

В 1976 году В.И.Лушиков предложил эксперимент по наблюдению квантовых состояний в гравитационном поле Земли. В 1999 году в Гренобле на реакторе ИЛЛ интернациональной группой исследователей из Франции, Германии и России (Гатчина, ПИЯФ и Дубна, ЛНФ ОИЯИ) такой эффект был наблюден.

В последнее время на установке КОВШ в Гренобле на реакторе ИЛЛ был получен минимально достигнутый коэффициент поглощения УХН в стенках сосуда, на которые был нанесен слой низкотемпературного безводородного масла. В экспериментах был получен коэффициент поглощения $\sim 5 \cdot 10^{-6}$ при $T \sim 100$ К.

В ЛНФ проводились и теоретические исследования по тематике УХН, написан ряд обзоров по УХН. В.К.Игнатовичем написана книга «Физика ультрахолодных нейтронов», которая стала широко известной, была переведена на английский язык и издана в Оксфорде.

Нейтронная оптика и другие приложения

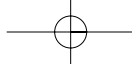
Обнаружение УХН и исследования с ними побудили обсуждение возможности создания нейтронного микроскопа (А.И.Франк и другие авторы) и проведение исследований по волновой оптике, которые проводятся в Гренобле группой А.И.Франка. Были исследованы особенности прецессии нейтрона в магнитном поле в условиях его взаимодействия со средой и показана возможность использования ларморовской прецессии для оценки времени взаимодействия нейтрона с квантовыми объектами. Изучен также закон дисперсии УХН на гравитационном спектрометре с использованием интерференционных фильтров. На этом же спектрометре исследована применимость нейтронной оптики к сильно поглощающим средам на примере прохождения УХН через гадолиниевые пленки.

Ю.Н.Покотиловский предложил проверку принципа эквивалентности прямым измерением гравитационного ускорения нейтрона в эксперименте по времени пролета с хорошей монохроматизацией с применением интерференционного фильтра и быстрого прерывателя пучка с помощью электромагнитной заслонки.

6. Физика конденсированных сред

Практически сразу после создания исследовательских ядерных реакторов было обнаружено, что нейтрон является мощнейшим инструментом изучения вещества в конденсированном состоянии. По сравнению с другими видами излучений, используемых для получения информации о структурной организации и динамике атомов и молекул в конденсированных средах (твердых телах и жидкостях), нейтроны имеют ряд преимуществ, поэтому нейтронография, то есть использование различных видов рассеяния нейтронов в конденсированных средах с целью изучения их строения, стала совершенно необходимым инструментом современного естествознания.

Для проведения экспериментов по рассеянию нейтронов конденсированными средами имеется две возможности. На источнике нейтронов с непрерывным потоком выделяют моноэнергетический пучок и измеряют зависимость интенсивности рассеянных в образце нейтронов от изменения их энергии при неупругом процессе или от угла рассеяния при упругом процессе. На импульсном источнике на образец падает



сплошной («белый») спектр нейтронов и измеряется зависимость интенсивности рассеянных в образце нейтронов от полного времени их пролета от источника до детектора. При анализе неупругого процесса дополнительно измеряется энергия нейтронов, регистрируемых детектором.

Исследования по физике конденсированных сред на первом пульсирующем реакторе в Дубне, как дополняющие работы по ядерной физике, были инициированы физиками из Польши — Е.Яником и другими, и были поддержаны активно Ф.Л.Шапиро. В результате нейтронная физика в ЛНФ начала развиваться широким фронтом.

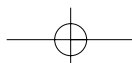
Спектроскопия тепловых нейтронов

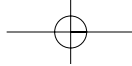
Метод времени пролета был хорошо известен в нейтронной ядерной спектроскопии, поэтому разработки методик экспериментов по неупругому рассеянию тепловых нейтронов конденсированными средами начались одновременно с пусковыми работами на реакторе ИБР в 1960 году. Уже через два года В.В.Голиковым, И.Жуковской, Ф.Л.Шапиро, А.Шкатулой и Е.Яником были получены первые результаты по динамике воды и динамике водорода в гидриде циркония. В 1965 году по инициативе физиков из Кракова был создан первый вариант спектрометра «обратной геометрии» для анализа неупругих процессов, в котором фиксируется энергия рассеянных нейтронов. Дальнейшие модификации этого спектрометра привели к созданию уникального Краковско-Дубненского спектрометра обратной геометрии (КДСОГ) на реакторе ИБР-30 и затем спектрометров КДСОГ-М и НЕРА-ПР на реакторе ИБР-2.

