

**FLnP**



# Направления научных исследований на перспективном импульсном источнике нейтронов в ЛНФ ОИЯИ

Том I



Объединённый институт ядерных исследований

Направления научных исследований на  
перспективном импульсном источнике  
нейтронов в ЛНФ ОИЯИ

ТОМ I



2025

Научные редакторы:  
С.А. Куликов, Н. Кучерка

Авторы:  
Р.В. Васин, Е.А. Горемычкин, В.Д. Жакетов, С.Е. Кичанов,  
Ю.Н. Копач, Е.В. Лычагин, Т.Н. Муругова, Т.В. Тропин,  
В.А. Турченко, Н.В. Федоров, А.Н. Бугай, Е.А. Якушев

Дизайнер  
К.В. Чижова

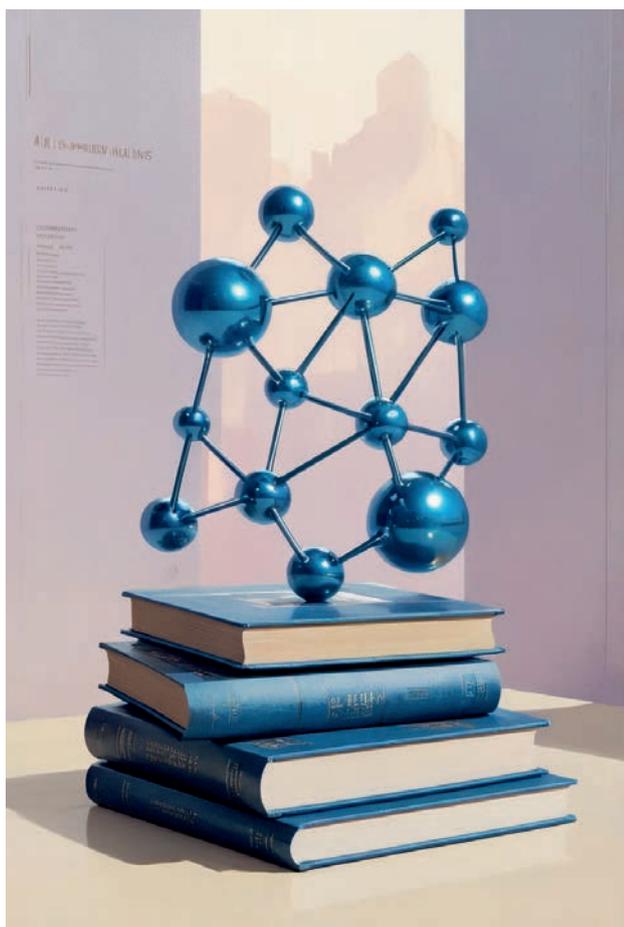
**Направления** научных исследований на перспективном импульсном источнике нейтронов в ЛНФ ОИЯИ. — Т. I. — Дубна: ОИЯИ, 2025. — IV, 136 с.

ISBN 978-5-9530-0645-3

Введение.....	1
1. Нейтроны в науках о жизни.....	13
1.1. Здоровье и долголетие.....	16
1.2. Медицина и фармакология.....	18
1.2.1. Создание новых лекарств.....	18
1.2.2. Адресная доставка лекарств.....	20
1.2.3. Протезирование и импланты.....	21
1.3. Окружающая среда, продукты питания и проблемы экологии.....	22
1.4. Приспособляемость и устойчивость живых систем к стрессам.....	23
1.5. Биотехнологии и биороботы.....	25
1.6. Радиобиологические исследования с использованием источников нейтронов.....	27
1.6.1. Исследования относительной биологической эффективности смешанных радиационных полей нейтронных источников.....	27
1.6.2. Исследования механизмов действия радиопротекторов на лабораторных животных.....	27
1.6.3. Радиобиологические аспекты нейтрон-захватной терапии рака.....	28
1.6.4. Структурные исследования биологических образцов.....	28
1.6.5. Астробиологические исследования.....	28
1.7. Нейтронные исследования в науках о жизни и развитие научной инфраструктуры.....	29
2. Наносистемы и мягкое конденсированное вещество.....	31
2.1. Полимеры.....	33
2.2. Поверхностно-активные вещества.....	35
2.3. Магнитные жидкости.....	36
2.4. Кинетические процессы в коллоидных системах.....	37
2.5. Адсорбционные слои на границе жидкость-воздух.....	38
2.6. Нанокompозиты и тонкие пленки.....	40
2.7. Роль нейтронных методов в исследованиях мягкого конденсированного состояния.....	41
3. Магнетизм и сверхпроводимость.....	43
3.1. Магнетизм и сверхпроводимость в магнитных слоях и тонких пленках.....	44
3.2. Спиновая динамика сильно коррелированных электронных систем.....	48
3.3. Высокотемпературная сверхпроводимость.....	51
3.4. Магнитные свойства материалов при высоких давлениях.....	53
3.5. Нейтронные методы в исследовании магнитных и сверхпроводящих материалов.....	55
4. Энергетика, химические источники тока.....	57
4.1. Материалы для ядерной энергетики.....	58
4.2. Преобразователи солнечной энергии.....	60
4.3. Химические источники тока.....	61
4.4. Водородная энергетика.....	63
4.5. Применение нейтронных методов при исследовании материалов для энергетики.....	64
5. Материаловедение.....	65
5.1. Конструкционные материалы.....	67
5.1.1. Стали.....	67
5.1.2. Сплавы.....	68
5.1.3. Бетоны и стёкла.....	71

# СОДЕРЖАНИЕ

5.2. Функциональные материалы.....	73
5.2.1. Сплавы с эффектом памяти формы.....	74
5.2.2. Самовосстанавливающиеся материалы.....	78
5.2.3. Метаматериалы.....	79
5.3. Аддитивные технологии.....	80
5.4. Нейтронные методы в исследовании конструкционных материалов.....	82
6. Науки о Земле.....	83
6.1. Атомная структура минералов.....	84
6.2. Магнитная структура минералов.....	85
6.3. Кристаллографические текстуры и анизотропия физических свойств горных пород.....	86
6.4. Микроструктура и проницаемость горных пород.....	88
6.5. Процессы деформации и разрушения горных пород.....	89
6.6. Объемное распределение минералов в метеоритах.....	90
6.7. Нейтронные методы в геофизических исследованиях.....	92
7. Нейтроны в исследованиях объектов культурного наследия и палеонтологии.....	93
7.1. Исследования объектов культурного наследия.....	94
7.2. Исследование палеонтологических материалов.....	98
7.3. Нейтронные методы в исследованиях объектов культурного наследия и палеонтологии.....	100
8. Фундаментальная ядерная физика низких энергий.....	101
8.1. Физика за пределами Стандартной модели и свойства нейтрона.....	103
8.1.1. Время жизни нейтрона.....	103
8.1.2. Нарушение P и T-инвариантности.....	104
8.2. Нейтронная оптика.....	107
8.2.1. Нестационарная квантовая механика и нейтронная оптика в случае больших ускорений.....	107
8.2.2. Нейтронная микроскопия.....	108
8.2.3. Спин-эхо для УХН.....	109
8.2.4. Гравитационная спектроскопия и проверка слабого принципа эквивалентности.....	109
8.3. Физика деления.....	110
8.3.1. Исследование T-нечетных эффектов в делении.....	110
8.3.2. Исследование и поиск редких мод деления.....	112
8.4. Получение ядерных данных.....	114
8.4.1. Сечения активации для дозиметрических целей.....	114
8.4.2. Сечения деления и выходы продуктов деления для широкого диапазона энергий налетающих нейтронов.....	115
8.4.3. Данные по распаду радиоактивных изотопов, в том числе, короткоживущих.....	115
8.5. Источник экзотических ядер и исследования на радиоактивных пучках.....	116
8.6. Исследование нейтрино и других редких событий.....	117
8.6.1. Оценка спектров антинейтрино для целей мониторинга состояния реактора.....	117
8.6.2. Непосредственное исследование реакторных нейтрино.....	118
Заключение.....	120
Литература.....	127



ковых, оптических и ряда других комплементарных методов позволяют дать адекватный ответ возникающим научным вызовам.

Востребованность нейтрона, как инструмента для исследования различных свойств материалов на уровне, начиная от атомного ядра и заканчивая целыми объектами, определяется его свойствами: электрической нейтральностью, наличием магнитного момента и большим временем жизни по отношению к бета-распаду. Неразрушающие нейтронные методы исследования помогают определять пути создания новых лекарств, пролить свет на причины возникновения болезней, разрабатывать квантовые материалы, вести поиск новых высокотемпературных сверхпроводников, способствуют созданию более ёмких и долговечных химических источников тока, новых функциональных материалов, дают возможность совершенствовать свойства конструкционных сталей и сплавов, разрабатывать новые методы аддитивных технологий, позволяют увидеть как работают компоненты внутри механизмов в режиме реального времени, приоткрыть тайны истории в исследованиях объектов культурного наследия и многое другое. Нейтронные методы уникальны в экспериментах, где требуется определить внутреннюю структуру и динамику материалов с легкими ядрами, магнитные структуры, текстуры и внутреннее напряжение в объемных образцах, а также пространственное распределение компонентов внутри массивных объектов и механизмов.

В дополнение к использованию нейтрона как инструмента, не менее интересным является и сам нейтрон в качестве объекта исследований. Нашему фундаментальному познанию природы дало бы дополнительную ясность понимание свойств нейтрона, его времени жизни в свободном состоянии, наличие у него электрического дипольного момента.

Изучение нейтронов может способствовать постижению Вселенной на ранней стадии образования, в частности, ответить на вопрос, почему материи больше, чем антиматерии и др.

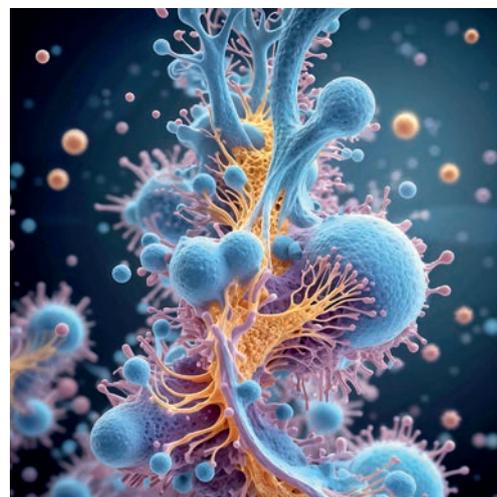
При всех преимуществах нейтронных методов исследования, связанных с глубиной проникновения нейтронов, магнитными свойствами, чувствительностью к изотопному составу, а значит, и возможностью варьирования контраста рассеяния, основным недостатком все еще остается относительно невысокая светосила на установках на выведенных пучках. В результате этого имеется ограничение по минимальному размеру исследуемых образцов, временному разрешению, продолжительности и точности экспериментов. Данную проблему можно решить только за счет увеличения потока нейтронов нужных энергий на образце и улучшения эффективности детектирования, сбора и анализа данных. Этого можно достичь комбинацией яркости источника нейтронов с оптимизацией всех узлов установок по рассеянию нейтронов, включающих в себя замедлители нейтронов, современные элементы нейтронной оптики, увеличение телесного угла и эффективности детектирующих элементов, использование передовых систем сбора, накопления и обработки данных. Более высокая плотность потока нейтронов на образце и лучшая статистика в экспериментах за меньшее время позволят уменьшить размеры синтезируемых новых образцов для исследования, повысить точность измерений и увидеть более тонкие процессы в сложных системах. Дополнительные возможности в изучении внутренних процессов и динамики появляются на импульсных источниках нейтронов при применении времяпролетных методик исследования в режиме реального времени с созданными экстремальными условиями на исследуемых образцах.

Во всех ведущих странах мира с развитой научно-исследовательской инфраструктурой для проведения исследований на установках на выведенных пучках нейтронов по физике конденсированных сред и ядерной физике, помимо создания и использования стационарных мощных исследовательских реакторов (ILL HFR – Франция, HFIR – США, FRM-II – Германия, OPAL – Австралия, PIK – Россия, CARR – Китай и других), которые генерируют непрерывные пучки нейтронов с высокой усредненной по времени яркостью, комплементарно к ним создаются импульсные источники нейтронов, которые генерируют периодические импульсы нейтронов с высокой пиковой плотностью потока, позволяющие эффективно применять времяпролетные методики в экспериментах с использованием почти всего спектра нейтронов от источника [Аксенов, Балагуров, 2016]. Такие источники строят на основе ускорителей или создают импульсные реакторы периодического действия. Примеры импульсных источников нейтронов: ИБР-2 – ОИЯИ, расположен в России, SNS – США, J-PARC – Япония, ESS – Европейский союз, Швеция, CSNS – Китай, ISIS – Великобритания. Помимо строительства новых высокоинтенсивных источников нейтронов, заявлены и прорабатываются программы модернизации и уже существующих: ISIS-II, SNS STS, вторая мишень на CSNS. Мировой опыт показывает, что для создания подобной крупномасштабной научной установки требуется около 20 – 25 лет. Введенный в эксплуатацию в 1983 году и прошедший глубокую модернизацию в 2012 году импульсный реактор ИБР-2, с учетом ежегодных программ работ и рабочей мощности, имеет, по предварительным оценкам, срок эксплуатации до 2040-х – 2050-х годов, в зависимости от режимов эксплуатации.

В связи с этим на смену реактора ИБР-2, который является единственным высокопоточным импульсным исследовательским источником нейтронов в странах-участницах ОИЯИ, стоит острая необходимость создать новый перспективный импульсный источник нейтронов высокой интенсивности с передовой приборной базой для коллективного доступа к оборудованию исследователей из стран-участниц Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ), ассоциированных членов и партнеров Института.

## Науки о жизни. Здоровье и медицина

Здоровье человека, лечение и профилактика заболеваний – одни из самых важных социальных задач, определяющих качество нашей жизни. Для их решения требуется глубокое понимание сложных биологических и молекулярных механизмов, отвечающих за выполнение различных функций в живых системах. К таким функциям можно отнести строительство и поддержание структуры клеточных элементов; запись, хранение и передача наследственной информации; синтез и утилизация химических соединений; передача и распространение сигналов; производство энергии; моторика. Главными участниками этих биологических процессов являются белки, липиды и нуклеиновые кислоты. Благодаря своим уникальным свойствам нейтроны могут предоставить точную информацию о положении атомов водорода и геометрии водородных связей, определять молекулярные структуры и их динамику. Эти знания имеют решающее значение для понимания поведения белков, ферментов и клеточных мембран, что способствует, помимо общего понимания функционирования живых организмов, повышению эффективности разработки и применения лекарственных средств для лечения и профилактики различных заболеваний.



Увеличение продолжительности жизни влечет за собой и изменение структуры заболеваний. Все большее распространение получают такие заболевания как сахарный диабет, онкологические заболевания, болезнь Паркинсона, повышение холестерина в крови и другие. Кроме того, появляются новые мультирезистентные штаммы бактерий и вирусов, которые представляют растущую угрозу нашему коллективному здоровью и безопасности. Нейтронные методы исследования, наряду с комплементарными методами, способствуют углублению нашего понимания механизмов развития заболеваний, вносят вклад в создание эффективных фармацевтических препаратов, способствуют разработке систем адресной доставки лекарств. Изучение причин заболеваний с помощью нейтронных методов, в частности, включает такое направление, как изучение болезни Альцгеймера, возникающей в результате нарушения мембран нейронов. Отдельными примерами применения нейтронных методов являются изучение транспорта холестерина и его влияние на нейродегенеративные заболевания и болезни сердца. Нейтронные методы способствуют изучению структуры и свойств липидных матриц кожного покрова. Эти знания дают возможность продвинуться в лечении дерматологических заболеваний и разработать способы трансдермальной доставки фармакологических и косметических средств. Нейтроны помогают исследовать структурные и механические свойства материалов, разрабатываемых для создания биосовместимых имплантов. Особое место применение нейтронов занимает в лечении злокачественных опухолей с помощью методики бор-захватной терапии и для производства радионуклидов, которые широко применяются в медицинской диагностике и лучевой терапии.

Важную роль в качестве жизни и здоровья человека играет окружающая среда. Нейтронные методы изучения элементного состава, структуры и динамики вещества уже активно применяются и находят новые направления для решения проблем экологии, качества продуктов питания, их хранения и переработки, изучения способов минимизации производственных отходов и в решении задач их утилизации.

## Энергетика

Получение, хранение и передача энергии является критически важной задачей для развития нашей цивилизации. Все больше исследований проводится в этом направлении с помощью нейтронных методов. Нейтроны обеспечивают идеальный доступ к структуре, кинетике и динамике многочисленных материалов и процессов. Нейтронные методы используются для изучения и оптимизации свойств конструкционных материалов и технологических процессов, которые играют важную роль в выработке энергии, как на энергетических ядерных реакторах, так и при создании термоядерных реакторов будущего. Уменьшению потерь при передаче энергии может способствовать применение высокотемпературных сверхпроводников, большой вклад в изучение структур которых был сделан с применением методики нейтронного рассеяния. Амбициозной задачей, которая может выполняться на перспективном импульсном источнике нейтронов, остается поиск и исследование соединений, обладающих сверхпроводимостью при комнатной температуре. Открытие и применение таких сверхпроводящих материалов приведет к технической революции во многих областях промышленности и в целом перестроении экономики.

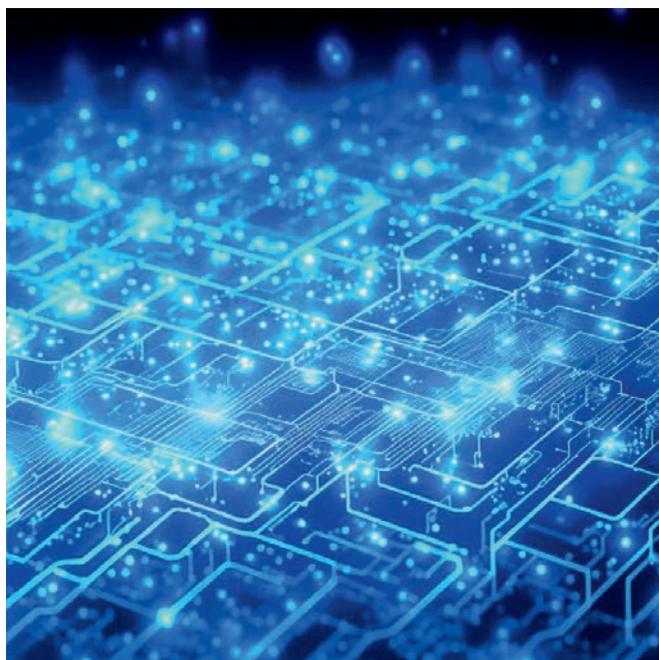


Одним из возможных направлений развития современной “зеленой” энергетики является применение органических солнечных батарей. Лёгкие, гибкие, полупрозрачные и потенциально дешёвые батареи могут стать широко используемым возобновляемым источником энергии. Также водородная энергетика представляет одно из активно развивающихся направлений в мире для энергетики будущего. Исследовательские программы по созданию водородных топливных ячеек или новых материалов для эффективного и безопасного хранения и транспортирования водорода в значительной степени зависят от исследований с помощью рассеяния нейтронов.

Все более широкое применение мобильных устройств, электрического транспорта требует развития аккумуляторной техники на основе ёмких твердотельных батарей. Благодаря высокой проникающей способности нейтронов, чувствительности к лёгким атомам в структуре и тому, что энергия тепловых нейтронов сопоставима с типичными энергиями возбуждений кристаллической структуры, методы рассеяния нейтронов активно применяются в исследованиях материалов для энергетики. Уже сейчас большое количество исследований выполняется с литий-ионными аккумуляторами с помощью методов рассеяния нейтронов в режиме реального времени зарядки и разрядки. Ведутся исследования материалов для создания компонентов коммерческих натрий-ионных аккумуляторов и, для увеличения удельной ёмкости, экологичности, долговечности аккумуляторов. Несомненно, будет проводиться поиск и исследование новых, более эффективных электродных материалов, твёрдых электролитов и других соединений.

## Квантовые материалы в современных цифровых технологиях

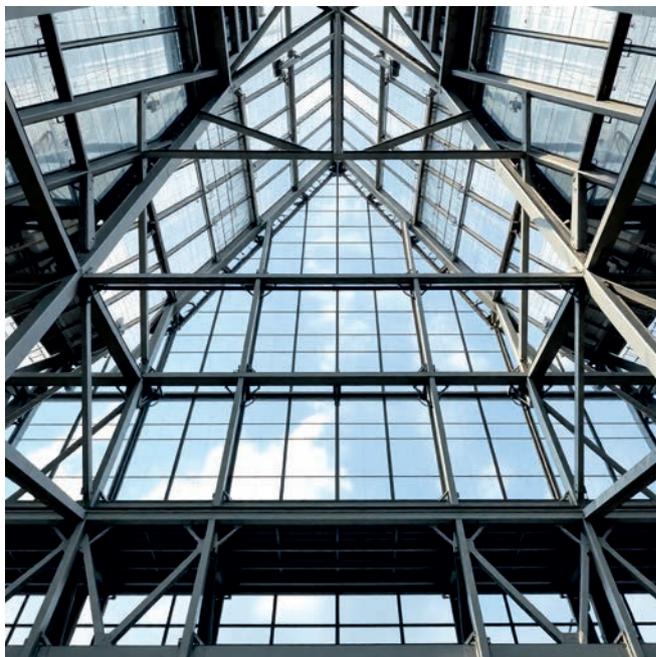
Цифровые технологии проникли в большинство сфер нашей жизни. На передний план выходят важные направления, связанные с хранением, обработкой, защитой и передачей информации. Современные топологические схемы уже перестают соответствовать потребностям человечества, поскольку существуют физические ограничения на то, чего могут достичь обычные компьютеры из-за ограничений плотности упаковки транзисторов на кристаллах и энергии, необходимой для их работы. Одно из направлений, с помощью которого можно преодолеть данную проблему – это использование квантовых материалов, которые обладают необычными магнитными и электрическими свойствами и технологий их производства. С их помощью можно создать высокоэффективные электрические системы и более быстрые и точные электронные устройства, квантовые компьютеры с энергонезависимой памятью, создавать нейроморфные вычислительные сети. Использование спинтронных устройств повышает энергоэффективность, поскольку закодированная спином информация может передаваться без движения электронов и, следовательно, без потери энергии. Квантовые вычисления способны обеспечить значительный прогресс в скорости обработки данных. Они открывают широкие возможности для развития и решения проблем во многих секторах экономики.



Важной составляющей в исследованиях магнитных структур является использование методов нейтронного рассеяния с их высокой чувствительностью к магнитным свойствам материалов. В частности, с помощью нейтронных методов уже были исследованы топологически стабилизированные спиновые вихри, так называемые скирмионы. Обладая уникальной чувствительностью к магнитным свойствам материалов, применение нейтронных методов чрезвычайно эффективно и уникально в определении статических и динамических свойств широкого спектра материалов. С помощью нейтронов был открыт эффект гигантского магнетосопротивления, которое нашло широкое применение в устройствах хранения данных и различных миниатюрных магнитных датчиках. Такой высокочувствительный магнитный датчик является ключом к магнитоэнцефалографии, которая может обнаруживать небольшое магнитное поле с высоким пространственным разрешением и широко используется вместе со сверхпроводящими материалами в медицине, а именно в магнитно-резонансных томографах. Эксперименты с помощью нейтронов открывают новые возможности в исследовании тонкопленочных гетероструктур, в том числе сверхпроводников и ферромагнетиков, магнитных наночастиц, топологических изоляторов, а также новых квантовых состояний вещества, которые позволят в будущем создать новые электронные устройства. Преодолению ряда ограничений в исследовании магнитных материалов будет в значительной мере способствовать создание перспективного высокопоточного импульсного источника нейтронов с передовой приборной базой.

## Конструкционные материалы и науки о Земле

Развитие нашей цивилизации невозможно представить без разработки, создания, исследования и применения новых материалов. На протяжении всего своего существования человечество революционно меняло ход истории с применением новых материалов. В современности материалы играют все более важную роль как в технологических прорывах, так и в повседневной жизни. Качество жизни в нашем обществе во многих случаях связано с доступностью предметов и устройств, изготовленных из новых материалов. Знание их кристаллической структуры, а также природы дефектов дает понимание химических и физических свойств материалов, а также возможность создавать материалы с заранее заданными физическими свойствами и прогнозируемым поведением. Разработка передовых материалов, поддерживающих новые технологии, зависит от способности управлять их свойствами на атомном уровне. Нейтронные



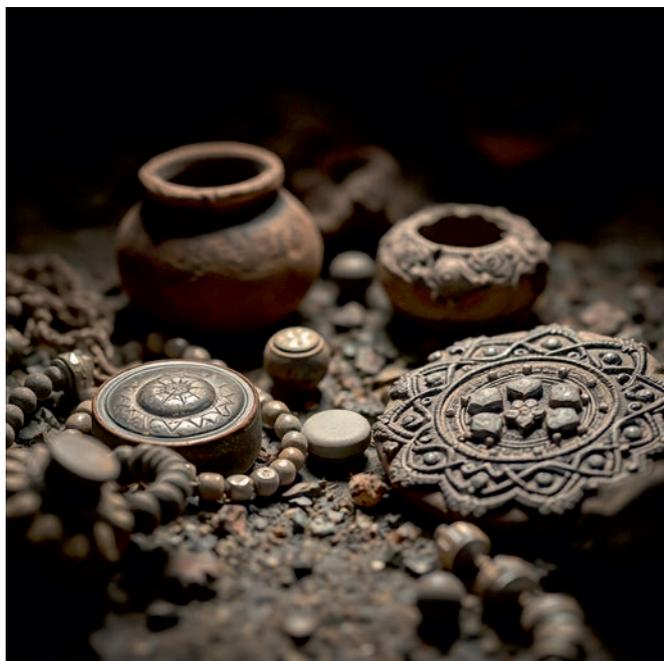
методы исследования являются одними из ключевых для достижения данных результатов. Большая глубина проникновения нейтронов в материал позволяет с высокой точностью проводить неразрушающие исследования внутренней структуры, свойств и процессов в объёмных массивных материалах и сложных системах. Особенно ценна возможность исследований при создании внешних воздействий на изучаемый материал, близких к природным условиям или условиям эксплуатации, в том числе экстремальным либо с агрессивной внешней средой: высокое давление, магнитное и электрическое поля, высокие и низкие температуры, в ходе реакций окисления/восстановления, различных химических процессов и др. Эти возможности имеют большое значение в инженерных науках и исследованиях в области наук о Земле. Способность быстро характеризовать материалы крайне необходима для оптимизации технологического процесса их синтеза, диагностики и последующего применения. Нейтронные методы исследования сокращают производственный цикл разработки и проверки новых материалов, что позволяет быстрее внедрять их в жизнь. Создание нового перспективного импульсного исследовательского источника нейтронов в значительной мере может ускорить процессы диагностики и анализа материалов. В то же время, большинство функциональных материалов представляют также фундаментальный научный интерес. Их изучение является дополнительным каналом взаимодействия между прикладными и фундаментальными исследованиями.

Авиакосмическая отрасль и автомобилестроение, машиностроение и строительство, судостроение и реакторостроение, медицина и фармацевтика, возобновляемые источники энергии, связь и информационные технологии, пищевая и химическая промышленность — во всех отраслях, где используются новые материалы и идут их разработки и характеристика, применяются нейтронные методы исследования. Материаловедение рассматривает широчайший спектр составов и структур, как хорошо известных и повсеместно применяющихся металлов, сталей, сплавов, стекол, цементов, керамик, полимеров, и др., так и появляющихся и привлекающих внимание в последние десятилетия высокоэнтропийных сплавов и сплавов с гигантской магнитострикцией, супер-дуплексных сталей, объёмных металлических стекол, металл-органических каркасов, нано- и биоматериалов, метаматериалов и др. В их обработке

используются как классические методы термомеханической обработки, сварки и др., так и новые процессы, например, интенсивной пластической деформации или аддитивные технологии.

Отдельное направление, в котором активно применяются нейтронные методы исследования — это науки о Земле, где объектами изучения являются состав, строение и динамика Земли. Для разработки методик предсказания землетрясений и извержений вулканов, изучения изменений рельефа земной поверхности и океанического дна, решения прикладных задач, например, обоснования выбора мест для строительства глубоководных хранилищ радиоактивных отходов, для добычи нефти и газа, необходима информация о деформациях и напряженном состоянии горных пород, анизотропии свойств. Получение этой информации возможно благодаря высокой проникающей способности тепловых нейтронов. Например, нейтронографический текстурный анализ позволяет с высокой точностью исследовать кристаллографические текстуры относительно больших крупнозернистых образцов горных пород и дает информацию о преимущественной пространственной ориентации кристаллических решеток зерен по всему минеральному ансамблю. Методы нейтронной радиографии и томографии применяются для получения трехмерных моделей внутреннего строения горных пород. Благодаря данному методу стало возможным, например, разделять минеральные и металлические компоненты в метеоритах смешанного состава, строить их распределения по занимаемым объемам и средним размерам компонентов, определять их морфологические особенности.

## Неразрушающие исследования объектов культурного наследия



Применение нейтронных методов для изучения объектов культурного наследия имеет ряд ключевых преимуществ и вызывает все больший интерес в археологии, а также при реставрации и консервации исторических артефактов, например, таких как картины, элементы оружия, скульптуры, посуда, керамика и др. Нейтронные методы уже используются на регулярной основе для изучения образцов из государственных музеев и частных коллекций. Обнаружение древних артефактов и произведений искусства обычно поднимает множество вопросов: правильное определение их исторических и культурных периодов создания, мест и способов изготовления, какие технологии и техники при этом применялись, а также требует выработки рекомендаций по выбору методов и условий для реставрации и их сохранения для будущих поколений.

Нейтронные методы являются неинвазивными, неразрушающими и идеально подходят для представления структурной информации об исторических артефактах, определения их состава, наличия изменений из-за условий окружающей среды, детектирования включений, структуры, восстановления технологии изготовления, места происхождения.

Методы нейтронной дифракции и томографии помогают количественно определить

составляющие фазы, их пропорции в образце и особенности кристаллических структур определенных фаз в монетах, оружии, статуях и др. Измерения объединяют химическую и структурную чувствительность, связанную с фазовым составом и текстурой, выявляя исторические технологии производства. Ключевым преимуществом нейтронных методов является способность исследовать внутренний состав и структуру через покрытия и слои коррозии, что снижает необходимость в потенциально опасной очистке и подготовке образцов к реставрации. Нейтронная томография позволяет представлять трехмерные модели внутренних частей артефактов без их вскрытия и разрушения даже при исследовании массивных объектов культурного наследия.

### Почему используются нейтроны?

Нейтронные методы рассеяния в изучении конденсированных сред позволяют изучать внутреннюю структуру и динамику вещества в широком диапазоне расстояний и энергий. Отсутствие электрического заряда позволяет нейтронам легко проникать вглубь исследуемого материала, в том числе через стенки устройств, поддерживающих требуемые внешние условия, включая и экстремальные: высокое давление, нагрузки растяжения и сжатия, высокие и криогенные температуры, магнитные и электрические поля и др. Неразрушающие нейтронные методы исследования на импульсных источниках нейтронов дают дополнительную возможность эффективно применять времяпролетную методику, в том числе в изучении химических процессов, фазовых переходов и динамики в режиме реального времени.

- Нейтроны легко проникают в большинство материалов, что позволяет изучать объемные образцы, либо сканировать небольшие области в глубине массивного образца. Это также позволяет исследовать образцы с созданными с помощью внешних устройств экстремальными условиями на них, например, криогенная температура и/или высокое давление.

- Поскольку нейтроны рассеиваются атомными ядрами, то можно определить, какой элемент и изотоп присутствует. Изотопный контраст — чувствительность и селективность по отношению к разным изотопам химических элементов, например водород и дейтерий, позволяет выделять определенные группы атомов в смесях, сложных биологических и других водородсодержащих материалах, в том числе и при наличии тяжелых элементов.

