

# ЛАБОРАТОРИЯ НЕЙТРОННОЙ ФИЗИКИ им. И. М. ФРАНКА

Научная программа Лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка в 2005 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», 07-4-1031-99/2008, руководители В. Л. Аксенов и А. М. Балагуров); по нейтронной ядерной физике (тема «Нейтронная ядерная физика — фундаментальные и прикладные исследования», 06-4-1036-2001/2007, руководители В. Н. Швецов и Ю. Н. Копач). Для обеспечения физических исследований осуществлялось развитие и создание базовых установок лаборатории: ИБР-2 (тема «Развитие и совершенствование комплекса ИБР-2», 07-4-851-87/2007, руко-

водители В. Д. Ананьев и Е. П. Шабалин) и ИРЕН (тема «Создание установки ИРЕН (Проект ИРЕН)», 06-4-0993-94/2005, руководители В. И. Фурман и И. Н. Мешков), а также развитие комплекса спектрометров ИБР-2 (тема «Разработка и создание элементов нейтронных спектрометров для исследования конденсированных сред», 07-4-1052-96/2008, руководители А. В. Белушкин и В. И. Приходько).

Актуальные вопросы исследований, проводимых в кооперации с ведущими ядерными центрами, были рассмотрены на XIII Международном семинаре по взаимодействию нейтронов с ядрами, IV рабочем совещании по исследованиям на реакторе ИБР-2, международном совещании по проекту SAD и совещании «Исследования в гигантских импульсах тепловых нейтронов на импульсных реакторах и в ловушках мощных ускорителей».

## ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД

Основная цель — исследование методами нейтронной физики структуры и динамики конденсированных сред, получение новых данных о микроскопических свойствах исследуемых систем, экспериментальная проверка теоретических предсказаний и моделей, обнаружение новых закономерностей. Работа по теме сводилась к проведению экспериментальных исследований и текущей методической деятельности, направленной на модернизацию действующих спектрометров и создание на ИБР-2 новых установок.

В основном эксперименты велись на базовой установке ЛНФ — реакторе ИБР-2, кроме того, сотрудники НЭО НИКС участвовали в выездных экспериментах в нейтронных центрах Европы. На реакторе ИБР-2 сотрудники отдела отвечали за эксплуатацию, развитие и проведение физических экс-

периментов на 13 спектрометрах, к которым относятся: ФДВР — фурье-дифрактометр высокого разрешения, ДН-2 — многоцелевой дифрактометр для экспериментов на поли- и монокристаллах, СКАТ — дифрактометр для исследования текстур, ЭПСИЛОН — дифрактометр для исследования внутренних напряжений, ФСД — фурье-дифрактометр для исследования внутренних напряжений, ДН-12 — дифрактометр для экспериментов при высоких внешних давлениях, ЮМО — спектрометр малоуглового рассеяния, РЕМУР — спектрометр поляризованных нейтронов, РЕФЛЕКС-Р — рефлектометр на поляризованных нейтронах, ДИН-2ПИ — спектрометр неупругого рассеяния в прямой геометрии, НЕРА-ПР — многокристальный спектрометр неупругого рассеяния, КДСОГ-М — спектрометр неупругого рассеяния в обратной геометрии. На всех

спектрометрах, кроме КДСОГ-М, проведение экспериментов регулируется программой пользователей. Ниже перечисляются результаты, полученные в 2005 г.

**Основные научные результаты.** Проведены нейтронные дифракционные исследования манганитов  $R_{0,5}Sr_{0,5}MnO_3$  ( $R = Sm, Nd_{0,772}Tb_{0,228}$  и  $Nd_{0,544}Tb_{0,456}$ ), направленные на выявление микроскопических причин гигантского кислородного изотопического эффекта, недавно открытого в  $Sm_{0,5}Sr_{0,5}MnO_3$ . Показано, что во всех изученных составах при низкой температуре сосуществуют две кристаллические фазы с разным типом янтеллеровских искажений кислородных октаэдров и с разным типом магнитного упорядочения. Дифракционные данные позволили предложить сценарий наблюдающихся фазовых переходов и установить, что переход из металлического состояния в диэлектрическое в составах с Sm при замене  $^{16}O$  на  $^{18}O$  является перколяционным, а именно, замена изотопа кислорода приводит к резкому (с 65 до 13 %) уменьшению объема ферромагнитной металлической фазы. Эту работу можно считать итоговой по теме изучения причин гигантского изотопического эффекта в манганитах — смены низкотемпературного металлического состояния на диэлектрическое при замене  $^{16}O$  на  $^{18}O$ . Установлено, что так же, как и в оксидах марганца с уровнем допирования  $x = 0,3$ , в составах с  $x = 0,5$  эффект существует только при наличии фазово-расслоенного состояния на мезоскопическом масштабе размеров. Основной причиной равновесного фазового расслоения является возникновение случайного поля напряжений на некогерентных границах сосуществующих фаз [1].

На дифрактометре ДН-12 проведено исследование влияния высокого давления до 5 ГПа на кристаллическую и магнитную структуру гексагонального манганита  $YMnO_3$  в температурном диапазоне 10–295 К. При нормальном давлении в этом соединении при  $T \sim T_N = 70$  К наблюдается состояние спиновой жидкости, обусловленное эффектами магнитной фрустрации на треугольной решетке, сформированной ионами Mn, а при  $T < T_N$  возникает упорядоченное треугольное антиферромагнитное (АФМ) состояние с симметрией неприводимого представления  $\Gamma_1$ . При увеличении давления до 5 ГПа наблюдается уменьшение величины упорядоченного магнитного момента ионов Mn при  $T = 10$  К с 3,27 до 1,52  $\mu_B$ , а также усиление диффузного рассеяния при температурах, близких к  $T_N$ . Обнаруженные эффекты могут быть объяснены в модели сосуществования упорядоченной антиферромагнитной фазы и состояния спиновой жидкости без дальнего магнитного порядка, объемная доля которого возрастает при увеличении давления за счет усиления эффектов фрустрации. Воздействие высокого давления, кроме того, приводит к спиновой переориентации магнитных моментов Mn и изменению симметрии АФМ-

структуры, которая может быть описана комбинацией неприводимых представлений  $\Gamma_1 + \Gamma_2$  [2].

