

Публикуемая ниже статья написана на основе доклада, сделанного автором на юбилейном заседании 88-й сессии Ученого совета Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ), посвященной 40-летию создания в Дубне импульсного быстрого реактора. ОИЯИ - один из ведущих научных центров в мире по использованию нейтронов для исследований фундаментальных взаимодействий и симметрии, структуры атомного ядра и конденсированного состояния вещества. На источниках нейтронов ОИЯИ проводят эксперименты ученые из 30 стран.

40 ЛЕТ НЕЙТРОННЫМ ИССЛЕДОВАНИЯМ В ДУБНЕ

В. Л. Аксенов

Исторически первыми интенсивными источниками нейтронов были ядерные реакторы с непрерывным потоком, где в процессе самопроизвольного деления урана тепловая мощность, а следовательно, и поток нейтронов поддерживаются постоянными во времени. 23 июня 1960 г. в Объединенном институте ядерных исследований в подмосковном городе Дубне начал работать исследовательский реактор нового типа - периодического действия, или импульсный быстрый реактор (ИБР). Идея этого реактора, суть которой состоит в импульсной генерации нейтронов с помощью быстрого вращения части активной зоны, была предложена Д.И. Блохинцевым в конце 1955 г. в Физико-энергетическом институте (ФЭИ) в Обнинске, где уже в начале 1956 г. И.И. Бондаренко и Ю.Я. Стависским было разработано теоретическое обоснование проекта. Главное достоинство такого реактора состоит в возможности производства больших импульсных потоков нейтронов с довольно большой частотой повторения - до 50 импульсов в секунду. При этом благодаря низкой средней мощности реактор очень экономичен и относительно дешев и прост в эксплуатации из-за меньшей активации оборудования и медленного выгорания топлива.

В марте 1956 г. в Дубне был образован международный научный центр - ОИЯИ, директором



АКСЕНОВ Виктор Лазаревич - доктор физико-математических наук, начальник отдела нейтронных исследований конденсированных сред Объединенного института ядерных исследований.

которого представители стран-участниц избрали Дмитрия Ивановича Блохинцева, и проект нового реактора переехал в Дубну, где он начал сооружаться в 1957 г. в Лаборатории нейтронной физики (ЛНФ), руководимой лауреатом Нобелевской премии И.М. Франком. Д.И. Блохинцев до конца жизни (1979) оставался научным руководителем и непосредственным участником всех работ по пульсирующим реакторам.

Успешная работа реактора ИБР и его модификаций [1] стимулировала появление в середине 60-х годов нескольких аналогичных проектов в Европе и США. Однако реализован был только проект реактора ИБР-2 в Дубне в 1984 г., что стало возможным благодаря опыту эксплуатации таких систем в Дубне и Обнинске, а также активному участию Министерства среднего машиностроения СССР (ныне Министерство по атомной энергии РФ), его институтов и предприятий. Реактор проектировался в научно-исследовательском конструкторском институте энерготехники, главным конструктором проекта был Н.А. Доллежал. Принципиальным отличием ИБР-2 от серии реакторов этого типа стало использование вращающегося с большой скоростью (до 1500 оборотов в минуту) отражателя нейтронов в активную зону для импульсной модуляции реактивности, а следовательно, мощности реактора и потока нейтронов из него (об особенностях импульсных реакторов в сравнении с другими источниками нейтронов см. [2, 3]). В настоящее время ИБР-2 - самый высокопоточный в мире импульсный источник нейтронов для научных исследований. Более того, в мире до сих пор нет ему аналогов, и он играет роль полигона для отработки методов экспериментов на высокопоточных импульсных источниках нейтронов с большой длительностью импульса, тем самым влияя на стратегию развития источников нейтронов для физических исследований.



Рис. 1. Общій вид експериментального зала реактора ИБР-2.

За прошедшие 40 лет на реакторах ОИЯИ было проведено много исследований, открывающих новые научные направления и имеющих принципиальное значение для развития наших представлений о строении вещества. Первоначально эти исследования были ориентированы на ядерную физику, но постепенно все большее развитие получила работа по изучению конденсированного состояния вещества. Причем стало больше проводиться экспериментов, связанных с задачами материаловедения, химии, биологии, наук о Земле, инженерных наук. Междисциплинарность - общая черта нейтронных исследований, она развивается благодаря уникальным свойствам нейтрона, проявляющимся при его взаимодействии с веществом.

ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ С НЕЙТРОНАМИ

Поскольку нейтрон не имеет электрического заряда ($Q_n \leq -0.4 \times 10^{-21} Q_e$), ядерные реакции с нейтроном могут происходить при самых малых его энергиях. Сечения реакций имеют резонансный характер, достигая очень больших величин при некоторых энергиях нейтронов. Эти так называемые нейтронные резонансы аналогичны спектральным линиям атомов в оптике. Каждому резонансу соответствует определенный уровень возбужденного компаунд-ядра, образовавшегося при захвате ядром нейтрона. Распады компаунд-состояния могут происходить по разным каналам: с вылетом нейтрона, протона, α -частиц, у-квантов или через деление ядра, и в зависимости от этого может быть получена различная информация о процессах, происходящих в атомном ядре.

