

Лаборатория физики частиц

1. История создания ЛФЧ, задачи лаборатории и ее структура

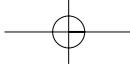
Лаборатория физики частиц (ЛФЧ) – самая молодая лаборатория в составе Объединенного института ядерных исследований. Основанная в 1988 году с целью концентрации интеллектуальных усилий и материальных ресурсов в исследованиях физики элементарных частиц, выполняемых на внешних ускорителях, она была названа первоначально Лабораторией сверхвысоких энергий (ЛСВЭ). Свое окончательное название – ЛФЧ – лаборатория получила в 1999 году, когда праздновалось ее десятилетие.

В связи с быстрым развитием физики частиц, оказавшим глобальное влияние на современное мировое сообщество, перед руководством и научной общественностью ОИЯИ в 80-е годы встала задача пересмотреть организацию исследований в этой области с целью эффективного использования интеллектуального и технического потенциала Института. Уже тогда сооружение крупного ускорителя в ОИЯИ и в странах-участницах не представлялось возможным из-за экономических ограничений. В настоящее время это доступно только международным объединениям. В 80-х годах действовали следующие ускорители: У-70 (ускоритель протонов 70 ГэВ в ИФВЭ), SPPS (коллайдер протонов и антипротонов 300 ГэВ в ЦЕРН), теватрон (коллайдер протонов и антипротонов 400 ГэВ во FNAL), HERA (коллайдер протонов и электронов с энергиями 820 ГэВ и 30 ГэВ соответственно). Проектировались или обсуждались машины: LEP (коллайдер электронов и позитронов с энергией 60 ГэВ), RHIC (коллайдер протонов и ядер с энергией 200 ГэВ/А), SSC (коллайдер протонов с энергией 40 ТэВ), УНК (коллайдер протонов с энергией 3×3 ТэВ²).

ОИЯИ мог и должен был принять вызов времени и продолжить интенсивные исследования в области физики частиц в условиях отсутствия собственной базовой установки и быстро расширяющегося фронта работ в других центрах. Предпосылками для активной позиции Института были результаты успешного осуществления в 1968–1980 годах большой программы исследований в ИФВЭ, FNAL и ЦЕРН:

- изучение дифракционных процессов на У-70 и теватроне с помощью оригинальной методики струйной мишени и полупроводниковых детекторов;
- измерение формфакторов К- и π-мезонов в их рассеянии на электронах в экспериментах на У-70 и теватроне;
- исследование регенерации нейтральных каонов на У-70;
- выполнение на У-70 широкой программы исследований с помощью пузырьковой камеры ЛЮДМИЛА и пропановой двухметровой камеры;
- обнаружение образования ядер антигелия на У-70;
- исследование дифракционных процессов и пионных резонансов с помощью искрового спектрометра МИС на У-70;
- исследование глубоконеупругого рассеяния мюонов на установке NA4 в ЦЕРН.

К тому времени в ОИЯИ уже существовали общеинститутские подразделения: СНЭО (Серпуховской научно-экспериментальный отдел, обслуживающий установки ОИЯИ в ИФВЭ) и ОНМУ (Отдел новых методов ускорений, разрабатывавший и создававший системы УНК и других ускорителей). Кроме того, была подготовлена Комплексная программа исследований на период 1991–1995 годов и развития



Института до 2000 года, предусматривающая дальнейшее расширение исследований по физике частиц на внешних ускорителях.

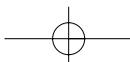
В истории создания ЛФЧ решения 62-й сессии Ученого совета ОИЯИ от 5 июня 1987 года занимают особое место. Практически они определили цели, задачи, сроки и форму создания новой лаборатории. На этой сессии директор ОИЯИ академик Н.Н.Боголюбов выступил с докладом о подготовке Комплексной программы исследований и развития ОИЯИ на период до 2000 года и о мероприятиях по совершенствованию структуры ОИЯИ. Комплексная программа на 1988–2000 годы, разработанная с учетом основных целей ОИЯИ и достигнутого уровня исследований, проводимых в Дубне и других центрах в области физики элементарных частиц, предусматривала участие в экспериментальных исследованиях, нацеленных на:

- проверку предсказаний теории электрослабых и сильных взаимодействий в рамках Стандартной Модели (СМ) и выхода за ее пределы;
- изучение структуры связанных состояний кварков и спиновых эффектов;
- изучение свойств промежуточных бозонов;
- изучение структуры адронов.

Эти эксперименты планировалось проводить главным образом на протонном синхротроне ИФВЭ У-70 с помощью действующих и создававшихся установок ОИЯИ: ГИПЕРОН, ЧАРМ, ДИМЕЗОАТОМ, СИГМА-АЯКС, МДС, СВД, НЕЙТРИННЫЙ ДЕТЕКТОР, МЕЧЕННЫЕ НЕЙТРИНО, а также на проектировавшемся в ИФВЭ Ускорительно-накопительном комплексе (УНК) встречных протон-протонных пучков на энергию 3×3 ТэВ. Для УНК с участием ОИЯИ разрабатывались установки ПАРУС-НЕПТУН, МАРС-4, ГЛЮОН, НЕЙТРИННАЯ ПРОГРАММА и УКД. Планировалось также продолжить сотрудничество с ЦЕРН, участвуя в эксперименте ДЕЛФИ на встречных электрон-позитронных пучках LEP, а также в экспериментах на SPS. Установки, предназначенные для работы при сверхвысоких энергиях, требовали развития техники и методики регистрации частиц. В частности, планировались работы по следующим направлениям:

- создание прецизионных вершинных детекторов;
- разработка технологии массового производства многопроволочных газовых детекторов;
- разработка калориметров с высокой грануляцией и высокой радиационной стойкостью;
- разработка мюонных детекторов большой площади;
- разработка и создание электроники.

Комплексная программа включала в себя также участие ОИЯИ в сооружении отдельных узлов УНК и других ускорителей на сверхвысокие энергии. Расширение программы исследований ОИЯИ в области физики частиц при высоких энергиях на ускорителях других центров, с которыми у Института уже было многолетнее взаимовыгодное сотрудничество, в первую очередь с ИФВЭ и ЦЕРН, требовало совершенствования деятельности и пересмотра структуры ОИЯИ. В Комплексной программе было записано: «Подготовка и проведение экспериментов на УНК потребует больших средств и объединения усилий многих специалистов. В целях концентрации



усилий в этом направлении для наиболее рациональной организации работ ставится задача образования единого подразделения по физике высоких и сверхвысоких энергий, в которое войдут заинтересованные коллективы из ЛЯП, ЛВЭ, ЛВТА, ОНМУ, СНЭО, а также математики и физики-теоретики». Таким образом, вопрос о создании новой лаборатории в ОИЯИ был поставлен в связи с планами расширения исследований по физике частиц.

Специальная комиссия Ученого совета, итоги деятельности которой также были представлены на 62-й сессии, рекомендовала дирекции ОИЯИ приступить к проведению следующих организационных мероприятий:

- преобразование ОНМУ в централизованный научно-методический отдел для разработки детекторов и узлов УНК (июль 1987);
- образование Лаборатории экспериментов на УНК (март 1988);
- завершение формирования Лаборатории экспериментов на УНК (июнь 1989).

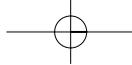
Название новой лаборатории еще не было определено, и пока условно она упоминалась как Лаборатория экспериментов на УНК.

По докладу Н.Н.Боголюбова Совет постановил одобрить проделанную работу по подготовке Комплексной программы. Эксперты из числа ведущих стран-участниц и членов Ученого совета приступили к доработке Программы и рекомендаций по совершенствованию структуры ОИЯИ, чтобы представить эти материалы на утверждение 63-й сессии Ученого совета и очередного совещания Комитета полномочных представителей ОИЯИ. В приказе, выпущенном 26 октября 1987 года, для реализации рекомендаций предписывалось:

- преобразовать ОНМУ в Общеинститутское научно-методическое отделение (ОНМО) по физике высоких энергий, имея в виду его последующее включение в новую Лабораторию сверхвысоких энергий;
- в ОНМО на базе отдела ядерной физики создать научно-методический отдел;
- объединить малочисленные ускорительные подразделения ОНМО в отдел систем УНК.

Программа работ по системам УНК (система подавления поперечных колебаний пучка, системы измерения тока и частот бетатронных колебаний пучка, прецизионного эталонного измерения тока для магнитометрического стенда ИФВЭ) была предложена в письме научного руководителя ИФВЭ академика А.А.Логунова от 24 сентября 1987 года. Реализация рекомендаций Комиссии в части создания новой лаборатории растянулась на более длительные сроки, чем это намечалось вначале.

На 63-й сессии Ученого совета ОИЯИ 12–14 января 1988 года директор ОИЯИ академик Н.Н.Боголюбов представил доклад о проекте Комплексной программы развития ОИЯИ до 2000 года и мероприятиях по совершенствованию структуры Института. В дискуссии по этому докладу выступили практически все члены Ученого совета. Большинство из них: В.Г.Кадышевский, В.П.Джелепов, Г.Н.Флёров, Ч.Шимане, Н.Содном, Р.Сосновский, Х.Христов, Д.Киш, Нгуен Ван Хьеу, И.М.Франк, М.Г.Мещеряков – поддержали эти документы. Однако были и возражения. Делегация ГДР (К.Ланиус) считала, что в Комплексной программе недостаточно четко изложена идея концентрации усилий на наиболее важных научных направлениях и в



связи с этим решение по новой лаборатории кажется преждевременным. Это мнение разделила и делегация Румынии (А.Беринде). В некоторых выступлениях отмечалось, что новая лаборатория нужна, но ее надо формировать без ущерба для других направлений. На это Г.Н.Флёров заметил, что без ущерба нельзя, как «нельзя поджарить яичницу, не разбив яйца». Р.Сосновски отметил, что если одобряется Комплексная программа, предусматривающая расширение работ по физике частиц на внешних ускорителях, то новая лаборатория нужна для эффективной организации этих работ. Совет одобрил проект и в Заключении и отдельно записал:

«Одобрить предложение по созданию новой Лаборатории сверхвысоких энергий. Поручить дирекции ОИЯИ приступить к ее формированию, оставаясь в рамках фонда заработной платы, обусловленного бюджетом Института. Просить страны-участницы дать предложения по кандидатурам на посты директора и заместителей директора этой лаборатории».

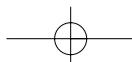
Состав первой дирекции вновь созданной лаборатории:
директор — д.ф.-м.н., профессор Савин И.А. (назначен 09.12.1988 г.);
заместители директора по науке:

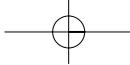
доктор Прокеш А., начальник отделения экспериментальной физики,
д.ф.-м.н. Голутвин И.А., начальник методического отделения,
д.ф.-м.н. Саранцев В.П., начальник отделения ускорителей;
заместитель директора по общим вопросам — Мельниченко И.М.;
главный инженер — Калагин В.Д.;
ученый секретарь — к.ф.-м.н. Шафранова М.Г.

С самого начала своего создания лаборатория сотрудничала, в основном, с ИФВЭ, ЦЕРН, SSC и BNL по наиболее актуальным проблемам физики, детекторов и ускорителей. Первоначально наиболее широким и активным было сотрудничество с ИФВЭ. Затем (после 1991 г.) оно сузилось из-за прекращения работ по УНК и сокращения финансирования У-70. Впервые в ОИЯИ лабораторией было инициировано сотрудничество с DESY, что сыграло важную роль в становлении новой лаборатории и упрочении ее позиций.

В настоящее время структура ЛФЧ включает в себя два научных отделения, четыре самостоятельных научно-экспериментальных и научно-методических отдела, в том числе Серпуховской научно-экспериментальный отдел, который базируется в Протвино, два самостоятельных научных сектора. Имеется также опытное производство, электротехнический отдел, конструкторское бюро, отдел обслуживания. Штатный состав лаборатории насчитывает 420 сотрудников.

Состав дирекции ЛФЧ в настоящее время:
директор — д.ф.-м.н., профессор Кекелидзе В.Д.;
заместители директора по науке:
д.ф.-м.н. Ледницкий Р.,
д.ф.-м.н., профессор Сапожников М.Г.,
к.ф.-м.н. Потребеников Ю.К.;
заместитель директора по общим вопросам — Мельниченко И.М.;
главный инженер — Петров В.А.;
ученый секретарь — к.ф.-м.н. Нагайцев А.П.





Лаборатория успешно решает свои основные задачи: проведение текущих экспериментов на уже существующих установках, подготовка новых экспериментов, разработка соответствующих приборов и развитие методик измерений характеристик частиц и их взаимодействий, разработка методов и систем ускорения частиц до высоких энергий. Работы по этим направлениям, рассчитанные на длительную перспективу, опираются на сотрудничество с такими ведущими научными центрами, как ЦЕРН, DESY, ИФВЭ (Протвино), BNL, Подземная лаборатория в Гран-Сассо – INFN.

Полное число проектов, выполняемых лабораторией или с участием сотрудников лаборатории, – 22. Среди них 14 – это эксперименты по физике частиц и ядерной физике: CMS, ATLAS, NA48, COMPASS, HERMES, H1, HERA-B, STAR, NIS, EXCHARM, BOREXINO, ТЕРМАЛИЗАЦИЯ, СИНГЛЕТ, ДЕЛЬТА-СИГМА. Пять проектов – это создание систем ускорителей LHC, TESLA, CLIC, IREN и др., два проекта по прикладным исследованиям и один – по развитию информационных технологий.

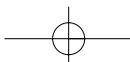
Деятельность лаборатории в основном развивается в рамках международного научно-технического сотрудничества. Программа исследований строится при учете интересов стран-участниц Института. Используя инфраструктуру и ресурсы ОИЯИ и ЛФЧ, они могут участвовать в крупных проектах с оптимальным и эффективным вложением своих сил. Лаборатория концентрирует усилия на наиболее актуальных направлениях и поддерживает проекты, решающие наиболее фундаментальные проблемы. Лаборатория выполняет НИР и участвует в создании наиболее перспективных детекторов и ускорительных систем и технологий, где у нее есть опыт и общепризнанный международный авторитет. Результаты, достигнутые лабораторией, широко известны и высоко оценены международным научным сообществом.

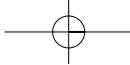
2. Основные результаты исследований по физике частиц

Международное сотрудничество через ОИЯИ с ИФВЭ (Протвино) ярко проявилось в экспериментах МИС, ЭКСЧАРМ и КМН на ускорителе У-70. В настоящее время на ускорителе У-70 ведутся работы по проекту ТЕРМАЛИЗАЦИЯ.

Проект МИС (руководитель А.А.Тяпкин)

По предложению польских физиков во главе с профессором Р.Сосновским в ОИЯИ под руководством профессора А.А.Тяпкина в 1973 году был создан высокоточный пьезометровый магнитный искровой спектрометр (МИС–ОИЯИ) для проведения экспериментов на ускорителе У-70. В то время это была самая крупная установка ОИЯИ в ИФВЭ. С помощью установки МИС–ОИЯИ на пучках пионов и каонов с импульсом 25 и 40 ГэВ изучалось когерентное образование пионов и каонов на ядрах и выяснялось существование бозонных резонансов. Этот эксперимент выполнялся как пятый совместный эксперимент по плану сотрудничества ГКИАЭ СССР и ЦЕРН. Следует подчеркнуть, что это был первый совместный эксперимент ОИЯИ–ЦЕРН и выполнялся он на советском ускорителе. В этом эксперименте принимали участие ученые из Вены, Братиславы, Болоньи, Варшавы, Дубны, Милана и Хельсинки.



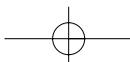


На установке МИС был получен обширный экспериментальный материал для исследования когерентного образования бозонных систем на ядрах и других интересных процессов. Важным методическим достижением явилось использование так называемой «живой» кремниевой мишени для измерения энергии ядер отдачи, а также впервые в мире — многопроволочных пропорциональных камер для выработки триггера по множественности для искровых камер. Проведенный парциально-волновой анализ данных по когерентному образованию трехпионных систем позволил доказать резонансную природу A_1 - и A_3 -мезонов, а также открыть два новых радиально-возбужденных состояния пиона. Одно из этих состояний с массой (1240 ± 30) МэВ и шириной (360 ± 120) МэВ было подтверждено спустя два года в эксперименте, выполненном при энергии 200 ГэВ на тэватроне в Батавии, а второе — с массой (1770 ± 30) МэВ и шириной (310 ± 50) МэВ — через 11 лет в другом эксперименте в ИФВЭ. Эти состояния, интерпретируемые как радиальные возбуждения пиона, напрямую свидетельствуют о его кварковой структуре. Несколько лет тому назад при анализе трехпионных событий в интервале масс 600–900 МэВ было получено указание на существование еще одного возбужденного состояния пиона с массой 750 МэВ. В настоящее время проводится анализ на существенно большем количестве трехпионных событий, набранных в течение 1984–1990 годов на установке МИС-2. Таким образом, исследованиями на установке МИС-ОИЯИ было обосновано новое направление по изучению спектроскопии радиально-возбужденных систем из легких и странных кварков. Результаты, полученные на МИС, докладывались на многих международных конференциях, в том числе и пяти Рочестерских конференциях, а также опубликованы в 47 научных работах.

Проект ЭКСЧАРМ (руководитель В.Д.Кекелидзе)

Эксперимент ЭКСЧАРМ нацелен на исследование характеристик инклюзивного рождения очарованных и странных частиц и на поиск узких барионных резонансов в нейтрон-нуклонных взаимодействиях на ускорителе У-70 ИФВЭ. С этой целью в Протвино создана специальная экспериментальная зона, включающая в себя канал нейтронов, здание с соответствующей инфраструктурой и установку ЭКСЧАРМ. Работы по эксперименту начаты в 1990 году и проводились международным сотрудничеством: Дубна—Алма-Ата—Бухарест—Минск—Москва—Пловдив—Прага—София—Серпухов—Тбилиси. Эксперимент продолжил исследования, начатые ранее на установках БИС, БИС-2 и ЧАРМ. Первые данные получены в 1992 году. Установка ЭКСЧАРМ предназначена для регистрации событий в переднем конусе, ограниченном, в основном, апертурой магнита. Она включает следующие компоненты:

- магнитный спектрометр, включающий 11 пропорциональных камер (ПК);
- систему идентификации частиц, включающую два пороговых черенковских газовых счетчика;
- триггерную систему, включающую ПК и два годоскопа сцинтилляционных счетчиков;
- систему управления мишенью, позволяющую использовать набор различных мишеней.



