

# ЛАБОРАТОРИЯ НЕЙТРОННОЙ ФИЗИКИ им. И. М. ФРАНКА

Научная программа Лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка в 2003 г. охватывала пять тем Проблемно-тематического плана научно-исследовательских работ и международного научно-технического сотрудничества ОИЯИ. Она была направлена на получение новых результатов по физике конденсированных сред (тема «Нейтронные исследования структуры и динамики конденсированных сред», 07-4-1031-99/2003, руководители В. Л. Аксенов и А. М. Балагуров); по нейтронной ядерной физике (тема «Нейтронная ядерная физика — фундаментальные и прикладные исследования», 06-4-1036-2001/2004, руководители В. И. Фурман и В. Н. Швецов). Для обеспечения физических исследований осуществлялось развитие и создание базовых установок лабора-

тории ИБР-2 (тема «Развитие и совершенствование комплекса ИБР-2», 07-4-851-87/2007, руководители В. Д. Ананьев и Е. П. Шабалин) и ИРЕН (тема «Создание установки ИРЕН (проект ИРЕН)», 06-4-0993-94/2004, руководители В. И. Фурман и И. Н. Мешков), а также развитие комплекса спектрометров ИБР-2 (тема «Развитие комплекса спектрометров ИБР-2 и информационно-вычислительной инфраструктуры», 07-4-1012-96/2003, руководители А. В. Белушкин и В. И. Приходько).

Актуальные вопросы исследований, проводимых в кооперации с ведущими ядерными центрами, были рассмотрены на XI Международном семинаре по взаимодействию нейтронов с ядрами и XII Международной конференции по избранным проблемам современной физики.

## ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД

**Дифракция.** На ФДВР получены новые экспериментальные результаты по магнитной и ядерной структурам манганитов с колоссальным магнетосопротивлением. В частности, детально были изучены две серии образцов  $(La_{1-y}Pr_y)_{0,7}Ca_{0,3}MnO_3$  (LPCM) в широком интервале концентраций Pr, каждый из которых был обогащен изотопом кислорода  $^{16}O$  или  $^{18}O$ . Выявлено качественное совпадение фазовых диаграмм этих серий, но со сдвигом по концентрации Pr. Это означает, что наблюдавшееся ранее сильное влияние изотопического замещения на макроскопические свойства LPCM в области смешанного металлического и диэлектрического состояний является в основном перколяционным эффектом, а не следствием появления принципиально нового состояния [1]. С помощью дифракции нейтронов исследованы кислородные и фторированные слоистые

оксиды марганца  $Sr_2GaMnO_{5-x}F_{1+x}$  со структурой типа браунмиллерита. В этих соединениях количество ионов  $Mn^{3+}$  и  $Mn^{4+}$ , влияющее на степень проявления механизма «двойного обмена», зависит от содержания кислорода и фтора и может быть легко изменено. Тип магнитного упорядочения в браунмиллеритах определяется как структурой немагнитного буферного слоя  $Ga(O,F)_6$ , так и орбитальной конфигурацией Mn. Определены кристаллическая и магнитная структуры соединения  $Sr_2GaMnO_{4,8}F_{1,2}$ , в котором средний заряд Mn составляет +3,8 (рис. 1).

На дифрактометре для высоких давлений ДН-12 проведено исследование структуры псевдобинарной системы халькогенидов ртути  $HgSe_{0,7}Se_{0,3}$  при давлениях до 9 ГПа. Предложена феноменологическая модель структурного фазового перехода из кубической структуры типа сфалерита в гексагональную

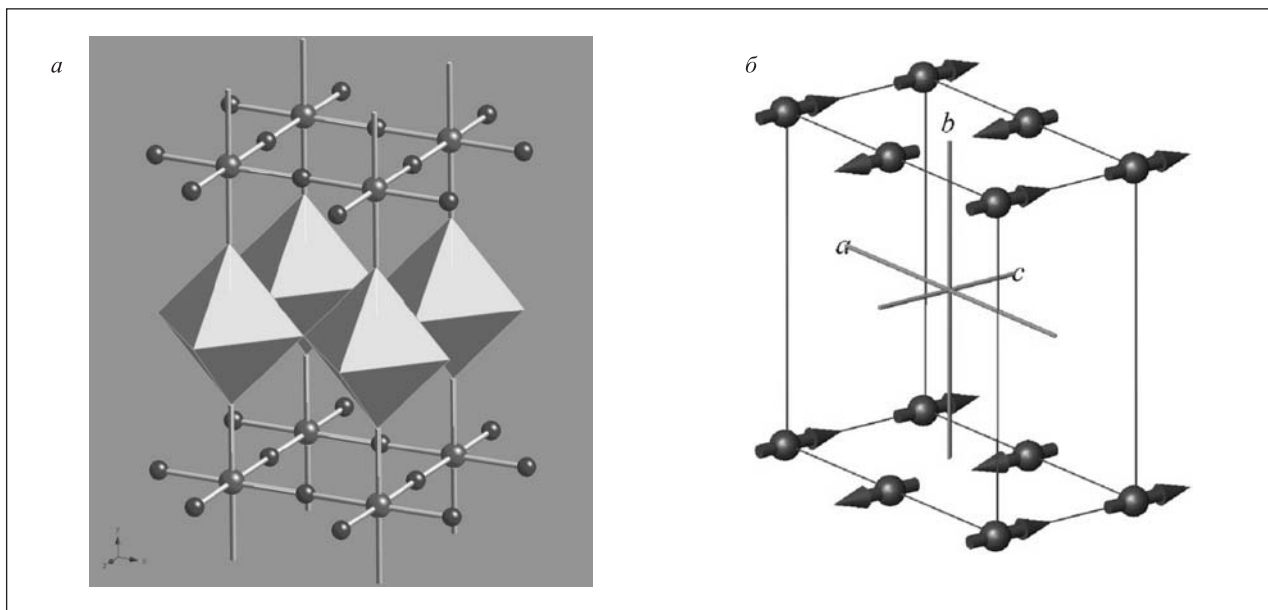


Рис. 1. *a*) Кристаллическая структура  $\text{Sr}_2\text{GaMnO}_5\text{F}_1$ . Показаны плоскости  $\text{MnO}_2$  и октаэдры  $\text{Ga}(\text{O},\text{F})_6$ . *б*) Спиновая конфигурация в  $\text{Sr}_2\text{GaMn}(\text{O},\text{F})_6$ . Показаны только ионы марганца

