

СЗМ

0-292

# ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА

1956-1986

3M  
292





# ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

---

НАРОДНАЯ  
РЕСПУБЛИКА  
БОЛГАРИЯ

ВЕНГЕРСКАЯ  
НАРОДНАЯ  
РЕСПУБЛИКА

СОЦИАЛИСТИЧЕСКАЯ  
РЕСПУБЛИКА  
ВЬЕТНАМ

ГЕРМАНСКАЯ  
ДЕМОКРАТИЧЕСКАЯ  
РЕСПУБЛИКА

КОРЕЙСКАЯ  
НАРОДНО-  
ДЕМОКРАТИЧЕСКАЯ  
РЕСПУБЛИКА

РЕСПУБЛИКА  
КУБА

МОНГОЛЬСКАЯ  
НАРОДНАЯ  
РЕСПУБЛИКА

ПОЛЬСКАЯ  
НАРОДНАЯ  
РЕСПУБЛИКА

СОЦИАЛИСТИЧЕСКАЯ  
РЕСПУБЛИКА  
РУМЫНИЯ

СОЮЗ  
СОВЕТСКИХ  
СОЦИАЛИСТИЧЕСКИХ  
РЕСПУБЛИК

ЧЕХОСЛОВАЦКАЯ  
СОЦИАЛИСТИЧЕСКАЯ  
РЕСПУБЛИКА

СЗМ  
0-292

© Объединенный институт ядерных исследований Дубна, 1986.

*Составители:*  
*А.Н.Сисакян*  
*В.А.Бирюков*  
*В.Г.Сандуковский*

*Под общей редакцией академика Н.Н.Боголюбова*

# 30 лет Объединенному институту ядерных исследований

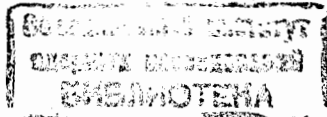
*Н.Н.БОГОЛЮБОВ, академик, директор ОИЯИ*

*А.СЭНДУЛЕСКУ, профессор, вице-директор ОИЯИ*

*Э.ЭНТРАЛЬГО, профессор, вице-директор ОИЯИ*

26 марта 1956 года отмечается как официальная дата организации нашего Института. 30 лет тому назад в Москве Полномочные Представители правительств социалистических стран подписали Соглашение о создании первого международного научного центра этих стран — Объединенного института ядерных исследований. Главной целью этого акта являлось объединение усилий социалистических государств для совместного выполнения фундаментальных исследований в области ядерной физики и изыскание новых возможностей использования атомной энергии в мирных целях на благо всего человечества.

Необходимость создания Института определялась рядом крупных событий пятидесятых годов, началом практического использования ядерной энергии в мирных целях. В 1954 году в СССР была введена в эксплуатацию первая в мире атомная электростанция, в 1955 году состоялась первая крупная международная конференция, посвященная проблемам мирного использования атомной энергии. Во многих странах начали создавать центры ядерных исследований, и Советский Союз взял на себя поставки исследовательских реакторов и ускорителей для оснащения национальных центров социалистических стран. Развитие физических исследований привело к необходимости создания крупных физических установок, которые приобретали промышленные размеры; их сложность и стоимость быстро росли, для обработки все возрастающего объема экспериментальной информации требовались большие научные коллективы. Следует отметить, что Советский Союз располагал тогда кадрами специалистов, а также техническим и промышленным потенциалом, позволявшими вести исследования в области ядерной физики на высоком уровне, и накопленный здесь опыт был необходим



другим странам социалистического содружества, начавшим работы в этой области. Все это привело к решению об организации ОИЯИ.

Правительство СССР, выступившее инициатором создания Института, передало в его ведение две научно-исследовательские организации Академии наук СССР, расположенные в подмосковном городе Дубне. В одной из них действовал крупный ускоритель протонов — шестиметровый синхроциклотрон на энергию 680 МэВ, а в другой заканчивалось строительство крупнейшего тогда ускорителя — синхрофазотрона на энергию протонов 10 ГэВ. Это дало возможность ученым нового Института сразу же начать многие актуальные исследования. Одновременно началась организация еще трех лабораторий, а несколько позднее была создана шестая.

Институт с момента его образования пользовался полным содействием Советского Союза. С помощью советских проектных организаций и промышленных предприятий в Дубне были построены мощные циклотроны для ускорения тяжелых ионов, созданы уникальные импульсные реакторы. Они обеспечили возможность проведения широко круга фундаментальных ядерно-физических исследований.

За 30 лет своей деятельности Институт вырос в крупнейший международный научный центр, известный во всем мире. Здесь сформировался высококвалифицированный интернациональный коллектив ученых и специалистов, создана крупная экспериментальная аппаратура и мощный измерительно-вычислительный комплекс, построены лабораторные здания, вокруг Института вырос большой город. Сегодня семитысячный коллектив Объединенного института составляют граждане одиннадцати стран-участниц: Народной Республики Болгарии, Венгерской Народной Республики, Социалистической Республики Вьетнам, Германской Демократической Республики, Корейской Народно-Демократической Республики, Республики Куба, Монгольской Народной Республики, Польской Народной Республики, Социалистической Республики Румынии, Союза Советских Социалистических Республик, Чехословацкой Социалистической Республики. Ученые Института внесли большой вклад в современную ядерно-физическую науку, они явились инициаторами новых научных направлений, разработали новые методы исследований и открыли новые физические явления, создали и укрепили научный авторитет ОИЯИ.

Одновременно с организацией Объединенного института ядерных исследований здесь начал формироваться коллектив физиков-теоретиков. В настоящее время Институт стал одним из крупнейших успешно работающих центров исследований в области теоретической физики. Учеными Института высказаны и развиты основополагающие идеи в области квантовой теории поля, физики элементарных частиц и атомного ядра, статистической механики.

Развит новый подход к построению квантовой теории поля, основанный на общих физических принципах релятивистской инвариант-

ности, спектральности, унитарности и причинности. Особую роль при этом сыграла разработка микроскопической формулировки принципа причинности. Создание метода ренормализационной группы и последовательной схемы устранения расходимостей проложило дорогу многим современным достижениям в теории калибровочных полей.

Построение аксиоматического подхода к квантовой теории поля позволило обосновать дисперсионные соотношения и тем самым открыло новый этап в развитии теоретической физики. Предложенные идеи и новые понятия прочно вошли в арсенал ученых: они лежат в основе получивших широкое признание исследований неупругих и автомодельных процессов, работ по дисперсионным правилам сумм и многих других подходов в физике сильных взаимодействий.

В работах по динамическим кварковым моделям элементарных частиц получили объяснение статические свойства адронов. Введение нового квантового числа кварков, впоследствии названного цветом, позволило разрешить принципиальную проблему статистики кварков и привело в результате к построению калибровочной теории сильных взаимодействий — квантовой хромодинамики. Дубненская модель "кваркового мешка" породила идеи, перекликающиеся с современными представлениями о "плении" кварков внутри адронов.

В результате исследований в области статистической механики получен целый ряд результатов, имеющих фундаментальное значение. Так, построение микроскопической теории сверхпроводимости не только позволило понять физические механизмы, приводящие к этому важному физическому явлению, но и оказало заметное влияние на развитие современной теории ядра и микроскопических моделей квантовой теории поля. Формулировка концепции квазисредних создала фундамент современной теории фазовых переходов — спонтанных нарушений симметрии и стимулировала развитие алгебраического подхода в задачах статистической механики и квантовой теории поля. Установленная в связи с формулировкой концепции квазисредних теорема "Об особенностях типа  $1/q^2$ " позволила исследовать вопрос об упорядочении в системах различной размерности и получила дальнейшее развитие в квантовой теории поля в связи с изучением механизмов Голдстоуна и Хиггса и построением теории электрослабых взаимодействий. Дальнейший прогресс в этой области связывается с надеждами на построение объединенной теории всех фундаментальных взаимодействий элементарных частиц.

Метод двухвременных температурных функций Грина вот уже четверть века является одним из важнейших методов в теории конденсированного состояния. Математически строгое исследование модельных задач статистической механики позволило получить ряд тонких мажорационных оценок для термодинамических величин и установить новые вариационные неравенства, что привело к формулировке важного в прикладном отношении метода аппроксимирующих гамильто-



нианов. Изучение стохастических процессов в динамических системах, взаимодействующих с термостатом, и разработка методов построения точных иерархий кинетических уравнений для таких систем позволили исследовать проблему полярона, а также ряд проблем, связанных с генерацией когерентного электромагнитного излучения и его взаимодействием со средой.

Учеными Института сформулирована микроскопическая теория атомного ядра. В ее основу положены математические методы, развитые при построении теории сверхтекучести, сверхпроводимости и ферми-жидкости. В рамках микроскопической теории разрешен ряд проблем, недоступных феноменологической теории ядра, в том числе узловые вопросы строения сферических и деформированных ядер. Построена теория квазичастичных, вибрационных и ротационных состояний деформированных ядер. Сформулирована квазичастично-фононная модель ядра, с помощью которой дано описание фрагментации одночастичных состояний, характеристик нейтронных и гигантских резонансов. Широкую популярность приобрел в последние годы разработанный в ОИЯИ микроскопический вариант модели взаимодействующих бозонов. На основе концепции квазисредних дана трактовка ядерного ротационного движения и спаривания. Большое влияние на экспериментальные исследования оказали работы по вычислению равновесной формы ядер, предсказанию новых областей деформированных ядер и изменению формы высокоспиновых состояний. На основе теории сверхасимметричного деления предсказаны новые виды распада ядер, промежуточные между  $\alpha$ -распадом и делением.

Представление о примесях многокварковых конфигураций в ядрах позволило успешно описать полученные в ОИЯИ экспериментальные данные по сечениям адрон-ядерных процессов в кумулятивной области.

Экспериментальные исследования в области физики высоких энергий — одно из главных направлений работ в Институте. Его основу составляет изучение структуры элементарных частиц и свойств их взаимодействия, динамики множественного рождения частиц и их резонансных состояний, а также проблем релятивистской ядерной физики. Тематика этих исследований определялась необходимостью получения информации для решения основных проблем теории фундаментальных взаимодействий. Созданная в Институте оригинальная экспериментальная аппаратура, в том числе крупные современные установки, дала возможность вести опыты не только на синхрофазотроне в Дубне, но и на ускорителях других научных центров: Института физики высоких энергий (Протвино, СССР), Европейского центра ядерных исследований (ЦЕРН, Швейцария) и Национальной ускорительной лаборатории им.Э.Ферми (Батавия, США).

В своих исследованиях, проведенных в широкой области энергий, ученые Института обнаружили новые свойства реакций упругого рас-

сеяния частиц, позволившие проверить ряд фундаментальных представлений современной физики. В работах по изучению образования странных частиц открыта новая частица — антисигма-минус-гиперон. Экспериментально обнаружено новое физическое явление — прямой переход фотона в векторный мезон, что подтвердило одну из важных теоретических моделей — векторную доминантность. При изучении прохождения заряженных частиц через монокристаллы открыто явление каналирования частиц в деформированных кристаллах.

В экспериментах на серпуховском ускорителе доказано существование ядер антитрития, изучены свойства  $K^0$ -мезонов, процессы рождения и распада резонансов с участием странных частиц. Интересные результаты получены при исследовании поляризационных явлений в рассеянии мезонов и протонов, впервые наблюдались ультрарелятивистские позитронии. Многие работы связаны с изучением кварковой структуры частиц, поиском новых короткоживущих частиц с квантовым числом "шарм".

Осуществив на синхрофазотроне ОИЯИ ускорение легких ядер, физики начали исследования в новом научном направлении — релятивистской ядерной физике. Обнаружено и исследовано новое физическое явление — кумулятивное рождение частиц, предложена и исследована новая универсальная характеристика атомного ядра — кварк-партоновая структурная функция, получены доказательства существования в ядрах мультикварковых состояний. Предложен количественный критерий границы применимости протон-нейтронной модели ядра.

Первые исследования в области физики элементарных частиц начались на старейшем ускорителе Дубны — синхроциклотроне — при энергиях протонов до 680 МэВ, теперь эти энергии называют средними. На синхроциклотроне было изучено упругое рассеяние неполяризованных и поляризованных нуклонов, а также процессы рождения  $\pi$ -мезонов. Это позволило проверить справедливость основных законов симметрии ядерных сил в сильных взаимодействиях: зарядовую симметрию и зарядовую независимость, Т-инвариантность. При исследовании взаимодействия нуклонов и мезонов открыты явления резонансного поглощения мюонов, двойной перезарядки пионов, обнаружено более 100 новых изотопов.

В области слабых взаимодействий открыт  $\beta$ -распад  $\pi$ -мезона, выполнены прецизионные измерения времени жизни  $\mu$ -мезона, позволившие значительно увеличить точность определения константы слабых взаимодействий. Исследования редких процессов подтвердили справедливость основных положений теории универсального слабого взаимодействия. Ученые Института обосновали возможность существования двух типов нейтрино — мюонного и электронного — и предложили эксперимент по обнаружению мюонного нейтрино.

В работах на синхроциклотроне родилось новое научное направление — мезохимия — исследование электронной структуры вещества

с помощью мезонных пучков. Большой цикл исследований был посвящен изучению  $\mu$ -мезонных процессов и мюонного катализа реакций синтеза двух ядер дейтерия или ядер дейтерия и трития.

Мощные ускорители многозарядных ионов, построенные в Дубне, обеспечивают получение интенсивных пучков в широком диапазоне масс и энергий. Это позволило ученым Института развернуть исследования в одном из быстро развивающихся направлений современной ядерной науки — физике тяжелых ионов. Большие успехи достигнуты в работах по синтезу новых элементов и изучению их свойств. В ОИЯИ впервые синтезированы новые химические элементы с атомными номерами от 102-го до 108-го, изучены физические и химические свойства многих изотопов этих элементов. В ряде реакций синтеза использован новый вид слияния сложных ядер — "холодное" слияние.

В ходе этих работ были открыты новые виды радиоактивного распада ядер. Один из них — спонтанное, с аномально коротким периодом деления ядер трансурановых элементов, находящихся в изомерном состоянии, которое отличается от основного большой деформацией ядра. Другой — запаздывающее деление ядер из возбужденных состояний, образующихся после  $\beta$ -распада, — испытывают нейтроноизбыточные и нейтронодефицитные изотопы трансурановых элементов. Экспериментально обнаружен спонтанный распад тяжелых ядер с испусканием ядер неона, это подтвердило предсказанное ранее существование нового типа радиоактивности — эмиссии тяжелых кластеров.

Результаты исследования закономерностей спонтанного деления и  $\alpha$ -распада тяжелых трансфермиевых элементов стимулировали развитие нового направления экспериментов по синтезу на ускорителях и поиску в природе сверхтяжелых элементов с атомными номерами 110-116. Природными образцами в этих работах служат различные минералы и руды, железомарганцевые конкреции, геотермальные воды, осколки метеоритов.

В течение многих лет в опытах на ускорителях исследуется механизм взаимодействия сложных ядер. Изучение многонуклонных передач в ядерных реакциях привело к открытию нового класса реакций между сложными ядрами — класса глубоконеупругих передач. В таких реакциях синтезировано около тридцати новых изотопов легких элементов с очень большим избытком нейтронов. Исследован новый вид ядерных реакций — "холодная" передача нуклонов.

Уникальные импульсные, периодического действия, реакторы на быстрых нейтронах, построенные в Дубне, послужили базой для проведения широкого круга исследований в области физики элементарных частиц, атомного ядра и конденсированных сред. В работах по нейтронной спектроскопии ядер получены подробные данные о свойствах индивидуальных ядерных уровней, особенно об их спиновых и радиационных ширинах, имеющие большое научное и прикладное значение.

ние. Для делящихся ядер измерены ядерные константы, используемые в реакторостроении.

Благодаря использованию разработанного в ОИЯИ оригинального метода получения поляризованных пучков резонансных нейтронов, а также поляризованных ядерных мишеней были широко развернуты исследования поляризационных эффектов в реакциях с нейтронами. Так, в поляризованных пучках прямым методом измерены спины компаунд-уровней ядер, исследовано нарушение пространственной четности в нейтронных резонансах и др.

Одно из новых направлений — исследование сверхтонких взаимодействий в атомах, содержащих ядра в высоковозбужденных состояниях. Здесь получены интересные новые данные о нейтронных резонансах, в том числе их магнитных моментах, об изменении радиусов ядер при их возбуждении. В течение многих лет успешно ведутся эксперименты по изучению редких процессов  $\alpha$ -распада компаунд-состояний различных ядер и радиационного захвата нейтронов ядрами.

Ученые Института впервые осуществили опыты по получению и хранению ультрахолодных нейтронов в закрытых сосудах в течение многих сотен секунд. Эти результаты важны для изучения фундаментальных свойств нейтронов, а также для применения их в нейтронной оптике, физике твердого тела и физике элементарных частиц. Важное значение для квантовой теории имеют экспериментальные результаты исследования с помощью тепловых нейтронов явления бозе-конденсации в сверхтекучем гелии.

Импульсные реакторы ОИЯИ оказались весьма эффективным инструментом для исследования конденсированных сред, в том числе сложных соединений и биологических объектов. Нейтроноструктурный анализ с использованием развитых в Институте методов позволил получить ценные данные, новые по сравнению с классическим рентгеноструктурным исследованием. Один из интересных результатов этих работ — построение пространственной модели иммуноглобулина.

Ведущиеся в Институте ядерно-физические исследования потребовали использования высокопроизводительной вычислительной техники и различных автоматизированных систем обработки экспериментальной информации. Для этих целей в ОИЯИ создан мощный измерительно-вычислительный комплекс, который насчитывает более 70 электронно-вычислительных машин различных классов и типов. Его основу составляют базовые ЭВМ ЕС-1060, CDC-6500 и БЭСМ-6, предназначенные для выполнения сложных расчетов и обработки большого объема информации, получаемой в опытах на ускорителях и реакторе. Эти базовые ЭВМ связаны с измерительными центрами лабораторий Института, действующими на основе машин среднего класса, и могут использоваться для обработки данных, в том числе в реальном времени проведения эксперимента. Малые вычислительные машины используются в системах управления работой крупных физических установок,

сканирующих устройств, в системах накопления и предварительной обработки экспериментальной информации, а также в системах доступа к машинам более высокого уровня.

Вычислительный комплекс оснащен памятью большого объема на магнитных дисках, сетью терминалов, удаленных станций ввода-вывода информации на рабочих местах физиков. Успешному функционированию комплекса способствует развитая система математического обеспечения, разработанная специалистами ОИЯИ. Созданы единая для базовых ЭВМ библиотека программ общего назначения, системы программ для обработки экспериментальных данных, в том числе для обеспечения экспериментов, проводимых на крупных электронных установках.

Большое внимание в Институте уделяется также развитию математических методов решения физических задач. Здесь разработаны численные методы и созданы системы программ для решения задач в области ускорительной техники, физики плазмы, планирования эксперимента, статистического моделирования сложных физических процессов, теории ядра, теории элементарных частиц и др.

Созданный в Институте центр для массовой обработки снимков с трековых детекторов оснащен автоматическими и автоматизированными измерительными системами, работающими на линии с ЭВМ. Сюда входят просмотровые столы и измерительные микроскопы, сканирующие автоматы НРД и "Спиральный измеритель", измерительные системы на базе электронно-лучевой трубки. Для обработки получаемых данных созданы сложные системы программ.

Базу для экспериментальных исследований в ОИЯИ составляют ускорители заряженных частиц и исследовательские импульсные реакторы. Поэтому естественно то большое внимание, которое уделяется в Институте созданию новых систем и усовершенствованию имеющихся установок. Так, в процессе эксплуатации синхрофазотрона непрерывно проводилось совершенствование его узлов, создавались новые инжекционные системы для расширения экспериментальных возможностей. На синхрофазотроне осуществлено ускорение ядер тяжелее водорода, и он стал первым релятивистским ускорителем ядер. В последние годы успешно ведутся разработки модельного сверхпроводящего синхротрона для приобретения опыта в сооружении и эксплуатации сверхпроводящих ускорителей.

В Институте выполнен широкий цикл теоретических и экспериментальных исследований новых типов сильноточных ускорителей, сооружен исследовательский электронный кольцевой циклотрон с жесткой фокусировкой. Синхроциклотрон ОИЯИ реконструирован в сильноточный фазотрон, что открывает новые экспериментальные возможности для физиков.

Широкое развитие в Институте получила техника ускорения тяжелых ионов. Здесь созданы циклотроны для ускорения многозаряд-

ных ионов, отличающиеся высокой интенсивностью пучков и широким диапазоном ускоряемых ионов: вслед за классическим циклотроном У-300 был создан двухметровый-изохронный циклотрон У-200, который послужил моделью для построенного позднее мощного циклотрона У-400.

Учеными Института был предложен принципиально новый метод ускорения, названный коллективным методом. Эксперименты подтвердили возможность создания коллективного ускорителя и перспективность этого направления. Ведется сооружение коллективного ускорителя тяжелых ионов.

С первых лет существования ОИЯИ начались работы по созданию исследовательских импульсных реакторов на быстрых нейтронах. Сначала был построен реактор ИБР, дополненный затем инжектором — линейным ускорителем электронов, его сменил более мощный реактор ИБР-30. В настоящее время ученые ведут исследования на созданном в Дубне мощном реакторе ИБР-2.

Успех многих экспериментов обусловлен своевременной разработкой оригинальных методов и созданием эффективной аппаратуры. В Институте разработан новый тип ядерных мишеней — сверхзвуковая струя газообразного вещества (водорода, дейтерия, гелия), проходящая через вакуумную камеру ускорителя. Большой объем экспериментальной информации получен на крупных пузырьковых камерах: жидководородных, пропановых, ксеноновой, помещенных в магнитное поле, а также на стримерных камерах. Для опытов на ускорителях ОИЯИ и других центров созданы большие магнитные спектрометры, в которых используются искровые, пропорциональные и дрейфовые камеры, сцинтилляционные годоскопы, сложные электронные схемы; аппаратура работает на линии с ЭВМ.

Широкое развитие получила в Институте криогенная техника. Созданы высокопроизводительные установки для ожижения газов, мишени с жидкими водородом, дейтерием и гелием размером до 3 м, упомянутые струйные мишени, криогенные системы пузырьковых камер. Для получения сверхнизких температур разработаны оригинальные установки с высокой холодопроизводительностью на основе растворения гелия-3 в гелии-4. На их базе созданы поляризованные водородные и ядерные мишени.

Исследования в области ядерной спектроскопии ведутся с помощью современных  $\alpha$ -,  $\beta$ - и  $\gamma$ -спектрометров; радиохимическая "полугорячая" лаборатория позволяет обрабатывать высокоактивные образцы. Для многих опытов, в особенности с тяжелыми ионами, разработаны экспрессные методы выделения короткоживущих продуктов ядерных реакций, электромагнитные масс-сепараторы и масс-анализаторы.

В экспериментах на пучках импульсного реактора используются различные типы спектрометров: с механическим прерывателем, обрат-

ной геометрии, двухосевой. Всевозрастающее внимание уделяется разработке стандартной регистрирующей и управляющей электронной аппаратуры, а также развитию измерительных центров лабораторий ОИЯИ. Центры оснащаются аппаратурой для накопления и анализа экспериментальной информации, системами электронных вычислительных машин.

Основная задача ученых нашего Института — проведение фундаментальных исследований в области ядерной физики. Однако развитие ускорительной техники, методов детектирования частиц и электронной техники нередко дает возможность эффективно решать важные задачи в области медицины, биологии, геологии, различные технические проблемы. Так, на специально сформированных пучках протонов и  $\pi$ -мезонов на синхротроне сотрудники Онкологического научного центра АМН СССР совместно с физиками ОИЯИ ведут работы, связанные с лечением злокачественных опухолей у человека. В Институте разработана методика получения радиоактивных изотопов, отличающихся хорошими характеристиками и высокой радиоизотопной чистотой.

Применяемые физиками методы регистрации тяжелых заряженных частиц с помощью полимерных пленок нашли эффективный выход в промышленную практику: путем облучения пленок ускоренными тяжелыми ионами получают ядерные фильтры, которые имеют ценные качества и могут быть использованы для очистки жидкостей и газов, стерилизации продуктов, очистки медицинских препаратов и др. Разработаны методы радиоизотопного и рентгенофлуоресцентного анализа с использованием различных источников радиоактивного излучения, применяемые в геологии, медицине, биологии и др.

С помощью импульсных пучков нейтронов от реакторов ОИЯИ исследуют макроскопическую структуру объектов, в том числе биологических макромолекул. Разработан метод изучения тонкой анатомической структуры объекта с помощью ускоренных на синхрофазотроне пучков  $\alpha$ -частиц и ионов гелия — ионная радиография. Один из детекторов — многопроволочная пропорциональная камера — эффективно используется в молекулярной биологии для обработки тонкослойных радиохроматограмм разрушающим методом.

Результаты 30-летней научно-исследовательской деятельности коллектива Института получили заслуженно высокую оценку мировой научной общественности. 29 работ ученых ОИЯИ зарегистрированы как открытия, сотрудниками Института сделано около 1000 изобретений. Около 170 монографий, посвященных актуальным проблемам современной физики, написали ученые Института, ежегодно публикуется более 1500 научных статей, препринтов, докладов на конференциях с результатами работ, выполненных в ОИЯИ. Многие научные достижения Института удостоены национальных премий стран-участниц, премий и медалей академий наук и других наград.

Вся деятельность Объединенного института строится на основе широкого и разностороннего международного сотрудничества с научно-исследовательскими центрами, университетами и другими организациями многих стран, а также международными организациями. Главное направление в этом сотрудничестве — совместные научные работы ученых ОИЯИ и их коллег из стран-участниц, которые в настоящее время ведутся практически по всей тематике Института, в них участвует около 200 организаций стран-участниц. На основе кооперирования проводятся теоретические и экспериментальные исследования, создается физическая и электронная аппаратура, организуются международные конференции, совещания и школы. Некоторой характеристикой масштабов этого сотрудничества могут служить поездки ученых в связи с проведением совместных работ: ежегодно в Дубну из стран-участниц приезжает около 1500 специалистов, около 500 человек выезжает из ОИЯИ в национальные центры.

Успехи Института в большой степени обусловлены его сотрудничеством со многими научными центрами Советского Союза. Соглашение между ОИЯИ и Государственным комитетом по использованию атомной энергии СССР открыло перед учеными Института большие возможности для проведения исследований на крупнейшем советском ускорителе в Институте физики высоких энергий (Протвино).

Современные физические установки ОИЯИ, работающие на пучках ускорителей в Дубне и Протвино, являются источниками огромного объема экспериментальной информации, в обработке которой участвуют вместе с учеными Института специалисты национальных центров стран-участниц. Таким образом ускоряется получение результатов экспериментов, с другой стороны, ученые из стран, где нет крупных ускорителей, имеют возможность участвовать в важных физических исследованиях, привлекать к работе сотрудников университетов, обучать студентов.

Деятельность Института оказала большое влияние на развитие фундаментальных исследований в области ядерной физики в странах-участницах. Возникли новые ядерно-физические центры, институты, лаборатории, они оснащаются крупными физическими установками. Ими руководят или в них работают ученые, получившие опыт работы в Объединенном институте. Это, в свою очередь, расширяет и углубляет научные и технические связи ОИЯИ с национальными организациями стран-участниц.

Объединенный институт ядерных исследований поддерживает широкие научные связи с международными организациями и физическими центрами стран, не являющихся членами ОИЯИ. На протяжении многих лет ведется научное сотрудничество Объединенного института



с Европейским центром ядерных исследований в Женеве, Международным теоретическим центром в Триесте, Институтом им.Н.Бора в Копенгагене, итальянскими национальными центрами. Успешно сотрудничают физики Дубны с учеными физических институтов Цюриха, Страсбурга, Сакле, Орсе, Гренобля, а также ряда научных центров Англии, ФРГ, Финляндии, Югославии. Ученые ОИЯИ приняли участие в экспериментах на крупнейшем ускорителе протонов в Национальной ускорительной лаборатории США им.Э.Ферми. В Объединенном институте установлены стипендии для ученых из государств, не являющихся членами ОИЯИ. В качестве стипендиатов здесь работали физики из институтов МАГАТЭ и ЮНЕСКО, а также ряда стран Европы, Азии и Африки.

Для успешного развития современной физической науки большое значение имеет широкий обмен информацией о результатах научных исследований. Работы сотрудников Института публикуются в научных журналах и многих других изданиях различных стран мира. Ученые более 50 стран получают оперативную информацию о деятельности ОИЯИ и направляют в Дубну свои сообщения. Объединенный институт является организатором многих международных совещаний ученых и специалистов. Ежегодно проводится несколько крупных конференций, симпозиумов и школ-семинаров, а также около 40 научно-методических и организационных совещаний.

Объединенный институт по праву заслужил авторитет школы высшей квалификации для ученых и специалистов из стран-участниц. Научные коллективы в Институте возглавляют известные ученые, в настоящее время в ОИЯИ работают 5 академиков и 6 членов-корреспондентов академий наук, около 170 докторов и 550 кандидатов наук. В Дубне созданы хорошие условия для творческого роста ученых: передовой современный уровень проводимых исследований и возможность использования уникальной техники, работа вместе с высококвалифицированными специалистами и научный демократизм, творческая атмосфера поиска. Несколько тысяч ученых и инженеров из многих институтов стран-участниц прошли школу ОИЯИ, многие из них возглавили большие исследовательские коллективы и научные направления.

На протяжении 30 лет деятельность Объединенного института неизменно привлекает внимание международной общественности. Институт посетили выдающиеся ученые многих стран, крупные общественные и политические деятели, дипломаты и представители всех средств массовой информации. Об Институте и его ученых ежегодно публикуются десятки статей в газетах и журналах разных стран.

Объединенный институт награжден Юбилейным почетным знаком ЦК КПСС, Совета Министров СССР, Верховного Совета СССР и ВЦСПС в честь 50-летия образования СССР. За успехи, достигнутые в фундаментальных и прикладных исследованиях в области физики элементарных частиц и ядерной физики, большой вклад в подготовку высококвали-

фицированных научных кадров и развитие научно-технического сотрудничества социалистических стран правительство СССР наградило ОИЯИ орденом Дружбы народов. Правительство Социалистической Республики Вьетнам наградило Институт орденом Дружбы.

30-летняя деятельность ОИЯИ явилась примером успешной интеграции творческих сил и материальных ресурсов социалистических стран в одной из важнейших областей современной науки. Большой опыт разносторонних международных связей и научного сотрудничества позволяет Институту успешно выполнять роль координирующего центра во многих исследованиях, проводимых странами-участницами ОИЯИ. Эта функция Института приобретает особенно важное значение в связи с предстоящей разработкой Комплексной программы научно-технического прогресса стран-членов СЭВ на 15-20 лет, которая должна помочь быстрейшему решению совместными усилиями важнейших вопросов в области науки и техники. На состоявшемся в июне 1984 года в Москве Экономическом совещании стран-членов СЭВ на высшем уровне отмечена особая актуальность всемерного ускорения научно-технического прогресса и предложено разработать Комплексную программу как базу для выработки согласованной, а в некоторых областях и единой научно-технической политики.

В заключение отметим, что Объединенный институт приступил к реализации своего седьмого пятилетнего плана развития. Этот план учитывает основные современные тенденции в теоретической и экспериментальной физике и предусматривает проведение широкого круга исследований в области физики элементарных частиц, атомного ядра и конденсированных сред. Дальнейшее развитие получают техника ускорителей и импульсных реакторов, методика физического эксперимента и обработки экспериментальной информации, вычислительная техника, а также применение ядерно-физических методов для прикладных работ, вырастет собственная производственная база для изготовления механического и электронного оборудования.



Москва, март 1956 года. Совещание представителей правительств социалистических государств, на котором принято решение об учреждении Объединенного института ядерных исследований. Выступает главный ученый секретарь Президиума АН СССР академик А.В.Топчиев.

Первая дирекция ОИЯИ – директор Института профессор Д.И.Блохинцев (в центре), вице-директора профессор М.Даньш (ПНР) и профессор В.Вотруба (ЧССР).





1976 год. Объединенный институт ядерных исследований награжден орденом Дружбы народов. От имени Президиума Верховного Совета СССР президент Академии наук СССР академик А.П.Александров вручает награду дирекции ОИЯИ.

Дирекция Института избирается Комитетом Полномочных Представителей правительств стран-участниц и ответственна перед ним за текущую деятельность ОИЯИ. В 1983 году директором Института вновь избран академик Н.Н.Боголюбов, вице-директорами – профессор А.Сэндулеску (СРР) и профессор Э.Энтральго (Республика Куба).



Дубна, 26 марта 1981 года.  
Торжественное собрание, посвященное 25-летию образования Объединенного института ядерных исследований. В президиуме собрания — главы дипломатических представительств и Полномочные Представители правительств стран-участниц ОИЯИ, представители министерств и ведомств по атомной энергии, видные ученые государств-членов Института.



1956



УЧУБНИК  
ИСТОРИИ  
СССР

1981





Дубна, 1970 год. Соглашение о научно-техническом сотрудничестве между ОИЯИ и Государственным комитетом по использованию атомной энергии СССР подписали председатель ГКАЭ А.М.Петросьянц и директор ОИЯИ академик Н.Н.Боголюбов.

Дубна, март 1984 года. Заседание Комитета Полномочных Представителей правительств стран-участниц ОИЯИ.



1981 год. За выдающийся вклад в создание и развитие ядерной физики во Вьетнаме Институт награжден вьетнамским орденом Дружбы. Награду вручает Чрезвычайный и Полномочный Посол Социалистической Республики Вьетнам Нгуен Хыу Май.



Известные советские ученые и специалисты возглавили в ОИЯИ важные направления деятельности. Во время заседания Комитета Полномочных Представителей в 1984 году (слева направо в первом ряду): директор ЛЯР академик Г.Н.Флеров, директор ЛЯП член-корреспондент АН СССР В.П.Джелепов, директор ЛВЭ академик А.М.Балдин, директор ЛНФ академик И.М.Франк, директор ЛВТА член-корреспондент АН СССР М.Г.Мещеряков.







Многолетнее научное сотрудничество связывает два международных научных центра — ОИЯИ и ЦЕРН. Совместные исследования являются предметом регулярных обсуждений. Директор ОИЯИ академик Н.Н.Боголюбов и генеральный директор ЦЕРНа профессор В.Енчке в Дубне в июне 1971 года.



Среди всемирно известных ученых, посетивших Дубну, был выдающийся французский физик и общественный деятель Фредерик Жолио-Кюри (третий справа).

Большую помощь и внимание Институту оказывал президент АН СССР М.В.Келдыш. Академик И.М.Франк знакомит академика М.В.Келдыша с исследованиями, проводимыми в Лаборатории нейтронной физики.



Выдающийся датский ученый Нильс Бор был гостем Объединенного института (на снимке в центре).



В организации Объединенного института, его становлении и развитии принимали участие многие выдающиеся ученые и организаторы науки социалистических стран. На снимке: академики Л.Инфельд (ПНР), Н.Н.Боголюбов и И.Е.Тамм.



Академик М.А.Марков, начальник управления ГКАЭ СССР А.А.Васильев, академик А.А.Логунов.



26152  
Директор ОИЯИ академик Н.Н.Боголюбов беседует с Полномочными Представителями Венгрии и Румынии академиками Л.Яноши и Х.Хулубеем.



Академики И.Я.Померанчук, С.Н.Вернов и В.И.Векслер.

НАУЧНОГО ЦЕНТРА  
ФИЗИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ  
БИБЛИОТЕКА

## ЧТО ТАКОЕ ОИЯИ?

### *ИСТОРИЯ СОЗДАНИЯ*

26 марта 1956 года делегации правительств социалистических стран собрались в Москве, чтобы обсудить предложение правительства Советского Союза о проведении совместных исследований в области ядерной физики. В этот день был подписан документ, вошедший в историю как Московское соглашение о создании Объединенного института ядерных исследований в Дубне. Правительства социалистических стран решили заключить Соглашение, "...придавая важное значение использованию атомной энергии в мирных целях на благо всего человечества и признавая необходимость сотрудничества ученых различных стран в теоретических и экспериментальных исследованиях в области ядерной физики с целью расширения возможностей использования атомной энергии в мирных целях". Соглашение положило начало практической деятельности первой международной научной организации социалистических стран.

Советский Союз безвозмездно передал новому научному центру два института Академии наук СССР: Институт ядерных проблем, в котором действовал один из самых крупных ускорителей — синхроциклонотрон на энергию протонов 680 МэВ, и Электрофизическую лабораторию, в которой завершалось строительство крупнейшего ускорителя — синхрофазотрона на энергию протонов 10 ГэВ, с первоклассным оборудованием и всеми вспомогательными зданиями и сооружениями. В этих организациях имелись сложившиеся большие коллективы квалифицированных ученых, инженеров, механиков, лаборантов и техников. Это избавило вновь созданный Институт от длительного периода организационных трудностей и позволило немедленно приступить к работе на уникальных ускорителях.

Соглашение устанавливало, что Институт содержится и развивается на средства стран-участниц в виде долевого взноса, исчисленного с учетом национального дохода и других факторов. Но размер долевого взноса не влияет на степень участия того или иного государства-члена в научной деятельности и управлении Институтом. Соглашение опреде-

лило порядок вступления и выхода государств из Объединенного института ядерных исследований.

Был установлен принцип выборности дирекции Института, ответственной перед правительствами государств-членов ОИЯИ за его текущую деятельность. На Московском совещании была единогласно избрана первая дирекция Объединенного института ядерных исследований: директор — известный советский ученый профессор Д.И.Блохинцев, вице-директора — профессор В.Вотруба (Чехословакия) и профессор М.Даньш (Польша). Дирекция получила первое поручение — подготовить проект Устава нового Института.

На первом совещании Комитета Полномочных Представителей государств-членов ОИЯИ 23 сентября 1956 года в Дубне были приняты Устав и Положение о персонале. Устав определил юридический статус Института как международной научно-исследовательской организации.

”Всею своей деятельностью Институт будет способствовать использованию ядерной энергии только для мирных целей на благо человечества”, — так определено основное направление деятельности ОИЯИ в Уставе (глава II, статья 4).

”Объединенный институт ядерных исследований имеет своей целью:

обеспечение совместного проведения теоретических и экспериментальных исследований в области ядерной физики учеными государств-членов Института;

содействие развитию ядерной физики в государствах-членах Института путем обмена опытом и достижениями в проведении теоретических и экспериментальных исследований;

поддержание связи с заинтересованными национальными и международными научно-исследовательскими и другими организациями в деле развития ядерной физики и изыскания новых возможностей мирного применения атомной энергии;

содействие всестороннему развитию творческих способностей научно-исследовательских кадров государств-членов Института”, — так гласит Устав (статья 4, глава II), определяя цели и задачи ОИЯИ.

История создания Института связана с именами крупнейших ученых и организаторов науки социалистических стран: А.П.Александрова, Д.И.Блохинцева, Н.Н.Боголюбова, В.И.Векслера, Л.Инфельда, И.В.Курчатова, А.Л.Минца, Г.Неводничанского, Е.П.Славского, И.Е.Тамма, Х.Хулубея, Л.Яноши.

В становлении и развитии ОИЯИ, формировании его основных научных направлений приняли непосредственное участие выдающиеся ученые стран-участниц Института: А.М.Балдин, В.П.Джелепов, Я.Кожешник, К.Ланиус, А.А.Логунов, М.А.Марков, М.Г.Мещеряков, Г.Наджаков, Л.Пал, А.М.Петросьянц, Б.М.Понтекорво, Н.Содном, И.Урсу, Г.Н.Флеров, И.М.Франк, Х.Христов, Ш.Цицейка, а также Н.Н.Говорун, И.Звара, Д.Киш, Ле Ван Тхием, Нгуен Ван Хьеу, А.Н.Тавхелидзе, А.Хрынкевич, Ф.Л.Шапиро, Д.В.Ширков.

## УПРАВЛЕНИЕ

Устав ОИЯИ определяет структуру органов управления Институтом с соблюдением основного принципа — принципа международнойности.

Высшим органом управления является *Комитет Полномочных Представителей* государств-членов Института, который собирается на свои совещания ежегодно. Совещание КПП правомочно рассматривать все основные вопросы существования Института: бюджет, план капитального строительства, перспективные, пятилетние и годовые научно-исследовательские планы Института, шкалу членских взносов, прием новых членов Института, избрание дирекции Института.

Для контроля финансовой деятельности Института утвержден *Финансовый комитет*, в котором каждая страна представлена одним членом. Первое заседание Финансового комитета проходило 26-27 сентября 1956 года.

Главным исполнительным органом ОИЯИ является *дирекция Института* — постоянно действующий орган управления. Дирекция избирается Комитетом Полномочных Представителей и ответственна перед ним за всю текущую деятельность Института: научную, финансовую, административно-хозяйственную и производственную. Директор Института и два вице-директора избираются сроком на три года. С января 1964 года директором Объединенного института является академик Н.Н.Боголюбов, крупнейший советский ученый. Вице-директорами ОИЯИ были многие известные ученые стран-участниц. В настоящее время эти посты занимают профессор А.Сэндулеску (Румыния) и профессор Э.Энтральго (Куба).

Вопросы научной деятельности ОИЯИ решает *Ученый совет*, сессии которого созываются два раза в год. На первой сессии Ученого совета ОИЯИ, состоявшейся 24-26 сентября 1956 года, были рассмотрены отчеты об исследованиях, проведенных учеными, вошедшими в новый Институт, и намечены перспективы его дальнейшего развития, планы будущих работ и научного сотрудничества с учеными различных стран. В соответствии с Уставом каждое государство-член Института направляет на сессию Ученого совета до трех своих представителей из числа ведущих специалистов. Согласно принятым Правилам процедуры Ученый совет утверждает планы научно-исследовательских работ Института, рассматривает результаты их выполнения, а также результаты отдельных исследований, присуждает премии Института за лучшие работы, выполненные в Дубне. В его компетенции находится также рассмотрение и утверждение планов международного научно-технического сотрудничества и планов совещаний, проводимых ОИЯИ, планов командирования специалистов ОИЯИ. Совет утверждает кандидатуры директоров лабораторий и их заместителей.

Ученый совет представляет свои рекомендации Комитету Полномочных Представителей по вопросам финансирования, строительства

новых объектов. Председателем Ученого совета является директор Института, заместителями председателя — вице-директора.

### КОНСУЛЬТАТИВНЫЕ ОРГАНЫ

Жизнь подсказала идею создания специальных консультативных органов при Ученом совете Института — *секций Совета* по физике высоких энергий, физике низких энергий и теоретической физике. Председателями секций являются вице-директора Института. Секции рассматривают перспективы развития основных научных направлений Института, научные планы лабораторий и планы международного сотрудничества в своей области, координируют и контролируют выполнение планов, представляют Ученому совету Института отчеты о деятельности секций.

При секциях созданы компетентные консультативные органы — *специализированные комитеты* по различным видам методики экспериментов; при секции по физике высоких энергий — фотоэмульсионный и камерный комитеты, комитет по электронным экспериментам; при секции по физике низких энергий — комитеты по структуре ядра, физике тяжелых ионов и нейтронной физике. Комитеты всесторонне рассматривают научные и методические вопросы в определенной области физики или вопросы, связанные с использованием определенной методики, проблемы координации исследований в лабораториях Института, а также обеспечения научного сотрудничества между лабораториями и научно-исследовательскими организациями стран-участниц. Члены комитетов и секций Ученого совета — крупные специалисты стран-участниц в области физики или техники.

Для комплексного рассмотрения научной, научно-организационной и научно-технической деятельности Института создан *Научно-технический совет* ОИЯИ. На его заседаниях обсуждаются планы научно-исследовательских и методических работ, в том числе перспективные и пятилетние, планы международного научно-технического сотрудничества, проекты новых установок и объектов строительства, распределение ассигнований по различным научным направлениям, выделение лучших работ на соискание национальных премий стран-участниц, вопросы повышения научно-технической и экономической эффективности научных исследований и другие вопросы. Совет призван содействовать проведению обоснованной единой научно-технической политики в Институте. Председателем НТС является директор Института, заместителями — вице-директора.

НТС ОИЯИ имеет свои отделения: по физике элементарных частиц и высоких энергий, физике атомного ядра и конденсированных сред, научно-организационным вопросам, а также секции в лабораториях. Председателями отделений НТС являются вице-директора ОИЯИ.



*Секции НТС в лабораториях* — консультативные органы дирекций, они осуществляют ежеквартальный контроль за эффективностью использования основных установок, рассматривают планы научно-исследовательских работ и отчеты об их выполнении, контролируют вопросы работы с соискателями и выдвигают лучшие работы на соискание премий ОИЯИ.

Квалификационные функции осуществляют *специализированные ученые советы*, на заседаниях которых проводится защита диссертаций. В лабораториях действуют также советы по присвоению ученых званий и выборам на должности научного персонала.

## ЛАБОРАТОРИИ

Институт состоит из шести научных лабораторий и нескольких общепринадлежностных отделов. В настоящее время в состав ОИЯИ входят:

Лаборатория теоретической физики, директор — академик Н.Н.Боголюбов,

Лаборатория высоких энергий, директор — академик А.М.Балдин,

Лаборатория ядерных проблем, директор — член-корреспондент АН СССР В.П.Джелепов,

Лаборатория ядерных реакций, директор — академик Г.Н.Флеров,

Лаборатория нейтронной физики, директор — академик И.М.Франк,

Лаборатория вычислительной техники и автоматизации, директор — член-корреспондент АН СССР М.Г.Мещеряков.

По своим масштабам, количеству научных сотрудников и оснащенности уникальным физическим оборудованием каждая из лабораторий сравнима с большим физическим институтом, а Объединенный институт является крупным научным комплексом. Лабораториям предоставлена самостоятельность в организации исследовательской работы.

Сейчас в лабораториях и производственных подразделениях работают более 7000 человек, из них более 1000 — научные сотрудники, около 2000 — инженерно-технический персонал. Среди ученых Института 5 академиков, 6 членов-корреспондентов академий наук, около 170 докторов и 550 кандидатов наук.

*Лаборатория теоретической физики* занимает важное место в деятельности ОИЯИ. Здесь сложилась большая школа физиков-теоретиков, известная всему научному миру. Теоретики Института изучают свойства симметрии элементарных частиц, структуру теории поля, взаимодействия элементарных частиц, а также проблемы теории атомного ядра и ядерных реакций, теории конденсированных состояний. Многие теории и модели, разработанные в лаборатории, легли в основу современного понимания микромира. В последние годы значительные

результаты получены в области теории электрослабых взаимодействий, квантовой хромодинамики и супергравитации. Ученые активно участвуют в планировании экспериментов на ускорителях Института и других научных центрах.

В *Лаборатории высоких энергий* основные экспериментальные работы выполняются на синхрофазотроне — самом крупном ускорителе Института. Они посвящены изучению структуры элементарных частиц и свойств их взаимодействия, резонансных состояний частиц и динамики их множественного рождения, свойств взаимодействия ядер высоких энергий с веществом.

В 1970 году на синхрофазотроне ОИЯИ было реализовано ускорение ядер тяжелее водорода до релятивистских скоростей, и это положило начало новому крупному научному направлению — релятивистской ядерной физике. В ЛВЭ впервые обнаружено и исследовано кумулятивное образование мезонов, протонов, ядер дейтерия и трития, получены доказательства существования в ядрах мультикварковых состояний.

На синхроциклотроне *Лаборатории ядерных проблем* на протяжении трех десятилетий научные исследования велись в следующих направлениях: изучение сильных взаимодействий пионов и нуклонов, электромагнитных процессов и слабых взаимодействий с участием пионов и мюонов, исследования в области ядерной спектроскопии нейтронодефицитных и сильнодеформированных ядер. Здесь родились новые научные направления, сделаны многие открытия, получены фундаментальные результаты, которые были внесены в учебники и справочники. Сейчас на базе синхроциклотрона создан сильноточный фазотрон. В 1984 году произведен его физический пуск, положивший начало новому этапу исследований.

Ученые Института ведут эксперименты с частицами высоких энергий не только в Дубне. Созданные ими физические установки действуют на пучках ускорителей других научных центров. Обширная программа исследований выполняется на ускорителе Института физики высоких энергий в Протвино.

Основные исследования *Лаборатории ядерных реакций* посвящены изучению свойств атомных ядер с помощью тяжелых ионов, пучки которых получают на мощных циклотронах У-200, У-300, У-400. Физика тяжелых ионов — новое научное направление, родившееся в Дубне. Здесь открыты новые виды радиоактивного распада ядер, синтезированы многие изотопы новых химических элементов с порядковыми номерами от 102-го до 108-го и около тридцати нейтронообогащенных изотопов легких элементов. Ведутся работы по синтезу на ускорителях и поиску в природе сверхтяжелых элементов.

В *Лаборатории нейтронной физики* построены импульсные реакторы на быстрых нейтронах — уникальные источники периодически повторяющихся очень коротких и мощных импульсов нейтронов, оснащенные затем инжекторами — ускорителями электронов. На реакторах ИБР и ИБР-30 выполнен большой цикл исследований свойств атомных ядер методами нейтронной спектроскопии, фундаментальных свойств нейтронов, атомной структуры и динамики твердых тел и жидкостей. В Дубне сооружен новый мощный импульсный реактор ИБР-2. В 1984 году он введен в эксплуатацию на средней мощности 2 МВт. На многих пучках реактора ведутся физические эксперименты.

Деятельность *Лаборатории вычислительной техники и автоматизации* связана с развитием и эффективным использованием вычислительного комплекса Института, автоматизацией физических исследований и обработки экспериментальных данных, а также с развитием математических методов решения физических задач.

Вычислительный комплекс насчитывает свыше 70 ЭВМ различного класса. Основой базового вычислительного центра являются ЭВМ ЕС-1060, БЭСМ-6 и CDC-6500, связанные с машинами измерительных центров лабораторий. Успешной работе комплекса способствуют созданные в ЛВТА большая библиотека программ математического обеспечения вычислительных машин, удаленные станции ввода-вывода информации и дисплейные системы. Наличие обширной информации, получаемой физиками с трековых камер, в том числе с больших пузырьковых камер, потребовало создания высокопроизводительных сканирующих устройств. Обработка камерных снимков ведется с помощью автоматов различных типов, а также системы полуавтоматов и просмотрных столов на линии с ЭВМ.

## НАУЧНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ОТДЕЛЫ

*Отдел новых методов ускорения.* В ОИЯИ предложен принципиально новый метод ускорения заряженных частиц (протонов, ионов) с помощью электронных колец, названный коллективным методом. Ученые ОНМУ разработали теоретические основы коллективного метода, выполнили большой цикл исследований, в которых экспериментально подтвердили возможность создания коллективного ускорителя. Созданы мощный линейный ускоритель электронов, несколько типов адгезаторов для формирования электронно-ионных колец, коммутаторы больших токов, аппаратура диагностики кольца и др. Сооружен прототип коллективного ускорителя тяжелых ионов, на котором проводятся экспериментальные исследования. Ведутся работы по созданию узлов коллективного ускорителя тяжелых ионов (КУТИ-20).

*Серпуховской научно-экспериментальный отдел (СНЭО)* организован для обеспечения экспериментов ученых ОИЯИ, проводимых на ускорителе Института физики высоких энергий в Протвино. Диапазон деятельности сотрудников отдела довольно широк: от помощи в монтаже установок до проведения научных исследований; они участвуют и в работе производственных подразделений, обеспечивают прием экспериментальной информации, ее запись на магнитные ленты и расчеты на ЭВМ, проводят криогенные и вакуумные работы, магнитные измерения, монтаж и обслуживание электрохозяйства, осуществляют инженерное обеспечение всех экспериментальных установок ОИЯИ на ускорителе в Протвино.

### **ОБЩЕИНСТИТУТСКИЕ НАУЧНЫЕ ОТДЕЛЫ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СЛУЖБЫ**

*Научный отдел главного ученого секретаря (НОГУС)* проводит научные исследования по перспективам развития ОИЯИ и оценке эффективности научно-исследовательских работ и международного научно-технического сотрудничества, осуществляет подготовку проектов перспективных и годовых планов научных исследований. Отдел занимается подготовкой и проведением сессий Ученого совета Института и его секций, научно-технического совета ОИЯИ.

НОГУС подготавливает к изданию ежегодный отчет о деятельности Института, организует пропаганду научных достижений и освещение деятельности ОИЯИ средствами массовой информации. Работающая в составе отдела фотолаборатория ОИЯИ ведет фотолетопись многолетней деятельности Института. Здесь создана большая фототека.

Институт принимает участие в работе Международной системы ядерной информации (ИНИС) Международного агентства по атомной энергии. Группа ИНИС, входящая в состав отдела, занимается подготовкой информации о публикациях ОИЯИ для ввода в систему и осуществляет по запросам ученых Института автоматизированный поиск информации, записанной на магнитные ленты ИНИС.

Основной задачей *Отдела радиационной безопасности и радиационных исследований (ОРБ и РИ)* является обеспечение радиационного контроля сотрудников ОИЯИ, работающих в радиационно-вредных условиях труда. Осуществляется как индивидуальный (около 2500 чел.), так и интегральный контроль. Индивидуальный дозиметрический контроль сотрудников Института показал, что в ОИЯИ нет превышения регламентированных величин доз. Для контроля за влиянием работы ядерно-физических установок ОИЯИ на внешнюю среду регулярно проводятся анализы степени радиоактивного загрязнения почвы, воды, воздуха. Проведенные исследования показали, что излучение

ядерно-физических установок ОИЯИ составляет пренебрежимо малую величину по сравнению с естественным природным уровнем радиации. Важным этапом в обеспечении радиационного контроля на ядерно-физических установках ОИЯИ явилось создание автоматизированных систем дозиметрического контроля, что позволило значительно поднять его качество.

*Издательский отдел* ежегодно выпускает в свет около 1000 сообщений и препринтов ОИЯИ, материалы Комитета Полномочных Представителей и Ученых советов Института, сборники трудов совещаний и конференций, организованных Институтом. Отдел направляет в редакции научных журналов, на конференции и симпозиумы статьи и доклады сотрудников Института, содержащие результаты теоретических, экспериментальных и методических работ, выполненных в соответствии с проблемно-тематическим планом ОИЯИ, а также рассылает во многие страны мира публикации Дубны. Ежедневно в издательском отделе выпускаются экспресс-бюллетени научно-технической библиотеки и патентного отдела, ежегодно издаются библиографические указатели работ сотрудников и отчеты о деятельности ОИЯИ. Кроме того, отделом выполняются заказы на ксерокопирование и переплетные работы.

Основной задачей *научно-технической библиотеки* (НТБ) является выдача литературы по заявкам сотрудников ОИЯИ, выполнение заказов читателей на получение книг по межбиблиотечному абонементу и комплектация фонда библиотеки книгами, препринтами, периодическими изданиями, в том числе на иностранных языках. Все поступающие в библиотеку издания обрабатываются и отражаются в центральном каталоге и каталогах филиалов библиотеки, ежедневно готовятся экспресс-бюллетени о новых поступлениях: "Книги", "Препринты", "Статьи", и обновляются выставки новых поступлений книг. Библиотека занимается также подготовкой тематических выставок литературы.

*Патентный отдел* осуществляет защиту приоритета сделанных в Институте открытий и изобретений, проводит мероприятия, способствующие обеспечению высокого технического уровня, патентной чистоты и патентоспособности разрабатываемой в Институте новой техники, обеспечивает Институт патентной информацией, осуществляет научно-методическое руководство изобретательской и патентно-лицензионной работой. Патентный отдел также контролирует использование изобретений и рационализаторских предложений, проводит работу по определению размера авторских вознаграждений.

На совещаниях экспертов-патентоведов стран-участниц ОИЯИ были выработаны и согласованы "Положение об открытиях, сделанных

в ОИЯИ” и ”Положение о правовой охране и использовании изобретений, созданных в ОИЯИ”. Для поощрения сотрудников Института были утверждены почетные звания ”Почетный изобретатель ОИЯИ” и ”Почетный рационализатор ОИЯИ”.

*Научно-технический отдел автоматизированных систем управления* (НТО АСУ) осуществляет разработку, внедрение и эксплуатацию задач АСУ. Разработка программного обеспечения ведется совместно с сектором математического обеспечения АСУ ЛВТА. Технической базой для решения задач АСУ являются ЭВМ центрального вычислительного комплекса Института. Отделом внедрен и эксплуатируется комплекс задач по учету кадров с использованием терминального метода ввода данных и получению справочной информации в отделе кадров. На базе программно-математического обеспечения подсистемы КАДРЫ решены информационно-поисковые задачи учета и анализа отдельных направлений основной деятельности Института: ”Учет международного научно-технического сотрудничества”, ”Учет изобретений ОИЯИ”. Ведутся работы по комплексной механизации бухгалтерского учета. Внедрены и эксплуатируются комплексы задач по бухгалтерскому учету материальных ценностей на складах ОИЯИ, расчету заработной платы для сотрудников Института, а также потребности Опытного производства ОИЯИ в материалах и комплектующих изделиях.

*Бюро стандартизации* обеспечивает подразделения ОИЯИ нормативно-технической документацией, занимается внедрением систем стандартов безопасности труда и других систем, ведет в Институте методическое руководство работами по стандартизации. Бюро внедрило в ОИЯИ Государственную систему стандартизации СССР, стандарты Единой системы конструкторской документации, создало библиотеку стандартов, разработало ограничительные стандарты на различные материалы, инструменты и узлы вакуумных систем, издало сборник стандартов ”Нормы конструкторские”.

*Отдел контрольно-измерительных приборов* (ОКИП) осуществляет техническое обслуживание сложных контрольно-измерительных приборов отечественного и зарубежного производства, находящихся в эксплуатации в ОИЯИ. ОКИП, являясь основным подразделением метрологической службы Института, способствует совершенствованию приборного парка, оснащению базовых установок новыми, более совершенными приборами, одновременно выводит из эксплуатации устаревшие приборы.

**ОРГАНЫ УПРАВЛЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

**КОМИТЕТ ПОЛНОМОЧНЫХ ПРЕДСТАВИТЕЛЕЙ**

Академик Х.Христов (Народная Республика Болгария)  
Член-корр. ВАН И.Ланг (Венгерская Народная Республика)  
Академик Нгуен Ван Хьеу (Социалистическая Республика Вьетнам)  
Доктор Ф.Гильберт (Германская Демократическая Республика)  
Чве Хак Гын (Корейская Народно-Демократическая Республика)  
О.Л.Кабальеро (Республика Куба)

Проф. Д.Цэвэгмид (Монгольская Народная Республика)  
Проф. М.Совински (Польская Народная Республика)  
Проф. М.Иванку (Социалистическая Республика Румыния)  
Академик А.М.Петросьянц (Союз Советских Социалистических Республик)  
Академик Б.Квасил (Чехословацкая Социалистическая Республика)

**Финансовый комитет**

По одному представителю от  
каждой страны-участницы  
ОИЯИ

**УЧЕНЫЙ СОВЕТ ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Председатель - академик Н.Н.Боголюбов  
профессор Э.Энтральго  
профессор А.Сэндзулеску

Главный ученый секретарь - доктор физико-математических наук А.Н.Сисакян

Народная Республика Болгария	Венгерская Народная Республика	Социалистическая Республика Вьетнам	Германская Демократическая Республика	Корейская Народно-Демократическая Республика	Республика Куба	Монгольская Народная Республика	Польская Народная Республика	Социалистическая Республика Румыния	Союз Советских Социалистических Республик	Чехословацкая Социалистическая Республика
профессор Ж.Желев профессор И.Златев академик Х.Христов	член-корр. ВАН Д.Верени академик ВАН Д.Киш член-корр. ВАН Н.Кроо	Ву Суан Куанг канд. физ.-мат. наук Ву Суан Минь канд. хим. наук Данг Ву Минь	профессор К.-Г.Клаун академик К.Ланиус профессор Г.Музиоль	Зен Им Кюн профессор Пак Мен Зон Хон Сын Му	кандидат физ.-мат. наук М.Леонард М.Мелиан	академик Н.Содном доктор физ.-мат. наук Б.Тувдендорж профессор Д.Чултэм	профессор И.Зелински академик ПАН Р.Сосновски академик А.Хрынкевич	профессор И.Врындуш профессор Д.Барб профессор Г.Семенеску	доктор технических наук А.А.Васильев академик А.А.Логунов профессор В.К.Лукьянов	профессор Ч.Шимане член-корр. САИ Ю.Дубински профессор Й.Тучек

**Секция Ученого совета ОИЯИ по физике высоких энергий**  
Председатель - профессор Э.Энтральго  
Ученый секретарь - кандидат физико-математических наук  
М.Г.Шафранова

**Секция Ученого совета ОИЯИ по теоретической физике**  
Председатель - академик Н.Н.Боголюбов  
Ученый секретарь - кандидат физико-математических наук  
М.А.Смондырев

**Секция Ученого совета ОИЯИ по физике низких энергий**  
Председатель - профессор А.Сэндзулеску  
Ученый секретарь - кандидат физико-математических наук  
И.К.Скобелев

**Камерный комитет**  
Председатель - кандидат физ.-мат. наук  
Х.Каназирски

**Комитет по электронным экспериментам**  
Председатель - доктор физ.-мат. наук  
Р.Ляйсте

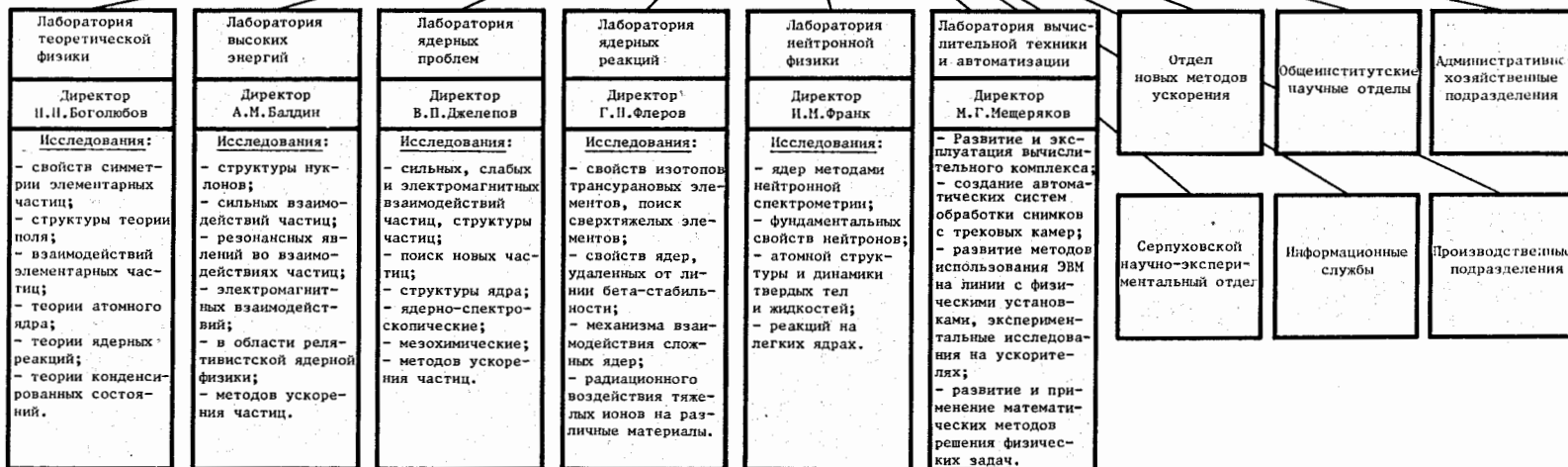
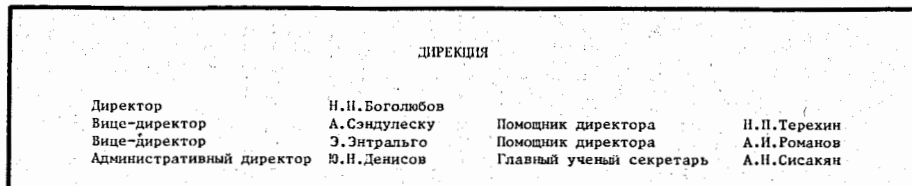
**Фотоэмульсионный комитет**  
Председатель - кандидат физ.-мат. наук  
М.Хайдук

**Комитет по нейтронной физике**  
Председатель - профессор  
К.Хенниг

**Комитет по структуре ядра**  
Председатель - доктор физических наук  
В.Андрейчев

**Комитет по физике тяжелых ионов**  
Председатель - профессор  
К.-Г.Каун

**СТРУКТУРА  
ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**





# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ БАЗА ОИЯИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ЕЕ РАЗВИТИЯ В ПРЕДСТОЯЩЕМ ПЯТИЛЕТИИ (1986-1990 ГОДЫ)

*Ю.Н.ДЕНИСОВ, профессор*

Для проведения экспериментальных исследований по наиболее актуальным проблемам современной физики необходимы установки, генерирующие пучки протонов, нейтронов, тяжелых ионов и других видов излучения в широком диапазоне энергий. При образовании Объединенного института ядерных исследований тридцать лет назад Советский Союз безвозмездно передал этому международному исследовательскому центру действующий синхроциклотрон, ускорявший протоны до энергии 680 МэВ, и находившийся в стадии наладки синхрофазотрон на энергию протонов 10 ГэВ. Эти два ускорителя, обладавшие в то время рекордными параметрами, стали первыми базовыми установками Института, на которых физики из всех стран-участниц ОИЯИ начали проводить экспериментальные исследования. Вскоре после создания Института парк базовых установок был дополнен реактором периодического действия на быстрых нейтронах и классическим циклотроном, предназначенным для ускорения многозарядных ионов в широком диапазоне масс.

В апреле 1957 года на синхрофазотроне были ускорены протоны, впервые была достигнута энергия 10 ГэВ. Все последующие годы одновременно с выполнением широкой программы физических экспериментов продолжалось совершенствование и развитие всех его технологических систем. В результате интенсивность пучка ускоренных протонов была доведена до  $4 \cdot 10^{12}$  частиц в импульсе, были созданы высокоэффективные системы быстрого и медленного выводов пучков, создана разветвленная система разводки пучков протонов и вторичных частиц.

В 1970 году на синхрофазотроне впервые были ускорены ядра тяжелее протона. К настоящему времени в результате последовательного совершенствования ионных источников и инжекционного комплекса синхрофазотрона получены пучки  $d$ ,  $d^+$ ,  ${}^3\text{He}$ ,  ${}^4\text{He}$ ,  ${}^6\text{Li}$ ,  ${}^7\text{Li}$ ,  ${}^{12}\text{C}$ ,  ${}^{16}\text{O}$ ,  ${}^{22}\text{Ne}$ ,  ${}^{24}\text{Mg}$ ,  ${}^{28}\text{Si}$ . Синхрофазотрон стал первым ускорителем, на котором удалось ускорить многозарядные ионы до релятивистских энергий  $\sim 4$  ГэВ/нуклон и создать тем самым условия для проведения на высоком уровне исследований по актуальным проблемам физики элементарных частиц и релятивистской ядерной физики.

Развитие синхрофазотрона продолжается. Улучшаются характеристики ионных источников, в том числе источника поляризованных дейтронов, создаются лучшие условия для их эксплуатации, совершенствуется вакуумная система ускорителя, развивается система автоматизированного управления режимом ускорения и разводки пучков. Все это позволит еще более расширить диапазон ускоряемых ионов и увеличить интенсивность получаемых пучков ядер.

Следующим значительным шагом в развитии ускорительной базы Института для экспериментов в области релятивистской ядерной физики является планируемая на ближайшие годы замена действующего синхрофазотрона на сверхпроводящий ускоритель ядер — "Нуклотрон". Замена действующей "теплой" магнитной системы синхрофазотрона с классической слабой фокусировкой на жесткофокусирующую сверхпроводящую, даже при размещении нового ускорителя в существующем здании, позволит получить ускоренные ядра с энергией до 7 ГэВ/нуклон. При соответствующем развитии инжекционного комплекса "Нуклотрона" диапазон масс ускоряемых ядер может быть расширен вплоть до урана, существенно будут повышены интенсивности пучков. Например, интенсивность пучков ускоренных дейтронов достигнет  $3 \cdot 10^{12}$  частиц/цикл,  $Mg^{12+}$  —  $1 \cdot 10^{11}$  частиц/цикл,  $U^{82+}$  —  $1 \cdot 10^9$  частиц/цикл. Кроме того, использование в ускорителе сверхпроводящей магнитной системы существенно уменьшит энергоемкость установки и расходы на ее эксплуатацию.

Разработка проекта ускорителя "Нуклотрон" базируется на результатах успешного развития в последнее десятилетие в Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований программы использования сверхпроводящих магнитов в ускорительной технике. За эти годы в ЛВЭ были созданы несколько моделей сверхпроводящих дипольных и квадрупольных магнитов "погружного" и "прокачного" типов с максимальной величиной магнитного поля 2,1÷2,3 Тл. Особенностью разработанных магнитных систем, названных магнитами типа "Дубна", является активное использование близко расположенного ярма для формирования поля в зазоре магнита. Это позволяет резко сократить расход сверхпроводящего кабеля и упростить конструкцию магнитной системы и ее криостата.

Для проверки основных конструкторских и технологических идей, заложенных в проект ускорителя "Нуклотрон", в Лаборатории высоких энергий сооружен сверхпроводящий жесткофокусирующий синхротрон СПИН с разделенными функциями поворота и фокусировки ускоряемых частиц. Применена магнитная система "погружного" типа. Для охлаждения магнитной системы до температуры 4,2 К используется криогенно-гелиевая установка КГУ-1600/4,5. При общем периметре ускорителя 54 м конечная энергия протонов составит 1,5 ГэВ. Опыт сооружения, запуска и пробной эксплуатации установки СПИН

будет использован при разработке проекта и в процессе сооружения сверхпроводящего ускорителя ядер "Нуклотрон".

Синхроциклотрон на энергию протонов 680 МэВ служил экспериментальной базой Института для физических исследований с момента образования ОИЯИ до 1979 года. К этому времени эксплуатационный ресурс его технологических систем был полностью использован, и ускоритель был остановлен на реконструкцию. Проектом реконструкции предусматривалось создание в существующем здании ускорителя нового типа — фазотрона с пространственной вариацией магнитного поля. Вид ускоряемых частиц — протоны и конечная энергия — 680 МэВ сохранились прежними. Пространственная вариация магнитного поля, обеспечивая вертикальную фокусировку ускоряемых частиц при растущем по радиусу магнитном поле, дает возможность существенно сократить диапазон частот ускоряющего напряжения и за счет этого увеличить как ускоряющее напряжение, так и частоту циклов ускорения. Оба эти фактора обеспечивают увеличение интенсивности пучка ускоряемых протонов. Применение новой высокоэффективной системы вывода обеспечивает дополнительное увеличение интенсивности внешних пучков протонов, нейтронов и мезонов.

В новом ускорителе использовался магнитопровод синхроциклотрона и некоторые его технологические системы. Но все основные узлы ускорителя в процессе реконструкции были изготовлены заново, на современном уровне технологических возможностей с широким применением автоматизированных систем контроля и управления режимом ускорения, вывода и разводки пучков по экспериментальным залам. Одновременно существенно увеличена площадь залов для размещения экспериментальных физических установок. Сооружены специальные помещения для работ по ядерной спектроскопии, работ с низким радиационным фоном, для медико-биологических исследований.

В 1984 году в Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований впервые в мире был осуществлен физический пуск фазотрона с пространственной вариацией магнитного поля. Была получена предельная проектная энергия ускоренных протонов — 680 МэВ. В 1985 году реализован вывод пучка из вакуумной камеры ускорителя с расчетной эффективностью ~60%.

Сечение выведенного пучка оказалось в десятки раз меньше, чем на старом ускорителе с классической слабой фокусировкой. Благодаря этому значительно увеличивается эффективность трактов проводки ускоренных протонов и вторичных частиц и существенно улучшается использование пучков в экспериментальных физических установках.

Радикально изменена система управления ускорителем. Пульт управления перенесен в новое помещение, непосредственно примыкающее к экспериментальным залам и основным технологическим системам фазотрона. Система контроля и управления режимом ускорения построена с применением многомашинной системы ЭВМ и электроники

в стандарте КАМАК. Особое внимание обращено на автоматизацию контроля радиационной обстановки в технологических помещениях ускорителя и экспериментальных залах.

Таким образом, в ЛЯП создана новая перспективная базовая установка для обеспечения экспериментальной программы Института на пучках протонов, нейтронов и мезонов в области средних энергий. Значительное место в этой программе занимают прикладные исследования, для которых на реконструированном фазотроне созданы благоприятные условия.

В последующие годы ускоритель и его основные системы будут совершенствоваться и развиваться с целью поэтапного увеличения интенсивности пучка ускоренных протонов и повышения эффективности. По мере увеличения коэффициента вывода и соответствующего снижения активации узлов ускорителя интенсивность внутреннего пучка протонов постепенно будет увеличиваться до ее проектного значения 10-50 мкА.

В 1957 году для расширения в ОИЯИ экспериментальных исследований в области ядерной физики было принято решение о создании Лаборатории ядерных реакций и оснащении ее необходимыми базовыми установками. Первым был сооружен "классический" циклотрон, предназначенный для ускорения широкого спектра многозарядных ионов вплоть до ядер цинка. Диаметр полюсов электромагнита этого циклотрона составляет 3,1 м. С момента его запуска в 1960 году в течение последующих 15 лет ускоритель У-300 обеспечивал ученым стран-участниц ОИЯИ лидирующее положение в экспериментальных исследованиях по физике тяжелых ионов.

В 1968 году экспериментальная база для исследований по физике тяжелых ионов была дополнена еще одним ускорителем — изохронным циклотроном с диаметром полюсов 2 м (У-200). На этом циклотроне благодаря аномально высокому среднему полю оказалось возможным ускорить ионы до энергии  $145(Z^2/A)$  МэВ в диапазоне отношений массы иона к заряду ( $A/Z$ ) от 5 до 28. Одновременно ускоритель У-200 использовался как модель более мощного изохронного циклотрона с диаметром полюсов 4 м (У-400), разработанного в Лаборатории ядерных реакций.

Новый изохронный циклотрон У-400 был введен в эксплуатацию в 1978 году. Благодаря высокому уровню среднего магнитного поля в зазоре магнита энергия ускоряемых ионов может достигать  $650(Z^2/A)$  МэВ. Ускоряются ионы с отношением массы к заряду ( $A/Z$ ) в диапазоне от 4 до 20. За время работы циклотрона У-400 на нем отлажены режимы ускорения широкого спектра ионов от  $^{15}\text{N}$  до  $^{84}\text{Kr}$  при конечных энергиях больше 5 МэВ на нуклон. Благодаря разработанным в ЛЯР высокоэффективным ионным источникам пучки ускоренных ионов на один-два порядка превосходят по интенсивности пучки, получаемые на других известных ускорителях тяжелых ионов.

Вывод пучка из циклотрона осуществляется в двух направлениях методом перезарядки ускоренных ионов на тонких графитовых фольгах толщиной  $40\text{--}60$  мкг/см<sup>2</sup>. Для расширения диапазона энергий выводимых ионов применяется как однооборотный (с радиусов  $170\text{--}175$  см), так и двухоборотный (с радиусов  $138\text{--}160$  см) вывод. Эффективность выводной системы составляет, в зависимости от массы ускоряемых ионов,  $30\text{--}70\%$ . Ускоритель оснащен автоматизированной системой контроля и управления режимом ускорения ионов и системами разводки выведенных пучков по экспериментальным установкам.

В Лаборатории ядерных реакций разработан проект дальнейшего развития ускорительной базы для исследований по физике тяжелых ионов. В основу проекта положен опыт, приобретенный в ЛЯР несколько лет назад, когда впервые в мире ионы ксенона были последовательно ускорены в тандеме двух циклотронов У-300 и У-400. Проектом предусматривается реконструкция морально устаревшего классического циклотрона У-300 в изохронный циклотрон У-400, аналогичный по параметрам действующему циклотрону, и соединение этих двух ускорителей в последовательный ускорительный комплекс. Первая ступень комплекса — действующий изохронный циклотрон У-400, вторая — реконструируемый циклотрон. При совместной работе обеих ступеней будут ускоряться все ионы вплоть до урана до энергии  $150\text{--}20$  МэВ на нуклон. В лаборатории уже ведется подготовка к реализации этого проекта.

Для обеспечения ускорительной базы ведущихся в Лаборатории ядерных реакций прикладных исследований сооружены две специализированные установки: микротрон МТ-22 и изохронный циклотрон с диаметром полюсного наконечника  $100$  см — ИЦ-100. В микротроне МТ-22 электроны ускоряются до энергии  $32$  МэВ при среднем токе пучка  $20$  мкА. Изохронный циклотрон — имплантатор предназначен для ускорения тяжелых ионов до энергии  $1$  МэВ на нуклон. С помощью этих ускорителей ведутся исследования по элементному анализу, отработке методики получения некоторых изотопов, например короткоживущего изотопа  $^{123}\text{I}$ , изготовлению ядерных фильтров, ионной имплантации и радиационному материаловедению.

Сразу же после образования ОИЯИ было решено оснастить Институт не только ускорителями, но и реакторными установками. Было принято оригинальное решение — соорудить не обычный стационарный исследовательский реактор на тепловых нейтронах, какими располагали все другие физические исследовательские центры, а импульсный реактор на быстрых нейтронах периодического действия — ИБР. Такой реактор со средней тепловой мощностью  $1$  кВт был запущен в Лаборатории нейтронной физики Объединенного института ядерных исследований в 1960 году. В 1969 году эта установка была заменена новым импульсным реактором ИБР-30, средняя тепловая мощность которого

уже достигла 25 кВт. Реактор генерирует периодически повторяющиеся импульсы нейтронного потока длительностью 70 мкс с частотой повторения от 4 до 100 импульсов в секунду. Мгновенная мощность реактора в импульсе достигает 150 МВт.

Периодичность действия реактора обеспечивается циклическим изменением коэффициента размножения нейтронов в активной зоне — модуляцией реактивности. В реакторе ИБР-30 для модуляции реактивности используется подвижная часть активной зоны — диск из металлического урана, запрессованный на периферии вращающегося стального ротора. При вращении ротора со скоростью 3000 об/мин урановый вкладыш 50 раз в секунду проходит между двумя неподвижными частями активной зоны, сначала переводя реактор в надкритическое состояние, а затем снижая реактивность.

Для исследований, требующих высокого энергетического разрешения для нейтронного потока, реактор ИБР-30 используется в подкритичном режиме как размножитель нейтронов от мишени инжектора электронов — линейного ускорителя ЛУЭ-40. Длительность импульса нейтронов в этом режиме сокращается до 3 мкс. Реактор оснащен восемью вакуумированными нейтронотодами длиной от десятков метров до 1 км.

В 1984 году в ЛНФ введен в эксплуатацию новый импульсный реактор на быстрых нейтронах ИБР-2, средняя тепловая мощность которого достигла 2 МВт. При длительности импульса нейтронов 215 мкс и частоте повторения циклов 5 Гц максимальная мощность реактора в импульсе достигает 1500 МВт. Максимальная интенсивность нейтронного потока от реактора в импульсе достигла рекордного значения  $10^{16}$  нейтронов/см<sup>2</sup>·с.

Для периодической модуляции реактивности в реакторе ИБР-2, в отличие от ИБР-30, использован подвижный отражатель при неподвижной активной зоне. Механизм изменения реактивности состоит из двух синхронно вращающихся элементов — основного и дополнительного подвижных отражателей. Основной подвижный отражатель в виде стальной динамически уравновешенной лопасти вращается со скоростью 1500 об/мин. Дополнительный отражатель — алюминиевый диск с бериллиевым вкладышем может вращаться с меньшей скоростью и определять тем самым частоту "вспышек" реактора, поскольку максимум коэффициента размножения нейтронов в активной зоне реактора достигается только при одновременном подходе к зоне лопасти основного отражателя и бериллиевого вкладыша дополнительного отражателя. При вращении дополнительного подвижного отражателя со скоростью 5 об/с частота импульсов нейтронов составляет 5 Гц. При одинаковой скорости вращения обоих отражателей 1500 об/мин частота циклов равна 25 Гц.

Напряженный тепловой режим активной зоны реактора потребовал применения в качестве теплоносителя системы охлаждения жидкого натрия.

Проектом предусмотрен и бустерный режим работы реактора. В качестве инжектора электронов будет использоваться уникальный индукционный линейный ускоритель, рассчитанный на максимальную энергию ускоряемых электронов 30 МэВ при токе пучка до 250 А в импульсе длительностью 0,7 мкс.

Реактор ИБР-2 оснащен необходимыми средствами управления и защиты (СУЗ), выполняющими те же функции, что и в стационарных реакторах. Вместе с тем импульсный характер работы реактора предъявляет ряд особых требований к СУЗ. Все они соответствующим образом учтены в подсистемах СУЗ ИБР-2. В частности, в реакторе использовалась, кроме обычной относительно медленной "падающей" защиты, быстродействующая защита. Время срабатывания быстродействующей аварийной защиты меньше длительности минимального цикла реактора. Совместная работа систем защиты обеспечивает достаточно надежную безопасность эксплуатации этой установки.

Реактор оснащается нейтронотодами с максимальной длиной до 500 м.

Опыт последних достижений экспериментальной ядерной физики показал принципиальную важность последовательного и непрерывного совершенствования ускорительной базы исследовательских физических центров. В ОИЯИ эта работа ведется с момента образования Института по трем направлениям: модернизация действующих ускорителей; сооружение новых, более мощных установок на основе уже известных, опробованных принципов; разработка принципиально новых путей создания ускорителей.

Один из новых перспективных методов ускорения заряженных частиц, так называемый коллективный метод, уже длительное время исследуется и развивается в Отделе новых методов ускорения Объединенного института ядерных исследований. Сейчас в ОНМУ ведется сооружение нового ускорителя тяжелых ионов КУТИ-20, основанного на коллективном методе ускорения. Главные части установки — индукционный ускоритель электронов СИЛУНД-20 и адиабатический генератор заряженных торов адгезатор-20, рассчитанные на повторение циклов ускорения с частотой до 20 Гц, уже готовы. Изготавливается линейный индукционный ускоритель заряженных торов. Ускоритель после его завершения должен обеспечить ускорение до энергии 20 МэВ на нуклон всех ионов вплоть до урана. Удачное завершение этой разработки создаст в Институте новые экспериментальные возможности для исследований в области ядерной физики.

Таким образом, на протяжении всех 30 лет существования ОИЯИ в его подразделениях велась напряженная и успешная работа по развитию ускорительной и реакторной базы для широкого спектра экспериментальных исследований практически по всем основным направлениям физики элементарных частиц, атомного ядра, конденсированных сред. Создавались также специализированные ускорительные установки для прикладных исследований. Перспективными планами Института предусматривается дальнейшее развитие этих работ.





Успешно развивается новое направление, зародившееся в Дубне, — релятивистская ядерная физика. Большинство экспериментов в этой области проводится на крупнейшем ускорителе Института — синхрофазотроне.



Электронно-лучевой ионизатор "Крион" — новый тип источника высокозарядных ионов, позволяющий ускорять на синхрофазотроне релятивистские ядра вплоть до кремния-28.



Экспериментальная установка ДИСК для исследования кумулятивных эффектов.

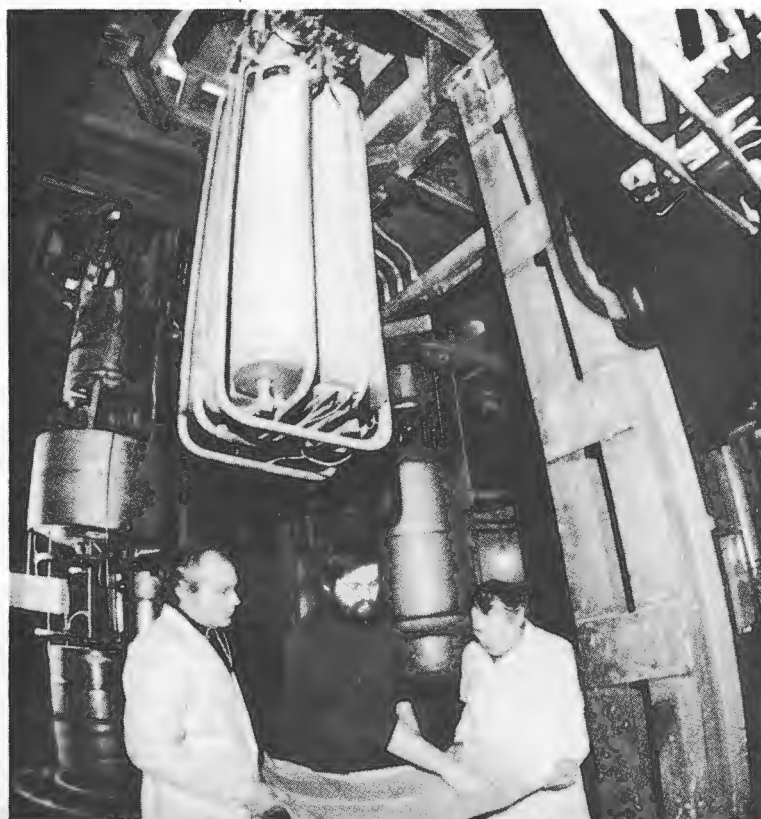


Ряд важных результатов в области релятивистской ядерной физики получен с помощью установки "Альфа".

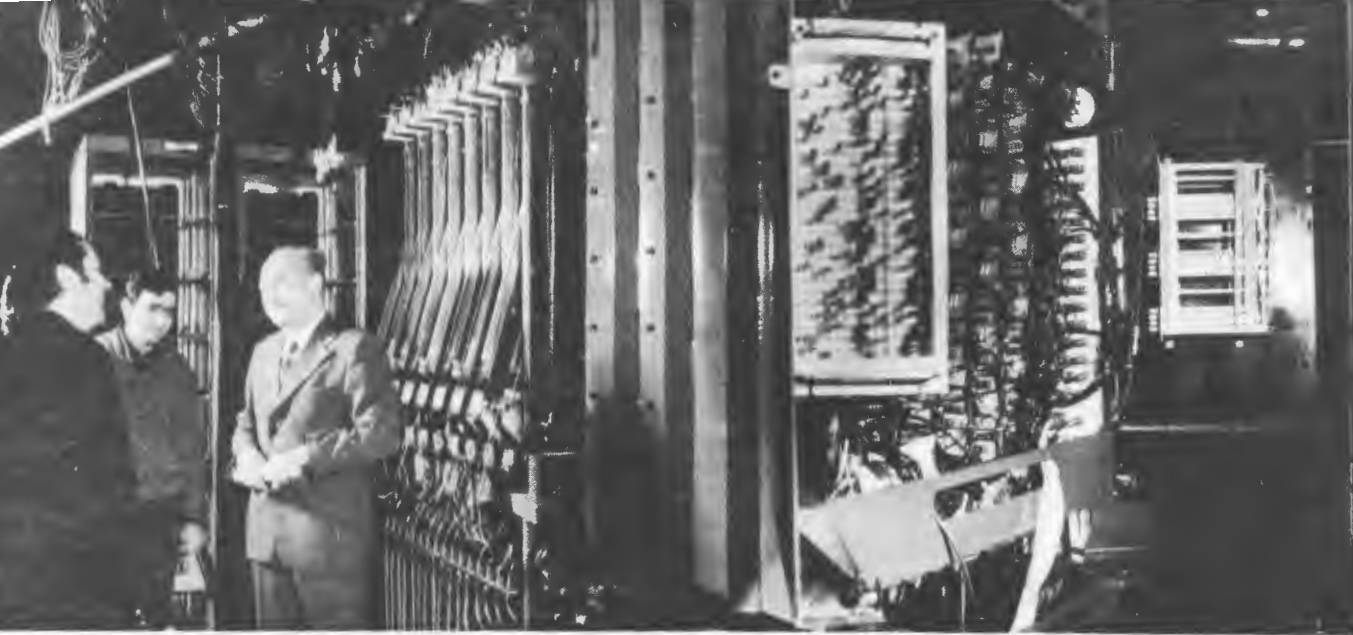




Двухплечевой магнитный спектрометр МАСПИК-2, предназначенный для исследования фрагментации релятивистских дейтронов и  $\alpha$ -частиц на ядрах.



Крупнейшая ожигительная установка КГУ-1600/4,5.



На 90-канальном черенковском масс-спектретре "Фотон" ведутся эксперименты по поиску и исследованию кумулятивного образования  $\phi$ - и  $\omega$ -мезонов.

Значительным успехом явилось создание сверхпроводящего модельного синхротрона — установки СПИН на основе нового, разработанного в Дубне подхода.





**Завершена реконструкция первого ускорителя Дубны синхроциклотрона в фазотрон – синхроциклотрон с пространственной вариацией магнитного поля.**

**Осуществлен физический запуск спектрометра АРЕС, предназначенного для поиска редких распадов  $\pi$ -мезонов и мюонов.**



Монтаж фазотрона/1981 г./.





Создана и успешно прошла стендовые испытания установка с жидкотритиевой мишенью для измерения скорости образования мезомолекул (снимок слева).



Прецизионный спектрометрический комплекс для амплитудных и временных измерений характеристик радионуклидов с помощью полупроводниковых детекторов, работающих на линии с микро- и мини-ЭВМ.

Безжелезный бета-спектрометр с тороидальным магнитным полем, изготовленный для ЛЯП ОИЯИ в ИЯФ (Краков, ПНР). Светосила — 20% при разрешающей способности 1%.



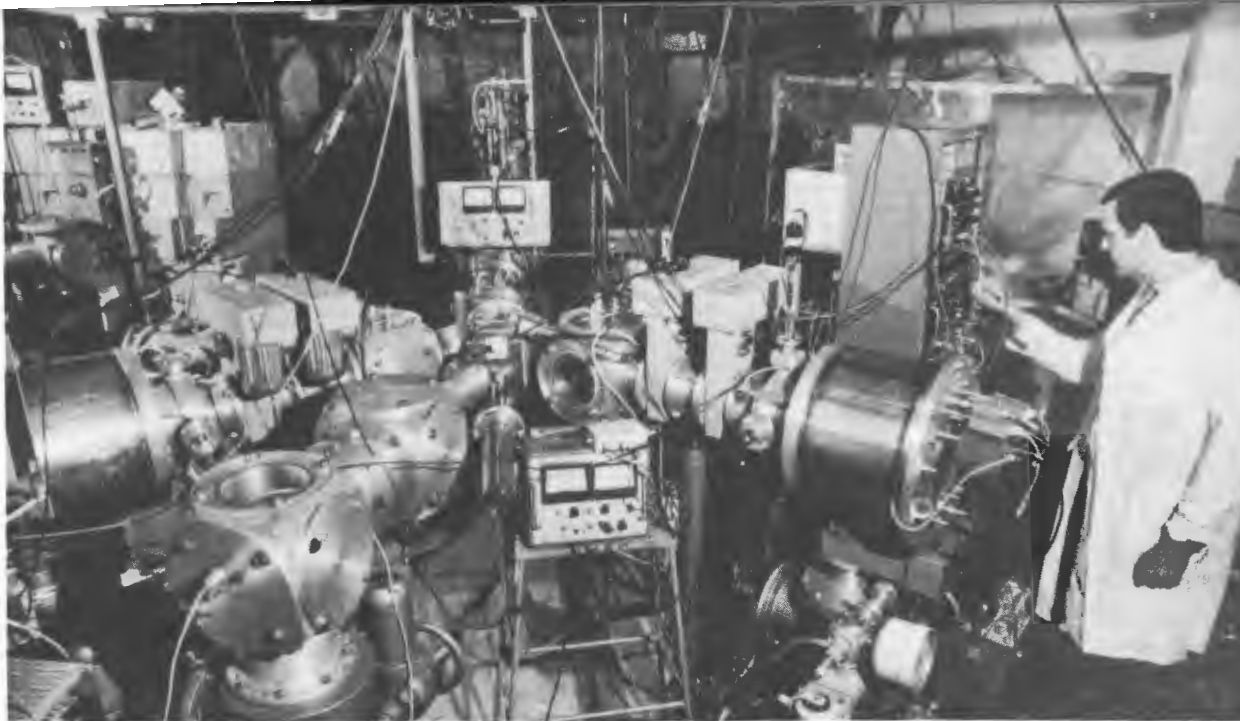


Поляризованная протонная "замороженная" мишень установки "Поляриметр" для экспериментов на ускорителе У-70 в ИФВЭ (Протвино). Проводится юстировка экранов рефрижератора растворения гелия-3 в гелии-4 (снимок справа).





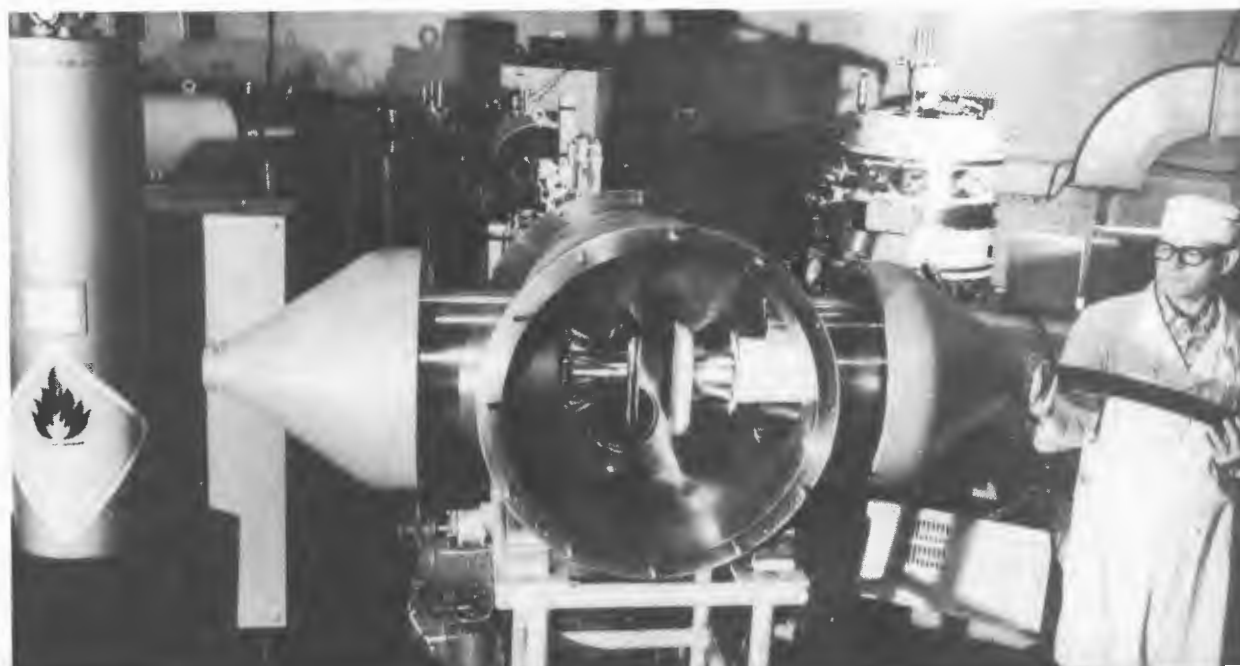




Двухплечевой времяпролетный спектрометр ДЭМАС предназначен для прецизионного измерения массовых распределений осколков деления составных ядер.

На ускорителе тяжелых ионов У-400 получены рекордные по интенсивности пучки ионов в диапазоне масс от неона до железа (снимок слева).

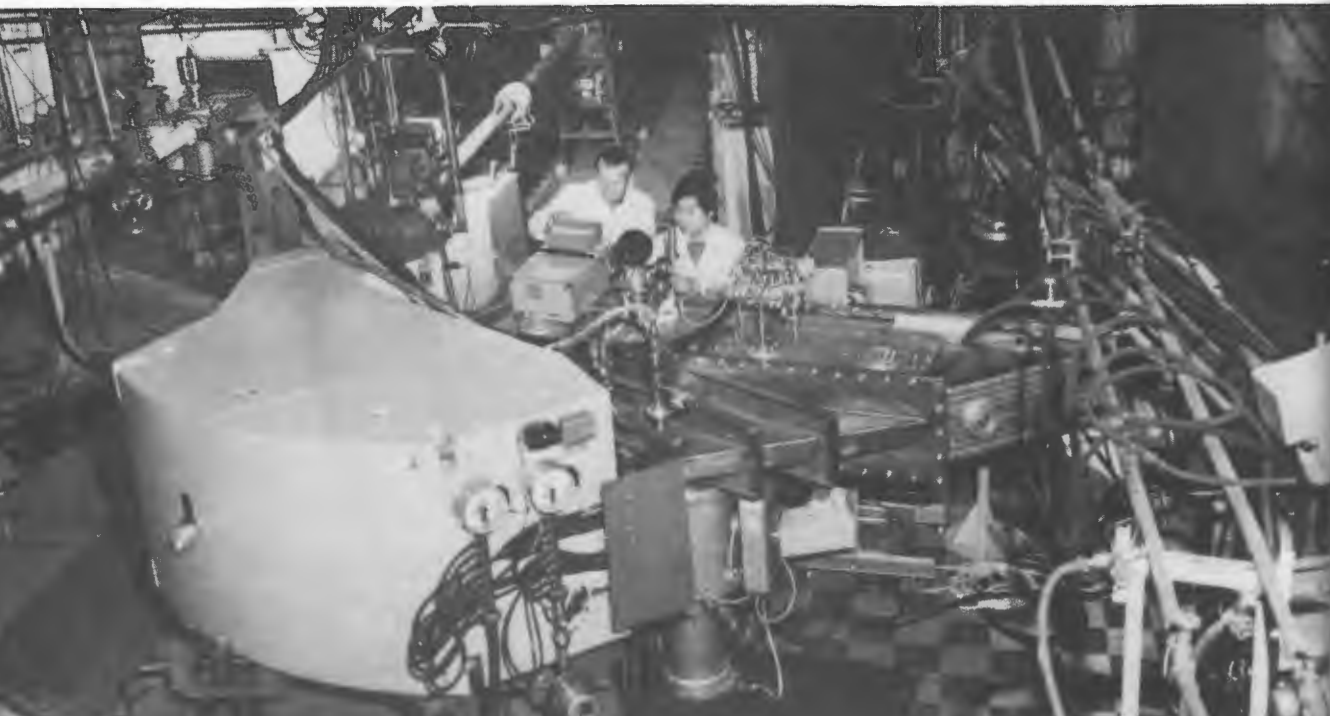
Для проведения экспериментов по синтезу трансурановых элементов создается установка "Василиса".





Подготовка мишени, способной выдержать тепловые нагрузки более 1 кВт, к очередному эксперименту по синтезу 109-го элемента.

Эксперименты по синтезу нейтронизбыточных изотопов легких ядер, расположенных на границе ядерной стабильности, проводятся с использованием масс-спектрометра МСП-144.

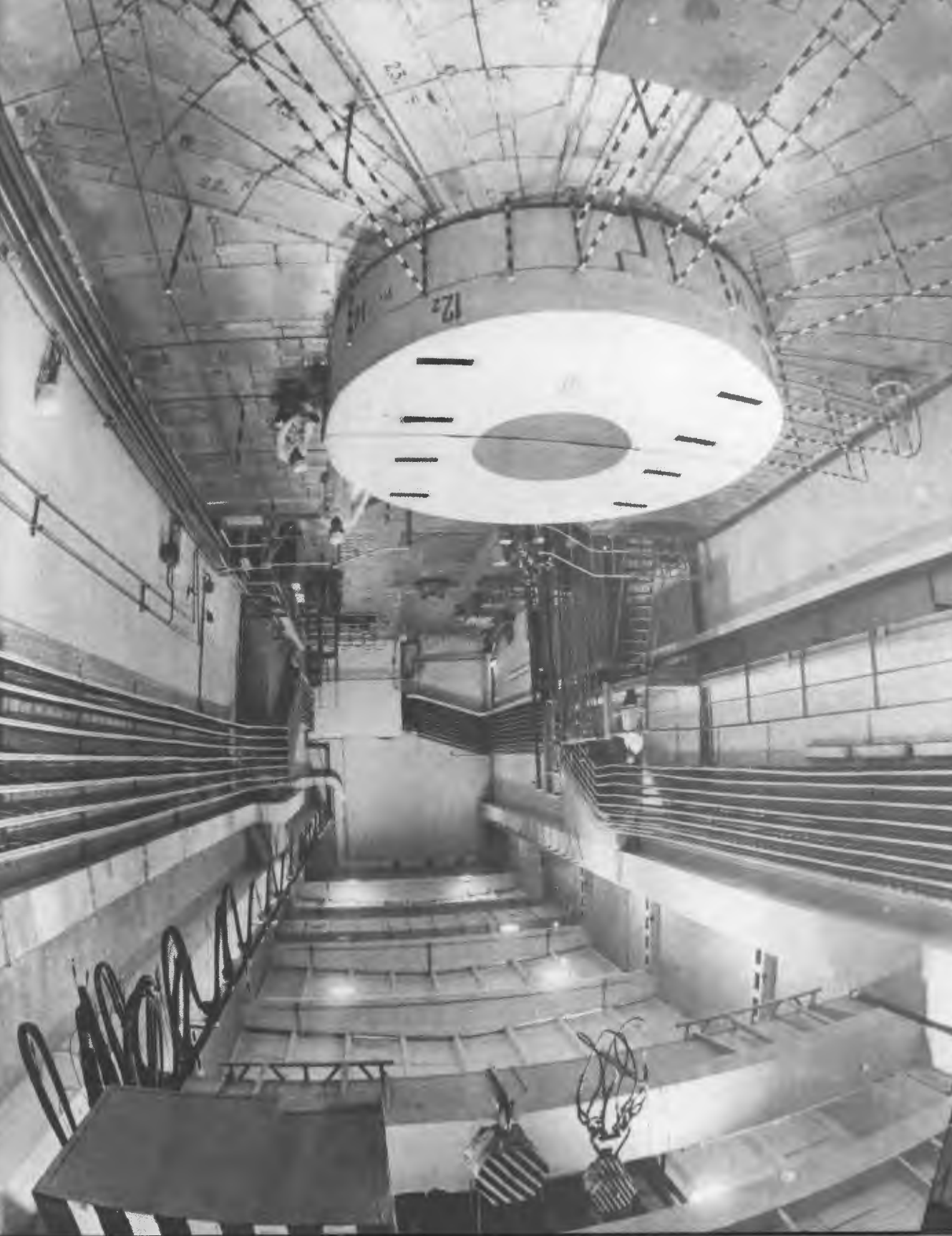




В Лаборатории ядерных реакций ведется широкий поиск сверхтяжелых элементов в природе.

На пучках ионов ускорителя У-400 проведены эксперименты по синтезу трансформиевых элементов от 106-го до 109-го с рекордной чувствительностью до  $10^{-36}$  см<sup>2</sup>. В работах по микрохроматографическому выделению продуктов распада синтезированных элементов активное участие принимают специалисты из Румынии, ГДР, Франции.





В 1984 году импульсный реактор на быстрых нейтронах ИБР-2 принят в постоянную эксплуатацию на средней мощности 2 МВт. Достигнут рекордный поток тепловых нейтронов с поверхности замедлителя в импульсе  $10^{16}$  нейтр./см<sup>2</sup>с (снимок слева).

Биологическая защита реактора (массивные чугунные и бетонные блоки) предохраняет персонал от радиационного облучения. Во внутреннем кольце защиты проходят каналы вывода нейтронов к экспериментальным установкам.

На создаваемом в ЛНФ линейном индукционном ускорителе электронов ЛИУ-30 осуществлена проводка пучка через инжекторный и первый ускоряющий участок.

Подготовка к измерениям на нейтронном дифрактометре.



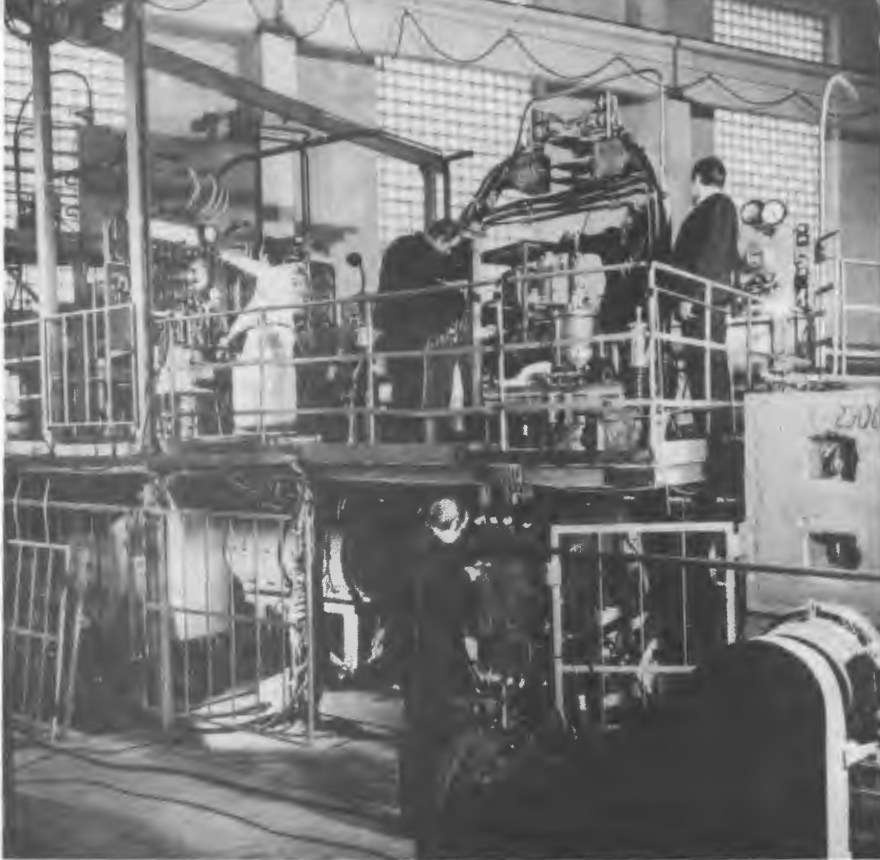


**Завершено создание спектрометра поляризованных тепловых нейтронов по методу времени пролета — установки СПН-1.**

**Установка для работ с ультрахолодными нейтронами. Ее конструкция позволяет использовать сосуды для хранения УХН.**



Установка для исследования взаимодействий поляризованных нейтронов с ядрами, на которой было получено первое экспериментальное доказательство резонансного усиления эффекта несохранения пространственной четности (снимок справа).



На ИБР-2 начата эксплуатация нейтронного спектрометра высокого разрешения.

Экспериментальный зал ИБР-2; на переднем плане – спектрометр ДИН-2К (снимок слева).

Осуществлена коренная реконструкция измерительного центра ЛНФ с переводом его на новую структуру.







**Расширение конфигурации и повышение эффективности ЭВМ центрального вычислительного комплекса ОИЯИ — одна из главных задач Лаборатории вычислительной техники и автоматизации.**

**Пульт оператора сканирующего автомата АЭЛТ-2/160. На экране дисплея-лупы могут быть представлены фрагменты измеренных событий с различной степенью детализации (снимок справа).**

**Первая очередь терминальной сети ЭВМ БЭСМ-6 на основе концентратора ЭВМ ЕС-1010.**



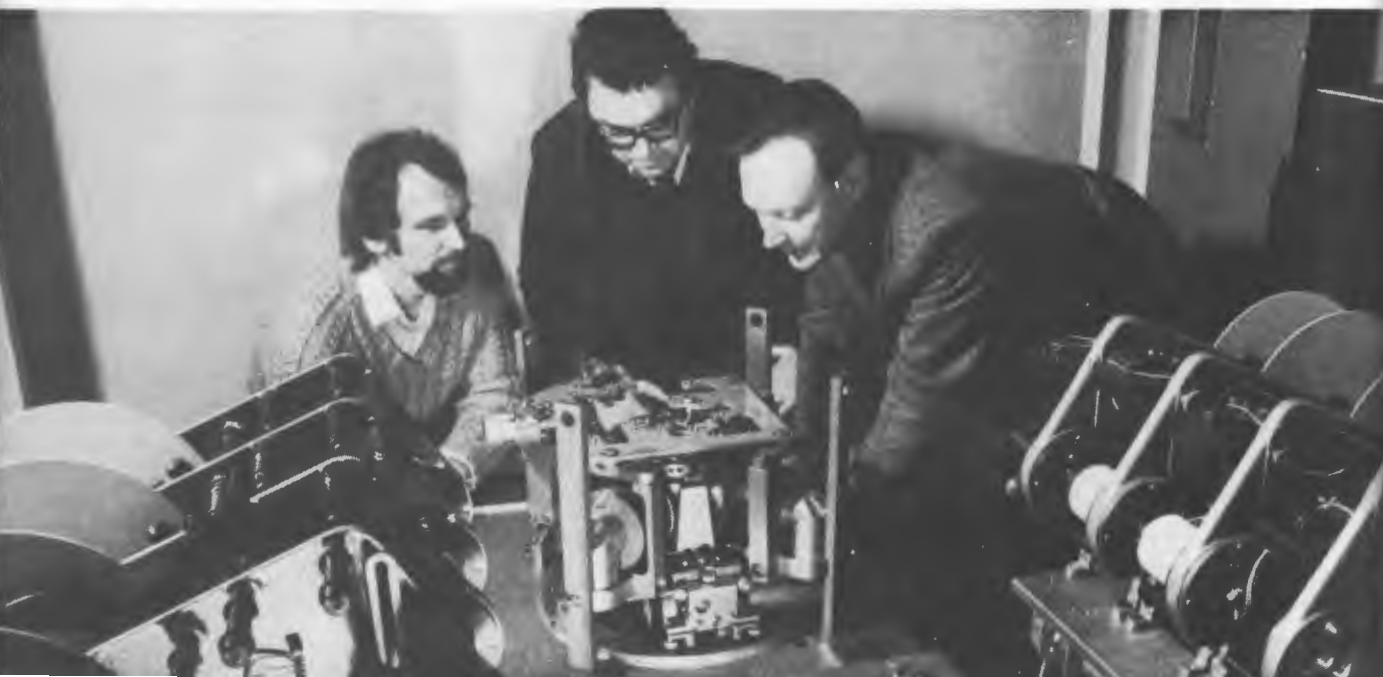




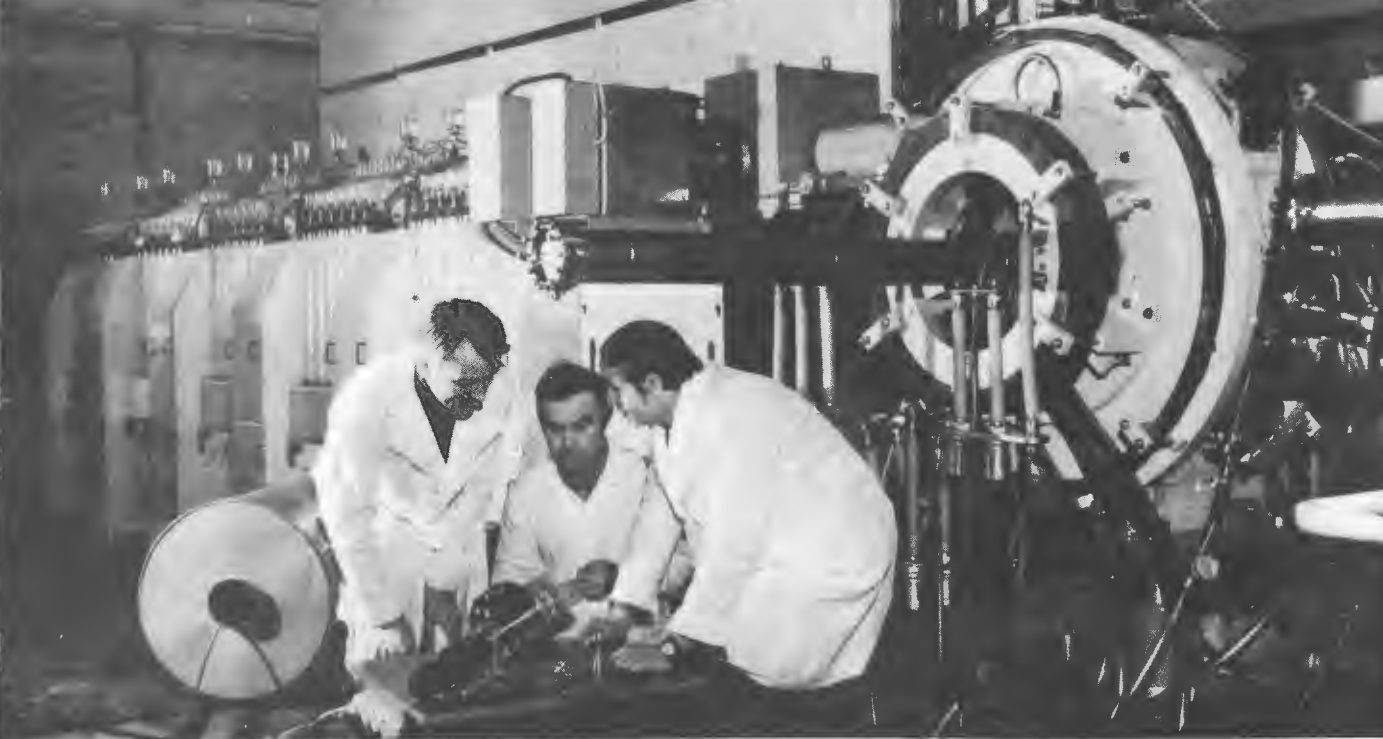
Центральный вычислительный комплекс ОИЯИ пополнился ЭВМ ЕС-1060 и ЕС-1061.

Система из двух просмотрных столов БПС-75 и ЭВМ СМ-4 используется для измерения снимков с установки РИСК (снимок справа).

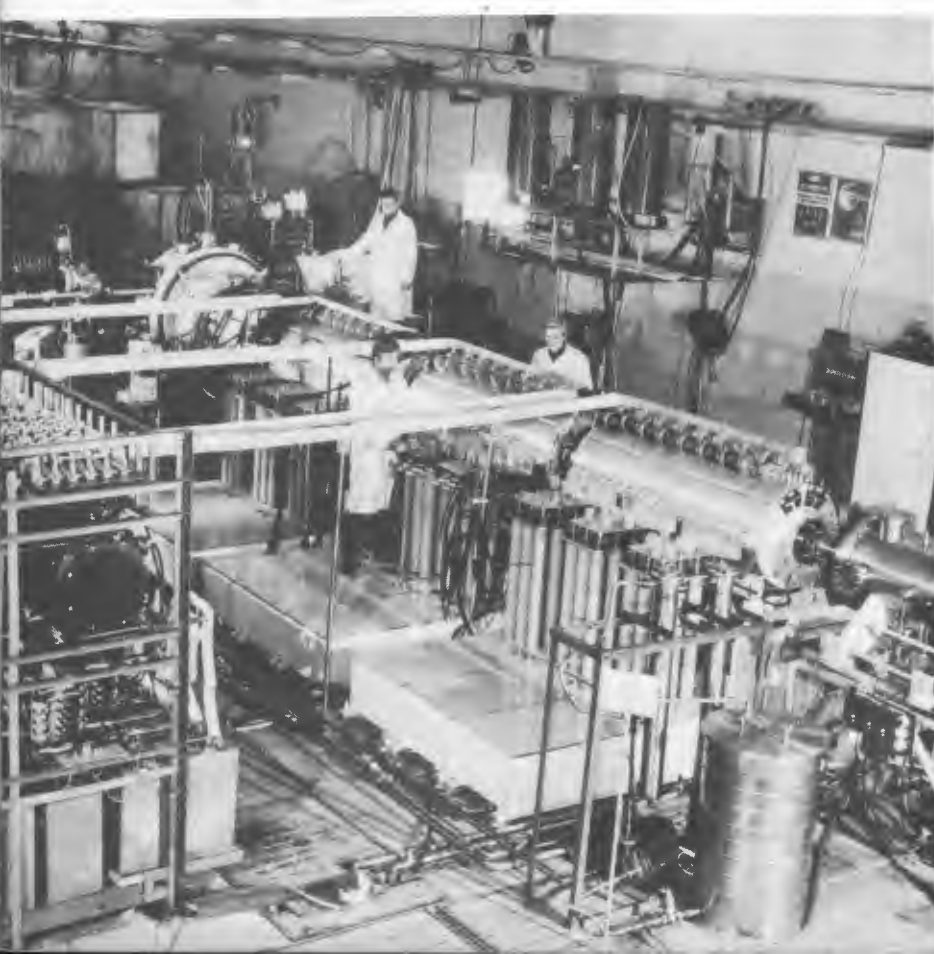
Настройка сканирующего автомата "Спиральный измеритель" для обработки многолучевых событий с трековых камер.



