

# ЛАБОРАТОРИЯ НЕЙТРОННОЙ ФИЗИКИ им. И. М. ФРАНКА

Научная программа Лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка в 2012 г. охватывала четыре темы Проблемно-тематического плана научно-исследовательских работ и международного научно-технического сотрудничества ОИЯИ. Она была направлена на получение новых результатов по физике конденсированных сред (тема «Исследования наносистем и новых материалов с использованием рассеяния нейтронов», 04-4-1069-2009/2014, руководители В. Л. Аксенов, А. М. Балагуров и Д. П. Козленко); по нейтронной ядерной физике (тема «Исследования в области нейтронной ядерной физики», 03-4-1104-2011/2013, руководители В. Н. Швецов и Ю. Н. Копач). Для обеспечения физических исследований осуществлялось развитие и создание базовых установок лаборатории: ИБР-2 (тема «Развитие реак-

тора ИБР-2М с комплексом криогенных замедлителей нейтронов», 04-4-1075-2009/2014, руководители А. В. Белушкин и А. В. Виноградов), а также развитие комплекса спектрометров ИБР-2 (тема «Перспективные разработки и создание оборудования для спектрометров ИБР-2М», 04-4-1075-2009/2014, руководители В. И. Приходько и С. А. Куликов).

Самыми значительными результатами 2012 г. стали получение лицензии Ростехнадзора на эксплуатацию исследовательской ядерной установки ИБР-2М и возобновление программы пользователей на ней, а также успешный физический пуск замедлителя холодных нейтронов на реакторе ИБР-2М. Оба источника нейтронов ЛНФ, реактор ИБР-2М и установка ИРЕН, работали в 2012 г. на физические эксперименты приблизительно по 1500 ч каждый.

## НЕЙТРОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД

В первой половине 2012 г. до момента получения лицензии на регулярную эксплуатацию реактора ИБР-2М научная экспериментальная работа сотрудников НЭОНИКС проводилась в нейтронных и синхротронных центрах в России и за рубежом. Она осуществлялась согласно существующим соглашениям о сотрудничестве, а также в соответствии с принятыми заявками на эксперимент.

По итогам первого этапа подачи заявок на эксперимент на модернизированном реакторе ИБР-2М было получено 163 предложения из 17 стран мира. Свыше одной трети заявок направлялись на решение физических задач, 25 % посвящались проблемам материаловедения, остальные 40 % охватывали области химии, геологических наук, биологии и прикладные задачи. Было отобрано 119 заявок, эксперименты по которым проведены на спектрометрах реактора ИБР-2М в 2012 г.

С мая 2012 г. возобновлено проведение исследовательских работ на базе реактора ИБР-2М в соответствии с пользовательской программой ЛНФ ОИЯИ. Также проводились работы по модернизации существующих и созданию новых спектрометров

в соответствии с планами развития комплекса спектрометров реактора ИБР-2М.

**Научные результаты.** Проведено исследование кристаллической и магнитной структур дейтерированного гербертсмитита  $\text{ZnCu}_3(\text{OD})_6\text{Cl}_2$  методом нейтронной дифракции, а также магнитной восприимчивости в диапазоне высоких давлений 0–10 ГПа и температур 1,5–300 К [1]. Данное соединение проявляет наиболее идеальную реализацию в кристаллических структурах магнитной двумерной кагоме-решетки ионов Cu со спином  $s = 1/2$ , имеющей основное состояние квантовой спиновой жидкости. Обнаружено, что приложение давления  $P = 2,5$  ГПа приводит к разрушению состояния квантовой спиновой жидкости в  $\text{ZnCu}_3(\text{OD})_6\text{Cl}_2$  и появлению антиферромагнитного упорядочения с температурой Нелля  $T_N = 6$  К и магнитной элементарной ячейкой  $\sqrt{3}_a \times \sqrt{3}_a$ . В области фазового перехода наблюдались аномалии барического поведения межатомных расстояний Cu–O и углов Cu–O–Cu, Cu–Cl–Cu. Проанализированы возможные механизмы данного явления.

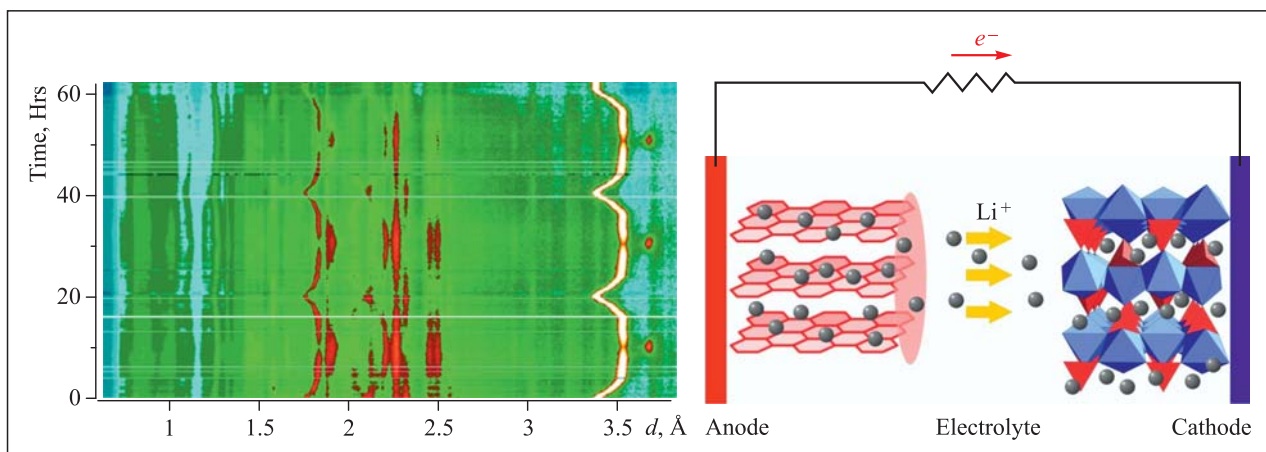


Рис. 1. Слева: эволюция нейтронных дифракционных спектров, полученных от литиевого источника тока в процессе трех циклов заряда/разряда. Каждый полный цикл заряда/разряда занимал около 20 ч. Интенсивный пик при  $d \approx 3,5 \text{ \AA}$  принадлежит графитовому аноду, пики в области  $2\text{--}2,5 \text{ \AA}$  принадлежат оливину. Справа: иллюстрация миграции ионов лития во время разряда/заряда Li-ion-батареи на основе  $\text{LiFePO}_4$  (катод, справа). В процессе заряда ионы лития внедряются в решетку графита, заставляя ее расширяться. И наоборот, во время разрядки батареи ионы лития выходят из решетки графита и его стандартные структурные параметры восстанавливаются

