

**ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ**

Дубна

ДЗ-2000-300

В.Л.Аксенов

**40 ЛЕТ НЕЙТРОННЫМ ИССЛЕДОВАНИЯМ
В ДУБНЕ**

Направлено в журнал «Вестник РАН»

2000

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 года в Объединенном институте ядерных исследований (ОИЯИ) в Дубне Московской области начал работать исследовательский реактор нового типа – импульсный реактор периодического действия (сокращенное название ИБР – импульсный быстрый реактор). 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, Обнинск), 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 такой реактор является очень экономичным и относительно простым и дешевым в эксплуатации из-за меньшей активации оборудования и медленного выгорания топлива.

В марте 1956 г. в Дубне был образован международный научный центр – ОИЯИ, директором которого представители стран-участниц избрали Блохинцева, и проект нового реактора переехал в Дубну, где он начал сооружаться в 1957 г. в Лаборатории нейтронной физики, руководимой лауреатом Нобелевской премии И.М.Франком. Д.И.Блохинцев до своей смерти (1979 г.) 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 РФ по атомной энергии), его институтов и предприятий. Принципиальным отличием реактора ИБР-2 от серии реакторов ИБР стало использование вращающегося с большой скоростью (до 1500 оборотов в мин.) 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]). Реактор ИБР-2 в настоящее время – самый высокопоточный в мире импульсный источник нейтронов для научных исследований. Более того, в мире до сих пор нет аналогов импульсного реактора ИБР-2, и он играет роль полигона для отработки методов экспериментов на высокопоточных импульсных источниках нейтронов с большой длительностью импульса и тем самым влияет на стратегию развития источников нейтронов для физических исследований. На рис. 1 показан общий вид экспериментального 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 получали работы по изучению конденсированного состояния вещества. Причем все больше проводится экспериментов, связанных с задачами материаловедения, химии, биологии, наук о Земле, инженерных наук. Междисциплинарность – общая черта нейтронных исследований, которая развивается благодаря уникальным свойствам нейтрона, проявляющимся при его взаимодействии с веществом.

