

## **Годовой отчет Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН Важнейшие научные результаты за 1999 год**

Основной целью Института является проведение фундаментальных и прикладных научных исследований по темам:

- физика высоких энергий;
- развитие метода встречных электрон - позитронных пучков;
- физика плазмы и управляемый термоядерный синтез;
- синхротронное излучение и лазеры на свободных электронах.

Кроме того, Институт разрабатывает и изготавливает промышленные ускорители, некоторые виды медицинской техники и высокотехнологичные элементы научно – исследовательского оборудования для российских и зарубежных лабораторий и научных центров.

Все ведущиеся в Институте работы выполняются в рамках утвержденных планов НИР, государственных программ, грантов отечественных и международных фондов, проектов, финансируемых СО РАН, и договоров со сторонними научными организациями.

## ФИЗИКА ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ:

### Эксперименты:

#### *Изучение процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ в экспериментах на ВЭПП2-М*

В 1999 году закончен анализ экспериментальных данных по измерению сечения  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$  в области энергий в системе центра масс от 600 до 1000 МэВ. Систематическая ошибка сечения не превышает 0.6%, что в несколько раз лучше, чем систематическая неопределенность предыдущих экспериментов. Значительно улучшена точность теоретического расчета вклада адронной поляризации вакуума в аномальный магнитный момент мюона, что особенно актуально в связи с новыми точными измерениями этого параметра в совместном эксперименте Брукхэйвской Национальной лаборатории США и ИЯФ им. Будкера СО РАН. С точностью, превышающей среднемировую, определены параметры  $\rho$ -мезона

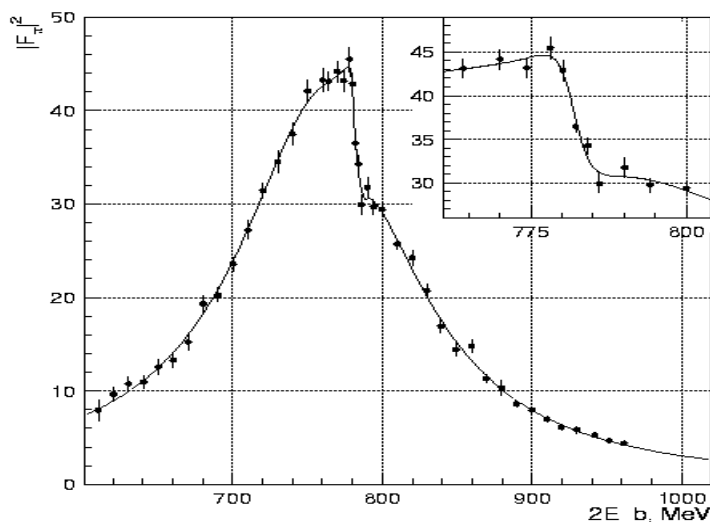


Рис.1 Квадрат формфактора пиона в зависимости от энергии в системе центра масс пучков. На вставке отдельно показана область  $\rho$  -  $\omega$  интерференции.

Наблюдение структуры в сечении процесса рождения трех пионов с детектором СНД в экспериментах на ВЭПП2-М

В области энергии выше  $\Phi$ - мезона изучался процесс  $e^+e^-$ -аннигиляции в три  $\pi$ - мезона. Было зарегистрировано около 20 тыс. Событий, соответствующих этому процессу. В энергетической зависимости сечения процесса был найден широкий пик при энергии  $2E \sim 1200$  МэВ, что является, возможно, первым проявлением нового изоскалярного резонанса  $\omega(1200)$ .