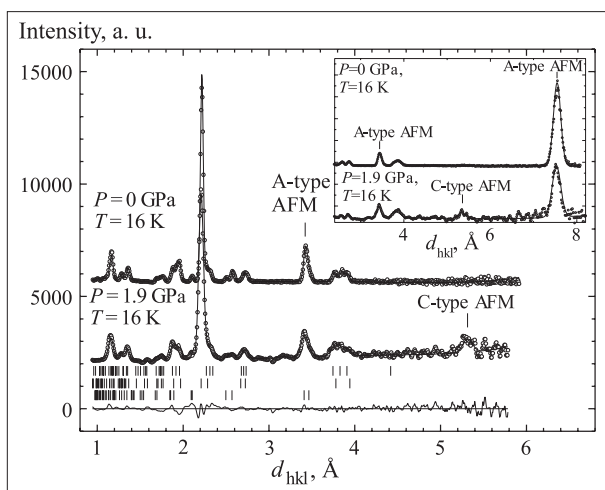


Рис. 2. Нейтронограммы  $\text{Pr}_{0,44}\text{Sr}_{0,56}\text{MnO}_3$ , полученные при  $P = 0$  и  $1,9$  ГПа,  $T = 16$  К. Данные обработаны с помощью метода Ритвельда. Наблюдается сосуществование начальной АФМ ромбической фазы (тип А) с индуцированной давлением АФМ тетрагональной фазы (тип С)

структуру типа киновари, который наблюдается в данном соединении под давлением. Проведено исследование влияния высоких давлений в диапазоне до 4 ГПа и низких температур в диапазоне 16–300 К на атомную и магнитную структуру  $\text{MnAs}$ . Установлено существование новой орторомбической магнитной фазы  $\text{MnAs}$  в области высоких давлений и низких температур. Проведено исследование атомной и магнитной структуры манганитов  $\text{Pr}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$

( $x = 0,50; 0,56$ ) в диапазоне давлений 0–5 ГПа и температур 16–300 К (рис. 2). В области высоких давлений и низких температур в  $\text{Pr}_{0,5}\text{Sr}_{0,5}\text{MnO}_3$  и  $\text{Pr}_{0,44}\text{Sr}_{0,56}\text{MnO}_3$  обнаружено возникновение новой тетрагональной фазы, которая сосуществует с исходной орторомбической фазой. В индуцированной давлением тетрагональной фазе  $\text{Pr}_{0,5}\text{Sr}_{0,5}\text{MnO}_3$  при низкой температуре возникает антиферромагнитный порядок С-типа, тогда как в  $\text{Pr}_{0,44}\text{Sr}_{0,56}\text{MnO}_3$  признаков магнитного порядка не обнаружено [2].

**Поляризованные нейтроны и нейтронная оптика.** На рефлектометре РЕМУР измерено пространственное распределение намагниченности на границе бислоя  $\text{V}(650 \text{ \AA})/\text{Cr}$ , где обнаружено наличие эффективного ферромагнитного слоя. Проанализированы данные рефлектометрических измерений профиля намагниченности в периодических  $\text{Fe}/\text{V}$ -структурах для определения типа магнитного упорядочения атомов ванадия вблизи границ раздела. Для анализа экспериментальных данных разработана программа расчета коэффициентов отражения с включением конкретного типа гауссовой неидеальности структуры границ раздела [3].

**Неупругое рассеяние нейтронов.** На спектрометре НЕРА-ПР проведена серия экспериментов по дифракции и неупругому рассеянию нейтронов на установке по исследованию фазовых переходов и динамики твердого мезитилена. На основе полученных результатов выполнены теоретические расчеты его замедляющих свойств. Показано, что твердый мезитилен может существовать в разных кристаллогра-

фических модификациях в зависимости от степени охлаждения и термической обработки. Получена и проанализирована обобщенная функция плотности фоновых состояний различных фаз мезитилена.

**Малоугловое рассеяние нейтронов.** На установке ЮМО проведены комплексные исследования ряда наноразмерных систем с использованием малоуглового рассеяния нейтронов. В частности, проведены и проанализированы эксперименты по малоугловому рассеянию нейтронов на коллоидных растворах фуллерена C60 в воде. Определены характерные параметры коллоидных частиц (размер, полидисперсность, плотность и др.) и их зависимость от концентрации фуллерена. На основании полученных результатов и данных дополняющих методов предложен ряд моделей частиц.

Повторены эксперименты по малоугловому рассеянию нейтронов на растворе C60/сероуглерод, которые подтвердили присутствие кластерных образований в растворе. Из кривых рассеяния получены функции распределения кластеров по размерам и определено влияние на них температуры и концентрации фуллерена. В рамках теории нуклеации рассмотрены уравнения кинетического образования кластеров в данной системе. Показано, что ряд простых выражений для энергии связи в зависимости от числа частиц в кластере, в частности, отвечающих капельной модели кластера, не могут описать кластерное состояние фуллерена в сероуглероде при использовании теории нуклеации.