Методом малоуглового рассеяния нейтронов исследованы жидкие дисперсии детонационных наноалмазов. Детонационные наноалмазы образуются в результате взрыва кислородонесбалансированных взрывчатых веществ в отсутствие каких-либо дополнительных источников углерода. Образующиеся кристаллы наноалмазов являются крайне интересным и перспективным материалом для нанотехнологий. Однако они трудноотделимы от побочных продуктов взрыва. Это связано с образованием сложной многоуровневой агрегации наноалмазов в момент синтеза, в которой участвуют соединения, отличные от углерода. Дисперсные наноалмазные порошки, приготовленные в циркониевых мельницах и помещенные в различные жидкости, образуют необычно стабильные коллоидные растворы без каких-либо добавок поверхностно-активных веществ. Данное явление может быть эффективно использовано для исследования внутренней структуры агрегатов наноалмазов посредством малоуглового рассеяния нейтронов. Полученные кривые рассеяния на наноалмазах в различных растворителях показывают сходное поведение. Частицы наноалмазов (характерный размер 5–6 нм) организованы в кластеры размером более 120 нм, близкие по своей структуре к гауссовским полимерам. Внутренняя структура кластеров не зависит от их концентрации в растворе. Оценка средней рассеивающей плотности кластеров с помощью вариации контраста в водных дисперсиях (легкая/тяжелая вода) дает значение меньшее, чем рассеивающая плотность чистого алмаза. Это свидетельствует о существовании в элементарной единице агрегатов компоненты, отличной от имеющейся у алмазов. В частности, это может быть неалмазная оболочка, которая, с одной стороны, ответственна за агрегацию частиц во время взрыва, а с другой — обеспечивает стабильность дисперсных частиц благодаря взаимодействию с растворителем.

На спектрометре РЕМУР проведено исследование явления сосуществования ферромагнетизма и сверхпроводимости в слоистых структурах, важного как с фундаментальной, так и с практической точки зрения. Известно, что ферромагнитное и сверхпроводящее состояние не могут сосуществовать одновременно в однородной системе. Но в неоднородной системе, какой являются слоистые наносистемы, такое сосуществование возможно. Практическая важность этих исследований связана с возможностью разработки принципиально новых наноприборов, логика работы которых определяется одновременно изменением магнитного состояния и температуры в небольших пределах. В основе экспериментального метода исследования явления лежат генерация нейтронного поля стоячих волн путем отражения нейтронной волны от периодической структуры, поляризационный анализ нейтронов и реги-

страция зеркально и диффузно отраженных нейтронов. Нейтронные исследования были проведены на структуре Pd(2 нм)/V(33 нм)/Fe(3 нм)/20×[V(3 нм)/Fe(3 нм)]/MgO в интервале изменений напряженности магнитного поля 0,2–4 кОм в широком интервале температур. Обнаружено, что в интервале 1,6–3,5 К сверхпроводящее состояние слоя V(33 нм) изменяет магнитное упорядочение в периодической структуре и профиль намагниченности на границе слоя железа со слоем V(33 нм). Было обнаружено также, что в диапазоне 7–30 К изменяется магнитное состояние периодической структуры в зависимости от температуры. Последнее связывается с ферромагнетизмом границ раздела. В модельной схеме распределения намагниченности в наноструктуре число бислоев, в которых существует антиферромагнитное упорядочение, равно  $N_1$ , а в которых оно отсутствует, —  $N_2$ . При этом  $N_1$  бислоев прилегает к толстому слою ванадия, а  $N_2$  бислоев следует за  $N_1$  бислоями. Расчеты показывают, что  $N_1$  находится в диапазоне 2–8, а  $N_2$  — в диапазоне 18–12. Таким образом, толстый слой ванадия изменяет тип упорядочения в ближайших прилегающих к нему бислоях периодической структуры.

На спектрометре обратной геометрии НЕРА выполнено изучение сравнительных характеристик веществ — кандидатов для холодных замедлителей нейтронов на ИБР-2: метана, метанола, мезитилена и воды. Критериями являлись количество водорода в веществе, подходящая плотность фононных состояний и радиационная стойкость. Твердый метан при  $T < 20$  К находится в кристаллической фазе II в частично (~ 25 %) разупорядоченном состоянии. Метанол при низкой температуре может находиться в кристаллической или аморфной фазах с трансляционным или ориентационным беспорядком. Мезитилен — весьма перспективное вещество для использования в холодных замедлителях благодаря

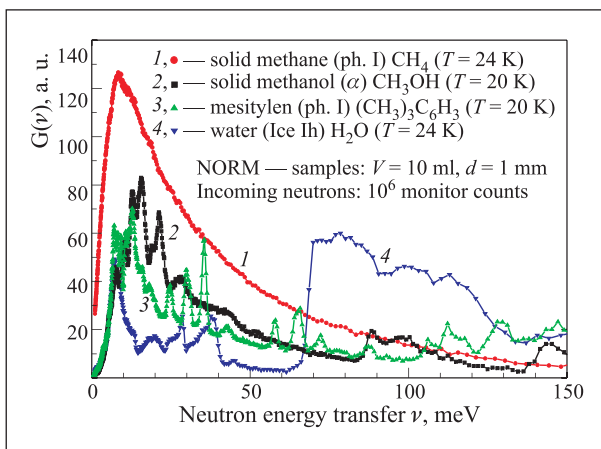


Рис. 1. Сравнение плотностей фононных состояний, полученных на основе однофононного приближения из измеренных для метана, метанола, мезитилена и воды спектров некогерентного неупругого рассеяния

высокому содержанию водорода, хорошим замедляющим свойствам и радиационной стойкости. На рис. 1 сравниваются плотности фононных состояний, полученные на основе однофононного приближения из измеренных для указанных веществ спектров некогерентного неупругого рассеяния. Основываясь на этих данных, а также результатах, полученных в ходе программы УРАМ-2, можно прийти к выводу, что для замедления нейтронов при гелиевых температурах наилучшими характеристиками обладает мезитилен в стеклоподобном состоянии.