- Длина волны тепловых и холодных нейтронов соизмерима с межплоскостным расстоянием в веществе, поэтому нейтронные методы находят широкое применение в изучении структуры материалов в широком диапазоне расстояний от атомного уровня до сотен нанометров и выше.

- Энергии тепловых и холодных нейтронов соизмеримы с энергиями элементарных возбуждений в конденсированных средах. С помощью нейтронных методов рассеяния можно определять как коллективную, так и индивидуальную динамику атомов, возбуждения и элементарные колебания молекул и кристаллической решетки.

- Наличие у нейтрона магнитного момента делает его уникальным инструментом для исследования магнитных свойств как объемных материалов, так и тонких пленок и поверхностей. Нейтронные методы идеально подходят для изучения микроскопической магнитной структуры и спиновой динамики вещества.

- Нейтронные методы - неразрушающие, поэтому деликатные материалы, такие как биологические объекты или предметы культурного наследия, можно изучать, не опасаясь их повреждения.

– Методы нейтронного рассеяния комплементарны с методами синхротронного рассеяния, электронной микроскопии и другими методами структурной диагностики. Их использование дает более четкое понимание общей картины структуры и динамики изучаемых конденсированных сред.

– При высокой плотности потока и времени облучения, нейтроны могут активировать достаточное для анализа количество ядер вещества, а путем регистрации испускаемых гамма-квантов можно с высокой точностью установить его элементный состав.

– Нейтрон является важным объектом для изучения его фундаментальных свойств. Результаты данных исследования приводят к пониманию происхождения Вселенной и физики элементарных частиц, открывают дополнительные возможности по проверке Стандартной модели. Этому способствуют эксперименты с ультрахолодными нейтронами по измерению времени жизни нейтрона в качестве свободной частицы и измерению электрического дипольного момента, нейтронной интерферометрии и поиску нейтрон–антинейтронных осцилляций, измерению гравитационной массы и др., в каждом из которых требуется интенсивный поток для повышения точности измерений.

## Предварительные параметры перспективного источника нейтронов в ОИЯИ

При реализации научной программы на установках на выведенных пучках нового импульсного источника нейтронов в ЛНФ ОИЯИ, помимо анализа научных задач, для решения которых создаются установки, необходим также и более комплексный подход к рассмотрению параметров, при которых проводится эксперимент. В частности, предполагаемые параметры будущего нейтронного источника, потоки нейтронов в позиции образца на установках на выведенных пучках, эффективность регистрации, сбора и накопления данных. Поток нейтронов определяет светосилу эксперимента, ширина импульса – его разрешающую способность по энергии начальных нейтронов. Для ряда экспериментов важной характеристикой является уровень фона между импульсами источника и уровень фона запаздывающих, некоррелированных с импульсом, нейтронов. В Таблице 1 приведены основные характеристики для пяти действующих и двух строящихся (CSNS и ESS) импульсных источников, откуда видно, что они изменяются в довольно широких пределах.

Источник	Страна расположения	Год пуска	W, МВт	$\Phi_{or}$ , $\times 10^{13}$ , н/см <sup>2</sup> /сек	$\Delta t_r$ , мкс	$\Delta t_{or}$ , тепловых нейтронов, мкс	$\nu_{or}$ , Гц
ИБР-2	Россия	1984	2	0.8	215	350	5
ISIS-I	UK	1985	0.2	0.07	1	20	50
LANSCCE	USA	1985	0.1	0.05	1	20	20
SNS	USA	2006	1	1	1	20	60
J-SNS	Japan	2009	1	1	1	20	25
ISIS-II	UK	2009	0.05	0.02	1	60	10
CSNS	China	2018	0.14	0.07	1	20	25
ESS	Sweden	2026	5 (план)	30	2860	~3000	14
Новый источник в ОИЯИ	Россия	2040 (план)	10	10	200	~300	10

Таблица 1. Основные характеристики исследовательских импульсных источников нейтронов.

Научная программа нового импульсного источника нейтронов в ОИЯИ, равно как и набор необходимых для её реализации установок на выведенных пучках для коллективного доступа, должна в значительной мере определяться потенциальными пользователями создаваемых инструментов. Количество экспериментов, выполненных внешними по отношению к ОИЯИ пользователями на перспективном импульсном источнике нейтронов будет значительно выше, чем на реакторе ИБР-2. Это связано с новыми возможностями ввиду увеличения плотности потока нейтронов на установках нового источника, как за счет совершенствования самих установок (оптимизация оптических элементов, многократное увеличением телесного угла детекторов, создание более эффективной электроники сбора и анализа данных, автоматизация работы систем окружения образца и т.д.), так и увеличения светосилы источника с оптимизацией замедлителей нейтронов, а также расширению возможностей по размещению новых установок.

## Программа коллективного доступа к исследовательским установкам на реакторе ИБР-2

В настоящее время на действующем импульсном исследовательском реакторе ИБР-2 в ЛНФ ОИЯИ работает программа коллективного доступа к оборудованию для проведения экспериментов и, прежде всего, установкам по рассеянию нейтронов. Научные сотрудники из любых стран мира на основании внешней научной экспертизы представляемых заявок на эксперимент получают время для его проведения. Финансовую поддержку имеют исследователи из организаций стран-участниц и ассоциированных членов ОИЯИ. При регулярной работе реактора в год реализуется более 200 экспериментов. Более 80 публикаций в год готовится по результатам этих исследований.

Распределение по странам, в которых экспериментаторы, получившие пучковое время в 2021 году, можно увидеть на рисунке 1.

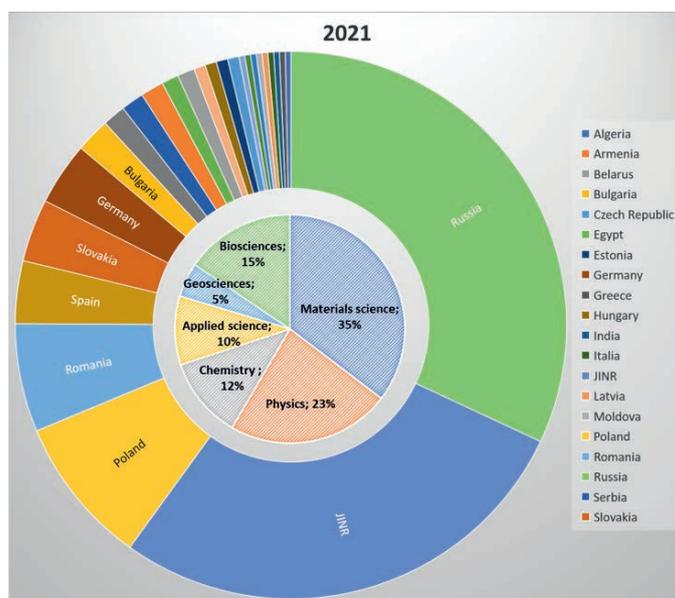


Рис. 1. Распределение участников пользовательской программы коллективного доступа к установкам на реакторе ИБР-2 по странам работы ученого и научным направлениям, по которым проводились эксперименты.

Распределение количества подаваемых и принятых заявок на эксперимент от года подачи представлено на рисунке 2.

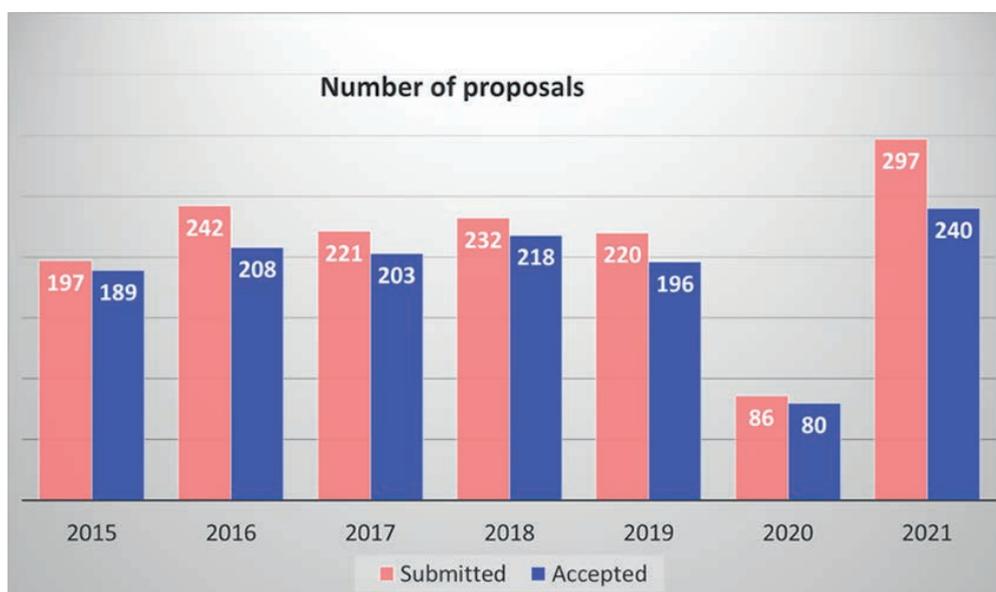


Рис. 2. Распределение количества подаваемых и принятых заявок на эксперимент в зависимости от года подачи заявки.

Вместе с экспериментальными работами, проводимыми учеными ЛНФ, привлечение исследователей из других организаций позволяет значительно расширить научную программу, реализуемую на установках на реакторе ИБР-2 и получить больше научных результатов, отраженных в публикуемых статьях (рисунок 3).

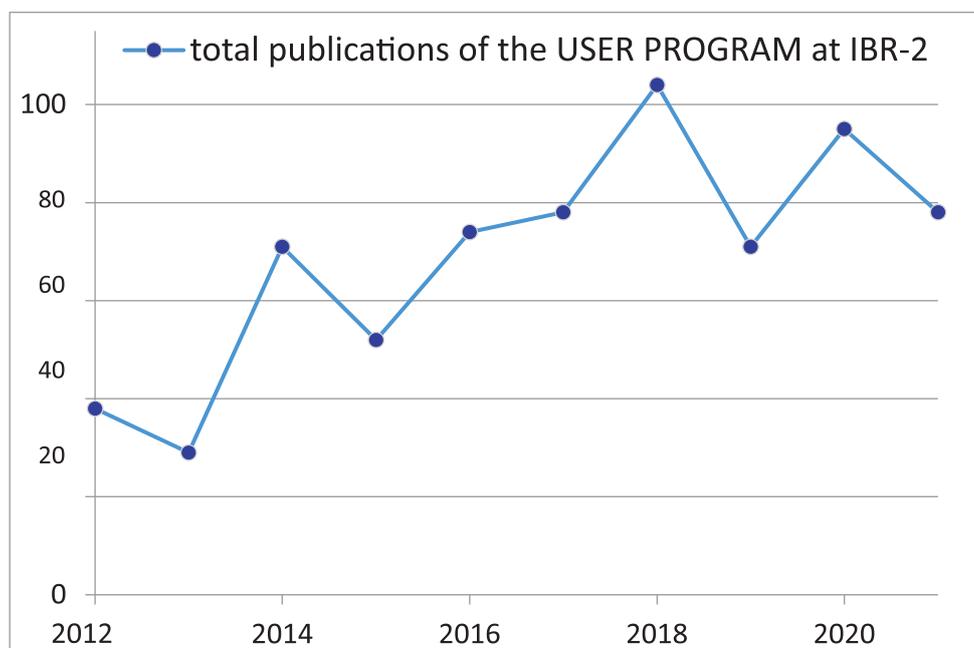
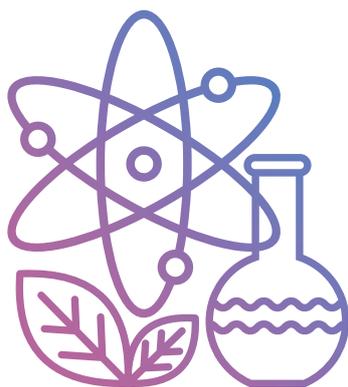


Рис. 3. Количество публикаций в периодических научных изданиях при реализации программы коллективного доступа к установкам на реакторе ИБР-2.

Учитывая сложившуюся практику и дополнительные возможности, которые может предоставить перспективный источник нейтронов с современными установками на выведенных пучках, в частности, увеличение их светосилы, более современные системы окружения образца и др., а также улучшение условий для подготовки и проведения экспериментов, ожидается увеличение количества пользователей на установках из организаций стран-участниц, ассоциированных членом и партнеров ОИЯИ.



---

## Нейтроны в науках о жизни



В настоящее время наблюдается повышенный интерес к наукам о жизни, и этот интерес по объективным причинам будет только расти. Вызвано это, в том числе, появлением новых технологий, повышением компьютерных мощностей, совершенствованием приборной базы, и, как следствие, расширением круга решаемых проблем. Большой интерес вызывает понимание устройства и функционирования биологических систем, взаимодействия отдельных компонентов этих систем на различных пространственных и временных уровнях. Получаемые знания находят применение в таких областях как биотехнологии, медицина, фармакология, экология, сельское хозяйство. Понимая структуру и механизмы функционирования живых систем на наномасштабных уровнях, мы можем регулировать их работу, исправлять дефекты и ошибки в существующих, создавать свои системы с заданными свойствами, то есть создавать новые лекарства, новые материалы, искать новые источники энергии и т.д.

Значительная доля информации о строении и динамике биологических систем (на уровне макромолекул и их комплексов) получается такими методами как методы рентгеновского и нейтронного рассеяния, ядерно-магнитного резонанса, масс-спектрометрии, электронно-парамагнитного резонанса, методом флуоресцентной спектроскопии и электронной микроскопии. В этом ряду техники нейтронного рассеяния и спектроскопии занимают особое место в связи с уникальными свойствами взаимодействия нейтрона с веществом. Эти свойства имеют особое значение в исследованиях биологических объектов. Нейтроны чувствительны к легким элементам, которые являются основными элементами, входящими в живые системы: углерод, азот, кислород, фосфор, сера и водород. Эти элементы эффективно детектируются с помощью нейтронов даже в тех системах, в которых также присутствуют более тяжелые элементы.

Биологические объекты на 50% состоят из атомов водорода, который хорошо “виден” с помощью нейтронных методов, в том числе с использованием техники вариации контраста. Тем самым можно выделять рассеяние от отдельных компонент, находящихся в составе сложных систем. Эта методика чрезвычайно полезна в структурных исследованиях таких многокомпонентных систем как биологические мембраны, комплексы белков с нуклеиновыми кислотами (например, хроматин, аптамеры с белками), мембранные белки в детергентном окружении, липопротеиды, мультикомпонентные ферментативные комплексы и даже целые органеллы и клетки.

Набор различных методик рассеяния нейтронов и нейтронной спектроскопии может дать как структурную, так и динамическую информацию. Структурные характеристики могут быть получены в широком диапазоне размеров – от одного ангстрема до сотен и тысяч ангстрем. Спектр исследуемых объектов чрезвычайно широк: небольшие молекулы (вода, биоактивные молекулы, пептиды и т.д.), биополимеры (белки, РНК, ДНК), агрегаты (мицеллы, модельные и биологические мембраны), мультикомпонентные комплексы (мульти-субъединичные белки, мембраны, модельные и биологические, фибриллы, белок-ДНК-РНК, хроматин, липопротеиды), клеточные органеллы, одноклеточные организмы (бактерии, вирусы), ткани и даже многоклеточные организмы (например, растения) (рисунок 1.1).

Динамические свойства биологических систем могут быть исследованы в широких временных и пространственных диапазонах – от пикосекунд до микросекунды в масштабах от 1 Å до сотен ангстрем, а получаемая пространственная информация о структуре живых систем может быть соотнесена с их динамическим поведением. Нейтроны позволяют получать информацию об автокорреляционных колебаниях атомов водорода, связывании субстрата с каталитическим центром фермента, конформационной подвижности субъединиц в белковых и других макромолекулярных комплексах, диффузии и вращении липидных молекул в мембранах, формировании рафтов в мембранах, ондуляционных колебаниях в мембране,

процессе сворачивания белков, динамике гидратной оболочки макромолекул и всего объема воды в клетках. При этом, как и в структурных исследованиях, можно применять избирательное дейтерирование для выделения сигнала отдельных компонент исследуемого объекта.

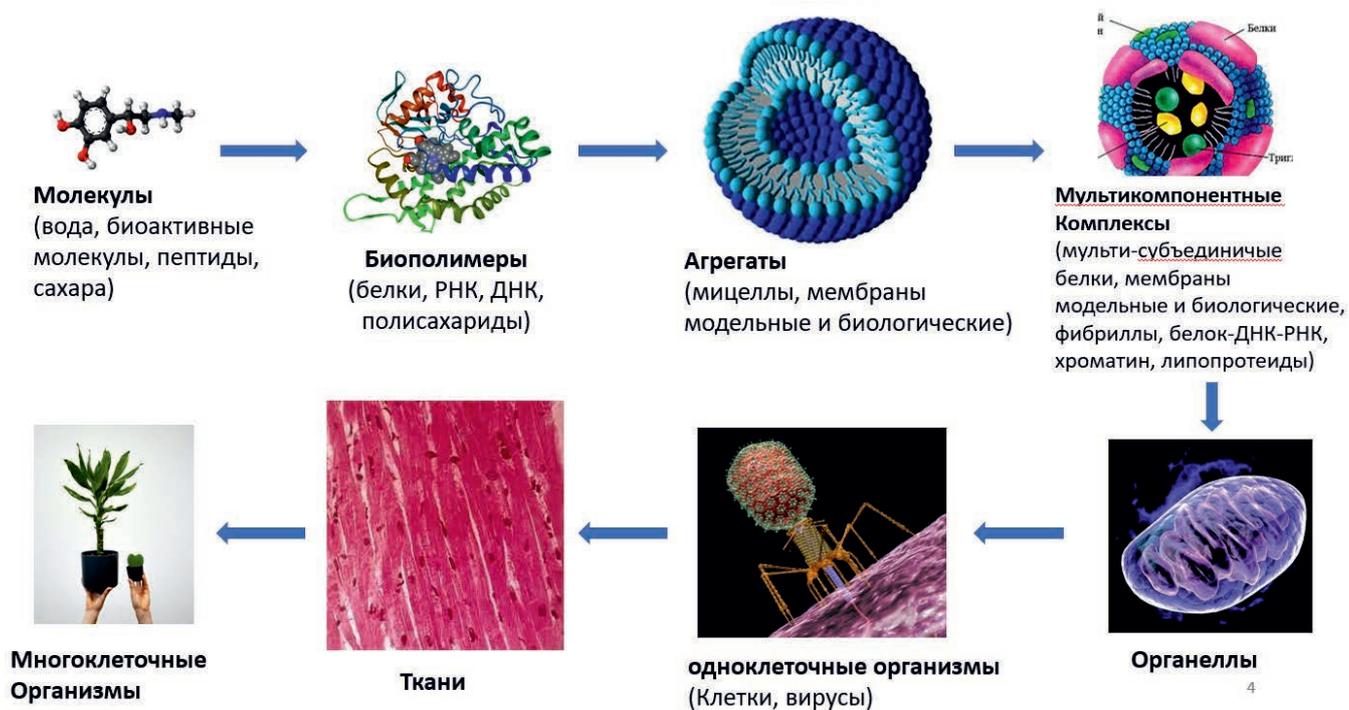


Рис. 1.1. Разнообразие биологических объектов, исследуемых нейтронными методами.

Значительно повысить чувствительность метода рассеяния нейтронов возможно с использованием техники поляризованных нейтронов. Длина рассеяния нейтрона зависит от спинового состояния ядра, на котором рассеивается нейтрон и самого нейтрона. Это свойство можно использовать при изучении биологических макромолекул. Когда поляризованный пучок нейтронов рассеивается на поляризованном водородосодержащем образце, высокое некогерентное сечение рассеяния водорода резко уменьшается, в то время как когерентный сигнал значительно увеличивается. Поляризовать биологические макромолекулы нетривиальная задача. Однако для белковых кристаллов это осуществить намного проще, поскольку белковые кристаллы обычно довольно малы и требуют небольших и простых в эксплуатации поляризационных устройств. Это дает возможность изучать отдельные атомы в составе белка [Zhao et al., 2013; Stuhmann, 2023].

Помимо этого, стоит отметить, что методы рассеяния нейтронов являются неразрушающими и глубоко проникающими. Таким образом, они позволяют исследовать действительно живые системы в процессе их функционирования и в условиях, приближенных к нативным. Высокая проникающая способность нейтронов позволяет использовать и создавать широкий спектр устройств окружения образца, регулирующих внешние условия (например, давление, влажность, магнитное поле и т.д.).

## 1.1. ЗДОРОВЬЕ И ДОЛГОЛЕТИЕ

Благодаря своей способности получать точную информацию о положении атомов водорода и геометрии водородных связей, нейтроны находят широкое применение в определении структуры и динамики систем, богатых водородом. Это в первую очередь живые системы, их сложная структура и механизмы функционирования. Нарушения, происходящие в клетках на биомолекулярном уровне (функционирование белков, нуклеиновых кислот, мембран и т.д.), приводят к развитию заболеваний и иногда даже гибели организма. Изучение биомолекул и их взаимодействия способствует не только фундаментальному пониманию функционирования живых систем, но и повышению эффективности выявления заболеваний, их лечения и профилактики, а также разработке и применению новых лекарств.



Большинство болезней связано с функционированием белков, которые являются мишенями основной доли применяемых в настоящее время лекарств. Это связано с тем, что белки выполняют множество функций в организме, в том числе регуляторных и ферментативных. Особый класс образуют мембранные белки. В растворе они могут существовать только в присутствии стабилизирующих детергентов, липидов, полимеров (рисунок 1.2) [Yeh et al., 2020].

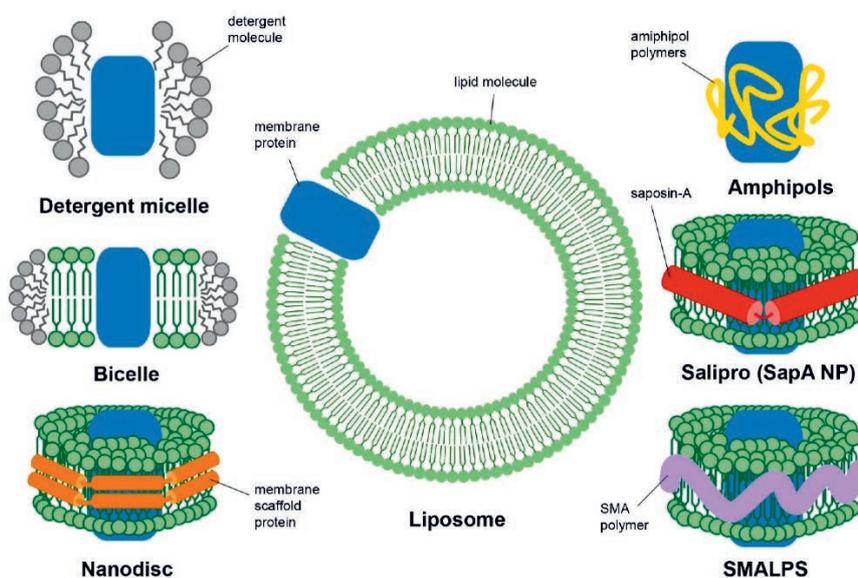


Рис. 1.2. Системы стабилизации мембранных белков. [Yeh et al., 2020]

Для исследования мембранных белков в растворе чаще всего используют методы малоуглового рассеяния и рефлектометрии. Система белок-липид или белок-детергент является неоднородной. В кривой рассеяния помимо сигнала от интересующего белка также содержится сигнал от детергентной «шубы». От этого сигнала необходимо избавиться, так как он мешает восстановлению трёхмерной модели белка. Здесь нейтроны незаменимы, поскольку позволяют «затенить шубу» при варьировании контраста. Для этого изменяется соотношение легкой и тяжелой воды в растворе, проводится избирательное дейтерирование липидов, детергентов, полимеров [Maric et al., 2014; Naing et al., 2018; Midtgaard., 2018], а также

дейтерирование самого целевого белка или отдельных его областей [Haertlein et al, 2016]. При этом можно восстанавливать не только трехмерную форму мембранного белка, но и наблюдать конформационные изменения в нем в присутствии активных молекул, так как исследуемый объект находится в растворе, приближенном к физиологическим условиям [Josts et al., 2018].

Техника вариации контраста успешно применяется также на более сложных живых системах: митохондриях [Murugova et al., 2011], внешних сегментах фоторецепторных мембран [Feldman et al., 2019], тилакоидных мембранах [Nagy et al., 2011; Liberton et al., 2013] и даже живых бактериях [Liberton et al., 2013]. При этом можно проводить дейтерирование исследуемых систем на этапе их синтеза или роста, применяя методы генной инженерии.

Среди наиболее распространенных заболеваний можно выделить сердечно-сосудистые, рак, ожирение, диабет, нейродегенеративные заболевания, ВИЧ-инфекция, амилоидозы. Ряд нейтронных методов, таких как малоугловое рассеяние нейтронов, рефлектометрия, нейтронная дифракция, успешно применяются для понимания молекулярных механизмов развития этих и других заболеваний: исследуется кинетика формирования фибрилл [Eves et al., 2021], генетически-обусловленные изменения в белках, участвующих в амилоидозе [Yee et al., 2019], взаимодействие амилоидных пептидов с липидной мембраной [Ivankov et al., 2021; Martel et al., 2017], взаимодействие капсидных белков с РНК и мембраной при формировании вирусных частиц (рисунок 1.3) [Datta et al., 2011] и т.д.

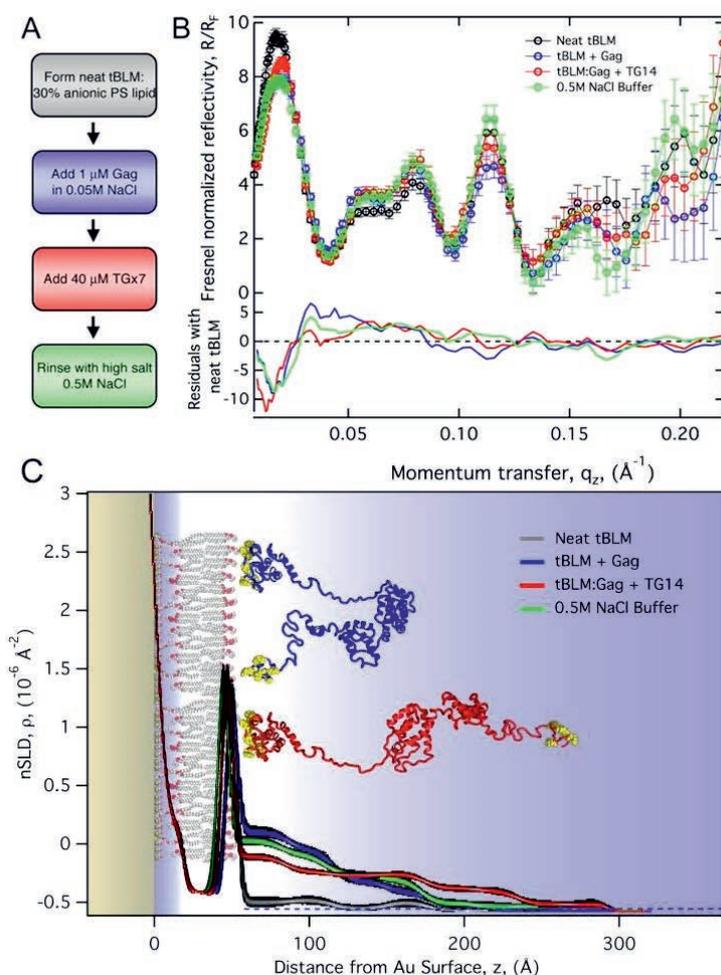


Рис. 1.3. Применение метода нейтронной рефлектометрии для исследования конформации капсидного белка Gag мембраной (tBLM) и ДНК (TG) [Datta et al., 2011].

Методы нейтронной спектроскопии (неупругое, квазиупругое и некогерентное рассеяние) применяются для исследований динамических свойств систем в норме и их изменение при патологиях. Эти методики помогают увидеть, каким образом генетические мутации приводят к патологическому повышению подвижности определенных участков функциональных белков [Takahashi et al., 2011; Matsuo et al., 2013]; как изменяются динамические свойства липопротеидов при атеросклерозе [Peters et al., 2017; Cisse et al., 2021], как подвижность боковых групп пептидов влияет на формирование амилоидных фибрилл и их токсичность [Bousset et al., 2014; Schirò et al., 2012; Tatsuhiro et al., 2022]; как динамика воды в клетке зависит от типа рака и от присутствия противораковых агентов [Martins et al., 2019].

## 1.2. МЕДИЦИНА И ФАРМАКОЛОГИЯ

### 1.2.1. Создание новых лекарств

Одной из главных проблем медицины является борьба с патогенными организмами (бактерии, грибки, вирусы и т.д.). Широкое использование антибиотиков привело к появлению устойчивых к ним видов бактерий. Поэтому сейчас человечество ищет альтернативные антимикробные средства. Среди таких средств можно выделить, антимикробные пептиды, синтетические полимеры, плюроники, бактериофаги, наночастицы на основе металлов, комплексы полимеров и антибиотиков и т.д. Также ведутся разработки композитных материалов с биоцидными свойствами, которые могут быть использованы при изготовлении медицинского оборудования и инструментария, протезов, защитной спецодежды, систем фильтрации воздуха и воды, что очень актуально для медицинских учреждений. Для изучения структурных и динамических свойств данных материалов как на этапе их создания, так и при исследовании их реакции на определенные внешние условия широко применяются нейтронные методы исследований [Barbinta-Patrascu et al., 2021]. Также изучаются взаимодействие антимикробных средств с биологической мембраной (например, разрушение или формирование пор) [Ivanov, et al., 2021] и ферментами патогена, участвующими в его размножении. Так как исследуемые системы часто являются комплексными, то широко применяется методика вариации контраста.



Еще одним методом борьбы с патогенами (особенно вирусными заболеваниями) является вакцинация. Структурные характеристики новых создаваемых вакцин, организация компонент внутри и их динамические свойства, а также взаимодействие компонент с биологическими системами исследуются широким набором нейтронных методик — от малоуглового рассеяния до спин-эхо метода [Davies et al., 2021; Santamaria et al., 2022; Mamontov et al., 2021; Krueger et al., 2021].

Основной мишенью создаваемых в настоящее время лекарств являются белки. Первая группа таких лекарств направлена на улучшение и компенсацию функций человеческих белков, который по какой-то причине работают некорректно. Вторая группа лекарств воздействует на функционально значимые белки патогенных микроорганизмов и блокирует их работу. Для рационального дизайна лекарств необходима информация о строении белков на атомарном уровне. Основным инструментом для решения этой задачи на настоящий момент

является рентгеновская кристаллография. Однако, в случае рентгена очень сложно определить локализацию атомов водорода в молекуле белка, так как этот элемент обладает малым количеством электронов, с которыми взаимодействует рентген.

Водород занимает центральную роль в химии ферментов: он влияет на локальное электростатическое взаимодействие и формирование водородных связей, тем самым регулирует взаимодействие фермента с лигандом и субстратом (т.е. потенциальными лекарствами) и скорость химических реакций. Определение позиций атомов водорода в белке, гидратации белка и типа молекул воды в его окружении позволяет расшифровать механизм работы фермента и регулировать его: перенос протонов; участие молекул воды в их переносе; участие водорода и воды в положении лиганда в активном центре фермента; процесс протонирования химических групп; промежуточное состояние лиганда в процессе работы фермента. Трудности, возникающие при нахождении позиций водорода в молекуле белка, решаются с помощью нейтронной кристаллографии. Необходимо отметить, что задача по расшифровке структуры белка и связанных с ним лигандов решается при комбинировании нейтронной и рентгеновской дифракции с методами молекулярной динамики [Ashkar et al., 2018].