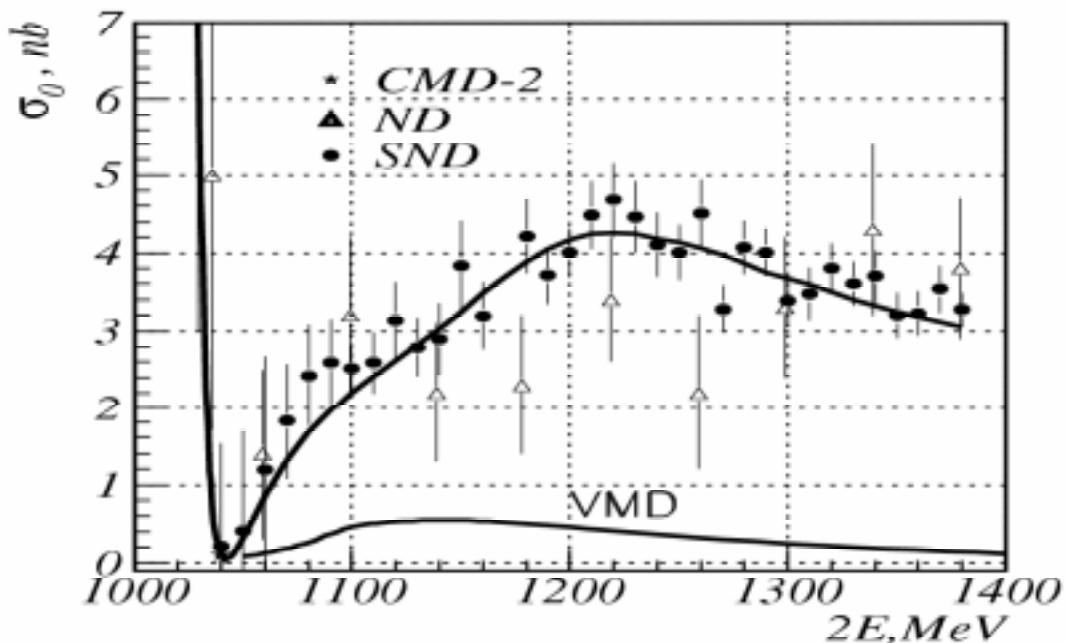


Рис.2 Зависимость сечения процесса рождения трех  $\pi$ - мезонов от энергии. Наблюдается широкий пик в области энергии  $2E \sim 1200$  МэВ. Рост сечения при малых энергиях обусловлен вкладом  $\Phi$ - мезона

Изучение процессов  $\Phi \rightarrow \pi^+\pi^-\gamma$  и  $\Phi \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma$  в экспериментах на ВЭПП2-М

На основе набранного в эксперименте интеграла светимости в 14 обратных пикобарн, соответствующего  $21 \cdot 10^6$  распадов  $\Phi$ - мезона, впервые наблюдался процесс  $\Phi \rightarrow \pi^+\pi^-\gamma$ . Совместный анализ заряженной и нейтральной мод в распадах  $\Phi \rightarrow \pi\pi\gamma$  продемонстрировал, что модель с промежуточным состоянием  $f_0(980)$  хорошо описывает экспериментальные данные. Большая величина относительной вероятности распада  $\Phi \rightarrow f_0(980)\gamma$ , равная  $(2.90 \pm 0.21 \pm 0.65) \cdot 10^{-4}$ , согласуется с предсказаниями теоретических моделей, в которых предполагается, что  $f_0(980)$ - мезон построен из четырех кварков.

### *Динамика процесса $e^+e^- \rightarrow 4\pi$*

В экспериментах с детектором КМД-2 впервые показано, что основной вклад в сечение процесса  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-2\pi^0$  дают промежуточные состояния  $a_1(1260)\pi$  и  $\omega\pi^0$ , в то время как сечение процесса  $e^+e^- \rightarrow 2\pi^+2\pi^-$  полностью описывается промежуточным состоянием  $a_1(1260)\pi$ .

На основе проделанного анализа предложена модель распадов  $\tau^- \rightarrow 2\pi^-\pi^+\pi^0\nu_\tau$ , хорошо описывающая имеющиеся данные.