На спектрометрах КДСОГ был выполнен целый ряд пионерских исследований динамики молекулярных кристаллов и эффектов кристаллического электрического поля в редкоземельных сплавах и соединениях (И.Натканец, А.В.Белушкин, Е.Л.Горемычкин, Я.Майер и др. совместно с Институтом физики твердого тела РАН). Эта же группа в 80-х годах изучала также фазовые переходы и спектры колебаний решетки в суперионных проводниках, температурную зависимость динамики и структуры сверхпроводящих керамик, эффекты кристаллического поля в редкоземельных интерметаллидах (совместно с Институтом металлургии и материаловедения им. А.А.Байкова). Были исследованы динамические свойства водорода в металлах (совместно с РНЦ КИ и ФЭИ). Начатое А.В.Белушкиным, И.Натканцем, Н.М.Плакидой и др. изучение вибрационных спектров и структурных переходов в суперионных проводниках вошло в широкий цикл исследований систем с разупорядоченными водородными связями, выполненный в 90-х годах в Лаборатории Резерфорда—Эпплетона (Англия) под руководством и при участии А.В.Белушкина.

Другие спектрометры неупругого рассеяния — спектрометры типа ДИН, в которых фиксируется энергия падающих на образец нейтронов, — были созданы физиками ФЭИ. Наиболее яркие результаты, полученные с помощью этих спектрометров, связаны с изучением спектра элементарных возбуждений и поиском бозе-конденсата в сверхтекучем гелии (Ж.И.Козлов, А.В.Пучков и др.).

Исследования с помощью неупругого рассеяния нейтронов на реакторах ИБР направлены главным образом на измерения плотности состояний и, следовательно, связаны только с некогерентным движением атомов в кристалле. Для изучения когерентного движения атомов в твердых телах эффективно используются реакторы не-





А.И.Куклин (слева) и Г.А.Вареник за наладкой экспериментальной аппаратуры

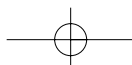
прерывного действия. Более универсальными для реакторов ИБР оказались исследования упругого рассеяния нейтронов.

Исследования на дифрактометрах

Дифракционные эксперименты с использованием метода времени пролета на реакторе ИБР были начаты в 1962 году и, по существу, явились первыми реальными экспериментами в этой области, показавшими работоспособность метода. Первые результаты были представлены в докладе Б.Бураса, Е.Лециевича, Е.Сосновского, И.Сосновской и Ф.Л.Шапиро на III Международной конференции по мирному использованию атомной энергии в 1964 году. В это же время возможность постановки дифракционного эксперимента по времени пролета на реакторе непрерывного действия была показана группой Б.Бураса в Сверке (Польша), однако мощности реактора явно не хватало для полноценной реализации метода.

Вскоре после экспериментов в Дубне и Сверке времяпролетная дифрактометрия начала быстро распространяться в мире. В 1964 году под руководством Б.Бураса дифрактометр по времени пролета был установлен на реакторе с прерывателем Ферми в Ризо (Дания). Их начали использовать на импульсных источниках нейтронов на базе электронных ускорителей: в 1966 году в США, в 1968 году в Японии, в 1969 году в Великобритании. Дифрактометры на этих импульсных источниках, так же как и первый дифрактометр на пульсирующем реакторе ИБР, были значительным продвижением по сравнению с комбинацией реактор непрерывного действия – прерыватель Ферми.

Уже в первых исследованиях, выполненных в ЛНФ, были подтверждены многие из предсказывавшихся достоинств дифрактометров по времени пролета и, прежде всего, большая скорость набора информации и возможность измерения трехмерных дифракционных спектров. Особенно привлекательным является импульсный характер облучения образца пучком нейтронов, что позволяет включать и внешние воздействия на образец в импульсном режиме и достигать гораздо больших значений параметров этого воздействия, нежели в стационарном режиме.