Помимо обнаружения и локализации водорода в белке, нейтроны незаменимы в случаях, когда необходимо приблизить температуру окружения исследуемого образца к физиологической. В случае рентгеновской дифракции кристалл необходимо держать при температурах жидкого азота, чтобы избежать разрушения белка под действием рентгена. Такая заморозка может влиять на динамику белка, его лиганда и их взаимодействие. Нейтроны же позволяют проводить эксперимент при комнатных температурах и избегать температурозависимых артефактов в структурной информации (рисунок. 1.4) [Kovalevsky et al., 2018].

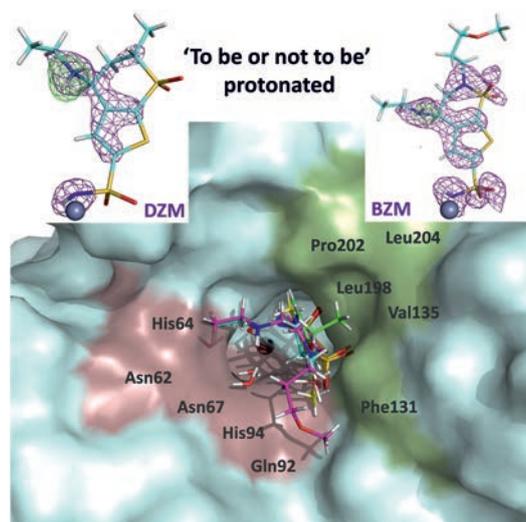


Рис. 1.4. Связывание лекарственных средств с ферментом карбоновая ангидраза человека. Результат получен с помощью нейтронной дифракции [Kovalevsky et al., 2018].

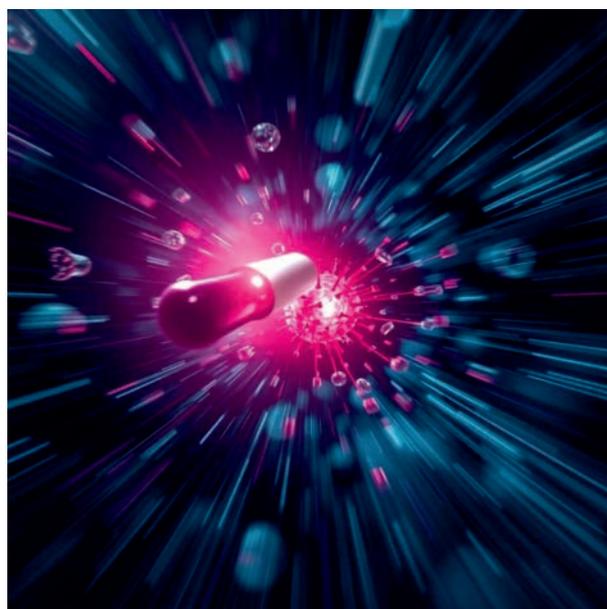
Значительную роль методов рассеяния нейтронов в фармацевтической индустрии при разработке новых лекарств иллюстрируют примеры использования нейтронной рефлектометрии, нейтронного спин-эхо и/или малоуглового рассеяния, которые широко применяются при исследовании структуры, динамики, физико-химической стабильности, функциональных свойств моноклональных антител [Wang et al., 2022b], ряд которых уже получил терапевтические одобрения для лечения различных онкологических заболеваний, мигрени, аллергических реакций [Yearley et al., 2013].

Как уже отмечалось, уникальная чувствительность рассеяния тепловых нейтронов к лёгким атомам, и особенно водороду, используется для определения их положения в структуре лекарственных средств и изучения их динамики. Например, в работе [Kovalevsky et al., 2020] методом дифракции нейтронов были исследованы комплексы ВИЧ-1 протеазы, играющей важнейшую роль в репликации вируса ВИЧ, и клинических лекарств от ВИЧ: ампренавира и дарунавира, определены изменения в положении атомов водорода и состояния протонирования при вариациях pH. Было показано, что положения атомов водорода в каталитической позиции энзима могут быть изменены вследствие мутаций, устойчивых к лекарственным средствам или протонирования поверхностных остатков, что запускает реакции переноса протона между каталитическими остатками аспартата и гидроксильной группой дарунавира. Конфигурация водородных связей в комплексах свидетельствует, что ампренавир и дарунавир слабее связаны с ВИЧ-1 протеазой, чем можно было полагать на основании результатов рентгеновской дифракции.

Востребованность подобных видов исследований ставит конкретные запросы по параметрам установок на выведенных пучках нового источника нейтронов в ЛНФ. Поскольку максимально достижимые размеры кристаллов биологических молекул, как правило, невелики (десятые-сотые доли мм<sup>3</sup>), для проведения исследований направленных на установление биохимических механизмов функционирования лекарственных средств и разработку новых лекарств крайне необходим источник нейтронов с высоким потоком на установках на выведенных пучках.

### 1.2.2. Адресная доставка лекарств

При традиционных методах доставки лекарств (перорально, инъекционно) действующее вещество попадает в системный кровоток и распространяется по всему телу. В большинстве случаев только небольшая часть введенного вещества достигает своей цели. В таком случае требуется повышение концентрации вводимого препарата. При этом лекарство может стать токсичным для других органов. Особенно это важно при терапии рака, когда используются препараты, убивающие не только раковые, но и здоровые клетки. Поэтому в настоящее время активно ведутся работы по разработке адресной доставки лекарств. Переносчики лекарств должны обладать следующими свойствами: биосовместимость; устойчивость при транспортировке к месту назначения; способность к транспорту и распознаванию; контролируемое высвобождение лекарства. Все описанные свойства транспортных систем могут быть исследованы с помощью нейтронографии. Основными методиками здесь являются малоугловое и неупругое рассеяние нейтронов.



На данный момент, в основном, ведутся разработки таких переносчиков, как липосомы, полиплексы, наночастицы металлов, микрогели, мицеллы, графен, фуллерены, плюроники и т.д. Нейтронное рассеяние может участвовать в изучении этих объектов как на этапе их синтеза [Draper et al., 2020; Shugare et al., 2020], так и на этапе мониторинга структурных и динамических свойств этих систем при различных внешних условиях (температура, значение pH, концентрация регуляторных молекул, ультразвук, магнитное поле, свет и т.д.) [Suner et al.,

2018]. Очевидно, что по объективным причинам, проведение исследований переносчиков лекарств не потеряет своей актуальности и в будущем.

### 1.2.3. Протезирование и импланты

Вследствие перенесенных заболеваний, несчастных случаев, а также возрастных изменений человек может лишиться какой-либо части тела, органа, ткани. Современная наука одной из своих целей ставит повышение качества жизни людей, попавших в такие ситуации. Для этого ведутся разработки, позволяющие заменить и восстановить поврежденные или потерянные ткани и органы с помощью протезов и имплантов. Для достижения результата, нейтронные методы помогают исследовать структурные и механические свойства материалов, разрабатываемых для создания имплантов [Cobo et al., 2015; Ahmed et al., 2011; Törnquist et al., 2021].

В основном в качестве таких материалов используются сплавы металлов, керамические соединения, углеродные материалы (нанотрубки, фуллерены, графен) и полимеры, а также композитные материалы. Импланты должны быть биосовместимы, биоинертны, устойчивы к коррозии и, в определенных случаях, биоразлагаемы. Биоразлагаемые материалы необходимы там, где импланты выполняют временную функцию: костные крепежи, устройства доставки лекарств, полимерные каркасы-матрицы для восстановления живых тканей, шовные материалы, мониторы жизненных показателей организма (температура, давление, концентрация кислорода и глюкозы и т.д.). Проведение исследований с помощью нейтронов помогают понять поведение подобных материалов при различных внешних условиях (например, под воздействием среды живого организма). Благодаря нейтроннографическим исследованиям [Ahmed et al., 2011] было установлено, что, хотя термическая обработка покрытия приводит к снижению остаточных сжимающих напряжений в импланте вблизи интерфейса и повышает степень кристалличности покрытия, дальнейшее выдерживание в модельных телесных жидкостях вновь повышает уровень остаточных напряжений.

Также нейтроны помогают наблюдать процессы старения имплантов и их сращивание с живыми тканями [Berts et al., 2014]. Хорошо этот процесс визуализируется нейтронной томографией [Isaksson et al., 2017] (рисунок 1.5).

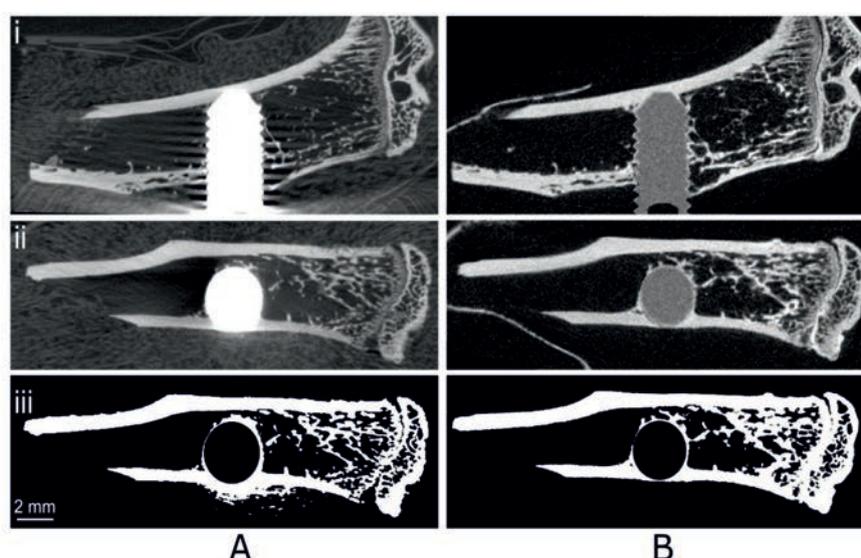


Рис. 1.5. Нарастание костной ткани на металлический имплант. Сравнение результатов рентгеновской и нейтронной томографии [Isaksson et al., 2017].

В определенных ситуациях, зависящих от исследуемого образца, нейтроны имеют лучший контраст по сравнению с рентгеном, лучшую детальность и отсутствие артефактов на изображении (например, для металлических деталей) [Isaksson et al. 2017; Metzke et al. 2011]. Кроме того, нейтроны обладают высокой проникающей способностью и позволяют исследовать образцы с большой толщиной.

### 1.3. ОКРУЖАЮЩАЯ СРЕДА, ПРОДУКТЫ ПИТАНИЯ И ПРОБЛЕМЫ ЭКОЛОГИИ

В результате хозяйственной деятельности человека происходит изменение окружающей среды, зачастую в худшую сторону: загрязнение атмосферы, вод, почвы; изменение климата; исчезновение некоторых видов животных и растений; истощение природных ресурсов. Перед человечеством стоит задача остановить загрязнение и избавиться от существующего. Использование нейтронных методов в изучении окружающей среды играет важную роль. В частности, нейтронный активационный анализ используется для мониторинга загрязнений тяжелыми металлами почв, воздуха и морепродуктов [Frontasyeva et al., 2020; Nekhoroshkov, et al. 2021] (рисунок 1.6). Также нейтронные методы исследования вещества помогают в разработках технологий по очистке сточных вод и водоемов [Zinicovscaia et al., 2020; Hellsing et al., 2014].

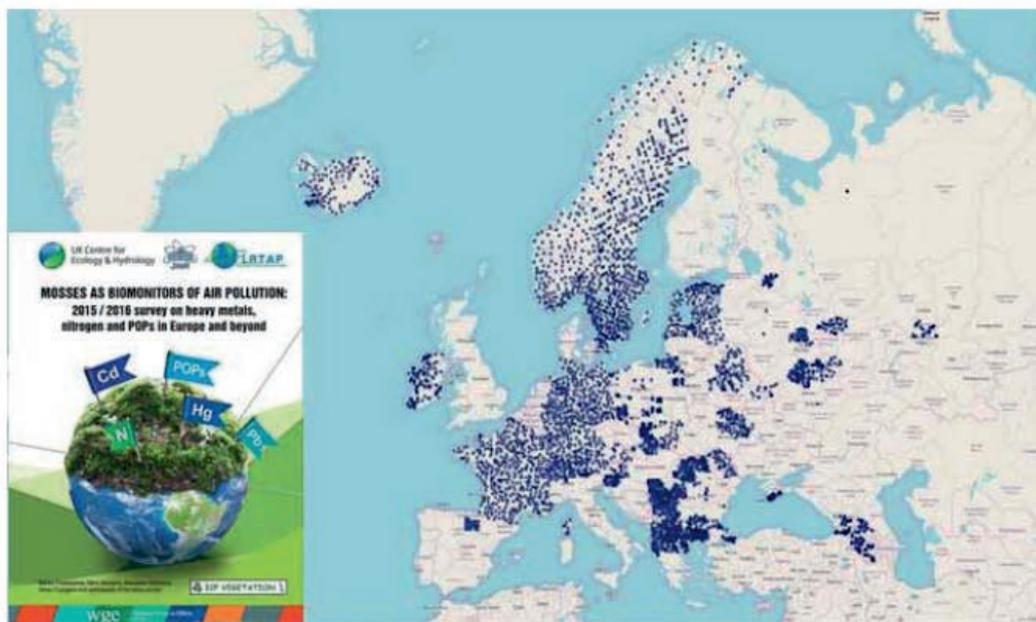


Рис. 1.6. Карта пробоотбора мхов-биомониторов для мониторинга загрязнения тяжелыми металлами. Исследования с помощью нейтронного активационного анализа [Frontasyeva et al., 2020].

Нейтронно-активационный анализ уже длительное время успешно проводится на реакторе ИБР-2. С помощью этой методики элементного и изотопного анализа можно определять более 70 элементов с точностью на уровне ppm ( $10^{-6}$  г/г) [Назаров, 1985]. Достоинствами метода являются высокая чувствительность и сравнительная простота реализации при наличии исследовательского реактора.

На фундаментальном уровне с помощью нейтронов можно исследовать влияние атмосферных загрязнений на климат, производство экологически чистых продуктов питания [Jones, 2017; Thompson, 2013]. Во избежание роста загрязнений необходимо разрабатывать

новые эффективные и более безопасные технологии применения удобрений и сельскохозяйственных ядохимикатов, а также новые активные материалы для устранения последствий техногенных аварий. Для решения этих задач нейтронные методы (малоугловое рассеяние, дифракция, неупругое и квазиупругое рассеяние, рефлектометрия и др.) помогают исследовать структурные характеристики таких материалов и их поведение в определенных внешних условиях. Например, наблюдать процесс высвобождения пестицидов из мицеллярной оболочки при контакте исключительно с восковым покрытием листа растения [Rambou, 2018] или процесс поглощения поверхностно-активными гелями сырой нефти с поверхности воды [Owoseni, 2018].

В 21-м веке методы рассеяния нейтронов получили распространение при проведении исследований на стыке материаловедения, диетологии и технологии пищевой промышленности для совершенствования методов производства, улучшения качества и ценности пищевой продукции [Lopez-Rubio & Gilbert, 2009]. С помощью *in situ* малоуглового рассеяния нейтронов проводятся исследования динамики ферментативного расщепления крахмала, диссоциации, агрегации, разворачивания различных белков, содержащихся в молоке, в том числе, например, основного аллергена коровьего молока – бета-лактоглобулина [Teixeira, 2019; Wu et al., 2023].

Концепция стеклования является очень важной не только для физики полимеров, но и при исследованиях продуктов питания [Одарченко & Сергиенко, 2015; Witek et al., 2021]. Комплексное применение дифракции и глубоко неупругого рассеяния нейтронов, а также измерение пропускания нейтронов позволили установить температуру стеклования рисовой лапши, а также сопутствующие стеклованию изменения вторичной структуры крахмала в сухой лапше [Witek et al., 2021]. Подобные исследования крайне полезны для изучения качества и стабильности замороженной или сублимированной еды, а также новых продуктов питания и процессов с ними, с которыми нам без сомнений предстоит встречаться чаще в будущем.

Таким образом для проведения исследований на перспективном источнике нейтронов в ОИЯИ, способствующих охране окружающей среды, решению проблем экологии, пищевой промышленности, необходимо предусмотреть создание ряда установок: установка для активационного анализа, дифрактометры, спектрометр квазиупругого и неупругого рассеяния, рефлектометр, установка малоуглового рассеяния. Увеличение флюенса и потока нейтронов на выведенных пучках критически важно для подобных исследований для увеличения количества исследуемых образцов, улучшения статистической выборки данных, развития методики нейтронного элементного анализа.

## 1.4. ПРИСПОСОБЛЯЕМОСТЬ И УСТОЙЧИВОСТЬ ЖИВЫХ СИСТЕМ К СТРЕССАМ

Живые организмы в течение своей жизни встречаются с различными стрессовыми воздействиями: радиация, активные формы кислорода, изменения давления, критические температуры. Вместе с тем в природе существуют организмы (археи, бактерии, дрожжи, водоросли, рыбы), живущие в условиях высоких концентраций соли, экстремальных значения рН, высоких или низких температур и т.д. Кроме того, известно, что раковые клетки также способны адаптироваться к условиям стресса в процессе противоопухолевой терапии. Экстремофилы являются интереснейшим объектом для исследования и открывают перспективы в науке, медицине, биотехнологиях, промышленности и освоении космоса. Исследования биомолекул, выделенных из таких организмов, помогут понять механизмы, позволяющие сохранить им свою активность в самых экстремальных условиях. Например, можно создавать уникальные наноматериалы на основе адаптивных принципов организмов,

приспособленных к суровым условиям. Исследуя антифризные белки, можно разрабатывать технологии криопротекции для промышленности и медицины. Понимание механизмов устойчивости некоторых бактерий к высокой кислотности поможет в борьбе с патологическими организмами, выживающими даже в среде желудка и т.д. Эволюция динамики и особенности структуры таких живых систем и отдельных ее компонент (мембран, белков, макромолекулярных комплексов и т.д.) могут быть прослежены нейтронными методами. Например, уже в настоящее время с помощью нейтронных методов изучаются особенности динамики внутриклеточной воды и белков в клетках экстремофилов [Tehei and Zaccai, 2007; Zaccai, et al., 2022], роль осмолитов в крио- и биопротекции [Al-Ayoubi, et al., 2017; Zaccai, et al., 2016; Magazu`et al., 2012], олигомеризация сенсорных комплексов в зависимости от внешних условий [Ryzhykau, et al. 2021] (рисунок 1.7), организация клеточных белков при дегидратации и высоком давлении [Erikamp et al., 2015; Minezaki Y. et al., 1996].

Transmembrane-bound

Tripod-shaped

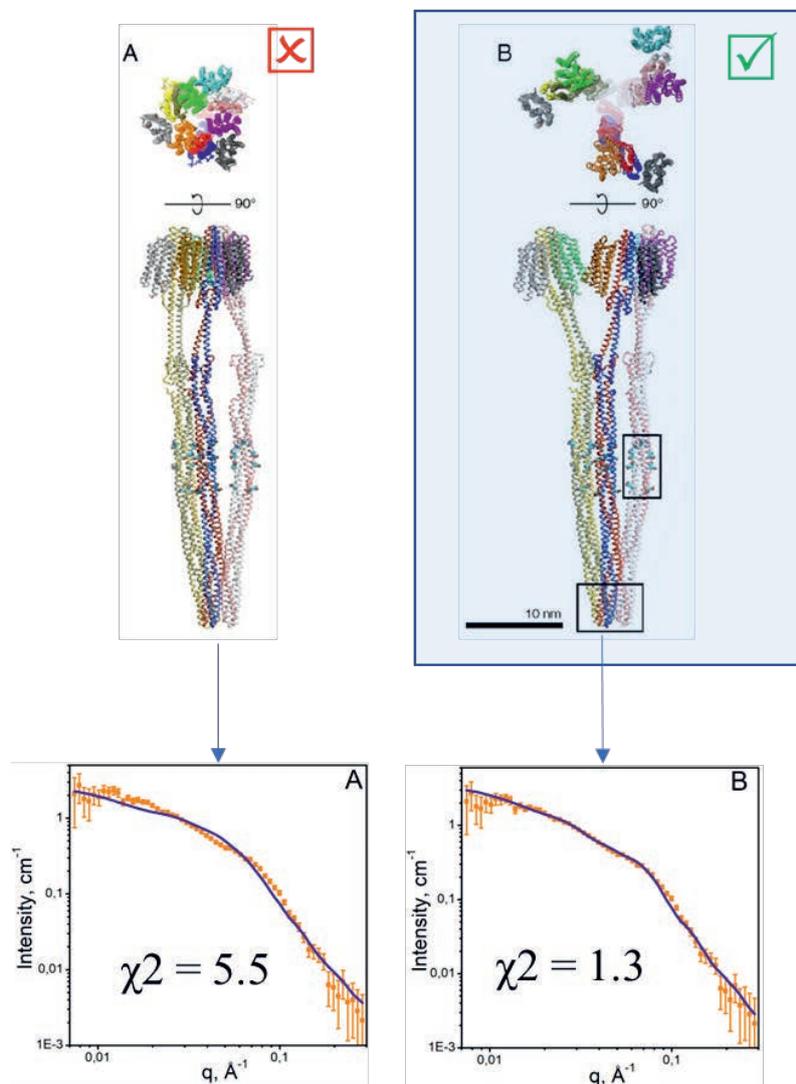


Рис.1.7. Исследование олигомерного состояния фоторецептора с помощью малоуглового рассеяния нейтронов, совмещенного с методом молекулярной динамики. Применение нейтронов позволило исследовать белковый комплекс в условиях высокой концентрации соли [Ryzhykau, et al. 2021].

Микроскопическое беспозвоночное животное тихоходка способно переживать резкие перепады температур, длительное обезвоживание, ионизирующее излучение и космический вакуум. Она обладает специфическими системами защиты и репарации. Так, например, в большом количестве в ее клетках вырабатывается специфический неупорядоченный белок Dsup (damage suppressor), связывающийся с ДНК и защищающий ее от пагубных действий радиации и активных форм кислорода. Исследование комплексообразования подобных белков с ДНК – прекрасная задача для нейтронного рассеяния, так как подобная система является неоднородной для нейтронов, и есть возможность использовать метод вариации контраста для структурных и динамических исследований как общего комплекса, так и отдельное поведение компонент в комплексе. В настоящее время интерес к неупорядоченным белкам растет. Стало понятно, что для выполнения своих функций не все белки должны иметь упорядоченную трехмерную структуру. Оказалось, что около 30% всех эукариотических белков относятся к неупорядоченным. Они выполняют важнейшие функции в клеточной регуляции и сигнализации. **Перспективный источник нейтронов с установками на выведенных пучках с высокой светосилой позволит расширить применение нейтронных методов для исследования этой и других групп важных белков поскольку такие системы имеют малые сечения рассеяния, а вариация контраста снижает интенсивность рассеяния. В тоже время проведение время-разрешенных экспериментов при изменении внешних условий требует высоких потоков падающего пучка.**

## 1.5. БИОТЕХНОЛОГИИ И БИОРОБОТЫ

Изобретенные человеком механизмы и технологии уже имеют свои аналоги в живых системах. Клетка имеет свои энергостанции, электрические сети, транспорт, химические и перерабатывающие заводы, станки и машины, системы хранения и передачи информации, электропроводящие системы и т.п. Только, в отличие от механизмов, созданных человеком, биологические имеют нано- и микро размеры. Поэтому биологические прототипы можно использовать как для создания новых, природоподобных технологий, так и использовать клеточные элементы для создания нанороботов. Это поможет решить проблемы во многих областях – от медицины и экологии до информационных технологий: контролируемая доставка лекарств, биосенсорика, микрохирургия, мониторинг токсических соединений и очистка от них окружающей среды, создание новых типов накопителей информации и обработки сигнала, преобразование разных видов энергии, создание биотоплива, оптоэлектронные и фотонные устройства и т.п. (рисунок 1.8).



Для реализации подобных технологий необходимо понимать устройство биологических систем на молекулярном уровне и их взаимодействие, а также реакцию таких систем на воздействие света, электромагнитного поля, изменения температуры, концентрации химических веществ.

Нанороботы являются биогибридными объектами. Для исследования таких систем

желательно использовать метод вариации нейтронного контраста. Кроме того, взаимодействие между компонентами в таких системах, их взаимное движение, ориентация и колебательные движения могут быть в широком диапазоне амплитуд и времен исследованы с помощью нейтронной спектроскопии. В области структурных характеристик нейтронные методы могут применяться в изучении процессов сборки наноробота, синтеза отдельных его составляющих, изучении систем токсичных элементов покрытых активным биосовместимым материалом, отслеживании структурных/динамических преобразований в системе после направленной ее модификации или изменений во внешних условиях [Toolan, 2022; Rakovich, 2010; Peters, 2016].

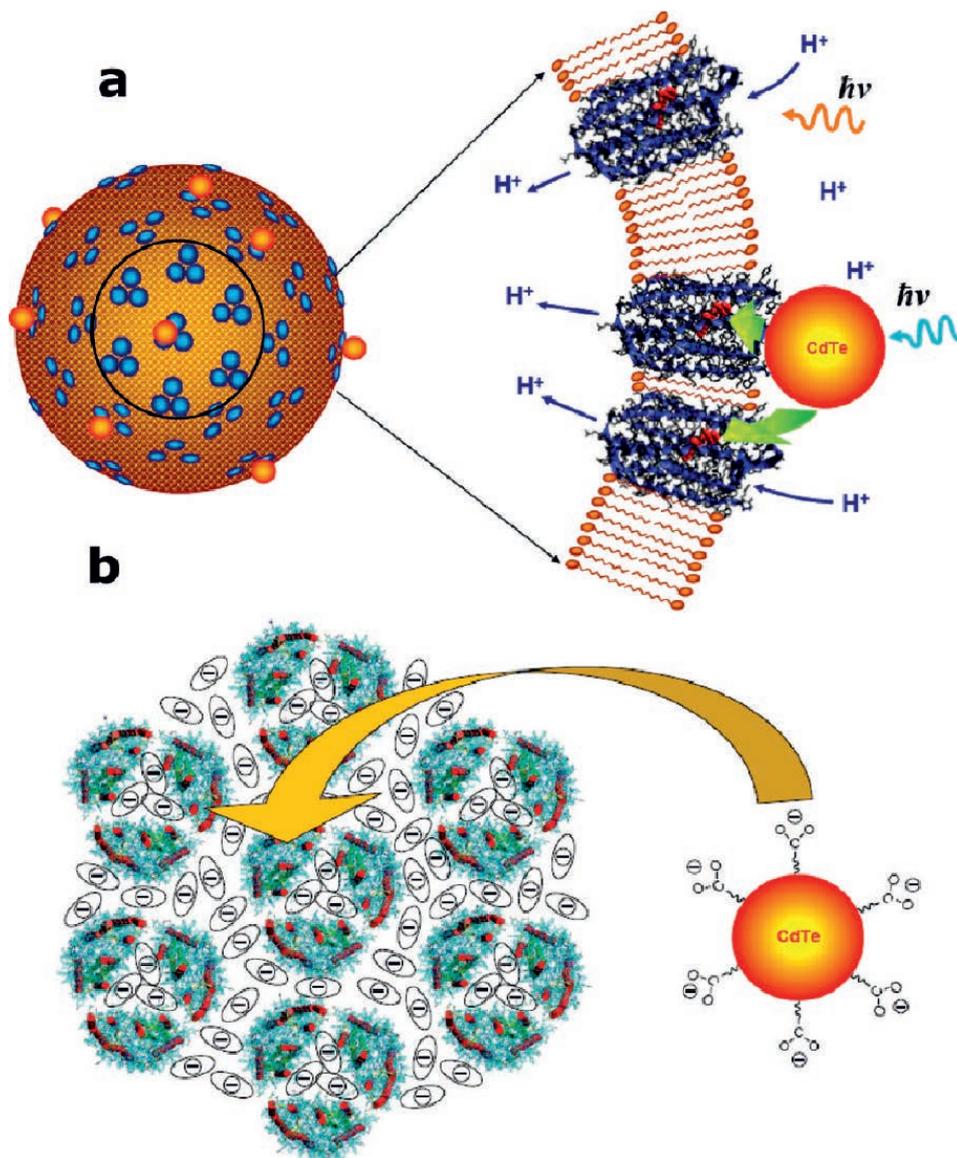


Рис. 1.8. Наноразмерный конвертер солнечной энергии, собранный на основе бактериальной пурпурной мембраны и квантовых точек [Rakovich, et al., 2010]

В настоящее время уже внедряются в жизнь технологии выращивания органов на чипе, применяемые для тестирования фармацевтических и химических соединений и биоматериала [Leung, 2022], а также эпидермальной электроники, позволяющей мониторить жизненные показатели и, в зависимости от их значения, вводить необходимые препараты (например, пластыри с инсулином) [Kim, 2011]. Компонентами таких систем являются материалы, которые

активно исследуются нейтронными методами, например, широко известные гидрогели и другие полимеры.

## 1.6. РАДИОБИОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИСТОЧНИКОВ НЕЙТРОНОВ

### 1.6.1. Исследования относительной биологической эффективности смешанных радиационных полей нейтронных источников

В большинстве фундаментальных радиобиологических исследований по проблеме относительной биологической эффективности (ОБЭ) ионизирующих излучений хорошо изучены моноэнергетические пучки частиц. В практически же важных случаях техногенных и природных источников нейтронов, как правило, присутствует непрерывный энергетический спектр, включающий в себя и гамма-кванты. Решение проблемы ОБЭ смешанных радиационных полей, во-первых, должно опираться на развитие расчетных и экспериментальных методов дозиметрии, позволяющих с максимальной точностью определять керму и поглощенную дозу непосредственно в биологических объектах, а во-вторых — на оценку биологических эффектов с применением современных методов молекулярной радиобиологии, радиационной генетики и радиационной физиологии. Организация подобного рода исследований должна предусматривать возможность манипуляции спектром излучений (изотопные источники, нейтронные генераторы, выведенные пучки с реактора), а также размещение биологических объектов — клеточных культур и мелких лабораторных животных в специальных контейнерах и фиксаторах. При этом необходимо соблюдение мер радиационной безопасности (в частности, отсутствие активации контейнеров) и необходимых санитарных норм в помещении (чистота, температура, влажность и др.).



### 1.6.2. Исследования механизмов действия радиопротекторов на лабораторных животных

Распространенность техногенных источников нейтронов ставит вопрос о мерах защиты, в частности, поиска перспективных радиопротекторов. Тестирование механизмов и эффективности действия радиозащитных препаратов, разрабатываемых в специализированных институтах стран-участниц, может быть организовано на выведенных пучках реактора. При этом необходимо проведение тотального облучения тела мелких лабораторных животных (мыши, крысы), что требует достаточной ширины и равномерности пучка. Облученные животные в дальнейшем поступают в виварий ЛРБ, где проводятся исследования нарушений поведенческих реакций облученных животных с использованием специализированных тест-систем и патоморфологических изменений в различных критических органах и системах грызунов с использованием современных гистологических и иммуногистохимических методов.

### 1.6.3. Радиобиологические аспекты нейтрон-захватной терапии рака

Одним из перспективных методов лечения злокачественных опухолей является нейтрон-захватная терапия. Данный вид терапии основан на использовании фармацевтических препаратов для доставки соединений определенных стабильных изотопов в опухолевые клетки и последующего облучения эпителиальными нейтронами. Высокая биологическая эффективность при селективном накоплении изотопа в клетке определяется короткопробежными продуктами нейтронзахватной реакции, которыми в зависимости от изотопа могут быть конверсионные и Ожэ-электроны (гадолий-157) или альфа-частицы (бор-10 и литий-6). Радиобиологические исследования в данной области направлены на поиск биологических механизмов избирательного накопления указанных изотопов в опухолевых клетках и иных путей обеспечения максимальной биологической эффективности продуктов нейтрон-захватных реакций. Организация радиобиологических исследований на клеточных культурах и мелких лабораторных животных требует вывода интенсивного пучка эпителиальных нейтронов с минимальной примесью гамма-излучения с реактора или нейтрон-производящей мишени ускорителя. Важнейшей задачей является также разработка методов дозиметрии и визуализации накопления изотоп-содержащих препаратов.