На спектрометре ДИН-2ПИ выполнен нейтрон-дифракционный эксперимент по исследованию микроструктуры расплавов Li–N с концентрацией примеси азота 1,3 и 3,5 ат. % и температуре 823 К. Получена основная микроструктурная характеристика вещества — полный структурный фактор  $S(Q)$ , а также парциальные структурные факторы  $S_{\alpha\beta}(Q)$  компонент расплава и соответствующие функции радиального распределения  $g_{\alpha\beta}(r)$  и  $g_{CC}(r)$  (рис. 2). Установлено, что при концентрации примесного компонента менее 4 ат. % в структурном факторе расплавов Li–N отсутствует так называемый «предпик», который является признаком существования в расплаве кластеров определенного размера. Анализ парциальных структурных характеристик расплава дает основание предположить, что примесь азота присутствует в расплавах  $\text{Li}_{0,987}\text{N}_{0,013}$  и  $\text{Li}_{0,965}\text{N}_{0,035}$  в форме нитрида лития  $\text{Li}_3\text{N}$ .

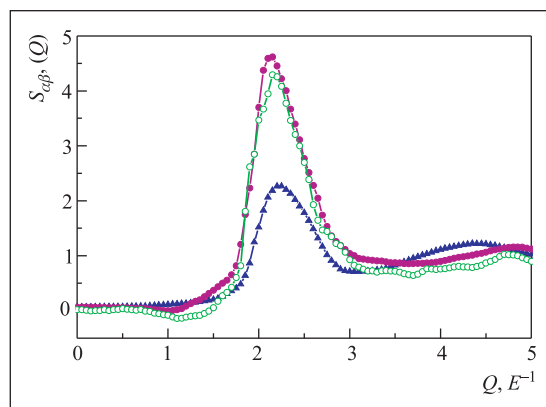


Рис. 2. Парциальные структурные факторы жидкого лития и азота для расплавов  $\text{Li}_{0,987}\text{N}_{0,013}$  и  $\text{Li}_{0,965}\text{N}_{0,035}$ . Треугольники — структурный фактор лития  $S_{\text{Li}}(Q)$ ; кружки —  $S_{\text{NN}}(Q)$  для концентраций 1,3 и 3,5 ат. % соответственно

Сотрудниками группы малоуглового рассеяния нейтронов завершён цикл работ, который подводит итог почти 20-летним дебатам по одной из ключевых проблем статистической физики — взаимодействию флуктуирующих случайных поверхностей. К случайным флуктуирующим поверхностям принадлежит широкий класс объектов: от биологических мембран до струн в современной теории поля. Это

является одной из причин внимания современной теоретической физики к биологическим мембранам, в частности, к липидным мембранам. В результате развиты новые подходы к исследованию межмембранных взаимодействий и определению универсальной константы, основанные на исследовании температурной зависимости межмембранных взаимодействий с помощью комплементарного использования малоуглового рассеяния тепловых нейтронов и дифракции высокого разрешения на синхротронном источнике. Получено значение константы взаимодействия, равное  $3\pi^2/256$  и совпадающее с теоретически предсказанным. Показано также, что переход от мультислойных к одиночным мембранам происходит в соответствии с теоретически предсказанной моделью двух состояний. Кроме того, впервые показано, какова истинная величина ондуляционных сил — они действительно вносят значительный вклад в баланс межмембранных взаимодействий и, более того, эти силы становятся доминирующими на расстояниях больше  $20 \text{ \AA}$  [3].

## НЕЙТРОННАЯ ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

**Экспериментальные исследования.** В 2005 г. экспериментальная программа в области нейтронной ядерной физики в лаборатории 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 Кореи, Франции, США и Японии.

С целью проверки полученных ранее экспериментальных результатов по поиску отрицательного нейтронного  $p$ -резонанса у изотопов свинца была проведена модернизация  $\gamma$ -спектрометра СОСОС на канале №1 реактора ИБР-2. В результате включения в состав спектрометра нового полупроводникового детектора  $\gamma$ -квантов GMX30-PLUS и специализированных электронных блоков возросла более чем в два раза эффективность спектрометра и увеличилось его быстродействие. Эксперименты по поиску отрицательного нейтронного  $p$ -резонанса у изотопов свинца продолжают: проведена серия измерений на естественном образце Pb.

На канале №11 реактора ИБР-2 завершена модернизация установки «Изомер» с целью развития работ по получению данных о выходах и постоянных распада групп запаздывающих нейтронов в делении минорных актинидов. В результате модернизации были улучшены параметры установки и расширены ее возможности. Проведены измерения на модернизированной установке и получены данные о

Впервые исследована динамика кристаллической решетки суперионного проводника AgCuSe методом неупругого рассеяния нейтронов. В низкотемпературной фазе обнаружены низкоэнергетические моды, которые, по всей видимости, имеют природу акустических фононов. Плотность фононных состояний  $G(\epsilon)$  в  $\alpha$ - и  $\beta$ -AgCuSe характеризуется недебаевским поведением. При переходе от  $\beta$ - к  $\alpha$ -фазе наблюдается размытие спектра плотности фононных состояний и ужесточение спектра в целом [4].

**Главные методические результаты.** В 2005 г. продолжались методические работы по модернизации комплекса спектрометров реактора ИБР-2. В основном они затрагивали детекторные системы спектрометров. В частности, на специализированном фурье-дифрактометре ФСД продолжалась комплектация детекторной системы (готовы шесть из 14 детекторных модулей), проведены пробные заполнения двумерного детектора для ЮМО, испытан в реальных условиях однокоординатный ПЧД с разрешением 1,8 мм.

выходе запаздывающих нейтронов при делении изотопа  $^{237}\text{Np}$  тепловыми нейтронами.