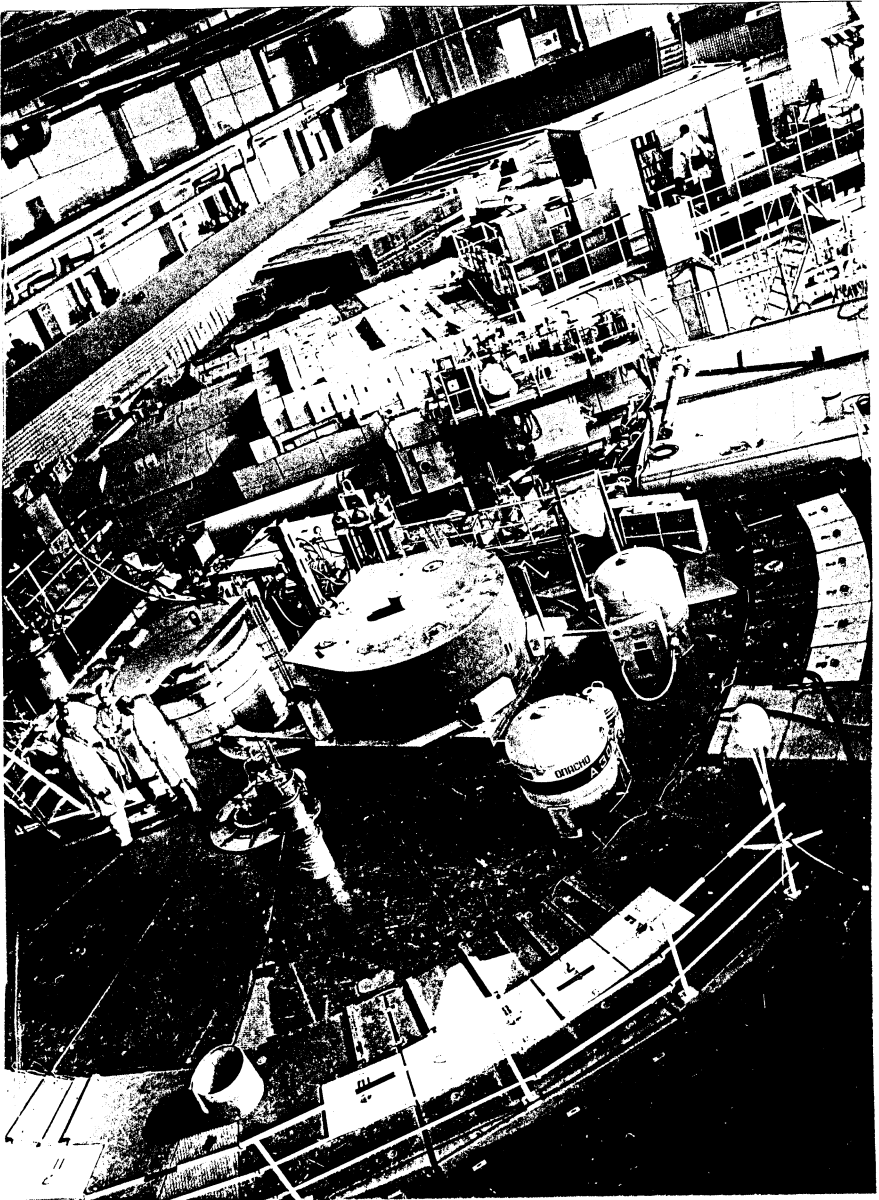


Рис. 1. Общий вид экспериментального зала реактора ИБР-2

ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ С НЕЙТРОНАМИ

Поскольку нейтрон не имеет электрического заряда ($Q_n \leq -0,4 \cdot 10^{-21} |Q_e|$), то 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, γ -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 ядра, 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 с поляризованными нейтронами и поляризованными ядрами. Начиная с 1961 г. по инициативе Ф.Л.Шапиро были разработаны методы поляризации нейтронов с помощью протонной мишени, поляризованной динамическим способом, поляризации ядер в мишени с помощью охлаждения до температур порядка 10^{-2} К в рефрижераторе с растворением гелия-3 в гелии-4, проведены пионерские исследования эффектов сверхтонких взаимодействий в компаунд-состояниях ядер [4]. В последнее время развитые методы используются для исследований нарушений фундаментальных симметрий в нейтронных резонансах.

Интерес к изучению эффектов нарушения пространственной четности (P-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 экспериментальной и теоретической физики (ИТЭФ, Москва) в 1964 г. группой Ю.Г.Абова, когда была обнаружена асимметрия вылета γ -квантов при радиационном захвате тепловых поляризованных нейтронов неполяризованными ядрами ^{113}Cd относительно направления поляризации нейтронов. Величина эффекта была на уровне 10^{-4} по сравнению с 10^{-7} – 10^{-8} для малонуکلонных систем.

Понимание связи наблюдаемых эффектов с конкретными нейтронными резонансами стало возможным только после проведенных в Дубне в 1981 г. экспериментов при упругом рассеянии нейтронов, т.е. в (p, p)-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 P-нечетных эффектов следует из теории Ю.М.Кагана и А.М.Афанасьева взаимодействия нейтронов с ядрами в регулярных структурах. 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, т.к. оно позволяет глубже понять структуру возбужденных состояний ядер. Целью таких исследований является измерение параметров смешивающихся резонансов и затем определение матричных элементов слабого взаимодействия в ядрах. Необходимо отметить, что задача является довольно сложной, поскольку современная теория атомного ядра не позволяет надежно описать сложную структуру компаунд-состояний и точно рассчитать коэффициенты усиления. Поэтому пока в данном направлении задача состоит в накоплении информации, причем интерес больше представляет повышение точности эксперимента и наблюдение слабых эффектов, обусловленных малыми матричными элементами, а также использование не только поляризованных нейтронов, но и поляризованных ядер.

Еще одним интересным результатом исследований упругого канала взаимодействия поляризованных нейтронов с поляризованными ядрами можно считать открытие новой возможности исследования нарушения симметрии относительно обращения времени (временной инвариантности).