### *Создание аэрогелевого черенковского счетчика*

Совместными усилиями Института ядерной физики и Института катализа разработаны аэрогелевые черенковские счетчики. Проведены прямые сравнения оптических свойств аэрогелей, производимых в Новосибирске и в японском Институте физики высоких энергий КЕК. У новосибирского аэрогеля длина поглощения света на порядок больше, чем у аэрогеля из КЕК.

Реализован метод сбора черенковских фотонов с помощью смесителя оптического спектра. В 1999 году проведены испытания реальных счетчиков, которые будут работать в детекторе КЕДР. Испытания показали, что данный метод по сравнению с методом прямого сбора света на ФЭУ позволяет на порядок уменьшить число ФЭУ. Это означает существенное удешевление системы счетчиков и уменьшение количества материала на пути частиц.

### *Электромагнитная структура дейтрона*

Создан новый источник поляризованных атомов дейтерия, обладающий рекордной интенсивностью. С марта 1999 года он используется на накопителе ВЭПП-3, где проводится эксперимент по измерению асимметрии в процессе упругого рассеяния электронов на поляризованной дейтериевой внутренней мишени. В результате светимость увеличена более чем в 20 раз по сравнению с предыдущими измерениями. В этом важном для ядерной физики эксперименте по изучению электромагнитной структуры простейшей ядерной системы - дейтрона - участвуют также ИЯФ ТГПУ (Томск), ПИЯФ (Гатчина), НИКХЕФ (Амстердам), АНЛ (Аргонна, США).

## Теория:

### *Вычисления анапольных моментов ядер*

Анапольный момент ядра - статическая характеристика, порождаемая электрическим током тороидальной конфигурации. В отличие от других электро- магнитных моментов, его магнитное поле отлично от нуля только внутри ядра, поэтому взаимодействие электронов с анапольным моментом контактное. Наличие статического анапольного момента прямо связано с существованием не сохраняющего четность взаимодействия между нуклонами, так как анапольный момент - P-нечетный оператор: если четность сохраняется, его среднее значение равно нулю. По этой причине измерение анапольного момента дает независимую информацию о P-нечетных ядерных силах. Первое ненулевое измерение анапольного момента, проведенное в Боулдере, Колорадо 2 года назад, поставило вопрос, насколько хорошо можно теоретически рассчитать величину анапольного момента. Поскольку спины нуклонов остова в ядре складываются в ноль, то основной вклад в анапольный момент ядра дает нечетный внешний нуклон. Однако, из-за взаимодействия нечетного нуклона с остальными частицами, приводящего к поляризации четного остова, возникает существенная поправка к анапольному моменту. Основная проблема для таких расчетов -- необходимость учесть большое число базисных состояний. Настоящая работа не имеет аналогов в отношении учета различных многочастичных эффектов. В работе использовано все пространство одночастичных состояний, включая непрерывный спектр. В ней были рассмотрены также вклады в анапольный момент от взаимодействий, зависящих от скорости. Еще один важный эффект, который впервые учтен в работе, -- влияние спаривания на эффекты поляризации. В этом подходе был рассчитан анапольный момент для широкого круга ядер.

### *Источник квазимонохроматических X-лучей, базирующийся на переходном излучении*

Рассмотрено переходное излучение (ПИ) ультрарелятивистских частиц. Показано, что проведя коллимацию переходного излучения от стопки периодически расположенных  $N$  пластинок, можно получить спектральное распределение ПИ в форме пика, положение которого  $\omega_1$  зависит от толщины пластинок радиатора и плазменной частоты вещества пластинки, но не зависит от энергии начального электрона. Параметры радиатора должны быть выбраны надлежащим образом, и они в определенном смысле противоположны тем, которые используются детекторах ПИ. Высота и ширина пика зависят от угла коллимации  $\theta_c$ . Высота пика при данном  $\theta_c$  пропорциональна  $N$ . Подбирая параметры можно создать источник X-лучей с желаемой энергией и довольно хорошей монохроматичностью. Предлагаемый радиатор имеет некоторые общие черты с ондуляторным излучением.