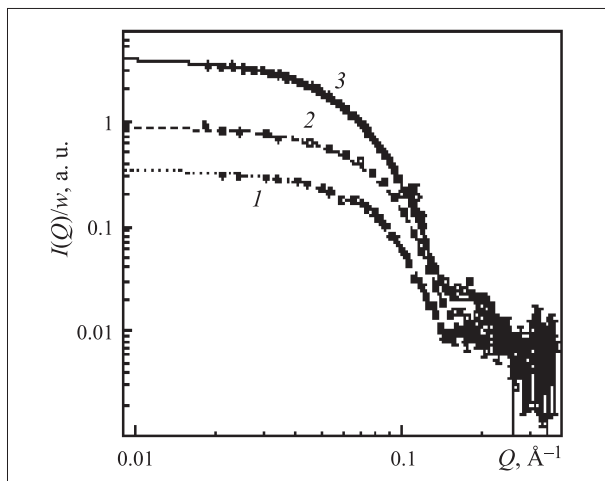


Рис. 3. Кривые малоуглового рассеяния для дендримеров G(3)7 в хлороформе-d (1) и бензоле-d6 (2), и для дендримеров G(4)7 бензоле-d6 (3).  $w = 4$  весовых % (1, 2) и 1 весовой % (3)

В рамках исследования феррожидкостей предложен простой метод тестирования промышленных образцов феррожидкостей на основе анализа интенсивности малоуглового рассеяния нейтронов. Метод позволяет с хорошей достоверностью выявлять агрегацию в феррожидкостях и судить об их стабильности при различных магнитных нагрузках [4].

Получены основные параметры поликарбоксилановых дендримеров с различной молекулярной архитектурой (рис. 3). При этом установлено, что растворитель проникает внутрь дендримерной структуры и его количество доходит до 30 % по объему [5]. Изучены аналитические модели для определения параметров структуры белка ResA, образующего с ДНК филаментные комплексы. Показано, что структура филаментов формируется двумя ResA-белками. Исследовано влияние н-декана на толщину липидного бислоя в униламеллярной везикуле. Прецизионные измерения кривых малоуглового рассеяния нейтронов позволили, в частности, обнаружить, что толщина бислоя возрастает на 2,4  $\text{\AA}$ . Кроме того, эти данные в совокупности с результатами экспериментов по дифференциальной сканирующей калориметрии позволили объяснить немонотонную температурную зависимость структурных параметров полиэтиленоксид/полипропиленоксидных сополимеров в водных растворах.

**Прикладные исследования.** В рамках изучения проблемы «Физика очага землетрясений и физика разрушения горных пород» проведены теоретические и экспериментальные исследования аномальных физических свойств минералов и горных пород при высоких температурах и давлениях. На экспериментальном комплексе SKAT–TKOC проведены измерения структуры, текстуры, а также упругих, деформационных и тепловых свойств поликристаллического кварцита при одновременном воздействии деформирующего усилия и температуры от 20 до 620  $^{\circ}\text{C}$ , позволившие проанализировать температурную зависимость внутренних решеточных напряжений. Для выяснения природы анизотропии сейсмических волн на разных глубинах литосферы впервые проведено комплексное исследование пород с разных глубин литосферы при высоких всесторонних давлениях, а также и на установке трехосного сжатия с температурой до 600  $^{\circ}\text{C}$ . Установлено, что основным фактором, контролирующим анизотропию упругих свойств оливиносодержащих мантийных пород при высоких всесторонних давлениях (выше 200 МПа), является кристаллографическая текстура оливина. Определено влияние текстуры формы (ориентированные микротрещины, поры, межзеренные границы и т. п.) на упругую анизотропию оливиновой породы [6].

Научная программа, реализуемая на установке «Эпсилон»/SKAT, была сконцентрирована на следующих направлениях: исследование приложенных и остаточных напряжений в поликристаллических материалах (горные породы и другие материалы); текстурный анализ материалов (в основном геологических) и получение анизотропных физических свойств горных пород по кристаллографическим текстурам. Исследуемыми объектами являлись композиции доломита и ангидрида, мраморные строительные материалы, горные породы из Восточных Альп и др. [7].

На дифрактометре ФДВР продолжались измерения остаточных напряжений в биметаллических (закаленная сталь и сплав циркония) конструкциях, используемых в нейтронных реакторах РБМК. Работа выполнялась совместно с исследовательскими институтами Минатома РФ. На этой же установке изучались материалы на основе сплава TiNi при внешней неаксиальной нагрузке и разной температуре. Получена зависимость температур мартенситного перехода от величины нагрузки. Наблюдалось образование и рост аустенитной фазы с соответствующим распределением напряжений между двумя фазами, которое зависело от внешней нагрузки. Обнаружена разность между параметрами решетки мартенситной фазы в свежеприготовленных и эксплуатируемых образцах [8].

Посредством дифракции нейтронов на установке ДИН-2ПИ исследована структура жидких сплавов свинец/калий. Анализ нейтронограмм в зависимости от относительной концентрации свинца указал на отсутствие специфических Zintl-кластеров в сплавах. Это значит, что изучаемый сплав обладает значительно меньшими коррозионными свойствами, чем чистый свинец, и может рассматриваться как возможный кандидат на высокоэффективное охлаждающее вещество для атомных электростанций [9].

**Главные методические результаты.** Проведены испытания новой головной части спектрометра РЕМУР на нейтронном пучке. Испытания подтвердили правильность выбранной концепции новой головной части с двумя различными источниками нейтронов. Разработаны физические обоснования и технические проекты модернизации платформ поляризаторов и защиты детектора спектрометра и создания новых подвижных коллиматоров.

Исследовано отражение нейтронов от слоистых спин-прецессоров. Создана новая магнитная система, которая позволила реализовать спин-прецессор с вращающимися токовыми плоскостями. Исследован спин-прецессор на основе двух токовых  $\pi/2$ -ротаторов. Экспериментально показано, что фаза прецессии спина нейтронов изменяется в зависимости от угла расходимости пучка и угла поворота токовых плоскостей ротаторов. Получено, что с этим прецессором можно использовать сечение пучка нейтронов  $10 \times 25$  см и исследовать объекты с корреляционной длиной в интервале  $10^2 - 10^4$  Å [10].