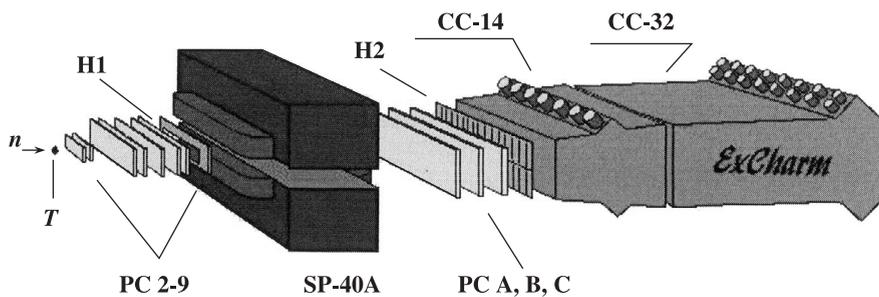


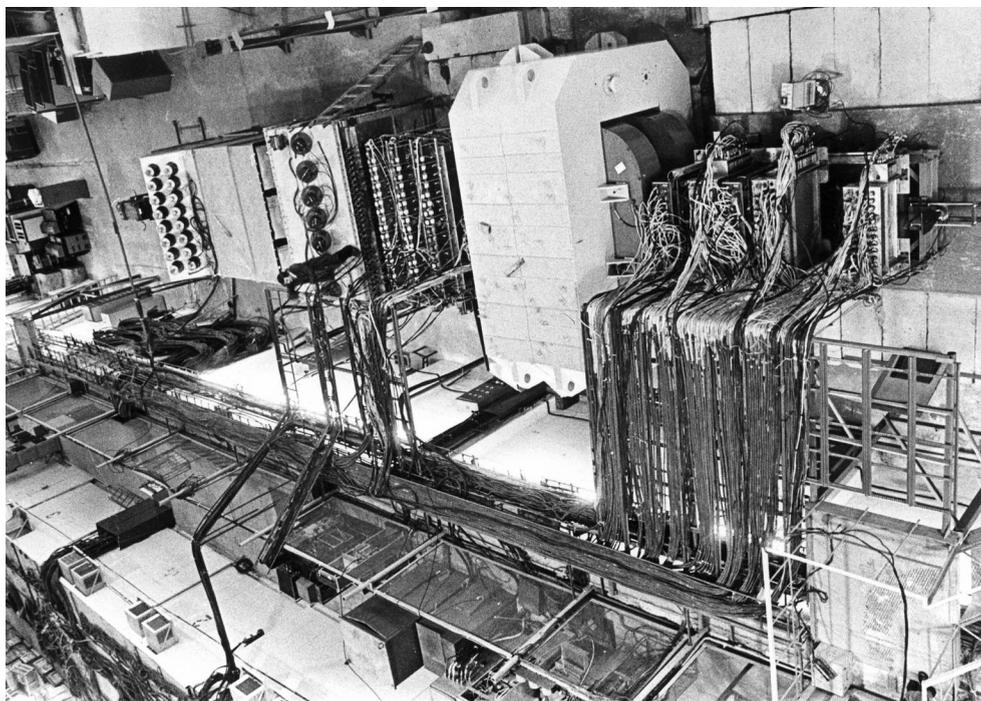
Схема установки EXCHARM:

T — мишень; PC — пропорциональные камеры; CC — черенковские счетчики; H1, H2 — сцинтилляционные годоскопы; SP-40A — спектрометрический магнит

За время экспозиции установки до 1998 года проведено 15 сеансов. Набрано более $6 \cdot 10^8$ событий.

Перечислим коротко полученные физические результаты.

Измерена масса Σ_c^0 и отношение парциальных вероятностей распадов $\Gamma(\Lambda_c^+ \rightarrow p \bar{K}^0 \pi^+ \pi^-) / \Gamma(\Lambda_c^+ \rightarrow \Lambda^0 \pi^+ \pi^+ \pi^-)$, характеристики рождения и распада гиперонов, антигиперонов, странных мезонов, парного и ассоциативного рождения ϕ -мезонов. Измерена поляризация Λ -гиперона, исследованы поляризационные эффекты в рождении странных векторных мезонов, изучены интерференционные корреляции в



Установка ЭКСЧАРМ

парном рождении Λ^0 -гиперонов и бозонов. Определены сечения инклюзивного рождения Ω^- и $\bar{\Omega}^+$.

Продолжаются работы по анализу данных при участии физиков Болгарии, Грузии Казахстана и России. Опыт сотрудничества востребован и развит в экспериментах NA48 и H1. Результаты опубликованы в 38 работах, защищены одна докторская, пять кандидатских диссертаций и более 10 дипломных работ.

Проект КМН (руководитель от ОИЯИ И.А.Савин)

С 1986 по 1996 год специалисты ЛФЧ принимали активное участие в подготовке и проведении экспериментов на Комплексе меченых нейтрино, КМН, в ИФВЭ (Протвино).

Через ОИЯИ в это сотрудничество также вошли болгарские, немецкие и чешские специалисты. Совместно с физиками из Протвино и Цойтена (Германия) специалистами ОИЯИ был внесен определяющий вклад в создание мюонной системы на основе дрейфовых трубок, а также в разработку физической программы исследования каонных распадов с помощью станции мечения КМН. Научную важность этих работ подчеркивает тот факт, что даже после объединения Германии из всех прежних сотрудничеств с ОИЯИ дирекция DESY, куда бывший институт в Цойтене вошел на правах филиала, поддержала участие немецких физиков только в каонном эксперименте на КМН. По результатам, составившим основу предложения по поиску зарядовой CP -асимметрии в каонных распадах, были защищены две кандидатские диссертации, причем одна из них – в Германии. Результаты этих работ неоднократно докладывались на международных конференциях, в том числе на Рочестерской конференции в Варшаве в 1996 году.



Дрейфовые трубки для мюонного спектрометра

Проект ТЕРМАЛИЗАЦИЯ (руководитель от ОИЯИ В.А.Никитин)

Цель эксперимента состоит в исследовании коллективного поведения вторичных частиц, образованных в многочастичном pp -взаимодействии при энергии пучка протонов 70 ГэВ. Предполагается исследовать область высокой множественности $n = 20\div 50$. У порога реакции $pN \rightarrow \pi + 2N$, где $n = 69$, все частицы имеют малый относительный импульс, и в термализованном плотном и холодном адронном газе вследствие многобозонной интерференции может возникнуть ряд коллективных эффектов в поведении вторичных частиц. Так, ожидается увеличение парциального сечения рождения n тождественных частиц по сравнению с общепринятыми экстраполяциями, а также увеличение выхода прямых фотонов в результате тормозного излучения в партонном каскаде и аннигиляции $\pi^+ + \pi^- \rightarrow n\gamma$ в плотном и холодном пионном газе. Кроме того, возможно формирование струй, состоящих из тождественных частиц, и образование многопионного (десять и более пионов) связанного состояния, которое в процессе формирования излучает мягкие фотоны.

В области высокой множественности ($n \geq 30$) большая часть энергии в с.ц.м. материализуется, что ведет к высокой плотности адронной системы. В этих условиях может образоваться пионный конденсат или произойти фазовый переход в кварк-глюонную плазму. Поэтому в эксперименте также планируется поиск сигналов образования кварк-глюонной плазмы: большой перемержаемости частиц в фазовом пространстве, увеличенного выхода прямых фотонов и др.

Физическая программа исследований определяет параметры установки, которая должна детектировать с высокой эффективностью события с множественностью от 20 до 40 заряженных частиц и до 100 фотонов, с нижним порогом регистрации последних около 50 МэВ. Триггерная система отбирает редкие события с указанной большой множественностью, обеспечивая коэффициент подавления событий с низкой множественностью $n < 20$ на уровне 10^4 . Магнитный спектрометр должен иметь разрешение $\Delta p/p$ около 1,5% в интервале импульсов от 0,3 до 5,0 ГэВ/с.

Эксперимент выполняется на действующей в настоящее время на У-70 установке СВД – Спектрометр с вершинным детектором. Она создана для исследования рождения и распада очарованных частиц, но имеет основные компоненты, необходимые для выполнения физической программы проекта «Термализация». Модернизированная установка СВД включает в себя следующие основные элементы: ядерные мишени, жидководородную мишень, вершинный детектор на базе полосковых кремниевых счетчиков, электромагнитный калориметр, пороговый черенковский счетчик, магнитный спектрометр, систему триггера для регистрации редких событий с высокой множественностью.

За период 1999–2003 годов на установке СВД было записано 50×10^6 событий взаимодействия протонов с ядрами C, Si, Cu, Pb. В 2004 году в этих данных в спектре инвариантной массы системы pK_s был найден пик, указывающий на резонанс с массой $1526 \pm 3 \pm 3$ МэВ/ c^2 и шириной не больше, чем 24 МэВ/ c^2 , которые соответствуют θ^+ -бариону с положительной странностью, предсказанному как экзотический барион, состоящий из пяти кварков $uudds$ – пентакварк. Полное сечение образования θ^+ -бариона в pN -взаимодействиях оценено как $30\div 120$ мкб.

Сотрудничество ТЕРМАЛИЗАЦИЯ включает организации НИИЯФ МГУ, ОИЯИ, ИФВЭ, ФИАН, Гомельский университет (Беларусь), Тбилисский университет (Грузия).

Опубликованы пять статей.

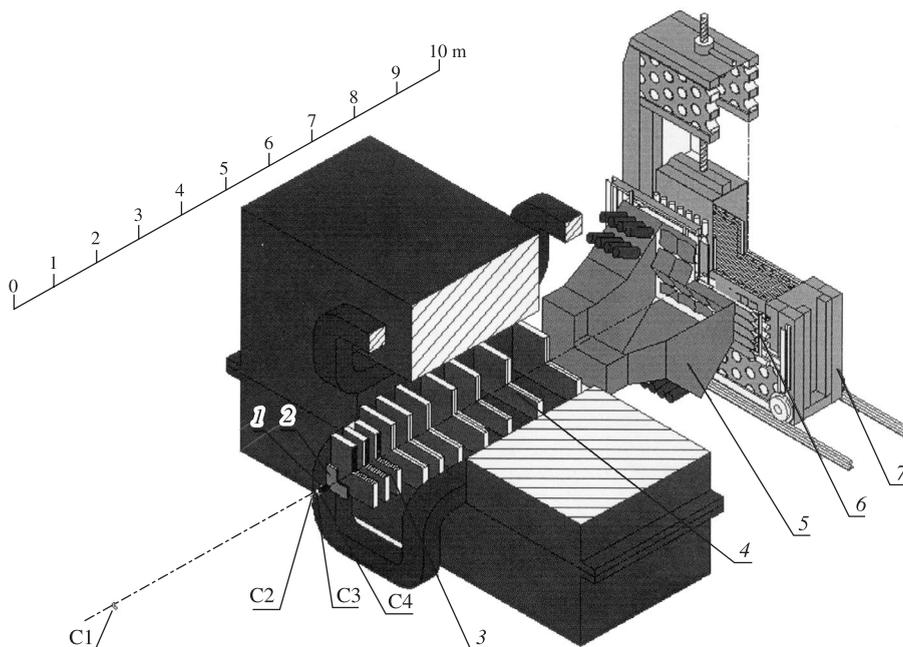


Схема установки СВД на ускорителе У-70:

- C1, C2 — пучковые сцинтилляционные и кремниевые годоскопы;
 C3, C4 — мишенная станция и кремниевый вершинный детектор;
 1, 2, 3 — трекер на дрейфовых трубках; 4 — пропорциональные камеры магнитного спектрометра; 5 — пороговый черенковский счетчик; 6 — сцинтилляционный годоскоп;
 7 — электромагнитный калориметр

Сотрудничество с ЦЕРНом состоит в участии ОИЯИ в экспериментах на ускорителе SPS (NA4, SMC (NA47), WA98, NA48/1, NA48/2, COMPASS) и подготовке новых экспериментальных установок (CMS, ATLAS) на создаваемом коллайдере LHC.

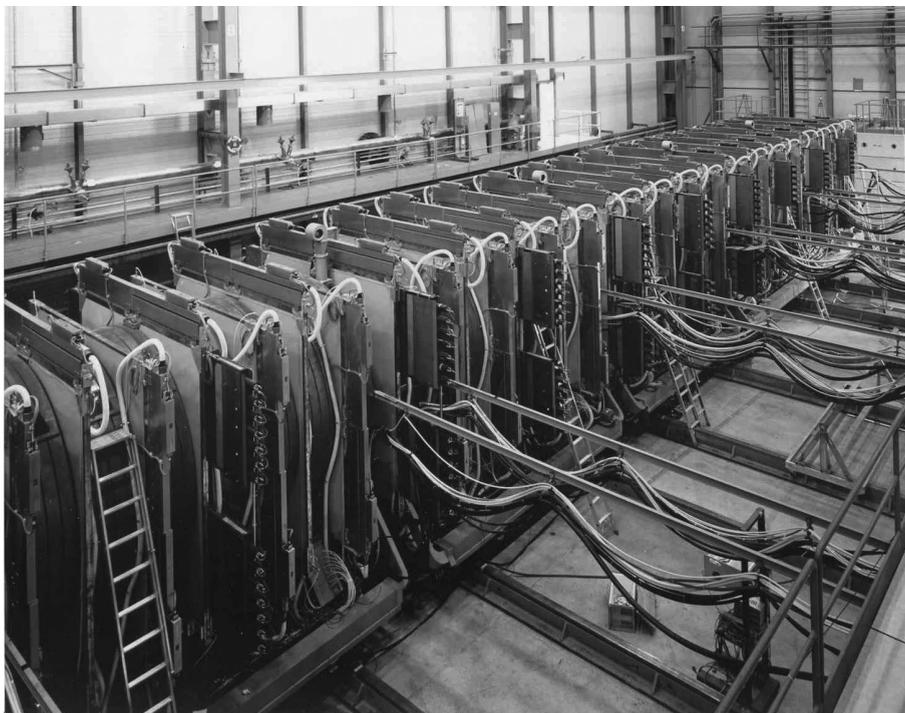
Проект NA4 (руководитель И.А.Савин)

Исследования в области физики глубоконеупругого рассеяния (ГНР) мюонов с целью изучения внутренней кварковой структуры нуклона (протона и нейтрона) являются основой успешного сотрудничества ОИЯИ и ЦЕРН в течение последних 30 лет. Начало этому сотрудничеству было положено в 1974 году, когда Институт был принят в первый совместный крупномасштабный эксперимент NA4 (коллаборация Болонья–ЦЕРН–Дубна–Мюнхен–Сакле) (BCDMS). Со стороны ОИЯИ экспериментом руководили профессора И.А.Савин и И.А.Голутвин. ОИЯИ внес большой вклад в этот эксперимент – в Дубне был изготовлен сердечник 50-метрового магнита и 80 пропорциональных камер размером $1,5 \times 3,0 \text{ м}^2$. Финансовый вклад ОИЯИ составлял 33% от полной стоимости созданной установки.

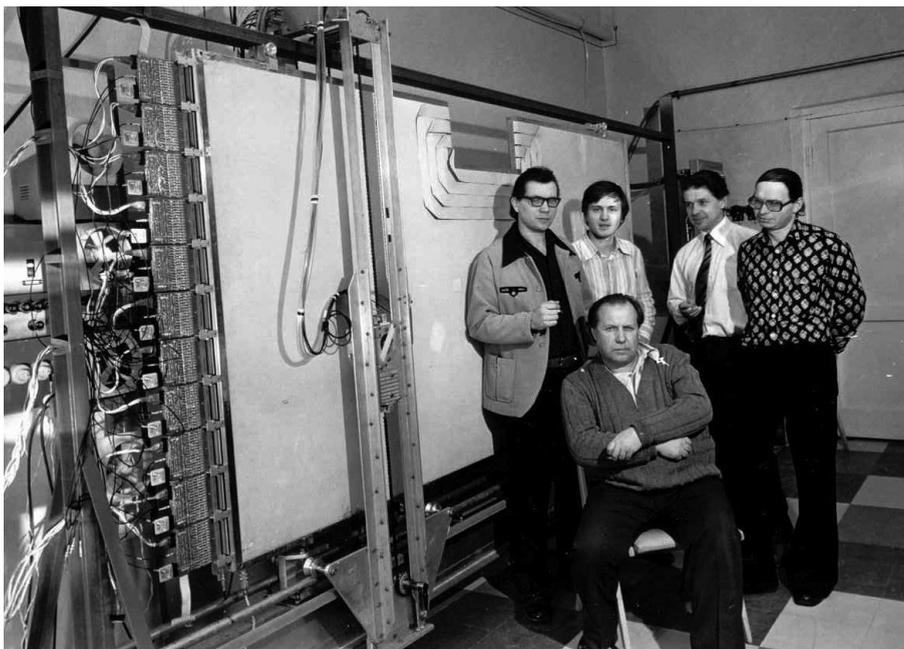
Физическая программа исследований глубоконеупругого рассеяния мюонов и нейтрино стала одним из главных разделов всех экспериментов, которые велись и ве-

дуются в ЦЕРН с 1976 года. Подготовка и проведение эксперимента, включая завершение обработки данных, охватили период с 1976 по 1990 год. Главной задачей эксперимента NA4 было исследование ГНР мюонов в широкой области кинематической переменной Бьеркена x (до $x \geq 1$) и максимально большими значениями квадрата переданного четырехимпульса ($Q^2 \sim 300 \text{ ГэВ}^2$). Огромная длина мишени (40 м) позволила выполнить эти исследования с высокой статистической точностью ($\sim 1,5\%$) на протонной, дейтериевой и углеродной мишенях, а также изучить ядерные эффекты в ГНР и получить уникальные данные по измерению эффектов электрослабой (γ - Z) интерференции в ГНР мюонов на углеродной мишени, которые практически анонсировали существование Z -бозона за два года до прямого открытия этой фундаментальной частицы – переносчика слабого взаимодействия. Следует отметить, что в эксперименты по изучению ядерных эффектов в структурных функциях нуклонов и эффектов электрослабой интерференции в ГНР мюонов сотрудники ОИЯИ внесли определяющий вклад, начиная от разработки физического предложения до получения результатов. Модернизация установки для проведения этих экспериментов – создание переднего мюонного спектрометра для регистрации событий с малыми переданными импульсами – была выполнена также при определяющем вкладе сотрудников ОИЯИ. Координацию этих работ в рамках коллаборации осуществлял профессор И.А.Голутвин.