### *Квазиклассическая функция Грина во внешнем поле и процессы рассеяния на малые углы*

Получено представление для квазиклассических функций Грина уравнений Дирака и Клейна-Гордона с учетом первой исчезающей поправки в произвольном локализованном потенциале, не обладающем, вообще говоря, сферической симметрией. С ее помощью найдено решение этих уравнений в приближении, аналогичном приближению Фарри-Зоммерфельда-Мауэ. Показано, что квазиклассическая функция Грина не сводится к функции Грина,

полученной в приближении эйконала, и имеет более широкую область применимости. Это иллюстрируется на примере вычисления амплитуды рассеяния заряженной частицы на малые углы и амплитуды дельбрюковского рассеяния вперед. Для амплитуды рассеяния заряженной частицы в потенциале, не обладающем сферической симметрией, найдена поправка, пропорциональная углу рассеяния. Получена реальная часть амплитуды дельбрюковского рассеяния вперед в экранированном кулоновском потенциале.

## РАЗВИТИЕ МЕТОДА ВСТРЕЧНЫХ ПУЧКОВ:

### *Линейный ускоритель для инжекционного комплекса ВЭПП-5*

В 1999 году смонтирована и включена в работу первая очередь линейного ускорителя электронов инжекционного комплекса ВЭПП-5 на энергию электронов до 180 МэВ и производительностью  $10^{12}$  электронов в секунду. На ускоряющей структуре получен проектный темп ускорения (25 МэВ/м). Разработана технология изготовления мощных СВЧ нагрузок на импульсную мощность до 120 МВт и среднюю мощность до 5 кВт. Проведены успешные испытания такой нагрузки. Разработан и изготовлен неразрушающий однопролетный датчик – измеритель профиля плотности ускоряемого сгустка с пикосекундным разрешением.



Рис. 4 - Часть ускоряющей структуры линейного ускорителя перед пайкой в Экспериментальном производстве ИЯФ.

### *Комплекс ВЭПП-3 – ВЭПП-4М*

На накопителе ВЭПП-3 круглосуточно ведутся эксперименты многочисленных групп из институтов СО РАН и ряда других организаций на пучках синхротронного излучения, а также продолжается с существенно увеличенной светимостью эксперимент "ДЕЙТОН" - изучение электромагнитных свойств дейтрона в упругом и неупругом рассеянии электронов на поляризованной внутренней дейтронной мишени.

### *Комплекс ВЭПП-2М*

В 1999 году накопитель ВЭПП-2М продолжал набор статистики с детекторами СНД и КМД-2 в диапазоне энергий от  $2 \times 300$  до  $2 \times 700$  МэВ.

Обработка ранее полученных данных с высокой достоверностью показала наличие целого ряда ранее не наблюдавшихся адронных резонансов в электрон-позитронных взаимодействиях. К сожалению, кривые возбуждения этих резонансов частично лежат в области энергий выше ВЭПП-2М, где суммарный интеграл светимости, накопленный на всех коллайдерах мира, на порядок меньше набранного на ВЭПП-2М в его области энергий. Это обстоятельство не позволяет определить параметры новых резонансов с необходимой точностью. В то же время знание адронных сечений в области энергий до  $2 \times 1000$  МэВ является решающим для лучшего понимания многих явлений физики высоких энергий.

В связи с этим в Институте разработан физический проект накопителя ВЭПП-2000 на энергию до 2 ГэВ в системе центра масс, который должен заменить ВЭПП-2М. При этом вся система воспроизводства пучков комплекса ВЭПП-2М сохраняется в неизменном виде, максимально используются существующие источники питания, кабельные трассы, система

автоматизированного управления и т.д. И, что особенно важно, расположение и конструкция нового накопителя позволяет вести эксперименты с существующими детекторами СНД и КМД-2.