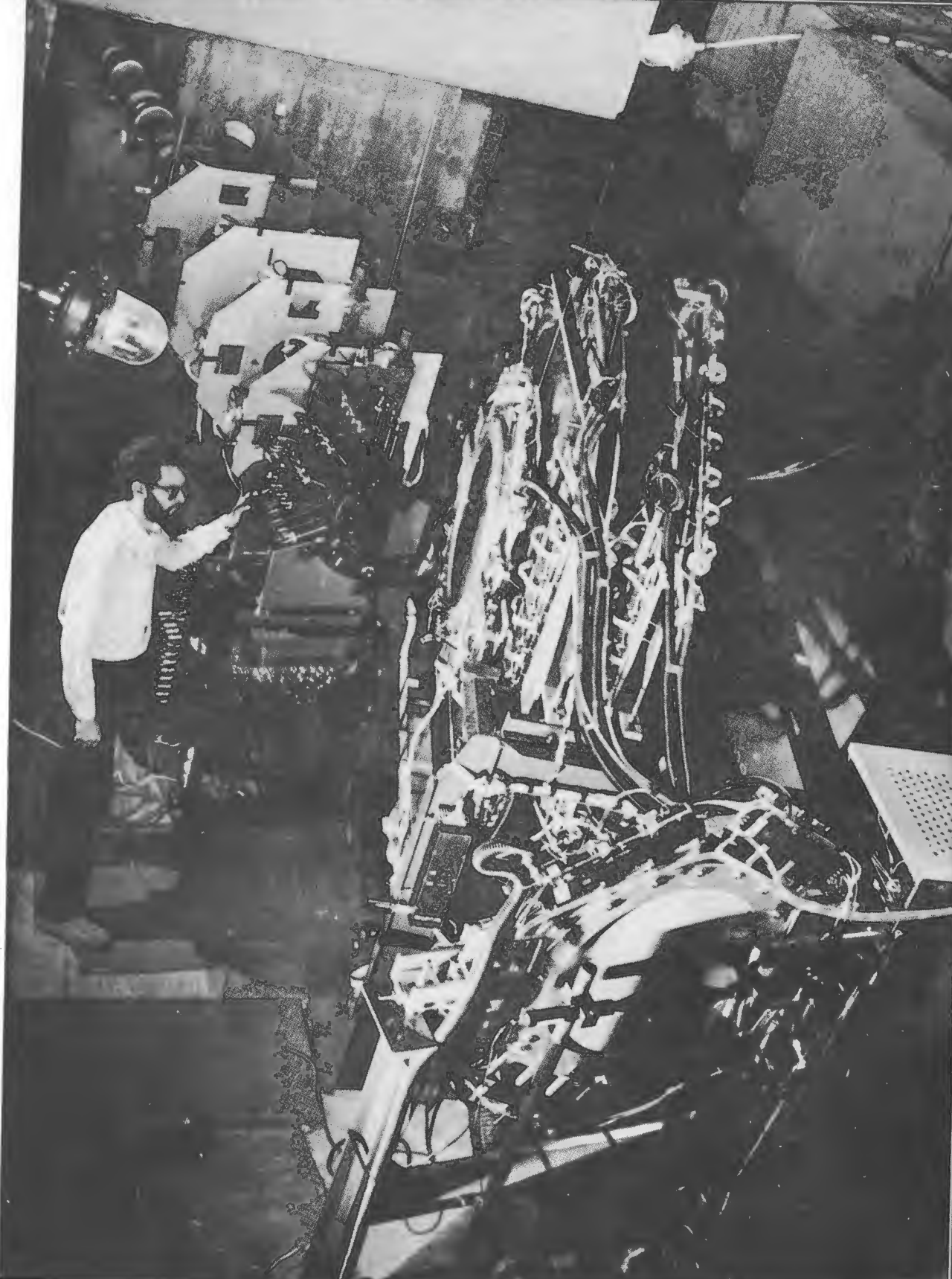


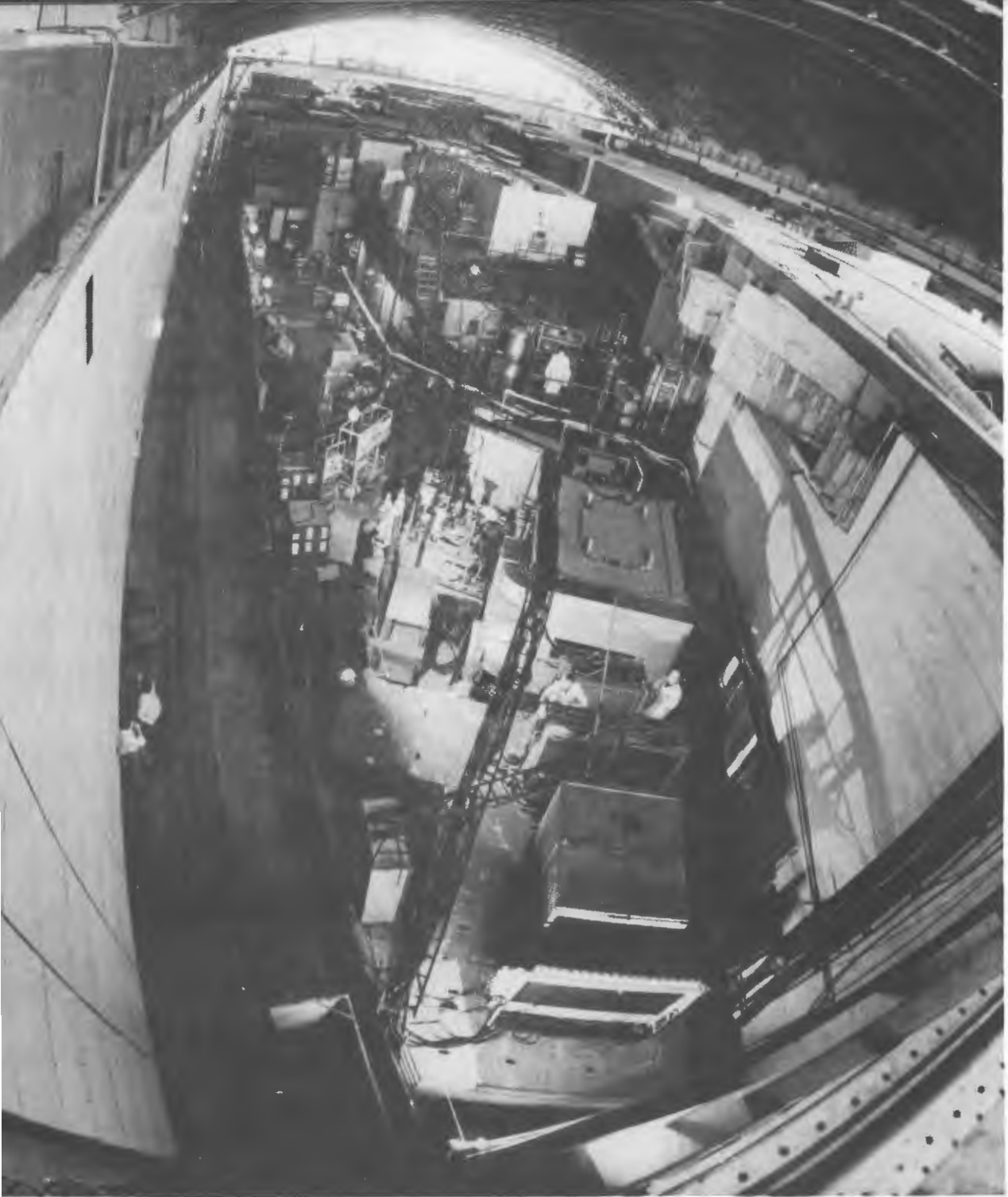


Проведены работы по подготовке экспериментов с электронно-ионными кольцами на головной части ускорителя КУТИ-20, в состав которой входят линейный ускоритель электронов СИЛУНД-20, адгезатор-20, системы вывода и предварительного ускорения колец в градиентном магнитном поле.



Установка, предназначенная для поиска и исследования свойств ядерных фрагментов, образованных во взаимодействиях релятивистских ядер (снимок справа).





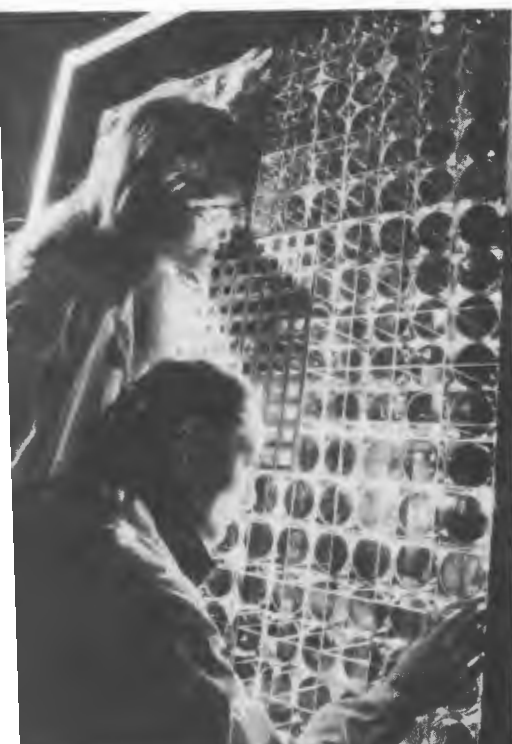
**Успешно развиваются исследования по программе "Гиперон". Общий вид установки.**



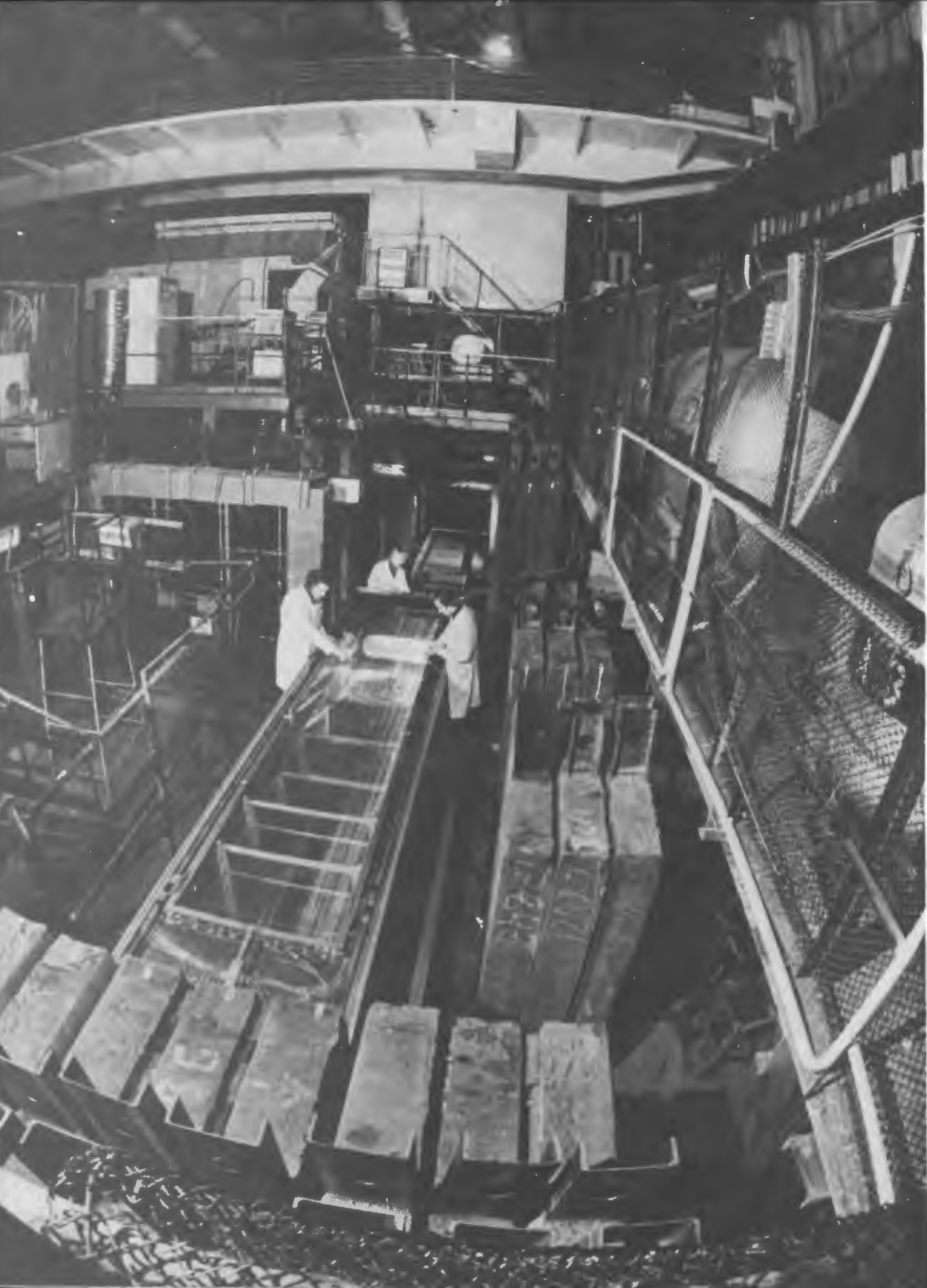
Большая программа исследований осуществляется учеными ОИЯИ на синхротроне ИФВЭ (Протвино). С помощью установки БИС-2 на нейтронном пучке серпуховского ускорителя продолжается поиск "очарованных" частиц. Эксперимент проводится на линии с ЭВМ ЕС-1040.

Ливневый детектор из свинцового стекла установки "Гиперон".

В течение ряда лет велись эксперименты по исследованию бозонных резонансов на установке МИС. Анализ данных привел к обнаружению нового псевдоскалярного мезона.







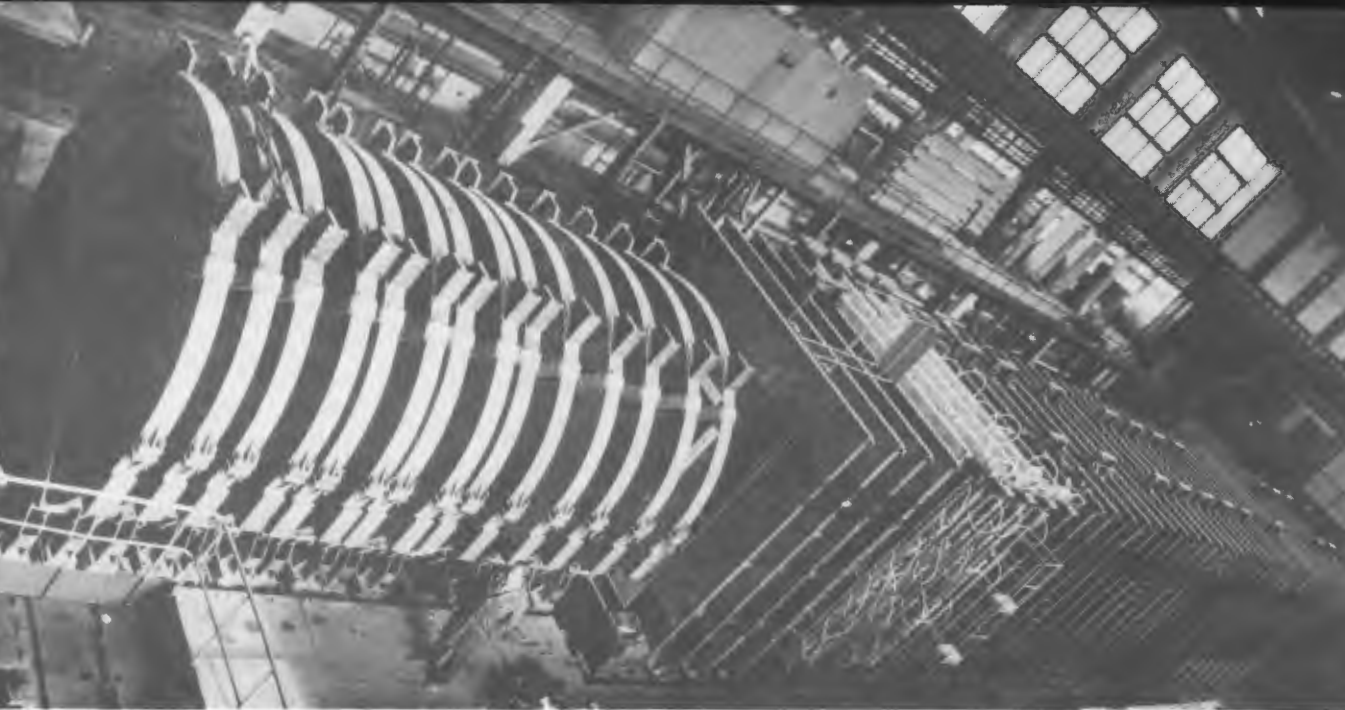


В совместном с ИФВЭ эксперименте АЯКС-СИГМА впервые зарегистрирован процесс упругого рассеяния  $\pi$ -мезонов на фотонах — комpton-эффект на пионе.

На крупнейшем магнитном спектрометре с пятиметровой стримерной камерой — установке РИСК — велись исследования адронных взаимодействий (снимок слева).

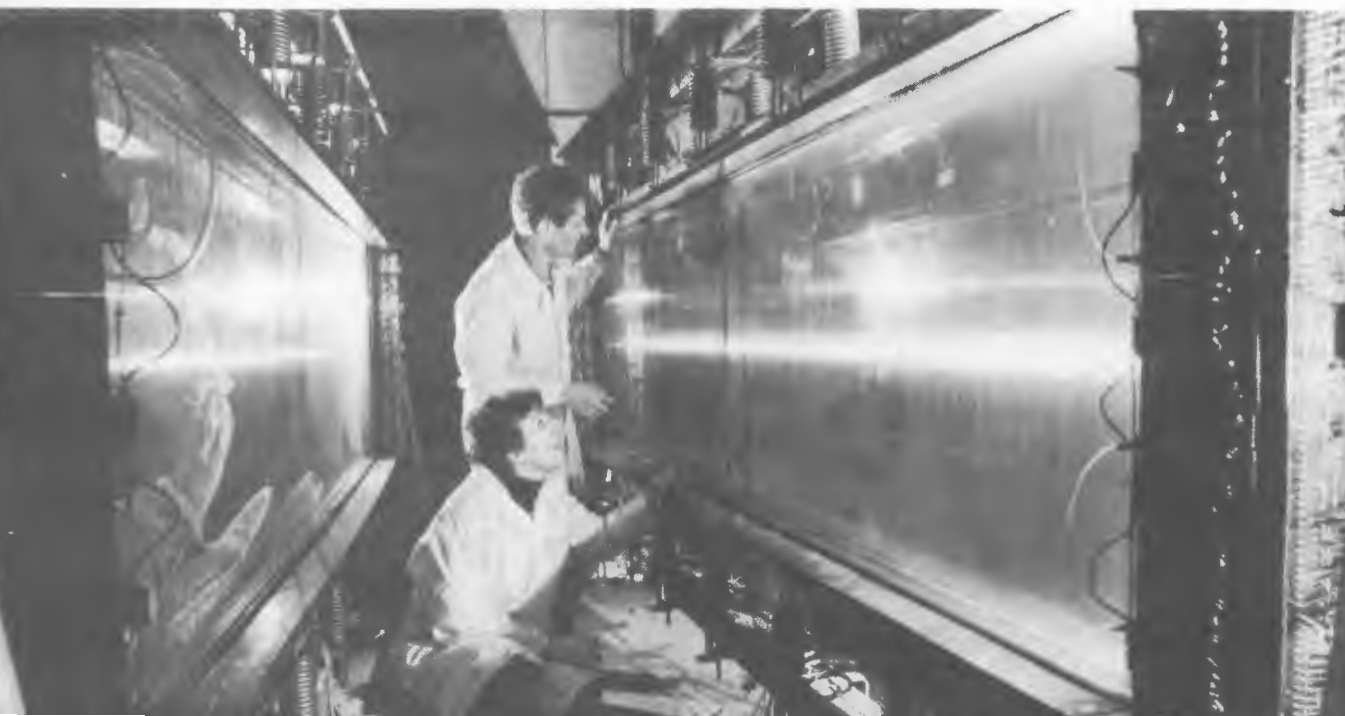
На установке "Проза" проводятся исследования поляризационных явлений в обменном пион-протонном рассеянии.





В сотрудничестве с ИФВЭ (Протвино), ИФВЭ (Цойген) и ЦИФИ (Будапешт) создается крупная экспериментальная установка для исследований в области физики нейтрино — "Нейтринный детектор". Общий вид установки во время монтажа; магнитная оболочка из 39 рамных магнитов (снимки вверху и справа).

Дрейфовые камеры установки "Позитроний", предназначенной для исследований ультрарелятивистских позитрониев. В камерах используется самогасящийся стримерный режим, обнаруженный и исследованный учеными Лаборатории ядерных проблем.







**Сочетание фундаментальных и прикладных исследований — характерная черта деятельности ОИЯИ. Новый специализированный циклический имплантатор ИЦ-100, созданный в ЛЯР, предназначен для производства ядерных фильтров и исследований в области радиационного материаловедения.**

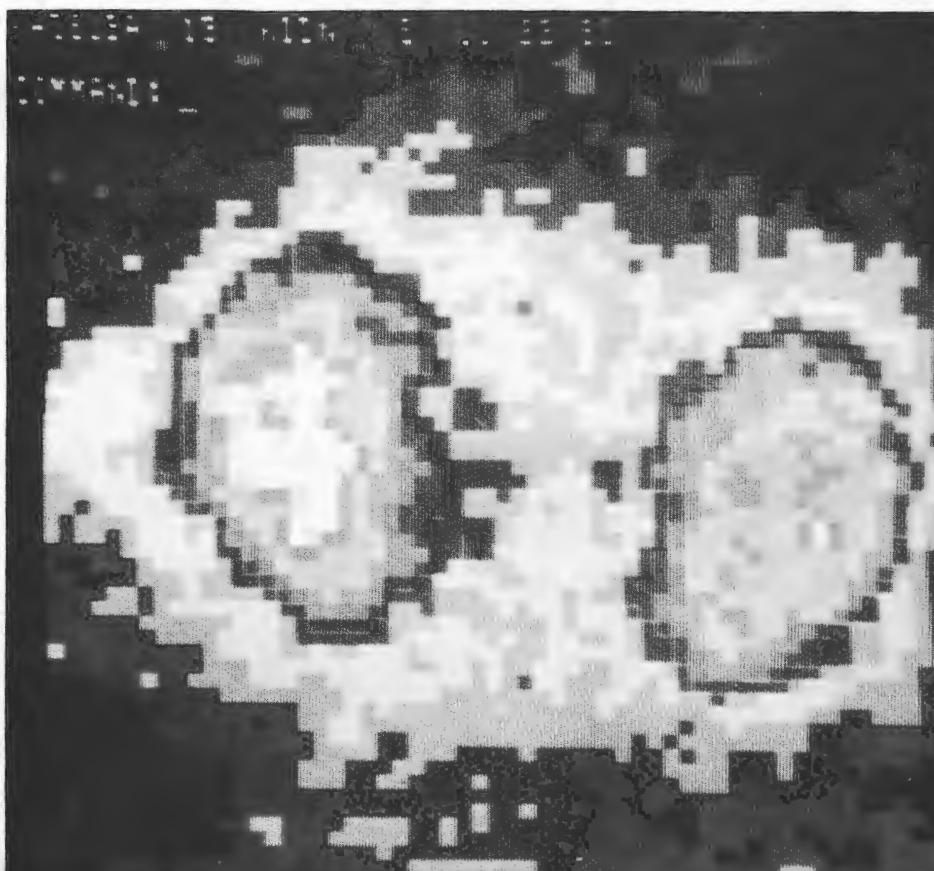
**В Лаборатории ядерных реакций выполнены новые разработки по созданию и внедрению ядерных фильтров. Установка по производству ядерных фильтров.**



Гамма-камера нового типа с высоким пространственным разрешением, созданная в ЛВЭ, предназначена для изучения структуры органов человека.



Распределение в почке человека излучения от введенного радиоактивного элемента, наблюдаемое с помощью гамма-камеры.





Завершается создание на фазотроне ОИЯИ клиничко-физического комплекса для исследования и лечения онкологических заболеваний. На снимке слева: одна из медицинских кабин комплекса.



Эксперименты по активационному анализу проводятся на микротроне МТ-22.

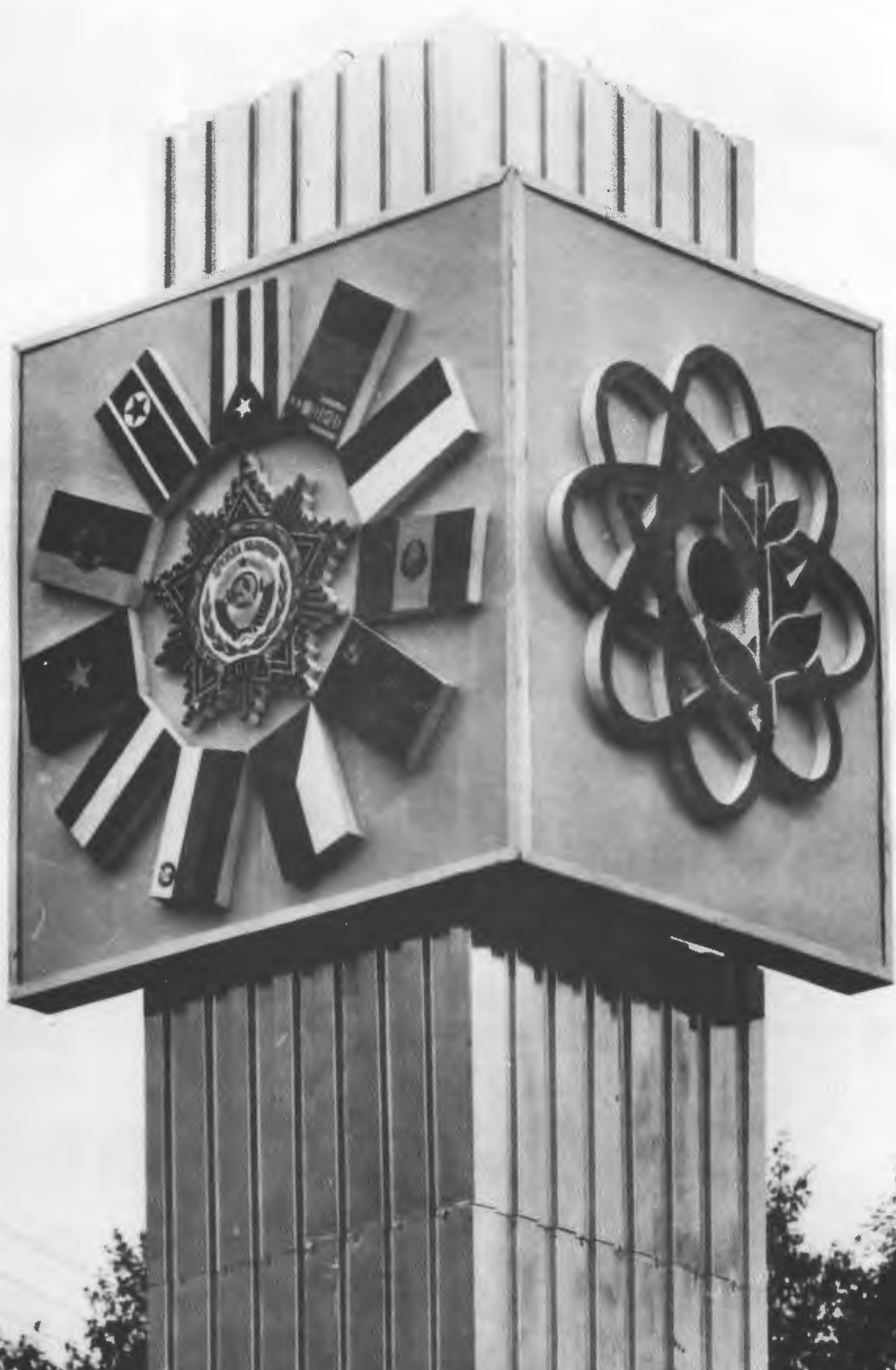


В 1984 году Лаборатория высоких энергий ОИЯИ совместно с Институтом кристаллографии имени А.В.Шубникова АН СССР завершила создание нового, более совершенного рентгеновского дифрактометра КАРД-4 на основе двумерного многопроволочного детектора и гониометра.

Высокочувствительный сверхпроводящий магнитокардиограф, разработанный в ЛНФ, значительно облегчает диагностику сердечных заболеваний.







## МЕЖДУНАРОДНЫЕ НАУЧНЫЕ СВЯЗИ

*А.И.РОМАНОВ, помощник директора ОИЯИ*

*В.С.ШВАНЕВ, начальник отдела международных связей*

Тридцатилетняя успешная деятельность Объединенного института ядерных исследований является ярким подтверждением эффективности и целесообразности международного научного сотрудничества, оно органически присуще Институту как международной организации, является основой его деятельности. Наличие в ОИЯИ уникальных экспериментальных установок, высококвалифицированного коллектива ученых создает необходимые условия для международного сотрудничества, вызывает интерес к ОИЯИ у физиков из научных центров стран-участниц и других стран. Институт успешно выполняет задачи, сформулированные в IV статье Устава: обеспечивает совместное проведение теоретических и экспериментальных исследований в области ядерной физики, содействует развитию ядерной физики в государствах — членах Института, поддерживает связи с заинтересованными национальными и международными научно-исследовательскими и другими организациями, содействует всестороннему развитию творческих способностей научно-исследовательских кадров государств — членов Института.

Международные научно-технические связи ОИЯИ непрерывно развивались и совершенствовались. В начальный период деятельности Института они осуществлялись главным образом путем обмена учеными, а также обмена научно-технической информацией, проведения совместных работ с помощью фотоэмульсионной методики и радиоактивных препаратов. В дальнейшем, благодаря вводу в строй пузырьковых камер и спектрометров, начались широкомасштабные исследования, для выполнения которых формировались большие интернациональные коллективы ученых, сотрудничество расширялось и углублялось. В настоящее время международные связи Института характеризуются большим объемом, выполнением многих десятков крупных совместных работ. Особенно большие масштабы приобрел такой вид сотрудничества, как "физика на расстоянии". Для обработки и анализа

научных данных, полученных в Дубне, были созданы многочисленные группы физиков в странах-участницах.

В настоящее время ОИЯИ поддерживает связи с более чем 200 научными центрами стран-участниц, 30 лабораториями стран, не входящих в Институт.

### **СОТРУДНИЧЕСТВО С НАУЧНЫМИ ЦЕНТРАМИ СТРАН-УЧАСТНИЦ ОИЯИ**

За истекший период Институт внес большой вклад в осуществление социалистической интеграции в науке, объединив усилия стран-участниц в решении фундаментальных проблем физики и оказав влияние на развитие науки и техники в этих странах. За 30 лет в лабораториях ОИЯИ длительное время работали более 4000 ученых и специалистов из стран-участниц ОИЯИ (не считая СССР). Плодотворность сотрудничества ученых социалистических стран внутри лабораторий Института проявилась уже в первые годы. В 1960 году была открыта новая частица микромира антисигма-минус-гиперон. Авторами открытия были физики Вьетнама, Китая, КНДР, Румынии, СССР и Чехословакии. В ряде других открытий участвовали физики Болгарии, Польши, СССР, Чехословакии и других стран. Премиями ОИЯИ отмечены исследования и разработки специалистов всех стран-участниц Института.

Каждая лаборатория Института, будучи международным научным коллективом, за истекшие годы внесла свой вклад в развитие сотрудничества с научными центрами в разных странах.

*Лаборатория теоретической физики*, являясь ведущим научным центром стран социалистического содружества в области теоретической физики элементарных частиц, атомного ядра и конденсированных сред, осуществляла постоянные контакты с научными центрами стран-участниц. Ежегодно в лабораторию приезжает около 200 специалистов стран-участниц для обсуждения научных проблем. Физики-теоретики ОИЯИ посещают институты и университеты стран-участниц, выступают на научных семинарах. ЛТФ оказала большое влияние на развитие науки в Болгарии, Вьетнаме, ГДР, Монголии, Польше, СССР, Чехословакии и других странах.

Значительный вклад в развитие международного научно-технического сотрудничества внесла *Лаборатория высоких энергий*. Основой сотрудничества лаборатории является совместное проведение экспериментов с помощью фотоэмульсионной, камерной и электронной методик. В настоящее время более половины экспериментальной информации, полученной на ускорителях Дубны и Протвино, обрабатывается в научных центрах стран-участниц. В совместных исследованиях с помощью фотоэмульсионной методики участвуют 23 лаборатории из 6 стран, с помощью пропановой камеры — 30 лабораторий из 10 стран,

водородной камеры — 17 лабораторий из 7 стран, бесфильмового искрового спектрометра БИС-2 — 16 институтов из 7 стран. Лаборатория оказала содействие в оснащении ряда научных центров стран-участниц соответствующей просмотровой и измерительной аппаратурой. С другой стороны, специалисты стран-участниц приняли активное участие в создании автоматизированных систем и математического обеспечения для обработки данных. При активном участии других научных центров успешно развивалось возникшее в лаборатории новое научное направление — релятивистская ядерная физика. Лаборатория имеет большие заслуги в объединении усилий ученых стран-участниц при проведении экспериментов на советском ускорителе протонов в Институте физики высоких энергий в Протвино.

*Лаборатория ядерных проблем* уже в первые годы существования Института организовала совместно с научными центрами Болгарии, Венгрии, ГДР, Польши, СССР, Чехословакии исследования радиоактивных нуклидов, получаемых на синхроциклотроне. Широкое научное сотрудничество осуществлялось в исследованиях короткоживущих нуклидов по программе ядерной спектроскопии на пучках протонов (ЯСНАПП). Значительный вклад внесли Карлов университет и Политехнический институт в Праге в создание установки СПИН и исследования на ней. Изохронный циклотрон У-120М был разработан и сооружен лабораторией для Института ядерной физики в Ржеже. Монгольскому государственному университету оказана помощь в создании математического обеспечения для работы спектрометров на линии с ЭВМ. Лаборатория является активным участником исследований на ускорителе Института физики высоких энергий в Протвино.

*Лаборатория ядерных реакций* при проведении научных исследований и методических разработок тесно сотрудничала с научными центрами стран-участниц, осуществляя ведущую роль в области физики тяжелых ионов. По проблемам исследования взаимодействия тяжелых ионов с ядрами, структуры атомного ядра, атомной физики лаборатория связана с научными центрами Венгрии, ГДР, Польши, СССР, Чехословакии. Вместе с Политехническим институтом в Праге были разработаны два микротрона для элементного анализа и проведения других прикладных работ. Совместно с учеными Центрального института ядерных исследований в Россендорфе был создан спектрометр продуктов ядерных реакций для исследований на У-400, со специалистами из ПНР — магнитный спектрометр-анализатор, с Центральным институтом физики СРР — каналы разводки пучков тяжелых ионов циклотрона У-400. С физиками из Института ядерных исследований в Дебрецене проводятся эксперименты на У-300 по изучению спектров электронов в ион-атомных столкновениях. С рядом научных центров стран-участниц осуществляются совместные работы по поиску сверхтяжелых элементов в природе и по прикладным исследованиям. При помощи ЛЯР в Варшавском физическом центре начато сооружение циклотрона тя-

желых ионов. Физическому институту в Ханое были поставлены микротрон и нейтронный генератор для проведения научных и прикладных работ.

*Лаборатория нейтронной физики* организовала широкое научное сотрудничество ученых стран-участниц в экспериментах на импульсных реакторах ИБР и ИБР-30, сыгравшее значительную роль в подготовке широкой программы экспериментов на уникальном импульсном реакторе ИБР-2. Научные центры Советского Союза, Польши и Венгрии приняли активное участие в создании реактора. В разработках спектрометров для исследований на ИБР-2 приняли активное участие ученые из Института ядерных исследований и ядерной энергетики БАН в Софии, Центрального института физических исследований в Будапеште, Технического университета в Дрездене, Центрального института ядерных исследований в Россендорфе, Института ядерной физики в Кракове, Института ядерной физики в Ржеже. Монгольскому государственному университету был поставлен нейтронный генератор для научных исследований и прикладных работ.

*Лаборатория вычислительной техники и автоматизации* активно сотрудничала с научными центрами стран-участниц по всем направлениям деятельности лаборатории. При непосредственном участии специалистов ГДР, ВНР, КНДР и других стран было создано базовое математическое обеспечение ЭВМ БЭСМ-6, а в сотрудничестве с научными центрами ПНР развито системное обеспечение CDC-6500. Эти разработки используются как в ОИЯИ, так и в других научных центрах стран-участниц. Центр обработки камерных снимков ОИЯИ укомплектован просмотрово-измерительным оборудованием, в том числе установками САМЕТ и "Спиральный измеритель", разработанными и изготовленными вместе с научными центрами ГДР и ЧССР.

*Отдел новых методов ускорения* вел совместные работы с научными центрами Болгарии, Венгрии, ГДР, Румынии, СССР и Чехословакии по созданию ускорителя нового типа с использованием коллективного метода ускорения. Специалисты Технического университета в Дрездене участвовали в разработке одного из самых важных узлов ускорителя — адгезатора-20, инженеры из Венгрии — в создании автоматической системы управления ускорителя. Особенно большой вклад в разработку различного оборудования внесли специалисты из Электротехнического института в Братиславе. На физическом факультете Софийского университета успешно разрабатываются узлы установки для генерации сильноточных электронных пучков.

В связи с широким научным сотрудничеством с научными центрами социалистических стран ОИЯИ ежегодно принимает только по совместным работам около 1500 физиков и инженеров в краткосрочные научные командировки, не считая СССР; 500 специалистов ОИЯИ выезжают в научные центры социалистических стран с этой же целью и для чтения лекций. Такой обмен учеными содействует оперативному реше-

нию научных и технических вопросов, повышению эффективности исследований.

Особо следует выделить сотрудничество лабораторий ОИЯИ с научно-исследовательскими организациями Советского Союза. Прежде всего необходимо отметить вклад СССР в создание базовых и экспериментальных установок ОИЯИ — технической основы для научной деятельности Института. Большое значение для Института как международной научной организации имело соглашение с Государственным комитетом по использованию атомной энергии СССР о научно-техническом сотрудничестве. Интернациональный коллектив Института получил возможность проводить эксперименты на мощном советском ускорителе протонов в ИФВЭ (Протвино). С помощью экспериментальных установок ОИЯИ там были проведены уникальные исследования, в которых участвовали физики Болгарии, Венгрии, Вьетнама, ГДР, Монголии, Польши, Румынии, Чехословакии, а также других стран. В последние годы эксперименты в ИФВЭ ведутся физиками ОИЯИ на 8-10 экспериментальных установках, для этого используется половина времени работы ускорителя. Экспериментальные данные, полученные учеными ОИЯИ в опытах на протонном ускорителе в Протвино, обрабатываются в научных центрах стран-участниц и других стран.

ОИЯИ придает большое значение сотрудничеству с такими крупными научными центрами СССР, как Институт атомной энергии им.И.В.Курчатова, Институт теоретической и экспериментальной физики, Физико-энергетический институт, Ленинградский институт ядерной физики им.Б.П.Константинова, Математический институт им.В.А.Стеклова, Институт ядерных исследований АН СССР и др.

ОИЯИ стал местом работы многих физиков из союзных республик СССР. Научно-исследовательские организации Киева, Минска, Тбилиси, Еревана, Баку, Ташкента, Самарканда, Душанбе, Алма-Аты ведут совместно с ОИЯИ теоретические и экспериментальные исследования, обработку данных с пузырьковых камер и спектрометров, разработку экспериментальных установок, используют опыт ОИЯИ в постановке научно-исследовательских и прикладных работ, создании программ научной информации.

ОИЯИ сыграл большую роль в деле подготовки высококвалифицированных научных кадров для стран-участниц. Около 400 физиков и инженеров стран-участниц защитили кандидатские и докторские диссертации по научным проблемам, разрабатываемым в ОИЯИ. По возвращении на родину многие ученые, длительное время работавшие в ОИЯИ, назначаются на руководящие научные посты, становятся директорами научно-исследовательских институтов, руководителями отделов и лабораторий, заведующими кафедрами, деканами физических факультетов. Вьетнамский физик Нгуен Дин Ты, длительное время работавший в ОИЯИ, сейчас — министр высшего и среднего специального образования СРВ, другой вьетнамский ученый — профессор Нгуен Ван Хьеу,

защитивший в ОИЯИ кандидатскую и докторскую диссертации, руководит Национальным центром научных исследований СРВ и является одновременно директором Института физики в Ханое. Он избран иностранным членом АН СССР. Монгольский физик Чойдогийн Цэрен — президент Академии наук МНР, Даржаагийн Чултэм — первый заместитель председателя Государственного комитета высшего и среднего специального образования МНР. Пак Гван О — Генеральный директор Института атомной энергии КНДР. Более 30 профессоров университетов ГДР ранее работали в ОИЯИ. Большое число ведущих болгарских физиков прошло "школу" ОИЯИ. Институт сыграл большую роль в деле подготовки кадров для Советского Союза. Бывшие сотрудники Института находятся сейчас на ответственных постах: академик А.А.Логунов — вице-президент АН СССР, ректор МГУ, директорами научно-исследовательских институтов работают А.Н.Тавхелидзе, Л.Д.Соловьев, И.В.Чувилло, Н.С.Амаглобели, Р.Г.Салуквадзе. За прошедшие 30 лет ОИЯИ внес значительный вклад в социалистическую интеграцию в области науки, в укрепление сотрудничества и дружбы между учеными стран-участниц Института и других стран. За активное участие в подготовке высококвалифицированных научных кадров и развитии научно-технического сотрудничества социалистических стран ОИЯИ награжден советским орденом Дружбы народов и вьетнамским орденом Дружбы. Процесс подготовки кадров продолжается. ОИЯИ успешно выполняет свою задачу "содействовать всестороннему развитию творческих способностей научно-исследовательских кадров государств — членов Института".

Традиционные связи ОИЯИ имеет с Постоянной комиссией СЭВ по мирному использованию атомной энергии. Представители ОИЯИ приглашаются на заседания Комиссии в качестве наблюдателей. С другой стороны, представитель СЭВ участвует в качестве наблюдателя в сессиях Ученого совета ОИЯИ и совещаниях высшего органа Института — Комитета Полномочных Представителей государств — членов ОИЯИ.

### *СВЯЗИ ОИЯИ С НАУЧНЫМИ ЦЕНТРАМИ СТРАН, НЕ ЯВЛЯЮЩИХСЯ УЧАСТНИЦАМИ ИНСТИТУТА*

Институт имеет широкое сотрудничество с научными центрами стран, не являющихся участницами Института, в котором особое место занимает Европейская организация ядерных исследований (ЦЕРН, Женева). Многие физики Объединенного института ядерных исследований длительное время работали в различных лабораториях ЦЕРНа и посещали этот центр с краткосрочными визитами. С другой стороны, некоторые ученые стран-участниц ЦЕРНа на длительное время приезжали в ОИЯИ, посещали Институт с целью ознакомления с его деятель-

ностью. Связи ОИЯИ с ЦЕРНом укрепились в процессе подготовки и проведения крупномасштабного мюонного эксперимента на протонном суперсинхротроне с помощью совместно созданной уникальной установки — тороидального спектрометра.

Один раз в два года ОИЯИ и ЦЕРН поочередно организуют школы молодых физиков, которые были проведены в Финляндии, Болгарии, Дании, Советском Союзе, Греции, Венгрии, Чехословакии. ОИЯИ и ЦЕРН являются инициаторами совместного проведения встреч ведущих ученых мира по перспективам физики высоких энергий. Первая такая встреча состоялась в Риге в 1967 году, и организатором ее был ОИЯИ. В 1976 году семинар был проведен в Тбилиси. Последний семинар ведущих ученых был организован в Японии в 1984 году.

Новым этапом сотрудничества ОИЯИ и ЦЕРНа является проведение крупного совместного эксперимента на строящемся в ЦЕРНе ускорительном комплексе LEP с помощью установки DELPHI. В этом эксперименте примет участие еще более многочисленная группа специалистов Института из разных стран.

Эффективно осуществлялись научные связи с итальянскими научными центрами. В течение 12 лет итальянские физики из Турина и Фраскати участвовали в экспериментах на синхроциклотроне Лаборатории ядерных проблем по изучению взаимодействий  $\pi$ -мезонов с гелием-4 и гелием-3. Сейчас с помощью совместно разработанной методики ученые успешно ведут эксперименты по исследованию взаимодействия медленных антипротонов с легкими ядрами на установке LEAR в ЦЕРНе. Успешно осуществлен совместный эксперимент с итальянскими физиками из Милана и Болоньи на протонном синхротроне Института физики высоких энергий в Протвино с помощью магнитного искрового спектрометра (МИС) ОИЯИ.

В течение многих лет ОИЯИ сотрудничает с научными центрами Франции, в том числе с Национальным институтом физики ядра и физики частиц, включающем в себя ряд лабораторий Франции. В 1972 и 1973 гг. на циклотроне для ускорения тяжелых ионов У-300 ОИЯИ были проведены совместные исследования ядерных реакций с тяжелыми ионами с помощью французского спектрометра. В экспериментах приняла участие большая группа французских физиков из Лаборатории ядерной спектроскопии в Орсе. В последние годы ОИЯИ вновь поддерживает с этой лабораторией активные связи. Совместно создан электростатический спектрометр, на котором в Лаборатории ядерных проблем ведутся исследования свойств нейтрино. Совместные работы проводились также с учеными ядерных центров в Сакле, Страсбурге, с физиками Университета в Париже, Института Анри Пуанкаре, имеются контакты с Национальным центром по физике тяжелых ионов в Кане (Нормандия). Лаборатория нейтронной физики в течение многих лет выполняла совместные научные исследования с Институтом ядерной физики им.М.Лауэ и П.Ланжевена в Гренобле.



Первые совместные с научными центрами США эксперименты по измерению электромагнитного радиуса  $\pi$ -мезона были проведены на ускорителе ИФВЭ (Протвино). После запуска в 1972 г. в Национальной ускорительной лаборатории им.Э.Ферми (Батавия) нового крупного ускорителя в течение нескольких лет была проведена серия совместных работ по исследованию упругого и неупругого рассеяния протонов на протонах с помощью уникальной аппаратуры, разработанной в Дубне. В этой же лаборатории группа физиков ОИЯИ участвовала в экспериментах по измерению электромагнитного радиуса  $\pi$ -мезона и К-мезона. В 1983-1984 гг. на синхрофазотроне ОИЯИ и на ускорителе в Протвино были проведены совместно с американскими физиками эксперименты по изучению эффектов каналирования заряженных частиц в монокристалле при высоких энергиях. Работы привели к открытию явления отклонения заряженных частиц с помощью изогнутого монокристалла.

Ряд совместных работ ОИЯИ провел с научными центрами Финляндии, включая исследования взаимодействия антипротонов с протонами и антидейтронов с дейтронами с помощью водородной камеры "Людмила", эксперименты на магнитном искровом спектрометре (МИС).

С 1975 г. Лаборатория ядерных проблем поддерживает связи с Сассекским университетом в Брайтоне (Великобритания) в исследованиях короткоживущих ориентированных ядер.

Теоретики Института проводят совместные работы в области физики конденсированных сред с югославскими коллегами из Института ядерных наук им.Б.Кидрича. Несколько лет тому назад ученые из Института физики в Белграде присоединились к работам в области релятивистской ядерной физики, выполняемым на пропановой пузырьковой камере ОИЯИ.

Ряд индийских физиков из Дели, Бомбея, Калькутты, Чандигарха, Курукшетры длительное время работали в различных лабораториях Института. Лаборатория высоких энергий провела ряд совместных экспериментов с физиками из университетов Чандигарха и Курукшетры в области релятивистской ядерной физики с помощью камерной и фотоэмульсионной методики.

ОИЯИ поддерживает также научные контакты с институтами ФРГ в Дармштадте, Карлсруэ, Мюнхене, Юлихе. Традиционные связи осуществляются с Институтом Нильса Бора в Копенгагене, международным центром теоретической физики в Триесте, Швейцарским институтом ядерных исследований в Цюрихе, Каирским университетом и Атомным исследовательским центром АРЕ, Резерфордской лабораторией (Великобритания) и другими.

В качестве стипендиатов в ОИЯИ работали физики Индии, Финляндии, Югославии, Алжира, Бразилии, Египта, Пакистана, Австрии.

Три стипендии предоставлено Международному агентству по атомной энергии в Вене.

Ежегодно в ОИЯИ с целью выполнения совместных работ, обсуждения научных проблем, чтения лекций бывает более 100 ученых из стран, не являющихся членами ОИЯИ.

### *МЕЖДУНАРОДНЫЕ НАУЧНЫЕ КОНФЕРЕНЦИИ ОИЯИ*

Важную роль в развитии международного научного сотрудничества играют научные совещания, организуемые ОИЯИ. Ежегодно Институт проводит четыре-пять крупных научных конференций, симпозиумов, школ по актуальным проблемам физики элементарных частиц, атомного ядра и конденсированных сред, ядерной электронике, научно-техническим проблемам, прикладным работам. Кроме того, ОИЯИ организует свыше 20 рабочих научных совещаний в год по отдельным направлениям исследований, осуществляемым с помощью пузырьковых камер, спектрометров, а также по методическим вопросам.

Объединенный институт ядерных исследований участвовал в крупнейших международных и национальных научных конференциях и симпозиумах. Ежегодно Институт направлял свои делегации примерно на 75 совещаний, проходивших в странах-участницах, и на 25 конференций — в других странах.

Традиционным стало участие ученых ОИЯИ в международных конференциях по физике высоких энергий, ядерной физике, ядерной электронике, физике низких температур. Сотрудники ОИЯИ представляют на эти конференции доклады о результатах последних теоретических и экспериментальных исследований, методических разработках.

ОИЯИ имеет хорошую базу для дальнейшего развития международного научного сотрудничества. Деятельность Института, его международные связи соответствуют интернациональным принципам и отвечают национальным интересам стран-участниц. Международное сотрудничество Института в последующие годы будет направлено на еще более эффективную эксплуатацию его уникальных базовых установок, создание новых экспериментальных установок, вычислительных мощностей, более полное использование интеллектуального и научно-технического потенциала ОИЯИ для решения фундаментальных проблем физики и их практического применения.

Объединенный институт имеет все возможности и в дальнейшем содействовать социалистической интеграции в области ядерной физики и использовать ее достижения для ускорения научно-технического прогресса, для развития международного научно-технического сотрудничества и связей, дружбы и взаимопонимания между народами.



Объединенный институт ядерных исследований является организатором многих крупных совещаний, некоторые из них стали традиционными. В августе 1979 года в Дубне состоялся Международный симпозиум по фундаментальным проблемам теоретической и математической физики, в работе которого приняли участие видные ученые стран-участниц ОИЯИ, а также США, Западной Европы и Японии. Выступает академик В.А.Амбарцумян (верхний снимок). Участники симпозиума – вице-президент АН СССР академик А.А.Логунов, директор ОИЯИ академик Н.Н.Боголюбов и директор ИЯИ АН СССР член-корреспондент АН СССР А.Н.Тавхелидзе (снимок справа). Многие доклады были посвящены развитию основополагающих идей и методов крупнейшего советского математика, механика и физика академика Н.Н.Боголюбова. На нижнем снимке – академики В.А.Амбарцумян и Н.Н.Боголюбов.







В работе Международной школы по структуре ядра, проходившей в Алуште в апреле 1980 года, приняли участие 160 физиков из стран-участниц ОИЯИ и других стран. Открываете школы. Выступает председатель оргкомитета профессор В.Г.Соловьев.



Академики П.А.Черенков и И.М.Франк в перерыве между заседаниями.



Доклад делает доктор физико-математических наук И.Н.Михайлов.



В августе 1984 года в Дубне состоялся III Международный симпозиум по избранным проблемам статистической механики. Его высокий научный уровень определялся как программой, так и составом участников, многие из которых являются признанными лидерами научных направлений. Академики Н.Н.Боголюбов и С.П.Новиков на пленарном заседании симпозиума.



Доклад делает вице-президент АН СССР академик А.А.Логанов.

В кулуарах симпозиума: кандидат физико-математических наук В.И.Юкалов и член-корреспондент АН СССР Н.Н.Боголюбов (мл.).





**VII Международное совещание по проблемам квантовой теории поля (апрель 1984 года, Алушта) было организовано по инициативе теоретиков Дубны. В работе совещания приняли участие 120 ученых из ОИЯИ, научных центров стран-участниц Института, а также Великобритании, Нидерландов и Швеции. Дискуссию ведет академик Л.Д.Фаддеев.**

**Профессор И.Нидерле (ЧССР) беседует с членами оргкомитета совещания П.Н.Боголюбовым и А.Е.Дороховым.**



Академик Л.И.Седов и старший научный сотрудник ЛТФ В.К.Мельников.



Участники совещания.







Международные школы физиков проводятся совместно Объединенным институтом ядерных исследований и Европейской организацией ядерных исследований (ЦЕРН) каждые два года. Участники школы ОИЯИ-ЦЕРН, проходившей в июне 1983 г. в Таборе (ЧССР).

ОИЯИ осуществлял научно-организационную работу, связанную с проведением XVIII Международной конференции по физике высоких энергий (Тбилиси, 1976 год). На снимке справа: открытие конференции.



XII Международный семинар по проблемам физики высоких энергий проходил в Дубне с 19 по 23 июня 1984 года. Основная тема семинара – кварковая структура ядер и экзотические многокварковые состояния ядерной материи. В работе семинара приняли участие более 200 ученых, представляющих 64 научных центра из 15 стран мира. Заседание семинара ведет академик А.М.Балдин.





**Просмотр и измерение фотографий с двухметровой пропановой камеры и установки РИСК с помощью измерительного стола БПС-75 в секторе высоких энергий Института ядерных исследований и ядерной энергетики Болгарской академии наук (София).**

**Обсуждение результатов совместных исследований, полученных на установке БИС-2 ОИЯИ, в секторе физики высоких энергий ИЯИЯЭ БАН.**



Исследования в области ядерной спектроскопии проводятся с помощью магнитного бета-спектрометра  $2\pi\sqrt{2}$ . Обсуждение эксперимента.

НРБ



В ИИЯЭ БАН и Софийском университете ведутся работы по совершенствованию технологии изготовления полупроводниковых детекторов путем внедрения ионов примеси в образцы, изготовленные в ОИЯИ. Масс-сепаратор ИИЯЭ БАН, предназначенный для проведения исследований в области ионной имплантации различных материалов.



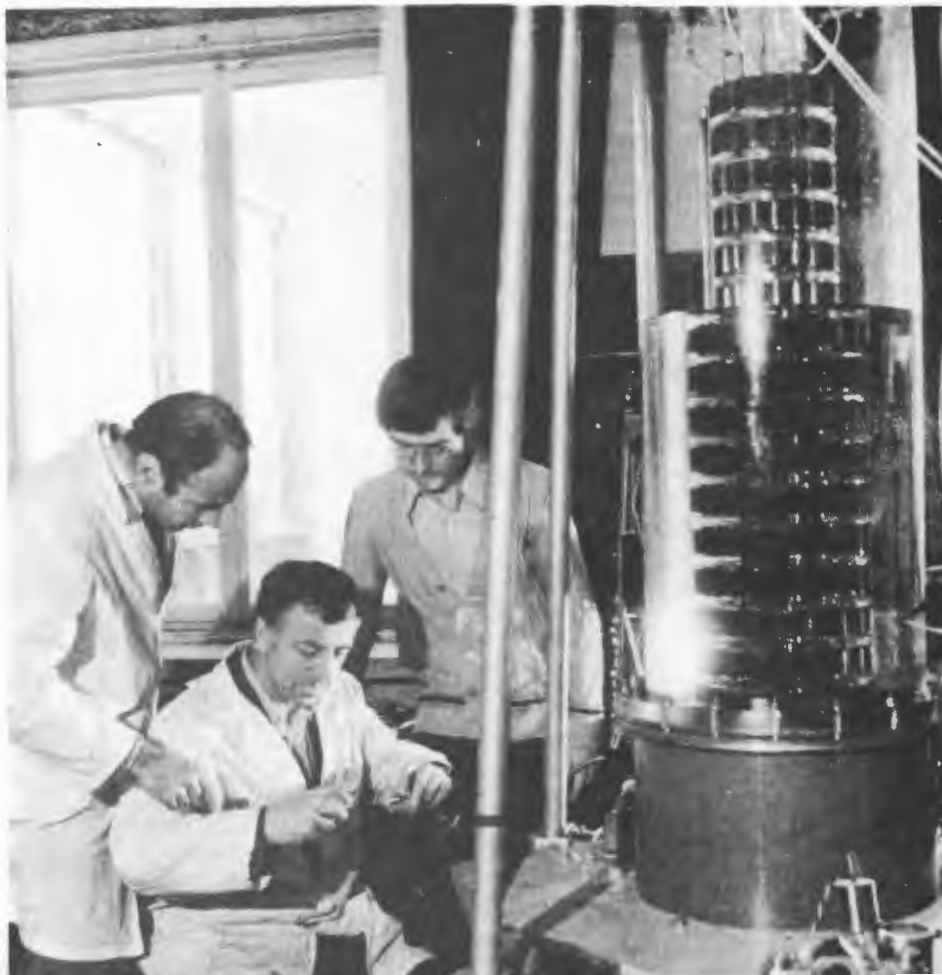


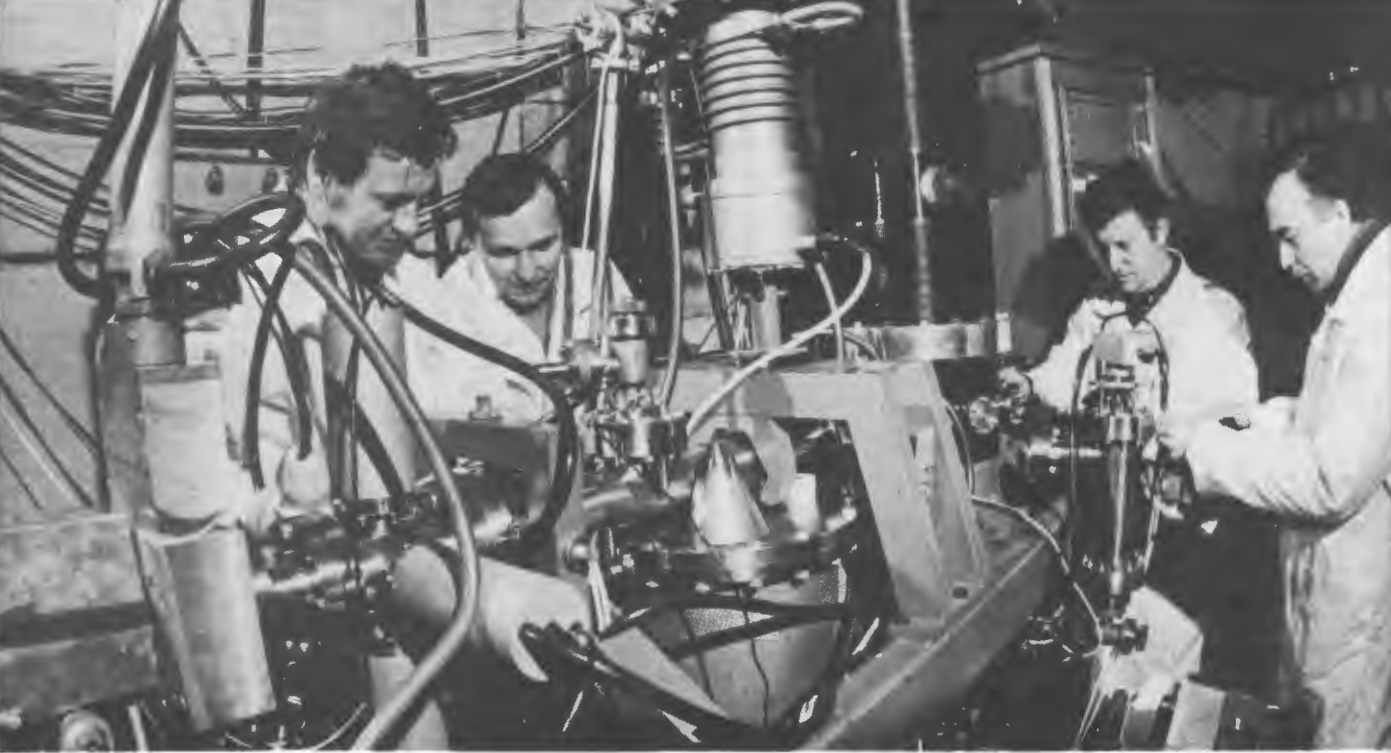


За большой вклад в развитие физической науки в Болгарии, подготовку высококвалифицированных научных кадров группа ученых ОИЯИ награждена болгарскими орденами Кирилла и Мефодия 1 степени. Вручение наград послом НРБ в СССР Д.Жулевым.

Основная базовая установка ИИЯЭ БАН — исследовательский реактор ИРТ-200 (снимок слева).

Одна из установок для проведения исследований на реакторе ИРТ-200.



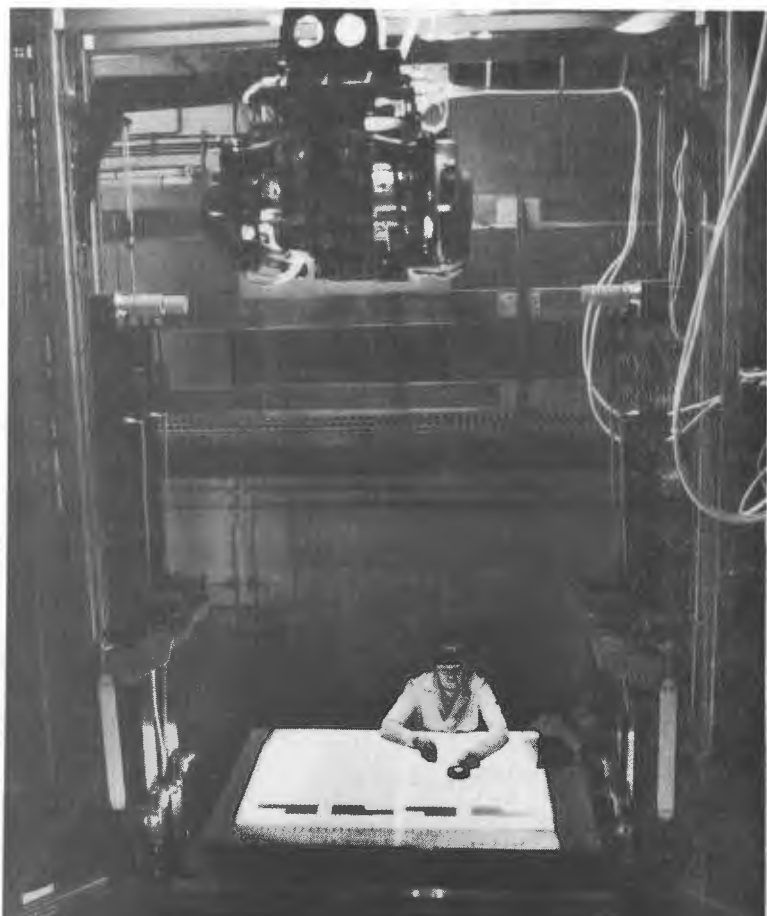


На пучке ускорителя У-300 успешно запущен электростатический спектрометр ЭСА-21 для исследований в области атомной физики, изготовленный в Институте ядерных исследований Венгерской академии наук.



ВНР

Сверхпроводящий магнитный спектрометр электронов на пучке ускорителя на 5 МэВ Института ядерной физики (Дегрецен).

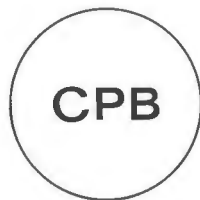


В работах по развитию автоматических и полуавтоматических систем обработки камерных снимков принимают активное участие венгерские специалисты. Измерительный прибор "Рима" изготовлен в Центральном институте физических исследований (Будапешт) для обработки снимков с трековых детекторов ОИЯИ.





Для многих специалистов стран-участниц ОИЯИ стал школой высшей квалификации. Успешно защитили диссертации на соискание ученой степени доктора физико-математических наук теоретики из СРВ Нгуен Тхи Хонг и Во Хонг Ань. Нгуен Тхи Хонг во время защиты диссертации (слева); Во Хонг Ань на семинаре в отделе теории атомного ядра ЛТФ (внизу).





В течение многих лет вьетнамские научные сотрудники вели в ЛЯР ряд важных для развития экономики Вьетнама работ по активационному анализу.



Ученые и специалисты научных центров ГДР принимают участие в выполнении 67 тем плана научно-исследовательских работ ОИЯИ. Плодотворно развивается сотрудничество с Центральным институтом ядерных исследований в Россендорфе. На снимке: исследовательский реактор ЦИЯИ.



Спектрометр для определения времени жизни нейтрона.





В ЦИЯИ проведены испытания ионизационной камеры для установки ДЭМАС.



В одном из отделов ЦИЯИ ведутся исследования по определению загрязнения жидкого натрия, используемого для охлаждения реактора ИБР-2.



**Институт физики высоких энергий в Цойтене активно участвует в программе исследований в области физики высоких энергий. Участники эксперимента на установке РИСК обсуждают результаты исследований.**

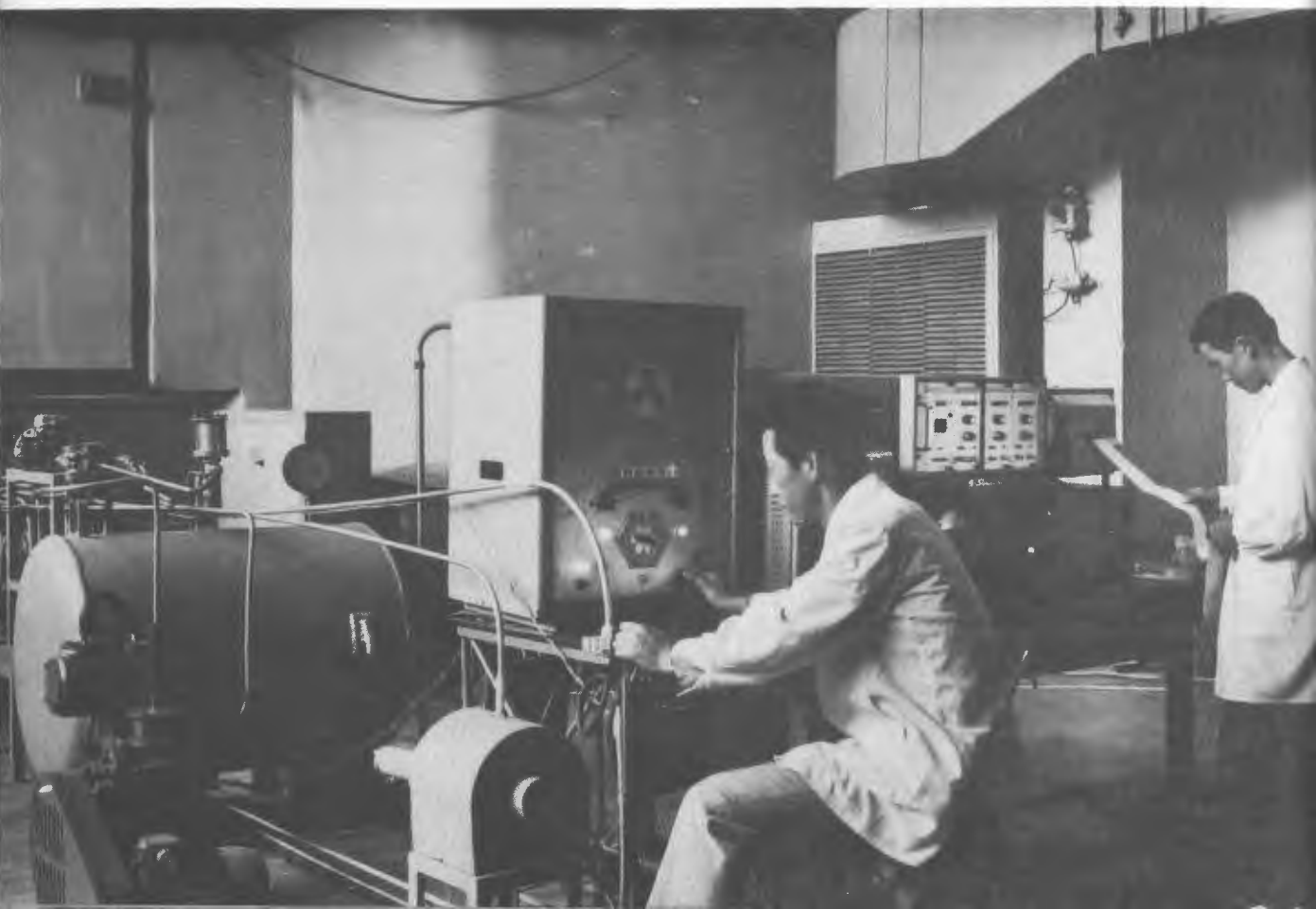
**В 1979 году в Цойтене введен в действие измерительный комплекс, который в настоящее время является одним из самых мощных центров по обработке фильмовой информации с установки РИСК и других установок ОИЯИ.**







Основная базовая установка  
Института ядерной физики  
ГКАЭ КНДР — исследова-  
тельный реактор ИРТ-М  
мощностью 4 МВт.



Установка с пневмопочтой  
для нейтронного активаци-  
онного анализа, установлен-  
ная на одном из горизон-  
тальных каналов реактора  
ИРТ-М.

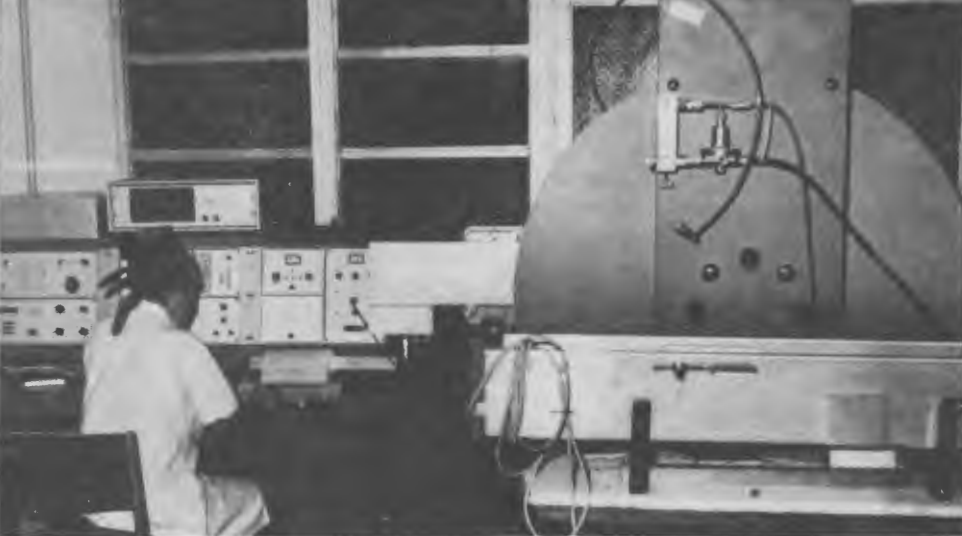
На ускорителе университета им.Ким Ир Сена (Пхеньян) проводятся совместные с Лабораторией нейтронной физики работы по рентгенофлуоресцентному анализу на протонах.

КНДР

По технической документации, переданной Объединенным институтом, в университете им.Ким Ир Сена изготовлен микротрон. Ведется наладка микротрона.







Эксперименты по ядерно-магнитному резонансу стабильных ядер на установке СХР-90.

Мессбауэровский спектрометр с источником  $^{57}\text{Co}$  предназначен для определения содержания железа в твердых образцах.



Плодотворное научное сотрудничество Республики Куба с Объединенным институтом ядерных исследований открыло широкие возможности для развития фундаментальных и прикладных исследований в различных областях физики элементарных частиц и атомного ядра. На установке МРХ-Гамма-25М ведутся исследования в области биологии и медицины по изучению воздействия излучения на растения и микроорганизмы.



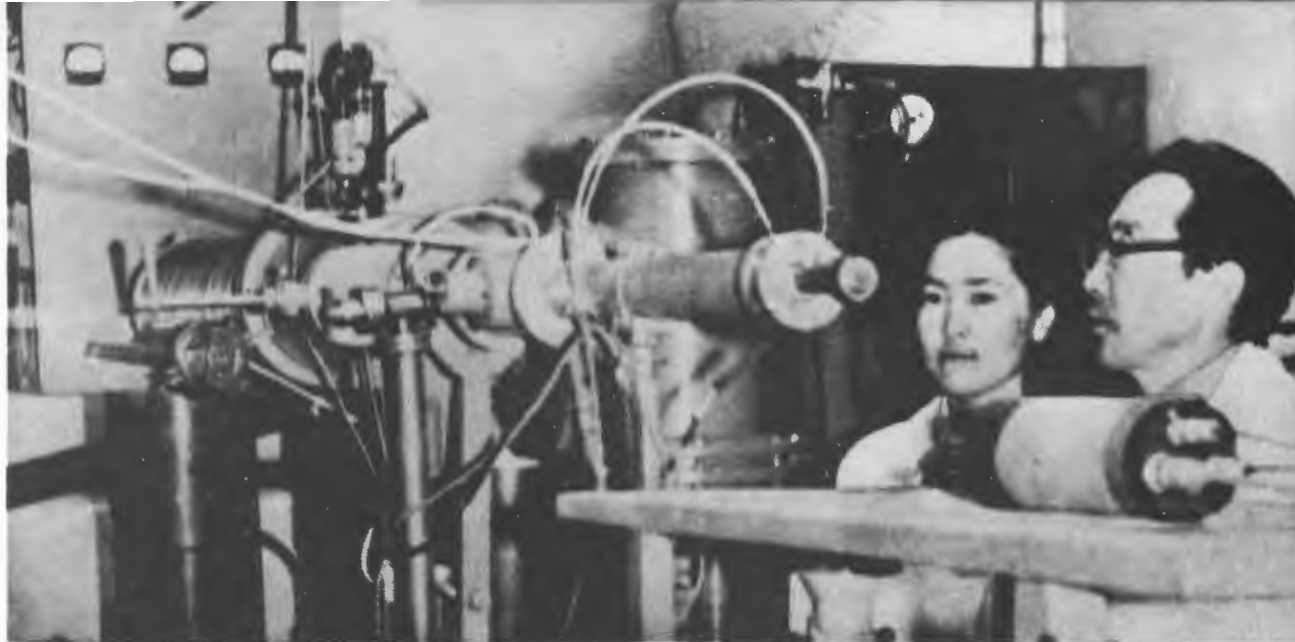


В Монгольском государственном университете успешно проводятся прикладные исследования с использованием рентгенофлуоресцентного спектрометра, Ge(Li)-спектрометра и малой ЭВМ PDP-11/04.

МНР

Нейтронный генератор лаборатории ядерных исследований Монгольского государственного университета.





Лаборатория ядерных исследований Монгольского государственного университета, созданная с помощью ОИЯИ, стала не только центром подготовки национальных кадров, но и главной базой для развития экспериментальной ядерной физики страны. На нейтронном генераторе лаборатории ведутся исследования по спектроскопии короткоживущих радиоактивных ядер и нейтронно-активационному анализу геологических и промышленных образцов.



Электромагнитный сепаратор для разделения изотопов, работающий в Институте ядерных проблем в Сверке, предназначен для ионного легирования полупроводников.

ПНР

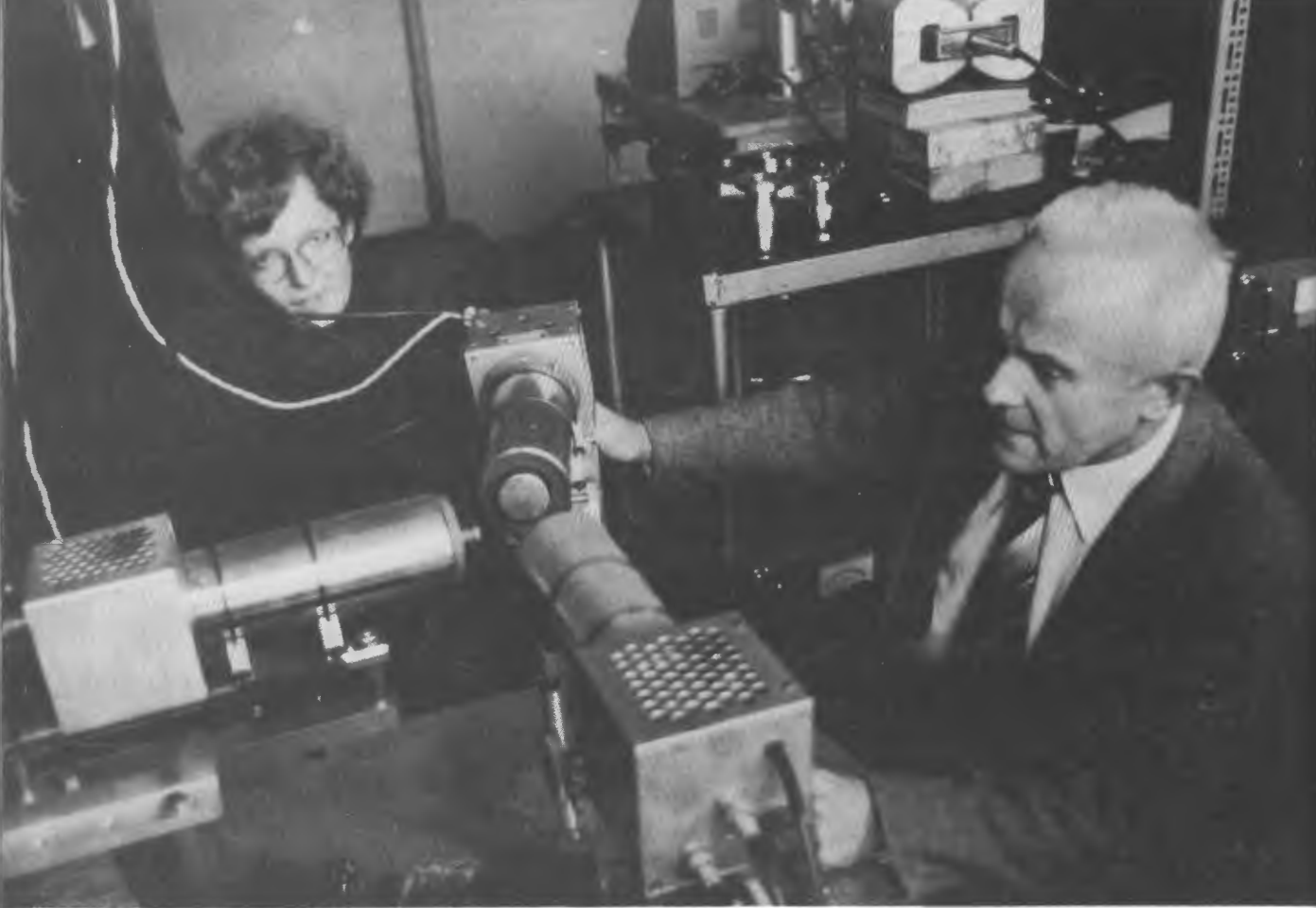
Важное место в сотрудничестве ОИЯИ с польскими научными центрами занимают исследовательские институты в Сверке: Институт ядерных проблем и Исследовательский реактор "Мария" в ИАЭ.

Вручение диплома почетного доктора Варшавского университета директору Объединенного института ядерных исследований академику Н.Н.Боголобову.



Совместно с сотрудниками ИЯП на стенде ЛВЭ проведено испытание мишенной станции для спектрометра ядер отдачи.





Плодотворное научное сотрудничество осуществляется с Институтом ядерной физики (Краков). Руководитель отдела ИЯФ академик А.Хрынкевич по время измерений на установке для исследования радиационных дефектов в кристаллах.

В Институте ядерной физики ведутся работы по реконструкции ускорителя У-120 в изохронный циклотрон У-144.

В отделе радиационной биологии ИЯФ проводятся исследования биологического воздействия нейтронов и  $\gamma$ -излучений. В опытах используются модельные растения, обладающие повышенной чувствительностью к излучению.



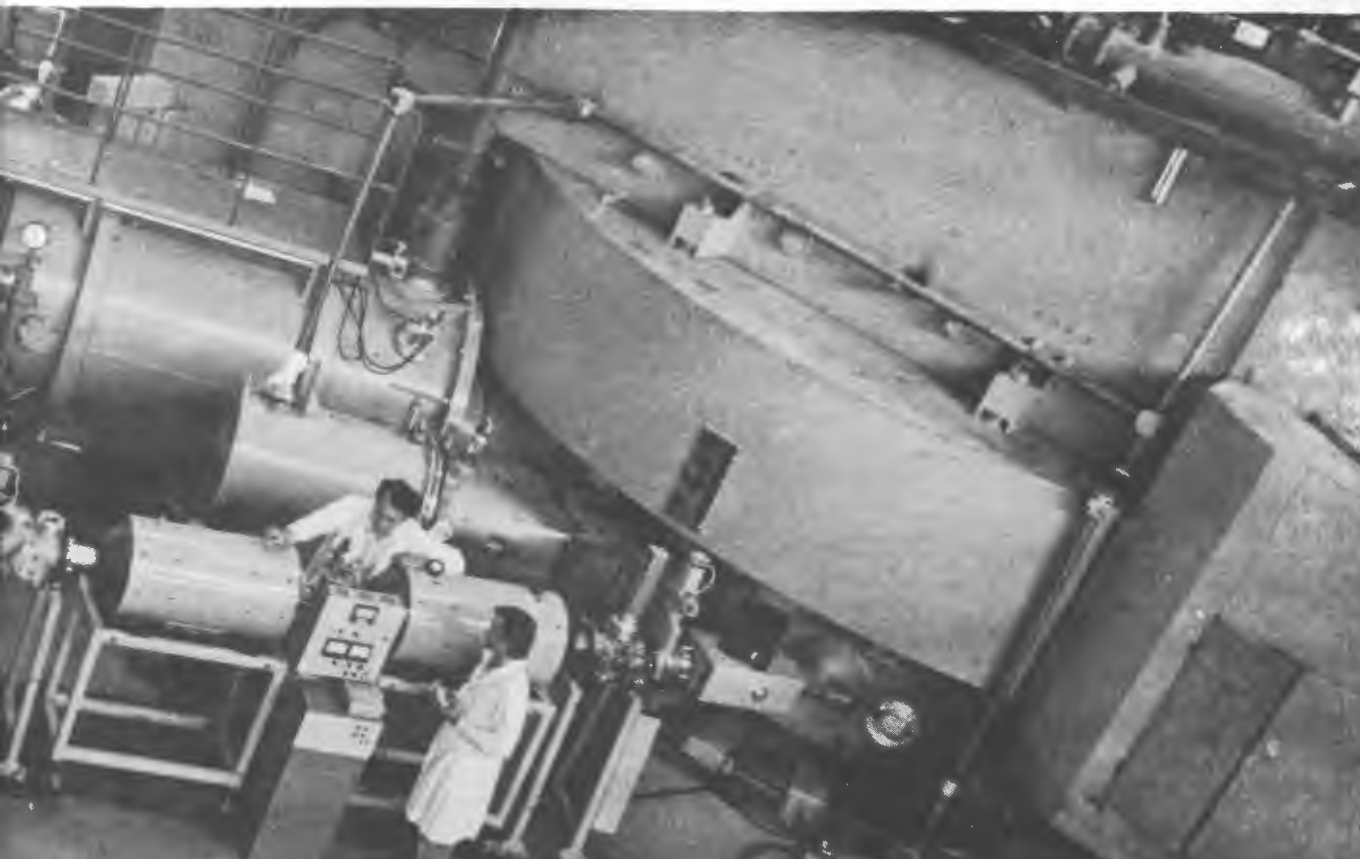
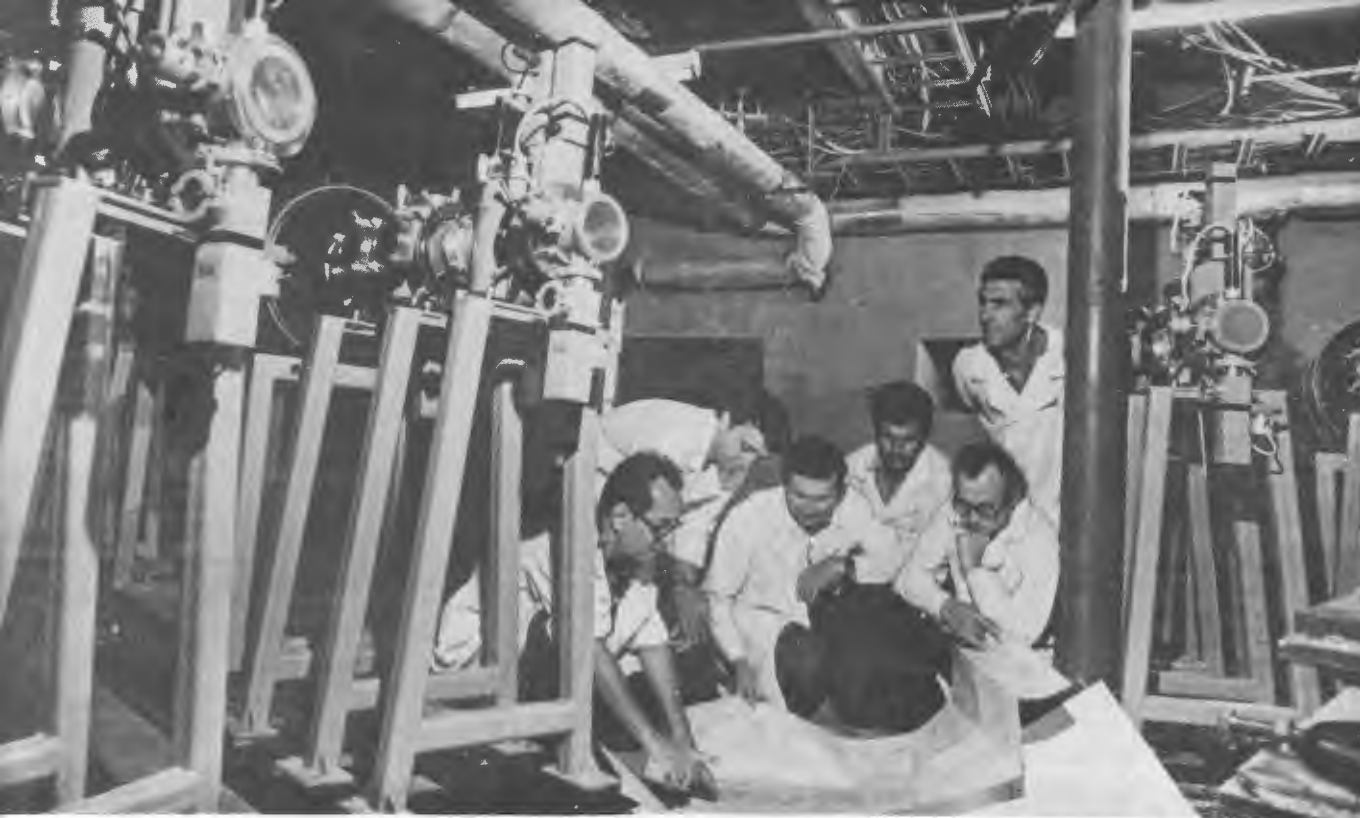


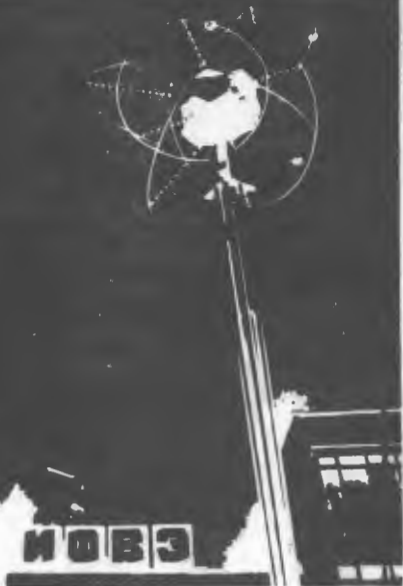


ССР

Завершена большая совместная работа сотрудников ОИЯИ и Центрального института физики в Бухаресте по созданию системы транспортировки пучков ускорителя У-400. Испытание в ЦИФ магнитных линз для системы транспортировки пучков (слева), монтаж системы транспортировки пучков (справа), канал вывода пучка из ускорителя (внизу).





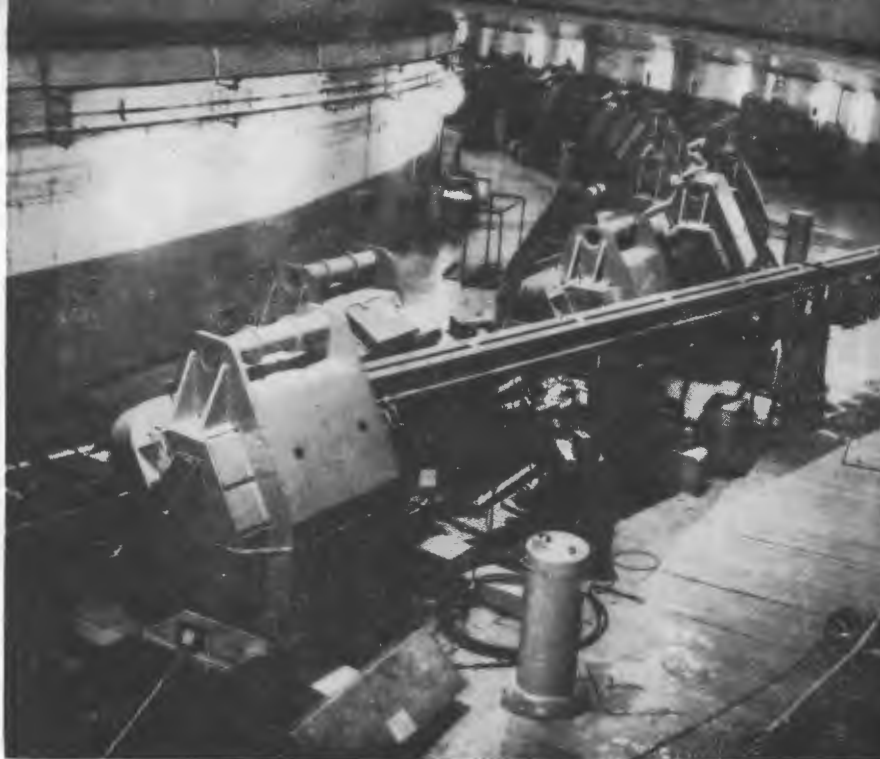


Научные связи ОИЯИ с Институтом физики высоких энергий в Протвино являются исключительно важными для проведения исследований в области физики высоких энергий. Ученые ОИЯИ широко используют ускоритель ИФВЭ для проведения своих исследований. Работа в экспериментальном зале ИФВЭ ведется и ночью.



Делегация ОИЯИ во главе с директором Института академиком Н.Н.Боголюбовым знакомится с работами, проводимыми в Институте ядерных исследований АН СССР (Москва).

**Интенсивно и плодотворно развиваются научные связи с Институтом теоретической и экспериментальной физики (Москва). На снимке: протонный синхротрон ИТЭФ на энергию 10 ГэВ.**



**Тесные связи поддерживаются между теоретиками Объединенного института и Математического института им. В.А.Стеклова АН СССР. Выступает академик Н.Н.Боголюбов.**





Ученые ОИЯИ ведут совместные работы с Ленинградским институтом ядерной физики им.Б.П.Константинова АН СССР по изучению взаимодействий мезонов и нуклонов с нуклонами и ядрами, исследованию реакции обратного электророжения пионов, изучению свойств нейтронодефицитных изотопов.



Директор ЛИЯФ АН СССР О.И.Сумбаев знакомит делегацию ОИЯИ с достижениями Института (Гатчина, 1981 г.).



**Сотрудничество ОИЯИ с Радиевым Институтом им.В.Г.Хлопина (Ленинград) имеет давние и плодотворные традиции. Семинар, посвященный 40-летию открытия спонтанного деления. Выступает академик Г.Н.Флеров.**



**Институт ядерных исследований АН УССР связывает с ОИЯИ многолетнее научное сотрудничество. Проверка работы узлов устройства для облучения мишеней на циклотроне ИЯИ АН УССР.**



Объединенный институт сыграл заметную роль в развитии ядерной физики во многих республиках Советского Союза. Исследовательский реактор ВВР-С Института ядерной физики АН Узбекской ССР (снимок справа).

Ряд интересных совместных исследований был проведен в сотрудничестве с учеными из Армении. Фрагмент кольца синхротрона Ереванского физического института на энергию электронов 6 ГэВ; обсуждение результатов ведут сотрудники Ереванского государственного университета.









Хорошей традицией стало научное сотрудничество Объединенного института ядерных исследований с Тбилисским государственным университетом.

В лаборатории ядерной физики Тбилисского государственного университета была разработана пропановая пузырьковая камера для экспериментов на синхротроне ОИЯИ.

Тесные научные контакты поддерживает с Объединенным институтом Академия наук Азербайджанской ССР. Здание Президиума Академии наук Азербайджана.



Президент АН АзССР академик Э.Ю.Салаев и директор ЛВЭ академик А.М.Балдин на пульте синхрофазотрона.





Более 30 научных учреждений Чехословакии участвуют в проведении совместных с ОИЯИ экспериментальных и теоретических исследований. Чехословацкие ученые и специалисты внесли большой вклад в создание многих установок Объединенного института. На снимке: установка "Гиперон".



Совместными усилиями сотрудников ЛНФ и специалистов Политехнического института в Праге под руководством профессора Ч.Шимане разработан и изготовлен прецизионный гониометр для исследования монокристаллов на пучке реактора ИБР-2.



Ряд известных ученых ОИЯИ избран в Чехословацкую академию наук, удостоен почетных дипломов ЧССР. На снимке: вручение диплома почетного доктора Политехнического института в Праге академику Г.Н.Флерову.



Спектрометр редких событий АРЕС.



Циклотрон У-120М в Ржеже был разработан и изготовлен в ОИЯИ при активном сотрудничестве со специалистами Института ядерной физики (Ржеж).





Физики ОИЯИ в рамках советско-американского сотрудничества участвовали в исследованиях на ускорителе ФНАЛ (Батавия).

Крупным по масштабу является совместный мюонный эксперимент ОИЯИ-ЦЕРН. На снимках: тороидальный спектрометр для эксперимента NA-4.



В ОИЯИ продолжается подготовка к крупному эксперименту на встречных электрон-позитронных пучках ускорителя LEP в ЦЕРНе (установка DELPHI). Обсуждение технических вопросов и планов работ по созданию в Дубне адронного калориметра для установки DELPHI.



ОИЯИ поддерживает плодотворные связи с научными центрами Франции. На снимках: обсуждение вопросов сотрудничества между коллективами Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ и ускорительного комплекса GANIL (слева), обсуждение перспектив сотрудничества в области физики низких энергий между ЛЯП ОИЯИ и Центром ядерной спектроскопии и масс-спектрометрии (Орсе) (внизу).



## ДУБНА. ШТРИХИ К ПОРТРЕТУ

*А.С.ГИРШЕВА, редактор еженедельника "Дубна: наука, содружество, прогресс"*

Город мирного атома, столица науки, "мекка" физиков, жемчужина северного Подмосковья — каких только названий не устаивалась Дубна за свои 30 лет! Почти каждый побывавший здесь журналист с восторгом сообщал своим читателям, что на улицах Дубны звучит разноязыкая речь и привокзальное кафе называется "Нейтрино", от плавательного бассейна "Архимед" рукой подать до реки Волги, что в одном из высотных домов города есть отличный книжный магазин с задорным названием "Эврика"... Благодаря популярной телепередаче "Очевидное — невероятное" повсюду стало известно, что велосипедистов в Дубне больше, чем пешеходов, а кинодокументалисты пытались показать, что за соснами почти не видны дубненские новостройки...

Да, многими неповторимыми чертами, лица необщим выражением отличается Дубна.

За 30 лет неузнаваемо изменился внешний облик города, выросли многоэтажные дома, поднялись новые корпуса лабораторий. Ветераны Института с умилением теперь вспоминают, что когда-то в городе было всего несколько улиц: Южная, Центральная, Парковая (сейчас они носят имена выдающихся ученых — Курчатова, Векслера, Жолио-Кюри), старожилы рассказывают, что в центре Дубны было всего несколько двухэтажных каменных домов, а вокруг толпились низкорослые деревянные постройки, простирались болота и леса. Даже не верится сейчас, что в первые годы существования ОИЯИ поездка в Москву на автобусе была целым событием и что при образовании Лаборатории нейтронной физики в ней насчитывалось всего три сотрудника...

Да, множество событий произошло в жизни города за 30 лет, но неизменным было, есть и будет одно: неповторимая атмосфера Дубны, в которой совершаются открытия мирового значения, — атмосфера научного поиска, дружбы, интернационализма, сотрудничества.

"Дубна является не только городом, где слова "дружба", "интернационализм", "сотрудничество" приобретают совершенно конкретный смысл, — в ходе работы здесь возникают дружеские связи, которые, что особенно важно для молодых людей, сохраняются на всю жизнь.

Дубна — магнит и мечта для всех, кто хочет углубиться в изучение материи. Это неудивительно. Здесь есть все условия для работы, для проявления способностей и овладения новыми знаниями. Но, я думаю, притягательная сила Дубны заключается и в другом. Здесь живут люди сердечные и гостеприимные, здесь течет великая река Волга, вокруг прекрасные поля и леса, здесь много построено и еще больше строится... В Дубне я узнал, почувствовал душу русского человека, полюбил русскую землю”.

К этим словам известного болгарского ученого академика Христо Христова полностью могут присоединиться и те, кто связан с Дубной и Институтом многие годы, и те, кому довелось здесь жить и работать всего несколько месяцев.

Все сотрудники Института чувствуют себя членами большой интернациональной семьи. Ее прекрасный живой символ — парк Дружбы на берегу Волги. Он был заложен руками ученых братских социалистических стран в день Ленинского коммунистического субботника. И год от года крепнут деревья, с каждой весной все гуще становится на них зеленая листва.

В Дубне делаются удивительные открытия не только в мире элементарных частиц, но и в области человеческих отношений. Вот что говорит об этом почетный член Академии наук СССР Нгуен Ван Хьеу:

”Для меня Дубна — это не только школа теоретической физики. Это — школа дружбы. Именно здесь для меня стало ясно, что совместная работа ученых стран социализма — это не простое сложение умов и средств. Мне стало ясно, что здесь два плюс три дает намного больше пяти. Вот в чем характерное свойство ”существенно нелинейных полей”. И здесь, в Дубне, я обнаружил новый тип ”взаимодействия”, новую силу дальнего действия притяжения, объединяющую ученых из географически далеких, но по сердцу близких стран. Это наша интернациональная солидарность. Эта могучая сила превратила нас в самую твердую, непобедимую, самую ”тяжелую частицу” — максимум”.

Если обратиться к специалистам, приехавшим работать в Дубну из разных стран-участниц Института, с вопросом: ”Как вы проводите свободное время?”, то большинство ответит, наверное, так: ”У меня такого времени практически нет, потому что главное для меня — не отдых, а максимальное использование тех уникальных возможностей, которые предоставлены в лабораториях ОИЯИ для научной работы”. И все-таки не наукой единой живут в Дубне физики, математики, химики... Они активно занимаются спортом: бегают, плавают, играют в волейбол, футбол, малый и большой теннис, занимаются в секциях виндсерфинга и верховой езды. Многие сотрудники Института могут гордиться и спортивными успехами. Впервые в жизни встают в Дубне на лыжи кубинцы, монголы, вьетнамцы, и на традиционных спартакиадах дружбы накал борьбы не уступает олимпийскому...



Живя в Дубне, вдалеке от столичных театров, музеев, дубненцы отнюдь не чувствуют себя оторванными от большого искусства. Преодолев расстояние в 130 км от Москвы, несмотря на утомительную дорогу, непогоду, в Дубну приезжали известнейшие артисты и музыканты. Залы Дома ученых и Дома культуры сотрясались от аплодисментов, когда здесь выступали Святослав Рихтер, Лили Иванова, Карел Готт, Беата Тышкевич, Аркадий Райкин, Данг Тхай Шон, солисты Берлинской оперы и актеры с Таганки...

В городе созданы все условия для того, чтобы люди, занятые напряженной научной деятельностью, имели возможность и для плодотворной работы, и для интересного отдыха, а их дети — для гармонического развития.

О дубненских детях — разговор особый. Маленький подмосковный город открывает перед ними широкие горизонты, сотни дорог. Хочешь быть, как родители, физиком, математиком — будь им! При ОИЯИ уже много лет действует физико-математическая школа, преподают в которой ведущие ученые и талантливые молодые специалисты. Не первый год проходят в Лаборатории вычислительной техники и автоматизации серьезную практику, овладевая одной из самых современных массовых профессий, юные программисты...

Детство тысяч дубненских ребят окрылила песня — даже перед трехлетними гостеприимно распахнуты двери знаменитой хоровой студии "Дубна", удостоенной звания лауреата премии Ленинского комсомола. А еще есть детская балетная студия "Фантазия", клуб юных техников, музыкальные школы, фотостудия, множество спортивных секций и кружков... И каждый год проводятся в Дубне молодежные праздники, антивоенные митинги, где юные дубненцы из Софии, Будапешта, Ханоя, Берлина, Пхеньяна, Гаваны, Улан-Батора, Варшавы, Бухареста, Праги вместе со своими советскими сверстниками поют: "Пусть всегда будет солнце! Пусть всегда будет мир!".

Сегодня, никуда не уезжая из Дубны, можно выучить несколько иностранных языков, можно закончить училище, техникум, вуз, получив нужную Институту и другим предприятиям города профессию... Вот еще одна характерная черта тридцатилетней Дубны — сегодня в лабораториях Института, в его производственных подразделениях начинают свою научную, рабочую биографию те, кто родился в этом городе, кто рос и вырос вместе с ним. Так продолжается эстафета поколений. И ветераны Института, и молодежь гордятся тем, что они причастны к достижениям первого в мире города интернациональной науки, где людей из разных стран объединяет общий труд в мирных целях. Поэтому Дубну по праву считают и прообразом города Будущего.



24 июля 1956 года Указом Президиума Верховного Совета РСФСР поселок Дубна Калининской области был преобразован в город и включен в состав Московской области.

Дубна — один из самых зеленых городов Подмосковья. Около 2000 га территории города занято лесами, зелеными насаждениями.

Средний возраст жителей Дубны 33 года.

В Дубне работает 28 дошкольных учреждений, которые посещают почти 5 тысяч детей.

70% работающего населения Дубны имеют высшее и среднее образование. Около 11 тысяч жителей города учатся.

В городе работают два филиала высших учебных заведений, 2 техникума, профессионально-технические училища.

В 25 библиотеках зарегистрировано более 50 тысяч читательских абонементов.

На тысячу жителей выписывается 1300 экземпляров газет и журналов.

В 74 коллективах художественной самодеятельности участвуют более 3000 человек. В учреждениях культуры работают 28 клубов и объединений, 12 народных университетов.

В городе имеется 2 стадиона, 3 футбольных поля, плавательный бассейн, теннисные корты, 15 спортзалов, 4 спортивных тира, легкоатлетические дорожки, лыжные базы, освещенные лыжные трассы.





Дубна — город многонациональный. Здесь живут и работают ученые и специалисты из 11 стран-участниц Объединенного института. Административный корпус ОИЯИ расположен в центре Дубны на улице Жюлио-Кюри.





Дубна раскинула свои улицы  
вдоль берега Волги. Боль-  
шие и малые, пассажирские  
и грузовые суда проходят  
по водным трассам мимо  
Дубны.





В этом новом здании живут  
молодые специалисты из  
стран-участниц ОИЯИ.

Зима в Дубне.







**Городской пляж на Волге.**

**Традиционный массовый кросс на приз имени академика В.И.Векслера всегда собирает много участников и болельщиков.**



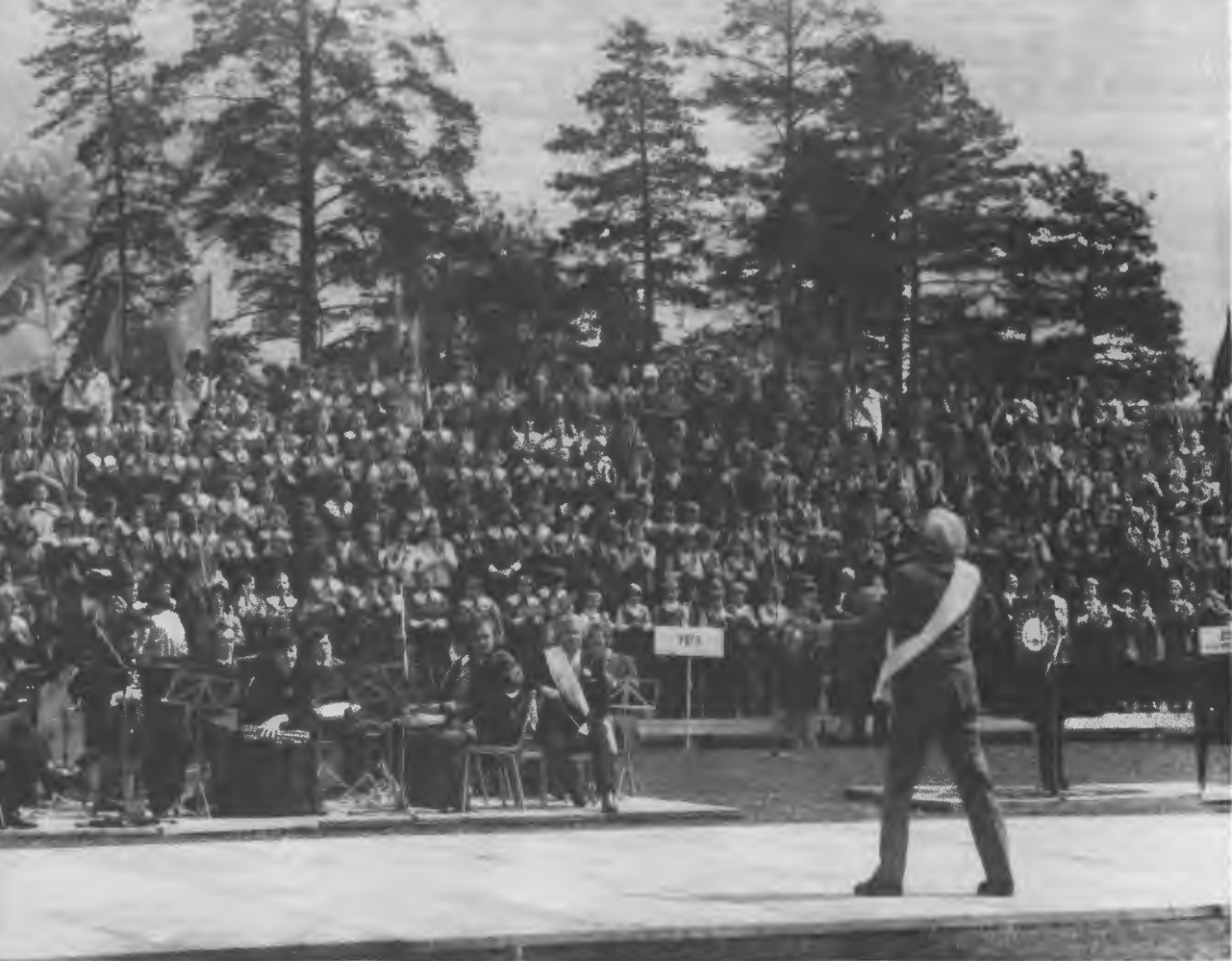
Туризм и водные лыжи, шахматы и теннис, парусный и водно-моторный спорт — таков диапазон увлечений дубненцев. Ежегодный летний слет туристов. Горит гостер дружбы.



Гостей Дубны принимает комфортабельная гостиница на берегу Волги, построенная по проекту болгарских архитекторов.







**Композитор Дмитрий Кабалевский дирижирует сводным хором участников праздника песни, регулярно проводимого в Дубне.**



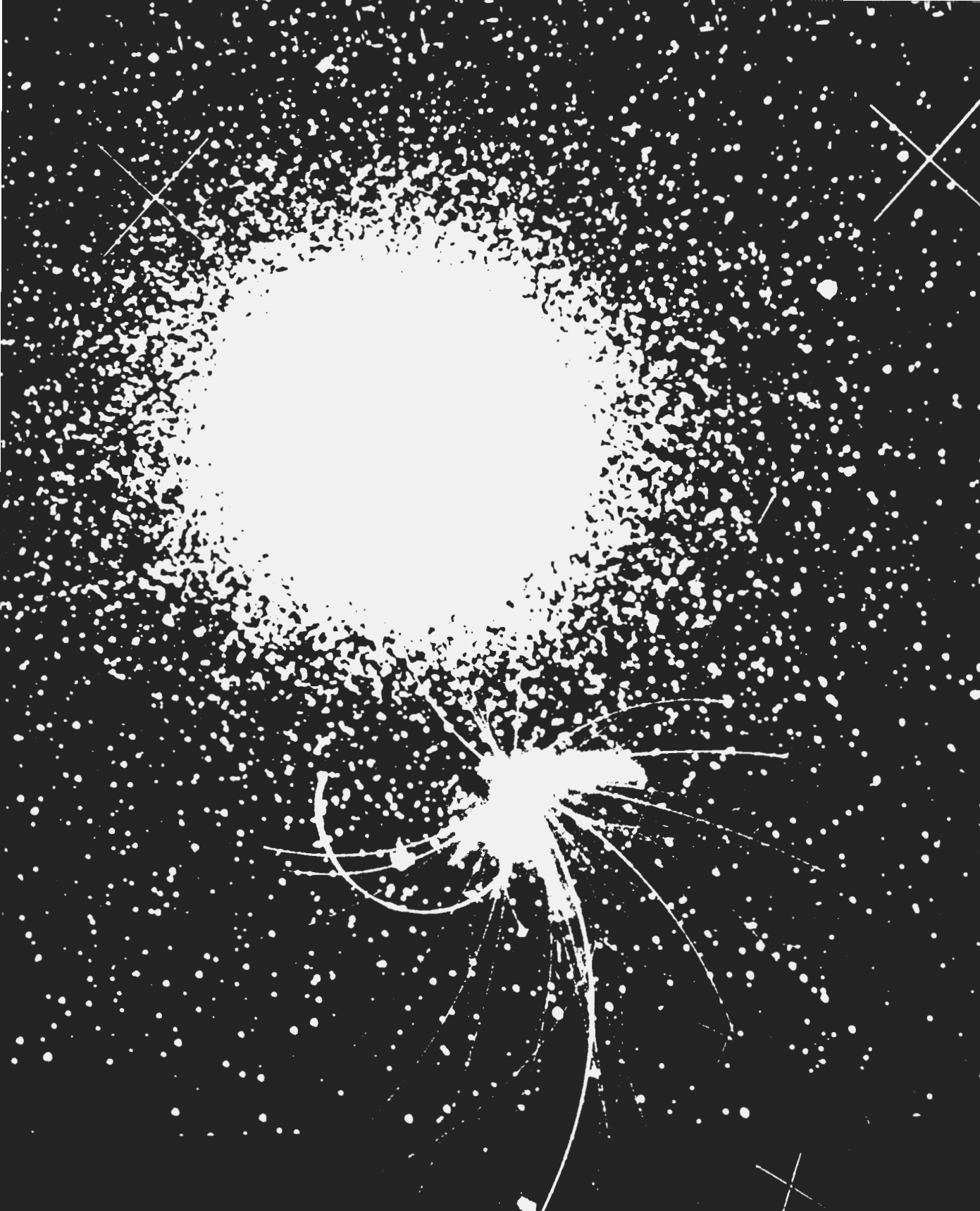
**В Доме культуры "Мир" часто проходят интересные встречи, концерты. Встреча с участниками популярной телевизионной передачи "Что? Где? Когда?".**



Жители Дубны принимают активное участие в антивоенных акциях. Антивоенный митинг, состоявшийся в мае 1983 года.

"Праздник детства" — так назывался концерт, в котором участвовали дубненская детская балетная студия "Фантазия" и детские танцевальные коллективы из Чехословакии и Болгарии.







## ЦВЕТНЫЕ КВАРКИ

*Н.Н.БОГОЛЮБОВ, академик*

*В.А.МАТВЕЕВ, профессор*

*А.Н.ТАВХЕЛИДЗЕ, член-корреспондент АН СССР*

Идея цветных кварков — фундаментальных фермионов, обладающих специфическим квантовым числом — цветом и являющихся наравне с лептонами простейшими составляющими вещества, лежит в основе современных теоретических представлений о мире элементарных частиц и атомных ядер. С этой идеей, являющейся поистине одним из краеугольных камней современного естествознания, связаны многие достижения в физике элементарных частиц, атомного ядра и высоких энергий.

Без представления о цветных кварках как фундаментальных составляющих материи вряд ли были бы возможны прогресс в понимании эволюции ранней Вселенной, продвижение по пути реализации глубокой идеи о единстве всех сил природы.

Понятие цвета — нового квантового числа, введенного Н.Н.Боголюбовым, Б.В.Струминским и А.Н.Тавхелидзе в 1965 г. в связи с решением проблемы статистики кварков <sup>1/</sup>, лежит в настоящее время в основе спектроскопии адронов, квантовой хромодинамики, а также различных вариантов объединенных калибровочных теорий сильного, слабого и электромагнитного взаимодействий.

Когда в 1964 г. в работах М.Гелл-Манна <sup>2/</sup> и Г.Цвейга <sup>3/</sup> была высказана гипотеза кварков — гипотетических частиц, из которых строятся все наблюдаемые сильновзаимодействующие частицы — мезоны и барионы, кварки мыслились как сугубо математические объекты, в терминах которых наиболее простым и изящным образом можно описывать обнаруженные к тому времени свойства унитарной SU(3) - симметрии сильных взаимодействий <sup>4/</sup>. Обладающие дробными электрическими зарядами и не наблюдаемые в свободном состоянии частицы не сразу получили необходимое физическое истолкование.

Прежде всего, построение адронов из кварков, обладающих спином  $1/2$ , привело к противоречию с принципом Паули для систем частиц с полупцелым спином.

Проблема статистики кварков не была, однако, единственной трудностью, стоящей на пути теории. Оставался без ответа вопрос: почему в природе реализуются лишь системы, соответствующие трем кваркам или кварк-антикварковым парам, и почему отсутствуют указания на существование других многокварковых состояний?

Особую важность приобрел вопрос о возможности существования кварков в свободном состоянии (проблема удержания или невылетаия кварков).

Анализ этих проблем привел в 1965 г. в работах Н.Н.Боголюбова, Б.В.Струминского и А.Н.Тавхелидзе<sup>/1/</sup>, а также независимо Й.Намбу и М.Хана<sup>/5/</sup>, Р.Фройнда<sup>/6/</sup> и Й.Миямото<sup>/7/</sup> к кардинальной идее о наличии у кварков нового, неизвестного ранее квантового числа, впоследствии названного цветом<sup>/8/</sup>.

Согласно гипотезе цветных кварков, кварки подчиняются статистике Ферми-Дирака, причем кварк каждого типа появляется в трех унитарно-эквивалентных состояниях  $q = (q_1, q_2, q_3)$ , различающихся значениями нового квантового числа — цвета. Так как в то время, когда было введено новое квантовое число, было известно лишь три типа кварков —  $u$ ,  $d$  и  $s$ , модель цветных кварков получила название модели трех триплетов.

Предполагалось, что волновая функция наблюдаемого семейства барионов, описываемая в приближении спин-унитарной симметрии полностью симметричным 56-компонентным тензором, является полностью антисимметричной по переменным цвета трех составляющих кварков<sup>/9/</sup>:

$$\psi_{ABC}(x_1, x_2, x_3) = \frac{1}{\sqrt{6}} \epsilon_{\alpha\beta\gamma} \phi_{abc}(x_1, x_2, x_3), \quad (1)$$

где  $A = (a, \alpha)$ ,  $B = (b, \beta)$ ,  $C = (c, \gamma)$ .

Данное предположение приводит к выводу о том, что наблюдаемые мезоны и барионы являются нейтральными по отношению к новому квантовому числу и отвечают, выражаясь в терминах соответствующей этому квантовому числу унитарной  $SU(3)$ -симметрии, синглетным состояниям. Так, например, известные мезоны и барионы строятся следующим образом из кварков и антикварков:

$$\begin{aligned} \bar{q}^a(1) q_a(2) & \text{ — мезоны;} \\ \epsilon^{\alpha\beta\gamma} q_\alpha(1) q_\beta(2) q_\gamma(3) & \text{ — барионы,} \end{aligned} \quad (2)$$

Таким образом, гипотеза цветных кварков позволила удовлетворить принципу Паули для спиновых кварков, а также требованиям спектроскопии адронов.

Введение цветных ферми-кварков как физических фундаментальных частиц открыло путь к динамическому описанию элементарных частиц.

Главной проблемой на этом пути являлось отсутствие кварков в свободном состоянии. Объяснение данного явления, известного как явление удержания или невылетания кварков, является одной из наиболее узловых принципиальных проблем, стоящих перед современной физикой элементарных частиц. Хотя очевидно, что окончательное решение проблемы невылетания остается все же за экспериментом, был принят ряд попыток дать логически непротиворечивое объяснение "вечного заключения" кварков внутри адронов.

Динамическая кварковая модель, разработка которой началась в Дубне в 1964 году, опиралась на предположение о том, что кварки — весьма тяжелые объекты, связанные в адронах огромными силами, которые, с одной стороны, обуславливают большой дефект масс кварков в адронах, а с другой — препятствуют их вылету наружу <sup>1.9.10/</sup>.

Динамическая кварковая модель позволила дать систематическое описание как статических наблюдаемых характеристик элементарных частиц (магнитных моментов, аксиально-векторных констант слабых переходов и других), так и формфакторов адронов. Эти исследования дали толчок развитию современных кварковых моделей элементарных частиц, среди которых наибольшей популярностью пользуются модель кваркового мешка <sup>10,11/</sup> и кварк-партоновая модель.

Важный шаг на пути развития динамической теории адронов сделал Й.Намбу, который впервые ввел в рассмотрение векторные переносчики цветового взаимодействия, явившиеся прообразом квантово-хромодинамических глюонных полей <sup>12/</sup>. Квантовая хромодинамика (КХД), бурное развитие которой мы наблюдаем в течение последних лет, возникла, таким образом, как результат объединения гипотезы цветных кварков и цветовой  $SU_c(3)$ -симметрии с принципом локальной калибровочной инвариантности Ч.Янга и Р.Миллса.

В этой связи важно подчеркнуть, что гипотеза Гринберга о параферми-статистике кварков <sup>13/</sup> не позволяет ввести калибровочную  $SU_c(3)$ -симметрию, лежащую в основе КХД, и является, таким образом, физически неприемлемой альтернативой гипотезе цветных ферми-кварков <sup>14/</sup>.

Размеры настоящей статьи не позволяют, очевидно, осветить все достижения квантовой хромодинамики, развитие которой знаменует значительный прогресс теории сильных взаимодействий.

Отметим лишь, что КХД и соображения о составной природе адронов приводят к возможности последовательного теоретического описания широкого круга явлений приближенной масштабной инва-

риантности или автомодельного поведения, позволяют дать обоснование метода кваркового счета для процессов с большими передачами импульсов.

В последние годы идея цветных кварков и фундаментальных хромодинамических сил начинает проникать в теорию ядерных явлений.

Следует отметить, что наиболее прямым указанием на проявление кварковой структуры ядер является наблюдающийся на опыте закон степенного падения электромагнитного формфактора дейтрона при больших передачах импульса, хорошо согласующийся с формулой кваркового счета и указывающий на наличие жесткой 6-кварковой структуры у дейтрона <sup>15,16</sup>.

В работах последнего времени весьма интенсивно обсуждаются проблемы учета кварковых степеней свободы при описании чисто ядерных явлений, в особенности тех, которые протекают при высоких энергиях и больших передачах импульса. Указывается, в частности, на возможность возбуждения "скрытого цвета" в ядерной материи и ряд других следствий <sup>17</sup>.