А.М.Балагуров и А.И.Бескровный за наладкой экспериментальной аппаратуры на пучках реактора ИБР-2



История развития метода времени пролета в ЛНФ в 60-х и 70-х годах содержит несколько ярких моментов. В 1966 году, одновременно и независимо в Дубне и Аргоне (США), был открыт принцип временной фокусировки нейтронов, позволивший увеличить светосилу и разрешающую способность дифрактометров. В 1967 году на созданном В.В.Нитцем на реакторе ИБР дифрактометре с импульсным магнитным полем удалось впервые получить данные по изменениям магнитной структуры гематита, происходящим в полях до 12 Тл. В начале 70-х годов на ИБР был построен специализированный дифрактометр ДН-2 для изучения монокристаллов, впервые в мировой практике оборудованный позиционно-чувствительным детектором. На нем А.М.Балагуровым, А.И.Бескровным и Б.Н.Савенко совместно с сотрудниками Института кристаллографии РАН выполнены пионерские работы по изучению доменных структур сегнетоэлектриков-сегнетоэластиков, в которых удалось на микроскопическом уровне проследить за процессами поляризации и переполяризации доменов под действием внешнего электрического поля. Первое уточнение структуры монокристалла на дифрактометре по времени пролета также выполнено на реакторе ИБР, а именно, в молекуле двойного лантан-магниевого нитрата определены позиции всех атомов водорода, входящих в состав гидратационной воды.

Полностью возможности времяпролетной дифрактометрии начали реализовываться в начале 80-х годов, когда появилось новое поколение высокопоточных импульсных источников нейтронов.

Создание мощных источников на базе протонных ускорителей в Японии (Цукубо – 1980 г.), в США (Аргона – 1981 г. и Лос-Аламос – 1985 г.), в Великобритании (Дидкот – 1985 г.), а также пульсирующего реактора ИБР-2 в Дубне (1984 г.) дало второе рождение времяпролетной дифрактометрии. К настоящему времени на каждом из этих источников построено несколько дифрактометров по времени пролета, которые превосходят дифрактометры на реакторах непрерывного действия по целому ряду параметров.

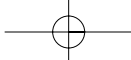
К 1982 году большинство нейтронных спектрометров были с ИБР-30 перенесены на ИБР-2, и начаты первые эксперименты на многоцелевом дифрактометре ДН-2.

Несколько позже были введены в эксплуатацию дифрактометр с импульсным магнитным полем СНИМ, текстурный дифрактометр НСВР и дифрактометр для исследования идеальных кристаллов ДИФРАН. Существенно больший, чем на ИБР-30, поток нейтронов, улучшенная организация пучков и современные электронные средства управления экспериментом обеспечили качественно новые возможности для структурной нейтронографии, что привело к заметному обновлению тематики исследований.

В частности, на дифрактометре ДН-2 совместно с Институтом физико-химической биологии им. А.Н.Белозерского (МГУ) и Институтом биологической физики РАН была начата программа исследований биологических мембран с помощью дифракции нейтронов по времени пролета с применением позиционно-чувствительного детектора, что позволило, в отличие от обычной постановки эксперимента на реакторах с непрерывным потоком, одновременно получать дифракционные отражения при различных длинах волн нейтрона, соответствующих различным углам дифракции. Особенно успешной темой стали исследования А.М.Балагурова, В.И.Горделия и Л.С.Ягужинского структуры липидных мультислоев, в которых определялись толщины липидного бислоя и водной прослойки, места внедрения малых гидрофобных и гидрофильных молекул, кинетика сорбции и десорбции воды и др.

Большой поток нейтронов на реакторе ИБР-2 позволяет эффективно исследовать необратимые процессы в кристаллах (Г.М.Миронова). Суть созданного метода, который получил название нейтронографии в реальном времени, состоит в том, что дифракционные спектры от исследуемого объекта измеряются за время, заметно меньшее, чем характерное время перестройки его структуры в результате тех или иных процессов. Понятно, что возможности метода во многом зависят от того, насколько малые времена измерения спектров в принципе достижимы. На стационарных источниках нейтронов, в том числе на самом мощном из них – реакторе ИЛЛ, удается набирать необходимую статистику при времени измерения около 1 мин. Первые же эксперименты на ИБР-2 показали, что имеются возможности улучшить временное разрешение до нескольких секунд. За короткое время была проведена серия экспериментов, в которых удалось получить подробную информацию о структурных перестройках в ходе гидратации компонентов цемента, синтезе из исходных компонентов высокотемпературных сверхпроводников, фазовых переходах в закаленном под высоким давлением тяжелом льде (совместно с Институтом физики твердого тела РАН) и многих других процессах. В модельном эксперименте на ДН-2 удалось впервые в мире зарегистрировать дифракционные спектры от одного импульса мощности источника. Как было показано Г.М.Мироновой, ситуация, когда одной вспышки оказывается достаточно для набора статистики, в принципе позволяет работать с временным разрешением, сразу на три порядка лучше, то есть $\sim 10^{-3}$ с. Эта величина, по-видимому, близка к предельному временному разрешению в нейтронографии необратимых процессов на импульсных источниках нейтронов. Она сравнима с величинами, достигнутыми на сверхъярких источниках синхротронного излучения и существенно лучше, чем пределы, достижимые на стационарных реакторах.