В экспериментах по изучению Р-нечетных эффектов рассматривались парные корреляции спина нейтрона \vec{s}_n с импульсами γ -кванта \vec{k}_γ , самого нейтрона \vec{k}_n или спина мишени \vec{I}_n . Для изучения нарушения временной инвариантности используют как поляризованные нейтроны, так и поляризованные ядра. В этом случае в амплитуде упругого рассеяния нейтронов вперед необходимо учитывать дополнительно тройную корреляцию: $\vec{s}_n \cdot [\vec{k}_n \cdot \vec{I}_n]$, вклад которой пропорционален матричным элементам как Р, так и Т-нечетного взаимодействия. Наличие этой корреляции приводит к разнице полных сечений при пропускании через поляризованную ядерную мишень нейтронов, поляризованных параллельно или антипараллельно оси $[\vec{k}_n \cdot \vec{I}_n]$. При этом присутствуют те же, что и при Р-неинвариантности факторы усиления, которые могут достигать значения $10^5 - 10^6$.

В качестве поляризаторов интенсивных пучков резонансных нейтронов наиболее эффективными являются поляризованные протонные мишени. В настоящее время в мире имеется три такие мишени: в ОИЯИ, в Институте высоких энергий (КЕК) в Тсукубе (Япония) и в Центре по рассеянию нейтронов в Лос-Аламосе (LANSCE). Недавно пучок нейтронов в ОИЯИ был оснащён 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 физиками Физического института им. П.Н.Лебедева РАН. Таким образом, созданы уникальные возможности для исследования фундаментальной проблемы нарушения временной инвариантности.

УЛЬТРАХОЛОДНЫЕ НЕЙТРОНЫ

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

Особенностью ультрахолодных нейтронов является их полное отражение от поверхности при любом угле падения, то есть 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 проведено Я.Б.Зельдовичем в 1959 г.

В 1968 г. на реакторе ИБР в ОИЯИ были проведены первые успешные опыты по экспериментальному наблюдению УХН и их накоплению. Эти опыты были продолжены 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. Эти эксперименты были продолжены на реакторах Научно-исследовательского института атомных реакторов (НИИАР, Димитровград), Петербургского института ядерной физики (ПИЯФ) РАН, Института им. Лауэ-Ланжевена (ИЛЛ, Гренобль, Франция). 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 удержания УХН в сосудах – по разным причинам время их жизни там было меньше теоретических предсказаний. Эта проблема изучается и по сей день. Параллельно изучался и сам процесс β -распада нейтрона, детальное знание 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, ПИЯФ РАН, РНЦ КИ. Совместная группа ЛНФ ОИЯИ и ПИЯФ РАН использовала оригинальную установку КОВШ на реакторе ВВР-М ПИЯФ, предложенную и разработанную в ЛНФ им. И.М.Франка. В настоящее время эксперименты по изучению свойств УХН с помощью установки КОВШ продолжаются на реакторе ИЛЛ.

Физика УХН дает новые возможности изучения проблем фундаментальных взаимодействий, квантовой механики, нейтронной оптики. Так, остается актуальной задача измерения ЭДМ нейтрона. Верхняя его граница была установлена методом хранения УХН физиками ИЛЛ в 1990 г. и ПИЯФ РАН в 1992 г. на уровне $3 \cdot 10^{-26}$ е-см. В процессе измерений ЭДМ нейтрона уже несколько теорий нарушения симметрии обращения времени были отвергнуты [7]. В настоящее время обсуждается 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 и для дальнейшего развития физики УХН необходимы источники УХН высокой плотности. Недавно сотрудниками ЛНФ им. И.М.Франка был предложен [8] новый способ генерации УХН на движущихся конверторах в сочетании с мощным импульсным реактором БИГР ВНИИЭФ. Ожидаемая плотность УХН до 10^5 см⁻³ позволит не только повысить статистику, но и провести новые эксперименты, пока недоступные на существующих источниках. Максимальная плотность УХН на реакторе ИЛЛ в настоящее время не превышает 10^2 см⁻³. 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 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 (см., например [3]), поэтому нейтронография, т.е. 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 после рассеяния в образце монохроматического пучка нейтронов измеряют изменение энергии нейтронов при неупругом рассеянии или угла рассеяния при упругом рассеянии. На импульсном источнике фиксируют время вылета нейтрона из источника и время его попадания на детектор и затем по измеренному времени пролета нейтронов от источника до детектора определяют их характеристики после рассеяния в образце.