Впервые на дифрактометре ФДВР проведены дифракционные *ex situ* и *in situ* эксперименты в реальном времени по изучению структурных изменений, происходящих в химических источниках электрического тока (литиевые аккумуляторы) с рабочим веществом — оливином, допированным ванадием ( $\text{LiFePO}_4 + x\text{V}$ ,  $x = 0, 0,75, 2$  и  $5\%$ ) в ходе их заряда/разряда (редокс-процессов) в режиме высокого разрешения ( $\Delta d/d \sim 0,001$ ). Сверхмалое допирование ванадием позволяет значительно улучшить свойства оливина ( $\text{LiFePO}_4$ ) как катодного материала — электропроводность возрастает в 108 раз, а емкость увеличивается на 33%. В режиме *in situ* в процессе заряда/разряда исследовались две батареи, в одной из которых  $\text{LiFePO}_4$  был на 0,75% допирован ванадием. Во время заряда батареи элементарная ячейка графита (выполняет роль анода) увеличивается из-за внедрения в структуру графита ионов лития и, наоборот, уменьшается до стандартных размеров в процессе разряда и миграции ионов лития обратно в электрод  $\text{LiFePO}_4$  (рис. 1). Расширение и восстановление кристаллической решетки графита, а также количество внедренных ионов лития в  $\text{Li}_x\text{C}$  сказываются на положении и интенсивности некоторых дифракционных рефлексов от графита. Четко зафиксирован фазовый переход  $\text{LiFePO}_4 \leftrightarrow \text{FePO}_4$ : при  $d \sim 2,4 \text{ \AA}$  в заряженном аккумуляторе появляются два сильных дифракционных рефлекса, характерные для фазы  $\text{FePO}_4$ . После нескольких циклов заряда/разряда батареи не замечено деградации кристаллической структуры рабочих электродов.

Методом малоуглового рассеяния нейтронов (МУРН) изучены растворы магнетоферритина —

искусственного биологического комплекса на основе апоферритина, в полости которого инициируется синтез оксидов железа с помощью химических методов. Методом вариации контраста определена средняя плотность длины рассеяния магнетоферритина и относительный состав комплекса в зависимости от загрузочного фактора LF (Loading Factor) — среднего числа атомов на один комплекс апоферритина. Измерения показали существенное смещение точки компенсации комплекса с ростом LF, что, возможно, связано с частичным разрушением оболочки апоферритина [2].

В рамках комплексного исследования влияния магнитных наночастиц на структуру амилоидных агрегатов проведен анализ структуры стабилизированных фибриллярных амилоидов лизоцима яичного белка в кислой среде методами малоуглового рассеяния нейтронов и рентгеновских лучей в водных растворах, а также атомно-силовой микроскопии при адсорбции на поверхность слюды [3]. Показано, что полученные кривые малоуглового рассеяния нейтронов согласуются со спиральной структурой протофиламентов, образующих амилоидные фибриллы. Для анализа предложено простое приближение, которое позволяет определять период повторяемости (шаг) и среднюю толщину соответствующей спирали, а также эффективный радиус основных структурных единиц, составляющих спираль. Обнаружен «изотоп-эффект» в структуре спирали при использовании тяжелой компоненты в растворителе (смеси  $\text{H}_2\text{O}/\text{D}_2\text{O}$ ), проявляющийся в существенном увеличении диаметра спирали при переходе к раствору со значительным содержанием  $\text{D}_2\text{O}$  (рис. 2).

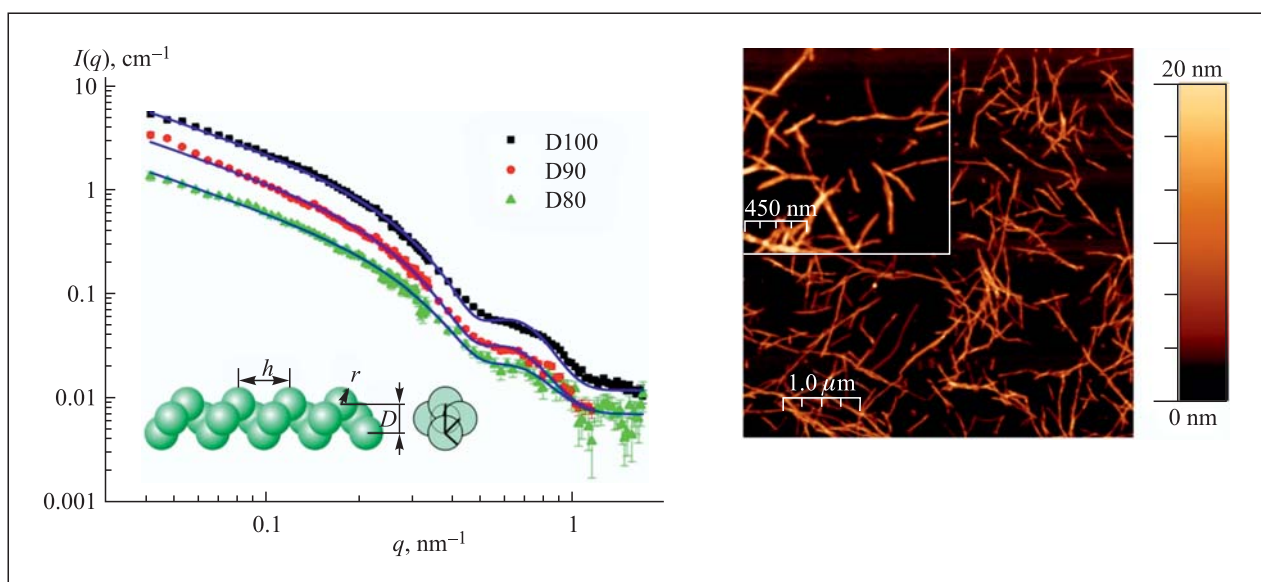


Рис. 2. Слева: кривые малоуглового рассеяния нейтронов (SANS-II, PSI) на фибриллярных амилоидных агрегатах лизоцима яичного белка при различном содержании  $D_2O$  в растворе. Кривые приближены моделью «спираль из однородных сфер», параметры которой проиллюстрированы на вкладке. Справа: изображение ACM (IEP SAS) для аналогичных агрегатов, адсорбированных на поверхность слюды из  $D_2O$