Изучена возможность создания и разработан эскизный проект рефлектометра поляризованных нейтронов с вертикальной плоскостью рассеяния на втором пучке спектрометра «Рефлекс». Предполагается, что разрешение установки должно составлять несколько процентов; рабочий интервал длин волн 1–10 Å; средняя по спектру поляризация падающего пучка на уровне не ниже 95 %. Основными объектами исследований для нового рефлектометра являются пленки на поверхности жидкостей.

На спектрометре «Рефлекс-П» проведена отладка методики измерений с поляризованными нейтронами с использованием ларморовской прецессии спина нейтрона, основанной на использовании токовых фольг. Ларморовская прецессия в комбинации с методом времени пролета является новым направлением, которое существенно расширяет экспериментальные возможности установки.

На дифрактометре для высоких давлений ДН-12 разработана и испытана коллимационная система для детекторов. При этом отношение эффект–фон увеличилось в три раза. Разработан проект охлаждаемого бериллиевого фильтра для проведения экспериментов по неупругому рассеянию нейтронов при высоких давлениях.

На установке «Эпсилон» отъюстирована система из девяти радиальных коллиматоров, каждый из которых может быть оснащен девятью детекторами. Установлены 42 новых детектора, таким образом, полное число детекторов доведено до 78. В ходе измерений дифракционные спектры, регистрируемые детекторами, суммируются посредством временной фокусировки, которая основана на вариациях ширины канала в зависимости от позиции детектора. Все необходимые вычисления выполняются в параллельном режиме. Для улучшения качества экспериментального определения упругих свойств материалов исследовано влияние количества зерен в поликристаллическом образце и распределения зерен по объемам на точность получаемых параметров упругих свойств. Предложенная новая модель расчета упругих свойств поликристаллов применена в исследованиях важных технологических материалов: меди, графита, циркония и др.

На установке ЮМО начала эффективно действовать двухдетекторная система: расширены возможности систем окружения образца; успешно выполняется проект по созданию установки с магнитным полем; создан ряд новых программ обработки экспериментальных данных. Успешно развивается проект по созданию малоуглового рентгеновского дифрактометра [11].

На спектрометре ДИН-2ПИ проводились завершающие работы по созданию экспериментальной базы для нейтронно-физических исследований вещества в области температур до 3000 К. Нагрев образца до нужной температуры и поддержание ее на заданном уровне в процессе измерения осуществляется с помощью термостата TS-3000, устанавливаемого в вакуумной камере спектрометра. Термостат спроектирован и изготовлен в Румынии по техническому заданию ЛНФ и ГНЦ РФ ФЭИ, Обнинск. Проведены испытания термостата в рабочих условиях. Новые экспериментальные возможности для нейтронно-физического исследования вещества при температуре до 3000 К позволят активизировать изучение: атомной структуры и динамики перспективных реакторных материалов в условиях рабочих и

экстремальных температур ядерных энергетических установок; суперионных проводников с флюоритной структурой (типа  $\text{CaF}_2$ ) в области суперионного перехода; перспективных материалов для термоядер-

ных реакторов в области температур до 3000 К, особенностей атомной структуры и динамики жидкоталлических систем с примесями углерода и его модификаций в области высоких температур и др.

## НЕЙТРОННАЯ ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

В 2003 г. экспериментальная программа в области нейтронной ядерной физики в ЛНФ включала традиционные направления как фундаментальных, так и прикладных исследований, проводившихся на пучках ИБР-2 и ЭГ-5, а также в сотрудничестве с другими ядерными центрами России, Болгарии, Польши, Чехии, Германии, Республики Корея, Франции, США и Японии.

**Экспериментальные исследования.** В начале 2003 г. в течение двух циклов на первом пучке реактора ИБР-2 была завершена экспериментальная работа по выяснению природы эффекта нарушения пространственной четности при взаимодействии поляризованных тепловых нейтронов с ядрами свинца [12]. В результате проведенных исследований было показано, что нарушающий пространственную четность эффект вращения спина нейтрона может быть обусловлен изотопом  $^{207}\text{Pb}$ , а не изотопом  $^{204}\text{Pb}$ , как было получено ранее группой из ИТЭФ. Это основано на обнаружении в  $^{207}\text{Pb}$   $p$ -волнового резонанса, который может объяснить эффект нарушения четности.

На пучке 11-б реактора ИБР-2 завершен эксперимент по измерению анизотропии рассеяния нейтронов газообразным аргоном при давлении 50 атм, а также металлическими пластинами ванадия и кадмия [13]. Измерялось отношение интенсивностей рассеяния нейтронов в переднюю и заднюю полушару  $R = I(30^\circ)/I(150^\circ)$  для нейтронов с энергиями  $E = 0,002-0,07$  эВ. Для аргона наблюдалась отчетливая дифракционная картина, хорошо совпадающая с литературными данными по его структурному фактору. Ослабленная в 50 раз, эта картина привела к двум важным выводам: 1) даже при низком давлении дифракция — серьезное препятствие для надежного измерения длины  $n$ ,  $e$ -рассеяния  $b_{ne}$ ; 2) ситуация с дифракцией много лучше в области  $E > 0,1$  эВ, где и следует делать измерения. Часто используемый в качестве изотропного рассеивателя ванадий впервые проявил небольшую ( $R = 0,97-1,06$ ) анизотропию, которая предсказывалась в работе J. Mayers (Nucl. Instr. Meth. 1984. V. 221. P. 609). Измерения с кадмием показали его заметную ( $\sim 10^{-3}$ ) отражательную способность, которая хорошо описывается по-

лученной простой формулой. Величина  $R$  порядка 0,02–0,03.

В 2003 г. была завершена обработка совместного (Дубна–Карлсруэ) эксперимента по измерению сечения нейтронного захвата при энергиях нейтронов, характерных для звездных условий, на радиоактивном изотопе  $^{147}\text{Pm}$ , представляющем важную точку ветвления на пути  $s$ -процесса [14]. С использованием новых данных проведен анализ ветвления  $s$ -процесса при  $A = 147, 148$ , получена оценка плотности нейтронов на стадии импульсного слоевого горения гелия в красных гигантах малых масс.