Специфика импульсных реакторов ОИЯИ состоит в большой светосиле и большой длительности импульсов, что стимулировало постановку экспериментов, не требующих высокого разрешения по энергии. В результате сформировалась оригинальная научная программа по изучению высоковозбужденных состояний ядер, эффектов сверхтонких взаимодействий в компаунд-состояниях, нарушения пространственной четности и временной инвариантности в нейтронных резонансах, интерференционных явлений при делении, ядерного синтеза, аналогичного процессам, происходящим как в ядрах красных гигантов, так и при взрывах сверхновых.

Одно из самых ярких и перспективных направлений нейтронной физики, зародившихся в Дубне, связано с исследованиями реакций с поляризованными нейтронами и поляризованными ядрами. Начиная с 1961 г. по инициативе Ф.Л. Шапира были разработаны методы поляризации нейтронов с помощью протонной мишени, поляризованной динамическим способом, поляризации ядер в мишени с помощью охлаждения до температур порядка $1.0 \sim 2$ К в рефрижераторе с растворением

гелия-3 в гелии-4, проведены пионерские исследования эффектов сверхтонких взаимодействий в кодшаунд-состояниях ядер [4]. В последнее время развитые методы используются для исследований нарушений фундаментальных симметрии в нейтронных резонансах.

Интерес к изучению эффектов нарушения пространственной четности (Р-четности, симметрии относительно инверсии координат или зеркальной симметрии) в ядерных взаимодействиях обусловлен возможностью их усиления благодаря близости по энергии состояний противоположной четности. Экспериментальные исследования в этой области начаты в Институте теоретической и экспериментальной физики (ИТЭФ) в 1964 г. группой Ю.Г. Абова, когда была обнаружена асимметрия вылета у-квантов при радиационном захвате тепловых поляризованных нейтронов неп поляризованными ядрами ^{113}Cd относительно направления поляризации нейтронов. Величина эффекта была на уровне 1СИ по сравнению с 10^7 — 10^8 для малонуклонных систем.

Понимание связи наблюдаемых эффектов с конкретными нейтронными резонансами стало возможным только после проведенных в Дубне в 1981 г. экспериментов при упругом рассеянии нейтронов, то есть в (n, l)-реакции. Оказалось, что при такой реакции суммарное усиление доходит до 10^6 раз по сравнению с затравочным эффектом в нуклон-нуклонном взаимодействии. Получили подтверждение два механизма усиления эффекта в сложных ядрах. Первый состоит в динамическом усилении смешивания уровней за счет их энергетической близости, второй - в кинематическом усилении, которое может достигать величины 10^2 — 10^3 .

Еще одна возможность усиления Р-нечетных эффектов следует из теории взаимодействия нейтронов с ядрами в регуляторных структурах, разработанной Ю.М. Каганом и А.М. Афанасьевым. В условиях динамической дифракции может появиться эффект усиления, обусловленный когерентным действием ядер, когда кристалл мишени превращается в подобие единого резонатора. Постановка такого эксперимента, пока никем не реализованного, готовится на реакторе ИБР-2 [5].

Изучение усиленных Р-нечетных эффектов представляет большой интерес для ядерной физики, так как позволяет глубже понять структуру возбужденных состояний ядер. Цель таких исследований - измерение параметров смешивающихся резонансов и затем определение матричных элементов слабого взаимодействия в ядрах. Необходимо отметить, что задача эта довольно трудная, поскольку современная теория атомного ядра не позволяет надежно описать сложную структуру компаунд-состояний и точно рассчитать коэффициенты усиления. Поэтому пока в

данном направлении главное - накопить информацию, причем основной интерес представляет повышение точности эксперимента и наблюдение слабых эффектов, обусловленных малыми матричными элементами, а также использование не только поляризованных нейтронов, но и поляризованных ядер.

С исследованиями упругого канала взаимодействия нейтронов с ядрами связано открытие новой возможности изучать нарушения симметрии относительно обращения времени (временной инвариантности). При этом используют как поляризованные нейтроны, так и поляризованные ядра. Здесь присутствуют те же, что и при Р-неинвариантности, факторы усиления, которые могут достигать значения 10^5 - 10^6 .