Магнитная структура ВЭПП-2000 основана на разработанной в лаборатории концепции круглых пучков, которая значительно ослабляет ограничение светимости из-за эффектов электромагнитного взаимодействия встречных сгустков. Расчетная светимость нового накопителя достигает  $1 \times 10^{32} \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1}$  на энергии 1 ГэВ и почти на порядок превышает светимость ВЭПП-2М в его диапазоне энергий.

#### *Однопролетный датчик положения пучка*

В рамках международного сотрудничества по проблеме развития предложенного в ИЯФ нового направления в ускорительной технике - линейных коллайдеров - разработан однопролетный датчик положения пучка со сверхвысоким разрешением в 0.15 микрона. Система датчиков установлена на испытательном стенде в Брукхейвенской национальной лаборатории (США), в ускорительном центре Германии (DESY), а также заказана Национальной лабораторией Японии (КЕК).

## ФИЗИКА ПЛАЗМЫ И УПРАВЛЯЕМЫЙ ТЕРМОЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ:

### Эксперименты на установке ГДЛ

На установке «Газодинамическая ловушка» в устойчивых режимах удержания проведены первые эксперименты с инъекцией мощных дейтериевых пучков, в которых наблюдается заметный выход термоядерных нейтронов. Как и ожидалось, плотность нейтронного потока имеет острые пики вблизи точек остановки быстрых захваченных дейтронов (увеличение потока примерно в 10 раз по сравнению с центром установки). Этот результат подтверждает ранее полученные данные о распределении быстрых частиц. Полный нейтронный поток достигает величины  $7 \cdot 10^9$  н/сек.

Проведены первые успешные эксперименты по исследованию влияния радиального электрического поля на МГД устойчивость двухкомпонентной плазмы.

Полученные на установке экспериментальные результаты являются очередным шагом в развитии проекта создания интенсивного источника нейтронов на основе открытой плазменной ловушки.