Методом малоуглового рассеяния нейтронов исследован процесс формирования мицелл светочувствительным поверхностно-активным веществом азобензол триметиламмоний бромидом (АзоТАБ). В трансконформации молекула АзоТАБ формирует заряженные эллипсоидальные мицеллы. При увеличении концентрации АзоТАБ размер и агрегационное число мицелл растут. Повышение температуры вызывает уменьшение этих параметров. Степень диссоциации брома  $\xi$ , напротив, падает с увеличением концентрации АзоТАБ и растет с повышением температуры. При облучении ультрафиолетовым светом форма кривых рассеяния резко изменяется в измеренном диапазоне векторов рассеяния  $q$ , что указывает на реорганизацию агрегатов АзоТАБ. Возможно, что в данном случае АзоТАБ формирует сильноанизотропные объекты. Показано, что добавление светочувствительного сурфактанта к нуклеиновым кислотам вызывает их компактизацию. При этом эффект компактизации также является светочувствительным. Светочувствительность объясняется изменением конформации сурфактанта в зависимости от длины волны облучения. Так, облучение системы ультрафиолетовым светом меняет конформацию молекулы АзоТАБ из транс- в цис-, что способствует отрыву АзоТАБ от РНК/ДНК и декомпактизации полинуклеотидных цепей.

Совместно с ЦНИИТМАШ в ферритно-мартенситных жаропрочных сталях 10Х9К3В2МФБР и Р91 были изучены процессы образования и распада мартенсита после нормализации с температуры  $1050\text{ }^\circ\text{C}$  и последующих отжигов в интервале температур  $500\text{--}840\text{ }^\circ\text{C}$ . Обнаружена сильная анизотро-

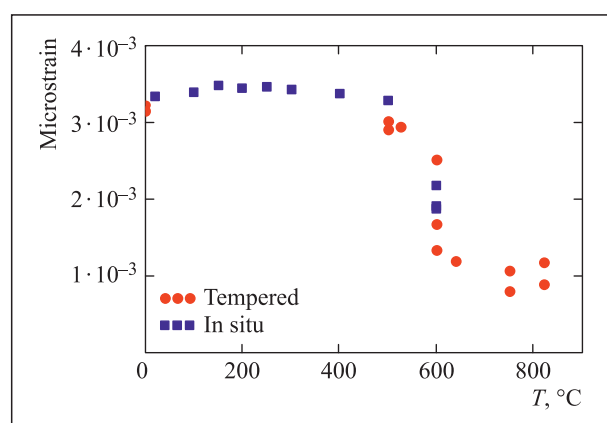


Рис. 3. Релаксация микродеформаций в стали 10Х9К3В2МФБР с увеличением температуры отжига

пия ширин дифракционных пиков, обусловленная большой плотностью дислокаций, возникающих при мартенситном превращении, определены величины микродеформаций и плотность дислокаций и их уменьшение по мере увеличения температуры и времени отжига (рис. 3). Измеренные спектры МУРН выявили большое поверхностное фрактальное рассеяние в этих мартенситах. При температуре отжига  $600\text{ }^\circ\text{C}$  в течение часа наблюдается интенсивное выделение объемных фрактальных частиц карбидов и нитридов. При дальнейшем отжиге карбиды укрупняются и уходят из поля зрения МУРН. При этом восстанавливается рассеяние на поверхностных фракталах вплоть до высоких температур отжига.

Реализован новый комплексный подход к исследованию физических свойств слоистых текстуриро-

ванных горных пород, основанный на создании модельных образцов с заданными характеристиками, приближенных по своей внутренней структуре и кристаллографической текстуре к реальным объектам, сформировавшимся в естественных условиях литосферы Земли. С этой целью (совместно с Геологическим институтом Чешской АН в Праге) проведены измерения скоростей квазипродольных упругих волн на двухфазных слоистых модельных образцах в форме шара, изготовленных из минеральных порошковых наполнителей (мусковит, кварц) и связующего послойного эпоксида. Установлен различный тип связи слоистой структуры в образцах с мусковитовым и кварцевым наполнителями с характером пространственного распределения скоростей квазипродольных ультразвуковых волн, что обусловлено самим процессом изготовления моделей (осаждением) [4].

Проведены квантово-химические расчеты динамики решетки оксида ванадия в полиморфных фазах оксида ванадия  $\alpha\text{-V}_2\text{O}_5$  и  $\beta\text{-V}_2\text{O}_5$  [5]. Оксиды ванадия широко используются в тонкопленочных электрохимических приборах и в качестве катода литиевых батарей в силу высокой плотности запасенной энергии и устойчивости к циклам перезаряда. Рассчитанные колебательные спектры сравнивались с экспериментальными рамановскими спектрами, установлено удовлетворительное согласие между ними. Анализ рассчитанных спектров позволил провести соотнесение экспериментальных линий и впервые получить жесткую привязку «структура–спектр» для двух полиморфов пентоксида ванадия. Рассчитана энергия активации фазового перехода  $\alpha\text{-V}_2\text{O}_5 \rightarrow \beta\text{-V}_2\text{O}_5$  и проведены дополнительные расчеты, направленные на выявление возможного механизма фазового перехода  $\alpha\text{-V}_2\text{O}_5 \rightarrow \beta\text{-V}_2\text{O}_5$ .