Наиболее эффективные поляризаторы интенсивных пучков резонансных нейтронов - поляризованные протонные мишени. В настоящее время в мире имеются три такие мишени: в ОИЯИ, в Институте высоких энергий (КЕК) в Тсукубе (Япония) и в LANCE - Центре по рассеянию нейтронов в Лос-Аламосе (США). Недавно пучок нейтронов в ОИЯИ был дооснащен еще одним протонным поляризатором, изготовленным в ИТЭФ, что делает этот пучок уникальным, имеющим протонные поляризатор и анализатор. Еще один вариант установки для экспериментов, включающей поляризатор и анализатор на основе ^3He , был изготовлен совместно с Физическим институтом им. П.Н. Лебедева РАН. Таким образом, созданы уникальные возможности для исследования фундаментальной проблемы нарушения временной инвариантности.

УЛЬТРАХОЛОДНЫЕ НЕЙТРОНЫ

Попытки исследования нарушения временной инвариантности с помощью нейтронов привели к появлению новой области - физики ультрахолодных нейтронов (УХН) - нейтронов с энергией меньше 10^{-7} эВ, или с эффективной температурой меньше 10^{-3} К. В 1968 г. Ф.Л. Шапиро предложил использовать для измерения электрического дипольного момента (ЭДМ) нейтрона газ ультрахолодных нейтронов [6]. Наличие ЭДМ у элементарных частиц возможно лишь при условии нарушения временной инвариантности.

Особенностью УХН является их полное отражение от поверхности при любом угле падения. Иначе говоря, такие нейтроны должны сохраняться в замкнутом объеме вплоть до их (β -распада, что и дает уникальную возможность проводить опыты по изучению свойств нейтрона как элементарной частицы. Теоретическое рассмотрение такого свойства УХН было сделано Я.Б. Зельдовичем в 1959 г.

В 1968 г. на реакторе ИБР в Дубне были проведены первые успешные опыты по экспери-

ментальному наблюдению УХН и их накоплению, продолженные совместно с физиками ИАЭ им. И.В. Курчатова (ныне РНЦ "Курчатовский институт") на реакторе ИРТ. Здесь в 1969 г. впервые в мире были выполнены эксперименты по хранению УХН в замкнутых сосудах. Эксперименты продолжались и у нас и за рубежом. В настоящее время все ведущие нейтронные центры мира имеют или создают каналы УХН, исследования с их помощью интенсивно развиваются.

С самого начала исследований возникла проблема (она изучается и по сей день) удержания УХН в сосудах - по разным причинам время их жизни там было меньше теоретических предсказаний. Параллельно шло изучение и самого процесса β -распада нейтрона, детальное значение которого важно для фундаментальной физики. Надо отметить, что довольно мало параметров β -распада измерено с нужной точностью, поэтому можно ожидать, что эти эксперименты продолжатся еще не один десяток лет. Пожалуй, единственное исключение составляет время жизни нейтрона, точность измерений которого была доведена до 0.3%. Наиболее надежные значения были получены с помощью УХН несколькими группами из ЛНФ ОИЯИ, Петербургского института ядерной физики (ПИЯФ) РАН, РНЦ "Курчатовский институт". Совместная группа ЛНФ и ПИЯФ использовала оригинальную установку КОВШ на реакторе ВВР-М ПИЯФ, предложенную и разработанную в ЛНФ. В настоящее время эксперименты с помощью этой установки продолжаются на реакторе Института им. Лауэ-Ланжевена (ИЛЛ) в Гренобле (Франция).

Физика УХН дает новые возможности для изучения проблем фундаментальных взаимодействий, квантовой механики, нейтронной оптики. Так, остается актуальной задача измерения ЭДМ нейтрона. Верхняя его граница была установлена методом хранения УХН на уровне 3×10^{-26} е • м физиками ИЛЛ в 1990 г. и ПИЯФ в 1992 г. В процессе измерений ЭДМ нейтрона уже несколько теорий нарушения симметрии обращения времени были отвергнуты [7]. В настоящее время обсуждаются лево-правосимметричные теории Великого объединения. Особый интерес представляет проверка гипотезы А.Д. Сахарова о преобладании вещества над антивеществом во Вселенной, возникшем после Большого взрыва (проблема барионной асимметрии в космологии). Эти модели дают оценку для ЭДМ 10^{-27} е • см. Так что для данного случая эксперимент по измерению ЭДМ нейтрона будет носить характер "да - нет".

Для реализации такого типа экспериментов необходимы источники УХН высокой плотности. Недавно сотрудниками ЛНФ был предложен [8] новый способ генерации этих нейтронов на движущихся конверторах в сочетании с мощным импульсным реактором БИГР (Большой импульсный графитовый реактор) ВНИИЭФ (г. Саров).

Ожидаемая плотность УХН до 10^5 нейтр./см³ позволит не только повысить статистику, но и провести новые эксперименты, пока не осуществимые на современных источниках. Максимальная плотность УХН на реакторе ИЛЛ в настоящее время не превышает 10^2 нейтр./см³. Первые пробные эксперименты на реакторе БИГР показали, что метод работает и после оптимизации установки могут быть достигнуты рекордные плотности УХН.