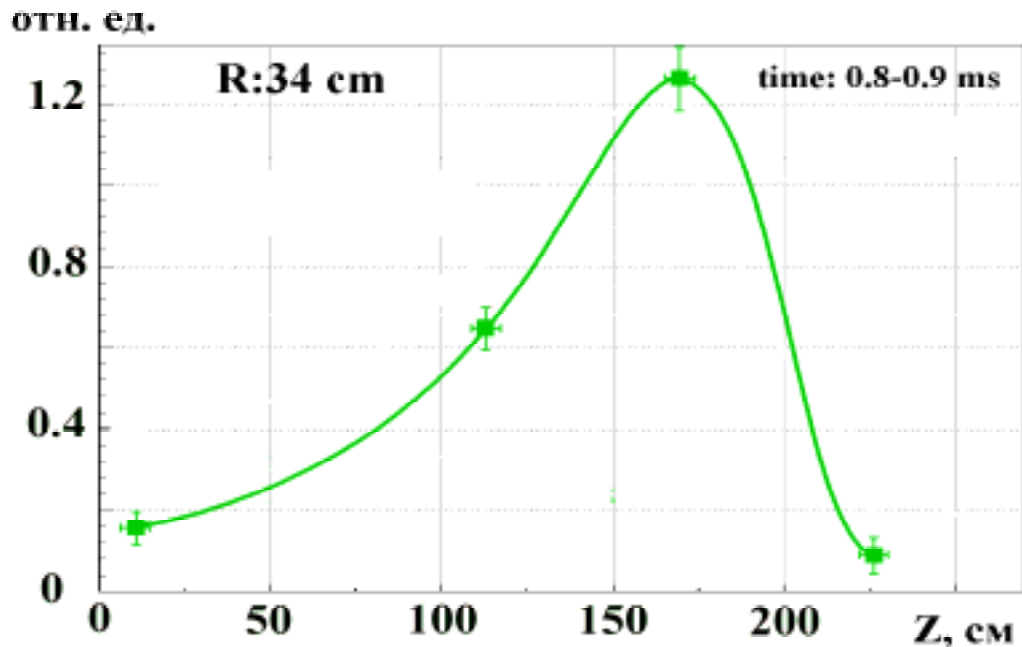


Рис.3 Распределение потока нейтронов вдоль оси установки ГДЛ

### *Исследование сильной ленгмюровской турбулентности в магнито-активной немаквелловской плазме на установке ГОЛ – М*

В области пространственных масштабов ленгмюровской турбулентности, содержащей более  $\frac{3}{4}$  всей плотности энергии турбулентности, проведены непосредственные измерения динамики плотности плазмы и не обнаружены локальные динамические понижения глубже, чем 20% от основной плотности плазмы. С учётом этого факта и на основе анализа измеренных ранее спектров ленгмюровских и ионно-звуковых колебаний, а также функции распределения плазменных электронов, предложен новый, альтернативный волновому коллапсу, механизм переноса энергии в сильной ленгмюровской турбулентности в немаквелловской, неизотермичной магнитоактивной плазме. Важную роль в этом механизме играет замедление ленгмюровских волн при рассеянии на коротковолновых ионно-звуковых колебаниях. Существенно, что указанный режим ленгмюровской турбулентности до настоящего времени подробно не исследовался экспериментально и остаётся, практически, недоступен для аналитической теории и численного моделирования в силу его сложности.

### *Установка ГОЛ-3-II*

В 1999 году на установке ГОЛ-3-II проведена модернизация с целью оптимизации параметров нагревающего сильноточного РЭП и улучшения термоизоляции нагретой плазмы от материальных торцов пробочной магнитной ловушки (длина 12м, поле в пробках 10Тл, поле однородной части 5Тл). Ранее торцы плазменного столба опирались на твердотельные электроды, и продольная электронная теплопроводность приводила к быстрому (масштаба 1мкс) остыванию плазмы после окончания инжекции РЭП (длительность пучка около 10 мкс). Используя в качестве электродов плотные плазменные сгустки и, тем самым подавив сток энергии вдоль магнитного поля, удалось поднять энергетическое время жизни нагретой плазмы на порядок величины. Этот результат открывает путь для получения плотной плазмы с горячими ионами в результате ее турбулентного нагрева сильноточными РЭП.

### *Установка ЭЛМИ*

Впервые продемонстрирована работоспособность двумерно распределенной обратной связи в генераторах электромагнитного излучения. Исследования такого нового механизма положительной обратной связи ведутся на установке ЭЛМИ на основе использования двумерного планарного брэгговского резонатора, который установлен в мазере на свободных электронах с релятивистским пучком (1 МэВ /4 кА /5 мкс) ленточной геометрии (сечение 3x140мм). В результате экспериментов в СВЧ-импульсе микросекундной длительности достигнут рекордный для миллиметрового диапазона уровень энергии масштаба 100 Дж за импульс на частоте 75 ГГц с узким спектральным интервалом.

### *Диагностический инжектор нейтральных атомов*

Для диагностики плазмы в крупных термоядерных установках разработан источник атомов гелия энергией до 50 кэВ с током до 0.5 эквив. А и длительностью до 10 сек. на основе высокочастотного плазменного эмиттера. При необходимости пучок может быть модулирован с частотой до 500 Гц. Расходимость пучка – менее 0.7 град. (при энергии 50 кэВ).

Для диагностики плазмы в установках меньшего масштаба разработан источник атомов водорода (гелия) с длительностью импульса 3 –5 мсек, током пучка до 4 эквив. А и энергией 30 кВ.

Источники установлены Институтом на крупных термоядерных установках Германии, США, Швейцарии с целью проведения совместных работ.

## СИНХРОТРОННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ И ЛАЗЕРЫ НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ

### *Вигглер с рекордными в мире параметрами*

В 1999 году была завершена работа по созданию сверхпроводящего вигглера с полем 10 Тесла. В его конструкции была разработана и успешно опробована технология изготовления сильнополевых катушек из ниобий-оловянного провода, использовано много других высокотехнологических новшеств (низкотемпературные холодильные машины вместо жидкого азота для охлаждения тепловых экранов, высокотемпературные керамические сверхпроводники в качестве тоководов, сверхпроводящие тепловые ключи, а также реконденсоры жидкого гелия).

Этот вигглер с рекордными в мире параметрами будет установлен на накопитель SPring-8 (Япония), имеющем энергию 8 ГэВ, для генерации синхротронного излучения с энергией фотонов более 1 МэВ.

Создание вигглера финансировалось МНТЦ в рамках проекта генерации ярких пучков медленных позитронов с помощью синхротронного излучения.

### *Новые рентгеновские детекторы*

В 1999 году был завершён этап создания нового поколения однокоординатных детекторов ОД-3 и двухкоординатных детекторов ДЕД-5.

Однокоординатный безпараллаксный детектор ОД-3 имеет рекордные параметры по быстродействию (10 МГц), высокая эффективность регистрации квантов получена без потери пространственного разрешения (0,2 мм). Использование ОД-3 открыло новые возможности для изучения кинетики быстропротекающих структурных изменений в микросекундном диапазоне времени. Изготовлено три детектора ОД-3: один детектор работает на накопителе ВЭПП-3, второй – на Фотонной Фабрике (Tsukuba, Japan), третий - на SPring-8 (Химеджи, Япония).

Двухкоординатный детектор ДЕД-5 имеет размер  $384 \times 384$  мм<sup>2</sup> при шаге проволочек 1,5 мм, быстродействие – 5 МГц. Детектор имеет два рабочих режима: инкрементный и покадровый. Кроме координат, записывается также время события и восстановленная энергия кванта.

Детектор установлен на станции «Энергодисперсионная дифрактометрия» накопителя ВЭПП-4.

### *Новый экспериментальный метод*

В 1999 году сотрудниками Института катализа СО РАН разработан метод определения структуры поверхности наночастиц, используя данные EXAFS молекул-зондов, адсорбированных на поверхности этих наночастиц. Для ряда конкретных задач в качестве зонда использована адсорбция молекул селеноводорода. Так, для наночастиц никелевых металлических катализаторов синтеза волокнистого углерода путём разложения метана этим способом установлена структура грани, на которой происходит разложение метана.

### *Создание новых технологий*

В 1999 году сотрудниками ИХТТиМС СО РАН методом малоуглового рассеяния с использованием синхротронного излучения в различных температурных диапазонах исследован *in situ* процесс «золь-гель» перехода циркон-алюминиевых золь и процесс кристаллизации полученных ксерогелей из аморфного в кристаллический продукт. Использование «золь-гель» технологии позволяет получить керамику с размерами кристаллов меньше

одного микрона путём гомогенизации всей системы на атомарном уровне. В конечном продукте нет не прореагировавших исходных компонент, что резко улучшает свойства керамики и делает возможным получение очень мелкого керамического порошка.

*Мощный ЛСЭ для Центра фотохимических исследований*

В 1999 году завершены работы по созданию инжектора электронов, который позволяет получать электронный пучок с пиковым током 8 А, длительностью 200 пс и частотой повторения до 22 МГц.

Изготовлены и испытаны восемь резонаторов из шестнадцати, необходимых для ускоряющей секции. Ведётся монтаж ВЧ-генератора мощностью 1,2 МВт.

## ОБОРУДОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ:

### *Конверсия тетрахлорсилана*

Совместно с Институтом неорганической химии СО РАН на промышленном ускорителе ЭЛВ-6 проведены первые эксперименты по электронно – лучевой технологии конверсии тетрахлорсилана в трихлорсилан в рамках программы получения сверхчистого кремния. ИЯФ и ИНХ включены в качестве соисполнителей в Государственную программу «Сверхчистый кремний».