Одно из важнейших и перспективных направлений нейтронной времяпролетной дифрактометрии связано с использованием высоких давлений при структурных исследованиях. В сотрудничестве с физиками из Института физики высоких давлений



им. Л.Ф.Верещагина (ИФВД) РАН и РНЦ «Курчатовский институт» были развиты методы исследования вещества при высоких давлениях на основе сочетания техники монокристалльных наковален и светосильных низкофоновых систем регистрации нейтронов. Использование монокристалльных наковален позволяет проводить исследования очень малого количества вещества (объемом до $0,01 \text{ мм}^3$), что значительно расширяет возможности изучения монокристаллов новых соединений и материалов. Совместно с РНЦ КИ на реакторе ИБР-2 создан уникальный дифрактометр ДН-12 для исследований при давлениях до 20 ГПа (В.Л.Аксенов, А.М.Балагуров, С.Л.Платонов, Б.Н.Савенко, В.П.Глазков, И.В.Наумов, В.А.Соменков, Г.Ф.Сырых). В настоящее время это самый светосильный дифрактометр в мире для изучения микрообразцов.

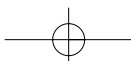
Фурье-дифрактометрия

Следующим важным этапом стало создание в 1992 году на реакторе ИБР-2 фурье-дифрактометра высокого разрешения (ФДВР). Второй раз Дубна стала местом реализации на импульсном источнике нового метода в нейтронной дифракции – метода нейтронной фурье-дифрактометрии. В отличие от обычной ситуации в нем фиксируется не время пролета каждого зарегистрированного нейтрона, а вероятность, с которой зарегистрированные нейтроны распределены по времени пролета. Технические проблемы восстановления дифракционного спектра в методе с фурье-прерывателем были решены финскими физиками из Центра технических исследований в Хельсинки, разработавшими обратный метод времени пролета и реализовавшими его в макетном варианте в 1975 году. Первый фурье-дифрактометр для структурных исследований на реакторе непрерывного действия был создан в 1984 году в ПИЯФ РАН.

Вскоре стало ясно, что наиболее адекватным для эффективной реализации метода является импульсный источник нейтронов с большой длительностью импульса, то есть источник типа реактора ИБР-2. В 1989 году Лаборатория нейтронной физики им. И.М.Франка совместно с ПИЯФ РАН и Центром технических исследований Финляндии начала создание фурье-дифрактометра высокого разрешения на реакторе ИБР-2. Это стало возможным благодаря финансовой поддержке в рамках соглашения между ОИЯИ и министерством науки ФРГ. С учетом опыта, полученного в предыдущие годы в Хельсинки и Гатчине, удалось успешно завершить проект и 11 июня 1992 года получены первые спектры (В.Л.Аксенов, А.М.Балагуров, В.Г.Симкин, А.П.Булкин, В.А.Кудряшев, В.А.Трунов, О.Антсон, П.Хиисмяки, А.Тиита).

В настоящее время ФДВР – один из лучших в мире нейтронных дифрактометров, обладающий разрешением на уровне одной десятой доли процента и рекордным потоком нейтронов на образце. ФДВР открывает широкие перспективы для структурных исследований в физике, химии, биологии, материаловедении. Конкретные применения ФДВР включают прецизионные исследования структуры поликристаллов, анализ дифракционных спектров от монокристаллов, если необходимо столь высокое разрешение, и эксперименты по анализу внутренних напряжений в объемных изделиях.