В становлении новой области исследований, называемой сейчас релятивистской ядерной физикой, большую роль сыграли теоретические работы А.М.Балдина и инициированные им в 70-х годах широкие экспериментальные исследования на пучках релятивистских ядер синхрофазотрона в Дубне, приведшие, в частности, к установлению границ применимости протон-нейтронной модели ядра.

Представление о цветных кварках и цветовой симметрии вот уже почти двадцать лет лежит в основе физики элементарных частиц. Позволив разрешить проблемы адронной спектроскопии, гипотеза цветных кварков привела в дальнейшем к созданию квантовой хромодинамики — калибровочной теории сильных взаимодействий, вызвала к жизни многочисленные варианты теории большого объединения.

В теоретических исследованиях последнего десятилетия большое внимание уделялось вопросу о том, является ли цветовая симметрия точным или приближенным законом природы. С этой еще не решенной принципиальной проблемой теории элементарных частиц тесно связан вопрос о зарядах кварков.

Заметим, что уже в первых работах, посвященных модели трех триплетов, указывалось на возможность выбора целочисленных значений электрических и барионных зарядов цветных кварков. Введение целочисленных зарядов кварков, зависящих от их цветового состояния, приводит, очевидно, к нарушению цветовой симметрии, по крайней мере в электромагнитных взаимодействиях частиц.

Исследование проблемы спонтанного нарушения цветовой симметрии привело в последние годы к интересным и важным результатам, касающимся особенностей структуры вакуума в калибровочных



теориях с цветными скалярными полями и вопроса о существовании легких скалярных кварков /18/

Подчеркнем, что гипотеза о целочисленности зарядов кварков и спонтанном нарушении цветовой и других калибровочных симметрий привела к представлению о нестабильных кварках и послужила исходным моментом ряда объединенных калибровочных моделей элементарных частиц, допускающих распад нуклона и другие процессы с несохранением барионного числа. Экспериментальная проверка предсказаний подобных теорий — дело ближайшего будущего.

### *Литература*

1. Боголюбов Н.Н., Струминский Б.В., Тавхелидзе А.Н. ОИЯИ, Д-1968, Дубна, 1965; Tavkhelidze A.N. In: High Energy Phys. and Elem.Particles. Vienna, 1965, p.753.
2. Gell-Mann M. Phys.Lett., 1964, 8, p.214.
3. Zweig G. Preprint TH-104, CERN, Geneva, 1964.
4. Neeman Y. Nucl.Phys., 1961, 26, p.222.
5. Han M.Y., Nambu Y. Phys.Rev., 1965, 139B, p.1006.
6. Freund P.G. Nuovo Cim., 1965, 39, p.765.
7. Migamoto Y. Progr.Theor.Phys.Suppl.Extra, 1965, No.187.
8. Gell-Mann M., Ramond R., Slansky R. Rev.Mod.Phys., 1978, vol.50, No.4, p.721.
9. Боголюбов Н.Н. и др. ОИЯИ, P-2141, Дубна, 1965. См. также: Проблемы физики элементарных частиц. Изд-во АН СССР, Ереван, 1965, с.406.
10. Bogoliubov P.N. Ann.Inst.H.Poincare, 1968, vol.VIII, 2, p.163.
11. De Grand T., Jaffe R.L., Jonson K. Phys.Rev., 1975, D12, p.2060.
12. Nambu Y. In: Preludes in Theor.Phys. (Ed. by R.Gatto). J.Wiley, New York, 1972, p.175.
13. Greenberg O.W. Phys.Rev.Lett., 1964, 13, p.598.
14. Говорков А.Б. Физика элементарных частиц и атомные ядра, 1983, т.14, вып.5, с.1229.
15. Arnold R.G. et al. Phys.Rev.Lett., 1973, 35, p.776.
16. Матвеев В.А., Мурадян Р.М., Тавхелидзе А.Н. Труды IV Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. ОИЯИ, Д1-9224, Дубна, 1975, с.219; Brodsky S. In: Few Body Probl.Nucl. Part. Phys. Les Presses del' Univ.Laval, Quebec, 1975, p.676.
17. Матвеев В.А. Мультикварковые системы. Теория и эксперимент. Лекции на школе по физике высоких энергий. Гомель, 1978. ОИЯИ, P2-12080, Дубна, 1978, с.123.
18. Матвеев В.А., Тавхелидзе А.Н., Шапошников М.Е. ТМФ, 1984, 59, № 3, с.323.

# РАБОТЫ ПО ОСЦИЛЛЯЦИЯМ НЕЙТРИНО В ДУБНЕ

*С.М.БИЛЕНЬКИЙ, доктор физико-математических наук*

*Б.М.ПОНТЕКОРВО, академик*

Осцилляции нейтральных каонов являются одним из самых замечательных эффектов в физике частиц. Этот эффект был предсказан Гелл-Манном и Пайсом в 1954 году и, как хорошо известно, детально изучен на опыте. Существуют ли аналогичные эффекты в системах других частиц? В 1957-1958 годах в Дубне<sup>1,2/</sup> впервые были рассмотрены осцилляции нейтрино — эффект, который представляет огромный интерес не только для физики элементарных частиц, но и для астрофизики.

В то время, когда была выдвинута гипотеза осцилляций нейтрино, был известен только один тип нейтрино. В физику только что входила теория двухкомпонентного нейтрино Ландау, Ли и Янга и Салама. В соответствии с этой теорией масса нейтрино равна нулю и осцилляции нейтрино невозможны.

Выполненные в Дубне пионерские работы по осцилляциям нейтрино были основаны на предположении о том, что лептонный заряд (как и странность) не является строго сохраняющимся квантовым числом и что волновая функция нейтрино представляет собой "смесь" волновых функций нейтрино Майорана (истинно нейтральных частиц) с отличными от нуля и различными массами  $m_1$  и  $m_2$  (аналогично тому, как волновая функция  $K^0$ -мезона является смесью волновых функций истинно нейтральных  $K_1^0$  и  $K_2^0$ )\*. Если массы  $m_1$  и  $m_2$  достаточно малы, то для слабых распадов частиц такая теория дает практически те же следствия, что и теория двухкомпонентного нейтрино. Однако в соответствии с этой теорией в пучках нейтрино будут иметь место переходы (осцилляции) нейтрино с отрицательной спиральностью (левых нейтрино) в антинейтрино с отрицательной спиральностью (левых антинейтрино):  $\nu_e \rightleftharpoons \bar{\nu}_{eL}$  (аналогично тому, как в пучках нейтральных каонов имеют место осцилляции  $K^0 \rightleftharpoons \bar{K}^0$ ).

\* Разумеется, мы пренебрегаем малыми эффектами CP-нарушения.

В обычном слабом V-A взаимодействии участвует только левое нейтрино (и правое антинейтрино). Таким образом, левые антинейтрино являются "стерильными" частицами <sup>2,3/</sup>. Обнаружить осцилляции нейтрино в этом случае можно по "недостаче" обычных левых нейтрино на некотором расстоянии от источника.

В 60-х годах в Дубне были рассмотрены <sup>2-4/</sup> возможные опыты, в которых могли бы быть зарегистрированы осцилляции нейтрино, а именно опыты с нейтрино от реакторов, ускорителей высоких энергий и Солнца. Было обращено внимание на то, что поиск осцилляций является исключительно чувствительным методом проверки закона сохранения лептонного заряда и измерения разности квадратов масс нейтрино. Это связано с тем, что осцилляции — интерференционное явление, напоминающее явление биений.

После того как в известном бруксейвенском опыте было доказано, что мюонное и электронное нейтрино — разные частицы, идея осцилляций была обобщена на случай двух типов нейтрино. В работе <sup>3/</sup> обсуждались все типы осцилляций, возможные в этом случае:  $\nu_e \leftrightarrow \nu_\mu$ ,  $\nu_e \leftrightarrow \bar{\nu}_{eL}$ ,  $\nu_\mu \leftrightarrow \bar{\nu}_{\mu L}$ .

Для понимания явления осцилляций нейтрино существенную роль сыграла работа 1969 года <sup>5/</sup>, в которой для случая двух типов нейтрино была построена минимальная схема смешивания нейтрино и осцилляций. В этой схеме четырем физическим (участвующим в стандартном слабом взаимодействии) нейтрино и антинейтрино  $\nu_e$ ,  $\nu_\mu$ ,  $\bar{\nu}_e$  и  $\bar{\nu}_\mu$  отвечают два массивных майорановских нейтрино  $\nu_1$  и  $\nu_2$  (четыре состояния —  $\nu_{1L}$ ,  $\nu_{1R}$ ,  $\nu_{2L}$  и  $\nu_{2R}$ ). При этом поля электронного и мюонного нейтрино ( $\nu_e$  и  $\nu_\mu$ ) связаны с полями майорановских нейтрино ( $\nu_1$  и  $\nu_2$ ) соотношениями

$$\nu_{eL} = \cos\theta \nu_{1L} + \sin\theta \nu_{2L}, \quad (1)$$

$$\nu_{\mu L} = \sin\theta \nu_{1L} + \cos\theta \nu_{2L}.$$

Здесь  $\theta$  — угол смешивания (параметр теории).

Как хорошо известно, поля кварков с определенными массами входят в заряженный слабый ток в смешанном виде. В простейшем случае четырех кварков в ток входят комбинации:

$$d'_L = \cos\theta_C d_L + \sin\theta_C s_L, \quad (2)$$

$$s'_L = -\sin\theta_C d_L + \cos\theta_C s_L,$$

где  $\theta_C$  — известный угол Кабиббо. Существенное различие между (1) и (2) состоит в том, что кварки — четырехкомпонентные дираковские частицы (кварк и антикварк — разные частицы).

Современная теория электрослабого взаимодействия основана на подтверждаемом многочисленными экспериментами предположении о том, что имеет место кварк-лептонная аналогия. В работе <sup>6/</sup> были рассмотрены осцилляции в случае смешивания нейтрино с дираковскими массами (аналогичного смешиванию (2))<sup>\*</sup>.

Если имеет место смешивание нейтрино (как с дираковскими, так и с майорановскими массами), то в простейшем случае двух типов нейтрино ( $\nu_e$  и  $\nu_\mu$ ) вероятность обнаружения  $\nu_e$  на расстоянии  $R$  от места образования  $\nu_\mu$  дается выражением <sup>8/</sup>

$$P_{\nu_e; \nu_\mu} = \frac{1}{2} \sin^2 2\theta \left(1 - \cos 2\pi \frac{R}{L}\right). \quad (3)$$

Здесь

$$L = 4\pi \frac{E}{\Delta m^2} \quad (4)$$

длина осцилляций ( $E$  — энергия нейтрино,  $\Delta m^2 = |m_1^2 - m_2^2|$ ). Вероятность обнаружения  $\nu_\mu$  на расстоянии  $R$  от места образования  $\nu_\mu$  в общем случае меньше единицы и равна

$$P_{\nu_\mu; \nu_\mu} = 1 - P_{\nu_e; \nu_\mu}. \quad (5)$$

Формулы (3)-(5) используются в настоящее время при анализе данных всех экспериментов по поиску осцилляций. Если угол смешивания достаточно велик, то осцилляции нейтрино могут быть наблюдаемы только при

$$L \lesssim R \quad (6)$$

или

$$\Delta m^2 \gtrsim 4\pi \frac{E}{R}. \quad (7)$$

Величина  $E/R$  характеризует чувствительность опыта по поиску осцилляций нейтрино (из (7) очевидно, что чем меньше  $E/R$ , тем чувствительнее к величине  $\Delta m^2$  опыт). Характерные значения этой величины для экспериментов, выполненных с нейтрино от реактора, мезонной фабрики, ускорителя высоких энергий и Солнца, соответственно равны  $10^{-2}$ ,  $10^{-1}$ ,  $1$  и  $10^{-11}$  эВ<sup>2</sup>.

Огромное значение могут иметь осцилляции для экспериментов с солнечными нейтрино. На это было обращено внимание в дубненских

---

<sup>\*</sup> Впоследствии нам стало известно, что смешивание нейтрино с дираковскими массами (а также смешивание кварков) было введено японскими авторами Маки, Накагава и Саката <sup>7/</sup> в 1962 году.

работах <sup>/3,4/</sup> еще до того, как Дэвис и др. начали свои известные эксперименты по регистрации нейтрино от Солнца. Если имеют место осцилляции нейтрино, то на пути от Солнца до Земли электронные нейтрино частично превратятся в нейтрино других типов, которые не могут быть зарегистрированы. В результате поток регистрируемых нейтрино окажется меньше ожидаемого потока. В работе <sup>/9/</sup> было показано, что, если возможны осцилляции только между активными физическими нейтрино ( $\nu_e \rightleftharpoons \nu_\mu$ ,  $\nu_e \rightleftharpoons \nu_\tau$  и т.д.), поток регистрируемых нейтрино может максимально ослабиться в  $n$  раз ( $n$  — число типов нейтрино). Если возможны также осцилляции между активными и стерильными нейтрино ( $\nu_e \rightleftharpoons \bar{\nu}_{eL}$ ,  $\nu_e \rightleftharpoons \bar{\nu}_{\mu L}$  и т.д.), то, как показано в работе <sup>/10/</sup>, поток детектируемых нейтрино от Солнца может максимально ослабиться в  $2^n$  раз.

До 1977-1978 гг. работы по осцилляциям нейтрино выполнялись в основном в Дубне. В этих работах была развита полная феноменологическая теория осцилляций нейтрино как с дираковскими, так и с майорановскими массами\* и рассмотрены все возможные опыты по поиску осцилляций. Результаты этих работ были изложены в обзоре <sup>/8/</sup> 1977 г., сыгравшем существенную роль в популяризации идей осцилляций нейтрино в широких кругах физиков. С точки зрения современной физики, осцилляции нейтрино — весьма вероятное явление. В большинстве моделей великого объединения при спонтанном нарушении симметрии нейтрино (как и все остальные фундаментальные фермионы) приобретают массы. Поля нейтрино входят при этом в гамилтониан слабого взаимодействия в смешанном виде.

Теория не может, однако, однозначно предсказать значения масс и углов смешивания нейтрино. Сегодня этот вопрос адресован к эксперименту. В настоящее время во всех нейтринных лабораториях мира ставятся десятки экспериментов по поиску осцилляций нейтрино. Поиск осцилляций нейтрино — одна из главных проблем современной нейтринной физики.

Не будет преувеличением сказать, что выполненные в Дубне работы по осцилляциям нейтрино открыли новое направление в физике элементарных частиц и астрофизике и оказали решающее влияние на развитие этого направления.

### Литература

1. Понтекорво Б.М. ЖЭТФ, 1957, 33, с.549.
2. Понтекорво Б.М. ЖЭТФ, 1958, 34, с.247.
3. Понтекорво Б.М. ЖЭТФ, 1967, 53, с.1717.
4. Pontecorvo B. Old and New Problems in Elementary Particles. (A volume

\* Эта теория (с учетом последних работ) изложена в лекциях <sup>/11/</sup>.

- dedicated to G.Bernardini). Academic Press, New York, London, 1968, p.252.
5. Gribov V., Pontecorvo B. Phys.Lett., 1969, 28B, p.493.
  6. Bilenky S.M., Pontecorvo B. Phys.Lett., 1976, B61, p.248.
  7. Maki Z., Nakagawa M., Sakata S. Prog.Theor.Phys., 1962, 28, p.870.
  8. Биленький С.М., Понтекорво Б.М. УФН, 1977, 123, с.181; Bilenky S.M., Pontecorvo B. Phys.Rep., 1978, 41, No.4, p.226.
  9. Понтекорво Б.М. Письма в ЖЭТФ, 1971, 13, с.281.
  10. Bilenky S.M., Pontecorvo B. Lett.Nuovo Cim., 1976, 17, p.569.
  11. Биленький С.М. ОИЯИ, P2-83-441, Дубна, 1983.

# ДИНАМИЧЕСКИЙ ПОДХОД В КВАЗИПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ТЕОРИИ СИЛЬНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ ПРИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЯХ

*С.В.ГОЛОСКОКОВ, кандидат физико-математических наук*

*С.П.КУЛЕШОВ, доктор физико-математических наук*

Достижения теории элементарных частиц в последние годы в значительной степени связаны с развитием квантовой хромодинамики, в основе которой лежат гипотеза о цветных кварках <sup>/1/</sup> и принцип локальной калибровочной инвариантности <sup>/2/</sup>. Важным свойством КХД на малых расстояниях является асимптотическая свобода, которая позволяет использовать в этой области хорошо разработанные методы теории возмущений. На расстояниях порядка 1 фм эти методы неприменимы, что не дает возможности развить в настоящее время микроскопическую теорию, определяющую адронную физику на больших расстояниях.

Исходным моментом изучения динамики сильных взаимодействий высоких энергий являются результаты, полученные Н.Н.Боголюбовым <sup>/3/</sup> на базе общих принципов квантовой теории поля. Общие принципы квантовой теории и представление об амплитуде рассеяния как единой аналитической функции кинематических переменных <sup>/3/</sup> были положены А.А.Логуновым в основу доказательства строгих ограничений и асимптотических соотношений для физически наблюдаемых величин <sup>/4/</sup>.

Важную роль в теории сильных взаимодействий играет квазипотенциальный метод Логунова — Тавхелидзе <sup>/5/</sup>, сочетающий в себе строгость основных принципов квантовой теории с возможностью использования эвристических соображений о характере взаимодействия адронов высоких энергий. В сочетании с гипотезой о гладкости квазипотенциала <sup>/6/</sup>, тесно связанной с динамикой взаимодействия адронов на больших расстояниях, квазипотенциальный метод позволил понять основные закономерности процессов высокоэнергетического рассеяния частиц на малые углы <sup>/7/</sup>.

Область жесткого взаимодействия, в которой все кинематические переменные оказываются одного порядка и существенно превышают размерные параметры системы, принципиально отличается по свойствам

от области мягких столкновений. В процессах с большими переданными импульсами проявляется точечная внутренняя структура частиц. Составная природа адронов позволяет объяснить степенное автомодельное <sup>8/</sup> поведение сечений рассеяния и формфакторов адронов

$$\frac{d\sigma}{dt} \sim \frac{1}{sN} f\left(\frac{t}{s}\right), \quad (1)$$

возможность существования которого была впервые обоснована для глубоконеупругих и инклюзивных процессов на базе аксиоматического подхода в квантовой теории поля Н.Н.Боголюбовым, В.С.Владимировым, А.Н.Тавхелидзе <sup>9/</sup>. В этой асимптотической области массы взаимодействующих частиц становятся несущественными, что приводит к  $\gamma_5$ -инвариантности сильного взаимодействия на малых расстояниях <sup>10/</sup>.

Из сказанного выше можно сделать вывод о том, что динамика сильных взаимодействий на малых и больших расстояниях имеет различный характер. Большинство подходов и моделей изучают, однако, процессы взаимодействия адронов на основе мягкого или жесткого механизма без учета их взаимного влияния, которое в ряде случаев может приводить к заметным эффектам. Следует отметить также, что большая величина сильного взаимодействия на расстояниях порядка размера адрона требует полного суммирования вкладов мягкой области в амплитуду рассеяния.

Эти важные проблемы решены в рамках квазипотенциального метода на основе сформулированного в ЛТФ ОИЯИ динамического подхода в теории сильных взаимодействий, основанного на разделении вкладов малых и больших расстояний в квазипотенциальном уравнении. Подход позволяет развить эффективный метод суммирования вкладов больших расстояний в мягком и жестком рассеянии адронов высоких энергий и рассматривать эти процессы на единой основе.

Процессы рассеяния частиц высоких энергий на малые углы исследовались ранее различными методами. Было показано, что следствием гладкости взаимодействия является эйкональный характер рассеяния адронов, а для амплитуды рассеяния справедливо представление <sup>7/</sup>:

$$T(s, t) = is \int d^2 \rho e^{i\vec{\Delta}\vec{\rho}} (1 - e^{2i\chi(\rho, s)}). \quad (2)$$

Информация о динамике взаимодействия на больших расстояниях содержится в (2) в эйкональной фазе  $\chi(\rho, s)$ . Разработанные методы, однако, не позволяли рассматривать рассеяние частиц со спином единым образом.

В рамках квазипотенциального метода нами получено представление для амплитуды рассеяния частиц произвольного спина <sup>11, 12/</sup>, справедливое как в области малых, так и больших передач импульса. Оно позволяет эффективно использовать проведенное в квазипотен-



циале взаимодействия разделение вкладов малых и больших расстояний и является основой изучения процессов рассеяния частиц высоких энергий в различных областях кинематических переменных. При рассеянии на малые углы вклад области малых расстояний несуществен, и динамика сильных взаимодействий определяется большими расстояниями. Для амплитуды рассеяния частиц произвольного спина в этой области справедливо единое эйкональное представление <sup>/13/</sup>, которое может быть использовано для изучения различных конкретных процессов. Исследованы критерии его применимости, позволившие показать, что стандартное эйкональное представление для амплитуды рассеяния справедливо лишь в случае спиновых эффектов, степенным образом падающих с ростом энергии <sup>/14/</sup>.

Модельные представления требуют, однако, изучения рассеяния адронов высоких энергий при слабой энергетической зависимости спиновых эффектов. Последовательное суммирование вкладов области больших расстояний, проведенное в этом случае в квазипотенциальном методе, с необходимостью приводит к модификации эйконального представления, причем в эйкональной фазе, определяющей амплитуду без переворота спина (2), появляются члены, растущие как  $\sqrt{s}$  <sup>/15/</sup>. Они могут быть интерпретированы как вклады с двукратным переворотом спина одной или двух частиц. В результате спиновые вклады могут играть существенную роль в динамике сильных взаимодействий при сверхвысоких энергиях, когда растущие как  $\sqrt{s}$  члены эйкональной фазы будут определять ее форму. Следствием этого являются спиновый механизм роста полных сечений и ряд других эффектов, появление которых возможно лишь в случае взаимодействия частиц со спином.

Процессы рассеяния частиц высоких энергий при больших передачах импульса исследовались (см., например, обзоры <sup>/16/</sup>) без учета взаимного влияния областей малых и больших расстояний. Полученное в рамках квазипотенциального метода представление для амплитуды рассеяния частиц произвольного спина позволяет просуммировать эффекты глобальной структуры адрона в процессах жесткого рассеяния при высоких энергиях <sup>/11/</sup>. При этом возникает наглядная картина процесса рассеяния. В начале и конце процесса происходят мягкие перерассеяния, определяемые областью больших расстояний, а рассеяние на большой угол определяется жестким рассеянием составляющих адронов. Эффекты больших расстояний приводят к предасимптотическим поправкам в дифференциальных сечениях, падающих с ростом энергии как  $1/s$  <sup>/12/</sup>.

В развитом методе произвол при вычислении поправок сведен к минимуму, т.к. поправочные члены определяются мягкой частью взаимодействия, информация о которой может быть получена из анализа процессов рассеяния на малые углы. Оценки показывают, что найденные поправки существенны при энергиях, экспериментально достигнутых в настоящее время в рассеянии адронов на большие углы.

С помощью найденных выражений для физических величин могут быть детально исследованы процессы рассеяния частиц со спином на малые и большие углы, таким образом, получена информация о динамике сильных взаимодействий при высоких энергиях. Для этого с помощью модельных представлений необходимо определить мягкий квазипотенциал, являющийся борновским членом амплитуды рассеяния. Для решения этой проблемы развита динамическая модель взаимодействия адронов <sup>/17/</sup>, учитывающая их структуру на больших расстояниях. Модель основана на предположении о наличии у адрона окруженной облаком кварк-антикварковых пар — мезонов — жесткой центральной части, в которой сосредоточены валентные кварки. В бесспиновом варианте модель позволила с малым числом свободных параметров воспроизвести все известные свойства мезон-нуклонного и нуклон-нуклонного рассеяния, сделать вывод о близости сечений рассеяния на малые углы различных нуклонов на нуклонах, а также мезонов на нуклонах при высоких энергиях <sup>/17/</sup>. Адекватное описание широкого круга процессов рассеяния адронов позволяет предположить, что использованная в модели гипотеза о структуре адронов на больших расстояниях соответствует физической реальности.

Обобщение этих модельных представлений на случай взаимодействия частиц со спином приводит к возникновению малого по величине аномального члена амплитуды рассеяния <sup>/18/</sup>, следствием чего является слабая зависимость от энергии спиновых эффектов. Как показано выше, в результате возникает спиновый механизм в динамике сильных взаимодействий <sup>/14/</sup> при сверхвысоких энергиях, который приводит к эффектам, определяемым растущим как  $\sqrt{s}$  членом эйконоальной фазы. Малость аномального члена приводит к тому, что рост эйконоальной фазы незаметен при энергиях ISR ( $\sqrt{s} \leq 60$  ГэВ). Однако этот рост существен при энергиях  $\sqrt{s} \geq 200$  ГэВ. Следствием быстрого роста эйконоальной фазы при таких энергиях являются спиновый механизм роста полных сечений, вклад которого в  $\sigma_{tot}^{pp}$  при энергиях pp-коллайдера ЦЕРНа ( $\sqrt{s} = 540$  ГэВ) составляет около 5 мб, быстрый рост дифференциальных сечений вблизи дифракционного минимума и максимума <sup>/19/</sup>. Это приводит к полному исчезновению дифракционной структуры при  $\sqrt{s} = 540$  ГэВ и  $|t| = 1$  ГэВ<sup>2</sup> и появлению в дифференциальных сечениях "плеча" с  $\frac{d\sigma}{dt} \Big|_{|t| \sim 1 \text{ ГэВ}^2} \sim 1,2 \cdot 10^{-3}$  мб/ГэВ<sup>2</sup>. Полученные результаты полностью подтверждены в эксперименте (рис.1). Это позволяет надеяться на то, что экспериментально обнаружены первые проявления механизма "спиновой" динамики сильных взаимодействий. Возникающая в модели поляризация соответствует эксперименту при достигнутых энергиях и слабо зависит от энергии при  $\sqrt{s} > 30$  ГэВ <sup>/19/</sup>.

Полученная информация о взаимодействиях адронов высоких энергий на больших расстояниях позволяет полностью определить величину мягких преасимптотических эффектов в жестком рассеянии адронов <sup>/12/</sup>. Учет преасимптотических поправок приводит к откло-

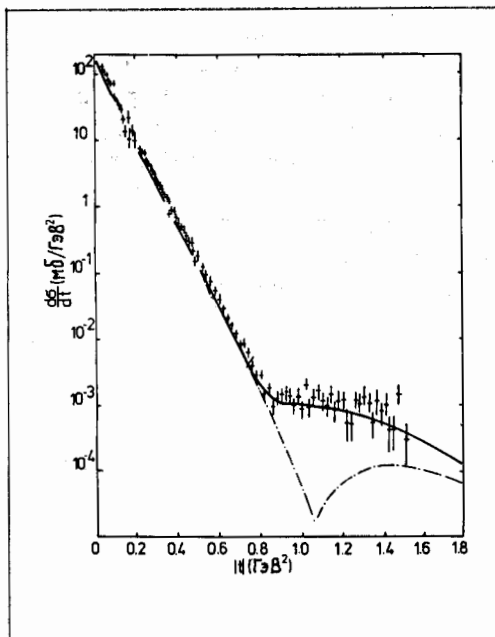
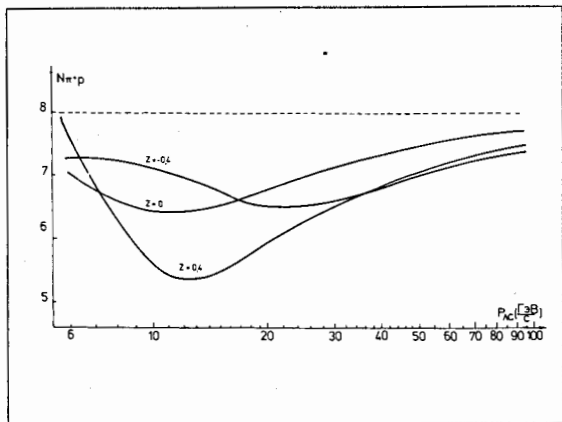


Рис.1. Предсказания динамической модели для  $pp$ -рассеяния при энергии  $pp$ -коллайдера ЦЕРНа. — с учетом спинового механизма, - - - без его учета.

нению от автомодельного поведения (1) и уменьшению энергетической зависимости дифференциальных сечений при конечных энергиях. Этот эффект сказывается на поведении эффективных степеней  $N_b(1)$ , которые начинают зависеть от энергии и угла рассеяния. Вычисления показывают, что отклонения эффективных степеней от правила кваркового счета велики для мезон-нуклонного рассеяния <sup>12/</sup> (рис.2). В случае протон-протонного рассеяния на углы, близкие к  $90^\circ$ , поправочные члены взаимно компенсируются, и наблюдаемое отклонение от автомодельного поведения незначительно, что полностью соответствует эксперименту. Полученные результаты позволяют количественно описать экспериментальные данные по  $\pi^+p$ ,  $pp$ - и  $pn$ -рассеянию. Таким образом, проведенное суммирование эффектов глобальной структуры адрона в процессах жесткого рассеяния частиц со спином показало, что наблюдаемые при конечных энергиях отклонения от автомодельности и  $\gamma_5$ -инвариантности могут быть объяснены вкладом больших расстояний. Подобные вычисления могут существенно расширить и дополнить возможности применения квантовой хромодинамики при исследовании рассеяния адронов на большие углы в преасимптотической области.



Таким образом, развитый единый динамический подход к исследованию процессов рассеяния частиц высоких энергий на малые и большие углы, где динамика сильных взаимодействий имеет различный характер, является

Рис.2. Предсказания энергетической зависимости эффективных степеней  $pp$ -рассеяния.

эффективным инструментом суммирования вкладов области больших расстояний в асимптотические и преасимптотические члены амплитуд мягкого и жесткого рассеяния адронов высоких энергий. Вклады области больших расстояний, определенные на основе динамической модели взаимодействия адронов, позволяют количественно воспроизвести различные характеристики рассеяния адронов на малые и большие углы. Проведенные вычисления указывают на определяющую роль больших расстояний в динамике процессов рассеяния частиц высоких энергий на малые углы и их существенное значение в рассеянии адронов на большие углы в преасимптотической области энергий.

### *Литература*

1. Боголюбов Н.Н., Струминский Б.В., Тавхелидзе А.Н. ОИЯИ, Д-1968, Дубна, 1965.
2. Yang C.N., Mills R.L. Phys.Rev., 1954, vol.96, p.191.
3. Боголюбов Н.Н., Ширков Д.В. Введение в теорию квантованных полей. 3-е изд. "Наука", М., 1976; Боголюбов Н.Н., Медведев Б.В., Поливанов М.К. Вопросы теории дисперсионных соотношений. Физматгиз, М., 1957.
4. Логунов А.А., Нгуен Ван Хьеу, Хрусталев О.А. В сб.: Проблемы теоретической физики, посв.60-летию Н.Н.Боголюбова. "Наука", М., 1969; Логунов А.А., Мествиришвили М.А., Петров В.А. В кн.: Общие принципы квантовой теории поля и их следствия. "Наука", М., 1977.
5. Logunov A.A., Tavkhelidze A.N. Nuovo Cim., 1963, vol.29, p.380.
6. Alliluyev S.P., Gershtein S.S., Logunov A.A. Phys.Lett., 1965, vol.18, p.195; Логунов А.А., Хрусталев О.А. ЭЧАЯ, 1970, т.1, с.71; Кулешов С.П. и др. ЭЧАЯ, 1974, т.5, с.3.
7. Кадышевский В.Г., Тавхелидзе А.Н. В сб.: Проблемы теоретической физики, посв.60-летию Н.Н.Боголюбова. "Наука", М., 1969; Гарсеванишвили В.Р., Матвеев В.А., Слепченко Л.А. ЭЧАЯ, 1970, т.1, с.91; Саврин В.И., Тюрин Н.Е., Хрусталев О.А. ЭЧАЯ, 1976, т.7, с.21.
8. Matveev V.A., Muradyan R.M., Tavkhelidze A.N. Lett.Nuovo Cim., 1973, vol.7, p.719; Brodsky S.J., Farrar G.R. Phys.Rev.Lett., 1973, vol.31, p.1153.
9. Боголюбов Н.Н., Владимиров В.С., Тавхелидзе А.Н. ТМФ, 1972, 12, с.3,305.
10. Логунов А.А., Мещеряков В.А., Тавхелидзе А.Н. ДАН СССР, 1962, т.142, с.317.
11. Голоскоков С.В. и др. ЭЧАЯ, 1977, т.8, с.969.
12. Голоскоков С.В., Кудинов А.В., Кулешов С.П. ЭЧАЯ, 1981, т.12, с.614.

13. Голоскоков С.В., Матвеев В.А. Труды XIV Межд. школы молодых ученых по физике высоких энергий. ОИЯИ, Д2-81-158, Дубна, 1981.
14. Голоскоков С.В. и др. ЯФ, 1982, т.35, с.1000.
15. Голоскоков С.В., Кулешов С.П., Тепляков В.Г. ЯФ, 1983, т.38, с.173,1335; ТМФ, 1983, т.57, с.35.
16. Brodsky S.J., Sivers D., Blankenbecler R. Phys.Rep. C, 1976, vol.23, p.1; Квинихидзе А.Н. и др. ЭЧАЯ, 1977, т.8, с.478.
17. Голоскоков С.В., Кулешов С.П., Селюгин О.В. ЯФ, 1982, т.35, с.1530; JINR, E2-82-109, Dubna, 1982.
18. Голоскоков С.В., Кулешов С.П., Тепляков В.Г. ЯФ, 1984, т.39, с.486.
19. Голоскоков С.В. ЯФ, 1984, т.39, с.913; ОИЯИ, P2-84-131, Дубна, 1984.

# ИССЛЕДОВАНИЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ СВОЙСТВ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И ИХ СТРУКТУРЫ

*А.А.КУЗНЕЦОВ, профессор*

*В.А.НИКИТИН, доктор физико-математических наук*

*И.А.САВИН, профессор*

*Э.Н.ЦЫГАНОВ, профессор*

Изучение фундаментальных свойств элементарных частиц и их структуры — одно из важнейших традиционных научных направлений исследований в общей программе экспериментов Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований.

За время своего существования интернациональным коллективом лаборатории внесен значительный вклад в реализацию этого направления: сделан ряд открытий, занесенных в Государственный реестр открытий СССР, впервые установлены многие неизвестные ранее закономерности, оказавшие существенное влияние на развитие знаний о строении вещества.

Актуальность и научная значимость исследований фундаментальных свойств элементарных частиц и их структуры определяются двумя главнейшими постоянно действующими факторами: запросами теории и поиском новых экспериментальных фактов, выходящих за рамки уже установленных закономерностей и даже принципов физики микромира.

Из-за бурного развития физики элементарных частиц содержание этих факторов меняется во времени, изменяется и конкретная постановка экспериментов. Если, например, в 60-е годы запросы теории концентрировались вокруг вопросов, связанных с систематикой элементарных частиц и проверкой дисперсионных соотношений, асимптотических теорем, теории комплексных моментов, то в последние годы наибольшее значение для теории приобрели проблемы, связанные с проверкой предсказаний кварковых моделей, квантовой хромоди-

намики и поиском экспериментальных фактов, имеющих принципиальное значение для создания единой теории фундаментальных взаимодействий. Соответственно изменялось и содержание программы экспериментов Лаборатории высоких энергий: сначала исследования концентрировались вокруг изучения характеристик разного типа бинарных реакций, позже — вокруг изучения свойств процессов множественного образования частиц и глубоконеупругих взаимодействий.

Сразу же после успешного запуска в 1957 г. синхрофазотрона на нем развернули широким фронтом систематические исследования общих характеристик нуклон-нуклонных и пион-нуклонных бинарных реакций. В частности, в результате изучения взаимодействий отрицательных пионов с протонами было установлено, что сечения этих столкновений вопреки общепринятому в то время мнению об их постоянстве убывают с ростом энергии налетающих пионов вплоть до энергии 9 ГэВ. Изучение свойств упругого пион-протонного рассеяния на большие (около  $180^\circ$ ) углы привело к обнаружению резонансной структуры энергетической зависимости сечения указанного процесса.

Некоторое время спустя в лаборатории был начат большой цикл экспериментов по исследованию свойств упругого протон-протонного и пион-протонного рассеяния на малые углы. Инициатором и первым руководителем этих работ был К.Д.Толстов. Эти исследования были инициированы классическими работами академика Н.Н.Боголюбова, в которых впервые было строго доказано, что дисперсионные соотношения есть прямое следствие общих принципов локальной квантовой теории поля: причинности, унитарности, релятивистской ковариантности.

При осуществлении опытов по упругому протон-протонному рассеянию на малые углы группой физиков, возглавляемой В.А.Свиридовым, а затем В.А.Никитиным, был предложен новый метод изучения этого процесса, обеспечивший на многие годы лидирующее положение Объединенного института ядерных исследований в этом направлении исследований. В основе метода — реализация возможности использования многократных (около  $10^4$  раз) прохождений внутреннего пучка ускоряемых частиц через тонкую (около  $10^{-6}$  г/см<sup>2</sup>) мишень, расположенную непосредственно в камере ускорителя, с одновременным измерением угла вылета и энергии частицы отдачи.

С помощью этого метода выполнены эксперименты на крупнейших ускорителях мира: синхрофазотроне ОИЯИ (Дубна), протонных синхротронах ИФВЭ (Протвино, СССР) и ФНАЛ (Батавия, США).

В пионерских опытах на синхрофазотроне с помощью этого метода впервые наблюдалась интерференция кулоновского и ядерного рассеяния. При этом в эксперименте обнаружена значительная по величине вещественная часть амплитуды упругого протон-протонного рассеяния при высоких (выше 1 ГэВ) энергиях. Этот результат зарегистрирован как открытие, его авторами являются сотрудники лабо-

ратории: Л.Ф.Кириллова, В.А.Никитин, А.А.Номофилов, Л.Н.Струнов и М.Г.Шафранова.

Одной из важнейших характеристик дифракционного рассеяния частиц, имеющих фундаментальное значение для теории, является величина дифракционного конуса при малых углах рассеяния, а также его поведение в зависимости от энергии (в классической дифракции ширина конуса не зависит от энергии). В различных лабораториях мира разными методами выполнено несколько экспериментов на эту тему, но определенного ответа о поведении дифракционного конуса при малых переданных импульсах получить не удалось. В эксперименте на ускорителе ИФВЭ была впервые обнаружена энергетическая зависимость конуса рассеяния протонов на протонах, что однозначно свидетельствует о непостоянстве радиуса сильного взаимодействия протонов. Этот результат сыграл большую роль в развитии теории и был зарегистрирован в качестве открытия. В авторском коллективе — ученые лаборатории: Г.Г.Безногих, Н.К.Жидков, Л.С.Солин, Л.Ф.Кириллова, В.А.Никитин, П.В.Номоконов, М.Г.Шафранова (СССР), В.Заячки и П.Марков (НРБ).

В этой же серии экспериментов при изучении упругого рассеяния протонов на дейтроне получены новые сведения о распределении ядерной материи в дейтроне.

Дальнейшее развитие новой методики исследования упругого рассеяния на малые углы, успешно использованной в экспериментах на синхрофазотроне и ускорителе ИФВЭ, позволило физикам ЛВЭ под руководством А.А.Кузнецова, В.А.Никитина и С.В.Мухина провести большую серию экспериментов на ускорителе ФНАЛ в Батавии (США). Это были первые эксперименты на вновь созданном крупнейшем в мире ускорителе. В совместных ОИЯИ-ФНАЛ экспериментах, продолжавшихся в течение десяти лет (начиная с 1972 г.), была детально изучена закономерность изменения вещественной части амплитуды упругого рассеяния протонов и дифракционного конуса в широком диапазоне энергий (от 8 до 400 ГэВ), установлены также неизвестные ранее свойства дифракционной диссоциации протонов на протонах и легких ядрах. В частности, впервые обнаружено явление антиэкранировки нуклонов в дейтроне, которое состоит в том, что в определенной кинематической области при неупругой дифракции когерентные волны от отдельных нуклонов складываются конструктивно и дифференциальное сечение рассеяния на дейтроне превышает удвоенное сечение рассеяния на одном нуклоне. Полученные результаты имели важное значение для проверки справедливости дисперсионных соотношений в новой области энергий. Было экспериментально подтверждено, что основные представления о микропричинности справедливы до расстояний  $\sim 10^{-15}$  см.

Надо отметить, что проведению всего цикла экспериментов на ускорителях ИФВЭ и ФНАЛ способствовало использование струйных га-



зовых мишеней из водорода, дейтерия и гелия, разработанных и созданных группой специалистов ЛВЭ под руководством Ю.К.Пилипенко.

В 1983 г. за цикл работ "Дифракционное рассеяние протонов при высоких энергиях" ученым ОИЯИ присуждена Государственная премия СССР, лауреатами стали Ю.К.Акимов, Л.С.Золин, А.А.Кузнецов, Б.А.Морозов, С.В.Мухин, В.А.Никитин, Ю.К.Пилипенко, В.А.Свиридов и М.Г.Шафранова.

Свойства упругого пион-протонного рассеяния в области кулон-ядерной интерференции были изучены группой физиков ЛВЭ под руководством Л.Н.Струнова. Получению новых физических результатов в этой серии опытов способствовало осуществление оригинального предложения — использования камеры Вильсона в режиме с пониженной чувствительностью, в результате чего интенсивные потоки пучковых пионов, пропускаемые через рабочий объем камеры, заполненной водородом, становятся невидимыми, а частицы отдачи хорошо регистрируются.

В дальнейшем свойства упругого рассеяния пионов на протонах на малые углы изучались с помощью полностью автоматизированной установки — искрового спектрометра на линии с ЭВМ, впервые сооруженного в ОИЯИ под руководством И.А.Голутвина.

Неизвестные ранее закономерности были установлены при исследовании свойств странных частиц, образующихся в пион-нуклонных взаимодействиях при энергии 6,8 и 8,3 ГэВ. Среди них — выполнение при высоких энергиях общеизвестного сейчас закона сохранения инерции барионного заряда, а также обнаружение роста сечений образования пар К-мезонов и  $\xi$ -гиперонов с энергией.

В марте 1960 г. была открыта новая частица антисигма-минус-гиперон. Обнаружение этой частицы зарегистрировано в качестве открытия, среди его авторов — ученые стран-участниц ОИЯИ: В.И.Векслер, Н.М.Вирясов, Е.Н.Кладницкая, А.А.Кузнецов, В.А.Никитин, М.И.Соловьев (СССР), Нгуен Дин Ты (СРВ), Ким Хи Ин (КНДР), А.Михул (СРР).

В 1964 г. группой физиков под руководством М.Н.Хачатуряна с помощью электронной установки "Фотон" (двухплечевой 90-канальный черенковский масс-спектрометр) был поставлен решающий эксперимент, доказавший существование прямого перехода векторного мезона в фотон. Результаты эксперимента подтвердили предсказания модели векторной доминантности и сыграли в последующем большую роль в физике элементарных частиц. Явление прямого перехода фотон-векторный мезон — это явление часто называют "ядерными свойствами света" — было зарегистрировано как открытие, среди его авторов — ученые ОИЯИ: А.М.Балдин, А.Т.Матюшин, В.Т.Матюшин, М.Н.Хачатурян, И.В.Чувило (СССР), Я.Гладки (ЧССР).

В течение 1959-1973 гг. группами физиков ЛВЭ и ЛЯП ОИЯИ в сотрудничестве с ИФВЭ Тбилисского государственного университета

была проведена серия опытов по изучению распадных свойств долгоживущих  $K^0$ -мезонов ( $K_L^0$ ). В экспериментах обнаружены распады  $K_L^0 \rightarrow 3\pi^0$  и  $K_L^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$  и определена их вероятность. Установлены также вероятности других типов распадов долгоживущих  $K^0$ -мезонов, в которых участвовали заряженные лептоны и нейтрино. Совокупность данных этой серии экспериментов имела важное значение для последующих теоретических разработок.

В конце 60-х — начале 70-х годов на ускорителе ИФВЭ группой физиков ЛВЭ под руководством И.А.Савина, а затем М.Ф.Лихачева был выполнен цикл исследований регенерации нейтральных каонов на углероде, дейтерии и водороде с целью изучения энергетической зависимости трансмиссионной регенерации, амплитуда которой пропорциональна разности амплитуд рассеяния каонов и антикаонов на соответствующем ядре. Актуальность этих исследований определялась необходимостью проверки основных положений и выводов асимптотических теорий сильных взаимодействий (теоремы И.Я.Померанчука), дисперсионных соотношений, модели комплексных угловых моментов. Эксперименты выполнялись с помощью бесфильмового искрового спектрометра (БИС) на линии с ЭВМ, осуществлявшей прием и запись информации на магнитные ленты. В качестве мишени-регенератора использовались трехметровые жидководородная и жидкодейтериевая мишени, разработанные в ЛВЭ под руководством Л.Б.Голованова, и мишень из углерода.

Измерение трансмиссионной регенерации на водороде и дейтерии интерференционным способом было осуществлено впервые в мире. Было установлено, что фаза амплитуды регенерации на водороде не зависит от энергии и равна  $-132,5^\circ \pm 5,7^\circ$ , а модуль амплитуды обратно пропорционален корню квадратному из импульса каона. Аналогичный результат был получен на дейтерии. В этой области энергий приведенные данные до сих пор остаются уникальными.

Установленные в регенерационных экспериментах закономерности полностью исключали нарушение теоремы Померанчука об асимптотическом равенстве полных сечений взаимодействий частиц и античастиц, на возможность чего указывали некоторые имевшиеся в то время данные. Результаты эксперимента также устанавливали справедливость основных выводов теории комплексных угловых моментов и дисперсионных соотношений о поведении амплитуд рассеяния в новой тогда энергетической области только что запущенного ускорителя на 70 ГэВ.

С помощью установки БИС было зарегистрировано также большое число трехчастичных распадов каонов  $K_S^0$  и  $K_L^0$ , изучение которых позволило выяснить многие вопросы теории слабых взаимодействий. В частности, установлено, что матричные элементы распадов содержат в основном вклады векторных формфакторов. Определено поведение этих формфакторов в зависимости от переданного импульса. Эти ре-

зультаты вошли в мировой банк данных и до сих пор являются наиболее точными.

Большим международным коллективом, возглавляемым М.И.Соловьевым и В.Г.Гришиным, при обработке снимков с двухметровой пропановой пузырьковой камеры, облученной отрицательными пионами с импульсом 40 ГэВ/с на ускорителе ИФВЭ, впервые наблюдалось обильное образование короткоживущих ( $\sim 10^{-23}$  с) частиц-резонансов, установлено явление "раннего скейлинга" в пион-нуклонных взаимодействиях при высоких энергиях и существование в этих взаимодействиях линейной корреляции при рождении отрицательных и заряженных пионов.

Результаты исследований свойств рождения адронных струй в пион-нуклонных взаимодействиях подтвердили универсальность механизма перехода (фрагментацию кварков и дикварков в адроны в процессах "мягких" адрон-нуклонных и  $e^+e^-$ -столкновениях при одинаковой энергии в с.ц.м.).

Группой физиков ЛВЭ, руководимой И.М.Граменицким, при изучении свойств антипротон-протонных взаимодействий при импульсе 22,4 ГэВ/с впервые обнаружена выстроенность спина  $\rho$ -мезона, что является прямым указанием на наличие поляризации кварков на стадии перед их соединением в мезон. Этот результат получен при анализе снимков с двухметровой жидководородной пузырьковой камеры "Людмила".

Используя трекочувствительную жидкодейтериевую мишень внутри рабочего объема камеры "Людмила", эта же группа получила важные данные об основных характеристиках никем еще не изучавшихся антидейтрон-дейтронных столкновений при энергии 12 ГэВ.

Члены другого большого международного коллектива, возглавляемого М.Ф.Лихачевым, с помощью бесфильмового искрового спектрометра (БИС-2), продолжая ранее начатые работы в пучке нейтронов со средней энергией 40 ГэВ, осуществляют на ускорителе ИФВЭ широкую программу исследований короткоживущих частиц с квантовым числом "очарование" и ведут поиск новых узких барионных резонансов, распадающихся на странные и обычные частицы.

В результате уже выполненных экспериментов впервые обнаружено аномально большое сечение образования очарованного бариона  $\Lambda_c^+$  в дифракционных адронных столкновениях при указанных энергиях, изучена зависимость этого сечения от атомного номера ядра-мишени и установлено существование асимметрии в распадах очарованных  $\Lambda_c^+$ -барионов. Эти результаты не только имеют большое научное значение, но и являются открытием нового научно-стратегического направления исследований при энергиях, близких по величине энергии серпуховского ускорителя.

С помощью установки БИС-2 установлено существование неизвестного ранее узкого барионного резонанса  $N_\phi(1956)$ , распадающегося

ся на гиперон  $\Sigma^-(1385)$  и  $K^+$ -мезон, и исследованы его важнейшие свойства. Показано, что новый резонанс является "экзотическим", так как его свойства не описываются обычными кварковыми схемами.

Неизвестные ранее экзотические типы резонансных состояний: с изотопическим спином  $5/2$  в системах  $p\pi^+\pi^+$  и  $p\pi^-\pi^-$ , а также резонансы, распадающиеся на два протона или два отрицательных пиона, обнаружены в опытах группой физиков ЛВЭ под руководством Ю.А.Трояна при анализе снимков с однометровой жидководородной пузырьковой камеры, облученной на синхрофазотроне пучком монохроматических нейтронов.

Структура пионов и каонов в экспериментах по упругому ( $\pi^-e$ )- и ( $K^-e$ )-рассеянию при высоких энергиях была изучена группой физиков ЛВЭ под руководством Э.Н.Цыганова. Эти исследования явились началом долговременного советско-американского сотрудничества в области физики элементарных частиц и высоких энергий.

Постановка опыта по упругому ( $\pi^-e$ )-рассеянию при энергии 50 ГэВ на ускорителе ИФВЭ была предложена группой физиков из ОИЯИ и независимо физиками из Калифорнийского университета (Лос-Анджелес, США) в 1970-1971 гг. Экспериментальная установка, созданная совместными усилиями этих групп, представляла собой одноплечевой магнитный спектрометр, регистрирующий обе вторичные частицы, и включала в себя магнитоотражающую искровую и пропорциональные камеры, жидководородную мишень, анализирующий магнит, мюонный детектор и систему сцинтилляционных и черенковских счетчиков.

Изучение электромагнитного формфактора пиона в упругом ( $\pi^-e$ )-рассеянии при энергии 100 ГэВ было проведено на ускорителе ФНАЛ (Батавия, США) в 1975-1976 гг. В этом исследовании были использованы все методические разработки и особенности постановки эксперимента, выполненного в ИФВЭ, а сам эксперимент осуществлялся при ведущем участии физиков ОИЯИ.

В 1975 г. этим же коллективом были предложены эксперименты по измерению электромагнитных формфакторов пиона и каона в упругом ( $\pi^-e$ )- и ( $K^-e$ )-рассеянии при энергии 250 ГэВ. Новая экспериментальная установка была создана на основе спектрометра, использовавшегося в предыдущем эксперименте. Однако, поскольку было необходимо существенно улучшить пространственное и угловое разрешение спектрометра, в него были включены дрейфовые камеры для измерения траектории как первичной частицы, так и вторичных частиц после мишени. Прецизионные дрейфовые камеры были разработаны и созданы в ЛВЭ. Они имели рекордную координатную точность, составляющую 55 мкм. Дрейфовые камеры с такими параметрами были впервые использованы в ходе проведения физических исследований при высоких энергиях. В этом эксперименте был впервые измерен электромагнитный радиус  $K^-$ -мезона, который оказался равным  $0,53 \pm 0,05$  фм. Совместная аппроксимация данных ( $\pi^-e$ )-рассеяния всех трех экспе-

риментов при энергиях 50, 100 и 250 ГэВ позволила получить значение радиуса пиона, равное  $0,636 \pm 0,024$  фм.

Одновременное измерение упругого рассеяния пионов и каонов на электронах при энергии 250 ГэВ позволило провести также прямое экспериментальное определение разности их формфакторов. В результате получено, что  $\langle r_{\pi}^2 \rangle - \langle r_K^2 \rangle = 0,16 \pm 0,06$  фм<sup>2</sup>, что хорошо согласуется с указанными выше отдельными измерениями.

На основе опыта описанных выше экспериментов после ввода в строй ускорителей с энергией пучков до 1 ТэВ и более в США планируется продолжение этих исследований, что позволит не только существенно улучшить точность измерения радиусов пиона и каона, но и выполнить прямые измерения формы их зарядового распределения.

Группой физиков ЛВЭ под руководством И.А.Савина в сотрудничестве с учеными других лабораторий ОИЯИ и ЦЕРНа в течение 1975-1978 гг. создана одна из крупнейших в мире экспериментальных установок (эксперимент NA-4). На этой установке, которая с 1979 г. начала работать в пучке мюонов с энергией 100 ÷ 280 ГэВ на ускорителе ЦЕРНа, проводятся исследования глубоконеупругих взаимодействий мюонов с нуклонами и ядрами с целью изучения их структуры вплоть до расстояний  $10^{-15}$  см. Анализ уже полученных в эксперименте NA-4 данных позволил проверить правильность предсказаний современных теорий основных взаимодействий между частицами в области энергий и переданных импульсов, максимально возможных на существующих ускорителях.

В частности, в 1979-1980 гг. по результатам измерения сечений при трех значениях энергии вычислены неупругие структурные функции нуклона, характеризующие распределение заряда внутри протонов и нейтронов. Эти результаты позволили установить количественные характеристики поведения структурных функций в зависимости от переданного импульса и отношения переданного импульса к переданной энергии и определить значение масштабного параметра  $\lambda$ , необходимого для описания взаимодействий между кварками в рамках современной теории сильных взаимодействий — квантовой хромодинамики. Параметр  $\lambda$  оказался в несколько раз меньше, чем в других экспериментах, выполненных при более низких энергиях.

Полученные в эксперименте NA-4 данные анализируются также с точки зрения других аспектов исследования взаимодействий мюонов с ядрами. В частности, проводился анализ событий с кинематическими характеристиками, значения которых лежат в области, запрещенной для "обычных" столкновений мюонов с нуклонами (кумулятивный эффект). Наблюдение кумулятивного эффекта в процессах глубоконеупругого лептон-ядерного рассеяния прямым способом подтвердило основные выводы, полученные ранее на синхрофазотроне в опытах по предельной фрагментации ядер, в которых впервые экспериментально

был обнаружен кумулятивный эффект и установлены его важнейшие свойства.

С целью поиска и оценки сечения образования мюонами с энергией 280 ГэВ  $\nu$ -частиц в этом же эксперименте были исследованы многомюонные события. В ходе анализа спектра масс пар положительных и отрицательных мюонов в области  $2 \div 18$  ГэВ не удалось обнаружить эти частицы на уровне сечений  $\sim 1,3 \times 10^{-39}$  см<sup>2</sup>/нукл. Этот результат — самая низкая верхняя граница, достигнутая в эксперименте.

Экспериментальные данные по рассеянию положительных и отрицательных мюонов на углероде при энергии 200 ГэВ были использованы для выделения той части сечения их взаимодействия, которая обусловлена интерференцией между фотоном и нейтральным промежуточным бозоном — переносчиком слабых взаимодействий. Впервые обнаруженная при этом асимметрия в сечениях рассеяния поляризованных мюонов разных знаков позволила проверить предсказания стандартной электрослабой модели в неисследованном ранее процессе и определить константы связи мюонного нейтрального тока. Изучение зависимости разности сечений  $\mu^+$ - и  $\mu^-$ -взаимодействий от масштабной переменной  $x$  дало возможность впервые получить значение интерференционной структурной функции  $xG_3(x)$  и проверить предсказания кварк-партоновой модели для отношения структурных функций, справедливых при предположении о дробности зарядов кварков.

В течение 1983 г. проведены, при одновременном облучении мюонами различных мишеней, измерения соответствующих этим ядрам структурных функций нуклонов и определено их отношение в зависимости от переменных  $x$  и  $Q^2$ . Эти измерения были выполнены для проверки существования так называемого эффекта Европейской мюонной коллаборации (сокращенно — эффект ЕМС), указывающего на то, что в области значений масштабной переменной  $x \leq 0,6$  в ядрах возможно существование многокварковых состояний. Результаты эксперимента NA-4 подтвердили эффект ЕМС и впервые показали его независимость от переданного импульса ( $Q^2$ ) и слабую зависимость от атомного веса мишени. Другими словами, эти результаты устанавливали, что при определенных условиях ядро может существовать в виде объекта, "составленного" не из протонов и нейтронов. Впервые этот факт был установлен ранее группой физиков Лаборатории высоких энергий, возглавляемой А.М.Балдиным и В.С.Ставиным, в опытах по предельной фрагментации ядер, выполненных на синхрофазотроне. Результаты этих опытов позволили сформулировать широкую программу исследований для будущих экспериментов по глубоконеупругому лептон-ядерному рассеянию при высоких энергиях. Сейчас изучение кварковых степеней свободы в ядрах — новая, весьма актуальная область исследований, реализацией которых заняты многие группы физиков на всех крупнейших ускорительных комплексах мира.

Таким образом, из всего вышесказанного следует, что за время существования Лаборатории высоких энергий ее научному коллективу удалось успешно провести целый ряд выдающихся экспериментов по исследованию фундаментальных свойств элементарных частиц и их структуры и внести заметный вклад в ответы на поставленные теорией вопросы. Осуществление экспериментальной программы в этом важном научном направлении Лаборатории высоких энергий продолжается и сегодня.

## ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЗМОВ РОЖДЕНИЯ ЧАСТИЦ И РЕЗОНАНСОВ

*И.М.ГРАМЕНИЦКИЙ, профессор*

*В.Г.ГРИШИН, профессор*

*М.Ф.ЛИХАЧЕВ, кандидат физико-математических наук*

Одним из традиционных направлений в Лаборатории высоких энергий является изучение свойств частиц и исследование их множественного рождения как доминирующего процесса при взаимодействии адронов высоких энергий. Для этой цели в лаборатории в 50-60-е годы были созданы 3 жидководородные камеры (0,4; 1 и 2 м по длине корпуса камеры), 2 пропановые пузырьковые камеры (0,5 и 2 м) и ксеноновая камера (0,5 м), а также магнитные спектрометры, содержащие искровые камеры и черенковские счетчики. Методика пузырьковых камер, регистрирующих все вторичные заряженные и нейтральные частицы, стала основной при изучении множественного рождения частиц при энергиях дубненского (10 ГэВ) и серпуховского (70 ГэВ) ускорителей. В результате экспозиции этих камер в пучках различных частиц ( $\pi$ ,  $n$ ,  $p$ ,  $\bar{p}$ ,  $d$ ,  $\bar{d}$  и легких ядер) при энергиях от 1 до 40 ГэВ была получена обширная информация об их взаимодействиях (около 5 миллионов стереофотографий), которая рассылалась в 50 институтов стран-участниц ОИЯИ, а также в институты Индии, Югославии, Франции, Финляндии и других стран. Около 50% информации обрабатывалось в ОИЯИ.

Впервые были созданы большие коллективы физиков из разных стран (до 100 специалистов), работающих по согласованной физической проблематике, что позволило существенно ускорить получение новых результатов. Это пример успешной организации "физики на расстоянии", что является одной из главных задач ОИЯИ.



Обработка информации, полученной с помощью пузырьковых камер, облученных на синхрофазотроне ОИЯИ, позволила получить данные о свойствах рождающихся частиц и резонансов (например, об импульсных и угловых распределениях, поляризациях, сечениях и т.д.). При этих энергиях ( $\leq 10$  ГэВ) доминирующую роль играют периферические процессы с образованием резонансов. Были измерены характеристики рождения легких резонансов ( $\rho$ ,  $\omega$ ,  $f$ ) и нуклонных изобар ( $\Delta$ ). Эти данные были успешно описаны моделью с обменом реджизованным пионом. В 1960 г. с помощью пропановой пузырьковой камеры, облученной отрицательными пионами с импульсом  $\sim 8$  ГэВ/с, был обнаружен случай образования и распада новой античастицы — антисигма-минус-гиперона. Это явление зарегистрировано в качестве научного открытия. На основе электронной методики в экспериментах по изучению  $\pi^+p$ -рассеяния назад были впервые установлены четности нуклонных изобар  $\Delta(2420)$  и  $\Delta(2840)$ . Результаты исследований на дубненском синхрофазотроне вошли в банк мировых данных и обзоры по характеристикам процессов при этих энергиях.

В связи с запуском в 1967 г. самого мощного в мире ускорителя на 70 ГэВ в ИФВЭ (Протвино) с помощью двухметровых пропановой и водородной ("Людмила") пузырьковых камер была осуществлена большая программа исследований процессов множественного рождения при энергии 22 и 40 ГэВ. Это первые результаты при столь высоких энергиях. Прежде всего были получены данные о множественностях вторичных заряженных и нейтральных частиц в  $\bar{p}p$ -,  $\pi^-p$ - и  $\pi^-^{12}C$ -взаимодействиях, которые сравнивались с моделями мультипериферического типа. Обнаружен рост средней множественности нейтральных пионов с увеличением числа заряженных частиц, что свидетельствовало о существенном вкладе ветвлений при этих энергиях. В дальнейшем установленная закономерность была подтверждена и при более высоких энергиях, вплоть до энергии коллайдера ( $E = 140$  ТэВ).

Было обнаружено, что во множественных процессах при энергиях 22 и 40 ГэВ доминирует образование резонансов ( $\geq 80\%$ ). Эти результаты были первым подтверждением предсказаний кварковых моделей множественного рождения частиц. Детальное сравнение экспериментальных данных с кварковой моделью показало, что она хорошо описывает инклюзивные и полуинклюзивные спектры вторичных частиц в  $\bar{p}p$ -взаимодействиях при энергии 22 ГэВ. Отклонения наблюдаются при сравнении корреляционных характеристик, это дает возможность усовершенствовать кварковые модели и глубже понять природу механизма множественного рождения.

Разработанный в лаборатории метод интерференционных корреляций позволил определить размеры области испускания пионов в исследуемых процессах. В  $\bar{p}p$ -взаимодействиях он оказался равен  $r \sim 2,5$  фм, в  $\pi^-p$ -соударениях (40 ГэВ) — 1,6 фм. Была изучена

и форма области излучения пионов, она оказалась вытянутой вдоль оси реакции в  $\bar{p}p$ -взаимодействиях и "сплюснутой" в  $\pi^-p$ -соударениях. В обоих случаях эта форма области излучения пионов объясняется кинематикой образования и распада резонансов. Было также показано, что экстремальные значения размеров области образования пионов в  $\pi^-p$ -взаимодействиях наблюдаются в системе центра инерции (с.ц.и.) составляющих их кварков, что является прямым доказательством кварковой природы этих взаимодействий.

Большой интерес представляет изучение спиновых эффектов, проявляющихся при рождении векторных мезонов. При исследовании процессов рождения  $\rho^0$ - и  $\omega^0$ -мезонов в  $\bar{p}p$ -взаимодействиях была обнаружена значительная выстроенность спина этих мезонов. Отсутствие этих эффектов в  $pp$ -взаимодействиях при той же энергии (22 ГэВ) позволяет связать их с аннигиляционными процессами в  $\bar{p}p$ -взаимодействиях. Эти данные, в частности, указывают на несостоятельность предположения некоторых кварковых моделей о равной вероятности существования всех спиновых проекций кварков. Причины появления поляризации кварков до их объединения в адроны в настоящее время широко обсуждаются. В любом случае, они связаны уже с более тонкими эффектами механизма множественного рождения.

Таким образом, длительное изучение множественных процессов в  $\bar{p}p$  (22 ГэВ)- и  $\pi^-p$  (40 ГэВ)-взаимодействиях, проведенное коллективами физиков из стран-участниц ОИЯИ с помощью двухметровых пузырьковых камер, позволило открыть новые закономерности этих процессов и установить их кварковую природу. Эти работы способствовали развитию кварк-партоновых моделей взаимодействия адронов при высоких энергиях.

С помощью двухметровой пропановой камеры выполнен большой цикл экспериментов по исследованию кумулятивных процессов в  $\pi^-^{12}\text{C}$ -взаимодействиях при  $p = 40$  ГэВ/с. Впервые было показано, что предельная фрагментация ядер углерода имеет место в интервале от 4 до 40 ГэВ/с. Изучены корреляционные характеристики пионов и протонов в кумулятивных процессах и установлены области их изменения. Обнаружены кумулятивные струи адронов, характеристики которых совпадают с аналогичными в "жестких" процессах и  $e^+e^-$ -аннигиляции при одинаковых энергиях взаимодействия в с.ц.и. Эта совокупность данных объясняется в рамках кварк-партоновой модели ядра, не сводящейся к модели независимых нуклонов с учетом их ферми-движения.

В последние годы с помощью камеры "Людмила" проводится экспериментальное исследование взаимодействий антидейтронов при  $p \approx 12$  ГэВ/с. Главная цель этих экспериментов — изучение аннигиляции  $dd$ , то есть 6 кварков и 6 антикварков. Получены первые результаты по множественности и одночастичным инклюзивным характеристикам  $dd$ -взаимодействий. Найдено событие  $\bar{d}d$ -аннигиляции

( $\sigma > 0,1$  мб). Поскольку об аннигиляционных каналах в этих процессах нет никакой информации, то после обработки полученных данных, несомненно, появятся новые интересные сведения об этих экзотических реакциях.

В 1986-1990 гг. на базе установки "Людмила" будет создан магнитный спектрометр с вершинным детектором (СВД). В качестве вершинного детектора будет использоваться быстроциклирующая водородная камера с высоким (10-20 мкм) пространственным разрешением. Главной задачей СВД является изучение характеристик процесса образования очарованных частиц пионами и протонами при энергиях 50-70 ГэВ на серпуховском ускорителе.

Модернизируется установка с двухметровой пропановой камерой. Она будет заполнена пропаном или фреоном, в ней будут установлены пластинки из различных элементов. Все это позволит изучать взаимодействия ядер, а также адронов и лептонов с ядрами при высоких энергиях. В настоящее время практически отсутствуют данные об адронной компоненте, образующейся во взаимодействиях нейтрино (антинейтрино) со средними и тяжелыми ядрами. В связи с этим планируется использовать эту установку для изучения процесса образования адронов во взаимодействиях  $\nu(\bar{\nu})$  с ядрами на серпуховском ускорителе.

В конце 70-х — начале 80-х годов с помощью бесфильмового спектрометра (БИС-2) ОИЯИ, действующего на линии с ЭВМ в пучке нейтронов серпуховского ускорителя, проведены изучение адронного рождения очарованных частиц и странных барионов и поиск новых узких барионных резонансов. Эти исследования выполнены в соответствии с планом международного сотрудничества ОИЯИ, в них приняли участие 14 институтов Советского Союза и стран-участниц.

В этих исследованиях при энергиях нейтронов, доступных на серпуховском ускорителе (20-70 ГэВ), впервые были получены следующие результаты:

а) получены экспериментальные данные о сечениях и динамике рождения странных барионов со странностями от -3 до +2;

б) обнаружен новый узкий барионный резонанс с массой  $1956_{-6}^{+8}$  МэВ/с<sup>2</sup> в системе  $\Sigma^-(1385)K^+$ , исследованы характеристики его рождения и распада;

в) наблюдалась когерентная диссоциация нейтронов на ядрах в систему  $\Lambda^0 K^0$ ;

г) наблюдалось адронное рождение очарованных барионов  $\Lambda_c^+$ , надежно зарегистрированных по двум каналам распада:  $K^0 \pi^- \pi^+$  (канал распада наблюдался впервые) и  $\Lambda^0 \pi^+ \pi^- \pi^+$ ; показано, что нижняя граница сечения рождения  $\Lambda_c^+$  нейтронами с энергией  $58 \pm 2$  ГэВ/с составляет  $\geq 17$  мкб на нуклон, что превышает предсказания значительной части теоретических моделей;

д) получены экспериментальные данные (при энергиях, отличных от энергий встречных накопительных колец в ЦЕРНе) о динамике

адронного рождения очарованных барионов, свидетельствующие о существенной роли процессов образования  $\Lambda_c^+$  в области фрагментации первичных нейтронов.

Научная программа на 1986-1990 гг. (проект "Чарм") предусматривает проведение на качественно новом уровне исследований свойств процессов рождения и распада очарованных частиц, узких барионных резонансов и странных частиц, образуемых нейтронами при энергиях, доступных на серпуховском ускорителе. Модернизированный спектрометр БИС-2М ОИЯИ существенно расширит область измерения кинематических переменных исследуемых процессов, улучшит идентификацию вторичных заряженных частиц, повысит избирательность к изучаемым каналам реакций в реальном времени.

# СПЕКТРОСКОПИЯ РАДИАЛЬНО-ВОЗБУЖДЕННЫХ СИСТЕМ ИЗ ЛЕГКИХ КВАРКОВ

*А.А.ТЯПКИН, профессор*

В последнее десятилетие на серпуховском ускорителе с помощью магнитного искрового спектрометра (МИС) ОИЯИ был проведен большой цикл исследований различных каналов множественного образования заряженных частиц на ядрах. Это был пятый эксперимент по плану международного сотрудничества Государственного комитета по использованию атомной энергии СССР и Европейской организации по ядерным исследованиям (ЦЕРН). Основными участниками совместных исследований были сотрудники отдела искрового спектрометра Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ и Национального института ядерной физики Италии из Милана и Болоньи. Приняли в них участие и физики из университетов Варшавы, Братиславы и Хельсинки.

Обработка обширного экспериментального материала, полученного на установке МИС, завершилась установлением целого ряда важных результатов. При изучении общих характеристик множественного образования заряженных частиц отрицательными пионами на ядрах была обнаружена неизменность для разных ядер мишени псевдобыстротных распределений при фиксированной множественности. Интересные новые результаты дали проведенные специальные измерения сечений полукогерентных упругих и неупругих взаимодействий пионов с ядрами углерода, которые сопровождаются последующим излучением  $\gamma$ -кванта возбужденным ядром.

Наиболее важные результаты были получены при изучении дифракционного образования пионами на ядрах трехпионных систем. Из всех каналов неупругого взаимодействия этот процесс наиболее близок к бинарным реакциям. Он допускает детальный анализ, который позволяет определить вклад отдельных состояний, различающихся по спине и четности. В силу этих особенностей исследование процесса дифракционной диссоциации адронов на ядрах в более сложные системы представляет уникальные возможности для обнаружения и изучения резонансных уровней возбуждения, присущих налетающим адронам как

сложным системам, состоящим из кварка и антикварка. Благодаря высокой точности измерения параметров треков частиц в проведенном эксперименте удалось в полной мере реализовать указанные преимущества поиска резонансных состояний в дифракционном процессе их образования и обнаружить ранее не наблюдавшиеся радиально-возбужденные состояния пиона.

Для изучения процесса дифракционного образования трехпионных систем на ядрах пионами с импульсом 40 ГэВ/с нами получено свыше 700 тысяч стереофотографий взаимодействий пионов с различными ядрами мишени; управление спектрометром осуществлялось специальной триггерной системой, эффективно отбирающей когерентные события с малым переданным импульсом. Такой значительный объем фоновой информации потребовал применения полностью автоматической обработки стереофотоснимков, которая проводилась на сканирующих автоматах НРD в Болонье и Дубне. Последующая обработка экспериментального материала и анализ результатов проводились на больших ЭВМ в Дубне, Милане и Женеве.

В результате автоматической обработки экспериментального материала было получено 110 тысяч событий с образованием трех пионов, удовлетворяющих всем критериям геометрической и кинематической проверки. Для каждого из этих событий были определены величина переданного ядру импульса, углы вылета мезонов из мишени, их импульсы и эффективная масса покоя всей системы из трех пионов. Эти данные заключали в себе полную информацию, необходимую для анализа характеристик возможных резонансов, образующихся при диссоциации пионов. Для дальнейшего анализа использовались события с малым переданным импульсом в области дифракционного конуса до первого минимума. Это надежно обеспечило выбор "чистых" когерентных событий без возбуждения ядра мишени.

С целью выявления возможных резонансных состояний для всей трехпионной системы был использован парциально-волновой анализ трехчастичных событий, учитывающий отдельно вклады различных волновых состояний по спине и четности. Такой анализ позволяет не только обнаружить резонансный характер вклада определенной волны, но и получить по изменению в соответствующей области масс фазы этой волны доказательство резонансной природы обнаруженного пика. Это обстоятельство имеет решающее значение в случае поиска малоинтенсивных и широких резонансов, поскольку подобные пики могут возникать также из-за кинематических эффектов.

В результате анализа были прежде всего найдены достаточно интенсивные пики известных резонансов  $A_1$  и  $A_3$  с квантовыми числами  $1^+$  и  $2^-$ . Для этих пиков обнаружены значительные изменения фаз соответствующих волн  $1^+$  и  $2^-$  в зависимости от эффективной массы системы из трех пионов. Это окончательно доказывает резонансную природу этих пиков.

Наиболее важные результаты проведенный анализ дал для вклада волны  $0^-$ , имеющей те же квантовые числа момента и четности, что и налетающий пион. В зависимости вклада этой волны от эффективной массы покоя всей системы были обнаружены характерные пики в области около 1200 и 1800 МэВ. Полученные в тех же областях масс значительные изменения фазы волны  $0^-$  (около  $80^\circ$ ) убедительно свидетельствуют о резонансной природе обнаруженных пиков.

Значительная ширина новых резонансов (300 и 200 МэВ), малая интенсивность и перекрытие первого из них более интенсивным  $A_1$ -резонансом препятствовали обнаружению этих возбужденных состояний в работах, предшествовавших нашему эксперименту. Большая статистика событий и высокая точность измерений позволили в данном эксперименте установить существование новых возбужденных состояний пиона со средними значениями массы  $1240 \pm 10$  и  $1770 \pm 40$  МэВ\*.

Тот факт, что массы новых резонансов значительно превышают массу налетающего пиона, а их квантовые числа полного момента совпадают, означает обнаружение возбуждения радиальной степени свободы в кварк-антикварковой системе. Таким образом, найденные резонансы принадлежат к особому типу резонансов, не укладывающихся в рамки обычной классификации адронов на основе теории унитарной симметрии. Такие резонансы дают наиболее прямое подтверждение составной структуры строения соответствующих адронов. Важной особенностью новых резонансов является то, что они непосредственно доказывают составную структуру наилегчайшего адрона, вносящего основной вклад в ядерные взаимодействия нуклонов. Полученные в эксперименте количественные характеристики обнаруженных радиально-возбужденных состояний пиона могут быть использованы для проверки теории, претендующей на описание спектроскопии системы из легких кварков.

При анализе вклада волн со спином и четностью  $1^+$ ,  $2^+$  и  $2^-$  были обнаружены резонансные эффекты в области масс трехпионной системы около 2 ГэВ, которые указывают на существование радиальных возбуждений  $A_1$ -,  $A_2$ - и  $A_3$ -мезонов. Тем самым результаты проведенных на спектрометре МИС экспериментов привели к обоснованию существования новых траекторий Редже, включающих в себя радиальные возбуждения пионов и  $A$ -мезонов.

В целом же благодаря успешному изучению дифракционного процесса образования трехпионных систем на ядрах обосновано новое направление исследований — спектроскопия радиально-возбужденных систем из легких кварков. Кварковая теория предсказывает целый ряд еще не открытых возбужденных состояний пионов и каонов в области

---

\*Существование первого из этих резонансов было затем подтверждено группами из ЦЕРНа и ФНАЛа.

энергий, доступных для серпуховского ускорителя. Обнаружение новых возбужденных состояний из легких и странных кварков, определение их массы, распадных ширин и интенсивности образования будет иметь первостепенное значение для апробации релятивистских вариантов кварковой теории адронов.

В проведенном эксперименте непосредственно проявилась плодотворность международного научного сотрудничества. Объединение усилий нескольких научных центров позволило получить новые фундаментальные результаты в ранее, казалось бы, достаточно подробно исследованной области энергий.





# Структура теорії поля

# КВАНТОВАЯ ТЕОРИЯ ПОЛЯ

*Д.В.ШИРКОВ, член-корреспондент АН СССР*

Основные идеи теории квантованных полей зародились в конце 20-х годов одновременно с возникновением релятивистской формулировки квантовой механики. Квантовое поле — это фундаментальное физическое понятие, отвечающее универсальной форме материи и лежащее в основе всех ее конкретных проявлений. Квантовое поле представляет собой единый объект, заменяющий поля и частицы классической физики. Математический аппарат квантовой теории поля в наши дни является единственной теоретической основой физики микрочастиц и их взаимодействий.

Современную форму квантовая теория поля приобрела в конце 40-х — начале 50-х годов, когда после реализации идеи вычитания ультрафиолетовых бесконечностей и построения ковариантной теории возмущений удалось создать математически строгую теорию перенормировок и получить конечную однозначную теорию возмущений для матрицы рассеяния. На заключительном этапе этого периода окончательного становления квантовой теории поля важную роль сыграли работы Н.Н.Боголюбова и его школы.

## 1. НОВАЯ ТЕОРИЯ МАТРИЦЫ РАССЕЙНИЯ

В цикле работ, опубликованных в 1951-1955 гг., Н.Н.Боголюбов дал формулировку квантово-полевой теории возмущений для матрицы рассеяния, рассматриваемой как функционал от свободных полей в произвольной области пространства-времени <sup>/1/</sup>. В этом построении решающую роль сыграла явная математическая запись условия микроскопической причинности <sup>/2/</sup>, наложенного непосредственно на матрицу рассеяния и сформулированного в терминах ее вариационных производных по "функции включения взаимодействия". Условие причинности Боголюбова оказалось наиболее сильным. Известное условие локальной коммутативности, выраженное через коммутатор

токов, а также предложенное ранее условие Штюкельберга являются следствиями условия Боголюбова. Использование этого условия совместно с условиями релятивистской ковариантности и унитарности матрицы рассеяния привело к созданию нового метода теории возмущений<sup>8/</sup> по степеням "функции включения взаимодействия". Преимущество метода связано с тем, что он не использует, подобно гамильтонову методу, уравнения движения и понятие состояния в фиксированный момент времени. Дело в том, что, в отличие от квантовой механики, математически корректное определение таких состояний в квантовой теории взаимодействующих полей наталкивается на трудности, связанные с наличием ультрафиолетовых расходимостей.

В рамках нового метода матрица рассеяния во всех сколь угодно высоких порядках теории возмущений представляется в виде, близком к результатам обычного гамильтонова подхода, использующего уравнение Шредингера. Отличие заключается в наличии так называемых квазилокальных операторов, дающих вклады в эффективный гамильтониан в виде контрчленов. Последние представляют собой средство проведения операции устранения расходимостей, которая тем самым получает строгое обоснование. Процедура перенормировок ультрафиолетовых бесконечностей при этом выглядит весьма элегантно и естественной. Она оказывается эквивалентной доопределению хронологических произведений операторных полевых функций в точках совпадения их пространственно-временных аргументов.

В дальнейшем выяснилось, что условие Боголюбова, сформулированное в терминах вариационных производных по полям, оказывается весьма удобным для аксиоматического построения теории поля. Соответствующее построение матрицы рассеяния, исходящее из небольшого числа фундаментальных условий, наложенных на нее самое, исторически явилось первой аксиоматической конструкцией в квантовой теории поля. Используемая здесь система аксиом была впоследствии расширена Н.Н.Боголюбовым для получения строгого доказательства дисперсионных соотношений (см. статью "Дисперсионные соотношения" в этой книге, с.99).

## 2. ТЕОРИЯ ПЕРЕНОРМИРОВОК

Процесс создания аксиоматической теории возмущений выявил важность тщательного анализа математической структуры сингулярных квантово-полевых функций (простейшей из которых является причинная функция распространения Штюкельберга — Фейнмана) и определения операций над ними, в первую очередь операции умножения друг на друга. Именно в сингулярном характере коэффициентных функций матрицы рассеяния кроется причина их неоднозначности, лежащая в основе нового взгляда на процедуру вычитания ультрафиолетовых расходимостей.

Доказательство того, что на этом пути можно перенормировать все расходящиеся диаграммы в любом порядке теории возмущений, сведя для перенормируемых теорий (например, для квантовой электродинамики) всю процедуру к перенормировкам масс, полей и констант связи, представляет собой довольно сложную математическую проблему. Она решена в работах Н.Н.Боголюбова и его учеников. При проведении этой программы выяснилось, что обычного аппарата классического математического анализа недостаточно для описания объектов, фигурирующих в квантовой теории поля. Было показано, что ультрафиолетовые расходимости возникают вследствие некорректного умножения причинных функций, являющихся обобщенными функциями в смысле Соболева.

На этой основе была разработана специальная техника такого доопределения произведений причинных функций, которое обеспечивает конечность и однозначность элементов матрицы рассеяния в произвольных порядках теории возмущений. Соответствующее утверждение составляет содержание теоремы о перенормировках<sup>4/</sup>. Его рецептурная часть<sup>5/</sup> (так называемая R-операция) является практической основой получения конечных однозначных результатов в квантово-полевых расчетах.

В итоге этих исследований к середине 50-х годов квантовая электродинамика (теория квантового взаимодействия электронов и позитронов с электромагнитным полем) стала законченной областью теории. Ее очень хорошее согласие с опытом подтвердило правильность физических представлений, лежащих в основе локальной квантовой теории поля.

Тем не менее в квантовой электродинамике оставалась еще одна проблема, ждущая своего решения. Речь идет о так называемых ультрафиолетовых асимптотиках перенормированных матричных элементов, то есть об их поведении в области больших значений энергии  $E$  и (или) импульсов  $\vec{p}$ . Дело в том, что при больших абсолютных значениях лоренц-инвариантной формы  $p^2 = E^2 - \vec{p}^2$  эффективным параметром разложения квантовой электродинамики оказывается не безразмерный квадрат заряда электрона (точнее, постоянная тонкой структуры  $\alpha = e^2/4\pi \approx 1/137$ ), а произведение  $\alpha \ln p^2$ , которое при достаточно больших значениях  $p^2$  перестает быть малым по сравнению с единицей. Поэтому в ультрафиолетовой области теория возмущений оказывается неэффективной.

### 3. РЕНОРМАЛИЗАЦИОННАЯ ГРУППА

В середине 50-х годов Н.Н.Боголюбовым и его учениками был создан новый, чрезвычайно эффективный метод исследования ультрафиолетовых и инфракрасных асимптотик в квантовой теории поля — метод ренормализационной группы.

Ренормализационная группа есть группа непрерывных преобразований квантово-полевых величин, связанных с особой симметрией микромира. Уравнения квантовой теории поля допускают специальный класс однопараметрических преобразований, состоящих из операции изменения масштаба импульсно-энергетических (или, что эквивалентно, пространственно-временных) переменных и операции преобразования константы связи, имеющей более сложный функциональный характер. Определение явного вида функции преобразования требует решения уравнений движения. Такие преобразования естественным образом возникают в процессе устранения расходимостей и называются преобразованиями перенормировки или ренормировочными. С математической точки зрения они являются функциональным обобщением преобразований степенного подобию.

Факт наличия особой группы непрерывных преобразований, связанных с конечным произволом, возникающим в результате квантово-полевой процедуры устранения ультрафиолетовых расходимостей, был установлен в 1953 году Штюкельбергом и Петерманом. Вслед за тем ренормгрупповые преобразования были явно реализованы как специфические преобразования (конечные преобразования Дайсона) вершинных функций, пропагаторов и констант связи при одновременном преобразовании растяжения шкалы энергий и импульсов. Оказалось, что эти преобразования могут быть записаны в виде функциональных уравнений для вновь введенных специфических функций — инвариантных (иначе — эффективных) констант связи. С практической точки зрения весьма полезными оказались дифференциальные групповые уравнения, соответствующие бесконечно малым групповым преобразованиям, впервые полученные в работе <sup>6/</sup>. На основе этих уравнений Н.Н.Боголюбовым и автором этих строк была предложена регулярная процедура улучшения результатов квантово-полевой теории возмущений в ультрафиолетовой и инфракрасной областях, то есть в таких областях, где решения уравнений движения имеют сингулярное поведение. Эта процедура, успешно примененная <sup>7,8/</sup> к асимптотикам функций Грина квантовой электродинамики, а также в двухзарядной мезон-нуклонной модели <sup>9/</sup>, известна теперь как метод ренормализационной группы (МРГ).

В 50-х (а также и в 60-х) годах МРГ в основном использовался в чисто теоретических квантово-полевых построениях. Принципиальным результатом, полученным на его основе, явилось заключение <sup>10/</sup> о недостаточности известных рассуждений о внутренней противоречивости локальной квантовой теории поля, основывавшихся на феномене призрачного полюса (иначе — "нуля заряда"). Это заключение было затем проиллюстрировано <sup>11/</sup> на явном примере.

Положение существенно изменилось в начале 70-х годов. Появилась перенормируемая объединенная модель электрослабых взаимодействий, а также теория кварк-глюонных взаимодействий (квантовая

хромодинамика), основанные на принципе локальной калибровочной симметрии и содержащие неабелевы калибровочные поля — поля Янга-Миллса. Было обнаружено, что в квантово-полевых моделях, содержащих такие поля, и в частности, в квантовой хромодинамике с небольшим числом кварковых полей, инвариантный заряд убывает с уменьшением расстояния (то есть с ростом  $p^2$ ). Явная формула для эффективного заряда квантовой хромодинамики в однопетлевом приближении, приведшая к важному качественному заключению о наличии в ней феномена асимптотической свободы, была получена с помощью МРГ. В современной литературе более употребительна формула двухпетлевого ренормгруппового приближения для эффективного заряда квантовой хромодинамики. Отметим, что ее прообраз, содержащий характерную зависимость  $\ln \ln p^2$  (не имеющую аналога в разложениях теории возмущений), был впервые получен в работе <sup>/7/</sup>.

В середине 70-х годов появилась схема так называемого "великого объединения взаимодействий", одним из следствий которой является возможность распада протона. Основное предположение схемы основано на экстраполяции эффективных констант связи квантовой электродинамики и квантовой хромодинамики из области современных экспериментальных энергий в такую область сверхвысоких энергий  $\sqrt{|p^2|} \approx 10^{15 \pm 1}$  ГэВ/с, где эти величины сравниваются. Подобная экстраполяция технически выполняется на основе формул, полученных с помощью МРГ.

Следует также отметить, что в течение 70-х годов МРГ вышел за рамки квантовой теории поля и успешно применяется в теории критических явлений, теории турбулентности, физике полимеров и ряде других, весьма далеких от физики микромира, разделах теории.

Причина такой общефизической универсальности ренормгрупповых представлений была недавно проанализирована в работе <sup>/12/</sup>. Суть дела заключается в том, что функциональные уравнения ренормгруппы соответствуют однопараметрической группе преобразований, которая отвечает симметрии транзитивного типа, то есть свойству транзитивности некоторой динамической величины  $G(x, g)$ , зависящей от физической переменной  $x$  и своего начального значения  $g$ , относительно значения переменной  $x = x_0$ , при котором это начальное значение задается. Такая симметрия в силу своей простоты присуща широкому кругу динамических систем при условии однородности по переменной  $x$ .

Возвращаясь к основной теме, подчеркнем, что в наши дни в квантовой теории поля метод ренормгруппы является одним из основных методов исследования. В теории сильных взаимодействий кварков и глюонов — квантовой хромодинамике, образующей фундамент современной теории ядерных сил, этот метод представляет собой главное средство получения количественных результатов.

Перечисленные в этом кратком очерке фундаментальные достижения Н.Н.Боголюбова и его школы надежно закрепились в основном

фонде данного раздела теоретической физики. Они широко отражены в монографиях и учебниках (см., например, /13-16/ ).

Результаты, полученные Н.Н.Боголюбовым в области новой теории матрицы рассеяния и теории перенормировок, вошли в цикл его работ, удостоенных Ленинской премии за 1958 год.

Цикл работ Н.Н.Боголюбова, А.А.Логунова и автора этих строк "Метод ренормализационной группы в теории полей", выполненный в 1955-1956 гг., отмечен в 1984 году Государственной премией СССР.

### *Литература*

1. Боголюбов Н.Н. ДАН СССР, 1951, т.81, с.757, 1015; ДАН СССР, 1952, т.82, с.217.
2. Боголюбов Н.Н. Изв.АН СССР, сер.физ., 1955, т.19, с.237.
3. Боголюбов Н.Н., Ширков Д.В. УФН, 1955, т.55, с.149; УФН, 1955, т.57, с.3.
4. Боголюбов Н.Н., Парасюк О.С. ДАН СССР, 1955, т.100, с.25, 429; Изв.АН СССР, сер.мат., 1956, т.20, с.585; Acta Mathemat., 1957, vol.97, p.227.
5. Степанов Б.М. ДАН СССР, 1963, т.151, с.84; Изв.АН СССР, сер.мат., 1965, т.29, с.1037; Завьялов О.И., Степанов Б.М. ЯФ, 1965, т.1, с.922; Завьялов О.И. ТМФ, 1974, т.21, с.322; ТМФ, 1975, т.23, с.291.
6. Боголюбов Н.Н., Ширков Д.В. ДАН СССР, 1955, т.203, с.203.
7. Боголюбов Н.Н., Ширков Д.В. ДАН СССР, 1955, т.203, с.391.
8. Логунов А.А. ЖЭТФ, 1956, т.30, с.793.
9. Ширков Д.В. ДАН СССР, 1955, т.105, с.972.
10. Боголюбов Н.Н., Ширков Д.В. ДАН СССР, 1955, т.105, с.685.
11. Боголюбов Н.Н., Логунов А.А., Ширков Д.В. ЖЭТФ, 1959, т.37, с.805.
12. Ширков Д.В. ДАН СССР, 1982, т.263, с.63; ТМФ, 1984, т.60, с.218.
13. Боголюбов Н.Н., Ширков Д.В. Введение в теорию квантованных полей. "Наука", М., 1984, изд.4-е.
14. Боголюбов Н.Н., Логунов А.А., Тодоров И.Т. Основы аксиоматического подхода в квантовой теории поля. "Наука", М., 1969.
15. Завьялов О.И. Перенормированные диаграммы Фейнмана. "Наука", М., 1979.
16. Боголюбов Н.Н., Ширков Д.В. Квантовые поля. "Наука", М., 1980.

## ДИСПЕРСИОННЫЕ СООТНОШЕНИЯ

*В.А.МЕЩЕРЯКОВ, профессор*

*НГУЕН ВАН ХЪЕУ, профессор (иностранный член АН СССР)*

*Л.Д.СОЛОВЬЕВ, профессор*

Дисперсионные соотношения были впервые получены в 30-е годы Крамерсом и Кронигом <sup>1/</sup> в оптике при изучении процесса распространения света в диэлектрической среде с затуханием. С тех пор они широко применяются в различных областях физики, но, пожалуй, наибольшего развития они достигли в 60-е годы в физике элементарных частиц. Широта и устойчивость их применения обусловлены тем, что дисперсионные соотношения являются математическим следствием отсутствия в природе сигналов, распространяющихся со сверхсветовой скоростью. Это свойство приводит к тому, что реакция любой системы на внешнее воздействие отсутствует до тех пор, пока оно ее не достигло. Если упрощенно характеризовать реакцию системы одной величиной  $F(t)$ , то условие  $F(t) = 0$  для  $t < 0$ , где  $t = 0$  — момент прихода сигнала, естественно назвать условием причинности. Математически удобнее обращаться не с самой величиной  $F(t)$ , а с ее фурье-образом

$$f(E) = \int F(t) e^{iEt} dt,$$

который в квантовой теории носит название амплитуды рассеяния в энергетическом представлении. Условие причинности приводит к тому, что амплитуда рассеяния  $f(E)$  является аналитической функцией комплексной переменной  $E = x + iy$  в верхней полуплоскости  $y > 0$ . Действительно, амплитуда рассеяния  $f(E)$  может быть продолжена на комплексные значения переменной  $E$ , так как растущая ветвь функции  $e^{-yt}$  не оказывает влияния на амплитуду рассеяния в силу условия причинности. Аналитические свойства амплитуды рассеяния позволяют применять для ее исследования хорошо развитый аппарат теории функций комплексного переменного. Обычно в качестве основного математического средства используется интегральная формула Коши:



$$f(E) = \frac{1}{2\pi i} \int_C \frac{f(E')}{E' - E} dE',$$

которая выражает функцию в любой точке внутри замкнутого контура  $C$  через ее граничные значения на самом контуре. Контур расположен в области аналитичности амплитуды рассеяния  $f(E)$ , которая определяется принципом причинности. Однако принцип причинности не запрещает амплитуде рассеяния иметь полюсы, положение которых на действительной оси зависит от масс элементарных частиц, а вычеты в них определяются константами взаимодействия между частицами. При действительных значениях энергии  $E$ , которые больше энергии покоя сталкивающихся частиц, амплитуда рассеяния имеет как действительную  $\text{Re}f(E)$ , так и мнимую  $\text{Im}f(E)$  части и просто связана с дифференциальным сечением рассеяния:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = |f(E)|^2 = (\text{Re}f(E))^2 + (\text{Im}f(E))^2.$$

Мнимая часть амплитуды рассеяния на нулевой угол (рассеяние вперед) выражается через другую экспериментально наблюдаемую величину — полное сечение (оптическая теорема):

$$\text{Im}f(E) \sim \sigma_{\text{tot}}(E).$$

Для ряда процессов контур  $C$  фактически сводится к своей действительной части (рис.1), для других этого удастся достигнуть специальными приемами, и тогда получается дисперсионное соотношение (ДС)

$$\text{Re}f(E) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\text{Im}f(E')}{E' - E} dE',$$

в которое входят экспериментально наблюдаемые величины, характеризующие рассеяние массы взаимодействующих частиц и их константы

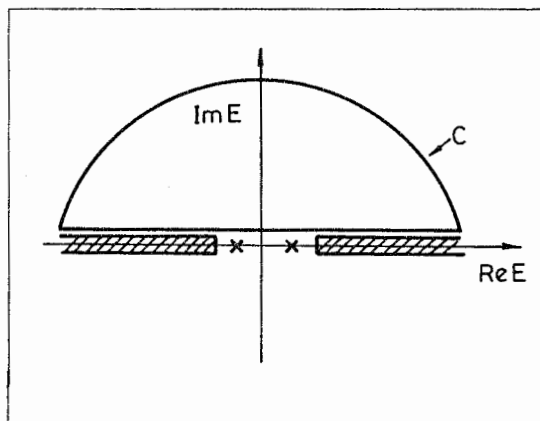


Рис.1

связи. Определяя последние через наблюдаемые величины для одних процессов, можно ставить вопрос о проверке принципа причинности посредством проверки ДС для других процессов.

Видно, что схема ДС не связана с величинами констант связи, а целиком базируется на аналитических свойствах амплитуды рассеяния. Амплитуда рассеяния определена для действительных значений  $E$ , и процедура ее аналитического

продолжения в комплексную плоскость представляет собой сложную задачу релятивистской квантовой теории поля (КТП). В КТП амплитуды рассеяния — обобщенные функции. Вопрос об аналитическом продолжении обобщенных функций был новым в математике 60-х годов, что наряду с ошибочными доказательствами аналитических свойств амплитуд процессов привело к попыткам вообще отказаться от доказательства ДС. Эти противоречия в свое время породили сомнения в справедливости всего направления ДС в целом.

В сентябре 1956 года на Международном съезде физиков-теоретиков в Сизтле (США) Н.Н.Боголюбов <sup>/2/</sup> представил математически корректное исследование аналитических свойств амплитуды рассеяния  $\pi$ -мезонов на нуклонах на ненулевой угол. Важным составным элементом доказательства был принцип микропричинности, новая формулировка которого была дана Н.Н.Боголюбовым ранее при аксиоматическом построении S-матрицы в КТП. Доказательство рассеяло сомнения в справедливости направления и явилось прочным фундаментом для всех последующих работ по ДС. Оно вводило в математическую физику новый эталон строгости рассуждений. В математике оно породило направление аналитического продолжения обобщенных функций нескольких комплексных переменных, в основе которого лежит теорема об "острие клина", носящая имя Боголюбова <sup>/3/</sup>. При помощи этой теоремы были доказаны также ДС для неупругих процессов <sup>/4/</sup>. В ходе доказательства ДС возникло представление о взаимной связи, казалось бы, различных процессов. Так, процессы

$$\pi^+ + p \rightarrow \pi^+ + p, \quad \pi^- + p \rightarrow \pi^- + p$$

выступали в нем как граничные значения единой аналитической функции  $f(E)$  в различных кинематических областях переменного  $E$ . Для значений  $E > 0$  граничные значения функции  $f(E)$  описывали первый, а при  $E < 0$  — второй процесс. Понятие о единой аналитической функции своих переменных ввело в физику представление о взаимной связи различных процессов и на много лет предопределило развитие физики элементарных частиц. В качестве иллюстрации этого утверждения можно привести (рис.2) последовательность процессов, позволившую (четыре года спустя после доказательства ДС) из данных по электромагнитной структуре нуклонов <sup>/5/</sup> получить теоретическое предсказание о существовании и массе  $\rho$ -мезона: резонансного состояния системы двух пионов.

Аналитические свойства амплитуд рассеяния можно использовать не только в форме ДС. Применяя к амплитудам рассеяния теорему Коши  $\oint_C f(E') dE' = 0$ , можно получить дисперсионные правила сумм (ДПС) как свержсходящиеся <sup>/6/</sup>, так и при конечных энергиях <sup>/7/</sup>. Если амплитуда процесса достаточно быстро убывает при больших энергиях  $E$ , то замкнутый контур  $C$  опять сводится к своей действитель-

ной части и возникает интегральное равенство <sup>18/</sup>:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(E') dE' = 0.$$

На этом языке ДПС можно сформулировать многие результаты более поздних теорий, например алгебры токов (соотношения Кабиббо-Радакати, Адлера-Вайнсбергера и др.). Наиболее интересные приложения они нашли в сочетании с предположением о важности в ДПС только конечного числа резонансов. Возникающие при этом уравнения допускают экспериментальную проверку. Они послужили основой ряда предсказаний ширин резонансов <sup>17/</sup>.

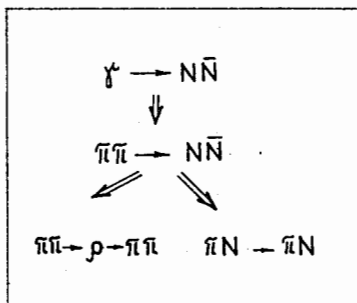


Рис.2

ДПС при конечных энергиях можно написать для амплитуд рассеяния, поведение которых при больших энергиях известны, например, из теории полюсов Редже <sup>18/</sup>. Тогда они связывают параметры поведения амплитуд рассеяния при высоких энергиях с интегралами от сечений процессов по области низких энергий. Такого рода соотношения важны при анализе экспериментальных данных и обладают предсказательной силой. В чисто теоретическом плане они позволяют поставить вопрос о существовании

резонансных амплитуд, точно удовлетворяющих ДПС при конечных энергиях <sup>19/</sup>. Ответ на него привел к возникновению понятия "дуальности" и "дуальных моделей".

Взаимная связь низких и высоких энергий была выявлена и на пути совершенно иного использования ДС. Привлекая дополнительную информацию, можно получить систему уравнений, описывающую процессы рассеяния при низких энергиях. Во-первых, здесь важны состояния с малыми значениями момента количества движения. Во-вторых, если одна из частиц имеет значительную массу, возникают дополнительные упрощения, например, в  $\pi N$ -рассеянии

$$\frac{v_N}{v_\pi} \sim \frac{m_\pi}{M_N} \ll 1,$$

где  $v_\pi, v_N$  — скорости частиц, а  $m_\pi, M_N$  — их массы. Уравнения выполняются при следующих условиях <sup>10/</sup>:

- а) аналитические свойства по энергии пиона  $\omega$ ;
- б) перекрестная симметрия;
- в) двухчастичная унитарность;
- г) наличие полюсов в комплексной плоскости  $\omega$ .

Все они являются приближенными по отношению к точным следствиям КТП. Тем не менее анализ свойств а-в приводит к заключению об их незамкнутости и необходимости учета области высоких энергий.

Понятие о "коротковолновом отталкивании" как о способе учета влияния высоких энергий на низкие с помощью свойства  $\gamma$  успешно реализует это заключение. Оно позволяет получить самосогласованную картину рассеяния при низких энергиях<sup>/11/</sup>. Особенно интересными оказались ДС для описания процессов фоторождения  $\gamma N \rightarrow \pi N$  при низких энергиях. Они позволили выразить амплитуды этих процессов через фазы  $\pi N$ -рассеяния и электромагнитные характеристики нуклона<sup>/20/</sup>. Дисперсионная теория процессов фоторождения при низких и средних энергиях оказалась весьма плодотворной, она продолжает углубляться с развитием эксперимента.

Общие аналитические свойства амплитуды рассеяния приводят к ряду экспериментально проверяемых физических следствий, которые справедливы независимо от динамики сильных взаимодействий и должны иметь место в любой теории модельного характера. В частности, из аналитичности амплитуды рассеяния по энергии при фиксированной передаче импульса вытекают асимптотическое равенство полных сечений взаимодействия частицы и античастицы<sup>/12/</sup>, асимптотическое равенство дифференциальных сечений перекрестных процессов, а также асимптотические соотношения между поляризациями соответствующих частиц в этих процессах<sup>/13/</sup>. Вначале такие соотношения были установлены для амплитуд рассеяния с гладким асимптотическим поведением. Впоследствии были строго доказаны аналогичные, но более общие асимптотические теоремы без каких-либо предположений относительно поведения амплитуды<sup>/14/</sup>.

Наряду с доказательством ДС для амплитуды рассеяния по энергии в своей основополагающей работе<sup>/12/</sup> Н.Н.Боголюбов указал также на возможность аналитического продолжения по передаче импульса. Аналитические свойства амплитуды по передаче импульса и условие унитарности приводят к верхним ограничениям на рост сечений процессов<sup>/15/</sup>, а также к нижним ограничениям на их убывание. Такие ограничения имеют место не только для сечений двухчастичных реакций, но и для сечений процессов множественного рождения<sup>/16/</sup>. При изучении этой проблемы А.А.Логунов ввел понятие об экспериментально измеряемой физической величине, которая впоследствии стала называться инклюзивным сечением<sup>/16/</sup>. В результате экспериментального исследования глубоконеупругих процессов обнаружено, что их сечения при высоких энергиях так же, как и при упругом рассеянии, зависят от двух, а не трех переменных. Это значит, что определенные комбинации сечений при высоких энергиях "ложатся" на одну универсальную кривую. Такого же рода закономерности были ранее обнаружены в ИФВЭ (Протвино) на примере инклюзивных процессов с выделенным адроном. Все они получили название масштабной инвариантности или автомодельности, по аналогии со свойствами автомодельных решений точечного взрыва в газодинамике. При помощи адекватного математического аппарата, развитого при доказательстве ДС, Н.Н.Боголюбов,

В.С.Владимиров и А.Н.Тавхелидзе установили факт автомодельного поведения амплитуд глубоконеупругих процессов как следствия общих постулатов квантовой теории поля <sup>17/</sup>.

К интересным следствиям приводит сочетание автомодельности с составной кварковой моделью. Оказывается, что при высоких энергиях поведение электромагнитных формфакторов адронов (например  $\pi$ -мезонов и нуклонов) целиком определяется числом составляющих кварков в адронах и имеет весьма простой вид <sup>18/</sup>:

$$F(t) \sim \frac{1}{t^{n_a-1}},$$

где  $n_a$  — число составляющих адронов,  $t$  — энергия фотонов. Подобные соотношения удалось установить и для бинарных реакций и обосновать их в рамках квантовой хромодинамики.

Краткий обзор метода ДС показывает его близость к результатам экспериментов. Эта черта ярко проявляется и на современном этапе развития теории сильных взаимодействий в квантовой хромодинамике (КХД). Если отвлечься от нерешенных проблем новой теории, таких, например, как проблема конфайнмента (ненаблюдаемость кварков в свободном состоянии), то и здесь метод ДС находит важные применения. ДПС при конечных энергиях позволяют на основе расчетов по теории возмущений и предположения о спектре адронов вычислить их массы. Экстраполируя применение ДС на более сложные ситуации, можно получить предсказание для экспериментально измеренных электромагнитных формфакторов адронов <sup>19/</sup>. Таким образом, в будущем метода ДС мы можем отметить два главных направления: во-первых, это обоснование его применимости в новых теориях, например КХД, во-вторых, разработка новых технических приемов получения предсказаний на основе расчетов теории.

### *Литература*

1. Kronig P. de L. J.Opt.Soc. Am. Rev. Sci. Instr., 1926, vol.12, p.547; Kramers H.A. Atti Congr. Int. Fis. Como, 1927, vol.2, p.545.
2. Bogolubov N.N. Problems of the Theory of Dispersion Relation. Princeton, 1955, Preprint: Боголюбов Н.Н., Медведев Б.В., Поливанов М.К. Вопросы теории дисперсионных соотношений. Физматгиз, М., 1958.
3. Боголюбов Н.Н., Владимирив В.С. Об аналитическом продолжении обобщенных функций. ОИЯИ, Р-71, Дубна, 1957; Изв.АН СССР, сер.матем., 1958, т.22, № 1, с.15.
4. Логунов А.А. Вопросы теории дисперсионных соотношений для неупругих процессов. ОИЯИ, Дубна, 1959.
5. Frazer W.R., Fulco J.R. Phys.Rev., 1960, 117, p.1603, 1609.

6. Logunov A.A., Solov'ev L.D. Nucl.Phys., 1960, 12, p.60.
7. Азнаурян И.Г., Соловьев Л.Д. ЯФ, 1967, 8, с.129.
8. Logunov A.A., Solov'ev L.D., Tavkheldidze A.N. Phys.Lett., 1967, 24B, p.181.
9. Veneziano G. Nuovo Cim., 1968, 57A, p.190.
10. Мещеряков В.А. ЖЭТФ, 1967, 53, с.175.
11. Серебряков В.В., Ширков Д.В. ЭЧАЯ, 1970, т.1, вып.1, с.171.
12. Померанчук И.Я. ЖЭТФ, 1958, 34, с.725.
13. Logunov A.A. et al. Phys.Lett., 1969, 7, p.69.
14. Волков Г.Г., Логунов А.А., Мествиришвили М.А. ТМФ, 1970, 4, с.196.
15. Логунов А.А., Мествиришвили М.А., Хрусталеv О.А. ЭЧАЯ, 1972, т.3, вып.3, с.515.
16. Logunov A.A., Mestvirishvili M.A., Nguyen Van Hieu. Phys.Lett., 1967, 25B, p.617.
17. Боголюбов Н.Н., Владимиров В.С., Тавхелидзе А.Н. ТМФ, 1972, 12, с.305.
18. Matveev V.A., Muradyan R.M., Tavkheldidze A.N. Nuovo Cim. Lett., 1973, 7, p.719.
19. Нестеренко В.А., Радюшкин А.В. Письма в ЖЭТФ, 1984, т.39, с.576.
20. Соловьев Л.Д. ЖЭТФ, 1957, 33, с.80.

# ОПИСАНИЕ СОСТАВНОЙ СТРУКТУРЫ АДРОНОВ НА ОСНОВЕ ТРЕХМЕРНОЙ ФОРМУЛИРОВКИ КВАНТОВОЙ ТЕОРИИ ПОЛЯ

*А.Н.СИСАКЯН, доктор физико-математических наук*

*Н.Б.СКАЧКОВ, кандидат физико-математических наук*

## ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ МНОЖЕСТВЕННОГО РОЖДЕНИЯ ЧАСТИЦ ПРИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЯХ

За пятьдесят лет своего развития (с основополагающих работ Г.В.Ватагина и Д.В.Скобельцина) физика множественного рождения обогатила наши представления о микромире рядом фундаментальных открытий.

Охарактеризуем некоторые основные закономерности множественного рождения при высоких энергиях.

1. Подтвердился предсказанный Г.В.Ватагиным теоретически еще в 1934 году рост с энергией относительного числа неупругих каналов. Адронные столкновения в основном имеют неупругий характер (~80%).

2. Большинство вторичных частиц — пионы, при этом их доля по сравнению с другими частицами убывает с ростом энергии, так как открываются каналы рождения более тяжелых мезонов и барионов.

3. Большинство вторичных частиц рождается с малыми поперечными импульсами  $p_T$ . Среднее значение поперечного импульса вторичных частиц слабо зависит от энергии и лежит в интервале  $\langle p_T \rangle \sim 0,2 \div 0,4$  ГэВ/с.

4. С ростом  $p_T$  вероятность рождения частиц падает экспоненциально вплоть до  $p_T \lesssim 1,5 \div 2,0$  ГэВ/с, после чего зависимость вероятности рождения от  $p_T$  становится степенной:  $(p_T)^{-N}$ . Здесь мы сталкиваемся с качественно новой областью — физикой больших поперечных импульсов, где новым является появление так называемого струйного механизма генерации вторичных частиц.

5. Измерение полных сечений является простейшим многочастичным экспериментом. Открытый в энергетическом интервале 30-70 ГэВ рост полных сечений ("серпуховской эффект"), а также рост наклона

дифференциального сечения продолжается вплоть до энергий коллайдера. Достигнут максимальный рост, определяемый границей Фруассара:  $\sigma_{tot} \leq A \ln^2 s$ ;  $\sigma_{tot} \sim 66 \pm 7 \text{ мб}$  ( $\sqrt{s} = 540 \text{ ГэВ}$ ).

6. Распределение по множественности заряженных частиц свидетельствует о корреляционных явлениях в процессе генерации, отвечающих одновременному действию двух или более механизмов образования частиц ("многокомпонентное описание"). Средняя множественность (первый корреляционный момент распределения) растет с энергией  $\langle n_c \rangle \sim A \ln^2 s + B \ln s + C$ . Приблизительно выполняется KNO-скейлинг, характер отклонений говорит о наличии (при энергии коллайдера) сильных дальнедействующих корреляций. Множественные характеристики (особенно в области малых  $p_T$ ) слабо зависят от типов сталкивающихся частиц.

Следует отметить, что изучение множественных процессов, в особенности в связи с развитием представлений о составной (кварковой) структуре адронов, является традиционным направлением исследований дубненских теоретиков.

В первую очередь сюда относятся фундаментальные исследования Н.Н.Боголюбова с учениками по кварковым моделям элементарных частиц, введение нового квантового числа, названного впоследствии "цветом" (Н.Н.Боголюбов, Б.В.Струминский, А.Н.Тавхелидзе). Именно это понятие в сочетании с принципом локальной калибровочной инвариантности легло в основу современной квантово-полевой теории сильных взаимодействий — квантовой хромодинамики.

Большая серия работ была выполнена А.А.Логуновым с сотрудниками по обнаружению на основе общих принципов квантовой теории поля строгих соотношений между характеристиками процессов при высоких энергиях, включая множественные <sup>1/</sup>. Эти работы положили начало принципиально новому направлению в физике высоких энергий, получившему в дальнейшем название инклюзивного подхода.

Экспериментальное изучение инклюзивных процессов привело к открытию скейлингового, или автомодельного, поведения структурных функций адронов. Сочетание принципа автомодельности с анализом размерностей и предположением о кварковой структуре адронов позволило В.А.Матвееву, Р.М.Мурадян и А.Н.Тавхелидзе <sup>2/</sup> получить правила размерного кваркового счета, устанавливающие связь между показателем степени убывания дифференциальных инклюзивных сечений (см. ниже) в области больших углов, а также показателем степени убывания упругих адронных формфакторов и числом кварков, входящих в состав этих адронов.

В настоящей статье дан краткий обзор работ дубненских теоретиков в этом направлении за последние годы. Основное внимание уделено изучению моделей процессов с большой множественностью и инклюзивных реакций с большими поперечными импульсами и обсуждению в этой связи структуры адронов.



ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ДЛЯ ИНКЛЮЗИВНЫХ СЕЧЕНИЙ  
В ТРЕХМЕРНОЙ ФОРМУЛИРОВКЕ  
КВАНТОВОЙ ТЕОРИИ ПОЛЯ.  
ОБЛАСТЬ БОЛЬШИХ  $p_T$ .  
СТРУЙНЫЙ МЕХАНИЗМ

Как известно, исключительно важную роль в феноменологическом описании инклюзивных процессов играет партонная модель. Существенно новым элементом, внесенным этой моделью, явилось введение универсальных функций распределения, описывающих вероятности нахождения в адроне кварков разных сортов, несущих определенные доли импульса всего адрона. В рамках самой партонной модели эти структурные функции не могут быть рассчитаны, поэтому они определяются феноменологическим путем. С их помощью сечения взаимодействия адронов выражаются через сечения индивидуальных кварк-кварковых или кварк-лептонных взаимодействий, "взвешенные" с функциями распределения.

Обобщение кварк-партонной модели на основе аппарата квантовой теории поля представляет собой задачу исключительной важности. Отметим, что значительный вклад в это направление внесли дубненские теоретики.

Саму задачу теоретико-полевого обобщения кварк-партонной модели можно представить себе как бы состоящей из двух частей. Первая связана с выбором такого лагранжиана взаимодействия между кварками, который приводил бы к выключению взаимодействия на малых расстояниях. Как известно, лагранжиан квантовой хромодинамики (КХД) решает эту задачу и позволяет применить теорию возмущений на малых расстояниях\*. Вторая задача, в значительной мере не связанная непосредственно с конкретным видом лагранжиана, состоит в развитии в рамках квантовой теории поля формализма для описания адронов как *связанных* состояний кварков и использования его для описания инклюзивных адрон-адронных реакций.

Для изучения связанных состояний в рамках квантовой теории поля А.А.Логуновым и А.Н.Тавхелидзе был предложен метод одновременного описания составных систем. Уравнения Логунова — Тавхелидзе получили широкое применение в задачах, связанных с адронной и кварковой физикой, что объясняется наличием четкого физического смысла и вероятностной интерпретации релятивистской волновой функции в их подходе. Существенным удобством одновременного подхода является

---

\* На больших же расстояниях считается, что силы взаимодействия между кварками возрастают, что и обуславливает их удержание внутри адрона в связанном состоянии. В этой области, описание которой остается пока на феноменологическом уровне, необходимо обращение к методам, выходящим за рамки теории возмущений, и к аппарату теории связанных состояний.

также большая приемственность с трехмерным аппаратом потенциального описания, применяемым в нерелятивистской квантовой механике (по этой причине уравнение Логунова — Тавхелидзе также называют квазипотенциальным уравнением).

В этой связи отметим также, что в настоящее время квазипотенциальный подход стал основным инструментом для сверхточных (вплоть до порядка  $\alpha^6 \ln \alpha$ ) расчетов предсказаний квантовой электродинамики (КЭД) для величины расщепления уровней водородоподобных атомов, а также позитрония и мюония <sup>/3,4/</sup>. Достигнутое при этом рекордное, вплоть до седьмого знака, совпадение теоретически рассчитанного значения энергетического сдвига с измеренным в эксперименте позволяет провести проверку основных принципов построения КЭД как локальной релятивистской квантовой теории поля. Оно также является подтверждением справедливости процедуры перенормировок и свидетельствует о высокой эффективности квазипотенциального подхода.

При описании адрон-адронных и лептон-адронных реакций весьма удобным является формализм функций Грина для многочастичных систем. Если в теоретико-полевых выражениях для функций Грина приравнять времена всех частиц (кварков), то вблизи полюсов, отвечающих связанным состояниям составляющих адрон кварков, такие функции Грина можно выразить через релятивистские одновременные волновые функции и амплитуды взаимодействия адронов <sup>/5,6/</sup>.

В результате амплитуды инклюзивных реакций типа  $A + B \rightarrow 1 + 2 \dots$  удается выразить через одновременные волновые функции, описывающие адроны  $A$  и  $B$  как связанные состояния кварков, а также матричные элементы амплитуд подпроцессов с участием кварков или других подсистем <sup>/5,6/</sup>. Волновые функции и амплитуды подпроцессов находятся из соответствующих им квазипотенциальных уравнений. (Наиболее удобной формой для этих целей является запись уравнений в переменных светового фронта). Ядра этих уравнений, отвечающие взаимодействию на малых расстояниях, могут быть построены с использованием теории возмущений КХД. Наличие у квазипотенциальных волновых функций вероятностной интерпретации позволяет построить из них плотности вероятности, имеющие смысл функций распределения импульсов кварков внутри адронов, то есть структурных функций <sup>/5-7/</sup>. При этом весьма эффективным инструментом для исследования свойств широкого круга инклюзивных процессов оказался аппарат матрицы плотности, развитый в работах теоретиков ИФВЭ (Протвино).

Таким образом, в одновременном трехмерном подходе к описанию составных объектов в квантовой теории поля возникает ясный по своему физическому смыслу аппарат описания взаимодействия при высоких энергиях, который является теоретико-полевым обобщением партонной модели.

Отметим, что при решении этой конкретной задачи наиболее явно проявилось основное преимущество при описании связанных систем одновременного формализма над многовременным, поскольку, как известно, волновые функции уравнения Бете — Солпитера не имеют однозначной вероятностной интерпретации именно в силу присущей им зависимости от индивидуальных времен составляющих систему частиц. Переход к одновременному описанию отвечает физической сути слияния индивидуальных частиц в связанное состояние.

В этой связи интересно также подчеркнуть, что глубокий анализ трудностей с описанием связанных состояний частиц в рамках специальной теории относительности (см. подробнее, например, /8,9/) еще раньше привел ряд исследователей к мысли о необходимости отказа от многовременного формализма при описании таких систем. Ибо согласно образному выражению Эддингтона: "Атом водорода состоит из протона и электрона, но протон сегодня, а электрон вчера не составляют атома водорода". Можно сказать, что уравнение Логунова — Тавхелидзе представляет собой динамическую реализацию идеи одновременного описания в рамках квантовой теории поля. Ковариантное обобщение квазипотенциальных уравнений осуществляется путем перехода к описанию в терминах единого инвариантного собственного времени системы, к которому приравниваются инвариантные собственные времена составляющих частиц /10/.