Метод времени пролета 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 динамике водорода в гидриде циркония [1]. В 1965 г. по инициативе физиков из Кракова был создан первый вариант спектрометра обратной геометрии. Дальнейшие модификации этого спектрометра привели к созданию уникального Краковско-Дубненского спектрометра КДСОГ на реакторе ИБР-30 и затем спектрометров КДСОГ-М и НЕРА-ПР на реакторе ИБР-2 [9].

На спектрометрах 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 РНЦ КИ и ФЭИ).

Другой тип спектрометров неупругого рассеяния – спектрометры типа ДИН – 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 [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 помощью которых 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 реакторе ИБР были начаты в 1962 г. и, по существу, явились первыми реальными экспериментами в этой области, показавшими работоспособность метода. Первые публикации появились в 1963 г. (см. обзор [12]). Они зафиксировали год и место рождения времяпролетной нейтронной дифрактометрии. 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 г. под руководством Б.Бураса времяпролетный дифрактометр был установлен на реакторе с прерывателем Ферми в Ризо, Дания. 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 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. Последнее позволяет включать и внешние воздействия на образец в импульсном режиме и достигать гораздо больших значений параметров этого воздействия, нежели в стационарном режиме.

История развития метода времени пролета в ЛНФ в 60-х и 70-х годах содержит 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, происходящих 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 были 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 в мировой практике уточнение структуры монокристалла на дифрактометре по времени пролета также было выполнено на реакторе ИБР, а именно 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), в США (Аргонн – 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 всех этих источниках построено по несколько времяпролетных дифрактометров, которые превосходят дифрактометры на реакторах непрерывного действия по целому ряду параметров.

Значительное, почти в 100 раз по сравнению с импульсными источниками предыдущего поколения, увеличение потока нейтронов на реакторе 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 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 [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. При добавлении воды мультислойная фаза преобразуется в многослойные липосомы, а при ее избытке – в моноламеллярные липидные везикулы. Липидная матрица является главным элементом биологических мембран, окружающих клетку и обеспечивающих ее жизнедеятельность. Для понимания механизмов работы мембраны необходимо знать такие параметры, как толщина водной прослойки и гидрофобной части, периоды повторяемости липидных бислоев, площадь, приходящаяся на одну липидную молекулу, а также зависимость этих параметров от температуры и различных добавок. Эти параметры измерялись с помощью дифракции нейтронов для липидных структур дипальмитоиллецитина, яичного лецитина, яичного фосфатидилхолина, фосфолипидов. Одним из значимых результатов этих измерений стало определение энергии

связи молекул воды с липидной головой, например, для фосфолипидов она оказалась равной 30 Дж/моль.

Большой поток нейтронов на реакторе ИБР-2 позволяет эффективно исследовать необратимые процессы в кристаллах. 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 от 5 до 10 мин. Первые же эксперименты на ИБР-2 показали, что имеются возможности улучшить временное разрешение до 1 минуты, а в отдельных случаях до нескольких секунд.