### 1.6.4. Структурные исследования биологических образцов

Методы структурного исследования биологических образцов, имеющиеся в инфраструктуре ЛНФ, в особенности, малоугловое рентгеновское и нейтронное рассеяние, могут быть эффективно применены для анализа радиационно-индуцированных эффектов в живых системах. В частности, исследования конформационных изменений трансмембранных белков и повреждений клеточных органелл в структурах центральной нервной системы могут пролить свет на механизмы радиационно-индуцированных нейродегенеративных процессов, что весьма актуально при изучении побочных эффектов лучевой терапии, оценке радиационных рисков космических видов излучений, а также исследований механизмов развития заболеваний мозга. Исследования механизмов транспорта в опухолевые клетки определенных классов молекулярных комплексов для адресной доставки радиосенсибилизаторов, контрастных агентов для томографии и препаратов, используемых в тераностике, весьма актуальны для развития медицинской радиобиологии и ядерной медицины.

### 1.6.5. Астробиологические исследования

Исследования в области астробиологии направлены, в первую очередь, на изучение механизмов синтеза пребиотических соединений при облучении адронными пучками простых органических молекул, в частности, формамида, в присутствии вещества метеоритов или пород планетных систем. Пионерские исследования в этом направлении с использованием пучков протонов выявили присутствие в реакционной смеси разнообразных пребиотических соединений: аминокислот, карбоновых кислот, сахаров, нуклеиновых оснований и даже нуклеозидов. Механизмы такого радиационного катализа изучены недостаточно детально. При этом возникает закономерный вопрос, возможен ли подобный синтез при облучении образцов пучками нейтронов.



Комплементарные астробиологические исследования элементного и структурного состава космического вещества, проводимые с целью поиска следов органических соединений и остатков живых организмов могут быть выполнены на перспективном источнике нейтронов в ЛНФ с применением метода нейтронно-активационного анализа.

## 1.7. НЕЙТРОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В НАУКАХ О ЖИЗНИ И РАЗВИТИЕ НАУЧНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ



В настоящее время растет интерес к пониманию архитектуры живых систем и процессов, происходящих в них. Такое понимание поможет создавать новые биоматериалы и развивать биотехнологии, управлять биосистемами и организмами, создавать системы с заданными характеристиками, внедрять природоподобные технологии. Выделим основные объекты исследования **на перспективном источнике нейтронов в ОИЯИ**:

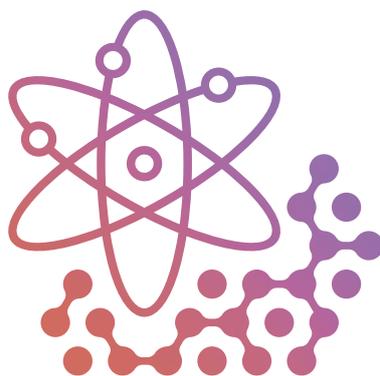
- макромолекулы (белки, ДНК, РНК, липиды);
- биологические мембраны и мембранные белки;
- неупорядоченные белки;
- сложные биоконплексы (ферментативные системы, белок липидные, белок-нуклеиновые и т.д.);
- сигнальные системы (рецепторы, фотосистемы);
- биогибридные материалы;
- полимеры;
- ткани;
- органеллы и живые клетки.

Большой потенциал применения для этих объектов имеют такие методы как малоугловое рассеяние нейтронов, дифракция для макромолекулярных кристаллов, рефлектометрия, нейтронная спектроскопия (неупругое рассеяние, неупругое спин-эхо, квазиупругое рассеяние, некогерентное рассеяние), нейтронная томография и нейтронный активационный анализ.

Следует также выделить ряд технических и организационных задач, решение которых необходимо для более полного выполнения научных исследований методами нейтронного рассеяния:

- Создание лаборатории для производства дейтерированных соединений и дейтерирования биологических объектов, кристаллизации белков.
- Создание базы для совместного использования нескольких комплементарных нейтронных методов (рентгеновское рассеяние, ядерно-магнитный резонанс, электронная и крио-электронная микроскопия, молекулярное моделирование, динамическое светорассеяние и др).
- Повышение вычислительных мощностей, которые позволят моделировать сложные мультикомпонентные системы и комплексно анализировать результаты, полученные несколькими комплементарными методами.

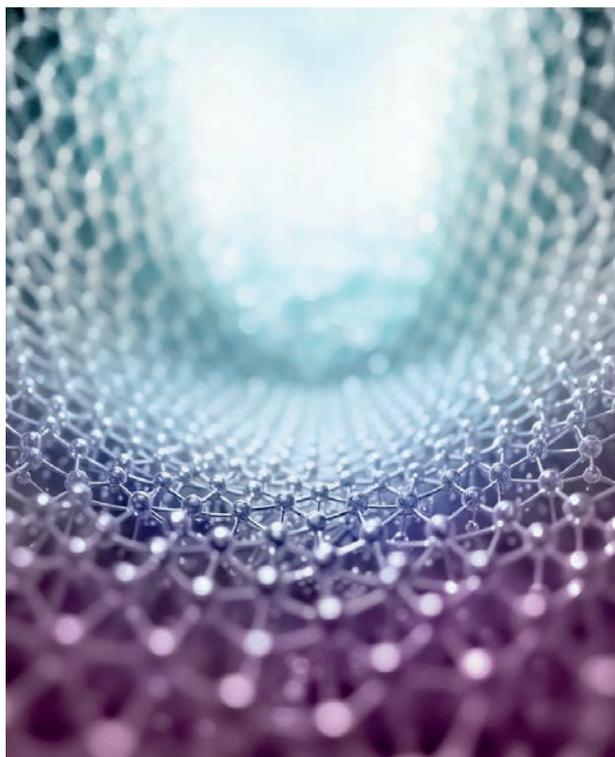
- Наука стремится к более сложным исследуемым системам и изучению механизмов непосредственно в клетке как объекте исследования, поэтому необходимо предусмотреть такую возможность на установках.
- Развивать возможности для время-разрешенных экспериментов (запуск процессов светом, сигнальными химическими молекулами, ионной силой, давлением, температурой и т.д.).



---

Наносистемы и мягкое  
конденсированное  
вещество





Под наносистемами обычно понимают системы, имеющие хотя бы в одном измерении нанометровый масштаб (1–100 нм). Они включают в себя наночастицы (НЧ), нанокompозиты и другие наноразмерные материалы. Понятие «мягкое конденсированное вещество» (soft condensed matter), с другой стороны, относится к широкому кругу материалов и систем, обладающих уникальными физическими свойствами из-за высокой степени внутреннего беспорядка. Эти системы находятся в состояниях, не относящихся к «простому» жидкому или кристаллическому состояниям, изучаемым в других областях физики твердого тела. К мягким конденсированным системам относят полимеры, коллоиды, жидкие кристаллы, гели, поверхностно-активные вещества (ПАВ) и другие. При этом, можно по-разному классифицировать все эти системы, основываясь на множестве характеристик или свойств, таких как размер, размерность, состав, функциональность и так далее. Например, по материалам, входящим в состав системы, их можно разделить на углеродные

наноматериалы, неорганические, органические наноматериалы, композитные наноматериалы. По размерности можно выделить объемные (3D) и планарные (2D) наноструктурированные материалы, одномерные наноструктурированные (1D) и нанодисперсные (0D) материалы, нанокompозиты и супрамолекулярные материалы.

Если говорить об актуальных задачах в этих системах, можно выделить направления: получение актуальных наноматериалов / мягкого вещества, применение наноматериалов (в *in situ*, *in operando* исследованиях), фундаментальные знания (физико-химические особенности наносистем, взаимодействия в ансамблях нанообъектов, необратимые процессы в наносистемах), моделирование наносистем и процессов. К тому же, практически для всех перечисленных выше систем большую актуальность имеют экологически чистые, биоразлагаемые материалы.

**Научная программа перспективного источника нейтронов в ОИЯИ в области мягких конденсированных сред и наносистем будет направлена на применение возможностей и главных преимуществ нейтронного рассеяния для изучения свойств, структуры и динамики широкого спектра материалов.** Ожидается, что новый импульсный источник нейтронов начнет работу в 2040 годах и будет оснащен набором современных инструментов, включая важные для этого направления малоугловые установки, рефлектометры и нейтронные спектрометры.

В области мягкого конденсированного вещества и наносистем большой интерес исследователей вызывают такие материалы, как полимеры, поверхностно-активные вещества, тонкие пленки, нанокompозиты и комплексные системы. Эти материалы играют важную роль во многих областях современной науки и техники, включая, химию, физику, биотехнологии, материаловедение и биомедицину. С помощью методов рассеяния нейтронов, пользователи смогут исследовать фундаментальные свойства этих материалов и систем на атомном и молекулярном уровнях, что даст новое представление об их поведении и потенциальных применениях. В этой области крайне важным является понимание как медленной динамики, так и крупномасштабных процессов в многокомпонентных системах. На

комплексе инструментов нового источника нейтронов станут возможны эксперименты с недостижимым ранее временным разрешением, что позволит на новом уровне исследовать сборку иерархических структур, динамику фазовых превращений и кинетику сильно неравновесных процессов в актуальных наносистемах. Ключевым фактором станет высокая плотность потока нейтронов на исследуемых образцах. Продолжая использовать сильные стороны нейтронов (чувствительность к легким элементам и изотопам, неразрушающее действие, хорошую проникающую способность и магнитное рассеяние), **эксперименты на новом источнике нейтронов дадут возможность эффективных исследований образцов в окружении, моделирующем реальные промышленные и природные процессы и условия.**

## 2.1. ПОЛИМЕРЫ

Полимеры представляют собой широкий класс систем и большую область для научных исследований, с разнообразными практическими применениями фактически во всех видах жизнедеятельности человека. За последние десятилетия технологии синтеза полимеров прошли большой путь, появилась возможность синтезировать сложные сополимеры, а также полимеры с низкой полидисперсностью [Lutz, 2016]. При этом по-прежнему поиск новых методов полимеризации остается серьезным вызовом для химии синтеза новых материалов [Abd-El-Aziz, 2020]. Нейтронное рассеяние играет важную роль в определении структуры и динамики сложных макромолекул и комплексных систем на основе полимеров, а также в исследованиях релаксации и поведения полимерных систем в различных экстремальных условиях. Например, методом малоуглового рассеяния нейтронов (МУРН) исследовались трехлучевые полимеры [Mortensen, 2018; Mortensen & Annaka; 2018]. Из полистирола синтезирован трехлучевой полимер с дейтерированными внешними частями цепей, что позволяет эффективно использовать преимущества нейтронного контраста. По данным МУРН на такой системе можно эффективно определять ориентацию отдельных цепей сополимера в расплаве. Здесь кроме прочего имеется интерес и фундаментального характера: полученные результаты дают возможность проверить применимость моделей статистической физики [de Gennes, 1971] к полимерным системам в экстремальных условиях. Нагретый образец сополимера растягивали, затем достаточно быстро охлаждали и последовательно следили за релаксацией. Результаты МУРН представлены на рисунке 2.1, где наблюдаются три этапа релаксации. В ходе первой стадии размываются и пропадают горизонтальные пики МУРН (то есть исчезает характерное расстояние между «ножками»). На втором этапе вертикальные пики сглаживаются и меняют форму, что говорит о том, что нарушается вытянутое расположение полимера в репационной трубке, запутываются макромолекулярные цепи, пропадают выраженные длина и ориентация. Наконец, на третьем этапе релаксации, занимающем на порядок больше времени чем предыдущие, микроструктура расплава переходит в изотропное состояние.

Сочетание методов компьютерного моделирования и экспериментов по рассеянию для прецизионного исследования структуры и динамики полимеров и полимерсодержащих систем будет играть все большую роль в новых исследованиях. В первую очередь здесь подразумевается измерение статического и динамического структурных факторов. При этом отмечается синергия двух методов [Arbe et al., 2020] — нейтронного рассеяния и молекулярно-динамического моделирования (МД), которому на микромасштабе доступен более широкий диапазон векторов  $q$  и большие диапазоны времен  $\tau$ . Так, предлагаемая в работах [Arbe et al., 2020; Colmenero et al., 2013; Genix et al., 2015] схема исследований состоит в итерациях моделирования системы, корректируемых за счет детального сравнения с данными нейтронного эксперимента. После достаточного числа итераций достигается приемлемое по

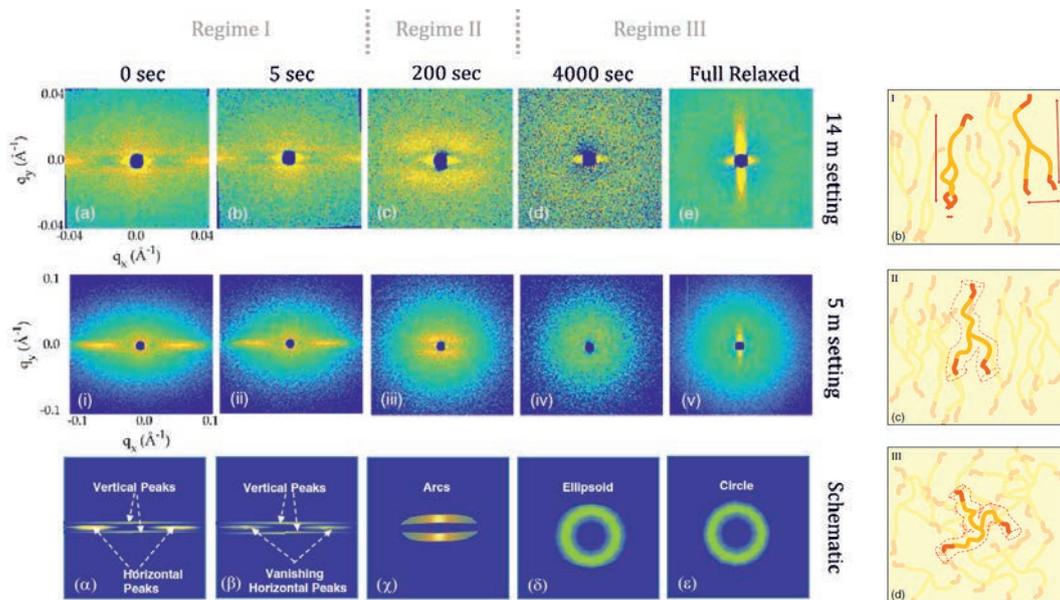


Рис. 2.1. Слева – данные МУРН для кинетики релаксации трехлучевого сополимера (полистирол). Справа – схематическое представление характерной структуры системы на разных этапах релаксации [Mortensen et al., 2018; Mortensen & Annaka; 2018].

качеству описание системы. Далее за основу берется МД моделирование и можно производить исчерпывающее исследование и описание системы. При этом вариация контраста в нейтронном эксперименте (за счет дейтерирования разных частей полимеров) позволяет выполнить более детальное сравнение с МД (и, следовательно, достаточно тонкую настройку параметров моделирования). Например, в работе [Genix et al., 2006] выполнено детальное исследование полиметилметакрилата (ПММА), при этом также выгодно использовался метод нейтронного спин-эхо (НСЭ) при разных температурах (рисунок 2.2). **Важно отметить большое значение расширения экспериментально достижимого диапазона времен  $\tau$  для НСЭ, которое будет доступно на новом источнике. Это позволит получить новую динамическую информацию на некоторых масштабах систем (рисунок 2.2).**

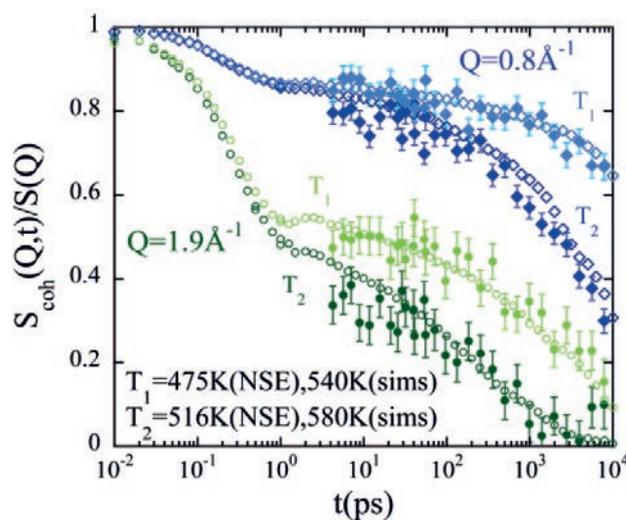


Рис. 2.2. Динамический структурный фактор ПММА при разных температурах, сравнение эксперимента с данными МД моделирования [Genix et al., 2006].

Нейтронное рассеяние в качестве дополняющего метода играет важную роль и в исследованиях стеклования полимеров. Например, в работе [Chua et al., 2017] большой объем измерений выполнен методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК), при этом метод нейтронного спин-эхо используется для отслеживания динамики полимеров в прямом пространстве. По этим измерениям видно, что даже при высоких температурах структурный фактор в основном проявляет «плато». Здесь расширение диапазона по времени (до  $\tau$ -мксек) дает дополнительную очень ценную новую информацию и является важной составляющей комплексных экспериментов. Для таких задач, как исследования стеклования полимеров, данная информация критически необходима для достижения полного понимания и описания данных физических явлений. **Таким образом, для детального исследования всего спектра возбуждений и релаксации в полимерах на новом источнике необходимо создать несколько спектрометров, дополняющих друг друга по диапазону времен, переданных энергий и импульсов.**

## 2.2. ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫЕ ВЕЩЕСТВА

Для ПАВ актуальны исследования различных образующихся из сурфактантов мицелл. В том числе характерным примером современных систем являются так называемые червеобразные мицеллы. Такие системы могут образовывать интересные структуры с рядом перспективных свойств для приложений. Особый интерес представляют, например, червеобразные мицеллы, образуемые gemini-ПАВ [Chen et al., 2017; Fan et al., 2019]. В данном случае к додецил-сульфату натрия добавлялись разные диамины. Данная система исследовалась методом МУРН в сочетании с крио-ТЭМ. Когда доля добавленных диаминов не велика, рассеяние хорошо описывается моделью раствора глобулярных мицелл. При увеличении концентрации диамина, этот симметричный форм-фактор уже не описывает данные МУРН. Наблюдается, что мицеллы вытягиваются и необходимо использовать эллипсоидальную модель. Далее, эллиптичность возрастает в десятки раз [Fan et al., 2019], что свидетельствует о формировании червеобразных мицелл из ПАВ. При этом МУРН играет ключевую роль в определении морфологии системы.

В работе [Murphy et al., 2020] исследования в том числе червеобразных мицелл дополняются данными метода rheoSANS [Eberle & Porcar, 2012]. Продемонстрировано успешное применение МУРН для исследований реологии и наноструктуры комплексных жидкостей в широком диапазоне скоростей сдвига (8 порядков) в капиллярах толщиной в сотни микрометров (рисунок 2.3). При отсутствии потока наблюдается изотропная функция рассеяния  $I(q_x, q_y)$ . При этом, когда жидкость течет по капилляру, то сигнал МУРН асимметрично расширяется в противоположном потоку направлении. Это свидетельствует о том, что имеет место обусловленная гидродинамическим потоком перестройка внутренней структуры. После превышения определенного порога скорости, мицеллы выравниваются вдоль потока, соответственно фактор анизотропии достигает 65%. Однако далее, при еще больших скоростях, этот фактор начинает снижаться. Это объясняется разрушением червеобразных мицелл при таких высоких скоростях потока. В результате образуются меньшие по размеру цилиндрические мицеллы, которые могут легче поворачиваться поперек потока [Murphy et al., 2020].

Важно отметить, что в таких *in situ* исследованиях достигаются скорости потоков сопоставимые с рядом промышленных систем, что имеет большое практическое значение. Соответственно, кроме большого фундаментального интереса, такие исследования имеют и практическую актуальность.

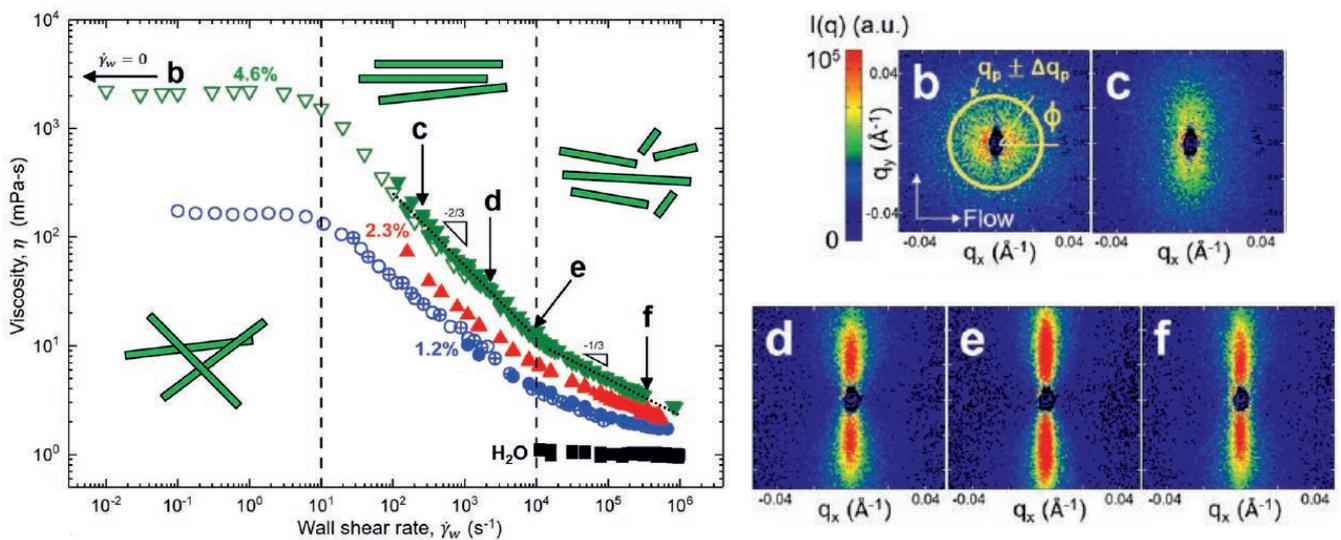


Рис. 2.3. Измерения вязкости системы при установившемся потоке для раствора червеобразных мицелл разных концентраций. Соответствующие 2D данные МУРН показаны справа для разных скоростей [Murphy et al., 2020].

### 2.3. МАГНИТНЫЕ ЖИДКОСТИ

Магнитные жидкости (феррожидкости) – высокодисперсные растворы ферро- или ферромагнитных наночастиц (размерами ~3–30 нм) известны ученым и исследуются уже более 50 лет [Vékás et al., 2007; Avdeev & Aksenov., 2011]. Отличительной особенностью от магнитореологических жидкостей является то, что в них не происходит фазового расслоения. Магнитные жидкости находят широкое применение в технических устройствах. Актуальными задачами в этой области, как и в общем для коллоидных систем, является развитие методов синтеза устойчивых магнитных жидкостей с заданными свойствами. В этих исследованиях нейтронное рассеяние, в том числе магнитное рассеяние, играет большую роль [Avdeev et al., 2011]. Так, исследования магнитных наночастиц активно ведутся методами МУРН и нейтронной рефлектометрии. Например, сравнивалась структура адсорбционных слоев на кремнии из магнитных жидкостей, стабилизированных олеиновой кислотой и полиэтиленгликолем (ПЭГ) [Garon et al., 2017], [Kubovcikova et al., 2017]. Показано, что из магнитной жидкости, стабилизированной олеиновой кислотой, наночастицы адсорбируются на поверхность кремния, что проявляется в качественном отличии кривой отражения от френелевской. Если же магнитные жидкости стабилизированы полимером, то такого поведения не наблюдается, в основном по причине образования агрегатов в объеме растворителя.

В более поздних исследованиях использовалась химическая модификация поверхности SiO<sub>x</sub>, чтобы инициировать адсорбцию наночастиц на подложку [Theis-Bröhl et al., 2020]. Методом нейтронной рефлектометрии наблюдается плотный слой наночастиц, структурой которого можно управлять с помощью магнитного поля (рисунок 2.4). Наличие адсорбированного монослоя наночастиц у поверхности приводит к тому, что при включении поля образуется вторичный слой димеров наночастиц. При этом ориентация, и, соответственно, плотность упаковки этих агрегатов сильно зависят от напряженности поля.

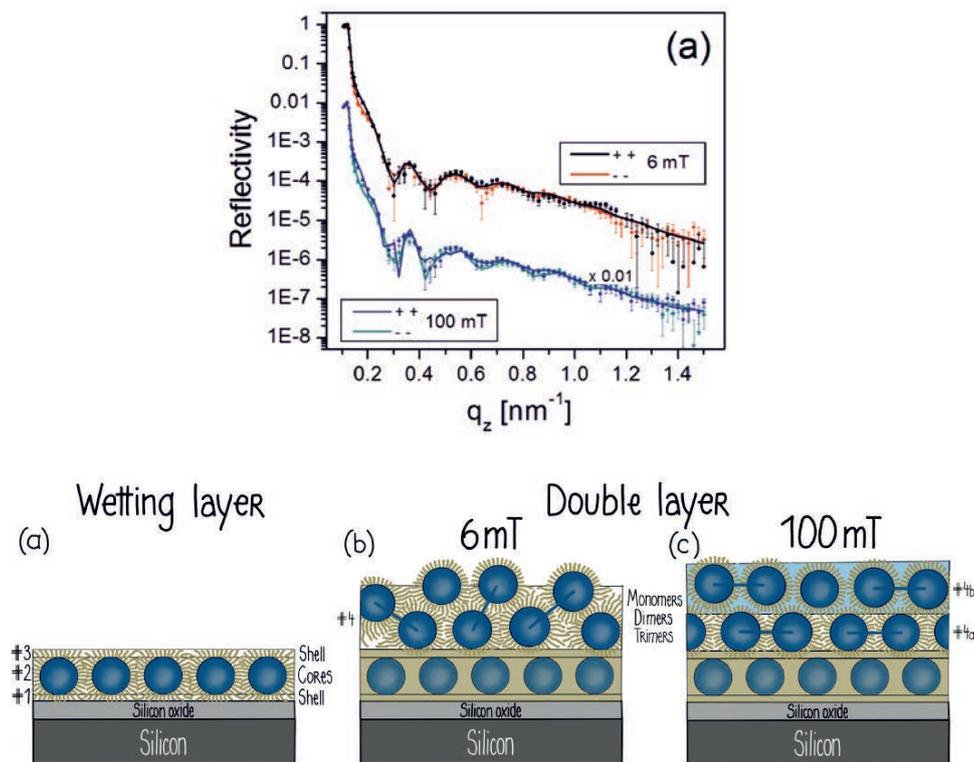


Рис. 2.4. Исследование структуры адсорбционных слоев магнитных наночастиц на обработанной поверхности кремния при включении поля [Theis-Bröhl et al., 2020].

## 2.4. КИНЕТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В КОЛЛОИДНЫХ СИСТЕМАХ

Разработка новых коллоидов и гибридных наноструктур открывает возможности для новых приложений и позволяет исследовать необычные явления, возникающие вследствие уникальной микроскопической структуры новых материалов. Большое развивающееся направление исследований в области коллоидных систем – это кинетические исследования, так называемые *time resolved* (TR) МУРН и МУРР. Данные методы имеют ряд преимуществ, например, перед флуоресцентной спектроскопией, для которой требуется модификация исследуемых молекул для нанесения меток. Одним из примеров исследований является изучение кинетики нуклеации и роста золотых и серебряных наночастиц [Polte et al., 2012; Wuithschick et al., 2015]. Модельное описание характера образования наночастиц было предложено Ламером около 70 лет назад (в свою очередь, его работы основаны на классической теории нуклеации) [LaMer & Dinegar, 1950]. С помощью TR-МУРР недавно получены интересные результаты, позволившие выявить 4 этапа роста наночастиц [Polte et al., 2012; Wuithschick et al., 2015]. Первый этап это нуклеация, в то время как второй и третий этапы включают коалесценцию, то есть слияние агрегатов. При этом в модели Ламера в явном виде коалесценция отсутствует. Отличие роста золотых наночастиц от серебряных, обнаруженное в этих работах, состоит в том, что для наночастиц Ag обнаружен метастабильный переход к отдельному этапу слияния зародышей.

Другой пример исследований из этой области, в котором уже используется рассеяние нейтронов – это исследование кинетики образования мезопористых кремниевых наночастиц. Мезопористый кремний представляет собой актуальный объект исследований, имеющий

применения, например, в доставке лекарств. В работе [Hollamby et al., 2012] синтезируются наноструктуры мезопористого кремния. Если про образование пор в объемных макросистемах известно уже достаточно много, то переход к наноразмерам может привести к новым явлениям. До нейтронных исследований рассматривались две гипотезы: первая состояла в том, что при этом переходе механизм образования сохраняется; вторая ("currant bun model" – модель «булочки с изюмом») – что образуются наноагрегаты кремния, которые встраиваются между растущими мицеллами, и частично экранируют взаимодействие поверхностно-активных веществ между собой. В рамках этой модели характерные времена всех происходящих процессов сравнимы по порядку величины, что влияет на структуру новой наночастицы. Именно эксперименты по МУРН позволили детально определить, какой механизм имеет место быть. Отметим, что это было достигнуто за счет измерений системы при трех разных контрастах (рисунок 2.5).

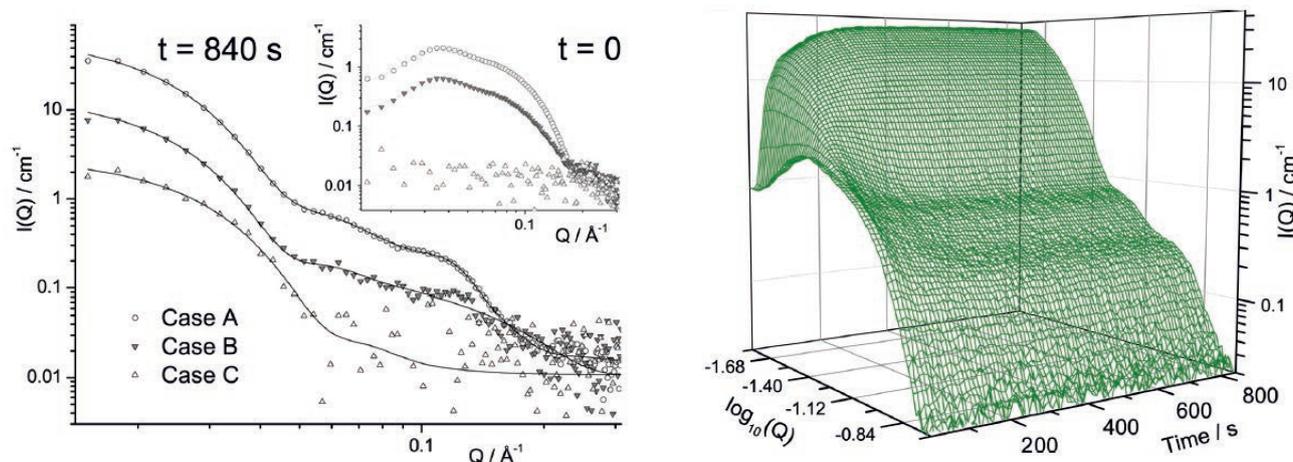


Рис. 2.5. Данные МУРН на образующихся кремниевых пористых наночастицах. Слева – три измерения с разным контрастом через 840 с после начала роста наночастиц (вставка измерения в начальный момент времени). Справа – набор измеренных кривых за 15 минут роста наночастиц [Hollamby et al., 2012].