Конструкция ФДВР позволяет проводить эксперименты как с порошками, так и с монокристаллами с относительным разрешением по межплоскостному расстоянию лучше, чем $0,1\%$. Это обстоятельство было в полной мере использовано при изучении явления разделения фаз в сильнокоррелированных электронных системах, привлекающего в настоящее время пристальное внимание и теоретиков, и экспериментато-



ров. На ФДВР была проведена серия экспериментов с монокристаллами лантанового купрата (А.М.Балагуров, В.Ю.Помякушин, В.Г.Симкин, А.А.Захаров), в которых удалось наблюдать сосуществование двух разных типов фазового расслоения, возникающих при охлаждении кристаллов. При макроскопическом фазовом расслоении, связанном с диффузией сверхстехиометрического кислорода, в объеме кристалла возникают области (с характерным размером около 1000 \AA) с разным содержанием кислорода, что проявляется в небольшом, но четко видимом на ФДВР расщеплении дифракционных пиков. При более низкой температуре в кристаллах возникает дополнительное фазовое расслоение на микроскопическом ($<30 \text{ \AA}$) уровне, связанное с неоднородным распределением носителей заряда. Явление фазового расслоения типично для электронных систем с сильными корреляциями и исследовалось весьма интенсивно в последнее время. Новые результаты получены недавно на ИБР-2 для систем с колоссальным магнитным сопротивлением (В.Л.Аксенов, А.М.Балагуров, В.Ю.Помякушин, Д.В.Шептяков).

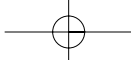
С помощью ФДВР В.Л.Аксеновым, А.М.Балагуровым и другими сотрудниками ЛНФ в сотрудничестве с группой Е.В.Антипова (МГУ) проведены комплексные исследования высокотемпературных сверхпроводников на основе ртути.

В создании ФДВР на ИБР-2 не менее важно еще одно обстоятельство. ФДВР — прибор нового типа для импульсных источников нейтронов. Он открыл совершенно новые возможности для реактора ИБР-2 и фактически вывел его в число лучших источников нейтронов в мире. Его создание повлияло на дальнейшее развитие нейтронных исследований в мире. В нескольких нейтронных центрах открыты проекты создания дифрактометров такого типа. Появился серьезный дополнительный аргумент в пользу источников нейтронов с длинным импульсом (типа ИБР-2). Это направление в настоящее время активно развивается.

В 2000 году сотрудники ЛНФ В.Л.Аксенов, А.М.Балагуров, В.В.Нитц и Ю.М.Останевич были удостоены Государственной премии РФ в области науки и техники за разработку и реализацию методов структурной нейтронографии по времени пролета с использованием импульсных и стационарных реакторов.

Малоугловое рассеяние

Дифрактометры по времени пролета позволяют параллельно с дифракцией получать информацию о рассеянии нейтронов на малые углы. Эта уникальная возможность, также впервые осознанная и реализованная в Дубне в группе Ю.М.Останевича и Л.Чера, позволяет в реальном времени следить за эволюцией крупномасштабных, размером в десятки и сотни ангстрем, неоднородностей, в том числе за возникающими при фазовом переходе или при твердофазном синтезе зародышами новых фаз. Важнейшей особенностью малоуглового рассеяния является возможность анализа структуры разупорядоченных систем. Этот метод, например, часто является единственным способом получения прямой структурной информации о системах с хаотическим и частично упорядоченным расположением неоднородностей плотности с характерными размерами $10-10\,000 \text{ \AA}$; он дает возможность исследовать дисперсную структуру сплавов, порошков, стекол (размер и степень полидисперсности частиц), особенности строения полимеров в различных агрегатных состояниях, весовые и геометрические характеристики биологических макромолекул и их комплексов, био-



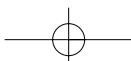
логические надмолекулярные структуры, такие как биологические мембраны и вирусы. Существенное различие длин рассеяния нейтронов для водорода и дейтерия, а также возможность избирательного дейтерирования макромолекул и надмолекулярных структур, делает малоугловое рассеяние нейтронов незаменимым методом исследования биологических и коллоидных объектов, полимеров и жидких кристаллов.