В рамках подготовки эксперимента по прямому измерению длины нейтрон-нейтронного рассеяния на импульсном реакторе ЯГУАР во ВНИИТФ (Снежинск) проведены расчеты фонов для нижней части экспериментального канала. В результате расчетов оптимизирована геометрия канала, коллиматоров и защиты под реактором, удовлетворяющая условию: число регистрируемых фоновых событий за вспышку не превышает 1 % от числа регистрируемых полезных событий. Установлено, что основной вклад в фон вносят быстрые нейтроны с энергиями от 100 кэВ до 5 МэВ. Силами международной коллаборации (ЛНФ, ВНИИТФ, Triangle University) при финансовой поддержке РФФИ, МНТЦ, Минатома РФ завершены работы по модернизации окружения реактора ЯГУАР: создана подреакторная шахта глубиной 10 м и проделаны отверстия в потолочных перекрытиях над реактором.

Продолжалась обработка полученной ранее экспериментальной информации о процессе каскадного  $\gamma$ -распада компаунд-состояний ядер с высокой плотностью уровней с помощью метода суммирования амплитуд совпадающих импульсов. В рамках этой программы к настоящему времени получены наиболее детальные и точные данные о свойствах возбужденных состояний сферического ( $^{118}\text{Sn}$ ) [15] и деформированного ( $^{185}\text{W}$ ) составных ядер практически до энергии связи нейтрона  $B_n$  в них. В форме предельно простых и максимально подходящих для определения наиболее вероятных значений плотности уровней и радиационных силовых функций спектров получена информация для более чем половины суммарной интенсивности всех возможных первич-

ных  $\gamma$ -переходов в обоих ядрах. Никакая иная методика эксперимента, известная в настоящее время, не может дать сопоставимой информации об аналогичных по параметрам ядрах в области выше энергии возбуждения — примерно 1–3 МэВ. Как и в ранее изученных ядрах, параметры каскадного  $\gamma$ -распада в области энергии возбуждения около половины энергии связи нейтрона как в  $^{118}\text{Sn}$ , так и  $^{185}\text{W}$  не могут быть воспроизведены без учета резкого изменения структуры ядра минимум в указанной области возбуждений. К такому выводу приводит не только наличие ступенчатой структуры в зависимости плотности уровней от энергии возбуждения около  $0,5B_n$ , но и весьма значительное увеличение суммарной каскадной заселяемости уровней ряда ядер ниже этой же энергии возбуждения. В рамках имеющихся разработок модельного описания плотности уровней теоретиками из Обнинска качественное объяснение наблюдаемых эффектов может быть получено в предположении о разрыве одной или нескольких куперовских пар нуклонов при эффективной энергии возбуждения деформированного ядра порядка 3 МэВ и несколько большей — в сферических ядрах области  $A = 100$ . С этим же связан переход ядра от возбуждений с доминирующими вибрационными компонентами волновых функций его уровней к доминированию многоквaziчастичных уровней.

**В области теоретической физики** были выполнены исследования по физике деления, фундаментальных свойств нейтрона и высоковозбужденных состояний компаунд-ядер.

В рамках нового подхода к описанию вынужденного деления, разработанного Барабановым и Фурманом, основанного на представлении спиральности и  $R$ -матричного формализма, завершен анализ экспериментальных данных о  $P$ -четных и  $P$ -нечетных угловых корреляциях осколков при делении резо-

нансными нейтронами [16]. Этот подход позволил описать интерференционные эффекты в дифференциальном сечении деления такие как анизотропию разлета осколков «вперед-назад» на поляризованном пучке нейтронов и их анизотропию «лево-право» на поляризованном пучке, а также анизотропию по спине — против спина, обусловленную вкладом нуклон-нуклонного слабого взаимодействия. Использование  $R$ -матричного формализма позволяет более полно и строго описывать вклад интерференции  $s$ - $p$ -резонансов в наблюдаемые угловые корреляции. При этом показана важная роль межрезонансной интерференции в энергетической структуре наблюдаемых эффектов. Это существенно отличает новый подход от упрощенного формализма Сушкова–Фламбаума, предложенного еще в 1982 г. В отличие от подхода Сушкова–Фламбаума структура несохраняющего четность сечения привязана к  $s$ -резонансам, соответственно и матричные элементы слабого взаимодействия своей суперпозицией входят в «примесную» делительную ширину  $s$ -резонансов.

**Прикладные исследования.** На пучке б-б реактора ИБР-2 с использованием прерывателя-монохроматора проведены измерения образцов-фильтров из конструкционных реакторных материалов Mo, Pb, Ti, W и Zr с целью измерения сечений рассеяния в тепловой области энергий нейтронов [17]. Проведен анализ времяпролетных спектров в области 0,1–200 кэВ для измерений Mo, Rh, Ho и W и получены полные, захватные сечения и пропускания с точностью 0,2–0,5 % (в пропусканиях) и 2–10 % (в сечениях). Для Nb, Mo и Pb в той же энергетической области определены коэффициенты резонансной блокировки в захватных сечениях и сечениях рассеяния. Полученные данные войдут в библиотеки ядерных данных, которые используются при расчете ядерных установок.

## НЕЙТРОННЫЕ ИСТОЧНИКИ

**Импульсный реактор ИБР-2.** В 2003 г. реактор ИБР-2 работал в соответствии с утвержденным графиком. На физический эксперимент отработано 681 ч в двух циклах. Работы по модернизации ИБР-2 продолжались по следующим направлениям:

- ПО-3 — главная задача года: на стенде ЛНФ выполнена контрольная сборка ПО-3 без кожуха; осуществлен пуск ПО-3 на воздухе до 360 об/мин (60 % от номинальных оборотов); проверен уровень вибраций; в НИКИЭТ (Москва) завершено изготовление кожуха; ведется контрольная сборка ПО-3 с кожухом.