**Эффективность измерения кинетических процессов в коллоидных растворах тем эффективнее, чем выше поток нейтронов на образце на соответствующих установках на выведенных пучках источника нейтронов.**

## 2.5. АДСОРБЦИОННЫЕ СЛОИ НА ГРАНИЦЕ ЖИДКОСТЬ–ВОЗДУХ

Исследование адсорбционных слоев биомолекул, ПАВ и полимеров на границе раздела жидкость–воздух – актуальная задача, позволяющая получить новые фундаментальные знания, а также практические приложения. Действительно, поверхностные свойства сложных смесей часто определяют характеристики косметических и медицинских препаратов, а также стабильность обычных пищевых продуктов. Важным методом исследования таких систем является нейтронная рефлектометрия с вертикальной плоскостью рассеяния (горизонтальной плоскостью расположения образца). Например, в работе [Gochev et al., 2019] исследовались адсорбционные слои β-лактоглобулина, как удобной модельной системы для исследований адсорбционных свойств белков в жидкости. Один из вопросов, который позволила решить нейтронная рефлектометрия, следующий: что происходит в изоэлектрической точке? Здесь незаменимыми оказались измерения в режиме «нулевого» контраста. На рисунке 2.6 показано

полученное представление о структуре поверхностного слоя на границе раздела вода–воздух: образованный монослой «сплюснутого» белка у поверхности, под которым расположен рыхлый слой димеров  $\beta$ -лактоглобулина, образовавшийся при достижении изоэлектрической точки.

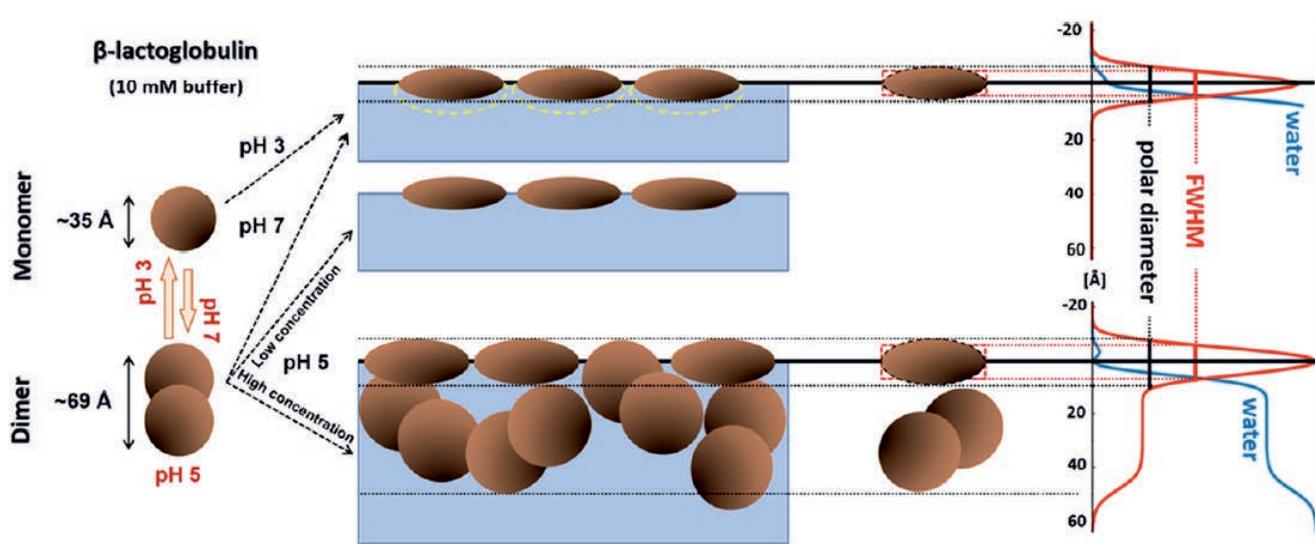


Рис. 2.6. Структура адсорбционного слоя  $\beta$ -лактоглобулина на поверхности воды и соответствующие профили ПДР системы [Gochev et al., 2019].

Другой пример – исследование взаимодействия полимера и ПАВ на границе жидкость–воздух [Slastanova et al., 2022]. Синтезирован сополимер PEG-g-PVAc, который в растворе образует структуры типа «тихоходок». В работе исследовался синергетический эффект влияния этого сополимера на структуру слоя ПАВ на поверхности воды. При одной и той же концентрации полимера варьировалась концентрация ПАВ. Измерения методом нейтронной рефлектометрии для трех разных контрастов позволили показать, что синергетический эффект проявляется лишь до определенной критической концентрации. Выше этого предела на поверхности образуется плотный монослой ПАВ, откуда полностью вытесняется полимер, что приводит к утрате его влияния на поверхностное натяжение системы.

Плотность потока нейтронов на образце в таких экспериментах играет решающую роль: высокие потоки на установках на выведенных пучках перспективного источника нейтронов дадут возможность использования зеркального отражения с разрешением, близким к атомарному. Кроме того, исследования с хорошим временным разрешением имеют решающее значение для определения того, как молекулы ПАВ самособираются в мицеллы и как такие структуры трансформируются в разные актуальные для применений объекты. Также следует ожидать, что через 20 лет обыденным признаком высокоэффективного нейтронного эксперимента по рефлектометрии станет сочетание с детальным незеркальным рассеянием и малоугловым рассеянием нейтронов в скользящей геометрии (GISANS), несущими количественную информацию о частицах от микронных до наноразмеров, их форм-факторе и распределении. Таким образом, для исследований как адсорбционных слоев, так и тонких пленок важно создание на перспективном источнике нейтронов рефлектометров высокого и среднего разрешения для прецизионной характеристики образцов и для исследования кинетики, соответственно, а также рефлектометров, специализирующихся на незеркальных модах рассеяния.

## 2.6. НАНОКОМПЗИТЫ И ТОНКИЕ ПЛЕНКИ

Наноконпозиты формируют актуальную область исследований, причем можно ожидать, что за следующие 20 лет будут получены новые системы, усовершенствованы методы синтеза, а также будет достигнут прогресс в управлении их свойствами. В настоящее время наночастицы часто включают в состав полимеров или волокнистых материалов для обеспечения повышенной прочности или эластичности (например, в пластмассах). При этом, дисперсионное состояние и агрегация нанонаполнителей оказывают значительное влияние на получаемые конечные свойства.

В качестве примера отметим развивающиеся исследования и работу над наноконпозитами с металлическими наночастицами [Faupel et al., 2010] с малой зависимостью от процедур приготовления. При этом с ростом относительной доли наночастиц в полимере наблюдается рост размеров наночастиц от единиц до десятков нанометров. Данные наноконпозиты имеют ряд применений, в том числе используются их оптические свойства (плазмонный резонанс, с управлением положения пика поглощения за счет варьирования отношения Ag/Au), или анти-бактериальные свойства — при взаимодействии с водой ионы серебра активно влияют на бактерии. При этом при низких концентрациях наночастиц данные материалы не являются токсичными.

Другой пример комплексной системы — это исследования тонких пленок полимерных наноконпозитов полистирол/фуллерен [Yaklin et al., 2008; Tropin et al., 2021]. Как показывают результаты нейтронного рассеяния [Tropin et al., 2021] и моделирование, фуллерен должен сосредотачиваться достаточно плотным слоем возле границы кремний-полимер. Авторы работы [Yaklin, et al., 2008] исследовали перевернутые, снятые со слюды, пленки и с помощью нейтронного эксперимента наблюдали диффузионное перемещение фуллеренов  $C_{60}$  в объем полистирола с границы раздела с воздухом (рисунок 2.7).

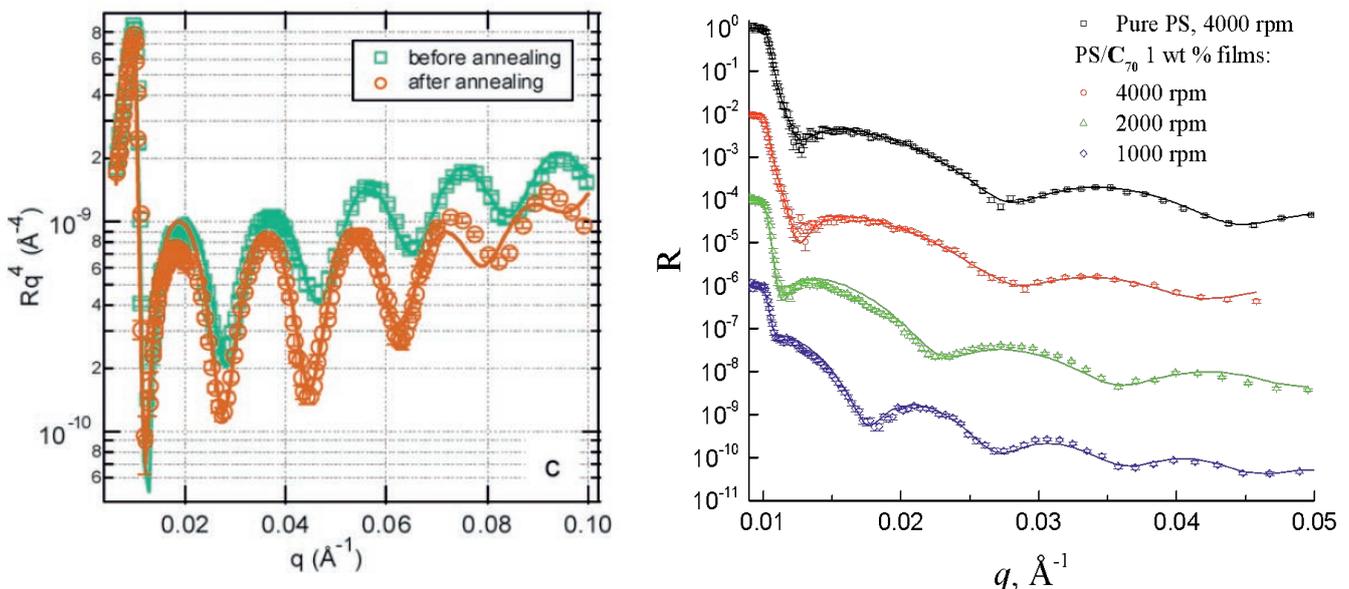


Рис. 2.7. Слева — нейтронная рефлектометрия наноконпозитов полистирол/ $C_{60}$ , перевёрнутых на кремниевую подложку до и после отжига [Yaklin et al., 2008]. Справа — данные нейтронной рефлектометрии (ИБР-2, ГРЭИНС) тонких пленок полистирол/ $C_{70}$  разной толщины [Tropin et al., 2021].

Композитные материалы часто имеют структуру на интервале от нанометров до микрометров. Высокий поток и широкий диапазон по  $q$  в МУРН для малых по объему образцов будут все более важным требованием в исследованиях нанокompозитных материалов как в их конечном состоянии, так и в динамике, во время приготовления и обработки.

## 2.7. РОЛЬ НЕЙТРОННЫХ МЕТОДОВ В ИССЛЕДОВАНИЯХ МЯГКОГО КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

Реализация научной программы на новом источнике нейтронов в области мягких конденсированных сред и наносистем внесет крупный вклад в этой области научных исследований и окажет значительное влияние на наше понимание этих материалов и их потенциальных применений. Программа объединит в единое сообщество исследователей из разных областей, включая материаловедение, химию, физику и биотехнологию. При поддержке международного научного сообщества пользователей и последних достижений в области методов рассеяния нейтронов программа откроет новые горизонты в исследованиях в области материаловедения, будет способствовать получению новых прорывных результатов и разработке новых актуальных для практических применений систем. Одним из ключевых факторов здесь станет высокая плотность потока нейтронов на установках на выведенных пучках нового источника.

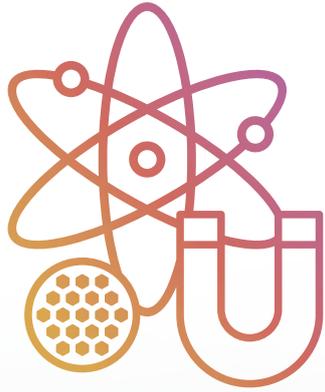
Отметим наблюдающиеся тенденции в области наносистем и мягкого конденсированного вещества, которые, как можно ожидать, будут иметь развитие в течение следующих 20 лет. Первое, что однозначно имеет место, это непрерывное усложнение структуры систем в сторону комплексности, неоднородности и иерархичности. Второе, это усложняющаяся динамика исследуемых и применяемых систем. Для получения функциональных материалов новые системы должны откликаться на изменяющиеся внешние параметры, и, следовательно, находиться в неравновесном состоянии. Ученым необходимо изучать неравновесные процессы, перестроения, динамику в потоках и иерархические во времени явления. Также будут оставаться актуальными фундаментальные исследования (до тех пор, пока не будет достигнуто глубокое понимание взаимодействий и процессов в нано- и мезо- системах).

Одной из основных комплексных задач для нейтронного рассеяния станет детальная характеристика структуры и динамики материалов на масштабах от  $\sim 1$  нм до  $\sim 10$  мкм. Ключевые нейтронные методы для этих задач это: малоугловое рассеяние, рефлектометрия и нейтронная спектроскопия (неупругое рассеяние). Высокая плотность потока нейтронов на установках на выведенных пучках позволит получать новую информацию об исследуемых системах, открывая возможности для разработки новых актуальных систем и фундаментального понимания взаимодействий и неравновесных процессов в комплексных структурах.

Для эффективного решения этих задач потребуются высокосветосильные малоугловые и ультрамалоугловые установки с быстродействующими 2D позиционно-чувствительными детекторами. Для первой установки, в том числе, важен широкий доступный  $q$ -диапазон. Также, следует рассмотреть возможность создания спин-эхо малоугловой установки. В области рефлектометрии полезными будут инструменты высокого разрешения и с низким фоном в обеих геометриях (вертикальная и горизонтальная плоскости рассеяния, задача достижения  $R$  до  $10^{-8}$ ), а также рефлектометр среднего или низкого разрешения с горизонтальной плоскостью для кинетических исследований. Актуально создание дополнительных установок для эффективных измерений незеркального рассеяния (характерные размеры структур  $\sim 10$ - $10^5$  нм) и малоуглового рассеяния в скользящей геометрии (GISANS) на масштабах от

субнанометров до сотен нанометров. Для исследований релаксации и энергетических спектров наносистем и мягкого вещества потребуется создание комплекса нейтронных спектрометров, включая спин-эхо спектрометры.

Отдельно также отметим непрерывный рост качества компьютерных методов моделирования. Можно ожидать, что через 20 лет применение моделирования в нейтронных исследованиях станет «не преимуществом, а обязанностью» на всех этапах эксперимента — подготовке, проведении измерений и обработке результатов. В настоящее время развитие исследований наносистем и мягких конденсированных сред происходит очень быстро, и направлено, по большому счету, «вширь» (большое число гибридных материалов, сложных систем на основе существующих материалов). Эта тенденция будет сохраняться, и в будущем неизбежно создание «библиотек» (возможно управляемых с помощью AI систем) для автоматизации разработки новых материалов. Одной из главных общих задач здесь является регулярная разработка самособирающихся структур для решения комплексных задач в медицине, технологии, пищевой промышленности и других отраслях. Эта задача требует развития всестороннего понимания структуры и динамики составляющих компонентов на всех масштабах размеров и времени с хорошим разрешением. Для решения этих задач незаменимым экспериментальным методом является метод рассеяния нейтронов, который должен быть органично встроен в современные многоступенчатые научно-исследовательские процессы.



---

# Магнетизм и сверхпроводимость



## 3.1. МАГНЕТИЗМ И СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ В МАГНИТНЫХ СЛОЯХ И ТОНКИХ ПЛЕНКАХ

В связи с бурным развитием нанотехнологий и благодаря ряду больших открытий в области физики систем пониженной размерности (эффект гигантского магнитного сопротивления, свойства графена и др.), изучению магнетизма в магнитных слоях и тонких пленках в последние годы уделяется повышенное внимание. Наиболее яркие примеры, демонстрирующие важность изучения этих явлений, включают косвенное обменное взаимодействие ферромагнитных слоев через промежуточные (парамагнитные, полупроводниковые) слои, эффект обменного подмагничивания при контакте ферромагнитных и антиферромагнитных слоев, эффект обменной «пружинной» связи между магнитно-жесткими и мягкими слоями, спин-ориентационные фазовые переходы, эффекты близости ферромагнитных и сверхпроводящих слоев. Важнейшие из этих явлений изучались с помощью рефлектометрии поляризованных нейтронов, поскольку этот метод является чувствительным к морфологическим и магнитным особенностям слоистых наноструктур. Некоторые из перечисленных эффектов, например, обменное подмагничивание и обменное взаимодействие через промежуточные слои, уже достаточно хорошо изучены для существующих технологических систем. Однако, с их продолжающейся миниатюризацией эти эффекты будут проявляться на меньших масштабах с усилением роли границ и влияния на состояние электронной системы. Понимание роли новых механизмов взаимодействия приведет не только к пониманию фундаментальных законов низкоразмерного магнетизма, но и позволит использовать их для конструирования систем с заданными магнитными и транспортными свойствами, например, для устройств магнитной памяти, инжекторов поляризованных электронов и др.

Прикладной интерес исследования тонкопленочных структур с помощью рефлектометрии поляризованных нейтронов связан также с тем, что особое внимание в последние годы уделяется проблемам спинтроники и создания квантового компьютера, с которыми связывают очередную промышленную революцию. Наличие спина у электронов уже используется для считывания информации с жестких дисков в коммерческих устройствах, основанных на эффекте гигантского магнетосопротивления. В дальнейшем с развитием спинтроники может быть снято фундаментальное ограничение электроники, связанное с потерей энергии при перемещении заряда, поскольку спиновый ток возможен при нулевом токе заряда. Индуцированное спин-орбитальным взаимодействием эффективное магнитное поле действует только на спины. Это обстоятельство может послужить решению задач спинтроники, в частности, созданию спиновых транзисторов, в которых контролируется спиновый ток, для использования в процессорах, в устройствах постоянной памяти и даже для реализации кубитов – элементов для квантовых вычислений.

В связи с развитием сверхпроводящей спинтроники, сверхпроводящего квантового компьютеринга и сверхпроводящего нейроморфного компьютеринга особый интерес представляет исследование взаимодействия сверхпроводимости и ферромагнетизма. Взаимодействие двух явлений впервые было рассмотрено Гинзбургом в 1957 г., который указал на большие трудности в реализации сверхпроводящего ферромагнетика. Позже отмечалось, что сосуществование явлений с ферромагнитным и сверхпроводящим параметрами порядка возможно в неоднородных системах. Указывалось, что сами явления ферромагнетизма и сверхпроводимости в неоднородных ферромагнитно-сверхпроводящих системах модифицируются. Так, в частности в обзоре [Nikitenko & Zhaketov, 2022] дается целостное представление о магнитных явлениях, обусловленных взаимодействием ферромагнитного и сверхпроводящего параметров порядка в слоистых наноструктурах.

Важный результат о взаимодействии сверхпроводимости и ферромагнетизма в слоистой

периодической структуре, полученный с помощью рефлектометрии поляризованных нейтронов, описан в работе [Khaydukov et al., 2019]. Показано, что структуры с бислоями Nb/Gd являются стабильными из-за отсутствия взаимного растворения элементов. Гадолиний, имея низкую температуру Кюри, является относительно слабым ферромагнетиком, а ниобий имеет сравнительно высокую температуру сверхпроводящего перехода и является сильным сверхпроводником. В результате, в структуре Nb/Gd следует ожидать значительного влияния сверхпроводимости на ферромагнетизм. Дополнительно, гадолиний имеет большое сечение взаимодействия с нейтронами, в результате чего при захвате нейтронов ядрами гадолиния образуется вторичное излучение – гамма-кванты с энергиями в сотни кэВ. Регистрация вторичного излучения позволяет определить пространственный профиль гадолиния, а затем и ниобия, что важно для определения с каким элементом связано изменение распределения намагниченности на границе ферромагнетика со сверхпроводником. В настоящее время проведены исследования периодических структур  $[\text{Nb}(25\text{нм})/\text{Gd}(x = 1, 2, 3, 5 \text{ нм})]_{12}$ , в которых толщина слоёв гадолиния была меньше или порядка корреляционной длины сверхпроводимости в гадолинии (рисунок 3.1). Наблюдалось когерентное действие сверхпроводящих слоёв, заключающееся в подавлении намагниченности слоёв гадолиния (сверхпроводящий диамагнетизм периодической Ф/С структуры). Таким образом периодическая структура является сверхпроводящей. Глубина проникновения магнитного поля в структуру составила 180 нм, что больше значения 120 нм для сверхпроводящего сплошного ниобия. Подавление величины намагниченности, как и ожидалось, возрастало при уменьшении толщины ферромагнитных слоёв гадолиния.

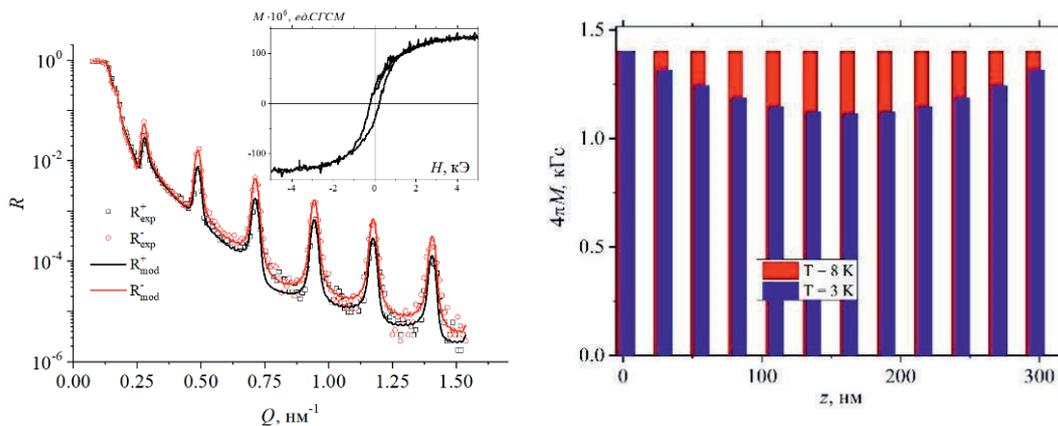


Рис. 3.1. (а) Экспериментальная зависимость (точки) коэффициентов отражения нейтронов для образца  $[\text{Gd}(2 \text{ нм})/\text{Nb}(25 \text{ нм})]_{12}$  при  $T=7 \text{ К}$  и  $H=4.5 \text{ кЭ}$ . Сплошными линиями показаны модельные кривые. На вставке показан магнитный гистерезис измеренный при  $T=7 \text{ К}$  на СКВИД магнитометре. (б) Намагниченность периодической структуры  $[\text{Gd}(2 \text{ нм})/\text{Nb}(25 \text{ нм})]_{12}$  при  $H = 661 \text{ Э}$ .

Для нейтронов основными взаимодействиями являются поглощение и рассеяние атомными ядрами и атомами. Распад ядер после захвата нейтронов сопровождается испусканием излучения в виде гамма-квантов, заряженных частиц и осколков ядер (рисунок 3.2). Тип, интенсивность и энергия излучения различны для изотопов элементов и характеризуют их. В реальных слоистых структурах граница раздела является относительно протяжённой (1-10 нм). В этой связи, в окрестности границы раздела потенциал взаимодействия определяется суммой потенциалов взаимодействия нейтронов с контактирующими элементами. Чтобы определить пространственное распределение определённого элемента, нужно регистрировать как первичное (нейтроны), так и вторичное (из ядер) излучения. Первичное излучение это отражённые и прошедшие структуру нейтроны. Интенсивность вторичного излучения определяется поглощением нейтронов. Парциальный коэффициент поглощения нейтронов может быть определён

непосредственно, если известно пространственное распределение конкретного изотопа. [Аксенов В.Л. и др., 2023]

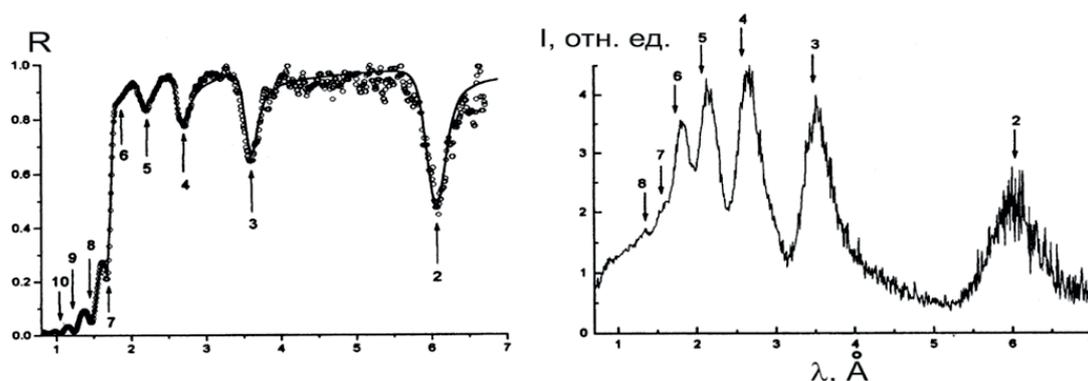


Рис. 3.2. Длинноволновые зависимости коэффициента отражения нейтронов (слева) от структуры  ${}^6\text{LiF}(20\text{нм})/\text{Ti}(200\text{нм})/\text{Cu}(100\text{нм})/\text{стекло}$  и выхода заряженных частиц (справа), вызванных захватом нейтронов ядрами изотопа  ${}^6\text{Li}$ .

Изменение распределения намагниченности на границе раздела сверхпроводник/ферромагнетик при сверхпроводящем переходе исследовалось в работе [Khaydukov et al., 2013]. Для структуры  $\text{Cu}(32\text{нм})/\text{V}(40\text{нм})/\text{Fe}(1\text{нм})/\text{MgO}(001)$  нейтронные измерения пространственного профиля потенциала взаимодействия нейтрона с веществом обнаружили появление при сверхпроводящем переходе положительной намагниченности. Эффект близости в гетероструктурах типа ферромагнетик – сверхпроводник ответственен за интерференционные явления, определяющие их термодинамические и транспортные свойства. Для рефлектометрических измерений структуры  $\text{Cu}(32\text{ нм})/\text{V}(40\text{ нм})/\text{Fe}(1\text{ нм})/\text{MgO}(001)$  используется разработанный режим усиленных стоячих нейтронных волн. Экспериментальные данные согласуются с предположением обратного эффекта, когда в сверхпроводящем слое возникает положительный магнитный момент. Следует отметить, что в данной работе также приводятся данные показывающие, что атомы железа полностью находятся в слое ванадия. Относительная концентрация атомов железа находится в диапазоне 0–20% на протяжении 10 нм со стороны слоя ванадия. Известно, что в сплаве FeV атомы ванадия намагничиваются и их моменты ориентируются антиколлинеарно магнитным моментам атомов железа. В этой связи, из-за сложной магнитной структуры, не исключаются другие сценарии изменения магнитного момента при сверхпроводящем переходе. В частности, это может быть диамагнитная компенсация при сверхпроводящем переходе магнитного момента атомов ванадия. Регистрация вторичного излучения из контактирующих на границе раздела элементов, дополнительно к отражению нейтронов, может помочь в идентификации механизма намагничивания структуры. **Перспективный источник нейтронов с высоким потоком нейтронов на установках на выведенных пучках позволит определять с высокой точностью корреляцию распределения концентрации элементов и намагниченности для широкого спектра элементов, исследовать тонкие магнитные эффекты связанные с изменением намагниченности меньше 1%.**

Другое важное и перспективное направление исследований — это исследование систем с нетривиальным магнитным упорядочением. Так в цикле работ на рефлектометре РЕМУР на реакторе ИБР-2 исследовались гетероструктуры со слоями геликоидально упорядоченных редкоземельных магнетиков Dy и Ho. В работе [Devyaterikov et al., 2022] приведены результаты исследований периодической структуры  $[\text{Dy}(6\text{ нм})/\text{Ho}(6\text{ нм})]_{34}$ . Геликоидальная магнитная структура формируется в объемном Dy в интервале между температурой Кюри ( $T_c = 85\text{ K}$ ) и температурой Нееля ( $T_N = 178\text{ K}$ ), в объемном Ho в интервале между  $T_c = 18\text{ K}$  и  $T_N = 132\text{ K}$ . В связи с влиянием размерных эффектов и эпитаксиальных напряжений в низкоразмерных

гетероструктурах на основе Dy и Ho магнитная структура проявляет особенности, такие как изменение температур Кюри и Нееля и отличные значения периодов геликоид по сравнению с объемными материалами. Важно, что в сверхрешетках с чередующимися слоями Dy и Ho образуются два разных магнитных геликоида, когерентно распространяющиеся в слоях Dy и Ho. На рисунке 3.3а показан нейтронный спектр для структуры  $[\text{Dy (6 нм)}/\text{Ho (6 нм)}]_{34}$ , полученный при  $T=100$  К. Соответственно периоды магнитных геликоид, температуры Нееля и Кюри для Dy и Ho в составе сверхрешетки отличны от характерных периодов и характерных температур монокристаллов и тонких однокомпонентных пленок Dy и Ho (рисунок 3.3б). Заключение, что для Ho в составе сверхрешетки  $[\text{Dy (6 нм)}/\text{Ho (6 нм)}]_{34}$  подавлен магнитный фазовый переход из геликоидальной фазы в коническую ниже значение температуры Кюри  $T_c$ . Для слоёв Dy по сравнению с  $T_c$  в монокристаллическом Dy, наблюдается рост температуры Нееля  $T_N$  в слоях Ho.

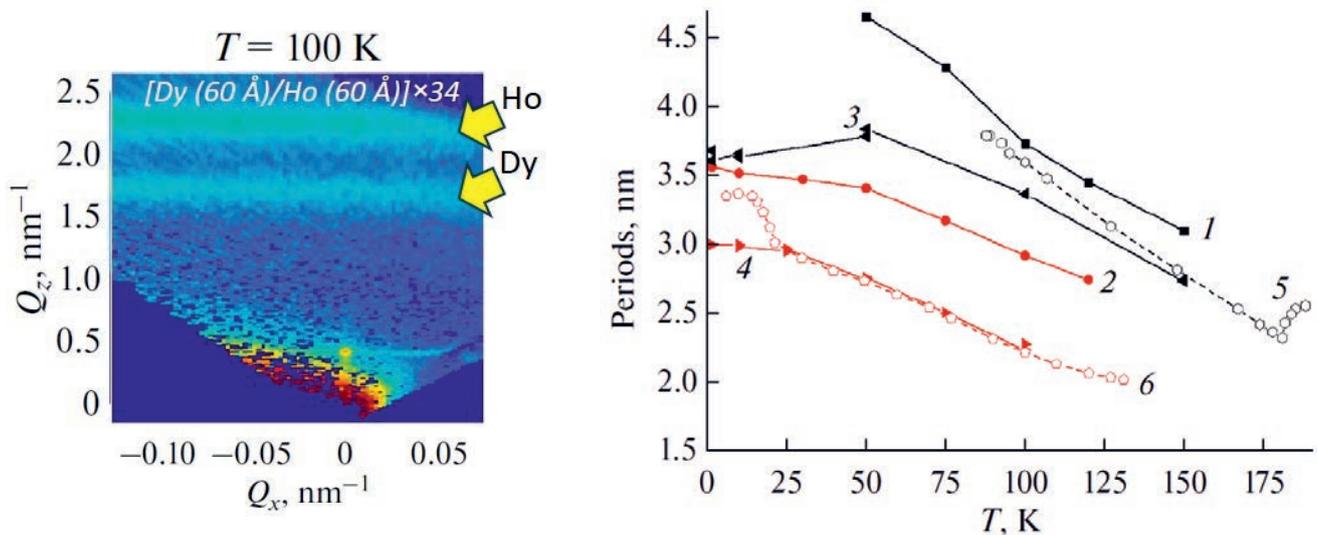


Рис. 3.3. (а) Рефлектометрические спектры для сверхрешетки  $[\text{Dy (6 нм)}/\text{Ho (6 нм)}] \times 34$  в координатах переданного волнового вектора  $Q_z-Q_x$ . (б) Температурная зависимость периода геликоида в объемных монокристаллах Dy (1) и Ho (2), в тонких (200 нм) пленках Dy (3) и Ho (4) и в Dy (5), Ho (6) в составе сверхрешетки.