НЕЙТРОНОГРАФИЯ ПО ВРЕМЕНИ ПРОЛЕТА

Практически сразу после создания исследовательских ядерных реакторов было обнаружено, что нейтроны 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), имеют ряд преимуществ (см., например, [3]). Поэтому нейтронография стала совершенно необходимым инструментом современного естествознания.

Для проведения экспериментов по рассеянию нейтронов конденсированными средами есть две возможности. На источнике нейтронов с непрерывным потоком после рассеяния в образце монокристаллического пучка нейтронов измеряют изменение их энергии при неупругом рассеянии или угла рассеяния - при упругом. На импульсном источнике характеристики нейтронов после их рассеяния в образце определяют с помощью измерений времени их пролета от источника до детектора.

Этот метод был хорошо известен в нейтронной ядерной спектроскопии, поэтому разработки методик эксперимента по неупругому рассеянию нейтронов конденсированными средами начались одновременно с пусковыми работами на реакторе ИБР в 1960 г., и уже через два года были получены первые результаты по динамике воды и водорода в гидриде циркония [1]. В 1965 г. по инициативе физиков из Кракова был создан первый вариант спектрометра обратной геометрии. Его дальнейшие модификации привели к созданию уникального Краковско-Дубненского спектрометра - КДСОГ на реакторе ИБР-30 и затем КДСОГ-М и НЕРА-ПР на реакторе ИБР-2 [9]. На КДСОГ был выполнен целый ряд пионерских исследований динамики молекулярных кристаллов (совместно с Институтом физики твердого тела РАН), эффектов кристаллического электрического поля в редкоземельных интерметаллидах (совместно с Институтом металлургии им. А.А. Байкова РАН), динамических свойств водорода в металлах (совместно с РИЦ "Курчатовский институт" и ФЭИ).

Другой тип спектрометров неупругого рассеяния - ДИН - был создан физиками ФЭИ. Наиболее яркие результаты, полученные с помощью этих спектрометров, связаны с изучением спек-

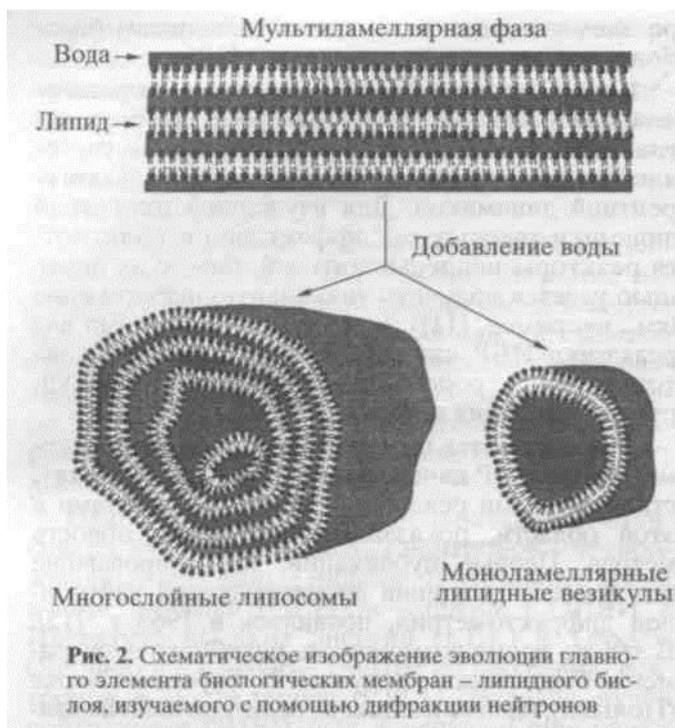
ра элементарных возбуждений и поиском бозе-конденсата в сверхтекучем гелии [10].

Исследования с помощью неупругого рассеяния нейтронов на реакторах ИБР направлены главным образом на измерения плотности состояний и, следовательно, связаны только с некогерентной динамикой. Для изучения когерентной динамики твердых тел эффективно используются реакторы непрерывного действия, с их помощью удается получить уникальную информацию (см., например, [11]). Более универсальными для реакторов ИБР, как и для любых импульсных источников нейтронов, оказались исследования упругого рассеяния нейтронов.