Завершено создание установки «Колхида», предназначенной для исследования взаимодействия поляризованных нейтронов с поляризованными ядрами. Для поляризации ядер мишени методом «грубой силы» был сконструирован криостат растворения  $^3\text{He}$  в  $^4\text{He}$  со сверхпроводящим магнитом. Проведено стендовое испытание криостата с магнитом. Получены следующие параметры: минимальная температура на образце  $T = 23 \text{ мК}$ , напряженность магнитного поля  $H = 5,8 \text{ Тл}$  при однородности поля в центре магнита  $\Delta H/H = 10^{-4}$ .

Продолжились работы по исследованию образцов для проверки  $T$ -неинвариантности в ядерных взаимодействиях. Исследовались два монокристалла алюмината лантана  $\text{LaAlO}_3$  с парамагнитной примесью  $\text{Nd}^{3+}$ : 0,3 и 0,08 %, полученные из Японии. Уверенно регистрировались усиленные ЯМР-сигналы на обоих кристаллах. Наблюдалось также перемещение ЯМР-линий La и Al при вращении кристалла в магнитном поле.

В рамках экспериментов по поиску нейтральных токов в нуклон-нуклонных взаимодействиях и определению слабой  $\pi$ -мезонной константы связи на пучке холодных поляризованных нейтронов PFIВ (ИЛЛ, Гренобль) проведен очередной 48-суточный сеанс измерений  $P$ -нечетной асимметрии ( $\sigma_n p_t$ ) вылета тритонов в реакции  $^6\text{Li}(n, \alpha)^3\text{H}$  ( $\sigma_n$  — спин нейтрона,  $p_t$  — импульс тритона). По сумме ре-

зультатов трех циклов наблюдается явный эффект в основных измерениях  $\alpha_t = t(8,6 \pm 2,0) \cdot 10^{-8}$  с учетом поправок на поляризацию нейтронов и угол вылета тритонов. Прошел также ряд контрольных экспериментов [5].

Коллаборацией NPDG с участием сотрудников ЛНФ проведены работы по проверке оборудования канала PF12 нейтронного источника LANSCE (Лос-Аламос) и аппаратуры для эксперимента по измерению  $P$ -нечетной асимметрии  $\gamma$ -квантов в реакции  $np \rightarrow d\gamma$  с целью определения слабой  $\pi$ -мезонной константы связи [6].

В рамках подготовки эксперимента по прямому измерению сечения рассеяния нейтрона на нейтроне были проведены работы на нейтронной установке Физико-энергетического института (Обнинск) по калибровке нейтронных детекторов, применявшихся в тестовых экспериментах на реакторе ЯГУАР (РФЯЦ, ВНИИТФ, Снежинск) в 2005 г. Анализ показал, что результаты расчетов ожидаемых нейтронных фонов группы из Снежинска для глубины более 2 м (глубина шахты — 12 м) полностью совпадают с результатами измерений [7]. На здании реактора ЯГУАР установлена задняя пролетная база экспериментальной установки. Завершен рабочий проект полной экспериментальной установки.

На установке GELINA (IRMM, Бельгия) проводятся совместные эксперименты по исследованию индуцированного резонансными нейтронами деления ядер  $^{239}\text{Pu}$ . В развитие метода исследований флуктуаций множественности мгновенных нейтронов и полной кинетической энергии осколков деления проводятся измерения множественности мгновенных нейтронов деления в корреляции с осколками.

На ускорителе К-130 в г. Ювяскюля (Финляндия) при участии сотрудников ЛНФ проведен многопараметрический эксперимент по измерению массово-энергетических распределений осколков деления  $^{238}\text{U}$ , индуцированного  $\alpha$ -частицами. Ведется обработка данных с целью поиска истинно тройного коллинеарного распада в делении. Началась подготовка к проведению аналогичного эксперимента по измерению нейтронно-индуцированного деления на пучке бб реактора ИБР-2.

На установке ЭГ-5 ЛНФ осуществлены исследования реакции  $^{20}\text{Ne}(n, \alpha)^{17}\text{O}$ . Нейтроны производились в реакции  $\text{D}(d, n)^3\text{He}$  с использованием газовой дейтериевой мишени при энергии дейтронов  $E_d \approx 2$  МэВ. Получаемый при этом диапазон энергий нейтронов  $E_n = 3,7-4,1$  МэВ охватывал группу нейтронных резонансов  $^{20}\text{Ne}$ . Обнаружены некоторые несоответствия между полученными данными и рекомендуемыми в нейтронных атласах положениями резонансов для этой реакции. Прделан ряд работ по переоборудованию пучка ЭГ-5 для измерений угловых корреляций в реакциях  $(n, p)$ ,  $(n, \alpha)$ .

На ЭГ-4.5 в Институте физики тяжелых ионов при Пекинском университете, Китай, проведены из-

мерения сечений и угловых распределений реакций  $^{64}\text{Zn}(n, \alpha)^{61}\text{Ni}$  и  $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$  при энергиях нейтронов 4; 5; 6 МэВ. Источник нейтронов —  $\text{D}(d, n)^3\text{He}$ -реакция на газовой дейтериевой мишени. В качестве детектора  $\alpha$ -частиц применялась двухсекционная ионизационная камера с сеткой. Полученная многомерная информация находится в стадии обработки.

В рамках нового метода извлечения длины  $n, e$ -рассеяния  $b_{ne}$  из данных по дифракции нейтронов на благородных газах были обработаны данные, полученные в ИЛЛ (Гренобль) по дифракции нейтронов с длиной волны  $\sim 0,7 \text{ \AA}$  на газообразном  $^{36}\text{Ar}$  при четырех разных плотностях и для семи разных состояний сжиженного Кг. Два математически разных подхода к решению многопараметрической задачи дали результаты для  $^{36}\text{Ar}$ :  $b_{ne} = -(1,33 \pm 0,28 \pm 0,57) \times 10^{-3}$  фм и  $b_{ne} = -(2,15 \pm 0,49) \cdot 10^{-3}$  фм. Предварительный результат еще не законченного анализа данных по Кг:  $b_{ne} = -(1,36 \pm 0,14) \cdot 10^{-3}$  фм [8], что пока еще по точности в 3–4 раза хуже лучших результатов. С целью существенно улучшить точность извлекаемого значения  $b_{ne}$  разрабатывается новый эксперимент для той же установки в Гренобле. В стадии завершения работа по изготовлению установки для измерения  $b_{ne}$  путем рассеяния медленных нейтронов газами Ar, Kг и Хе низкого давления ( $\sim 1$  атм) с использованием метода времени пролета на нейтронных источниках в г. Троицке и на ИРЕН-1.