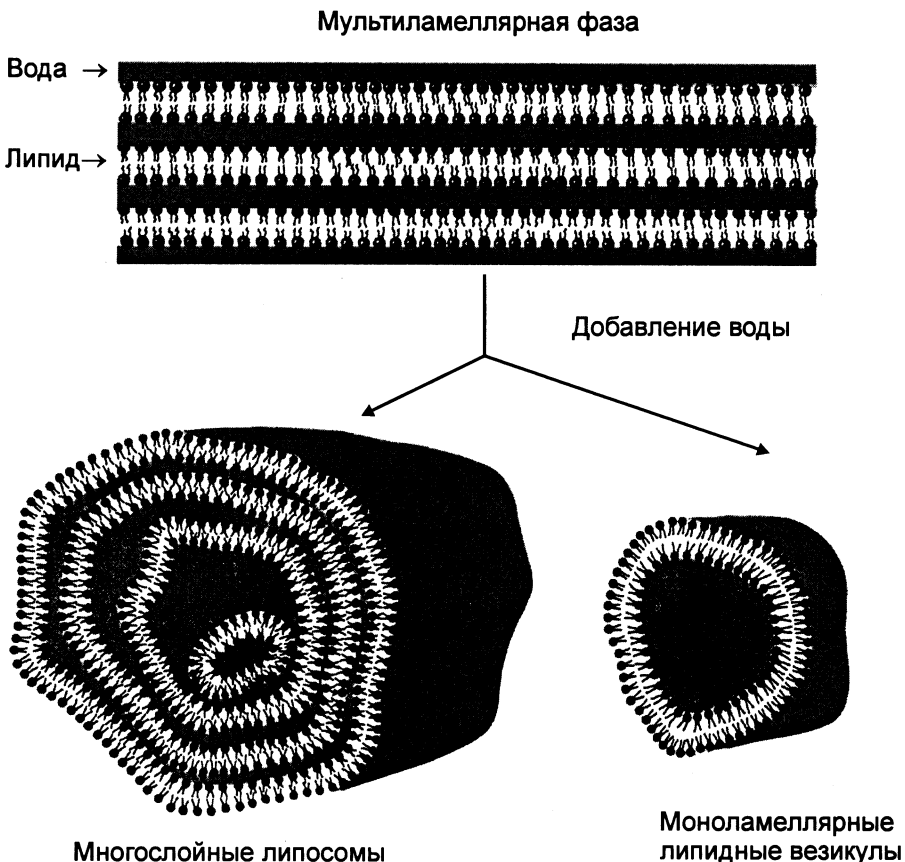


Рис. 2. Схематическое изображение эволюции главного элемента биологических мембран – липидного бислоя, изучаемого с помощью дифракции нейтронов

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.

Одно из важнейших и перспективных направлений нейтронной времяпролетной дифрактометрии связано с использованием высоких давлений при структурных исследованиях. В сотрудничестве с ведущими специалистами в мире в этой области, физиками из Института физики высоких давлений им. Л.Ф.Верецагина (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 настоящее время это самый светосильный дифрактометр в мире для изучения микрообразцов.

Камеры высокого давления ИФВД РАН 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 глубоких 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 и Институтом геологии рудных месторождения РАН. Образцы были 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 части рис. 3 показаны 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 в нейтронной дифрактометрии – метода нейтронной фурье-дифрактометрии. В отличие от обычного метода времени пролета, в этом методе фиксируется не время пролета каждого зарегистрированного нейтрона, а вероятность, с которой зарегистрированные нейтроны распределены по времени пролета [12]. 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 г. Первый фурье-дифрактометр для структурных исследований на реакторе непрерывного действия был создан в 1984 г. в ПИЯФ РАН.

Вскоре стало ясно, что наиболее адекватным для эффективной реализации метода является импульсный источник нейтронов с большой длительностью импульса, т.е. источник типа реактора ИБР-2. В 1989 г. 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. С учетом опыта, полученного в предыдущие годы в Хельсинки и в Гатчине, удалось успешно завершить проект в середине 1992 года – 11 июня были получены первые спектры.

В настоящее время ФДВР – один из четырех лучших в мире нейтронных дифрактометров, которые обладают наиболее высоким 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.