Нейтроны также позволили провести детальный анализ низкотемпературных измерений для структуры  $\text{Al}_2\text{O}_3(11\bar{0}2)/\text{Nb}(40 \text{ нм})/[\text{Dy}(6 \text{ нм})/\text{Ho}(6 \text{ нм})]_{34}/\text{Nb}(10 \text{ нм})$ , полученных при температуре ниже  $T_c(\text{Nb})$  [Zhaketov et al., 2023]. Нейтронные измерения проводились на времяпролетном рефлектометре поляризованных нейтронов РЕМУР. На рисунке 3.4а показана зависимость пропорциональной магнитному моменту разности коэффициентов зеркального отражения нейтронов  $S=R_+ - R_-$ . Данные приведены для Брэгговского пика первого порядка, полученного на периоде сверхрешетки. Образец охлаждался в магнитном поле  $H=1$  кОе, измерение проводилось в этом же поле. Видно, что с уменьшением температуры параметр  $S$  возрастает, что указывает на то, что геликомагнитное упорядочение трансформируется в веерное, поскольку возрастает коллинеарная компонента намагниченности (рисунок 3.4б). Но при  $T=1.5\text{K} < T_c(\text{Nb})$  наблюдается обратное поведение, т.е. уменьшение  $S$ , что указывает на восстановление геликомагнитной фазы из веерной. Данное поведение связано с тем, что геликомагнитная фаза является энергетически более выгодной для существования сверхпроводящих корреляций. Интегральное макроскопическое значение магнитной индукции в геликомагнетике равно нулю, в то время как для магнетика с веерным магнитным упорядочением данное значение отлично от нуля. Очевидно, что для сверхпроводящих корреляций более выгоден первый случай, в связи с чем и происходит подстройка магнитного упорядочения.

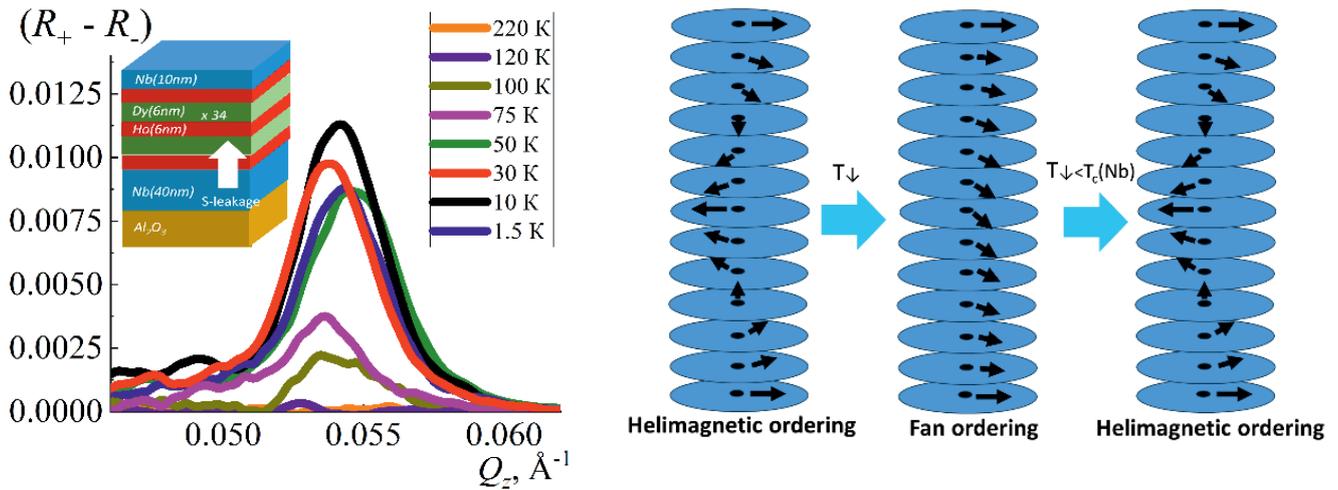


Рис. 3.4. (а) Разность коэффициентов зеркального отражения нейтронов, полученная при различных значениях температуры в магнитном поле  $H = 1kOe$ . (б) Изменение магнитного упорядочение при охлаждении структуры: магнитный геликоид трансформируется в магнитный веер, под влиянием сверхпроводимости магнитный веер трансформируется в магнитный геликоид.

Стоит отметить и исследования сложно-упорядоченной некомпланарной магнитной системы [Tatarskiy, 2020], которые показывают, что антисимметричное взаимодействие Дзялошинского–Мории влияет на отражение поляризованных нейтронов от многослойной структуры со случайной магнитной анизотропией. Показано, что антисимметричный обмен приводит к возникновению поляризационно-зависимого асимметричного члена в отражении. **Данные исследования требуют регистрации малоуглового рассеяния нейтронов в скользящей геометрии на уровне меньше 1% от интенсивности отраженного пучка. Для подобных экспериментов требуются сформированный высокий поток нейтронов на образце, который может обеспечить перспективный источник нейтронов с передовыми установками на выведенных пучках.**

### 3.2. СПИНОВАЯ ДИНАМИКА СИЛЬНО КОРРЕЛИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ

Перспективным направлением исследований является изучение спиновой динамики сильно коррелированных электронных систем (СКЭС) методом неупругого рассеяния нейтронов (НРН). Например, изучение магнитной динамики системы с переменной валентностью  $\text{CePd}_3$  [Goremuchkin et al., 2018]. Суть этой работы в том, что экспериментальное определение четырехмерной функции закона рассеяния  $S(Q, \omega)$  и её сравнение с теоретическими расчетами в теории DFT+DMFT позволяет сделать вывод о происхождении особенностей зонной структуры и, соответственно, об аномальных магнитных, транспортных свойствах исследуемого объекта. Первые эксперименты с монокристаллическим образцом  $\text{CePd}_3$  показали наличие необычной эволюции магнитных возбуждений в  $Q - \omega$  пространстве. На рисунке 3.5. показаны экспериментально определенные 2D сечения мнимой части обобщенной восприимчивости  $\chi''(Q, \omega) \sim S(Q, \omega)(1 - \exp(-\omega/k_B T))$  при энергиях 35 мэВ (панель А) и 65 мэВ (панель В).

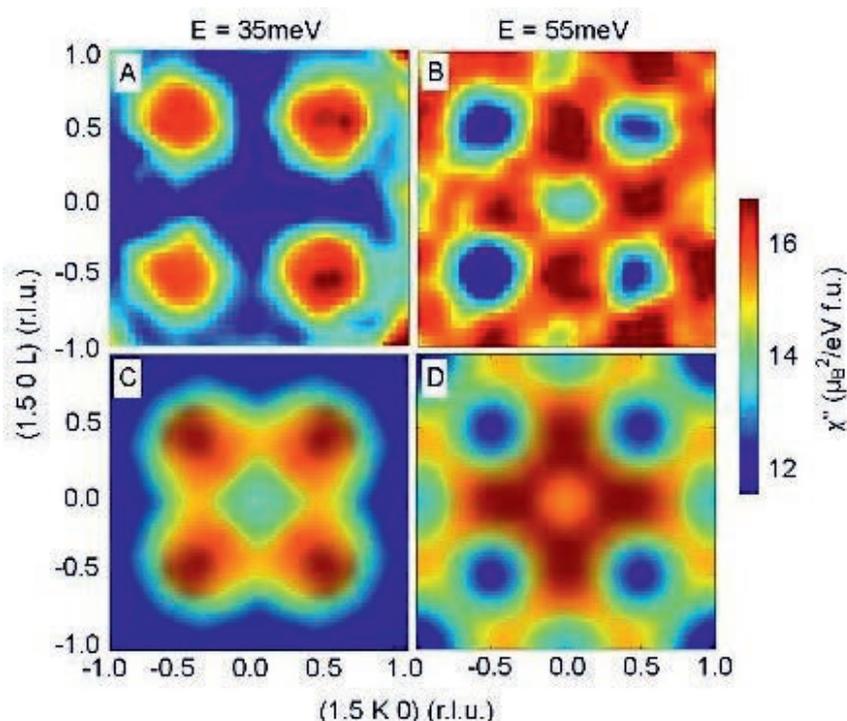


Рис. 3.5. Интенсивность магнитного рассеяния при энергиях 35 мэВ и 65 мэВ в плоскости (1.5 K L). Панели A и B — данные НРН эксперимента при  $T=5\text{K}$ . Панели C и D результаты теоретических расчетов из первых принципов методом DFT+DMFT. [Goremychkin et al., 2018]

Сравнение данных в (A) и (B) дает неожиданный результат, указывающий на сильную зависимость интенсивности рассеяния от  $Q$ . Вычисления, сделанные из первых принципов (нижние панели C и D), показывают хорошее количественное согласие с экспериментом. Они также дают ответ на вопрос о происхождении особенностей в законе рассеяния  $S(Q, \omega)$ : электрон дырочные возбуждения (переходы электронов между электронными и дырочными карманами) и их локация в  $Q - \omega$  пространстве обусловлена деталями зонной структуры исследуемого вещества. По сути можно утверждать, что измерения четырехмерного закона рассеяния  $S(Q, \omega)$  методом НРН позволяет исследовать электронную структуру СКЭС. В частности, степень когерентности электронных зон может быть видна в температурной зависимости  $S(Q, \omega)$ . На рисунке 3.6. представлены данные НРН для двух температур 6 К и 300 К. При комнатной температуре всё структурированное рассеяние практически полностью пропадает, в то время как при 6 К имеются три хорошо выраженные особенности.

Такая эволюция интенсивности рассеяния очень хорошо описывается вычислениями в модели DFT+DMFT, что отражает значительную потерю когерентности  $4f$  зон в окрестности уровня Ферми при высокой температуре. Этот результат весьма важен так как он является прямым спектроскопическим подтверждением эволюции  $4f$  моментов от режима свободных парамагнитных состояний при высокой температуре к режиму сильно связанных  $4f$  состояний с электронами проводимости ( $d$  электроны палладия) при низких температурах. Эксперименты такого рода предполагают на перспективном источнике нейтронов в ОИЯИ наличие спектрометров неупругого рассеяния нейтронов с большой областью покрытия ( $Q - \omega$ ) пространства и высокой плотностью потока нейтронов на образце, что позволит проводить измерения четырех-мерного закона рассеяния  $S(Q_x, Q_y, Q_z, \omega)$ . В обозримом будущем эта технология измерения НРН несомненно будет дальше совершенствоваться и пользоваться все более растущим спросом у пользовательского сообщества.

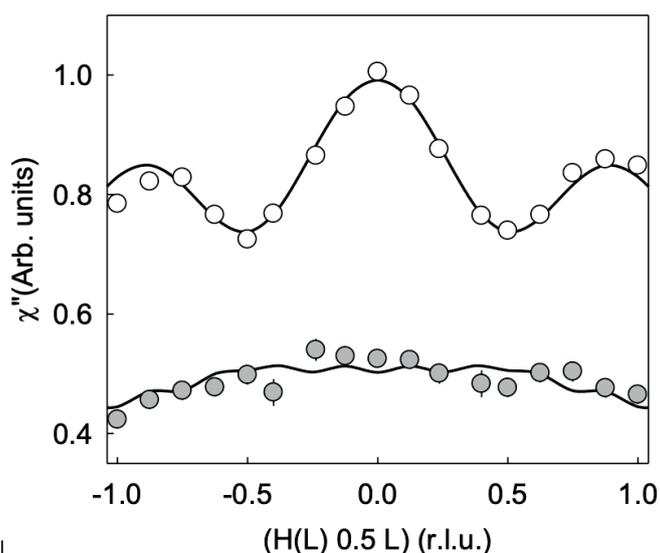


Рис 3.6. Температурная зависимость динамической магнитной восприимчивости  $\text{CePd}_3$ . Светлые (серые) символы – HPN измерения при 6 K (300 K) и передаче энергии  $60 \pm 10$  мэВ,  $K = 0,50 \pm 0,25$ . Линии – результаты расчетов DFT+DMFT. [Goremuchkin et al., 2018]

Другим интересным примером успешного применения 4D нейтронной спектроскопии являются исследования спиновой динамики молекулярных магнетиков [Chiesa, 2017]. Если в предыдущем примере изучения магнитной динамики СКЭС измерения проводились в области тепловых нейтронов  $\sim 10$  мэВ –  $200$  мэВ, то в случае молекулярных магнетиков спектр магнитных возбуждений значительно меньше и покрывает диапазон энергий  $\sim 1$  мэВ –  $10$  мэВ и в этом случае эксперименты проводятся на спектрометрах высокого разрешения расположенные на холодных источниках нейтронов. В работе изучался молекулярный наномагнетик содержащий кластер из 12 атомов марганца (рисунок 3.7) и сокращенно называемый  $\text{Mn}_{12}$  с полной химической формулой

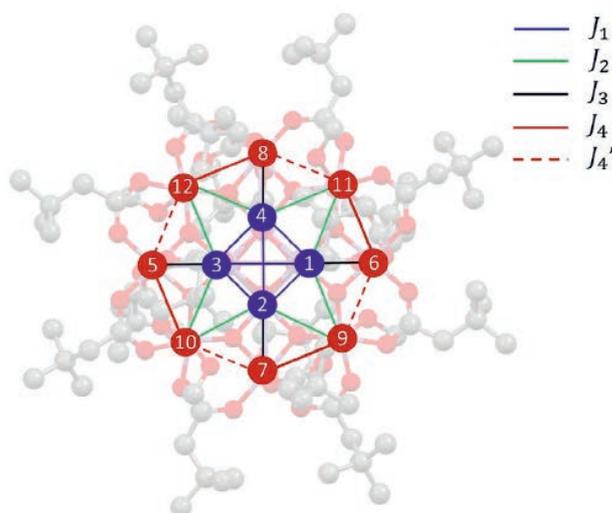
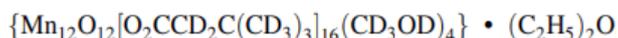


Рис. 3.7. Структура молекулы  $\text{Mn}_{12}$ . Синие окружности – ионы  $\text{Mn}^{+4}$  (1 – 4,  $s=3/2$ ), красные окружности – ионы  $\text{Mn}^{+3}$  (5 – 12,  $s=2$ ). Линии, соединяющие атомы марганца, соответствуют различным величинам обменного взаимодействия. Полное число обменных констант равно пяти. В правом верхнем углу приведен их список. [Chiesa et al., 2017]

Это очень своеобразный наномагнетик так как он содержит изолированный кластер из 12 магнитоактивных ионов разной валентности и, соответственно, имеющих различное значение спина (магнитного момента). Феноменологический гамильтониан, описывающий магнитную динамику  $Mn_{12r}$ , будет содержать пять обменных констант и наиболее надежный способ их определения — это измерение четырехмерной функции рассеяния методом НРН и количественное сравнение экспериментальных данных с расчетами магнитной динамики с использованием модельного гамильтониана. Как видно на рисунка 3.8, практически во всем диапазоне энергий имеется очень хорошее согласие измеренных и рассчитанных сечений  $S(Q_x, Q_y)$ , что однозначно указывает на высокое качество полученных значений параметров спинового гамильтониана. Это абсолютно необходимо для понимания физических свойств наномагнитных материалов и их возможных практических применений.

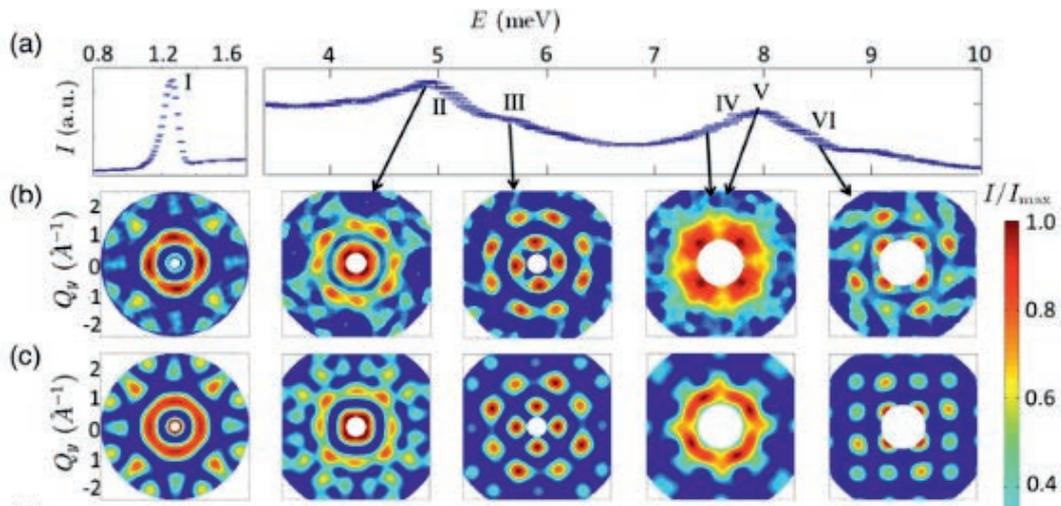


Рис. 3.8. (a) Спектр НРН измеренный на спектрометре LET, ISIS при энергиях налетающих нейтронов 4.2 мэВ и 15.4 мэВ и температуре 1.5 К. (b) 2D сечение  $S(Q_x, Q_y)$ , полученное интегрированием по всему диапазону  $Q_z$ , (c) Вычисленные 2D распределение интенсивности, с определенным в НРН эксперименте набором обменных параметров модельного гамильтониана [Chiesa et al., 2017].

### 3.3. ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНАЯ СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ

Огромный интерес во всем мире вызывает поиск и исследования соединений, обладающих высокотемпературными сверхпроводящими (ВТСП) свойствами. Открытие высокотемпературных сверхпроводящих материалов при комнатной температуре и нормальном давлении могло бы привести к настоящей промышленной революции. Эта амбициозная задача безусловно будет предметом для изучения на перспективном источнике нейтронов. К настоящему времени построено несколько теорий сверхпроводимости (например, Bardeen et al., 1957; Аксенов и др., 1992; Bozin et al., 2015]) и, в частности, с помощью методов рассеяния нейтронов проводятся важные исследования в области физики высокотемпературных сверхпроводников. Так, в работах [Smolyaninova et al., 2015; Smolyaninova et al., 2019] продемонстрировано, что метаматериал со стремящейся к нулю эффективной диэлектрической проницаемостью, состоящий из наночастиц Al, покрытых оболочкой  $Al_2O_3$ , общим диаметром 18 нм, обладает в 3.25 раза более высокой критической температурой сверхпроводимости, чем чистый алюминий. Неупругое рассеяние нейтронов позволило установить, что это повышение связано с усилением электрон-электронного взаимодействия вследствие дополнительных гибридных плазмон-фононных возбуждений, возникающих в метаматериале типа "металл-диэлектрик".

Изучение спиновой динамики ВТСП методом неупругого рассеяния нейтронов (НРН) позволило установить многие интересные особенности спектра элементарных магнитных возбуждений и их связь с возникновением сверхпроводимости, например, появление в сверхпроводящем состоянии так называемого нейтронного резонанса (пик в законе рассеяния  $S(Q_{\text{res}}, \omega_{\text{res}})$  в определенной точке зоны Бриллюэна ( $Q_{\text{res}}$ ), энергия ( $\omega_{\text{res}}$ ) которого коррелирует с температурой перехода в сверхпроводящее состояние. Хорошей иллюстрацией роли НРН в изучении ВТСП являются работы по изучению магнитной динамики так называемых «железных» сверхпроводников, открытых в 2008 году. На рисунке 3.9 показана эволюция закона рассеяния в зависимости от температуры [Christianson et al., 2008].

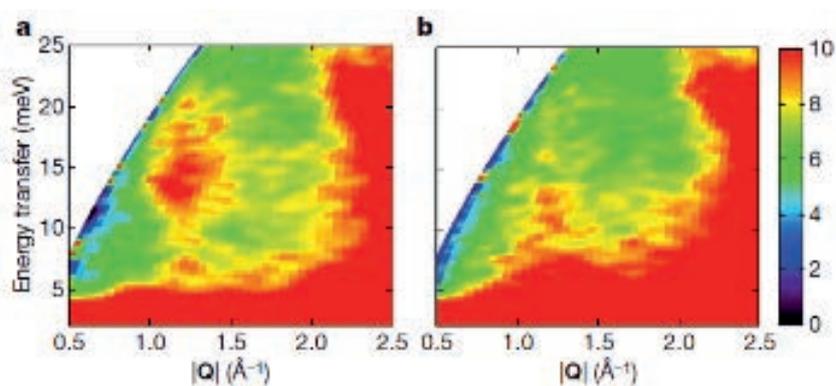


Рис. 3.9. Закон рассеяния ВТСП соединения  $\text{Ba}_{0.6}\text{K}_{0.4}\text{Fe}_2\text{As}_2$  в координатах  $Q - \omega$  для двух температур, в сверхпроводящем состоянии (a) 7K и в нормальном (b) 50K. [Christianson et al., 2008]

Как видно на этом рисунке при 7 K в сверхпроводящем состоянии имеется особенность в спектре магнитных возбуждений при энергии 14 мэВ и передаче импульса  $1.15\text{\AA}^{-1}$ . Как показал анализ полученных данных, эта особенность есть нейтронный резонанс, ранее установленный в НРН исследованиях медных ВТСП. Наблюдение нейтронного резонанса в сочетании с данными фотоэмиссионной спектроскопии позволило сделать вывод о симметрии куперовской пары  $s_{\pm}$  в данном классе ВТСП соединений.

Огромный интерес вызывает обнаруженное в 2010-е годы явление сверхпроводимости в гидридах (например,  $\text{H}_3\text{S}$ ,  $\text{LaH}_{10}$ ,  $\text{YH}_9$  и др.) при высоких ( $\sim 10\text{--}100$  ГПа) давлениях и при температурах, близких к комнатной. Ведутся работы по поиску новых гидридов с ещё более высокой критической температурой при относительно низких давлениях, например, синтез тройных систем, обладающих значительно лучшими физическими свойствами (La-Ce-H, [Chen et al., 2023]). Идут исследования физического механизма сверхпроводимости в гидридах и построения соответствующей теории, которая должна описать наблюдаемые эффекты, например, огромное понижение критической температуры при замене водорода на дейтерий ( $\sim 70$  K), значительный температурный гистерезис электрического сопротивления ( $\sim 15$  K), крайне высокие критические магнитные поля ( $> 100$  T) [Eremets et al., 2022]. Предполагается, что благодаря чувствительности методов рассеяния тепловых нейтронов к водороду, эксперименты по упругому [Haberl et al., 2023] и неупругому [Antonov et al., 2022] рассеянию нейтронов при высоких давлениях дадут уникальную информацию о структуре и динамике гидридов-сверхпроводников. **Следует отметить, что эксперименты при высоких давлениях требуют проведения измерений образцов крайне небольших объёмов ( $\sim 0.01$  мм<sup>3</sup> и ниже). Поэтому для них необходим источник нейтронов с высоким потоком на установках на выведенных пучках.**

### 3.4. МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ

В последнее время наблюдается значительный прогресс в исследованиях материалов, находящихся в экстремальных условиях. Высокое давление зачастую приводит к возникновению новых физических явлений в материалах, среди которых, помимо индуцированной давлением сверхпроводимости, разнообразные изменения магнитных состояний, переходы диэлектрик–металл, спиновый кроссовер, структурные и электронные фазовые переходы. Кроме того, исследования при высоких давлениях открывают уникальные возможности изучения микроскопических механизмов формирования физических явлений в функциональных материалах в результате анализа отклика различных свойств на изменение структурных параметров при сжатии кристаллической решетки. Также в условиях воздействия высоких давлений и температур возможен синтез новых метастабильных форм материалов с необычными свойствами. Природа взаимодействия нейтронов с веществом определяет ряд преимуществ нейтронной дифракции перед соответствующими рентгеновскими методами в структурных исследованиях: высокая чувствительность к положениям в кристаллической структуре легких атомов, таких как водород и кислород, особенно в условиях структурного беспорядка; возможность исследования магнитных структур материалов; высокая проникающая способность. [Козленко и др., 2021]

В настоящее время исследование ван-дер-ваальсовских магнетиков является одним из наиболее актуальных направлений в области физики конденсированного состояния и материаловедения, поскольку подобные вещества по сути являются магнитными аналогами графена – уникального двумерного материала, открытие которого было отмечено Нобелевской премией по физике 2010 г. Исследования двумерных форм ван-дер-ваальсовских магнетиков показали, что магнитное упорядочение в них может сохраняться при достаточно высоких температурах вплоть до предела атомного монослоя. Кроме того, в данных материалах обнаружено большое разнообразие новых физических явлений при изменении термодинамических параметров (температуры и давления), включая сверхпроводимость, топологические спиновые возбуждения, скирмионные состояния и др.

Проведенные на реакторе ИБР-2 исследования структурных и магнитных свойств соединения  $\text{CrBr}_3$  с помощью метода нейтронной дифракции позволили обнаружить необычные эффекты – аномальное поведение структурных характеристик в области температуры ферромагнитного упорядочения  $T_c$  и отрицательное тепловое расширение объема кристаллической решетки квазидвумерных ван-дер-ваальсовских слоев в области температур  $T < T_c$ . Следует отметить, что отрицательное тепловое расширение является сравнительно редким физическим эффектом, обнаруженным лишь в нескольких классах материалов. В то время как в большинстве кристаллических веществ наблюдается увеличение объема кристаллической решетки и характерных межатомных расстояний с увеличением температуры – положительное тепловое расширение, в исключительных случаях, как для  $\text{CrBr}_3$ , в определенном диапазоне термодинамических параметров может реализовываться обратный эффект – отрицательное тепловое расширение, когда с увеличением температуры происходит уменьшение объема и межатомных расстояний (рисунок 3.10) [Kozlenko et al., 2021]. Интересно отметить, что графен также демонстрирует отрицательное тепловое расширение, причем коэффициент линейного теплового расширения атомных слоев в  $\text{CrBr}_3$  в области  $T < T_c$ ,  $\alpha_l = -1.6 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ , оказался близким к соответствующей величине для графена в области низких температур. Полученный результат свидетельствует о хорошей совместимости материалов типа  $\text{CrX}_3$  и графена с точки зрения перспектив создания гетероструктур на их основе, практическое использование которых может стать важным шагом на пути к разработке передового поколения устройств спинтроники, наноэлектроники, записи и хранения информации. [Kozlenko et al., 2021]

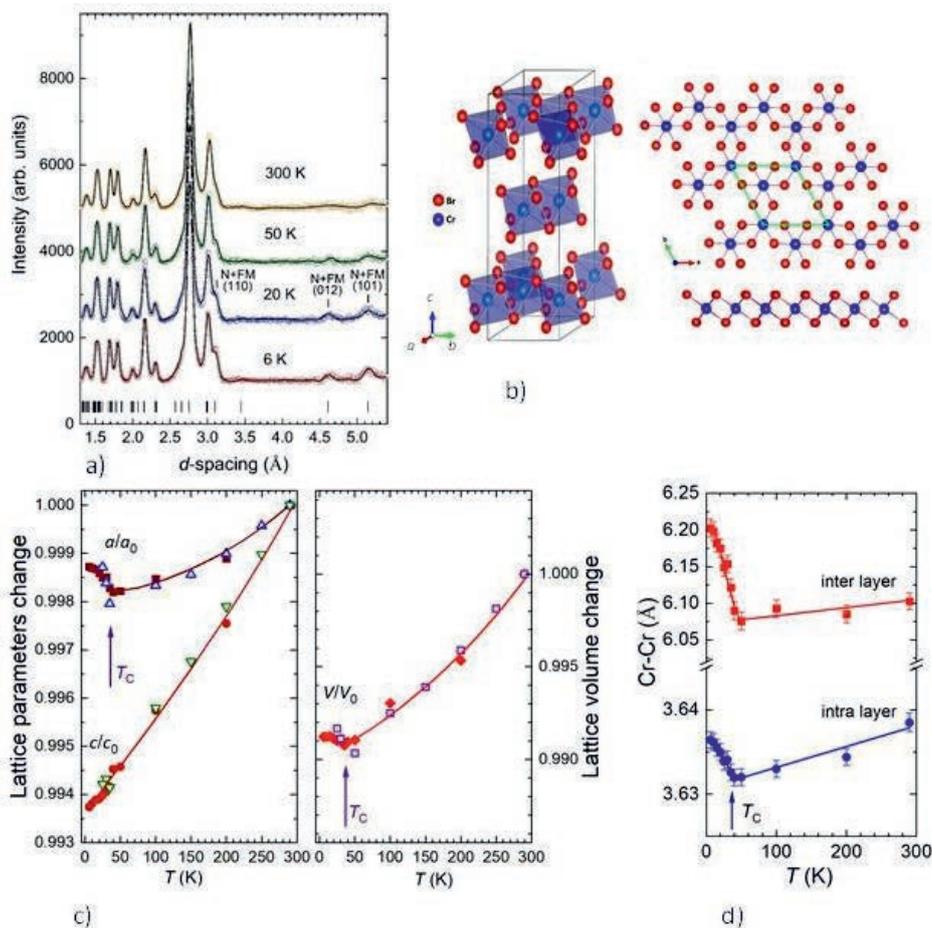


Рис. 3.10. а) Нейтронные дифракционные спектры  $\text{CrBr}_3$ , измеренные при различных температурах и профили, рассчитанные по методу Ритвельда. б) Ромбоэдрическая кристаллическая структура  $\text{CrBr}_3$  симметрии R3. Справа показан вид ван-дер-ваальсовских атомных слоев сверху и сбоку. в) Температурные зависимости параметров и объема элементарной ячейки кристаллической решетки  $\text{CrBr}_3$ , нормированные на соответствующие значения при комнатной температуре. д) Температурные зависимости расстояний между магнитными ионами Cr внутри ван-дер-ваальсовских слоев (intra-layer) и между слоями (inter-layer) [Kozlenko et al., 2021].