Эксперименты по времяпролетной дифрактометрии на ИБР начались в 1962 г. и, по существу, стали первыми реальными научными опытами в этой области, показавшими работоспособность метода. Первые публикации, зафиксировавшие год и место рождения времяпролетной нейтронной дифрактометрии, появились в 1963 г. [12]. В это же время возможность подобного эксперимента была показана группой Б. Бураса и Сверке (Польша), однако мощности реактора явно не хватало для полноценной реализации этого метода. В 1964 г. под руководством Б. Бураса времяпролетный дифрактометр был установлен на реакторе с прерывателем Ферми в Ризо (Дания). Затем их начали использовать на импульсных источниках нейтронов на базе электронных ускорителей: в 1966 г. в США, в 1968 г. в Японии, в 1969 г. в Великобритании. Дифрактометры на этих импульсных источниках, так же как и первый 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 предсказанных достоинств дифрактометров по времени пролета, прежде всего большая скорость набора информации и возможность измерения трехмерных дифракционных спектров. Особенно привлекательным представляется импульсный характер облучения образца пучком нейтронов. Последнее позволяет включать и внешние воздействия на образец в импульсном режиме, тем самым достигать гораздо больших значений параметров этого воздействия, нежели в стационарном режиме.

В истории развития метода времени пролета в ЛНФ в 60-х и 70-х годах есть несколько ярких моментов. В 1966 г. одновременно и независимо в Дубне и Аргонне (США) был открыт принцип временной фокусировки нейтронов, позволивший увеличить светосилу и разрешающую способность дифрактометров. В 1967 г. на созданном 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 для изучения монокристаллов, впервые в мировой практике оборудованный позиционно-чувствительным детектором. На нем 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 реполяризации доменов под действием внешнего электрического поля. Первое в мировой практике уточнение структуры монокристалла на дифрактометре по времени пролета также было осуществлено на реакторе ИБР: в молекуле двойного лантан-магниевого нитрата определены позиции всех 48 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 (Тсукуба - 1980 г.), США (Аргонн - 1981 г. и Лос-Аламос - 1985 г.), Великобритании (Дидкот - 1985 г.), а также пульсирующего реактора ИБР-2 в Дубне (1984 г.) дало второе рождение времяпролетной дифрактометрии. К настоящему времени на всех этих источниках построено по несколько времяпролетных дифрактометров, которые по целому ряду параметров превосходят дифрактометры на реакторах непрерывного действия.

Значительное - почти в 100 раз по сравнению с импульсными источниками предыдущего поколения - увеличение потока нейтронов на ИБР-2

позволило выйти за рамки традиционных дифракционных исследований, связанных с физикой твердого тела и материаловедением. 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 изучения биологических мембран с помощью описываемого метода с применением позиционно-чувствительного детектора, что позволило одновременно получать дифракционные отражения при различных длинах волн нейтрона, соответствующих различным углам дифракции [13].

Для иллюстрации изучаемых объектов на рис. 2 показан фрагмент структуры многослойной системы, состоящей из липидных бислоев и слоев воды, и ее изменения при добавлении воды. Липидная матрица - главный элемент биологических мембран, окружающих клетку и обеспечивающих ее жизнедеятельность. Для понимания механизмов работы мембраны необходимо знать толщину водной прослойки и гидрофобной части, периоды повторяемости липидных бислоев, площадь, приходящуюся на одну липидную молекулу, а также зависимость данных параметров от температуры и различных добавок. Одним из значимых результатов измерений с помощью дифракции нейтронов параметров для липидных структур стало определение энергии связи молекул воды с липидной головой.

Большой поток нейтронов на ИБР-2 позволяет эффективно исследовать необратимые процессы в кристаллах. Суть 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 от 5 до 10 мин. Первые же эксперименты на ИБР-2 показали, что можно улучшить временное разрешение до 1 мин, а в отдельных случаях - до нескольких секунд. За короткий период 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.

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

ве с ведущими в мире специалистами в этой области - учеными 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 мм^3), а это значительно расширяет возможности изучения монокристаллов новых соединений и материалов. Совместно с РНЦ "Курчатовский институт" на ИБР-2 создан уникальный, в настоящее время самый светосильный дифрактометр ДН-12 для исследований при давлениях до 20 ГПа.

Камеры высокого давления ИФВД успешно используются на комплексе текстурных дифрактометров для исследования горных пород как в связи с фундаментальными проблемами геологии и геофизики, так и для решения прикладных задач, например, для обоснованного выбора мест строительства глубинных хранилищ радиоактивных отходов. На рис. 3 показана схема экспериментов по изучению горных пород, проведенных совместно с Геофизическим институтом Чешской АН, Институтом геологии и динамики литосферы Геттингенского университета (Германия) и Институтом геологии рудных месторождений РАН. Образцы взяты из оливиновых ксенолитов, вынесенных из мантии Земли потоками базальтов с глубины 80-120 км в Чехии, и из кернов Кольской сверхглубокой скважины. В верхней части рис. 3 показан один из таких образцов, в левой - карты изолиний скоростей продольных упругих волн, измеренных при разных всесторонних давлениях, в правой - нейтронографические полюсные фигуры, наглядно отражающие характер преимущественных ориентировок зерен оливина. Сравнение результатов измерений и моделирования структуры позволило установить, что характер упругой анизотропии сильно меняется с ростом гидростатического давления и обусловлен только кристаллографической текстурой при высоких давлениях [14].