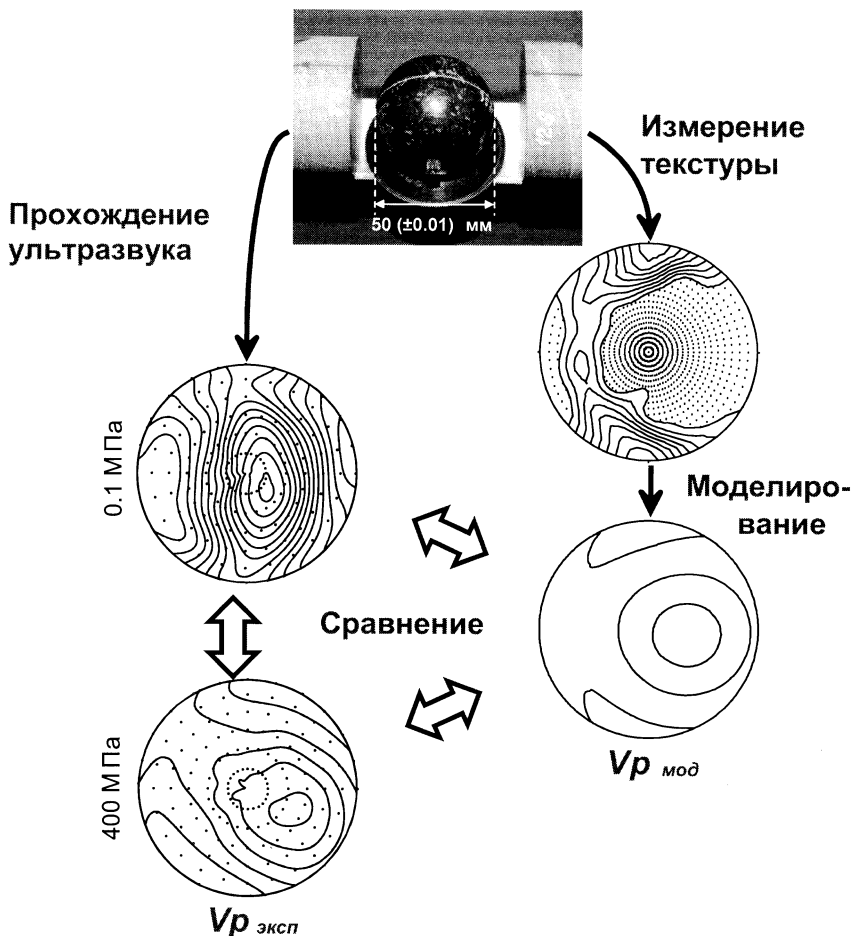


Рис. 3. Схема использования дифракции нейтронов в науках о Земле. Данные о характере анизотропии скорости упругого сжатия V_p получены с использованием дифракции нейтронов (определение полюсных фигур текстуры) и пространственного измерения скорости скорости прохождения ультразвука (карты изолиний скоростей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

Благодаря своей конструкции ФДВР является единственным в мире нейтронным дифрактометром, на котором возможно измерение спектров от монокристаллов с пространственным разрешением лучше чем 0,1%. Это обстоятельство было в полной мере использовано при изучении явления разделения фаз в сверхпроводниках, привлекающего в настоящее время пристальное внимание и теоретиков, и экспериментаторов. На выбранных для изучения на ФДВР кристаллах лантанового купрата [15] была проведена серия экспериментов, в которой удалось, прежде всего, выявить существование кристаллов, содержащих примерно одинаковое количество сверхстехиометрического кислорода, но принципиально по-разному ведущих себя при охлаждении. В одном типе кристаллов при охлаждении четко наблюдалось макроскопическое фазовое расслоение, проявляющееся в небольшом, но четко видимом на ФДВР, расщеплении дифракционных пиков. Другой тип кристаллов также испытывал при охлаждении фазовое расслоение, но на микроскопическом (<100 нм) уровне и при значительно более низкой температуре.

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.

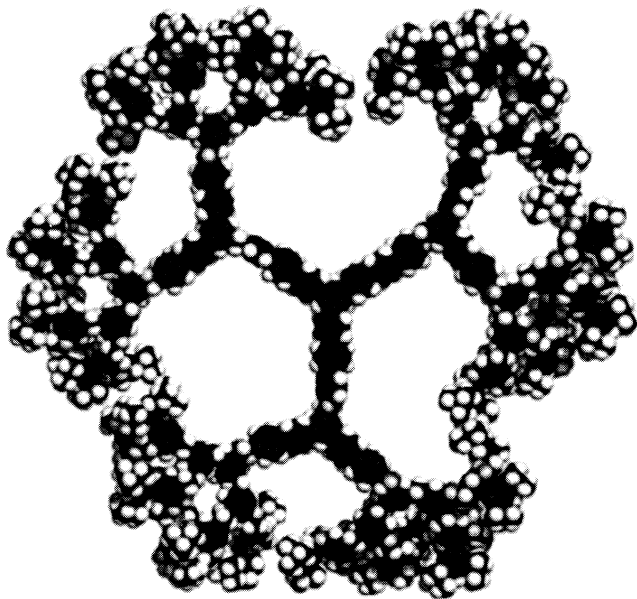


Рис. 4. Фрагмент структуры полимера – полиаллилкарбосиланового дендримера, изучаемого методом малоуглового рассеяния нейтронов. Темные кружки – атомы кремния, светлые – аллильные группы