**Методические результаты.** Завершено создание основной конфигурации нового дифрактометра для исследования микрообразцов ДН-6 на канале 6б

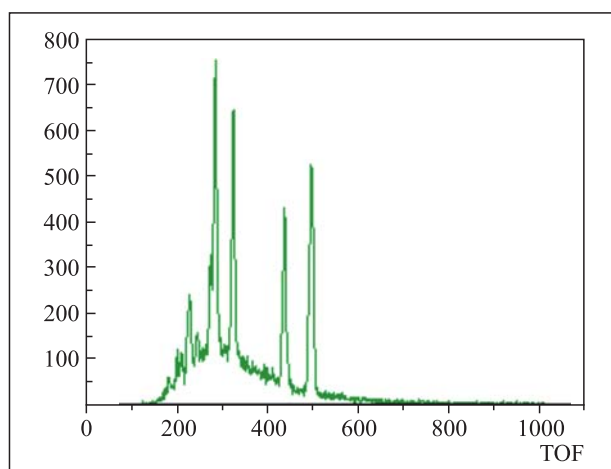


Рис. 4. Спектр от стандартного образца Ni на дифрактометре ДН-6

реактора ИБР-2. Основные элементы дифрактометра — зеркальный вакуумный нейтроновод, механическая часть, детекторная система, смонтированы на канале 6б. Проведены первые научно-методические эксперименты, которые показали увеличение светосилы на порядок по сравнению с аналогичным дифрактометром ДН-12 (рис. 4).

Завершена масштабная модернизация дифрактометров СКАТ/«Эпсилон» и НЕРА-ПР на каналах 7а-1, 7а-2, 7б, основной задачей которой была замена зеркальных нейтроноводов, установка прерывателей пучка и  $\lambda$ -прерывателей, модернизация детекторной системы, электроники накопления и окружающего образца. На спектрометре НЕРА-ПР интегральный нейтронный поток на образце увеличился примерно в два раза, поток в области холодных нейтронов — в четыре раза (в режиме работы с криогенным замедлителем) (рис. 5). Аналогичные данные по СКАТ/«Эпсилон» уточняются. Установки сданы в эксплуатацию. Для расширения экспериментальных возможностей дифрактометра «Эпсилон» приобретена камера высокого давления типа «Париж–Эдинбург».

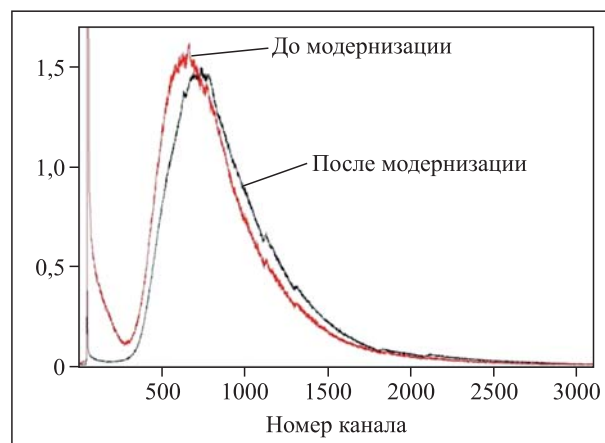


Рис. 5. Спектр падающих нейтронов, измеренный на образце ванадия на спектрометре НЕРА-ПР до и после модернизации

Продолжены работы по реконструкции дифрактометра ДН-2 в дифрактометр для исследований в режиме реального времени. Установлены прерыватель пучка, зеркальный нейтроновод, двухкоординатный ПЧД с чувствительной площадью регистрации  $200 \times 200$  мм. Начаты первые тестовые измерения.

Продолжены работы по созданию нового многофункционального рефлектометра GRAINS на реакторе ИБР-2М, канал 10. Выполнена доработка узлов системы формирования пучка в связи с обнаруженными конструкционными недостатками. Проведены завершающие работы по созданию биологической защиты, ведутся электротехнические работы, необходимые для начала пусконаладочных работ на установке.

Начаты работы по созданию инфраструктуры вывода нейтронных пучков 13-го и 14-го каналов ИБР-2М, на которых планируется разместить дифрактометр FSS (перемещаемый из GKSS) и макетный вариант установки для нейтронной радиографии. Установлена биологическая защита, завершаются электротехнические работы.

Достигнут существенный прогресс в развитии зондовой нейтронной микроскопии. Эксперимент проводился с пучком поляризованных нейтронов с длиной волны 4 Å и шириной 2 мкм, сформированным слоистым волноводом, который

## НЕЙТРОННАЯ ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

На импульсном источнике резонансных нейтронов ИРЕН ЛНФ методами нейтронной спектроскопии проводился анализ содержания бора в образцах материалов на основе фосфатных композиций. Образцы были синтезированы в Белорусском государственном университете (Минск). Новые многофункциональные материалы сочетают в себе свойства эффективного нейтронного протектора с высокой термостойкостью и механической прочностью [6].

Совместно с колледжем Геттисберга (Пенсильвания, США) проведен завершающий этап работы по анализу данных первой попытки измерения сечения  $n$ - $n$ -рассеяния, осуществленной на Уральском импульсном реакторе ЯГУАР с целью изучения зарядовой симметрии ядерных сил. Показано, что наблюдаемый аномально сильный эффект возрастания интенсивности рассеяния с ростом энергии импульса ЯГУАРА может быть объяснен радиационной десорбцией водорода с поверхности алюминиевого канала установки под действием мощной дозы  $\gamma$ -излучения во время импульса реактора. Полученная величина коэффициента десорбции,  $\eta(\gamma) = 0,02$ , согласуется с данными других экспериментов. Выполненный анализ опубликованных данных по методам обработки поверхностей металлов указывает на возможность снижения  $\eta(\gamma)$  до величины, приемлемой для измерения сечения  $n$ - $n$ -рассеяния [7].