В настоящее время сложился целый ряд направлений, устанавливающих глубокую связь одновременного квазипотенциального подхода с ковариантной гамильтоновой формулировкой квантовой теории поля /11/, методом одновременной редукции /12/ и методом Фока — Подольского /13/. Все эти направления получили широкое развитие и применение для описания бинарных реакций /14,15/ (особо отметим успешное предсказание местонахождения дифракционного минимума в сечении упругого  $\pi$ -рассеяния), поведения поляризацій, спектра масс и ширин распадов радиальных и орбитальных возбуждений чармония, ботомия и легких мезонов /16/, включая и недавно открытые радиальные возбуждения  $\pi$ -мезона, а также других конкретных физических процессов, интенсивно исследуемых на ускорителях.

Возвращаясь к проблеме описания инклюзивных реакций, отметим, что при определенных асимптотических условиях, которые легко находятся (степенное убывание волновых функций, ограниченность поперечной составляющей импульса кварков в адроне), полученные в одновременном подходе формулы переходят в формулы партонной модели. Так, например, для случая, когда в конечном состоянии выделена одна частица  $C$  для сечения процесса  $A + B \rightarrow C + X$ , в работах /5,6/ была получена формула, которая в пределе  $s \rightarrow \infty$ ,  $t/s$  — фиксировано принимает вид:

$$\frac{d\sigma_{AB \rightarrow CX}}{d^3\vec{k}/E_k} = \frac{s}{\pi} \int dx \cdot dy \cdot dz \cdot x \cdot y \cdot z^{-2} \cdot \rho_A^{A'}(x, Q^2) \times \quad (1)$$

$$\times \rho_B^{B'}(y, Q^2) \cdot \rho_C^C(z, Q^2) \cdot \frac{d\tilde{\sigma}^{A'B' \rightarrow C'D'}(s'; t', u')}{dt'} \cdot \delta(s' + t' + u')$$

и выражает инклюзивное сечение образования адрона С через дифференциальное сечение рассеяния подсистем  $A'B' \rightarrow C'D'$  (см.рис.1)

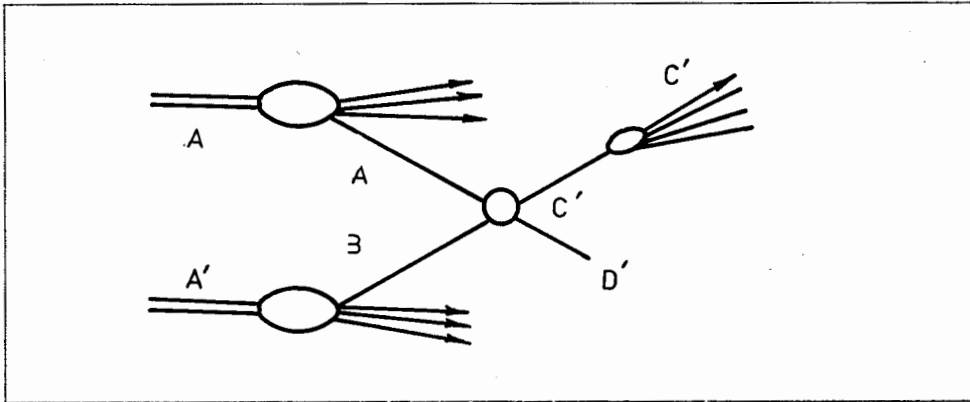


Рис.1

и функции распределения  $\rho_A^{A'}$ ,  $\rho_B^{B'}$  и  $\rho_C^C$ , построенные из соответствующих релятивистских квазипотенциальных волновых функций. В частном случае, когда  $A'$ ,  $B'$ ,  $C'$  и  $D'$  являются кварковыми состояниями, соответствующие величины  $\rho_A^{A'}$  и  $\rho_B^{B'}$  переходят в структурные функции  $\rho_A^a$  и  $\rho_B^b$ ,  $d\tilde{\sigma}/dt'$  — в дифференциальное сечение упругого рассеяния кварков, а формула (1) — в известную в партонной модели формулу "жестких соударений".

Из формулы (1) в предположении о справедливости правил кваркового счета для сечений  $d\tilde{\sigma}/dt'$  легко получить степенной закон убывания инклюзивных сечений <sup>5,6/</sup>:

$$\frac{d\sigma_{AB \rightarrow CX}}{d^3\vec{p}/E_p} \sim p_T^{-N} \cdot \phi(x, \theta), \quad (2)$$

где степень N связана с числом составляющих состояний  $C'$  и  $D'$  формулой

$$N = 2[(n_{A'} + n_{B'} + n_{C'} + n_{D'}) - 2], \quad (3)$$

а функция  $\phi(x, \theta)$  выражается через интеграл от структурных функций, описывающих распределение частиц  $A'$ ,  $B'$  и C в адронах A,

В и состоянии  $C'$ . Информация о виде этих структурных функций может быть получена с помощью использования принципа автомодельности и правил размерного кваркового счета, а также представления структурных функций через релятивистские квазипотенциальные волновые функции, на чем мы подробнее остановимся ниже.

Как видно из формул (2) и (3), минимальная степень убывания инклюзивного сечения  $\sim p_T^{-4}$  осуществляется, когда подпроцесс  $A' + B' \rightarrow C' + D'$  происходит за счет упругого рассеяния двух кварков ("жесткое рассеяние"). Процессам, обусловленным рассеянием составных подсистем  $q\pi \rightarrow q\pi$ ,  $qd \rightarrow qd$  ( $d$  — дикварк  $(qq)$ ), соответствует более быстрое убывание сечений <sup>5,6/</sup>:

$$\frac{d\sigma}{d^3\vec{p}/E_p} (AB \rightarrow \pi) \sim A(x_T, \dots) \cdot p_T^{-8} + B(x_T, \dots) p_T^{-12} \dots, \quad (4)$$

где  $x_T = 2p_T/\sqrt{s}$ .

Отклонение от чисто степенного автомодельного поведения в рамках КХД описывается с помощью так называемых аномальных размерностей, которые могут быть вычислены по теории возмущений. В работе <sup>17/</sup> были сформулированы универсальные правила кваркового счета для аномальных размерностей, описывающих логарифмическое отклонение от степенных автомодельных закономерностей в глубоко-неупругих адрон-адронных и лептон-адронных реакциях с большими переданными импульсами и всевозможным выделением частиц разных сортов в конечных состояниях. Полученные формулы позволяют, в принципе, провести всестороннюю проверку предсказаний КХД, что представляет интересную задачу для будущих экспериментов при высоких энергиях.

## ОПИСАНИЕ СТРУКТУРНЫХ ФУНКЦИЙ АДРОНОВ В РАМКАХ КОВАРИАНТНОГО ОДНОВРЕМЕННОГО ФОРМАЛИЗМА

Как было отмечено ранее, знание ковариантных одновременных волновых функций как решений соответствующих квазипотенциальных уравнений позволяет, в принципе, рассчитать вид структурных функций. Эта задача решалась в работах ряда авторов <sup>5-7/</sup>. В них было показано, что входящий в адронный тензор матричный элемент тока перехода адрона  $A$  в конечное состояние  $|X, \alpha\rangle$  в импульсном приближении может быть выражен через квазипотенциальную волновую функцию  $\Psi_{M\mathcal{P}}^A$  связанного состояния  $N$  частиц, образующих адрон  $A$  (см. рис.2).

В импульсном приближении, соответствующем учету лишь тех глюонов, обмен которыми создает входящий в уравнение для волновой функции связанного состояния кварков квазипотенциал, структурную

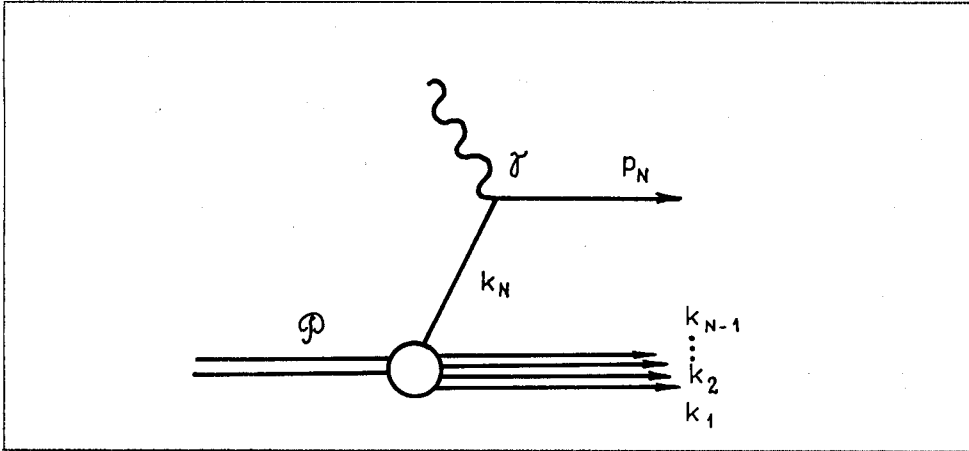


Рис.2

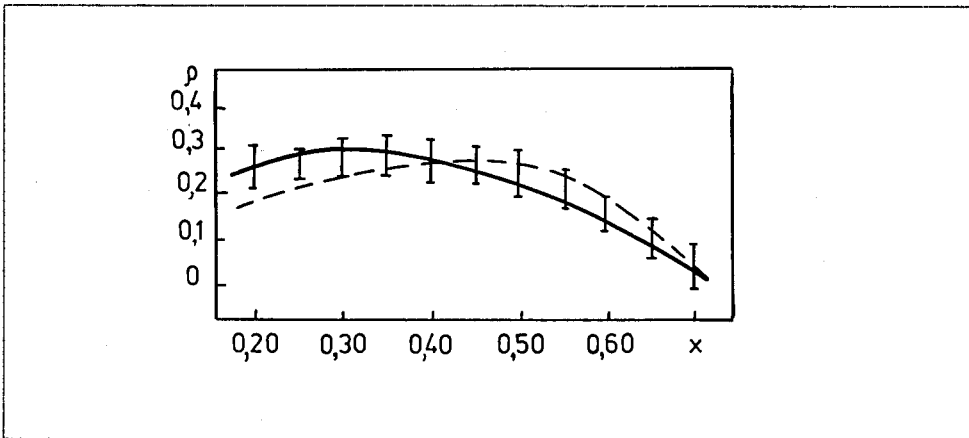


Рис.3

функцию можно представить в виде [18]:

$$\rho_i(\xi, W^2) = \rho_i^{\text{скейл.}}(\xi) + \rho_i^{\text{предск.}}(\xi, W^2), \quad (5)$$

где  $\rho_i^{\text{скейл.}}(\xi)$  — скейлинговая по переменной Нахтмана  $\xi$  часть структурной функции. На рис.3 изображены графики  $x$ -зависимости  $\rho(x, Q^2)$  (при фиксированном значении  $Q^2$ ) в случае выбора  $\Psi_{M\phi}^A$  в виде точного решения квазипотенциального уравнения с запрещающим осцилляторным потенциалом (сплошная линия) и в виде приближенного решения с модельным хромодинамическим потенциалом, которые при определенном выборе параметров неплохо согласуются с экспериментальными данными по структурной функции  $\pi$ -мезона.

Изучение вклада предасимптотического члена  $\rho$  предск. ( $\xi$ ,  $Q^2$ ); в  $Q^2$ -зависимость показало, что эффекты связанности приводят в области  $x > 0,35$  к убыванию структурной функции при изменении  $Q^2$  в интервале  $0,5 \leq Q^2 \leq 10$  ГэВ<sup>2</sup>, а далее их вклад практически исчезает. Рост же структурной функции при малых  $x$  с ростом  $Q^2$  будет осуществляться лишь при определенных условиях на массу кварка.

## АВТОМОДЕЛЬНОЕ ПОВЕДЕНИЕ СЕЧЕНИЙ ПОЛУИНКЛЮЗИВНЫХ РЕАКЦИЙ

Интересной особенностью инклюзивных процессов в области больших  $p_T$  является появление зависимости средней ассоциативной множественности от поперечного импульса частицы-триггера.

Для понимания этой закономерности весьма плодотворным является многокомпонентный подход к описанию инклюзивных и полуинклюзивных спектров.

Рассмотрим полуинклюзивный процесс



то есть в данном случае в реакции инклюзивным образом выделяется одна из заряженных вторичных частиц, которая получила в результате взаимодействия большой поперечный импульс ( $C(p_T)$  — частица-триггер).

Процесс (6) характеризуется так называемым полуинклюзивным сечением  $d\sigma^n/d\vec{p}_c$ , которое, будучи просуммировано по числу всех заряженных частиц  $n_c$ , приводит к одночастичному инклюзивному распределению  $d\sigma/d\vec{p}_c = \sum d\sigma/d\vec{p}_c$ . В работах <sup>5,19/</sup> подробно исследовались полуинклюзивные распределения в рамках отмеченной выше трехмерной формулировки квантовой теории поля, а также связь моментов полуинклюзивного распределения со структурными функциями.

Проиллюстрируем корреляционный характер ассоциативной множественности рассмотрением закона подобия для полуинклюзивных процессов <sup>19/</sup>.

Ассоциативная множественность реакции (6) определяется следующим образом:

$$\langle n(p_T) \rangle = \frac{\sum_n (n-1)F(n, p_T)}{\sum_n F(n, p_T)}, \quad (7)$$

где  $F(n, p_T)$  — полуинклюзивное распределение.

Предположим, что это распределение может быть разбито на компоненты в соответствии с силой корреляций между множественностью и поперечным импульсом триггера.

Интересно отметить, что, используя только слагаемое, отвечающее слабой корреляции, мы приходим к известному скейлингу KNO

$$\langle n \rangle \cdot \frac{\sigma_n}{\sum_n \sigma_n} = \Psi\left(\frac{n}{\langle n \rangle}\right). \quad (8)$$

В то же время корреляционный член средней ассоциативной множественности и соответствующее ему распределение дают закон подобия для полуинклюзивных сечений <sup>/19/</sup>

$$\langle n(p_T) \rangle \cdot \frac{d\sigma_n / d\vec{p}_T}{\sum_n d\sigma_n / d\vec{p}_T} = \Psi\left(\frac{n}{\langle n(p_T) \rangle}\right), \quad (9)$$

который получил экспериментальное подтверждение на ускорителях ИФВЭ (Протвино) и ЦЕРНа.

Такой закон (9) следует, в частности, из представлений о когерентном возбуждении нуклона и моделей множественного рождения в приближении прямолинейных путей, которые предсказывают зависимость

$$\langle n(p_T) \rangle = a + bp_T^2, \quad (10)$$

близкую к наблюдаемой на опыте.

Таким образом, KNO-скейлинг отвечает нулевым (или пренебрежимо малым) корреляциям между  $\langle n \rangle$  и  $p_T$ . В случае сильных корреляций можно ожидать выполнения соотношения (9). Это соотношение позволяет получить также формулу скейлинга в среднем. При сверхвысоких энергиях, где доля вторичных частиц, рожденных в струе, увеличивается (корреляции  $\langle n \rangle \leftrightarrow p_T$  значительные), следует ожидать специфических отклонений от KNO-распределения.

Следует отметить, что автомодельная функция  $\Psi(z)$  (9) может быть найдена как решение уравнения ренормгруппы для полуинклюзивных сечений <sup>/5,19/</sup>. При этом закон дисперсии

$$D(p_T) = \frac{1}{\sqrt{a}} \cdot \langle n(p_T) \rangle \quad (11)$$

и отклонения от него, которые были изучены в рамках уравнения ренормгруппы, имеют аналогию с соотношением Вроблевского — Мальхотры для полных средних множественностей

$$D = A \langle n \rangle - B. \quad (12)$$

Закономерность (9) была проверена в ЦЕРНе и подтвердилась, что явно свидетельствует о сильных  $\langle n \rangle \leftrightarrow p_T$  корреляциях.



ПРОЦЕССЫ С БОЛЬШОЙ МНОЖЕСТВЕННОСТЬЮ.  
МНОГОКОМПОНЕНТНОЕ ОПИСАНИЕ  
МИРОВЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Как уже отмечалось выше, процессы с большой множественностью главным образом разыгрываются на больших расстояниях (малых  $r_T$ ). Здесь существенны иные механизмы генерации частиц, нежели в области больших  $r_T$ .

Для описания таких процессов весьма плодотворным является многокомпонентный подход <sup>5,19/</sup>. Рассмотрим одну из его конкретных реализаций. Отправным моментом модели является предположение, что в наблюдаемую множественность основной вклад вносят области фазового пространства, выделяемые следующим образом:

- область, соответствующая вторичным частицам, образованным благодаря диссоциации сталкивающихся (лидирующих) частиц;
- область, отвечающая независимому испусканию разного сорта нейтральных адронных ассоциаций (кластеров) с нулевым изоспином.

При этом вероятность распределения по числу кластеров имеет вид

$$W_{n_1, n_2, \dots}^{ij} = \alpha_i \cdot \beta_j \cdot P_{n_1}(\langle n_1 \rangle) P_{n_2}(\langle n_2 \rangle) \dots, \quad (13)$$

где  $\alpha_i, \beta_j$  — вероятности  $i$ -го и  $j$ -го каналов диссоциации налетающей частицы и частицы мишени соответственно,  $n_\ell(\langle n_\ell \rangle)$  — множественность (средняя множественность) кластеров типа  $\ell$ ,  $P_n(\langle n \rangle)$  — пуассоновское распределение.

Феноменологический анализ показывает, что сталкивающиеся адроны диссоциируют в среднем не более чем на три частицы и что диссоциация равновероятна для налетающей частицы и мишени. Если при этом ограничиться, например, рассмотрением кластеров с модами распада не более чем в четыре заряженные частицы, то распределение по множественности заряженных частиц в процессах

$$ap \rightarrow n + X \quad (a = p, \bar{p}, K^\pm, \pi^\pm)$$

будет иметь вид

$$W_{n_c} = \alpha^2 \cdot \sum_{n=0}^{\lfloor \frac{n_c-2}{4} \rfloor} P_n(b) \cdot P_{\frac{n_c-2-4n}{2}}(a) + 2\alpha(1-\alpha) \times$$

$$\sum_{n=0}^{\lfloor \frac{n_c-4}{4} \rfloor} P_n(b) \cdot P_{\frac{n_c-4-4n}{2}}(a) + (1-\alpha)^2 \sum_{n=0}^{\lfloor \frac{n_c-6}{4} \rfloor} P_n(b) \cdot P_{\frac{n_c-6-4n}{2}}(a), \quad (14)$$

где  $a$  — вероятность диссоциации не более чем на одну заряженную частицу,  $a$  и  $b$  — средние числа кластеров, распадающихся на 2 и 4 заряженные частицы соответственно.

Зная  $W_n$  — топологическое сечение, можно вычислить среднюю множественность и остальные корреляционные моменты и распределения.

Например, средняя множественность заряженных частиц определяется выражением

$$\langle n \rangle = 2a + 4b + 2 + 4(1 - a), \quad (15)$$

а второй корреляционный момент  $f_2 = \langle n \rangle + 8b - 8\beta^2 - 4$ .

На основе этой модели<sup>/20/</sup> было проведено описание мировых экспериментальных данных по топологическим характеристикам для  $pp$ -,  $p\bar{p}$ -,  $p\pi$ -,  $Kp$ -взаимодействий в области до энергий ( $s \approx 100 \div 4000 \text{ ГэВ}^2$ ). Было получено вполне удовлетворительное описание множественных распределений  $\chi^2_{d.f.} = 1,6$  и, кроме того, были сделаны предсказания для энергий SPS-коллайдера. Предсказания согласуются с полученными экспериментальными результатами в  $pp$ -соударениях при энергии  $\sqrt{s} = 540 \text{ ГэВ}$ . Так, для средней множественности теоретическое значение  $\langle n^{теор.} \rangle = 27,7$ , а полученное на опыте  $\langle n^{exp} \rangle = 27,4 \pm 2,0$ .

Модель была использована для изучения зарядово-нейтральных корреляций и корреляций вперед-назад, где также были получены предсказания, подтвердившиеся экспериментально (на ускорителях ИФВЭ, ФНАЛ, ЦЕРНа)<sup>/21,22/</sup>.

Были изучены свойства адронных ассоциаций (кластеров, резонансов) и механизмов образования вторичных частиц, в частности, показано возрастание при высоких энергиях вклада многочастичных адронных кластеров. Это может рассматриваться как объяснение событий с большой интенсивностью, обнаруженных в космических лучах. Более детально такие явления предстоит исследовать на ускорителях будущего.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Физика множественного рождения адронов — бурно развивающаяся область, без детального понимания которой невозможно построить будущую теорию элементарных частиц. Следует подчеркнуть, что есть все основания считать множественные характеристики неразрывно связанными с внутренней структурой сталкивающихся частиц. Здесь важным фактором является установление универсальности структурной функции адрона.

Бесспорным на сегодняшний день представляется наличие не одного, а ряда механизмов множественной генерации частиц, хотя выделение их в эксперименте представляется непростой задачей.

Детальное исследование множественных процессов на ускорителях частиц и релятивистских ядер, анализ корреляционных явлений в этих процессах <sup>/23/</sup> — путь, на котором будет обнаружено немало нового и интересного.

### *Литература*

1. Логунов А.А., Мествиришвили М.А., Петров В.А. Общие принципы квантовой теории поля и их следствия. "Наука", М., 1977.
2. Matveev V.A., Slepchenko L.A., Tavkheldze A.N. Phys.Lett., 1981, vol.B100, p.75.
3. Ньюнко Н.Е., Тюхтяев Ю.Н., Фаустов Р.Н. Проблемы физики высоких энергий и квантовой теории поля. IV Международный семинар. ИФВЭ, Протвино, 1983, с.104.
4. Lepage G.P. Phys.Rev., 1977, vol.A16, p.863.
5. Квинихидзе А.Н. и др. ЭЧАЯ, 1977, т.8, № 3, с.478.
6. Sivers D., Brodsky S.J., Blankenbecker R. Phys.Rev., 1976, vol.23, No.1, p.1.
7. Faustov R.N. Proc. V Int.Symp.on Many Particle Hydrodynamics. Eisenach and Leipzig, 1974, p.769.
8. Широков Ю.М. ЖЭТФ, 1951, т.21, с.748.
9. Черников Н.А. ЭЧАЯ, 1973, т.4, № 3, с.773.
10. Matveev V.A., Muradyan R.M., Tavkheldze A.N. JINR, E2-3498, Dubna, 1967, p.24; Faustov R.N. Ann.of Phys., 1973, vol.78, No.1, p.176.
11. Kadyshevsky V.G. Nucl.Phys., 1968, vol.B6, p.125.
12. Логунов А.А., Саврин В.И., Тюрин Н.Е., Хрусталеv О.А. ТМФ, 1971, т.6, с.157.
13. Ризов В.А., Тодоров И.Т. ЭЧАЯ, 1975, т.6, № 3, с.669.
14. Кулешов С.П., Матвеев В.А., Сисакян А.Н. ЭЧАЯ, 1974, т.5, № 1, с.3.
15. Саврин В.И., Тюрин Н.Е., Хрусталеv О.А. ЭЧАЯ, 1976, т.7, № 1, с.21.
16. Savrin V.I., Sidorov A.V., Skachkov N.B. Hadronic Journal, Harvard Univ., 1981, vol.4, No. 5, p.1642.
17. Matveev V.A., Slepchenko L.A., Tavkhesidze A.N. Phys.Lett., 1981, vol.B100, p.75.
18. Savrin V.I., Skachkov N.B. Nuovo Cim., 1981, 65A, No.1, p.1.
19. Матвеев В.А., Сисакян А.Н., Слепченко Л.А. ЯФ, 1976, т.23, № 2, с.432.

20. Drenska S., Mavrodiev S.Cht., Sissakian A.N. In: JINR Rapid Communications, No.1-84, Dubna, 1984, p.7.
21. Мавродиев С.Ш., Сисакян А.Н., Торосян Г.Т. ОИЯИ, P2-12570, Дубна, 1979, с.18.
22. Мавродиев С.Ш. и др. ЯФ, 1979, т.30, с.245.
23. Balдин А.М. Nucl.Phys., 1985, A434, p.695; Балдин А.М., Диденко Л.А. В сб.: Краткие сообщения ОИЯИ, №8-85, Дубна, 1985, с.5.

# КВАНТОВАЯ ТЕОРИЯ ПОЛЯ С НЕЛОКАЛЬНЫМ И НЕЛИНЕЙНЫМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ

*М.К.ВОЛКОВ, доктор физико-математических наук*

*Г.В.ЕФИМОВ, доктор физико-математических наук*

*В.Н.ПЕРВУШИН, доктор физико-математических наук*

Нелокальная квантовая теория поля (НКТП) была призвана устранить ультрафиолетовые расходимости локальной КТП. Идея состояла в том, чтобы ввести в лагранжиан взаимодействия нелокальный формфактор и, применив методы канонического квантования гамильтоновой динамики, получить конечную самосогласованную НКТП. К середине 50-х годов выяснилось, что НКТП содержит собственные трудности, которые, казалось, закрывают этот путь усовершенствования локальной КТП. Как было сформулировано Д.И.Блохинцевым<sup>/2/</sup> и М.А.Марковым<sup>/1/</sup>, внесшим на этом этапе определяющий вклад в изучение НКТП, основная причина неудачи этого подхода состоит в том, что введение формфактора приводит к передаче сигналов в нелокальной системе со сверхсветовой скоростью, развитие системы во времени начинает зависеть не только от прошлых, но и будущих состояний системы, а это несовместимо с гамильтоновой динамикой. Следовательно, считал Д.И.Блохинцев, НКТП может быть построена только в рамках негамильтоновых методов.

В Лаборатории теоретической физики ОИЯИ со дня ее основания под руководством Д.И.Блохинцева начались исследования проблем НКТП, и к середине 70-х годов была построена конечная самосогласованная теория с нелокальным взаимодействием<sup>/3,4/</sup>. Успех был обусловлен двумя новыми идеями.

Во-первых, формфакторы в конфигурационном пространстве должны быть не обычными, а обобщенными функциями, фурье-образ которых в импульсном пространстве является целой аналитической функцией, убывающей достаточно быстро в пространственно-подобном направлении.

Во-вторых, формфактор должен быть проквантован, т.е. в пространстве Фока физических частиц необходимо ввести дополнительные

степени свободы неких фиктивных квантов, которые устраняются на окончательном этапе вычислений. Такой механизм построения теории сводится к тому, что динамика нелокального взаимодействия определяется квантово-полевым уравнением Шредингера с запаздыванием, следовательно, теория нелокального взаимодействия описывается негамильтоновой динамикой в соответствии с идеями Д.И.Блохинцева.

В результате для скалярного и электромагнитного взаимодействий была построена  $S$ -матрица, удовлетворяющая условиям конечности, релятивистской и градиентной инвариантности, унитарности и макропричинности в каждом порядке теории возмущений. Таким образом, в НКТП был достигнут тот же уровень математической строгости, что и в локальной КТП <sup>3/</sup>.

В квантовой электродинамике с нелокальным взаимодействием было показано, что выполнен принцип соответствия между квантовой и классической теориями в задаче о собственной массе электрона. Для нелокальных взаимодействий было получено представление  $S$ -матрицы в форме функционального интеграла, для которого доказана теорема существования при произвольных константах связи. Было найдено асимптотическое поведение плотности энергии вакуума для ряда скалярных и фермионных моделей в пределе сильной связи <sup>4/</sup>.

Методы НКТП позволили реализовать удержание кварков. Было построено квантованное поле, названное виртонным, которое не существует в свободном состоянии, а проявляется только в виртуальных переходах. Использование виртонного поля для описания кварков в области конфайнмента привело к возникновению виртон-кварковой модели адронных взаимодействий <sup>4/</sup>. В этой модели дано единое описание физики адронов низких энергий.

Наряду с нелокальными теориями поля развивались методы, позволяющие описывать неполиномиальные локальные теории поля.

В начале 60-х годов в ЛТФ были предложены и разработаны методы регуляризации неполиномиальных (нелинейных) квантовых теорий поля. В дальнейшем эти методы получили широкое признание и интенсивно развивались как в Советском Союзе, так и в других странах и вошли в физическую литературу под названием суперпропагаторных методов.

Суперпропагаторный метод стимулировал развитие в ЛТФ целого направления — квантовой киральной теории поля, которая была успешно применена для теоретического описания адронной физики низких энергий (параметров взаимодействия мезонов, вероятностей и форм-факторов слабых и электромагнитных распадов и т.д.). Вычислены были также такие величины, как электромагнитные радиусы пионов и каонов, их поляризуемость, вероятность редких распадов и т.д. Теоретики ЛТФ предложили эксперименты по измерению этих величин и способы обработки экспериментальных данных. Предсказания были подтверждены в экспериментах ОИЯИ — ФНАЛ (США) (радиус пиона)

и ОИЯИ—ИФВЭ (поляризуемость пиона). Суперпропагаторный метод и его приложения к физике элементарных частиц были описаны в монографии <sup>5/</sup>.

Геометрический метод ковариантной теории возмущений, который был предложен в ЛТФ для киральных лагранжианов, оказался эффективным инструментом в геометрических суперсимметричных теориях и был применен для доказательства отсутствия ультрафиолетовых расходимостей в  $N=4$  теории Янга — Миллса.

Интересные результаты были получены для четырехкваркового лагранжиана сверхпроводящего типа, где с помощью метода коллективных переменных удалось вывести известные феноменологические лагранжианы на единой основе, в частности, сигма-модель для скалярных и псевдоскалярных мезонов, модель типа Янга — Миллса для векторных и аксиально-векторных мезонов и модель векторной доминантности для электромагнитных взаимодействий адронов. Было показано, что при введении мезонных полей как составных кварк-антикварковых объектов происходит спонтанное нарушение киральной симметрии и перестройка вакуума. В результате описан механизм превращения легких токовых кварков в тяжелые составляющие кварки. Таким образом, был сделан шаг к обоснованию низкоэнергетической киральной динамики с позиций более фундаментальной теории — квантовой хромодинамики.

### *Литература*

1. Марков М.А. Гипероны и К-мезоны. Физматгиз, М., 1958.
2. Блохинцев Д.И. Пространство и время в микромире. "Наука", М., 1970.
3. Ефимов Г.В. Нелокальные взаимодействия квантованных полей. "Наука", М., 1977.
4. Ефимов Г.В. Проблемы в квантовой теории с нелокальным взаимодействием. "Наука", М., 1985.
5. Волков М.К., Первушин В.Н. Существенно нелинейные квантовые теории, динамические симметрии и физика мезонов. Атомиздат, М., 1979.



Релятивистская  
ядерная физика



# РЕЛЯТИВИСТСКАЯ ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

*А.М.БАЛДИН, академик*

*В.С.СТАВИНСКИЙ, доктор физико-математических наук*

## ВВЕДЕНИЕ

Основной объект релятивистской ядерной физики — кварк-глюонная структура атомных ядер.

Получение пучков частиц все больших энергий оказалось магистральным путем, на котором открываются новые законы физики, возникают принципиально новые понятия и даже новые принципы инвариантности. В физике микромира, как ни в одной другой области физики, часто появляются экспериментальные данные, выводящие за рамки известных законов природы, существенно меняющие основные представления естествознания вплоть до таких понятий, как пространство-время или законы сохранения.

Одна из величайших древних истин состоит в том, что картину мира (всего многообразия природы — как живой, так и неживой) можно логически вывести из свойств элементарных сущностей. Существует даже убеждение, что чем меньше эти элементарные сущности, тем более фундаментальным, более всеобщим законам они подчиняются. Свойства атомов мы выводим из свойств элементарных частиц. Из свойств молекул и атомов микробиологи выводят свойства клетки, свойства гигантских молекул ответственны за механизм наследственности и т.д.

Еще совсем недавно свойства атомных ядер выводили только из протон-нейтронной модели ядра, а сейчас можно считать установленным тот факт, что протоны и нейтроны состоят из кварков. Основной объект релятивистской ядерной физики — кварковая структура ядра, а один из основных выводов в этой области состоит в том, что протон-нейтронная модель ядра приближенна и ограничена. В ядре существуют многокварковые конфигурации, а внутренняя структура протона, находящегося внутри ядра, сильно отличается от структуры протона, находя-

щегося в пустоте. Цель настоящей статьи — рассказать об этой новой области физики высоких энергий, возникшей в Дубне в результате перестройки дубненского синхрофазотрона в ускоритель <sup>1/</sup>, который позволяет получить пучки атомных ядер, движущихся со скоростью света.

Релятивистские эффекты, или эффекты, обусловленные принципами механики околосветовых скоростей, в канонической ядерной физике представляются малыми и ненадежно установленными поправками. Величина этих поправок определяется малым параметром \*  $\vec{P}^2/m^2$ , где  $\vec{P}$  — характерный импульс нуклона (протона или нейтрона), входящего в состав ядра, а  $m$  — его масса. Нерелятивистская теория ядра описывает огромное количество экспериментальных фактов, в том числе фактов, имеющих большое прикладное значение.

Под релятивистской ядерной физикой мы понимаем область ядерных взаимодействий, в которой параметр  $\vec{P}_i^2/m_i^2$  велик:  $\vec{P}_i^2/m_i^2 \gg 1$ . В этой области необходимо учитывать требования теории относительности, в частности, необходимо уточнить, в какой системе координат мы рассматриваем частицу с импульсом  $P_i$  и массой  $m_i$ . В этой связи мы вводим величины, не меняющиеся при переходе от одной системы координат к другой:

$$b_{ik} = -\left(\frac{P_i}{m_i} - \frac{P_k}{m_k}\right)^2 = -\left(\frac{E_i}{m_i} - \frac{E_k}{m_k}\right)^2 + \left(\frac{\vec{P}_i}{m_i} - \frac{\vec{P}_k}{m_k}\right)^2, \quad (1)$$

$E_{i,k}$  — энергии частиц,  $P_{i,k}$  — четырехмерные импульсы,  $b_{ik}$  — по смыслу есть квадраты разности четырехмерных скоростей частиц

$i$  и  $k$ . При  $\frac{\vec{P}_i^2}{m_i^2} \sim \frac{\vec{P}_k^2}{m_k^2} \ll 1$  величины  $b_{ik}$  переходят в квадрат разности трехмерных скоростей частиц  $i$  и  $k$ :  $b_{ik} = (\vec{v}_i - \vec{v}_k)^2$ . В системе покоя частицы  $k$

$$b_{ik} = 2\left[\frac{E_i}{m_i} - 1\right] = \frac{2T_i}{m_i}, \quad (2)$$

где  $T_i$  — кинетическая энергия.

Итак, под релятивистской ядерной физикой мы понимаем область ядерных столкновений, где относительные четырехмерные скорости  $u_i = P_i/m_i$  удовлетворяют условию

$$b_{ik} \gg 1. \quad (3)$$

Как было показано в экспериментах на дубненском синхрофазотроне,

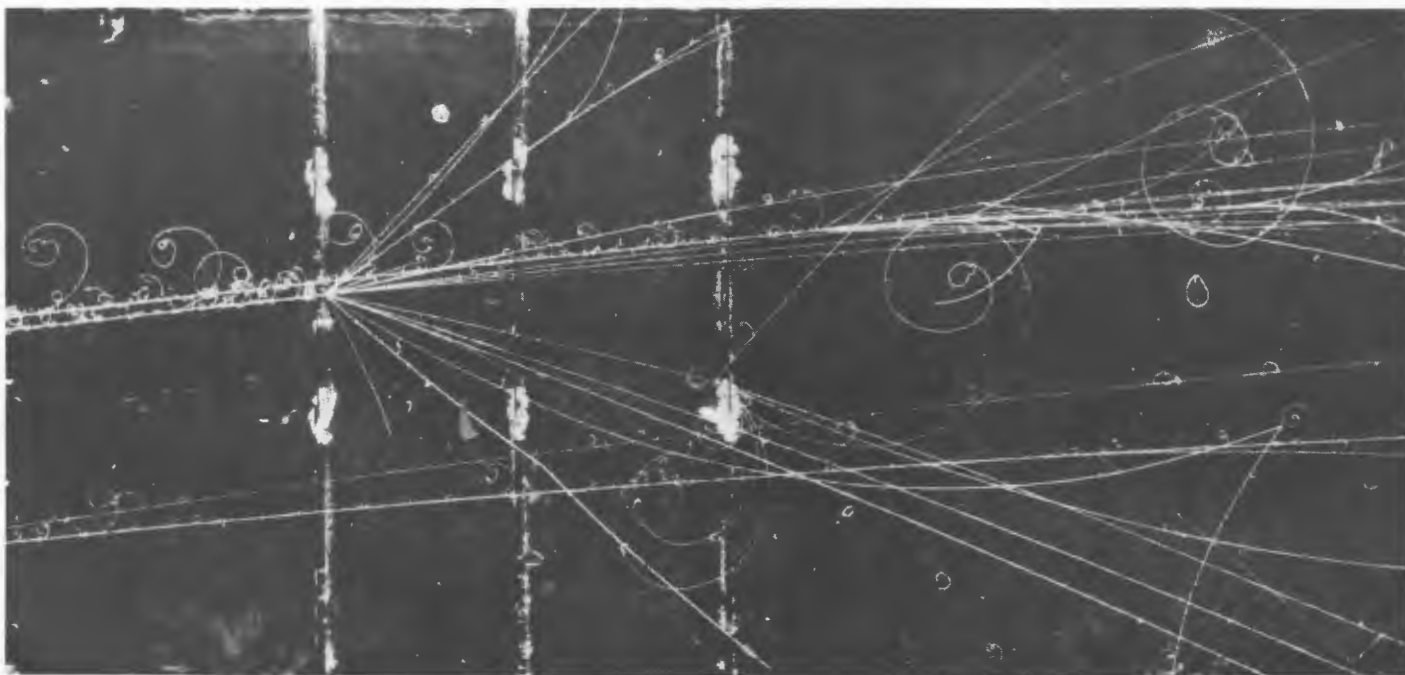


Рис.1. Фотография взаимодействия ядра углерода с энергией 4,5 ГэВ/нуклон (жирный трек слева) с ядром тантала (на рисунке видны три пластины из тантала, размещенные в пузырьковой камере). В результате взаимодействия происходит рождение частиц.

для выявления кварковых степеней свободы достаточно условия

$$b_{ik} > 5. \quad (4)$$

Рассмотрим столкновение атомных ядер, в результате которого образуется много частиц. На рис.1 приведен пример столкновения ядра углерода, движущегося со скоростью, близкой к скорости света, с ядром тантала. Вертикальные линии — изображение пластинок тантала, помещенных в пузырьковую камеру. На двухметровой пузырьковой камере Объединенного института ядерных исследований получены миллионы таких снимков. Обозначим римскими цифрами I и II сталкивающиеся ядра, а цифрами 1,2,3,... — частицы — продукты реакции:

$$I + II \rightarrow 1 + 2 + 3 + \dots \quad (5)$$

Имеющиеся системы обработки снимков позволяют определять импульсы и массы частиц, а следовательно, и величины  $b_{I II}$ ,  $b_{I1}$ ,  $b_{I2}$ , ...  $b_{12}$ , ...  $b_{II2}$  и т.д.

Одно из основных утверждений, которые мы проиллюстрируем ниже, состоит в том, что распределения вероятностей по  $b_{ik}$  в среднем довольно быстро убывают при возрастании  $b_{ik}$ . Это свойство распределений отражает фундаментальное свойство кварков, которое называется асимптотической свободой. Физический смысл критериев (3) и (4) состоит в том, что взаимодействие кварков, входящих в частицу или ядро  $i$ , и кварков, входящих в частицу или ядро  $k$ , при  $b_{ik} \gg 1$  становится настолько слабым, что его можно оценивать по теории возмущений.

Энергию пучков релятивистских ядер принято характеризовать энергией, приходящейся на один нуклон налетающего ядра. Это естественно, т.к. энергия связи нуклонов в ядрах много меньше массы нуклона и в силу критерия (3) много меньше кинетической энергии, приходящейся на один нуклон релятивистского ядра. На заре релятивистской ядерной физики было немало докладов на конференциях, семинарах, в которых утверждалось, что столкновение релятивистских ядер сведется к столкновению почти свободных (квазисвободных) нуклонов. Для большинства столкновений ядро-ядро при высоких энергиях это утверждение недалеко от истины. Однако существует область столкновений, где квазисвободными частицами можно считать кварки, из которых состоят все адроны <sup>2/</sup>, в том числе и атомные ядра. Для этого необходимо (по аналогии со столкновениями квазисвободных нуклонов), чтобы импульс, приходящийся на *один кварк* налетающего ядра, был бы много больше характерного импульса кварка внутри адронов. Но что такое число кварков внутри адрона? Число частиц в релятивистской квантовой механике зависит от системы координат, внутреннее движение не отделяется от движения как целого; и во-

обще, в этой области мы имеем дело с квантовой теорией поля, согласно которой число кварков и глюонов внутри адрона бесконечно велико. В этой связи мы и предложили делить импульсы на массы, считая, что масса частицы в известном смысле характеризует среднее число частиц, составляющих, например, протон. Для релятивистских ядер, во всяком случае, это справедливо. Допустим далее, что мы достигли такого уровня столкновений, что кварки можно рассматривать как квазисвободные и выбивать их из ядра. Как представить себе дальнейшую судьбу таких кварков? Согласно широко признанной гипотезе кварки в пустоте находиться не могут. Это свойство называется "конфайнмент" (заключение, пленение цветных зарядов). Однако пленение кварка происходит не мгновенно. Для нарастания поля, нейтрализующего цветной заряд кварка, требуется некоторое время  $\tau$ , в течение которого он успеет пройти расстояние порядка

$$l_f \approx r_0 \left( \frac{E}{\mu} \right), \quad (6)$$

$\mu$  — эффективная масса выбитого кварка,  $E$  — энергия. Чем больше энергия выбитого кварка  $E$ , тем большее расстояние он пройдет, прежде чем сформируется в адрон. Определим деконфайнмент как явление, в котором выбитый кварк проходит расстояние, много большее размеров родительского адрона, и адронизируется в пустоте. Размер адрона по порядку величины составляет  $R \sim r_0 \sim 1/\mu$ , а величина  $E/\mu$  согласно формуле (2) равна  $(b_{ik}/2 + 1)$ , где  $b_{ik}$  — квадрат разности четырехскоростей родительского адрона и выбитого кварка в системе покоя адрона. Подставив эти величины в формулу (6), имеем

$$l_f \sim R \cdot \frac{1}{2} b_{ik}, \quad (7)$$

откуда ясно, что  $l_f \gg R$  при  $b_{ik} \gg 1$ , то есть мы опять пришли к критерию (3). Этот критерий можно получить из основной величины квантовой хромодинамики, характеризующей силы взаимодействия из так называемой бегущей константы взаимодействия  $a_s$ :

$$a_s = \frac{1,4}{\ln(Q^2/\Lambda^2)}. \quad (8)$$

Здесь  $Q^2$  — квадрат передачи четырехимпульса, а  $\Lambda$  мы будем рассматривать как эффективную массу квазисвободного кварка. Тогда

$$\frac{Q^2}{\Lambda^2} = -\left(\frac{K}{\Lambda} - \frac{K'}{\Lambda}\right) \approx -\left(\frac{P}{m} - \frac{K'}{\Lambda}\right)^2.$$

Здесь мы положили четырехскорость кварка до столкновения  $K/\Lambda$  приблизительно равной четырехскорости адрона  $P/m$ . Таким образом,  $\frac{Q^2}{\Lambda^2} \approx b_{ik}$  — квадрат разности четырехскорости исходного адрона и выбитого кварка.

В рассматриваемом случае при условии  $b_{ik} \gg 1$  величина  $\alpha_s$  характеризует слабость взаимодействия выбитого кварка с адронородителем.

Рассмотрим величину  $b_{I\Pi}$  в системе покоя ядра I ( $E_I = m_I$ ,  $\vec{P}_I = 0$ ):

$$b_{I\Pi} = 2 \left[ \frac{(P_I \cdot P_{\Pi})}{m_I m_{\Pi}} - 1 \right] = 2 \frac{T_{\Pi}}{m_{\Pi}},$$

где  $T_{\Pi}$  — кинетическая энергия ядра  $\Pi$  в системе покоя ядра I. Из критерия (4) следует, что при

$$\frac{E_{\Pi}}{m_{\Pi}} > 3,5 \quad (9)$$

должен наступить асимптотический режим столкновения, когда ядра начинают взаимодействовать не на уровне нуклонов, а на уровне составляющих нуклоны кварков. Условие (9) можно записать, используя определение атомного веса  $A_{\Pi}$ :  $m_{\Pi} = m_0 A$  (где  $m_0 = 931$  МэВ — атомная единица массы), в виде

$$\frac{E_{\Pi}}{A_{\Pi}} > 3,5 m_0,$$

откуда ясно, что при энергии релятивистских ядер  $E_{\Pi} \geq (3 \div 4) A_{\Pi}$  ГэВ большую роль начинают играть кварковые степени свободы. Это один из главных наших выводов, имеющих решающее значение при выборе параметров ускорителя. Разъяснению этого вывода и его обоснованию мы уделим внимание ниже.

Отметим, что уже более 10 лет синхрофазотрон ОИЯИ является единственным в мире ускорителем, имеющим пучки релятивистских ядер выше границы  $E_{\Pi} \geq (3 \div 4) A_{\Pi}$  ГэВ, где происходит деконфаймент кварков. В связи с этим мы опишем также возможности экспериментальных исследований на синхрофазотроне и перспективы этих исследований.

### КУМУЛЯТИВНЫЙ ЭФФЕКТ

Выше мы привели оценки, показывающие, при каких энергиях, вернее, при каких относительных скоростях движения ядра и мишени кварки можно рассматривать как квазисвободные частицы. Если пренебречь скоростями внутреннего движения кварков, то импульс, приходящийся на один кварк ядра, движущегося с импульсом  $P_{\Pi}$ , в приближении квазисвободных кварков можно записать как  $xP_{\Pi}$ , где  $x$  — доля импульса ядра,  $0 \leq x \leq 1$ . Доля импульса, приходящаяся на один квазисвободный нуклон, в том же приближении равна  $\frac{1}{A_{\Pi}} P_{\Pi}$ . Рассмотрим случай, когда в результате столкновения релятивистского

ядра с мишенью рождается пион ( $\pi$ -мезон) с импульсом, пропорциональным импульсу ядра:  $P_1 = aP_{II}$  (рождение "вперед"). Согласно изложенному выше при достаточно больших относительных скоростях пион-ядро и пион-мишень этот пион образовался из кварка, вылетевшего за пределы сталкивающихся частиц. В реальном эксперименте мы можем измерить не  $x$ , а  $a$ , причем в силу закона сохранения импульса  $x \geq a$ . Этих сведений нам достаточно, чтобы определить понятие кумулятивного эффекта. Допустим, что мы наблюдаем пион с импульсом, большим, чем импульс, приходящийся на один нуклон налетающего ядра  $II$ , т.е.  $a > \frac{1}{A_{II}}$  или  $x \geq a > \frac{1}{A_{II}}$ , или, вводя величину

$$X_{II} = x \cdot A_{II}, \text{ получим} \\ X_{II} > 1. \quad (10)$$

Кумулятивным эффектом называется рождение частиц в области, которая называется областью предельной фрагментации ядра  $II$ :  $b_{II} > b_{II I} > 5$  и при  $X_{II} > 1$ .

Согласно изложенным выше идеям такие частицы не могут образоваться из одного нуклона налетающего ядра. Их обнаружение свидетельствует о существовании не известного нам в настоящее время внутриядерного механизма, в результате которого один кварк может нести на себе импульс более чем одного нуклона ядра.

Функцию  $G(X)$ , характеризующую вероятность того, что константа ядра имеет импульс, соответствующий группе из  $X$  нуклонов, мы называем структурной функцией ядра. Это — новое понятие физики ядра, его главная динамическая характеристика, которая не может быть представлена в виде суперпозиции структурных функций свободных нуклонов.

Обнаружением в Дубне кумулятивных пионов в 1971 году было положено начало изучению кварковых явлений в релятивистских ядерных столкновениях. В экспериментах, проведенных в Лаборатории высоких энергий <sup>3/</sup>, использовался уникальный пучок релятивистских ядер дейтерия, впервые полученный на дубненском синхрофазотроне. Энергия образовавшихся пионов была значительно больше энергии, приходящейся на один нуклон ядра дейтерия. Энергия двух нуклонов как бы складывалась и концентрировалась на одной частице — пионе. Отсюда и название — кумулятивный эффект.

Кумулятивный эффект был предсказан <sup>4/</sup> на основе гипотезы о том, что спектры вторичных частиц, образующихся при столкновении адронов (в том числе и релятивистских ядер), определяются локальными свойствами адронной материи, а не геометрическими характеристиками сталкивающихся объектов. Наша гипотеза соответствовала автомодельному характеру поведения решений некоторых задач гидродинамики (например, задача сильного точечного взрыва). Идея автомодель-

ности незадолго до начала работ в Дубне была выдвинута и успешно применена В.А.Матвеевым, Р.М.Мурадяном и А.Н.Тавхелидзе <sup>/5/</sup> к глуконепругому рассеянию электронов на нуклонах. Математическим выражением гипотезы является приближенная масштабная инвариантность: безразмерные величины, зависящие от импульсов, не меняются при замене всех импульсов  $P_i \rightarrow \eta P_i$ . Масштабная инвариантность, с точки зрения нашей постановки эксперимента, означала простой факт: вероятность рождения пионов должна зависеть только от отношения импульсов пионов и дейтронов, т.е. от введенной выше величины  $X_{II}$ . В наших экспериментах не только были обнаружены пионы с  $X_{II} > 1$ , но и впервые показана справедливость масштабной инвариантности для релятивистских ядерных столкновений. Однако еще несколько лет оставался без ответа главный вопрос. Начиная с каких энергий релятивистских ядер осуществляется автомодельный режим? Критерий (4) был сформулирован много позже.

Постепенно пришло понимание того, что поскольку (в силу масштабной инвариантности) сечение почти перестает зависеть от энергии столкновения, или от  $b_{I II}$ , то зависимость сечения кумулятивных процессов от свойств мишени должна быть очень слабой. С другой стороны, сечение процесса зависит только от относительных скоростей. Стало быть, кумулятивные процессы можно изучать в системе покоя ядра, из которого кумулятивные частицы вылетают (его называют фрагментирующим ядром) под действием любых частиц. Иначе говоря, благодаря тому, что при достаточно больших  $b_{I II}$  окрестности точки I в пространстве четырехскоростей слабо коррелируют с окрестностями точки II, кумулятивный эффект можно изучать на неподвижных ядрах. Определенная выше область предельной фрагментации ядра II ( $b_{II} > b_{I II} > 5$ ) в основном соответствует частицам, вылетающим "назад" в системе покоя ядра II по отношению к направлению импульса бомбардирующего ядра.

Именно исследование образования пионов "назад" (в основном под углом  $180^\circ$ ) на ядрах под действием протонов и дейтронов с энергией до 10 ГэВ не только дало возможность подтвердить существование событий с  $X > 1$  и масштабную инвариантность, но и установить границу начала предельной фрагментации ядер или деконфайнмента кварков. Изучение предельной фрагментации различных ядер вплоть до урана позволило установить универсальные свойства кумулятивных процессов на различных ядрах, обнаружить так называемую аномальную или усиленную зависимость сечений взаимодействия ядер и частиц с ядрами от атомного номера.

Сечение кумулятивных процессов было измерено вплоть до  $X \geq 3$ . При этом оно меняется более чем в миллиард раз. Универсальная зависимость сечения от  $X$  имеет простой экспоненциальный характер:  $\sigma \approx e^{-X/\langle X \rangle}$  для всех ядер. Величина  $\langle X \rangle$  с 10% точностью равна 0,14. По своему физическому смыслу она характеризует размеры



мультикварковых систем, из которых вылетают кумулятивные частицы. Величина  $X$  характеризует эффективное число нуклонов фрагментирующего ядра, участвующих в образовании кумулятивной частицы, и называется кумулятивным числом.

Невозможно коротко описать многообразие экспериментальных данных по кумулятивному образованию частиц. Однако основные экспериментальные факты, относящиеся к этому интересному явлению, можно охватить следующей простой аппроксимационной формулой <sup>3/</sup> для сечения столкновения релятивистских ядер в области предельной фрагментации, например, ядра:

$$\sigma \approx A_{II}^m(X) \cdot A_I^n \cdot \exp\left[-\frac{X}{\langle X \rangle}\right]. \quad (11)$$

Эта приближенная зависимость оказалась при  $X \geq 1$  универсальной для всех атомных ядер от гелия до урана. Приблизительное постоянство  $\langle X \rangle$  во всей области исследованных  $X$  ( $0,5 \leq X \leq 3,3$ ) и универсальность зависимости  $\sigma$  от  $\langle X \rangle$  для всех ядер характеризуют  $\langle X \rangle$  как важный параметр ядерной материи. Зависимость от атомного номера ядра-мишени  $A_I^n$  оказалась, в соответствии со сказанным выше, довольно слабой ( $n \approx 0,3$ ). Зависимость же от атомного номера фрагментирующего ядра  $A_{II}^m(X)$  оказалась усиленной. При  $X$ , лежащем в области  $0,5 \leq X \leq 1$ , величина  $m(X)$  может быть приближенно аппроксимирована формулой

$$m(X) = \frac{2}{3} + \frac{X}{3}, \quad (12)$$

т.е. в этой области  $X$   $A_{II}$ -зависимость меняется от обычной для адрон-ядерных взаимодействий зависимости типа  $A_{II}^{2,3}$  до  $A_{II}^1$  (в этом и состоит усиление). Зависимость типа  $\sigma \approx A_{II}^1$  ожидалась на основе гипотезы о локальном и равновероятном по всему объему ядра взаимодействии. Именно такой характер и наблюдается в кумулятивной области  $X > 1$ .

Детальные измерения  $A$ -зависимости сечений рождения кумулятивных пионов были проведены на синхрофазотроне ОИЯИ. Эти измерения стали возможны после осуществления вывода пучка из ускорителя в измерительный павильон, где была создана новая экспериментальная установка. Эффективный вывод ускоренного пучка из ускорителя со слабой фокусировкой является трудной инженерной задачей. Однако она была решена коллективом, обслуживающим синхрофазотрон. Вывод пучка из ускорителя за относительно большое время (порядка секунды) в измерительный павильон и создание установки, способной работать при больших интенсивностях первичного пучка, позволили проследить изменение поперечного сечения в миллиард раз. Согласно формуле (11) это соответствует изменению  $X$  в области  $0,5 < X \leq 3,3$ . Был создан фокусирующий магнитный спектрометр с регистрацией

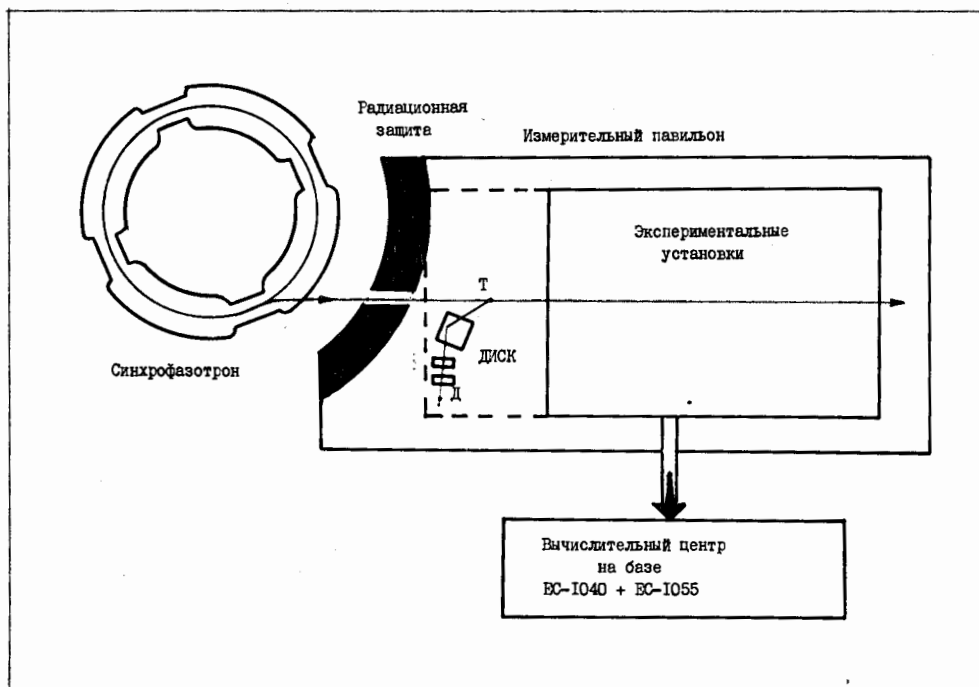


Рис.2. Схема размещения экспериментального оборудования на пучке синхрофазотрона ОИЯИ. ДИСК — магнитный спектрометр с фокусировкой, предназначенный для исследования кумулятивного рождения частиц.

вторичных частиц сцинтилляционными и черенковскими детекторами и системой дистанционного управления и телеметрического контроля. Установка работает на линии с мощной вычислительной машиной ЕС-1040, обеспечивающей накопление и обработку экспериментальной информации. На рис.2 показана схема опыта.

В качестве фрагментирующих ядер  $A_{II}$  был взят широкий набор мишеней: H, D, He,  ${}^6\text{Li}$ ,  ${}^7\text{Li}$ , Be, C, Mg, Al, Si,  ${}^{54}\text{Fe}$ ,  ${}^{56}\text{Fe}$ ,  ${}^{58}\text{Fe}$ ,  ${}^{58}\text{Ni}$ ,  ${}^{61}\text{Ni}$ ,  ${}^{64}\text{Ni}$ , Cu,  ${}^{64}\text{Zn}$ ,  ${}^{112}\text{Sn}$ ,  ${}^{118}\text{Sn}$ ,  ${}^{124}\text{Sn}$ ,  ${}^{144}\text{Sm}$ ,  ${}^{154}\text{Sm}$ ,  ${}^{182}\text{W}$ ,  ${}^{186}\text{W}$ , Pb, U.

Впервые было установлено, что зависимость вероятности рождения кумулятивных мезонов от атомного веса фрагментирующего ядра для взаимодействия адронов пропорциональна атомному весу ядра, т.е.

$$E \frac{d\sigma}{dp} \approx A_{II}.$$

”Объемный” характер  $A_{II}$ -зависимости, или, другими словами, равная вероятность рождения мезонов по всему объему ядра, подтвердил локальный характер предполагаемого в гипотезе кумулятивного эффекта взаимодействия и рождения протяженных адронов.

Позже усиленная  $A_{II}$ -зависимость была обнаружена в США в опытах по исследованию рождения частиц с большой поперечной составляющей импульса (опыты Кронина). Такой характер зависимости сечений рождения адронов свидетельствовал о том, что протяженные объекты взаимодействуют только своими частями, локальными подструктурами. Экспериментальными исследованиями этого явления занялись физики различных лабораторий мира, а сами исследования получили название "А<sup>α</sup>-физика".

Уже в первых работах подчеркивалось, что поскольку масштабная инвариантность интерпретируется на основе локального характера адронных взаимодействий (автомодельности), то в ядрах существуют два характерных масштаба импульсов, начиная с которых реализуется приближенная масштабная инвариантность. Один соответствует случаю, когда в качестве квазисвободных частиц можно рассматривать составляющие нуклонов — кварки, а другой соответствует импульсному приближению ядерной физики, в котором как квазисвободные частицы рассматриваются нуклоны. Кумулятивный эффект мы рассматривали как сигнал о наличии в ядрах "капелек" адронной материи (или многокварковых конфигураций), по своей структуре сильно отличающихся от свободных нуклонов. Эта интерпретация кумулятивного эффекта, т.е. закономерностей образования частиц в области предельной фрагментации ядер за пределами кинематики однонуклонных столкновений, встречала возражения на протяжении более десяти лет. В многочисленных теоретических работах предпринимались попытки путем корректного учета релятивистских эффектов и малонуклонных корреляций в ядрах объяснить все закономерности кумулятивного эффекта, не выходя за рамки протон-нейтронной модели ядра. Такие попытки имели успех в объяснении кумулятивного образования протонов, дейтронов и ядерных фрагментов, т.е. эффектов, в которых отделить нуклонную масштабную инвариантность (ядерную) от кварковой практически невозможно. Резкий поворот во мнении ученых относительно рассматриваемых эффектов начался в 1981 г., когда аналогичные явления начали изучать в глубоконеупругом рассеянии электронов, мюонов и нейтрино ("лептонов") на атомных ядрах. Психологически этот поворот вполне понятен: взаимодействие лептонов с адронами сыграло в установлении структуры протона, свойств кварков и глюонов такую же роль, какую знаменитые опыты Резерфорда сыграли в установлении структуры атома. (Если таким способом изучается кварковая структура протона, то почему бы не исследовать и кварковую структуру ядра?) Некоторые из установленных нами закономерностей были в этих опытах подтверждены.

В совместном мюонном эксперименте ОИЯИ—ЦЕРН на установке с рекордными на сегодняшний день параметрами были получены прямые экспериментальные данные по структурной функции ядра углерода при  $X > 1$ . Это было первое экспериментальное подтверждение гипотезы

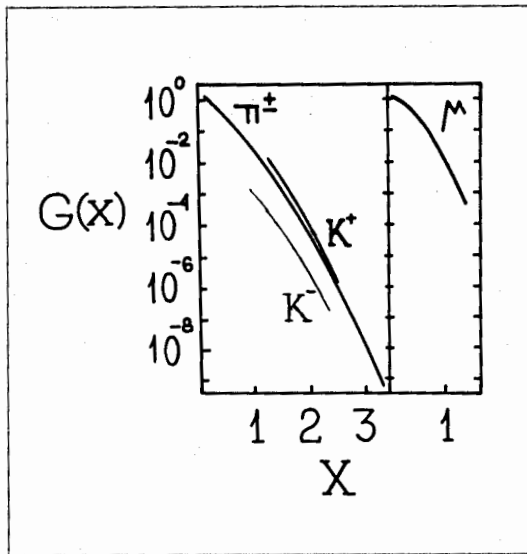


Рис.3. Зависимость от масштабной переменной структурных функций ядер из экспериментов по кумулятивному рождению адронов (пионы, каоны — левая часть рисунка) и глубоконеупругому рассеянию мюонов (правая часть рисунка).

тезы кумулятивного ядерного эффекта в экспериментах с лептонами <sup>/8/</sup>.

На рис.3 (справа) показаны эти данные. Для сравнения на этом же рисунке (слева) показаны данные по структурной функции тяжелого ядра и данные по кумулятивному рождению

$\pi^-$ -мезонов и K-мезонов в зависимости от масштабной переменной X.

Из рисунка видно, что в экспериментах с мюонами измерена структурная функция до  $X \sim 1,4$ , где ее абсолютная величина составляет примерно  $10^{-8}$ . Конечно, это "робкое" продвижение в кумулятивную область. Однако значение этого эксперимента велико. Совпадение полученных результатов с данными по кумулятивному рождению в адронных взаимодействиях практически сняло с повестки дня попытки объяснить кумулятивное рождение с точки зрения старых представлений о ядре и его нуклонной структуре в кумулятивных явлениях. Мюонный эксперимент несомненно явился мощным стимулом экспериментальных исследований структурных функций ядер в лептонных взаимодействиях при  $X > 1$ , т.е. в кумулятивной области.

Особое впечатление на физиков-теоретиков произвели результаты опытов Европейской мюонной коллаборации в 1983 г. (так называемый EMC-эффект) <sup>/7/</sup>. Коллаборация обнаружила, что в области  $X \sim 0,5$  распределения кварков в нуклоне железа и в нуклоне дейтрона заметно различаются. Этот результат согласуется с A-зависимостью, даваемой формулами (11) и (12). Кроме того, коллаборация обнаружила различие этих распределений и в области  $X < 0,3$ , где отсутствуют данные по распределению кварков в ядрах из опытов по кумулятивному рождению. К сожалению, и по настоящее время надежные данные по глубоконеупругому рассеянию лептонов в кумулятивной области ( $X > 1$ ) отсутствуют, за исключением упомянутых выше <sup>/6/</sup> предварительных данных. Наши данные в этой области можно рассматривать как предсказание для будущих экспериментов по лептон-ядерному рассеянию.

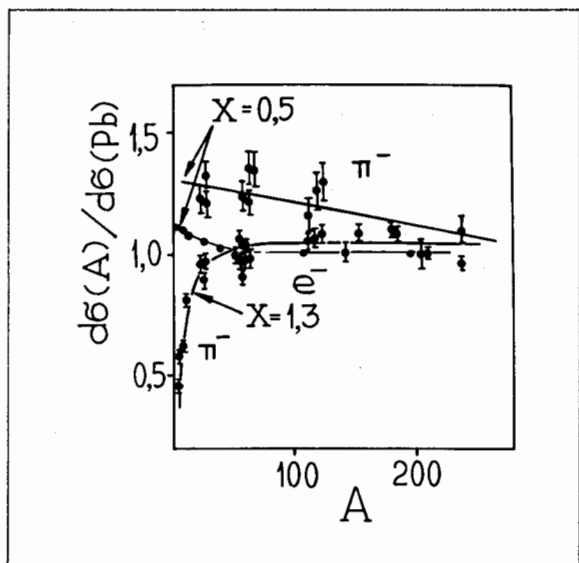


Рис.4. Отношение сечений фрагментации (структурных функций) легкого ядра к тяжелому (Pb) в зависимости от атомного веса ядра ( $A$ ) для пионов и электронов при  $X = 0,5$  и для пионов при  $X = 1,3$ .

На рис.4 приведены экспериментальные данные о зависимости отношений (легкого ядра к тяжелому) вероятностей (сечений) наблюдения рожденного пиона и рассеянного электрона, рассчитанные на один нуклон ядра.

Данные SLAC (США) относятся к рассеянию электронов при  $X = 0,5$ , наши данные — к рождению  $\pi^-$ -мезонов при  $X = 0,5$  и  $X = 1,3$ . Отношение структурных функций легкого ядра и тяжелого дает возможность анализировать экспериментальные данные при  $X < 1$  и при  $X > 1$ .

Из рис.4 видно, что характер зависимости структурной функции от атомной массы ядра из данных по глубоконеупругому рассеянию лептонов для  $X = 0,5$  тот же самый, что и для адронных процессов: с ростом  $A$  структурная функция (сечение) уменьшается.

В адронных процессах потребовались дополнительные эксперименты, чтобы доказать, что падение сечения с ростом атомной массы ядра не связано с поглощением рожденных пионов. Аналогичный характер зависимости для лептонов, где нет эффектов поглощения, подтверждает сделанный нами ранее вывод о том, что такое поведение связано с зависимостью структурной функции от атомного веса ядра типа (11).

Совершенно другой характер зависимости структурной функции от атомного веса ядра при  $X = 1,3$ , а именно: рост сечения с ростом  $A$  при  $A < 30$  говорит о смене механизма, определяющего зависимость структурной функции от атомного веса фрагментирующего ядра в кумулятивной области.

На рис.5 показаны зависимости от  $X$  отношений структурных функций ядра. Для удобства сопоставления с ЕМС-эффектом взято отношение, обратное рис.4 (отношение сечений фрагментирующего тяжелого ядра и легкого). Отношение, равное единице, соответствует модели ядра, состоящей из протонов и нейтронов, которые обладают такой же структурой, какую они имеют в пустоте. Подчеркиваем, что

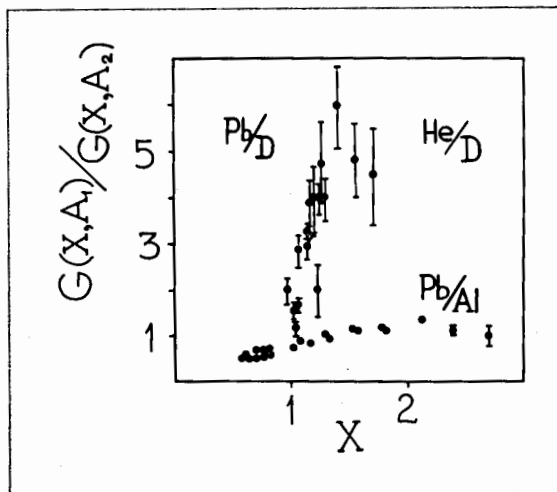


Рис.5. Зависимость отношений структурных функций тяжелого ядра и легкого от масштабной переменной  $X$ .

если данные при  $X < 1$  говорят лишь о том, что нуклон в ядре и нуклон в пустоте различаются по своей внутренней структуре, то данные в кумулятивной области (при  $X > 1$ ) свидетельствуют о возникновении в ядре мультикварковых конфигураций, включающих кварки от нескольких нуклонов.

Хотя большинство приведенных данных и их интерпретация получены в начале 70-х годов, они пережили "второе рождение" в экспериментах с лептонами в 80-х годах. Такое продолжительное "непонимание" экспериментальных данных объясняется их "необычностью". Действительно, при  $X < 1$  отношение структурных функций ядра свинца и дейтерия меньше единицы, т.е. вероятность наблюдения кварков с долями импульса  $X \sim 0,6 \div 0,8$  в тяжелом ядре меньше, чем в хорошо изученном "рыхлом" ядре дейтерия! Это, естественно, показалось странным. Однако еще более "неожиданным" было появление реальных событий, имеющих отличное от нуля сечение для  $X > 1$ .

Действительно, как понять в рамках старой нуклонной модели ядра полученный экспериментальный факт, что один кварк, заключенный в объеме одного нуклона, принимает на себя импульс двух-трех и возможно большего числа нуклонов, что и приводит к наблюдению событий с  $X > 1$ ?

Из рис.3 видно, что извлеченные из эксперимента структурные функции ядер при наблюдении кумулятивных  $\pi^+$ -мезонов и  $K^+$ -мезонов по порядку величины совпадают. Это является сильным подтверждением изложенных во введении идей.  $\pi^+$ - и  $K^+$ -мезоны характеризуют распределение одних и тех же  $u$ -кварков, которые, отрываясь от ядра, адронизируются в пустоте, в одном случае подхватывая  $\bar{d}$ -кварк и образуя пион, в другом случае подхватывая  $\bar{s}$ -кварк и образуя нуклон. Отрицательные  $K^-$ -мезоны состоят из кварков, которых в ядре нет (как преобладающих). Наблюдение на опыте значительных выходов  $K^-$ -мезонов, причем (как видно из рис.3) с зависимостью от  $X$ , близкой к зависимости для  $K^+$ - и  $\pi^+$ -мезонов, видимо, характеризует распределение в ядре глюонов.

Из рис.5 видно, что наиболее подробные данные о структурной функции тяжелого ядра получены из экспериментов по наблюдению

кумулятивных  $\pi$ -мезонов (кривая в левой части рис.3). При изменении аргумента  $X$  от 0 до 3,3 структурная функция уменьшается на девять порядков величины. Это означает, что на  $10^9$  различных возможностей всего один раз в ядре реализуется конфигурация, когда один кварк несет на себе импульс, соответствующий группе из 3,3 нуклонов.

Экспериментальные исследования в этой области кинематических переменных становятся чрезвычайно трудной задачей. Они требуют создания высокоинтенсивных (до  $10^{12}$  в секунду) пучков частиц, решения сложных инженерных вопросов по выводу за время порядка секунды из ускорителей таких пучков, создания сложных экспериментальных установок, способных получать неискаженную экспериментальную информацию в таких сложных радиационных условиях, применения мощной вычислительной техники для автоматизации сбора и обработки данных и т.д. Другими словами, эти исследования становятся сложной и дорогостоящей экспериментальной задачей. Но, с другой стороны, информативность и, что очень важно, однозначность интерпретации экспериментальных данных существенно возрастают с ростом величины  $X$ .

## КЛАССИФИКАЦИЯ ЯДЕРНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ

Взаимодействие ядер и частиц с ядрами можно классифицировать по параметрам  $b_{ik}$ , характеризующим, как было отмечено во введении, силу взаимодействия частиц  $i$  и  $k$ . Кроме того, величины  $b_{ik}$  определяют уровень (нуклонный или кварковый), на котором следует рассматривать структуру взаимодействующих объектов  $i$  и  $k$ .

Утверждения, обоснование которых дается ниже, состоят в следующем:

1) Область  $b_{ik} = 10^{-2}$  соответствует взаимодействию ядер как слабосвязанных систем, состоящих из нуклонов. Это область, где справедлива протон-нейтронная модель ядра.

2) Область  $0,1 < b_{ik} < 5$  является промежуточной. В этой области кварковые степени свободы играют существенную роль в перестройке адронных систем. Сечения взаимодействия относительно большие, что создает благоприятные условия для поисков так называемой кварковой экзотики, то есть кварковых систем, существенно отличающихся по своей структуре от обычных, которые состоят из трех кварков или из кварка и антикварка.

3) Область  $b_{ik} > 5$  соответствует взаимодействию ядер на кварковом уровне. В этой области ядра следует рассматривать как кварк-глюонные системы. Взаимодействие между кварками, входящими в объект  $i$  и в объект  $k$ , считается относительно слабым, и кварки ведут себя как квазисвободные (почти свободные частицы). Взаимо-

действие в этой области приводит к деконфайнменту кварков (в определенном выше смысле).

Что касается области (1), то из самых общих соображений было показано <sup>/8/</sup>, что сечение реакции  $I + II \rightarrow 1 + \dots$ , где I, II и 1 — нуклонные системы, имеет вид

$$\frac{d\sigma}{db_{I1}} = \frac{\mathcal{F}}{[b_{I1} + a]^2} \quad (13)$$

при  $b_{I1} \gg b_{II} \sim a_{I1} \approx 2\epsilon |m_I - m_1| / m_I m_1$ , где  $\epsilon$  — энергия связи фрагмента 1 в ядре I, а  $m_I$  и  $m_1$  — массы этих ядер.  $\mathcal{F}$  — слабо меняющаяся функция  $b_{ik}$ .

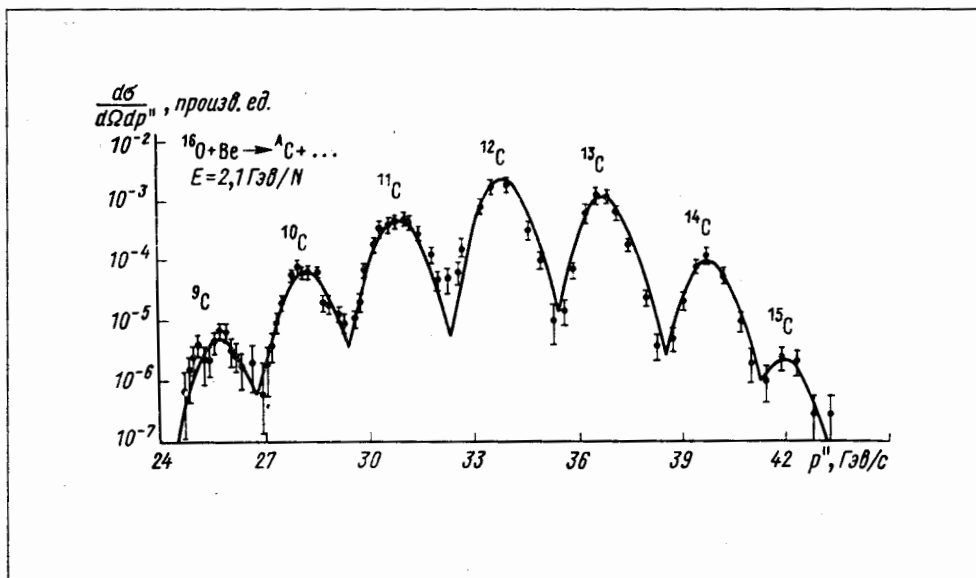


Рис.6. Распределение по продольному импульсу изотопов углерода при взаимодействии ускоренных ядер кислорода с ядрами бериллия.

Формула (13) описывает большую совокупность экспериментальных данных по реакциям, в которых происходит перераспределение нуклонов. В таких реакциях импульс, приходящийся на один нуклон фрагмента 1, примерно равен импульсу на нуклон налетающего ядра. На рис.6 приведено распределение по продольному импульсу изотопов ядра углерода в реакции  $^{16}\text{O} + \text{Be} \rightarrow \text{A}^{13}\text{C} + \dots$  при энергии ядер кислорода 2,1 ГэВ/нуклон. Положения максимумов на рисунке в точности соответствуют условию  $b_{I1} = 0$ , ширины пропорциональны соответствующим величинам  $a$ . Формула (13) описывает также угловое распределение фрагментов.



Следует подчеркнуть, что эти закономерности справедливы при всех  $b_{I\text{II}}$ , начиная с  $b_{I\text{II}} \gtrsim 0,5$ , и практически не зависят от величины  $b_{I\text{II}}$ , зависимость же от  $b_{I\text{I}}$  целиком определяется квазисвободой нуклонов (малостью величины  $\alpha$ , которая определяет большую величину сечения реакции (13)). Нетрудно показать, что при больших величинах импульсов  $P_1$  и  $P_1$  величина  $b_{I\text{I}}$  и соответственно сечения зависят только от отношения  $P_1/P_1$ , т.е. имеет место масштабная инвариантность. Однако эта масштабная инвариантность к кварковым степеням свободы, очевидно, отношения не имеет. Она иногда называется ядерным скейлингом и отчетливо проявляется в образовании ядерных фрагментов,  $\alpha$ -частиц, дейтронов и протонов. Это справедливо и при  $b_{I\text{II}} > 5$ , но при  $b_{I\text{I}} < 0,2$ . Для того чтобы кварковые степени свободы активно проявлялись, необходимо, чтобы не только  $b_{I\text{II}}$  было больше 5, но и чтобы  $b_{I\text{I}} > 5$ , а для барионных систем это условие выполнить трудно (сечения делаются слишком малыми). Интересно отметить, что при  $b_{I\text{II}} > 5$  и  $b_{I\text{I}} \gtrsim 1$  сечения образования протонов имеют характеристики, близкие к тем, которые наблюдаются в образовании  $\pi$ - и К-мезонов при  $b_{I\text{II}} > 5$  и  $b_{I\text{I}} \gtrsim 5$ , в частности, это наблюдается в кумулятивной области. Однако для барионных систем отличить кварковую масштабную инвариантность от ядерной (нуклонной) практически невозможно.

Реакции перераспределения нуклонов между ядерными фрагментами, описываемые формулой (13), имеют хорошую перспективу для обнаружения нейтроноизбыточных изотопов и для ряда других областей ядерной физики (в частности, для поиска и исследования гиперядерных и изоядерных систем). Столь же убедительные количественные выводы относительно области промежуточных  $b_{ik}$ , которые позволяет сделать простая формула (13), пока отсутствуют. Экспериментальные данные в этой области весьма обширны, но пока не очень информативны. Наиболее важными экспериментами в этой области являются эксперименты по поиску кварковой экзотики. Обнаружение узких резонансов, соответствующих дибарионам и другим системам с нестандартным числом кварков, может сделать исследования в области  $0,1 \lesssim b_{ik} \lesssim 5$  необычайно актуальными.

Область асимптотически больших  $b_{ik}$ , как уже отмечалось во введении, начинается довольно рано: при  $b_{ik} > 5$ . В обоснование этого утверждения можно привести значительное число экспериментальных фактов. Мы остановимся лишь на некоторых из них.

Один из главных результатов наших экспериментов по исследованию кумулятивного эффекта был получен в первых работах<sup>9/</sup>: предельная фрагментация ядер начинается при энергии релятивистских ядер 4-5 ГэВ/нуклон. Мы подчеркивали этот результат и в цитируемых выше статьях и обзорах. В обзорном докладе на Международной конференции по физике высоких энергий в Токио<sup>10/</sup> был собран экспериментальный материал различных групп в обоснование этого

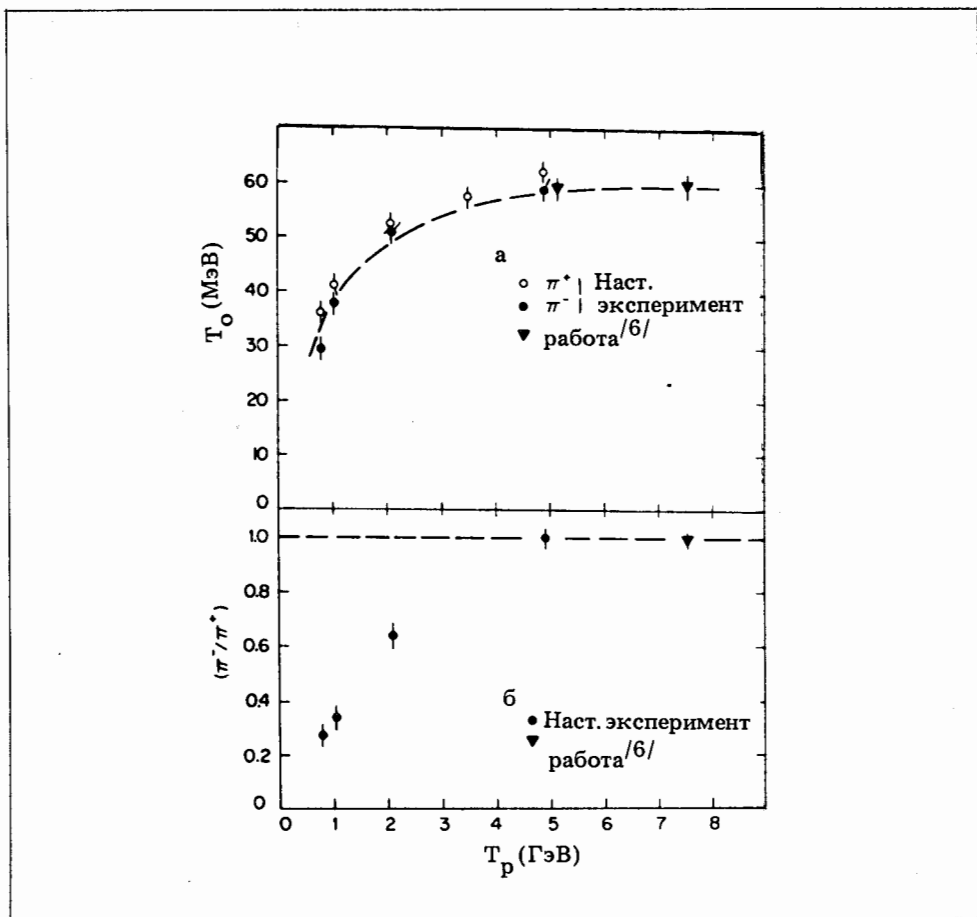


Рис.7. Экспериментальные данные группы Шредера (США), подтверждающие выход на асимптотический режим при энергиях синхрофазотрона Дубны.

важного утверждения. Этот обзор привлек внимание американских физиков к нашим работам, и они выполнили исследования по образованию пионов "назад" на ядрах под действием протонов, обратив особое внимание на промежуточную область энергий.

В наших обозначениях исследованная ими область энергий соответствует  $2 \lesssim b_{I\ II} \lesssim 8$ . Их результаты, показанные на рис.7, как отмечают сами авторы /11/, подтверждают наши основные выводы и экспериментальные результаты (треугольники на рис.7). Величина  $T_p$ , отложенная по оси абсцисс на рис.7, в наших обозначениях равна  $T_p = \frac{b_{I\ II}}{2} m_0$ . Величина  $T_0$  — параметр, описывающий спектр образованных в реакции  $p + A \rightarrow \pi^\pm (180^\circ)$  пионов, если его аппроксимиро-

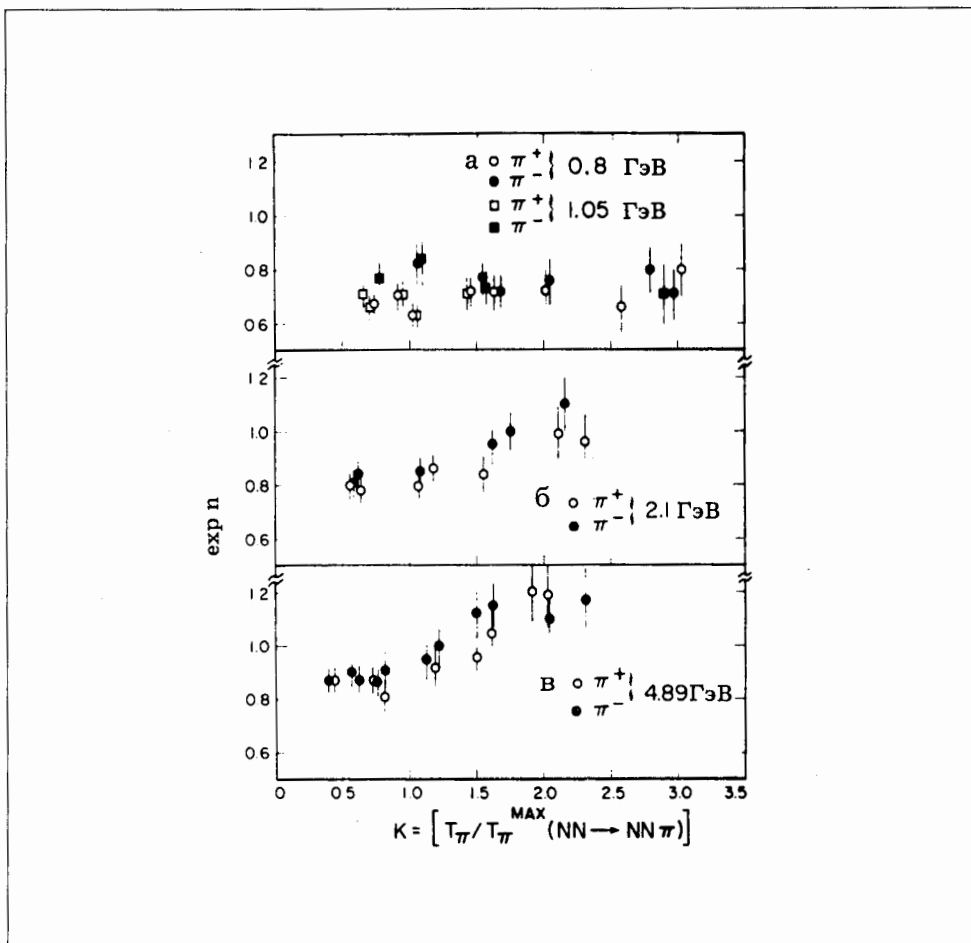


Рис.8. Усиленная A-зависимость (показатель степени в A-зависимости), подтверждающаяся в опытах Шредера.

вать выражением  $\exp[-T_\pi/T_0]$ , где  $T_\pi$  — кинетическая энергия пионов,  $\pi^-/\pi^+$  — отношение сечений образования отрицательных и положительных пионов. На рис.8 представлена зависимость показателя степени  $n$  от атомной массы  $A$  в выражении  $\sigma \approx A^n$  для разных  $T_p = b_{I\text{II}}/2$ . Как видно из рисунка, усиленные или аномальные A-зависимости ( $n \approx 1$ ) возникают только при достаточно больших  $T_p$  и  $T_\pi$ , примерно соответствующих нашей оценке  $b_{ik} > 5$ .

Сейчас существуют экспериментальные данные по кумулятивно-рождению пионов в широкой области  $b_{I\text{II}} > 5$ , и все они согласуются с утверждением, что в области  $b_{I\text{II}} > b_{\text{III}} > 5$  и  $b_{I1} > 5$  наступает асимптотический режим, в котором сечение хорошо описывается аппроксимирующей формулой (11). Таким образом, утверждение о на-

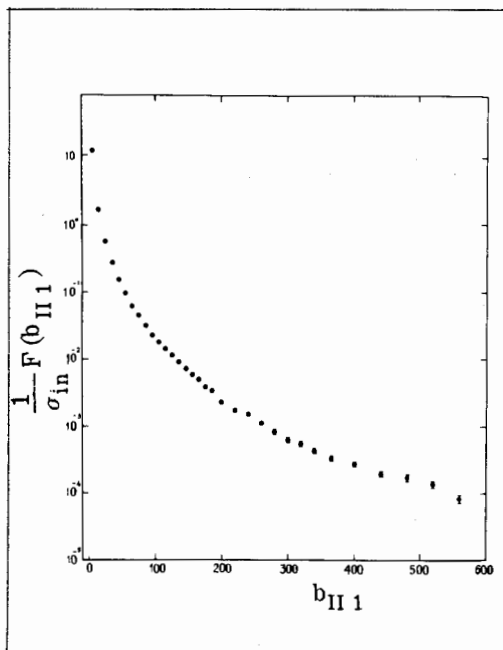


Рис.9. Резкое ослабление корреляций в зависимости от параметра  $b_{ik}$  в реакции с рождением пионов.

чале предельной фрагментации ядер при  $b_{II} \approx 5 \div 6$  или при энергии сталкивающихся ядер 3,5-4 ГэВ/нуклон хорошо экспериментально обосновано и находится в соответствии с представлением о деконфайменте кварков (в смысле, изложенном во введении). Непосредственную проверку представления об ослаблении взаимодействий (и соответственно характеризующих их величин) с ростом  $b_{ik}$  можно провести на трековых приборах,

где в качестве частиц  $i$  и  $k$  можно выделить любые из частиц в реакции множественного рождения (5).

Согласно развиваемым представлениям распределения по  $b_{ik}$  должны монотонно убывать, а корреляции между частицами  $i$  и  $k$  должны исчезать. Это свойство сечений множественного рождения частиц в области релятивистских столкновений можно сформулировать аналогично принципу ослабления корреляций Н.Н.Боголюбова в статистической физике <sup>/12/</sup>. Экспериментальных данных, подтверждающих эту идею, очень много, мы, однако, ограничимся только типичной иллюстрацией. Приведенные на рис.9 экспериментальные данные показывают зависимость сечения образования пионов в реакции  $\pi^- + {}^{12}\text{C} \rightarrow \pi\pi + \dots$  при энергии падающих пионов 40 ГэВ (или при  $b_{II} \approx 570$ ) от  $b_{II1}$ . Большой объем экспериментальных данных хорошо согласуется с гипотезой о монотонном ослаблении корреляций при  $b_{ik} \rightarrow \infty$ .

Из принципа ослабления корреляций следует много важных выводов. Например: при  $b_{II} \gg 1$  окрестность точки I в пространстве  $b_{ik}$  слабо коррелирует с окрестностью точки II. Отсюда следует, что для изучения окрестности точки II можно использовать любые частицы I. Иначе говоря, для изучения многих эффектов релятивистской ядерной физики не обязательно ускорять ядра (в частности, как отмечалось выше, это справедливо для изучения кумулятивного эффекта). Этот же принцип позволяет определить струи адронов как группы частиц, обусловленных адронизацией кварков в пустоте и слабо зависящих от механизма их образования.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ РЕЛЯТИВИСТСКОЙ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

Поскольку физика релятивистских ядер возникла на базе физики высоких энергий и имеющиеся здесь средства уже обеспечивают проведение широких программ исследования кварковой материи, то на ближайшие годы основными инструментами релятивистской ядерной физики будут переделанные протонные синхротроны и детекторы физики элементарных частиц. В настоящее время в ЛВЭ на исследования проблем релятивистской ядерной физики ориентировано 4 трековых прибора и 7 крупных электронных установок.

Основной спецификой релятивистских ядерных столкновений (по сравнению со столкновениями частиц) являются очень большие множественности рождающихся частиц. Приближенно эти множественности описываются как результат положения столкновений квазисвободных нуклонов взаимодействующих ядер. Большая часть частиц-продуктов представляет собой нуклоны и нуклонные системы (ядра), описываемые формулой (13). В связи с этим при регистрации релятивистских ядерных столкновений области малых  $b_{Ii}$  и  $b_{IIi}$  стараются исключить. В большинстве случаев это можно сделать благодаря тому, что эти области соответствуют либо очень малым углам, либо медленным частицам. В наиболее интересной области больших  $b_{ik}$  инклюзивные\* или полуинклюзивные постановки опытов релятивистской ядерной физики мало отличаются от соответствующих постановок адронной физики. Области асимптотически больших  $b_{ik}$  и больших  $X (\geq 1)$  соответствуют редким процессам, идущим с малыми сечениями, для которых специфика больших множественностей ядерных столкновений не играет роли.

Таким образом, главным новым условием проведения экспериментов в области релятивистской ядерной физики являются интенсивные пучки. Интенсивность выведенных пучков ядер уже сейчас значительно превышает интенсивность вторичных пучков частиц (пионов, каонов и др.). Это обстоятельство позволило относительно легко адаптировать и развить существующие детекторы и приспособить их к изучению процессов релятивистской ядерной физики. В этой связи в ЛВЭ основное внимание уделяется развитию ускорительного комплекса. Ускорение дейтронов на синхрофазотроне в Дубне в 1970 г. показало, что ускорение легких ядер не требует больших переделок ускоряющей системы ускорителей физики высоких энергий. Вскоре после получения пучков релятивистских дейтронов были ускорены пучки релятивистских ядер гелия. Однако уже получение пучков релятивистских ядер

---

\* Понятие, введенное и разработанное А.А.Логуновым и его сотрудниками.

углерода на синхрофазотроне показало, что с ростом заряда трудности релятивистского ускорения ядер быстро нарастают. В существующих синхрофазотронах могут ускоряться лишь ядра, полностью лишенные электронных оболочек. Вследствие больших размеров орбиты и относительно медленного набора энергии суммарная толщина вещества, которую должен преодолеть ускоряемый ион, настолько велика, что электронные оболочки заведомо будут разрушены, заряд иона изменится и он выпадет из ускорения. Однако ядра, полностью лишенные электронных оболочек, представляют собой устойчивую систему, так как вероятность захвата электрона ядром быстро падает с увеличением энергии.

Проблема создания эффективных источников сильноионизованных атомов высокой зарядности стоит перед физиками уже около тридцати лет. Получение же пучка ядер, полностью лишенных электронных оболочек, представляет собой чрезвычайно сложную задачу. В настоящее время эта задача решается двумя различными путями.

Первый путь — создание предварительных ускорителей относительно низкозаряженных ионов (иногда каскада ускорителей) с промежуточной "обдиркой" ионов на твердых и газообразных мишенях. В этом случае для получения ионов используют источник с разрядом Пеннинга, обеспечивающий высокие интенсивности относительно низкозарядных ионов. Средний заряд ионов после прохождения вещества обдирочного устройства сильно зависит от их энергии. Например, для получения голого ядра кальция ( $Z = 20$ ) необходимо ускорять ионы до энергии 10 МэВ/нуклон, а это уже проблема создания дополнительного специализированного ускорителя. Иногда для этой цели предлагается использовать действующие ускорители, расположенные на значительном расстоянии от основного, и транспортировать пучки от ускорителя к ускорителю.

Другой путь получения пучка голых ядер — использование компактного ионного источника с последующим ускорением этих ядер в обычном линейном ускорителе на второй кратности — предложен и развит в Дубне. В ЛВЭ разработали источники принципиально нового типа, которые позволили получить рекордные параметры ионизации атомов. Этот путь рекомендовал нам Г.Н.Флеров. Электронно-лучевой ионизатор, предложенный и разработанный Е.Д.Донцом<sup>/13/</sup>, прекрасно соответствует синхротронному методу ускорения, так как он дает не только максимальное отношение заряда к массе, что обеспечивает достижение максимальной энергии ядер для данного ускорителя, но и имеет импульсный характер работы. С марта 1977 года ионизатор КРИОН-1 регулярно используется для получения пучков релятивистских ядер на синхрофазотроне Лаборатории высоких энергий ОИЯИ<sup>/14/</sup>. Прогресс в получении рекордных параметров ионизации (так называемый фактор ионизации повысился на пять порядков величины) показал, что в ближайшем будущем любые ионы всех достаточно

стабильных элементов таблицы Менделеева станут доступны для исследования их свойств и применений в ускорительной технике. В электронно-лучевом методе ионизации не существует принципиальных сложностей, и все зависит от искусства экспериментатора. Как выяснилось в последние годы, физика сильноионизованных атомов сама по себе представляет большой интерес как с точки зрения многочисленных приложений, так и с точки зрения возможности исследования ряда фундаментальных проблем, а для этих целей электронно-лучевой источник предоставляет уникальные возможности.

Другим типом источников, эффективно используемых для целей релятивистской ядерной физики, являются лазерные источники. Первый лазерный источник для этих целей был разработан в ЛВЭ совместно с группой физиков Московского инженерно-физического института под руководством Ю.А.Быковского <sup>/15/</sup>. При воздействии сфокусированного излучения на поверхность твердой мишени образуется плазменный факел с большой температурой и плотностью. Электроны как очень легкие частицы получают основную долю энергии и при своем вылете перпендикулярно поверхности мишени создают, по-видимому, некоторое подобие механизма коллективного ускорения. Такой процесс ускорения позволяет, например, ионам с  $Z > 20$  набрать энергию до  $20 \div 40$  кэВ.

Применение метода ускорения сильноионизованных атомов в условиях работы синхрофазотрона хотя и оказалось далеко не простой задачей, но довольно быстро привело к успеху. В частности, первые экспериментальные данные с релятивистскими ядрами углерода рекордных энергий получены в 1976 году на основе лазерного источника. В источнике использовался лазер на неодимовом стекле с выходной мощностью 1 ГВт, обеспечивающей плотность потока излучения на мишени  $10^{13}$  Вт/см<sup>2</sup>. Однако лазер на неодимовом стекле оказался ненадежным в эксплуатации и давал слишком низкую среднюю интенсивность пучка. Дальнейшая разработка лазерного источника была ориентирована на использование CO<sub>2</sub>-лазера, свободного от недостатков неодимового лазера и, что особенно важно, позволяющего существенно снизить плотность потока излучения, требуемую для получения в лазерной плазме ионов одной и той же зарядности. В результате проведенных исследований был создан лазерный источник <sup>/16/</sup>, основанный на CO<sub>2</sub>-лазере с ультрафиолетовой преионизацией, имеющей выходную энергию 10 Дж при частоте повторения 1 Гц. В экспериментах с CO<sub>2</sub>-лазером в синхрофазотроне были впервые ускорены ядра лития и магния, а также в сто раз была увеличена рабочая интенсивность пучков ядер углерода. Последняя достигла величины, которая планировалась при условии создания специального дорогостоящего ускорителя-бустера синхрофазотрона.

Однако получение полностью ионизованных (голых) ядер еще не решает проблемы ускорения тяжелых ядер на обычных синхрофазотро-

нах. Главная проблема — получение значительно более глубокого вакуума в камере ускорителя. Уже при ускорении ядер магния на синхрофазотроне потери интенсивности при перезарядке ядер (подхват электронов) оказываются недопустимо большими. Для улучшения вакуума в камеру синхрофазотрона вводятся поверхности, охлаждаемые жидким гелием, — создается так называемая криооткачка. Завершение систем криооткачки позволит увеличить интенсивность пучков ядер магния в тысячу раз и продвинуться до середины периодической системы по массам ускоряемых ядер. Существующие в настоящее время пучки на синхрофазотроне перечислены в статье И.Н.Семеновича и др. (см. с.277).

Важно подчеркнуть, что развитие ускорительного комплекса синхрофазотрона как уникального центра по исследованию в области релятивистской ядерной физики потребовало создания больших и сложных систем медленного вывода (за время порядка секунды) ускоренных пучков ядер с коэффициентом вывода лучше 90%. Для эффективного использования пучков построен большой экспериментальный зал, размеры которого позволяют сооружать экспериментальные установки протяженностью до 70 метров. Планировка и инженерное обеспечение зала позволяют вести несколько экспериментов одновременно. Физические установки, расположенные в зале, могут быть соединены с помощью линии связи с вычислительным центром ЛВЭ, оснащенный ЭВМ ЕС-1040 и ЕС-1055 (см. рис.2). Созданная система каналов обеспечивает их одновременную и независимую работу. В каждом из каналов можно менять импульс и сорт вторичных частиц; для отклонения первичного пучка в боковые каналы установлены магниты, и головные части боковых каналов окружены бетонной защитой, обеспечивающей радиационную безопасность персонала, работающего в зале. В конце центрального канала смонтирована ловушка, рассчитанная на гашение полной интенсивности.

Второе направление выведенного из синхрофазотрона пучка было предназначено в основном для обеспечения работы пузырьковых камер (длительность вывода 0,7 мс). В настоящее время начаты работы по реализации второго направления медленного вывода. Характеристики второго медленного вывода:

Энергия протонов	1,3– 8,1 ГэВ
Энергия ядер	0,5-3,6 ГэВ/нуклон
Длительность вывода	1 мс — 1 с
Коэффициент вывода	50%
Размеры пучка на внешней мишени	от 20x20 мм <sup>2</sup> до 160x160 мм <sup>2</sup> .

Комплекс второго медленного вывода имеет энергию ниже границы деконфайнмента и предназначен для ядерных исследований.

Развитие синхрофазотрона как ускорителя релятивистских ядер позволило вывести его на ведущее положение в мире. Параметры пучков релятивистских ядер будут постоянно улучшаться.



В ЛВЭ разработана следующая программа исследований с использованием пучков релятивистских ядер. В течение ближайших 4-5 лет будут максимально использоваться пучки релятивистских ядер синхрофазотрона рекордных энергий до 5 ГэВ/нуклон. Область энергий выше 3,5 ГэВ/нуклон (определяемая нашим критерием  $b_{I II} > 5$ ) пока не достигнута в других ускорительных центрах, она одновременно является областью, где уже наступает деконфайнмент и происходит перестройка кварковых структур адронных систем. Планируемое ускорение легких ядер в западных ускорительных центрах до энергий выше 5 ГэВ/нуклон не приведет к потере Дубной конкурентоспособности в исследованиях по релятивистской ядерной физике, так как при энергии выше 5 ГэВ/нуклон сечения процессов (согласно изложенным выше результатам) выходят на асимптотический режим и меняются очень слабо.

Как показано выше, основные выводы об атомных ядрах как кварк-глюонных системах были получены на синхрофазотроне в Дубне, а на крупнейших ускорителях мира они получили лишь подтверждение и пока неполное.

По-видимому, оптимальной областью энергий релятивистских ядерных столкновений, с точки зрения изучения кварковой материи и хромодинамики больших расстояний, является область 4÷8 ГэВ/нуклон. В ЛВЭ ОИЯИ планируется в качестве дальнейшего развития ускорительного комплекса создание специализированного ускорителя релятивистских ядер — "Нуклотрона" <sup>/17/</sup> на энергию 6÷7 ГэВ/нуклон. Создание "Нуклотрона" предполагает замену кольцевого магнита на сверхпроводящую систему типа "Дубна" с использованием существующей площадки, сооружений, экспериментальных залов, комплекса медленного вывода и др. В магнитных системах типа "Дубна" реализуется идея использования больших плотностей тока в сверхпроводниках для миниатюризации поперечного сечения ускорителя. Исследование магнитных систем и создание модельного сверхпроводящего синхротрона СПИН <sup>/18/</sup> позволило решить практически все технологические проблемы и показало большую экономическую целесообразность создания ускорителей, основанных на этом принципе. Достигнутый в камере этих магнитных систем вакуум в миллион раз лучше, чем в синхрофазотроне, что позволяет ускорять любые ионы.

Таким образом, исследования релятивистских ядерных столкновений открыли принципиально новый подход к структуре атомных ядер, показали границы применимости протон-нейтронной модели ядра. Несомненно, что изучение кварковых степеней свободы атомных ядер и ядерных реакций составляет главную перспективу фундаментальных исследований в ядерной физике. Проблематика этой области науки стала очень широкой, затрагивающей фундаментальные проблемы как квантовой теории поля, хромодинамики, так и физики ядра. Можно уверенно прогнозировать на длительное время бурное развитие релятивистской ядерной физики как крупного раздела физики микромира.

### *Литература*

1. Балдин А.М. "Природа", 1976, № 10, с.46.
2. Шехтер В.М. "Природа", 1980, № 2, с.53.
3. Ставинский В.С. ЭЧАЯ, 1979, т.10, вып.5, с.949.
4. Балдин А.М. ОИЯИ, Р7-5808, Дубна, 1971.
5. Матвеев В.А., Мурадян Р.М., Тавхелидзе А.Н. ЭЧАЯ, 1971, т.2, вып.1, с.5.
6. Савин И.А. В кн.: Труды VI Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. ОИЯИ, Д1,2-81-728, Дубна, 1981, с.223.
7. Aubert J.J., Bassompierre G., Becks K.H. et al. Phys.Lett., 1983, vol.123B, p.275.
8. Балдин А.М. ДАН СССР, 1975, т.222, № 5, с.1064.
9. Baldin A.M., Ghirdanescu N., Stavinsky V.S. In: Proc. of the Topical Meeting on High Energy Collisions Involving Nuclei. Trieste, 1974. Bologna, 1975, p.171.
10. Baldin A.M. In: Proc. of the Int. Conf. on High Energy Phys., 19th., Tokyo, 1979, p.455.
11. Schroeder L.S. et al. Phys.Rev.Lett., 1979, vol.43; 24, p.1787.
12. Балдин А.М., Диденко Л.А. В сб.: Краткие сообщения ОИЯИ, №3-84, Дубна, 1984, с.5.
13. Донец Е.Д. ЭЧАЯ, 1982, т.13, вып.5, с.941.
14. Вадеев В.П. и др. ОИЯИ, Р7-10823, Дубна, 1977.
15. Ананьин О.Б. и др. Квантовая электроника, 1977, т.4, № 7, с.1547.
16. Безногих Ю.Д. и др. ОИЯИ, Р9-84-246, Дубна, 1984.
17. Алексеев В.П. и др. ОИЯИ, 9-7148, Дубна, 1973; Балдин А.М. и др. В кн.: Труды IV Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. "Наука", М., 1975, т.2, с.4.
18. Шелаев И.А. и др. ОИЯИ, Р9-83-582, Дубна, 1983.

## ПЕРВЫЕ ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭНЕРГИЯХ В ОИЯИ

*Б. СЛОВИНСКИ, доктор физико-математических наук*

В последние годы релятивистская ядерная физика переживает этап исключительно бурного развития. Достижения в области экспериментальной техники, в особенности ускорение атомных ядер до релятивистских энергий, электронные и нейтринные пучки большой энергии и интенсивности, возможность достаточно точно измерять большие передачи импульсов различным компонентам реакции, наблюдение и измерение характеристик множественного, в том числе струйного образования частиц при высоких энергиях, сделали реальным вопрос об исследовании субадронных структур мезонов и нуклонов, а также атомных ядер. Сформировались основы теоретического описания наблюдаемых явлений: квантовая хромодинамика, несмотря на существующие еще серьезные трудности, претендует на количественное объяснение, в принципе, всей совокупности известных фактов, относящихся к взаимодействиям адронов и свойствам ядерной материи.

В настоящее время, когда достаточно четко виден круг проблем и сопутствующих им трудностей в этой области, можно должным образом оценить значимость тех первых экспериментальных работ, в которых наблюдались явления, привлекающие ныне всеобщий интерес.

Уже в 1956 году М.Г.Мещеряковым и сотрудниками был выполнен на шестиметровом синхроциклотроне эксперимент, в котором изучались при помощи магнитного спектрометра с телескопом из сцинтилляционных счетчиков энергетические спектры протонов с энергией 100-700 МэВ, испускаемых под углами  $7^\circ$ ,  $12,2^\circ$ ,  $18^\circ$ ,  $24^\circ$  и  $30^\circ$  из ядер бериллия, углерода, меди и урана под действием протонов с энергией 660 МэВ. Анализ экспериментальных данных, проведенный на основе импульсного приближения с учетом релятивистской кинематики, показал, что лучшей параметризацией импульсного распределения внутриядерных нуклонов ядер бериллия и углерода является гауссовская функция со значением  $1/e$  при энергии приблизительно 20 МэВ или суперпозиция двух гауссовских распределений, которая лучше учитывает высокоимпульсную часть фермиевского движения нуклонов в ядре. Получены данные, позволяющие оценить импульсное распре-

ление периферических нуклонов в более тяжелых ядрах: меди и урана, которое соответствует в основном радиальной волновой функции оболочечной модели с радиальным квантовым числом  $n = 1$ . Было сделано весьма существенное замечание, которое, как оказалось впоследствии, можно отнести и ко многим более поздним аналогичным исследованиям. Суть его в том, что оценки импульсного распределения внутриядерных нуклонов, основанные на изучении энергетических спектров квазиупруго рассеянных адронов, могут привести к некоторому завышению высокоимпульсной части этого распределения, если не будет учтено рассеяние на тесных двунуклонных группах и, возможно, более тяжелых ядерных подструктурах.

Результаты, относящиеся к фермиевскому движению внутриядерных нуклонов, нашли широкое отражение не только в текущей научной литературе, но и в монографиях и учебных пособиях по структуре атомных ядер и ядерным реакциям. Они послужили также для обоснования модели внутриядерного каскада, которая очень часто применяется в различных аспектах при анализе экспериментальных данных. Позднее, когда взаимодействия релятивистских частиц и ядер с атомными ядрами стали уникальным источником сведений о процессах, протекающих с участием короткоживущих частиц, и о специфических локальных свойствах ядерной материи, надежное знание движения внутриядерных нуклонов как "классического фона" стало фактором, определяющим корректность этих исследований.

В 1957 году был выполнен ряд экспериментов, в которых измерялись энергетические спектры  $\pi^+$ - и  $\pi^-$ -мезонов, испускаемых под углом  $56^\circ$  к пучку первичных протонов с энергией 670 МэВ. Такое значение угла в лабораторной системе отсчета соответствовало углу  $90^\circ$  в системе центра масс нуклон-нуклон. Мишенью были ядра углерода. Получены энергетические распределения заряженных пионов, простирающиеся до значения 400 МэВ, и не исключалась возможность того, что верхняя граница энергии этих частиц равна 470 МэВ, как в случае реакции  $p + {}^{12}\text{C} \rightarrow \pi^+ + {}^{13}\text{C}$ . Был сделан вывод, что для объяснения наблюдаемой высокоэнергетической части спектров в рамках нуклон-нуклонных внутриядерных столкновений требуется допустить существование внутри ядра углерода нуклонов, обладающих импульсом не менее 350 МэВ/с. Это значение импульса внутриядерного нуклона для углерода превышает более чем на 100 МэВ/с граничное значение, вытекающее из модели ферми-газа невзаимодействующих нуклонов. Более десяти лет спустя такого рода эмиссия частиц в адрон-ядерных взаимодействиях, когда частицы испускаются вне области, соответствующей кинематике адрон-нуклонных столкновений, стала привлекать всеобщий интерес в связи с возможностью изучать таким образом локальные свойства ядерной материи.

Однако вопрос о том, при каких условиях можно достаточно убедительно говорить о проявлении нетривиальных, с точки зрения ядер-

ной физики, свойств атомных ядер, оказался более сложным, чем предполагалось вначале. В рамках некоторых модельных подходов было показано, например, что для того, чтобы вторичная частица, образованная в адрон-ядерных столкновениях, приобрела характеристики, находящиеся вне кинематической области, разрешенной для свободных адрон-нуклонных столкновений при той же энергии в интервале значений масштабной переменной  $x \lesssim 2$ , нет необходимости привлекать новые представления о природе взаимодействия. Не лишены недостатков и другие критерии, скорее всего качественного характера, например, чтобы передача импульса была не меньше  $\sim 1$  ГэВ/с или чтобы эффективная масса мишени была больше массы покоя нуклона и т.п. Наиболее аргументированным теоретически и экспериментально является предложенное недавно А.М.Балдиным условие, при выполнении которого можно считать, что адроны вообще, в том числе и внутриядерные, утрачивают свою индивидуальность, то есть роль квазичастиц ядерной материи, а именно: предполагается, что для этого необходимо, чтобы передача квадрата четырехскорости вторичной частице была не меньше 5. В упомянутом эксперименте эта величина, соответствующая высокоэнергетической части заряженных пионов, испускаемых в области фрагментации ядра-мишени, заметно превышала 5. Следовательно, в 1957 г. в ОИЯИ впервые наблюдался качественно новый тип явлений, изучение которых стало основным содержанием современной релятивистской ядерной физики.

Большое значение имело открытие в 1957 году М.Г.Мещеряковым и сотрудниками явления прямого выбивания дейтронов из атомных ядер протонами с энергией 657 МэВ. В этом эксперименте пучок протонов синхроциклотрона ОИЯИ падал поочередно на мишени из  $H_2O$ ,  $D_2O$ ,  $Li$ ,  $Be$  и  $C$  толщиной от 1,1 до 3,4 г/см<sup>2</sup>. Системой коллиматоров выделялись испускаемые под углом  $7,6^\circ$  вторичные частицы, которыми в основном были протоны. При облучении всех мишеней наблюдались пики от дейтронов с энергией немного меньше 675 МэВ. Анализ экспериментальных данных показал, что регистрируемые аппаратурой дейтроны не могли образоваться ни в результате реакции подхвата нейтронов из ядер падающими протонами, ни в столкновениях первичных протонов с нейтронами ядра-мишени. Была также отвергнута возможность возникновения этих дейтронов в более сложных процессах каскадного типа. Обнаружено, что пики в измеренных ими импульсных спектрах дейтронов значительно шире, чем пик, наблюдаемый в упругом  $pd$ -рассеянии. Считая это уширение обусловленным, в основном, распределением по импульсам квазидейтронных кластеров в ядрах, М.Г.Мещеряков и сотрудники получили оценки средней энергии движения этих кластеров в ядрах  $Li$ ,  $Be$ ,  $C$  и  $O$ : 8, 11, 14 и 14 МэВ соответственно, а по сдвигу пиков относительно пика от  $pd$ -рассеяния — энергию связи дейтронов в исследованных ядрах: 9,5, 16,7, 25,2 и 20,7 МэВ. Была получена также оценка полного сечения выбива-

ния дейтронов из ядер. В дальнейшем измерено дифференциальное сечение выбивания дейтронов под разными углами в интервале  $6,5^\circ - 16^\circ$  и изучена зависимость этого сечения от атомного номера ядра-мишени. Таким образом, был дан и первый достаточно полный количественный экспериментальный анализ обнаруженного явления и, следовательно, явления кластеризации ядерной материи, которому уже через некоторое время стали посвящать отдельные международные конференции.

В 1967 году группой Г.Палевского на брукхейвенском космотроне был выполнен аналогичный эксперимент, в котором при помощи магнитного спектрометра исследовалась реакция  $p + (A, Z) \rightarrow d + p + (A - 2, Z - 1)$  на ядрах  ${}^4\text{He}$ ,  ${}^6\text{Li}$ ,  ${}^{12}\text{C}$ ,  ${}^{16}\text{O}$  и  $\text{Pb}$  при импульсе первичных протонов 1 ГэВ/с. Испускание дейтронов наблюдалось под углами  $5^\circ$ ,  $10^\circ$  и  $15^\circ$  (в л.с.). Сделана оценка средней кинетической энергии двунуклонных кластеров в изученных ядерных мишенях, которая оказалась в полном согласии с более ранними результатами, полученными в ОИЯИ.

Открытие явления прямого выбивания дейтронов из атомных ядер высокоэнергетическими протонами существенно стимулировало интерес к исследованию структуры атомных ядер. Вслед за экспериментальным наблюдением Д.И.Блохинцев выдвинул концепцию о существовании флуктуаций ядерного вещества, которой суждено было возродиться в виде так называемой флуктонной модели ядра при объяснении "жесткой" части импульсных спектров  $\pi$ -мезонов, образованных в кумулятивной области в протон-ядерных соударениях при энергиях в несколько ГэВ. Следует также отметить, что обнаруженный эффект впервые указал на реальную возможность экспериментального исследования взаимодействия одновременно трех адронов на малых расстояниях.

Данные М.Г.Мещерякова и сотрудников вновь обратили на себя внимание в начале 70-х годов, когда появились пучки легких релятивистских ядер, в связи с изучением кумулятивного эффекта. В 1981 г. явление прямого выбивания дейтронов из атомных ядер высокоэнергетическими протонами зарегистрировано Государственным комитетом по делам изобретений и открытий СССР как научное открытие.

Дальнейшие работы этой группы физиков, выполненные на синхрофазотроне ОИЯИ с помощью одноплечевого магнитного спектрометра с проволочными искровыми камерами на линии с ЭВМ, имели своей целью подробное и систематическое изучение инклюзивных спектров быстрых дейтронов и протонов, испускаемых в столкновениях дейтронов и протонов с различными мишенями ( $p$ ,  $d$ ,  $\text{C}$ ,  $\text{Al}$ ,  $\text{Bi}$ ) при трех значениях импульса падающих частиц: 4,3; 6,3 и 8,9 ГэВ/с. Хорошее импульсное разрешение детектора ( $\Delta p/p \approx \pm 0,25\%$ ) и большая статистика накопленного экспериментального материала дали возможность подробно исследовать структуру высокоимпульсной части спектра вторичных протонов и дейтронов в интервале переданных им-

пульсов  $0,2 \leq |t| \leq 0,8$  (ГэВ/с)<sup>2</sup>. Для анализа полученной информации привлекалась модель многократного дифракционного рассеяния. При этом был развит формализм, позволивший предсказать переход двухпиковой структуры "жесткой" части спектров дейтронов от dd-рассеяния в трехпиковую, когда возрастает величина переданного импульса. Наличие такого превращения подтверждено экспериментально.

В целом удалось удовлетворительно воспроизвести измеренные в высокоимпульсном интервале спектры протонов и дейтронов в рамках картины многократного дифракционного рассеяния с привлечением известных моделей распределения нуклонов по импульсам в дейтроне. В случае рассеяния дейтронов на ядрах углерода при 6,3 и 8,9 ГэВ/с и ядрах алюминия и висмута при 6,3 ГэВ/с наблюдаемые спектры можно было объяснить, предполагая наличие сопутствующего дейтронам испускания нуклонов в связанных состояниях, в виде фрагментов. Некоторое превышение экспериментально наблюдаемой высокоимпульсной части вторичных дейтронов, например из реакции  $d + C \rightarrow d + \dots$  при 6,3 и 8,9 ГэВ/с, над результатами теоретического анализа, составляющее не более нескольких процентов, можно надеяться компенсировать равным образом как путем подбора более рафинированных ядерных моделей и способов учета релятивистских эффектов, так и на основе предположения о наличии внутри ядра-мишени шестикварковых примесей. Последнее не противоречит ряду других, появившихся недавно, экспериментальных данных и, в принципе, возможно по критерию передачи четырехскорости. Тем не менее окончательный вывод по данному вопросу можно будет сделать, когда появится более богатая, чем инклюзивные спектры, экспериментальная информация. В частности, следует считать перспективными в этой связи корреляционные эксперименты, в которых наряду с импульсными распределениями релятивистских частиц, испускаемых вперед, измеряются характеристики более медленных сопутствующих адронов, испускаемых в широком интервале углов в направлении назад по отношению к пучку первичных частиц.