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 [16], 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 – полиаллилкарбосилановых дендримеров, синтезируемых в Институте синтетических полимерных материалов РАН [17]. 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 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.

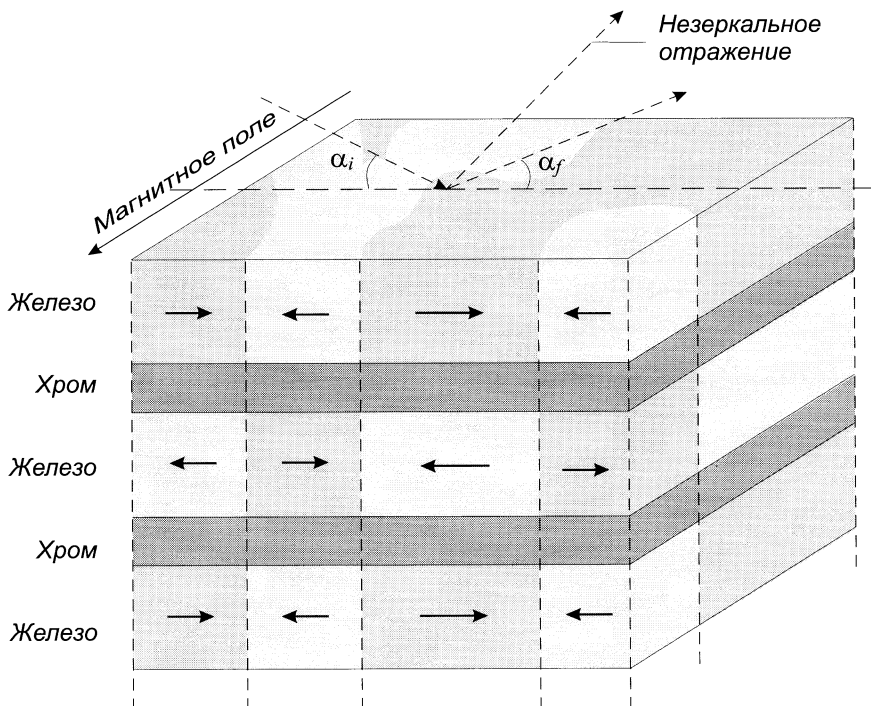


Рис. 5. Магнитная доменная структура многослойной системы железо-хром, полученная с помощью измерения незеркального отражения поляризованных нейтронов