- Новая топливная загрузка: в завершающей фазе на ПО «Маяк» находится изготовление твэлов; изготовлены и получены комплектующие детали для тепловыделяющих сборок (ТВС); начат проект в ГСПИ участка сборки твэлов в ТВС.
- Основное оборудование реактора: продолжалось изготовление нового корпуса реактора; продолжалась работа по выпуску конструкторской документации на откатные защиты, стационарные отражатели.
- СУЗ: заключен договор со СНИИП-

СИСТЕМАТОМ на разработку и изготовление электронной аппаратуры СУЗ; продолжалась разработка исполнительных механизмов СУЗ в НИКИЭТ.

- Гелиевая установка: завершена разработка новой ХГУ.

**Проект ИРЕН.** Основной задачей проекта ИРЕН в 2003 г. был демонтаж реактора ИБР-30, что является обязательным условием для получения разрешения на строительство установки ИРЕН. Дирекция ОИЯИ номинально выделила специальный грант (80 тыс. долл. США) на демонтаж реактора ИБР-30 и отдельный грант (50 тыс. долл. США) на сам проект.

Первый грант позволял в принципе выполнить данную задачу. Но, фактически, несмотря на большие усилия, направленные на выполнение специального приказа директора ОИЯИ и реализацию соответствующего плана-графика, демонтаж ИБР-30 не был закончен в 2003 г. Между тем, большинство пунктов плана-графика были выполнены (строительство здания 117/6 для хранения активированных элементов реактора завершено и проведено его техническое оснащение, все специальное оборудование, необходимое для демонтажа реактора, изготовлено и испытано, все контейнеры, предназначенные для транспортировки и хранения топливной загрузки реактора, изготовлены и получены, первый этап тренировки персонала завершен). Отсутствие некоторого дозиметрического оборудования и долги за строительство здания 117/6 не позволили нам

получить лицензию на эксплуатацию этого хранилища и его использование для некоторых операций с топливной загрузкой. Таким образом, демонтаж ИБР-30 может быть начат только летом 2004 г., если дозиметрическое оборудование будет оплачено, доставлено и установлено в первом квартале 2004 г. и до начала работ будет получена лицензия на эксплуатацию хранилища. Работы по демонтажу реактора разрешено проводить только в теплое время года. Важно отметить, что существующая лицензия на демонтаж ИБР-30 истекла 31.12.2003 г., поэтому сейчас мы отослали заявление на получение новой лицензии Госатомнадзора РФ.

Второй основной задачей проекта ИРЕН было завершение разработки утверждаемой части рабочего проекта установки. Она была выполнена с большой задержкой ГСПИ, Москва. Совсем недавно мы получили эту часть рабочего проекта, который необходимо согласовывать в соответствующих российских инстанциях. Начата деятельность по получению разрешения на размещение источника ИРЕН в ОИЯИ на базе полученного проекта. Но мы до сих пор не получили из НИКИЭТ конструкторской документации по размножающей мишени, необходимой для объявления тендера на изготовление корпуса этой мишени. Указанная документация практически готова, но она до сих пор не получена ОИЯИ из-за долгов по соответствующему контракту. Очень похожа ситуация и с техническим проектом АСКУ источника ИРЕН. Проект выполнен специальной московской организацией ОКСАТ НИКИЭТ в кредит.

## РАЗВИТИЕ КОМПЛЕКСА СПЕКТРОМЕТРОВ ИБР-2 И ИНФОРМАЦИОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Работы по теме в 2003 г. велись по следующим основным направлениям:

- создание нейтронных детекторов;
- развитие систем окружения образца;
- развитие систем сбора данных и сетевой инфраструктуры;
- текущая модернизация и эксплуатация комплекса спектрометров ИБР-2.

**Создание нейтронных детекторов. Газовые детекторы. Инфраструктура.** Выполнен большой объем работ по созданию технологической и электронной инфраструктуры для изготовления и тестирования детекторов:

- Завершается подготовка к сдаче в эксплуатацию чистого помещения. В нем уже ведутся некоторые работы по сборке элементов детекторов.

- Создан стенд для намотки анодных и катодных плоскостей нейтронных детекторов на основе многопроволочных пропорциональных камер (MWPC) и начато изготовление электродов для MWPC-детекторов с индивидуальным съемом информации с каждой нити и со считыванием информации с линий задержки.
- Собран электронный стенд для испытания двухкоординатных детекторов с линиями задержки. Он включает в себя амплитудный анализатор и NIM-крейт с 5-канальным дискриминатором с точной временной привязкой, блоками управляемых задержек и высоковольтным источником питания. В состав стенда входит также персональный компьютер со встроенной платой сбора и накопления данных (DAQ), разработанной в сотрудничестве с ИГМ, Берлин

[18]. Вся указанная аппаратура отлажена, и проведены первые тестовые измерения с источником  $^{252}\text{Cf}$  на реальном детекторе, изготовленном в ИЛЛ, Гренобль.

*Разработка и изготовление детекторов* [19]. Выполнена оригинальная разработка MSGC-детектора с «виртуальным» катодом и изготовлен прототип детектора, настроена электроника считывания сигналов и проведены измерения. В настоящее время проверяется стабильность работы детектора. Собрана и подготовлена к тестированию электроника для определения координат событий в этом детекторе методом деления заряда.

Разработан и изготовлен MWPC-детектор с чувствительной областью  $20 \times 20$  см и планируемым координатным разрешением 2,5 мм (рис. 2). Координаты определяются путем кодирования номера «сработавшей» проволоки. Совместно с Университетом Магдебурга разработана принципиальная схема блока для вычисления центра масс кластера события в пространстве детектора ( $64 \times 64$  нити) и проведено ее моделирование в FPGA. Точность определения центра масс составляет 0,5 пиксела. Разработана и изготовлена упрощенная версия блока кодирования ( $24 \times 24$  пиксела).