Полученные в NA4 (BCDMS) эксперименте данные по структурным функциям на протонной, дейтронной и углеродной мишенях стимулировали разработку и созда-



Общий вид мюонного спектрометра установки NA4



Сотрудники научно-методического отделения ЛФЧ — создатели больших пропорциональных камер установки NA4

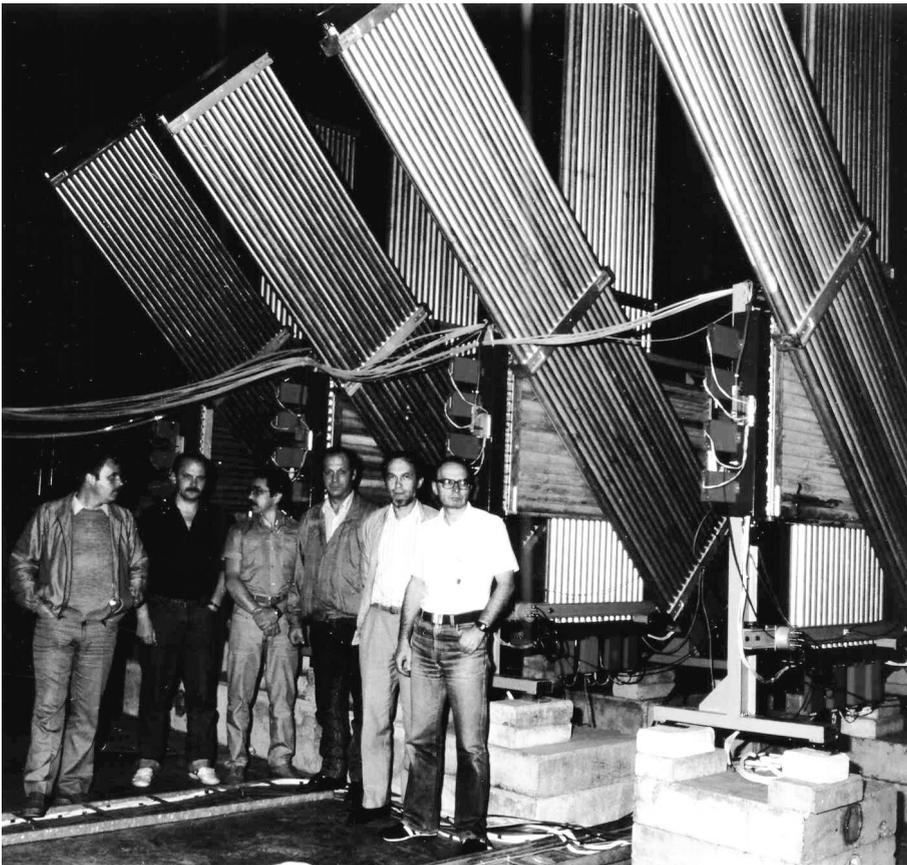
ние программ анализа этих данных с целью проверки квантовой хромодинамики. Анализ этих данных при большом вкладе физиков ОИЯИ позволил выполнить проверку пертурбативной КХД с точностью несколько процентов для эволюции структурных функций и получить значение константы сильных взаимодействий α_s с рекордной точностью. Результаты коллаборации VCDMS вошли в мировую базу данных по физике высоких энергий и имеют один из самых высоких индексов цитирования (к 2002 году число ссылок на публикации с результатами VCDMS достигло 2150). По результатам, полученным VCDMS коллаборацией, в научных изданиях опубликованы 96 работ. Участие ОИЯИ в первом крупномасштабном совместном эксперименте NA4 укрепило научный авторитет Института и открыло дорогу для работ в других международных экспериментах в ЦЕРН, DESY, Fermilab и BNL. Впервые была доказана возможность участия ОИЯИ в международном разделении труда по созданию крупных экспериментальных установок. В результате проведения эксперимента в ОИЯИ было открыто новое научное направление — исследование кварковой структуры нуклона, которое развивается и продолжается до настоящего времени (эксперименты HERMES (DESY) и COMPASS (CERN)). Была разработана передовая технология создания и массового производства современных детекторов; внедрены современные средства обработки экспериментальных данных; разработаны новые теоретические методы.

Работа в эксперименте NA4 стала хорошей школой подготовки научно-технических кадров высшей международной квалификации. Более 80 сотрудников ОИЯИ,

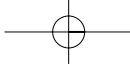
включая 20 из стран-участниц, приобрели опыт работы в крупном международном эксперименте. По материалам и результатам VCDMS было защищено четыре докторских и одна кандидатская диссертации.

Проект NA47 (руководитель И.А.Савин)

Исследования структуры нуклонов, начатые коллаборацией VCDMS в эксперименте NA4, были продолжены физиками ОИЯИ в 1988–1995 годах в рамках другого эксперимента NA47 в составе так называемой Спиновой мюонной коллаборации (SMC). Основная задача этого эксперимента состояла в определении вклада кварков в спин поляризованных нуклонов и проверке фундаментальных правил сумм для зависящих от спина структурных функций нуклонов. Для спектрометра SMC физиками ЛФЧ была создана система дрейфовых камер, перекрывавшая площадь нескольких десятков квадратных метров. Физики ЛФЧ также приняли участие в создании и совершенствовании крупнейшей в мире поляризованной мишени. Начиная с 1991 года, коллаборация SMC регулярно представляла новые результаты на всех крупнейших международных конференциях. В результате было с высокой точностью установлено,



Группа сотрудников ЛФЧ — создателей дрейфовых камер спектрометра SMC



что вклад кварков в спин нуклонов не превышает 20%, нарушаются правила сумм Эллиса-Джаффе для зависящих от спина структурных функций протона и нейтрона, но при этом выполняется правило сумм Бьеркена для разности структурных функций протона и нейтрона. Эти результаты стимулировали постановку других экспериментов в ЦЕРН (COMPASS), в США (Fermilab) и в DESY (HERMES) с целью дальнейшего изучения спиновой структуры нуклонов. В эксперименте NA47 (SMC) приняло участие около 50 сотрудников ОИЯИ из разных стран-участниц. Было опубликовано более 30 научных работ, защищена одна докторская и две кандидатские диссертации.

Проект WA98 (руководитель А.С.Водопьянов)

Задача эксперимента WA98 состояла в исследовании общих свойств взаимодействия ядер свинца при импульсе 158 А·ГэВ/с: поиск сигналов образования кварк-глюонной плазмы, определение параметров центрального файерболла — размера, времени эволюции и температуры, поиск эффектов кирального конденсата.

Группа ЛФЧ участвовала в подготовке и реализации проекта WA98 в период 1994–2002 годов. Эксперимент выполнялся на выведенном пучке ядер свинца на ускорителе SPS в ЦЕРН. В сотрудничество входили 20 организаций из Европы, США, России, Японии. Наиболее активные связи группа ЛФЧ имела с группой Женевского университета. Обязательства группы ЛФЧ состояли в создании сцинтилляционного годоскопа на 500 каналов регистрации времени пролета вторичных частиц. Получена точность измерения времени пролета 120 пс, что является лучшим результатом в данном классе приборов. Годоскоп входил в систему идентификации частиц. Поставленная методическая задача была успешно решена. Группа также участвует в обработке данных и публикации результатов.

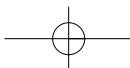
Наиболее важные физические результаты состоят в следующем.

Проверена гипотеза о киральном конденсате, признаками которого являются увеличенный выход нейтральных пионов и увеличенная дисперсия выхода нейтральных и заряженных частиц. Измерен выход нейтральных пионов как функция множественности вторичных частиц. Признаки кирального конденсата не обнаружены. Впервые в ядерных взаимодействиях измерен выход прямых фотонов и наблюдается их парная корреляция, уточнены модели ядерных взаимодействий. Измерены спектры π^+ - и π^- -мезонов и уточнены параметры области файерболла — размер и температура.

По результатам эксперимента опубликованы 22 статьи.

Проекты NA48, NA48/1, NA48/2 (руководитель В.Д.Кекелидзе)

Установка NA48 создана при значительном материальном и творческом вкладе ученых ЛФЧ ОИЯИ на всех этапах подготовки и проведения эксперимента. При этом использованы высокие технологии, иногда недоступные в странах-участницах ЦЕРН. Так, было произведено и поставлено в ЦЕРН около 23 тонн криптона. Объем газа соизмерим с мировым его производством, а качество и чистота не имели аналогов в мире. Для производства этой партии сверхчистого криптона совместно с Научно-исследовательским и конструкторским институтом энерготехники (НИКИЭТ) был построен перерабатывающий завод под Екатеринбургом, основанный на уникальных технологиях. Сотрудники ОИЯИ внесли определяющий вклад в организа-

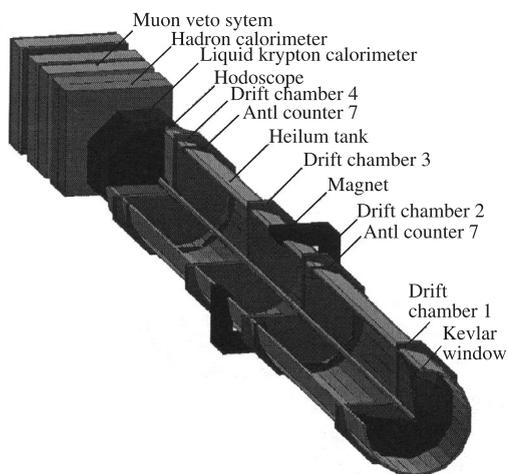
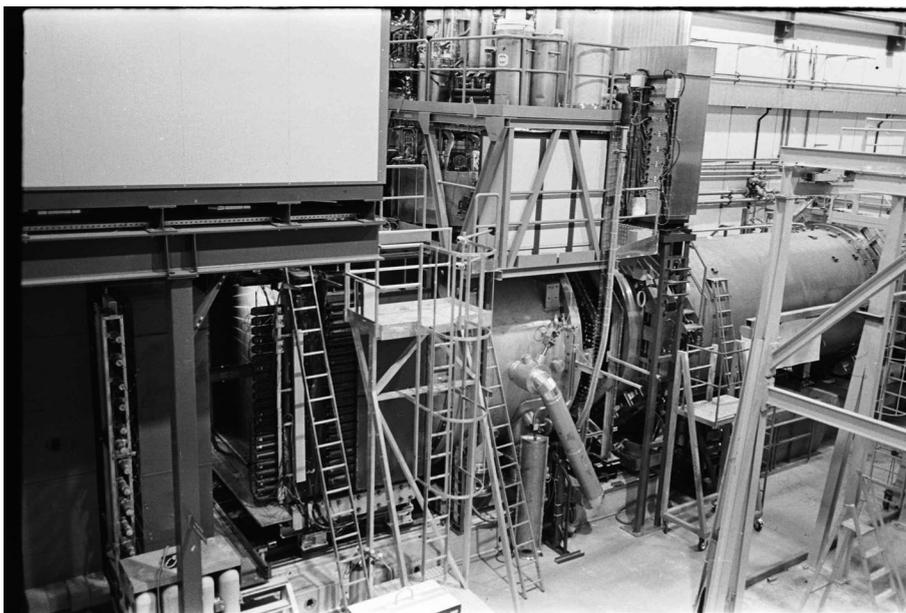


цию строительства этого завода, а также в разработку технологического процесса. Криостат для жидкокриптонового калориметра — одного из главных детекторов эксперимента, также был построен по уникальным технологиям российской космической индустрии на заводе им. Хруничева при полной финансовой поддержке Международного научно-технического центра (МНТЦ). Это был первый проект МНТЦ, нацеленный на поддержку фундаментальной науки, и первый случай выделения средств на поддержку эксперимента в ЦЕРН. Сотрудниками ОИЯИ была разработана и создана быстрая электроника считывания данных с детектора пучка KABES, впервые объединившего принципы TPC-камеры и MICROMEAS по усилению ионизационного сигнала. Это была первая работающая в реальном эксперименте электроника, базирующаяся на микросхемах HPTDC, произведенных по новейшим разработкам ЦЕРН и технологиям фирмы IBM. Таким образом, в ОИЯИ удалось успешно освоить и даже развить высокие электронные технологии.

Серия экспериментов NA48 заслужила репутацию наиболее точных и надежных. Данные о свойствах частиц (PDG) были расширены, исправлены или уточнены их результатами. Такая репутация заслужена не только благодаря уникальным детекторам, но и благодаря участию в эксперименте большого числа молодых талантливых физиков, благодаря эффективным принципам организации работ, когда любой физический результат получался независимо несколькими группами, входящими в сотрудничество, одной из которых была ЛФЧ.

В настоящее время ЛФЧ является одним из ведущих центров анализа данных сотрудничества NA48. Здесь протекает основной творческий процесс получения результатов эксперимента, проводимого на ускорителе ЦЕРН. Преимущества такой научной политики для ОИЯИ очевидны, поскольку привели к развитию в ЛФЧ информационной инфраструктуры (фермы компьютеров, программного и сетевого обеспечения, зала для видеоконференций и др.). Она способствует привлечению в ОИЯИ талантливой молодежи из стран-участниц ОИЯИ, а также повышению уровня научных дискуссий в лаборатории. В эксперименте NA48 участвовало более 50 сотрудников, аспирантов и студентов из России, Болгарии, Грузии и Казахстана.

Основные результаты эксперимента NA48. Обнаружено существование прямого нарушения CP -четности — явления, вытекающего из основополагающих принципов Стандартной Модели. Научная общественность ожидала этого результата более 35 лет, со времени Нобелевского открытия 1964 года, сделанного в Брукхейвене, когда впервые было обнаружено CP -нарушение в распадах нейтральных долгоживущих каонов $K_L \rightarrow \pi^+\pi^-$, которое происходит за счет малой примеси CP -четного состояния в CP -нечетное состояние K_L . Оно характеризуется малым комплексным параметром ϵ , где $Re(\epsilon) = 2,3 \cdot 10^{-3}$. В рамках СМ такое смешивание обусловлено переходом с несохранением странности $\Delta S = 2$. Два поколения (аромата) кварков d, s достаточны для этого процесса. Однако СМ предсказывала также и прямое CP -нарушение, происходящее в слабых распадах с $\Delta S = 1$. Для описания прямого нарушения CP -четности необходимо наличие трех поколений кварков. Оно может проявляться в распадах нейтральных каонов за счет интерференции конечных состояний с различными значениями изоспина и описывается малым комплексным параметром ϵ' . Теоретические расчеты предсказывают значение для отношения $Re(\epsilon'/\epsilon)$ в интервале $0 \div 10 \cdot 10^{-4}$. Экспериментально наблюдаемой величиной, позволяющей измерить параметр



Общий вид установки NA48 в районе жидкокриптонового калориметра и криостат этого калориметра, изготовленный в России

прямого CP -нарушения, является отношение

$$R = \{\Gamma(K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0) / \Gamma(K_S \rightarrow \pi^0 \pi^0)\} / \{\Gamma(K_L \rightarrow \pi^+ \pi^-) / \Gamma(K_S \rightarrow \pi^+ \pi^-)\} = 1 - 6 \operatorname{Re}(\epsilon' / \epsilon).$$

В эксперименте NA48 был реализован новый подход, основанный на измерении величины R путем подсчета событий в каждой из четырех мод распада независимо. При этом большинство систематических погрешностей сокращаются при их вкладе в компоненты отношения R . Итоговым результатом эксперимента является значение $\operatorname{Re}(\epsilon' / \epsilon) = (14,7 \pm 2,2) \cdot 10^{-4}$, которое отличается от нуля на 6,7 стандартных отклоне-



Совещание коллаборации NA48 в Дубне (февраль 1997 г.)

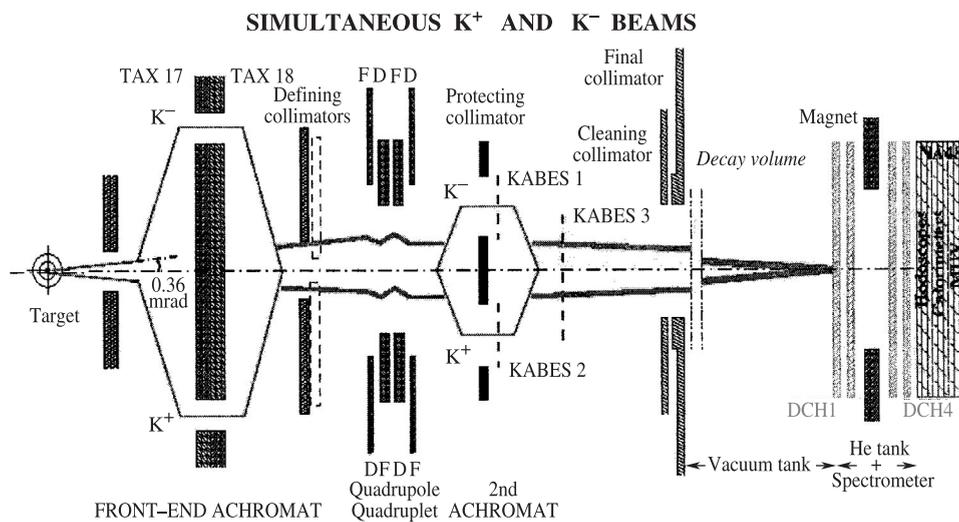


Схема формирования пучков заряженных каонов в эксперименте NA48/2

ний. Тем самым надежно доказано существование в Природе явления прямого CP -нарушения.

Сделанное сотрудничеством NA48 научное открытие вошло в список наиболее ярких событий в истории ЦЕРН. А в 2004 году публикация этого результата в журнале «Physics Letters» была отмечена как самая читаемая экспериментальная работа за всю историю этого престижного журнала.

В экспериментах NA48 и NA48/1 обнаружены также следующие распады каонов и гиперонов:

$$K_S^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- e^+ e^-, K_S^0 \rightarrow \pi^0 e^+ e^-,$$

$$K_S^0 \rightarrow \pi^0 \mu^+ \mu^-, K_S^0 \rightarrow \pi^0 \gamma \gamma,$$

$$K_L^0 \rightarrow \pi^+ / - \mu^- / + \nu \gamma, \Xi^0 \rightarrow \Sigma^+ \mu^- \nu.$$

Выполнена серия работ по точному измерению основных характеристик нейтральных каонов, η -мезона и гиперонов. Значительно улучшена точность измеренных ранее величин — масс и вероятностей распадов каонов. Получен ряд наиболее значимых ограничений на вероятности редких распадов каонов и гиперонов.

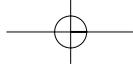
Опубликовано около 30 научных статей, защищены 4 кандидатских диссертации, выполнен ряд дипломных работ.

Проект COMPASS (руководитель И.А.Савин)

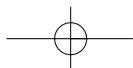
С 1998 года физики ЛФЧ участвуют в эксперименте COMPASS (NA58) по изучению инклюзивных и полунклюзивных процессов в глубоконеупругом рассеянии мюонов на поляризованной мишени. Они внесли определяющий вклад в часть предложения, которая относится к измерениям вклада глюонов в спин нуклона, а также регистрации Λ -гиперонов с целью проверки поляризации странного кваркового моря в нуклоне. Эта проблематика связана с продолжением исследований спиновой структуры нуклонов, начатых сотрудничеством SMC (NA47) в ЦЕРН. Для спектрометра COMPASS физиками ЛФЧ создан адронный калориметр HCAL1, состоящий из 500 модулей и перекрывающий площадь около 10 квадратных метров. В 1998–1999 годах для того же спектрометра группа сотрудников ЛФЧ разработала методику нового трекового координатного детектора на основе тонкостенных дрейфовых трубок..

Проект CMS (руководитель И.А.Голутвин)

Группа сотрудников научно-методического отделения ЛФЧ ОИЯИ принимает участие в проекте CMS с самого начала разработки концепции эксперимента, представленной в марте 1992 года. Успешно завершив научно-методические исследования, сотрудничество CMS, объединяющее около 2000 ученых и инженеров из 36 стран и 152 институтов, с 1997 года приступило к созданию многоцелевого детектора — Компактного мюонного соленоида. Важной составной частью этого объединения является сотрудничество CMS России и стран-участниц ОИЯИ (RDMS), созданное по инициативе ОИЯИ в сентябре 1994 года. Сотрудничество RDMS объединяет, организует и координирует деятельность 284 ученых и специалистов из семи стран и 20 российских институтов и институтов стран-участниц ОИЯИ. В качестве ассоциированных



**Строу-камеры для трека спектрометра COMPASS
в процессе их сборки в ЛФЧ**





Отправка из ЛФЧ в ЦЕРН двух (из 15-ти) строу-камер трекера спектрометра COMPASS

членов участвуют также четыре российские отраслевые организации. В октябре 1995 года в Арзамасе-16 состоялось заседание Комитета по научной политике российской национальной программы по фундаментальной ядерной физике. Комитет определил участие российских лабораторий в проекте LHC как важнейшее направление национальной программы по физике частиц. Создание сотрудничества RDMS позволило привлечь физиков, отраслевую науку и промышленность стран-участниц ОИЯИ к реализации грандиозного проекта XXI века и взять полную ответственность за создание ряда систем комплекса.