Предложен новый метод измерения поляризации холодных/тепловых нейтронов, использующий  $P$ -четную асимметрию в ядерных реакциях, вызванных поляризованными нейтронами. Проанализирована схема, основанная на большой корреляции между спином нейтрона и циркулярной поляризацией  $\gamma$ -кванта в  $(n, \gamma)$ -реакции поляризованных нейтронов с ядрами. Этот метод может быть использован, например, для измерения поляризации нейтронного пучка в экспериментах с часто меняющейся конфигурацией. Показано, что можно ожидать высокую точность и надежность измерений [8].

направлялся на аморфную магнитную проволочку  $(\text{Co}_{0,94}\text{Fe}_{0,06})_{72,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$  диаметром 190 мкм, содержащую два типа магнитных доменов. В результате сканирования в направлении перпендикулярно пучку нейтронов был измерен поперечный профиль угла прецессии спина нейтрона в проволочке, что позволяет анализировать ее магнитную микроструктуру (распределение магнитной индукции). Экспериментально показано, что за разумное время измерений (порядка 10 ч) можно получить статистически обеспеченные данные о магнитной микроструктуре.

В эксперименте, проведенном широкой международной коллаборацией с использованием нейтронных детекторов DEMON, исследовались угловые корреляции между направлением вылета мгновенных нейтронов деления и спинами осколков деления. Для этого изучались тройные корреляции осколок-нейтрон-нейтрон, для которых путем выбора динамической системы координат, связанной с направлением вылета осколков, наблюдались угловые корреляции вылета двух нейтронов относительно друг друга. Наличие таких корреляций было предсказано теоретически и впервые наблюдалось в данном эксперименте [9].

Разработан и применен для исследования спонтанного деления  $^{252}\text{Cf}$  новый метод восстановления энергии мгновенных нейтронов деления, применимый к единичным событиям с измеренным временем пролета нейтрона [10]. В процессе анализа экспериментальных данных был разработан новый метод разделения мгновенных нейтронов и  $\gamma$ -квантов. Цифровая реализация корреляционного алгоритма позволила более чем на порядок повысить фактор подавления мгновенных  $\gamma$ -квантов деления. Важным достоинством метода явилось то, что он имеет единственный параметр для критерия отбора событий [11].

Продолжается анализ накопленных в ЛНФ экспериментальных данных по интенсивностям двухквантовых каскадов радиационного захвата нейтронов ядрами области масс от  $^{39}\text{K}$  до  $^{199}\text{Hg}$ . Выполнена проверка гипотезы о форме связи парциальной ширины  $\gamma$ -переходов между возбужденными уровнями указанных ядер и структурой волновой функции возбуждаемого уровня. Показано, что введение зависимости указанной ширины от плотности возбуждаемых  $\gamma$ -переходом уровней обеспечивает высококачественное воспроизведение экспериментальных интенсивностей двухквантовых каскадов во всех  $\sim 40$  изученных к настоящему времени ядрах. Этот результат открывает возможность разработки моделей нового поколения каскадного

$\gamma$ -распада компаунд-состояний, обеспечивающих существенное улучшение точности вычисления параметров такого процесса и факторов, его определяющих [12].

Для массивной (500 кг,  $\varnothing 30 \times 65$  см) урановой мишенной сборки КВИНТА, облученной на нуклотроне ОИЯИ ускоренными дейтронами с энергиями от 1 до 8 ГэВ, были впервые одновременно измерены временные спектры запаздывающих нейтронов (ЗН) с помощью детектора «Изомер-М» и пространственные распределения скоростей деления  $^{238}\text{U}$ . Кроме того, с помощью жидкостных сцинтилляционных детекторов ДЕМОН были проведены первые прямые измерения энергетических спектров утечки мгновенных нейтронов, образующихся внутри мишенной сборки, которые показали наличие большого фона высокоэнергетических нейтронов. В отличие от существующих теоретических предсказаний анализ результатов измерений 2012 г. показал, что для глубоководкритической мишени из естественного урана полное число делений растет линейно в зависимости от энергии падающих дейтронов в исследованном интервале их энергий. Групповой анализ временных спектров ЗН указывает на рост средней энергии нейтронов, вызывающих деление ядер  $^{238}\text{U}$  мишени, при увеличении энергии падающих дейтронов [13].

Предложен новый эффективный способ аналитического описания электромагнитных волн в анизотропных средах. Показано, как рассчитывать отражение и преломление на границе раздела изотропной и анизотропной сред. Исследовано расщепление волн при отражении и преломлении и появление поверхностных волн. Обсуждаются поверхностные волны Дьяконова и способы их наблюдения. Показывается, как рассчитывать отражение и пропускание плоскопараллельных одноосных пластин [14].

В образце TiO/Pt/Si выполнено исследование глубинного профиля кислорода с помощью резонанса в упругом рассеянии ионов гелия с энергией 3,045 МэВ

на атомах кислорода. Показано, что путем сканирования по энергии вблизи резонанса обнаружены три слоя толщиной 10–30 нм, содержащие кислород с концентрацией 50–60–67 ат. %, и один слой с концентрацией кислорода около 10 ат. %. Измерение концентрации кислорода выполнено с точностью 2 ат. % [15]. С помощью ядерных аналитических методик RBS и ERD исследовано влияние облучения быстрыми нейтронами с дозой  $1,4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$  на характеристики SiC- и SiC(N)-пленок. Обнаружено изменение проводимости слоев в 100 раз, в то время как концентрация элементов и толщина слоев в образцах не претерпела заметных изменений [16]. Рассмотрены предельные аналитические возможности методики RBS и ERD при использовании пучков заряженных частиц (протонов и ионов гелия). Показано, что совместное использование обеих методик дает полную информацию о содержании всех элементов в поверхностном слое образца. Последовательный анализ одного и того же образца на пучке протонов и ионов гелия позволяет повысить точность определения концентрации легких элементов и увеличить глубину анализа [17].

В рамках международной программы «Атмосферные выпадения тяжелых металлов в Европе — оценки на основе анализа мхов-биоиндикаторов» в 2012 г. завершен анализ и опубликованы работы, отражающие вклад сектора нейтронного активационного анализа в европейский атлас по Македонии, Болгарии, Хорватии и Сербии [18–21]. В сотрудничестве с биофизиками Института физики им. Э. Андроникашвили Грузинского государственного университета им. И. Джавахишвили и Университета им. И. Чавчавадзе в 2012 г. продолжались исследования по разработке методов синтеза наночастиц золота и серебра некоторыми новыми штаммами бактерий и сине-зеленой водорослью *Spirulina platensis* [22].