Следующим этапом развития времяпролетной дифрактометрии стало создание в 1992 г. на реакторе ИБР-2 фурье-дифрактометра высокого разрешения (ФДВР). Второй раз Дубна стала местом реализации на импульсном источнике нового метода - нейтронной фурье-дифрактометрии. В отличие от обычного в этом методе фиксируется не время пролета каждого зарегистрированного нейтрона, а вероятность, с которой они распределены по времени пролета [12]. Технические проблемы восстановления дифракционного спектра в методе с фурье-прерывателем были решены физиками из Центра технических исследований в Хельсинки, разработавшими обратный метод времени проле-

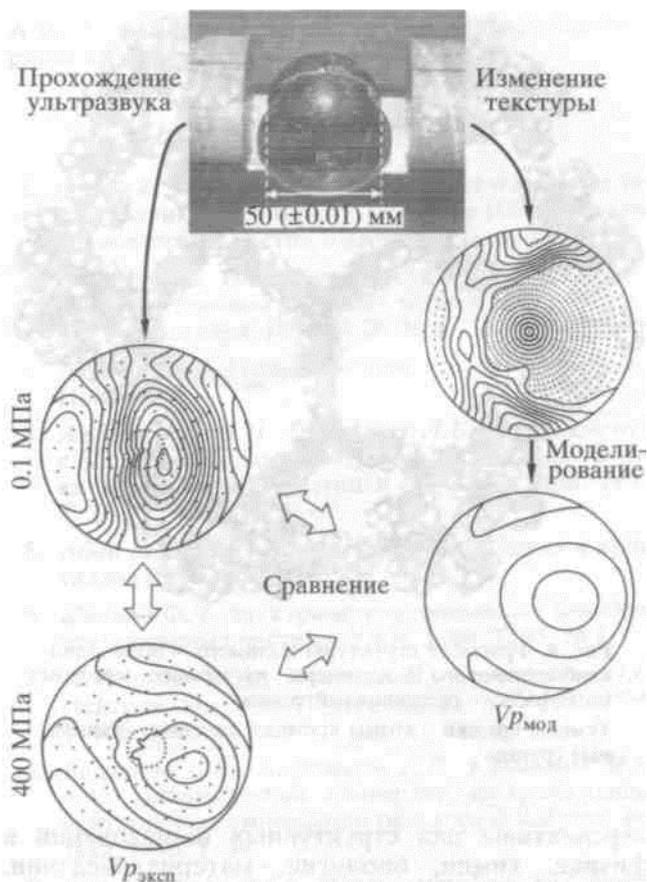
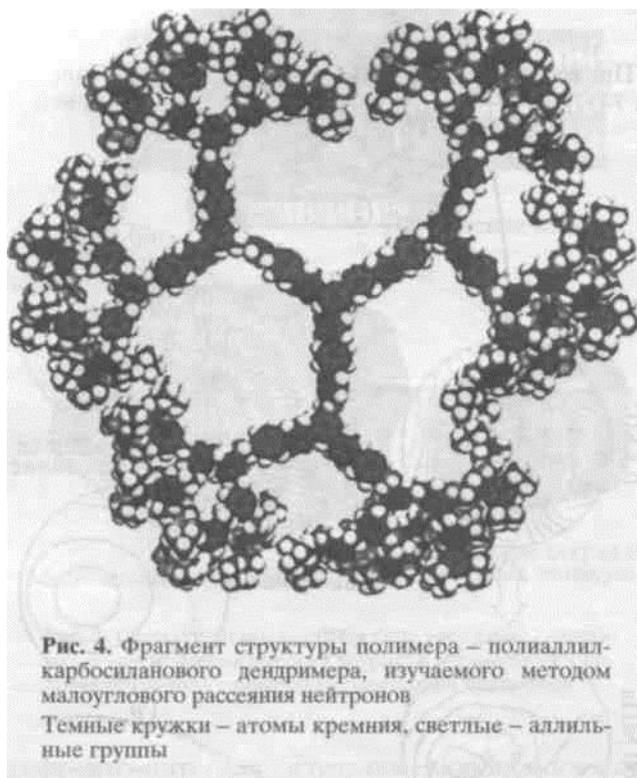


Рис. 3. Схема использования дифракции нейтронов в науках о Земле. Данные о характере анизотропии скорости упругого сжатия V_p получены с использованием дифракции нейтронов (определение полюсных фигур текстуры) и пространственного измерения скорости прохождения ультразвука (карты изолиний скоростей продольных упругих волн) при разных всесторонних давлениях

та и реализовавшими его в макетном варианте в 1975 г. Первый фурье-дифрактометр для структурных исследований на реакторе непрерывного действия был создан в 1984 г. в ПИЯФ.