В рамках исследования взаимодействия нейтронов с наноструктурами и изучения возможности эффективного охлаждения очень холодных и холодных нейтронов в область ультрахолодных были проведены измерения на пучках PF1b и PF2 высокопоточного реактора ИЛЛ (Гренобль). Измерялась вероятность рассеяния нейтронов со скоростями от 30 до 1000 м/с в зависимости от угла рассеяния на образцах наноалмазных порошков и на структуре слабосвязанных наночастиц  $\text{D}_2\text{O}$  и  $\text{D}_2$ , находящихся в сверхтекучем гелии (в «жели»). Полученного экспериментального материала достаточно для проверки правильности теории диффузии нейтронов в мелкодисперсной и нанодисперсной среде. Результаты показывают, что вероятность рассеяния нейтронов на образцах достаточно велика и, если процессы передачи энергии от нейтрона к образцу идут достаточно интенсивно, то «жель» можно использовать для охлаждения очень холодных и холодных нейтронов в область ультрахолодных.

На пучке PF2 реактора ИЛЛ измерены полные и дифференциальные сечения очень медленных нейтронов для жидких флуорополимеров при 80–300 К с целью изучения предельных возможностей в хранении УХН и проведен эксперимент по исследованию «малого нагрева» УХН при отражении от твердой поверхности [9]. Впервые обнаружен значительный эффект нагрева в мкэВ-ной области энергий.

Выполнен новый эксперимент по наблюдению изменения энергии нейтрона при прохождении через ускоренное вещество. Существование эффекта объясняется справедливостью принципа эквивалентности и детальными нейтронно-оптическими расчетами, что впервые подтверждено экспериментально. Изменение энергии нейтрона, зарегистрированное в опыте, составляло величину порядка  $2 \cdot 10^{-10}$  эВ. Изменение энергии нейтрона регистрировалось гравитационным спектрометром УХН (ИЛЛ, Гренобль) с интерференционными фильтрами в фазе с движением образца [10].

Поставлен новый эксперимент по проверке справедливости закона  $1/v$  при взаимодействии УХН с образцом естественного гадолиния (сечение радиационного захвата порядка 25 Мб). Найдено, что закон  $1/v$  выполняется с точностью порядка 0,1 % для интервала изменения скоростей от 4 до 35 м/с.

Из измеренных к настоящему времени в 51 ядре ( $27 < A < 201$ ) значений интенсивностей двухквантовых каскадов между нейтронным резонансом и низколежащими уровнями составного ядра извлечены данные по плотностям уровней и силовым функциям первичных  $\gamma$ -переходов. Это сделано для интервала энергии возбуждения ядра шириной от  $\sim 5$  до  $\sim 9$  МэВ. Такие данные впервые получены без привлечения любых ядерных моделей или непроверяемых гипотез. Найденные таким образом плотности уровней и радиационные силовые функции имеют значительно (практически на порядок) меньшие систематические погрешности, чем любые имеющиеся аналогичные данные. Лучшая точность позволила наблюдать сильное влияние структуры ядра на эти основные параметры его каскадного  $\gamma$ -распада [11].

**Прикладные исследования.** На ускорителе ЭГ-5 ЛНФ с использованием ядерно-физических методик PIXE и RBS выполнены исследования окисных слоев кремния, имплантированных ионами германия, и слоистых полупроводниковых структур Si/HfO<sub>2</sub>/Ru, подвергавшихся отжигу при различных температурных условиях. Получены глубинные профили элементов для 34 образцов. Также на ЭГ-5 с использованием методик PIXE и RBS проводились исследования элементного состава зубов людей различных профессий, проживающих в различных условиях, и состава аэрозолей в воздухе г. Улан-Батора. В составе

исследованных образцов обнаружены следующие микропримеси: F, Na, Mg, Al, S, Cl, K, Ca, Ti, Mn, Fe, Cu, Zn, As, Sr, Zr, Ba.

В рамках международной программы «Атмосферные выпадения тяжелых металлов в Европе — оценки на основе анализа мхов-биомониторов», предусматривающей одновременный сбор биомониторов в 2005–2006 гг., в ряде районов Центральной России, Белоруссии, Болгарии, Словакии, Сербии и Черногории, Македонии, Румынии и Турции [12] проведен сбор образцов мха (пассивный биомониторинг) для нейтронного активационного анализа на реакторе ИБР-2. Результаты анализа по 10 элементам: As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Ni, Pb, V и Zn — будут переданы в Европейский атлас атмосферных выпадений тяжелых металлов, издаваемый с периодичностью в 5 лет под эгидой ООН. (Наличие меди и свинца определяется методом атомной абсорбционной спектроскопии.) Проведен анализ образцов мхов, собранных в Монголии и на юге Вьетнама. Продолжены работы по изучению атмосферных выпадений тяжелых металлов, редкоземельных и других элементов методом активного биомониторинга в промышленных центрах Бая-Маре (Румыния), Познань (Польша) и Афины (Греция).

Завершен анализ образцов растительного и животного происхождения в рамках проекта технической кооперации с МАГАТЭ (2003–2005 гг.) по контролю качества продуктов питания, выращенных в условиях сильного антропогенного загрязнения. Результаты доложены на Рабочем совещании МАГАТЭ (14–16 ноября 2005 г., Дубна).

Получены новые результаты НАА по определению хрома в бактериальных образцах *Arthrobacter oxidans*, предоставленных биохимиками Института физики АН Грузии [13].

Проведен анализ 50 археологических образцов керамики (ранний неолит) из курганов Смоленской области и Майкопского кургана на Северном Кавказе для Государственного Эрмитажа (Санкт-Петербург).