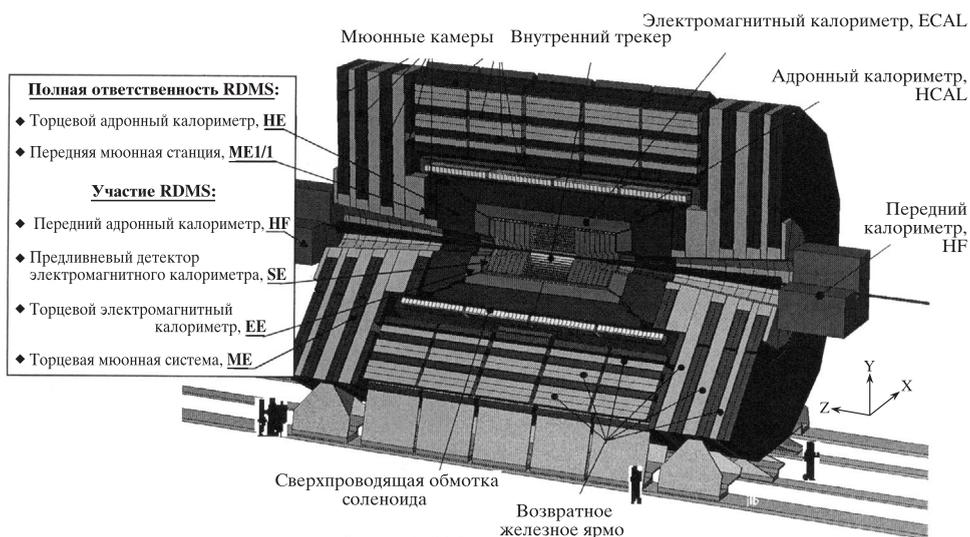
Основные направления деятельности ОИЯИ в рамках RDMS сформулированы в проекте (документ CMS №96-85, 1995) «Изучение фундаментальных свойств материи в протон-протонных и ядро-ядерных взаимодействиях при сверхвысоких энергиях на большом адронном коллайдере в ЦЕРНе. Создание установки CMS». Эта деятельность вылилась в масштабное участие ОИЯИ по разработке, конструированию и созданию торцевых детекторов. ОИЯИ несет ответственность и координирует эти работы. Специалисты ОИЯИ внесли определяющий вклад в систему торцевых адронных калориметров HE, переднюю мюонную станцию ME1/1, торцевой предливневый детектор SE.

ОИЯИ совместно с ИФВЭ (Протвино), НЦ ФЧВЭ (Минск), ХФТИ и Институтом монокристаллов (Харьков), НИКИЭТ (Москва) завершает создание торцевых адронных калориметров (HE). Работа по созданию торцевых адронных калориметров ведется с широким привлечением промышленности стран-участниц. Например, разработка системы подвески торцевых детекторов потребовала от специалистов всех участвующих организаций глубокой инженерной проработки. Было найдено элегантное решение компенсации больших магнитных сил. Специальные усилия были предприняты НИКИЭТ по разработке и поставке материалов с улучшенными прочностными характеристиками. Так, латунь поглотителя выплавлена из артиллерийских гильз. В результате завод «Красный Выборжец» в Санкт-Петербурге поставлял заготовки пластин поглотителя и элементов крепления из специальной латуни. Изготовление секторов поглотителя, элементов интерфейса и предварительная сборка проведены на Минском заводе им. Октябрьской Революции (МЗОР) в Беларуси. Организацию поставок, сопровождение изготовления поглотителя и технический контроль качества на всех этапах обеспечивал НИКИЭТ. Сцинтилляционные тайлы изготовлены в Институте монокристаллов (Харьков) из материалов, поставляемых коллаборацией. Изготовление и сборка оптических элементов (мегатайлов) выполнена в ИФВЭ. Эта работа высоко оценена сотрудничеством CMS: НИКИЭТ и заводу МЗОР в 2003 году присуждены «Золотые призы CMS». Успешно завершена сборка двух торцевых адронных калориметров HE, включая механику и сцинтилляционную оптику, а также начат монтаж электроники считывания и подготовка к запуску калориметров в наземном зале в ЦЕРН.

ОИЯИ и институты Беларуси и Болгарии завершают создание передних мюонных станций (ME1/1) на основе катодно-стриповых газовых камер, предложенных ОИЯИ в 1993 году для торцевой мюонной системы CMS. Камеры для первой торцевой системы поставлены в ЦЕРН. Изготовление камер в Дубне для второй системы завершено в 2003 году.

ОИЯИ и институты Армении и Беларуси участвуют в подпроекте предливневого детектора SE. На основе так называемой кремниевой программы, инициированной ОИЯИ более 10 лет тому назад, в сотрудничестве с Дубной и ЦЕРН в Научно-исследовательском институте материаловедения (Зеленоград) разработана передовая технология изготовления радиационно стойких кремниевых координатных детекторов для предливневого детектора SE. Серийное изготовление кремниевых стриповых детекторов успешно ведется в кооперации с ЭЛМА, Зеленоградом и ЦЕРНом.

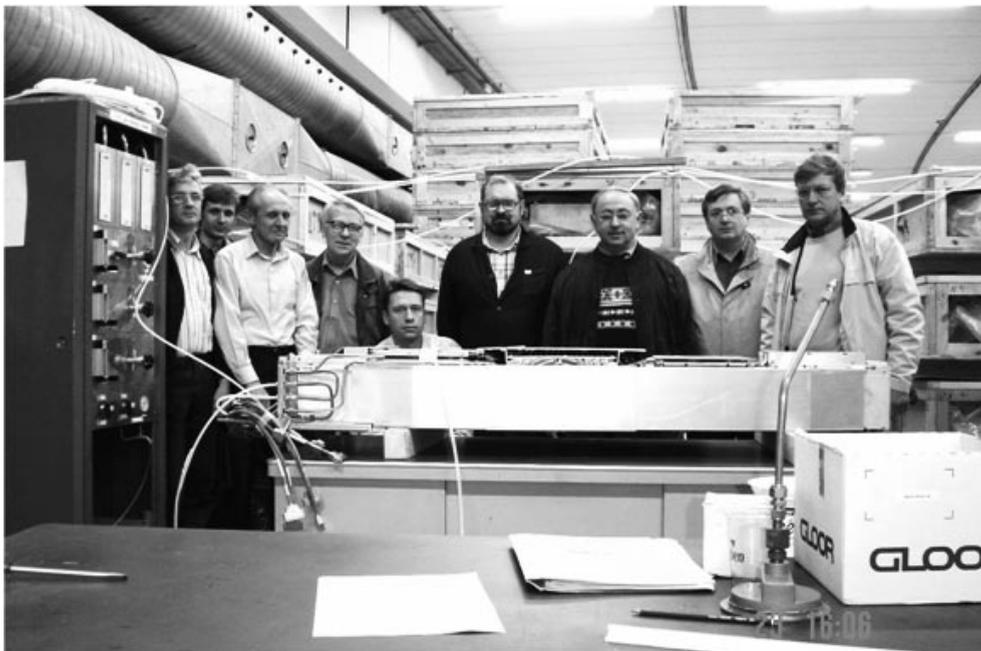
Физики ОИЯИ участвуют также в разработке долговременной программы научных исследований эксперимента CMS после запуска LHC. В 2002 году по инициати-



Общий вид компактного мюонного соленоида — CMS

Общий вес установки — 14 500 т; внешний диаметр — 14,6 м; длина — 21,6 м; магнитное поле соленоида — 4 тесла. В рамке показаны системы, за которые коллаборация CMS России и стран-участниц ОИЯИ несет ответственность

в Дубны было начато систематическое изучение процессов с жесткими мюонами в конечном состоянии (с поперечным импульсом больше 300 ГэВ). Изучение спектра пар мюонов в эксперименте CMS позволит проверить предсказания СМ и структуру электрослабых радиационных поправок при значениях инвариантной массы пары мюонов от 2 до 2,5 ТэВ. Кроме того, моделирование показывает, что установка CMS способна проверить Randall-Sundrum сценарий (RS1) по димюонному каналу на 95%-ном уровне достоверности в течение года работы LHC для диапазона масс гравитона от 2,2 до 5 ТэВ в зависимости от величины константы связи. Представляют также интерес и жесткие мюоны в распадах Z^0 и W (RS2 сценарий или некоммутативные дополнительные измерения). Эти исследования отнесены к задачам первого приоритета в физической программе RDMS CMS. Такой же статус присвоен работам дубненской группы по изучению распадов B -мезонов, для чего в ЛФЧ был создан пакет программ для моделирования рождения и распадов B -мезонов. В работы по B -физике вовлечены специалисты из INFN (Флоренция), Цюрихского университета, ИФВЭ (Протвино), а также ИТФ и ИФВЭ КАН (Пекин, Китай). Кроме того, физическая программа RDMS включает также изучение процессов прямого рождения γ и Z с целью калибровки адронного калориметра по каналам « γ +jet» и « Z +jet», а также моделирование отклика адронного калориметра установки CMS для объединенной системы HE/HF. Дальнейшее развитие получили работы в рамках программы исследований с тяжелыми ионами на установке CMS, где дубненские физики внесли определяющий вклад в изучение глобальных характеристик ультрарелятивистских ядро-ядерных взаимодействий. Была продемонстрирована принципиальная

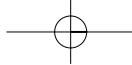


Поставка в ЦЕРН первых 40 камер для торцевой мюонной системы

возможность наблюдения образования кварк-глюонной плазмы для событий центральных взаимодействий легких ядер и нецентральных взаимодействий тяжелых ионов.

Проект ATLAS (руководитель Н.А.Русакович)

Участие ЛФЧ в работах по проекту ATLAS на LHC восходит к 1991 году, когда в составе протосотрудничества ASCOT сотрудники лаборатории начали заниматься расчетами загрузки внутреннего трека и мюонной системы частицами, образовавшимися в протон-протонных взаимодействиях с энергией в системе центра масс 14 ТэВ. После принятия решений Директоратом ЦЕРН о создании LHC и последовавшего вслед за этим объединения групп ASCOT и EAGLE в сотрудничество ATLAS сотрудниками ЛФЧ (руководитель В.В.Кухтин) были подготовлены предложения по участию в создании детектора общего назначения для LHC и определены конкретные обязательства по торцевому жидкоаргоновому адронному калориметру LAr HEC. Период до 2003 года включительно может быть охарактеризован как этап принятия решений по идеологии подсистем, конструирования и отработки технологии производства серийных элементов детекторов, исследования их на пучках частиц, а также сборки детекторов подсистем. В рамках обязательств ОИЯИ по созданию LAr HEC были собраны 24 модуля калориметра из общего количества 132, разработан и изготовлен в серии элемент электроники считывания информации, проведена калибровка 700 датчиков для измерения температуры жидкого аргона в криостатах установки ATLAS. На реакторе ИБР-2 ОИЯИ проведены исследования радиационной стойкости электроники и материалов, используемых в калориметрах и системах считывания



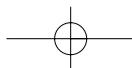
информации, а также на специально созданной уникальной установке изучалось загрязнение жидкого аргона выделениями с поверхности материалов, погруженных в криостат, при облучении образцов интенсивным пучком нейтронов. Кроме того, проводились теоретические расчеты и моделирование процесса одиночного рождения t -кварка в реакции слияния глюона и промежуточного бозона, определены критерии выделения этого процесса из информации, регистрируемой установкой ATLAS. Эти научно-методические работы выполнялись в рамках международной кооперации, в которой заметную роль помимо российских участников играли представители Азербайджана, Грузии, Канады, Германии. Результаты были опубликованы в четырех статьях в реферируемых журналах, а также неоднократно докладывались на международных и национальных конференциях и семинарах.

С начала 1990 годов группа сотрудников ЛФЧ (руководитель В.Д.Пешехонов) совместно с МИФИ (руководитель Б.А.Долгошеин) начала разработку детектора переходного излучения – трекера, на основе которого в дальнейшем расширенное сотрудничество российских институтов приступило к созданию TRT для внутреннего детектора установки ATLAS. В настоящее время в ЛФЧ проводятся работы на последней стадии сборки 34 детекторов для TRT ATLAS. По результатам этих работ подготовлены пять публикаций.

Сотрудничество с DESY состоит в участии ОИЯИ в экспериментах HERMES, H1 и HERA-B.



Первый (из 17-ти) восьмислойный модуль детектора переходного излучения TRT ATLAS тестируется перед отправкой в ЦЕРН



Проект HERMES (руководитель В.Г.Кривохижин)

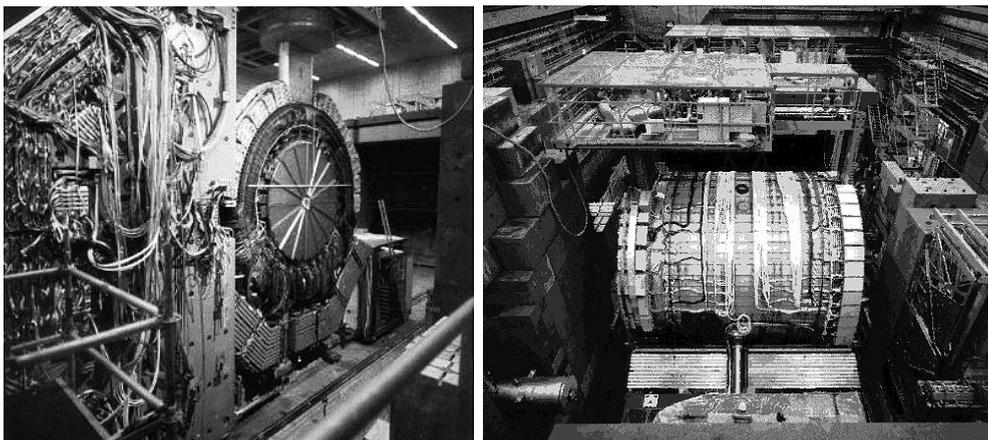
HERMES — один из ведущих экспериментов по изучению спиновой структуры нуклонов. Он выполняется на ускорительном комплексе HERA. В нем участвуют более 200 физиков из 35 институтов, включая ОИЯИ. Главная цель эксперимента — изучение внутренней спиновой структуры нуклонов через измерение асимметрий сечений в инклюзивных, полуинклюзивных и эксклюзивных процессах в реакциях ГНР поляризованных электронов (позитронов) на поляризованных ядерных газовых мишенях (водород, дейтерий и гелий). Первые данные были получены в 1995 году с использованием поляризованной гелий-3 мишени. Получен ряд результатов по спиновой структуре нуклонов, включая измерения азимутальной асимметрии сечений в реакциях полуинклюзивного рождения пионов и спиновой асимметрии в фоторождении адронных пар с большим поперечным импульсом, позволившей оценить поляризацию глюонов в нуклоне. Измерена азимутальная асимметрия в реакции глуконепругого виртуального комптоновского рассеяния.

Дубненской группой был внесен существенный вклад в модернизацию магнитного спектрометра, а также в анализ данных. Примерно двукратное улучшение разрешения спектрометра было получено после включения в 1997 году системы минидрейфовых вершинных камер, разработанных в ЛФЧ и произведенных в ОИЯИ. Одной из основных задач сотрудничества является прецизионное измерение зависимости от бьеркеновской переменной x структурных функций g_1 для протона, дейтрона и нейтрона для уточнения вклада в спин нуклона валентных кварков. В сотрудничестве с коллегами из Минска (Национальный центр физики частиц и высоких энергий при БГУ) и Еревана (ЕрФИ) физиками ЛФЧ был разработан оригинальный метод извлечения спин-зависимых и спин-независимых структурных функций нуклонов. Другим важнейшим результатом сотрудничества, полученным с определяющим участием физиков ЛФЧ, стало измерение Q^2 -зависимости обобщенного интеграла Герасимова–Дрела–Хёрна (ГДХ) для протона и дейтрона. Интеграл ГДХ связывает аномальный вклад в магнитный момент нуклона с интегралом по энергии полных спин-зависимых сечений фотопоглощения. Полученные зависимости не показали существенного отклонения от $1/Q^2$ поведения в измеренном диапазоне по Q^2 и, таким образом, не было обнаружено указания на наличие больших эффектов из-за влияния области нуклонных резонансов или нелидирующих твистов.

Сотрудничество специалистов ЛФЧ с DESY по эксперименту HERMES поддерживалось грантом немецкого министерства BMBF. BMBF выделило грант для разработки дрейфовых камер передней части спектрометра. С участием сотрудников ЛФЧ опубликованы 32 статьи.

Проект H1 (руководитель М.Н.Капишин)

Эксперимент H1 успешно осуществляется на электрон-протонном коллайдере HERA начиная с 1992 года. Выполнены прецизионные измерениями структуры протона в области малых значений переменной Бьеркена x . Исследована структура фотона в рамках КХД-динамики при больших Q^2 . Эксперимент H1 оптимизирован для исследований в области больших Q^2 , где топологию событий легко идентифицировать и наблюдается низкий уровень фона. Увеличение светимости коллайдера HERA в 2002 году и использование накопленного опыта позволили существенно расширить



Виды N1 детектора на ускорителе HERA (DESY, Гамбург)

программу физических исследований, связанных с проверкой СМ. Предусмотренная продольная поляризация пучка электронов и позитронов также является важным инструментом для достижения максимальной чувствительности измерений.

Материальный вклад ОИЯИ в эксперимент включал в себя создание двух станций спектрометра вперед летящих протонов FPS, большой пропорциональной камеры ВРС для регистрации рассеянных электронов и позитронов, а также нового PLUG детектора установки. Сотрудники ОИЯИ внесли значительный вклад в физический анализ процессов ГНР и фоторождения на основе новых статистически обеспеченных экспериментальных данных, полученных после модернизации коллайдера HERA и установки N1 с использованием FPS, ВРС и PLUG детекторов. В частности, была измерена дифракционная структурная функция F_2^D в области $Q^2 < 1 \text{ ГэВ}^2$ для проверки эффектов «насыщения» в переходной области между ГНР ($Q^2 > 0 \text{ ГэВ}^2$) и фоторождением ($Q^2 \sim 0 \text{ ГэВ}^2$), а также в измерении дифракционных инклюзивных сечений процессов фоторождения и фоторождения струй адронов с большим поперечным импульсом для проверки предсказаний КХД. В эксперименте N1 измерены инклюзивные дифференциальные сечения процессов, описываемых нейтральными и заряженными токами, в e^-p и e^+p -взаимодействиях в кинематической области по квадрату переданного импульса $150 \text{ ГэВ}^2 < Q^2 < 30000 \text{ ГэВ}^2$ и $0,0032 < x < 0,65$. С использованием модернизированной экспериментальной установки N1 на модернизированном коллайдере HERA планируется получить новые данные по измерению глубоконеупругих процессов в области очень больших Q^2 , по исследованию структуры протона и фотона в процессах рождения струй адронов с большими P_T , структуры поперона в дифракционных процессах, по поиску лепто-кварковых состояний вне пределов СМ.