В настоящее время создается, в том числе и в ОИЯИ, ряд экспериментальных установок, обладающих такого рода возможностями. С их помощью можно будет внести определенную ясность в затрагиваемую здесь проблему.

### *Литература*

1. Мещеряков М.Г. В кн.: Мультикварковые взаимодействия и квантовая хромодинамика. VI Международный семинар по проблемам физики высоких энергий. ОИЯИ, Д1,2-81-728, Дубна, 1981, с.260; ЖЭТФ, 1959, т.36, вып.6, с.1631; ЖЭТФ, 1958, т.34, вып.6, с.1357; ЖЭТФ, 1957, т.33, вып.5 (11), с.1185.
2. Балдин А.М. Краткие сообщения по физике. ФИАН, М., 1971, № 1, с.35; ОИЯИ, 1-84-185, Дубна, 1984.

# ПРОЯВЛЕНИЕ КРАТНЫХ НУКЛОН-НУКЛОННЫХ СОУДАРЕНИЙ В РАССЕЙАНИИ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ДЕЙТРОНОВ

*Л.С.АЖГИРЕЙ, доктор физико-математических наук*

В течение длительного времени описание атомных ядер только на языке составляющих их нуклонов являлось плодотворным и экономным способом объяснения их структуры, симметрий и взаимодействий. Применение для ядерных исследований частиц все более высоких энергий вынуждает нас, однако, выйти за рамки этой простой картины и учитывать возможность и других степеней свободы в ядрах. Это связано с тем, что, во-первых, увеличение передаваемого ядру импульса позволяет зондировать его пространственную структуру на расстояниях, сравнимых с размером нуклона (или даже меньше него); во-вторых, увеличение доступной энергии приводит к рождению и распространению в ядре новых частиц, таких, как пионы и нуклонные резонансы. Таким образом, ядерная физика постепенно эволюционирует от исследования проблемы многих нуклонов к исследованию новой области, где наряду со свойствами многоадронной системы должны учитываться и внутренние свойства каждого адрона. Понятно, что для изучения тонких эффектов, связанных с проявлением внутренних степеней свободы адронов в ядрах, необходимо иметь достаточно полное представление о ядре как многонуклонной системе; изучению этого аспекта и посвящены описываемые исследования.

По мере перехода от промежуточных энергий к высоким адрон-нуклонное рассеяние приобретает все более дифракционный характер. При этом угловые распределения рассеянных частиц характеризуются резко выраженным максимумом в направлении вперед. Поэтому при прохождении адрона через ядро вероятность его рассеяния на заданный угол более чем на одном нуклоне может стать сравнимой или даже большей, чем вероятность рассеяния на этот же угол только на одном нуклоне. Общая теория ядерных реакций в дифракционном приближении, учитывающая кратные адрон-нуклонные рассеяния, была разработана Глаубером<sup>/1/</sup> и Ситенко<sup>/2/</sup>.

Рассмотрим процесс квазиупругого (с развалом мишени) рассеяния простейших ядер-дейтронов на дейтронах. В рамках модели крат-



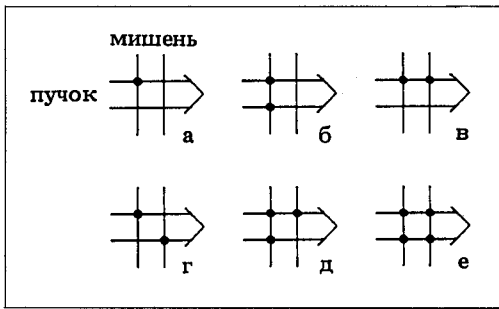


Рис.1. Схематическое представление процессов кратных нуклон-нуклонных соударений, приводящих к квазиупругому (с развалом дейтрона-мишени) дейтрон-дейтронному рассеянию.

ных нуклон-нуклонных соударений этот процесс схематически показан на рис.1. Линии представляют собой нуклоны, а черные кружки на пересечении линий — нуклон-нуклонные столкновения. Число черных кружков на каждой диаграмме характеризует кратность соударений — от единицы до четырех. Из рисунка видно, что в квазиупругом дейтрон-дейтронном рассеянии возможны двукратные нуклон-нуклонные столкновения разного типа: один из нуклонов налетающего дейтрона рассеивается последовательно на обоих нуклонах дейтрона мишени (рис.1в); оба налетающих нуклона рассеиваются на одном и том же нуклоне дейтрона мишени (рис.1б); оба налетающих нуклона одновременно рассеиваются на разных нуклонах дейтрона мишени (рис.1г).

Оказывается, что дейтроны, испытавшие квазиупругое рассеяние на дейтронах вследствие нуклон-нуклонных соударений разной кратности, имеют импульсные распределения с максимумами при различных значениях потери импульса. Так, если потерю импульса в рассеянии, обусловленном однократным столкновением (диаграмма а), обозначить через  $\Delta$ , то к такой же потере импульса приведет и диаграмма б; в случае трехкратных соударений (диаграмма д) потеря импульса составит  $5 \Delta/8$ , а диаграммам в, г и е будет соответствовать потеря импульса  $\Delta/2$ . Поэтому исследование высокоимпульсных частей спектров дейтронов, квазиупруго рассеянных на дейтронах на малые углы, представляет собой спектроскопию кратных нуклон-нуклонных перерассеяний.

Эксперименты по рассеянию релятивистских дейтронов на ядрах были выполнены в 1973-1975 гг. на синхрофазотроне ОИЯИ. Вторичные дейтроны, испущенные в результате дейтрон-ядерных взаимодействий, регистрировались под фиксированным углом  $103$  мрад с помощью одноплечевого магнитного спектрометра с проволочными камерами, работавшего на линии с ЭВМ.

Измеренные высокоимпульсные части спектров дейтронов от дейтрон-дейтронных столкновений при  $4,3$ ,  $6,3$  и  $8,9$  ГэВ/с показаны на рис.2 <sup>3/</sup>. Исследованные области импульсных потерь соответствуют упругому и квазиупругому рассеяниям. В случае рассеяния дейтронов с импульсом  $4,3$  ГэВ/с в спектре виден пик, на правом склоне

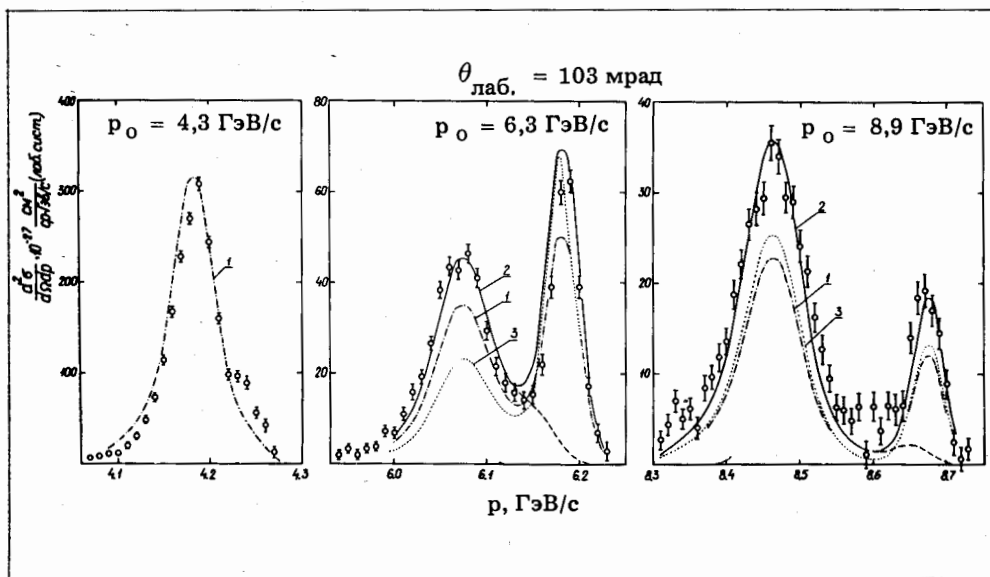


Рис.2. Импульсные спектры дейтронов, зарегистрированных под углом 103 мрад в дейтрон-дейтронных взаимодействиях при 4,3, 6,3 и 8,9 ГэВ/с. Цифры — варианты расчетов, выполненных в рамках модели многократного нуклон-нуклонного рассеяния, штриховые кривые — вычисленные вклады от квазиупругого рассеяния в области пиков, кинематически отвечающих упругому рассеянию дейтронов на дейтронах.

которого заметен прилив, указывающий на наличие второго слабого пика, положение которого соответствует примерно вдвое меньшей потере импульса налетающим дейтроном. При 6,3 и 8,9 ГэВ/с оба пика хорошо разделяются и становятся сравнимыми по величине. Во всех спектрах положение левых пиков кинематически соответствует квазиупругому рассеянию дейтронов на нуклонах, а положение пиков при больших значениях импульса — упругому рассеянию дейтронов на дейтронах.

Обнаруженная структура высокоимпульсных частей спектров упруго и квазиупруго рассеянных дейтронов анализировалась в рамках модели многократного рассеяния, в которой амплитуда дейтрон-дейтронного рассеяния выражается через амплитуды упругого нуклон-нуклонного рассеяния и волновую функцию дейтрона, без дополнительных свободных параметров. Варианты расчетов, отмеченные цифрами на рис.2, отличались значениями параметра наклона дифференциального сечения и отношения реальной и мнимой частей амплитуды нуклон-нуклонного рассеяния, варьировавшимися в пределах точности их экспериментального определения. Видно, что результаты расчетов без каких-либо дополнительных предположений качественно воспроизво-

дят основные особенности измеренных распределений дейтронов, и поэтому обнаруженную структуру естественно интерпретировать как проявление эффекта кратных нуклон-нуклонных соударений. Интересно отметить, что результаты расчетов довольно чувствительны как к значению параметра наклона дифференциального сечения упругого нуклон-нуклонного рассеяния (ср. варианты расчета 2 и 1), так и к значению отношения реальной и мнимой частей амплитуды упругого нуклон-нуклонного рассеяния (ср. варианты 2 и 3). Поэтому данные по дейтрон-дейтронным соударениям могут служить также новым источником информации о величине отношения реальной и мнимой частей амплитуды нуклон-нуклонного рассеяния, не зависящим от данных по интерференции кулоновского и ядерного рассеяний протонов.

Интересной особенностью, отличающей рассеяние дейтронов на дейтронах от протон-дейтронного рассеяния, в области передач импульсов  $0,6-1,5$  (ГэВ/с)<sup>2</sup> является то, что несмотря на рыхлую систему дейтрона при определенных условиях упругое рассеяние в случае бомбардировки дейтронов дейтронами оказывается относительно более вероятным, чем в случае бомбардировки дейтронов протонами. Это обусловлено возможностью реализации при дейтрон-дейтронном рассеянии двукратных соударений такого типа, когда оба налетающих на дейтрон нуклона одновременно рассеиваются каждый на одном из двух нуклонов мишени (диаграмма г на рис.1): такой механизм упругого рассеяния допускает возможность достаточно больших передач импульса обоим нуклонам дейтрона при слабом возмущении их внутриядерного относительного движения. Можно предположить, что существование кратных соударений такого типа должно приводить к обогащению верхних участков спектров дейтронов и при дейтрон-ядерном рассеянии (из-за рассеяния дейтронов на группах нуклонов внутри ядра).

Высокоимпульсные части спектров дейтронов от их рассеяния на углероде при значениях начальных импульсов  $6,3$  и  $8,9$  ГэВ/с приведены на рис.3<sup>4/</sup>; стрелками показаны значения импульсов, соответствующие кинематике упругих рассеяний дейтронов на ядрах водорода, дейтерия и углерода. Видно, что, действительно, максимумы этих спектров заметно сдвинуты к верхним границам спектров относительно положений пиков, соответствующих упругому дейтрон-протонному рассеянию. Штриховыми кривыми на рис.3 показаны результаты расчетов, выполненных в рамках модели многократного рассеяния в предположении, что выбиваемые из ядра налетающим дейтроном нуклоны никак не коррелированы и не взаимодействуют в конечном состоянии между собой. Видно, что имеется большое расхождение с экспериментальными данными, особенно в области малых потерь импульса.

Наблюдаемые импульсные распределения рассеянных дейтронов удается лучше воспроизвести на основе предположения, что часть нуклонов, выбитых дейтронами из ядра, вылетает в связанном состоянии

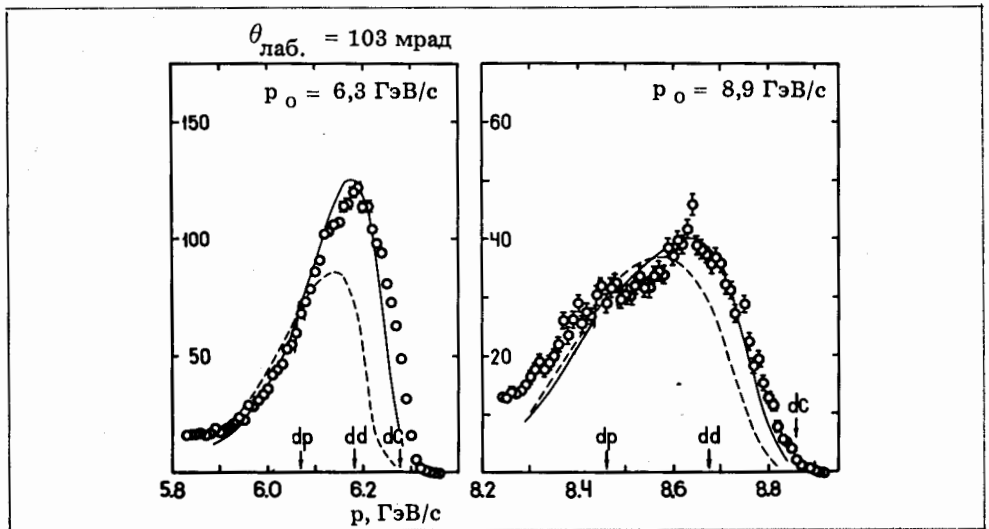


Рис.3. Спектры дейтронов, испущенных под углом 103 мрад в соударениях дейтронов с ядрами углерода при 6,3 и 8,9 ГэВ/с. Кривые — результаты расчетов в рамках модели многократного нуклон-нуклонного рассеяния без учета (штриховые) и с учетом (сплошные линии) предположения, что часть нуклонов, выбитых дейтронами из ядра, испускается в связанном состоянии.

в виде ядер дейтерия, трития и т.п.; этот вариант расчетов показан на рис.3 сплошными кривыми. Отметим, что описание экспериментальных данных в случае рассеяния дейтронов на более тяжелых ядрах (алюминия, висмута) является менее удовлетворительным, окончательная интерпретация этих результатов требует дальнейшего развития теоретических представлений о взаимодействии многонуклонных систем.

Таким образом, проведенные исследования показывают, что в ядерном рассеянии релятивистских дейтронов, при передачах импульса в области  $0,4-0,8 \text{ (ГэВ/с)}^2$ , ярко проявляются эффекты кратных нуклон-нуклонных соударений, причем определенные особенности этих соударений могут быть изучены только тогда, когда обе сталкивающиеся частицы являются сложными объектами.

### Литература

1. Glauber R.J. In: Lectures in Theoretical Physics. (Ed. by W.E.Brittin et al.). New York, 1959, vol.1, p.315.
2. Ситенко А.Г. Укр.физ.журн., 1959, т.4, № 2, с.152.
3. Azhgirey L.S. et al. Nucl.Phys., 1978, A305, p. 397.
4. Ажгирей Л.С. и др. ЯФ, 1979, т.30, вып.6 (12), с.1578.



Исследование свойств  
атомных ядер

## ПАРНЫЕ КОРРЕЛЯЦИИ СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО ТИПА И СТРУКТУРА СЛОЖНЫХ ЯДЕР

*В.Г.СОЛОВЬЕВ, профессор*

*И.Н.МИХАЙЛОВ, профессор*

Одной из центральных проблем современной физики является решение задачи многих тел. Мы вступили в такой этап исследований, когда нельзя ограничиваться приемами, сводящими теоретические рассмотрения к задаче двух тел. Необходимость изучения взаимодействия многих частиц выступает в ряде разделов физики. Самый яркий и богатый пример системы сильно взаимодействующих частиц — атомное ядро, являющееся хорошим объектом для изучения задачи многих тел. Оно не так велико, как конденсированная среда, где микроструктура "замазана". Структура ядра более сложна, чем структура атома, у которого основной источник силы сконцентрирован в центре. Изучение строения атомного ядра и механизмов ядерных реакций имеет принципиальный научный интерес. Это связано, во-первых, с исключительно важной ролью атомных ядер в природе и, во-вторых, с тем, что изучение системы сильно взаимодействующих частиц, какой является атомное ядро, дает более полную информацию о свойствах частиц и системы по сравнению с изучением элементарного акта взаимодействия двух частиц.

Развитие микроскопической теории началось после построения теории парных корреляций сверхпроводящего типа в атомных ядрах. Определяющее значение для развития микроскопической теории имеют математические методы, развитые Н.Н.Боголюбовым в 1946 году при построении теории сверхтекучести. Большую роль в развитии этого направления сыграли работы Дж.Бардина, Л.Купера, Дж.Шриффера и Н.Н.Боголюбова по теории сверхпроводимости и работы Л.Ландау по теории ферми-жидкости.

Н.Н.Боголюбов указал на то, что математические методы, развитые при построении теорий сверхтекучести и сверхпроводимости, обладают большой общностью, поэтому их следует применить для изуче-

ния строения атомного ядра. Н.Н.Боголюбов сформулировал условия сверхтекучести ядерной материи. О.Бор, Б.Моттelson и Д.Пайс поставили вопрос о существовании сверхтекучих состояний в атомных ядрах. Теория парных корреляций сверхпроводящего типа в атомных ядрах, построенная независимо С.Т.Беляевым и В.Г.Соловьевым, положила начало широкому изучению ядерной структуры, в том числе вибрационных состояний на основе микроскопического подхода.

Теория парных корреляций явилась тем основным направлением в развитии теории атомного ядра, которое привело в конечном итоге к созданию крупного коллектива физиков-ядерщиков. Развитие нового направления — сверхтекучей модели ядра — потребовало известной смелости, настойчивости и большого труда. В первое время было широко распространено мнение, что в рамках сверхтекучей модели ядра не может быть речи об описании свойств конкретных ядер. В отделе теории ядра одними из первых в мире применили сверхтекучую модель ядра для выполнения количественных расчетов ядерных характеристик. Учет парных корреляций позволил детально описать ряд свойств ядер, которые не укладывались в рамки ранее существовавших моделей. Так, результаты, относящиеся к двухквaziчастичным состояниям в четно-четных деформированных ядрах при сравнительно небольших энергиях возбуждения, полученные в 1960-1963 годах (В.Г.Соловьев, Т.Шиклош и др.), нашли блестящее экспериментальное подтверждение и в настоящее время хорошо известны.

Большое влияние на дальнейшее развитие теории, особенно в описании высокоспиновых состояний, сыграло введение эффекта блокировки. А описание усиления  $\alpha$ -распада вследствие учета парных корреляций (В.Г.Соловьев) послужило основой для введения О.Бором парно-вибрационной моды коллективного движения. Важную роль сыграли работы по проверке точности приближенных методов и усовершенствованию сверхтекучей модели ядра (И.Н.Михайлов, В.Рыбарска, А.Павликовски).

Коллективное движение в системах со спариванием приобретает черты безвихревого движения идеальной жидкости. Уже первые эксперименты, в которых удалось зарегистрировать ядерные ротационные полосы, показали, что моменты инерции ядер существенно меньше, чем у твердого тела с эквивалентным распределением массы. Количественный теоретический анализ ротационных характеристик ядер оказался возможным только на основе теории спаривания.

Большую роль в теории атомного ядра играет вариационный принцип Хартри — Фока — Боголюбова. Он служит основой микроскопического описания коллективных вибрационных состояний как низколежащих, так и гигантских резонансов, а также взаимодействия между сложными ядрами. Разработана общая теория (В.Г.Соловьев, Р.В.Джолос) ядерных вибраций на основе метода самосогласованного поля Н.Н.Боголюбова. Показано, что из уравнений метода самосогласо-

ванного поля в качестве частного случая вытекают уравнения теории конечных ферми-систем.

Трактовка ядерного ротационного движения и спаривания основана на методах, в которых законы сохранения углового момента и числа нуклонов выполняются в среднем. Математическую основу методов, использующих нарушения законов сохранения, заложил Н.Н.Боголюбов в работе "Квазисредние в задачах статистической механики".

Большое влияние на проведение экспериментальных исследований оказали работы В.Г.Соловьева, А.Собичевского, В.В.Пашкевича по вычислению равновесных деформаций ядер, изучению изомеров формы и предсказаниям новых областей деформированных ядер. На основании расчетов была предсказана новая область деформированных ядер в районе  $A \sim 100$ . В 1970 году появилось экспериментальное подтверждение существования этой области деформированных ядер с параметрами, близкими к расчетным. Идея о возможности изменения формы ядра в возбужденном состоянии по сравнению с основным (В.Г.Соловьев) нашла широкое экспериментальное подтверждение. Резкая зависимость моментов инерции от деформации, характерная для потенциального движения идеальной жидкости, создает условия для изменения формы ядра при увеличении спина, которое может быть замечено уже в спектре нижайших ротационных состояний некоторых достаточно "мягких" ядер (В.В.Пашкевич, С.Фраундорф). Расчеты показали возможность сосуществования сферической и деформированной формы у ядер ртути, что было подтверждено экспериментальными данными.

Важным достижением является микроскопическое описание низколежащих вибрационных состояний в четно-четных деформированных ядрах (В.Г.Соловьев, Л.А.Малов, С.И.Федотов). Микроскопическое описание позволило связать положение и структуру вибрационных состояний с поведением одночастичных уровней среднего поля и двухквазичастичными состояниями. На основе метода приближенного вторичного квантования изучены однофононные квадрупольные и октупольные состояния деформированных ядер в области редких земель и актиноидов. В результате этих расчетов получили объяснение такие до этого непонятные факты, как весьма сильное уменьшение значений энергии октупольных состояний в изотопах тория, урана и плутония и энергии  $\gamma$ -вибрационных состояний ниже уровня  $\beta$ -вибрационных в изотопах диспрозия и эрбия.

Развит математический аппарат взаимодействия квазичастиц с фононами, и получено достаточно правильное описание неротационных состояний нечетных деформированных ядер (В.Г.Соловьев, Л.А.Малов, С.И.Федотов).

В системах с парными корреляциями нижайшие коллективные состояния находятся ниже двухквазичастичных состояний. В ядрах, не очень удаленных от магических, нижайшие коллективные возбужде-



ния квадрупольной симметрии оказываются слабо связанными с возбуждениями квазичастичной природы. Однако эти коллективные возбуждения только в редких случаях проявляются как гармонические колебания. Ангармонические эффекты в спектре коллективных возбуждений удается учесть, отказываясь от рассмотрения связи коллективных и квазичастичных степеней свободы. Несмотря на схематичность такого рассмотрения оно оказалось очень полезным для понимания условий возникновения в ядрах квадрупольной деформации. Исследования в этом направлении (Р.В.Джолос, Д.Янссен) легли в основу модели взаимодействующих бозонов, широко используемую в настоящее время для анализа структуры ядер, в особенности ядер переходной области между сферическими и деформированными.

В работах по микроскопической теории невибрационных состояний (И.Н.Михайлов, Е.Наджаков) была построена схема описания ядерных ротационных полос, которая, по оценке видного американского физика А.Кляйна, является одним из наиболее строгих обоснований обобщенной теории Бора и Моттельсона. Исследования структуры высокоспиновых состояний (В.В.Пашкевич, С.Фрауендорф, И.Н.Михайлов, С.Цвек) привели к выяснению многих качественных изменений в свойствах ядер по мере увеличения момента (выстраивание внутренних угловых моментов и связанное с ним изменение правил ветвления переходов, перестройка вибрационного спектра и др.).

Важную роль для проведения количественных расчетов имеет разработка метода восстановления симметрии гамильтониана при спонтанно нарушенной симметрии самосогласованного поля (Н.И.Пятов, С.Габраков). Этот метод успешно применяется для параметризации остаточных сил взаимодействия между нуклонами при изучении структуры ядер при больших спинах.

С ростом энергии возбуждения увеличивается плотность уровней в атомных ядрах и усложняется их структура. Осуществляется переход от простых низколежащих состояний к очень сложным состояниям при средних и высоких энергиях возбуждения. Практически невозможно измерить и описать характеристики каждого из многих тысяч уровней, волновые функции которых содержат большое число компонент. Поэтому задача состоит в выяснении закономерностей усложнения структуры состояний с ростом энергии возбуждения. Первым шагом в решении этой задачи является изучение фрагментации одноквазичастичных, двухквазичастичных и однофононных состояний. Для описания характеристик ядер, определяемых фрагментацией этих состояний, была сформулирована квазичастично-фононная модель ядра (КФМЯ) (В.Г.Соловьев). Особенности и преимущества КФМЯ следующие: 1) использование в качестве базиса не одночастичных (как обычно), а однофононных состояний; 2) ответственность взаимодействия квазичастиц с фононами за фрагментацию квазичастичного и коллективного движения и тем самым за усложнение структуры ядерных состояний

с ростом энергии возбуждения; 3) представление волновых функций возбужденных состояний в виде ряда по числу операторов фононов; 4) использование метода силовых функций, благодаря которому стало возможным вычисление различных характеристик многих ядер.

В рамках КФМЯ в сферических и деформированных ядрах рассчитаны фрагментация одно- и двухквазичастичных состояний; нейтронные  $s$ -,  $p$ - и  $d$ -силовые функции, включая спиновое расщепление; радиационные силовые функции и сечения фотопоглощения; положение и ширины гигантских электрических и магнитных резонансов, включая зарядово-обменные резонансы (В.Г.Соловьев, Ч.Стоянов, Л.А.Малов, А.И.Вдовин, В.В.Воронов, Д.Дамбасурен, Чан Зуи Кхыонг, В.Ю.Пономарев и др.).

Широкий фронт и высокий технический уровень экспериментальных исследований требуют дальнейшего развития теории атомного ядра.

# МЮОННЫЙ КАТАЛИЗ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ СИНТЕЗА

*В.П.ДЖЕЛЕПОВ, член-корреспондент АН СССР*

*Л.И.ПОНОМАРЕВ, доктор физико-математических наук*

Сущность явления мюонного катализа заключается в том, что отрицательно заряженный мюон  $\mu^-$ , образуя с ядрами изотопов водорода мезомолекулу, сближает их настолько, что они практически мгновенно сливаются в ядро гелия. Впервые такую реакцию, а именно катализ реакции слияния ядер водорода и дейтерия



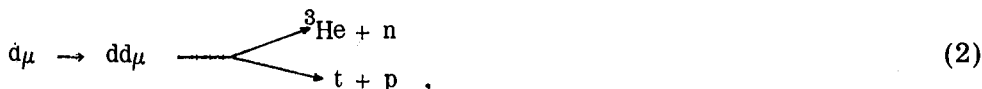
наблюдал в пузырьковой камере Л.Альварец с сотрудниками в 1957 г. За этим последовал короткий период энтузиазма, который питался надеждами использовать эту реакцию, известную как "холодный термояд", для производства ядерной энергии взамен термоядерных реакций, идущих при температурах в несколько миллионов градусов. Однако эксперименты, выполненные в 1957-1962 гг., показали, что мюонный катализ в дейтерии и смеси водорода и дейтерия неэффективен, поскольку скорость образования мезомолекул  $pd\mu$  и  $dd\mu$  сравнима со скоростью распада  $\mu^-$ -мезона. А это означало, что в среднем за время жизни мюона он может осуществить не более одного акта катализа, а этого явно недостаточно для покрытия затрат энергии на рождение  $\mu^-$ -мезона.

В ОИЯИ детальное экспериментальное изучение явления мюонного катализа было начато после 1960 г. группой физиков под руководством В.П.Джелепова (П.Ф.Ермолов, В.И.Москалев, В.В.Фильченков и др.). Для этой цели в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ была создана новая методика измерения характеристик исследуемого явления. Теоретическое изучение этого явления началось еще раньше: в 1954 г. Я.Б.Зельдович опубликовал первые оценки скоростей образования мезомолекул, а С.С.Герштейн в цикле работ, выполненных

в 1957-1962 гг. в ЛТФ ОИЯИ, заложил основы методов, используемых и поныне для описания процессов мюонного катализа.

С самого начала задача экспериментальных и теоретических исследований формулировалась шире, чем выяснение вопроса о практической значимости явления  $\mu$ -катализа: было запланировано всестороннее изучение многочисленных мезоатомных и мезомолекулярных процессов, которые лишь в совокупности дают полное представление о явлении  $\mu$ -катализа.

В 1962-1966 гг. экспериментаторы ЛЯП ОИЯИ, изучая  $\mu$ -катализ в чистом дейтерии:



установили, что скорость  $\lambda_{dd\mu}$  образования мезомолекул  $dd\mu$  при температуре 240 К примерно в десять раз превышает значения  $\lambda_{dd\mu}$ , измеренные физиками США и Англии в 1960 г. и 1963 г. соответственно при температуре 20 К. Это было неожиданно, поскольку характерные мезоатомные энергии ( $\sim 5$  кэВ) более чем в сто тысяч раз превышают тепловые энергии мезоатомов ( $\sim 0,03$  эВ).

Качественное объяснение этого эксперимента в 1967 г. дал Э.А.Весман (ЛТФ ОИЯИ). Он предположил, что обнаруженное резкое различие  $\lambda_{dd\mu}$  при указанных температурах может быть объяснено резонансным механизмом образования мезомолекул  $dd\mu$  по схеме



с образованием возбужденного мезомолекулярного комплекса, одним из ядер которого становится образовавшаяся мезомолекула  $dd\mu$ , или, точнее — мезомолекулярный ион  $(dd\mu)^+$ .

Для реализации указанного механизма необходимо, однако, чтобы мезомолекула  $dd\mu$  могла существовать в слабосвязанном вращательно-колебательном состоянии  $J = v = 1$  с энергией связи  $|\epsilon_{11}(dd\mu)| \approx 2$  эВ. Доказательство существования этого состояния  $dd\mu$ -молекулы было получено только в 1973 г. в расчетах Л.И.Пономарева (ЛТФ ОИЯИ) и И.В.Пузынина и Т.П.Пузыниной (ЛВТА ОИЯИ), хотя предположение о его существовании было высказано еще в 1957 г. С.С.Герштейном.

Вслед за этими расчетами была предпринята новая серия экспериментов в ЛЯП ОИЯИ. В 1974 г. группа экспериментаторов в составе В.М.Быстрицкого, В.П.Джелепова, В.В.Фильченкова и др. измерила скорость образования  $dd\mu$ -молекул в газовой мишени высокого давления при комнатной температуре (300 К) и подтвердила значение  $\lambda_{dd\mu}$ , полученное в 1966 г. в диффузионной камере.

Параллельно с этим теоретики ОИЯИ (С.И.Виницкий, Л.И.Пономарев, Л.Н.Сомов, М.П.Файфман и др.) в содружестве с математиками

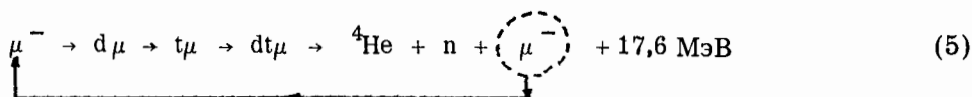
(И.В.Пузынин, Т.П.Пузынина, Н.Ф.Трускова) развивали численные методы прецизионного решения задачи трех тел, с помощью которых в 1977 г. энергия слабосвязанного состояния  $dd\mu$ -молекулы была найдена с точностью  $\sim 0,1$  эВ и выполнен первый количественный расчет скорости  $\lambda_{dd\mu}$  резонансного образования мезомолекул  $dd\mu$ .

Одновременно с этими расчетами в ЛЯП ОИЯИ (В.М.Быстрицкий, В.П.Джелепов, В.И.Петрухин, Л.Н.Сомов, В.М.Суворов, В.В.Фильченков и др.) была измерена температурная зависимость  $\lambda_{dd\mu}(T)$  в широком интервале температур, которая хорошо согласовывалась с формой теоретической зависимости для  $\lambda_{dd\mu}(T)$ . Тем самым было твердо установлено существование резонансного механизма образования мезомолекул  $dd\mu$ .

В теоретических расчетах 1977 г., выполненных в ОИЯИ, было, кроме того, обнаружено слабосвязанное состояние мезомолекулы  $dt\mu$  с квантовыми числами  $J = v = 1$  и энергией связи  $|\epsilon_{11}(dt\mu)| \approx 1$  эВ. На основе этих расчетов была предсказана большая скорость ( $\lambda_{dt\mu} \gtrsim 10^8 \text{ с}^{-1}$ ) резонансного образования мезомолекул  $dt\mu$  в реакции



и сделан вывод о том, что в смеси дейтерия и трития один  $\mu^-$ -мезон может катализировать  $\sim 100$  реакций синтеза по схеме



и освободить  $\sim 2$  ГэВ энергии и  $\sim 100$  нейтронов.

Этот теоретический вывод инициировал большое число экспериментальных и теоретических работ как в Советском Союзе, так и в других странах, поскольку он возродил надежды использовать явление мюонного катализа для производства ядерной энергии.

Первое экспериментальное подтверждение большой скорости  $\lambda_{dt\mu}$  образования мезомолекул  $dt\mu$ , найденной в теоретических расчетах, было получено в 1979 г. группой экспериментаторов ЛЯП (В.М.Быстрицкий, Л.Н.Сомов, В.В.Фильченков и др.) под руководством В.П.Джелепова и В.Г.Зинова в содружестве с учеными ВНИИИМ (Москва). В этих опытах впервые в мире была зарегистрирована последовательность реакций мюонного катализа (5) в смеси дейтерия и трития и намечены пути его дальнейшего изучения.

Теоретические расчеты, выполненные в последовавшее за этим пятилетие (1979-1984 гг.) группой теоретиков и математиков ОИЯИ (С.И.Виницкий, В.С.Мележик, Л.И.Пономарев, И.В.Пузынин, Т.П.Пузынина, М.П.Файфман и др.), позволили вычислить энергии слабосвя-

занных состояний с точностью  $\sim 0,001$  эВ, то есть с относительной точностью  $\sim 10^{-6}$ . Эти рекордные по точности расчеты позволяют дать полное количественное описание явления мюонного катализа. В работы этого цикла внесли весомый вклад ученые из НРБ Д.Бакалов и М.Касчиев.

Экспериментальные и теоретические работы по  $\mu$ -катализу, выполненные в Дубне, инициировали исследования в этой области во всем мире; в настоящее время явление мюонного катализа изучают в институтах США, Швейцарии, Канады, Франции, Японии и т.д. Этой проблеме были посвящены секция на III Международной конференции по нетрадиционным источникам энергии (Хельсинки, 7-9 июня 1983 г.) и специальный симпозиум по мюонному катализу (Джексон, Вайоминг, США, 8-9 июня 1984 г.).

Ряд экспериментальных результатов получен в 1983-1984 гг. группой физиков из ЛИЯФ им.Б.П.Константинова АН СССР под руководством А.А.Воробьева. В ОИЯИ группа экспериментаторов из ЛВЭ под руководством М.И.Соловьева начала исследования рождения  $\pi^-$ -мезонов на пучке дейтронов с энергией  $\sim 2$  ГэВ, которые необходимы для определения затрат на производство  $\mu^-$ -мезонов.

История изучения явления мюонного катализа в ОИЯИ может служить примером многолетнего плодотворного сотрудничества теоретиков и экспериментаторов. Кроме того, на этом примере хорошо видно, как фундаментальные исследования в области физики элементарных частиц со временем могут стать основой поисковых работ по практическому использованию обнаруженного явления.

## ЯДЕРНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ НА ПУЧКЕ ПРОТОНОВ

*К.Я. ГРОМОВ, профессор*

*Г. ЛИЗУРЕЙ, доктор физико-математических наук*

Одним из фундаментальных результатов ядерной физики стало установление того факта, что большинство атомных ядер представляют собой системы из многих сильно взаимодействующих частиц-нуклонов, не поддающиеся точному теоретическому расчету. Теоретический анализ данных о свойствах ядер обычно проводится на основе ряда ядерных моделей, описывающих выбранные свойства отдельных групп ядер<sup>/1/</sup>. В этих условиях особенно важно получить новые, все более полные и точные экспериментальные данные о возможно большем числе атомных ядер разного сорта. На решение этой задачи направлены развиваемые в ряде научных центров мира программы исследования ядер, удаленных от полосы  $\beta$ -стабильности. Сейчас известно и более или менее изучено около 2,5 тысяч разных изотопов. Оценки по формулам для масс ядер показывают, что может существовать до 7-8 тысяч изотопов, устойчивых по отношению к мгновенному, за ядерное время, испусканию нуклона; таким образом, поле исследований очень велико. Удаление от стабильных ядер открывает возможность для изучения явлений, невозможных вблизи полосы стабильности, — таких, как испускание частиц, задержанное  $\beta$ -распадом, радиоактивный распад с испусканием протонов и др.

Практически первой в мире широкой программой исследования ядер, удаленных от полосы  $\beta$ -стабильности, стали проводившиеся в 1956-1968 гг. в ЛЯП ОИЯИ под руководством члена-корреспондента АН СССР Б.С. Дзелепова исследования нейтронодефицитных изотопов редкоземельных элементов. С самого начала для этих работ было характерно широкое международное сотрудничество. На карте (рис.1) показаны города, куда рассылались для исследований нейтронодефицитные изотопы, полученные при облучении мишеней из разных веществ протонами с энергией  $\sim 660$  МэВ на синхротроне ОИЯИ. В этом цикле работ было убедительно доказано<sup>/2/</sup>, что реакции глу-

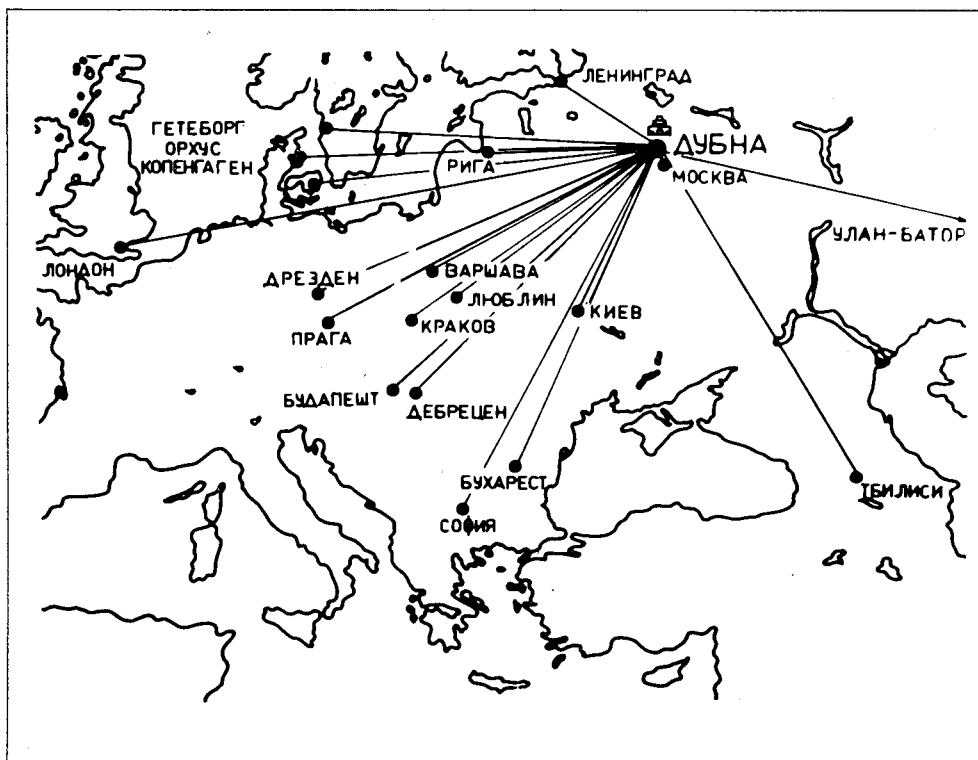


Рис.1. Карта рассылки нейтронодефицитных изотопов из ЛЯП ОИЯИ в 1956-1970 гг. Изотопы получали при облучении мишеней на синхротроне ОИЯИ.

бокого расщепления типа  $p$ ,  $xr$ ,  $up$  являются наиболее эффективным и универсальным методом получения удаленных от стабильных нейтронодефицитных изотопов. Это обстоятельство было впоследствии широко использовано при проектировании и развитии программ исследований удаленных от полосы  $\beta$ -стабильности ядер на ускорителях протонов средних энергий в ряде научных центров мира. В 70-е годы это утверждение было расширено и на нейтроноизбыточные изотопы: группой ISOLDE в Европейской организации по ядерным исследованиям показано, что реакции глубокого расщепления и высокоэнергетического деления на протонах средних энергий являются наиболее мощным источником получения удаленных нейтроноизбыточных изотопов.

Для исследования спектров ядерных излучений в ЛЯП ОИЯИ и сотрудничающих организациях использовался широкий набор спектрометров разного типа. Среди них — магнитные  $\beta$ -спектрометры и спектрографы высокого разрешения, большой магнитный  $\alpha$ -спектрограф,  $\gamma$ -спектрометры со сцинтилляционными и полупроводниковыми детекторами, установки для измерения времен жизни возбужденных



состояний и изучения угловых  $\gamma\gamma$ - и  $e\gamma$ -корреляций, полупроводниковые  $\beta$ -спектрометры, светосильные безжелезные  $\beta$ -спектрометры с тороидальным полем, установка для исследования угловых распределений  $\gamma$ -излучения от ядер, ориентированных при сверхнизких температурах и др.

В 1969 году в ЛЯП ОИЯИ был построен электромагнитный масс-сепаратор, и впервые в странах социалистического содружества начато разделение значительных количеств радиоактивных изотопов. Эти работы пошли особенно успешно в связи с созданием оригинального высокоэффективного трубчатого источника ионов с поверхностной ионизацией.

Эксперименты 1956-1969 гг. проводились в режиме офф-лайн, то есть мишени облучались на внутреннем протонном пучке ускорителя, из облученной мишени методами "мокрой" химии выделялись фракции изотопов исследуемого химического элемента, из которых готовились источники для спектрометров ядерного излучения. В этих экспериментах для исследований были доступны изотопы с периодами полураспада  $\sim 30$  мин и более. Описание методики этих работ дано в статье <sup>/2/</sup>. Новый этап начался в 1967-1969 гг., когда в ОИЯИ были начаты исследования по программе ЯСНАПП (ядерная спектроскопия на пучке протонов). Для изучения короткоживущих изотопов по этой программе был создан сепаратор изотопов, к ионному источнику которого с помощью пневмопочты передавалась мишень, облученная на выведенном пучке протонов, и, таким образом, обеспечивалась возможность исследования изотопов с периодами полураспада до 1-2 мин <sup>/3,4/</sup>.

Результаты исследований докладывались на многих международных и национальных конференциях, опубликованы в десятках статей. Обзор полученных результатов сделан в работах <sup>/2-4/</sup>. Не останавливаясь здесь на подробном обзоре полученных результатов, отметим и проиллюстрируем только некоторые. Открыто более 100 новых радиоактивных изотопов с периодами полураспада от нескольких дней до нескольких минут. Это число следует сравнить с примерно 700-800 изотопами, открытыми за тот же период во всем мире. Получен большой объем новых данных о схемах распада ядер, в первую очередь об интересной области деформированных ядер редкоземельной области с атомным весом  $150 \div 190$ . Новые данные об энергиях, спинах, четности возбужденных состояний, вероятностях электромагнитных и  $\beta$ -переходов между ними позволили построить десятки схем распада, содержащих ротационные уровни, уровни  $\beta$ - и  $\gamma$ -колебаний, одно-, двух-, трех- и четырехквaziчастичные уровни, провести анализ их структуры. Приведем два примера полученной информации.

На рис.2 систематизированы полученные сведения об одночастичных протонных состояниях в нечетных изотопах тулия <sup>/4/</sup>. Хорошо видно систематическое изменение энергии одноквaziчастичных состояний по мере увеличения числа пар нейтронов в остове ядра. При срав-

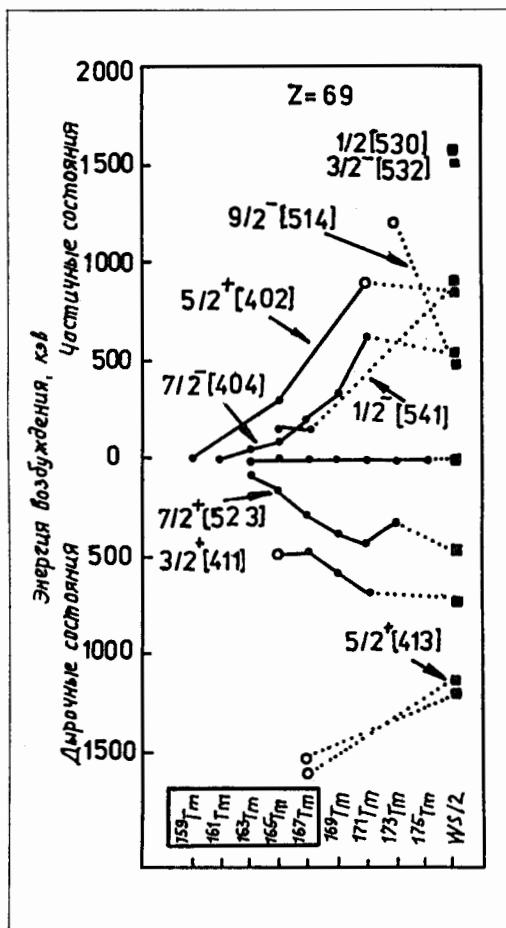


Рис.2. Систематика энергий одноква- зичастичных уровней в ядрах тулия ( $Z = 69$ ) с нечетным  $A$ . ● — досто- верно, ○ — предположительно уста- новленные состояния, ■ — одноква- зичастичные энергии среднего поля, рас- считанные по сверхтекучей модели ядра.

нении этих экспериментальных данных с расчетами по ква- зичастично-фононной модели <sup>1/1</sup> обнаруживается хорошее согла- сие как по тенденции измене- ния энергии уровней, так и в пределах точности модели по величине энергии уровней.

На рис.3 представлена схема распада открытого в этих ис- следованиях ядра <sup>162</sup>Tm. Чет- ко проявляются ротационные полосы основного состояния,  $\gamma$ (900 кэВ)- и  $\beta$ (1087 кэВ)- вибрационных состояний. Со- стояния 1352, 1505, 1572 и 1595 кэВ, вероятно, двухква- зичастичные. Представляет интерес выяснение природы второго  $0^+$ - состояния (1420 кэВ).

Получен большой объем новой экспериментальной информации о свойствах возбужденных состояний ядер: времена жизни уровней, вероятности  $\alpha$ -,  $\beta$ - и  $\gamma$ -переходов между ними. Анализ этих сведе- ний потребовал в ряде случаев уточнения параметров теории.

С начала 70-х годов ядерные спектроскописты ЛЯП ОИЯИ прини- мали участие в разработке некоторых узлов экспериментального комп- лекса ИРИС для исследования ядер, удаленных от полосы стабильности, в Ленинградском институте ядерной физики АН СССР, а с момента его пуска в 1975 году — в экспериментальных исследованиях на нем. Был создан экспериментальный комплекс, в котором облучаемая протонами с  $E_p = 1$  ГэВ мишень совмещена в один узел с ионным ис- точником, и, таким образом, впервые в социалистических странах были созданы условия для изучения короткоживущих ядер с периодами по- лураспада до 0,1 с.

Отметим некоторые результаты этого сотрудничества. Открыто 20 новых изотопов с  $T_{1/2}$  до долей секунды. На основе измерений

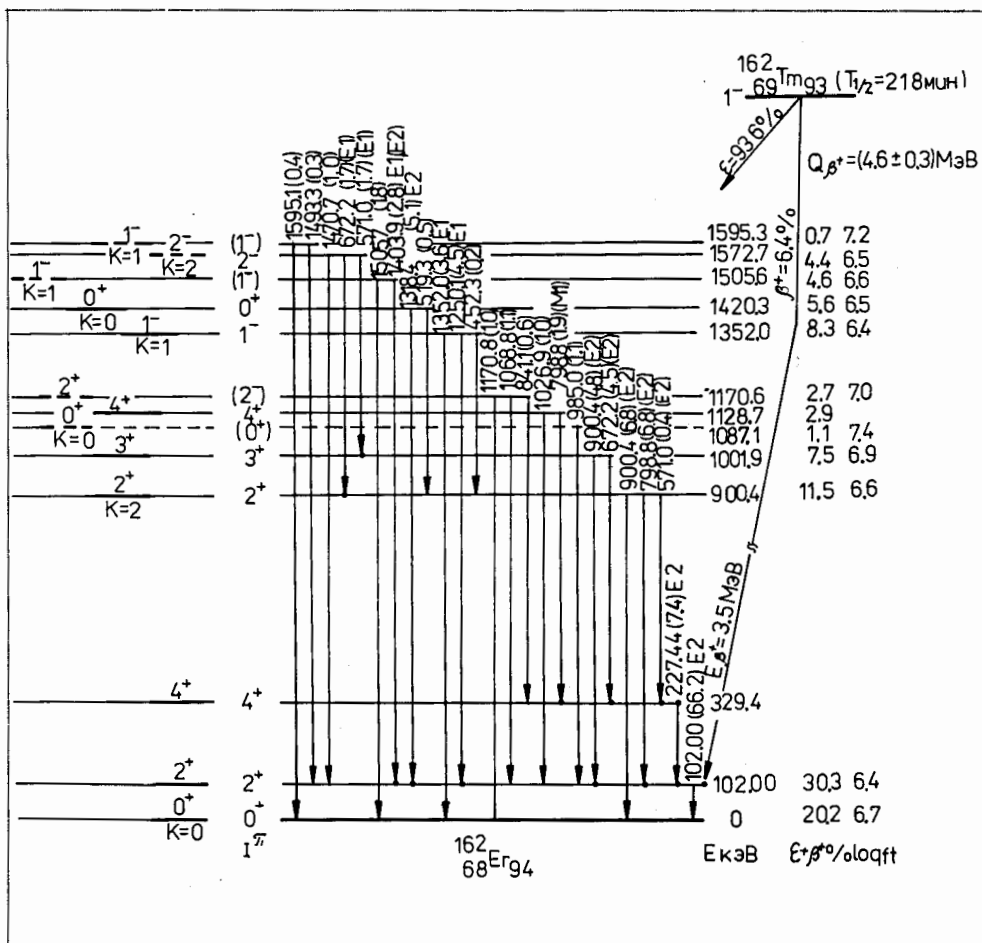


Рис.3. Схема распада ядра  $^{162}\text{Tm}$ .

энергии  $\alpha$ -распада и граничных энергий  $\beta^+$ -спектров впервые получены экспериментальные данные о массах более 40 короткоживущих ядер, в том числе ядер, расположенных у границы области, где происходит радиоактивный протонный распад. Данные о массах ядер позволили определить энергию связи протона в ряде ядер и установить, что открытые ранее изотопы —  $\alpha$ -распадчики (рис.4) — являются одновременно протонно-радиоактивными  $^{5/}$ . Впервые определено положение протяженного участка границы протонной устойчивости ядер. Она проходит в этой области карты изотопов через ядра  $^{178}\text{Au}$ ,  $^{172}\text{Ir}$ ,  $^{167}\text{Re}$ ,  $^{161}\text{Ta}$ ,  $^{156}\text{Lu}$  и  $^{151}\text{Tm}$ .

В ходе методических разработок, обеспечивших успех ядерно-спектроскопических исследований в ЛЯП ОИЯИ, были получены ре-

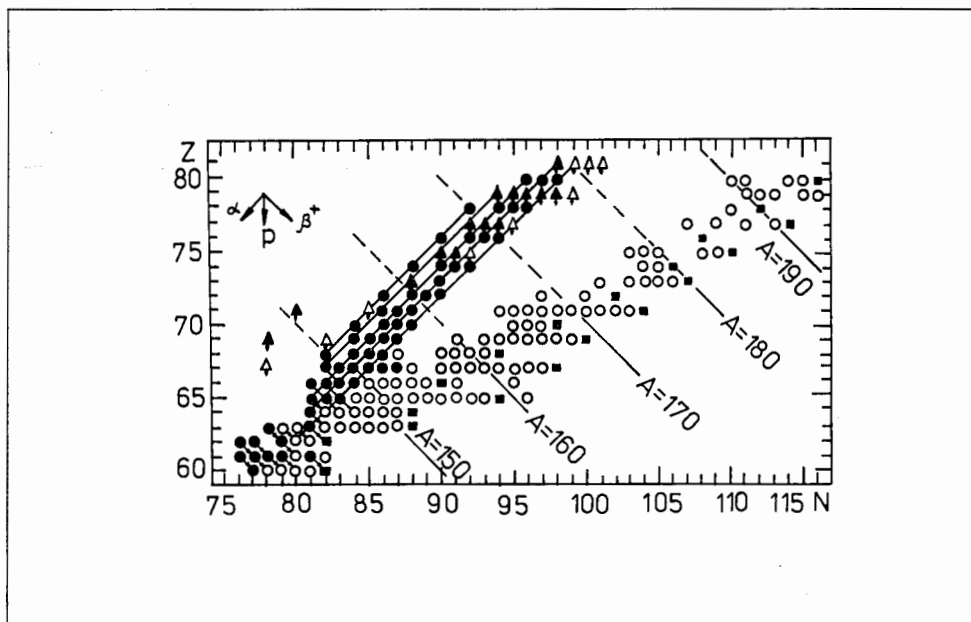


Рис.4. Фрагмент диаграммы нуклидов: ● — ядра, массы которых определены на экспериментальном комплексе ИРИС; ○ — ядра с ранее известными массами; ■ — стабильные ядра; ▲ — ядра, протонный распад которых установлен надежно; △ — предположительно (энергия связи протона близка к нулю).

зультаты, имеющие самостоятельное фундаментальное и прикладное значение. Отметим среди них следующие:

- исследования в области химии редкоземельных элементов <sup>/6/</sup> и астата;
- разработка методов получения редких радиоизотопов для медицинских и других целей;
- разработка методик изготовления полупроводниковых детекторов ядерного излучения <sup>/7/</sup>;
- разработка методов прецизионной спектроскопии ядерных излучений с помощью полупроводниковых детекторов <sup>/7/</sup>;
- издание атласа спектров ядерных излучений <sup>/8/</sup>.

В настоящее время в ЛЯП ОИЯИ создается новый крупный экспериментальный комплекс для исследования ядер, удаленных от полосы стабильности, — ЯСНАПП-2. Будут обеспечены условия для получения и исследования ядер с  $T_{1/2}$  до 0,1 с с использованием в режиме он-лайн интенсивного протонного пучка фазотрона ОИЯИ. Создание комплекса ЯСНАПП-2 откроет для ученых стран-участниц ОИЯИ новые возможности для исследований в этой интересной области ядерной физики.

## *Литература*

1. Соловьев В.Г. Теория атомного ядра. Ядерные модели. Энергоиздат, М., 1981.
2. Громов К.Я., Джелепов Б.С. АЭ, 1969, т.26, с.362.
3. Арльт Р. и др. ЭЧАЯ, 1974, т.5, с.843.
4. Громов К.Я. и др. ЭЧАЯ, 1975, т.6, с.971.
5. Алхазов Г.Д. и др. Изв. АН СССР, сер.физ., 1984, т.48, с.834.
6. Молнар Ф., Халкин В.А., Херрманн Э. ЭЧАЯ, 1973, т.4, с.1077.
7. Вылов Ц. и др. Спектры излучения радиоактивных нуклидов. "Фан", Ташкент, 1980.
8. Vylov Ts. et al. ZfK-399, 1980; ZfK-505, 1983, Rossendorf, DDR.



# Статистическая механика

## СТАТИСТИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА В ОИЯИ

*Н. ТОНЧЕВ, кандидат физико-математических наук*

*А. С. ШУМОВСКИЙ, доктор физико-математических наук*

В 1946 г. на собрании Отделения физико-математических наук АН СССР Н.Н.Боголюбов выступил с докладом, в котором впервые было дано объяснение явления сверхтекучести на микроскопическом уровне <sup>1/</sup>.

При разработке теории этого явления Н.Н.Боголюбовым были использованы два сравнительно простых с математической точки зрения приема. Это упрощение гамильтониана системы (переход к так называемому модельному гамильтониану, в котором осуществлен "сдвиг на константу" волновой функции) и решение задачи о вычислении статистической суммы путем специфического преобразования переменных <sup>1,2/</sup>. Предложенные методы оказались весьма удобными для физического понимания явления сверхтекучести.

Дальнейшее развитие статистической механики показало необычайную плодотворность идей, выдвинутых Н.Н.Боголюбовым в связи с построением микроскопической теории сверхтекучести. Через десять лет представления о сверхтекучести системы из связанных пар электронов легли в основу микроскопической теории сверхпроводимости <sup>3,5/</sup>. При этом также широко были использованы математические методы, связанные с введением модельных гамильтонианов и каноническим преобразованием Боголюбова.

Эти работы по сверхпроводимости <sup>3-5/</sup> явились первыми исследованиями в области статистической механики, выполненными в ОИЯИ. Выдвинутые в этих работах идеи и развитые в них методы во многом определили пути дальнейшего развития статистической механики в ОИЯИ и оказали заметное воздействие на другие области физики. Так, идея о спаривании сверхпроводящего типа в системе нуклонов <sup>6/</sup> легла в основу современной теории ядра <sup>7/</sup>, а вариационный принцип Хартри — Фока — Боголюбова <sup>8,9/</sup> стал ее важным методом. Модельные задачи сверхпроводящего типа нашли свое применение также в квантовой теории поля <sup>10/</sup>.

В 1958 г. Н.Н.Боголюбов за работы по развитию нового метода, приведшего к обоснованию теорий сверхтекучести и сверхпроводимости, был удостоен Ленинской премии.

Сложившееся в Лаборатории теоретической физики научное направление можно охарактеризовать как развитие методов статистической механики и их применение в различных областях физики.

Ниже мы попытаемся дать краткий обзор основных достижений, связанных с развитием этого направления в ОИЯИ.

В процессе построения микроскопической теории сверхпроводимости Н.Н.Боголюбов пришел к формулировке фундаментальной концепции квазисредних <sup>/11,12/</sup>, играющей исключительно важную роль в теории систем с бесконечным числом степеней свободы. Дело в том, что вакуум в таких системах вырожден, и для однозначного определения состояния такое вырождение надо снять (то есть спонтанно нарушить симметрию исходного гамильтониана), например, путем введения в гамильтониан дополнительного операторного выражения — "источников", пропорциональных малому параметру. Концепция квазисредних не только конструктивно разрешает проблему неоднозначности выбора пространства состояний макроскопической системы, но и устанавливает принципиальную связь между термодинамическим понятием фазы, условиями устойчивости равновесного состояния и микроскопическим описанием, связанным с рассмотрением взаимодействий и их свойств симметрии.

Значение концепции квазисредних трудно переоценить. Во-первых, эта концепция служит основой современной теории фазовых переходов. Далее, необходимость выхода за пределы одного пространства состояний, заложенная в концепции квазисредних, привела к расширению традиционного формализма пространства Фока и стимулировала развитие алгебраического подхода в проблеме спонтанных нарушений в статистической механике и квантовой теории поля <sup>/13,14/</sup>.

О влиянии работ по спонтанным нарушениям симметрии, связанных с идеей о квазиусреднении, на квантовую теорию поля свидетельствует, в частности, в своей Нобелевской лекции С.Вайнберг <sup>/15/</sup>: "Как-то в 1960 г. или в начале 1961 г. я познакомился с идеей, которая вначале появилась в теории твердого тела, а затем была привнесена в физику частиц теми, кто работал в обеих областях физики. Это была идея о "нарушении симметрии", заключающаяся в том, что гамильтониан и коммутационные соотношения квантовой теории могут обладать точной симметрией и тем не менее физические состояния могут не отвечать представлениям этой симметрии. В частности, может оказаться, что симметрия гамильтониана не является симметрией вакуума".

Дальнейшее последовательное развитие этих идей в квантовой теории поля и физике элементарных частиц привело к построению теории электромагнитных и слабых взаимодействий <sup>/15/</sup>.

В связи с формулировкой метода квазисредних Н.Н.Боголюбовым была также доказана фундаментальная теорема <sup>/12/</sup>, согласно которой в системе при спонтанном нарушении непрерывной симметрии возникают элементарные возбуждения с энергией, стремящейся к нулю



в длинноволновом пределе (теорема "Об особенностях  $1/q^2$ "). Другими словами, имеет место появление безмассовых возбуждений — квантов типа фотона или фонона, обмен которыми приводит к взаимодействию бесконечного радиуса. Этот результат был, в частности, использован при исследовании весьма сложного вопроса об отсутствии "дальнего порядка" в статистических системах одного и двух измерений <sup>/16/</sup>.

Несколько позже аналог теоремы "Об особенностях  $1/q^2$ " был установлен и в квантовой теории поля в работах Дж.Голдстоуна, А.Салама, С.Вайнберга, П.Хиггса.

Важным этапом в развитии статистической механики явилось введение в 1959 г. Н.Н.Боголюбовым и С.В.Тябликовым формализма двухвременных температурных функций Грина <sup>/17/</sup>. В соединении с техникой спектральных разложений этот метод оказался универсальным средством изучения систем многих взаимодействующих частиц и получил широкое распространение в физике конденсированных сред.

В частности, на основе этого метода С.В.Тябликовым и его учениками (Т.Шиклошем, Г.Конвентом, Н.М.Плакидой) был получен ряд принципиальных результатов в квантовой теории магнетизма <sup>/18/</sup>. Так, в работах С.В.Тябликова и Г.Конвента <sup>/19/</sup> была предложена новая теория спин-фононного взаимодействия в гейзенберговском ферромагнетике. Эта теория в дальнейшем получила детальное развитие в работах Г.Конвента, Н.М.Плакиды и других <sup>/20/</sup>.

С.В.Тябликов за работы по развитию методов квантовой теории магнетизма удостоен в 1970 г. Государственной премии СССР.

В работах Н.М.Плакиды и Т.Шиклоша <sup>/21/</sup> был предложен метод самосогласованного расщепления цепочки уравнений для функций Грина, на основе которого удалось построить теорию сильноангармонических кристаллов. Разработка этой теории привела к развитию метода самосогласованных фононов в физике твердого тела (Н.М.Плакида, Т.Шиклош, Г.Конвент, В.Л.Аксенов, С.Стаменкович), позволившего исследовать проблему устойчивости кристаллов и структурные фазовые переходы. Этот метод получил широкое применение в задачах о магнитном и сегнетоэлектрическом упорядочении и послужил основой для постановки и теоретического анализа экспериментов по рассеянию нейтронов, осуществленных на установках ЛНФ ОИЯИ <sup>/22/</sup>. Подчеркнем, что это важное направление исследований успешно развивается в ЛТФ ОИЯИ на протяжении уже почти двух десятилетий.

Концепция квазисредних Боголюбова получила эффективное применение в неравновесной статистической механике в связи с разработкой метода неравновесного статистического оператора в работах Д.Н.Зубарева и его учеников (К.Валясека, А.Л.Куземского и др.) <sup>/23/</sup>. Приложения этого метода связаны с теорией ядерного магнитного резонанса в кристаллах, теорией спин-решеточной релаксации электронов проводимости и примесных центров, а также с рядом других проблем физики неравновесного состояния.

Еще одно направление, интенсивно развиваемое в ЛТФ ОИЯИ, связано с методом аппроксимирующих гамильтонианов, развитым в работах Н.Н.Боголюбова (мл.), его учеников и сотрудников (А.С.Шумовского, Й.Бранкова, Н.Тончева, В.Н.Плечко, В.А.Загребнова и др.)<sup>/24/</sup>. Идея об аппроксимирующем гамильтониане, восходящая к работам Н.Н.Боголюбова по теории сверхтекучести<sup>/1,2/</sup>, позволила получить точное решение модельной задачи теории сверхпроводимости<sup>/25/</sup> при нулевой температуре. Рассмотрение случая произвольных температур привело Н.Н.Боголюбова (мл.) к формулировке теоремы об асимптотической близости свободных энергий, вычисленных на основе модельного и "упрощенного" аппроксимирующего гамильтонианов<sup>/24/</sup>. Эта теорема, лежащая в основе метода и в значительной мере определившая дальнейшее развитие конструктивных исследований квантово-статистических систем, утверждает возможность аппроксимации для широкого класса систем с "отрицательным" взаимодействием. В дальнейшем в рамках метода аппроксимирующих гамильтонианов был обоснован вариационный принцип минимакса Н.Н.Боголюбова (мл.), позволяющий получить адекватные физические результаты для систем со взаимодействием частиц разного знака, в частности, в задачах теории антиферромагнетиков и антисегнетоэлектриков. Оказалось, что этот принцип позволяет получить корректные физические результаты и в тех случаях, когда стандартный подход, связанный с минимизацией свободной энергии, приводит к нарушению принципов термодинамики<sup>/27/</sup>.

Метод аппроксимирующих гамильтонианов Н.Н.Боголюбова (мл.) дает возможность асимптотически точно вычислять макроскопические характеристики квантово-статистических систем — термодинамические потенциалы, временные корреляционные функции и функции Грина. На его основе удалось исследовать свойства ряда физически важных модельных систем в рамках строгого математического рассмотрения<sup>/28-30/</sup>. В частности, при этом был развит новый метод определения квазисредних, связанный с явным введением унитарно-неэквивалентных представлений канонических перестановочных соотношений<sup>/24-32/</sup>.

Принципиальный шаг в развитии метода аппроксимирующих гамильтонианов был сделан в работе<sup>/29/</sup>, в которой впервые удалось исследовать системы со взаимодействием, построенным на неограниченных операторах. Это привело, в частности, к точному решению важной физической проблемы равновесных характеристик сверхизлучательных систем. В дальнейшем этот подход был распространен на широкий класс задач, описывающих взаимодействие "материи" с бозонными полями<sup>/30,31/</sup>.

Последующее развитие метода связано со стремлением установить и максимально расширить те классы модельных систем статистической механики, которые допускают асимптотически точное решение в термодинамическом пределе<sup>/33,34/</sup>.

Цикл работ Н.Н.Боголюбова (мл.) и Б.И.Садовникова, включающий метод аппроксимирующих гамильтонианов, удостоен в 1983 г. Государственной премии СССР.

Фундаментальный вклад в обоснование и развитие неравновесной статистической механики внесли работы Н.Н.Боголюбова, посвященные исследованию стохастических процессов в динамических системах, взаимодействующих с термостатом <sup>/35/</sup>. Еще в 30-е годы проблема описания стохастических процессов в динамических системах привлекла внимание Н.Н.Боголюбова и Н.М.Крылова <sup>/36/</sup>, разработавших метод, позволяющий уже в первом приближении получать уравнение Фоккера — Планка. В дальнейшем усилия были направлены на математически строгое обоснование этого метода, его расширение на случай квантовых систем и установление связи с методом функций Грина. Помимо обоснования статистической механики этот метод имеет и большое прикладное значение, например, в задачах физики плазмы.

За работы по теории стохастических процессов в динамических системах Н.Н.Боголюбову в 1983 г. Президиумом АН СССР присуждена Золотая медаль им.М.А.Лаврентьева.

В 1979 г. в связи с исследованием динамики полярона Н.Н.Боголюбов и Н.Н.Боголюбов (мл.) <sup>/37,38/</sup> сформулировали новый метод построения кинетических уравнений для систем, взаимодействие в которых связано с процессами однобозонного обмена. В основе метода лежит специальный прием, позволяющий определить средние от бозонных переменных по функции распределения для начального состояния. В результате из уравнений движения для средних удается полностью исключить бозонные переменные и получить цепочку интегродифференциальных уравнений для средних от операторов, описывающих материальную подсистему.

Отметим, что указанный метод, развитый первоначально для конкретной задачи физики твердого тела, имеет большую общность и оказывается пригодным для изучения динамических свойств широкого круга систем, взаимодействие в которых линейно по бозонным переменным. В частности, на основе этого подхода впервые удалось получить точную иерархию кинетических уравнений для проблемы сверхизлучательной генерации когерентных электромагнитных полей (Н.Н.Боголюбов (мл.), Фам Ле Киен, А.С.Шумовский) <sup>/39,40/</sup>. Эта иерархия позволила исследовать временные зависимости параметров сверхизлучательных лазеров на основе двух- и трехуровневых систем. Кроме того, удалось строго описать процессы генерации когерентного излучения в полярных диэлектриках <sup>/41/</sup> на основе принципиально нового физического механизма неравновесной самокорреляции диполей, предложенного ранее в работах тех же авторов.

Изучение физически важных процессов двухфотонного излучения и накачки потребовало существенной модификации метода и привело к разработке так называемого метода частичного исключения бозон-

ных переменных <sup>/42/</sup>. Помимо указанных процессов этот метод позволяет также описывать явления комбинационного рассеяния, излучения второй гармоники и рассеяние Мандельштама — Бриллюэна, что особенно важно для расчета характеристик лазеров с кристаллическим рабочим телом.

Важные результаты были получены также в связи с различными приложениями статистической механики.

В 1974 г. по инициативе В.А.Загребнова и В.Б.Приезжева, предложивших математическую модель для оценки фракции бозе-конденсата в He II и ее температурной зависимости ниже критической точки, в ЛНФ ОИЯИ было осуществлено экспериментальное исследование, подтвердившее правильность теоретических оценок <sup>/43/</sup>. Этими же авторами был обоснован и другой важный эксперимент по определению верхней границы фракции бозе-конденсата с помощью рассеяния нейтронов на смеси <sup>3</sup>He — <sup>4</sup>He <sup>/44/</sup>.

Направление, связанное с исследованием электронной структуры твердых тел, на протяжении ряда лет развивается в ЛТФ ОИЯИ. Этой области посвящены работы П.Цише и его сотрудников (В.Ёна, Ю.Шрайбера и др.) <sup>/45/</sup>. Сотрудником ЛТФ Ш.-Л.Дрекслером разрабатываются вопросы влияния фононных аномалий на поведение электронов в сверхпроводниках, в частности, ему удалось исследовать аномальный изотопический эффект в соединениях типа Pd<sub>x</sub>(Dx).

Подход к самосогласованному описанию корреляционных эффектов в неидеальных ферми-системах с сильным взаимодействием развивался в работах А.Л.Куземского, Э.Петру и др. <sup>/46,47/</sup>. Этот подход позволяет исследовать важную проблему сосуществования магнетизма и сверхпроводимости, построить теорию сверхпроводимости в разупорядоченных сплавах, а также провести количественный анализ экспериментов по дифракции нейтронов в переходных металлах.

Традиционными в ЛТФ являются исследования в области обоснования статистической механики и строгих результатов в проблеме фазовых переходов.

В.Б.Приезжевым предложен новый подход к исследованию проблемы димеров, позволивший получить точное выражение для статистической суммы модели димеров на трехмерной решетке типа алмаза <sup>/48/</sup> и определить критическую точку в двумерной модели замкнутых полимеров с исключенным объемом <sup>/49/</sup>.

Цикл работ по исследованию систем с сингулярным потенциалом взаимодействия в классической и квантовой статистической механике был выполнен В.А.Загребновым <sup>/50/</sup>. Кроме того, им была исследована проблема построения предельных гиббсовских состояний непрерывных систем и структуры спектра корреляционных операторов типа Кирквуда — Зальцбурга <sup>/51-52/</sup>.

Системы с непрерывной симметрией и чистыми фазами, разделенными доменной стеной конечной толщины, рассматривались в рабо-

тах Н.Ангелеску <sup>/53/</sup>, в которых на примере изотопной D-векторной модели удалось доказать невозможность существования подобных состояний.

В работах В.Н.Плечко получены новые соотношения для индексов логарифмических поправок к степенным критическим асимптотикам <sup>/54/</sup> и предложен новый подход в двумерной модели Изинга, основанный на зеркальной грассмановой факторизации матрицы плотности <sup>/55/</sup>.

Теория адиабатических инвариантов, развивавшаяся в работах Г.Ненчу, позволила изучить динамику электронов Блоха в постоянном электрическом поле и строго доказать (совместно с А.Ненчу) существование лестничной структуры спектра <sup>/56/</sup>.

В связи с бурным развитием нелинейной тематики в физике конденсированных сред в ЛТФ ведутся целенаправленные исследования в этой области.

В работах В.К.Федянина и др. (см. обзор <sup>/57/</sup>) выполнен цикл исследований, посвященный изучению нелинейных возбуждений в ферромагнетиках, оптических средах, биополимерах и т.д. и проанализированы возможности изучения таких возбуждений на базовых установках ОИЯИ.

В работах И.Гочева построена квантовая теория нелинейных возбуждений в спиновой цепочке. Найдены локализованные состояния нового типа — нестационарные локализованные состояния, являющиеся когерентными для указанной системы. Их можно представить также как нерасплывающиеся пакеты спиновых комплексов. Усреднение операторных уравнений движения при помощи найденных состояний приводит к уравнениям классической теории магнетизма <sup>/58,59/</sup>.

В цикле работ В.Л.Аксенова развита теория структурных фазовых переходов в неупорядоченных системах. В частности, изучено динамическое поведение и пиннинг солитонов в модели с дефектами <sup>/60/</sup>. Совместно с М.Бобетом предложена и изучена модель структурного стекла в структурно-неустойчивых кристаллах <sup>/61/</sup>.

В.Л.Аксеновым совместно с сотрудниками ЛНФ был выполнен цикл работ по исследованию электронных и фононных спектров интерметаллических и редкоземельных соединений. Была теоретически предсказана и затем экспериментально подтверждена гибридизация фононов и квадрупольных экситонов в  $\text{PrNi}_5$ , а также дано теоретическое объяснение температурной зависимости ширины линий магнитных экситонов в  $\text{PrAl}_2$ .

Основные работы Н.Тончева связаны с исследованием экситонного фазового перехода в средах с магнитными и сверхпроводящими свойствами. Совместно с Н.Ангелеску и Г.Ненчу им изучен фазовый переход в экситонное состояние при наличии "электронного резервуара" произвольной мощности <sup>/62/</sup>. Впервые теоретически обоснована возможность "узкого" фазового перехода первого рода в моделях,

используемых в теории Cr и его сплавов. Исследования взаимодействия между экситонным и сверхпроводящим фазовыми переходами в металлах с конгруэнтными участками поверхности Ферми, выполненные совместно с Й.Бранковым, позволили изучить конкуренцию таких переходов в зависимости от параметров конкретной системы <sup>/63/</sup>.

Н.М.Плакидой и Н.Тончевым с помощью метода аппроксимирующих гамильтонианов Н.Н.Боголюбова (мл.) исследована D-мерная модель структурного перехода ферродисторсионного типа. Математически строго изучена термодинамика в такой модели <sup>/64/</sup>.

Важные исследования особенностей структурного перехода в суперионных проводниках, приведшие к постановке в 1984 г. экспериментов на реакторе ИБР-2, выполнены Н.М.Плакидой <sup>/65/</sup>.

Ряд исследований по теории каналирования заряженных частиц в монокристаллах, связанных с экспериментами, выполнявшимися в ЛВЭ, был проведен Г.Адамом, С.Адам, Г.М.Гавриленко, Д.Михалаке, В.К.Федяниным и др. <sup>/66,67/</sup>. В частности, ими изучены некоторые особенности излучения, возникающего при каналировании позитронов.

Д.Бардошем и Г.М.Гавриленко разрабатывается теория явления торможения электронов в металлах для диапазона энергий 0,1-30 МэВ/нукл. в связи с экспериментами по исследованию изменения механических свойств металлов при облучении ионами, выполняемыми в ЛЯР <sup>/68/</sup>.

Применение метода континуального интегрирования для ряда модельных задач статистической механики рассматривалось в работах К.Родригеса, В.К.Федянина и др. <sup>/69/</sup>.

Д.Светогорским выполнены исследования по статистической механике цепных молекул, в которых, в частности, впервые был корректно рассчитан статистический интеграл молекулы с жесткими связями между звеньями <sup>/70/</sup>.

Теория взаимодействия сильных электромагнитных полей с полупроводниковыми кристаллами разрабатывалась Во Хонг Ань <sup>/71/</sup>, в работах которой, в частности, было исследовано явление возбуждения поверхностных поляритонов лазерным излучением.

Большой цикл работ по исследованию магнитных структур методом дифракции нейтронов был выполнен В.Сикорой и другими. Написанная на основе этих исследований монография <sup>/72/</sup> является основным справочным пособием по указанной проблеме.

Д.Пушкарковым развивается новый квазичастичный подход к теории дефектов в квантовых кристаллах <sup>/73/</sup>, а также к описанию квантового поведения нелинейных возбуждений солитонного типа и их взаимодействия с другими элементарными возбуждениями в твердых и низкоразмерных магнитных системах <sup>/74,75/</sup>, позволивший описать зонную структуру и кинетику новых квазичастиц — дефектонов и солитонных волн.

Новый подход к описанию гетерофазных состояний в физических системах, основанный на последовательном применении концеп-

ции квазисредних Н.Н.Боголюбова, развивается в работах В.И.Юкалова и А.С.Шумовского <sup>76,77/</sup>. В рамках этого подхода удалось описать явление зародышеобразования при кристаллизации и плавлении, ряд аномальных свойств сверхпроводников, частично разупорядоченных магнетиков и сегнетоэлектриков, а также построить модель возникновения мультикварковой компоненты в ядерной материи <sup>78/</sup>, связанную с интерпретацией экспериментов, выполненных в рамках сотрудничества ОИЯИ—ЦЕРН.

А.Холас разрабатывал теорию простых металлов на основе концепции псевдопотенциала, а также теорию переходных металлов на основе приближения сильносвязанных электронов <sup>79/</sup>.

Теория модели Андерсона в применении к явлению хемосорбции разрабатывается Ли Бен Иром.

Исследования в области статистической механики и ее приложений ведутся в ОИЯИ в тесном содружестве с ведущими научными центрами стран-участниц, такими, как Институт физики твердого тела БАН и Институт механики и биомеханики БАН, Софийский университет (НРБ), Центральный институт физических исследований ВАН (ВНР), Институт физики (СРВ), Технический университет (Дрезден), Лейпцигский университет, Берлинский университет (ГДР), Гаванский университет (Куба), Вроцлавский университет, Вроцлавский педагогический институт, Институт ядерной физики (Краков) (ПНР), Центральный институт физики и Центральный институт физики ядра (СРР), Физический институт САН (ЧССР), Математический институт АН СССР, Московский государственный университет, Институт теоретической физики АН УССР, Институт физики металлов УНЦ АН СССР (Свердловск), Институт прикладной физики АН МССР и многими другими.

В разное время в ЛТФ работали или бывали с деловыми визитами Й.Влахов, В.Караиванов, Й.Коцев, И.Лалов, Д.Марваков, М.Приматара, И.Стоянова, Д.Узунов (НРБ), Э.Правецки, Е.Шойам (ВНР), У.Бен, В.Веллер, Д.Иле, А.Клемм, А.Кюнель, В. и Э.Коллей, Ф.Кристофф, Р.Лоренц, Н.Ульманн, В.Шиллер, В.Эбелинг (ГДР), Б.Вествански, З.Галясевиц, Я.Ковальски, С.Кшемински, З.Стрыхарски, А.Подольска-Стрыхарска, Т.Пашкевич, К.Парлински, Е.Пшистава, Е.Червонко, А.Холас, Е.Яник (ПНР), А.Корчавей, П.Грюнфельд, Г.Мезинческу (СРР), М.Блажек, В.Дрхал, И.Карасова, М.Колар, И.Курдуновски, Н.Шурда, Ш.Шуян (ЧССР) и многие другие.

Совместные работы ведутся также с участием специалистов из СФРЮ, Италии, Швейцарии, ФРГ и других стран.

Традиционно проходящие в Дубне Международные симпозиумы по избранным проблемам статистической механики посвящены обсуждению наиболее важных проблем этой области физики. В их работе принимают участие ведущие специалисты из стран-участниц, а также Австралии, Англии, Дании, Испании, Италии, Нидерландов, США, Франции и других стран. Как показывает опыт, такие симпозиумы оказывают

стимулирующее воздействие на развитие исследований в наиболее важных и перспективных направлениях.

Исследования в области статистической механики, ведущиеся в ОИЯИ, заслужили высокую оценку международной научной общественности. Работы сотрудников ЛТФ ОИЯИ широко цитируются в научной литературе. Монографии, авторами которых являются сотрудники ЛТФ, переводятся на иностранные языки и переиздаются во многих странах мира.

В заключение еще раз подчеркнем, что развитие методов и исследования в области приложений статистической механики составляют важный раздел проблемно-тематического плана научно-исследовательских работ ОИЯИ и связаны как с фундаментальными исследованиями, так и с планированием, постановкой и обработкой экспериментов на ряде базовых установок Института.

#### *Литература*

1. Боголюбов Н.Н. Изв. АН СССР, сер. физ., 1947, 11, с.77.
2. Боголюбов Н.Н. Вестник МГУ, 1947, № 7, с.43.
3. Боголюбов Н.Н. ОИЯИ, Р-94, Дубна, 1957; ЖЭТФ, 1958, 34, с.38.
4. Боголюбов Н.Н. ОИЯИ, Р-99, Дубна, 1957; ЖЭТФ, 1958, 34, с.73.
5. Боголюбов Н.Н., Толмачев В.В., Ширков Д.В. Новый метод в теории сверхпроводимости. Изд-во АН СССР, М., 1958.
6. Боголюбов Н.Н. ДАН СССР, 1958, 119, с.52.
7. Соловьев В.Г. Теория атомного ядра. "Наука", М., 1981.
8. Боголюбов Н.Н. ОИЯИ, Р-126, Дубна, 1958; ДАН СССР, 1958, 119, с.244.
9. Боголюбов Н.Н., Соловьев В.Г. ОИЯИ, Р-262, Дубна, 1958; ДАН СССР, 1958, 124, с.1011.
10. Nambu Y., Jona-Lasinio G. Phys.Rev., 1961, 122, p.345.
11. Bogolubov N.N. Physica, 1960, S26, p.1.
12. Боголюбов Н.Н. ОИЯИ, Д-781, Дубна, 1961; Избранные труды по статистической физике. Изд-во МГУ, М., 1979.
13. Haag R. Nuovo Cim., 1962, 25, p.287.
14. Эмх Ж. Алгебраические методы в статистической механике и квантовой теории поля. "Мир", М., 1976.
15. Вайнберг С. УФН, 1980, 132, с.201.
16. Боголюбов Н.Н. (мл.), Садовников Б.И. Некоторые вопросы статистической механики. "Высшая школа", М., 1975.
17. Боголюбов Н.Н., Тябликов С.В. ДАН СССР, 1959, 126, с.53.
18. Тябликов С.В. Методы квантовой теории магнетизма. "Наука", М., 1975.
19. Тябликов С.В., Конвент Г. ОИЯИ, Р4-3794, Дубна, 1969; Phys. Lett., 1968, 27A, p.130.
20. Plakida N.M., Konvent H. In: Magnetism in Metals and Metallic Compounds. Plenum Press, N.Y., 1976.
21. Plakida N.M., Siklos T. phys.stat.sol., 1969, 33, p.103,113.



22. Аксенов В.Л., Плакида Н.М., Стаменкович С. Рассеяние нейтронов сегнетоэлектриками. Энергоатомиздат, М., 1984.
23. Зубарев Д.Н. Неравновесная статистическая термодинамика. "Наука", М., 1971.
24. Боголюбов Н.Н. (мл.). Метод исследования модельных гамильтонианов. "Наука", М., 1974.
25. Боголюбов Н.Н. ОИЯИ, Р-511, Дубна, 1960; Избранные труды. "Наукова думка", Киев, 1971, т.3.
26. Боголюбов Н.Н. (мл.). ЯФ, 1969, 10, с.425.
27. Осипов М.А., Шумовский А.С. ТМФ, 1980, 46, с.125.
28. Brankov J.G., Shumovsky A.S., Zagrebnov V.A. ОИЯИ, Р4-7918, Дубна, 1974; Physica, 1974, 78A, p.183.
29. Бранков Й.Г., Загребнов В.А., Тончев Н.С. ОИЯИ, Р4-7735, Дубна, 1974; ТМФ, 1975, 22, с.20.
30. Bogolubov N.N., Jr., Plechko V.N. Physica, 1976, 82A, p.163.
31. Боголюбов Н.Н. (мл.) и др. Метод аппроксимирующего гамильтониана в статистической физике. Изд-во БАН, София, 1981.
32. Боголюбов Н.Н. (мл.), Шумовский А.С. Труды МИАН. "Наука", М., 1975, т.136, с.351.
33. Боголюбов Н.Н. (мл.) и др. УМН, 1984, т.39, с.3.
34. Shumovsky A.S., Yukalov V.I. Physica, 1982, 110A, p.518.
35. Боголюбов Н.Н. ЭЧАЯ, 1978, 9, с.501.
36. Боголюбов Н.Н., Крылов Н.М. В кн.: Избранные труды. "Наукова думка", Киев, 1970, т.2.
37. Боголюбов Н.Н., Боголюбов Н.Н. (мл.). В кн.: Фундаментальные проблемы теоретической и математической физики. ОИЯИ, Д-12831, Дубна, 1979, с.337.
38. Боголюбов Н.Н., Боголюбов Н.Н. (мл.). ЭЧАЯ, 1980, т.11, с.245.
39. Боголюбов Н.Н. (мл.), Фам Ле Киен, Шумовский А.С. ОИЯИ, Р17-81-465, Дубна, 1981; ТМФ, 1982, т.52, с.423.
40. Боголюбов Н.Н. (мл.), Плечко В.Н., Шумовский А.С. ЭЧАЯ, 1983, т.14, с.1443.
41. Боголюбов Н.Н. (мл.), Шумовский А.С. В сб.: Труды VII Межд. сов. по проблемам квантовой теории поля. ОИЯИ, Д2-84-366, Дубна, 1984.
42. Bogolubov N.N., Jr., Fam Le Kien, Shumovsky A.S. Physica, 1984, 297A, p.127.
43. Александров Л. и др. ЖЭТФ, 1975, 68, с.1825.
44. Загребнов В.А., Приезжев В.Б. ОИЯИ, Р17-9634, Дубна, 1976.
45. Ziesche P. et al. Ergebnisse Elektronentheorie der Metalle. Akademie-Verlag, Berlin, 1984.
46. Куземский А.Л. ЭЧАЯ, 1981, т.12, с.366; ТМФ, 1978, т.36, с.208.
47. Wysokinski K., Kuzemsky A.L. Journ.of Low Temp.Phys., 1976, vol.52, p.81.
48. Priezzhev V.B. J.Stat.Phys., 1981, vol.26, p.917.
49. Приезжев В.Б. ЖЭТФ, 1978, 74, с.1177.

50. Загребнов В.А. Труды Московского матем.общества. "Наука", М., 1980, т.41, с.101.
51. Zagrebnoy V.G. J.Stat.Phys., 1982, vol. 27, p.577.
52. Загребнов В.А. ТМФ, 1982, т.51, с.389.
53. Angelescu N., Bandaru M., Costache G. J.Phys.A: Math.Gen., 1983, 16, p.2479.
54. Plechko V.N. Phys.Lett., 1982, 89A, p.373.
55. Plechko V.N. JINR, E17-84-23, Dubna, 1984.
56. Nenciu A., Nenciu G. J.Phys.A: Math.Gen., 1982, 14A, p.2817; 15A, p.3313.
57. Makhankov V.G., Fedyanin V.K. Phys.Rep., 1984, vol.104, p.1.
58. Гочев И.Г. ЖЭТФ, 1983, 85, с.199.
59. Gochev I.G. Phys.Lett., 1984, A104, p.36.
60. Aksenov V.L., Didyk A.Yu., Zakula R. Lect.Notes in Phys., 1985, vol.217, p.500.
61. Aksenov V.L., Bobeth M. phys.stat.sol.(b), 1985, vol.128, p.K105.
62. Angelescu N., Nenciu G., Tonchev N.S. JINR, E17-82-798, Dubna, 1982; J.Phys.F: Math.Phys., 1984, 14, p.2155.
63. Тончев Н.С., Бранков Й.Г. ФНТ, 1984, т.10, с.1014.
64. Плакида Н.М., Тончев Н.С. ОИЯИ, P17-84-478, Дубна, 1984.
65. Плакида Н.М. ОИЯИ, P17-84-760, Дубна, 1984.
66. Гавриленко Г.М., Федянин В.К. ЭЧАЯ, 1981, т.12, с.220.
67. Adam G. et al. Nucl.Instr.and Meth., 1982, vol.194, p.297.
68. Бардош Г., Гавриленко Г.М. ОИЯИ, P17-84-371, Дубна, 1984.
69. Родригес К., Федянин В.К. ЭЧАЯ, 1984, т.15, с.870.
70. Svetogorsky D.A., Pavlotsky I.P. J.Phys.A: Math.Gen., 1978, 11, p.2349.
71. Vo Hong Anh. Phys.Rep., 1980, 64, p.1.
72. Oles A. et al. Magnetic Structures Determined by Neutron Diffraction. Warszawa — Krakow, 1976.
73. Пушкаров Д.И. ЖЭТФ, 1975, 68, с.1471.
74. Пушкаров Д.И. В сб.: Труды III Международного симпозиума по избранным вопросам статистической механики. ОИЯИ, D17-84-850, Дубна, 1984, т.2, с.205.
75. Pushkarov D.I., Vlahov J.P. JINR, E17-12099, Dubna, 1978.
76. Боголюбов Н.Н. (мл.), Шумовский А.С., Юкалов В.И. ТМФ, 1984, 60, с.432.
77. Шумовский А.С., Юкалов В.И. ЭЧАЯ, 1985, 16, с.808.
78. Балдин А.М. и др. ДАН СССР, 1984, 279, с.602.
79. Kuzemsky A.L., Holas A., Plakida N.M. Physica, 1983, 122B, p.168.



ФИЗИКА ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ

## СВЕРХТЯЖЕЛЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

*Г.Н.ФЛЕРОВ, академик*

*Г.М.ТЕР-АКОПЬЯН, доктор физико-математических наук*

Познание химических элементов, составляющих многообразие окружающего нас мира, с глубокой древности привлекало внимание людей и стало впоследствии одним из главных направлений научного исследования природы человеком. О росте числа известных химических элементов в шкале исторического времени говорит рис.1, на котором показана связь этого процесса с некоторыми этапами развития науки и техники. Еще совсем недавно, в начале нашего столетия, закончилось заполнение всех клеток периодической системы Д.И.Менделеева, принадлежащих стабильным химическим элементам. Событием, оказавшим глубокое влияние на развитие науки и техники нашего столетия, явилось открытие полония и радия, сделанное в конце XIX века Марией и Пьером Кюри. С этого открытия, как известно, началась история ядерной физики. В области исследования химических элементов оно положило начало получению и изучению свойств радиоактивных нуклидов и, в конечном счете, выдвинуло задачу об изучении пределов стабильности химических элементов, следующих за ураном, решение которой представляет проблему принципиального и практического значения.

Первый трансурановый элемент (нептуний) был синтезирован в реакции захвата нейтрона ядрами урана. Затем последовательно в различных реакциях, протекающих в потоках легких бомбардирующих частиц (нейтронов, дейтронов, ядер гелия), были получены другие трансурановые элементы вплоть до менделевия — элемента с атомным номером 101. Получение этих элементов не оставило надежды на возможность их обнаружения в природе, так как их время жизни оказалось существенно меньше возраста Солнечной системы (4,6 млрд.лет). Эти исключительно тонкие эксперименты, ныне ставшие классическими, были выполнены в сороковых-пятидесятых годах группой американских физиков под руководством Г.Сиборга.

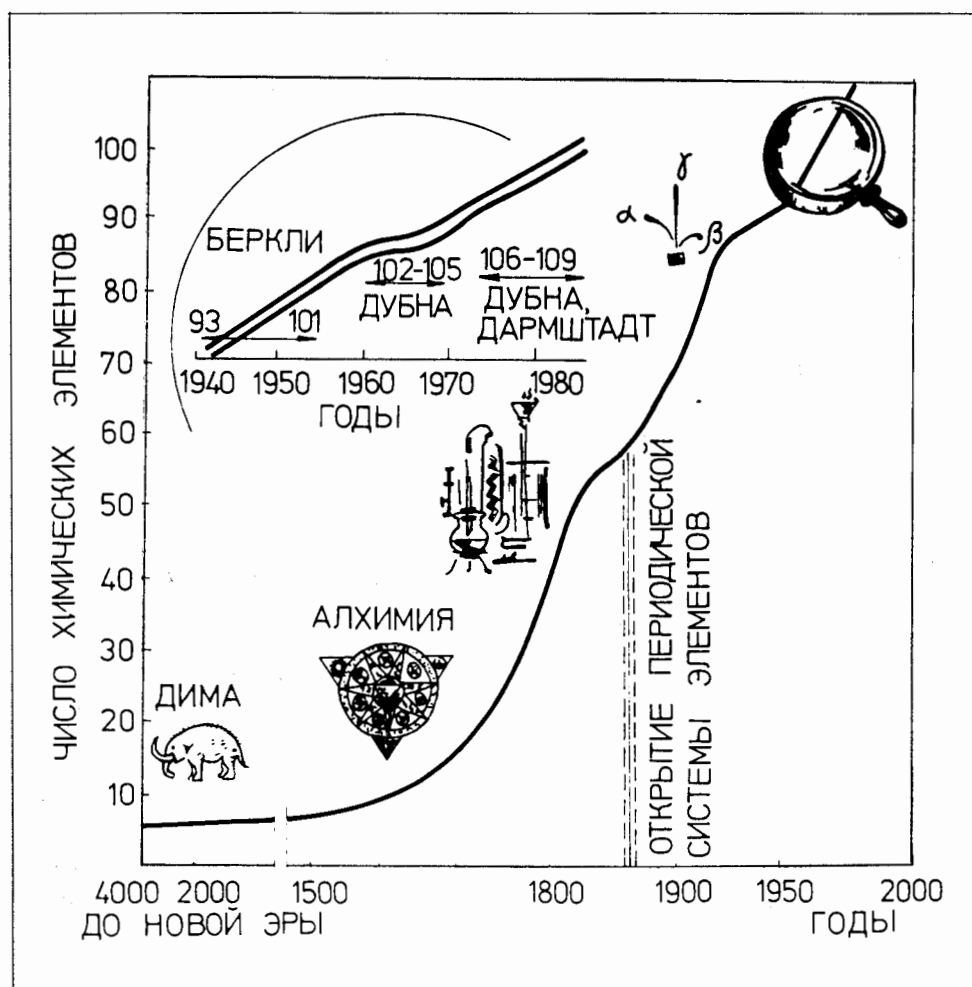


Рис.1. Рост числа известных элементов в историческом времени.

Синтезом менделевия закончился первый этап исследования трансурановых элементов. Дальнейшие эксперименты в этой области проводились на пучках тяжелых ионов. В шестидесятые годы в Дубне на циклотроне тяжелых ионов У-300 последовательно был осуществлен синтез элементов с атомными номерами 102, 103, 104 и 105<sup>1/</sup>. Мы назвали "курчатовием" 104-й элемент в честь И.В.Курчатова — выдающегося ученого современности, классические работы которого явились фундаментом для ряда актуальных направлений ядерной физики, таких, как изомерия ядер, нейтронная физика, физика деления и т.д.

Курчатовий — первый из трансурановых элементов, не принадлежащий химической группе актиноидов. Его химическое подобие бли-

жайшему легкому гомологу — гафнию было доказано в экспериментах, проведенных в Дубне И.Зварой с сотрудниками <sup>12/</sup>. Аналогичным методом была проведена и химическая идентификация 105-го элемента — нильсбория <sup>13/</sup>.

Синтез элементов 102-105 позволил получить ряд существенных результатов, на основании которых впервые представилась возможность делать выводы о пределах стабильности тяжелых атомных ядер. Наиболее важной в этом отношении была информация о спонтанном делении трансурановых нуклидов. Спонтанное деление было открыто одним из авторов этой статьи (Г.Н.Флеровым) вместе с К.А.Петржаком в 1940 году. Оно наблюдалось как редкая ветвь радиоактивного распада ядер урана. Уран оказался единственным элементом, который испытывает этот вид радиоактивного распада. Трактовка этого явления на основе модели жидкой капли, предложенная Н.Бором и Дж.Уилером и Я.И.Френкелем, давала веские основания для предположения о том, что периоды полураспада ядер должны неуклонно уменьшаться по мере возрастания атомного номера. Согласно этой модели вряд ли можно было надеяться на получение атомов курчатовия, имеющих время жизни, достаточное для их наблюдения.

Однако результаты, полученные в Дубне, опровергли эти пессимистические выводы. Атомы курчатовия, нильсбория и других тяжелых элементов имели достаточно большое время жизни, а зависимость их периодов полураспада от числа нейтронов в ядре свидетельствовала о сильном влиянии эффектов нейтронных оболочек на величину потенциального барьера, препятствующего делению. Сильное влияние эффектов оболочек на величину и форму барьера деления ярко отразилось в факте существования спонтанно делящихся изомеров, которые были открыты в Дубне в процессе экспериментов по синтезу курчатовия <sup>14/</sup>. На основании данных изучения этого принципиально нового вида изомерии Г.Н.Флеров и О.Бор предположили <sup>15/</sup>, что он связан с образованием метастабильного состояния, в котором форма ядра отличается от формы в основном состоянии.

Причины появления изомеров формы были выявлены В.М.Струтинским, который развил теоретический метод расчета потенциальной энергии деформации ядра (метод оболочечной поправки) и получил двугорбую структуру барьера деления.

В конце шестидесятых годов этот метод был применен для оценки устойчивости ядер в широком диапазоне атомных номеров и массовых чисел, выходящем далеко в область неизученных ядер. Большие барьеры деления были получены для целой группы нуклидов, располагающихся около магических чисел  $Z = 114$ ,  $N = 184$  (см. рис.2). Так возникла гипотеза о новом острове стабильности сверхтяжелых элементов (СТЭ). Теоретические и экспериментальные работы, относящиеся к проблеме СТЭ, рассмотрены подробно в нашем обзоре <sup>16/</sup>. Для ядер, находящихся в центре этого острова, высота барьера деления оценива-

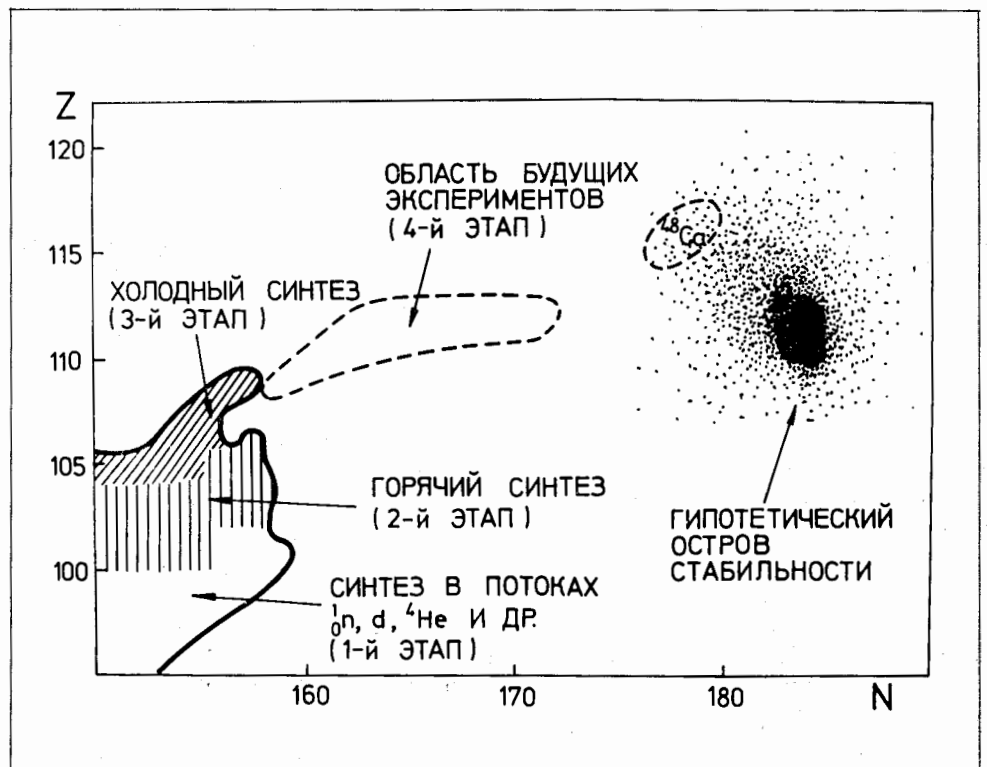


Рис.2. Карта тяжелых нуклидов. В левом нижнем углу показана граница известных нуклидов, в которой отмечены области синтеза в потоках нейтронов, дейтронов,  $^4\text{He}$  и т.д. в реакциях горячего и холодного слияния. Пунктирной линией обведена область будущих экспериментов на пучках ионов Ar, Ca, Sc, Ti. В правом верхнем углу указана область гипотетических СТЭ. Контуры этой области отмечены точками, плотность которых приблизительно отражает изменение логарифма (скорее, логарифма логарифма) периода полураспада нуклидов. Показан участок острова стабильности, который представляется доступным для экспериментов на пучке ионов  $^{48}\text{Ca}$ .

лась величиной более 10 МэВ, т.е. она заведомо больше высоты барьера деления урана (6 МэВ). Время жизни ядра, имеющего такой барьер, может быть очень продолжительным. Расчеты дают периоды полураспада СТЭ от нескольких часов до величин, соизмеримых с возрастом Солнечной системы. Неопределенность этих оценок очень велика: действительные периоды полураспада могут быть на много порядков величины больше или меньше расчетных величин. Эта неопределенность может быть устранена лишь в результате обнаружения сверхтяжелых атомных ядер. Поэтому синтез и поиск в природе химических элементов, принадлежащих гипотетическому острову стабильности, представляет исключительно важную и актуальную задачу.

Проблема синтеза СТЭ тщательно изучалась и продолжает исследоваться в ОИЯИ, а также в нескольких лабораториях в ФРГ, США и Франции, располагающих мощными ускорителями тяжелых ионов. Центральное место в ней занимает вопрос о слиянии двух сложных ядер, которое может привести к образованию компаунд-ядра, не очень далеко отстоящего от центра острова стабильности. Последнему условию в наибольшей степени удовлетворяет слияние ядер кюрия ( $Z = 96$ ) и кальция ( $Z = 20$ ) с массовыми числами 248 и 48, или, как принято говорить, реакция слияния  $^{248}\text{Cm} + ^{48}\text{Ca}$ . Эта реакция выгодно отличается от других подобных ей реакций также и по той причине, что, благодаря большой энергии связи нуклидов в дважды магическом ядре  $^{48}\text{Ca}$ , достигается уменьшение энергии возбуждения компаунд-ядра, а следовательно, повышается его устойчивость.

Эксперименты по синтезу СТЭ в реакции  $^{248}\text{Cm} + ^{48}\text{Ca}$  были выполнены в 1976 году в Дубне, затем они проводились в Беркли (США) и сравнительно недавно в Дармштадте (ФРГ). К сожалению, ни одной из групп не удалось добиться положительного результата. Однако это ни в коем случае не может служить основанием для сомнений относительно существования острова стабильности СТЭ. Как видно из рис.2, даже в случае реакции  $^{248}\text{Cm} + ^{48}\text{Ca}$  ожидаемые ядра-продукты удалены от центра острова стабильности, поэтому их периоды полураспада могли быть слишком короткими в сравнении с быстротой действия применявшихся экспериментальных методов. Но прежде чем вносить изменения в методику с целью существенного увеличения ее экспрессности, необходимо выяснить некоторые детали механизма слияния сложных ядер. В самом деле, для синтеза новых элементов применялись такие реакции (например,  $^{242}\text{Pu} + ^{22}\text{Ne}$ ,  $^{249}\text{Bk} + ^{15}\text{N}$ ,  $^{246}\text{Cm} + ^{18}\text{O}$  и др.), в которых вслед за перекрытием диффузных поверхностных слоев сталкивающихся ядер автоматически происходило образование компаунд-ядра. Однако по мере возрастания величины произведения порядковых номеров ядер мишени и бомбардирующего иона баланс сил (кулоновской и ядерной) становится все более невыгодным для слияния. В конце концов должна наступить критическая ситуация, когда перекрытия диффузных слоев недостаточно для образования компаунд-ядра. Чтобы преодолеть барьер слияния, необходимо значительно теснее сблизить сталкивающиеся ядра, а это требует дополнительной энергии, которая вследствие действия сил трения расходуется на нагрев системы. Иными словами, слиянию ядер препятствует не только кулоновский, но и дополнительный динамический барьер, обусловленный силами трения. Не исключено, что в случае реакции  $^{248}\text{Cm} + ^{48}\text{Ca}$  вероятность образования ядер СТЭ существенно снижена по этой причине.

Для изучения механизма реакции слияния сложных ядер, а также для выяснения свойств новых тяжелых нуклидов большое значение имел метод холодного синтеза ядер, предложенный и развитый в ОИЯИ



Ю.Ц.Оганесяном <sup>7</sup>/. В реакциях слияния тяжелых ионов  $^{54}\text{Cr}$ ,  $^{55}\text{Mn}$  с ядрами свинца и висмута с помощью этого метода в Дубне в середине семидесятых годов были получены элементы с порядковыми номерами 106 и 107 <sup>8</sup>/. Недавно в экспериментах, проводившихся параллельно в Дубне и Дармштадте, на пучке ионов  $^{58}\text{Fe}$  были получены элементы 108 и 109 <sup>9,10</sup>/. В результате было установлено, что основным видом распада вновь синтезированных нуклидов является  $\alpha$ -распад. Это говорит об их сравнительно высокой стабильности по отношению к спонтанному делению, что служит веским аргументом в пользу существования острова стабильности СТЭ. В отношении механизма слияния сложных ядер существенным является результат, указывающий на образование слабозбужденных (холодных) компаунд-ядер в указанных комбинациях мишеней и бомбардирующих ионов. Вместе с тем в этих экспериментах было установлено, что при переходе от  $Z = 107$  к  $Z = 109$  вероятность образования новых нуклидов резко уменьшается. По-видимому, в этом проявляется действие дополнительного динамического барьера, обусловленного силами трения. Используя самый мощный пучок ионов  $^{58}\text{Fe}$ , который имеется в Дубне на циклотроне У-400, удавалось получить в случае 109-го элемента не более одного атома в день. Поэтому кажется, что возможности этого метода для синтеза новых элементов практически исчерпаны.

По нашему мнению, дальнейшее развитие работ по синтезу новых элементов ( $Z = 110, 111, 112$ ) будет основано на применении широкого класса ядерных реакций типа  $^{230,232}\text{Th} + ^{48}\text{Ca}$ ,  $^{231}\text{Pa} + ^{48}\text{Ca}$ ,  $^{233-238}\text{U} + ^{48}\text{Ca}$ ,  $^{230,232}\text{Th} + ^{50}\text{Ti}$ ,  $^{230,232}\text{Th} + ^{45}\text{Sc}$  <sup>11</sup>/. До последнего времени этим реакциям не уделялось достаточно внимания, так как согласно простым жидкокапельным оценкам в них должны получаться сравнительно сильно возбужденные компаунд-ядра. Однако при осторожном сближении двух ядер, которое можно осуществить при энергии соударения, намного меньшей кулоновского барьера, эффекты оболочек могут облегчить слияние. К тому же эти реакции, по-видимому, свободны от проявления динамического барьера, который приводит к ограничению метода холодного синтеза. Таким образом, можно предполагать, что хотя бы в некоторых из указанных выше реакций может идти слияние с образованием компаунд-ядра, имеющего не очень высокую энергию возбуждения.

Применение в качестве бомбардирующих ионов стабильных изотопов аргона, скандия, кальция и титана позволит изучить несколько десятков комбинаций сталкивающихся ядер, довольно сильно различающихся по структуре нуклонных оболочек. Физико-химические свойства мишеней из тория, протактиния и урана допускают их длительное облучение пучками тяжелых ионов с предельно высокой интенсивностью. Поэтому чувствительность таких экспериментов может быть повышена в 50-100 раз по сравнению с той, которая была достигнута при попытках синтеза СТЭ. В результате можно рассчитывать на существ-

венное продвижение в область нуклидов, непосредственно примыкающую к острову стабильности (см. рис.2). Вместе с тем будут получены результаты, проливающие свет на механизм реакций синтеза СТЭ.

Постановка экспериментов по поиску СТЭ в природе, в сущности, подобна постановке классических опытов супругов Кюри, приведших к открытию радия и полония. В их основе лежит поиск таких геологических или космологических объектов, для которых наблюдаемая скорость счета событий спонтанного деления ядер превышает уровень, ожидаемый за счет распада примеси урана. Такое превышение может быть обнаружено, если действительно кроме урана в природе существует хотя бы один нуклид, испытывающий спонтанное деление. Если верна гипотеза о существовании нового острова стабильности, этот нуклид будет принадлежать одному из СТЭ, имеющему период полураспада около одного миллиарда лет, соизмеримый с возрастом Солнечной системы.

В Дубне были созданы принципиально новые детекторы, действие которых основано на регистрации множественных нейтронов, испускаемых при спонтанном делении атомного ядра. Такие детекторы позволяют обнаружить исключительно редкие акты распада — до одного деления в месяц в образцах массой в 10-20 кг. Новый элемент можно обнаружить, даже если его концентрация составляет  $10^{-15}$  от массы исследуемого образца.

Для исследования нами были взяты образцы некоторых каменных метеоритов и химические фракции, выделенные из термальных водных источников в районах глубинных разломов земной коры. Такой выбор объектов изучения был не случайным. Каменные метеориты по современным представлениям относятся к наименее дифференцированным образованиям Солнечной системы, то есть их химический состав в наибольшей степени отражает распространенность элементов в веществе Солнечной системы. Термальные воды, выбранные для изучения, концентрируют редкие тяжелые элементы, которые поступают в них в результате выщелачивания глубинных пород и при возгонке вещества верхней мантии, близкого, как полагают, по своему составу к веществу каменных метеоритов.

В изученных образцах метеоритов и гидротерм были обнаружены события спонтанного деления, скорость счета которых в 20-30 раз превышала фон от урана. Вся совокупность данных исследования этого явления показывает, что речь действительно идет о наблюдении нового природного спонтанно делящегося нуклида. Следующим шагом должна быть идентификация этого нуклида, то есть установление его атомного номера и массового числа, детальное изучение свойств радиоактивного распада. Однако эти задачи сильно осложнены из-за очень низкой концентрации этого нуклида в образцах метеоритов ( $10^{-14}$  г/г) и гидротерм ( $10^{-16}$  —  $10^{-15}$  г/г). Поэтому для их решения в Дубне разработаны и применяются в полевых условиях (на устьях гидротермальных

скважин) эффективные методы выделения и концентрирования редких элементов из объемов термальных вод, достигающих многих десятков кубических метров. Для определения массы атомов исследуемого нуклида создается уникальный прибор — ультрачувствительный масс-спектрометр, рассчитанный на обнаружение одного атома нового нуклида среди  $10^{14}$  посторонних атомов. Начаты работы по созданию гигантского детектора множественных нейтронов, который позволит изучать спонтанное деление в геологических пробах массой до 1000 кг.

Особое место в проблеме поиска СТЭ в природе занимают космические лучи. Дело в том, что в космическом излучении представлены атомные ядра всех известных химических элементов, нуклеосинтез которых происходит в многочисленных и разнообразных звездных объектах нашей Галактики. Возраст этих элементов составляет в среднем 10 млн. лет. Это повышает шансы нахождения ядер СТЭ в космических лучах по сравнению с веществом Солнечной системы.

Для поисков сверхтяжелых ядер в космических лучах мы использовали замечательные возможности, которые создала сама природа. Ядра тяжелых элементов, поступающие с космическими лучами в пределы Солнечной системы, имеют скорость, близкую к скорости света. Попадая в небольшие небесные тела — астероиды эти ядра проникают на глубину 5-15 см и тормозятся, оставив в конце своего пути повреждения структуры в некоторых минералах, входящих в состав вещества астероидов. Эти повреждения, так называемые латентные, невидимые треки, сохраняются десятки и сотни миллионов лет. Они могут быть превращены в видимые треки в результате обработки этих минералов специальными растворами. Длина этих треков резко возрастает с увеличением атомного номера ядра, оставившего свой след в минерале.

Остается вопрос, как доставить в лабораторию пробы вещества астероидов. Эта проблема вполне разрешима, так как такими пробами являются метеориты, периодически падающие на Землю. В мире существует немало коллекций метеоритов, которые всесторонне исследуются учеными разных специальностей.

К настоящему времени в Дубне В.П.Перельгиным с сотрудниками проведена обработка и просмотр кристаллов оливина — весьма распространенного минерала, входящего в состав железокремнистых метеоритов. Было обнаружено семь треков, длина которых (0,35-0,4 мм) примерно вдвое превышала длину треков ядер урана. Мы рассматриваем эти треки как перспективные кандидаты в треки сверхтяжелых ядер.

Что нужно, чтобы отбросить слово "кандидат", полностью убедившись в том, что мы действительно видим следы, оставленные сверхтяжелыми ядрами? Здесь имеется несколько путей, среди которых отметим наиболее перспективный. Это поиск следов осколков деления атомных ядер СТЭ, которые должны находиться недалеко от конца видимого трека. Чтобы выявить следы осколков деления, нужно проде-

лать ювелирную работу, обеспечив возможность избирательного проникновения растворителя в эту область кристалла оливина. Если удастся обнаружить следы осколков деления, отпадут все сомнения в том, что найденные аномально длинные треки принадлежат ядрам СТЭ. Только для этих ядер спонтанное деление может представлять основной вид радиоактивного распада. Для ядер урана, а также для всех трансурановых ядер, которые могут присутствовать в космических лучах, основным видом радиоактивности является  $\alpha$ -распад, а спонтанное деление может происходить лишь в одном случае на миллионы распадов.

Мы рассказали в этой статье о трех основных направлениях исследований проблемы сверхтяжелых элементов — это синтез элементов на пучках тяжелых ионов, поиски СТЭ в земных образцах и метеоритах и поиски ядер СТЭ в космических лучах. Каждое из этих направлений имеет интересные перспективы в будущем.

Исследования в области синтеза новых элементов в последние годы отодвинули границу периодической системы Д.И.Менделеева вплотную к атомному номеру 110. Реальной задачей стал синтез элементов 110-112, который позволит выяснить свойства тяжелых нуклидов, существенные для наших представлений об острове стабильности СТЭ.

Для проблемы СТЭ большое значение имеет задача идентификации нового природного спонтанно делящегося нуклида. Если будет доказана его принадлежность к острову стабильности, появится реальная возможность выделения весовых количеств нового элемента.

Обнаружение ядер СТЭ в космических лучах будет иметь принципиальное значение для теории, описывающей стабильность тяжелых нуклидов.

### *Литература*

1. Flerov G.N., Druin V.A. Atomic Energy Rev., 1970, vol.8, p.255.
2. Zvara J. et al. Inorg.Nucl.Chem.Lett., 1971, vol.7, p.1109.
3. Звара И. и др. Радиохимия, 1976, т.18, с.371.
4. Flerov G.N. et al. In: Proc. 3rd Conf. on Reactions Between Complex Nuclei. Asilomar, California, 1963. (Ed. by A.Ghiorso, R.M.Diamond and H.E.Conzett). Univ.Calif.Press, Berkeley and Los Angeles, 1963, p.434.
5. Флеров Г.Н., Друин В.А. В кн.: Структура сложных ядер. Материалы летней школы физиков. Телави, 1965 (под ред. Н.Н.Боголюбова). Атомиздат, М., 1965, с.249.
6. Flerov G.N., Ter-Akopian G.M. Rep.Prog.Phys., 1983, vol.46, p.817.
7. Oganessian Yu.Ts. et al. Nucl.Phys., 1975, vol.A239, p.353.
8. Oganessian Yu.Ts. Nucleonica, 1977, vol.22, p.89.
9. Oganessian Yu.Ts. et al. JINR, E2-84-651, Dubna, 1984.

10. Armbruster P. In: Proc. Int. Conf. Nucl.Phys. Florence, 1983. (Ed. b. P.Blasi and R.A. Ricci). Tipografia Compositori, Bologna, 1983, vol.2 p.343.
11. Flerov G.N. In: Proc. Int. Conf. Nucl.Phys., Florence, 1983. (Ed. by P.Blasi and R.A.Ricci). Tipografia Compositori, Bologna, 1983, vol.2 p.365.

## СИНТЕЗ НОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ТАБЛИЦЫ МЕНДЕЛЕЕВА

*Ю.Ц.ОГАНЕСЯН, профессор*

*А.А.ПЛЕВЕ, кандидат физико-математических наук*

Греческое слово *synthesis* означает соединение известных элементов и получение нового объекта, обладающего качественно новыми свойствами. Интереснейшие исследования в ядерной физике — синтез новых элементов — полностью соответствуют и этому определению, и неуголимому стремлению человека к познанию нового.

В 1934 г. Э.Ферми, проводя опыты по взаимодействию нейтронов с различными веществами, предложил метод синтеза 93-го элемента при облучении урана нейтронами. Однако до претворения этой идеи в жизнь прошло еще около шести лет. Первый успешный эксперимент удалось провести Макмиллану и Эйблсону только в 1940 г., когда авторы, облучая  $^{238}\text{U}$  нейтронами, наблюдали образование  $^{239}\text{Np}^{1/}$ .

Сущность этого метода синтеза сводится к тому, что  $\beta$ -стабильное ядро, захватывая нейтроны, удаляется от области  $\beta$ -стабильности. Выбрасывая электрон, ядро возвращается в область  $\beta$ -стабильности, но при этом его порядковый номер увеличивается на единицу. Таким образом, захват нейтронов и цепочка последовательных  $\beta$ -распадов позволяют накапливать различные изотопы трансурановых элементов.

После создания ядерных реакторов с их помощью был осуществлен синтез  $^{239}\text{Pu}$  в количестве, достаточном для использования его в качестве исходного материала для накопления более тяжелых трансурановых элементов в ядерных реакторах. Этим методом удалось продвинуться до 100-го элемента — фермия. Однако продвижению в трансфермиевую область препятствует малое время жизни изотопа  $^{258}\text{Fm}$ , который, испытывая быстрое спонтанное деление, исключает образование  $\beta$ -неустойчивого изотопа  $^{259}\text{Fm}$ . Подробнее с этим вопросом можно ознакомиться в ряде обзоров и монографий.