Вскоре стало ясно, что наиболее адекватным для эффективной реализации метода является импульсный источник нейтронов с большой длительностью импульса, то есть типа реактора ИБР-2. В 1989 г. ЛНФ совместно с ПИЯФ и Центром технических исследований в Хельсинки начала создание ФДВР на реакторе ИБР-2. С учетом опыта, полученного в предыдущие годы в Хельсинки и в Гатчине, удалось успешно завершить проект в середине 1992 г. - 11 июня были получены первые спектры.

В настоящее время ФДВР - один из четырех лучших в мире нейтронных дифрактометров, обладающих наиболее высоким разрешением - на уровне 0.1% - и рекордным потоком нейтронов на образце. Его создание открывает широкие



перспективы для структурных исследований в физике, химии, биологии, материаловедении. Конкретно ФДВР применяются в прецизионных исследованиях структур поликристаллов, анализе дифракционных спектров от монокристаллов, если необходимо столь высокое разрешение, и в экспериментах по анализу внутренних напряжений в объемных изделиях.

Фактически успехи в создании ФДВР вывели дубненский реактор в число лучших источников нейтронов в мире. Появился серьезный дополнительный аргумент в пользу источников нейтронов с длинным импульсом. Это направление в настоящее время активно развивается.

Дифрактометры по времени пролета позволяют параллельно с дифракцией получать информацию о рассеянии нейтронов на малые углы. Эта уникальная возможность, также впервые установленная и реализованная в Дубне [15], 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. Малоугловое рассеяние нейтронов находит все большее применение при изучении надатомных структур в биологии, физике жидких кристаллов, химии мицеллярных растворов, поверхностно-активных веществ, полимеров.

Одной из наиболее развивающихся областей использования нейтронов является исследование полимеров. На рис. 4 показан фрагмент структуры одного из новых полимеров, синтезируемых в

Институте синтетических полимерных материалов РАН [16]. Этот тип дендримера состоит из 384 атомов кремния и 382 аллильных групп $\text{CH}=\text{CHCH}_2$ и обладает свойством монодисперсности. С помощью малоуглового рассеяния нейтронов на установке ЮМО, названной так в честь ее создателя Ю.М. Останевича, измерены параметры дендримера, показанного на рис. 4: его сферичность, радиус сферы, плотность, монодисперсность. Использование изотопного контраста растворителей (в данном случае бензола C_6H_6 и C_6D_6) делает малоугловое рассеяние нейтронов практически единственным методом, позволяющим измерять параметры полимеров и тем самым корректировать технологии их изготовления.

Если угол падения нейтронов на образец уменьшать, то при достижении некоторого критического значения можно наблюдать 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, а Дубна - единственное место в нашей стране, где она развивается уже более 10 лет. В настоящее время имеется три рефлектометра, причем два из них с поляризованными нейтронами.

Нейтронная рефлектометрия - наука молодая, как метод измерений она начала активно развиваться с начала 80-х годов. Недавно физикам ОИЯИ совместно с коллегами из ПИЯФ, Института физики металлов УрО РАН и ИЛЛ в Гренобле удалось учесть в экспериментах эффекты незеркального отражения, которые дают дополнительную информацию о структуре. На рис. 5 показаны результаты исследований магнитной структуры многослойной системы, состоящей из тонких слоев железа и хрома. Такие системы обладают так называемым гигантским магнетосопротивлением (ГМС), и их применение связано с дальнейшим развитием вычислительной техники, а именно со значительным увеличением объема памяти твердых дисков. Однако для использования на практике таких систем надо знать механизм ГМС. До недавнего времени его связывали с представлением о стопке однородно упорядоченных антиферромагнитных слоев железа, что следовало из данных по зеркальному отражению поляризованных нейтронов. Как показали исследования с учетом эффектов незеркального отражения [17], каждый из слоев железа содержит домены диаметром 200-300 нм, они, по-видимому, и играют главную роль в процессах, приводящих к ГМС.

Итак, за 40 лет работы импульсных реакторов в ОИЯИ сформировалась научная школа по нейтронной физике, которая определила развитие этой науки в мире по целому ряду направлений. Источники нейтронов в Дубне открыты для всех исследователей и с каждым годом привлекают все больше пользователей не только из физичес-