Участие сотрудников ЛФЧ в коллаборации N1 на протяжении всех лет поддерживается грантом немецкого министерства ВМБФ. Результаты, полученные в эксперименте N1, доложены учеными из ОИЯИ на четырех международных конференциях

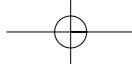
по физике высоких энергий. По результатам выполненных исследований опубликованы 55 научных работ, защищена кандидатская диссертация.

Проект HERA-B (руководители И.А.Голутвин и Ю.Т.Кирюшин)

В 1994 году в DESY начали создавать экспериментальную установку HERA-B для изучения взаимодействия протонов с ядрами проволочной мишени, помещенной в гало протонного пучка ускорительно-накопительного кольца HERA. В создание детектора, подготовку и проведение эксперимента внесли вклад более 33 организаций из 14 стран, включая ОИЯИ. Сотрудники ЛФЧ ОИЯИ внесли большой вклад в производство модулей внешнего трекера детектора HERA-B. С этой целью в Дубне была создана линия массового производства модулей из материалов и комплектующих, поставляемых DESY, Германия. Массовое производство дрейфовых камер велось одновременно в Дубне, Гамбурге, Цойтене и Пекине. Программа массового производства полностью выполнена в сентябре 1999 года. В целом произведено и доставлено из Дубны в DESY около 300 модулей. Указанное количество модулей соответствует почти 40000 каналам регистрации, что составляет 30% от полного числа каналов внешнего трекера. Дубненская группа внесла также определяющий вклад в подготовку и монтаж внешнего трекера, проверку и наладку его суперслоев непосредственно в DESY. Физики ЛФЧ активно участвовали в развитии программного обеспечения и моделировании установки HERA-B. После завершения в конце 1999 года монтажа суперслоев внешнего трекера физики Дубны, занятые в этих работах, сконцентрировали свои усилия на участии в проведении экспериментов и анализе данных.



Линия массового производства дрейфовых камер внешнего трекера установки HERA-B



Физическая программа эксперимента HERA-B на период набора данных в 2002–2003 годах была сконцентрирована на измерении сечения $b\bar{b}$ -рождения в протон-ядерных взаимодействиях при энергии протонов 920 ГэВ и изучении подавления рождения различных состояний чармония, включая J/ψ , ψ' и χ_c . Другими направлениями исследований являются: A -зависимость рождения открытого очарования, V_s -смешивание, рождение пар Дрела–Яна, рождение жестких фотонов, спектроскопия чармония, асимметрии в рождении прелестных, очарованных и странных частиц. Анализ данных планируется завершить до конца 2005 года.

На протяжении всех лет сотрудничество специалистов ЛФЧ с DESY поддерживалось грантом немецкого министерства BMBF. В 2000 году BMBF выделило специальный грант для приобретения вычислительной техники, которая была интегрирована в компьютерную ферму ЛФЧ–ЛВЭ. По результатам, полученным с участием сотрудников ЛФЧ, защищены пять дипломных работ и сделаны 18 научных публикаций.

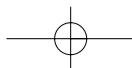
Проект STAR (руководитель Р.Я.Зулькарнеев)

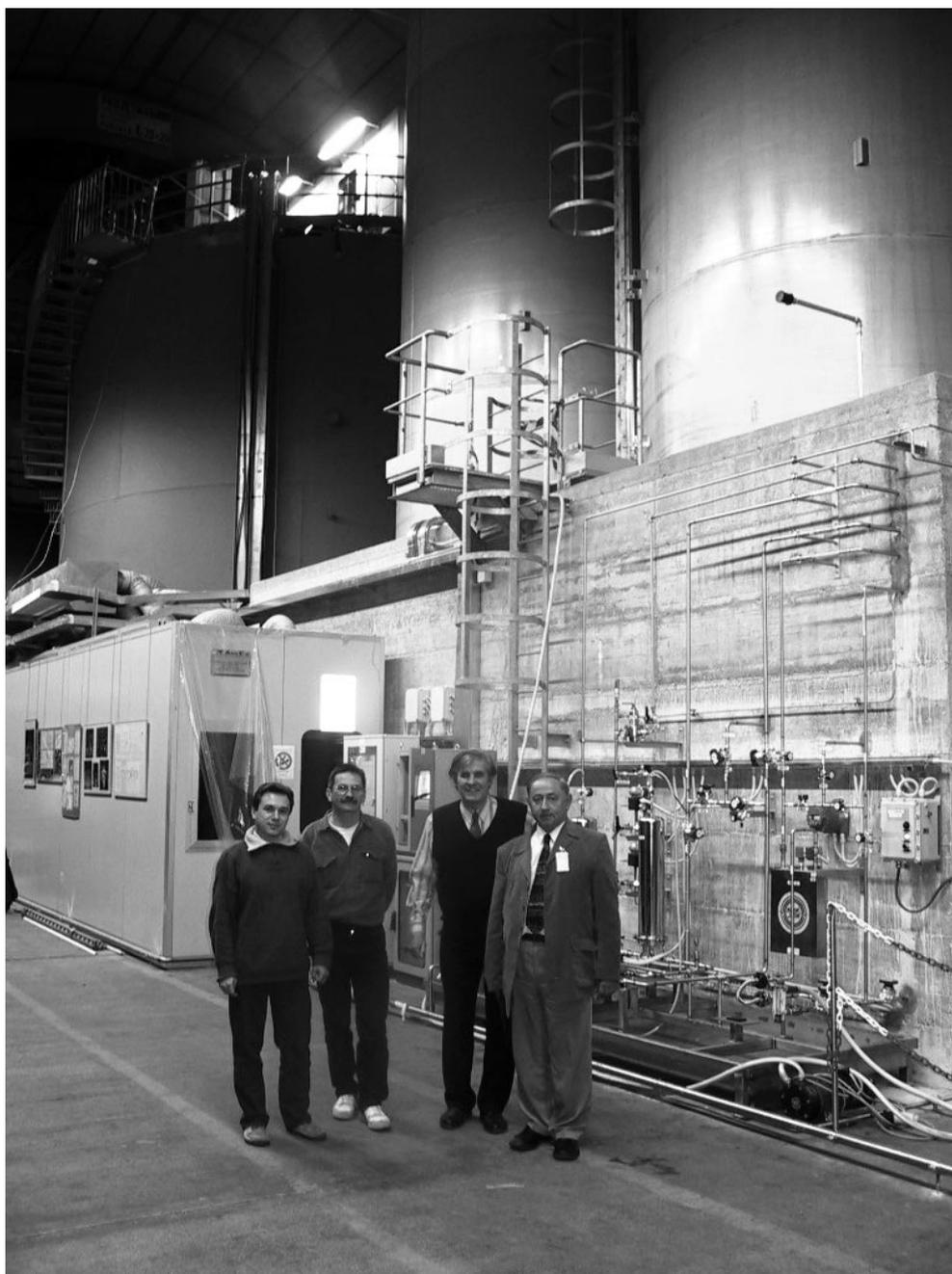
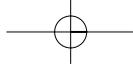
Лаборатория физики частиц с 1999 года участвует в работах по созданию электромагнитного калориметра детектора STAR для экспериментов на ядерных и поляризованных пучках протонов коллайдера RHIC в BNL (США).

Цель проекта STAR – выполнить детальную и широкую программу исследований свойств ядерной материи, находящейся в экстремально сжатом и нагретом состояниях, и провести поиск сигналов образования кварк-глюонной плазмы при соударениях тяжелых ионов. Важной задачей является также осуществление широкой программы поляризационных исследований. Осуществление проекта STAR основывается на самых новейших достижениях техники ускорения поляризованных пучков протонов и тяжелых ядер. В реализации проекта участвуют 538 физиков из более чем 50 университетов и 12 стран мира.

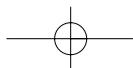
Физики ЛФЧ с 1999 года участвуют в создании цилиндрического электромагнитного калориметра (ВЕМС), который является важной частью 4 π -детектора STAR. Калориметр играет доминирующую роль при выполнении программы поляризационных экспериментов. Он также существенно расширяет возможности детектора при поисках сигналов кварк-глюонной плазмы. Прибор позволяет идентифицировать и измерять энергию электронов и гамма-квантов в области выше 0,5 ГэВ и регистрировать процессы образования нейтральных частиц (π , ϕ , J/ψ , W , Z и пр.). Группа ЛФЧ тесно взаимодействует с BNL и тремя другими группами из университетов Детройта, Лос-Анджелеса и Мичигана (США), принимающими участие в создании ВЕМС. ЛФЧ выполняла работы на всех этапах создания ВЕМС, начиная с проектирования отдельных узлов калориметра до участия в изготовлении, наладке и запуске всего комплекса в 2004–2005 годах на пучке RHIC.

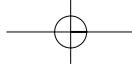
Группа ЛФЧ также участвует в создании программного обеспечения и моделировании электромагнитного калориметра с целью разработки методики идентификации частиц, проведения калибровки и изучения ливневых характеристик детектора. Физики ЛФЧ совместно с коллегами из BNL и университетов Детройта и Сан-Паулу (Бразилия) исследуют образование мягких и жестких прямых фотонов, а также $c\bar{c}$ - и $b\bar{b}$ -систем, как потенциальные инструменты для поиска сигналов образования кварк-глюонной плазмы в (Au-Au)-соударениях на RHIC.





Полным ходом идет сооружение детектора BOREXINO
в Национальной лаборатории Италии в Гран-Сассо





Проект STAR вместе с экспериментами COMPASS и HERMES продолжает традицию ЛФЧ по изучению спиновой структуры нуклона, начатую еще в конце 80-х годов прошлого столетия сотрудничеством SMC в ЦЕРН. Одна из главных целей этого проекта – осуществление широкой программы поляризационных исследований, необходимых для разрешения проблемы «спинового кризиса», а также изучение возможного проявления эффектов, выходящих за рамки СМ. Усилия физиков ЛФЧ концентрируются на задаче измерения спиновой структурной функции глюона в протоне, проблеме определения поляризаций морских и валентных кварков и изучении зависимости этой поляризации от аромата конstituэнтов в протоне. Для выполнения указанных задач STAR планирует постановку нового поколения поляризационных экспериментов по измерению спиновых асимметрий в процессах рождения векторных бозонов и лептонных пар в соударениях продольно- и поперечно-поляризованных пучков протонов на RHIC.

Группа сотрудников ЛФЧ являются соавторами около 30 работ, опубликованных в Phys. Rev. Lett., Phys. Rev. и трудах конференций QM-2000, 2001, 2002, 2003, 2004 и др. изданиях.

Проект БОРЕКСИНО (руководитель О.А.Займидорога)

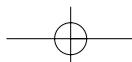
Проект БОРЕКСИНО посвящен измерению потока солнечных нейтрино и исследованию явления осцилляций нейтрино с помощью низкофонового калориметрического детектора с жидким сцинтиллятором. Установка создается в Италии в подземной Национальной лаборатории Гран-Сассо. Группа ОИЯИ внесла большой вклад в создание прототипа детектора, в анализ данных и получение первых физических результатов. Фоновые измерения привели к ряду интересных результатов. Получено ограничение на величину магнитного момента солнечных нейтрино, ограничение на время жизни гипотетического тяжелого нейтрино с массой $m_{\nu_H} \geq 2m_e$ и каналом распада $\nu_H \rightarrow \nu_L + e^+ + e^-$. Выполнен поиск эффектов нестабильности электрона по каналу распада электрона в гамма-квант и нейтрино, а также эффектов нестабильности связанных в ядре нуклонов и возможных их распадов в невидимые состояния.

Опубликовано более 30 работ.

Проект НИС (руководители О.А.Строковский и А.Г.Литвиненко)

Проект нацелен на поиск проявлений поляризации странных кварков и антикварков в нуклонах. Проект мотивирован неожиданными результатами, касающимися роли странных кварков в нуклонах. Интуитивно казалось, что $s\bar{s}$ пары в нуклонах несущественны, поскольку они находятся в море нуклона и не влияют на его квантовые числа. Однако экспериментальные результаты по $p\bar{p}$ аннигиляции в покое, полученные на кольце LEAR, привели к необходимости рассмотреть модель нуклона с волновой функцией, содержащей отрицательно поляризованные $s\bar{s}$ пары (модель Эллиса–Карлинера–Харзеева–Сапожникова). Привлекательная особенность модели поляризованной скрытой странности нуклонов состоит в том, что она одновременно дает основу для естественного объяснения «спинового кризиса».

Проект НИС предполагает исследовать рождение ϕ - и ω -мезонов в $p\bar{p}$ -взаимодействиях при энергии пучка, близкой к порогу рождения этих частиц. Превышение над порогом должно составлять $30 \div 100$ МэВ. Сечение рождения ϕ -мезона в $p\bar{p}$ -взаимо-



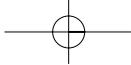


Визит в ЛФЧ Генерального директора ЦЕРНа Робера Эмара (16 апреля 2004 г.)

действию у порога измерено только в одной точке (эксперимент DISTO на ускорителе SATURN-II, Франция). После составления проекта НИС в том же году был предложен аналогичный опыт для установки ANKE (COSY, Германия). Энергетический интервал измерений по проекту НИС заполняет (с перекрытием) «щель» между планируемыми в COSY измерениями и данными DISTO. Такие измерения в настоящее время возможны только на нуклотроне ОИЯИ, который предоставляет широкие возможности для исследований явлений вблизи порога и ниже его при достаточно большом переданном 4-импульсе (порядка 1 ГэВ/с).

В настоящее время создание установки ведется объединенными усилиями ЛФЧ и ЛВЭ с участием физиков ЛИТ, ЛТФ и стран-участниц ОИЯИ: России, Грузии, Армении. Эксперимент выполняется на базе установки СФЕРА (ЛВЭ ОИЯИ). Используются ее магнит, система сбора данных, логическая электроника, пучковые мониторы. Пропорциональные камеры размером $2 \times 1 \text{ м}^2$ и их электроника доставлены из Протвино после демонтажа установки ЭКСЧАРМ. Ведется наладка камер на стенде, изготавливается система идентификации частиц.

Спектрометр НИС также может быть использован для проведения других экспериментов, в первую очередь для исследования легких гиперядер и процессов с перезарядкой легких ядер. Рассматривается возможность исследования рождения векторных мезонов ρ , ω , ϕ -протонами и дейтронами в ядерной среде, чтобы получить ответ на давний вопрос о возможности изменения свойств элементарных частиц в ядерной среде. Например, известно, что возбуждение Δ -изобары в ядрах сильно модифицируется влиянием среды. Изучение этой проблемы для векторных мезонов только начи-



нается. Здесь может оказаться решающим использование пучков релятивистских ядер среднего и большого атомного номера.

Физическая программа эксперимента НИС освещена в четырех докладах на международных и российских конференциях.

3. Методические и прикладные исследования

Разработка детекторов на основе дрейфовых трубок

В 1998–1999 годы в рамках сотрудничества с ЦЕРН группа сотрудников ЛФЧ под руководством В.Д.Пешехонова разработала методику нового трекового координатного детектора на основе тонкостенных дрейфовых трубок и совместно с Мюнхенским техническим университетом, Университетом г. Фрайбурга и Варшавским техническим университетом создала полномасштабный прототип straw-камер большого размера, испытал его на пучке SPS в ЦЕРНе. В последующие годы в ЛФЧ было создано 15 двухслойных трековых камер с общей чувствительной площадью около 420 м². Начиная с 2002 года, детекторы работают в составе трековой системы спектрометра COMPASS. Работа была поддержана грантом немецкого министерства BMBF.

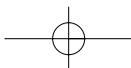
С начала 1990-х годов группа сотрудников ЛФЧ совместно с МИФИ начала разработку детектора переходного излучения TRT. На этой основе расширенное сотрудничество российских институтов приступило к созданию TRT для внутреннего детектора установки ATLAS.

Кремниевые планарные детекторы в России и ОИЯИ

В конце 80-х годов по инициативе профессоров И.А.Голутвина и В.А.Свиридова в ОНМУ ОИЯИ было создано новое методическое направление, целью которого были разработка и исследование кремниевых планарных детекторов для широкомасштабного применения в экспериментах на создаваемых ускорителях SSC, LHC и др. Это направление получило название «Дубненская силиконовая программа». Кроме ОИЯИ в ней приняли участие эксперты из разных научных центров СССР: ГИРЕД-МЕТ (Москва), ФТИ им. А.Ф.Иоффе (Ленинград), НИИПФП им. А.Н.Сенченко (Минск), НПО «Элма» и НИИМВ им. А.Ю.Малинина (г. Зеленоград).

В 80-е годы были созданы экспериментальные установки, использовавшие первые координатные планарные кремниевые детекторы, и получен положительный опыт применения таких детекторов в пучках заряженных частиц. Планировавшиеся новые эксперименты на строящихся ускорителях SSC и LHC ориентировались на массовое применение кремниевых детекторов. Основными проблемами для широкого применения таких детекторов в те годы были высокая стоимость детекторного кремния, выращиваемого методом бестигельной зонной плавки (БЗП), и высокая цена изготовления детекторов, а также радиационная стойкость детекторов.

Для начала работ по созданию планарных кремниевых детекторов в СССР необходимо было изучить ситуацию с отечественным БЗП-кремнием в свете долгосрочной перспективы его изготовления. Также было важно создать технологию изготовления пластин для детекторов. Конечно, все предпосылки к этому были – в СССР в те годы был достаточно высокий уровень технологии интегральных схем на многих



предприятиях. Но большое отличие параметров детекторного кремния от кремния, применяемого для микроэлектронных изделий, потребовало тщательного изучения отечественного материала и сравнения с материалом иностранных фирм. В те годы еще существовал запрет на ввоз в СССР БЗП-кремния производства западных фирм и надо было ориентироваться на доступный материал. Особенностью изготовления координатных (полосковых или стриповых) кремниевых детекторов является то, что обычно на пластине диаметром 76 или 100 мм размещен один детектор площадью (30–40) см² и всего лишь один дефект на пластине приводит к браку всего детектора.

После поездки осенью 1991 года на ЗТМК (Запорожье), где выращивались кристаллы БЗП-кремния, и обсуждения с экспертами предприятия стало ясно, что в сложившихся к тому времени политических и экономических условиях в стране невозможно было рассчитывать на отечественный материал. По инициативе И.А.Голутвина и при поддержке ЦЕРН, INFN (Флоренция), INFN (Милан) в 1992 году было образовано сотрудничество RD-35/ЦЕРН, в рамках которого был получен в слитках БЗП-кремний. Изготовление детекторов проводилось на отечественном и зарубежном материалах. Это давало возможность сравнивать радиационную стойкость детекторов, изготовленных на кремнии от разных производителей. Материал ЗТМК был вполне пригоден для детекторов, немного уступал по однородности и времени жизни и, если бы не развал страны, этот высокотехнологичный материал достойно бы конкурировал на международном рынке.