Другим методом синтеза трансурановых элементов, который применяется в лабораториях, является облучение легкими заряженны-

ми частицами (протонами, дейтронами и  $\alpha$ -частицами) тяжелых мишеней, полученных из реактора. Это комбинированный метод, использующий ускорители и реакторы. Его роль была особенно большой при открытии изотопов и элементов вплоть до менделевия (101-й элемент).

Метод основан на ядерных реакциях типа  $(d, xn)$  и  $(\alpha, xn)$ . Захват тяжелым ядром-мишенью дейтрона или  $\alpha$ -частицы с энергией 20-40 МэВ, превышающей кулоновский барьер, приводит к образованию возбужденного составного ядра, которое "остывает", выбрасывая один или несколько нейтронов. В результате таких ядерных реакций образуется новое ядро с порядковым номером на одну или две единицы больше. Этим методом были получены последовательно трансурановые элементы до менделевия (101-го) включительно. В этой работе экспериментаторы впервые столкнулись с трудностью идентификации нового элемента по считанному числу атомов (всего в первых опытах было синтезировано 17 атомов 101-го элемента). Эта трудность стала затем характерной для всей трансфермиевой области.

По мере продвижения в область более тяжелых элементов стало очевидным, что и этот метод имеет предел, обусловленный недостаточностью достаточно тяжелых мишеней. Все попытки синтезировать более тяжелые элементы на ускорителях, а также в ядерных взрывах оказались безуспешными.

Для дальнейшего продвижения были нужны новые идеи, новые методы синтеза. Ускоренные тяжелые ионы могли позволить скачком, сразу на несколько единиц, увеличивать заряд (порядковый номер) ядра. Г.Н.Флеров, работавший тогда в Институте атомной энергии, сразу понял, что будущее трансурановых элементов связано с тяжелыми ионами, и сумел убедить в этом И.В.Курчатова. И, как в свое время при открытии спонтанного деления, Курчатов и Флеров решили, что нужно "бросить все и заниматься только этим".

Сначала находилось много скептиков. Не верили в возможность получения ионов с большим зарядом для эффективного ускорения — эта задача была решена в коллективе академика Л.А.Арцимовича в Институте атомной энергии. Авторитеты считали, что в циклотроне все ускоряемые ионы растворяются — слишком длинен путь ускорения. Г.Н.Флеров словом и делом убедил в обратном: в 1956 году в ИАЭ был ускорен пучок ионов кислорода, в миллионы раз более интенсивный, чем полученный до этого в Англии, затем углерода, азота. Были начаты опыты на пучках, в которых постепенно получили все трансурановые элементы, ранее синтезированные в реакторах. Затем перешли к опытам по синтезу 102-го элемента при облучении мишени из плутония ускоренными ионами кислорода. Работы проводились группой молодых физиков под руководством Г.Н.Флерова. Именно в этих работах были получены первые определенные данные о свойствах нового элемента — изотопа  $^{252}_{102}$ . Этим было экспериментально доказано, что с помощью тяжелых ионов можно получать нуклиды, которые нель-

зя синтезировать другими методами (в реакторах, на ускорителях легких частиц и т.д.). Идея выдержала испытание опытом.

Специализированный ускоритель тяжелых ионов было решено строить в Дубне. 1957 год считается годом рождения Лаборатории ядерных реакций: Д.И.Блохинцев, в то время директор ОИЯИ, подписал приказ о создании в Институте новой лаборатории. В течение трех лет ускоритель тяжелых ионов, крупнейший в мире циклотрон У-300, был разработан, создан и запущен.

В результате исследований с пучками тяжелых ионов, начатых 25 лет назад в ОИЯИ<sup>2/</sup>, а затем в США, Франции, ФРГ, возникло и развилось целое направление ядерной физики — физика тяжелых ионов. Синтезированы новые элементы, изучены механизмы реакций между сложными ядрами, открыты новые явления. Наши представления о ядрах, особенно тяжелых, существенно изменились. Однако со времени открытия вынужденного деления (О.Ган и Ф.Штрассман, 1939 г.) и спонтанного деления урана (Г.Н.Флеров, К.А.Петржак, 1940 г.), теоретических работ Н.Бора и Д.Уилера (1939 г.), Я.А.Френкеля (1939 г.) и до конца пятидесятых годов тяжелое делящееся ядро рассматривалось как бесструктурная жидкая капля с особыми ядерными свойствами, и на этой основе моделировались его характеристики в отношении деления, наблюдавшиеся в экспериментах (вероятность спонтанного деления, деления в ядерной реакции и т.д.).

Синтез новых элементов и изотопов, накопление и систематизация данных по их спонтанному делению постепенно меняли эту картину: обнаруживались отклонения от "жидкокапельных" свойств ядер. В систематиках периодов спонтанного деления (их зависимости от массового числа либо числа нейтронов в ядре) наблюдались скачки и изломы, в отличие от плавных монотонных изменений, соответствующих модели "жидкой капли". Этот факт свидетельствовал о важной роли внутренней структуры при делении и на основании общих соображений позволял предполагать, что времена жизни последующих трансурановых элементов могут оказаться существенно выше ожидавшихся. На этой основе было выбрано направление исследований по дальнейшему синтезу и изучению свойств тяжелых трансурановых элементов, направление, как мы увидим далее, весьма плодотворное.

Традиционно синтез новых элементов, идентификация и изучение их физических свойств сопровождалось химическими исследованиями. Однако систематическое уменьшение времени жизни более тяжелых ядер и сечений их образования в реакциях синтеза (в опытах приходилось иметь дело со считанными атомами) заставили смотреть на дело иначе. К тому же спонтанное деление приобретало всевозрастающую роль в распаде более тяжелых ядер. В этих условиях наиболее эффективным способом обнаружения и идентификации новых ядер является регистрация их спонтанного деления. Поэтому была разработана и создана высоконадежная и практически бесфоновая аппаратура для син-



теза и изучения свойств новых трансурановых элементов по спонтанному делению.

Работы по синтезу новых элементов ведутся в Лаборатории ядерных реакций со дня ее основания. Систематические опыты по синтезу 104-го были начаты сразу после пуска циклотрона У-300. Эту первую задачу, поставленную Г.Н.Флеровым перед коллективом ЛЯР, Д.И.Блохинцев назвал "дипломной работой" молодой лаборатории.

Здесь совпало по времени много нового: новая лаборатория, новый коллектив, новый ускоритель тяжелых ионов У-300, новая экспериментальная аппаратура. Естественно, в работе было много трудностей: все новое как раз создавалось, формировалось, становилось.

При всяком поиске чего-то нового необходимо выбрать направление поиска, и это очень важный момент. В нашем случае нужно было выбрать реакцию синтеза, оценить ее вероятность. Получить хоть какое-то представление об ожидаемых свойствах 104-го — способах распада, времени жизни и на этой основе выбрать метод регистрации, сконструировать и изготовить экспериментальную установку. Наиболее неясным был вопрос о времени жизни.

В физике ядра нет строгой теории. Есть модельные представления, годные в ограниченном диапазоне параметров, и приемы их экстраполяции в неисследованную область. Для делящихся ядер моделью была жидкая капля, но тут оценки для  $T_{1/2}$  104-го давали  $10^{-18}$  с. Другая возможность — экстраполяция эмпирической систематики периодов полураспада трансурановых элементов относительно спонтанного деления, и это оказалось более обоснованным. Прямая экстраполяция давала для изотопов 104-го элемента значение  $T_{1/2} = 10^{-7}$  с и меньше. Однако, принимая во внимание существенную стабилизирующую роль внутренней структуры ядра, мы сочли эти оценки безусловными и, вопреки пессимистическим предсказаниям, решили начать поиск в области долей секунды. Поэтому экспериментальная установка была рассчитана на регистрацию редких событий спонтанного деления 104-го элемента за время от миллисекунд и выше с момента ядерной реакции синтеза.

Начались опыты. Изучалась реакция



в которой суммарное (составное) ядро  ${}_{104}^{264}$ , возникающее в реакции, возбуждено, испускает 4 нейтрона и переходит в ядро  ${}_{104}^{260}$ , находящееся в основном (невозбужденном) состоянии.

После упорной борьбы с помехами в регистрирующей аппаратуре среди продуктов ядерных реакций был обнаружен спонтанно делящийся излучатель с  $T_{1/2} = 0,014$  с. Немедленно были сделаны контрольные опыты: изучены близкие реакции, не приводящие к суммарному значению заряда ядра  $Z = 104$ ; сделаны экспериментальные оцен-

ки кинетической энергии и угловых распределений делящихся ядер. Данные этих опытов показали, что в реакциях с тяжелыми ионами новый излучатель образуется не при полном слиянии сталкивающихся ядер, а в результате передачи лишь нескольких нуклонов. Значит, это не 104-й, а ядро более легкого элемента. Перекрестные реакции с  $\alpha$ -частицами, дейтронами, наконец, нейтронами позволили идентифицировать это ядро. Оказалось, что это ядро  $^{242}\text{Am}$ .

Итак, наблюдается не новый элемент, а новое свойство известных тяжелых ядер. Внешне оно проявляется в существовании у одного ядра двух (или более) сильно различающихся периодов спонтанного деления. В данном случае это было ядро  $^{242}\text{Am}$ ; впоследствии таких ядер было обнаружено и изучено несколько десятков среди изотопов  $\text{U} \div \text{Cf}$  <sup>13/</sup>.

Но почему деление этого "странного" ядра ускорено более чем в  $10^{20}$  раз по отношению к нормальным ядрам америция? Возбужденное состояние, изомер? В пороговых реакциях  $^{243}\text{Am}(n,2n) \ ^{242,242f}\text{Am}$  была определена его энергия по отношению к основному состоянию: 2,9 МэВ. Стала качественно понятна повышенная делимость, но возник другой парадокс: столь высоколежащее состояние в ядре не может жить так долго —  $10^{-2}$  с! Оно обязано за время  $\sim 10^{-12}$  с испустить серию гамма-квантов и перейти в основное состояние. Что же его удерживает? Возможно, какие-то необычные "запреты", связанные с глубокой внутренней перестройкой, высоким спином и т.д. В этом случае выход излучателя должен очень резко зависеть от условий реакции, квантовых характеристик начальных и возникающих в реакции возбужденных ядер. Но этого не наблюдалось. И в простых, и в сложных реакциях относительный выход оставался неизменным.

Никакие существовавшие тогда теории атомного ядра не могли объяснить этого явления. Г.Н.Флеров интуитивно понял, что открытое явление — новый вид ядерной изомерии, также обусловленный влиянием внутренней структуры ядра, но совершенно особый, проявляющийся в делении. Вместе с О.Бором он выдвинул <sup>14/</sup> гипотезу об изомерии формы, то есть о существовании у делящихся ядер долгоживущих состояний со значительной деформацией.

Эта идея нашла подтверждение в теоретических работах В.М.Струтинского, впервые получившего расчетным путем сложную структуру барьеров деления с промежуточными минимумами потенциальной энергии деформации ядра при делении. Стационарные состояния во вторичных минимумах и были теми самыми "делящимися изомерами формы", а внутренний пик двугорбого барьера деления препятствовал гамма-распаду. Вывод этот был в скором времени подтвержден в многочисленных экспериментальных и теоретических работах.

Важнейшим следствием этого открытия было экспериментальное обнаружение существенной роли внутренней структуры тяжелых ядер в формировании барьера спонтанного деления. На теоретических расче-

тах, учитывающих такие эффекты, основаны в настоящее время оценки свойств тяжелых и сверхтяжелых трансурановых элементов.

Делящиеся изомеры образуются путем реакций передачи нуклонов (эти реакции всегда сопровождают любую реакцию полного слияния двух сталкивающихся ядер) с относительно большим выходом и временами жизни, лежащими в широких пределах от  $10^{-2}$  до  $10^{-10}$  с. Поэтому их распад создает фон при регистрации спонтанного деления синтезируемых трансурановых элементов. С этим фоном пришлось бороться, и это обстоятельство сильно осложнило задачу синтеза и идентификации новых ядер и задержало синтез 104-го элемента, но ненадолго. Была создана еще более чувствительная и более избирательная аппаратура, и в 1964 г. физики получили первые определенные указания на образование 104-го элемента с массовым числом 259-260 и временем жизни порядка секунды — долей секунды.

Периодический закон Менделеева предсказывал, что, начиная со 104-го, химические свойства трансурановых элементов должны резко изменяться, отличаясь от свойств предыдущих актиноидов. Это повышало надежность и ценность химической идентификации. Поэтому, несмотря на короткое время жизни, была сделана попытка вернуться к химии, хотя и несколько необычной. Была разработана быстродействующая методика с применением газовой химии, а установка отлажена с помощью радиоизотопов гафния, химического аналога будущего 104-го.

Опыты с газовой химией позволили окончательно идентифицировать новый элемент, показав, что его химические свойства действительно аналогичны свойствам гафния и в таблице элементов Менделеева он должен занимать место с номером 104<sup>5,6/</sup>. Таким образом, было показано, что, действительно, как мы и надеялись, время жизни 104-го элемента существенно отличается от результатов экстраполяции (см. выше). Новый элемент, первый трансактиноид, был назван "курчатовием" (Ku) в честь Игоря Васильевича Курчатова.

Созданная методика, физическая и химическая, позволяла синтезировать и более тяжелые элементы. Например, 105-й элемент — нильсборий был получен при замене ядра-мишени  $^{242}\text{Pu}$  на  $^{243}\text{Am}$ <sup>5,6/</sup>. В дальнейшем мы неоднократно возвращались к свойствам курчатовия.

Приблизительно в то же время в ЛЯР был окончательно идентифицирован 102-й элемент, а впоследствии были получены 103-й и многочисленные изотопы 102-го ÷ 105-го элементов как в Дубне, так и в Беркли.

То обстоятельство, что изотоп  $^{260}\text{Ku}$  оказался в действительности существенно стабильнее, чем предсказывали экстраполяции, давало надежду, что изотопы следующих, более тяжелых элементов окажутся

достаточно долгоживущими для экспериментального изучения. Остался, однако, неясным вопрос выбора реакций синтеза.

Традиционно экспериментаторы стремились использовать для целей синтеза мишень из наиболее тяжелого из доступных элементов и изотопов и соответствующий вид тяжелых ионов. Физики в Беркли располагали несколько более "тяжелыми" мишенями, Дубна имела преимущество в интенсивностях пучков и в наборе ускоряемых тяжелых ионов. Однако общей особенностью всех реакций при таком подходе было быстрое (почти экспоненциальное) уменьшение вероятности синтеза при переходе к более тяжелым синтезируемым ядрам. Принципиальная причина этого явления — быстро возрастающая делимость более тяжелых ядер, особенно в возбужденном состоянии. Правда, группа в Дубне имела то преимущество, что для идентификации новых элементов она использовала методы, основанные на регистрации актов спонтанного деления. (В Беркли использовался  $\alpha$ -распад). Аппаратура, основанная на этом принципе, как уже говорилось, весьма чувствительна и практически не имеет нефизического фона, что является определяющим при регистрации очень редких событий распада. Тем не менее к 1973 г. на синтезе 105-го элемента традиционный метод практически исчерпал себя. Нужен был новый подход к проблеме реакций синтеза.

Решение проблемы было найдено одним из авторов (Ю.Ц.О.), предложившим использовать так называемые "реакции холодного синтеза" <sup>7/</sup>. Дело в том, что в ходе реакции синтеза вероятность образования конечного ядра в основном состоянии определяется вероятностью слияния двух исходных ядер и "выживаемостью" промежуточного возбужденного ядра относительно разделения на два осколка. "Выживаемость" определяется энергией возбуждения. Чем больше энергия возбуждения, тем выше делимость, т.е. отношение вероятности разделиться к вероятности испустить нейтрон, сохранив суммарный заряд (номер элемента). Кроме того, при большей энергии возбуждения ядро должно испустить больше нейтронов, чтобы "остыть", и тогда конкуренция деления происходит многократно. Поэтому реакцию синтеза следует выбирать так, чтобы энергия возбуждения промежуточного ядра была минимальной. Реакции такого типа получили название "холодных" реакций.

Конечно, не было ясно априори, насколько может быть эффективным такой выбор. Ответ на этот вопрос дал эксперимент <sup>7/</sup>. Было показано, что, например, реакции  $^{208}\text{Pb}(^{40}\text{Ar}, xn)^{248-x}\text{Fm}$ , где минимальная энергия возбуждения промежуточного ядра составляет всего 26 МэВ, идут с достаточно большой вероятностью, несмотря на то, что ядра изотопов Fm обладают высокой делимостью, особенно в возбужденном состоянии. Дело в том, что при слиянии двух "магических"

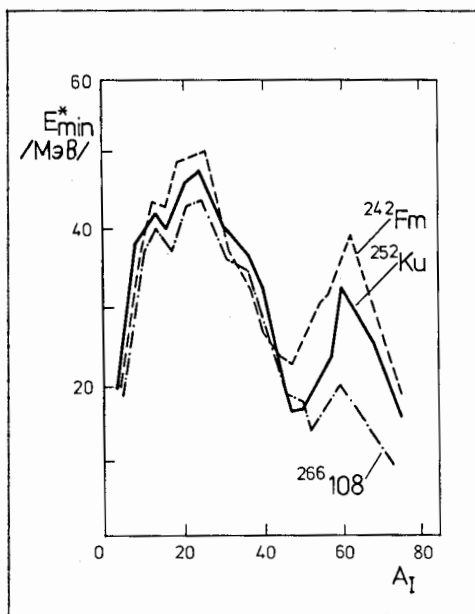


Рис.1. Зависимость минимальной энергии возбуждения составных ядер трансурановых элементов, образующихся в различных комбинациях мишень-частица, от массы бомбардирующего иона <sup>11/</sup>.

ядер \* <sup>208</sup>Pb и <sup>40</sup>Ar образуется сравнительно неплотная система нуклонов <sup>248</sup>Fm. При этом кинетическая энергия сталкивающихся ядер в значительной степени идет на изменение структуры, так что на долю внутренней энергии возбуждения остается небольшая часть полной энергии реакции. Это обстоятельство отражено на рис.1, иллюстрирующем также способ выбора оптимальной реакции синтеза изотопов Fm и Ku.

Новый метод синтеза открыл дорогу к 106-му и более тяжелым элементам, однако для этого идею нужно было опять воплотить в технические решения. Если, например, использовать в качестве мишени дважды магические ядра <sup>208</sup>Pb ( $Z = 82$ ), то для синтеза 106-го элемента нужны ускоренные ионы хрома ( $Z = 24$ ). Поэтому необходимо было ускорить ионы металлов, таких, как Ca, Ti, Cr, Mn, Fe, Ni и т.д., причем определенных их изотопов.

Проблемой являлось получение ускоренных многозарядных ионов металлов, так как ранее циклотронные источники ионов работали лишь на газообразном "топливе". Проблемой было получение самих изотопов ускоряемых элементов — некоторые из них содержатся в естественной смеси в долях процента. Здесь неоценимую помощь нашей лаборатории оказали Государственный комитет СССР по использованию атомной энергии и Госфонд стабильных изотопов СССР, за что мы им чрезвычайно признательны.

Проблему же ускорения ионов элементов, находящихся в твердом состоянии, пришлось решать самим. В Лаборатории ядерных реакций был разработан и создан новый тип источника многозарядных ионов с рабочим веществом в твердом состоянии <sup>18/</sup>. В отличие от источ-

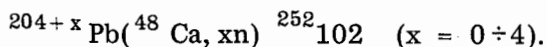
\* Подобно оболочечной структуре в системе атомных электронов, нашедшей свое отражение в периодичности химических свойств элементов и существовании периодической системы Менделеева, в ядрах также существует система оболочек для нуклонов. Ядра с замкнутыми оболочками протонов или нейтронов наиболее плотно упакованы и называются "магическими".

ника с газом, новый источник имеет в плазменной камере дополнительный третий электрод, содержащий рабочее вещество. Для изготовления и крепления электродов была разработана специальная технология, обеспечивающая механическую и термическую прочность при использовании рабочего вещества в виде металлов, окислов, солей и т.д. Новая конструкция и новые режимы работы источника обеспечивали высокий выход многозарядных ионов и чрезвычайно экономное расходование дорогостоящих разделенных изотопов. Была предусмотрена также возможность сбора и многократной регенерации рабочего вещества. Таким образом, была создана принципиальная возможность ускорять ионы практически любого элемента таблицы Менделеева.

Эти достижения позволили расширить исследования на всех направлениях физики тяжелых ионов, включая прикладные задачи, и результаты их трудно переоценить. Теперь во всех ядерных лабораториях мира, имеющих ускорители тяжелых ионов, используется этот принцип ионизации атомов.

Сразу после ввода в строй твердотельного источника ионов были ускорены ионы  $^{48}\text{Ca}$  — самого экзотического ядра таблицы изотопов. Это ядро содержит на 8 нейтронов больше, чем дважды "магическое" ядро  $^{40}\text{Ca}$ , и само является дважды "магическим", а естественное содержание его в смеси изотопов составляет всего 0,19%. В реакциях с таким экзотическим ионом следовало ожидать не менее экзотических результатов. И надежды оправдались.

Как пример "холодной" реакции был изучен синтез известного изотопа 102-го элемента с мишенями из разделенных изотопов свинца:



При этом, в случае  $^{208}\text{Pb}$ , энергия возбуждения суммарного ядра, возникающего в реакции слияния, всего 18 МэВ! Оказалось, что, например, реакция с вылетом двух нейтронов ( $x = 2$ ) в 40 раз более вероятна, чем реакции с ионами  $^{18}\text{O}$  и  $^{22}\text{Ne}$ , приводящие к тому же продукту.

Теперь стало ясно, что выбранное направление перспективно, и можно было двигаться по пути увеличения массы и заряда ионов, с тем чтобы синтезировать более тяжелые элементы. Однако возможности У-300 были на пределе.

Для расширения диапазона ускоряемых ионов в сторону больших масс и повышения интенсивности пучков в ЛЯР был разработан и создан новый, самый мощный в мире циклический ускоритель тяжелых ионов У-400 с диаметром полюсов 4 м<sup>19</sup>. Он способен ускорять ионы с массой до 100 атомных единиц; интенсивности пучков составляют десятки и сотни микроампер.

С помощью "холодных" реакций в короткий срок в Дубне было синтезировано 5 изотопов Ку. Детальные исследования их свойств

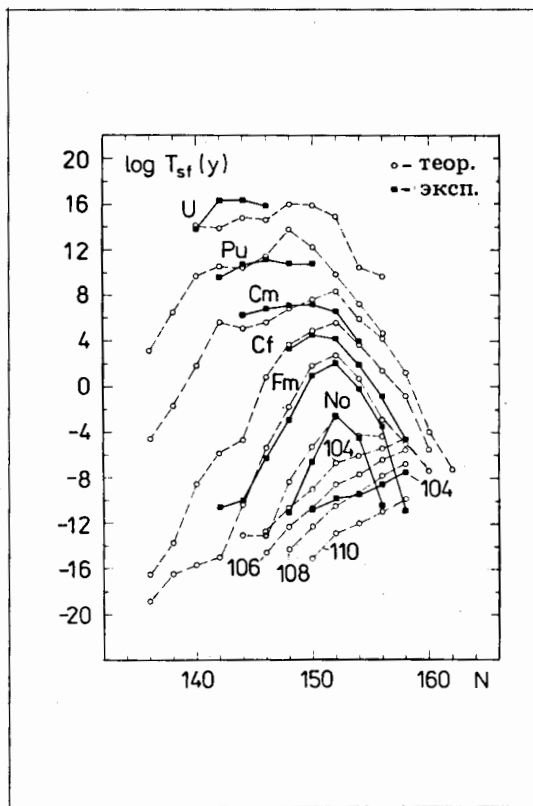


Рис.2. Систематика периодов спонтанного деления четно-четных ядер тяжелых элементов (периоды полураспада в зависимости от числа нейтронов в ядре). На примере изотопов Cm-No хорошо проявляется стабилизирующее влияние нейтронной оболочки  $N = 152$  (см. примечание на с. 212). В то же время видно, что вероятности спонтанного деления изотопов Ku (эксперимент и теория) и более тяжелых элементов (теория) подчиняются совершенно иной закономерности  $^{11}/$ .

позволили составить принципиально новую систематику периодов спонтанного деления тяжелых трансурановых элементов  $^{10}/$  (рис.2).

Из рисунка видно, что периоды спонтанного деления изотопов курчатовия подчиняются совершенно новой закономерности, а изотоп  $^{260}\text{Ku}$

оказался даже более устойчивым, чем изотоп 102-го элемента с тем же числом нейтронов. Это противоречило привычным представлениям о делимости тяжелых ядер, однако и это обстоятельство, и весь необычный ход зависимости  $T_{SF}(N)$  для изотопов курчатовия были поняты и объяснены специфическим влиянием внутренней структуры ядра на форму барьеров деления  $^{10}/$ . На рис.2 показаны последние теоретические оценки периодов спонтанного деления ядер в трансурановой области.

К настоящему времени известно 10 изотопов курчатовия. Их времена жизни лежат в интервале от 0,5 мс (массовое число 254) до 65 с (массовое число 261).

Далее в Дубне были начаты опыты по синтезу более тяжелых элементов в "холодных" реакциях и получены новые результаты по 106-му и 107-му элементам. Спустя пять лет после его разработки в Дубне метод "холодного" синтеза был принят в зарубежных ядерных центрах, прежде всего в Дармштадте. При облучении мишеней из Pb, Bi ускоренными ионами Cr, Mn, Fe в сравнительно короткий срок были получены 3 изотопа 106-го элемента, 2 изотопа 107-го, 3 изотопа 108-го, 1 изотоп 109-го. К настоящему времени, в итоге десятилетней работы, удалось вплотную подойти к синтезу 110-го элемента.

В результате этих исследований выяснилось, что экспериментально обнаруженная на примере курчатовия дополнительная устойчивость тяжелых ядер в отношении спонтанного деления простирается и дальше. Даже в четно-четных изотопах 106-го и 108-го элементов, где жидкокапельный барьер деления практически отсутствует и устойчивость к делению определяется структурными эффектами, альфа-распад успешно конкурирует со спонтанным делением. Стало ясно, что необычные свойства изотопов курчатовия — не исключение, а новая закономерность в свойствах ядер трансурановых элементов.

Но даже и в "холодном" синтезе сечения реакций полного слияния падают для более тяжелых элементов. В Дубне проведено систематическое изучение сечений реакций, ведущих к наиболее тяжелым ядрам. На основании полученных результатов мы ожидали, что для следующего, 110-го элемента сечения реакций синтеза будут чрезвычайно малы. В Дармштадте была сделана попытка обнаружить его с временами жизни вплоть до  $10^{-6}$  с и получен отрицательный результат.

Работы по 109-110 элементам подвели нас вплотную к задаче синтеза сверхтяжелых ядер. Собственно говоря, мы уже достигли берегов "острова стабильности", так как расчетные предсказания области сверхтяжелых ядер охватывают диапазон  $Z = 110-126$ . Естественно, нетерпение исследователей найти ответ на вопрос: есть сверхтяжелые или нет? — приводит к постановке длительных, напряженных экспериментов. Однако попытки синтезировать элементы 110-114 на ускорителях пока не дали положительных результатов.

Раньше мы отмечали две возможные причины: либо периоды полураспада синтезируемых ядер так малы, что лежат за пределами возможностей используемой экспериментальной аппаратуры, либо слишком малы вероятности доступных на ускорителях реакций. Однако теперь положение стало более определенным.

Существовавшие лишь в теории (точнее, даже не в теории, а в полумпирических модельных представлениях) структурные эффекты, определяющие свойства самых тяжелых ядер, получили экспериментальное подтверждение. Более того, их влияние оказалось решающим в отношении способности к спонтанному делению — фундаментальному свойству ядра, которое определяет границу периодической системы со стороны тяжелых ядер. Поскольку причины дополнительной устойчивости далеких трансурановых элементов качественно те же, что обуславливают, пока, правда, в теории, существование гипотетических сверхтяжелых ядер, успехи, достигнутые в синтезе далеких трансурановых элементов, делают попытки синтеза сверхтяжелых ядер более оптимистическими в отношении их времени жизни.

Тогда центр тяжести проблемы смещается: большего внимания требует другой ее аспект — эффективность искусственного синтеза. Здесь нам необходимо достичь более глубокого понимания процесса крупномасштабной перестройки ядер при слиянии с участием кулонов-



ских и ядерных сил, которая должна привести к рождению сверхтяжелого ядра. Многие проблемные стороны реакции синтеза проявляются в широком круге исследований, которыми занимаются многие группы, оснащенные первоклассной методикой. Однако истинное понимание придет, по-видимому, позднее, и мы надеемся, что это будет более глубокое понимание как свойств ядер, так и процесса их фундаментальной перестройки.

На этом пути понадобятся новые идеи, новые гипотезы, новые экспериментальные установки, новые ускорители. Сегодня в Лаборатории ядерных реакций "лидер" — циклотрон У-400, способный ускорять ионы с массой до 100 атомных единиц. Наше завтра — ускорительный комплекс У-400 — У-400М, ионы практически всех элементов таблицы Менделеева, новая область энергий.

Таким образом, в результате экспериментов по синтезу трансуранных элементов в реакциях с тяжелыми ионами значительно расширилась область известных элементов и изотопов конца периодической таблицы Менделеева. Существенно изменились наши представления об их свойствах и прежде всего о природе и свойствах барьера деления, благодаря чему открыта новая область исследований в физике тяжелых ионов. Это — успех всего направления ядерной физики, о котором идет речь — физики тяжелых ионов. Эта область ядерной науки широко развивается как в фундаментальных, так и прикладных аспектах и в настоящее время занимает существенное место в программах исследований крупных научных центров США, ФРГ, Франции, Китая. В недалеком будущем исследования, проводимые более широким фронтом, позволят, по нашему мнению, дать более определенный ответ на вопрос о принципиальной возможности искусственного синтеза сверхтяжелых ядер.

Не исключено, что периоды полураспада более тяжелых изотопов сверхтяжелых элементов, синтез которых вообще невозможен на ускорителях, в действительности велики и сравнимы с возрастом Солнечной системы, и в других реакциях, имевших место при нуклеосинтезе и нам пока недоступных, вероятности их образования значительны. Поэтому, безусловно, следует продолжить работы по поиску сверхтяжелых элементов в земной коре и космических объектах.

Если какая-либо отрасль науки интенсивно и плодотворно развивается, ее конкретные разработки всегда оригинальны, уникальны, выполнены на основе новейших достижений в смежных областях науки и техники. На них затрачиваются большие материальные и человеческие ресурсы, и стоимость их, как правило, чрезвычайно высока. В отличие от промышленных разработок они не рассчитаны на непосредственный экономический эффект. Но возможности их использования велики, правда, в своей узкой области. Известно, что даже небольшая доля научных разработок, внедренная в народное хозяйство, приносит науке

”сегодняшнюю” окупаемость. Поэтому очень важно искать и находить применение научно-технических достижений (разработок) в смежных областях.

Работа нашей лаборатории на переднем крае ядерной физики наших дней вызвала к жизни целый ряд предельно чувствительных и экспрессных экспериментальных методов: элементного и изотопного анализа, регистрации излучений, техники получения и ускорения ионов, изучения взаимодействия ионов с веществом. На этой основе были широко развернуты прикладные исследования, результаты которых уже сегодня находят применение в народном хозяйстве стран-участниц ОИЯИ. Разработки методов анализа продуктов реакций и примесей в мишенях позволили развить методы активационного анализа состава вещества на основе рентгеновского, нейтронного и  $\gamma$ -излучений. Эти методы нашли широкое применение в геологии, биологии, сельском хозяйстве, экологии, промышленности.

Развитие экспериментальной техники регистрации редких событий спонтанного деления с помощью твердотельных трековых детекторов привело к созданию в нашей лаборатории пористых мембран — так называемых ядерных фильтров, находящих все более широкое применение в медицине, биологии, в технологии особо чистых веществ и т.д.

Изучение проблемы радиационной стойкости мишеней под воздействием интенсивных пучков тяжелых ионов в опытах по синтезу трансурановых элементов дало основу для развития радиационного материаловедения.

На основе микротронной техники получения интенсивных потоков  $\gamma$ -квантов, развитой в лаборатории для исследования структуры барьеров деления трансурановых элементов, отработана технология получения радиоизотопов для медицины (йода, индия и др.).

Успехи в развитии техники получения и ускорения многозарядных ионов позволили создать основы технологии ионной имплантации для целенаправленного и контролируемого изменения свойств полупроводников, тонких пленок, поверхностей, оптических сред и т.д.

В настоящее время в Лаборатории ядерных реакций изучаются новые перспективные направления развития физики тяжелых ионов и использования ядерно-физических методов в народном хозяйстве.

### *Литература*

1. McMillan E.M., Abelson P.H. Phys.Rev., 1940, 57, p.1185.
2. Flerov G.N., Ter-Akopian G.M. Studies of Induced and Natural Radioactivity on Heavy Ion Beams at Dubna. A Talk given at the Int. Symp. on Social and Cultural Problems of the Development of Science and Civilization, held from May 31 to June 2, 1984 in Lublin, Poland; JINR, E7-85-5, Dubna, 1985.

3. Flerov G.N. et al. In: Proc. 3rd Conf. on Reactions Between Complex Nuclei. Asilomar, California, 1963. (Ed. by A.Ghiorso, R.M.Diamond and H.E.Conzett). Univ.Calif.Press, Berkeley and Los Angeles, 1963, p.219.
4. Флеров Г.Н., Друин В.А. Структура сложных ядер. Атомиздат, М., 1966, с.269.
5. Флеров Г.Н. и др. В сб.: Труды Международной конференции по физике тяжелых ионов. ОИЯИ, Д7-5769, Дубна, 1971, с.125.
6. Звара И. Там же, с.145.
7. Оганесян Ю.Ц. и др. ОИЯИ, Д7-8194, Дубна, 1974; Oganessian Yu.Ts. et al. Nucl.Phys., 1975, A239, p.353.
8. Третьяков Ю.П., Пасюк А.С. В сб.: Труды IV Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. "Наука", М., 1975, т.2, с.43; Кутнер В.Б. и др. ОИЯИ, Р7-85-362, Дубна, 1985.
9. Флеров Г.Н. и др. В сб.: Труды VII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. ОИЯИ, Дубна, 1982, т.1.
10. Оганесян Ю.Ц. и др. ОИЯИ, Д7-8224, Дубна, 1974; Oganessian Yu.Ts. et al. Nucl.Phys., 1975, A239, p.157.
11. Oganessian Yu.Ts., Lazarev Yu.A. In: Treatise on Heavy Ion Science. (Ed. by D.A.Bromley). Plenum Press, New York, 1984, vol.4, ch.1, p.3.

ПОЛУЧЕНИЕ ЯДЕР ЛЕГЧАЙШИХ ЭЛЕМЕНТОВ,  
РАСПОЛОЖЕННЫХ ВБЛИЗИ ГРАНИЦ  
ЯДЕРНОЙ СТАБИЛЬНОСТИ, В РЕАКЦИЯХ  
С ТЯЖЕЛЫМИ ИОНАМИ

*Ю.Э.ПЕНИОНЖКЕВИЧ, доктор физико-математических наук*

Одной из наиболее важных и интенсивно развиваемых задач современной ядерной физики является синтез новых ядер. Первый эксперимент по искусственному синтезу не существующего в природе радиоактивного изотопа был осуществлен в лабораторных условиях более 50 лет назад Ирен и Фредериком Жолио-Кюри, получившими  $\beta$ -радиоактивное ядро  $^{30}\text{P}$  в реакции  $^{27}\text{Al}(\alpha, n)$ . В дальнейшем, по мере развития ядерной техники, для получения новых радиоактивных изотопов и элементов начали использоваться интенсивные пучки ускорителей заряженных частиц вплоть до релятивистских энергий, нейтронные потоки мощных реакторов и ядерных взрывов, тормозное  $\gamma$ -излучение ускорителей электронов, интенсивные потоки  $\pi$ -мезонов. В настоящее время известно около 2000 радиоактивных изотопов существующих и не существующих в природе элементов. Многие из этих изотопов производятся в больших количествах в промышленном масштабе. Однако задача синтеза новых радиоактивных изотопов далеко еще не исчерпана, так как согласно существующим оценкам число ядерно-стабильных изотопов достигает  $\sim 5000$ . Данная цифра может быть недостаточно точной, так как границы нуклонной стабильности ядер, то есть их устойчивости к распаду с испусканием протонов и нейтронов, пока экспериментально не определены. Изучение свойств нуклидов, расположенных вблизи границ стабильности, дает возможность исследовать ядерную материю в экстремальных состояниях, при которых проявляются ее новые свойства, в том числе новые виды радиоактивного распада, и получать экспериментальную информацию для проверки тех или иных модельных представлений о структуре ядра, на основе которых делается предсказание свойств ядер в различных областях масс. Проблема исследования свойств ядер вблизи границ ядерной стабильности имеет большое значение не только для ядерной физики, но и для расширения нашего познания макромира. Так, получение и изучение свойств так называемых нейтронных ядер ( $^6\text{n}$ ,  $^6\text{H}$ ,  $^{10}\text{He}$ )

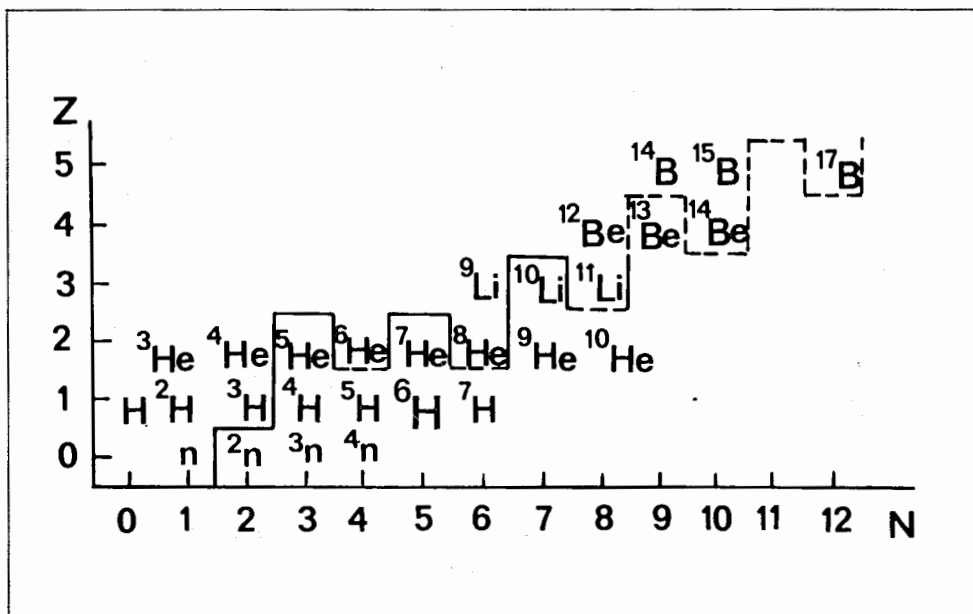


Рис.1

позволяет получить информацию и моделировать процессы, происходящие во Вселенной.

В связи с этими проблемами большой интерес представляет синтез и изучение свойств нейтронообогащенных ядер легчайших элементов, где граница ядерной стабильности практически уже достигнута. На рис.1 представлена экспериментально определенная линия стабильности нейтроноизбыточных ядер легчайших элементов. Вопрос о стабильности некоторых нейтроноизбыточных ядер легчайших элементов до сих пор не решен однозначно. В частности, это относится к нуклиду  $^{10}\text{He}$ , стабильность которого уже более 15 лет исследуется теоретически и экспериментально. В теоретических работах было показано, что устойчивость этого ядра относительно распада  $^{10}\text{He} \rightarrow ^8\text{He} + 2n$  существенно зависит от центрального потенциала взаимодействия двух нуклидов. Форма и величина этого потенциала определяется неточно, а его небольшое изменение, не противоречащее данным по NN-рассеянию, может приводить при расчетах к устойчивости не только ядер  $^{10}\text{He}$ , но и более тяжелых изотопов гелия. Из этого примера видно, что теоретические оценки и экстраполяции на основе экспериментальных данных могут давать различные значения масс ядер в области легких ядер и неоднозначно определять границу ядерной стабильности. Ответ на вопрос о стабильности этих ядер может дать только эксперимент. Однако здесь имеются принципиальные трудности, связанные с проблемой синтеза ядер вблизи границ стабильности в ядерных реакциях, ввиду

малого сечения их образования в большинстве используемых для этих целей ядерных реакций. Большой прогресс в этом направлении был достигнут с использованием интенсивных пучков ускоренных тяжелых ионов для синтеза новых нейтроноизбыточных изотопов легчайших элементов. Первые эксперименты, проведенные в 1969 году в Лаборатории ядерных реакций, позволили получить около 30 новых изотопов. В этих опытах использовались реакции многонуклонных передач под действием ускоренных ионов  $^{15}\text{N}$ ,  $^{18}\text{O}$ ,  $^{22}\text{Ne}$ ,  $^{40}\text{Ar}$  [1]. Было показано, что сечение образования различных изотопов в этих реакциях является функцией величины  $Q$  реакции (разности масс ядер во входном и выходном канале реакции). Между тем дальнейшее продвижение к области нуклонной стабильности ядер с помощью реакций многонуклонных передач оказалось менее эффективным. Определенные экспериментально верхние границы сечения образования слабосвязанных ядер  $^{11}\text{Li}$  ( $B_{2n} = 0,16$  МэВ) и  $^{14}\text{Be}$  ( $B_{2n} = 0,21$  МэВ) в этих реакциях оказались намного ниже того, что ожидалось из экстраполяции по выходам остальных изотопов лития и бериллия с использованием зависимости от величины  $Q$  реакции. Таким образом, сечение образования слабосвязанных ядер в реакциях многонуклонных передач оказалось значительно ниже ожидаемого, что можно было объяснить передачей образующимся продуктам реакции относительно высокой (большей, чем энергия связи нуклонов в ядре) энергии возбуждения.

Большой интерес для получения "холодных" ядер вблизи границ нуклонной стабильности представляют прямые реакции, протекающие при взаимодействии тяжелых ионов с энергией  $\sim 10$  МэВ/нуклон с ядрами мишени. К таким реакциям прежде всего относятся реакции, сопровождающиеся вылетом высокоэнергетических частиц и ядер. Исследованию механизма этих реакций посвящено большое количество экспериментальных и теоретических работ. Интересные результаты при изучении эмиссии высокоэнергетических частиц в реакциях с тяжелыми ионами были получены в Лаборатории ядерных реакций. В экспериментах использовался магнитный спектрометр, располагавшийся под углом  $0^\circ$ , с системой ( $\Delta E \times E$ )-детекторов. Спектрометр с системой регистрации позволял с высокой чувствительностью (вплоть до  $10^{-7}$  мб/ср) надежно выделять и идентифицировать продукты ядерных реакций. При энергиях бомбардирующих ионов  $7-10$  МэВ/нуклон в выходном канале реакции под углом  $0^\circ$  по отношению к направлению пучка наблюдались  $\alpha$ -частицы с энергией до  $30$  МэВ/нуклон и более. Измерения энергетических спектров  $\alpha$ -частиц показали, что их граничная энергия практически достигает максимально возможной для данной реакции энергии, так называемого кинематического предела. Было обнаружено также, что для всех исследованных реакций с относительно большой вероятностью наблюдается вылет и других легких заряженных частиц и ядер ( $^{1,2,3}\text{H}$ ,  $^{3,4,6,8}\text{He}$ ,  $^{6,7,8}\text{Li}$ ,  $^{7,9}\text{Be}$  и др.) со скоростями, в несколько раз превышающими скорость бомбардирующих ионов

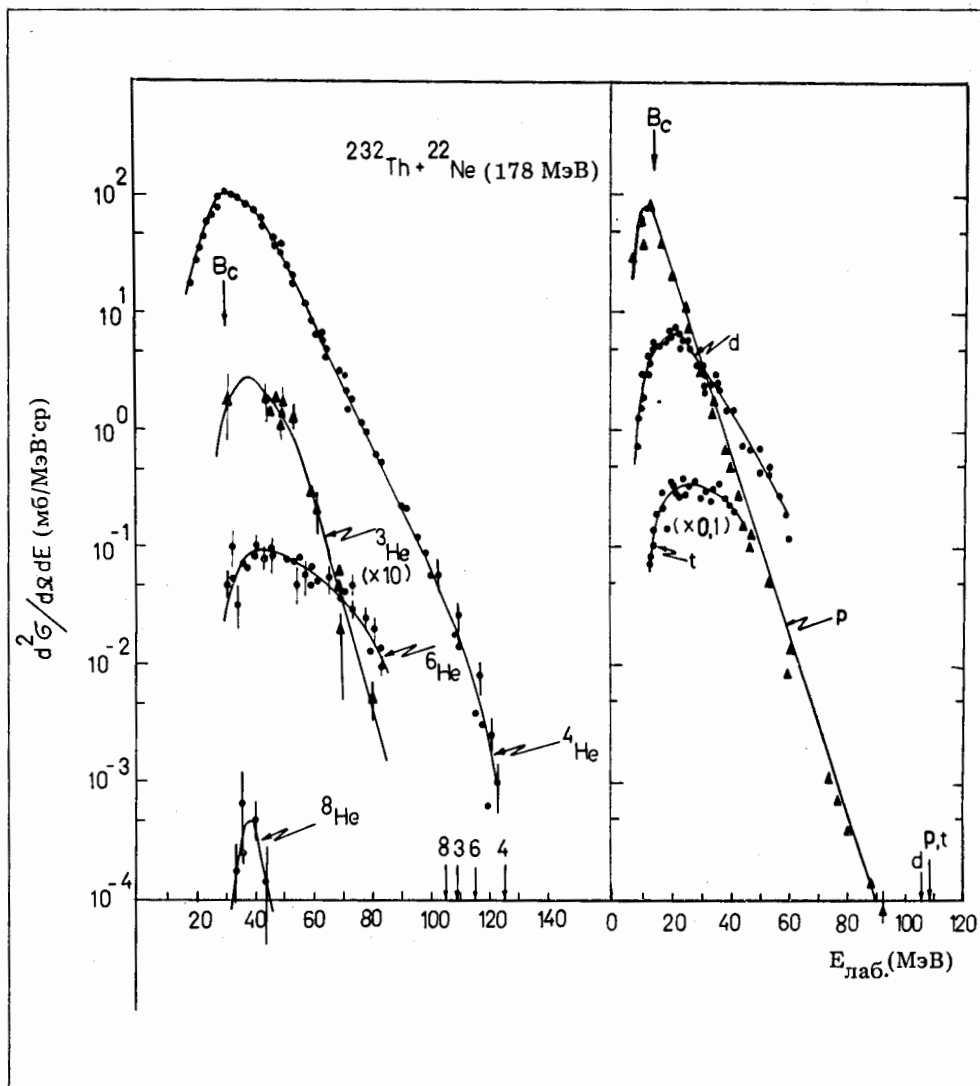


Рис.2

(см. рис.2). Максимальная энергия наблюдаемых частиц соответствует практически полной передаче импульса налетающего иона частице. Таким образом, вылет частиц с максимально возможными энергиями должен приводить к образованию двух "холодных ядер". Реакции с вылетом быстрых заряженных частиц были использованы для получения ядер  $^{10}\text{He}$ . На основании измерения выходов изотопов  $^8\text{He}$  в различных реакциях было показано, что в реакции  $^{232}\text{Th} + ^{11}\text{B}$  он наибольший. Экстраполяция данных по сечениям образования легких изотопов

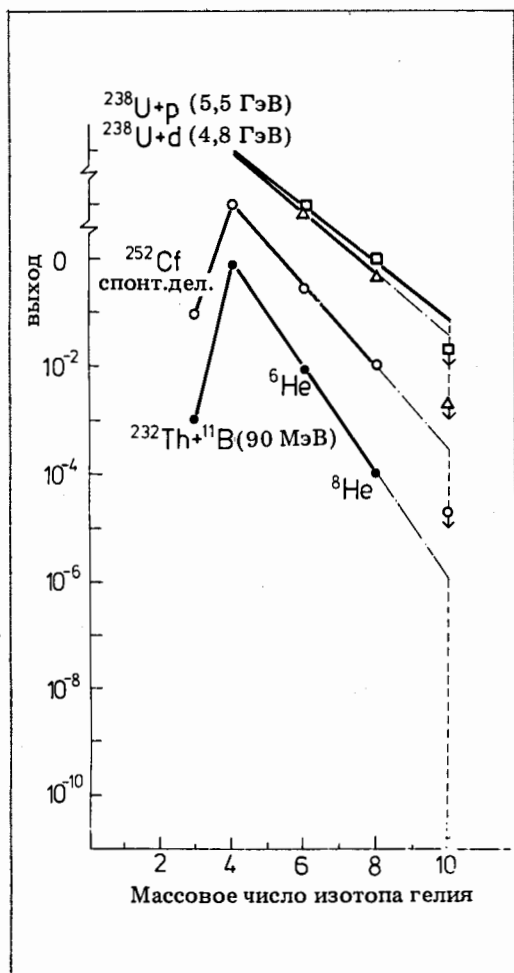


Рис.3

гелия (рис.3) показала, что сечение образования ядер  $^{10}\text{He}$  в этой реакции должно составлять  $5 \cdot 10^{-3}$  мб/ср. За время эксперимента было зарегистрировано  $1,5 \cdot 10^6$  ядер  $^8\text{He}$ . В то же время не было обнаружено ни одного события, соответствующего образованию ядер  $^{10}\text{He}$ . Полученная таким образом верхняя граница образования ядер  $^{10}\text{He}$  составляла  $5 \cdot 10^{-7}$  мб/ср. Тот факт, что выход  $^{10}\text{He}$  оказался намного меньше ожидаемого, свидетельствует, по-видимому, о нестабильности ядер  $^{10}\text{He}$ . Однако для однозначного ответа на вопрос о стабильности ядер, расположенных вблизи границ ядерной стабильности, необходимым является измерение их избытка масс, на основании чего можно сделать вывод об их стабильности по отношению к тому или иному виду распада. Именно так была определена нестабильность ядер  $^6\text{He}$  [2] в реакциях с ускоренными ионами  $^7\text{Li}$  и ядер  $^9\text{He}$  в реакциях с  $\pi^-$ -мезонами [3].

Для этой цели наиболее эффективными могут явиться реакции перезарядки с тяжелыми

ионами. Особый интерес с точки зрения получения ядер вблизи границ ядерной стабильности представляют реакции многократной перезарядки — зарядово-обменные процессы, которые могут идти лишь при взаимодействии сложных ядер. Реакции перезарядки приводят к образованию конечных продуктов в основном состоянии. Первые эксперименты по изучению сечений реакций двойной перезарядки, проведенные в Дармштадте (ФРГ), Беркли (США) и в Дубне, показали, что их сечение может достигать нескольких микробарн, и оно существенно зависит от энергии бомбардирующих ионов и величины  $Q$  реакции (см. таблицу). Угловое распределение продуктов реакций перезарядки имеет сильную направленность вперед, что характерно для прямого процесса.

Исследования стабильности нейтроноизбыточных ядер легчайших элементов (изотопов водорода, гелия, бериллия) проводятся в Лабора-



Таблица

	Реакция	$E_L$ (МэВ)	$Q$ (МэВ)	$\frac{d\sigma}{d\Omega}$ $\text{см}^2/\text{ср} \cdot 10^{30}$	
A	$^{40}\text{Ca}(^{14}\text{C}, ^{14}\text{O})^{40}\text{A}$	3.7	5	10	Лос-Аламос 1980
B	$^{42}\text{Ca}(^{48}\text{Ti}, ^{48}\text{Cr})^{42}\text{A}$	6.0	10	4.5	Дармштадт 1982
C	$^{42}\text{Ca}(^{48}\text{Ti}, ^{48}\text{Ca})^{42}\text{Ti}$	6.0	18	<4	— " —
D	$^{24}\text{Mg}(^{18}\text{O}, ^{18}\text{Ne})^{24}\text{Ne}$	6.9	15	0.8	Беркли 1978
E	$^{26}\text{Mg}(^{18}\text{O}, ^{18}\text{C})^{48}\text{Ti}$	6.9	22	<0.1	— " —
F	$^{48}\text{Ca}(^{18}\text{O}, ^{18}\text{C})^{48}\text{Ti}$	5.5	21	0.04	— " —
		6.2	21	0.4	
G	$^{48}\text{Ca}(^{14}\text{C}, ^{14}\text{Be})^{48}\text{Ti}$	6.2	33	<0.04	Орсе 1982
	$^9\text{Be}(^{14}\text{C}, ^{14}\text{O})^9\text{He}$	11.5	35	0.4	Дубна 1983
	$^9\text{Be}(\pi^+, \pi^+)^9\text{He}$	190	30	0.04	
	$^{10}\text{Be}(^{14}\text{C}, ^{14}\text{O})^{10}\text{He}$	11.5	40		
	$^{10}\text{Be}(^{48}\text{Ca}, ^{48}\text{Ti})^{10}\text{He}$	7.0	30		

$^9\text{Be} + n_0 (10^{22}/\text{см}^2) \rightarrow$

$^{10}\text{Be}$

$(10^{-4} \text{ г/г}) \cdot \gamma$

$\beta(0.55)$   
 $T_{1/2} = 1.6 \cdot 10^5 \text{ лет}$

тории ядерных реакций с использованием пучков радиоактивных ядер  $^{14}\text{C}$ , ускоренных на циклотроне У-300 до энергий 11,5 МэВ/нуклон. Образующиеся в реакциях перезарядки под действием ускоренных ядер  $^{14}\text{C}$  продукты обладают удобными для их регистрации свойствами. Так, в реакции двукратной перезарядки образуются ядра  $^{14}\text{O}$ , изучая энергетический спектр которых вблизи максимальных энергий, соответствующих основному состоянию ядра, можно определить его массу. Первый возбужденный уровень в ядре  $^{14}\text{O}$  составляет ~5 МэВ, поэтому даже при энергетическом разрешении методики хуже 1% воз-

### МАГНИТНЫЙ СПЕКТРОМЕТР

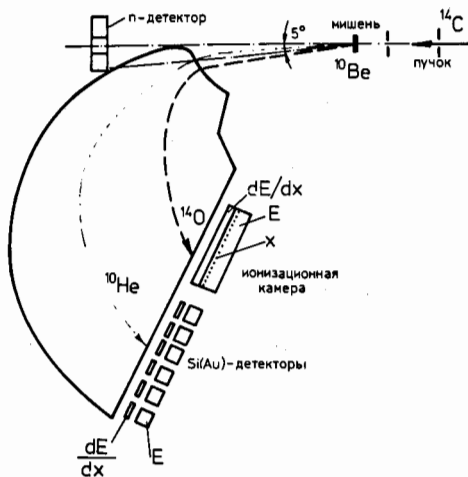


Рис.4

можно разделить с хорошей точностью пики в энергетическом спектре  $^{14}\text{O}$ , соответствующие энергетическим уровням этого ядра и основному состоянию исследуемого ядра. Таким образом, в реакции  $^9\text{Be} (^{14}\text{C}, ^{14}\text{O}) ^9\text{He}$  был измерен избыток массы ядра  $^9\text{He}$  и подтверждены полученные в Лос-Аламосе (США) в реакции перезарядки на  $\pi^-$ -мезонах данные о нестабильности этого ядра относительно нейтронного распада. Однако сечение двойной перезарядки в реакции с ионами  $^{14}\text{C}$  оказалось на порядок выше сечения на  $\pi^-$ -мезонах и составило  $0,4$  мкб/ср. Таким же образом ведутся эксперименты по измерению избытка массы ядра  $^{10}\text{He}$ . Схема этого эксперимента представлена на рис.4. Исследуется реакция двойной перезарядки  $^{10}\text{Be} (^{14}\text{C}, ^{14}\text{O}) ^{10}\text{He}$ . В связи с необходимостью регистрации продуктов реакции под углами вылета вперед в опытах используется магнитный спектрометр, позволяющий надежно разделять продукты ядерной реакции и рассеянный пучок. За магнитным спектрометром располагается детектор для изучения энергетического спектра нейтронов. В случае короткого времени

жизни ядра  $^{10}\text{Ne}$  ( $10^{-21} \cdot 10^{-22}$  с) они будут распадаться на ядра  $^8\text{He}$  и  $2\text{p}$ . Измерение энергетических спектров нейтронов в совпадении с ядрами  $^8\text{He}$ , регистрируемыми в фокальной плоскости магнитного спектрометра, дает возможность выделить по энергии нейтроны, импульс которых соответствует импульсу ядер  $^{10}\text{Ne}$ . Мишень из  $^{10}\text{Be}$  изготавливается путем разделения на масс-сеператоре изотопов бериллия из бериллиевого образца, обогащенного до  $10^{-3}$  изотопами  $^{10}\text{Be}$ . Такое обогащение достигнуто благодаря длительному облучению образца бериллия в активной зоне мощного реактора (см. таблицу). В реакциях двойной перезарядки с ионами  $^{14}\text{C}$   $^{6,7}\text{Li}$  ( $^{14}\text{C}$ ,  $^{14}\text{O}$ ) исследуется стабильность ядер  $^{6,7}\text{H}$ .

Большие перспективы открываются в области исследования свойств ядер вблизи границ ядерной стабильности с появлением пучков тяжелых ионов с энергией 100 МэВ/нуклон и более. Первые эксперименты, проведенные во Франции на ускорительном комплексе GANIL, позволили получить при облучении мишени из тантала ускоренными ионами аргона с энергией 60 МэВ/нуклон целый ряд новых изотопов азота (вплоть до  $^{23}\text{N}$ ). Интерпретируя процесс образования этих изотопов как реакцию фрагментации, авторы показали большие возможности этих реакций не только для получения новых нуклидов, но и изучения их свойств. Весьма принципиальным является вопрос интенсивности пучков ускоренных ионов. Поэтому создание в Лаборатории ядерных реакций циклотронного комплекса У-400 — У-400М, который позволит получать пучки ускоренных тяжелых ионов высокой энергии и большой интенсивности, явится важным шагом на пути синтеза и исследования свойств ядер вблизи границ ядерной стабильности. Использование больших интенсивностей пучков ускоренных тяжелых ионов позволит получать вторичные пучки экзотических ядер. Так, при бомбардировке мишени ионами  $^{14}\text{C}$  с интенсивностью 10 мкА можно получать вторичные пучки ядер  $^6\text{He}$  и  $^8\text{He}$  с интенсивностью  $10^8 \text{ с}^{-1}$  и  $10^6 \text{ с}^{-1}$  соответственно. Использование вторичных пучков экзотических ядер явится важным шагом в исследовании взаимодействия сверхнейтроноизбыточных ядер, а также в определении энергии связи нестабильных образований.

### Литература

1. Волков В.В. ЭЧАЯ, 1971, т.2, с.285.
2. Александров Д.В. и др. ЯФ, 1984, т.39, вып.3, с.513.
3. Seth K.K. Proc. of Int. Energy Nucl.Chem. Workshop, Los Alamos, 1980.



# Нейтронная физика

# ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ ИМПУЛЬСНЫХ РЕАКТОРОВ ИБР

*Ю.А.АЛЕКСАНДРОВ, кандидат физико-математических наук*

*В.П.АЛФИМЕНКОВ, кандидат физико-математических наук*

*В.И.ЛУЩИКОВ, кандидат физико-математических наук*

В 1982 году исполнилось 50 лет со дня открытия нейтрона. За истекшие полвека накоплен огромный экспериментальный материал о свойствах нейтрона и вызываемых им ядерных реакциях. Нейтронное излучение стало использоваться не только для научных лабораторных исследований, но и в технике, в первую очередь в ядерной энергетике.

Однако мы еще далеки от полного понимания структуры нейтрона и механизма его взаимодействия с веществом. Возникающие вопросы тесно связаны с физикой элементарных частиц, с представлениями о фундаментальных основах микромира. Импульсные реакторы ИБР, являясь весьма интенсивными источниками нейтронов в широком диапазоне энергий и обладая универсальной возможностью спектроскопии по времени пролета, позволяют выполнить ряд уникальных исследований весьма тонких характеристик нейтрона.

Хотя основным источником информации о структуре элементарных частиц является физика высоких энергий, в нейтронной физике низких энергий существует по крайней мере две проблемы, непосредственно связанные с внутренней структурой нейтрона. Одна из них — определение среднеквадратического радиуса распределения электрического заряда в нейтроне. Несмотря на то, что исследования в этом направлении ведутся уже около 40 лет (начало им было положено Э.Ферми в 1947 г.), результата, не вызывающего сомнения, нет до сих пор. Практически задача сводится к измерению амплитуды рассеяния медленных нейтронов на электронах, входящих в состав атома-рассеивателя (амплитуды так называемого (n-e)-взаимодействия). Главная экспериментальная трудность — малая ( $\leq 0,5\%$ ) величина искомого эффекта по сравнению с сильным нейтронно-ядерным рассеянием. Основной

вклад в амплитуду (n-e)-взаимодействия вносит магнитный релятивистский эффект (эффект Фолди), рассчитываемый теоретически, поэтому, чтобы говорить о другом вкладе, обусловленном распределением электрического заряда в нейтроне, необходимо вести измерения с высокой точностью (с погрешностью менее 1-2%).

В Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ был найден подходящий для проведения исследований рассеиватель, имеющий приблизительно в 100 раз меньшее сечение ядерного рассеяния, чем обычные нуклиды. Это  $^{186}\text{W}$ . Благодаря его уникальным ядерным характеристикам относительный вклад эффекта (n-e)-взаимодействия возрос в десятки раз и достиг 20-30%, что позволило определить амплитуду (n-e)-взаимодействия с высокой статистической точностью (с погрешностью  $\approx 1\%$ ). Исследования проводились методом дифракции медленных нейтронов на монокристаллах, выращенных из вольфрама, обогащенного изотопом  $^{186}\text{W}$ . Поскольку металлический вольфрам — парамагнетик, ожидалось, что магнитное рассеяние не будет давать вклада в дифракционные пики. В ходе эксперимента установлено, что помимо небольшого ядерного рассеяния и рассеяния, обусловленного искомым (n-e)-взаимодействием, в дифракционные пики дает вклад небольшой дополнительный эффект. Выяснению природы этого эффекта способствовали эксперименты с поляризованными нейтронами, проведенные в содружестве с физиками ИЯФ (Ржеж, ЧССР) и ЛИЯФ (Гатчина). Эти исследования дают основания полагать, что природа дополнительного эффекта — все-таки магнитная. По-видимому, нейтроны рассеиваются на своего рода магнитных кластерах, образующихся в металлическом вольфраме, возможно, на очень короткое время. Вероятная причина образования подобных кластеров — примесь атомов кобальта, имеющих в исследуемых монокристаллах в количестве 3-5 на 1000 атомов вольфрама. Каков механизм образования кластеров — это вопрос, требующий дальнейших исследований.

Вторая проблема, связанная со структурой нейтрона, — проблема его электрической поляризуемости. Поляризуемость характеризует способность нейтрона деформироваться под действием внешнего электрического поля  $E$ , благодаря чему нейтрон приобретает наведенный электрический дипольный момент  $D = \alpha E$ , где  $\alpha$  — коэффициент электрической поляризуемости — является одной из фундаментальных характеристик нейтрона. Представления о поляризуемости нейтрона были введены в работах советских физиков около 30 лет тому назад в связи с рассмотрением вопроса о рассеянии нейтронов в кулоновском поле тяжелых ядер. В 1965-1966 гг. в ЛНФ ОИЯИ на импульсном реакторе ИБР-30 методом времени пролета проведены опыты по изучению рассеяния нейтронов свинцом в килоэлектронвольтовой области энергий. В этих опытах получена оценка величины  $\alpha$ :  $-4,7 \cdot 10^{-42} \leq \alpha \leq 6,1 \cdot 10^{-42} \text{ см}^3$  (с вероятностью  $\approx 70\%$ ).

В последние годы благодаря развитию техники эксперимента существенно повысилась точность определения полных нейтронных се-

чений  $\sigma_{\text{tot}}$  и амплитуд когерентного рассеяния  $b_{\text{ког}}$  в области энергий ниже 20-50 эВ. В отдельных случаях погрешность измерений не превышает нескольких сотых долей процента. В ЛНФ ОИЯИ предложен метод определения величины  $a$ , основанный на измерении энергетической зависимости величин  $\sigma_{\text{tot}}$  и  $b_{\text{ког}}$  тяжелых ядер. Обработка известных из литературы прецизионно измеренных при энергиях нейтронов 1,26, 5,19 и 10,1 эВ полных сечений и амплитуд когерентного рассеяния холодных нейтронов свинцом и висмутом привела к значению  $a = (13 \pm 8) \cdot 10^{-42} \text{ см}^3$ . Дальнейшие измерения полных сечений  $\sigma_{\text{tot}}$  и амплитуд  $b_{\text{ког}}$  свинца и висмута в области энергий до 50 эВ могут существенно уточнить значение  $a$ . Такие измерения в настоящее время ведутся на импульсных реакторах ИБР-30 и ИБР-2.

Высокая светосила и хорошие спектрометрические характеристики импульсного реактора в области малых энергий 0,1-10 эВ позволили обнаружить процессы с несохранением пространственной четности. Вопрос о том, строго ли сохраняется пространственная четность во взаимодействии между нуклонами, возник в 1957 г. после обнаружения Ц.Ву нарушения пространственной четности в слабых взаимодействиях. В соответствии с гипотезой об универсальности слабого взаимодействия между фермионами четность не должна сохраняться и в нуклон-нуклонных взаимодействиях. Модельные оценки масштаба такого несохранения во взаимодействии между двумя нуклонами давала практически необнаружимые величины  $10^{-7} - 10^{-6}$ . В таких условиях естественными оказались поиски ситуаций, в которых P-нечетные эффекты во взаимодействии между нуклонами по какой-либо причине были подчеркнуты, усилены. В 1964 г. эти поиски увенчались первым успехом — группой Ю.Г.Абова была обнаружена P-нечетная асимметрия вылета  $\gamma$ -квантов, возникающих при радиационном захвате тепловых нейтронов ядрами  $^{113}\text{Cd}$ , относительно направления спинов захватываемых нейтронов. Позже были обнаружены и другие P-нечетные эффекты в неупругих взаимодействиях тепловых нейтронов со сложными ядрами. Все наблюдавшиеся эффекты имели порядок  $10^{-4}$ , то есть в сравнении с эффектами, ожидаемыми в нуклон-нуклонных взаимодействиях, были усилены в  $10^2 - 10^3$  раз.

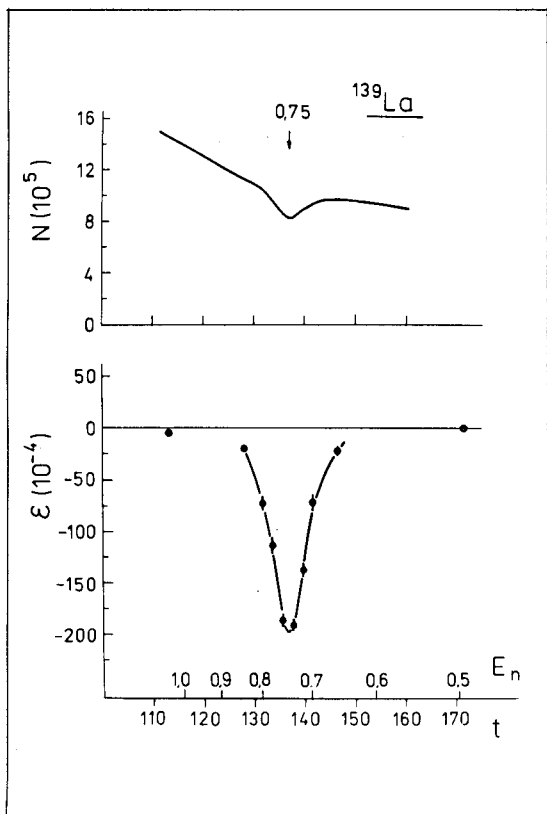
И поиски P-нечетных эффектов в сложных ядрах, и интерпретация полученных результатов производились с использованием модели смешивающихся по четности (за счет слабого межнуклонного взаимодействия) возбужденных состояний ядер. Однако прямого подтверждения справедливости такой модели не было. В 1980 г. в теоретической работе О.П.Сушкова и В.В.Фламбаума было показано, что в соответствии с этой моделью в полных нейтронных сечениях сложных ядер вблизи р-резонансов при определенных условиях должен наблюдаться значительно усиленный и резонансно зависящий от энергии нейтронов

Р-нечетный эффект. Речь идет о зависимости полных нейтронных сечений неполяризованных ядер от направления спинов нейтронов по отношению к их импульсу (от спиральности нейтронов). Уже в следующем году такой эффект наблюдался для р-резонанса с энергией 1,3 эВ ядра  $^{117}\text{Sn}$ . Эксперимент был проведен в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ на уникальном поляризованном пучке нейтронов реактора ИБР-30. Позже, также в ЛНФ ОИЯИ, были обнаружены аналогичные эффекты для р-резонансов ядер  $^{139}\text{La}$ ,  $^{81}\text{Br}$  и  $^{111}\text{Cd}$ . Коротко опишем указанные эксперименты и приведем полученные результаты.

Энергетическая зависимость полных нейтронных сечений исследовалась методом времени пролета. Измерения проводились на пролетной базе 60 м, причем в зависимости от требующегося энергетического разрешения использовался либо бустерный режим работы реактора с длительностью нейтронной вспышки  $\approx 4$  мкс, либо более интенсивный, собственно реакторный режим с длительностью нейтронной вспышки  $\approx 70$  мкс. Нейтронный пучок поляризовался с помощью разработанного в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ метода пропускания через поляризованную протонную мишень. При этом используется то обстоятельство, что для нейтронов в широкой области энергий сечение синглетного рассеяния на протонах значительно превосходит сечение триплетного рассеяния, поэтому фильтрация нейтронного пучка через поляризованную протонную мишень приводит к поляризации пучка в том же направлении, что и поляризация протонов в мишени. Поляризация такого пучка естественно растет с ростом толщины мишени, однако при этом падает его интенсивность. Максимальную статистическую точность получаемых результатов обеспечивает мишень оптимальной толщины, ослабляющая пучок примерно в 7 раз. При этом поляризация профильтрованного пучка приблизительно равна поляризации протонов в мишени. В экспериментах использовалась динамически поляризованная протонная мишень с рабочим веществом из монокристалла двойного лантан-магниевого нитрата. Площадь монокристалла составляла  $30 \text{ см}^2$ , поляризация протонов в нем — около 60%. Пучок, профильтрованный через такую мишень, имел поперечную поляризацию. Продольно-поляризованный пучок, то есть пучок с определенной спиральностью, получался посредством адиабатического поворота нейтронной поляризации в ведущем магнитном поле.

В экспериментах изучалась зависимость прозрачности исследуемых мишеней от спиральности нейтронов. Для этого продольно-поляризованный пучок пропускался через мишень и регистрировался нейтронным детектором. Времяпролетные спектры для двух спиральностей нейтронов, получаемые при реверсе поляризации пучка, накапливались в анализирующей системе, созданной на основе ЭВМ СМ-3. Эта система автоматически управляла реверсом поляризации пучка, причем для повышения точности результатов поляризация пучка реверсировалась через каждые 0,5-1 мин.





Экспериментальные результаты, полученные при исследовании Р-нечетной зависимости полного нейтронного сечения от спиральности нейтронов для ядра  $^{139}\text{La}$ . По горизонтальной оси — время пролета (номер временного канала анализатора), здесь же — соответствующие энергии нейтронов в эВ. Вверху — экспериментальный времяпролетный спектр; р-резонансу с энергией 0,75 эВ соответствует небольшой провал. Внизу — эффект пропускания, пропорциональный изменению полного нейтронного сечения при реверсе спиральности нейтронов.

Анализируя результаты измерений прозрачности мишени с использованием данных о толщине мишени, легко определить значение полного нейтронного сечения исследуемых ядер. Экспериментально полученные полные

нейтронные сечения исследованных ядер действительно оказались разными для нейтронов разных спиральностей. Это различие имело резонансный энергетический пик в области р-резонансов, что явилось убедительным аргументом в пользу применимости модели смешивающихся по четности ядерных состояний для объяснения усиленных Р-нечетных эффектов в сложенных ядрах. Эффекты сложным образом зависят от структуры смешивающихся ядерных состояний. Теория дает лишь статистические оценки этих величин. Полученные экспериментальные данные согласуются с ними. Особенно большим должен быть эффект, когда смешиваются уровни, соответствующие близко расположенным слабому р-резонансу и сильному s-резонансу. Такой случай реализуется в  $^{139}\text{La}$ , где имеются слабый р-резонанс при энергии 0,75 эВ и недалеко сильный отрицательный s-резонанс. В этом случае полное нейтронное сечение, связанное с р-резонансом, изменяется при реверсе спиральности нейтронов на 15%, это самый большой из известных Р-нечетных эффектов. Экспериментальные результаты для  $^{139}\text{La}$  приведены на рисунке.

Безусловно, магистральный путь к пониманию законов микромира связан с экспериментами при всевозрастающих энергиях, тем не менее принципиально новые явления обнаруживаются и при движе-

нии в противоположном направлении к малым и ультрамалым энергиям взаимодействия. Ярким примером таких явлений может служить впервые продемонстрированная в ЛНФ возможность хранения в замкнутых объемах нейтронов крайне низких энергий  $\lesssim 10^{-7}$  эВ. Эта возможность связана с тем, что для нейтронов малых энергий с длиной волны, значительно превышающей межатомные расстояния, дискретная атомная структура вещества становится несущественной и для таких нейтронов все вещество представляет собой как бы единое гигантское ядро. Однако средняя плотность этого ядра значительно, почти на 15 порядков, меньше обычной плотности нуклонов в ядре, поскольку размеры ядер ( $\sim 10^{-13}$  см) намного меньше расстояния между ядрами ( $\sim 10^{-8}$  см). Такое гигантское, но рыхлое ядро в большинстве случаев слабо отталкивает нейтроны, а для нейтронов с энергией  $\lesssim 10^{-7}$  эВ (так называемых ультрахолодных нейтронов) становится полностью непроницаемым. Отсюда и следует возможность хранения газа из ультрахолодных нейтронов в герметических сосудах. Нейтроны как бы оказываются запертыми внутри огромного полого ядра, сформированного стенками сосуда. Экспериментальное доказательство непроницаемости веществ для ультрахолодных нейтронов проведено в 1968 году группой Ф.Л.Шапира на реакторе ИБР. Сложность эксперимента заключалась в том, что атомный реактор испускает лишь один ультрахолодный нейтрон на  $10^{12}$  обычных, так называемых тепловых нейтронов. Импульсный режим работы реактора ИБР позволил уверенно выделить по методу времени пролета ультрахолодные нейтроны из огромного потока более быстрых нейтронов.

Хранящийся в сосудах нейтронный газ (время хранения — несколько минут, плотность газа — примерно  $10^3$  нейтронов на литр объема) может быть использован (и уже используется) для поиска слабых электрических свойств нейтрона, существование которых предсказывается некоторыми моделями ядерных взаимодействий.

Если удастся получить еще более медленные нейтроны с энергией  $\sim 10^{-12}$  эВ, то в гравитационном поле Земли они будут образовывать квантовые слои, расположенные на горизонтальной поверхности.

В сложном процессе деления атомных ядер, разыгрываемом в атомном реакторе, могут рождаться не только новые ядра-осколки, нейтроны и нейтрино, но и какие-нибудь экзотические, еще не известные науке легкие частицы. Современные теории объединения взаимодействий во многих вариантах предсказывают существование новых трудноуловимых частиц. Импульсный реактор может существенно облегчить поиск таких частиц, так как их появление должно быть строго синхронным с работой реактора. В 1982-1983 гг. на реакторе ИБР-2 были выполнены эксперименты по поиску гипотетической нейтральной частицы — аксиона, существование которого позволило бы объяснить высокую степень сохранения пространственной четности в сильных взаимодействиях. Предсказывалось, что аксионы должны излучаться

возбужденными осколками делящихся ядер, свободно проникать через бетонную защиту реактора и затем распадаться на два  $\gamma$ -кванта. Парное появление  $\gamma$ -квантов может быть вызвано и другими причинами — естественной радиоактивностью веществ, космическим фоном и так далее. Однако в отличие от этих фоновых событий, реализующихся равномерно во времени, пары  $\gamma$ -квантов от аксионов должны появляться только во время коротких ( $\sim 0,2$  мс) всплесков мощности импульсного реактора. Предсказывавшиеся аксионы с высокой степенью достоверности обнаружены не были.

Приведенные выше примеры использования импульсных реакторов для исследования фундаментальных проблем современной физики, конечно, не исчерпывают весь перечень аналогичных задач, и очередные эксперименты в этих направлениях уже готовятся к постановке на новом мощном реакторе ИБР-2.

## НЕЙТРОНОГРАФИЯ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД В ОИЯИ

*А.М.БАЛАГУРОВ, кандидат физико-математических наук*

*И.НАТКАНЕЦ, кандидат физико-математических наук*

*Ю.М.ОСТАНЕВИЧ, доктор физико-математических наук*

Нейтроннография конденсированных сред в последние два десятилетия получила мировое признание как один из наиболее эффективных и прямых методов экспериментального исследования микроскопических свойств твердых тел, жидкостей, растворов, а также биологических макромолекул и органелл. Медленные нейтроны обладают удачным сочетанием характеристик для таких исследований: высокой проникающей способностью, чувствительностью к магнитным свойствам вещества и тепловому движению атомов. В отличие от рентгеновских лучей, нейтроны "различают" изотопы, легкие атомы на фоне тяжелых и атомы с близкими атомными номерами. Все эти свойства нейтронного излучения по достоинству были оценены еще в 50-е годы, а с начала 60-х годов во всем мире уже велась интенсивная работа по созданию нейтронных источников и спектрометров, предназначенных для проведения нейтроннографических экспериментов.

Исследования конденсированных сред в последнее время являются доминирующими в физике (по некоторым данным, до 80% физических исследований). Можно указать две основные причины столь большого интереса. Первая связана с тем, что исследования в области физики конденсированных сред отличаются быстрой и эффективной отдачей для промышленности и других нужд народного хозяйства. Вторая причина состоит в актуальности этих исследований для развития науки в целом, поскольку изучаются основополагающие закономерности, определяющие структурную организацию материальных объектов окружающего нас мира. Именно поэтому успехи этого раздела физики находят живейший отклик во многих смежных областях науки, в первую очередь в химии и биологии.

В свете этих замечаний становится понятной роль исследований в области физики конденсированных сред в научной программе Объединенного института и большое внимание, которое уделяется их развитию. Основным методом этих исследований в ОИЯИ стала нейтронография на крупных базовых установках — импульсных реакторах. Основная организационная форма проведения этих исследований — международное сотрудничество со специализированными институтами стран-участниц, владеющими как исследуемыми объектами, так и дополнительными к нейтронографии методами.

Нейтронография позволяет получать экспериментальную информацию двух типов: о пространственном расположении и о законах движения атомов, образующих изучаемый объект. При этом оказывается, что упруго рассеянные нейтроны в основном несут структурную информацию, а нейтроны, изменившие свою энергию при рассеянии, — информацию о динамических свойствах. Хотя оба эти аспекта очень тесно связаны, изучение динамики более трудоемко, выполнено на меньшем количестве объектов; далеко не всегда удается построить единые описания обоих аспектов, поэтому мы рассмотрим исследования структуры и динамики раздельно.

## 1. СТРУКТУРНАЯ НЕЙТРОНОГРАФИЯ

Структурную нейтронографию условно можно разделить на две области: высокого и низкого разрешения. Задача первой — восстановление структуры объекта с точностью, достаточной для локализации отдельных атомов, пространственное разрешение при этом — около 1 Å. Высокое разрешение достигается только в исследованиях монокристаллов и простых поликристаллических веществ. Для некристаллизующихся объектов, какими являются многие биологические тела, полимерные материалы, растворы и т.д., приходится ограничиваться более низким разрешением ( $\geq 10$  Å). Структурная модель при этом характеризует пространственное расположение достаточно больших "кирпичей", образующих исследуемый объект, например рибонуклеиновых кислот и белков в двухкомпонентных комплексах. Наконец, есть большой класс веществ, относящихся к аморфным (стекла, жидкости, растворы, аморфные металлы, "спиновые стекла" и т.д.). Структуру этих веществ приходится интерпретировать на вероятностном языке с помощью функций плотности распределения межатомных расстояний. Здесь пространственное разрешение играет очень важную роль, и только с помощью нейтронографии в последние годы его удалось довести до 0,1 Å, после чего стало возможным разрешить парциальные парные корреляции многоатомных систем.

Исследования на поликристаллах в ОИЯИ начались еще в 1963–1964 гг., вскоре после пуска первого импульсного реактора.

В первых исследованиях, проведенных под руководством Ф.Л.Шапиро, удалось выявить принципиальные достоинства структурной нейтронографии по методу времени пролета. К их числу относятся:

- эффективное использование практически всего спектра тепловых нейтронов от источника и, как следствие, светосила метода;
- одновременность измерения всей дифракционной картины при полном отсутствии механических перемещений образца и детектора;
- очень хорошая разрешающая способность в области больших межплоскостных расстояний.

Тогда же было отмечено, что новый метод очень удобен для исследования влияния больших импульсных электрических, магнитных или других внешних воздействий на кристалл, а также релаксационных процессов малой длительности. В последующей, вот уже двадцатилетней работе, проводившейся как в ЛНФ ОИЯИ, так и в других лабораториях, эти выводы полностью подтвердились, и метод времени пролета стал в дифракционных экспериментах эффективным средством изучения атомной структуры вещества.

Среди первых исследований, в которых в полной мере проявились перечисленные достоинства, следует отметить установление магнитной структуры в кристаллах  $\text{BiFeO}_3$ ,  $\text{PrF}_3$ ,  $\text{PrFeO}_3$  и  $\text{NdFeO}_3$ .

Очень важными в методическом отношении были работы по развиту "метода фокусировки нейтронов по времени", выполненные в ЛНФ в 1966 ÷ 1968 гг. В них был найден очень эффективный путь повышения светосилы дифрактометра без ухудшения разрешающей способности. Метод временной фокусировки оказался настолько эффективным и простым в реализации, что успешно применяется до настоящего времени.

В конце 60-х годов в ЛНФ была реализована еще одна из упоминавшихся выше особенностей метода времени пролета — возможность эффективного исследования явлений, возникающих при воздействии на образец сверхсильных внешних полей. Импульсный характер облучения образца нейтронами позволяет и внешнее поле прикладывать в виде коротких импульсов, синхронизированных по времени воздействия с прилетом на образец нейтронов определенной энергии. Естественно, что создание очень сильных импульсных полей, действующих лишь короткое время, является более простой задачей, чем создание столь же сильных стационарных полей. В 1968 г. в ЛНФ была создана импульсная магнитная установка, позволяющая воздействовать на образец в течение ~3 мс магнитным полем напряженностью до 120 кЭ, в то время как напряженность стационарного поля для аналогичных экспериментов не удавалось поднять выше 45 кЭ. В экспериментах с гематитом  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  наблюдались интересные явления в полях с напряженностью в интервале от 50 до 120 кЭ: перестройка доменной структуры кристалла, поворот вектора антиферромагнетизма, аномальное возрастание интенсивности рассеяния при некоторых условиях

и так далее. Аналогичные эксперименты успешно продолжались впоследствии, а в настоящее время на ИБР-2 создается новая импульсная магнитная установка, с помощью которой удастся увеличить напряженность поля до 250 кЭ.

В 70-е годы в ЛНФ были разработаны два новых метода структурной нейтронографии — многомерная нейтронная дифрактометрия монокристаллов и малоугловое рассеяние нейтронов по времени пролета. Оба эти метода разрабатывались впервые в мировой практике, они отличаются высокой эффективностью для импульсных источников нейтронов. Из числа физических исследований этого периода следует отметить определение как положения атомов дейтерия в кристалле  $\text{La}_2\text{Mg}_3 \cdot (\text{NO}_3)_{12} \cdot 24\text{D}_2\text{O}$ , так и симметрии и размеров элементарной ячейки длиннопериодной структуры  $\text{TlGaS}_2$ , исследования доменной структуры  $\text{KD}_2\text{PO}_4$  и общего вида анти-dnp-антител, а также наблюдения гидратации полиионов с помощью малоуглового рассеяния нейтронов.

В 1978 г. в ЛНФ впервые было осуществлено сочетание использования метода времени пролета и позиционно-чувствительной детекторной системы. Несмотря на сравнительно небольшие размеры первых позиционных детекторов удалось сразу в несколько десятков раз увеличить скорость эксперимента. Созданная в ЛНФ двухкоординатная многонитевая камера позволила осуществить регистрацию трехмерных нейтронограмм, что резко сократило продолжительность и улучшило качество дифракционных экспериментов.

В 1982 г. началась систематическая работа на новом высокопоточном импульсном источнике нейтронов — реакторе ИБР-2. Существенно больший поток нейтронов, улучшенная "организация" пучков и современные электронные средства управления экспериментом обеспечили качественно новые возможности для структурной нейтронографии. Это привело к значительному обновлению тематики, в первую очередь за счет применения новых сложных кристаллов и биологических объектов. Так, успешно были исследованы сегнетоэлектрические и сегнетоэластические кристаллы  $\text{KD}_3(\text{SeO}_3)_2$  и  $\text{LiKSO}_4$ , кристаллы  $\text{CsH(D)SO}_4$ , испытывающие фазовый переход в суперионное состояние при  $T = 412 \text{ K}$ ; гексаферриты типа  $\text{M Ba}(\text{TiCo})_x \cdot \text{Fe}_{12-2x} \cdot \text{O}_{19}$  и  $\text{PbGa}_x \cdot \text{Fe}_{12-x} \cdot \text{O}_{19}$ , обладающие длиннопериодной магнитной структурой; модельные и биологические липидные мембраны, на мультислоях которых изучается кинетика процессов водного обмена. Наконец, проведены первые пробные эксперименты по дифракции нейтронов на монокристалле мышечного белка миоглобина.

Независимым, оригинальным и перспективным направлением структурных исследований являются исследования текстур материалов и изделий методом времени пролета. Текстуальная нейтронография выгодно отличается от соответствующих рентгеновских исследований тем, что нейтроны позволяют получать информацию о текстуре толстых об-

разцов и реальных изделий большой площади. Развитый в ОИЯИ вариант исследования текстур, кроме того, позволяет исследовать материалы с низкой степенью симметрии (гексагональной, моноклинной и т.д.), которые до сих пор были практически недоступными для всех других методов. Этот метод уже получил мировое признание и предусматривается в программах всех вновь создаваемых исследовательских импульсных источников нейтронов. Область применения этих исследований необычайно широка: от металлургии до генезиса горных пород, включая прикладные исследования.

## 2. ДИНАМИКА КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД

Разработка методики экспериментов по неупругому рассеянию нейтронов началась одновременно с пусковыми работами на реакторе ИБР в 1960 г., и уже через два-три года были получены первые результаты по исследованию динамики воды на спектрометре холодных нейтронов с бериллиевым фильтром в прямой геометрии и динамики водорода в гидриде циркония на двойном спектрометре по методу времени пролета с синхронным прерывателем пучка перед образцом. Основной задачей этого этапа было отыскание главных направлений и адекватных методов исследований.

Вместо спектрометра холодных нейтронов вскоре был создан спектрометр обратной геометрии, в котором образец удаляется на определенное расстояние от импульсного источника и облучается полным спектром нейтронов, а для монохроматизации рассеянных нейтронов между образцом и детектором помещается бериллиевый фильтр. Дальнейшие модификации этого спектрометра (добавление кристаллического анализатора, одновременная регистрация неупругого и упругого рассеяния) привели к созданию спектрометра КДСОГ, который стал основным инструментом на реакторе ИБР-30 для исследования неупругого некогерентного рассеяния нейтронов. Совершенствование методов регистрации данных, поступающих от многодетекторных установок, позволило создать на реакторе ИБР-2 уникальный спектрометр КДСОГ-М, успешно применяемый ныне для решения широкого круга задач, требующих изучения неупругих и квазиупругих процессов рассеяния с одновременными исследованиями фазового состояния образца.

Метод обратной геометрии в основном чувствителен к процессам, в которых нейтрон при рассеянии теряет энергию. Во многих случаях интерес представляют процессы, в которых энергию теряет изучаемый образец, а нейтрон — приобретает. Для исследования таких процессов на реакторах ИБР-30 и ИБР-2 эффективно используются спектрометры типа ДИН, созданные совместно с Физико-энергетическим институтом (Обнинск). В этих спектрометрах для монохроматизации используются прерыватели пучка нейтронов, работающие синхронно с им-



пульсным источником. Следует заметить, что эти два типа спектрометров не конкурируют, а удачно дополняют друг друга.

Третий тип спектрометра неупругого рассеяния — "корреляционный" — разрабатывается на протяжении ряда лет группой венгерских ученых. Этот весьма своеобразный метод должен сочетать в себе некоторые возможности обеих обсуждавшихся выше методик и обладать как высокой светосилой, так и хорошей разрешающей способностью. Следует также отметить создание на реакторе ИБР-30 в сотрудничестве с ИЯИ в Сверке (ПНР) кристаллического спектрометра ВКСН-300 для изучения фононов в монокристаллах методом когерентного неупругого рассеяния нейтронов. Небольшая светосила установки не позволила развить исследования в этом направлении, однако идея метода получила развитие на современных импульсных источниках нейтронов.

Первые эксперименты, поставленные под руководством Ф.Л.Шапиро и Е.А.Яника по неупругому и квазиупругому рассеянию нейтронов на воде и некоторых органических веществах, определили тематику исследований водородсодержащих материалов: неорганических и органических кристаллов и жидкостей. В исследованиях динамики молекулярных групп  $\text{NH}_3$ ,  $\text{NH}_4$ ,  $\text{CH}_3$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{H}_3\text{O}^+$  и др. методом неупругого некогерентного рассеяния нейтронов получены данные о частотах либрации или ротации этих групп во многих кристаллах, например в аммониевых солях типа  $\text{NH}_4\text{X}$ , где  $\text{X} = \text{Cl}, \text{Br}, \text{I}, \text{NO}_3$  и др. Анализ квазиупругого рассеяния в зависимости от передачи импульса нейтрона позволил получить информацию о временных и геометрических параметрах реориентации диффузного характера. Примером может служить определение характера молекулярных реориентаций и их связи с фазовыми переходами в "пластических кристаллах" типа  $(\text{CH}_3)_3 \cdot \text{CX}$  (где  $\text{X} = \text{Cl}, \text{Br}, \text{NO}_2, \text{CN}$ ).

Систематические исследования межмолекулярной динамики в ряду органических кристаллов возрастающей сложности, таких, как бензол и нафталин, были предприняты в сотрудничестве с учеными Института физики твердого тела АН СССР. Выполнение многолетней программы этих исследований, проводимых частично и на реакторе ILL в Гренобле, дало полное понимание динамики молекулярных кристаллов со степенью сложности как у нафталина. Переход к еще более сложным кристаллам: антрацену и дифенилу, послужил толчком к развитию динамической модели кристаллов без энергетической щели между внутримолекулярными и межмолекулярными колебаниями. При этом для дифенила удалось дать теоретическое описание несоразмерного фазового перехода, который связан с гибридизацией торсионных колебаний молекулы с трансляционными колебаниями решетки.

В последние годы проводится изучение комплексных соединений типа  $[\text{Me}(\text{NH}_3)_6] \cdot (\text{NO}_3)_2$ , жидкокристаллических аморфиков и ионных проводников типа  $\text{CsHSO}_4$ . В результате одновременных исследований дифракции, квазиупругого и неупругого рассеяния нейтронов

этих соединений обнаружена тесная связь между динамикой молекулярных групп и структурными фазовыми переходами, которые имеют место в этих веществах.

Другая проблема, исследованная в ОИЯИ с помощью рассеяния нейтронов, связана с динамикой квантовой жидкости — сверхтекучего гелия. Две разные экспериментальные задачи были решены с помощью спектрометра ДИН-1 на реакторе ИБР-30: исследования спектра элементарных возбуждений и поиск бозе-конденсата. Первая из них относится к числу классических, которыми в разное время занимались несколько исследовательских лабораторий. Дубненские исследования привнесли в решение этой задачи ряд новых результатов: определение времени жизни ротонных при больших импульсах квазичастиц и обнаружение ряда тонких особенностей в спектрах возбуждений при повышенных энергиях возбуждений.

Поиск бозе-конденсата был уникальным экспериментом, до сих пор не повторенным на стационарных реакторах. Суть его сводилась к исследованию импульсного распределения атомов гелия вблизи  $p = 0$  в сверхтекучем состоянии. Если при этих условиях реализуется бозе-конденсация, некоторая часть атомов гелия должна находиться в состоянии покоя. Эксперименты с рассеянием нейтронов позволили установить существование компонента с нулевым импульсом и исследовать его температурную зависимость. Хотя в настоящее время нет теоретических представлений о связи между сверхтекучестью и бозе-конденсацией, наблюдается корреляция между плотностью сверхтекучего компонента, определяемого макроскопическими методами, и плотностью бозе-конденсата, найденного по неупругому рассеянию нейтронов.

Самостоятельное и очень интересное направление связано с исследованиями эффектов кристаллического поля в интерметаллических редкоземельных соединениях методом неупругого рассеяния нейтронов. Предметом наблюдения здесь являются электронные уровни парамагнитных ионов редких земель, входящих в состав интерметаллических соединений. Взаимодействие этих ионов с рядом подсистем (кристаллическим электрическим полем, электронами проводимости), а также магнитные диполь-дипольные взаимодействия с соседними атомами приводят к расщеплению электронных уровней, заселению отдельных подуровней электронами с волновыми функциями различной симметрии, что, в конечном счете, определяет необычайное многообразие свойств редкоземельных соединений. Неупругое магнитное рассеяние нейтронов в этих системах оказалось основным и очень эффективным методом исследования. Одним из замечательных результатов в этой области является экспериментальное разделение вкладов решетки и электронов проводимости в суммарное расщепление (выполненное впервые в мире в 1983 г.).

В качестве примера задачи, находящейся в главном русле развития современной технологии, укажем на исследования динамики водо-

рода в гидридах металлов. Водород является перспективным видом горючего, а технологическая проблема состоит в нахождении удобного способа его хранения. Многие ученые связывают решение этой проблемы со способностью ряда металлов растворять в твердой фазе значительное количество водорода и выделять его при умеренных воздействиях. Поэтому изучение микроскопических свойств водорода в металлах является очень ценным, в первую очередь для решения задач энергетики будущего. Эти исследования велись с самого начала работы реактора ИБР, продолжались в 70-х годах на реакторе ИБР-30 и в последнее время получили развитие на реакторе ИБР-2.

Заканчивая этот далеко не полный обзор развития нейтронографических исследований конденсированных сред, необходимо отметить, что это направление сейчас, после освоения реактора ИБР-2, получило новые превосходные возможности для дальнейшего развития как в области чисто научных задач, так и задач, приближенных к "горячим точкам" современного материаловедения и технологии.

Более подробная информация об исследованиях, выполненных в ЛНФ ОИЯИ до 1970 г., содержится в обзоре И.М.Франка <sup>1/</sup> и статьях Ф.Л.Шапиро <sup>2/</sup>. Параметры экспериментальных установок на реакторе ИБР-2 и результаты первых экспериментов на них приведены в материалах IV Школы по нейтронной физике <sup>3/</sup>.

### *Литература*

1. Франк И.М. ЭЧАЯ, 1972, т.2, с.807.
2. Шапиро Ф.Л. Нейтронные исследования. "Наука", М., 1976, т.2.
3. Сборник "IV Школа по нейтронной физике". ОИЯИ, ДЗ,4-82-704, Дубна, 1982.

# ЭФФЕКТЫ СВЕРХТОНКИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ В НЕЙТРОННЫХ РЕЗОНАНСАХ

*Л.Б.ПИКЕЛЬНЕР, доктор физико-математических наук*

Одним из важнейших направлений физики атомного ядра является изучение возбужденных состояний ядер. Основные параметры, характеризующие такие состояния, — это энергия возбуждения, время жизни, парциальные ширины, четность, спин, магнитный момент, форма ядра. Все эти величины исследуются методами ядерной спектроскопии, а сами ядра в возбужденных состояниях получают в результате ядерных реакций различного типа. Лучше всего изучены низкие состояния, хуже — высоковозбужденные. Существует, однако, область довольно высокого возбуждения, изученная очень подробно. Такую возможность дает нейтронная спектроскопия, использующая взаимодействия медленных нейтронов с ядрами. Для средних и тяжелых ядер при энергии возбуждения 6-8 МэВ, обусловленной энергией связи нейтрона, среднее расстояние между уровнями составляет единицы — десятки электрон-вольт. Это позволяет, используя нейтроны с энергией до килоэлектрон-вольт, изучать для каждого ядра десятки, а иногда и сотни уровней. Однако из названных выше параметров оставались недоступными магнитные моменты и среднеквадратичные радиусы компаунд-состояний ядер, образующихся при захвате нейтронов.

В последние годы в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ были предложены и реализованы методы измерения этих величин, основанные на использовании эффектов сверхтонкого взаимодействия в нейтронных резонансах.

## МАГНИТНЫЕ МОМЕНТЫ НЕЙТРОННЫХ РЕЗОНАНСОВ

Впервые на возможность измерения магнитных резонансов указал Ф.Л.Шапиро. Метод основан на том, что энергии ядерных уровней для поляризованной и неполяризованной ядерной мишени в магнитном по-

ле несколько различаются. Действительно, если поместить ядра со спином 1 и магнитным моментом  $\mu_0$  в магнитное поле  $H$ , то произойдет расщепление уровня на  $2I + 1$  подуровней. Для неполяризованных ядер эти подуровни заселены равномерно, если же ядра поляризованы за счет достаточно низкой температуры при данном магнитном поле, то заселяются преимущественно низшие подуровни. При этом центр тяжести уровня смещается. Для нейтронного резонанса, возбуждаемого при взаимодействии нейтронов с ядрами, можно записать, опуская несущественные детали, выражение для изменения  $\Delta E_0$  резонансной энергии нейтрона:

$$\Delta E_0 = -f_N H (\mu_b - \mu_0), \quad (1)$$

где  $f_N$  — поляризация ядер и  $\mu_b$  — магнитный момент компаунд-состояния ядра. Из выражения (1) видно, что, измерив сдвиг резонанса и зная остальные величины, можно определить магнитный момент  $\mu_0$  резонансного состояния. Сложность эксперимента обусловлена крайней малостью величины  $\Delta E_0$ . Действительно, при  $f_N = 1$ , магнитном поле  $H = 10^6$  Э и разности  $\mu_b - \mu_0$ , равной одному ядерному магнетону, сдвиг резонанса  $\Delta E_0$  составляет  $3 \cdot 10^{-6}$  эВ. При этом надо иметь в виду, что собственная ширина уровня составляет около 0,1 эВ. Отсюда видно, что в качестве объекта исследований могут быть пригодны только ядра редкоземельных элементов, у которых внутренние поля на ядрах достигают  $7 \cdot 10^6$  Э и имеются низкоэнергетические нейтронные резонансы. Одновременно большие поля на ядрах позволяют получить высокую поляризацию ядер, хотя даже в этом случае требуется температура порядка сотых долей градуса Кельвина.

Эксперименты, выполненные в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ, проводились на пучке нейтронов импульсного реактора ИБР-30. По методу времени пролета измерялось пропускание нейтронов через поляризованную и неполяризованную мишень и определялся энергетический сдвиг резонансов путем сравнения двух таких спектров. В качестве мишеней использовались металлические фольги из редкоземельных элементов Tb, Dy, Ho, Er, ферромагнитные при низких температурах, обладающие магнитным полем  $(3 \div 7) \cdot 10^6$  Э. Для охлаждения образцов применялся рефрижератор с растворением  $^3\text{He}$  в  $^4\text{He}$ , обеспечивающий температуру около 30 мК в стационарном режиме, позволявшем проводить многосуточные измерения. Указанные поля и температура давали поляризацию ядер, близкую к единице.

Малость изучаемых эффектов потребовала не только длительных измерений для обеспечения высокой статистической точности спектров, но и проведения целого ряда контрольных экспериментов, показавших отсутствие ложных эффектов.

В результате серии экспериментов были получены значения магнитных моментов ряда компаунд-состояний указанных ядер, приведенные в табл.1. Здесь же указаны значения энергетического сдвига резонансов. Видно, что эксперимент позволяет измерить сдвиг с точностью около  $10^{-5}$  эВ. Трудно рассчитывать на заметное увеличение

Таблица 1

Экспериментальные данные по магнитным моментам резонансов

Компаунд-ядро	Энергия резонанса $E_0$ , эВ	$\Delta E_0$ $10^{-6}$ эВ	Магнитный момент $\mu_b$ ядерн.магнетон
$^{160}\text{Tb}$	3,35	19 $\pm$ 9	-0,2 $\pm$ 1,0
	4,99	-20 $\pm$ 33	4,3 $\pm$ 3,7
	11,1	31 $\pm$ 39	-1,7 $\pm$ 4,4
$^{162}\text{Dy}$	2,72	1,3 $\pm$ 8,9	-0,4 $\pm$ 0,7
	3,69	-16,1 $\pm$ 10,7	-1,8 $\pm$ 0,9
	4,35	11,4 $\pm$ 14,8	0,5 $\pm$ 1,2
$^{164}\text{Dy}$	1,71	-28,2 $\pm$ 5,9	2,8 $\pm$ 0,5
$^{166}\text{Ho}$	3,93	36 $\pm$ 12	1,8 $\pm$ 0,7
	12,7	4 $\pm$ 30	3,9 $\pm$ 1,9
$^{168}\text{Er}$	0,46	27 $\pm$ 7	0,9 $\pm$ 0,4
	0,58	44 $\pm$ 16	1,8 $\pm$ 0,9

точности в подобных экспериментах, и без того весьма сложных. В связи с этим и ошибки магнитных моментов велики, однако не следует забывать, что речь идет о высоковозбужденных состояниях тяжелых ядер (энергия возбуждения  $6 \div 8$  МэВ) с временем жизни порядка  $10^{-15}$  с. Ни один из других существующих методов не может быть применен для измерений магнитных моментов таких состояний, поэтому полученная информация является единственной в своем роде и ее целе-

сообразно сопоставить с теоретическими оценками. Рассмотрение в рамках статистической модели показало, что среднее значение  $g$ -фактора ( $g = \mu/I$ ) для высоковозбужденных состояний близко к величине  $Z/A$ , то есть отношению заряда к массовому числу. Для исследованных ядер это составляет около 0,4. Эксперимент дает  $\langle g \rangle = 0,34 \pm 0,22$ . Другая предсказываемая характеристика — это среднеквадратичное отклонение отдельных значений  $g$  от среднего. Для нее и теория и эксперимент дают оценку  $\Delta g \approx (0,3 \div 0,5)$ . Таким образом, можно заключить, что описание магнитных моментов компаунд-состояний ядер в рамках статистической модели ядра является правомерным.

### ИЗМЕРЕНИЕ СРЕДНЕКВАДРАТИЧНОГО РАДИУСА ЗАРЯДА ЯДРА ПРИ ЗАХВАТЕ НЕЙТРОНА

В экспериментах по определению магнитных моментов компаунд-состояний ядер было использовано влияние сверхтонкого магнитного взаимодействия на положение нейтронного резонанса. Рассмотрим теперь другой эффект: влияние электростатического сверхтонкого взаимодействия на энергию нейтронного резонанса, который позволяет получить еще одну характеристику ядер — изменение среднеквадратичного радиуса заряда ядра  $\Delta \langle r_0^2 \rangle$  при возбуждении до энергии связи нейтрона.

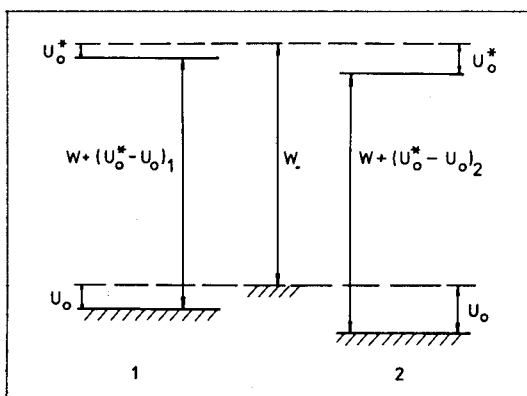


Рис.1. Схема, объясняющая природу химического сдвига ядерного уровня. Основное и возбужденное до энергии  $W$  состояния ядра, полностью лишённого электронной оболочки, показаны пунктиром. Реальное ядро в веществе окружено электронной оболочкой, и его потенциальная энергия уменьшается на величину  $U_0$ . Если форма и размер ядра в основном и возбужденном состояниях одинаковы, то  $U_0 = U_0^*$  и разность энергий этих состояний по-прежнему  $W$ . Различия в геометрии ядра приводит к тому, что

$U_0 \neq U_0^*$ , а, следовательно, энергия перехода между уровнями будет отлична от  $W$ . Проводить сравнение с ядром, полностью лишённым электронов, невозможно, но если использовать два разных химических соединения, содержащих исследуемое ядро, то различие в электронном окружении приводит к различию в энергии перехода:  $\Delta E = (U_0^* - U_0)_1 - (U_0^* - U_0)_2$ .

Экспериментальное исследование  $\Delta\langle\gamma_p^2\rangle$  для уровней с возбуждением в несколько десятков килоэлектрон-вольт получило широкое распространение сразу после открытия эффекта Мёссбауэра. Очень высокое энергетическое разрешение позволяло измерить изомерный химический сдвиг  $\gamma$ -линии, который непосредственно связан с  $\Delta\langle\gamma_p^2\rangle$ . Однако возможности метода ограничиваются указанной низкой энергией возбуждения.

В Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ В.К.Игнатович, Ю.М.Останевич и Л.Чер указали на возможность проведения аналогичных исследований с резонансными нейтронами. Рис.1 поясняет, как связаны между собой форма ядра и положение ядерного уровня. Изменение резонансной энергии нейтронов (химический сдвиг резонанса) описывается выражением

$$\Delta E_0 = \frac{2}{3} \pi e^2 Z \Delta\rho_e(0) \Delta\langle\gamma_p^2\rangle. \quad (2)$$

Здесь  $e$  — заряд электрона,  $Z$  — число протонов в ядре,  $\Delta\rho_e(0)$  — разность плотностей электронов в месте расположения ядра для двух исследуемых химических соединений. Из выражения (2) видно, что, измеряя  $\Delta E_0$  и зная величину  $\Delta\rho_e(0)$ , которая получается из отдельных расчетных и экспериментальных данных, можно получить  $\Delta\langle\gamma_p^2\rangle$ . Оптимистические оценки позволяли ожидать величину сдвига  $10^{-5}$ – $10^{-4}$  эВ. Такая точность была ранее достигнута в измерениях магнитных моментов, но в измерениях  $\Delta\langle\gamma_p^2\rangle$  эксперимент усложнялся тем, что разным химическим соединениям соответствуют различные доплеровские уширения резонансов. Такое различие в наблюдаемой форме резонанса может приводить к ложным эффектам, и поэтому должно специально исследоваться. Экспериментальное изучение химических сдвигов нейтронных резонансов проводилось на импульсном реакторе ИБР-30. В качестве изучаемых ядер были выбраны изотопы урана, удобные большим  $Z$ , наличием низковольтных резонансов и богатым набором химических соединений разной валентности. Измерялось пропускание нейтронов разными химическими соединениями урана. Образцы сменялись через каждые 5 мин, чтобы устранить возможные аппаратные ошибки. Накопленные спектры за суммарное время измерения 200-300 ч обрабатывались для определения химического сдвига резонанса. Существенной частью исследования являлось экспериментальное и теоретическое изучение эффектов, связанных с колебаниями кристаллической решетки в разных образцах, определяющих доплеровское уширение резонансов.

В результате проведения большого цикла экспериментов были получены значения  $\Delta\langle\gamma_p^2\rangle$ , соответствующие изменению среднеквадратичного



тичного радиуса заряда ядра при захвате нейтрона в резонансах  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  и  $^{238}\text{U}$ . После вычитания изотопного вклада, соответствующего увеличению ядра-мишени на один нейтрон, остается значение  $\Delta\langle r_p^2 \rangle_B$ , связанное только с возбуждением ядра. В табл.2 приведены эти величины для всех исследованных резонансов. Обращает на себя внимание значительное уменьшение  $\langle r_p^2 \rangle_B$  в резонансе  $^{238}\text{U}$ . Для других резонансов тоже в большинстве случаев  $\langle r_p^2 \rangle_B$  уменьшается с возбуждением, хотя и не так заметно. Среднее значение, найденное по 8 резонансам  $^{235}\text{U}$ , составляет  $\Delta\langle r_p^2 \rangle_B = (-0,18 \pm 0,10)$  фм<sup>2</sup>.

Таблица 2

Изменение среднеквадратичных радиусов ядер при возбуждении, определяемом захватом резонансных нейтронов

Ядро-мишень	Энергия резонанса, $E_0$ , эВ	$\Delta\langle r_p^2 \rangle_B$ , фм <sup>2</sup>
$^{234}\text{U}$	5,16	-0,46 <sub>±</sub> 0,25
	1,14	-0,09 <sub>±</sub> 0,22
$^{235}\text{U}$	2,03	-0,23 <sub>±</sub> 0,21
	3,15	+0,10 <sub>±</sub> 0,48
	3,61	-0,08 <sub>±</sub> 0,25
	4,85	-0,62 <sub>±</sub> 0,25
	8,77	-0,01 <sub>±</sub> 0,26
	11,67	-0,34 <sub>±</sub> 0,29
	12,39	+0,15 <sub>±</sub> 0,31
$^{238}\text{U}$	6,67	-1,7 <sub>±</sub> 0,5

Представляет интерес вопрос о корреляции  $\Delta\langle r_p^2 \rangle_B$  с делительными ширинами резонансов  $\Gamma_f$ . На рис.2 показаны экспериментальные данные для всех резонансов, включая практически неделящиеся резонансы  $^{234}\text{U}$  и  $^{238}\text{U}$ . Видно, что для малых  $\Gamma_f$  среднеквадратичный радиус уменьшается по сравнению с его значением для основного состояния ядра.

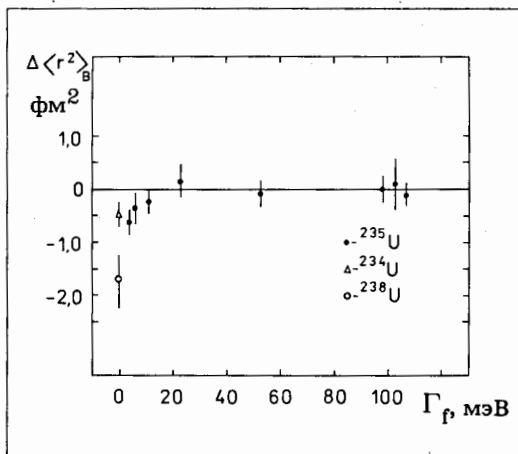


Рис.2. Изменение среднеквадратичного радиуса заряда ядра изотопов урана при возбуждении, связанном с захватом резонансных нейтронов. По оси абсцисс — величина  $\Gamma_f$  — делительная ширина резонанса, через который образовалось составное ядро.

В заключение можно отметить, что изучение эффектов сверхтонких взаимодействий в нейтронных резонансах позволило получить новую информацию о свойствах возбужденных состояний ядер, а разработанный метод измерений малых сдвигов резонансов является перспективным для широкого круга исследований.



Вычислительная техника

Прикладная математика

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, ИНИЦИИРУЕМЫХ ЧАСТИЦАМИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

*В.С.БАРАШЕНКОВ, профессор*

Еще совсем недавно физика высоких энергий представляла собой казавшийся очень далеким от практики раздел "чистой науки". Сегодня расчет ядерно-физических процессов, протекающих под действием высокоэнергетического излучения, необходим для решения важных прикладных задач — прогнозирования и оценки радиационной обстановки на больших высотах и вокруг ускорителей, создающих мощные пучки проникающего излучения; определения доз и побочных эффектов при мезотерапии рака; наработки с помощью ускорителей больших количеств новых изотопов, применяемых в медицине и в ядерной энергетике, и так далее.

Вместе с тем исследование процессов, протекающих под действием высокоэнергетических частиц в атомных ядрах, а также фотоэмульсионных "звезд" и широких атмосферных ливней, порожденных космическими частицами сверхвысоких энергий, дает исключительно важные сведения о свойствах глубинных "этажей" окружающей нас природы.

Характерной особенностью ядерно-физических процессов, связанных с высокоэнергетическим излучением, является большое число и широкий энергетический спектр вовлеченных в процесс частиц. Например, при столкновении протона с ядром урана при  $T = 1 \text{ ГэВ}^*$  в среднем рождается около 25 вторичных частиц, в том числе 20 нейтронов, которые, распространяясь в веществе, многократно "размножаются" в серии столкновений с ядрами; их энергии охватывают область от тепловых до значений, близких к энергии первичной частицы. При  $T \sim 10^3 \text{ ГэВ}$  в ядерном столкновении возможно рождение сразу нескольких сотен частиц. В развивающийся затем каскад (лаvinу)

---

\* Здесь и везде далее  $T$  — кинетическая энергия налетающей частицы в лабораторной системе координат.

рождающихся и рассеивающихся в веществе частиц дают вклад существенно различные по своей природе ядерные реакции.

В этих условиях наиболее адекватным способом теоретического анализа представляется статистическое моделирование явления на основе метода Монте-Карло. При этом удастся не только учесть разнообразные детали ядерных взаимодействий, но и моделировать специфические особенности конкретных установок и экспериментов.

Метод статистического моделирования различных процессов, связанных с распространением высокоэнергетических частиц и ядер в конденсированных и газообразных средах, в течение ряда лет разрабатывается в ОИЯИ в сотрудничестве с вьетнамскими, немецкими и румынскими учеными. В этих работах принимают участие физики из институтов Минска, Кишинева, Ташкента, Обнинска и других городов Советского Союза.

Задействованные на ЭВМ пакеты программ позволяют анализировать взаимодействия адронов и легких ядер с гетерогенным веществом практически произвольной геометрии и состава в интервале энергий от долей эВ (пучки индуцированных тепловых нейтронов) и до нескольких десятков ГэВ. Использование моделей кварк-глюонных струн — новых короткоживущих физических объектов, образующихся при взаимодействиях быстрых адронов, — позволяет распространить расчеты на еще более высокие энергии. Разработанные методы дают возможность рассчитывать интенсивность и спектры частиц различных типов внутри и вне облучаемого вещества, пространственное распределение и параметры продуктов ядерных реакций, распределение тепловыделения.

Математическое моделирование ядерно-физических процессов дает важную информацию для проектирования сложных экспериментальных установок, создаваемых в ОИЯИ большими интернациональными коллективами, облегчает интерпретацию выполняемых на них измерений.

Взаимодействие высокоэнергетической частицы с веществом представляет собой быстро развивающийся со временем лавинообразный процесс: "каскадное дерево" с очень большим числом "ветвей" (при взаимодействии протона с энергией 1 ГэВ с урановой или свинцовой мишенью число "ветвей" достигает многих тысяч) и ядерными взаимодействиями в его "узлах".

Из рис.1 видно, что расчет имеет циклический характер и сводится к многократному повторению нескольких основных блоков. После того как рассчитано одно каскадное дерево, вычисления повторяются для новой первичной частицы, затем для следующей и так далее. Рассчитываются многие десятки, а иногда и сотни деревьев для того, чтобы уменьшить статистические флуктуации изучаемых величин. Такой подход соответствует реальным физическим процессам, происходящим

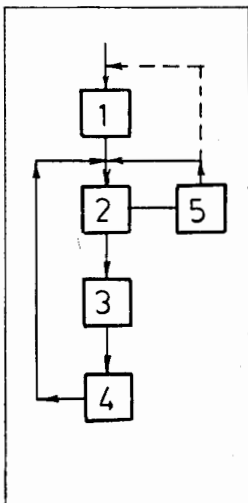


Рис.1. Принципиальная схема расчета межъядерного каскада в веществе: 1 — розыгрыш энергии и других параметров первичной частицы, 2 — проверка, является ли частица  $\pi$ -мезоном; если да, то проводится расчет вероятности ее распада, 3 — частица не распалась, расчет ее пробега, 4 — расчет ядерного взаимодействия; определение характеристик рождающихся частиц и остаточного ядра (или его осколков при делении), 5 — частица распалась, выбор новой частицы; если рассматривалась первичная частица, то переход к блоку 1 (показано пунктиром). Реальная схема расчетов включает в себя много дополнительных деталей, и поэтому она значительно сложнее.

в природе, где результирующий эффект составляется из независимых вкладов большого числа каскадов.

Расчет "узлов" каскадного дерева — наиболее сложная и трудоемкая часть задачи. В принципе, для описания этих "узлов" можно воспользоваться феноменологическими аппроксимациями известных экспериментальных данных. Таким образом почти всегда удается хорошо описать упругие столкновения, когда изменяются лишь импульсы сталкивающихся ядра и частицы, а все остальные их свойства сохраняются. Что же касается неупругих столкновений, свойства которых существенно зависят от энергии частицы и типа ядра-мишени, то феноменологические аппроксимации оказываются эффективными только в некоторых частных случаях (например, когда интересуются усредненными характеристиками излучения и мишенями простого химического состава), хотя и в этих случаях подготовка феноменологических аппроксимаций для широкого интервала энергий сама по себе очень трудная задача, оправданная лишь в случае многократного повторения расчетов для вещества данного состава.

Ориентируясь на разнообразные задачи, мы с самого начала отказались от такого подхода, выполняя вместо этого в каждом "узле" расчет упругого или неупругого ядерного взаимодействия. Исключение составляет лишь область энергий, которые меньше 10,5 МэВ, где все вычисления межъядерного каскада выполняются на основе известной 28-групповой системы констант Л.П.Абагян и др.<sup>1/</sup>\*

\*Для гетерогенных сред весьма эффективным оказывается "подгрупповой метод", позволяющий учитывать резонансные взаимодействия низкоэнергетических нейтронов, не привлекая детальных сведений об энергетической зависимости сечений <sup>1,2/</sup>.