Малоугловое рассеяние нейтронов имеет ряд важнейших особенностей, отличающих его от малоуглового рассеяния рентгеновских лучей. Это, прежде всего, определяется общими особенностями взаимодействия нейтронов с веществом: большой глубиной проникновения, зависимостью рассеяния от изотопного состава вещества и от его магнитных свойств. В ЛНФ ОИЯИ установки малоуглового рассеяния по методу времени пролета были введены в строй сначала на реакторе ИБР-30 в 1975 году, а затем и на высокопоточном импульсном реакторе ИБР-2. Сейчас этот спектрометр называется ЮМО (в честь Ю.М.Останевича) и является практически единственной установкой малоуглового рассеяния нейтронов в России, обеспечивающей широкий круг систематических исследований в различных областях физики конденсированного состояния вещества, физикохимии и биологии на мировом уровне. Более 50% экспериментов на установке выполняются зарубежными исследователями или в тесном сотрудничестве с ними.

Примером применения малоуглового рассеяния нейтронов являются исследования полиэлектролитов (Й.Плештил, Ю.М.Останевич, В.Ю.Беззаботнов, Д.Главата), то есть макромолекул, содержащих группы атомов, которые способны в определенных условиях диссоциировать, образуя заряженный полиион и малые противоионы. Возникающие на макромолекуле заряды меняют как ее конформацию, так и свойства самого растворителя. Интерпретация результатов нейтронных экспериментов оказалась возможной на основе представления о гидратной оболочке, окружающей полиион. Толщина оболочки соответствует мономолекулярному слою воды с плотностью, превышающей плотность нормальной воды на 10%. На спектрометре малоуглового рассеяния нейтронов на ИБР-2 был получен ряд рекордных результатов, в частности по измерению радиусов инерции малых молекул (В.Ю.Беззаботнов, Л.Чер, Т.Гросс, Г.Янго, Ю.М.Останевич). Такие эксперименты нелегко реализовать из-за того, что сечение рассеяния каждой одиночной частицы падает как квадрат объема. Однако применение методики изотопного замещения и специальной процедуры измерения спектров позволили получить уникальные результаты для молекул, имевших радиус инерции всего 3 Å. Например, удалось выяснить, какие структурные изменения происходят в водных растворах тетраметилмочевины.

Целый ряд новых результатов с помощью малоуглового рассеяния нейтронов на реакторе ИБР-2 был получен в биофизических исследованиях. Эти исследования были инициированы в начале 70-х годов И.Н.Сердюком и А.С.Спириным (Институт белка РАН, г. Пушкино) и были поддержаны в ЛНФ И.М.Франком и Ю.М.Останевичем. В сотрудничестве с ИБ РАН был выполнен большой цикл работ по изучению структуры рибосомы.

В последние годы установку ЮМО активно используют физики из Румынии для исследования магнитных жидкостей. Получены новые интересные результаты по идентификации структуры магнитных наночастиц в дисперсных средах (М.В.Авдеев, В.Л.Аксенов, М.Балашоу, Д.Бика, Л.Векаш, Л.Рошта).



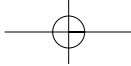
Оптика поляризованных нейтронов

Одной из первых установок, начавших работать на реакторе ИБР-2, был спектрометр с поляризованными нейтронами (СПН). СПН создавался совместно с физиками из университета в Магдебурге. Оригинальной составляющей СПН был спин-флиппер, предложенный Д.А.Корнеевым. Спин-флиппер Корнеева с протяженной рабочей частью в вертикальном направлении для немонахроматических пучков полностью использует сечение пучка и тем самым значительно повышает светосилу. С начала работы реактора ИБР-2 на СПН в группе Д.А.Корнеева развивался метод деполяризации нейтронов. Наиболее интересные научные результаты с помощью этого метода были получены при исследовании смешанного состояния в высокотемпературных сверхпроводниках (В.Л.Аксенов, Е.Б.Докукин, Ю.В.Никитенко, А.В.Петренко). Впоследствии на СПН стала применяться рефлектометрия с поляризованными нейтронами (Д.А.Корнеев, В.Лебнер, Е.Б.Докукин, В.В.Пасюк, А.В.Петренко, Л.П.Черненко).

Если угол падения нейтронов на образец уменьшать, то при достижении некоторого критического значения наблюдается полное (зеркальное) отражение. Измеряя зависимость коэффициента отражения от длины волны, мы получаем информацию о кристаллической и магнитной структуре поверхностей и многослойных структур. В этом состоит нейтронная рефлектометрия. Дубна – единственное место в нашей стране, где уже более 20 лет развивается нейтронная рефлектометрия и в настоящее время имеется два рефлектометра с поляризованными нейтронами.