## ИМПУЛЬСНЫЙ РЕАКТОР ИБР-2

1. Получена лицензия Ростехнадзора № ГН-03-108-2614 от 27.04.2012 на эксплуатацию исследовательской ядерной установки ИБР-2.

2. В соответствии с условиями действия лицензии на эксплуатацию исследовательской ядерной установки ИБР-2 в течение года специализированными организациями совместно с персоналом установки выполнялись плановые работы по оценке технического состояния и определению остаточного ресурса технологического оборудования установки.

3. Проведена модернизация системы охлаждения кожуха подвижного отражателя ПО-3: изменена схема разгрузки насосов со сбросом части воды непосредственно в бак дистиллята и произведена замена

насосов системы охлаждения кожуха модулятора реактивности ПО-3.

4. С мая 2012 г. проводились регулярные циклы работы ИБР-2М на мощности 2 МВ для научных экспериментов с функционированием замедлителя СМ-202 в водяном или криогенном режиме в соответствии с планом-графиком физического пуска замедлителя.

В таблице представлены данные по работе ИЯУ ИБР-2 на физический эксперимент.

Дополнительно 10 июля проводился однодневный цикл работы реактора для тестирования криогенной системы.

### Данные по работе ИБР-2 на физический эксперимент

№ цикла	Период	Режим работы замедлителя	Мощность реактора, МВт	Время работы реактора на мощности, ч	Время работы реактора на физический эксперимент, ч
1	21 мая – 1 июня	Водяной	2	247	241
2	18 – 29 июня	Водяной	2	272	264
3	24 – 29 сентября 3 – 9 октября	Криогенный Криогенный	2	244	201
4	22 октября – 1 ноября	Водяной	2	179	171
	12 – 24 ноября	Водяной	2	290	281
	28 ноября – 4 декабря	Криогенный	2	171	131
	13 – 21 декабря	Криогенный	2	189	182
Всего:				1592	1471

### ПЕРСПЕКТИВНЫЕ РАЗРАБОТКИ И СОЗДАНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ СПЕКТРОМЕТРОВ ИБР-2

В рамках проекта комплекса криогенных замедлителей реактора ИБР-2 проведен пуск первого замедлителя КЗ-202 при максимальной мощности реактора 2 МВт. Все системы КЗ-202 работали в нормальном режиме, и камера полностью загружалась замороженными мезитиленовыми шариками. Наблюдение за процессом заполнения камеры шариками (мониторинг) осуществлялось путем получения нейтронного образа камеры замедлителя на двухкоординатном ПЧД методом «камеры-обскуры» (рис. 6). В конце рабочего цикла реактора, который составил 5,5 сут, установлено, что выигрыш в потоке холодных нейтронов с поверхности криогенного замедлителя по сравнению с водяным замедлителем составил до 13 раз. В 2012 г. по проекту выполнена также модернизация автоматизированной

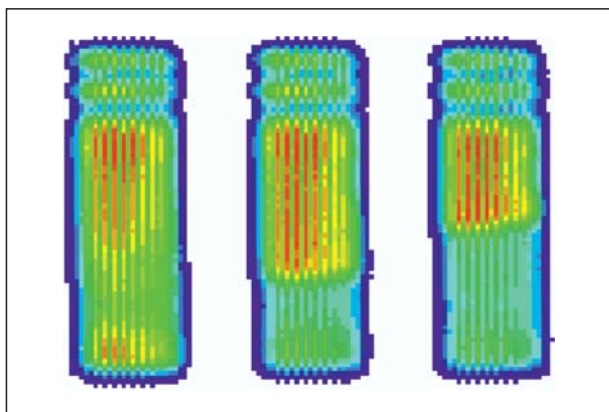


Рис. 6. Нейтронное изображение части комплекса замедлителей КЗ-202 с криогенным замедлителем, расположенным в нижней половине, при разном уровне заполнения шариками: пустая камера (слева), заполненная на 2/3 (в центре) и полная (справа)

системы сбора и регистрации контрольной и измерительной информации с датчиков системы контроля холодного замедлителя.

Завершены работы по созданию установки для очистки гелия. Установка предназначена для очистки и подготовки гелия-3 для вторичного использования в детекторах нейтронов. Смесь газов из детекторов, содержащая гелий-3, сохраняется в резервуарах установки, и при помощи криогенной системы и системы перекачки гелий очищается от других газов. Затем с помощью специального криогенного насоса компримируется до давления 80 бар, достаточного для заправки новых детекторов. На установке проведены пусконаладочные работы и начата ее эксплуатация.

Продолжалось развитие программного комплекса VITESS. В 2012 г. были усовершенствованы специальные VITESS-модули, позволяющие моделировать поведение спина нейтрона в произвольных магнитных полях, и выполнен первый этап оригинального проекта: погружение VITESS-модулей в магнитное поле. К настоящему времени разработан модуль «поляризационное зеркало в магнитном поле» и выполнено его тестирование, модуль будет включен в следующие версии VITESS. Разработаны и находятся в стадии тестирования четыре новых VITESS-модуля, позволяющих моделировать и рассчитывать поверхности временной фокусировки для времяпролетных спектрометров на импульсных источниках нейтронов. Кроме того, в комплекс VITESS введен и адаптирован из программы MCSTAS модуль для моделирования газонаполненного ПЧД.

На 7-м канале ИБР-2 завершено изготовление и выполнен монтаж 80-метрового нейтронновода НЕРА-ПР. Произведена юстировка оптических элементов. Изготовлена регулируемая диафрагма ней-

тронного пучка. Управление диафрагмой осуществляется шаговыми двигателями, подключенными к РС через контроллер и преобразователь CAN/USB. Проведена также модернизация многосчетчикового детектора НЕРА-ПР. Введена в эксплуатацию система управления коллиматорами детекторов и гониометром Huber на спектрометре «Эпсилон». В настоящее время на этих спектрометрах установлены новые DAQ-системы для точечных детекторов, завершаются наладочные работы и проводятся тестовые измерения. Система автоматизации этих установок контролирует также состояние прерывателей, шибера, показания вакуумных датчиков и других элементов спектрометров. Отлажены на стенде и подготовлены к переносу на пучки комплекты аппаратуры систем автоматизации и систем сбора данных для спектрометров СКАТ, GRAINS и ДН-2 (RTD). Для GRAINS выполнен также монтаж и проведены испытания двух поляризаторов и двух диафрагм, а для ДН-2 разработаны чертежи системы коллимации пучка.