В настоящее время известно много моделей ядерных взаимодействий при высоких энергиях, по форме и деталям часто весьма значительно отличающихся одна от другой. Однако в их основе, как правило, лежит один из двух механизмов внутриядерных взаимодействий: каскадный механизм, когда взаимодействие рассматривается как разветвленная последовательность некогерентных взаимодействий быстрых частиц с отдельными внутриядерными нуклонами, и коллективный механизм, при котором взаимодействие быстрой частицы происходит когерентно сразу с несколькими внутриядерными нуклонами. Эти два типа взаимодействий, конечно, не являются абсолютно изолированными и могут переходить один в другой по мере того, как когерентное взаимодействие, реализующееся в отдельных "узлах" каскадного дерева, постепенно захватывает все это дерево (или, наоборот, когда единое коллективное взаимодействие распадается на отдельные обособленные блоки). В наших программах используется "каскадно-испарительная" модель ядерных реакций  $^{3-5}$ . В соответствии с опытом считается, что неупругие взаимодействия частиц с энергиями, которые меньше нескольких десятков МэВ, сопровождаются образованием так называемого "компаунд-ядра" — сильно возбужденной системы, распадающейся с испусканием одного или двух нейтронов или  $\gamma$ -кванта. При энергиях, которые больше нескольких десятков МэВ, предполагается, что неупругие взаимодействия протекают в три следующие друг за другом стадии. Процесс начинается с быстро протекающей "каскадной стадией", когда из ядра вылетают вновь родившиеся частицы и выбитые внутриядерные нуклоны, а ядро остается в сильно возбужденном состоянии. На второй стадии происходит процесс релаксации этого ядра до равновесного состояния (при этом также могут испускаться отдельные быстрые частицы, уносящие большую долю энергии возбуждения). Взаимодействие завершается сравнительно медленно протекающей "распадной стадией", когда ядро теряет энергию возбуждения посредством конкурирующих между собой процессов испарения частиц и деления ядра (образующиеся осколки деления, как правило, также сильно возбуждены и теряют свою энергию путем испарения частиц). Распадная стадия завершается испусканием  $\gamma$ -квантов, после чего ядро оказывается в долгоживущем состоянии.

В своем развитии каскадно-испарительная модель прошла несколько этапов — от одномерного нерелятивистского каскада в первых работах до трехмерной релятивистской картины в ядре с диффузной плотностью распределения нуклонов, изменяющейся в процессе взаимодействия.

В общих чертах расчет внутриядерного каскада, в частности определение длины свободных пробегов частиц, близок к расчету каскада в веществе; существенное отличие состоит лишь в дополнительном учете в веществе ионизационных потерь энергии и распадов каскадных частиц. При энергиях, которые больше нескольких ГэВ,

следует принимать во внимание выбивание нуклонов из ядер лавиной быстрых каскадных частиц; пренебрежение этим эффектом приводит к значительному завышению множественности рождающихся частиц.

При моделировании внутриядерного каскада информация о мезон-нуклонных и нуклон-нуклонных взаимодействиях задается феноменологически в виде аналитических и табличных распределений, по которым производится розыгрыш характеристик рождающихся частиц. По сравнению с адрон-ядерными взаимодействиями информация о столкновениях элементарных частиц не столь многофакторная (меньше число различных типов "узлов" каскадного дерева), и ее можно компактно и в то же время достаточно точно аппроксимировать аналитическими выражениями с табличными коэффициентами, подобранными по соответствующим экспериментальным данным. В нашем распоряжении имеются достаточно точные аппроксимации адрон-адронных взаимодействий, применимые вплоть до нескольких тысяч ГэВ<sup>3,6/</sup>.

Сравнение с опытом показывает, что в случае адрон-ядерных взаимодействий каскадно-испарительная модель пригодна вплоть до энергий  $T \approx 10$  ГэВ. При столкновении двух ядер область ее применимости меньше:  $T \approx 1-2$  ГэВ/нукл. налетающего легкого ядра, и еще меньше при столкновении тяжелых ядер<sup>7/</sup>. При больших энергиях множественность рождающихся низкоэнергетических частиц, характеризующая разветвленность ("мощность") теоретического каскада, превосходит экспериментальную и довольно быстро возрастает при увеличении энергии.

Анализ показал, что это противоречие обусловлено прежде всего пренебрежением пространственно-временной эволюцией адрон-адронных взаимодействий внутри ядра<sup>8-10/</sup>. Их нельзя считать мгновенными; необходимо определенное время для формирования вторичных частиц, в течение которого внутри ядра распространяются кварк-глюонные объекты, еще не успевшие фрагментировать в адроны.

Среди большого числа обсуждающихся в литературе подходов к описанию пространственно-временной эволюции адрон-адронного взаимодействия, пожалуй, наиболее многообещающим выглядит подход, подсказываемый топологическим разложением бинарной кварк-глюонной амплитуды адронного взаимодействия. Если в этом разложении ограничиться только планарными и цилиндрическими диаграммами, отвечающими  $t$ -канальному обмену соответственно полюсами Редже и полюсом Померанчука, то можно считать, что в момент соударения первичных частиц происходит либо аннигиляция медленных валентных кварков с образованием одной кварк-глюонной струны, либо цветовая перезарядка путем обмена глюонами, когда образуются две кварк-глюонные струны, разлетающиеся в системе центра масс сталкивающихся адронов в противоположных направлениях. Как показывает анализ, кинематические свойства этих струн существенно различны, и их можно рассматривать как независимые физические объекты.



В дальнейшем кварк-глюонные струны разрываются вакуумными кварк-антикварковыми парами, порождая ливни адронов, — происходит процесс фрагментации находящихся на концах струн кварков (антикварков) или кварка и дикварка в адроны.

Внутри ядра кварк-глюонные струны ведут себя как самостоятельные физические объекты, которые могут распасться (фрагментировать) на адроны или же успеть провзаимодействовать с внутриядерными нуклонами.

Образование кварк-глюонных струн в столкновении двух адронов и их распространение внутри ядра до распада или взаимодействия можно рассматривать с помощью метода Монте-Карло <sup>/11-13/</sup>. При уменьшении энергии, когда кварк-глюонные струны распадаются практически сразу же после их образования, каскадная модель со струнами автоматически переходит в обычную каскадную модель с резонансами. При еще меньших энергиях, когда и резонансные частицы распадаются вблизи точек их рождения, остается лишь пион-нуклонный каскад.

К сожалению, в настоящее время нет достаточно удовлетворительной динамической теории, которая позволяла бы количественно рассчитывать процесс распада кварк-глюонной струны на адроны и ее взаимодействия с нуклоном. Каскадную модель со струнами сегодня скорее следует рассматривать как решение обратной задачи: получить сведения о свойствах кварк-глюонных струн, сравнивая результаты расчетов с опытом.

Вместе с тем следует заметить, что благодаря усреднениям ядерно-физические процессы в среде довольно слабо чувствительны к деталям внутриядерных взаимодействий и даже обычная каскадно-испарительная модель, не учитывающая кварковых эффектов, позволяет рассчитывать физические явления в средах по крайней мере до энергий порядка нескольких десятков ГэВ.

Расчет каскада частиц в среде существенно усложняется, если под действием излучения среда изменяет свои свойства, например, при очень интенсивном облучении, когда с большой скоростью происходит нарастание концентрации осколков расщепления ядер, или в делящихся средах, где каждая первичная частица с энергией  $T = 1$  ГэВ порождает в среднем около сотни медленных нейтронов, образующих новые ядра <sup>/14-16/</sup>.

В качестве примера монте-карловского моделирования процессов, происходящих в средах под действием потоков высокоэнергетических частиц, на рис.2 приведена высотная зависимость дозы облучения незащищенного человека протонами, нейтронами и  $\pi$ -мезонами, генерированными в атмосфере падающим на Землю космическим излучением <sup>/16/</sup>. Для наглядности доза облучения, полученная в течение часа на определенной высоте  $D$  [час], приведена в отношении к величине среднесуточной дозы  $D_{\text{санит}}$ , принятой для лиц, работающих с ра-

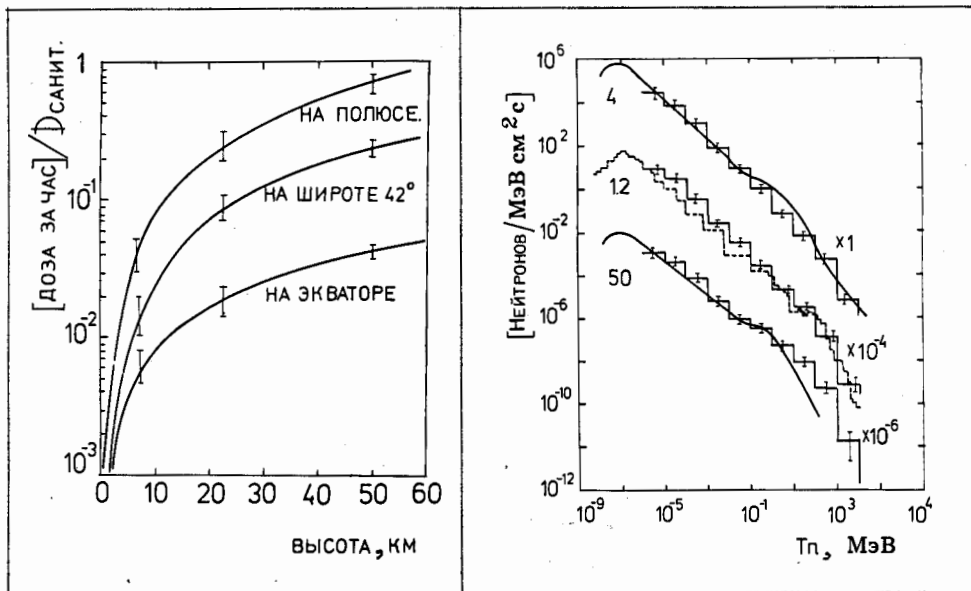


Рис.2. Доза облучения на различных высотах над уровнем моря на полюсе, широте  $42^\circ$  и экваторе.

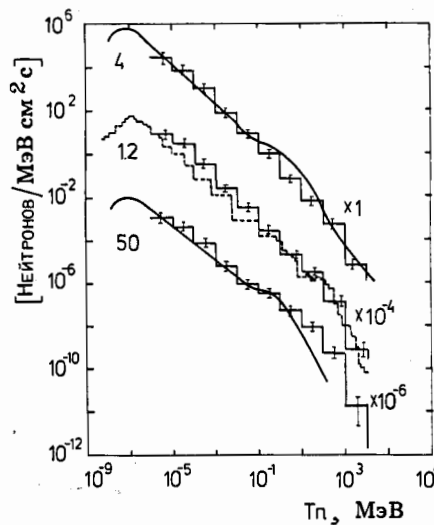


Рис.3. Энергетический спектр нейтронов в атмосфере на высоте 4,12 и 50 км над уровнем моря (географическая широта местности  $42^\circ$ ). Сплошная гистограмма — наш расчет, пунктирная — расчет Т.Армстронга /18/. Кривая — экспериментальные данные.

диоактивными излучениями\*. Данные относятся к случаю, когда на Солнце нет значительных хромосферных вспышек. При таких вспышках доза облучения может возрасти в десятки, сотни, а иногда даже в тысячи раз. При особенно мощных хромосферных вспышках (к счастью, они довольно редки) за несколько часов полета на больших высотах можно набрать дозу, которую лицам, работающим с радиоактивными препаратами, разрешается получить лишь в течение года.

Из-за сложных эффектов рассеяния и отражения каскадных частиц доза облучения зависит от количества и расположения топлива в самолете и от других деталей, которые можно учесть при моделировании.

На рис.3 показан энергетический спектр нейтронов, присутствующих в атмосфере в условиях спокойного Солнца /17/. Для сравнения приведены экспериментальные данные и результаты расчетов Ок-

\* Следует иметь в виду, что санитарные правила устанавливают недельную и годовую предельно допустимые дозы облучения. Для небольших интервалов времени допустимые санитарными правилами дозы могут во много раз превосходить среднюю.

Таблица

Характеристики взаимодействия протонов и дейтронов с мишенью из естественного урана. Мишень имеет форму цилиндра длиной 90 см, диаметром 120 см. Пучок первичных частиц попадает в узкую осевую щель глубиной 26 см. Все данные в расчете на одну первичную частицу. Статистические ошибки — около 5%.

	T = 1 ГэВ		T = 2 ГэВ	
	p	d	p	d
Число рождающихся нейтронов	89	98	197	205
Число образующихся ядер $^{239}\text{Pu}$	82	90	181	187
Тепловыделение в мишени (ГэВ), в том числе за счет ионизационных потерь	4,6	5,1	10,1	10,2
	0,60	0,64	0,93	0,93

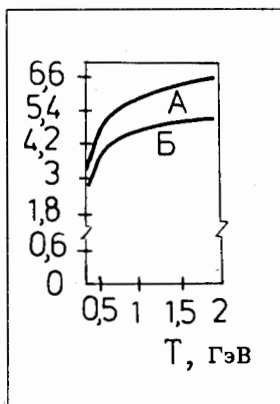


Рис.4. Доля энергии, возвращаемой в электросеть электроядерной установкой, использующей протоны с энергией T: А — естественная смесь изотопов урана; В — чистый  $^{238}\text{U}$ .

риджской лаборатории в США, где создана аналогичная программа монте-карловского моделирования<sup>/18-19/</sup>. Как видно, различные данные согласуются в интервале более десяти порядков величины. Это является хорошей иллюстрацией точности моделирования.

Таблица иллюстрирует результаты моделирования ядерно-физических процессов в тяжелых средах<sup>/15/</sup>. Под действием частиц с энергией  $T \geq 1$  ГэВ происходит быстрая наработка ядер  $^{239}\text{Pu}$ , которые, как и  $^{235}\text{U}$ , могут использоваться в энергетических установках в качестве ядерного горючего. Даже без сжигания этих ядер выделяющаяся в мишени энергия деления во много раз превосходит энергию первичных частиц. Мишень может служить мощным источником тепловой энергии и одновременно эффективным наработчиком ядерного горючего. Рис.4 получен при моделировании суммарной энергетической эффек-

тивности одной из таких электроядерных установок (с учетом к.п.д. преобразования электрической энергии в энергию пучка ускоренных частиц, к.п.д. тепловой электростанции, возвращающей энергию в сеть, и т.д.) /14,20/. Расчеты показывают, что электроядерный бридинг — одно из наиболее перспективных направлений ядерной энергетики будущего /14,16/.

В работе /21/ моделировался процесс накопления изотопов, образующихся в метеорите под действием потоков частиц в космическом пространстве. Концентрация и радиальное распределение этих изотопов могут многое рассказать о вариациях космических лучей за последние сотни миллионов и даже миллиарды лет. Хотя внешние слои метеорита сгорают в атмосфере Земли, сравнение радиохимических данных для внутренних слоев с результатами моделирования, выполненного при различных предположениях, дает важную информацию.

Это только некоторые, наиболее характерные примеры возможностей монте-карловского моделирования физических процессов на ЭВМ. Во многих случаях математическое моделирование сложной гаммы происходящих явлений позволяет существенно уменьшить время их анализа и сэкономить значительные средства, подсказывая наиболее эффективные пути экспериментальных исследований и позволяя иногда вообще обойтись без промежуточных макетных работ.

Точность величин, получаемых таким путем, как правило, оказывается в пределах точности современных экспериментальных данных. Что касается времени расчета, то для таких величин, как интегральные спектры частиц внутри защиты, спектры частиц за защитой с толщиной в десятки сантиметров, распределение тепловыделения, время на ЭВМ с быстроедействием около миллиона операций в секунду составляет около 30-60 мин. Время счета существенно возрастает при переходе к очень толстым слоям вещества; в этих случаях целесообразно использовать комбинированный способ расчета, когда результаты статистического моделирования выдаются на некоторую простую поверхность и рассматриваются далее как источники в соответствующем кинематическом уравнении.

Время расчета каскадов в атмосфере с пятипроцентной точностью в интегральных спектрах частиц составляет около часа. Программы монте-карловских моделей ядерно-физических процессов, разработанные в ОИЯИ, используются во многих институтах СССР и других стран-участниц ОИЯИ.

### *Литература*

1. Абагян Л.П. и др. Групповые константы для расчета реакторов и защиты. Энергоиздат, М., 1981.
2. Николаев М.Н. и др. АЭ, 1971, т.30, с.426.

3. Барашенков В.С., Тонеев В.Д. Взаимодействие высокоэнергетических частиц и атомных ядер с ядрами. Атомиздат, М., 1972.
4. Барашенков В.С. и др. УФН, 1973, т.109, с.91.
5. Barashenkov V.S. et al. Nucl.Phys., 1980, vol.A338, p.423.
6. Барашенков В.С., Славин Н.В. ЭЧАЯ, 1984, т.15, с.997.
7. Барашенков В.С. и др. ОИЯИ, P2-83-117, Дубна, 1983; ЯФ, 1984, т.39, с.1133.
8. Давиденко Г.В., Николаев Н.Н. ЯФ, 1976, т.24, с.77.
9. Левченко Б.Б., Николаев Н.Н. ЯФ, 1983, т.37, с.1016.
10. Chin C.V. et al. Phys.Rev., 1982, vol.D25, p.2911.
11. Амелин Н.С. и др. ОИЯИ, P2-83-769, Дубна, 1983.
12. Амелин Н.С., Барашенков В.С. ОИЯИ, P2-83-770, Дубна, 1983.
13. Амелин Н.С. и др. ОИЯИ, P2-84-369, Дубна, 1984.
14. Барашенков В.С. ЭЧАЯ, 1978, т.9, с. 871.
15. Барашенков В.С. и др. ОИЯИ, 2-84-391, Дубна, 1984.
16. Alsiller F.S. et al. ORNL/TM-7528, Oak Ridge, 1981.
17. Барашенков В.С. и др. АЭ, 1974, т.36, с.224.
18. Armstrong T.W. et al. J.Geophys.Res., 1973, vol.73, p.2715.
19. Armstrong T.W., Moran H.S. Nucl.Sc. and Eng., 1970, vol.42, p.41.
20. Барашенков В.С., Шмаков С.Ю. Труды Международного совещания по проблемам математического моделирования в ядерно-физических исследованиях. ОИЯИ, Д10,11-81-622, Дубна, 1981.
21. Барашенков В.С. и др. Геохимия, 1972, т.11, с.1325.

## РАЗВИТИЕ ДИАЛОГОВЫХ СРЕДСТВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭВМ

*В.Е.АНИХОВСКИЙ, младший научный сотрудник*

*В.В.ГАЛАКТИОНОВ, кандидат физико-математических наук*

*С.Г.КАДАНЦЕВ, кандидат физико-математических наук*

*В.В.КОРЕНЬКОВ, младший научный сотрудник*

*Е.Ю.МАЗЕПА, младший научный сотрудник*

*В.П.ШИРИКОВ, доктор физико-математических наук*

История широкого использования электронных вычислительных машин насчитывает немногим более 30 лет, но за это короткое время они стали настолько необходимым инструментом для проведения научных исследований, решения задач управления и использования в промышленном производстве, настолько быстро растут требования к скорости работы этих машин, оснащению их внешними устройствами для хранения больших объемов информации и предоставлению эффективных и удобных средств доступа, что изготовители оборудования и поставщики ЭВМ пока не успевают удовлетворить такие требования. Сказывается и то обстоятельство, что во многих организациях, в том числе и в ОИЯИ, наряду с новыми еще работают машины производства 60-х годов, то есть того времени, когда основными средствами ввода информации в ЭВМ были устройства считывания с перфокарт и магнитных лент. Впрочем, до сих пор заводская комплектация вновь поставляемых ЭВМ включает лишь несколько простейших локальных терминалов (дисплеев с клавиатурой) для организации прямого доступа и диалога пользователя с машиной. Следовательно, массовый пользователь вынужден оформлять свои задачи на перфокартах, которые затем вводятся в ЭВМ операторами эксплуатационной службы вычислительного центра с последующей выдачей распечатки результатов пропуска задач на печатающих устройствах, также обслуживаемых операторами.

Тем самым пользователь "отчужден" от своей программы на время ее выполнения в машине, не имеет возможности следить за промежуточными результатами счета и воздействовать на ход расчетов в динамике; затрудняется построение программных справочных систем, резко падает эффективность отладки программ и т.п. Есть и другая сторона этой проблемы: поставляемые программные и технические средства не унифицированы, в результате чего, скажем, терминалы серии ЕС не рассчитаны на подключение к машине БЭСМ-6 или CDC-6500, а широко применяемые дисплеи типа "Видеотон" и MERA являются чужеродными для ЕС ЭВМ. Резко различаются и программные средства, в том числе языки общения через терминалы с машиной того или иного типа.

До 1979 года основные вычислительные мощности ОИЯИ были представлены двумя независимо работавшими базовыми ЭВМ БЭСМ-6 и CDC-6500; с 1981 года введена в эксплуатацию ЭВМ ЕС-1060, а в 1984 году Институт получил ЕС-1061. БЭСМ-6 в первые годы эксплуатации была оснащена терминалами "Видеотон-340", напрямую подключенными к ней с помощью телеграфных линий (что приводило к заметным тратам времени машины на непосредственное управление терминалами при приеме и выдаче информации). Терминалы обслуживались программной системой, не имевшей удобных средств редактирования текстов программ, вводимых пользователем с терминала.

Отсутствие таких средств на современном уровне организации диалога с ЭВМ считается совершенно недопустимым. Работа пользователя при вводе программы с терминала похожа на работу машинистки: он набирает на клавиатуре текст своей программы, написанной чаще всего на алгоритмическом языке Фортран, строка за строкой (часто не пользуясь предварительной записью на бумаге, а это увеличивает вероятность опечаток и ошибок). Машина должна воспринимать эти строки и накапливать в своей оперативной или внешней дисковой памяти, образуя "файл". Каждая строка по мере набора отображается на экране терминала, и, если пользователь заметил опечатку или пропуск какой-то буквы, он должен иметь возможность дать машине приказ на исправление этой опечатки. По окончании набора всего текста желательно снова запросить его выдачу на экран, чтобы убедиться, что машина правильно восприняла его и нет собственных ошибок. Пользователь может обнаружить новые опечатки, пропуск целых строк, может возникнуть необходимость заменить какие-то строки или использованное в программе обозначение, например матрицы  $A$  на  $MATR$  по всему тексту файла. Программная система в машине, организующая обслуживание терминалов, должна уметь выполнять подобные исправления и замены по простым командам пользователя; нельзя заставлять его самого выискивать строки, в которых встречается обозначение  $A$ , и править их. Хорошая система должна понимать приказ типа "Замени обозначение  $A$  на

обозначение MATR по всему тексту файла” (или в каком-то определенном диапазоне строк). Убедившись в видимой правильности отредактированного текста, пользователь может дать машине приказ (RUN) произвести пробный счет по данному варианту программы с выдачей на экран результатов этого счета (промежуточных и окончательных). На основании их просмотра может возникнуть необходимость в дополнительных правках текста программы. Машина должна сохранять варианты текста в своем архиве на дисках или магнитных лентах, пока пользователь не укажет ей, что какие-то тексты ему больше не нужны.

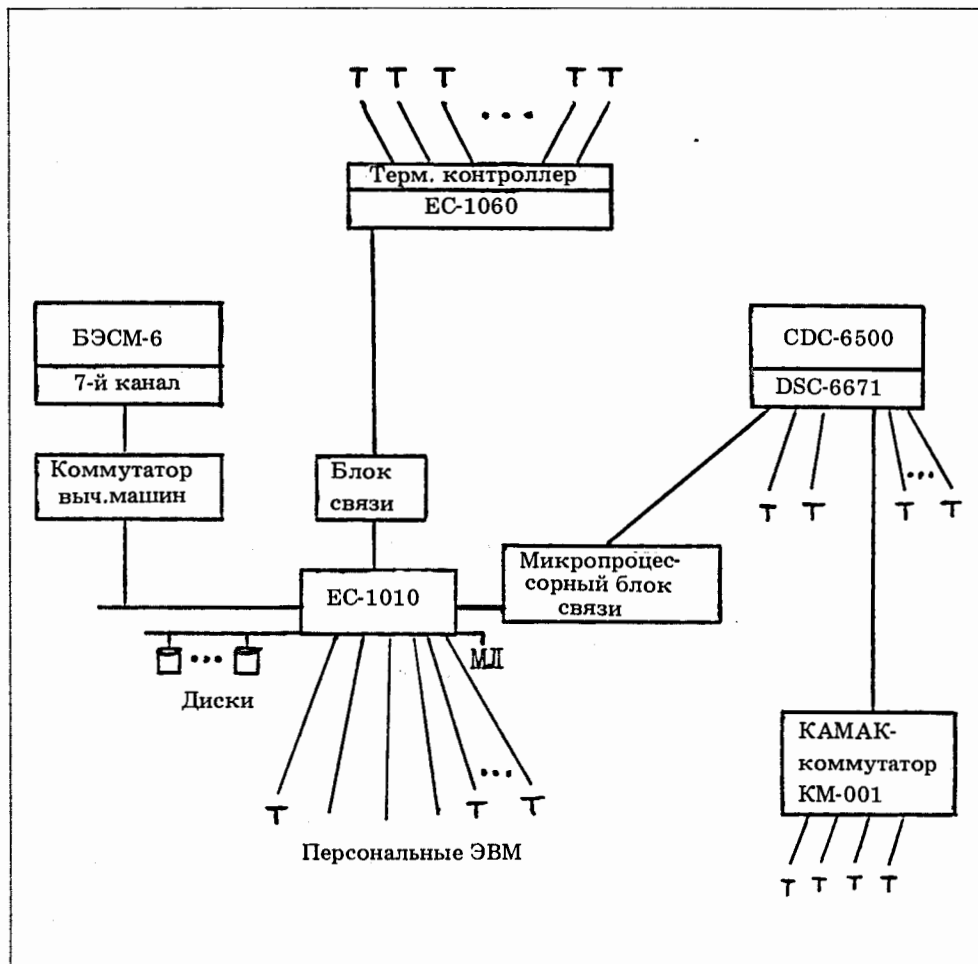
Если Институт имеет разнотипные ЭВМ (как в нашем случае), то желательно научить их единому диалекту языка общения с пользователем при проведении подобных сеансов связи, что и стало одной из наших задач. Учитывая то обстоятельство, что наибольший опыт диалоговой работы был получен на ЭВМ CDC-6500, где специальная программная система INTERCOM<sup>1/</sup> обслуживала дисплеи и удаленные групповые станции ввода и вывода информации и имела все средства для проведения описанных выше сеансов связи, целесообразно было в качестве унифицированного языка диалога с разнотипными ЭВМ (в том числе БЭСМ-6 и ЕС ЭВМ) выбрать язык INTERCOM. Для CDC-6500 оставалась, правда, нерешенной следующая проблема: ее оборудование позволяло использовать не более 16 терминалов, и в результате многие крупные подразделения ОИЯИ получили доступ к машине лишь по одной-двум линиям связи. В этом плане еще хуже обстояло дело с ЭВМ ЕС-1060, где в стандартном комплекте было получено только 4 терминала ЕС-7906, неспособных работать на большом расстоянии от ЭВМ.

Обратим внимание и еще на одно обстоятельство. В приведенном примере описания сеанса связи вся работа машины складывается, с одной стороны, из ввода, накопления в памяти и редактирования текстовой информации, а с другой — из перевода по команде RUN текстового представления программы в машинное и выполнения полученной программы. Первая часть работы является непроизводительной тратой времени мощной ЭВМ, с нею вполне может справиться дешевая и небольшая машина, оснащенная собственной внешней памятью для хранения текстовых файлов и соединенная каналом связи с главными ЭВМ. Именно поэтому нами была реализована подсистема коллективного пользования, представленная на рисунке, которая хотя бы частично позволила справиться с проблемами, отмеченными выше /2-7/.

ЕС-1010 с помощью специально разработанного для нее технического и программного обеспечения взяла на себя функции непосредственного обслуживания дополнительной группы из 16 терминалов: накопления и редактирования поступающих от пользователей текстов, хранения и выдачи на терминалы результатов прохождения задач на больших ЭВМ. Она не выполняет сама команды типа RUN. Так, если



программа направляется для выполнения на БЭСМ-6, то ЕС-1010 готовит задания в виде, понимаемом БЭСМ-6; для этого фортранный текст автоматически обрамляется управляющими директивами, понимаемыми программным обеспечением БЭСМ-6. Эта же машина выполняет и целый ряд других команд, которые, в частности, помогают пользователю следить за прохождением его задачи на основной расчетной ЭВМ.



Блок-схема терминальной подсистемы коллективного пользования.

Для ЕС-1060 задача расширения средств доступа к ней через терминалы технически решалась по-другому. С освоением микропроцессорной техники стало возможным дешево строить средства сопряжения

ЭВМ и терминалов. В качестве одной из первых реализаций таких возможностей в ЛВТА был разработан и введен в эксплуатацию программно-управляемый терминальный контроллер для 16 терминалов, подключенных через этот контроллер к каналу ЕС-1060. Главным его конструктивным элементом стала микромашина с процессором ИНТЕЛ-8085А и собственной памятью для программ управления и данных, переправляемых от терминалов большой машине и обратно. Диалог с пользователем поддерживался с помощью созданной для ЕС ЭВМ программной подсистемы TERM, понимающей язык INTERCOM. Ее возможности, конечно, лишь в какой-то степени характеризуются приведенным нами примером. Так, средствами TERM можно вызвать с терминала справочную систему, которая выполняет следующие основные функции:

1. Выдача информации по всем выполняемым в машине заданиям и процедурам (например, время начала выполнения того или иного задания, объем используемой при его выполнении памяти ЭВМ, время, оставшееся до завершения шага задания, характеристика используемых внешних устройств и информационных файлов), а также ее выдача на внешние устройства.

2. Выдача инструкций (для начинающих работать на ЕС-1060 пользователей, операторов; описания способов использования самого TERM или специального текстового редактора ТЕХТА и т.д.) и экспресс-информации (новости программного обеспечения на всех базах ЭВМ ОИЯИ).

3. Вызов комплекса средств для системного программиста; эта возможность предоставлена для получения информации об использовании центрального процессора ЕС-1060, о распределении ее оперативной памяти, работе устройств ввода-вывода и т.д. Также в рамках TERM пользователю дается набор подпрограмм, обращаясь к которым посредством более общих фортранных программ, он сам может организовать обмен информацией с несколькими терминалами.

Указанными способами был внедрен единый диалоговый язык общения с основными ЭВМ ОИЯИ (напрямую или через посредников типа ЕС-1010), снята с них часть нагрузки и увеличено количество терминалов, в том числе имеющих одновременный доступ к разным машинам. Эти разработки нашли применение и в других институтах стран-участниц. Конечно, это лишь частичное решение проблемы обеспечения эффективного прямого доступа к ЭВМ. Тот факт, что с CDC-6500 стала возможной работа с 31-го терминала вместо 16, не удовлетворил реальной потребности подразделений Института. Именно поэтому при нашем участии, состоявшем в создании необходимого программного обеспечения, в Лаборатории ядерных проблем и Отделе новых методов ускорения ОИЯИ была проведена техническая проработка процесса использования типового КАМАК-коммутатора КМ-001 с управляющим микропроцессором типа ИНТЕЛ-8080 для подключения нескольких до-

полнительных терминалов к мультиплексору CDC-6500 через одну входную линию (сейчас он уже находится в эксплуатации, см. рисунок). На базе сделанного продумываются и начинают разрабатываться и другие средства для создания более общей вычислительной сети.

В обеспечении доступа и средств диалога пользователя с ЭВМ есть еще одна проблема: перегрузки ЭВМ и замедление получения от нее ответов, когда чрезмерно увеличивается число пользователей, одновременно работающих с терминалов, если это терминалы простейшего типа, неспособные сами выполнять какую-то работу, кроме передачи или приема текста. По этой причине актуальным становится применение "интеллектуальных терминалов", которые сами по себе являются машинами, но малыми, индивидуального пользования. Для сети, представленной на рисунке, была проведена разработка по монтажу, подключению и программному связному обеспечению для двух типов таких персональных ЭВМ-терминалов: первый был укомплектован на базе серийного дисплейного вычислительного комплекса ДВК-1, дополненного гибким диском и матричной печатью, а в качестве второго использована японская установка CANON с микропроцессором, объемом оперативной памяти 64 кбайт, накопителями на дисках, дисплеем, печатью и графопостроителем. Это уже настоящие рабочие станции для небольших групп пользователей с собственными средствами для решения небольших задач. Подключение к сети существенно расширяет их возможности: в тех случаях, когда задача слишком трудоемка для автономного решения, можно обратиться по линии связи к одной из больших машин. Естественно, что нужна организация обмена информацией между дисковым архивным хозяйством персональной ЭВМ и внешней памятью больших машин или их посредника (см. рисунок). Поэтому после подключения модифицированного ДВК-1 и установок CANON их внутреннее программное обеспечение было расширено необходимыми программами для подобной перекачки файлов.

Проблема широкого внедрения хорошо оснащенных терминалов типа персональных ЭВМ, включенных в общую вычислительную сеть Института, объединяющую терминалы и машины и предоставляющую пользователям унифицированные диалоговые средства и языки программирования, — вот цель, на пути к которой сделан первый шаг, о котором рассказано в данной статье.

### *Литература*

1. INTERCOM REFERENCE MANUAL, CONTROL DATA CORP., Publ. 60307100, USA, 1974.
2. Галактионов В.В., Каданцев С.Г., Шириков В.П. ОИЯИ, Д10,11-11264, Дубна, 1978.

3. Аниховский В.Е. и др. ОИЯИ, Р11-12809, Дубна, 1979.
4. Галактионов В.В. и др. В кн.: Тезисы докладов Всесоюзной конференции "Диалог человек — ЭВМ". ЛИАП, Л., 1982, с.90.
5. Гончаков В.С., Кореньков В.В., Шириков В.П. В кн.: Тезисы докладов Всесоюзной конференции "Диалог человек — ЭВМ". ЛИАП, Л., 1982, с.87.
6. Каданцев С.Г. ОИЯИ, 11-82-828, Дубна, 1982.
7. Мазепа Е.Ю. ОИЯИ, 11-83-801, Дубна, 1983.

# НЕПРЕРЫВНЫЙ АНАЛОГ МЕТОДА НЬЮТОНА В НЕЛИНЕЙНЫХ ЗАДАЧАХ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

*Е.П.ЖИДКОВ, профессор*

Исследованию нелинейных задач математической физики в последние годы во всем мире уделяется большое внимание. Прежде всего это вызвано тем, что математические модели, с помощью которых приходится изучать различные физические явления (и не только физические), совершенствуются и усложняются с целью более адекватного описания Природы. Линейные математические модели часто уже не устраивают исследователей, так как они не могут описать порой самых важных (определяющих) свойств изучаемого объекта. Принцип суперпозиции, используемый в линейных моделях, в нелинейных моделях может привести к неверным либо грубым результатам. Появилась необходимость вместо традиционных математических методов, применяемых в линейных моделях, создавать новые как аналитические, так и численные методы решения нелинейных задач.

С другой стороны, бурное развитие вычислительной техники в послевоенные годы дало в руки исследователя мощный инструмент, с помощью которого удастся разработанные вычислительные методы решения сложных нелинейных задач применять на практике и исследуемые задачи доводить до численных данных. Раньше такие методы практически не могли быть использованы из-за большого объема вычислительной работы.

Таким образом, развитие вычислительной техники способствовало бурному развитию методов решения нелинейных задач математической физики с использованием ЭВМ.

В ОИЯИ большинство задач, поддающихся математическому моделированию, являются нелинейными. Поэтому естественно, что исследованию нелинейных задач в Институте как в теоретическом, так и в вычислительном аспекте всегда уделялось серьезное внимание. Задачи теоретической физики, создания крупных физических установок (ускорители, реакторы), обработки экспериментальных данных приводились к нелинейным математическим моделям (уравнениям), для

исследования которых и разрабатывались новые аналитические и вычислительные методы.

Здесь мы остановимся лишь на одном подходе к решению нелинейных задач математической физики — непрерывном аналоге метода Ньютона. Этот метод развивается математиками ОИЯИ на протяжении многих лет и уже успешно применен к широкому кругу нелинейных задач, связанных с проблематикой Института. Другой причиной, побудившей описать в настоящей статье именно этот метод, является его большая универсальность. На его основе легко получаются численные методы для решения широкого спектра нелинейных задач на ЭВМ. В настоящее время хорошо известно, что численные методы являются наиболее эффективными при решении сложных задач физики.

Часто решение задачи численным методом с использованием ЭВМ является единственной возможностью довести исследование до численных результатов. Аналитические методы хороши лишь при исследовании простых математических моделей. Перейдем теперь к описанию непрерывного аналога метода Ньютона и его применению в нелинейных задачах математической физики, опуская детали.

Итак, пусть требуется решить нелинейное уравнение

$$\phi(x) = 0, \quad (1)$$

где нелинейный оператор  $y = \phi(x)$  отображает пространство Банаха  $X(x \in X)$  в банахово пространство  $Y(y \in Y)$ . Другими словами, требуется найти такие элементы  $x^* \in X$ , которые переводятся оператором  $\phi(x)$  в нулевой элемент пространства  $Y$ .

Уравнение (1) описывает очень широкий класс нелинейных уравнений математической физики. Если говорить лишь о задачах экспериментальной и теоретической физики, то уравнением (1) можно описать магнитные поля в ускорителях и других крупных физических установках, траектории заряженных частиц в ускорителях. Это и уравнения Чу — Лоу, и обратная задача теории рассеяния, и задача на собственные значения для уравнений типа уравнений Шредингера, и еще целый ряд других задач, перечисление которых заняло бы слишком много места.

В дальнейшем мы опишем метод решения уравнения, носящий название непрерывного аналога метода Ньютона.

Для решения уравнения (1) применим метод введения дополнительного непрерывного параметра  $t$ , изменяющегося в интервале  $0 \leq t < +\infty$ . Пользуясь физической терминологией, мы хотим "стационарную" задачу (1) заменить "эволюционной" задачей, причем роль "времени" будет играть дополнительный параметр  $t$ .

Можно бесчисленным множеством способов вводить параметр  $t$ . Существенно лишь требование, чтобы в процессе "эволюции" (при  $t \rightarrow +\infty$ )  $x(t)$  имело предел  $x^*$ , являющийся решением уравнения (1). Итак, мы предположим, что  $x \in X$  зависит от неотрицательного вещест-

венного параметра  $t$  таким образом, что удовлетворяется дифференциальное уравнение

$$\frac{d\phi[x(t)]}{dt} = -\phi[x(t)] \quad (2)$$

или

$$\phi'(x) \frac{dx(t)}{dt} = -\phi(x). \quad (3)$$

Уравнение (3) перепишем в виде

$$\frac{dx}{dt} = -\phi'(x)^{-1} \phi(x), \quad (4)$$

где  $\phi'(x)$  — производная Фреше оператора  $\phi(x)$ , представляющая собой линейный оператор, действующий из  $X$  в  $Y$ . Если ограничиться случаем, когда  $y = \phi(x)$  — функция одной вещественной переменной, то  $\phi'(x)$  — обычная производная функции  $y = \phi(x)$ . Выражение (4) представляет собой дифференциальное уравнение в пространстве Банаха  $X$ .

Зададим для этого уравнения начальное условие

$$x(t) \big|_{t=0} = x_0. \quad (5)$$

Выражения (4), (5) представляют собой задачу Коши для абстрактного дифференциального уравнения. Вместо уравнения (1) мы и будем рассматривать задачу Коши (4), (5). Ею описывается некоторый "эволюционный" процесс  $x = x(t)$ ,  $x_0$  играет роль начального приближения решения уравнения (1). Указанный способ введения дополнительного параметра  $t$  характеризует непрерывный аналог метода Ньютона<sup>/1-4/</sup>.

Задача (4), (5) имеет первый интеграл

$$\phi[x(t)] = \phi(x_0)e^{-t}, \quad (6)$$

из которого сразу следует, что

$$\lim_{t \rightarrow +\infty} \|\phi(x(t))\| = 0. \quad (7)$$

В случае функции одной вещественной переменной знак нормы следует заменить на знак модуля, и мы будем иметь

$$\lim_{t \rightarrow +\infty} |\phi(x(t))| = 0. \quad (8)$$

Если существует предел  $\lim_{t \rightarrow +\infty} x(t) = x^*$ , то из выражений (7) или (8) ясно, что  $x^*$  является корнем уравнения (1).





не отражается даже на программе, написанной для ЭВМ, а влечет за собой увеличение затрачиваемого машинного времени и памяти ЭВМ. При использовании других методов решения нелинейных задач часто каждый следующий этап, повышающий точность решения задачи, требует трудоемкой творческой работы. Например, при использовании метода теории возмущений получение каждого следующего приближения обычно связано с большими трудностями.

Как уже отмечалось, описанный метод был успешно применен в целом ряде нелинейных задач экспериментальной и теоретической физики. Были решены задачи теории ускорителей: расчет повторно-фокусирующих систем транспортировки и формы электронного кольца во внешнем магнитном поле, исследование орбит заряженных частиц в синхрофазотроне ОИЯИ, определение параметров магнитной системы для создания однородного магнитного поля и т.п.

Другой класс задач, решаемых описанным методом, относится к теоретической физике. Это численное решение задач на собственные значения для интегродифференциальных уравнений в теории ядра, численное решение обратной задачи теории рассеяния, исследование уравнений Лоу, анализ спектральных задач в математических моделях мюонного катализа и т.п. Что касается обратной задачи теории рассеяния, то она относится к классу так называемых некорректных задач. Для ее исследования наряду с непрерывным аналогом метода Ньютона используется метод Тихонова решения некорректно поставленных задач.

Здесь перечислен далеко не полный перечень нелинейных задач математической физики, для решения которых можно успешно применить непрерывный аналог метода Ньютона. Основной вклад в разработку и развитие непрерывного аналога метода Ньютона внесли И.В.Пузынин, Е.Х.Христов, Б.Н.Хоромский и автор этих строк.

### *Литература*

1. Жидков Е.П., Пузынин И.В. ДАН СССР, 1968, т.180, № 1, с.18.
2. Говорин М.К. Изв.вузов, сер.матем., 1958, 5 (6), с.18.
3. Жидков Е.П., Макаренко Г.И., Пузынин И.В. ЭЧАЯ, 1973, вып.1, с.127.
4. Визнер Я. и др. ЭЧАЯ, 1978, т.9, вып.3, с.710.



Ускорительная техника

Импульсные реакторы

# СИНХРОФАЗОТРОН КАК УСКОРИТЕЛЬ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЯДЕР, ЕГО ДАЛЬНЕЙШЕЕ РАЗВИТИЕ

*И.Н.СЕМЕНЮШКИН, кандидат физико-математических наук*

*Л.Г.МАКАРОВ, кандидат технических наук*

*И.А.ШЕЛАЕВ, доктор технических наук*

В 1944 году выдающийся советский ученый академик В.И.Векслер сформулировал принцип автофазировки при ускорении заряженных частиц в циклических резонансных ускорителях. Это исключительное по значимости открытие сняло ограничение на получение релятивистских частиц в лабораторных условиях и послужило основой для создания многих поколений уникальных физических приборов — ускорителей заряженных частиц — основных инструментов для исследования структуры материи.

Всего три года, но каких трудных для нашей страны, проходит после открытия принципа автофазировки, а В.И.Векслер и небольшой коллектив ученых и инженеров ФИАН уже завершают работы, совершенный научный подвиг — впервые в мире заработал ускоритель, созданный на основе нового принципа, — электронный синхротрон на энергию 35 МэВ. А еще через два года (невиданный темп!) запущен электронный синхротрон на 250 МэВ, на котором было открыто фоторождение мезонов и положено начало исследованиям на ускорителях в области электромагнитных взаимодействий элементарных частиц и ядер. Серия электронных ускорителей, созданная В.И.Векслером, позволила приступить к разработке проекта синхрофазотрона на энергию протонов 10 ГэВ.

Дубненский синхрофазотрон, созданный под руководством В.И.Векслера, в 50-е годы был крупнейшим протонным ускорителем. Несмотря на то, что после запуска ускорителя прошло почти 30 лет, и сегодня в распоряжении экспериментаторов имеются уникальные пучки частиц. Это стало возможным после выхода синхрофазотрона в начале 70-х годов в не освоенный ранее энергетический диапазон уско-

ренных ядер. Появились экспериментальные возможности для быстрого развития исследований в новом научном направлении — релятивистской ядерной физике, в становлении которой основополагающую роль сыграли работы академика А.М.Балдина.

Открытие в Дубне кумулятивного эффекта в ядерных реакциях, возможность изучения свойств кварковой материи, проявляющихся при энергии 3,5 ГэВ/нуклон (область предельной фрагментации ядер), поставило синхрофазотрон более чем на 10 лет в исключительное положение единственного в мире ускорителя, обладающего энергией пучков ядер выше этой границы.

После получения в синхрофазотроне ускоренного пучка дейтронов было доказано, что нет принципиальных проблем для ускорения и более тяжелых ядер. Однако для реализации таких возможностей необходимо было решить ряд сложных физических и инженерно-технических задач. Главные из них — получение на инжекторе достаточно интенсивных пучков ядер и ускорение ядерных пучков на синхрофазотроне.

Инжектор синхрофазотрона — линейный ускоритель ЛУ-20 рассчитан на получение протонов с энергией 20 МэВ. Его ускоряющая структура, в принципе, может обеспечить и ускорение ядер, если их скорость в процессе набора энергий будет равна или в целое число раз меньше скорости протонов. На существующем инжекторе нет возможности обеспечить скорость ядер на входе в ЛУ-20 и в процессе ускорения, равную скорости протонов, поэтому ускорение должно начинаться со скорости, которая в 2 раза меньше, и энергия ядер на выходе ЛУ-20 составляет 5 МэВ/нуклон.

Для получения ядер или высокозарядных ионов в лаборатории были разработаны и теперь используются на синхрофазотроне три типа оригинальных источников: криогенный электронно-лучевой источник Донца, лазерный, поляризованных дейтронов.

Криогенный электронно-лучевой источник КРИОН имеет рекордные параметры, что обеспечивает получение ядерных пучков, включая криптон, и ионов  $\text{Xe}^{52+}$ . В лазерном источнике ионы высокой зарядности образуются при взаимодействии излучения  $\text{CO}_2$ -лазера с мишенью. На выходе источника получены интенсивные пучки ядер вплоть до фтора, ионы  $\text{Mg}^{10+}$ ,  $\text{Si}^{10+}$  и др. Наличие двух источников высокозарядных ионов позволяет ускорять в инжекторе легкие ядра вплоть до фосфора, а при работе с источником "Полярис" — и поляризованные дейтроны.

Для обеспечения ускорения ядер в синхрофазотроне потребовалось провести реконструкцию ускоряющей высокочастотной системы ускорителя, оснастить ускоритель дополнительными диагностическими датчиками, позволяющими контролировать процесс ускорения в широком диапазоне интенсивностей ускоряемых частиц, улучшить вакуум в камере.

Практически все физические исследования, выполняемые на синхрофазотроне, проводятся на выведенном из ускорителя пучке. Вывод частиц, ускоренных до требуемой энергии, осуществляется последовательно по двум направлениям в одном цикле работы ускорителя. По направлению 1 обеспечивается медленный вывод пучка в течение 500 мс с эффективностью больше 90%. Это направление используется для формирования в экспериментальном зале площадью 6000 м<sup>2</sup> восьми пучков с энергией частиц вплоть до максимальной, на которых могут одновременно работать от 2 до 4 физических установок. По направлению 2 проводится быстрый (< 1 мс) вывод частиц с энергией вплоть до максимальной на одну из двух пузырьковых камер (однометровую жидководородную или двухметровую пропановую). Имеется также возможность выводить по этому направлению частицы средних энергий (0,3 ÷ 1 ГэВ/нуклон) за 500 мс.

В настоящее время в лаборатории имеется 12 каналов частиц, на которых работают 16 установок лабораторий ОИЯИ и других организаций. В течение года синхрофазотрон работает около 4000 часов 5 сеансами, 70% времени — в режиме ускорения ядер. Основные характеристики выведенных из синхрофазотрона пучков приведены в табл.1.

Как видно из изложенного выше, синхрофазотрон обеспечивает достаточно широкий круг физических исследований с помощью пучков релятивистских ядер. Параметры его пучков позволят проводить конкурентоспособные исследования в течение не менее 10 лет. Тем не менее ускорительный комплекс нуждается в непрерывном развитии и оптимизации его эксплуатации.

Поэтому в ЛВЭ на протяжении последних десяти лет энергично развивается программа внедрения сверхпроводимости в ускорительную технику. Основная цель этой программы — резкое снижение расходов на изготовление и эксплуатацию ускорителя. В ходе ее реализации выполнен большой объем проектной и конструкторской работы по изготовлению и экспериментальному исследованию сверхпроводящих магнитов, криостатов, криогенных гелиевых установок и другого оборудования. Важным этапом этой программы является создание в ЛВЭ модельного сверхпроводящего синхротрона — установки СПИН.

СПИН построен с использованием оригинальных сверхпроводящих магнитов, разработанных в ЛВЭ и получивших название магнитов "Дубна". Магниты этого типа обеспечивают получение рабочего поля порядка 2,1—2,3 Т и выгодно отличаются как от обычных теплых магнитов с полем 1,8—2,0 Т, так и от разработанных в других лабораториях сверхпроводящих магнитов с полем 4,0—5,0 Т.

Высокая плотность тока в сверхпроводящей обмотке — порядка 600 А/мм<sup>2</sup> — позволяет почти в 20 раз снизить вес сверхпроводящего магнита по сравнению с теплым той же апертуры, в результате чего трудоемкость изготовления сверхпроводящих магнитов "Дубна", даже с учетом гелиевого криостата, оказывается существенно ниже трудоем-

Основные характеристики выведенных из синхрофазотрона пучков

Выведенные из ускорителя частицы	Энергия ГэВ	Интенсивность (част./имп.)	
		1980 г.	1984 г.
p	9	$4 \cdot 10^{12}$	$4 \cdot 10^{12}$
d	8,2	$4 \cdot 10^{11}$	$1 \cdot 10^{12}$
d <sup>+</sup>	8,2	—	$5 \cdot 10^8$
n	4,1	$10^9$	$10^{10}$
${}^3\text{He}^{2+}$	17,2	—	$2 \cdot 10^{10}$
${}^4\text{He}^{2+}$	16,4	$2 \cdot 10^{10}$	$5 \cdot 10^{10}$
${}^6\text{Li}^{3+}$	24,6	—	$1,5 \cdot 10^8$
${}^7\text{Li}^{3+}$	23,9	—	$2 \cdot 10^9$
${}^{12}\text{C}^{6+}$	49,2	$2 \cdot 10^6$	$5 \cdot 10^8$
${}^{16}\text{O}^{8+}$	65,6	$5 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^7$
${}^{19}\text{F}^{9+}$	73,1	—	$1,5 \cdot 10^7$
${}^{22}\text{Ne}^{10+}$	81,0	—	$10^4$
${}^{24}\text{Mg}^{12+}$	98,4	—	$10^5$
${}^{28}\text{Si}^{14+}$	114,8	—	$10^3$

кости изготовления теплых магнитов. Благодаря сверхпроводимости мощность системы питания ускорителя и величина потребляемой электроэнергии также значительно уменьшаются.

В магнитах типа "Дубна" близко расположенное стальное ярмо позволяет примерно вдвое уменьшить число ампер-витков обмотки. Ярмо магнита обеспечивает также высокую однородность магнитного поля и фиксирует геометрию обмотки. Для сравнения отметим, что в сверхпроводящих магнитах ускорителя ФНАЛа вклад имеющегося стального экрана составляет всего 15% от общей величины поля порядка 4,3 Т. Кроме того, для удержания обмотки в них необходимо изготавливать довольно сложный и высокоточный силовой бандаж из шихтованной нержавеющей стали. Значительный объем магнита ФНАЛа занят полями рассеяния, что примерно в 10 раз повышает энергию, запасенную на единицу длины магнита. Таким образом, магниты "Дубна" при уменьшении поля всего в два раза оказываются на порядок менее материалоемкими, имеют существенно более простую и надежную тех-

нологию, для их использования требуются менее энергоемкие системы питания и охлаждения.

Изготовление серии магнитов "Дубна" для установки СПИН убедительно показало, что принятая технология обеспечивает высокую воспроизводимость параметров магнитов даже при изготовлении их в лабораторных условиях.

Установка СПИН представляет собой жесткофокусирующий сверхпроводящий синхротрон с разделенными функциями поворота и фокусировки ускоряемых частиц. При общем периметре ускорителя 54 м конечная энергия протонов составляет 1500 МэВ, ядер — 526 МэВ/нуклон, а тяжелых нерелятивистских ионов —  $2700 (Z/A)^2$ , где  $Z/A$  — отношение заряда иона к его массе.

Магнитная система СПИНа включает в себя 48 дипольных магнитов с номинальным полем 22,7 кЭ, 58 квадрупольных линз с градиентом 8,7 кЭ/см и два девятиметровых прямолинейных промежутка. Инжектором СПИНа служит импульсный электростатический ускоритель с потенциалом 0,75 МэВ, размещенный внутри кольца синхротрона. В том же здании на расстоянии 60 м от СПИНа установлена крупная гелиевая установка КГУ-1600/4,5, обеспечивающая охлаждение СПИНа до 4,2 К и поддержание рабочей температуры.

Работы по созданию установки СПИН позволили решить многие технологические и конструкторские вопросы по изготовлению и эксплуатации сверхпроводящих ускорителей и перейти к разработке крупного ускорителя, названного "Нуклотроном".

Сооружение "Нуклотрона" явится одновременно модернизацией и развитием синхрофазотрона. Замена его магнитной системы на сверхпроводящие магнитные элементы позволит получить ускоритель с более высокой конечной энергией, с лучшими основными эксплуатационными характеристиками и параметрами пучков.

"Нуклотрон" планируется разместить в имеющемся кольцевом тоннеле вокруг фундамента действующего синхрофазотрона. Максимальное использование действующих производственных помещений, энергетического и кранового хозяйства корпуса синхрофазотрона значительно снизит капитальные затраты на сооружение "Нуклотрона". Применение новейших достижений в технике сверхпроводимости и современной электронике также приведет к снижению эксплуатационных расходов.

"Нуклотрон" будет представлять собой жесткофокусирующий синхротрон с разделенными функциями, его общая длина 250 м. Диаметр наружного круглого вакуумного бака не превысит 0,7 м. Для магнитной системы будут использованы магниты типа "Дубна" из трубчатого сверхпроводника, которые разработаны и опробованы в ЛВЭ.

Охлаждение магнитных элементов будет производиться двухфазным гелием. Криогенный комплекс "Нуклотрона" будет состоять из 2-3 типовых установок КГУ-1600/4,5. Экспериментальная проверка

работоспособности магнитов типа "Дубна" позволяет сделать вывод, что на их основе можно создать ускоритель, работающий с частотой 0,5—1 Гц, с приемлемыми расходами на криогенное обеспечение. Некоторые параметры "Нуклотрона" приведены в табл.2.

Таблица 2

Основные проектные параметры "Нуклотрона"

№№ пп	Параметры	Единица измерения	Величина
1.	Максимальная энергия	ГэВ/нуклон	7
2.	Частота циклов	Гц	0,5 ÷ 1
3.	Интенсивность пучка: дейтронов	част. за цикл	$3 \cdot 10^{12}$
	Mg <sup>12+</sup>		$1 \cdot 10^{11}$
	U <sup>82+</sup>		$1 \cdot 10^9$
4.	Потребляемая мощность	МВт	1,5
5.	Потребляемая энергия (4000 ч работы в год)	млн кВт.ч	4,5
6.	Максимальное поле в диполях	Т	2,2
7.	Количество диполей	шт.	96
8.	Максимальный градиент в квадрупольях	Т/м	38
9.	Количество квадрупольей	шт.	64

Экспериментальное исследование процессов столкновения релятивистских ядер имеет прямое отношение к фундаментальным проблемам современной физики. Эта область физических явлений очень сложна и многообразна, так что создание "Нуклотрона" обеспечивает длительную перспективу важных исследований для больших интернациональных коллективов физиков.



# РАЗВИТИЕ КОЛЛЕКТИВНЫХ МЕТОДОВ УСКОРЕНИЯ

В ОИЯИ

*В.П.САРАНЦЕВ, профессор*

История возникновения и развития коллективных методов ускорения тесно связана с историей ОИЯИ. Работы, выполненные в Институте, не только послужили начальным толчком развития нового направления ускорительной науки, но и на протяжении многих лет его становления определяли передний край этих исследований.

Первые предложения об использовании собственных полей частиц для ускорения и фокусировки были сделаны известными советскими физиками В.И.Векслером, Г.И.Будкером и Я.Б.Файнбергом на конференции в Женеве (1956 г.). В то время уже многое знали о неприятностях, которые вызывают собственные поля заряженных частиц в процессе их ускорения. Много, даже слишком много, знали о неустойчивостях плазмы во внешних полях. Именно эти обстоятельства привели к некоторым пессимистическим взглядам при рассмотрении возможности реализации высказанных предложений. Первые же опыты по ускорению плазмы электромагнитной волной показали, что реализовать впрямую предложения невозможно. Надо от чего-то отказаться. От чего? Вот именно в этот момент и был сделан, пожалуй, самый важный шаг, и сделан он был физиками ОИЯИ. На первый взгляд казалось, что он не имеет отношения к становлению новых методов ускорения. Предложение предусматривало создание кольцевого сгустка электронов за счет адиабатического изменения параметров в растущем магнитном поле. Собственное поле кольца электронов можно существенно уменьшить за счет добавления в кольцо положительно заряженных ионов. Возражение, как говорится, лежит на поверхности — кольцо становится плазменным со всеми вытекающими отсюда неприятностями. Но была в предложении небольшая тонкость: электроны берутся с самого начала релятивистскими, то есть ускоренными до значительных энергий, и тогда для компенсации их полей достаточно небольшого количества ионов, скажем, одного процента от числа электронов. Под плазмой же понимают электрически нейтральное образование из электронов и ионов.

А электронов берется столько, сколько разрешает физика ускорителей с учетом слабого возмущения внешнего магнитного поля. Хорошо, предположим, что мы нашли способ получения электронно-ионного сгустка, но какое это имеет отношение к когерентным методам ускорения? Пожалуй, число ионов мало, и, конечно, принцип когерентности, когда существует прямая зависимость ускоряющего поля от числа ускоряемых ионов, здесь не выполняется. В то время, опять-таки учеными ОИЯИ, был сделан следующий важный шаг — было решено отказаться от когерентности. А что же остается? Остается поле, действующее со стороны всех электронов на все ионы, оно может достигать  $10^6$ —  $10^7$  вольт на сантиметр. И это поле необходимо заставить работать на ускорение и удержание ускоряемых ионов. Задача в общих чертах была понятна. На этом этапе и возникла в ОИЯИ группа исследователей, которая впоследствии выросла в Отдел новых методов ускорения.

Сейчас трудно даже перечислить те вопросы, которые возникли перед группой в процессе физического обоснования нового метода ускорения. Была разработана теоретическая модель тонкого двухкомпонентного кольца, которая позволила в линейном приближении рассмотреть многие условия стабильного существования такого сгустка и определить рамки экспериментальных исследований.

Как ускорять такой сгусток? Можно ли обеспечить фокусировку в процессе ускорения и нужно ли? Возможно ли в эксперименте обеспечить без возмущения адиабатическое изменение размеров кольца?

Принципиальные положительные ответы на эти вопросы были получены к 1967 году. Можно выйти на суд мировой общественности — и это было сделано в 1967 году в Кембридже на Международной конференции по ускорителям. Как назвать новое направление в ускорителях? Именно тогда и появилось название — коллективный ускоритель ионов. В это название мы вложили не только принцип ускорения — ускорение полями, создаваемыми коллективом частиц, — но и чувство удовлетворенности работой коллектива ученых и инженеров над новой схемой ускорения. И хотя впоследствии много появлялось разных названий, но все-таки первое до сих пор знаменует новое направление в развитии ускорителей — коллективные методы ускорения.

Возвращаясь к конференции по ускорителям 1967 года, я не могу описать реакции на наши предложения. В силу разных причин никто из отдела в работе этой конференции не участвовал. Мы долго не решались послать доклад без докладчика. Работа была сделана большая, и нужно было за нее отчитаться. Эти доводы были — за. Но были и против — а вдруг не поймут и объяснить будет некому? Это в дальнейшем привело бы к предвзятому отношению на многие годы. Ведь конференции бывают лишь один раз в три года.

И все-таки послали! Волна реакции на доклад в полной мере докатилась до нас только через 4 месяца — когда в Беркли собрались все

известные ускорительщики и специально обсудили сделанные нами предложения. На открытии этого совещания — это был первый симпозиум по коллективным методам ускорения — известный американский физик Э.Мак-Миллан сказал, что в Беркли проведено теоретическое рассмотрение нового принципа ускорения и не найдено видимых недостатков. Элегантный принцип ускорения знаменует собой совершенно новый класс ускорителей, использующий большие поля плазменного типа. Предполагается, что в ближайшее время в Беркли начнутся эксперименты по формированию электронных колец с использованием индукционного ускорителя электронов — установки "Астрон".

Значит, поняли и оценили. Мало того, начали работы во многих странах. Теперь надо было показать работоспособность нового метода. И не хотелось, чтобы это сделали другие. Правда, у нас был задел — модель системы формирования колец. Но, как потом стало ясно, во временном отношении он составлял только полгода. Не так уж и мало, если работа делается коллективом специалистов, отдающих себя целиком этой работе. Энтузиазма было хоть отбавляй, но мастерства не хватало. Компенсировали на первых порах выдумкой. Необходимо было наряду с проверкой основных принципов нового метода ускорения создать коллектив специалистов самого разного профиля, способный решать задачи на самом переднем крае науки и техники.

И первая задача была решена успешно. В 1969 году в ОИЯИ впервые получили фотографии электронных колец. Конечно, с позиции сегодняшнего уровня они кажутся плохими, но они были первыми. В 1971 году были получены ускоренные  $\alpha$ -частицы. Нерегулярно, случайно, на модели, технически далеко не совершенной, но получены опять-таки впервые. Таким образом, приоритет ОИЯИ в создании нового способа ускорения частиц неоспорим. Подобные опыты в Гаршинге (ФРГ) удалось воспроизвести только в 1975 году. Но тем не менее, все, что было до этого времени, — это макеты, модели. Нужен был ускоритель. И вот здесь на первый план выходила техника, самая разная: слаботочная и сильноточная электроника, импульсная техника, магнитные поля, импульсные и стационарные, ультравысоковакуумная техника, электротехника. Не меньшую, а подчас и определяющую роль играла правильно и рационально выбранная конструкция и, конечно, производство. Все это надо было сделать начиная с нуля. И если сегодня говорить об успехах ОНМУ в обосновании и создании нового типа ускорителей, то необходимо вспомнить в первую очередь именно этапы формирования всесторонне технически грамотного коллектива. Для иллюстрации остановлюсь без особых комментариев на том, как видоизменялась конструкция вакуумной камеры адгезатора. Переход от первой модельной системы к новой диктовался, в основном, необходимостью максимального захвата электронов на орбиту и получения высокого вакуума. Это означало, что стенки нужно максимально приблизить к пучку, а магнитное поле должно проходить сквозь стенку без искажений. Тре-

бования очень сложные. Решалась задача последовательно: сначала камера, армированная дельта-древесиной, затем камера из тонкой нержавеющей стали и, наконец, титановая. Еще один пример — ускоритель электронов. Первый был промышленным, но он не устраивал нас по многим причинам: недостаточная интенсивность пучка, большая длительность импульса, устаревшая конструкция генераторов. СИЛУНД — сильноточный импульсный линейный ускоритель наносекундного диапазона — так назывался новый ускоритель электронов. Это была принципиально новая установка. Достаточно сказать, что индукторы сделаны с использованием феррита, другой генератор, иначе формируется магнитное поле, новый принцип работы источника электронов.

И наконец, последний ускоритель — СИЛУНД-20. Это во всех отношениях уникальный ускоритель. А ведь разработан он и сделан полностью силами специалистов ОНМУ. К тому же мощность пучка этого ускорителя на порядок выше. Только постоянный рост квалификации технического персонала позволил в научном плане оставаться все это время на самом высоком в мире уровне. Если говорить конкретно о достижениях в развитии коллективного метода ускорения, то об этом красноречиво свидетельствуют результаты международных симпозиумов и конференций. Можно коротко резюмировать эти результаты: в Объединенном институте ядерных исследований предложен новый способ ускорения тяжелых частиц. В работах на прототипе коллективного ускорителя экспериментально показаны возможности нового метода для ускорения атомов азота, аргона, ксенона. Достигнутые темпы ускорения в десятки раз превышают полученные на самых современных ускорителях тяжелых ионов. Исследования по коллективному методу ускорения открыли совершенно новое направление в технике ускорителей. Благодаря новому подходу в передаче энергии от легких частиц к тяжелым возникло новое направление в ускорительной технике, которое можно объединить общим названием, — ионные пучки большой мощности, позволившие генерировать импульсы пучков частиц, по мощности сравнимые с мощностью лазеров.

Конкретные пути реализации нового подхода к проблеме ускорения частиц породили в разных странах настолько обильное число модификаций коллективного метода, что этому направлению посвящают уже целые конференции.

В ОИЯИ создание первого ускорителя ведется не ради отработки нового метода, а для использования в исследованиях в области ядерной физики. В этом ускорителе предполагается реализовать все или, точнее, почти все возможности коллективного метода, а именно: ускорять все ионы вплоть до урана, обеспечить высокую эффективность ускорения (примерно в 20 раз выше, чем в самых современных линейных ускорителях тяжелых ионов), достаточную среднюю интенсивность ионов за счет больших частот повторения. Головная часть такого ускорителя уже создана. Исследования показали, что использование различных ис-

точников нейтральных атомов, от газового клапана до лазерного источника, дает возможность получать в нужных количествах действительно любые ионы.

Все системы ускорителя создаются из расчета работы с частотой 20 Гц, в то время как максимальная частота может достигать 50 Гц. В одном цикле ускорения ускоряется  $6 \cdot 10^{11}$  ионов азота, или  $1,5 \cdot 10^{11}$  ионов железа, или  $7 \cdot 10^{10}$  ионов ксенона, или  $4 \cdot 10^{10}$  ионов урана. Соответствующие интенсивности, умноженные на частоту повторения, дают представление о возможностях ускорителя. Если к этому добавить, что энергия 20 МэВ/нуклон достигается на длине 20 м, то станет ясно, что и параметры, характеризующие темп ускорения в такой системе, неплохие.

Исчерпываются ли этим возможности коллективного метода? На последнем конкурсе молодых ученых ОИЯИ на лучшее предложение по экспериментам от ОНМУ сделано предложение по уменьшению размеров электронно-ионного кольца в адгезаторе. Реализация этого предложения приведет к увеличению эффективности ускорения почти на порядок. Это только один из примеров, показывающий, что овладение данным методом ускорения в корне изменит многие устоявшиеся представления в физике ускорителей.

## РЕАКТОР ИБР-2 – ЭТО НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ В НЕЙТРОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

*В.Д.АНАНЬЕВ, главный инженер реактора ИБР-2*

*И.М.ФРАНК, академик*

*Е.П.ШАБАЛИН, кандидат технических наук*

Создание реактора ИБР-2, принятого в эксплуатацию в 1984 г., было длительной и сложной работой. Она не была случайной. Весь предшествующий путь развития Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ закономерным образом привел к тому, чтобы эта установка была создана.

Хорошо известно, что основной тематики Объединенного института ядерных исследований с момента его создания стали фундаментальные исследования в области ядерной физики. Такие исследования с помощью заряженных частиц, ускоренных до высоких энергий, уже велись в Лаборатории ядерных проблем и Лаборатории высоких энергий, вошедших в состав Института при его возникновении. Перспективным представлялось и использование для изучения ядер нейтронного излучения. Нейтрон не имеет электрического заряда. Он интенсивно взаимодействует с ядрами даже при малых энергиях. Было известно, что это взаимодействие весьма сложно зависит от энергии нейтронов: наблюдаются так называемые "нейтронные резонансы", в какой-то мере напоминающие спектральные линии атомов в оптике. Выяснение и изучение этих особенностей — предмет нейтронной спектроскопии ядер. В период становления ОИЯИ в этой области ядерной физики многое еще предстояло выяснить, да и сейчас еще здесь имеется широкое поле деятельности для экспериментатора. В развитии таких исследований можно было пойти традиционным для нейтронной физики путем получения нейтронных пучков с помощью ускорителей или обычных исследовательских реакторов. Однако первый директор ОИЯИ член-корреспондент АН СССР Д.И.Блохинцев настоял на сооружении реактора совершенно нового типа, принцип которого он разработал вместе с коллегами, будучи еще директором Физико-энергетического инсти-

туда в Обнинске. И в 1960 г. в Дубне вступил в строй первый в мире импульсный реактор периодического действия, или пульсирующий реактор, ИБР. Он производил нейтроны короткими импульсами высокой интенсивности, которые следовали друг за другом периодически с регулируемым интервалом от 0,01 до 0,2 с. Средняя интенсивность излучения и мощность реактора (1 кВт) были невелики, что очень облегчало его техническое обслуживание. А импульсный поток нейтронов, который важен для выполнения исследований на нейтронных пучках реактора по методу времени пролета, соответствовал потоку в исследовательских реакторах мегаваттной мощности  $10^{13}$  нейтр./см<sup>2</sup>·с. При этом именно метод времени пролета является основным в нейтронной спектроскопии.

Оснащение Объединенного института еще в начале его развития установкой совершенно нового типа было прекрасной идеей уже само по себе; к тому же оказалось, что и идея пульсирующего реактора весьма плодотворна. Исследования ядер методом нейтронной спектроскопии не только развернулись, но и успешно продолжают до сих пор. Уже в первые годы работы ИБРа физики поняли, что использование пульсирующего потока очень эффективно для изучения строения твердого тела и жидкостей. Нейтрон, который "сбросил" скорость до уровня теплового движения, взаимодействуя с веществом, "чувствует" колебания атомов и отзывается на них изменением скорости. Измеряя скорость нейтрона до и после взаимодействия (что очень легко делать с использованием импульсного потока по методу времени пролета), можно получить ясную картину внутреннего движения атомов. Структура вещества, порядок расположения атомов выявляются в опытах по дифракции нейтронов. Медленный нейтрон взаимодействует с кристаллической решеткой (или другой упорядоченной структурой) так же, как рентгеновские лучи. В ЛНФ в 1964 г. были проведены первые в мире опыты по дифракции нейтронов методом времени пролета. Применение нейтронных методов для изучения строения и свойств твердых и жидких тел в то время было еще совершенно новым в мировой науке. Метод времени пролета для этой цели впервые был использован в ЛНФ. Основополагающими здесь были в первую очередь работы члена-корреспондента АН СССР Ф.Л.Шапира. Теперь плодотворность этого метода общепризнана, в расчете на него строятся импульсные источники нейтронов. Таким образом, уже в начале 60-х годов нейтронная физика в ЛНФ перестала быть только ядерной физикой — она стала служить задачам физики твердого тела (или, точнее — физики конденсированного состояния вещества).

Идея пульсирующего реактора оказалась плодотворной не только потому, что повысила эффективность применения методов нейтронной физики. Конструкция импульсного реактора ИБР допускала его дальнейшее развитие, которое и началось вскоре после запуска. Сначала была увеличена мощность реактора в несколько раз. Затем реактор был

”состыкован” с ускорителем электронов — микротроном. С помощью этой гибридной установки (названной ”бустером”) удалось в десятки раз сократить длительность нейтронной вспышки — с 40 до 1 мкс, что увеличило экспериментальные возможности ИБРа для исследований в области ядерной физики. Работа по созданию ИБРа и бустера была удостоена в 1971 г. Государственной премии СССР; в коллективе лауреатов было 7 сотрудников ОИЯИ.

В середине 60-х годов начались перспективные разработки импульсного реактора типа ИБР нового поколения, который смог бы дать рекордный для исследовательских реакторов поток нейтронов —  $10^{16}$  нейтр./см<sup>2</sup>с. Можно отметить, что за последние 20 лет на стационарных исследовательских реакторах не удалось поднять поток нейтронов выше  $10^{15}$  нейтр./см<sup>2</sup>с.

Теперь, вспоминая прошлое, можно сказать, что сооружение ИБР-2 (так назвали новый реактор) оказалось весьма нелегкой задачей. Инженеры и ученые на каждом шагу сталкивались с трудностями, обусловленными нестандартной, оригинальной конструкцией реактора. При их решении в полной мере проявился инженерный талант Д.И.Блохинцева, который был научным руководителем проекта. Он всегда настаивал, чтобы в реакторе там, где это возможно, применялись узлы и элементы апробированной и хорошо зарекомендовавшей себя конструкции. Так была выбрана активная зона реактора, аналогичная активной зоне реактора БР-5 ФЭИ (Обнинск), жидкометаллическое натриевое охлаждение.

Однако очень существенный элемент реактора — его подвижный отражатель — был совершенно новым узлом, которого нет ни на одном из реакторов. Более того, трудно даже найти аналоги этой машины в других областях техники, поэтому он требовал особого внимания. Назначение подвижного отражателя — пять раз в секунду выводить реактор в надкритическое состояние на 200-300 мкс, в течение которых формируется передний фронт импульса мощности. При уходе отражателя от активной зоны импульс затухает. Подвижный отражатель представляет собой 2 стальных соосных ротора сложной формы массой каждый в несколько сотен килограммов, диаметром 2,5 м; один из них вращается со скоростью 1500 об./мин, второй — медленнее. И при таких параметрах стабильность положения роторов должна сохраняться в пределах сотых долей миллиметра. К тому же обслуживание этого узла реактора в течение всего срока службы (пять лет) невозможно из соображений радиационной безопасности. Эта сложная задача, как и многие другие, возникшие при проектировании реактора, была решена усилиями сотрудников ЛНФ Объединенного института ядерных исследований, уже имевших опыт работы на первом ИБРе, и специалистов ряда других организаций. Ответственную работу по изготовлению системы контроля выполнили польские специалисты.



В 1984 г. после кропотливой работы по пуску и исследованию реактор ИБР-2 был сдан в эксплуатацию. Сейчас параметры его таковы:

средняя мощность	— 2 МВт
мощность в импульсе	— 1500 МВт
продолжительность импульса быстрых нейтронов	— 215 мкс
частота повторения импульсов	— 5 раз в секунду.

В активной зоне реактора "рождаются" быстрые нейтроны; необходимые для нейтронографических исследований "тепловые" нейтроны образуются в окружающих активную зону водяных кассетах в результате замедления скорости быстрых нейтронов при столкновении их с протонами молекулы воды. Затем нейтроны распространяются по вакуумированным каналам (их на ИБР-2 14) к физическим установкам, которые размещаются в двух больших экспериментальных залах и частично в павильонах вне этих залов. "Стартуя" практически одновременно, в течение короткого импульса мощности, нейтроны достигают изучаемого образца в разное время, в зависимости от их скорости. Так нейтроны разделяются по скоростям, и в этом заключается суть метода времени пролета. Определяющей величиной качества источника нейтронов, используемого для экспериментов по методу времени пролета, является плотность потока тепловых нейтронов, идущего в нейтроноводе. Эта величина в реакторе ИБР-2 достигает значения  $10^{16}$  нейтр./см<sup>2</sup>с в пике импульса. Такая высокая светимость источника медленных нейтронов, полученная впервые, позволяет осуществлять эксперименты по изучению структуры и динамики очень сложных объектов (таких, как белковые молекулы и органические кристаллы, жидкие кристаллы), расшифровке текстуры сплавов и минералов, кинетике быстрых процессов в веществах и т.д. Об этом подробно рассказывается в статье А.М.Балагурова, И.Натканца и Ю.М.Останевича, помещенной в этой книге. Научные исследования на реакторе ИБР-2 уже вышли за пределы физики твердого тела; фактически нейтронно-спектроскопический метод времени пролета применяется для решения многих задач биологии, медицины, геологии, металловедения и других наук.

Плодотворность использования импульсных нейтронных источников периодического действия, которая привела к созданию реактора ИБР-2, не осталась незамеченной зарубежной наукой. Вместе с тем реакторы, подобные ИБР-2, нигде не строятся. Ведущие научные центры мира, использующие нейтронные методы, развивают сейчас базу источников на основе высокоэнергетических протонных ускорителей на энергию 0,1—1 ГэВ, так называемых "мезонных фабрик", или spallation neutron source (SNS). Плотность потока нейтронов, достигнутая сейчас на SNS —  $3 \cdot 10^{14}$  нейтр./см<sup>2</sup>с (установка IPNS-1 в Аргоннской национальной лаборатории США). В 1986 г. должен завершиться пуск SNS в Англии (Резерфордская лаборатория), где ожидают потока в  $4 \cdot 10^{15}$  нейтр./см<sup>2</sup>с. Возможно, лишь во второй половине 90-х годов

вступят в строй "мезонные фабрики", которые несколько превзойдут нынешние параметры ИБР-2. Однако к тому времени и характеристики реактора ИБР-2 будут выше за счет намеченных модернизаций. Традиционные источники нейтронов — стационарные исследовательские реакторы — также продолжают использоваться для экспериментов с помощью медленных нейтронов. Реакторы с большим потоком нейтронов (в ILL в Гренобле, в Брукхейвенской лаборатории США и др.) имеют, как правило, многоцелевое назначение. Сооружение и эксплуатация такого реактора в 5-10 раз дороже, чем ИБР-2, а между тем эффективность его для широкого класса исследований, в которых можно использовать метод времени пролета нейтронов, не превосходит, как показал опыт, возможностей ИБР-2. Еще более дорогими являются упоминавшиеся ранее источники на основе протонных ускорителей. Таким образом, путь развития нейтронных источников в ОИЯИ был выбран, безусловно, правильно. В течение своей тридцатилетней деятельности Объединенный институт имел и будет иметь в дальнейшем прекрасные возможности для научных исследований с помощью нейтронов.



Методика физического  
эксперимента

# ДЕТЕКТОРЫ ЧАСТИЦ, ЭЛЕКТРОННАЯ И КРИОГЕННАЯ АППАРАТУРА ДЛЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ И ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

*Ю.В.ЗАНЕВСКИЙ, профессор*

*А.Г.ЗЕЛЬДОВИЧ, профессор*

*И.Ф.КОЛПАКОВ, профессор*

*Ю.К.ПИЛИПЕНКО, кандидат технических наук*

Успешное развитие методики и средств автоматизации физического эксперимента в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ явилось основой для создания экспериментальных установок, предназначенных для выполнения широкой программы физических исследований. Крупные автоматизированные установки с использованием многоканальных детектирующих систем работали и продолжают работать на синхрофазотроне, серпуховском и других ускорителях; к ним относятся:

- "Фотон" — черенковский 90-канальный масс-спектрометр и двухплечевая детектирующая система из проволочных искровых и пропорциональных камер для изучения электромагнитной структуры адронов;
- БИС-2 — бесфильмовый спектрометр из пропорциональных камер, работающий по программе поиска новых очарованных частиц на серпуховском ускорителе;
- СКМ-200 — стримерная двухметровая камера для исследований в области релятивистской физики;
- ДИСК-2 — установка из сцинтилляционных и черенковских счетчиков с поворотным плечом для изучения кумулятивного образования частиц;
- "Альфа" — спектрометр с пропорциональными и дрейфовыми камерами для исследования упругого рассеяния релятивистских ядер и спектра возбуждения малонуклонных систем;
- СЯО — спектрометр ядер отдачи с полупроводниковыми детекторами и дрейфовыми камерами, с тонкой

- мишенью на внутреннем пучке синхрофазотрона для исследования дифракционного взаимодействия протонов с легкими ядрами и фрагментации ядер;
- ”Тау” — спектрометр с дрейфовыми камерами и тонкой мишенью на внутреннем пучке серпуховского ускорителя для поиска распада новых короткоживущих частей;
- NA-4 — тороидальный спектрометр на ускорителе SPS (ЦЕРН) для исследования глубоконеупругого рассеяния мюонов на водороде, дейтерии и углероде, а также для поиска новых частиц;
- ”Кристалл” — спектрометр с дрейфовыми камерами для изучения явления каналирования частиц высоких энергий в монокристаллах;
- ”Резонанс” — стримерная камера с жидководородной мишенью в магнитном поле для изучения редких процессов во взаимодействиях элементарных частиц.

В лаборатории создается многоцелевой спектрометр с пропорциональными камерами и черенковским калориметром для экспериментов в области релятивистской ядерной физики. Специалисты лаборатории принимают участие в создании установки DELPHI для экспериментов на ускорителе LEP в ЦЕРНе.

К основным направлениям методических исследований в лаборатории относятся:

- разработки новых типов детекторов частиц;
- разработки в области электроники, автоматизации и обработки данных;
- развитие криогенных приборов и сверхпроводящих устройств для ядерно-физических экспериментов.

## КООРДИНАТНЫЕ ДЕТЕКТОРЫ

Электронные координатные детекторы частиц — искровые, стримерные, многопроводочные камеры — успешно разрабатываются в Лаборатории высоких энергий в течение длительного времени. Наиболее интенсивное развитие в лаборатории получили многопроводочные координатные детекторы<sup>/1,2/</sup>. Здесь впервые в странах-участницах ОИЯИ разработаны и применены в экспериментах на линии с ЭВМ проводочные искровые камеры, а с 1970 г. ведутся разработки пропорциональных и дрейфовых камер для физических экспериментов и диагностики пучков на синхрофазотроне и серпуховском ускорителе. Уже в 1974 г. в лаборатории была введена в строй одна из крупнейших экспериментальных установок ”Фотон”, в состав которой вошли 32 проводочные

двухкоординатные искровые камеры ( $1 \times 1 \text{ м}^2$ ), 6 пропорциональных камер с электронной системой съема и обработки информации на линии с ЭВМ. Практически все экспериментальные установки лаборатории оснащены пропорциональными и дрейфовыми камерами.

В ЛВЭ разработаны детекторы с высоким пространственным и энергетическим разрешением. Эксперименты на ускорителе в Батавии по определению электромагнитных радиусов пиона и каона при энергии 100 и 250 ГэВ, а также эксперименты по каналированию выполнены с помощью созданных в лаборатории дрейфовых камер с разрешением 60 мкм. Для нового варианта спектрометра ядер отдачи создана "время-проекционная" камера, измеряющая пространственное положение траектории частицы и плотность ионизации. Разрешение прибора по энергии и массе, полученное при исследованиях на вторичном пучке синхрофазотрона, составляет соответственно 0,7 и 3%. Технология создания высокоточных многопроволочных детекторов, разработанная в ЛВЭ, успешно используется в других лабораториях. Работы по созданию многопроволочных детекторов ведутся совместно с ИЯФ (Краков) и ЦИФИ (Будапешт).

Пропорциональные камеры в сочетании с новейшей электронной регистрирующей аппаратурой и вычислительной техникой могут использоваться в качестве детекторов "изображения", или электронных аналогов рентгеновской пленки, что чрезвычайно важно при проведении медико-биологических исследований. Такие системы позволяют значительно уменьшить радиационные нагрузки при проведении исследований и существенно увеличить уровень автоматизации. Детекторы "изображения" для биологии и медицины успешно разрабатываются в лаборатории <sup>3,4/</sup>.

На основе пропорциональных камер создан прибор нового типа УРАН <sup>3/</sup> для двумерного анализа радиохроматограмм и электрофореграмм, позволяющий в сотни раз сократить время анализа. Прибор дает возможность обрабатывать радиохроматограммы неразрушающим методом, он работает на линии с микро-ЭВМ, информация передается на цветной телевизионный монитор. Эта работа удостоена Золотой медали ВДНХ СССР. Прибор используется для систематических исследований в Институте молекулярной биологии АН СССР.

Для исследований структуры монокристаллов белков специалистами ЛВЭ ОИЯИ и Института кристаллографии АН СССР создан крупнейший в мире автоматизированный рентгеновский дифрактометр КАРД-3 <sup>3,4/</sup>, в основу которого входит пропорциональная камера с электроникой обработки информации в стандарте КАМАК на линии с ЭВМ СМ-2. Высокое пространственное разрешение дифрактометра позволило в 50 раз ускорить измерение дифракционной картины, получаемой от монокристаллов белков. По своей производительности прибор превосходит известные дифрактометры аналогичного назначения. С помощью дифрактометра КАРД-3 получены данные для 30 кри-

сталлов, использованные для выяснения связи функций белка со структурой молекул. Академия наук СССР отметила эту работу как одно из важнейших достижений 1982 г.

Впервые в мировой практике в 1982 г. специалистами ЛВЭ при участии Всесоюзного научно-исследовательского института медицинского приборостроения создана гамма-камера на основе многопроволочного координатного детектора<sup>/3/</sup>. По сравнению с традиционными созданная гамма-камера обладает лучшим пространственным разрешением. Прибор используется для обследования пациентов при заболеваниях почек, головного мозга, легких. Разработка удостоена Серебряной медали ВДНХ СССР.

### ЭЛЕКТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Лаборатория высоких энергий достигла больших успехов в области автоматизации физического эксперимента. Здесь впервые в странах-участницах создан набор модулей КАМАК, разработан первый в ОИЯИ микрокомпьютер, предложен специализированный процессор для отбора событий, регистрируемых спектрометрами в экспериментах с элементарными частицами, созданы крупнейшие в странах-участницах ОИЯИ автоматизированные системы сбора и обработки информации, поступающей со спектрометров<sup>/5-8/</sup>.

В лаборатории в течение 1970-1984 гг. разработано 178 модулей КАМАК для экспериментов, созданы десятки автоматизированных систем для физических и инженерных установок. Так, для спектрометра БИС-2 с 10 тысячами каналов пропорциональных камер разработана автоматизированная система сбора и обработки данных, включающая 45 крейтов КАМАК на линии с ЕС-1040.

Высокой степенью автоматизации отличаются базовые установки лаборатории. Наиболее крупные из них:

— автоматизированная система управления режимами работы синхрофазотрона и медленным выводом частиц — информационно-измерительная и управляющая система КАМАК на линии с ЭВМ ЕС-1010;

— первая в странах-участницах ОИЯИ автоматизированная система управления крупной установкой с использованием жидкого гелия — система КАМАК с микро-ЭВМ;

— создаваемый в лаборатории впервые в странах-участницах ОИЯИ сверхпроводящий синхротрон, который также обеспечивается автоматизированной системой с микро-ЭВМ.

Продолжаются работы по созданию автоматизированной системы для "Нуклотрона", внедряются достижения микроэлектроники с использованием новых стандартов микропроцессорных систем.

В лаборатории создан вычислительный центр с ЭВМ ЕС-1055М и ЕС-1040, оснащенный новейшей техникой комбината "Роботрон". Центр включает в себя сеть терминалов для обработки данных и работ на линии со спектрометрами.

Опыт использования автоматизированных систем для исследований в области физики высоких энергий вызывает интерес специалистов, занимающихся автоматизацией различных процессов в народном хозяйстве стран-участниц ОИЯИ. Крупным результатом в области прикладных исследований является разработка модулей и систем КАМАК, которые были внедрены во многих институтах и организациях СССР и других стран-участниц. В частности, совместные разработки модулей и систем КАМАК проводились с объединением "Полон", ИЯФ (Ржеж) и ЦИФИ (Будапешт).

### КРИОГЕННЫЕ ПРИБОРЫ И УСТРОЙСТВА

В Лаборатории высоких энергий под руководством профессора А.Г.Зельдовича создана крупная криогенная база<sup>/9/</sup>, на основе которой велась разработка криогенных приборов для ядерных исследований<sup>/10/</sup>. Созданная в 1964 г. специалистами лаборатории однометровая жидководородная пузырьковая камера до настоящего времени используется в экспериментах на синхрофазотроне. Это простая по конструкции и в то же время одна из самых точных в мире камер. Накопленный опыт использован при разработке двухметровой водородной камеры "Людмила".

Разработанные в ЛВЭ ожижители водорода и гелия обеспечивают работу жидководородных камер и снабжают ожиженными газами подразделения Института. Исследованы процессы очистки газообразного и фильтрации жидкого водорода. Впервые в странах-участницах ОИЯИ исследован процесс орто-, параконверсии водорода, найдены эффективные катализаторы и налажено получение жидкого параводорода<sup>/15/</sup>.

Для физических экспериментов создано около 15 типов различных мишеней, среди них прецизионные, в которых количество водорода устанавливается с точностью до 0,05%. Созданы полностью неметаллические мишени для работы в стримерных камерах. Такие мишени и подобные им сосуды могут работать в электрических и переменных магнитных полях, что имеет прикладное значение<sup>/11,12/</sup>. Исследована теплопроводность криогенной теплоизоляции и проницаемость неметаллических пленок. Изучен процесс формирования и улавливания газовой струи в вакууме. Впервые в мире разработаны струйные водородная, дейтериевая и гелиевая мишени, которые успешно использовались в ИФВЭ (Протвино, СССР) и в первых совместных экспериментах ОИЯИ—ФНАЛ после запуска ускорителя в Батавии (США)<sup>/13/</sup>.



Работы по исследованию сверхпроводимости велись как в направлении изучения свойств сверхпроводящих материалов, так и создания сверхпроводящих магнитов, а также устройств для определения критических токов и измерения электрического сопротивления изоляции, токовводов, источников питания и эвакуации энергии. В перечисленных работах участвовали сотрудники из институтов стран-участниц: ИФТТ, София; Университета, Будапешт; ИЭВМ, Берлин; ТУ, Дрезден; ИФТМ и ЦИФ, Бухарест; МИФИ, Москва; ЭТИ САН, Братислава. С участием специалистов ЭТИ САН ЧССР (Братислава) разработаны калориметрический и электрический методы измерения энергетических потерь в сверхпроводящих кабелях, находящихся в переменных магнитных полях. Метод позволяет улучшить параметры кабелей и снизить потери в импульсных сверхпроводящих магнитах <sup>/17/</sup>.

Важным направлением развития ускорительной техники является получение поляризованного пучка. С участием сотрудников ИЯИ (Варшава) исследованы процессы поляризации атомов и создан для синхротрона криогенный источник поляризованных дейтронов "Полярис" <sup>/14/</sup>.

Введен в эксплуатацию первый экземпляр крупнейшей криогенной гелиевой установки КГУ-1600/4,5, разработанной в НПО "Гелий-маш" (СССР) с участием ЛВЭ <sup>/16/</sup>. Создана современная система автоматического управления установкой. Установка КГУ-1600/4,5 предназначена для криостатирования сверхпроводящих ускорителей. Совместно с ИФВЭ, НПО "Криогенмаш", НИИЭФА (СССР) лаборатория принимает участие в проработке криогенных систем УНК. Создание крупных криогенных установок сопровождалось разработкой технологических элементов — поршневых детандеров (с участием сотрудников ИЯФ, Пхеньян), сосудов Дьюара, сифонов, предохранительных клапанов, автоматических устройств, термометров, указателей и регуляторов уровня, многие из которых использованы другими организациями.

### *Литература*

1. Заневский Ю.В. ЭЧАЯ, 1977, т.8, вып.3, с.631.
2. Заневский Ю.В. Проволочные детекторы элементарных частиц. Атомиздат, М., 1978.
3. Балдин А.М. и др. В кн.: Труды совещания по использованию новых ядерно-физических методов для решения научно-технических и народнохозяйственных задач. Дубна, 1981 г. ОИЯИ, P18-82-117, Дубна, 1982, с.78.
4. Abdushukurov D.A. et al. In: Proc. of the Wire Chamber Conference. Vienna, 1983. Nucl. Instr. and Meth., 1983, vol.15, p.101.
5. Колпаков И.Ф. АЭ, 1978, т.44, вып.4, с.339.

6. Колпаков И.Ф. Электронная аппаратура на линии с ЭВМ в физических экспериментах. Атомиздат, М., 1974, с.231.
7. Колпаков И.Ф. В кн.: 2-й Всесоюзный семинар по автоматизации научных исследований в ядерной физике и смежных областях. ИЯФ СО АН СССР, Новосибирск, 1982, с.58.
8. Колпаков И.Ф., Маталин-Слуцкий Л.А. "Природа", 1984, № 2, с.79.
9. Balandico A.O. Cryogenics, June, 1966, p.158.
10. Криогенные приборы и устройства в ядерной физике (под ред. проф. А.Г.Зельдовича). Энергоиздат, М., 1982.
11. Голованов Л.Б. ЭЧАЯ, 1972, т.2, вып.3, с.717.
12. Голованов Л.Б. ЭЧАЯ, 1977, т.8, вып.5, с.1155.
13. Bartenev V.D. et al. Adv.Cryog.Eng., 1973, vol.18, p.460.
14. Anishchenko N.G. et al. In: Proc.5th Int.Symp. on High Energy Spin Phys., Brookhaven, 1982. AIP Conf.Proc., N.Y., 1983, No.95, p.445.
15. Буянов Р.А. , Зельдович А.Г., Пилипенко Ю.К. Химическая промышленность, 1961, № 2, с.105.
16. Пронько В.Г. и др. ОИЯИ, P18-12147, Дубна, 1979, с.347.
17. Дробин В.М. и др. ПТЭ, 1980, № 3, с.203.

# МЕТОД ПОЛУЧЕНИЯ СВЕРХНИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР ПУТЕМ РАСТВОРЕНИЯ $^3\text{He}$ В $^4\text{He}$ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ В ФИЗИКЕ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

*Б.С.НЕГАНОВ, доктор физико-математических наук*

Современные методы исследования характеризуются все более интенсивным внедрением в них низкотемпературной криогеники, получившей в последние десятилетия существенное развитие. В связи с широким применением гелиевых температур и явления сверхпроводимости возникла даже новая область индустрии. Благодаря открытию и интенсивному использованию эффектов Мессбауэра и Джозефсона произошли поистине фантастические изменения в измерительной технике. Существенный прогресс намечается также в вычислительной технике. Но все это — начало реализации возможностей лишь области гелиевых температур. Теперь уже очевидно, что освоение одной этой области температур способно преобразить современный мир техники. Интервал же температур, лежащий ниже одного градуса по шкале Кельвина, условно называемый областью сверхнизких температур и являющийся "бесконечным" в том же смысле, в каком "бесконечен" интервал скоростей, изучаемый с помощью средств ускорительной техники, таит в себе, по-видимому, не меньшее многообразие явлений, революционное влияние которых так же невозможно предвидеть, как полвека назад — влияние открытий в используемой области гелиевых температур. Развитие ядерной энергетики, стимулирующее промышленное освоение области гелиевых температур, открыло путь и к освоению области сверхнизких температур благодаря получению в достаточном количестве изотопа  $^3\text{He}$ .

В настоящей статье сообщаются результаты развития и применения физики и техники сверхнизких температур, основанной на использовании  $^3\text{He}$ , в изучении фундаментальных процессов микромира. Излагаемый ниже материал является кратким итогом двадцатилетнего опыта работ, ведущихся в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ в этой области. Следует отметить, что это направление в своей начальной стадии было далеко от тематики Института. Развитием его мы обязаны директору лаборатории члену-корреспонденту АН СССР, профессору

В.П.Джелепову, который оказал решительную и всестороннюю поддержку исследованиям и на котором, естественно, лежала ответственность за итоги этой работы.

За прошедшее время в лаборатории был разработан и внедрен новый метод получения сверхнизких температур, основанный на использовании эффекта охлаждения при растворении жидкого  $^3\text{He}$  в сверхтекучем  $^4\text{He}$ , предсказанного Г.Лондоном в 1951 г. В итоге удалось понизить предельную температуру, достигаемую с помощью жидкого гелия, почти в 500 раз.

Сущность процесса охлаждения при растворении  $^3\text{He}$  в сверхтекучем  $^4\text{He}$  так же проста, как и в обычном способе, основанном на испарении низкотемпературных жидкостей. Как и классический метод, этот способ основан на использовании скрытой теплоты перехода жидкость—"пар", так как процесс растворения  $^3\text{He}$  в  $^4\text{He}$ , в соответствии с теоретическими моделями, можно рассматривать как испарение квантовой жидкости с переходом ее в ферми-газ. При этом роль  $^4\text{He}$  в образующемся растворе из-за нулевой энтропии сверхтекучего компонента  $^4\text{He}$  сводится к роли сосуда с остаточным фоном бозевских квазичастиц, то есть к некоторому новому "вакууму", взаимодействие с которым атомов  $^3\text{He}$  приводит лишь к некоторой перенормировке эффективной массы квазичастиц  $^3\text{He}$ . Очевидно, подобный процесс "испарения" будет происходить до тех пор, пока образующийся раствор не превратится в аналог насыщенного пара и система не будет представлять собой равновесие двух фаз — жидкости и газа. Это явление отражает расслоение раствора, обнаруженное Уолтером и Фербенком в 1956 г. Критической температурой, при которой плотность "пара" в жидкости становится одинаковой и теплота перехода обращается в нуль, оказалось значение 0,86 К. Соответствующая фазовая диаграмма раствора, выясненная позднее, приведена на рис.1. Диаграмма дает равновесные значения концентраций растворов  $X^I$  и  $X^{II}$  в области расслоения фаз в зависимости от температуры раствора. Благоприятной особенностью является почти 100% концентрация  $^3\text{He}$  в легкой верхней фазе при  $T \sim 0,2$  К и конечная концентрация  $^3\text{He}$  в тяжелой "газовой" фазе при  $T = 0$ , обеспечивающая работоспособность метода при сколь угодно низких температурах из-за высокой равновесной упругости "пара" вплоть до  $T = 0$ .

Для того чтобы процесс растворения мог протекать с постоянной скоростью, достаточно непрерывно производить удаление перешедших в "паровую фазу" атомов  $^3\text{He}$ , нарушая равновесие фаз и вызывая новые переходы, как и в обычном способе охлаждения при непрерывной откачке паровой фазы над кипящей жидкостью. Самым замечательным обстоятельством, упрощающим все дело, оказалось то, что этот процесс извлечения "испарившихся" атомов  $^3\text{He}$  из объема, занятого  $^4\text{He}$ , то есть аналог процесса откачки паровой фазы, можно осуществлять с помощью диффузионных насосов, как и в обычном способе ох-

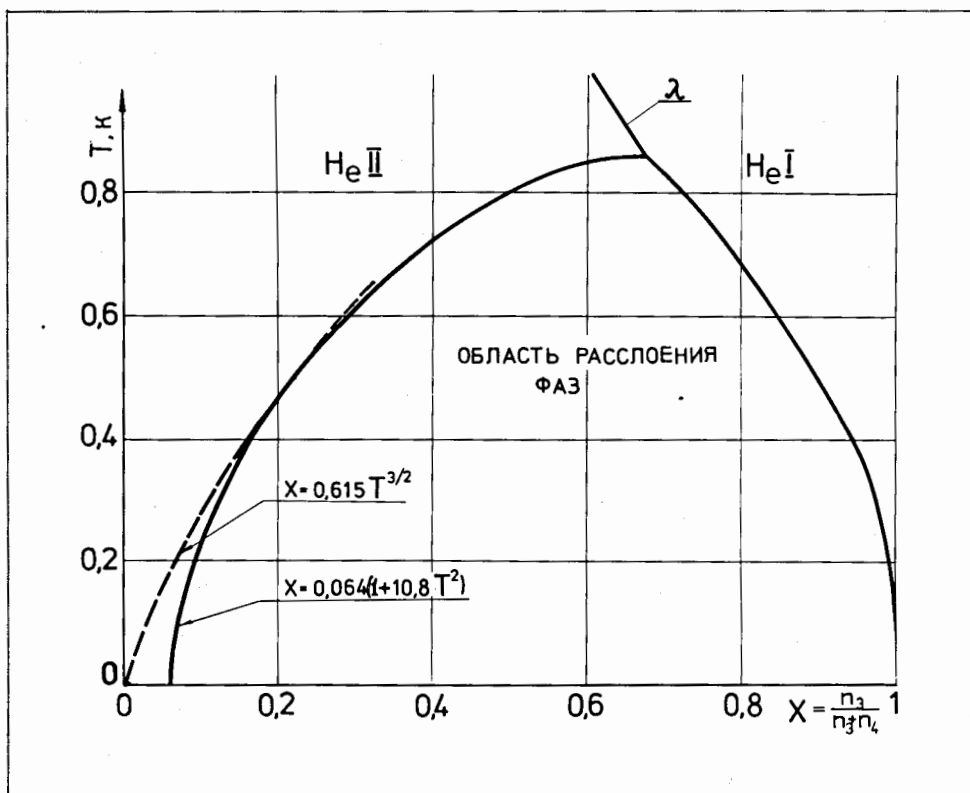


Рис.1. Фазовая диаграмма раствора  ${}^3\text{He}$  в  ${}^4\text{He}$ .  $n_3$  и  $n_4$  — число атомов  ${}^3\text{He}$  и  ${}^4\text{He}$  в ед. объема.

лаждения. Для этого достаточно разделить объем  ${}^4\text{He}$ , содержащий "газовую" фазу  ${}^3\text{He}$ , на две части, соединив их узким каналом. Если затем один из объемов, который теперь принято называть ванной испарения, нагреть до температуры около 0,7 К, то содержащийся в растворе  ${}^3\text{He}$  начнет интенсивно испаряться, в то время как жидкий  ${}^4\text{He}$ , атомы которого связаны между собой большими силами, будет находиться еще в сверхтекучем состоянии. Собирая откачанный диффузионным насосом  ${}^3\text{He}$ , можно замкнуть цикл, подавая снова сконденсированный  ${}^3\text{He}$  во второй объем, имеющий более низкую температуру вследствие поглощения в нем тепла при переходе атомов  ${}^3\text{He}$  через границу двух фаз. Дальнейшее движение атомов  ${}^3\text{He}$  в ванну испарения будет происходить по узкому соединительному каналу под действием перепада осмотического давления, возникающего и поддерживаемого благодаря непрерывной откачке из этой ванны паровой фазы  ${}^3\text{He}$ .

Таким образом, процесс получения сверхнизкой температуры сводится к испарению жидкого  ${}^3\text{He}$  в две стадии: сначала происходит

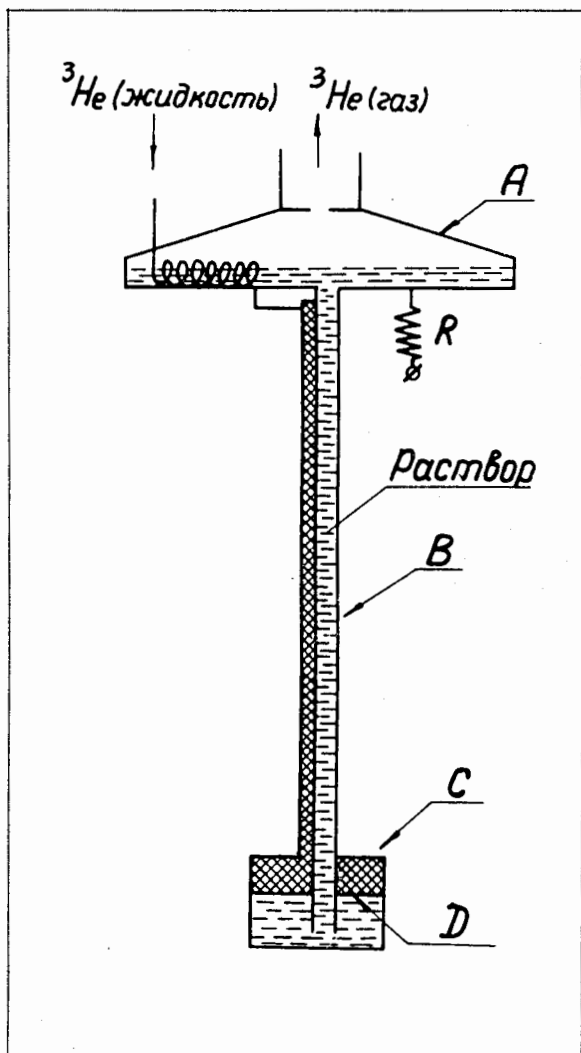


Рис.2. Принципиальная схема ступени растворения  ${}^3\text{He}$  в  ${}^4\text{He}$ .

интенсивное "испарение" в объем, заполняемый жидким  ${}^4\text{He}$ , и реализуется некоторая весьма малая доля полной теплоты испарения, а затем при сравнительно высокой температуре происходит испарение  ${}^3\text{He}$  из его слабого раствора в  ${}^4\text{He}$  и реализуется остальная, главная часть скрытой теплоты испарения  ${}^3\text{He}$ . Сумма этих значений теплоты (при одной и той же температуре) равна теплоте испарения чистого  ${}^3\text{He}$  в физический вакуум. Чтобы сделать процесс растворения не только непрерывным, но и эффективным, необходимо возвращаемый в ванну растворения жидкий  ${}^3\text{He}$  охладить до температуры, близкой к температуре ванны растворения. Эту функцию в рефрижераторах растворения выполняет третий главный их элемент

— теплообменник, в который превращаются диффузионный канал и канал возврата жидкого  ${}^3\text{He}$  путем создания между ними теплового контакта с достаточно развитой поверхностью теплообмена. В этом случае полезная тепловая нагрузка или холодопроизводительность может быть выражена очень простой формулой:  $\dot{q} = 95Z(T^2 - T_0^2)$  Вт, где  $T_0$  — температура раствора при отсутствии внешнего тепла,  $T$  — рабочая температура,  $Z$  — скорость растворения.

Принципиальная схема рефрижератора с замкнутым циклом растворения  ${}^3\text{He}$  показана на рис.2. Устройство состоит из ванны испарения А, противоточного теплообменника В и ванны растворения С. Находящийся в верхней части ванны С  ${}^3\text{He}$  непрерывно растворяется на границе разделения фаз D, переходя в раствор, заполняющий осталь-

ную часть ванны С, один из каналов теплообменника В и некоторую часть ванны А. С той же скоростью происходит удаление паров  $^3\text{He}$  из ванны А с помощью внешнего насоса, очистка и конденсация в криостате и возвращение в ванну С через другой канал теплообменника после предварительного охлаждения в ванне А. Скорость откачки паров  $^3\text{He}$ , а следовательно, и скорость циркуляции  $^3\text{He}$  в системе, определяется производительностью используемых насосов и давлением паров  $^3\text{He}$  над уровнем жидкости в ванне А, зависящим от концентрации и температуры раствора в ней. Последний параметр может быть произвольно задан с помощью нагревателя R, что и позволяет регулировать скорость циркуляции  $^3\text{He}$  Z и связанную с ней холодопроизводительность установки  $q$ .

Первая экспериментальная работа, опубликованная нами в 1965 году<sup>/1/</sup>, сразу показала основные преимущества нового способа и послужила толчком к освоению его во многих научных центрах мира. Скоро этот метод получил мировое признание и широкое применение прежде всего непосредственно в физике сверхнизких температур, практически вытеснив метод адиабатического размагничивания, являвшийся ранее единственным способом получения температур ниже 0,3 К. Минимальная температура, достигнутая нами с помощью этого метода в 1968 г., была равна 5,5 мК. В настоящее время этим методом в стационарном режиме получают температуру до 2 мК, и благодаря ему физика сверхнизких температур вступила в новую фазу развития.

Кроме развития метода охлаждения нашей задачей был, естественно, поиск наиболее эффективных применений его в исследованиях, проводимых по программе Объединенного института ядерных исследований. Основываясь на преимуществах метода и прежде всего на высокой холодопроизводительности, можно было надеяться, что такой областью будет создание поляризованных мишеней с более широкими возможностями, называемых теперь мишенями "замороженного" типа<sup>/2/</sup>. Такие мишени обладают предельной степенью поляризации, близкой к 100%, стабильностью во времени, возможностью изменения направления вектора поляризации и, что наиболее существенно, возможностью применения магнитных систем с изменяющейся во время опыта апертурой, определяющей в значительной степени круг задач, решаемых с помощью таких мишеней. Нами были разработаны и введены в действие две протонные и две дейтронные поляризованные мишени "замороженного" типа для высоких и средних энергий, успешно используемые в настоящее время в опытах на ускорителях ИФВЭ (Протвино) и ЛИЯФ (Гатчина) для изучения поляризационных эффектов.

Другим эффективным применением нового метода оказался способ поляризации короткоживущих ядер, имплантированных в магнитные матрицы, успешно используемый в нашей лаборатории<sup>/3/</sup>. Изучение асимметрии излучения короткоживущих поляризованных ядер в сочетании с измерениями магнитного ядерного резонанса на этих ядрах

открыло новые широкие возможности в ядерной спектроскопии. Исследования с ориентированными радиоактивными ядрами представляют значительный интерес также для физики твердого тела.

Однако наиболее перспективным использованием разработанной техники получения сверхнизких температур для физики элементарных частиц является создание изолированных от внешних воздействий сверхчувствительных систем с массой порядка 100 кг и более <sup>14/</sup>. Такие системы можно использовать, например, для изучения взаимодействия нейтрино с веществом в области чрезвычайно малых передач импульса, недоступной наблюдению обычными методами. Фундаментальной задачей, решаемой с помощью изолированных систем, является обнаружение гравитационных волн и других возможных ультраслабых взаимодействий, если они существуют в природе. Этим методом, по-видимому, на новом уровне может быть исследована также проблема двойного безнейтринного  $\beta$ -распада ядер <sup>15/</sup>. Такие опыты требуют длительного наблюдения за адиабатической системой при температуре порядка 10 мК и ниже в условиях подземной лаборатории, максимально изолированной как от механических и электромагнитных воздействий, так и от воздействия со стороны космического и радиоактивного излучения. Можно надеяться, что в этих условиях будет достигнут порог регистрации тепловыделения в системе на уровне  $10^{-22}$  Вт/г. В ближайшие годы предполагается начать эти эксперименты.

### *Литература*

1. Неганов Б.С., Борисов Н.С., Либург М.Ю. ЖЭТФ, 1966, 50, с.1445.
2. Неганов Б.С. Вестник АН СССР, 1968, 12, с.49.
3. Навратил И. и др. ОИЯИ, БЗ,6-9223, Дубна, 1975.
4. Неганов Б.С. ОИЯИ, 8-81-193, Дубна, 1981.
5. Мицельмахер Г.В., Неганов Б.С., Трофимов В.Н. ОИЯИ, Р8-82-549, Дубна, 1982.



# РАЗВИТИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЯДЕР

*И.А.ГОЛУТВИН, доктор физико-математических наук*

Прогресс в физике элементарных частиц во многом определяется методическим обеспечением экспериментальных исследований. Увеличение доступной на ускорителях энергии частиц или ускорение новых типов частиц требуют реализации в детекторах новых свойств и качественного улучшения ранее доступных характеристик. Этот процесс совершенствования экспериментальных методов происходит непрерывно. Особенно большие успехи достигнуты за последнее десятилетие, когда именно высокий методический уровень экспериментальных установок позволил сделать крупнейшие открытия в физике.

Развитие экспериментальных методов исследования элементарных частиц и релятивистских ядер в течение последних 5-10 лет являлось одним из главных направлений деятельности Отдела новых методов ускорения. Наряду с созданием нескольких крупных экспериментальных установок был выполнен большой объем исследований и разработок, являющихся методической основой нового поколения экспериментальных установок. Три фактора определяли успехи в этой области исследований:

- глубокая инженерная проработка и ориентация на современную технологию;
- использование последних достижений электроники и вычислительной техники;
- неразрывная связь методических разработок с проведением экспериментов на ускорителях.

За это время получены следующие основные результаты:

- созданы координатный детектор установки NA-4, методическая база для разработки, изготовления и испытаний проволочных пропорциональных и дрейфовых камер большого размера, проведены реконструкция экспериментальной установки NA-4, дополнение ее другими типами детекторов;

- созданы дрейфовые камеры размером 2x4 м для установки "Нейтринный детектор", изготовление которых организовано в Опыт-

ном производстве ОИЯИ; разработана многоканальная электронная аппаратура для считывания информации с дрейфовых камер, организовано ее тиражирование для нескольких тысяч каналов;

— разработаны и исследованы разные типы проволочных камер, обеспечивающих высокую точность и высокое быстродействие, изготовлены опытные партии этих камер;

— разработан комплекс электроники для пропорциональных камер, изготовлены опытные партии приборов, создана система автоматического контроля и испытания электроники в процессе изготовления на основе микропроцессорных устройств;

— на основе разработанных пропорциональных камер и электроники проведена реконструкция и запуск установки "Сигма" на пучке ускорителя ИФВЭ (Протвино);

— разработана методика регистрации релятивистских ядер на основе пропорциональных камер с малым количеством вещества на пути частиц;

— разработан новый метод исследования ядерных фрагментов на основе черенковских счетчиков с тонкими радиаторами;

— на пучке релятивистских ядер синхрофазотрона создана новая экспериментальная установка, на которой произведены исследования процессов образования и свойств релятивистских ядерных фрагментов.

#### СОЗДАНИЕ И РЕКОНСТРУКЦИЯ УСТАНОВКИ NA-4

В 1975 году было подписано соглашение о подготовке и проведении силами нескольких институтов из разных стран мира \* крупномасштабных исследований процессов глубоконеупругого рассеяния мюонов на различных мишенях на 400 ГэВ протонном ускорителе ЦЕРНа (эксперимент NA-4). В 1976 г. были начаты работы по изготовлению узлов установки, а в 1978 г. состоялся ее комплексный запуск. В 1979-1980 гг. были получены экспериментальные данные на углеродной мишени, в результате анализа которых

— установлены количественные характеристики поведения неупругих структурных функций нуклонов и ядер в зависимости от переданного импульса и определено значение нормировочного параметра  $\Lambda_{QCD}$ , необходимого для современной теории сильных взаимодействий;

— определен верхний предел образования T-частицы;

— измерена структурная функция ядра при глубоконеупругом рассеянии мюона на ядре в кумулятивной области.

---

\* Объединенный институт ядерных исследований, Дубна; Европейская организация по ядерным исследованиям, Женева; Институт физики Мюнхенского университета, ФРГ; Центр ядерных исследований, Сакле, Франция; Институт физики университета в Болонье, Италия.

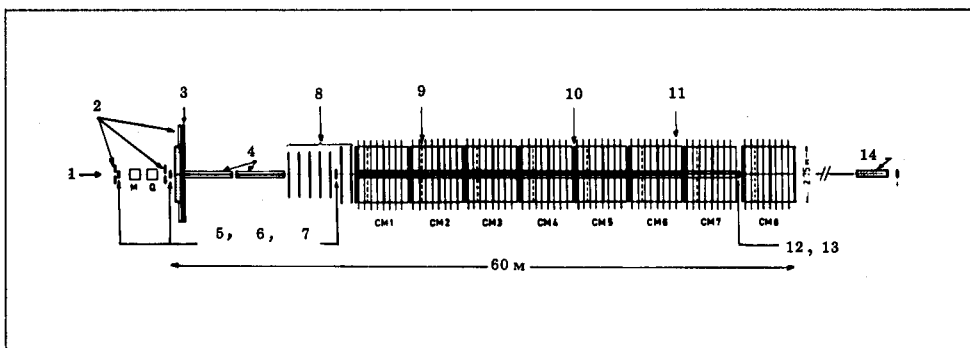


Рис.1. Общий вид установки NA-4. 1 — пучок, 2 — счетчики антисовпадений; 3 — экран из железа; 4 — мишени; 5,6,7 — пучковые годоскопы; 8 — гексагональные камеры; 9 — триггерные счетчики мозаичной структуры; 10 — сегментированные триггерные счетчики; 11 — пропорциональные камеры; 12,13 — пучковые годоскопы; 14 — экран.

Дальнейшее углубление знаний по изучаемым проблемам было невозможно без совершенствования экспериментальной аппаратуры. Поэтому в 1980-1981 гг. была проведена реконструкция установки с целью расширения кинематической области и повышения точности измерения сечений. Начиная с 1982 г. весь экспериментальный комплекс NA-4 работает в полном объеме в режиме набора данных на разных мишенях.

Установка в ее последней конфигурации схематично показана на рис.1. Она состоит из системы измерения пучковых частиц и защиты от фона (пучковые годоскопы 5,6,7,8,9 с общим числом элементов 400, счетчики антисовпадений с общей площадью  $25 \text{ м}^2$ ); 8 супермодулей (СМ-1÷СМ-8), образующих тороидальный спектрометр, и фронтального спектрометра.

В супермодулях установлено по 8 координатных плоскостей (всего 64), каждая из которых образована из двух пропорциональных камер размером  $3 \times 1,5 \text{ м}$ . Детали конструкции камеры показаны на рис.2. Камера состоит из двух самоподдерживающихся панелей, двух разделительных рам с приклеенными печатными платами и сигнального электрода из золоченой вольфрамовой проволоки диаметром 20 мкм. Проволоки сигнального электрода, натянутые вдоль 3-метровой стороны, имеют поддержки через каждые 60 см и распаяны на печатных платах. Шаг проволочек 2 мм. 4-компонентная газовая смесь непрерывно продувается через камеры. Контроль состава смеси осуществляется автоматически с точностью лучше 1%.