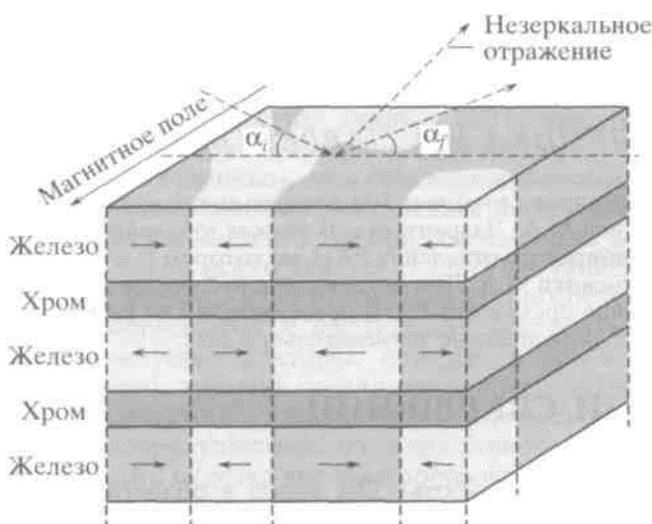


Рис. 5. Магнитная доменная структура многослойной системы железо–хром, полученная с помощью измерения незеркального отражения поляризованных нейтронов

ких 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 политика пользователей. Ее суть состоит в том, чтобы дать возможность специалистам сторонних организаций получить как можно более широкий доступ к экспериментальным установкам. Научные комитеты по направлениям исследований производят отбор поданных на эксперименты предложений. Например, на реакторе ИБР-2 экспериментаторы почти из 30 стран ежегодно выполняют около 200 экспериментов. На долю ЛНФ приходится около 30% пучкового времени, приблизительно 35% используют ученые из более чем 20 научных институтов России.

Такая организация работ привлекает молодежь. Наш институт активно сотрудничает с ведущими вузами страны, с 1961 г. в Дубне работает филиал физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, в настоящее время интеграция с высшей школой организуется через Межфакультетский центр МГУ "Строение вещества и новые материалы" 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 нашей страны в развитии новых методов нейтронной физики, которые вывели Россию на передовые рубежи в области нейтронных исследований вещества.

Автор признателен академиком Ю.М. Кагану и А.Ю. Румянцеву за стимулирующие обсуждения материала этой публикации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Франк И.М. Развитие и применение в научных исследованиях импульсного реактора ИБР // Физика элементарных частиц и атомного ядра. 1972. Т. 2.
2. Аксенов В.Л. Импульсные реакторы для нейтронных исследований // Физика элементарных частиц и атомного ядра. 1995. Т. 26. № 6.
3. Аксенов В.Л. Пульсирующий ядерный реактор // Природа. 1996. № 2.
4. Алфименков В.П., Пикельнер Л.Б. Эксперименты с поляризованными нейтронами и ядрами // Физика элементарных частиц и атомного ядра. 1995. Т. 26. № 6.
5. Абов Ю.Т. Когерентные процессы в ядрах и кристаллах // УФН. 1996. Т. 166. № 9.
6. Шапиро Ф.Л. Электрические дипольные моменты элементарных частиц // УФН. 1968. Т. 95. № 1.
7. Мостовой Ю.А., Мухин К.Н., Патаракин О.О. Нейтрон вчера, сегодня, завтра // УФН. 1996. Т. 166. №9.
8. Багряное Б.В., Карташов Д.Г., Кувшинов М.М. и др. Динамический конвертор ультрахолодных нейтронов на импульсном реакторе // Ядерная физика. 1996. Т. 59.
9. Natkaniec I., Janik J.A., Mayer J. et al. Inverted geometry multipurpose spectrometer for pulsed neutron sources // Neutron Scattering in Nineteens. Vienna: IAEA, 1985.
10. Blagoveshenskii N.B., Bogoyavlenskii I.V., Karnatsevich L.V. et al. Structure of the excitation spectrum of liquid ^4He // Phys. Rev. B. 1994. V. 50. № 22.
11. Дубовский Л.Б., Румянцева А.Ю. Восстановление поверхности Ферми металлов и сплавов // Природа. 1997. № 1.
12. Аксенов В.Л., Балагуров А.М. Времяпролетная нейтронная дифрактометрия // УФН. 1996. Т. 166. № 9.
13. Горделий В.И., Исламов А.Х., Сырых А.Г. Определение флуктуации периода повторяемости липидных и биологических мембран методом дифракции нейтронов по времени пролета // Биологические мембраны. 1992. Т. 9.
14. Иванкина Т.И., Клима К., Локаичек Т. и др. Исследование анизотропии оливинового ксенолита с помощью акустических волн и дифракции нейтронов // Физика Земли. 1999. Т. 5.
15. Гладких И., Козлов Ж.А., Останевич Ю.М., Черл. Малоугловое рассеяние нейтронов с использованием времени пролета // Сообщение ОИЯИ. № 3-7655. Дубна: ОИЯИ, 1974.
16. Gordely V.I., Mukhametjanov R.I., Kuklin A.I. et al. Investigation of 7 generation dendrimers // FLNP Annual Report 2000. Dubna: JINR, 2000.
17. Lauter-Pasyuk V., LauterHJ., Toperverg B. et al. Magnetic off-specular neutron scattering from Fe/Cr multilayers // Physica B. 2000. V. 283.