Кроме указанных выше установок к настоящему времени введены в эксплуатацию новые DAQ-системы для точечных детекторов на спектрометрах ФСД, ДИН-2ПИ, ДН-6 и РЕФЛЕКС.

Продолжались работы по созданию на 13-м канале реактора ИБР-2 нового фурье-дифрактометра высокого разрешения, основанного на узлах спектрометра FSS (GKSS, Гестхахт, Германия). В связи с созданием испытательного стенда по нейтронной радиографии на 14-м канале были скорректированы проекты размещения оборудования и разработана новая схема биологической защиты 13-го и 14-го каналов, разработаны чертежи, изготовлены и смонтированы элементы защиты. К сожалению, до сих пор не решены проблемы, связанные с транспортировкой оборудования FSS из Санкт-Петербурга в Дубну.

Завершен проект создания газового кольцевого секционированного детектора для дифрактометра ДН-6. В 2012 г. по проекту выполнены следующие основные работы:

— разработаны и изготовлены механические узлы для крепления и юстировки детектора, а также установлена его фоновая защита;

— выполнена наладка 96-канальной электроники сбора и накопления данных;

— разработаны программы для тестирования детектора, модернизировано программное обеспечение накопления данных и разработан новый программный интерфейс;

— проведены тестовые испытания детектора на канале 6б реактора ИБР-2 с рабочими смесями при различных давлениях гелия-3;

В настоящее время детектор передан физикам для дальнейшего тестирования и проведения рабочих измерений.

Проведена замена вышедших из строя позиционно-чувствительных детекторов на ФДВР и РЕФЛЕКС. Изготовлены и переданы в ИЯИ (Ржеж, Чехия) две детекторные системы, включающие в себя 2D ПЧД, детекторную электронику, электронику сбора и накопления данных, а также программное обеспечение. На дифрактометре ДН-2 (RTD) введена в эксплуатацию детекторная система с 2D ПЧД (чувствительная область  $225 \times 225$  мм) и завершено изготовление кольцевого гелиевого детектора обратного рассеяния (в декабре планируются его испытания на пучке). Изготовлен и испытан сцинтилляционный счетчик на основе ND-экрана со съемом светового сигнала с помощью спектросмещающих волокон. Начата подготовка к изготовлению сцинтилляционных счетчиков для детектора «Астра». Проведен ряд работ по улучшению чистого помещения, его площадь увеличена до  $10 \text{ м}^2$ .

Проведены измерения профилей нейтронных пучков на каналах 2, 4, 6а, 6б, 7, 9, 11, 12 модернизированного реактора ИБР-2М. Измерения проводились в зонах вывода пучков с помощью двухкоординатного ПЧД-монитора тепловых нейтронов. Для каждого пучка были измерены средняя интенсивность, координатное и временное распределения нейтронных потоков.

Выполнен большой объем работ по развитию и сопровождению инструментального программного комплекса Sonix+ на спектрометрах ИБР-2М:

— подготовлены версии Sonix+ и начата их опытная эксплуатация на спектрометрах НЕРА-ПР, «Эпсилон», ДИН-2ПИ, ДН-6, RTD, где установлены новые DAQ-системы; подготовлены и испытаны на стенде версии Sonix+ для СКАТ и ДН-2 (RTD);

— разработаны варианты программ юстировки для спектрометров ЮМО, РЕМУР и РЕФЛЕКС;

— разработан и внедрен на спектрометрах новый вариант пользовательского интерфейса на основе PyQt и Matplotlib.

Успешно выполнена главная задача в развитии локальной вычислительной сети в прошедшем году — обеспечена возможность работы конечных пользователей на скорости до 1 Гбит/с в основных сегментах сети (здания 42, 42а, 43 (ИРЕН), 44, 117, 119). Обеспечена также бесперебойная работа всего сетевого оборудования как на спектрометрах ИБР-2, так и в офисах персонала лаборатории.

В связи с увеличением потока данных, поступающих со спектрометров, сетевой сегмент ИБР-2 был выделен в подсеть и подключен непосредственно к коммутатору лаборатории, что позволило обеспечить его пропускную способность до 10 Гбит/с.

Приобретен и установлен новый сервер Super-Micro 6047, предназначенный в первую очередь для хранения данных. Объем дисковой памяти сервера составляет 72 Тбайта.



## КОНФЕРЕНЦИИ И ШКОЛЫ

В 2012 г. в ЛНФ были организованы и проведены три научные школы для молодых ученых: V Высшие курсы для молодых исследователей, студентов, аспирантов и докторов наук из стран СНГ по современным методам исследований наносистем и материалов «Синхротронные и нейтронные исследования наносистем» (СИН-нано-2012) (17 июня – 5 июля, Москва–Дубна), III Международная молодежная научная школа «Приборы и методы экспериментальной ядерной физики. Электроника и автоматика экспериментальных установок» (8–12 сентября, Дубна) и IV Международная молодежная научная школа «Современная нейтронография: фундаментальные и прикладные исследования функциональных и наноструктурированных материалов» (24–28 сентября, Дубна). Они продолжили традицию организации школ, посвященных фундаментальным и прикладным аспектам исследований в области нейтронной физики, физики конденсированного состояния, материаловедения и в других смежных областях с целью привлечения молодых ученых для развития и использования установок ЛНФ.

С 21 по 26 мая в Алуште (Украина) проходил 20-й Международный семинар по взаимодействию

нейтронов с ядрами «Фундаментальные взаимодействия и нейтроны, ядерная структура, ультрахолодные нейтроны, смежные вопросы». Представленные на семинаре работы охватывали широкий спектр фундаментальных и прикладных проблем в области ядерной физики и экологии, изученных с помощью нейтронов.