Поиск предприятия электронной промышленности, которое смогло бы создать технологию планарных детекторов и затем производить серийные детекторы, шел в течение нескольких лет. Первые исследовательские работы были проведены в 1987–1990 годы в НИИВТ им. С.А.Векшинского (Москва) и на Заводе им. 50-летия Октября (Фрязино). В результате этих работ были изготовлены планарные детекторы, которые использовались для радиационных исследований. На создаваемом ускорителе SSC для адронного калориметра планировалось применение кремниевых детекторов. Для этого потребовалось бы 300 м² активной площади детекторов. Было ясно, что изготовление такого количества кремниевых детекторов потребует промышленного производства пластин и детекторов при относительно небольшой цене. Лучше всех справиться с этой задачей могло Научно-производственное объединение «Элма» (Зеленоград), которое было основным производителем кремниевых пластин для электронной промышленности СССР. Первые переговоры с дирекцией НПО «Элма» состоялись весной 1990 года, когда в ходе встречи И.А.Голутвина с генеральным директором НПО «Элма» Л.А.Иванютиным и профессором М.Г.Мильвидским (ГИРЕДМЕТ) была обсуждена программа по созданию детекторной технологии.

Однако в то время поставленные задачи казались невыполнимыми из-за жестких требований на параметры детекторов: большая площадь прибора; низкие обратные токи; сохранение работоспособности детектора после инверсии типа проводимости при воздействии радиации; высокое напряжение пробоя. Заниматься проблемой создания детекторной технологии было поручено начальнику физико-технологической лаборатории НИИМВ, входившей в НПО «Элма», Ю.Ф.Козлову. Результатом сотрудничества ОИЯИ с НИИМВ на протяжении 15 лет является создание в России технологии планарных кремниевых детекторов, которые известны во многих научных центрах мира и соответствуют по своим параметрам мировым стандартам. Суще-

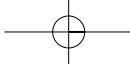


Дубненский региональный центр по созданию
и исследованию модулей кремниевых детекторов

ствующая высокотехнологическая линия производства в НИИМВ позволяет производить до 2 м^2 кремниевых детекторов в год.

В ЛФЧ ОИЯИ при сотрудничестве с Зеленоградом и НЦФЧВЭ (Минск) была создана технологическая инфраструктура, позволяющая применять кремниевые планарные детекторы в будущих физических экспериментах. Разработана технология облучения детекторов, измерения параметров облученных детекторов и их хранения. Разработан и создан технологический комплекс для сборки детекторов в микромодуль, который размещен в чистой зоне ЛФЧ в помещениях с классом чистоты 100. Работы специалистов ОИЯИ по технологии детекторов в условиях небольшой исследовательской лаборатории позволили понять в деталях технологические процессы и сложности планарной технологии, что всегда позволяло лучше решать обсуждаемые проблемы с экспертами из НИИМВ.

Первые планарные детекторы были изготовлены в НИИМВ летом 1991 года. С 1992 года все основные разработки детекторов проводились с учетом спецификации эксперимента CMS. Создаваемые экспериментальные установки на ускорителе LHC базируются на широкомасштабном применении планарных кремниевых детекторов. Наибольшего масштаба оно достигло в эксперименте CMS – более 200 м^2 чувствительной площади кремниевых детекторов только в центральной трековой системе.



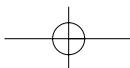
Кроме того, в данном эксперименте потребуется более 18 м^2 полосковых детекторов для плоскостей электромагнитного калориметра на основе кристаллов PbWO_4 . Для такого огромного количества кремниевых детекторов потребуется вырастить кристаллы высокоомного кремния в объеме большем, чем за все предыдущие годы. Основными особенностями применения детекторов в эксперименте CMS являются: работа в сильном магнитном поле, высокое быстродействие при частоте столкновений пучков 40 МГц, большой радиационный фон (до 2×10^{14} нейтрон/см²/10 лет). Первые два требования, естественно, реализуются с помощью кремниевых детекторов. Проблема радиационной стойкости оказалась очень серьезной и потребовала длительных исследований многими научными коллективами разных стран.

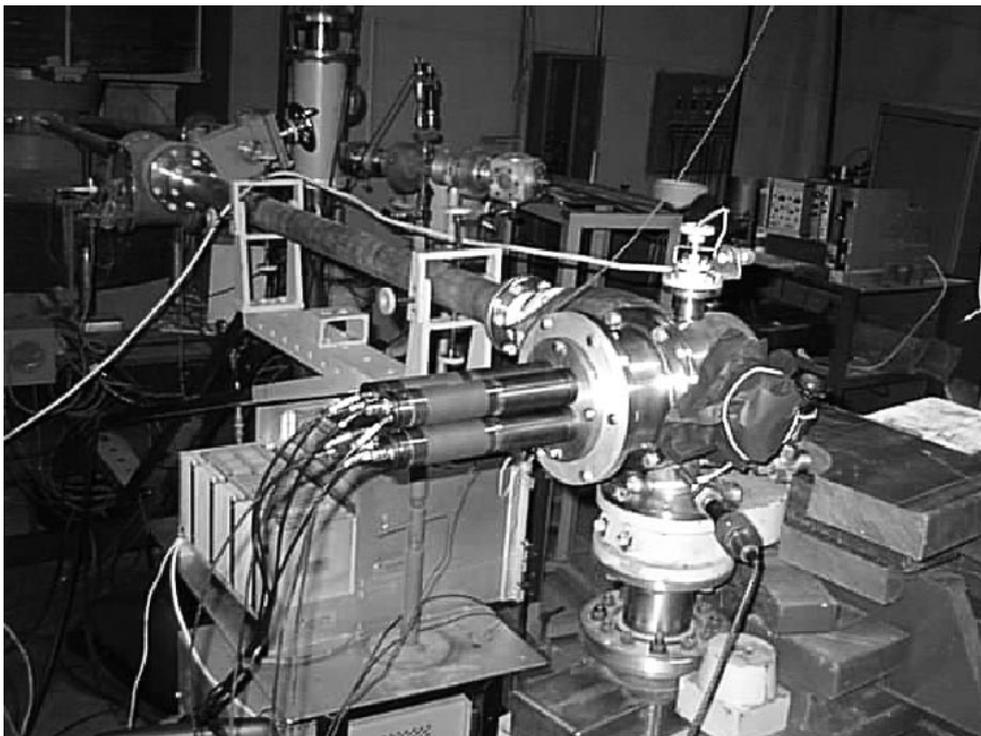
Для международного эксперимента CMS должно быть изготовлено более 8 м^2 кремниевых детекторов — это самый большой заказ такого типа приборов для промышленности России. Вкладом России и ОИЯИ по созданию предливневой части электромагнитного калориметра CMS является изготовление 1900 полосковых детекторов размера $(63 \times 63 \times 0,3) \text{ мм}^3$. Все детекторы тестируются в ОИЯИ и собираются в микромодули. После этого они будут смонтированы в составе установки CMS. Созданная в ОИЯИ научно-методическая база позволяет доводить (тестирование, сборка в корпус, сварка контактов, электроника, радиационные тесты) изготовленный в Зеленограде детектор (собственно кристалл) до готового к применению прибора для физических экспериментов. Технология позволяет выпускать планарные кремниевые детекторы для других научных и прикладных применений (рентгеновская спектрометрия, альфа-спектрометрия, фотоприемники и др.).

Применение ядерно-физических методов для идентификации сложных химических веществ

Цель данного проекта — создание прибора, проводящего анализ состава сложного химического вещества в реальном времени как в различных технологических процессах (определение качества угля, цемента и др.), так и в практике таможенного досмотра багажа и грузов с целью обнаружения нелегально транспортируемых веществ типа взрывчатки, ядерного топлива или наркотиков, для поиска мин в грунте. Применение ядерно-физической технологии для решения этих задач обеспечивает большую глубину зондирования, химическую чувствительность и высокую скорость неразрушающего анализа. Получаемые данные пригодны для быстрой обработки с помощью методов, широко применяемых в практике физического эксперимента, что позволяет создать эффективную систему автоматического принятия решения.

Работа установки основана на использовании метода меченых нейтронов (МН), позволяющего получить трехмерное изображение объекта и определить его элементный состав. Для этого используются быстрые монохроматические нейтроны с энергией 14,1 МэВ из реакции $d + t \rightarrow {}^4\text{He} + n$ при облучении мишени, содержащей тритий (обычно Tt_2), пучком дейтронов с энергией ~ 100 кэВ. В бинарной реакции α -частицы с энергией 3,5 МэВ и нейтроны вылетают в противоположных направлениях. Локализация траектории α -частицы двухкоординатным α -спектрометром определяет направление вылета «меченого» нейтрона. Меченый нейтрон взаимодействует с веществом изучаемого объекта, в результате чего образуется характеристическое гамма-излучение, несущее информацию об атомарном составе

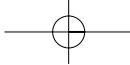




Экспериментальная установка проекта ДВИН на ускорителе Ван-де-Граафа (электростатический генератор ЛНФ)

объекта. Монохроматические нейтроны имеют скорость 5 см/нс, поэтому, измеряя время между моментами попадания α -частицы и γ -кванта в соответствующие детекторы, можно определить положение излучателя и восстановить трехмерную картину распределения вещества в объекте и его химический состав. Отбор событий по критерию $\alpha\gamma$ -совпадений позволяет также значительно подавить фон от ускорителя и рассеянных частиц. Метод МН, в основном, основывается на идентификации элементов С, N и O и получении атомарного состава в каждой выделенной области объекта. В γ -спектрах этих элементов имеется несколько интенсивных линий в интервале энергии 2-8 МэВ. Другие элементы тоже могут быть идентифицированы, если γ -детекторы имеют достаточно высокое энергетическое разрешение. Идентификация делящегося материала (U-235, U-238) также возможна по превышению выхода нейтронов над уровнем фона, который наблюдается при отсутствии в объекте делящихся веществ.

По инициативе ЛФЧ в ЛНФ ОИЯИ создана экспериментальная установка и ведутся работы по идентификации веществ, скрытых в различных контейнерах. Часть исследований в рамках данного проекта выполнена на ускорителе Ван-де-Граафа, где получается пучок дейтронов с энергией 400 кэВ. В настоящее время в установке используется разработанный совместно с НИИ Автоматики (Москва) компактный пе-



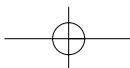
реносной генератор нейтронов, также действующий на описанном выше принципе. Генератор содержит внутренний многоканальный регистратор α -частиц. Испытаны два варианта α -регистратора — на базе неорганических сцинтилляторов YAP(Ce) и кремниевых полупроводниковых детекторов. Для быстрой автоматической селекции γ -спектров по их сходству с эталонными спектрами разработано программное обеспечение, основанное на применении метода нейронных сетей.

Измерения показали, что сложные различные вещества порождают качественно различающие γ -спектры, что позволяет эффективно идентифицировать простые и некоторые сложные вещества, упакованные в контейнеры или находящиеся под землей. Так, образец тринитротолуола массой 1500 г, помещенный на глубине 18 см под землей, дал γ -спектр с четкими линиями С и О. По согласованной с представителями таможенной программе были проделаны 22 испытания прибора, из которых в 21 случае была получена правильная идентификация заданных образцов. Созданная система не имеет аналогов в России. Конечная цель проекта — получить экспериментальное доказательство применимости описанной методики в практике разминирования и таможенного контроля. Предполагается, что полученный при выполнении проекта опыт и технологические разработки приведут к созданию коммерчески значимого продукта.

4. Ускорительная техника

Краткая история ускорительного отделения

Научное отделение по ускорительной тематике основано на базе Отдела новых методов ускорения, который был создан в ОИЯИ в 1968 году. Главная задача Отдела — теоретическое и экспериментальное обоснование коллективного метода ускорения ионов электронными кольцами. У истоков формирования этого нового направления в физике ускорителей была замечательная плеяда молодых ученых, которыми руководил академик В.И.Векслер, — В.П.Саранцев, О.И.Ярковой, С.Б.Рубин, Н.Б.Рубин, А.Б.Кузнецов, Г.В.Долбилов, В.П.Рашевский, Э.А.Перельштейн, И.Н.Иванов. Ими был предложен принципиально новый вариант коллективного метода ускорения, основанный на создании компактного электронного кольца как источника ускоряющего электрического поля с большой напряженностью. В короткие, почти фантастические сроки была создана модель коллективного ускорителя тяжелых ионов, включавшая в себя абсолютно новые для ускорительной техники технические узлы, присущие установкам типа «токамаков» с импульсными магнитными полями. Этот этап привел к результату, признанному в мировом сообществе, — впервые в мире с помощью электронных колец были ускорены α -частицы до энергии несколько МэВ на длине ускорения ~40 см. Следующим шагом было уже создание прототипа коллективного ускорителя тяжелых ионов. Ориентация на тяжелые ионы произошла под влиянием академика Г.Н.Флёрова, который пристально следил за всеми работами по коллективным методам ускорения и придавал им большое значение как самому перспективному направлению в физике и технике ускорения сильнозарядных ионов. Создание прототипа КУТИ потребовало сосредоточить фантастические усилия на разработку и изготовление всех основных узлов будущего ускорителя у себя в ОНМУ, причем эти узлы разрабатывались впервые в мировой ускорительной практике.



Коллективом под руководством Г.В.Долбилова был сконструирован и изготовлен сильноточный инжектор индукционного линейного ускорителя на энергию $E_0 = 2$ МэВ, ток в импульсе $I_e = 200$ А. Камера для формирования электронных колец с большой плотностью получила название адгезатор (адиабатический генератор заряженных тороидов).

В 1976 году были проведены сеансы успешного ускорения ионов азота на прототипе коллективного ускорителя. После этих экспериментов было принято решение о создании полномасштабного ускорителя тяжелых ионов с энергией до 10 МэВ/нуклон (КУТИ) с частотой повторения 20 Гц. Решение этой задачи также требовало создания принципиально новых узлов – ускорителей, которые должны были работать на частоте повторения 20 Гц. Были созданы новый электронный ускоритель «Силунд-20», новый вариант адгезатора, система питания магнитных полей, которая формировала импульсные магнитные поля с напряженностью до 20 кЭ. В создании всего ускорительного комплекса определяющую роль сыграли Г.В.Долбилов и другие сотрудники ОНМУ. Для ускорения ионов до энергии 10 МэВ/нуклон была предложена схема ускорения электрон-ионных колец в электрическом поле индукционного линейного ускорителя (ЛУЭК). В создании коллективных ускорителей как в ОНМУ, так и в научных центрах других стран физики столкнулись с большими проблемами, обусловленными тем, что процесс коллективного ускорения, являясь плазменным процессом, имел очень много ограничений, связанных с проявлением плазменных неустойчивостей. Прежде всего это было связано с двумя фундаментальными величинами – давлением остаточного газа в камере $P \leq 10^{-9}$ торр и пороговым числом электронов в кольце $N_e \geq 10^{13}$. Все это приводит к нерегулярному ускорению ионов. Нерешенная экспериментальная проблема и резко ухудшившееся экономическое положение в стране привели к тому, что продолжение работ в этом направлении было уже невозможно. Однако, учитывая большой научный и технический потенциал ОНМУ, дирекция ОИЯИ переориентирует коллектив, поставив во главу угла задачи, связанные с созданием новых методик в области физического эксперимента и ускорительной техники. Как уже было сказано, решение основных экспериментальных проблем коллективного метода ускорения привело к созданию в ОНМУ и ОИЯИ новых научных направлений:

- физика и техника создания индукционных линейных ускорителей наносекундной длительности – СИЛУНД, СИЛУНД-20, ЛУЭК (Г.В.Долбилов и др.);
- физика и техника формирования импульсных магнитных полей заданной конфигурации в металлических камерах (Л.С.Барабаш);
- методы расчета поведения ансамбля частиц с большим пространственным зарядом, выполненные Э.А.Перельштейном и другими сотрудниками ОНМУ;
- экспериментальные методы исследования электрон-ионных колец по синхротронному и оптическому излучению (В.А.Свиридов, С.И. Тютюнников);
- создание систем автоматического управления ускорителями (АСУ) под руководством В.Д.Инкина;
- физика и техника формирования сверхпроводящих электрических и магнитных систем, физика низких температур (Н.И.Балалыкин);
- физика и техника генерации мощного когерентного излучения миллиметрового диапазона (А.К.Каминский);

- разработка систем подавления колебаний заряженных частиц в кольцевых ускорителях адронов (В.М.Жабицкий).

Исходя из накопленного в течение многих лет опыта в указанных направлениях, ускорительное отделение успешно решает задачи, о которых будет рассказано ниже. Следует отметить, что создание такого работоспособного коллектива было бы невысказимо без профессора В.П.Саранцева, который объединил людей для решения главной задачи, а своим самоотверженным трудом научил коллег работать на пределе своих возможностей.

Основные знаменательные даты ускорительного отделения:

- 1968 – создание отдела новых методов ускорения;
- 1970 – зарегистрировано ускорение α -частиц коллективным методом;
- 1972 – начало разработки прототипа коллективного ускорителя тяжелых ионов ПКУТИ;
- 1976 – осуществление ускорения ионов азота на прототипе КУТИ до энергии 2 МэВ/нуклон; запуск первой секции ЛУЭК (линейного ускорителя тяжелых ионов, энергия ускоренных ионов доведена до 4 МэВ/нуклон);
- 1982 – запуск линейного ускорителя электронов СИЛУНД-20 с током 800 А, с частотой повторения до 50 Гц;
- 1983 – запуск комплекса СИЛУНД-20 и адгезатор-20 в режиме формирования электронных колец;
- 1989 – эксперименты по усилению в ондуляторе излучения миллиметрового диапазона;
- 1992 – эксперименты по использованию синхротронного излучения КУТИ-20 для конденсированных сред.

После создания ЛСВЭ усилия ускорительного отделения под руководством И.Н.Иванова были направлены на решение фундаментальных и прикладных проблем физики ускорителей. Первоначально это была новая тематика, связанная с созданием источников когерентного СВЧ-излучения.

В 1983 году профессор В.П.Саранцев инициировал начало исследовательских работ в ОИЯИ по созданию источников когерентного СВЧ-излучения – лазеров на свободных электронах (ЛСЭ). В миллиметровом диапазоне длин волн такие источники получили название мазеров (МСЭ). Как одно из основных прикладных применений, рассматривалось использование МСЭ в работах по двухпучковому ускорению (ДПУ). В ДПУ источником СВЧ-энергии для запитки ускоряющих секций пучка основного ускорителя, в которых обеспечивается высокий (более 100 МэВ/м) темп ускорения, является пучок низкоэнергетического сильноточного ускорителя. Для получения высокого темпа набора энергии в основном ускорителе предполагалось заметное увеличение (до $10 \div 40$ ГГц) частоты ускоряющего поля.

С начала работ по генерации когерентного излучения в ОИЯИ исследования проводились по трем основным направлениям:

- экспериментальные и теоретические исследования схем МСЭ;
- создание группирователей электронного пучка и исследование его динамики;
- создание источника СВЧ-мощности для тестирования и запитки высокоградиентных структур в диапазоне $30 \div 40$ ГГц.