Нейтронная рефлектометрия – наука молодая, как метод измерений она начала активно развиваться с начала 80-х годов, и физики ЛНФ были среди пионеров. Одним из новых эффектов, обнаруженных при исследовании отражения поляризованных нейтронов от магнитных сред, был эффект расщепления пучка (Д.А.Корнеев, В.И.Боднарчук, В.К.Игнатович). Теоретически этот эффект был предсказан В.К.Игнатовичем при обсуждении проблемы поляризации ультрахолодных нейтронов. На основе эффекта переворота спина в стоячей волне В.Л.Аксеновым и Ю.В.Никитенко был предложен новый метод исследования слоистых магнитных структур. С использованием периодических наноструктур создается резонансное усиление поля стоячих нейтронных волн. Измерение переполаризации нейтронов на границах магнитно-неколлинеарных слоев позволяет с большой точностью измерять профиль намагниченности в слоистых структурах. Недавно физикам ЛНФ совместно с коллегами из ПИЯФ РАН, ИФМ УрО РАН и ИЛЛ удалось учесть эффекты незеркального отражения при отражении поляризованных нейтронов от слоистых структур. В результате впервые экспериментально наблюдался эффект неоднородного скашивания направления спинов в основном состоянии антиферромагнитно связанной многослойной структуры в магнитном поле (В.В.Лаутер-Пасюк, Х.Лаутер, Б.Топерверг, М.Миляев, Л.Ромашев, В.В.Устинов, А.В.Петренко, В.Л.Аксенов).

Спектрометр СПН в последние годы был реконструирован и на его месте в 2002 году создан при активном участии Х.Лаутера (ИЛЛ, Гренобль) новый прибор РЕМУР, на котором можно проводить эксперименты по рефлектометрии и малоугловому рассеянию поляризованных нейтронов. Рефлектометр РЕМУР в настоящее время является одним из лучших в мире, его создание стало возможным благодаря финансовой поддержке в рамках соглашения между ОИЯИ и министерством науки ФРГ. В 2002 году завершён также первый этап создания рефлектометра РЕФЛЕКС. Этот рефлек-



тометр отличается высоким угловым разрешением, что делает возможным измерение детальных особенностей в поведении кривой зеркального отражения в широком спектральном интервале.

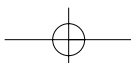
Инженерные исследования

С самого начала работы ИБР-2 на нем проводились эксперименты, имеющие прикладной характер. В 1990-х годах основные усилия были сосредоточены на изучении текстур горных пород и внутренних напряжений в объемных изделиях, а, начиная с 2000 года, акцент в прикладных исследованиях сделан на работы, представляющие интерес для атомной науки и техники. Эти работы связаны с исследованием структуры и свойств конструкций и конструкционных материалов для реакторов, структурными исследованиями материалов, испытавших радиационные повреждения, количественным анализом текстур для моделирования процессов в геоматериалах при высоких давлениях и температурах для выработки оптимальных критериев для проектирования и строительства ядерных объектов и т.д. Такого рода работы ведутся на дифрактометрах высокого разрешения ФДВР (Г.Д.Бокучава, В.В.Сумин, А.В.Тамонов) и ЭПСИЛОН (К.Вальтер, К.Шеффцок) и текстурном дифрактометре СКАТ (К.Уллемайер, А.Н.Никитин). На ФДВР изучаются внутренние напряжения в объемных изделиях, композитных и градиентных материалах. Для этого приобретены или созданы специальные устройства, такие как тензорный сканер на основе гониометра фирмы HUBER, нагрузочная машина, широкоапертурные коллиматоры. Результаты, полученные в нейтронных экспериментах, дополняются данными ультразвуковых и магнитных исследований и расчетами. На СКАТ многие текстурные эксперименты ведутся в специальной камере при одновременном воздействии деформирующего усилия и температуры от 20 до 620 °С.