### *Лучевая технология рудоподготовки*

Совместно с Институтом горного дела СО РАН (лаборатория обогащения полезных ископаемых и экологических технологий) на промышленном ускорителе ИЛУ проведено исследование по интеграционному проекту СО РАН «Физико-химические основы интенсификации процессов рудоподготовки, обогащения и переработки минерального сырья с использованием энергетических воздействий (ускоренные электроны)». Установленные в процессе работы закономерности направленных изменений свойств минералов под действием пучка ускоренных электронов позволяют разработать новые технологии рудоподготовки и обогащения минерального сырья.

### *Литиевая линза*

Работы по повышению эффективности получения антипротонов в антипротонном коллайдере Национальной лаборатории им. Ферми (США) включают в себя замену собирающей антипротоны цилиндрической линзы с твердым литием на линзу с жидким литием, прокачиваемым через систему.

В рамках сотрудничества между ИЯФ и ФНАЛ разработана и изготовлена цилиндрическая линза диаметром 2 см и длиной 15 см с прокачиваемым жидким литием и системой питания, обеспечивающей запитку линзы импульсами тока амплитудой до 0.7 МА, соответствующей полю на поверхности линзы до 13 Тесла. Разработана система прокачки жидкого лития, включающая в себя электромагнитный насос оригинальной конструкции, устройство создания и контроля в литии статического давления величиной до 300 атм., систему нагрева и компьютерного контроля температуры литиевого контура и скорости прокачки лития, а также теплообменник на основе жидкометаллического теплоносителя из галлий-индиевого сплава.

### *Проект ускорительного комплекса для нейтрон-захватной терапии*

Разработан проект ускорительного комплекса для генерации нейтронного пучка для проведения нейтрон-захватной терапии и терапии быстрыми нейтронами в условиях госпиталя. Проект прошел международную экспертизу и одобрен для начального финансирования по программе МНТЦ.

### *Новый детектор для МЦРУ «Сибирь»*

На основе многоканальной ионизационной камеры сконструирован детектор, предназначенный для использования в установке МЦРУ «Сибирь» вместо многопроволочной пропорциональной камеры, что улучшает пространственное разрешение, быстродействие, надежность установки и снижает дозу облучения пациентов. Изготовлено два образца детектора, с которыми ведутся тестовые измерения.

### *Электрофизическое оборудование*

- В рамках сотрудничества России с Европейским Центром Ядерных Исследований (ЦЕРН) разработана технология и освоено массовое производство прецизионных электромагнитов для строящегося комплекса протон-протонных встречных пучков (LHC) с энергией до 8 ТэВ. Производство и еженедельная поставка магнитов налажены в кооперации с заводами Челябинска, Череповца, С.-Петербурга и Новосибирска. Полный вес поставляемых в ЦЕРН электромагнитов составит около 6 тыс. тонн.
- Разработан и изготовлен уникальный ЯМР-измеритель постоянных магнитных полей с напряженностью до 10 Тесла, работающий при криогенных и комнатных температурах.
- Разработаны и изготовлены новые высокотехнологичные биметаллические резонаторы с рабочей частотой 180 МГц и рабочим напряжением до 900 кВ при непрерывном режиме работы.
- Разработаны и изготовлены мощные модульные ВЧ генераторы с рабочей частотой 180 МГц и выходной мощностью до 500 кВт при непрерывном режиме работы.
- Разработаны и изготовлены прецизионные источники питания постоянного тока с выходной мощностью до 200 кВт с использованием современных устройств преобразовательной техники и современной элементной базы.
- Разработаны автоматизированные системы сбора данных и системы управления, легко интегрируемые в системы управления крупных установок известных физических центров США, Европы, Японии и Кореи, с которыми ИЯФ ведет совместные работы.