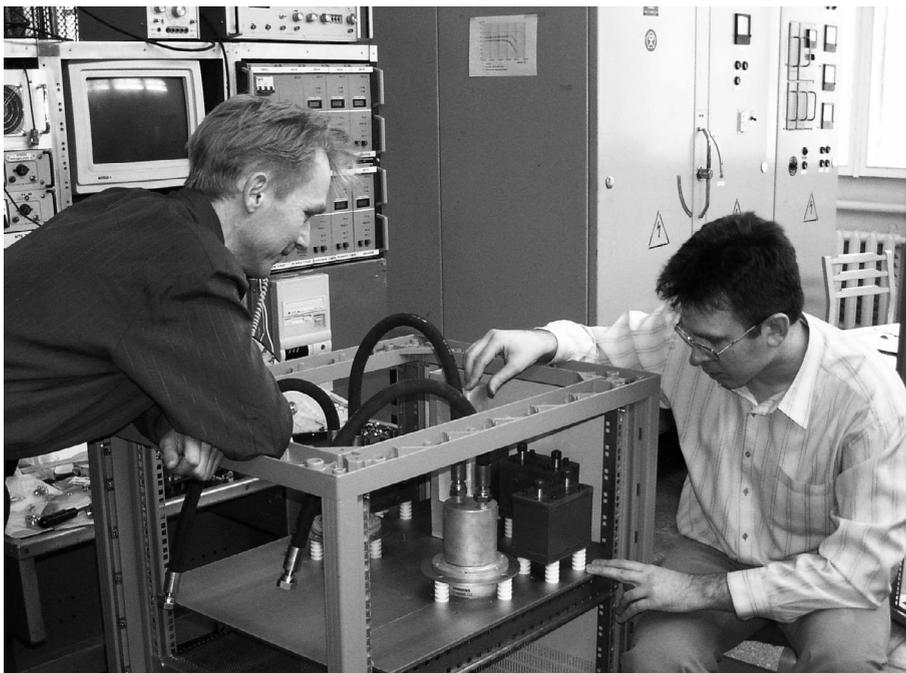
Ускорители электронов для радиационных технологий типа D-300-10, разработанные коллективом ЛФЧ в составе: Г.В.Долбилова, А.В.Мажулина, В.А.Савельева, В.Н.Разувакина, Н.А. Зинина и др. Ускорители поставляются в Японию, Китай и другие страны



Значительный прогресс в исследованиях по увеличению эффективности МСЭ был достигнут после того как было продемонстрировано, что эффективность и ширина спектра на выходе МСЭ с ведущим магнитным полем имеют сильную зависимость от направления этого поля. Экспериментально измеренное значение эффективности МСЭ-усилителя в режиме так называемого обратного ведущего магнитного поля достигало 27% и превышало эффективность МСЭ в режиме прямого поля в 3–9 раз.

Полученные результаты позволили использовать указанный тип МСЭ-генератора в экспериментах по тестированию ускоряющей структуры коллайдера CLIC. Значительный вклад в эти работы внес к.ф.-м.н. А.К.Каминский.

Следующий цикл работ по генерации уже жесткого коротковолнового излучения был предложен коллективом сотрудников под руководством д.ф.-м.н. М.В.Юркова.



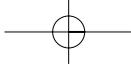
Сборка мощного широкополосного усилителя

Во второй половине XX века источники когерентного оптического излучения — лазеры — оказали заметное влияние на развитие целого ряда фундаментальных исследований и прикладных применений. Интенсивные разработки в области лазерной физики и техники привели к заметному расширению спектра в сторону инфракрасного и ультрафиолетового диапазонов. На протяжении последних десятилетий велись интенсивные разработки лазеров, работающих в рентгеновском диапазоне. Однако эта проблема не была решена, и трудно ожидать ее решения в обозримом будущем из-за больших сечений поглощения коротковолнового излучения в активной среде и низких коэффициентов отражения зеркал. Современное состояние дел с квантовыми генераторами таково, что область длин волн короче 100 нм (граница вакуумного ультрафиолета) практически недостижима для обычных лазеров.

В лазере на свободных электронах электромагнитное излучение усиливается электронным пучком при прохождении ондулятора — магнитного элемента со знакопеременным магнитным полем.

До недавнего времени качество электронных пучков позволяло получать сравнительно небольшой коэффициент усиления излучения за проход ондулятора, поэтому для достижения необходимой мощности излучения использовались оптические резонаторы.

Решение проблемы рентгеновского лазера на свободных электронах (ЛСЭ) стало возможным после развития технологии производства и ускорения интенсивных эле-



ктронных пучков высокого качества (имеющих малые энергетический разброс и эмиттанс). В рентгеновском ЛСЭ усиление излучения происходит за один пролет электронного пучка в ондуляторе. Так как активной средой ЛСЭ является электронный пучок, движущийся в вакууме, отпадают принципиальные ограничения на усиление коротковолнового излучения. Ввод в строй рентгеновских лазеров откроет беспрецедентные перспективы для фундаментальных и прикладных применений в различных областях биологии, химии и физики.

Рентгеновский ЛСЭ обладает большим потенциалом для увеличения яркости выходного излучения по сравнению с классической однопролетной схемой, где яркость излучения ограничена неполной продольной когерентностью вследствие старта процесса усиления излучения из дробового шума электронного пучка. Была разработана схема двухкаскадного ЛСЭ-усилителя, которая в настоящий момент принята как основная для рентгеновского ЛСЭ на ТТФ. В этой схеме первый ондулятор с монохроматором играет роль задающего лазера.

Первые экспериментальные результаты на рентгеновском ЛСЭ в DESY, полученные в феврале 2000 года, продемонстрировали обоснованность научного подхода к созданию рентгеновского лазера и правильность принятых технических решений. Ускоритель работал на энергии $180 \div 260$ МэВ, и ЛСЭ производил мощное, плавно перестраиваемое излучение в области вакуумного ультрафиолета $80 \div 180$ нм.

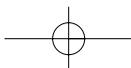
Исследования свойств электрон-ионных колец созданного коллективного ускорителя КУТИ-20 привели к пониманию того, что они являются источником синхротронного излучения в инфракрасной части спектра с очень высокой импульсной яркостью, значительно превосходящей все известные в мире.

На этой установке под руководством д.т.н. С.И. Тютюнникова впервые были проведены фундаментальные исследования оптических свойств нового класса материалов высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) с температурой перехода $T \geq 90$ К.

Проведенные исследования на пучке СИ коллективного ускорителя позволили накопить опыт в этой области и сформулировать направления будущих исследований. К этому времени была завершена работа по созданию специализированного источника СИ в РНЦ «Курчатовский институт» (на базе ускорителя «Сибирь-2»), который имеет следующие параметры: энергия электронов $E_e = 2,5$ ГэВ, ток накопленных электронов $I_e = 100$ мА, критическая энергия квантов рентгеновского излучения $E_c = 6,9$ кэВ. Было решено создать на пучке СИ установку для исследований ближнего порядка неупорядоченных квазикристаллических систем. Для этих целей создается энергодисперсионный спектрометр EXAFS (Extended X-ray Fine Structure). Установка обладает следующими отличительными особенностями:

- возможность измерять спектры поглощения EXAFS с временным разрешением, что позволит исследовать влияние внешних динамических воздействий на структуру образца;
- минимальный размер образца может составлять $0,1 \div 0,2$ мм;
- отсутствие механической перестройки по длинам волн при измерении EXAFS-спектров.

В настоящее время идет завершение запуска станции EXAFS-спектроскопии в РНЦ «Курчатовский институт», использование которой дает большие возможности исследовать



дований в области физики конденсированных сред. Инициатором этой работы являлся бывший директор Лаборатории нейтронной физики д.ф.-м.н. В.Л.Аксенов.

Как было сказано выше, в процессе работ по коллективному методу ускорения был накоплен уникальный опыт в разработке различных ускорительных технологий. Это позволило включиться в одну из важнейших работ по созданию большого адронного коллайдера (LHC) в CERN.

Начиная с 1997 года в ускорительном отделении ЛФЧ осуществляются разработка и создание системы подавления поперечных колебаний пучка большого адронного коллайдера LHC, сооружаемого в CERN (проект LHC Damper). Эта работа ведется в рамках Соглашения ОИЯИ–CERN по участию нашего Института в ускорительной части создания LHC и поддерживается Министерством науки и промышленности РФ как часть общей программы участия России в создании ускорителя нового поколения.

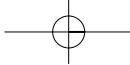
Основная задача этих систем изначально состояла в обеспечении поперечной устойчивости заряженных частиц, что позволяет существенно повысить интенсивность ускоряемых пучков.

В ЛФЧ ОИЯИ был предложен и совместно с CERN осуществлен эксперимент на пучке SPS, чтобы показать эффективность нелинейных методов и возможность их реализации. Результатом работы стало не только подтверждение старых результатов, но и открытие нового нелинейного метода подавления, названного «логическим», что позволило использовать принципиально новую схемотехнику для создания систем поперечной обратной связи.

В соответствии с Соглашением ОИЯИ–CERN коллаборация производит 20 электростатических кикеров и 40 широкополосных усилителей для системы поперечной



Монтаж электростатического дефлектора



обратной связи ЛНС. Параметры разрабатываемых устройств не имеют аналогов в мировой практике.

Разработанный прототип кикера представляет собой электростатический дефлектор, состоящий из двух медных пластин длиной 1500 мм, имеющих профиль симметричных 90° сегментов кольца с внутренним диаметром 52 мм.

В феврале 2000 года закончена наладка классических вариантов усилителей и сборка прототипа. Тестирование собранного комплекса проведено на специальном стенде ЛФЧ совместно с коллегами из CERN. Испытания показали полную адекватность характеристик установки проектным параметрам.

Главный результат завершенных на данный момент работ состоит в том, что схемотехника усилителей и конструкция кикера в целом соответствуют требованиям проекта и могут считаться согласованными. В настоящее время документация на прототип системы проходит в CERN процедуру согласования с ответственными экспертами проекта. Завершение этого этапа будет являться стартом для начала изготовления промышленной серии оборудования. Инициатором этой программы был начальник ускорительного отделения к.ф.-м.н. И.Н.Иванов. Благодаря его усилиям был сформирован коллектив ведущих специалистов (В.М.Жабицкий и др.), который успешно продолжает дело.

В соответствии с решениями дирекции ОИЯИ был значительно активизирован процесс изготовления комплекса ИРЕН на основе мощного линейного ускорителя на 200 МэВ для создания источника импульсных пучков нейтронов. В Лаборатории физики частиц в 2002 году был создан отдел линейного ускорителя под руководством д.ф.-м.н. Г.Д.Ширкова. За трехлетний период им проделана большая работа по изготовлению и наладке основных узлов ускорителя. В настоящее время идет работа по установке этих узлов в зале ускорителя в рабочем состоянии уже под руководством к.ф.-м.н. А.П.Сумбаева.

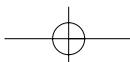
В начале 90-х годов в ускорительном отделении ЛФЧ под руководством Г.Д.Ширкова начались интенсивные исследования по физике ЭЦР-источников. Этому способствовал богатый опыт по исследованию динамики ионизации и накопления ионов в электронных кольцах, полученный в ОНМУ. В 1992 году было начато сотрудничество по физике источников многозарядных ионов между ОИЯИ и CERN.

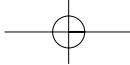
Теоретические исследования в этой области осуществлялись в рамках программы по ускорению ионов свинца на ускорительном комплексе PS и SPS в CERN в 1993–1995 годах.

С 1995 года ускорительное отделение ЛФЧ участвовало в исследовательско-конструкторских работах по проектированию линии транспортировки низкоэнергетического пучка ионов между лазерным источником ионов и ионным RFQ в CERN.

В последующие годы в рамках сотрудничества с RIKEN (Япония) и LNS INFN (Италия) проведены важные теоретические исследования по образованию и накоплению ионов в ЭЦР-источнике, в том числе по методам лазерной инжекции ионов и нейтралов твердотельных элементов.

В 1999–2001 годах совместно с RIKEN и в сотрудничестве с ВНИИЭФ (Саров) подготовлен и выполнен проект по применению модели крупных частиц в компьютерных программах и численному моделированию многокомпонентной ЭЦР-плазмы.





В последние годы теоретическая и экспериментальная деятельность связана с исследованиями на ЭЦР-источниках в RIKEN, Франкфурте и ЛЯР ОИЯИ с целью усовершенствования их работы и получения большей информации об основных характеристиках ЭЦР-плазмы. В частности, в RIKEN использование предложений сотрудников ЛФЧ позволило существенно повысить интенсивность ионных пучков, получены первые экспериментальные результаты по лазерной инжекции ионов и нейтральных атомов из металлической мишени в 18 ГГц сверхпроводящий ЭЦР-источник ионов.

Во Франкфурте проведены запуск и наладка новой, не имеющей аналогов, системы для измерения эмиттанса пучка ЭЦР-источника.

Придавая большое значение прикладным работам, в ускорительном отделении созданы оригинальные ускорители электронов для радиационно-стимулированных технологий под руководством Г.В.Долбилова.

Разрабатываемый ускоритель имеет следующие конструктивно-технологические особенности:

- использование холодных катодов с пороговыми эмиссионными характеристиками допускает применение синусоидального напряжения для формирования импульсов тока электронного пучка;
- многопучковый, многооконный вариант ускорителя позволяет конструировать систему вывода электронного пучка с очень большой суммарной площадью выводных окон посредством увеличения числа малых окон;
- использование источника высокого напряжения, основанного на коаксиальном вакуумном резонаторе, существенно улучшает добротность и эффективность преобразования энергии промышленной сети в энергию электронного пучка.

Экспериментальный опыт позволил начать в 2000 году работы по созданию полномасштабной модели ускорителя с энергией 500–700 кэВ и выходной мощностью 25–35 кВт. Параметры электронного пучка ускорителя: суммарный пиковый ток 0,5 А, длительность импульса 10–20 мкс, частота повторения 10–20 кГц.

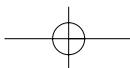
В настоящее время изготовлены по этой схеме два ускорителя: один – для Японии, другой – для Китая.

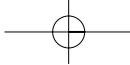
Ускорительное отделение ЛФЧ обладает уникальной экспериментальной базой, позволяющей проводить широкий спектр исследований и создавать новые экспериментальные установки. В секторе криофизических исследований (руководитель д.т.н. Ю.П.Филиппов) создано уникальное криофизическое оборудование для получения низких температур $T \leq 1,5$ К.

За годы существования ЛФЧ на его основе проведен широкий спектр исследований двухфазных гелиевых потоков. В настоящее время сектор принимает участие в проекте XFEL-TESLA, в рамках которого создается система криодиагностики ускорителей.

Создание широкого спектра экспериментальных установок в ОНМУ было бы немислимо без помощи высококвалифицированных рабочих, руками которых сделаны основные узлы всех ускорителей. Неоценимый вклад в эти работы внес В.И.Клементьев.

Большой вклад сотрудниками ЛФЧ внесен в развитие систем управления и диагностики ускорителей. Первые работы, начатые в 1987 году под руководством

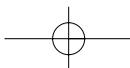


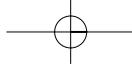


И.Н.Иванова, были посвящены разработке и созданию систем подавления когерентных поперечных колебаний (СППК) пучка УНК в Протвино (Россия). Это был один из первых в мире проектов адронных коллайдеров такого масштаба. Проведенные в сотрудничестве с экспертами различных институтов теоретические исследования проблемы показали уникальность сочетания необходимых параметров и отсутствие аналогов инженерно-технической реализации системы. Однако было найдено методическое решение задачи, которое состояло в обосновании принципиально нового режима подавления и в последствии получило название UNK-technology. Система была успешно реализована совместно со специалистами ИФВЭ (Протвино) и МРТИ (Москва). Тем самым был завоеван международный приоритет в создании СППК для ускорителей подобного типа, и положено начало серии работ по исследованию различных режимов подавления. Этот результат стал в 1997 году основой сотрудничества ЦЕРН–ОИЯИ–Россия для создания системы поперечной обратной связи для ЛНС (ЦЕРН, Швейцария). Как с теоретической, так и с технической точки зрения эта задача оказалась еще более сложной из-за необходимости комплексного обеспечения ряда противоречивых условий. Тем не менее накопленный опыт позволил к 2002–2003 годам найти необходимые методические, инженерные и технологические решения, которые были утверждены экспертным советом ЛНС. Одновременно была начата промышленная реализация системы. Все работы проводятся в тесном сотрудничестве с институтами и предприятиями России (МЭИ, АТН, «Торий»), Республики Беларусь (ИТМО, ИГГ АНБ), Болгарии (ЭЛСИЭЛ, ИЯИЯЭ БАН), Германии (DESY), Чехии («Вакуум-Прага») и т.д. Разработки, полученные в ходе выполнения проекта, успешно внедряются и используются в различных прикладных ускорительных установках.

С 1995 года ОИЯИ является членом коллаборации TESLA, в рамках которой в DESY разрабатывается новый линейный электрон-позитронный коллайдер на основе сверхпроводящих ускоряющих секций с высоким темпом ускорения. Специалисты ЛФЧ принимали активное участие на всех этапах разработки проекта TESLA, внося наиболее весомый вклад в развитие ускорительных технологий с использованием рентгеновских ЛСЭ. Результаты работ специалистов из ОИЯИ по проекту TESLA получили высокую оценку в рамках коллаборации и широкое международное признание. Они оказали заметное влияние на развитие проекта в части опции гамма-гамма коллайдера и рентгеновского лазера. В частности, основной схемой для рентгеновского лазера на тестовом ускорителе TESLA принята двухкаскадная схема, обеспечивающая полную продольную когерентность излучения. Как перспективное развитие рентгеновского ЛСЭ, для TESLA принята многокаскадная схема генерации импульсов излучения аттосекундной длительности. Работы неизменно поддерживались целевым финансированием BMBF (Министерство науки и техники Германии) и целевыми грантами Польши. Благодаря этой поддержке на тестовом ускорителе TESLA специалистами ОИЯИ был проведен эксперимент по изучению ЛСЭ нового типа – регенеративного ЛСЭ-усилителя.

В ОИЯИ развивается новое нетрадиционное направление в технике электронных ускорителей для радиационных технологий. В частности, разрабатываемые в ЛФЧ многопучковые ускорители с высокой частотой повторения обеспечивают возможность использования очень дешевых постоянных электрических полей для ускорения

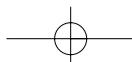


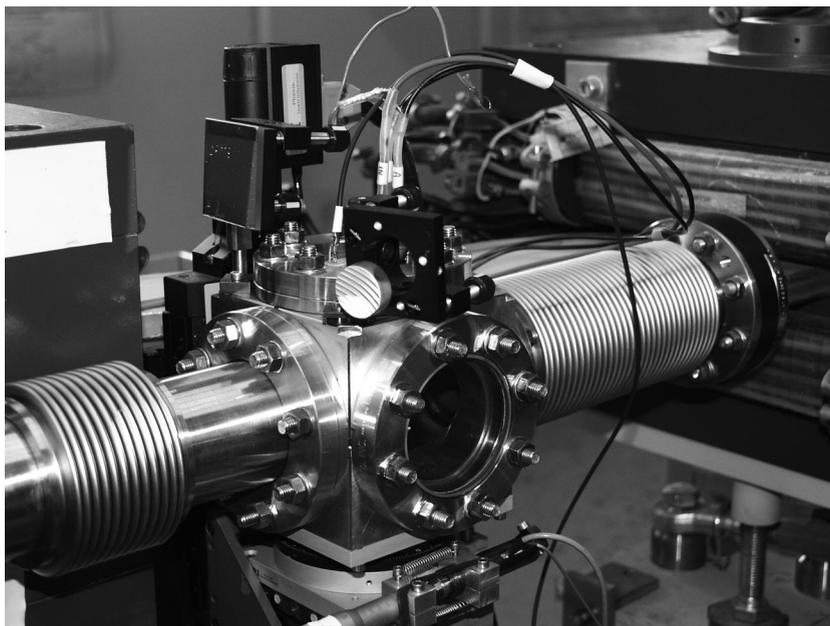


вторичных электронов. С 1995 года эти работы поддерживались Институтом ядерных исследований и ядерной энергетики (София, Болгария), а с 2001 года они получили внебюджетное финансирование в рамках соглашений о сотрудничестве между ОИЯИ и USTC (Хефэй, Китай) и фирмой MUS (Токио, Япония).