Дальнейшие перспективы

Более чем за 40 лет работы импульсных реакторов в ОИЯИ сформировалась научная школа нейтронографии по времени пролета, которая определила развитие этой науки в мире по целому ряду направлений. Источники нейтронов ОИЯИ открыты для всех исследователей и с каждым годом привлекают все больше пользователей не только из физических научных центров, но и центров биологии, химии, геологии, материаловедения и других наук. Причем доля экспериментов «нефизического» профиля возрастает. Важную роль в процессе привлечения научных центров к нейтронным исследованиям играет так называемая программа пользователей. Ее суть состоит в том, чтобы дать возможность специалистам сторонних организаций получить возможно более широкий доступ к экспериментальным установкам. Научные комитеты по направлениям исследований проводят отбор поданных предложений по экспериментам. Например, на реакторе ИБР-2 экспериментаторы из почти 30 стран ежегодно выполняют около 150 экспериментов. На долю ЛНФ приходится около 30% пучкового времени. Около 35% пучкового времени используют ученые из более чем 20 научных институтов России.

Такая организация работ привлекает молодежь. ОИЯИ активно сотрудничает с ведущими вузами страны, с 1961 года в Дубне работает филиал физического факультета МГУ им. М.В.Ломоносова, в 2000 году в МГУ была открыта кафедра нейтроно-



графии (заведующий кафедрой В.Л.Аксенов), которая базируется в ЛНФ, интеграция с высшей школой организуется также через Межфакультетский центр «Строение вещества и новые материалы» МГУ и Учебно-научный центр ОИЯИ. Ежегодно на базе ОИЯИ обучаются десятки студентов. Регулярно проводятся научные школы и конференции.

Все это позволило в полной мере реализовать творческое сотрудничество ведущих научных организаций стран-участниц ОИЯИ в развитии новых методов нейтронографии, которые вывели Институт на передовые рубежи в области нейтронных исследований конденсированного вещества.

7. Исследования эффекта Мёссбауэра

Ф.Л.Шапиро, пожалуй, был первым в нашей стране, который осознал значение открытого Р.Мёссбауэром в 1958 году эффекта резонансного поглощения γ -лучей ядрами без отдачи и открывающиеся возможности исследований с использованием этого эффекта. В 1959 году Ф.Л.Шапиро создает классическую теорию эффекта Мёссбауэра и предлагает использовать эффект Мёссбауэра на ядре ^{67}Zn для наблюдения смещения энергии γ -кванта в поле тяжести Земли, предсказанного теорией относительности. В связи с этим в ЛНФ были развернуты исследования по подготовке такого эксперимента. В 1960 году в лаборатории был обнаружен эффект Мёссбауэра на ядре ^{67}Zn с разрушением эффекта магнитным полем (Ф.Л.Шапиро, В.П.Алфименков, В.И.Лушиков, Ю.М.Останевич), а в 1962 году для γ -квантов с $E = 92,7$ кэВ от ядра ^{67}Zn был впервые измерен скоростной спектр эффекта Мёссбауэра и применен метод частотной модуляции γ -излучения для определения наблюдаемой ширины γ -резонанса, которая составила $\sim 10^{-10}$ эВ. Впервые получены точности относительных измерений энергии $\sim 5 \cdot 10^{-16}$ и измерены вероятности испускания ($\sim 0,8 \cdot 10^{-2}$) и поглощения ($\sim 2 \cdot 10^{-2}$) γ -квантов без отдачи. Максимум резонансного поглощения $\sim 2 \cdot 10^{-3}$ проявился при нулевой относительной скорости источника и поглотителя. Структура наблюдаемого энергетического спектра соответствовала наличию квадрупольного расщепления уровней ядра ^{67}Zn в гексагональной кристаллической решетке ZnO – матрице источника и поглотителя (исследования выполнены упомянутой выше группой с привлечением А.В.Стрелкова и др.).

Малая величина эффекта на ^{67}Zn и относительно короткий период полураспада материнского ядра ^{67}Ga – 72 часа – существенно ограничивали проведение работ. С другой стороны, ^{67}Zn оставался единственным мёссбауэровским ядром, с которым мог быть поставлен убедительный эксперимент по измерению изменения энергии γ -кванта в поле тяжести Земли. Так, для смещения линии ^{67}Zn на полуширину достаточно разнести источник и поглотитель по высоте на 4,9 метра. Для такого же смещения линии ^{57}Fe необходима разность по высоте в 3 км! В 1968 году А.И.Бескровным и Ю.М.Останевичем была разработана методика приготовления сильных источников с излучателем ^{67}Ga и применен токовый метод регистрации мёссбауэровских спектров. Использование этих методик позволило примерно в 200 раз сократить время измерений по сравнению с традиционным способом регистрации. В качестве матрицы для источника, дающего одиночную линию, была использована окись магния, но ве-