Продолжались работы по изучению влияния нейтронного спектра деления на физические свойства мелкокристаллических алмазов, полученных в Институте физики твердого тела и полупроводников НАН Белоруссии (Минск) [14].

## НЕЙТРОННЫЕ ИСТОЧНИКИ

**Импульсный реактор ИБР-2.** В 2005 г. реактор ИБР-2 работал в соответствии с утвержденным графиком. На физический эксперимент отработано около 1831 ч. Распределение времени на экспери-

менты на спектрометрах реактора производилось в соответствии с рекомендациями экспертов по поступившим заявкам и имеющимися долгосрочными обязательствами.



*Основные результаты по модернизации ИБР-2 в 2005 г.:*

1. Новая топливная загрузка.
    - Завершены работы по созданию участка сборки ТВЭЛ в ТВС. Участок принят в эксплуатацию комиссией из представителей ОИЯИ, ГСПИ, ВНИИНМ, НИКИЭТ.
      - В настоящее время идет процедура получения лицензии на сборку ТВЭЛ.
    - 2. Основное оборудование реактора ИБР-2М.
      - В НИКИЭТ продолжалось изготовление нового корпуса реактора.
        - Завершено изготовление внутрикорпусного перегрузочного устройства.
      - 3. В ОП ОИЯИ изготовлены откатные устройства для размещения замедлителей реактора ИБР-2М.
      - 4. СУЗ ИБР-2М.
        - В НИКИЭТ завершена разработка КД исполнительного механизма АЗ.
        - Изготовлен опытный образец ИМ АР в ОП ОИЯИ.
          - В СНИИП-СИСТЕМАТОМ завершена разработка АСУЗ, ведется изготовление опытного образца.
            - Начаты работы по созданию системы контроля технологических параметров (ИНЭУМ).
        - 5. Комплекс замедлителей ИБР-2М.
          - Продолжались макетные работы по транспортировке шариков из  $C_9H_{12}$ .
            - В НИКИЭТ начат технический проект комплекса замедлителей ИБР-2М.
            - В ГСПИ начата разработка технологической части проекта замедлителей.
            - В Гелиймаше продолжалось изготовление КГУ-700/15.
- На обеспечение работ по модернизации ИБР-2 в 2005 г. израсходовано на 30 декабря 2005 г. 890 тыс. долл. США, в т.ч. ОИЯИ — 490 тыс. долл. США, Росатомом — 400 тыс. долл. США.

В 2005 г. по теме «Разработка комплекса замедлителей нейтронов широкого спектра («комбизамедлителей») для модернизируемого исследовательского реактора ИБР-2М» сделано следующее:

1. Завершены расчеты спектральных характеристик нейтронных пучков, обоснована методика расчета сравнением с известными экспериментальными данными.
2. Разработан принцип конструкции холодного замедлителя, основанный на использовании шариков из замороженной смеси мезитилена и *m*-ксилола, обеспечивающий предельно возможный поток холодных нейтронов (на уровне проектируемого твердотопливного замедлителя второй мишени источника ISIS) при длительной работе.
3. Выполнены эксперименты по оценке свойств твердого мезитилена, необходимые для проектирования шарикового холодного замедлителя, в частности,

отработан метод получения шариков смеси мезитилена и *m*-ксилола, оценена ударная прочность шариков, сделаны предварительные опыты по транспортировке шариков в потоке газа в прямой трубе.

4. Разработана теория и составлена программа расчета движения шариков в трубе произвольной конфигурации, изготовлен стенд для проведения опытов по транспортировке шариков потоком газа в трубе, близкой по конфигурации к реальной.

5. Разработан концептуальный проект системы охлаждения замедлителей, транспортировки шариков в камеру замедлителя и трассировки труб гелиевого охлаждения.

6. Составлены технические задания на проектирование комплекса замедлителей и системы их охлаждения (с НИКИЭТ и ГСПИ).

7. Выполнен проект и частично изготовлен модернизированный вариант облучательной установки УРАМ-2 (под названием УРАМ-3М) для проведения в 2006 г. экспериментов по подтверждению длительной работоспособности холодного замедлителя с мезитилоном.



Рис. 3. Шарик из замороженной смеси мезитилена и *m*-ксилола при температуре жидкого азота

В результате работ, проведенных в 2005 г., получены данные, необходимые для начала проектирования комплекса замедлителей на ИБР-2М.

**Проект ИРЕН.** Основные усилия и средства были сосредоточены на завершении подготовки и проведении работ по демонтажу реактора ИБР-30.

Для получения положительной экологической экспертизы проекта вывода из эксплуатации ИБР-30 была спроектирована и создана сеть опорных скважин для контроля состояния подземных вод на площадке ЛЯП. Проведены завершающие тренировки персонала по выполнению отдельных технологических операций демонтажа оборудования реактора и

разгрузки активной зоны. Благодаря настойчивой работе руководства ЛНФ и ее технических подразделений в середине октября удалось начать демонтаж реактора. Значительная часть активированного оборудования реактора демонтирована и перевезена на временное хранение в зд. 117/6. К середине ноября была закончена высверловка урановых вкладышей из подвижных частей активной зоны ИБР-30. Освобожденное топливо эвакуировано на хранение в ОРДВ ОИЯИ. Завершена разгрузка активной зоны реактора. Окончание демонтажа остального оборудования реактора ИБР-30 запланировано на первую половину 2006 г.

Определенный прогресс был достигнут и в создании линака ЛУЭ-200. После приобретения недостающей части специальной медной трубки были продолжены остановленные в сентябре 2004 г. работы по намотке катушек соленоида магнитной фокусирующей системы. К началу четвертого квартала эти работы были завершены. Проведенные магнитные измерения показали соответствие параметров изготовленных катушек проектным значениям.

Завершены работы по монтажу модулятора М350 в ускорительном зале зд. 43. В настоящее время завершается тестирование систем модулятора и подготовка к его пуску. Успешно завершились вакуумные испытания оборудования магнитного спектрометра. Начинаются работы по его контрольной сборке на стенде.