Источники ионов на электронно-циклотронном резонансе (ЭЦР) и электронно-лучевые источники ионов (ЭЛИИ) являются сегодня основными видами источников с последовательной ионизацией электронным ударом. Исследования в области физики источников ионов начались в ОИЯИ в начале 80-х годов в связи с идеями использования легких малозарядных ионов для охлаждения тяжелых многозарядных ионов и отбора энергии ионов из пучка ЭЛИИ (ионное охлаждение). В начале 90-х годов в ЛФЧ начались интенсивные исследования по физике ЭЦР-источников. В 1992 году было начато сотрудничество по физике многозарядных источников ионов между ОИЯИ и ЦЕРН. Программа ОИЯИ–ЦЕРН по теоретическим исследованиям в этой области осуществлялась в рамках программы по ускорению ионов свинца на ускорительном комплексе PS и SPS в CERN в 1993–1995 годах. В последующие годы в рамках сотрудничества с RIKEN (Япония) и LNS INFN (Италия) проведены наиболее важные теоретические исследования по образованию и накоплению ионов в ЭЦР-источнике. Новый сверхпроводящий ЭЦР-источник SERSE разработан и сконструирован в INFN-LNS (Катания, Италия) и CEA-DRFMC (Гренобль, Франция), испытан в Гренобле и смонтирован в Катании в середине 1998 года. С 1995 года ЛФЧ участвовала в исследовательско-конструкторских работах по проектированию линии транспортировки низкоэнергетического пучка ионов между лазерным источником ионов и ионным RFQ в CERN. В 1999 году в сотрудничестве с RIKEN подготовлен и начат новый проект по применению модели крупных частиц в компьютерных программах и численном моделировании для многокомпонентной ЭЦР-плазмы. В последние годы экспериментальная деятельность связана с исследованиями на ЭЦР-источниках в RIKEN (Франкфурт) и ЛЯР ОИЯИ с целью усовершенствования их работы и получения большей информации об основных характеристиках ЭЦР-плазмы.

В конце 2000 года приказом по ОИЯИ в ЛФЧ для завершения ускорительной части проекта ИРЕН образован научно-экспериментальный отдел ускоряющих систем. Проектом ИРЕН предусмотрено создание в ОИЯИ новой базовой установки – интенсивного источника резонансных нейтронов с параметрами нейтронных пучков, обеспечивающими возможности постановки и решения широкого спектра задач как в области фундаментальных ядерно-физических, так и в области прикладных исследований. Импульсный источник использует бустерный принцип быстрого размножения первичных нейтронов в размножающей мишени, содержащей подкритическую сборку тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ) из ^{239}Pu . В качестве драйвера, инициирующего появление первичных нейтронов, используется пучок электронов линейного ускорителя электронов (ЛУЭ-200). В разработке проекта и создании ускорителя принимают участие четыре лаборатории ОИЯИ, а также ряд научно-производственных организаций стран-участниц ОИЯИ и ведущих ускорительных центров других стран. Помимо Института ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН (Новосибирск) существенный вклад в оснащение ускорителя внесен Стамфордским центром линейного ускорителя (SLAC, USA), Ереванским физическим институтом (Республика Ар-

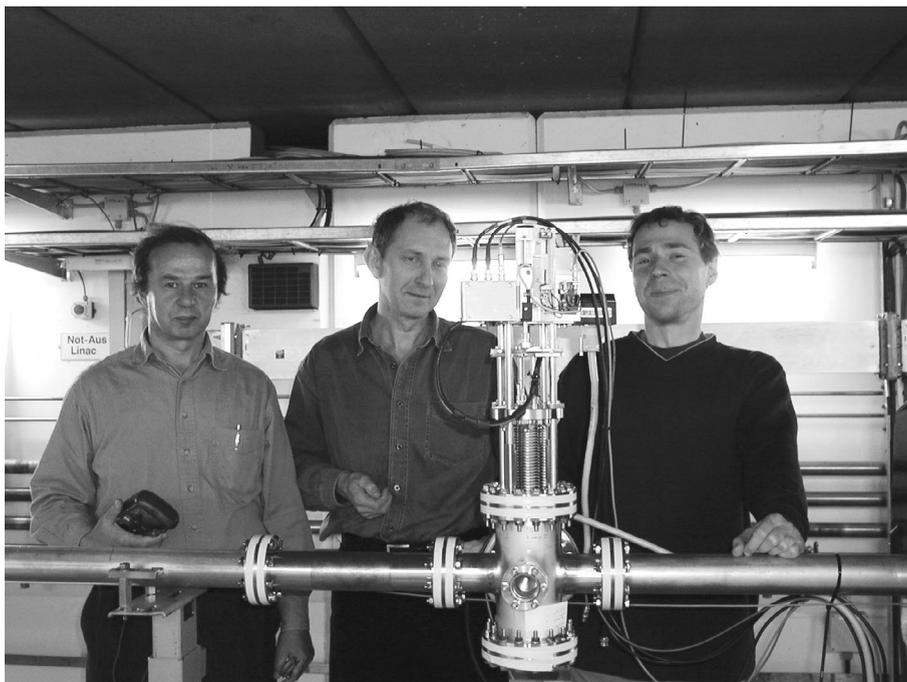




Камера с зеркальным и диагностическим оборудованием проекта «Регенеративный усилитель ЛСЭ» (RAFEL)



М.Юрков, Е.Шнайдемиллер (DESY) и А.Фатеев настраивают камеру проекта RAFEL



А.Фатеев (слева) с польскими коллегами завершают сборку камеры диагностики отраженного излучения

меня), фирмой «Вакуум-Прага» (Чехия) и Базой развития и внедрения Болгарской академии наук (София, Болгария). В совместных экспериментах с ИЯФ СО РАН при тестировании прототипов ускоряющих секций для ускорителя ЛУЭ-200 достигнуты рекордные темпы ускорения интенсивного пучка электронов для ускоряющих структур с бегущей волной S-band диапазона.

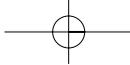
5. Серпуховской научно-экспериментальный отдел

ОИЯИ–ИФВЭ: многолетнее уникальнейшее сотрудничество

Особое место среди национальных центров стран-участниц для ОИЯИ занимает Институт физики высоких энергий (ИФВЭ, Протвино).

В октябре 1967 года в ИФВЭ на только что построенном ускорителе У-70 впервые в мире был получен пучок ускоренных протонов с рекордной в мире энергией 76 миллиардов электрон-вольт, что позволило физикам Советского Союза и ОИЯИ проводить систематические исследования свойств микромира в той области энергий, которая ранее была недоступна.

Академик Н.Н.Боголюбов, который в это время занимал пост директора ОИЯИ и был первым научным руководителем ИФВЭ, в конце 1967 года писал: «В прошедшем году важное место в деятельности ОИЯИ занимала подготовка к экспериментам на



гигантском ускорителе протонов, построенном в Советском Союзе близ города Серпухова. Такое развитие событий диктовало нам необходимость более тщательного пересмотра нашей программы подготовки к экспериментам в ИФВЭ с целью ее интенсификации».

18 июня 1970 года было подписано Соглашение о научно-техническом сотрудничестве между Государственным комитетом по использованию атомной энергии СССР и Объединенным институтом ядерных исследований, заложившее основу участия ученых ОИЯИ в экспериментах на У-70.

Физики ОИЯИ и институтов стран-участниц получили прекрасные условия для проведения экспериментов по физике высоких энергий на ускорителе ИФВЭ.

Со своей стороны ОИЯИ обеспечил оснащение производственной базы ИФВЭ первоклассными чехословацкими станками, принял участие в строительстве производственных и жилых зданий.

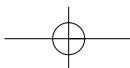
Для реализации решения Ученого совета по выполнению программы научных исследований ОИЯИ по физике высоких энергий и в целях лучшей организации работ ученых стран-участниц ОИЯИ приказом от 2 февраля 1968 г. № 21 был создан специальный отдел — Серпуховской научно-экспериментальный отдел (СНЭО). Начальником отдела был назначен д.ф.-м.н. М.И.Соловьев.

Вновь созданный отдел должен был действовать оперативно. Уже в апреле 1968 года ОИЯИ поставил эксперимент по изучению рассеяния протонов на протонах и дейтонах на малые углы (руководитель В.А.Никитин). На этой установке впервые в мире была разработана и применена «струйная водородная и дейтериевая мишень». В результате всего год спустя после запуска ускорителя физиками ОИЯИ в совместных исследованиях с ИФВЭ были получены первые предварительные сведения о поведении упругого протон-протонного рассеяния в ранее недоступной области энергий.

В результате этого эксперимента была установлена неизвестная ранее закономерность изменения радиуса сильного взаимодействия протонов при высоких энергиях, заключающаяся в том, что радиус сильного взаимодействия протонов с протонами при энергиях свыше 10 ГэВ увеличивается при возрастании энергии (открытие № 244, зарегистрированное в Государственном реестре открытий СССР). Это означает, что с ростом энергии эффективный радиус протона растет, а сам протон становится более прозрачным.

В опытах по измерению упругого рассеяния протонов на протонах удалось получить новые принципиально важные сведения о вещественной части амплитуды их рассеяния при высоких энергиях. Эти результаты вызвали большой интерес научной общественности и впервые доказали, что фундаментальные принципы теории (причинность, унитарность) не нарушаются. Работа вошла в цикл исследований по открытию «Серпуховского эффекта» и была отмечена Государственной премией. Необходимо отметить, что этот коллектив вместе со своей «мишенью» был приглашен в качестве первоочередного на суперциклотрон с энергией в 400 ГэВ/с в США (Лаборатория Ферми).

Вскоре в ИФВЭ была привезена и смонтирована установка для изучения регенерации на водороде, дейтерии и углероде долгоживущих K^0 -мезонов в короткоживущие K^0 -мезоны (установка БИС, руководитель И.А.Савин, затем БИС-2, руководитель М.Ф.Лихачев).



На этой установке впервые было систематически исследовано асимптотическое поведение амплитуд упругого рассеяния вперед нейтральных каонов. Актуальность этих исследований обосновывалась необходимостью проверки основных положений и выводов асимптотических теорий сильных взаимодействий, дисперсионных соотношений, модели комплексных угловых моментов. На этой же установке зарегистрировано большое количество трехчастичных распадов короткоживущих и долгоживущих нейтральных каонов, изучение которых позволило выяснить многие вопросы теории слабых взаимодействий.

Также на экспериментальной установке БИС-2 выполнена широкая программа исследований короткоживущих очарованных частиц и поиск новых узких барионных резонансов, распадающихся на странные и обычные частицы. В результате этих исследований обнаружено аномально большое сечение образования очарованного Λ -гиперона, а также установлено существование асимметрии в его распаде.

Продолжение этой программы в последующие годы реализовано на новой установке ЭКСЧАРМ, которая специально предназначалась для изучения рождения странных и очарованных частиц в пучке высокоэнергичных нейтронов на специальном канале (II примыкание) ускорителя У-70. В результате впервые получены новые важные результаты о свойствах рождения и распада этих частиц.

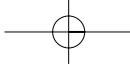
В эти же годы проведен совместный ОИЯИ–ИФВЭ–США эксперимент по рассеянию π^- и K^- -мезонов на электронах (руководитель Э.Н.Цыганов). В результате опыта впервые непосредственно измерен эффективный радиус (формфактор) нестабильных частиц (π^- и K^- -мезона), в распадах которых не участвуют нуклоны. Величина формфактора оказалась приблизительно такой же, как и у нуклона при одинаковой энергии налетающих частиц. В эксперименте использовалась оригинальная методика, которая впоследствии успешно применена в совместных экспериментах на ускорителе в Батавии (США).

Под руководством В.И.Петрухина создана установка для поиска тяжелых частиц и антиядер, завершившаяся открытием антитрития.

Из ОИЯИ в ИФВЭ перевезены и установлены двухметровая тяжеложидкостная пузырьковая камера для исследования пи-минус протон и пи-минус углерод взаимодействий (руководители М.И.Соловьев и В.Г.Гришин), а также крупнейшая в странах-участницах ОИЯИ двухметровая жидководородная камера «Людмила» для исследования $\bar{p}p^-$ и $\bar{d}p^-$ взаимодействий (руководители И.М.Граменицкий и Н.М.Вирясов).

В результате изучения на этих камерах процессов множественного рождения частиц впервые обнаружены новые закономерности в рождении частиц при высоких энергиях. В частности, обнаружено новое явление в микромире – так называемое масштабное поведение множественности вторичных частиц в пион-нуклонных, антипротон-протонных и пион-ядерных взаимодействиях, а также установлена возможность обильного рождения резонансов. Кроме того, исследование свойств рождения адронных струй в пион-нуклонных взаимодействиях при 40 ГэВ/с подтвердило универсальность механизма фрагментации кварков и дикварков в адроны в мягких адрон-нуклонных и позитрон-электронных столкновениях при одинаковой энергии в с.ц.м.

При изучении свойств антипротон-протонных взаимодействий при импульсе 22,4 ГэВ/с обнаружена выстроенность спина ρ -мезона, что прямо доказывало нали-



чие поляризации кварков на стадии перед их соединением в мезон. При использовании трековочувствительной жидкодейтериевой мишени внутри рабочего объема камеры «Людмила» получены данные о свойствах основных характеристик никем ранее не изучавшихся антидейтрон-дейтронных столкновений при энергии 12 ГэВ.

С помощью специально созданного и установленного на пучке 40 ГэВ У-70 пятиметрового искрового спектрометра (установка МИС-1 и затем МИС-2) было надежно установлено существование новых нестабильных возбужденных состояний π -мезона, распадающегося на три обычных π -мезона.

Обработка огромного (в основном, фильмового) экспериментального материала, полученного на ускорителе ИФВЭ на этих установках, велась во многих национальных институтах стран-участниц ОИЯИ. Так впервые родилась новая форма научно-технического сотрудничества, которую выразительно назвали «физика на расстоянии». Эта новая форма сотрудничества позволила вовлекать в проведение исследований на переднем рубеже знаний коллективы, которым самостоятельное проведение подобных работ было бы не под силу.

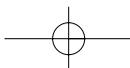
С первых дней работы У-70 было начато изучение поляризационных эффектов в области самых высоких на то время энергий на совместно созданной ОИЯИ и ИФВЭ установке «Проза-Поляриметр» (руководитель Ю.М.Казаринов). Важной особенностью этой установки являлась разработанная в ОИЯИ под руководством Б.С.Неганова большая поляризованная «замороженная» мишень, которая могла работать в двух вариантах — протонном и дейтронном, что существенно расширяло круг изучаемых явлений поляризации. В результате исследований поляризационных эффектов в зарядово-обменных процессах впервые установлена сложная зависимость поляризации в пион-протонном рассеянии с обменом заряда. В результате опытов впервые получено экспериментальное доказательство важной роли спина при высоких энергиях.

Большая программа совместных ИФВЭ—ОИЯИ исследований гиперзарядово-обменных реакций выполнена на установке ГИПЕРОН (руководители Ю.А.Будагов и В.Б.Флягин). Установка была нацелена на изучение динамики процессов с весьма малыми сечениями на основе очень большой статистики. В этом эксперименте, помимо новой научной информации о свойствах гиперзарядово-обменных реакций, получены важные сведения о кварковом составе η -мезона и верхней границе вероятности распада короткоживущего нейтрального каона на электрон и позитрон.

Установка ГИПЕРОН развивается и продолжает работать до сих пор на пучках У-70. Основная программа исследований сейчас направлена на изучение редких распадов заряженных каонов.

Исследование свойств образования и распадов релятивистских позитрониев, образующихся в результате редкого, ранее не наблюдавшегося распада нейтрального пи-мезона на фотон и позитроний, выполнено в эксперименте «Позитроний» (руководитель Л.Л.Неменов). Для регистрации позитрония разработаны и созданы трехметровые дрейфовые камеры, в которых впервые применен режим самогасящегося стримерного разряда, предложенный специалистами ОИЯИ.

Ряд важных физических результатов получен в совместных ОИЯИ—ИФВЭ экспериментах по программе СИГМА-АЯКС (руководитель от ОИЯИ Г.В.Мицельмахер). Детально исследован так называемый комптон-эффект на π -мезоне. Ранее комптон-эффект зарегистрирован лишь для стабильных частиц — протона и электрона. В ре-



зультате эксперимента впервые была измерена фундаментальная структурная константа поляризуемости пиона. Параллельно велось также изучение процесса образования пионных пар пионами в кулоновском поле ядер. Эти исследования дополняют эксперименты по распаду нейтрального пиона и делают возможным прямую проверку как цветной $SU(3)$ -теории, так и гипотезы об аномалиях в киральной теории.

В ОИЯИ был создан и установлен на У-70 нейтринный детектор (руководитель от ОИЯИ С.А.Бунятов) для изучения взаимодействий нейтрино с нуклонами и электронами, а также поиска событий, свидетельствующих об осцилляции нейтрино.

В первые годы работы У-70 учеными ОИЯИ был проведен ряд поисковых экспериментов, в том числе: поиск существования монополя Дирака (руководитель В.П.Зрелов), поиск короткоживущих частиц (установка ТАУ, руководитель Л.С.Золлин), поиск аномально долгоживущих странных частиц (руководитель Б.М.Понтекорво), исследование редких и радиационных распадов K^- -мезонов (установка ИСТРА, руководитель от ОИЯИ Б.Ж.Залиханов).

Всего начиная с 1967 года в ИФВЭ приняты и одобрены около 175 предложений экспериментов. В одном из своих выступлений академик А.А.Логоунов отметил: «Ученые ОИЯИ подготовили и провели более 50 экспериментов. Это около трети всех экспериментов на нашем ускорителе и треть времени работы ускорителя на физический эксперимент».

В настоящее время в ОИЯИ готовятся два новых предложения: проект по обнаружению прямого CP -нарушения и уточнению характеристик параметров Стандартной Модели и проект «Термализация» — исследование процессов с предельной множественностью.

Вся деятельность ученых ОИЯИ в ИФВЭ протекала под эгидой практически ежегодных совместных совещаний дирекций ОИЯИ и ИФВЭ. Кроме этого, 24 июня 1992 года было заключено Соглашение о научно-техническом сотрудничестве между ИФВЭ и ОИЯИ, которое и определяет в настоящее время связи между нашими институтами.

Во всех проведенных и проводящихся ОИЯИ в ИФВЭ экспериментах вложен большой определяющий труд рабочих, техников, инженеров и ученых Серпуховского научно-экспериментального отдела. Подавляющее большинство сотрудников СНЭО имеют высокую профессиональную квалификацию, поскольку в процессах монтажа, наладки и проведения исследований они должны быть прекрасно подготовлены для работы с любыми типами детекторов. Это позволяет им и сейчас быть востребованными для подготовки и проведения экспериментов не только в ИФВЭ, но и на зарубежных ускорителях.