Минерал магнетит  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  является одним из первых магнитных материалов, используемых человечеством с древних времен. В настоящее время он также находит широкое применение в развитии современных технологий. Магнетит демонстрирует ряд необычных физических явлений, которые активно исследуются на протяжении более ста лет. В частности, при изучении было обнаружено аномальное поведение физических свойств магнетита при высоких давлениях в области структурного фазового перехода, происходящего при 20–25 ГПа. Для выяснения природы этого явления проведено исследование магнитных и электронных свойств магнетита с помощью дифракции нейтронов и синхротронной Мессбаэровской спектроскопии на изотопе железа  $^{57}\text{Fe}$  в диапазоне давлений 0 – 40 ГПа и температур 10 – 300 К. В фазе высокого давления обнаружено ферримагнитное упорядочение, возникающее при температуре  $T_{\text{NP}} \sim 420$  К и установлена его симметрия. Определена структурная, магнитная и электронная диаграмма магнетита в исследуемом диапазоне термодинамических параметров (рисунок 3.11). [Kozlenko, et al., 2019]

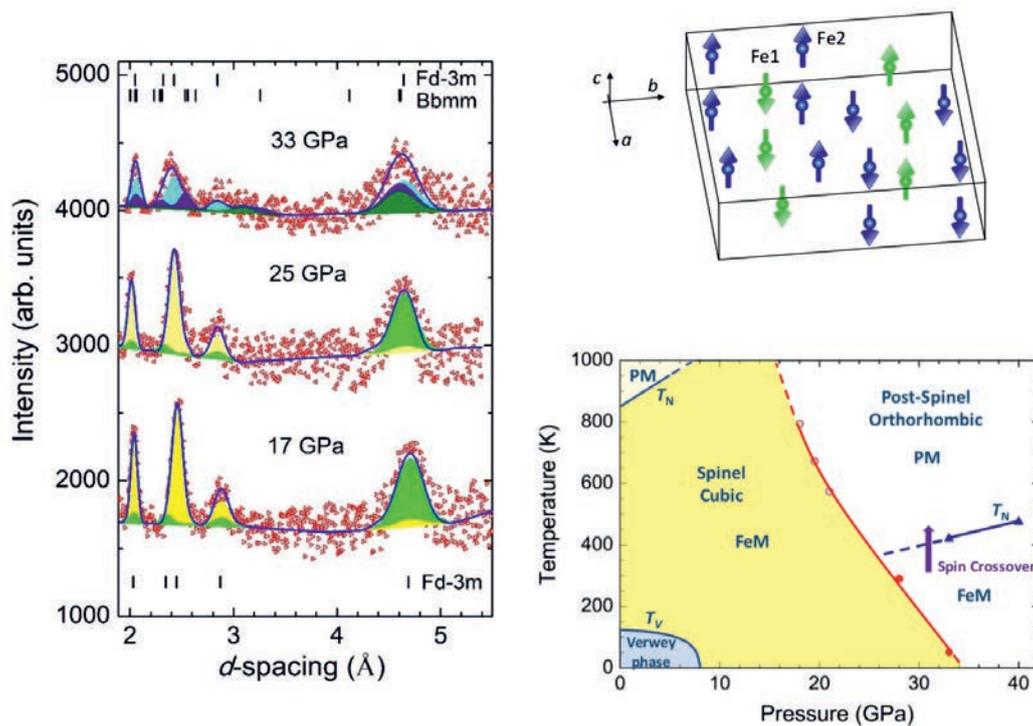


Рис. 3.11. Слева: нейтронные дифракционные спектры магнетита, измеренные при давлениях до 33 ГПа на дифрактометре ДН-6 в камере высокого давления с алмазными наковальнями и обработанные по методу Ритвельда. Справа: магнитная структура орторомбической фазы высокого давления магнетита (вверху) и структурная, магнитная и электронная фазовая диаграмма магнетита (внизу) [Kozlenko, et al., 2019].

Создание перспективного источника нейтронов даст возможность повысить интенсивность потока нейтронов на микрообразцах при проведении экспериментов по изучению атомной и магнитной структуры и свойств функциональных материалов при экстремальных внешних условиях (воздействие внешнего высокого давления и низкой температуры), что будет являться важным фактором для проведения данных исследовательских работ на новом, более высоком качественном уровне.

### 3.5. НЕЙТРОННЫЕ МЕТОДЫ В ИССЛЕДОВАНИИ МАГНИТНЫХ И СВЕРХПРОВОДЯЩИХ МАТЕРИАЛОВ

Ряд приведенных примеров изучения магнитной динамики демонстрируют, прежде всего, необходимость наличия приборов неупругого рассеяния нейтронов с большим телесным углом, позволяющим проводить измерения закона рассеяния в четырех измерениях и покрывающих область передач энергий  $\sim 1$  мэВ – 200 мэВ. Эти примеры не охватывают все области изучения сильно коррелированных электронных систем, т.к. эти системы демонстрируют большое разнообразие основных состояний, которое постоянно увеличивается. Например, в течении последних трех-четырёх десятилетий появились такие СКЭС материалы как ВТСП (медные, железные), сверхпроводники с тяжелыми фермионами, CMR, GMR, большое разнообразие квантовых магнетиков, спиновая жидкость, спиновый лед, квантовые критические точки и так далее. Причем «индустрия» создания новых материалов с экзотическими свойствами продолжает интенсивно работать. Пример тому массиванный поиск ВТСП с комнатной температурой перехода при нормальном давлении. Нет никаких

оснований предполагать, что интерес к исследованиям методом неупругого рассеяния нейтронов будет когда-либо снижаться в силу трех обстоятельств:

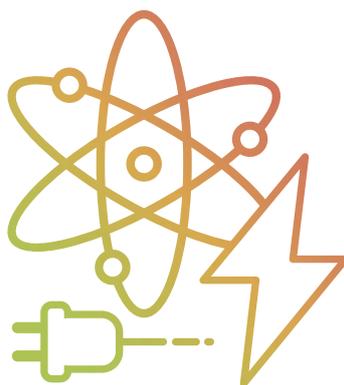
- Нейтрон имеет магнитный момент, магнитное неупругое рассеяние нейтронов не имеет конкурента в лице неупругого рассеяния на синхротронных источниках.
- Магнитное НРН позволяет получать детальную, спектроскопическую информацию о динамике исследуемого материала на микроскопическом уровне, что не может быть достигнуто каким-либо другим методом.
- Синтез новых материалов, содержащих магнитоактивные атомы дает много новых интересных систем, требующих детального изучения магнитной динамики как с целью понимания их фундаментальных физических свойств, так и для их использования в прикладных задачах.

Приведенные в разделе примеры также демонстрируют ряд направлений с кругом задач, для решений которых необходимо наличие нескольких рефлектометров на перспективном источнике нейтронов в ОИЯИ для исследования сверхпроводящих и магнитных слоистых гетероструктур. Интенсивный поток нейтронов на установках на выведенных пучках позволит определять с высокой точностью корреляцию распределения концентрации элементов и намагниченности для широкого спектра элементов, исследовать тонкие магнитные эффекты связанные с изменением намагниченности <1%.

Создание перспективного источника нейтронов также даст возможность повысить интенсивность потока нейтронов на микрообразцах при проведении экспериментов по изучению атомной и магнитной структуры и свойств функциональных материалов при экстремальных внешних условиях (воздействие внешнего высокого давления и низкой температуры), что будет являться важным фактором для проведения данных исследовательских работ на новом, более высоком качественном уровне. Безусловно, на новом источнике нейтронов в составе установок на выведенных пучках должны быть дифрактометры для исследования микрообразцов при внешних экстремальных условиях (высокое давление, низкие температуры и др.).

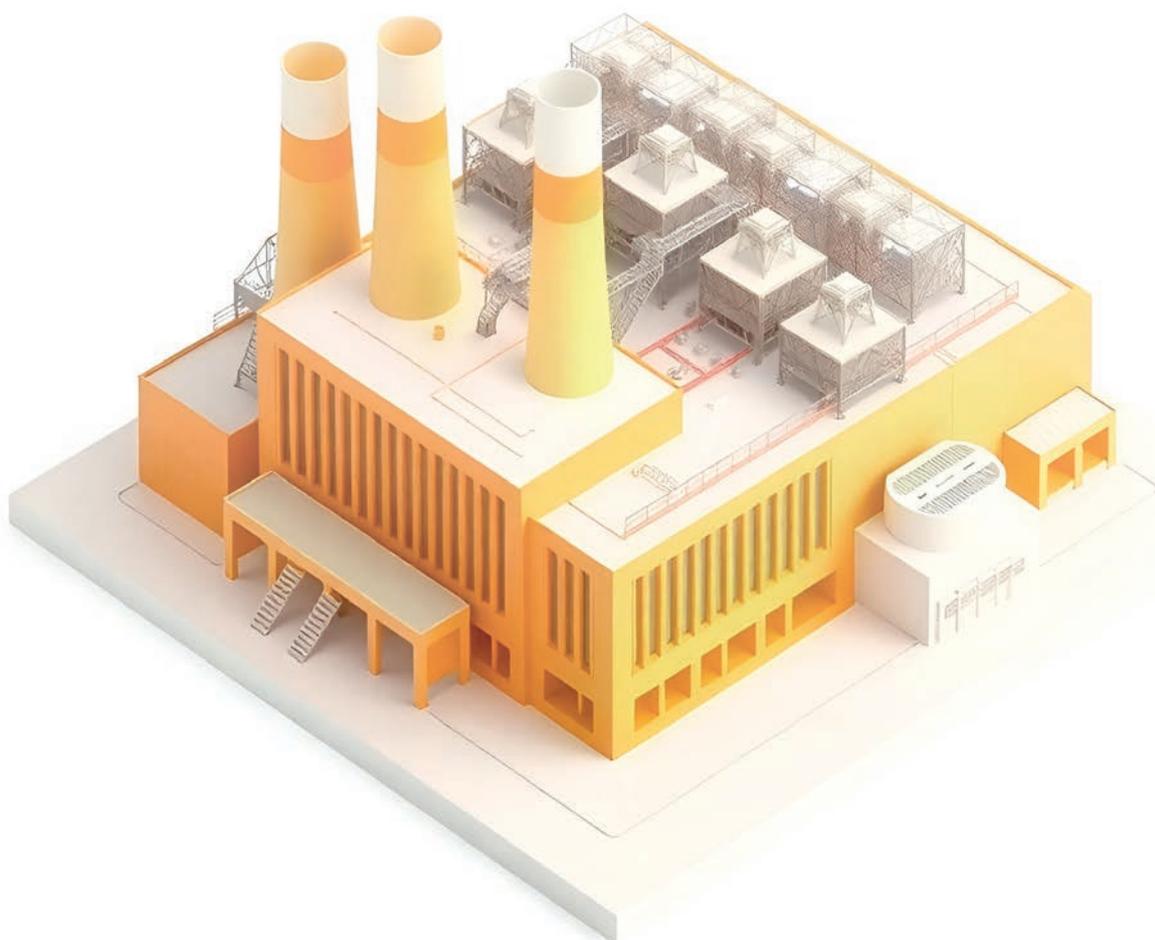
**По сравнению с реактором ИБР-2, увеличение плотности потока нейтронов на образце на установках на перспективном источнике нейтронов позволит реализовать следующие возможности:**

- уменьшение статистической ошибки измерений при заданном времени измерений, разрешении и интервале волнового вектора;
- уменьшение времени измерений для заданного разрешения в определённом интервале волнового вектора нейтронов;
- увеличение разрешения за счёт коллимации пучка и увеличения пролётной базы;
- увеличение статистически обеспеченного диапазона длин волн нейтронов;
- уменьшение размеров образца меньше  $5 \times 5 \text{ мм}^2$ ;
- проведение измерений в режиме реального времени.



---

Энергетика,  
химические источники тока



## 4.1. МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Уникальные свойства тепловых нейтронов обуславливают их применение для исследования материалов, важных для энергетики. Ряд исследовательских работ был выполнен с помощью методов рассеяния нейтронов в целях развития ядерной энергетики. В частности, исследовались внутренние напряжения в образцах корпусов реакторов. Методом нейтронной дифракции исследованы внутренние напряжения в образцах, вырезанных из натурального корпуса реактора ВВЭ-1000. Исследованы тонкий и толстый темплеты (плоские образцы, вырезанные из объемного изделия), выявлено влияние объемного фактора на распределение напряжений. Тангенциальные напряжения в феррите на границе раздела фаз феррит-аустенитное покрытие являются сжимающими, что позволяет считать изделие имеющим высокую стойкость к коррозионному растрескиванию [Сумин и др., 2010].



Нейтронная дифракция находит свое применение в изучении распределения остаточных напряжений, плотности дислокаций и размеров кристаллитов в образцах-свидетелях, изготовленных из стали 18MND5, используемых для оценки охрупчивания материала корпуса ядерных реакторов [Bokuchava & Petrov, 2020]. Иногда образцы-свидетели, прошедшие разрушительный тест Шарпи, необходимо восстановить и поместить обратно в непосредственной близости от корпуса реактора. Поэтому желательно чтобы процесс восстановления образца – сварки – вносил минимальные изменения в напряжённо-деформированное состояние и микроструктуру материала. Нейтронные дифракционные эксперименты были проведены, сканируя образцы по глубине и длине с небольшим измеряемым объёмом  $2 \times 2 \times 10 \text{ мм}^3$  (рисунок 4.1). Показано, что электронно-лучевая сварка в целом индуцирует наименьшие остаточные напряжения по сравнению с другими методами. Однако она приводит к возникновению вблизи сварных швов областей с повышенными плотностями дислокаций и сильнее других методов измельчает зёрна стали, что заметно повышает предел текучести материала вблизи сварных швов.

Благодаря отличным механическим свойствам, коррозионной стойкости и низкому поглощению нейтронов, сплавы Zr-Nb широко применяются в конструкциях ядерных реакторов. Кристаллографическая текстура, формирующаяся в ходе процессов термомеханической обработки этих сплавов, обуславливает анизотропию физических свойств изделий и влияет на механизмы их деградации: например, преимущественную ориентировку преципитатов гидридов, радиационную ползучесть или распухание. С помощью дифракции нейтронов исследуются кристаллографические текстуры в трубах высокого давления, сделанных из сплава Zr+2.5%Nb с помощью многоступенчатого процесса: экструзия при  $800^\circ\text{C}$ , охлаждение на воздухе при комнатной температуре, холодная пилигримовая прокатка и отжиг при  $400^\circ\text{C}$  в течение 24 ч [Malamud et al., 2018]. Установлено, что в трубах формируется специфическая микроструктура и острая однокомпонентная текстура с преимущественной ориентировкой осей  $[0001]$  сплава в касательном, а нормалей к плоскостям  $\{10\text{-}10\}$  – в аксиальном направлении труб (рисунок 4.2). Обнаружено, что текстура в конечной части трубы несколько острее, чем в передней. Измерения на различных нейтронных дифрактометрах продемонстрировали, что погрешности в определении положения, объёма и ширины

текстурных компонент с помощью нейтронной дифракции малы и сопоставимы с ожидаемыми в процессе производства труб. Это исследование подтвердило, что дифракция нейтронов позволяет изучать текстуры в объёме образца, обеспечивая великолепную статистику зёрен и превосходную точность.

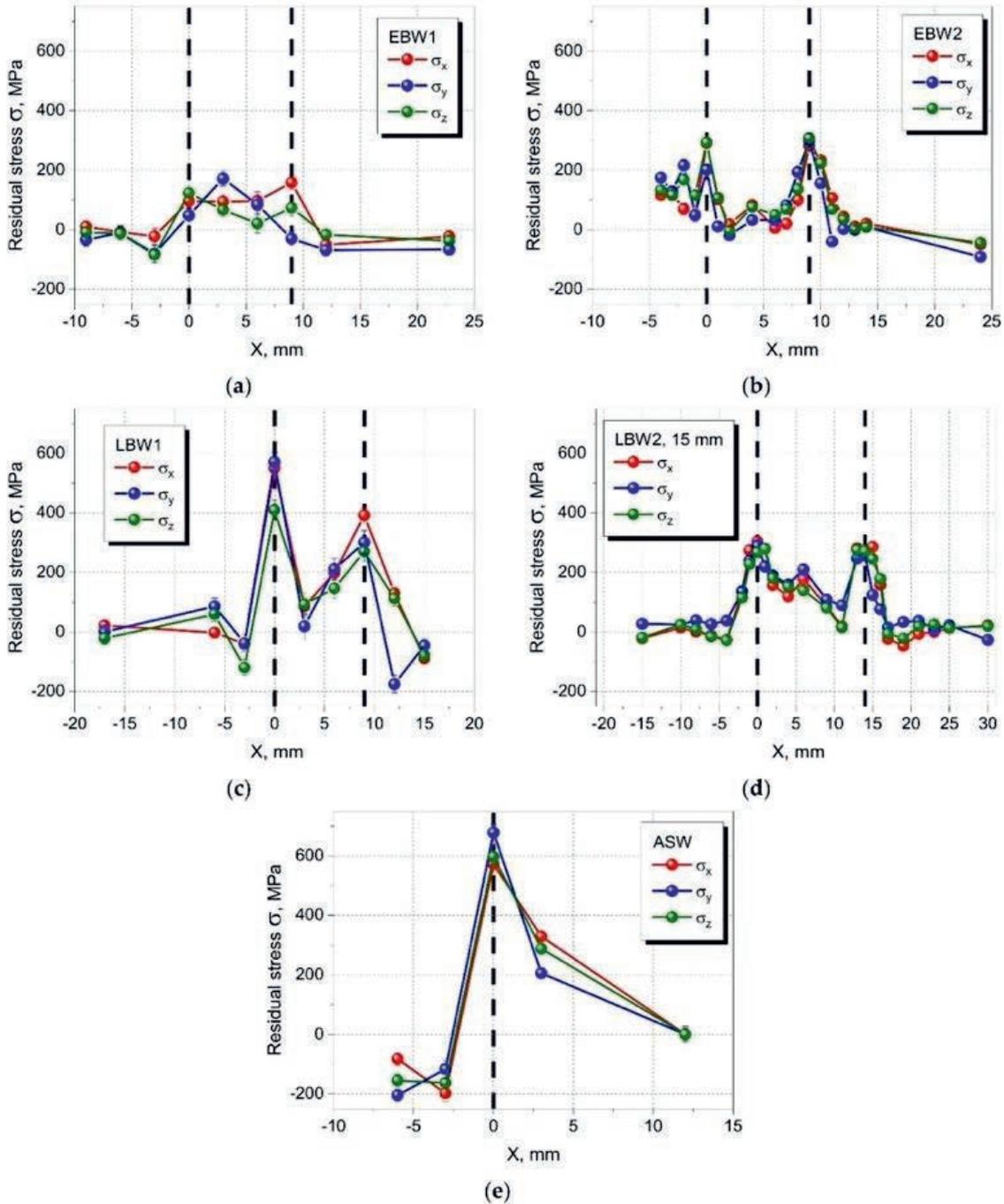


Рис. 4.1. Главные компоненты тензора остаточных механических напряжений 1-го рода в восстановленных сваркой после теста Шарпи образцах стали 18MND5; показаны различные режимы сварки: дуговая сварка шпилек (ASW), электронно-лучевая сварка (EBW), лазерная сварка (LBW). Ось X координатной системы направлена вдоль образцов перпендикулярно сварочным швам, ось Z – перпендикулярно поверхности образцов. Пунктиром отмечены положения сварных швов [Bokuchava & Petrov, 2020].

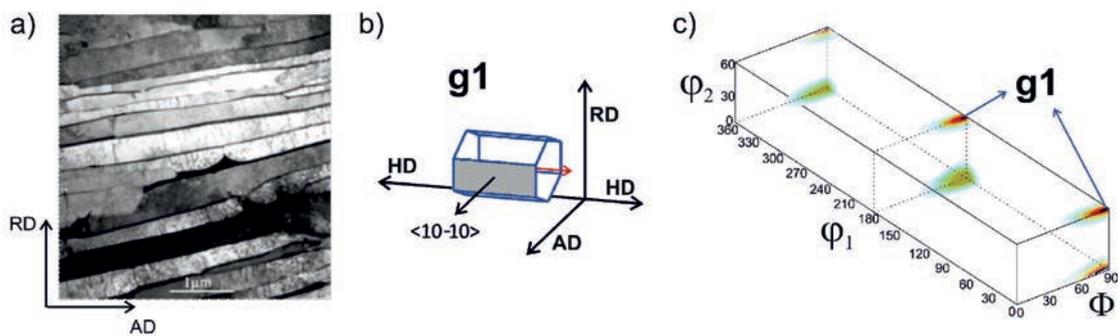


Рис. 4.2. Микроструктура и текстура трубы высокого давления из сплава Zr+2.5%Nb: результаты СЭМ (a), схематичное изображение основной текстурной компоненты  $g_1$  (b), распределение ориентационной интенсивности в ориентационном пространстве в нотации углов Бунге (c). RD – радиальное, AD – аксиальное и HD – касательное к трубе направления [Malamud et al., 2018].

Разработка источников энергии будущего неразрывно связана с управляемым термоядерным синтезом в термоядерных реакторах (токамак), которые требуют, в частности, точного измерения магнитных полей для обеспечения работы. В токамаках используются в основном довольно надежные индуктивные преобразователи на основе металлических приемных катушек с интеграторами для измерения топологии распределения магнитного поля. Индуктивные преобразователи подходят для такой функции в токамаках с длительностью импульса магнитного поля не более нескольких десятков секунд. Увеличение длительности импульсов до 3600 с для токамаков нового поколения, таких как ITER, приводит к увеличению стационарной части импульса, что приводит к значительному снижению точности измерения магнитного поля. Кроме того, высокие потоки нейтронов могут генерировать радиационно-индуцированные сигналы в интеграторах, вызывая дополнительную составляющую погрешности измерения магнитного поля. Исследование радиационной стойкости материалов и устройств, которые работают в высоких радиационных полях, требует проведения необходимых исследований на экспериментальных установках, с близкими по характеристикам условиями. Например, ряд работ был выполнен для исследования датчиков Холла, созданных на основе InAs/i-GaAs при облучении их быстрыми нейтронами и гамма-квантами на реакторе ИБР-2 в ЛНФ [Bolshakova et al., 2015].

Для проведения работ по изучению радиационной стойкости материалов и электроники в потоке быстрых нейтронов и гамма квантов, а также проведения методических работ, на перспективном источнике нейтронов необходимо предусмотреть экспериментальный канал с возможностью доступа к позициям облучения в непосредственной близости с источником с возможностью *in situ* измерения сигналов.

#### 4.2. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ

Одним из возможных направлений развития энергетики является применение органических солнечных батарей. Лёгкие, гибкие, полупрозрачные и потенциально дешёвые батареи могут стать широко используемым возобновляемым источником энергии. Однако необходимы дополнительные исследования для улучшения их эффективности и долговременной стабильности.

В органических солнечных батареях конверсия происходит вследствие поглощения фотонов в полимере-доноре, например, поли-(3-гексилтиофене), РЗНТ, с образованием

экситона. Он, в свою очередь, разделяется на свободные носители заряда на интерфейсе донор–акцептор. В качестве акцептора обычно используются небольшие молекулы, например, производный фуллерена метиловый эфир [6,6]–фенил–С61–масляной кислоты (PCBM). Для совершенствования характеристик батареи необходимо чтобы в активном слое расстояние между интерфейсами донор–акцептор было сопоставимо с длиной диффузии экситона (~ 20 нм). Времяпролётное малоугловое рассеяние нейтронов при скользящем падении пучка оказывается наилучшим методом для исследования морфологии активного слоя. С помощью него, например, было показано, что добавление 1,8–октенедитиола в систему РЗНТ: PCBM (рисунок 4.3) улучшает растворимость PCBM в аморфном РЗНТ и уменьшает средние расстояния между областями PCBM и размер областей РЗНТ, что упрощает образование экситонов [Wienhold et al., 2020]. Как следствие, улучшается эффективность конверсии и увеличивается ток короткого замыкания батареи.

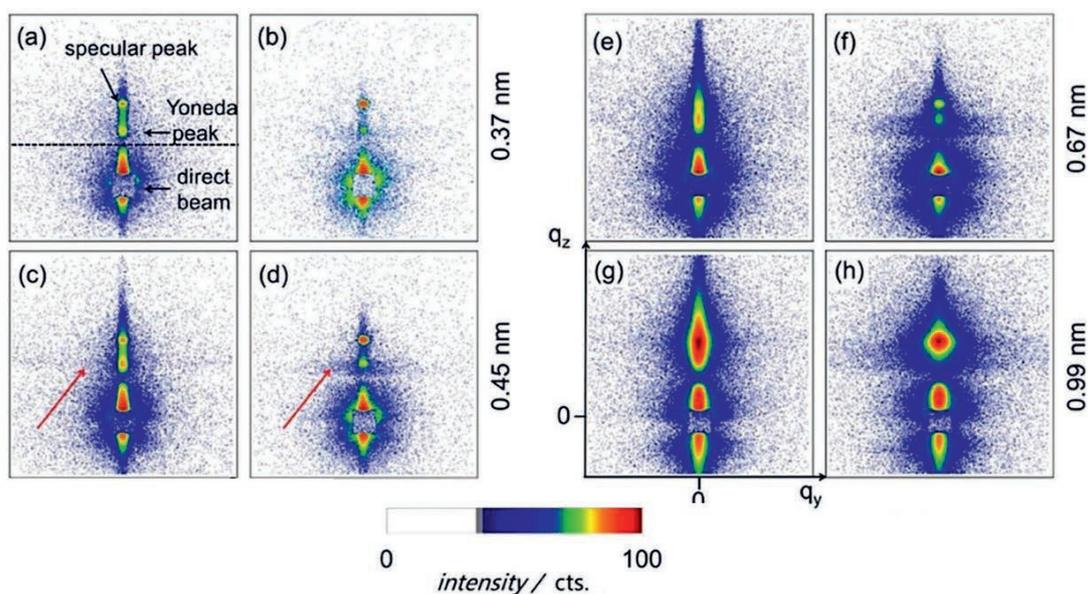


Рис. 4.3. Времяпролётное малоугловое рассеяние нейтронов при скользящем падении пучка на тонкой плёнке РЗНТ:PCBM без добавления растворителя (a, c, e, g) и с добавлением 5 об.% 1,8–октенедитиола (b, d, f, h). На (a) показаны поверхность образца (пунктирная линия), прямой пучок, зеркальный пик и пик Ионеды, на (g) – ориентация компонентов вектора рассеяния [Wienhold et al., 2020].

Незаменимым для изучения динамики структуры активного слоя органических солнечных батарей оказывается метод квазиупругого рассеяния нейтронов, крайне чувствительного к флуктуациям водорода в полимерах из-за большой длины некогерентного рассеяния атома водорода. Представленные примеры являются начальной стадией изучения органических материалов для применения в солнечных батареях. Более активному развитию исследований по данному направлению будет способствовать создание новых источников нейтронов с высокосветосильными установками на выведенных пучках.

### 4.3. ХИМИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ ТОКА

Наша повседневная жизнь уже не представляется без мобильных устройств, электроавтомобилей, электросамокатов и других устройств, источниками энергии для которых служат твердотельные аккумуляторы. Основные требования, предъявляемые к таким

источникам энергии – это емкость или время непрерывной работы до повторной зарядки, долговечность, масса, размеры, рабочий диапазон температур и др. Огромное количество исследований материалов для литий-ионных аккумуляторов было выполнено с помощью методов рассеяния нейтронов, в частности, [Avdeev et al., 2019; Kosova et al., 2015].

Литий-ионные аккумуляторы широко применяются в самых разных областях. Тем не менее, относительно небольшое содержание лития в коре Земли и прогнозируемое истощение экономически выгодных запасов лития к середине 21 века, делают необходимым разработку новых типов аккумуляторов. В настоящее время активно ведутся исследования электродных материалов для создания коммерческих натрий-ионных аккумуляторов. Благодаря высокой проникающей способности тепловых нейтронов, чувствительности к лёгким атомам в структуре и тому, что энергия тепловых нейтронов сопоставима с типичными энергиями возбуждений кристаллической структуры, методы рассеяния нейтронов находят применение в этих исследованиях [Shah et al., 2021].

Например, с помощью *operando* дифракции нейтронов на электрохимической ячейке  $\text{Na}_{0.5}\text{Ni}_{0.25}\text{Mn}_{0.75}\text{O}_2$  + твёрдый углерод (рисунок 4.4), было обнаружено локальное упорядочение ионов Ni и Mn, связанное с большой разницей в их валентности. Также были определены последовательности фазовых превращений в катодном материале и было установлено, что при напряжении больше 4 В катод переходит в новую структурную фазу O3s, представляющую собой полностью Na-обеднённую фазу O3 (пространственная группа R-3m) [Liu et al., 2020].

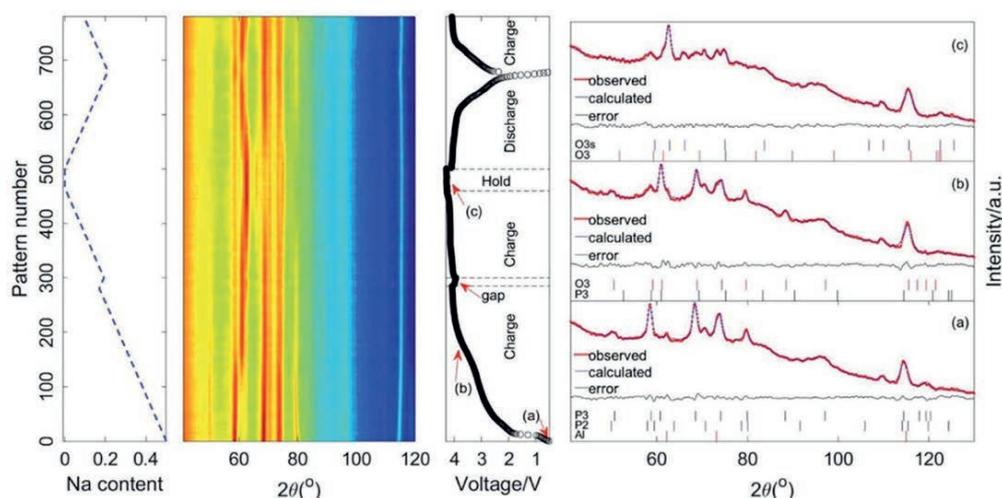


Рис. 4.4. Нейтронограммы электрохимической ячейки  $\text{Na}_{0.5}\text{Ni}_{0.25}\text{Mn}_{0.75}\text{O}_2$  + твёрдый углерод (интенсивность показана цветом), измеренные *operando* при циклировании со скоростью 10 мА/г. Показаны расчётное содержание натрия, напряжение на ячейке и дифрактограммы при разных состояниях ячейки, отмеченных красными стрелками [Liu et al., 2020].

Эксперименты по неупругому рассеянию нейтронов позволили измерить плотности фононных состояний в перспективном катодном материале. Была установлена связь изменений в динамике ионов натрия с открытием одно- и двумерных путей диффузии натрия при структурных фазовых переходах в слоистом оксиде  $\text{Na}_{0.7}\text{CoO}_2$  [Juranyi et al., 2015]. В ходе разработки новых твёрдых электролитов с целью удешевления натрий-ионных аккумуляторов, улучшения стабильности функционирования и повышения безопасности, также проводятся нейтронографические исследования [Gao et al., 2023]. Нет сомнений, что поиск новых материалов для химических источников тока будет вестись и в будущем, а методы рассеяния нейтронов будут играть значительную роль в исследованиях таких материалов, например, в калий-ионных или мультивалентных металл-ионных аккумуляторах [O'Donnell & Greenbaum, 2020].

#### 4.4. ВОДОРОДНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

Использование водорода для производства, накопления и потребления энергии представляет огромный интерес с точки зрения кардинального снижения выбросов парниковых газов. Одной из важнейших задач материаловедения в этой области является разработка новых материалов для хранения водорода, включая различные гидриды, пористые материалы. Для решения этой задачи необходимы методы рассеяния нейтронов: дифракция, неупругое и квазиупругое рассеяние [Zhang et al., 2022; Klein et al., 2023]. Преимущество нейтронов в подобных исследованиях проявляется в их чувствительности к изотопической замене водорода на дейтерий, которая дает методике дополнительные возможности. Так, метод *in situ* дифракции нейтронов позволяет исследовать структуру и кинетику гидратации нанокompозитов  $\text{MgD}_2\text{-TiD}_2$  [Ponthieu et al., 2013]. Дешёвый и безопасный для окружающей среды гидрид магния способен (обратно) накапливать до 7.6 вес.% водорода, однако кинетика адсорбции и десорбции водорода чрезвычайно медленная. С помощью реакционного шарового помола удаётся произвести насыщенные водородом нанокompозиты  $\text{MgD}_2\text{-TiD}_2$ , с отличной кинетикой адсорбции и десорбции водорода, которая вызвана ограничением роста зёрен фаз Mg и  $\text{MgD}_2$  нановключениями  $\text{TiD}_2$  и когерентностью границ между  $\text{MgD}_2$  и  $\text{TiD}_2$  (рисунок 4.5), благодаря чему сохраняются короткие пути диффузии водорода в Mg-матрице во время обратимого насыщения водородом.