Проведены численные исследования по моделированию динамики пучка электронов в ускорительном тракте ЛУЭ-200 с целью оптимизации системы фокусировки и минимизации потерь частиц, определены критерии учета погрешностей магнитных полей в тракте ускорителя.

Специалистами ОИЯИ и ГСПИ велось рабочее проектирование системы водоохлаждения ускорителя ЛУЭ-200.

Начато создание рабочего проекта системы электропитания ускорителя.

Завершен проект реконструкции помещения пульту ЛУЭ-200 и комнат для размещения систем электропитания и водоохлаждения в зд. 43. Начаты работы по ремонту и переоборудованию указанных помещений.

В 2006 г. планируется поставка оборудования, необходимого для завершения монтажа и комплексной наладки оборудования ЛУЭ-200.

К сожалению, не удалось в полном объеме выполнить работы по ускорителю ЛУЭ-200, намеченные на 2005 г., в основном из-за задержки или отсутствия запланированного финансирования. Тем не менее создан необходимый задел для выполнения задач, предложенных в ПТП 2006 г., с конечной целью пуска к концу 2007 г. первой очереди установки ИРЕН с неразмножающей нейтронно-производящей мишенью и стендом для прикладных исследований.

## РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ НЕЙТРОННЫХ СПЕКТРОМЕТРОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД

Работы по теме проводились по следующим основным направлениям:

- создание нейтронных детекторов;
- развитие систем окружения образца;
- развитие систем сбора данных и вычислительной инфраструктуры.

**Создание нейтронных детекторов.** В 2005 г. изготовлены опытные образцы 1D-детектора и 2D-монитора и проведены их испытания на стенде с источником и на пучках ИБР-2 [15, 16]. Оба детектора выполнены на основе многопроволочных пропорциональных камер со съемом информации с линии задержки. Это позволило в максимальной степени

унифицировать электронику считывания (предусилители, дискриминаторы и др.) и накопления данных (преобразование и фильтрация данных, гистограммирование и др.), а также основные программные модули и интерфейсы. Накопление и визуализация данных осуществляются на персональном компьютере [17].

Проведенные ранее методические исследования и макетирование отдельных узлов позволили с высокой степенью достоверности планировать следующие технические характеристики 2D-монитора и 1D-детектора (см. табл.):

Параметры	Газовая смесь	
	2D-монитор 50 мбар He <sup>3</sup> + 950 мбар CF <sub>4</sub>	1D-детектор 2000 мбар He <sup>3</sup> + 1000 мбар CF <sub>4</sub>
Эффективность, %	0,1	40
Чувствительная область, мм	100 × 100	200 × 80
Координатное разрешение, мм	4 × 4	2
Скорость счета, соб./с	до 10 <sup>5</sup>	до 10 <sup>5</sup>
Диффер. неоднородность, %	< 5	< 5
Съем сигнала	Линии задержки	Линия задержки



Испытания монитора и 1D-детектора, проведенные в течение двух весенних и трех осенних циклов на ИБР-2, подтвердили наличие указанных характеристик.

В шестом цикле реактора ИБР-2 с 17 по 28 октября 2005 г. на спектрометрах ТЕСТ (канал 6б) и ФДВР (пятый канал) были проведены тестовые и рабочие измерения дифракционных спектров. Исследована также зависимость координатного разрешения от анодного и дрейфового напряжений. В качестве рабочих значений были выбраны  $+Hv = 4200$  В,  $-Hv = 3000$  В. При этом координатное разрешение в центре детектора составило 1,6 мм, а на краях детектора — 1,9 мм. На ФДВР с 1D-детектором проведены рабочие измерения дифракционных спектров  $(La_{0,1}Pr_{0,9})_{0,7}Ca_{0,3}MnO_3$  (манганит с СМР-эффектом, в котором при низкой температуре возникает АФМ-фаза) при  $T = 10$  и 290 К. Время накопления спектров составляло около 2 ч.

Общее время измерения образцов с 1D-детектором на пятом канале составило около 180 ч. При этом электроника и программное обеспечение работали стабильно во всех режимах измерений.

**Развитие систем окружения образца.** На дифрактометре ФСД установлены 16 дополнительных модулей сцинтилляционного детектора АСТРА вместе с механической системой юстировки, электроникой управления и сбора данных. Проведены испытания детекторов и осуществлен ввод в опытную эксплуатацию.

На спектрометре ЮМО введено в эксплуатацию устройство перемещения ПЧД-детектора вдоль нейтронновода и устройство вертикальной и горизонтальной юстировки ПЧД.

На спектрометре РЕМУР установлены устройство перемещения диафрагмы, устройство управления двумя осями гониометра и перемещением поворотной платформы на основе высокоточных двигателей ДБМ 120.

Выполнен первый этап работ по замене выработавших свой ресурс силовых приводов прерывателей нейтронных пучков ЭКТ2 на новые приводы ЭКТ4. Новый привод введен в опытную эксплуатацию на 10-м канале ИБР-2, он обеспечивает точность стабилизации фазы прерывателя 185–200 мкс.

Для каналов 6а и 6б проведены стендовые испытания барабанных прерывателей производства ОП ОИЯИ для подавления фона и систем управления прерывателями. Точность стабилизации фазы составила 25–50 мкс.

Для спектрометра НЕРА-ПР разработан и испытан криостат с рефрижератором на импульсных трубках РТ405 (Cryomech, США) для работы в диапазоне температур 250–3 К. В настоящее время получена температура 2,8 К.

**Развитие систем сбора данных и вычислительной инфраструктуры.** К числу наиболее важных результатов истекшего года следует отнести при-

обретение нового центрального сервера Sun Fire X4200, устройства массовой памяти Storage Array (6,4 Тбайт) и двух высокоскоростных сетевых коммутаторов Cisco 3750 (1 Гбит).