По инициативе румынского представителя в Европейской ассоциации по нейтронному рассеянию (ENSA) местом проведения 39-го совещания ENSA 8–9 октября 2012 г. был выбран международный нейтронный центр ЛНФ ОИЯИ (Дубна).

С 3 по 7 сентября 2012 г. в Алуште (Украина) проходила Международная летняя школа и совещание «Сложные и магнитные системы “soft matter”: физико-механические свойства и структура» (CMSMS'12), организованная Объединенным институтом ядерных исследований совместно с Западным университетом Тимишоары (Тимишоара, Румыния), Институтом механики сплошных сред РАН (Пермь), Институтом физики и ядерной инженерии (Бухарест, Румыния) и Румынским физическим обществом.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kozlenko D. P. et al. From Quantum Disorder to Magnetic Order in an  $s = 1/2$  Kagome Lattice: A Structural and Magnetic Study of Herbertsmithite at High Pressure // Phys. Rev. Lett. 2012. V. 108. P. 187207 (1-5).
2. Melnikova L. et al. Physical Characterization of Iron Oxide Nanoparticles in Magnetoferritin // Magnetohydrodynamics. 2012 (accepted).
3. Avdeev M. V. et al. On the Determination of the Helical Structure Parameters of Amyloid Protofilaments by Small-Angle Neutron Scattering and Atomic-Force Microscopy // J. Appl. Cryst. 2012 (accepted).
4. Nikitin A. N. et al. Peculiarities of Ultrasound Propagation Through Layered Structurally Inhomogeneous Solid Bodies // J. Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2012. V. 6, No. 6. P. 954–960.
5. Baddour-Hadjean R. et al. Lattice Dynamics of  $\beta$ -V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>: Raman Spectroscopic Insight into Atomistic Structure of a High-Pressure Vanadium Pentoxide Polymorph // Chem. Mater. 2012. V. 51. P. 3194.
6. Kuzhir P. P. et al. Boron Enriched Unfired Phosphate Ceramics as Neutron Protector // Nanosci. Nanotechnol. Lett. 2012. V. 4. P. 1–6.
7. Stephenson S. L. et al. Experiment on Direct  $nn$  Scattering the Radiation-Induced Outgassing Complication // Neutron Spectroscopy. Nucl. Phys. A. 2012. V. 895. P. 33–43.
8. Gledenov Yu. M. et al. A Method to Measure Neutron Polarization Using  $P$ -Even Asymmetry of  $\gamma$ -Quantum Emission in the Neutron–Nuclear Interaction // Yad. Fiz. 2012. V. 75. P. 836–839.
9. Kopatch Yu. et al. Angular Correlations between Fragment Spins and Prompt Neutrons in Spontaneous Fission of <sup>252</sup>Cf // Proc. of the 20th Intern. Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei (ISINN-20), May 21–26, 2012 (in press).
10. Zeynalov Sh. et al. A New Approach to Prompt Fission Neutron TOF Data Treatment // Phys. Procedia. 2012. V. 31. P. 132–140.
11. Zeynalova O. V. et al. Cross Correlation Method Application to Prompt Fission Neutron Investigation // AIP Conf. Proc. 2012. V. 1487. P. 207.
12. Sukhvojev A. M. et al. General Trend and Local Variations of Neutron Resonance Cascade Gamma-Decay Radiative Strength Functions. JINR Commun. E3-2012-100. Dubna, 2012.
13. Adam J. et al. Recent Results of Study of ADS with 500 kg Natural Uranium Target Assembly QUINTA Irradiated by Deuterons with Energies from 1 to 8 GeV at JINR Nuclotron // Book of Abstr. of the XXI Intern. Baldin Seminar on High Energy Physics Problems, Dubna, Sept. 10–15, 2012. Dubna, 2012. P. 37.
14. Ignatovich F. V., Ignatovich V. K. Optics of Anisotropic Media // Phys. Usp. 2012. V. 55. P. 709–720.

15. *Kobzev A. P.* Investigation of Depth Profiles of Oxygen in Oxide Nanolayers // XIX Intern. Conf. on Electrostatic Accelerators and Beam Technologies (ESACCEL 2012), Obninsk, Russia, Nov. 13–15, 2012.
16. *Huran J. et al.* Investigation of Neutron Irradiation Influence on the Properties of SiC and SiC(N) Films by Nuclear and Physical Analytical Methods // Ibid.
17. *Kobzev A. P. et al.* Analytical Possibilities of Nuclear-Physical Techniques // Intern. Conf. «Fundamental Problems of Nuclear Physics, Atomic Power Engineering and Nuclear Technologies» (NUCLEUS 2012) (62nd Conf. on Nuclear Spectroscopy and Atomic Nucleus Structure), Voronezh, Russia, June 25–30, 2012.
18. *Krmar M. et al.* Moss Biomonitoring Technique Used to Study Spatial and Temporal Atmospheric Deposition of Heavy Metals and Airborne Radionuclides in Serbia // Essays of Fundamental and Applied Environmental Topics / Ed. D. T. Mihailovic. Nova Publ. Inc., 2012. P. 159–192.
19. *Spiric Z. et al.* Multi-Element Atmospheric Deposition Study in Croatia // Intern. J. Envir. Anal. Chem. 2012. V.92. P. 1200–1214.
20. *Barandovski L. et al.* Trends of Atmospheric Deposition of Trace Elements in Macedonia Studied by the Moss Biomonitoring Technique // J. Envir. Sci. Health, Part A. 2012. V. 47. P. 2000–2015.
21. *Lazo P. et al.* The Study of Atmospheric Deposition of Heavy Metals in Tirana and Vlora Cities, Albania, by Moss Biomonitoring Technique // Fresenius Environ. Bull. 2012. V. 21. P. 2170–2177.
22. *Kalabegishvili T. L. et al.* Synthesis of Gold Nanoparticles by Some Strains of Arthrobacter Genera // J. Mater. Sci. Engin. A. 2012. V. 2. P. 164–173.