Точно такой же корпус будет использоваться для создания двухкоординатного детектора площадью  $20 \times 20$  см со считыванием информации с линий задержки. Катодные плоскости с линиями задержки, анодная плоскость и предусилители находятся в стадии изготовления. Изготовление корпуса и сборка детектора, а также начало тестовых испытаний с DAQ-электроникой планируется на I–II кварталы 2004 г.

**Сцинтилляционные детекторы.** Работы в этом направлении успешно ведутся в течение нескольких лет. В 2003 г. получены следующие результаты:

- Для дифрактометра ФСД с целью снижения себестоимости детекторов выполнены исследования и доработка конструкции сцинтилляционных счетчиков, обеспечившие переход на отечественные фотоумножители. Изготовлены основные детали и узлы двух секций (16 рабочих модулей) широкоапертурного  $90^\circ$  сцинтилляционного (ZnS-) детектора с временной фокусировкой ASTRA. Совместно с ГОИ (Санкт-Петербург) выполнен первый этап исследований новых сцинтилляционных материалов на основе ZnS. Данные материалы позволяют улучшить характеристики сцинтилляционных ZnS-экранов, а также отказаться от дорогостоящих закупок ZnS-экранов за рубежом.
- Изготовлен и испытан на 12-м канале реактора ИБР-2 опытный образец модуля для  $90^\circ$  сцинтилляционного (ZnS-) детектора спектрометра ДН-12. Образец был спроектирован на основе метода «грубой» временной фокусировки, позволяющего значительно увеличить

телесный угол наблюдения, используя сцинтилляционные пластины малой площади. Испытания продемонстрировали соответствие параметров детектора расчетным значениям. Согласно результатам испытаний, полностью собранный из модулей нового типа  $90^\circ$  детектор (кольцо из 16 модулей), обеспечит восьмикратное увеличение скорости набора статистики по сравнению с действующим на 12-м канале кольцевым  $90^\circ$  детектором на гелиевых счетчиках.

**Развитие систем окружения образца.** Разработан микроконтроллерный блок управления шаговыми двигателями для создания многоканальных систем управления исполнительными механизмами спектрометров на базе ПК. В состав системы входят: контроллер управления, коммутаторы-усилители шаговых двигателей SMD-D2A и блок питания для двигателей  $32\text{В} \cdot 2\text{А}$ . Связь с ПК осуществляется по протоколу RS232.

Для спектрометра ДСД реактора ИВВ-2М Свердловского филиала НИКИЭТ изготовлена центральная платформа стресс-дифрактометра с линейным сканером. Центральная платформа обеспечивает вращение линейного сканера, как целого, вокруг вертикальной оси и вращение поворотной платформы с детектором вокруг этой же оси. Все системы управления выполнены на базе шаговых двигателей под управлением программы эксперимента.

Разработан шахтный криостат для проведения экспериментов по дифракции на пучках тепловых нейтронов в диапазоне температур 8–300 К. В криостате использован рефрижератор замкнутого цикла фирмы «Leybold» на основе холодной головки CoolPower 5/100T и компрессора CoolPak 6000. Замена образца не требует снятия кожуха криостата и какой-либо разборки криостата. Для смены образца предназначен канал — шахта, снизу соединенная посредством теплообменника со второй ступенью рефрижератора. Объем образца — ванадиевый стакан, зашунтированный медным теплопроводом, который выравнивает температуру по этому объему. Проходной диаметр шахты равен 19,2 мм, однако на уровне теплообменника имеется коническое усечение до диаметра 18,1 мм. Максимально возможный диаметр образца ограничивается диаметром в 17 мм.

Разработан автономный сорбционный рефрижератор для работы при температуре 0,3 К [20]. Рефрижератор выполнен в виде вставки диаметром 80 мм, погружаемой в гелиевый криостат. Он обеспечивает температуру образца 0,31 К в течение 20 ч после конденсации  $^3\text{He}$  при полезной тепловой нагрузке 10 мкВт. Время реконденсации 0,5 ч.

Выполнены работы по модернизации систем управления прерывателями на базе микроконтроллеров для спектрометров: НЕРА-ПР, СКАТ и ДИН-2 (три прерывателя) [21]. Существенно модернизировано программное обеспечение систем управления прерывателей.



**Развитие систем сбора данных и сетевой инфраструктуры.** В локальной сети ЛНФ установлены и введены в эксплуатацию модуль Catalyst 8510 для контроля и анализа трафика, а также новый mail-сервер на базе двух процессоров Intel с операционной системой Solaris.

Продолжались работы по развитию Web-сервера ЛНФ и информационной системы HIPNS (hypertext information system on neutron sources and neutron instruments), предоставляющей пользователям сведения о нейтронных источниках и спектрометрах, а также о выполняемых на них исследованиях [22]. Реализована XML-версия системы HIPNS с использованием технологии Apache Cocoon. Запрашиваемые страницы автоматически генерируются из содержимого базы данных, которая создана для нескольких спектрометров ИБР-2. В 2003 г. приобретен и установлен новый двухпроцессорный Web-сервер.

В сотрудничестве с ГМИ, Берлин, завершено тестирование электроники сбора данных с MWPC-детектора с линиями задержки. В документацию внесены изменения, улучшающие быстродействие и временное разрешение, и на фирме ILFA, Гамбург, изготовлено 10 плат для ОИЯИ и ГМИ. Разработана первая версия программного обеспечения платы, включающего в себя алгоритмы отбора событий (реализованные в FPGA), программы управления потоками данных в различных режимах работы платы (эти программы выполняются цифровым сигнальным процессором, установленным на плате), программный драйвер платы, программы предварительной обработки и пользовательские программы на ПК. Электроника и программное обеспечение успешно протестированы с реальным детектором при работе с источником (в ИГМ и в ЛНФ) и на реакторе ВЕР-II в ИГМ. Анализ и визуализация данных осуществлялись с использованием пакетов ROOT и PV-WAVE [23]. В настоящее время ведутся работы по оптимизации программ.