Как известно, в настоящее время единственным мощным вычислителем и поставщиком общего дискового пространства в LAN ЛНФ является центральный файл-сервер Enterprise 3000 фирмы SUN Microsystem (два процессора ULTRA SPARC 250 МГц, RAM — 256 Мбайт, HDD — 200 Гбайт). Сервер находится в эксплуатации восемь лет, что недопустимо долго для вычислительной техники. Кроме того, используемое в настоящее время оборудование SUN на основе RISK-архитектуры (Enterprise 3000, Sun Workstations) имеет неприемлемую для нас стоимость обслуживания и развития. В то же время происходит резкий рост производительности вычислительных систем, построенных на основе архитектуры X86, и развитие платформы AMD-64. Эти факторы и предопределили замену основных серверов вычислительного кластера ЛНФ современными мощными системами на основе Intel Pentium IV Xeon и AMD Opteron 64. Существующий сервер Enterprise 3000 будет использоваться до полного износа для работы с приложениями, написанными под старую операционную систему.

Наряду с установкой серверов планируется создание новой архитектуры LAN ЛНФ и переход на использование Gigabit Ethernet на основных магистралях сети. В настоящее время центральный коммутатор сети ЛНФ Cisco 8510CSR соединен с сетью Института двумя линками с общей пропускной способностью 200 Мбит/с. Такое подключение уже не может обеспечить устойчивое обслуживание пользователей в условиях постоянного увеличения объема трафика и нагрузки на маршрутизирующее оборудование. Кроме того, CSR8510 не позволяет эффективно управлять передачей данных при вирусных и DDOS-атаках на сеть. Перевод ядра сети на маршрутизирующие коммутаторы Cisco 3750, установка интерфейса 1 Мбит/с в CSR8510 и использование высокоскоростных соединений на основных линках LAN ЛНФ дает новые возможности дальнейшего развития сети и позволяет повысить надежность ее работы, а также обеспечить связь с сетью ОИЯИ и другими сетями на гигабитных скоростях.

Программный комплекс Sonix+ введен в эксплуатацию на спектрометре РЕМУР. В рамках комплекса Sonix+:

- разработана новая версия модулей, отвечающих за интерпретацию скрипта;
- разработана новая программа визуализации спектров Spectra Viewer для данных с 1D- и 2D-детекторов в формате Sonix+;
- осуществлялось совершенствование компонентов комплекса, библиотек скриптов и т. д.

Наряду с упомянутой выше электроникой регистрации данных и управления для сцинтилляци-

онных детекторов на спектрометре ФСД выполнены работы по развитию и тестированию программного обеспечения платы сбора данных для MWPC-детекторов. В частности, разработаны и испытаны две версии FPGA-программ для работы платы с однокоординатными детекторами и со встроенным мониторным счетчиком. Ведется разработка новой электроники сбора данных с USB-интерфейсом для многосчетчиковых систем.

Во время циклов ИБР-2 постоянно осуществлялась электронная и программная поддержка экспериментов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балагуров А. М. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2005. Т. 82. С. 672.
2. Козленко Д. П. и др. Индуцированный давлением антиферромагнетизм в манганите  $\text{La}_{0,75}\text{Ca}_{0,25}\text{MnO}_3$  // Там же. Т. 82, №7. С. 501–505.
3. Gordeliy V. I., Cherezov V. G., Teixeira J. // Phys. Rev. E. 2005. V. 72. P. 1–16.
4. Скоморохов А. Н. и др. Исследования суперионного проводника AgCuSe методом неупругого рассеяния нейтронов // Поверхность (направлено).
5. Весна В. А. и др. Обнаружение  $P$ -нечетного эффекта вылета тритонов в реакции  ${}^6\text{Li}(n, \alpha){}^3\text{H}$  // Письма в ЖЭТФ. 2005. Т. 82, № 8. С. 519–523.
6. Seo P.-N. et al. // New pulsed cold neutron beam line for fundamental nuclear physics at LANSCE // J. Res. Nat. Inst. Stand. Technol. 2005. V. 110. P. 145–148.
7. Mitchell G. E. et al. Direct  $nn$ -scattering measurement with the pulsed reactor YAGUAR // Ibid. P. 225–230.
8. Mitsyna L. V. et al. New method to extract the neutron-electron scattering length // Eur. Phys. J. C. 2005. V. 40. P. 473–477.
9. Pokotilovski Yu. N. UNC anomaly and the possibility for further decreasing the neutron losses in traps // Nucl. Instr. Meth. A. 2005. V. 554. P. 356–362.
10. Франк А. И. и др. Дифракция нейтронов на движущейся решетке как нестационарное квантовое явление // Письма в ЖЭТФ. 2005. Т. 81. С. 541–545.
11. Суховой А. М., Хитров В. А., Чер Ли. Экспериментальные основания необходимости уточнения модельных представлений о каскадном гамма-распаде компаунд-состояния сложного ядра // ЯФ. 2005. Т. 68, № 9. С. 1568–1582.
12. Frontasieva M. V., Steinnes E. Distribution of 35 elements in peat cores from ombrotrophic bogs studied by epithermal neutron analysis // J. Radioanal. Nucl. Chem. 2005. V. 265, No. 1. P. 11–15.
13. Мосулишвили Л. М. и др. Применение нейтронного активационного анализа в исследовании аккумуляции и адсорбции ртути биомассой *Spirulina platensis* // Экологическая химия (СПб.). 2005. Т. 14, № 2. С. 104–109.
14. Dutov A. G. et al. Influence of synthesis conditions and irradiation on physical properties of spontaneous crystalline diamonds // Diamond and Related Materials. 2005. V. 14. P. 1678–1682.
15. Belushkin A. et al. Development of gas-filled position sensitive detectors at FLNP // ICNS'2005, Sydney, Australia, Nov. 27 – Dec. 2, 2005.
16. Belushkin A. et al. 2D Position-sensitive monitor detector for thermal neutrons // Book of Abstr. of IV Workshop on Investigations at the IBR-2 Pulsed Reactor, Dubna, June 15–18, 2005. P. 72.
17. Levchanovski F. et al. Data acquisition boards for high-rate neutron delay line detectors with 2D position and time resolution // Ibid. P. 79.