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 10 лет развивается нейтронная рефлектометрия и 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 РАН, Института физики металлов УрО РАН и ИЛЛ 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 недавние исследования с учетом эффектов незеркального отражения [18], каждый из слоев железа содержит домены диаметром 200-300 нанометров. Эти домены, по-видимому, и играют главную роль в процессах, приводящих к ГМС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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 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 политика 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 производят отбор поданных на эксперименты предложений. Например, на реакторе ИБР-2 экспериментаторы из почти 30 стран ежегодно выполняют около 200 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 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 академикам 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. С. 807-860.
2. Аксенов В.Л. Импульсные реакторы для нейтронных исследований // Физика элементарных частиц и атомного ядра. 1995. Т. 26. № 6. С. 1449-1474.
3. Аксенов В.Л. Пульсирующий ядерный реактор // Природа. 1996. № 2. С. 3-17.
4. Алфименков В.П., Пикельнер Л.Б. Эксперименты с поляризованными нейтронами и ядрами // Физика элементарных частиц и атомного ядра. 1995. Т. 26. № 6. С. 1524-1538.
5. Абов Ю.Г. Когерентные процессы в ядрах и кристаллах // УФН. 1996. Т. 166. В. 9. С. 949-954.
6. Шатино Ф. Л. Электрические дипольные моменты элементарных частиц // УФН. 1968. Т. 95. В. 1. С. 145-158.
7. Мостовой Ю.А., Мухин К.Н., Патаракин О.О. Нейтрон вчера, сегодня, завтра // УФН. 1996. Т. 166. № 9. С. 987-1022.
8. Багрянов Б.В., Карташов Д.Г., Кувишинов М.И. и др. Динамический конвертор ультрахолодных нейтронов на импульсном реакторе // Ядерная физика. 1996. Т. 59. С. 1938-1988.
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. P. 411-412.
10. Blagoveshenskii N.B., Bogoyavlenskii I.V., Karnatsevich L.V. et al. Structure of the excitation spectrum of liquid ${}^4\text{He}$ // Phys. Rev. B. 1994. V.50. N 22. P.16550-16565.
11. Дубовский Л.Б., Румянцев А.Ю. Восстановление поверхности Ферми металлов и сплавов // Природа. 1997. № 1. С. 13-25.
12. Аксенов В.Л., Балагуров А.М. Времяпролетная нейтронная дифрактометрия // УФН. 1996. Т. 166. № 9. С. 955-986.
13. Горделий В.И., Исламов А.Х., Сырых А.Г. Определение флуктуаций периода повторяемости липидных и биологических мембран методом дифракции нейтронов по времени пролета // Биологические мембраны. 1992, Т. 9. С. 193-200.
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. С. 29-39.
15. Pomjakushin V.Yu., Amato A., Balagurov A.M. et al. Phase separation in $\text{La}_2\text{CuO}_{4+y}$ single crystals studies by μSR and neutron diffraction // Physica C. 1997. V. 282-287. P. 1353-1354.
16. Гладких И., Козлов Ж.А., Останевич Ю.М., Чер Л. Малоугловое рассеяние нейтронов с использованием времени пролета // Сообщение ОИЯИ. № 3-7655. Дубна: ОИЯИ. 1974.
17. Gordel'ny V.I., Mukhamet'yanov R.I., Kuklin A.I. et al. Investigation of 7 generation dendrimers. // FLNP Annual Report 2000, Dubna: JINR. 2000.
18. Lauter-Pasyuk V., Lauter H.J., Toperverg B. et al. Magnetic off-specular neutron scattering from Fe/Cr multilayers. // Physica B. 2000. V.283. P. 194-198.

Рукопись поступила в издательский отдел
18 декабря 2000 года.

Аксенов В.Л.
40 лет нейтронным исследованиям в Дубне

D3-2000-300

Публикуемая статья написана на основе доклада, сделанного автором на юбилейном заседании 88-й сессии Ученого совета Объединенного института ядерных исследований 8 июня 2000 г., посвященной 40-летию нейтронных исследований в Дубне. ОИЯИ является одним из ведущих научных центров в мире по использованию нейтронов для исследований фундаментальных взаимодействий и симметрий, структуры атомного ядра и конденсированного состояния вещества. Ученые из 30 стран проводят эксперименты на источниках нейтронов ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2000

Перевод Т.Ф.Дроздовой

Aksenov V.L.
40 Years of Neutron Physics in Dubna

D3-2000-300

This publication is based on the report presented by the author at the jubilee meeting of the 88th session of the Scientific Council of the Joint Institute for Nuclear Research (JINR) on June 8, 2000 devoted to the 40th anniversary of neutron investigations in Dubna. JINR is one of the world leading scientific centers in the use of neutrons for the investigation of fundamental interactions and symmetries, the structure of atomic nuclei, and the condensed state of matter. Scientists from 30 countries conduct experiments at the JINR neutron sources.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2000

Редактор Е.К.Аксенова. Макет Н.А.Киселевой

Подписано в печать 22.12.2000
Формат 60 × 90/16. Офсетная печать. Уч.-изд. листов 1,61
Тираж 240. Заказ 52423. Цена 1 р. 94 к.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
Дубна Московской области