Комбинированная система управления спектрометром НЕРА-ПР (графический интерфейс на PC с сохранением управляющих программ на VME) была предоставлена пользователям в опытную эксплуатацию с конца октября 2002 г. до февраля 2003 г. Эта эксплуатация показала стабильную работу как аппаратной части, так и операционной системы Windows XP и созданного программного обеспечения [24]. Работы по полному переводу программ управления на платформу Windows находятся в стадии завершения [25]. Одновременно решается аналогичная задача по переводу спектрометра СПН (РЕМУР) на новую систему управления на основе адаптера VME-PCI [26]. Планируемые сроки завершения работ — конец I квартала 2004 г.

Программный комплекс SONIX адаптирован для работы на спектрометре ФСД, установлен, испытан и передан в эксплуатацию [27]. Начаты также работы

по переносу адаптированного комплекса SONIX на спектрометр ФДВР.

В течение года разработан и изготовлен ряд цифровых и аналоговых электронных блоков для спектрометров ИБР-2 (спин-флипперы для спектрометра СПН, предусилители, спектрометрический усилитель и др.) [26]. В ответ на запрос пользователей проводились работы по текущей модернизации и ремонту аппаратуры, а также по оптимизации и сопровождению программного обеспечения [28].

Много усилий потребовало обеспечение бесперебойной работы спектрометров во время сеансов ИБР-2 и проведение профилактических работ в период остановки реактора.

По теме «Детекторы, системы окружения образца, системы сбора данных, локальная сеть» подготовлены долгосрочные проекты развития на период 2004–2008 гг. [29].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Aksenov V. L., Balagurov A. M., Pomjakushin V. Yu. // Usp. Fiz. Nauk. 2003. V. 173. P. 883–887.
2. Bannykh O. A. et al. // Rus. Metallurgy. 2002. V. 5. P. 459–462; Metally. 2002. V. 5. P. 55–59.
3. Kozlenko D. P. // J. Phys.: Condensed Matter. 2003. V. 15. P. 2339–2349.
4. Аксенов В. Л. и др. Нейтронная оптика слоистых магнитных наноструктур. НТ-2003. Екатеринбург, 2003.
5. Aksenov V. L. et al. // J. Mag. Mag. Mater. 2003. V. 258–259. P. 452–455.
6. Kuklin A. I. et al. // J. Appl. Cryst. 2003. V. 36. P. 679–683.
7. Nikitin A. N., Ivankina T. I. // Rus. J. Earth Sci. 2003. V. 5, No. 4. P. 1–28.
8. Никитин А. Н. и др. // Физика Земли (в печати).
9. Благовеццкий Н. М. и др. Препринт ФЭИ-2987. Обнинск, 2003.
10. Aksenov V. L. et al. // Physica B (in press).
11. Soloviev A. G. et al. // Nucl. Instr. Meth. A. 2003. V. 502, No. 2–3. P. 498.
12. Andrzejewski J. et al. // Yad. Fiz. (in press).
13. Enik T. L. et al. On Thermal Neutrons Scattering by Argon, Vanadium and Cadmium // Proc. of the XI Intern. Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei «Neutron Spectroscopy, Nuclear Structure, Related Topics» (ISINN-11), Dubna, May 28–31, 2003 (in press).
14. Reifarh R. et al. // Astrophys. J. 2003. V. 582. P. 1251–1262.
15. Honzatko J. et al. // Nucl. Phys. A (submitted).
16. Barabanov A. L. et al. A Helicity Approach Description of the P-Even and P-Odd Effects in the Fission of  $^{239}\text{Pu}$  by Resonance Neutrons // Proc. of the XI Intern. Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei «Neutron Spectroscopy, Nuclear Structure, Related Topics» (ISINN-11), Dubna, May 28–31, 2003 (in press).
17. Grigoriev Yu. V. Investigation of Nb, Mo, Rh, W Neutron Cross-Sections in the Resonance Energy Range // Ibid.
18. Gebauer B. et al. DAQ Board with PCI Interface for MWPCs with Delay Line Readout // Third Intern. Work-

- shop on Position-Sensitive Detectors, Tokyo, Jan. 13–16, 2004 (submitted).
19. *Belushkin A. V.* Detector Development Activities at Frank Laboratory of Neutron Physics // *Ibid.*
  20. *Trofimov V., Chernikov A.* // *PTE.* 2003. V. 4. P. 1.
  21. *Grigoriev Yu. et al.* Preprint PhEI-2991. Obninsk, 2003.
  22. *Duginov A. et al.* // Book of Abstr. of the XIX Intern. Symp. on Nuclear Electronics and Computing (NEC-2003), Varna, Bulgaria, Sept. 15–20, 2003. Dubna, 2003.
  23. *Litvivenko E.* Visualization and Data Treatment Software Based on PV WAVE and IDL Packages // *Ibid.* P. 40–41.
  24. *Kirilov A. et al.* JINR, P13-2003-63. Dubna, 2003.
  25. *Kirilov A., Yudin V.* JINR, P13-2003-11. Dubna, 2003.
  26. *Yudin V.* JINR, P13-2003-12. Dubna, 2003.
  27. *Bogdzel A. A. et al.* // Book of Abstr. of the XIX Intern. Symp. on Nuclear Electronics and Computing (NEC-2003), Varna, Bulgaria, Sept. 15–20, 2003. Dubna, 2003. P. 23.
  28. *Soloviev A. et al.* // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2003. V. 502, No. 2–3. P. 500–502.
  29. *Gebauer B. et al.* // Book of Abstr. of the XIX Intern. Symp. on Nuclear Electronics and Computing (NEC-2003), Varna, Bulgaria, Sept. 15–20, 2003. Dubna, 2003. P. 35–36.