На одной стороне камеры размещается 11 карт электроники. Одна карта имеет 32 канала, каждый из которых содержит усилитель-дискриминатор с низким входным сопротивлением, за которым следу-

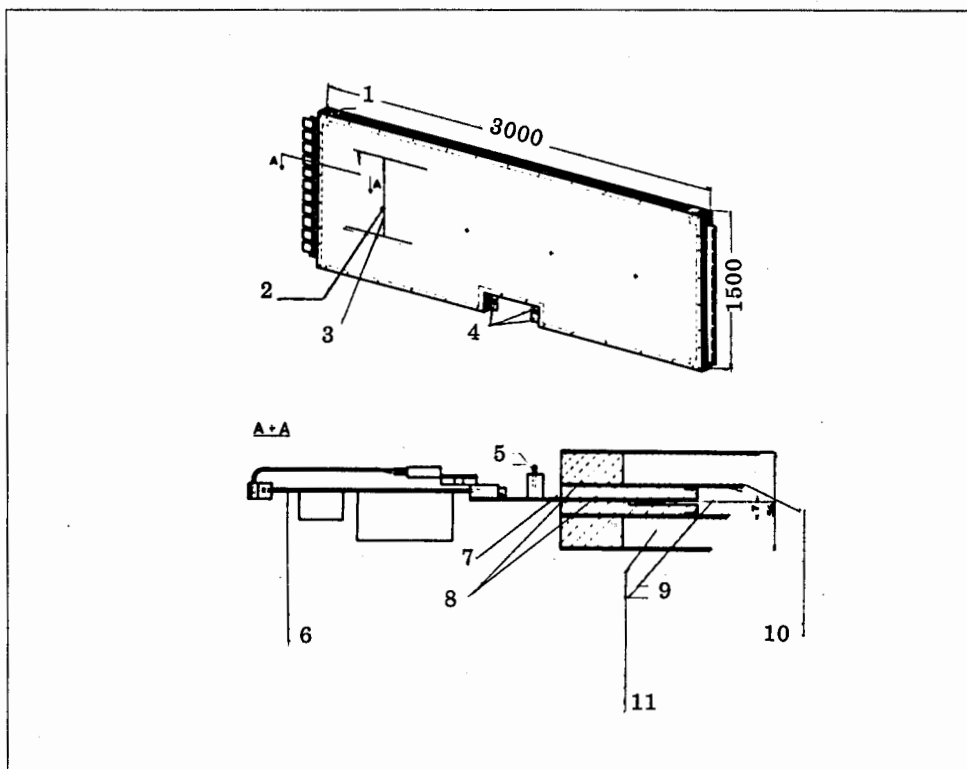


Рис.2. Детали конструкции пропорциональной камеры размером 3х1,5м. 1 — газ, 2 — разделительный упор; 3 — поддерживающие проволоки; 4 — разъемы перехода; 5 — 2 мм/4 мм переключатель; 6 — карта считывания F6 2001 или LRS 7700; 7 — печатная плата; 8 — рамы из вентронита; 9 — 20 мкм проволока из золоченого вольфрама; 10 — проводящее покрытие; 11 — панель с сотовым заполнением.

ют два устройства задержки на  $470 \pm 10$  нс, подключаемые к выходу усилителя поочередно, чтобы уменьшить неэффективность канала за счет "мертвого" времени. При нагрузке  $10^5$  сигналов на канал неэффективность меньше  $2,5 \times 10^{-3}$ .

Ширина плато эффективности составляет несколько сотен вольт. Типичные кривые задержанных совпадений показаны на рис.3. На рис.4 показано представление на дисплее типичного события глубоконеупругого рассеяния.

В целом вся система пропорциональных камер показала превосходные характеристики в течение многолетнего периода набора данных. Средняя частота обрыва проволочек составила 3 из 112640 в год, а число "шумящих" и "мертвых" каналов электроники не превышало 20 за два месяца непрерывной работы.

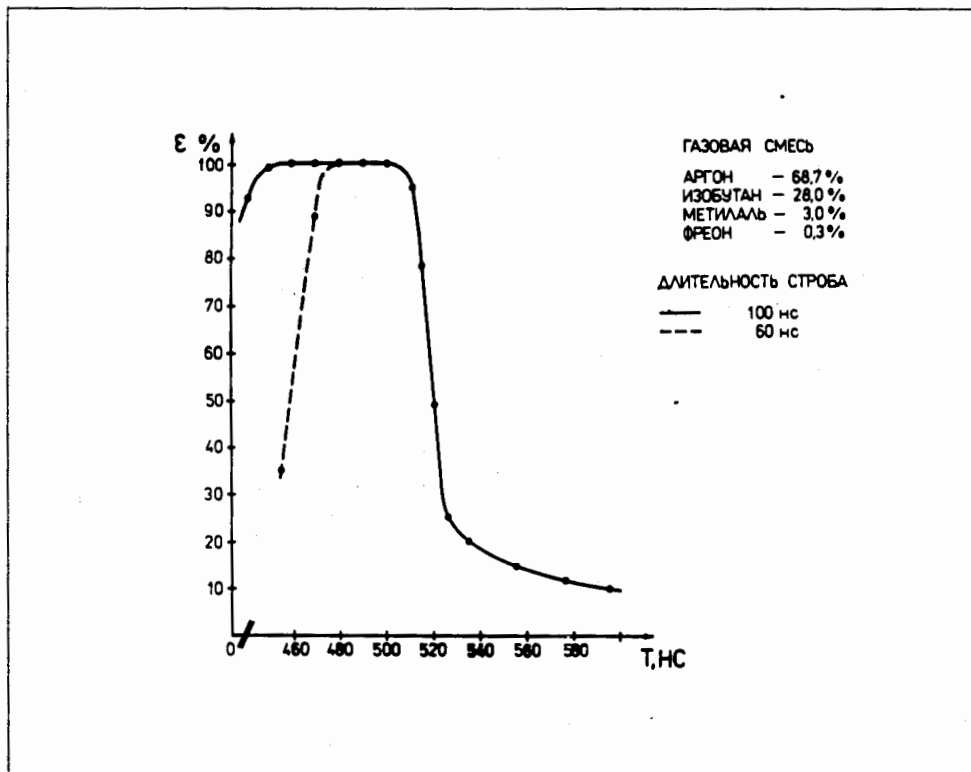


Рис.3. Зависимость эффективности пропорциональной камеры от задержки строба (кривая задержанных совпадений) для двух длительностей строба — 100 нс (сплошная линия) и 60 нс (пунктирная линия).

Основу фронтального спектрометра составляют пропорциональные камеры гексагональной формы, каждая из которых состоит из трех плоскостей, повернутых на  $60^\circ$  по отношению друг к другу. При создании гексагональных камер был учтен опыт, приобретенный в процессе разработки пропорциональных камер тороидального спектрометра. Сохранены основные требования: высокая идентичность и надежность; жесткость конструкции; отсутствие магнитных материалов; наличие точных реперных отверстий для юстировки; расположение регистрирующей электроники непосредственно на камере; простота и технологичность изготовления.

Основные элементы конструкции камеры показаны на рис.5. Особенностью камеры является наличие на каждом катоде двух чувствительных областей: внутренней, диаметром 10 см, и внешней, гексагональной формы, с максимальным размером 220 см. На эти области подается различное высокое напряжение, что позволяет в широких пределах управлять эффективностью регистрации частиц. Пространственное

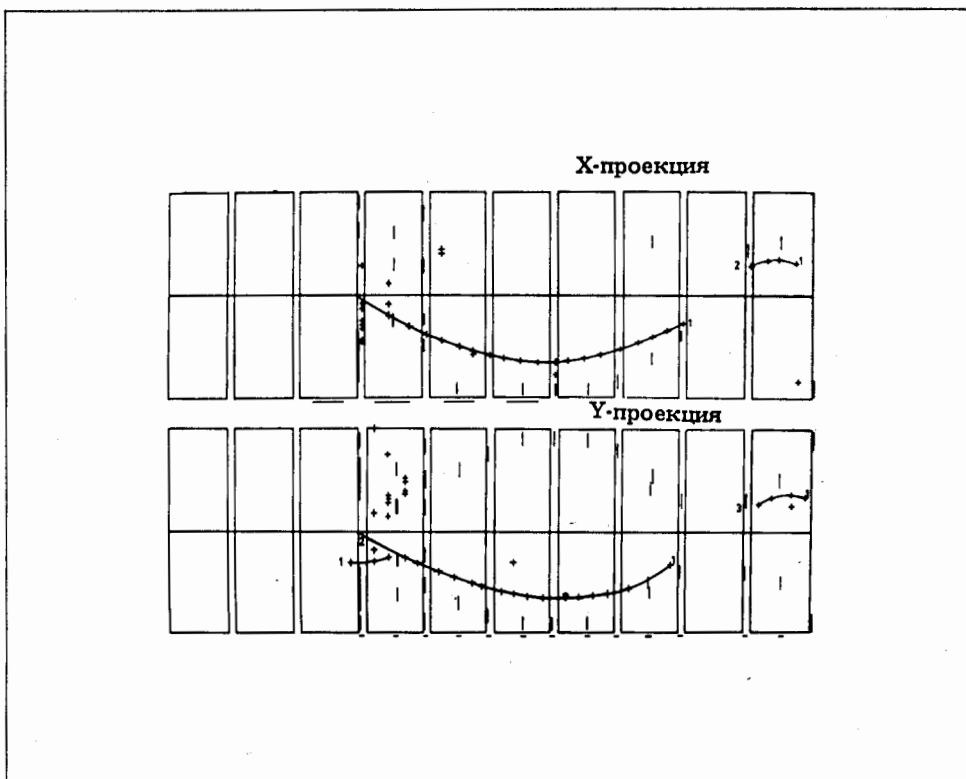


Рис.4. Реконструкция с помощью ЭВМ типичного события глубоконеупругого рассеяния (представление на дисплее). Каждый прямоугольник представляет собой один супермодуль, короткие линии внутри прямоугольников обозначают срабатывания триггерных счетчиков (на боковой проекции срабатывания полуколец показаны дважды, что отражает неопределенность информации с триггерных счетчиков). Пересечения указывают на срабатывание пропорциональных камер. Сплошные линии являются проекциями реконструированного трека.

разрешение одной плоскости — лучше 0,7 мм, временное разрешение (включая электронику) — лучше 35 нс.

Вся система пропорциональных камер тороидального спектрометра была разработана и изготовлена в течение двух лет. Разработка и изготовление гексагональных камер потребовали менее одного года. Это стало возможным благодаря созданию в Отделе новых методов ускорения специальной научно-методической базы, включающей комплекс технологической оснастки для изготовления камер и оборудования для испытаний. Эта научно-методическая база в дальнейшем послужила основой для создания ряда крупных экспериментальных установок для физических исследований.

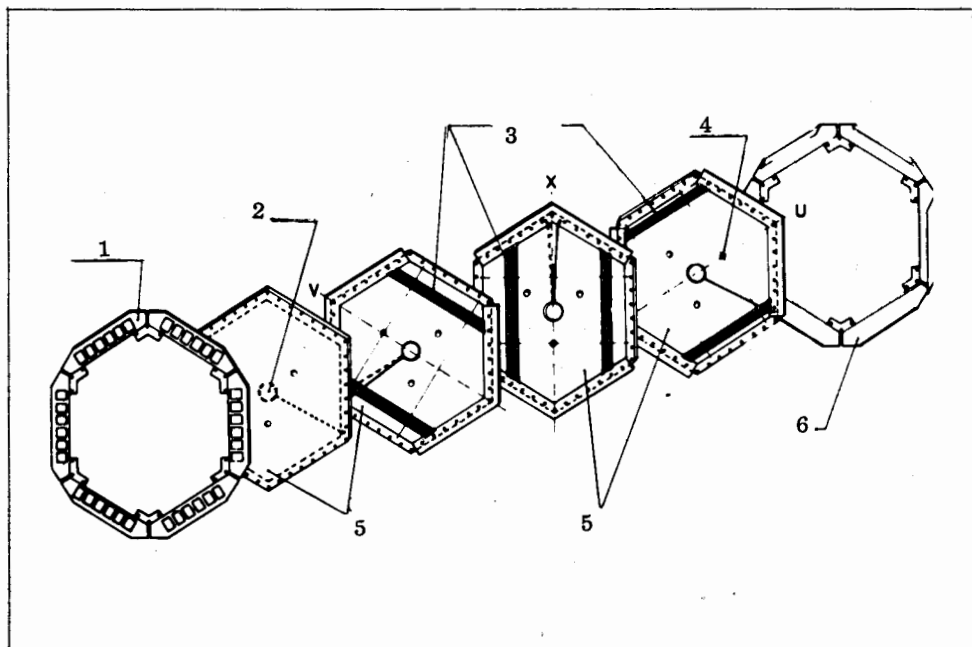
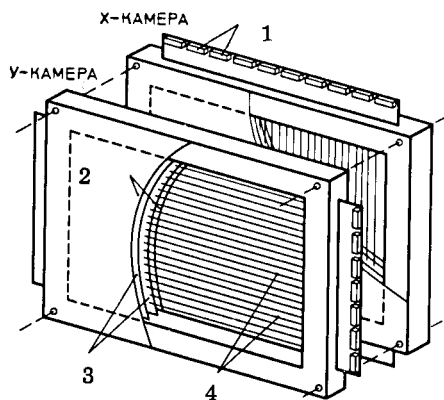


Рис.5. Основные элементы конструкции гексагональной камеры: 1 — рамы; 2 — центральная зона  $\varnothing 100$  мм; 3 — сигнальные электроды, 4 — упоры; 5 — панели трехслойной структуры типа "сэндвич"; 6 — крышки.

### ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫЕ КАМЕРЫ С МАЛЫМ КОЛИЧЕСТВОМ ВЕЩЕСТВА НА ПУТИ ЧАСТИЦ

В Отделе новых методов ускорения проведены разработки и изготовлена партия пропорциональных камер с малым количеством вещества на пути частиц, что является существенным для экспериментов с ускоренными ядрами. Имеются два типа камер с чувствительной площадью  $896 \times 1280$  мм<sup>2</sup>. Они имеют аналогичную конструкцию (рис.6), их основное различие заключается в положении сигнальных проволок. В X-камере они натянута вдоль короткой стороны, а в Y-камере — вдоль длинной. Из этих камер можно набирать различные пакеты. Сигнальные проволоки из позолоченного вольфрама диаметром 20 мкм распаяны с шагом 2 мм и выведены поочередно на два ряда разъемов, расположенных на противоположных сторонах камеры. Высоковольтные электроды выполнены из алюминиевой фольги толщиной 14 мкм, натянутой с силой 1 кг/см (по периметру). Межэлектродный зазор 7 мм.



Чувствительная область  $1280 \times 896 \text{ мм}^2$ .  
Шаг сигнальной плоскости 2 мм.

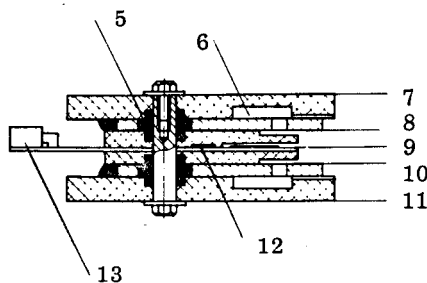


Рис.6. Конструкция пропорциональной камеры размером  $0,9 \times 1,3 \text{ м}$  с высоковольтными электродами из алюминиевой фольги. 1,13 — разъемы электроники считывания; 2,7,11 — алюминизированный лавсан; 3,8,10 — алюминиевая фольга 14 мкм; 4,9 — сигнальные проволоки 20 мкм; 5 — изолирующие втулки; 6 — газовый коллектор; 12 — газовое уплотнение.

## ПУЧКОВЫЕ КАМЕРЫ

Пропорциональные камеры позволяют производить измерения непосредственно в интенсивных пучках заряженных частиц. Потери эффективности, связанные с образованием пространственного заряда, начинаются при плотностях потоков частиц порядка  $10^4 \text{ част./мм}^2 \cdot \text{с}$ . Именно эта величина и ограничивает возможность регистрации частиц с помощью пропорциональных камер.



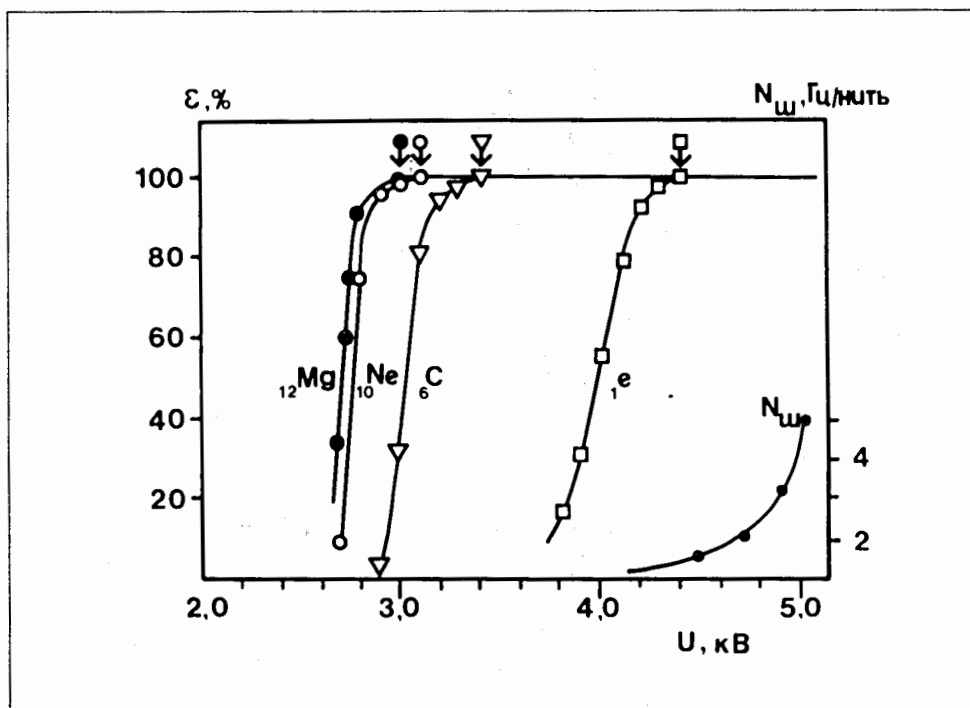


Рис.7. Зависимость эффективности регистрации различных ядер с помощью пучковой камеры от напряжения на камере.

Для работы в пучках частиц и ядер высоких энергий создано несколько типов пучковых камер с катодами из тонкой алюминиевой фольги с секционированными катодами из металлизированного лавсана и шагом сигнальных нитей 1 и 2 мм. Конструктивно камеры состоят из однокоординатных круглых секций, которые могут быть собраны в пакеты произвольной толщины с поворотом друг относительно друга на 45, 60 и 90°. Изготовлено более 50 таких камер. Они использовались для измерений в пучках частиц и ядер на ускорителях ОИЯИ, ИФВЭ и ЦЕРНа. В качестве примера на рис.7 показана эффективность регистрации различных ядер, ускоренных на синхрофазотроне ОИЯИ, с помощью пучковой камеры в зависимости от напряжения на камере.

### ДВУХКООРДИНАТНЫЕ ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫЕ КАМЕРЫ С КАТОДНЫМ СЧИТЫВАНИЕМ

В пропорциональной камере при движении лавины вблизи анодной нити на катодах наводится индуцированный заряд. Измеряя распределение этого заряда по плоскости камеры, можно с большой точностью

определить место прохождения частицы. Были созданы и исследованы различные типы приборов, использующих этот принцип. Так, на камере размером  $3 \times 1,5$  мм, катоды которой были выполнены в виде полос, нанесенных проводящей краской, изучена зависимость точности регистрации лавины от ширины полос. При ширине полос 18 и 36 мм точность регистрации примерно совпадает с точностью определения координат в обычных пропорциональных камерах с шагом 2 и 4 мм соответственно.

Пропорциональная камера со считыванием информации с катодов, обладая всеми особенностями обычных пропорциональных камер, позволяет повысить точность регистрации треков заряженных частиц. Так, на камерах с шириной полос 2 мм была реализована точность 50 мкм.

Считывание информации с двух катодов камеры наряду с регистрацией сигналов с анодных проволок позволяет в одной камере одновременно измерять три координаты, что очень важно при изучении многотрековых событий.

## ЭЛЕКТРОНИКА ДЛЯ ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫХ КАМЕР

Создание больших экспериментальных установок с использованием пропорциональных камер предъявляет особые требования к электронике: идентичность каналов и их взаимозаменяемость, высокая надежность, простота настройки и регулировки. Разработанная и созданная в Отделе новых методов ускорения электронная аппаратура для пропорциональных камер включает в себя: электронику регистрации; автоматизированный стенд настройки регистрирующей электроники; систему считывания (БУС-П); систему низковольтного питания электроники; высоковольтное питание камер (ВИНКД) (рис.8).

Регистрирующая электроника располагается на камерах и представляет собой карту с 32 каналами, выполненными на базе микросхемы К405ХП1. Конструктивное использование карты позволяет оперативно заменять неисправные каналы. Параллельная запись информации на карте и последовательный вывод ее с камеры значительно упрощает линию связи от камерной электроники до электроники считывания и сокращает объем электроники считывания.

Основные характеристики электроники регистрации: линейная регулировка порога срабатывания от 4 до 8 мкА; диапазон регулировки времени задержки одновибратора от 250 до 950 нс; минимальная длительность строба записи 25 нс.

Блок считывания информации (БУС-П) представляет собой устройство с кодированием информации от 2048 нитей пропорциональных камер, обеспечивающее кластерный режим кодирования координат.

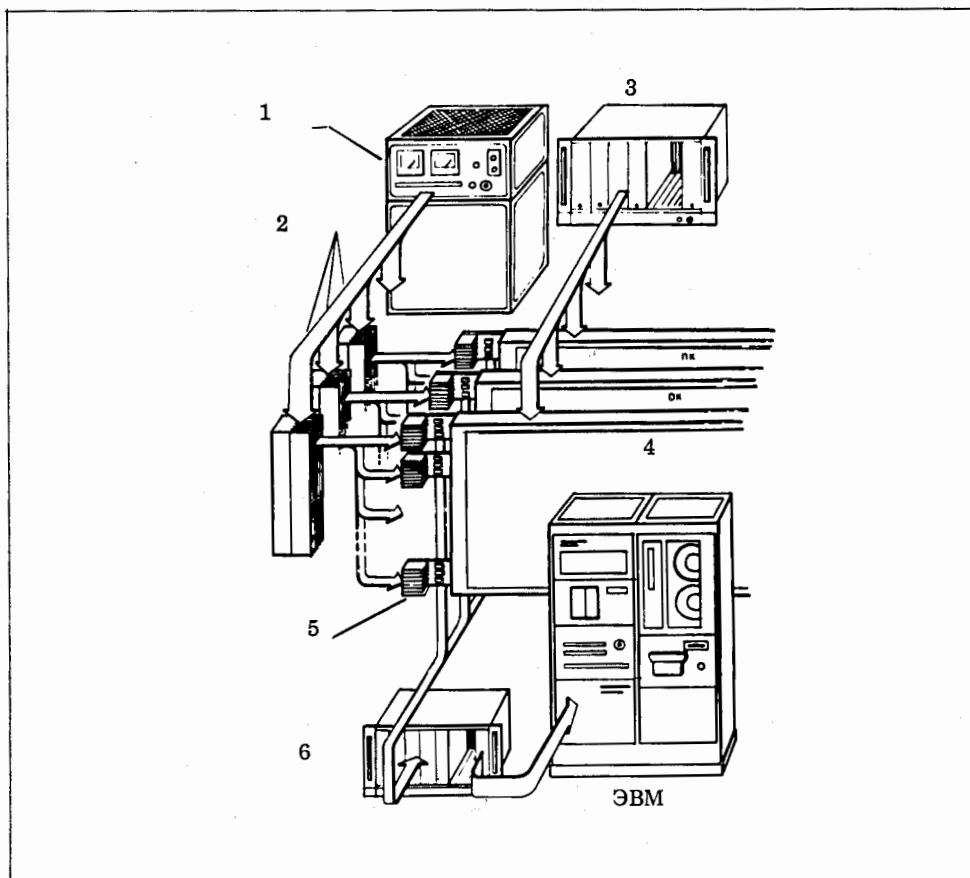


Рис.8. Состав электронной аппаратуры для пропорциональных камер: 1 — нерегулируемый выпрямитель; 2 — стабилизаторы; 3 — высоковольтное питание (ВИНКД); 4 — пропорциональная камера; 5 — электроника регистрации; 6 — системы считывания (БУС-П).

Имеются два режима считывания: нормальный (электроника располагается с одной стороны камеры) и мультиплексный (электроника располагается с обеих сторон). Время считывания информации определяется частотой тактового генератора и составляет 400 мкс на 2048 каналов регистрации. Управление работой устройства организуется как по внешним сигналам, так и по команде от ЭВМ. Полная схема устройства считывания размещается в блоке КАМАК двойной ширины с одной монтажной платой.

Создание регистрирующей электроники для установок, содержащих тысячи каналов, практически не представляется возможным без автоматизации процесса настройки и проверки. Разработанная в Отделе

новых методов ускорения автоматизированная система позволяет производить контроль основных электронных компонент, подбор элементов с целью получения оптимальных и идентичных характеристик в каналах, контроль и настройку функционально законченных узлов.

Аппаратурная часть автоматизированной системы выполнена в стандарте КАМАК на основе микропроцессорного контроллера МИКАМ-2. Программная система хранится на бумажной ленте и занимает объем памяти около 5 кбайт.

## МОДЕРНИЗАЦИЯ УСТАНОВКИ "СИГМА"

Весной 1982 г. на Координационном совете при Институте физики высоких энергий (Протвино) была утверждена программа экспериментов по изучению эксклюзивного образования резонансов в редких распадах на установке "Сигма-М", выполняемых совместными усилиями ИФВЭ и ОИЯИ. В соответствии с соглашением между институтами в Отделе новых методов ускорения разработаны, изготовлены и введены в действие на ускорителе ИФВЭ следующие пропорциональные камеры: 1400x2800 мм, шаг 2 мм — 4 шт.; 900x1300 мм, шаг 2 мм — 6 шт.; 64x64 мм, шаг 1 мм — 6 шт., с общим количеством сигнальных нитей (и соответственно каналов регистрации) 8,5 тысяч.

Введение пропорциональных камер большой площади, обладающих высоким временным разрешением и большой загрузочной способностью, позволило в несколько раз увеличить "скорострельность" установки и улучшить ряд других ее параметров. Так, работая в прямом пучке при максимально возможной интенсивности в канале  $(2-3) \times 10^6$  част./с, камеры сохраняют высокую эффективность. На рис.9 показана зависимость эффективности регистрации камеры, находящейся в прямом пучке, от интенсивности загрузки.

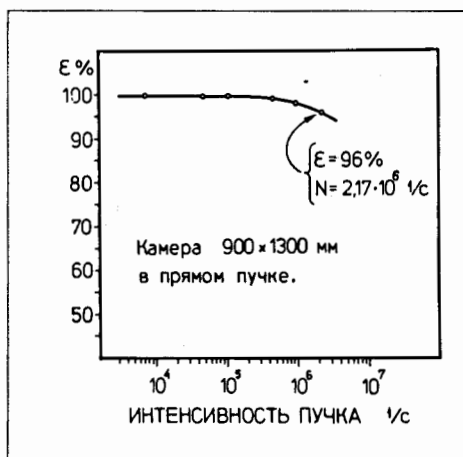


Рис.9. Зависимость эффективности камер размером 0,9x1,3 м от интенсивности пучка.

## ДРЕЙФОВЫЕ КАМЕРЫ ДЛЯ УСТАНОВКИ "НЕЙТРИННЫЙ ДЕТЕКТОР"

Дрейфовые камеры, разработанные в Отделе новых методов ускорения, предназначены для установки в мюонном спектрометре "Нейтронного детектора" ОИЯИ-ИФВЭ, а также в мишенной части калориметра. В мюонном спектрометре устанавливается 36 дрейфовых камер размером 2x4 м. Камеры таких размеров в Советском Союзе не изготавливались. Общий вид камеры показан на рис.10. Камера состоит из 8 идентичных дрейфовых ячеек с длиной проволочных электродов 4 м и дрейфовыми промежутками 120 мм. Для регистрации координат треков используется сигнальный элемент, схема которого показана на рис.11, размещенный в центре дрейфовой ячейки и состоящий из 4 сигнальных проволок диаметром 50 мкм, попеременно смещенных относительно центра элемента на  $\pm 0,75$  мм, 10 катодных и 2 охранные проволоки диаметром 200 мкм. Структурные элементы, фиксирующие проволоки, представляют собой платы с точными отверстиями, обеспечивающие точность не хуже 0,15 мм. Особенностью камеры является использование в качестве несущих элементов конструкции панелей с сотовым заполнением, что обеспечивает хорошую точность фиксации сигнальных элементов в объеме камеры, независимо от их числа.

Изготовление больших дрейфовых камер налажено в Опытном производстве ОИЯИ.

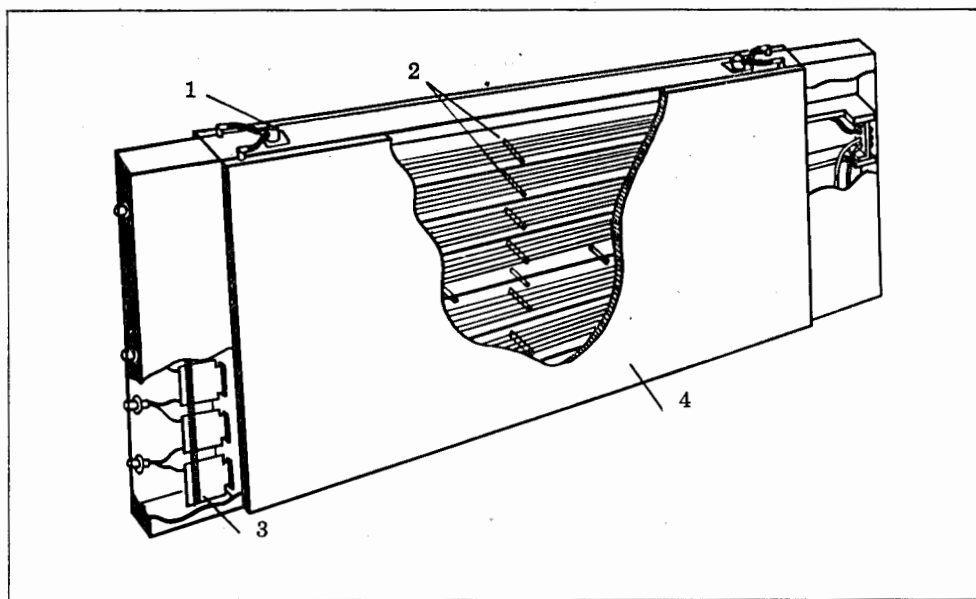


Рис.10. Общий вид дрейфовой камеры размером 4x2 м. 1 — газовый ввод; 2 — поддерживающие элементы; 3 — электроника регистрации; 4 — сотовые панели.

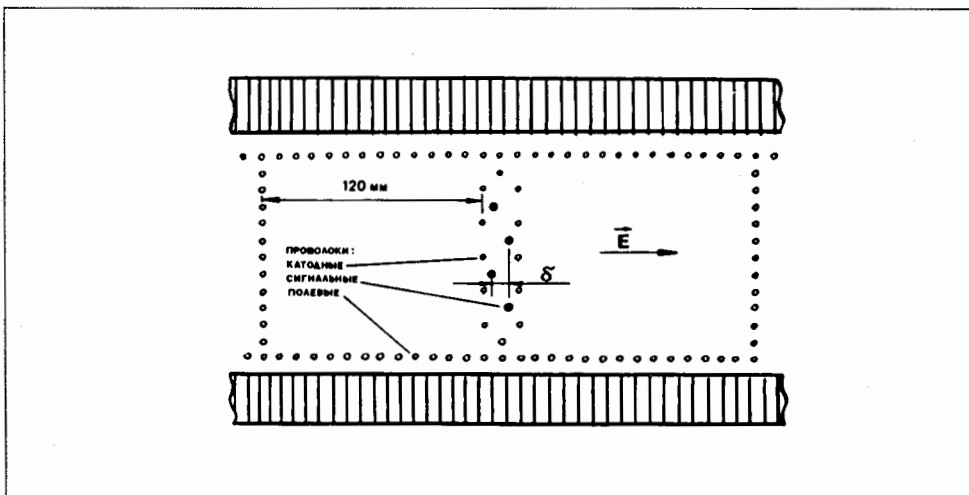


Рис.11. Схема дрейфовой ячейки и сигнального элемента дрейфовой камеры размером 4x2 м.

## ЭЛЕКТРОНИКА ДРЕЙФОВЫХ КАМЕР

Прогресс в микроэлектронике и использование современной технологии и оборудования сделали возможным решение сложной инженерной задачи — создание многотрековой регистрирующей электронной аппаратуры для большого числа дрейфовых ячеек.

Основные элементы электронной аппаратуры дрейфовых камер установки "Нейтринный детектор" следующие:

— Непосредственно на камерах располагаются 4-канальные *усилители-формирователи* (8 блоков на каждой камере), обеспечивающие усиление сигналов от уровня 0,8 мкА, формирующие стандартную длительность (100 нс) и имеющие точную временную привязку к входным сигналам.

— На расстоянии приблизительно 10-20 м от камер располагается *система питания* усилителей-формирователей, состоящая из трех шкафов, каждый из которых обеспечивает стабилизированное напряжение  $\pm 6$  В мощностью не менее 1 кВт.

— Сигналы с усилителей-формирователей передаются по телефонным кабелям длиной 120 м в аппаратуру *измерения временных интервалов*, работающую на линии с ЭВМ СМ-4. При дальнейшем анализе эта информация сопоставляется с временной и амплитудной информацией, полученной со сцинтилляционных счетчиков.

Общие характеристики аппаратуры:

Число измерительных каналов	— несколько тысяч.
Точность измерения временных интервалов	— $\pm 6$ нс.
Мертвое время канала	— 100 нс.
Диапазон величин измеряемого времени	— до 100 мкс.

Аппаратура построена по модульному принципу. В одном крейте размещается 256 измерительных каналов. Таким образом, вся система, содержащая 4000 каналов, занимает 16 крейтов.

Характеристики электронной аппаратуры и схемно-технические решения, положенные в ее основу, позволяют измерять координаты треков с точностью лучше 0,25 мм, разрешать треки, проходящие на расстоянии 5 мм друг от друга, и полностью исключать потерю эффективности регистрации при любых наложениях входных сигналов.

### УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СЕЧЕНИЙ СИЛЬНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ФРАГМЕНТОВ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЯДЕР НА СИНХРОФАЗОТРОНЕ ОИЯИ

Эксперименты, выполненные в 1980-1982 гг., в которых получено указание на необычно большое сечение взаимодействия ядерных фрагментов высокой энергии с веществом, инициировали интерес к проблеме аномалона. Для экспериментального исследования этой проблемы на синхрофазотроне Лаборатории высоких энергий ОИЯИ, на котором получены рекордные энергии ускоренных ядер, была предложена новая методика и создана экспериментальная установка, позволяющая исследовать явление с хорошей статистической точностью и по нескольким параметрам.

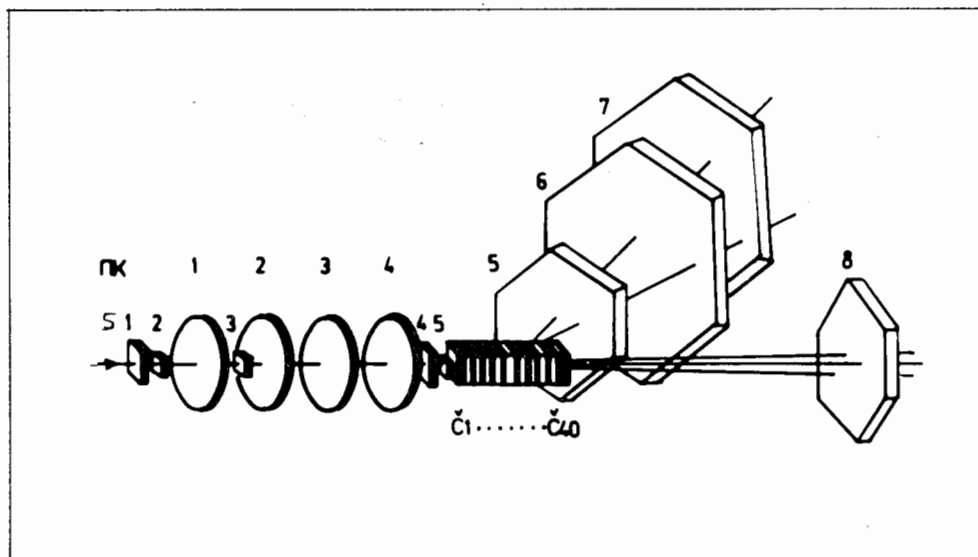


Рис.12. Общий вид установки для исследования сечений сильного взаимодействия фрагментов релятивистских ядер на синхрофазотроне ОИЯИ.

Основные трудности, с которыми сталкиваются эксперименты по поиску аномалонов, связаны с измерением заряда фрагмента, вызывающего вторичное взаимодействие. Необходимо также отделение взаимодействий исследуемого фрагмента от взаимодействий сопровождающих его нуклонов и легких ядер — продуктов первичного взаимодействия.

Для определения заряда фрагментов и отбора событий с кратными взаимодействиями предложено использовать черенковское излучение.

Схема установки показана на рис.12. Она расположена на выведенном пучке ядер синхрофазотрона Лаборатории высоких энергий ОИЯИ. Пакеты пропорциональных камер ПК1 — ПК4 измеряют координаты и углы пучковой частицы. Счетчики S1 — S5 вырабатывают триггерный сигнал. Пакеты пропорциональных камер ПК5 — ПК8 предназначены для уточнения координат взаимодействия первичного ядра и вторичных фрагментов. Каждый из пакетов ПК1 — ПК8 состоит из трех однокоординатных пропорциональных камер, повернутых друг относительно друга на  $60^\circ$ . Катоды камер изготовлены из алюминиевой фольги толщиной 14 мкм, шаг сигнальных проволок 2 мм, зазор между электродами 7 мм. Размер чувствительной области камер ПК1 — ПК4 — 128 мм, ПК5 и ПК8 — 384 мм, ПК6 — 640 мм и ПК7 — 896 мм.

Основу установки составляет "живая" мишень — детектор из 40 черенковских счетчиков с радиаторами из плексигласа толщиной по пучку 5 мм и ФЭУ-84. Взаимодействие пучкового ядра в  $i$ -м счетчике отмечено значительной разницей сигналов  $a_{i-1}$  и  $a_{i+1}$  в двух счетчиках —  $i-1$  и  $i+1$  ( $a_{i-1}/a_{i+1} = Z^2 / \sum Z_K^2$ ). Здесь  $Z$  — заряд первичного ядра, а  $Z_K$  — заряды вторичных релятивистских частиц. Например, для реакции  ${}_{12}\text{Mg} + A \rightarrow {}_{11}\text{Na} + p + \dots$  имеем скачок сигнала 144/123, что легко регистрируется. Аналогично выделяются вторичные взаимодействия. Схема детектора-мишени и принцип ее работы иллюстрируются рис.13. Там же показаны дисплей типичного события и спектр зарядов ядер и фрагментов, измеренный одним из счетчиков (счетчик № 22) при облучении мишени ядрами магния.

Замечательной особенностью прибора является почти полная нечувствительность к медленным и сильно ионизирующим вторичным продуктам, а также пониженная чувствительность к релятивистским частицам, которые значительно отклонились от пучка. С помощью установки можно эффективно разделять фрагменты, измерять вероятность рождения фрагментов, выделять частицы сопровождения и каналы реакции, измерять с высокой точностью средние длины свободного пробе-



га ядер. Эффективность разделения фрагментов иллюстрируется рис.14 — зарядовыми спектрами ядер  $^{12}\text{Mg}$  и его фрагментов второго и третьего поколений. Видно, что выделяются фрагменты до  $^5\text{B}$  вклю-

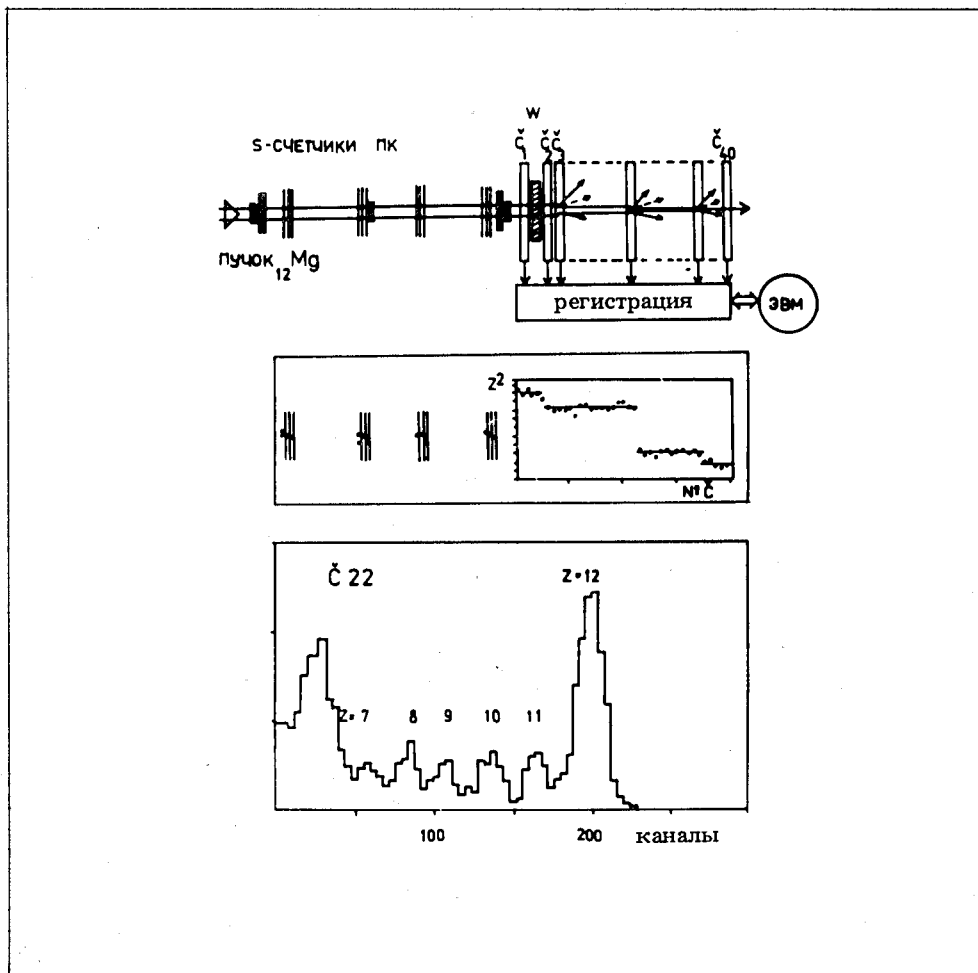


Рис.13. Принцип работы детектора-мишени из 40 черенковских счетчиков ( $\check{C}_1 - \check{C}_{40}$ ); дисплей события и спектр зарядов ядер и фрагментов, измеряемый одним из черенковских счетчиков ( $\check{C}_{22}$ ).

чительно. Например, зарядовое разрешение ближайшего фрагмента второго поколения  $^{11}\text{Na}$  составляет 0,1e.

На установке были проведены исследования взаимодействия ядер углерода, кислорода, неона и магния, ускоренных до энергии 4 ГэВ/нуклон, и их фрагментов с легкими (углерод, кислород) и тяжелыми (вольфрам) ядрами мишени.

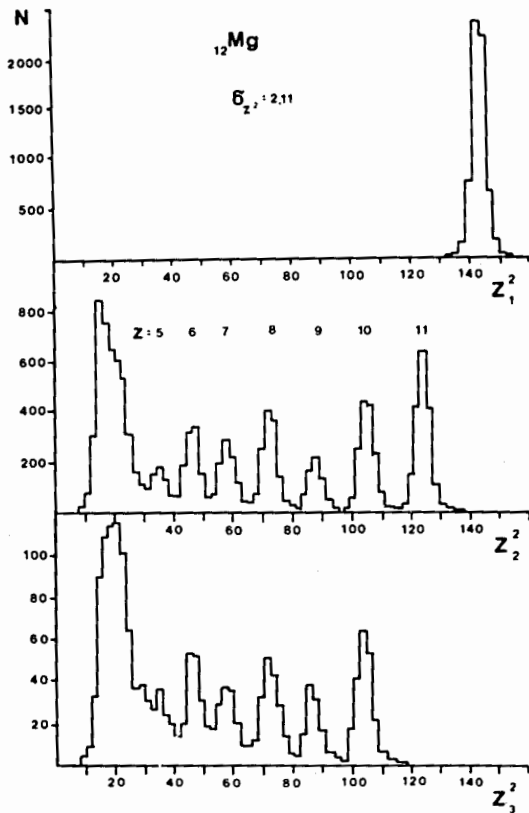


Рис.14. Зарядовые спектры ядер  $^{12}\text{Mg}$  (шкала  $Z_1^2$ ) и его фрагментов второго (шкала  $Z_2^2$ ) и третьего (шкала  $Z_3^2$ ) поколений.

# ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА ПУЧКАХ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ

*Г.Н.ФЛЕРОВ, академик*

*В.И.КУЗНЕЦОВ, доктор физико-математических наук*

*В.А.ЩЕГОЛЕВ, кандидат физико-математических наук*

Работы по прикладным исследованиям на пучках тяжелых ионов были начаты в Лаборатории ядерных реакций около десяти лет назад. Сейчас определились два важнейших направления практического применения тяжелых ионов — получение "ядерных" мембран и радиационное материаловедение.

Ядерные мембраны — это высококачественный фильтрующий материал, получаемый путем облучения полимерной пленки ускоренными тяжелыми ионами и последующей химической обработки. Метод производства ядерных мембран на ускорителях возник как альтернатива предложенному ранее "реакторному" способу <sup>1/</sup> и превзошел его по ряду показателей.

Тяжелые ионы, несущие одинаковый заряд и имеющие одинаковую скорость, при прохождении через полимер образуют каналы радиационного повреждения с одинаковой плотностью дефектов. Последующее химическое травление превращает эти каналы в цилиндрические отверстия одинакового диаметра. В отличие от "реакторного" метода облучение пленки на циклотроне дает возможность произвольно изменять энергию и массу бомбардирующих частиц, угол их входа в полимер, что позволяет формировать необходимую микроструктуру мембран. Благодаря высокой интенсивности пучков на ускорителях многозарядных ионов новый метод оказался на несколько порядков производительнее "реакторного" метода. Например, в течение одного часа на циклотроне У-300 можно облучить 500-1000 м<sup>2</sup> полимерного материала при плотности треков  $\sim 10^9$  см<sup>-2</sup>. Для задач, где требуется еще более высокая плотность пор, могут быть сделаны мембраны, в которых число отверстий на одном квадратном сантиметре площади дости-

гает  $10^{10}$  и даже более. Еще одно преимущество ядерных мембран состоит в том, что в отличие от осколков деления ядра ускоряемых ионов стабильны, а их энергия недостаточна для вступления в ядерные реакции с ядрами элементов мишени. Поэтому активация полимерного материала в процессе облучения тяжелыми ионами полностью исключена.

Главная отличительная особенность ядерных мембран — это узкое распределение пор по размерам. Калиброванный размер отверстий дает ядерным мембранам ряд преимуществ по сравнению с другими фильтрующими материалами. Использование их вместо традиционных мембран на основе производных целлюлозы позволяет повысить эффективность многих технологических процессов. Более того, при помощи ядерных мембран был решен ряд принципиально новых задач.

В последние годы основное внимание было уделено поиску новых областей эффективного использования ядерных мембран и разработке новых типов мембран. Так, разработана методика изготовления анизотропных ядерных мембран <sup>/2/</sup> с повышенной удельной производительностью. Они имеют ячеистую структуру, которая формируется при помощи определенной комбинации операций облучения-травления. Толщина пористого дна ячеек очень мала, благодаря чему гидродинамическое сопротивление мембраны снижается по сравнению с обычной структурой в несколько раз. Пространственное расположение элементов структуры анизотропной ядерной мембраны упорядочено, в то время как все остальные виды фильтрующих материалов имеют хаотичное строение. Разработка данной методики — первый шаг к широкому внедрению методов создания регулярных микроструктур при помощи пучков тяжелых ионов.

Наряду с этим разработана методика изготовления уникального пористого материала толщиной 1-2 мкм. Представляется весьма перспективным применить данный материал для защиты органов дыхания человека от вредных воздействий. Например, респиратор на основе такой ядерной мембраны с площадью фильтрующей поверхности  $\sim 500 \text{ см}^2$  практически не затрудняет дыхания человека и в то же время полностью обеспечивает очистку воздуха от угольной пыли.

Укажем несколько характерных областей техники и народного хозяйства, в которых эффективность применения ядерных мембран надежно обоснована.

В производстве полупроводниковых приборов первостепенное значение имеет чистота технологических сред, и в частности воды. Присутствие посторонних веществ и частиц в процессе создания полупроводниковых приборов оказывает существенное влияние на качество и выход продукции. В связи с этим на предприятиях электронной про-

мышленности в качестве промывочной среды используется особо чистая вода с удельным сопротивлением 15-18 МОм·см, содержащая не более 50-150 микрочастиц (размером 0,2 мкм) в миллилитре. Быстрый прогресс в области электроники постоянно ужесточает технические требования к этим качественным показателям. Ядерные мембраны оказались идеальным материалом для конечной очистки от микрочастиц и получения особо чистой воды. Это обусловлено двумя факторами: во-первых, ядерные мембраны с диаметром пор 0,2 мкм задерживают все микрочастицы большего размера, в том числе бактерии, во-вторых, в отличие от большинства других типов фильтрующих материалов они практически не выделяют в фильтрат каких-либо низкомолекулярных примесей. Свечевые патроны на основе ядерных мембран имеют площадь рабочей поверхности около 0,6 м<sup>2</sup> и производительность более 0,25 м<sup>3</sup> чистой воды в час. Они компактны, удобны в работе и могут быть использованы не только в микроэлектронике, но и в других областях народного хозяйства.

Многие области современной техники требуют дальнейшего совершенствования теплозащитных материалов, и в частности экранно-вакуумной теплоизоляции. Существенное улучшение ее теплозащитных свойств может быть достигнуто путем снижения теплопереноса за счет повышения вакуума между экранами. Однако применение для этой цели перфорированных экранов не обеспечивает улучшения тепловых параметров изоляции из-за резкого возрастания радиационного теплопереноса. Оказалось, что наилучшим экраном является металлизированная ядерная мембрана, непроницаемая для теплового излучения, но пропускающая молекулы газа. Согласно теории для практически полного отражения излучения диаметр отверстий должен быть меньше половины длины волны падающего излучения, а толщина экрана должна в 2-4 раза превышать диаметр отверстий. Для изоляции, используемой при температурах ниже 300 К, этим требованиям удовлетворяет мембрана с диаметром пор менее 2 мкм. Установлено, что многослойные пакеты из металлизированных ядерных "фильтров" имеют эффективный коэффициент теплопроводности в 1,5 раза ниже, чем разработанная ранее экранно-вакуумная изоляция из перфорированных металлических пластин <sup>3/</sup>.

Благодаря очень малому разбросу размеров пор в ядерных мембранах переход от полной задержки частиц определенной величины к полному пропусканию происходит в довольно узком интервале диаметров пор. Это делает их незаменимыми в процессах очистки, концентрирования и стерилизующей фильтрации вирусов и вакцин <sup>4/</sup>. Нетрудно подобрать мембрану, с помощью которой наиболее эффективно происходит отделение крупных примесей от суспензий вирусов, и мембрану с порами меньшего диаметра, на которой осуществляют концентрирование вирусов. Одновременно производится их очистка от балластных примесей (диафильтрация), которая достигается чередованием опе-

раций концентрирования и разбавления чистым растворителем. Сейчас отработаны технологические режимы очистки и концентрирования вирусов гриппа, бешенства, клещевого энцефалита. Величины, полученные с помощью технологии, основанной на ядерных мембранах, оказались в 10-20 раз более эффективными, чем очищенные другими методами. Работы в этой области были отмечены премией Совета Министров СССР за 1984 год.

Одно из применений ядерных мембран в производстве медицинских препаратов связано с проблемой контроля стерильности. В настоящее время соответствующие приборы, называемые стеритест, приобретаются за рубежом, а потребность в них велика. Экспериментальная проверка показала, что подобные устройства можно изготовить на основе ядерных мембран. Использование их в приборах стеритест весьма целесообразно благодаря высокой прочности, отсутствию коробления под действием склеивающих агентов и другим положительным качествам. Материал ядерных мембран не обладает ни бактерицидными, ни бактериостатическими свойствами и выдерживает стерилизацию любым из известных способов.

Особый интерес представляет изготовление ядерных мембран из материалов, способных работать в агрессивных химических средах и при высоких температурах. В этом отношении перспективными материалами являются фторопласты, полипропилен и некоторые новые виды полимеров. Еще более важной задачей представляется разработка металлических мембран "ядерного" типа.

Важным прикладным направлением в Лаборатории ядерных реакций являются работы по радиационному материаловедению, направленные, главным образом, на изучение возможностей использования ускорителей тяжелых ионов для моделирования радиационной повреждаемости конструкционных реакторных материалов<sup>15/</sup>.

Ускорители тяжелых ионов на энергии  $\sim 10$  МэВ/нуклон занимают в ряду имитационных устройств особое место, так как позволяют исследовать свойства материалов в условиях высоких скоростей образования радиационных дефектов (на несколько порядков больших, чем на ускорителях легких ионов) с соблюдением такого важного требования, предъявляемого к материаловедческим экспериментам, как макроскопичность облучаемого объекта. Это обуславливает эффективность применения пучков тяжелых ионов для изучения таких явлений, представляющих интерес прежде всего с практической точки зрения, как радиационное упрочнение и охрупчивание, радиационная ползучесть и распухание. Наряду с практическими задачами имитационных исследований, изучение особенностей радиационного дефектообразования в твердых телах под действием тяжелых ионов с энергиями  $\sim 10$  МэВ/нуклон представляет интерес и для дальнейшего развития представлений физики радиационных повреждений, поскольку в этой области систематических исследований не проводилось.

Использование пучков тяжелых ионов, получаемых на циклотронах У-200, У-300, У-400, дает возможность проведения исследований по изучению свойств материалов в широком интервале значений скоростей образования радиационных дефектов с применением ионов различной массы и энергии. Это позволяет вводить в круг перспективных задач и такие, которые касаются изучения влияния и скорости образования повреждений, и "жесткости" спектров первично выбитых атомов на формирование и эволюцию дефектной структуры облучаемых материалов. В зависимости от характера задач облучение может проводиться ионами химически активных элементов, инертных газов и металлов.

Первые эксперименты по изучению особенностей радиационного деформирования и разрушения алюминия, облучаемого высокоэнергетичными ионами углерода <sup>6,7/</sup>, показали, что при одновременном действии облучения и поля механических напряжений за сравнительно короткое время (порядка нескольких часов) удается получить достаточно полную информацию об особенностях деформирования и разрушения материалов в этих условиях. Было показано, что при облучении алюминия тяжелыми ионами существенно увеличивается скорость ползучести и уменьшается долговечность. Получены данные о функциональной зависимости скорости радиационной ползучести алюминия от приложенного напряжения. Были обнаружены также интересные эффекты изменения свойств материалов в момент включения и выключения ионного пучка <sup>6/</sup>.

Результаты работ <sup>6,7/</sup> вызвали ряд вопросов, решение которых потребовало создания экспериментальной методики на основе современного материаловедческого оборудования. В настоящее время испытания материалов как после предварительного облучения, так и непосредственно на пучках тяжелых ионов проводятся на универсальной испытательной машине Instron 1121, работающей в режимах деформации с постоянной скоростью и программного нагружения. Так как изучение механических свойств материалов под облучением требует высокой точности измерений и контроля условий облучения, специально для материаловедческих экспериментов разработана система диагностики пучков ионов на базе секционированных мониторов вторичной электронной эмиссии <sup>8/</sup>. Эта система позволяет эффективно контролировать пространственное распределение частиц в пучке и с высокой точностью измерять полный поток частиц, попадающих на образец. Эффективность разработанной методики подтверждается результатами первых экспериментов по изучению радиационного упрочнения и охрупчивания материалов <sup>8/</sup>.

Для определения общих закономерностей радиационно-симулированного изменения механических свойств материалов большое значение имеют исследования дефектной структуры, образующейся в результате облучения. Поэтому наряду с изучением свойств материалов непосредственно на пучках тяжелых ионов в Лаборатории ядерных

реакций совместно с другими организациями проводятся исследования облученных материалов с помощью структурно-чувствительных методик <sup>5/</sup>.

Рост масштабов и практической значимости прикладных исследований с тяжелыми ионами привел к необходимости создания в настоящий момент специализированных ускорителей. Расчеты показывают, что для данной цели может быть разработан весьма компактный и экономичный ускоритель. Сейчас в лаборатории завершен монтаж нового циклотрона (циклического имплантатора ИЦ-100), предназначенного для решения прикладных задач. ИЦ-100 — это изохронный циклотрон с диаметром полюсов 1 м, весом 50 т и потребляемой мощностью 150 кВт. В настоящее время на нем получены пучки ионов аргона с параметрами, близкими к расчетным. Возможности нового ускорителя не ограничены производством ядерных мембран и экспериментами по радиационному материаловедению. На циклотроне ИЦ-100 можно будет проводить широкий круг исследований по ионной обработке материалов. Это такие недавно возникшие направления, как направленное изменение свойств электроизоляционных материалов, улучшение качества элементов оптических систем, создание холодных катодов и источников ионов, специальных мембран для диагностики заболеваний крови и др. Дальнейший технический прогресс немислим без интенсивного развития данных исследований.

### *Литература*

1. Флеров Г.Н. Вестник АН СССР, 1984, № 4, с.35.
2. Флеров Г.Н. и др. АЭ, 1982, 53, с.181.
3. Флеров Г.Н. и др. В сб.: IV Совещание по использованию новых ядерно-физических методов для решения научно-технических и народнохозяйственных задач. ОИЯИ, Р18-82-118, Дубна, 1982, с.150.
4. Мчедlishvili Б.В., Коликов В.М. Там же, с.138.
5. Флеров Г.Н. и др. АЭ, 1976, т.40, вып.3, с.211.
6. Воробьев Е.Д. и др. ОИЯИ, 18-82-558, Дубна, 1982.
7. Регель В.Р. и др. ОИЯИ, 18-12747, Дубна, 1979.
8. Флеров Г.Н. и др. ОИЯИ, 18-83-537, Дубна, 1983.





# Основные даты деятельности Объединенного института ядерных исследований

1956

— 26 марта в Москве подписано Соглашение об учреждении Объединенного института ядерных исследований. Избрана первая дирекция Института: директор — профессор Д.И.Блохинцев, вице-директора — профессор В.Вотруба (ЧССР) и профессор М.Даныш (ПНР). Правительство Советского Союза, выступившее инициатором создания ОИЯИ, передало в его ведение Институт ядерных проблем АН СССР, который располагал шестиметровым синхроциклотроном, и Электрофизическую лабораторию АН СССР, в которой заканчивалось сооружение самого большого тогда ускорителя — синхрофазотрона. На базе Института ядерных проблем была создана Лаборатория ядерных проблем, а на базе Электрофизической лаборатории — Лаборатория высоких энергий.

— 23 сентября на совещании Полномочных Представителей правительств государств-членов ОИЯИ принят Устав ОИЯИ, регламентирующий деятельность Института.

— Созданы Лаборатория теоретической физики и Лаборатория нейтронной физики. В Лаборатории нейтронной физики начато строительство импульсного реактора на быстрых нейтронах ИБР.

— Опубликованы первые научные работы сотрудников Института.

— Н.Н.Боголюбовым дано строгое доказательство дисперсионных соотношений, которое заложило математические основы этого метода и на многие годы определило развитие теории сильных взаимодействий.

— В.И.Векслером впервые высказаны идеи об использовании для ускорения заряженных частиц собственных сил плотных сгустков электронов, послужившие прообразом коллективного метода ускорения.

## 1956-1959

— А.А.Логуновым проведен цикл исследований по применению метода дисперсионных соотношений к неупругим процессам. На основе этих исследований впоследствии был развит инклюзивный подход в физике высоких энергий.

## 1957

— В Лаборатории ядерных проблем группой ученых под руководством М.Г.Мещерякова экспериментально установлено неизвестное ранее явление прямого выбивания дейтронов из атомных ядер нуклонами высоких энергий. (Государственный комитет Совета Министров СССР по делам изобретений и открытий, диплом № 221, 1979).

— Создана Лаборатория ядерных реакций и начато строительство циклического ускорителя многозарядных ионов У-300.

— На синхрофазотроне в Лаборатории высоких энергий получен пучок протонов, ускоренных до проектной энергии 10 ГэВ.

— М.А.Марковым предложены эксперименты по изучению взаимодействия нейтрино с нуклонами, которые в настоящее время успешно осуществляются.

— Б.М.Понтекорво выдвинул гипотезу о существовании осциллирующих нейтрино.

— Д.И.Блохинцевым выдвинута гипотеза о существовании квантовых флуктуаций плотности ядерной материи ("флуктонов"), получившая в дальнейшем широкое применение в релятивистской ядерной физике.

## 1957-1958

— Н.Н.Боголюбовым построена микроскопическая теория сверхпроводимости. Развитые при этом идеи и методы получили в дальнейшем широкое применение в статистической механике, ядерной физике и физике элементарных частиц.

## 1957-1960

— В Лаборатории ядерных проблем и Лаборатории теоретической физики сформулировано понятие полного опыта и развиты общие методы восстановления амплитуд упругих процессов.

## 1958

— Академику Н.Н.Боголюбову присуждена Ленинская премия за разработку нового метода в квантовой теории поля и статистической физике, приведшего, в частности, к обоснованию теории сверхтекучести и теории сверхпроводимости.

— Академику И.М.Франку присуждена Нобелевская премия по физике за открытие и объяснение эффекта Вавилова — Черенкова (совместно с П.А.Черенковым и И.Е.Таммом).

— Теоретиками Лаборатории теоретической физики предложен общий метод определения внутренних четностей странных частиц.

— В Лаборатории ядерных проблем внедрено в практику физического эксперимента управляемое импульсное питание газоразрядных детекторов, что послужило основой развития новой техники искровых камер.

## 1958-1962

— Сотрудниками Лаборатории теоретической физики разработана дисперсионная теория рассеяния адронов при низких энергиях, благодаря которой получена единая картина основных процессов сильных взаимодействий.

## 1958-1963

— Н.Н.Боголюбовым сформулировано представление о сверхтекучести ядерной материи и предложен вариационный принцип в задаче многих тел (принцип Хартри — Фока — Боголюбова). На их основе в Лаборатории теоретической физики получила развитие микроскопическая теория ядра.

## 1959

— Группе ученых и специалистов во главе с академиком В.И.Векслером присуждена Ленинская премия за создание синхрофазотрона

на 10 миллиардов электрон-вольт в Дубне. В числе лауреатов сотрудники ОИЯИ Л.П.Зиновьев, В.А.Петухов.

— Б.М.Понтекорво совместно с сотрудниками Института теоретической и экспериментальной физики и Института атомной энергии им.И.В.Курчатова открыли новое явление — безрадиационные переходы в мезоатомах. (Госкомизобретений, диплом № 100, 1971 г.).

— В Лаборатории ядерных проблем совместно с Институтом химической физики АН СССР, Институтом прикладной математики АН СССР и Радиевым институтом им.В.Г.Хлопина АН СССР экспериментально обнаружено явление образования и распада сверхтяжелого гелия — гелия-8. (Госкомизобретений, диплом № 119, 1972 г.).

— В Лаборатории теоретической физики Н.Н.Боголюбовым с сотрудниками развит метод двухвременных температурных функций Грина в задачах статистической механики.

— В Лаборатории высоких энергий впервые получены экспериментальные данные о важнейших свойствах странных частиц, образующихся в пион-протонных взаимодействиях при энергии 7-8 ГэВ.

— Б.М.Понтекорво показал, что в опытах с нейтрино от ускорителей высоких энергий можно ответить на вопрос, отличается ли мюонное нейтрино от электронного нейтрино.

— В Лаборатории ядерных проблем разработаны методы и начато систематическое разделение больших количеств радиоактивных изотопов.

— В Лаборатории ядерных проблем запущен изохронный циклотрон со спиральной структурой магнитного поля, который явился прообразом большого ускорителя. На этом циклотроне проверены основные результаты линейной и нелинейной теории движения частиц в магнитных полях с крутоспиральной структурой.

## 1960

— Учеными Лабораторий высоких энергий открыта новая элементарная частица: антисигма-минус-гиперон. (Госкомизобретений, диплом № 59, 1968 г.).

— В совместных исследованиях ученых ОИЯИ, Физического института и Института химической физики АН СССР открыто свойство

электромагнитной поляризуемости сильно взаимодействующих элементарных частиц. (Госкомизобретений, диплом № 217, 1979 г.).

— В Лаборатории ядерных реакций запущен 310-сантиметровый циклотрон для ускорения тяжелых ионов (У-300).

— В Лаборатории нейтронной физики запущен исследовательский импульсный реактор периодического действия на быстрых нейтронах — ИБР.

— Н.Н.Боголюбовым сформулирована концепция квазисредних, которая лежит в основе современной теории фазовых переходов. Она оказала существенное влияние на развитие квантовой теории поля, в частности, на создание теории электрослабых взаимодействий.

— Д.И.Блохинцевым предложена идея нескольких вакуумов и спонтанного перехода между ними.

— В Лаборатории ядерных проблем развернулись широкие исследования свойств нейтронодефицитных изотопов. В ходе реализации этой программы (1955-1979 гг.) открыто более ста новых радиоактивных изотопов, получена богатая информация о структуре атомных ядер.

## 1961

— В связи с формулировкой концепции квазисредних Н.Н.Боголюбовым доказана фундаментальная теорема "Об особенностях  $1/q^2$ ". В квантовой теории поля полученный результат связан с так называемыми механизмами Голдстоуна и Хиггса.

## 1961-1964

— В Лаборатории теоретической физики введено понятие спина поля вне массовой оболочки. Показано, что уравнения Янга — Миллса и Эйнштейна можно вывести как уравнения теорий полей с определенным спином (1 и 2).

## 1962

— Зарегистрировано открытие В.И.Векслером принципа автофазировки при ускорении заряженных частиц в циклических резонансных ускорителях. Это открытие дало возможность проектировать

и сооружать микротроны, синхротроны, фазотроны, все крупнейшие ускорители заряженных частиц. (Госкомизобретений, диплом № 10, 1962 г., приоритет от 8.06.44 г.) .

— В Лаборатории ядерных проблем экспериментально обнаружен  $\beta$ -распад положительно заряженного  $\pi$ -мезона, измерена его вероятность. Эти исследования экспериментально подтвердили закон сохранения векторного тока в слабых взаимодействиях элементарных частиц. (Госкомизобретений, диплом № 135, 1973 г.) . За работы, приведшие к открытию  $\beta$ -распада  $\pi$ -мезона, Золотой медали им.И.В.Курчатова и премии Академии наук СССР за 1965 г. удостоена группа ученых ОИЯИ: Ю.Д.Прокошкин, С.С.Герштейн, А.Ф.Дунайцев, В.И.Рыкалин, В.И.Петрухин.

— Сотрудниками Лаборатории ядерных проблем и Лаборатории теоретической физики открыто явление захвата отрицательно заряженных  $\pi$ -мезонов ядрами химически связанного водорода, что привело к созданию нового научного направления — мезонной химии. (Госкомизобретений, диплом № 164, 1975 г.) .

— В Лаборатории ядерных реакций открыта новая разновидность радиоактивного распада — протонный распад радиоактивных ядер. (Госкомизобретений, диплом № 35, 1966 г.) .

— Сотрудниками ЛЯР открыто новое физическое явление — спонтанное деление атомных ядер из возбужденного состояния. (Госкомизобретений, диплом № 52, 1967 г.) .

— В Лаборатории высоких энергий поставлен первый в мире эксперимент по исследованию упругого пион-нуклонного рассеяния на большие углы при энергии выше 1 ГэВ. Эти работы положили начало широкому исследованию указанного процесса не только в ОИЯИ, но и на всех крупнейших ускорителях мира.

— В Лаборатории высоких энергий под руководством В.И.Векслера начались исследования по коллективному методу ускорения ионов.

1963

— Академик Б.М.Понтекорво удостоен Ленинской премии за экспериментальные и теоретические исследования физики нейтрино и слабых взаимодействий.

— Сотрудниками Лаборатории высоких энергий в экспериментах по упругому  $pp$ -рассеянию обнаружено явление потенциального рассеяния протонов высоких энергий. (Госкомизобретений, диплом № 246, 1981 г.).

— Учеными Лаборатории ядерных проблем открыто явление двойной перезарядки  $\pi$ -мезонов. (Госкомизобретений, диплом № 77, 1970 г.).

— В Лаборатории ядерных реакций открыто явление образования изотопа 102-го элемента. (Госкомизобретений, диплом № 34, 1966 г.).

— В Лаборатории теоретической физики разработан квазипотенциальный подход (уравнение Логунова — Тавхелидзе) в теории поля, который нашел многочисленные применения как при количественном описании высокоэнергетического рассеяния, так и при построении составных кварковых моделей.

— В ЛТФ завершено построение релятивистского аналога кинетической теории газа Больцмана.

— Сотрудниками Лаборатории нейтронной физики предложен и реализован эффективный метод поляризации нейтронов в широком диапазоне энергий путем пропускания их через поляризованную протонную мишень.

#### 1963-1965

— В Лаборатории высоких энергий выполнен цикл исследований упругого пион-протонного и пион-ядерного рассеяния. В этих экспериментах было доказано, что силы ядерного взаимодействия пиона с нуклоном имеют характер отталкивания.

#### 1964

— В Лаборатории высоких энергий (совместно с Белорусским государственным университетом) теоретически установлено явление ядерной прецессии нейтронов. (Госкомизобретений, диплом № 224, 1979 г.).

— Сотрудниками Лаборатории ядерных реакций сделано открытие — синтезирован 104-й элемент курчатовий. (Госкомизобретений, диплом № 37, 1966 г.). Изучены радиоактивные и химические свойства нового элемента.

— В Лаборатории теоретической физики разработана диаграммная техника без виртуальных частиц, приводящая к трехмерной формулировке релятивистской задачи двух тел.

— Сотрудниками Лаборатории ядерных проблем предложен метод исследования процессов при малых передачах импульса, в котором частицы отдачи с энергиями около 1 МэВ детектировались полупроводниковыми детекторами. Этот метод использовался для исследования протон-протонного рассеяния на синхрофазотроне.

## 1965

— Зарегистрировано открытие Г.Н.Флеровым и К.А.Петржаком (Радиевый институт им.В.Г.Хлопина АН СССР) спонтанного деления урана. (Госкомизобретений, диплом № 33, 1965 г., приоритет от 4.09.40 г.).

— В совместных с Институтом теоретической и экспериментальной физики исследованиях в Лаборатории ядерных проблем обнаружено новое явление существования мюония в конденсированных средах. (Госкомизобретений, диплом № 161, 1975 г.).

— В Лаборатории ядерных проблем открыто явление изменения относительной интенсивности рентгеновских линий К-серии  $\mu$ -мезоатома. (Госкомизобретений, диплом № 201, 1978 г.).

— Сотрудниками Лаборатории ядерных реакций открыто явление образования 103-го элемента периодической системы Д.И.Менделеева. (Госкомизобретений, диплом № 132, 1973 г.).

— В Лаборатории ядерных проблем реализован высокоэффективный метод получения сверхнизких температур в стационарном режиме, основанный на растворении жидкого гелия-3 в гелии-4, что открыло принципиально новые возможности для исследований в области ядерной физики и физики конденсированных сред. Автор этих работ Б.С.Неганов удостоен в 1981 г. премии им.М.В.Ломоносова Академии наук СССР.

— В Лаборатории теоретической физики Н.Н.Боголюбовым и А.Н.Тавхелидзе с сотрудниками предложена и обоснована идея о наличии у кварков нового квантового числа, называемого ныне "цветом", которая заложила основы современных представлений в теории сильных взаимодействий. Одновременно сформулированы основные положения составной кварковой модели элементарных частиц, известной сейчас как модель кваркового "мешка".



— В Лаборатории высоких энергий осуществлен запуск установок с пузырьковыми камерами в магнитном поле: двухметровой пропановой и однометровой жидководородной.

— В ЛВЭ началось производство высокоточных бесфильмовых камер. Разработанная в лаборатории методика изготовления многопроволочных детекторов широко используется во многих научных центрах стран-участниц.

— Введена в действие система импульсного бустера на реакторе ИБР. Сочетание реактора с инжектором-ускорителем электронов позволило получить очень короткий импульс при сохранении большой светосилы в импульсе.

— В Лаборатории нейтронной физики создан первый в странах-участницах ОИЯИ измерительный центр для обработки физической информации, поступающей одновременно с 8 пучков реактора ИБР.

— В Вычислительном центре ОИЯИ начала действовать система из трех ЭВМ, связанная с лабораторными измерительными центрами.

#### 1965-1977

— На основе идей, выдвинутых Д.И.Блохинцевым и М.А.Марковым, сотрудниками Лаборатории теоретической физики построена квантовая теория поля с нелокальным и неполиномиальным взаимодействием, удовлетворяющая всем требованиям аксиоматического подхода.

#### 1966

— В Лаборатории ядерных реакций в результате изучения процесса многонуклонных передач сделан вывод об обнаружении явления глубоконеупругой передачи нуклонов в ядерных реакциях. (Госкомизобретений, диплом № 229, 1980 г.).

— Создана Лаборатория вычислительной техники и автоматизации. В новой лаборатории концентрируются разработки, связанные с вычислительной техникой и автоматизацией обработки экспериментальных данных.

— В Лаборатории теоретической физики закончены разработка и математическое обоснование модели квазинезависимых кварков

(модель кваркового "мешка"), в рамках которой с высокой точностью вычислены магнитный момент и электромагнитный радиус протона, отношение аксиальной и векторной констант.

— Сотрудниками ЛТФ открыто существование калибровочной инвариантности нового вида, когда в качестве калибровочного поля выступает антисимметричное тензорное поле.

— В ЛТФ предложена теория релятивистской струны.

— В эксперименте на синхрофазотроне реализована методика обработки данных с помощью ЭВМ на линии с экспериментальной установкой.

— На синхротроне Лаборатории ядерных проблем создан протонный пучок с мощностью дозы 150 рад/мин для совместных с Институтом экспериментальной и клинической онкологии АМН СССР радиобиологических и онкологических исследований.

— В Лаборатории нейтронной физики впервые наблюдался  $\alpha$ -распад нейтронных резонансов тяжелых ядер.

— Математиками ЛВТА разработан непрерывный аналог метода Ньютона для решения широкого класса нелинейных задач математической физики.

1967

— Группа ученых Лаборатории ядерных реакций во главе с академиком Г.Н.Флеровым удостоена Ленинской премии за работы по синтезу трансурановых элементов. В числе лауреатов сотрудники ОИЯИ В.А.Друин, И.Звара.

— В Лаборатории высоких энергий обнаружено новое явление распада  $\phi^0$ -мезона на электрон-позитронную пару, указывающее на существование прямых переходов между  $\phi^0$ -мезоном и  $\gamma$ -квантом. (Госкомизобретений, диплом № 94, 1971 г.).

— За изучение некоторых особенностей образования и распада сверхтяжелых ядер в реакциях с тяжелыми ионами группа сотрудников Лаборатории ядерных реакций удостоена премии Ленинского комсомола в области науки и техники. (Авторы: В.И.Илющенко, С.А.Карамян, И.В.Кузнецов, М.Б.Миллер, В.Л.Михеев, Ю.Ц.Оганесян, Ю.Э.Пенионжквич).

— На синхрофазотроне осуществлен быстрый вывод с эффективностью около 50% протонного пучка с энергией 10 ГэВ.

— В Лаборатории нейтронной физики подготовлено физико-техническое обоснование проекта нового мощного импульсного реактора на быстрых нейтронах ИБР-2, разработан эскизный проект и начато техническое проектирование реакторной части комплекса ИБР-2.

#### 1967-1974

— В Лаборатории теоретической физики развит метод решения нелинейных уравнений дисперсионного подхода и сделаны приложения к эксперименту.

— Теоретиками ОИЯИ и ИФВЭ (Протвино) сформулированы конечно-энергетические правила сумм в физике элементарных частиц, выдвинута концепция "глобальной дуальности" в теории сильных взаимодействий, устанавливающая взаимосвязь асимптотического поведения амплитуд при высоких энергиях со свойствами частиц и резонансов в соответствующих прямых каналах реакций.

#### 1968

— В совместных исследованиях сотрудников ОИЯИ (ЛЯП и ЛТФ) и Московского государственного университета им.М.В.Ломоносова теоретически обосновано и экспериментально подтверждено явление резонансного поглощения отрицательных мюонов атомными ядрами. (Госкомизобретений, диплом № 173, 1976 г.).

— На реакторе ИБР в Лаборатории нейтронной физики осуществлено первое успешное наблюдение ультрахолодных нейтронов. В дальнейшем (совместно с Институтом атомной энергии им.И.В.Курчатова) были проведены эксперименты по накоплению и хранению ультрахолодных нейтронов в замкнутых плоскостях. В связи с этим зарегистрировано открытие — явление удержания медленных нейтронов, положившее начало развитию нового научного направления в физике нейтронов. (Госкомизобретений, диплом № 171, 1975 г.).

— Образован Отдел новых методов ускорения.

— Ученые ОИЯИ приступили к реализации программы экспериментов на ускорителе протонов на энергию 70 ГэВ в Институте физики высоких энергий в Протвино.

— Д.И.Блохинцевым разработана квантовая теория взаимодействия микросистемы с измерительным прибором, которая явилась завершающим шагом интерпретации квантовой механики на основе концепции квантовых ансамблей.

— В Лаборатории теоретической физики дано микроскопическое описание неротационных состояний деформированных ядер, которое получило экспериментальное подтверждение.

— В Лаборатории ядерных проблем введена в действие электронная модель кольцевого циклотрона с жесткой фокусировкой, на которой экспериментально подтверждена теоретически обоснованная сотрудниками лаборатории возможность получения в релятивистских циклотронах токов порядка сотен миллиампер.

— В Лаборатории ядерных реакций осуществлен физический запуск и вывод пучка изохронного циклотрона У-200 для ускорения тяжелых ионов.

— В ЛЯР проведены эксперименты по тройному делению возбужденных составных ядер. Впервые предложена модель последовательного деления ядер на три осколка примерно равной массы.

— В Лаборатории вычислительной техники и автоматизации введена в эксплуатацию вычислительная машина БЭСМ-6. Группой специалистов лаборатории под руководством Н.Н.Говоруна создана система математического обеспечения "Дубна" для ЭВМ БЭСМ-6, которая в дальнейшем получила широкое распространение как в СССР, так и в других странах-участницах ОИЯИ.

— В ЛВТА завершены работы по созданию полуавтоматической системы на базе 14 измерительных микроскопов типа ПУОС на линии с ЭВМ БЭСМ-4 и начаты массовые измерения снимков с трековых детекторов.

#### 1968-1972

— В Лаборатории теоретической физики выдвинут принцип автомодельности в физике высоких энергий. В работах Н.Н.Боголюбова, В.С.Владимирова и А.Н.Тавхелидзе дано обоснование существования степенного асимптотического поведения в квантовой теории поля. Принцип автомодельности впервые применен при исследовании фундаментального процесса образования димьюнных пар в адронных столкновениях при высоких энергиях.

#### 1968-1978

— Сотрудниками ЛТФ разработаны и применены при анализе результатов экспериментов методы сильной связи каналов в ядерных реакциях при низких энергиях.

#### 1968-1983

— В ЛТФ развит метод самосогласованных фононов, получивший широкое применение в физике конденсированного состояния.

#### 1969

— В совместных теоретических и экспериментальных работах ученых Лаборатории высоких энергий ОИЯИ, Ленинградского института ядерной физики АН СССР и Института физики высоких энергий (Протвино) установлена закономерность изменения радиуса сильного взаимодействия протонов при высоких энергиях. (Госкомизобретений, диплом № 244, 1981 г.).

— В совместных исследованиях с Институтом атомной энергии им.И.В.Курчатова в Лаборатории ядерных проблем открыто явление двухчастотной прецессии положительного  $\mu$ -мезона в атоме мюония в магнитном поле. (Госкомизобретений, диплом № 162, 1975 г.).

— В совместных исследованиях с Институтом теоретической и экспериментальной физики и Государственным научно-исследовательским и проектным институтом редкометаллической промышленности в Лаборатории ядерных проблем открыто свойство одноэлектронных атомов в кристаллических полупроводниках быть глубокими донорами. (Госкомизобретений, диплом № 259, 1982 г.).

— В Лаборатории нейтронной физики введен в действие более мощный реактор ИБР-30 — новый модифицированный вариант реактора ИБР с улучшенной конструкцией ряда узлов и линейным ускорителем электронов в качестве инжектора.

— Двухметровая пропановая пузырьковая камера ЛВЭ ОИЯИ введена в строй на пучке ускорителя ИФВЭ (Протвино).

— Завершена программа создания вычислительной базы ОИЯИ, введены в строй все ЭВМ комплекса как в ЛВТА, так и в измерительно-вычислительных центрах других лабораторий Института. Для обмена

информацией между вычислительными машинами ОИЯИ и других институтов реализована система с использованием стандартных магнитных накопителей.

— На модели коллективного ускорителя в Отделе новых методов ускорения создана система вывода кольцевого сгустка из адгезатора (адиабатического генератора заряженных тороидов) и получены результаты по ускорению такого сгустка в спадающем магнитном поле.

#### 1969-1970

— В Лаборатории ядерных реакций получены экзотические нейтронообогащенные изотопы легких элементов, такие, как углерод-20, азот-21, кислород-24, фтор-25, неон-26.

#### 1970

— 18 июня подписано Соглашение о научно-техническом сотрудничестве между Государственным комитетом по использованию атомной энергии СССР и Объединенным институтом ядерных исследований. Это Соглашение расширило возможности Института в научном сотрудничестве с национальными физическими центрами Советского Союза, а также возможности участия специалистов из стран-участниц ОИЯИ в научных программах советских институтов.

— Сотрудниками Лаборатории ядерных реакций открыт элемент 105 периодической системы Д.И.Менделеева. (Госкомизобретений, диплом № 114, 1972 г.).

— Специалистами Лаборатории высоких энергий осуществлен режим ускорения дейтронов на синхрофазотроне до энергии 11 ГэВ. Это явилось началом создания под руководством А.М.Балдина экспериментальной базы для развития нового научного направления — релятивистской ядерной физики. Исследования в области релятивистской ядерной физики в настоящее время интенсивно развиваются в ОИЯИ и других крупнейших исследовательских центрах мира.

— В Лаборатории ядерных проблем создан комплекс аппаратуры для исследований короткоживущих, удаленных от полосы  $\beta$ -стабильности изотопов, — ЯСНАПП (ядерная спектроскопия на пучке протонов).

— На модели коллективного ускорителя в ОНМУ впервые осуществлено ускорение  $\alpha$ -частиц.

1971

— Подписан Протокол о характере и формах сотрудничества между Объединенным институтом ядерных исследований и Советом Экономической Взаимопомощи.

— За цикл работ "Исследовательский реактор ИБР и реактор ИБР с инжектором" группа сотрудников ОИЯИ во главе с членом-корреспондентом АН СССР Д.И.Блохинцевым и академиком И.М.Франком удостоена Государственной премии СССР. В числе лауреатов сотрудники ОИЯИ Ф.Л.Шапиро, И.М.Матора, Е.П.Шабалин, С.К.Николаев, В.Т.Руденко.

— За достижения в теоретико-групповом и аксиоматическом подходе в теории элементарных частиц сотрудник Лаборатории теоретической физики И.Тодоров удостоен Димитровской премии (НРБ).

— При изучении спонтанного деления трансураниевых элементов в Лаборатории ядерных реакций обнаружено новое физическое явление — запаздывающее деление атомных ядер. (Госкомизобретений, диплом № 160, 1975 г.).

— В совместных исследованиях сотрудников Института физической химии АН СССР и Лаборатории ядерных реакций открыта закономерность стабилизации низших состояний окисления актинидных элементов. (Госкомизобретений, диплом № 169, 1975 г.).

— Произведен запуск установки с двухметровой жидководородной пузырьковой камерой "Людмила" на пучке ускорителя ИФВЭ (Протвино).

— Сотрудниками Лаборатории высоких энергий в опытах с релятивистскими дейтронами на синхрофазотроне обнаружен кумулятивный эффект — многобарионное столкновение с концентрацией энергии на одном пионе, причем энергия пиона превышает энергию, приходящуюся на один нуклон в налетающем ядре.

— В Лаборатории ядерных реакций организована совместная работа двух ускорителей: У-300 и У-200, что позволило существенно расширить диапазон ускоряемых ионов, впервые в мире ускорить ионы ксенона и начать широкие эксперименты по синтезу сверхтяжелых элементов.

— Объединенный институт ядерных исследований награжден Юбилейным почетным знаком ЦК КПСС, Президиума Верховного Совета СССР, Совета Министров СССР и ВЦСПС в честь 50-летия образования СССР.

— Государственная премия СССР присуждена за открытие и исследование эффекта теней в ядерных реакциях на монокристаллах, проведенное в совместных работах Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ и Научно-исследовательского института ядерной физики МГУ. В числе лауреатов сотрудник ОИЯИ С.А.Карамян.

— Сотрудниками Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ и Института атомной энергии им.И.В.Курчатова открыто явление квантовой некогерентной диффузии положительных  $\mu$ -мезонов в твердом веществе. (Госкомизобретений, диплом № 268, 1982 г.) .

— Завершен анализ данных, полученных сотрудниками Лаборатории высоких энергий на серпуховском ускорителе в эксперименте по изучению регенерации К-мезонов на водороде. Установлено, что в области 10-50 ГэВ нарушений теоремы Померанчука не наблюдается.

— Осуществлен медленный вывод ускоренного пучка протонов из камеры синхрофазотрона, на этой основе создана разветвленная сеть каналов пучков релятивистских ядер.

— В Лаборатории ядерных проблем создан пятиметровый магнитный искровой спектрометр МИС. Осуществлен запуск установки на пионном пучке ускорителя ИФВЭ (Протвино) .

— Сотрудниками ЛЯП в экспериментах по поиску монополя Дирака на ускорителе ИФВЭ установлена верхняя граница сечения рождения монополей протонами с энергией 70 ГэВ на нуклонах ядер кислорода и кремния.

— В ЛЯП теоретически предсказан и позднее экспериментально подтвержден в исследованиях на электронном циклотроне с жесткой фокусировкой эффект расширения замкнутых орбит в периодических структурах магнитных полей, позволяющий осуществить высокоэффективный (больше 99,9%) вывод пучка из камеры сильноточных циклотронов.

— В результате прецизионных измерений сотрудниками Лаборатории нейтронной физики определены магнитные моменты компаунд-состояний ряда ядер.



— В ЛНФ впервые изготовлен сверхнизкотемпературный криостат для поляризованной ядерной мишени, основанный на методике растворения гелия-3 в гелии-4.

— Центральный вычислительный комплекс Института пополнился новой электронно-вычислительной машиной CDC-6200. Завершены работы по объединению в единую систему машины БЭСМ-6 центрального комплекса и машин лабораторных центров. Закончено создание системы математического обеспечения обмена информацией по линиям связи комплекса.

— В ЛВТА завершены работы по созданию автоматической измерительной системы НРД и начаты массовые измерения снимков с пузырьковых и искровых камер.

#### 1972-1974

— Для медико-биологических исследований на синхроциклотроне сконструирована оригинальная мезонная линза и создан интенсивный пучок  $\pi$ -мезонов с мощностью дозы 3 рад/мин.

#### 1973

— Государственная премия СССР присуждена за цикл работ "Фоторождение  $\pi$ -мезонов на нуклонах". (Совместные исследования ученых ОИЯИ и ФИ АН СССР). В числе лауреатов сотрудники ОИЯИ академик А.М.Балдин, академик А.А.Логунов, член-корреспондент АН СССР А.Н.Тавхелидзе, профессор Л.Д.Соловьев.

— Теоретиками ОИЯИ развито приближение прямолинейных путей в квантовой теории поля, позволившее описать ряд важных особенностей высокоэнергетического рассеяния адронов. Работы этого цикла отмечены премией Ленинского комсомола в области науки и техники. В числе лауреатов сотрудники ОИЯИ С.П.Кулешов, В.А.Матвеев, В.Н.Первушин, А.Н.Сисакян, М.А.Смондырев.

— В Лаборатории теоретической физики А.Н.Тавхелидзе с сотрудниками сформулированы "правила кваркового счета", устанавливающие связь характеристик адрон-адронных взаимодействий с числом составляющих, из которых построены взаимодействующие объекты.

— В Лаборатории высоких энергий на выведенных пучках синхрофазотрона начала работать двухметровая стримерная камера СКМ-200, на которой ведутся исследования в области ядро-ядерных взаимодействий.

— На серпуховском ускорителе в совместном эксперименте ЛЯП ОИЯИ и ИФВЭ обнаружен антитритий.

— Радиохимики Лаборатории ядерных проблем обнаружено существование устойчивого в водных растворах катиона тяжелого галогена — астата и изучены его химические свойства.

— В Лаборатории ядерных реакций на пучках тяжелых ионов с  $Z > 40$  впервые проведено экспериментальное изучение процессов ионизации внутренних атомных оболочек и образования тяжелых квазимолекул с суммарным зарядом вплоть до  $Z = 137$ .

#### 1973-1974

— Сотрудниками ЛЯР предложен новый метод "холодного" синтеза тяжелых элементов с  $Z > 100$ , основанный на использовании мишеней из тяжелых металлов (ртуть, таллий, свинец, висмут) и ионов тяжелее аргона. Этот метод был использован в работах по синтезу новых изотопов элементов с  $100 \leq Z \leq 109$ .

#### 1973-1981

— В Лаборатории теоретической физики выполнен цикл работ по методу аппроксимирующих гамильтонианов и его приложениям. Эти работы внесли значительный вклад в развитие модельного подхода в статистической механике.

#### 1974

— Сотрудниками Лаборатории ядерных реакций открыто явление образования радиоактивного изотопа элемента с атомным номером 106. (Госкомизобретений, диплом № 194, 1977 г.).

— В Лаборатории теоретической физики разработан метод бозонного представления гамильтониана ядра, послуживший основой модели взаимодействующих бозонов.

— В ЛТФ открыто третье семейство мультипольных параметров — тороидное, сыгравшее впоследствии важную роль при изучении несохранения дискретных симметрий и предсказании новых коллективных явлений в конденсированных средах.

— Закончен анализ результатов исследования прямого рассеяния пионов с энергией 50 ГэВ на электронах, которое проводилось на серпуховском ускорителе объединенной группой физиков ОИЯИ и Калифорнийского университета. Определен электромагнитный радиус пиона.

— В Лаборатории высоких энергий завершен цикл работ по исследованию кумулятивного мезообразования во взаимодействиях релятивистских дейтронов с ядрами.

— Учеными ЛВЭ показано, что в ядерных столкновениях энергия 3,5—4 ГэВ/нуклон налетающих ядер соответствует границе области предельной фрагментации. При этом во взаимодействиях проявляются кварковые степени свободы.

— В ЛВЭ введены в действие новый инжектор синхрофазотрона — линейный ускоритель ЛУ-20 на энергию протонов 20 МэВ и принципиально новый источник высокозарядных ионов КРИОН. Получены ускоренные релятивистские ядра гелия и азота.

— В ЛВЭ подготовлено физическое обоснование сверхпроводящего ускорителя "Нуклотрон".

— На пионном пучке синхрофазотрона ЛВЭ запущен многоцелевой черенковский масс-спектрометр "Фотон" на 90 каналов.

— На синхроциклотроне Лаборатории ядерных проблем выполнено прецизионное измерение времени жизни мюона, позволившее в несколько раз улучшить точность определения константы слабого взаимодействия Ферми.

— На ускорителе У-300 Лаборатории ядерных реакций впервые в мире ускорены ионы  $^{48}\text{Ca}$ ,  $^{50}\text{Ti}$ ,  $^{54}\text{Cr}$ .

— В Лаборатории вычислительной техники и автоматизации завершено создание сканирующего автомата на электронно-лучевой трубке АЭЛТ-1. На нем началась массовая обработка камерных снимков.

— Физиками ЛВТА создан автоматизированный высокоразрешающий магнитный спектрометр с проволочными камерами на линии с ЭВМ (установка МАСПИК), с помощью которого впоследствии была обнаружена двухпиковая структура в высокоимпульсных частях спектров дейтронов от квазиупругого дейтрон-дейтронного рассеяния.

## 1974-1975

— На масс-спектрометре БЭМС-2 в Лаборатории ядерных реакций открыто и изучено десять излучателей запаздывающих протонов в области изотопов бария и редкоземельных элементов.

## 1975

— Группа сотрудников Лаборатории ядерных реакций во главе с академиком Г.Н.Флеровым удостоена Государственной премии СССР за цикл работ по синтезу и изучению свойств атомных ядер вблизи границы ядерной устойчивости. В числе лауреатов сотрудники ОИЯИ В.В.Волков, Г.М.Тер-Акопян, Ю.Ц.Оганесян, В.А.Карнаухов, В.Л.Михеев, А.С.Пасюк, Ю.В.Лобанов, Л.А.Петров, В.З.Белов, В.М.Плотко.

— На синхроциклотроне Лаборатории ядерных проблем в опытах по поиску распада мюона на три электрона осуществлена наиболее точная проверка справедливости закона сохранения мюонного заряда.

— В Лаборатории ядерных реакций завершен цикл работ по синтезу и изучению свойств новых изотопов трансфермиевых элементов с  $Z = 100, 102, 103, 104, 105$  и  $106$ , которые проводились на пучках циклотрона У-300. Эти исследования позволили дать новую систематику периодов спонтанного деления и  $\alpha$ -распада тяжелых ядер.

## 1975-1976

— Учеными Лаборатории теоретической физики и Лаборатории нейтронной физики изучено явление бозе-конденсации в жидком гелии.

## 1975-1980

— Сотрудниками Лаборатории теоретической физики развита техника вычисления многопетлевых диаграмм Фейнмана с использованием аналитических вычислений на ЭВМ, получены рекордные результаты в квантовой хромодинамике.

## 1976

— За успехи, достигнутые в фундаментальных и прикладных исследованиях в области физики элементарных частиц и ядерной физики,

большой вклад в подготовку высококвалифицированных научных кадров и развитие научно-технического сотрудничества социалистических стран Президиум Верховного Совета СССР наградил ОИЯИ орденом Дружбы народов.

— Н.Н.Боголюбовым развита теория стохастических процессов в динамических системах и изучена кинетика твердых сфер. За работу "О стохастических процессах в динамических системах" Президиум АН СССР присудил Н.Н.Боголюбову Золотую медаль им.М.А.Лаврентьева и премию за 1983 год.

— В Лаборатории теоретической физики выдвинута гипотеза о многокварковой природе флюктонов Блохинцева; лежащая ныне в основе объяснения кумулятивного эффекта и подтвержденная в экспериментах NA-4 по глубоконеупругому рассеянию мюонов на ядрах (на ускорителе ЦЕРНа).

— Сотрудниками ЛТФ предложено объяснение аномально малого времени хранения ультрахолодных нейтронов.

— Эксперименты на синхрофазотроне по рассеянию релятивистских  $\alpha$ -частиц на различных ядрах позволили обнаружить новое явление — осцилляции в дифференциальных сечениях, которое было предсказано в теории элементарных частиц.

— В Лаборатории ядерных реакций завершен цикл работ по синтезу элемента с атомным номером 107.

— В адгезаторе прототипа КУТИ в Отделе новых методов ускорения получено сжатое электрическое кольцо радиусом 4 см, диаметром малого сечения 0,4 см; число электронов в кольце  $10^{13}$ .

#### 1976-1978

— В совместных экспериментах ученых Лаборатории высоких энергий ОИЯИ и Национальной ускорительной лаборатории им.Э.Ферми (США) по  $\pi^-e^-$  и  $K^-e^-$ -рассеянию при энергиях 100 и 250 ГэВ определены с наилучшей точностью электромагнитные радиусы  $\pi^-$  и  $K^-$ -мезонов.

#### 1977

— Государственная премия СССР присуждена за цикл работ по исследованию расщепления легких ядер  $\gamma$ -лучами высоких энергий

методом камеры Вильсона, действующей в мощных пучках электронных ускорителей, группе сотрудников ОИЯИ, ФИ АН СССР, ФТИ АН УССР, ИЯИ АН СССР, ИФ АН ГрССР и ТГУ. В числе лауреатов сотрудник ОИЯИ С.Б.Герасимов.

— В ЛНФ состоялся физический пуск в стационарном режиме мощного импульсного реактора ИБР-2.

— В Лаборатории теоретической физики разработан кинетический подход к единому описанию адрон-ядерного и ядро-ядерного взаимодействий при средних и высоких энергиях.

— В Лаборатории высоких энергий изучены многобарионные системы, резонансы в которых интерпретированы как сверхплотные многокварковые состояния.

— На синхрофазотроне ускорены ядра углерода, кислорода, неона.

— В Лаборатории ядерных реакций проведен цикл экспериментов по изучению характеристик деления тяжелых и сверхтяжелых слабо возбужденных ядер и впервые обнаружено влияние оболочечных эффектов на массовое распределение осколков деления возбужденных составных ядер.

— В Лаборатории нейтронной физики с помощью сверхпроводящего квантового магнитометра в макроскопическом опыте определена верхняя граница дипольного электрического момента электрона.

— В ОНМУ на прототипе коллективного ускорителя тяжелых ионов осуществлен устойчивый режим ускорения ионов азота, аргона и ксенона в спадающем магнитном поле.

#### 1977-1984

— В Лаборатории теоретической физики выдвинута концепция "скрытого цвета" в ядерной материи, указано на принципиальную верность учета цветовых степеней свободы кварков при описании структуры ядер на малых расстояниях.

#### 1978

— В Лаборатории ядерных реакций состоялся пуск нового мощного ускорителя тяжелых ионов — изохронного циклотрона У-400.

— В Лаборатории нейтронной физики осуществлен физический пуск реактора ИБР-2 в импульсном режиме без теплоносителя.

— В Лаборатории теоретической физики разработана квази-частично-фононная модель ядра, в рамках которой получено единое описание ядерных состояний при низких, средних и высоких энергиях возбуждения.

— Осуществлен запуск на пучке серпуховского ускорителя крупного спектрометра со стримерными камерами (установка РИСК), созданного в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ для изучения адрон-адронных взаимодействий.

— Изучены упругое и неупругое  $pp$ -,  $pd$ -,  $pHe$ -взаимодействия при малых переданных импульсах на ускорителе Национальной ускорительной лаборатории им.Э.Ферми (Батавия, США) при энергии протонов 50-400 ГэВ. (Совместные исследования ОИЯИ—ФНАЛ).

— Завершен монтаж установки для совместного ОИЯИ—ЦЕРН эксперимента по изучению глубоконеупругого рассеяния мюонов на ускорителе 400 ГэВ в ЦЕРНе.

— Учеными Лаборатории ядерных проблем на синхроциклотроне открыто и изучено новое явление — резонансное образование  $dd\mu$ -мезомолекул.

— На основе проводящихся в Лаборатории ядерных проблем разработок сильноточных ускорителей с пространственной вариацией магнитного поля введен в эксплуатацию в Институте ядерной физики ЧСАН созданный в ОИЯИ ускоритель У-120М, на котором достигнуты высокие проектные параметры.

#### 1978-1979

— Теоретиками Института развит новый подход к теории электромагнитных взаимодействий, опирающийся на концепцию "фундаментальной длины".

#### 1978-1980

— В Лаборатории теоретической физики Н.Н.Боголюбовым с сотрудниками разработан метод исключения бозонных переменных из кинетических уравнений для систем, взаимодействующих с бозонными полями, и изучена кинетика полярона.

— В Лаборатории ядерных реакций проведена разработка интенсивных источников  $\gamma$ - и нейтронного излучений и высокочувствительных методик элементного активационного анализа на их основе.

#### 1978-1981

— В ЛТФ завершено построение суперполевой теории простой супергравитации на основе введения адекватной комплексной геометрии суперпространства.

#### 1979

— В ЛТФ разработан новый алгебраический подход к формулировке внутренних и калибровочных симметрий в теории элементарных частиц, который подтвердил приоритет введения квантового числа цвета в ОИЯИ.

— В ЛТФ развита микроскопическая теория высокоспиновых состояний атомных ядер.

— В Лаборатории ядерных проблем группой ученых под руководством В.П.Джелепова впервые проведено наблюдение и экспериментальное исследование  $\mu$ -катализа реакции синтеза ядер дейтерия и трития.

— Состоялся пуск крупного спектрометрического комплекса ЛЯП ОИЯИ-ИФВЭ "Гиперон" на пучке серпуховского ускорителя.

— Запуск совместно с ИФВЭ установки ЛЯП ОИЯИ "Проза", включающей "замороженную" поляризованную мишень, положил начало исследованиям поляризационных явлений в обменном пион-протонном рассеянии при энергиях ускорителя ИФВЭ (Протвино).

— В Отделе новых методов ускорения на прототипе КУТИ осуществлено ускорение электронно-ионных колец в электрическом поле ускоряющей индукционной секции до энергии ионов 4 МэВ/нуклон.

#### 1979-1982

— В ЛЯР в реакциях с тяжелыми ионами (энергия  $\leq 10$  МэВ/нукл.) экспериментально обнаружен вылет быстрых заряженных частиц и ядер с энергией вплоть до кинематического предела для бинарных процессов.



1979-1984

— В эксперименте на синхрофазотроне впервые показана возможность отклонения высокоэнергетического пучка протонов с помощью изогнутого монокристалла. Осуществлен вывод ускоренного пучка из вакуумной камеры ускорителя с помощью кристаллического дефлектора.

— В работах по поиску сверхтяжелых элементов в природе (в метеоритах и геотермальных рассолах) сотрудниками Лаборатории ядерных реакций обнаружен второй природный спонтанно делящийся излучатель после урана.

1980

— В Лаборатории нейтронной физики осуществлен первый этап энергетического пуска импульсного реактора на быстрых нейтронах ИБР-2. Реактор испытан в импульсном режиме с натриевым охлаждением.

— В Лаборатории теоретической физики на основе квазичастично-фононной модели ядра дано описание ширин гигантских резонансов и фрагментации глубоких дырочных состояний в сферических ядрах.

— В экспериментах на серпуховском ускорителе учеными Лаборатории высоких энергий с помощью установки БИС-2 обнаружено образование нейтронами на ядрах очарованного бариона  $\Lambda_c^+$  и узкого барионного резонанса  $N_\phi$ .

— В ЛВЭ предложена и исследована новая характеристика атомного ядра — кварк-партоновая структурная функция.

— Учеными Лаборатории ядерных проблем создан новый детектор заряженных частиц постоянной чувствительности — проволочная камера в самогасящемся стримерном режиме.

— Для повышения чувствительности активационного анализа в Лаборатории ядерных реакций создан микротрон МТ-22 с энергией пучка электронов 22 МэВ и интенсивностью свыше 30 мкА.

— В Лаборатории нейтронной физики измерены синглетные и триплетные длины рассеяния нейтронов на гелии-3, имеющие важное значение для теории малонуклонных систем.

— В ЛНФ с помощью малоуглового рассеяния нейтронов исследованы общий вид и конформационные изменения иммуноглобулинов.

— В Лаборатории вычислительной техники и автоматизации завершено создание сканирующего автомата АЭЛТ-2/160 на электронно-лучевой трубке с двухфильмовым лентопротяжным механизмом.

1981

— За выдающийся вклад в создание и развитие ядерной физики во Вьетнаме правительство СРВ наградило Объединенный институт ядерных исследований орденом Дружбы.

— Цикл экспериментов по исследованию каналирования электронов и позитронов высоких энергий в монокристаллах выполнен учеными Лаборатории высоких энергий ОИЯИ совместно с сотрудниками Национальной ускорительной лаборатории им.Э.Ферми (США) на ускорителях ОИЯИ, ИФВЭ и ФНАЛ.

— В Лаборатории ядерных проблем разработана и практически используется методика элементного анализа живых организмов по мезорентгеновскому излучению (мюонная диагностика).

— Сотрудниками Лаборатории ядерных реакций на основе анализа минералов из метеоритов изучена распространенность элементов с атомными номерами  $50 \leq Z \leq 120$  в космических лучах.

— В Лаборатории нейтронной физики впервые обнаружено многократное (до  $10^5$  раз) усиление эффекта несохранения пространственной четности в нейтронных резонансах, возникающего за счет слабого взаимодействия в ядрах.

— Сотрудниками ЛНФ обнаружены химические сдвиги нейтронных резонансов, ранее предсказанные в лаборатории. Величины сдвигов характеризуют изменения размеров и формы ядра в возбужденном состоянии.

— В Лаборатории вычислительной техники и автоматизации введена в эксплуатацию мощная ЭВМ ЕС-1060.

— В Отделе новых методов ускорения состоялся запуск инжектора КУТИ — линейного индукционного ускорителя СИЛУНД-20.

## 1981-1984

— В Лаборатории теоретической физики получена точная иерархия кинетических уравнений для сверхизлучательных систем, на основе которой исследованы динамические характеристики сверхизлучательных лазеров. Развита метод частичного исключения бозонных переменных в применении к теории многофотонных процессов.

## 1982

— Н.Н.Боголюбовым исследована принципиальная связь между термодинамическим предельным переходом и эргодичностью динамических систем.

— В совместном ОИЯИ—ЦЕРН эксперименте на установке NA-4 измерена асимметрия в процессах глубокоупругого рассеяния положительных и отрицательных  $\mu$ -мезонов на ядрах углерода при энергиях 120 и 200 ГэВ. Полученный результат подтвердил предсказания теории электрослабого взаимодействия.

— В экспериментах на синхрофазотроне ИФВЭ определена доля шестикваркового состояния ядра дейтерия.

— В Лаборатории высоких энергий введена в эксплуатацию крупная гелиевая ожигительная установка КГУ-1600/4,5.

— Учеными Лаборатории ядерных проблем на ускорителе ИФВЭ (Протвино) проведено исследование когерентного образования трехпионных систем в пион-ядерном рассеянии. Впервые обнаружено существование новых резонансов — радиальных возбуждений пиона.

— Ученые ЛЯП ОИЯИ и ИФВЭ обнаружили и исследовали на ускорителе ИФВЭ комптон-эффект на пионе. Впервые измерена фундаментальная структурная константа поляризуемости пиона.

— Проведен первый физический эксперимент на реакторе ИБР-2 — поиск гипотетической нейтральной частицы — аксиона. Экспериментаторами ЛНФ и ЛЯП доказано отсутствие "стандартного" варианта аксиона.

— Полностью реконструирован измерительно-вычислительный центр Лаборатории нейтронной физики: система многоканальных анализаторов заменена на систему малых ЭВМ с центральным процессором PDP-11/70.

— В Лаборатории вычислительной техники и автоматизации введена в эксплуатацию система коллективного пользования на базе ЭВМ БЭСМ-6, CDC-6500 и концентратора терминалов.

#### 1982-1984

— В Лаборатории ядерных реакций проведен цикл экспериментальных исследований образования и радиоактивного распада изотопов с  $Z = 106 \div 109$ . Показано, что все синтезированные ядра, включая четно-четные изотопы, испытывают главным образом  $\alpha$ -распад, что свидетельствует о повышении ядерной устойчивости транскурчатовых элементов по отношению к спонтанному делению.

#### 1983

— За цикл работ "Дифракционное рассеяние протонов при высоких энергиях" группе сотрудников ОИЯИ, а также ЛИЯФ АН СССР и ФИ АН СССР присуждена Государственная премия СССР. В числе лауреатов сотрудники ОИЯИ Ю.К.Акимов, В.А.Никитин, Б.А.Морозов, Ю.К.Пилипенко, Л.С.Золин, С.В.Мухин, М.Г.Шафранова, В.А.Копылов-Свиридов, А.А.Кузнецов.

— Государственная премия СССР присуждена за цикл совместных работ ЛТФ и МГУ "Математические методы статистической механики". В числе лауреатов сотрудник ОИЯИ Н.Н.Боголюбов (мл.).

— На синхрофазотроне введен в действие лазерный источник ионов, позволивший в 100 раз увеличить интенсивность релятивистских ядер углерода, впервые получить пучки ядер лития и магния с энергией 4 ГэВ/нуклон.

— В совместных исследованиях сотрудников Лаборатории ядерных проблем и ИФВЭ на серпуховском ускорителе обнаружено образование пионных пар пионами в кулоновском поле ядра. Получено прямое экспериментальное подтверждение гипотезы о существовании цветных степеней свободы у кварков, выдвинутой в 1965 г. теоретиками ОИЯИ.

— Физиками Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ на ускорителе ИФВЭ (Протвино) обнаружен редкий распад  $\pi^0$ -мезона на атом позитрония и  $\gamma$ -квант.

— На ускорителе ЛИЯФ АН СССР (Гатчина) в совместных экспериментах ученых ЛЯП ОИЯИ и ЛИЯФ впервые определено положение протяженного участка протонной устойчивости атомных ядер.

— В Лаборатории нейтронной физики параллельно с работами по энергетическому пуску реактора ИБР-2 начались физические исследования на нейтронных спектрометрах МУР, ДН-2, КОРА, КДСОГ-М и на многопозиционной установке "Регата" для активационного анализа.

— В Лаборатории нейтронной физики выполнены эксперименты по определению вклада электронов проводимости в расщепление атомных уровней кристаллическим полем.

— В Отделе новых методов ускорения создана и запущена головная часть коллективного ускорителя тяжелых ионов КУТИ-20.

## 1984

— Академику Н.Н.Боголюбову, академику А.А.Логунову и члену-корреспонденту АН СССР Д.В.Ширкову присуждена Государственная премия СССР за цикл работ "Метод ренормализационной группы в теории полей".

— Решением Государственного Совета НРБ почетного звания "Лауреат Димитровской премии" удостоены Ж.Желев, П.Марков, В.Христов за научные достижения в области ядерной физики. (Работы выполнены в ОИЯИ и ИЯИЯЭ БАН).

— Государственная премия ЧССР имени Клемента Готвальда присуждена за цикл работ по исследованию свойств атомных ядер методом ядерной ориентации при сверхнизких температурах. Авторы: М.Фингер (ОИЯИ), З.Яноут (Политехнический институт, Прага), С.Шафрата (Физический институт ЧСАН).

— Президиум АН СССР присудил Золотую медаль им.М.В.Ломоносова за 1984 год академику Н.Н.Боголюбову за выдающиеся достижения в области математики и теоретической физики.

— В Лаборатории ядерных проблем осуществлен физический пуск сильноточного фазотрона — установки "Ф".

— Импульсный реактор ИБР-2 сдан в эксплуатацию на средней мощности 2 МВт. Импульсный поток тепловых нейтронов составил  $10^{16} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  — самый высокий поток среди исследовательских реакторов в мире.

— Теоретические работы А.М.Балдина и инициированные им в 70-е годы широкие экспериментальные исследования на пучках релятивистских ядер синхрофазотрона ЛВЭ привели к установлению границ применимости протон-нейтронной модели ядра.

— В Лаборатории высоких энергий завершен монтаж модельного сверхпроводящего синхротрона СПИН, начаты комплексные испытания его систем.

— В ЛЯР в реакциях  $^{209}\text{Bi} + ^{55}\text{Mn}$  и  $^{207,208}\text{Pb} + ^{58}\text{Fe}$  синтезированы изотопы 108-го элемента с массовыми числами 263-265, в реакции  $^{209}\text{Bi} + ^{58}\text{Fe}$  синтезирован изотоп 109-го элемента с массовым числом 266.

— В Лаборатории нейтронной физики исследованы структура и динамика суперионного проводника при фазовых переходах.

— Сотрудниками ЛНФ обнаружено несохранение пространственной четности в реакции (n, p).

#### 1984-1985

— В Лаборатории ядерных реакций создан специализированный циклический имплантатор ИЦ-100 для производства ядерных фильтров и изучения радиационного воздействия тяжелых ионов на различные материалы.



# Оглавление

Н.Н.Боголюбов, А.Сэндулеску, Э.Энтральго. 30 лет Объединенному институту ядерных исследований . . . . .	5
Что такое ОИЯИ? . . . . .	18
Органы управления ОИЯИ. . . . .	28
Структура ОИЯИ . . . . .	29
Ю.Н.Денисов. Экспериментальная база Объединенного института ядерных исследований и перспективы ее развития в предстоящем пятилетии (1986-1990 годы) . . . . .	30
А.И.Романов, В.С.Шванев. Международные научные связи. . . . .	39
А.С.Гиршева. Штрихи к портрету . . . . .	48

## **ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЧАСТИЦ РОЖДЕНИЕ ЧАСТИЦ И РЕЗОНАНСОВ**

Н.Н.Боголюбов, В.А.Матвеев, А.Н.Тавхелидзе. Цветные кварки. . . . .	55
С.М.Биленький, Б.М.Понтекорво. Работы по осцилляциям нейтрино в Дубне . . . . .	60
С.В.Голоскоков, С.П.Кулешов. Динамический подход в квазипотенциальной теории сильных взаимодействий при высоких энергиях . . . . .	65
А.А.Кузнецов, В.А.Никитин, И.А.Савин, Э.Н.Цыганов Исследования фундаментальных свойств элементарных частиц и их структуры . . . . .	72
И.М.Граменицкий, В.Г.Гришин, М.Ф.Лихачев. Изучение механизмов рождения частиц и резонансов . . . . .	82
А.А.Тяпкин. Спектроскопия радиально-возбужденных систем из легких кварков . . . . .	87

## СТРУКТУРА ТЕОРИИ ПОЛЯ

Д.В.Ширков. Квантовая теория поля . . . . .	93
В.А.Мещеряков, Нгуен Ван Хьеу, Л.Д.Соловьев Дисперсионные соотношения. . . . .	99
А.Н.Сисакян, Н.Б.Скачков. Описание составной структуры адронов на основе трехмерной формулировки квантовой теории поля. . . . .	106
М.К.Волков, Г.В.Ефимов, В.Н.Первушин. Квантовая теория поля с нелокальным и нелинейным взаимодействием . . . . .	120

## РЕЛЯТИВИСТСКАЯ ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

А.М.Балдин, В.С.Ставинский. Релятивистская ядерная физика . . . . .	125
Б.Словински. Первые ядерно-физические исследования при релятивистских энергиях в ОИЯИ. . . . .	151
Л.С.Ажгирей. Проявление кратных нуклон-нуклонных соударений в рассеянии релятивистских дейтронов . . . . .	156

## ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ АТОМНЫХ ЯДЕР

В.Г.Соловьев, И.Н.Михайлов. Парные корреляции сверхпроводящего типа и структура сложных ядер . . . . .	163
В.П.Джелепов, Л.И.Пономарев. Мюонный катализ ядерных реакций синтеза . . . . .	168
К.Я.Громов, Г.Лизурей. Ядерная спектроскопия на пучке протонов	172

## СТАТИСТИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА

Н.Тончев, А.С.Шумовский. Статистическая механика в ОИЯИ. . . . .	181
--	-----

## ФИЗИКА ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ

Г.Н.Флеров, Г.М.Тер-Акопян. Сверхтяжелые элементы . . . . .	195
---	-----



Ю.Ц.Оганесян, А.А.Плеве. Синтез новых элементов таблицы Менделеева . . . . .	205
Ю.Э.Пенионжкевич. Получение ядер легчайших элементов, расположенных вблизи границ ядерной стабильности, в реакциях с тяжелыми ионами. . . . .	219

## НЕЙТРОННАЯ ФИЗИКА

Ю.А.Александров, В.П.Алфименков, В.И.Лущиков Фундаментальные физические исследования с помощью импульсных реакторов ИБР. . . . .	229
А.М.Балагуров, И.Натканец, Ю.М.Останевич Нейтроннография конденсированных сред в ОИЯИ . . . . .	236
Л.Б.Пикельнер. Эффекты сверхтонких взаимодействий в нейтронных резонансах . . . . .	244

## ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА ПРИКЛАДНАЯ МАТЕМАТИКА

В.С.Барашенков. Математическое моделирование ядерно-физических процессов, инициируемых частицами высоких энергий. . . . .	253
В.Е.Аниховский, В.В.Галактионов, С.Г.Каданцев, В.В.Кореньков, Е.Ю.Мазепа, В.П.Шириков. Развитие диалоговых средств использования ЭВМ. . . . .	263
Е.П.Жидков. Непрерывный аналог метода Ньютона в нелинейных задачах математической физики . . . . .	270

## УСКОРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА ИМПУЛЬСНЫЕ РЕАКТОРЫ

И.Н.Семенюшкин, Л.Г.Макаров, И.В.Шелаев Синхрофазотрон как ускоритель релятивистских ядер, его дальнейшее развитие . . . . .	277
В.П.Саранцев. Развитие коллективных методов ускорения в ОИЯИ	283
В.Д.Ананьев, И.М.Франк, Е.П.Шабалин. Реактор ИБР-2 — это новые возможности в нейтронных исследованиях . . . . .	288

## МЕТОДИКА ФИЗИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Ю.В.Заневский, А.Г.Зельдович, И.Ф.Колпаков, Ю.К.Пилипенко Детекторы частиц, электронная и криогенная аппаратура для фундаментальных и прикладных исследований . . . . .	295
Б.С.Неганов. Метод получения сверхнизких температур путем растворения $^3\text{He}$ в $^4\text{He}$ и его применение в физике элементарных частиц . . . . .	302
И.А.Голутвин. Развитие экспериментальной методики исследований элементарных частиц и релятивистских ядер . . . . .	308
Г.Н.Флеров, В.И.Кузнецов, В.А.Щеголев. Прикладные исследования на пучках тяжелых ионов . . . . .	326
Основные даты деятельности ОИЯИ . . . . .	332

*Рабочая группа:*

В.П.Бочкарев  
Е.А.Васильева  
Е.Б.Соболева  
Б.М.Старченко  
Ю.А.Туманов  
Л.П.Устенко

*В подготовке материалов приняли участие:*

Р.А.Асанов, А.М.Говоров, А.Д.Коваленко, А.Б.Кузнецов,  
Б.И.Пустыльник, М.Г.Сапожников, Ю.П.Устенко, А.Б.Швачка

86-1

Редакторы Е.К.Аксенова, Т.Я.Жабицкая.  
Макет Н.А.Киселевой.  
Набор Е.М.Граменицкой, В.С.Румянцевой.  
Изготовление негативов С.А.Гикал.  
Монтаж и изготовление форм И.В.Козубской.  
Печатник В.В.Евсеева.  
Переплетные работы Р.Р.Пешехоновой.

Художник В.П.Бочкарев. Фото Ю.А.Туманова.  
В книге, кроме того, использованы фотографии,  
выполненные в разные годы Н.М.Гореловым, П.И.Зольниковым, У.Том,  
В.А.Шустиным, а также снимки, предоставленные ТАСС  
и рядом институтов стран-участниц ОИЯИ.

Подписано в печать 02.01.86.

Формат 80x100/16. Печать офсетная. Уч.изд.л. 32,8.

Тираж 500. Заказ 37038.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований  
Дубна Московской области