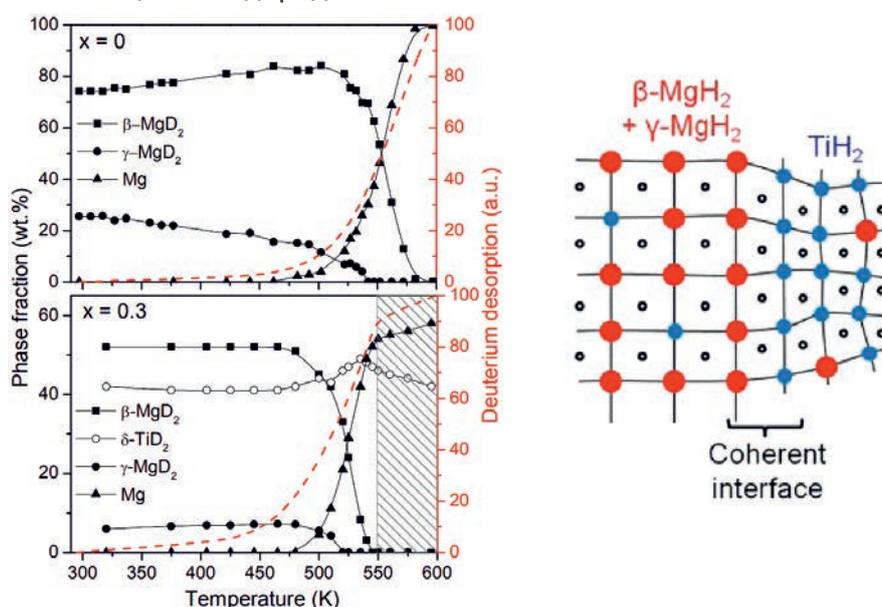


Рис. 4.5. Изменение фазового состава нанокompозитов  $\text{MgD}_2$  и  $0.7 \text{MgD}_2 + 0.3 \text{TiD}_2$  при термодесорбции дейтерия при нагреве со скоростью 0.5K/мин (слева, штриховая линия показывает долю десорбированного дейтерия) и схематичное изображение межфазной границы (справа) [Ponthieu et al., 2013].

Рассеяние нейтронов играет незаменимую роль в исследованиях хитозана – материала, рассматриваемого для производства электродов либо протонообменных мембран для различных топливных элементов. Это полисахарид природного происхождения, который содержится в грибах, водорослях, губках, червях и моллюсках, и при повышении влажности демонстрирует хорошую протонную проводимость. С помощью квазиупругого рассеяния нейтронов исследовалась динамика протонов в гидратированном хитозане. Показано, что гидратированный хитозан проявляет протонную проводимость при температурах  $> 238 \text{ K}$ . Ключевую роль в протонной проводимости играет перенос протона от гидроксильных и аминогрупп хитозана к окружающим молекулам гидратационной воды, а также медленная динамика гидратационной воды. Показано, что подвижная гидратационная вода способствует

протонированию вследствие практически одинаковых энергий активации процесса протонирования и прыжковой диффузии гидратационной воды [Hirota et al., 2022].

Благодаря высокой проникающей способности нейтронов и высокой чувствительности методов рассеяния нейтронов к водороду, нейтронная радиография позволяет визуализировать изменение распределения воды в процессе работы водородных топливных элементов (рисунок 4.6) [Nasu et al., 2022].

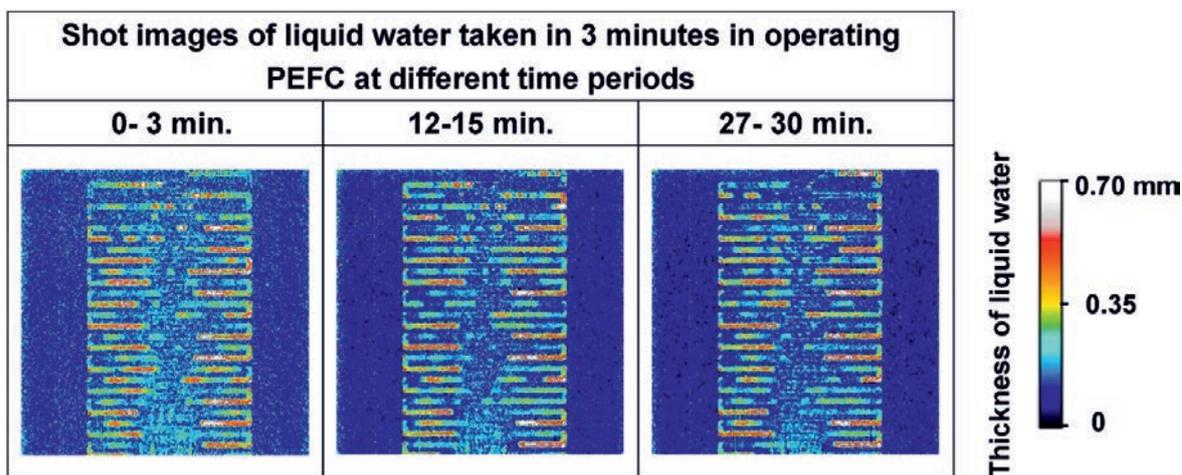


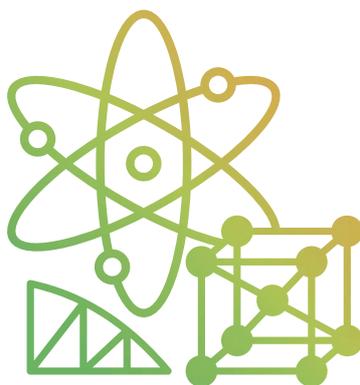
Рис. 4.6. Распределение жидкой воды в действующем полимерном электролитном топливном элементе с водоотталкивающим газодиффузионным слоем в качестве катода в разные моменты времени. Плотность тока составляет  $1 \text{ A cm}^{-1}$ , температура ячейки  $75^\circ\text{C}$ , относительная влажность газа 73% [Nasu et al., 2022].

Подобные эксперименты незаменимы для решения задач по разработке мощных, стабильных и безопасных водородных топливных элементов.

## 4.5. ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙТРОННЫХ МЕТОДОВ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ЭНЕРГЕТИКИ

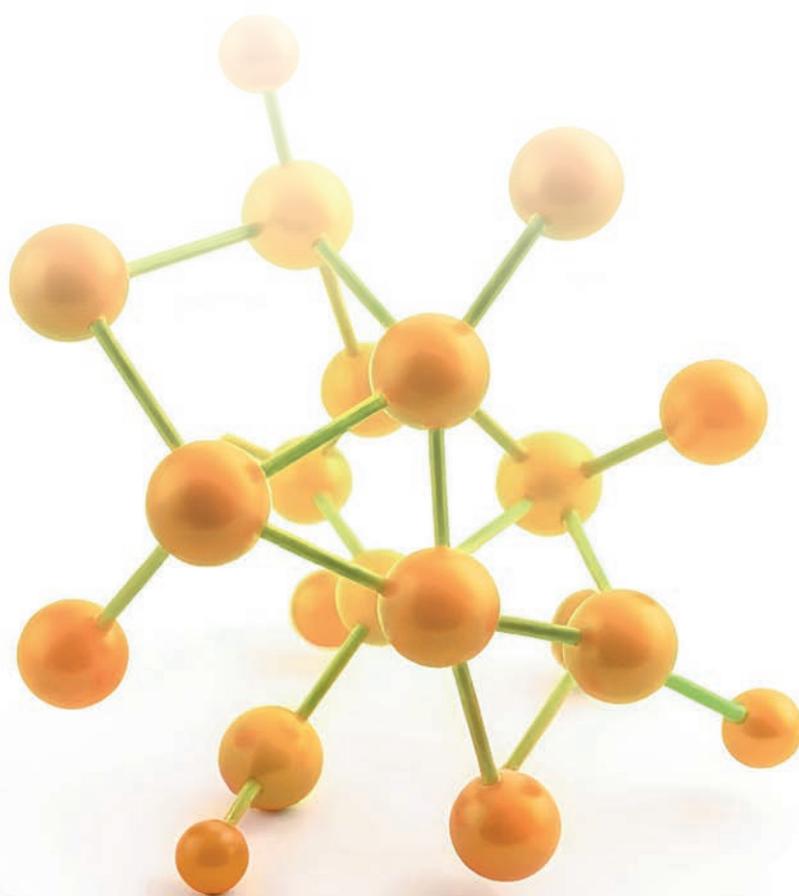
Рассеяние нейтронов позволяет решать огромное количество задач в самых разных областях материаловедения, необходимых для развития генерации и хранения энергии. В том числе тех, которые будут представлять интерес в ближайшие десятилетия: развитие ядерной и термоядерной энергетики, изучение новых материалов для водородной энергетики, перспективных источников тока, например, K-ионные, мультивалентные металл-ионные аккумуляторы. Развитие альтернативных источников энергии, с улучшением их эффективности, долговечности и экологичности, таких как преобразователей солнечной энергии, требуют поиска и изучения новых материалов и изучения их структуры и динамики.

В связи со столь широким разнообразием задач, которые будут решаться еще не одно десятилетие, на перспективном источнике нейтронов требуется создать установки на выведенных пучках, включающих в себя установки малоуглового рассеяния, дифрактометры, спектрометры неупругого и квазиупругого рассеяния, установки для исследования радиационной стойкости и проведения методических работ. Для изучения *in situ* процессов необходимо развитие приборной базы окружения образца с топливными водородными ячейками и химическими источниками тока, нагрузочными машинами и др. Во многих случаях исследования необходимо проводить в реальном времени, что требует высоких потоков нейтронов.

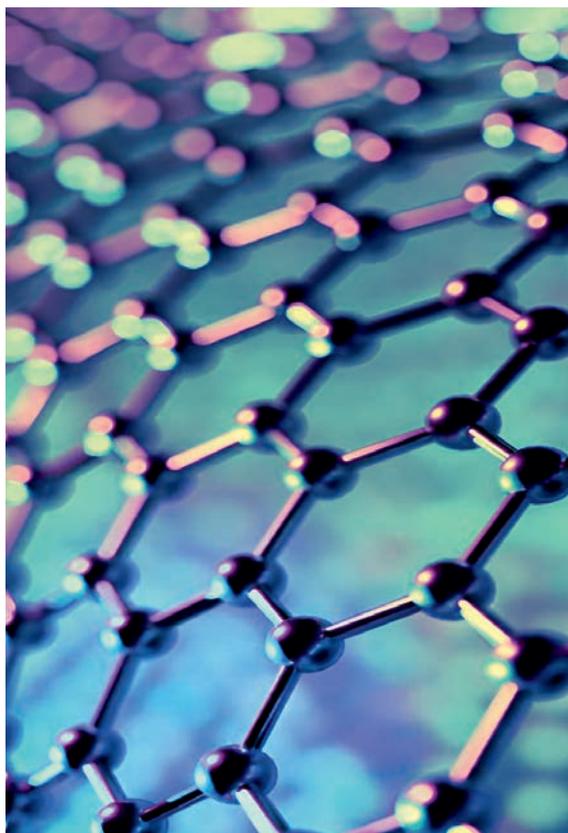


---

# Материаловедение



Материаловедение – междисциплинарная наука, изучающая связь между составом, структурой, процессами обработки и свойствами материалов для оптимизации производства и применения готовых изделий в медицине, энергетике, строительстве, машиностроении и других отраслях. Материаловедение рассматривает широчайший спектр составов и структур, как хорошо известных и повсеместно применяющихся металлов, сталей, сплавов, стёкол, цементов, керамик, полупроводников и др., так и появляющихся и привлекающих внимание в последние десятилетия высокоэнтропийных сплавов и сплавов с гигантской магнитострикцией, супер-дуплексных сталей, объёмных металлических стёкол, металл-органических каркасов, нано- и биоматериалов, метаматериалов и др. Для производства готовых изделий используются как классические методы механической и термической обработки, сварки и др., так и новые, например, процессы интенсивной пластической деформации или аддитивные технологии. Несмотря на то, что ещё в первых работах по рассеянию тепловых нейтронов был отмечен один из их главных недостатков – небольшое количество доступных источников нейтронов по сравнению с источниками рентгеновского излучения и электронов [Shull & Wollan, 1948], дифракция, малоугловое и неупругое рассеяние нейтронов, нейтронные радиография и томография, а также рефлектометрия находят широкое применение при изучении структуры и микроструктуры, фазового состояния и состава, преимущественных ориентировок зёрен, остаточных механических напряжений, динамики атомов и молекул всевозможных материалов. Крайне полезными оказываются чувствительность рассеяния нейтронов к лёгким элементам, особенно водороду, разным изотопам одного и того же химического элемента, а также магнитное рассеяние нейтронов. Вследствие большой проникающей способности тепловых нейтронов, возможно исследовать объёмные ( $> 100 \text{ см}^3$ ) образцы, что важно, когда в материале могут существовать градиенты фазового состава, кристаллографической текстуры и т.п., либо поверхностные эффекты. В этом случае использование поверхностно-чувствительных методов измерений, например, рентгеновского дифракционного анализа кристаллической структуры, может привести к неверным выводам о связи структуры материала и его свойств (рисунок 5.1) [Sumnikov et al., 2022]. Необходимо отметить возможность добиться отличного разрешения и симметричной формы дифракционных пиков при использовании рассеяния нейтронов по методу обратного времени пролёта, что открывает возможность прецизионных исследований микроструктуры (определение плотности дислокаций разных типов, распределение кристаллитов материала по форме и размеру, присутствие различных дефектов упаковки) по нейтронным дифракционным данным [Vokuchava, 2020].



Спектр задач, решаемых с помощью методов рассеяния нейтронов при исследованиях различных материалов, очень широк. Рассмотрим лишь отдельные примеры, которые распределены по тематикам исследований. Такое разделение в достаточной степени условно. Например, сплавы с эффектом памяти формы широко используются и в медицине, и в аэрокосмической отрасли, и в робототехнике, а методы рассеяния нейтронов используются не только для исследований изменений их кристаллической структуры, кристаллографической

текстуры, микроструктуры, внутренних механических напряжений и т.п. (в том числе in situ) при термоупругом мартенситном превращении, обуславливающим эффект памяти формы, но также для изучения их формирования при процессе производства готовых изделий из этих материалов (в том числе, с помощью аддитивных технологий) или при изготовлении изделий с помощью сварки.

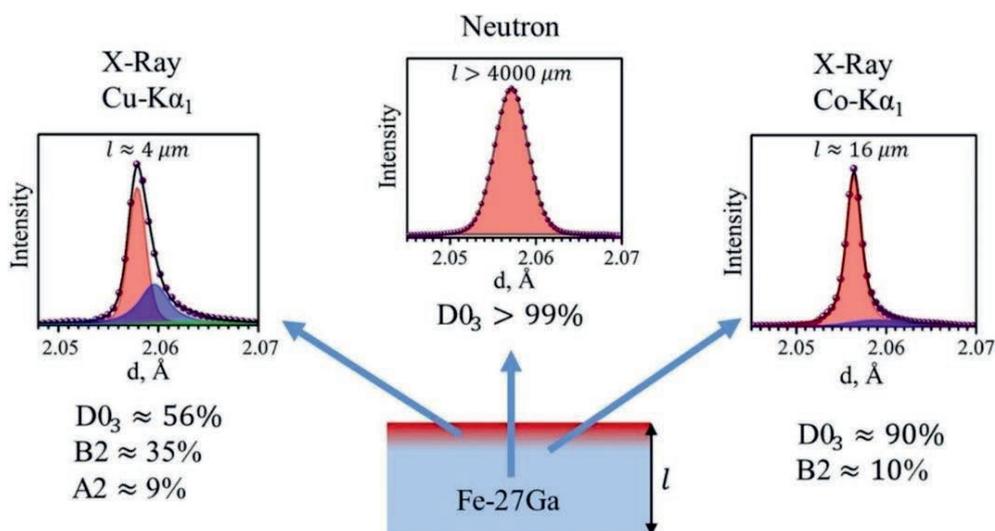


Рис. 5.1. Зависимость измеренного с помощью дифракционных методов фазового состава магнестрикционного Fe-Ga сплава от глубины проникновения используемого излучения [Sumnikov et al., 2022].

## 5.1. КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

### 5.1.1. Стали

Широкое применение нашли методы рассеяния нейтронов в исследованиях конструкционных материалов во всех отраслях промышленности: аэрокосмической, химической, нефтегазовой, машиностроении, станкостроении, металлургии, строительстве и т.д. В том числе активно исследуются стали: конструкционные, инструментальные, и особенно стали специального назначения.

Например, при изучении дуплексных нержавеющей сталей 22Cr-5Ni (2205) и 25Cr-7Ni (2507), обладающих превосходной прочностью и устойчивостью к агрессивным средам, вследствие чего применяющихся в химической и нефтегазовой промышленности, методом малоуглового рассеяния нейтронов было показано формирование в результате длительного старения (до 6000 ч.) состояния фазового расслоения. Его следствием является упрочнение ферритной компоненты стали, увеличение её твёрдости и изменение режима её деформации при нагрузках [Xu et al., 2019]. Дальнейшие исследования необходимы чтобы выяснить ли механизм охрупчивания стали от температуры, а также определить механизм фазового превращения в феррите при высоких температурах, которым может являться либо спинодальный распад, либо образование и рост зародышей.

В работе [Liang et al., 2020] с помощью дифракции нейтронов был исследован эффект водородного охрупчивания супер-дуплексной нержавеющей стали UNS S32760. Было показано, что в аустените насыщение водородом увеличивает плотность дислокаций, в

результате чего аустенитная компонента стали деформируется пластически. В феррите, напротив, после насыщения водородом плотность дислокаций несколько падает (рисунок 5.2).

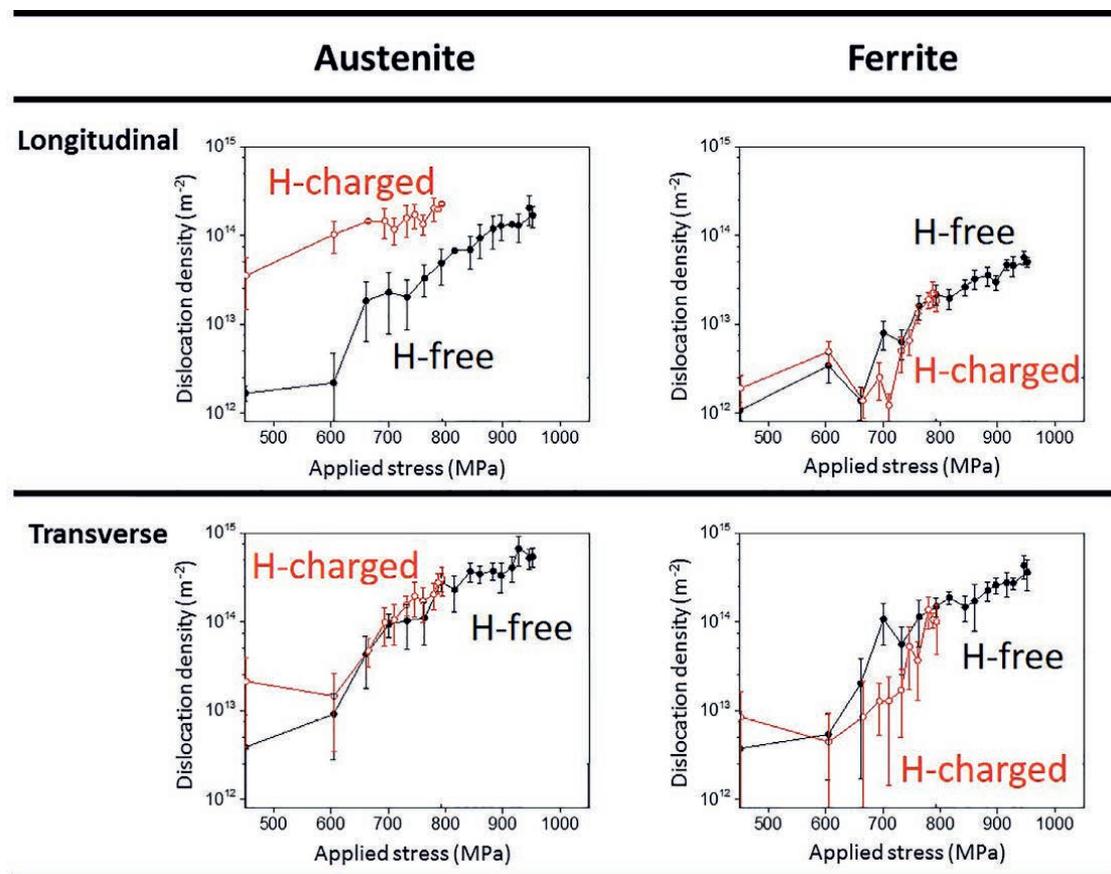


Рис. 5.2. Эволюция плотности дислокаций в аустенитной и ферритной компонентах супер-дуплексной нержавеющей стали UNS S32760 до и после насыщения водородом при деформации со скоростью  $10^{-4} \text{ c}^{-1}$  [Liang et al., 2020].

Совместно с фрактографическим анализом образцов, нейтронографические исследования позволили предложить модель, описывающую процесс водородного охрупчивания в супер-дуплексных нержавеющих сталях. Исследования водородного охрупчивания различных конструкционных материалов представляются весьма перспективными в связи с потенциальным использованием водородного топлива и необходимостью конструирования соответствующих трубопроводов, хранилищ и т.п. [Wang et al., 2022a]. Методы рассеяния нейтронов помогут создать модели, позволяющие прогнозировать срок службы конструкций, давать оценки критических нагрузок и оптимизировать микроструктурный дизайн дуплексных нержавеющих сталей.

### 5.1.2. Сплавы

Методами рассеяния нейтронов активно исследуются различные сплавы. Интерес вызывают как их атомная и магнитная структуры, их упорядочение и характерные дефекты, так и характеристики готовых изделий: фазовый состав, кристаллографическая структура, микроструктура. Благодаря высокой проникающей способности тепловых нейтронов, исследования проводятся на объемных образцах.

Лёгкие алюминиевые сплавы являются повсеместно используемыми конструкционными материалами. Их прочность может быть повышена, например, с помощью термомеханической обработки, значительно увеличивающей плотность вакансий и дислокаций в структуре. Как правило, это приводит к снижению пластичности материала. Однако формирование в алюминии широких малоугловых границ позволяет получить лёгкий пластичный сплав с высоким пределом прочности. С помощью метода полного рассеяния нейтронов было показано, что в сплаве Al +  $\approx 1$  вес.% ZnO (20 нм наночастицы) появляются связи алюминий-кислород (рисунк 5.3), причём кислород занимает межузельные позиции в решётке алюминия [Joo et al., 2023]. Области, насыщенные кислородом, формируют широкие малоугловые границы, в которых, в свою очередь, образуются кластеры дислокаций, облегчающие дислокационное скольжение на начальной стадии пластической деформации. При увеличении степени деформации выход дислокаций на поверхность малоугловой границы способствует дислокационному упрочнению.

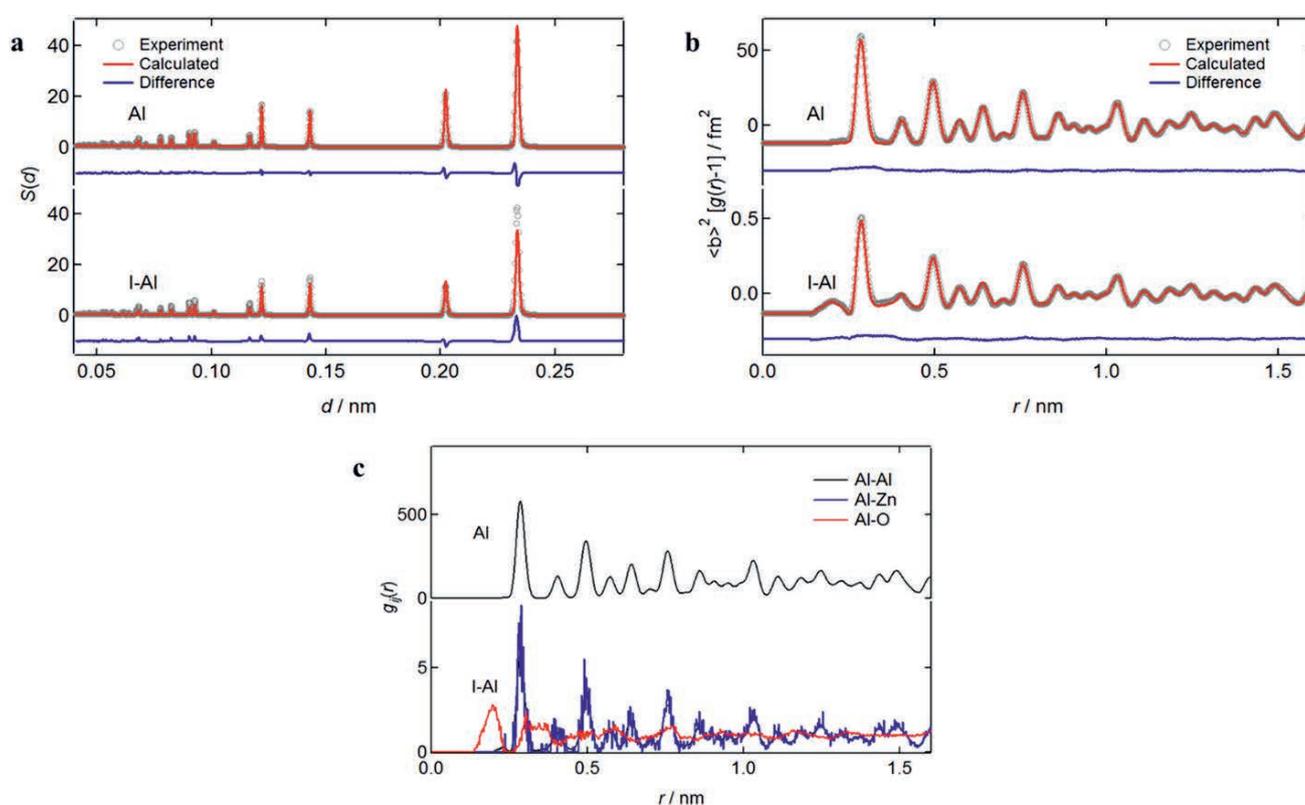


Рис. 5.3. Нейтронограммы чистого алюминия и алюминия с межузельными атомами кислорода (a); соответствующие им парные корреляционные функции (b); частичные парные функции распределения для различных пар атомов (c) [Joo et al., 2023].

В 2010-е годы значительно возрос интерес к высокоэнтропийным сплавам, то есть сплавам, содержащим не менее пяти элементов, причём количество каждого из них должно лежать в пределах 5–35 ат %. Такие материалы характеризуются высокой энтропией смешения, поэтому их свойства и протекающие в них процессы существенно отличаются от известных металлов и сплавов. Потенциально могут быть получены высокоэнтропийные сплавы, обладающие крайне высокой твердостью, жаропрочностью, коррозионной стойкостью, пластичностью и т.п., причём в широком диапазоне температур и других условий. В научно-исследовательской работе по созданию высокоэнтропийных сплавов с улучшенными характеристиками находят применение методы рассеяния нейтронов. Например, с помощью *in*

*situ* дифракции нейтронов был изучен процесс неупругой деформации мелкозернистых ( $\approx 6$  мкм) сплавов  $\text{Co}_{20}\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Mn}_{20}\text{Ni}_{20}$ ,  $\text{Co}_{35}\text{Cr}_{20}\text{Mn}_{15}\text{Ni}_{15}\text{Fe}_{15}$  и  $\text{Co}_{35}\text{Cr}_{25}\text{Mn}_{15}\text{Ni}_{15}\text{Fe}_{10}$  со скоростью деформации  $10^{-3} \text{ c}^{-1}$  [Wei et al., 2022]. Анализ позиций и профилей дифракционных пиков позволил рассчитать упругие деформации кристаллической структуры, плотности дислокаций, вероятности существования дефектов упаковки и двойников в структуре (рисунок 5.4) на различных стадиях деформации. Последние два сплава обладают лучшими пластическими и прочностными свойствами (предел прочности  $\text{Co}_{35}\text{Cr}_{25}\text{Mn}_{15}\text{Ni}_{15}\text{Fe}_{10}$  на 40% выше, чем у  $\text{Co}_{20}\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Mn}_{20}\text{Ni}_{20}$ ), но за счёт разных физических механизмов, что и было установлено с помощью дифракция нейтронов на объёмных образцах высокоэнтропийных сплавов.

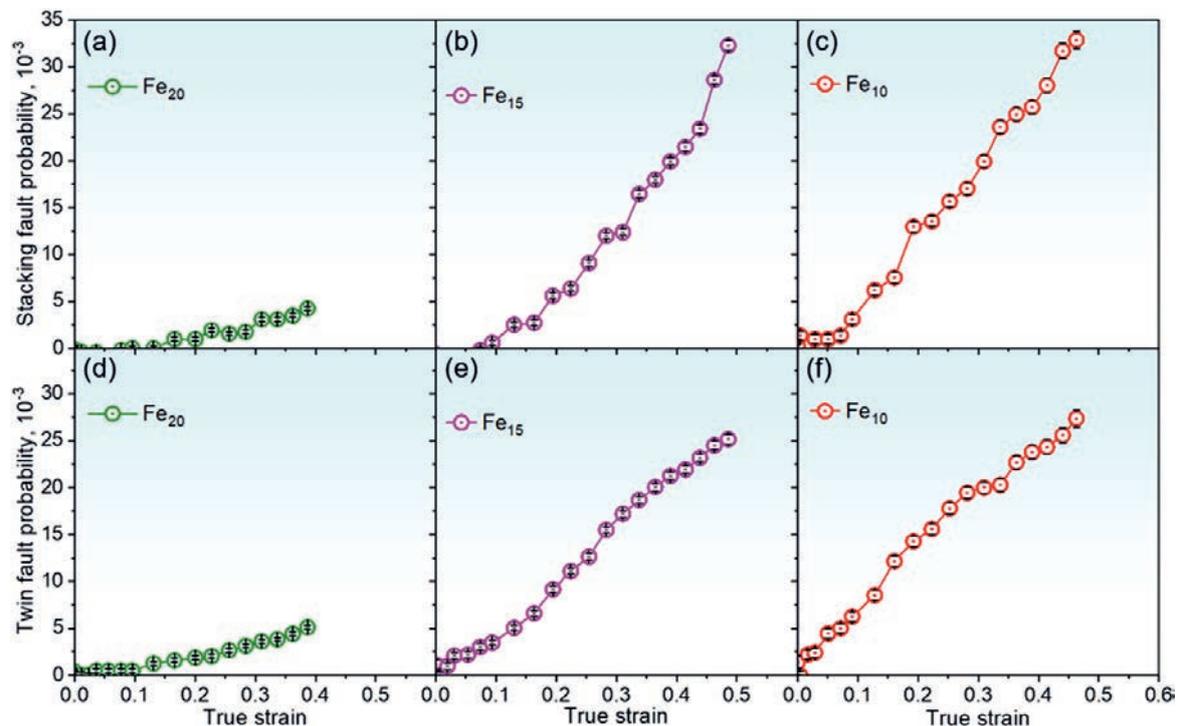


Рис. 5.4. Рассчитанные по нейтронографическим данным вероятности дефектов упаковки (a, b, c) и двойников (d, e, f) в сплавах  $\text{Co}_{20}\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Mn}_{20}\text{Ni}_{20}$  (обозначен  $\text{Fe}_{20}$ ),  $\text{Co}_{35}\text{Cr}_{20}\text{Mn}_{15}\text{Ni}_{15}\text{Fe}_{15}$  ( $\text{Fe}_{15}$ ) и  $\text{Co}_{35}\text{Cr}_{25}\text{Mn}_{15}\text{Ni}_{15}\text{Fe}_{10}$  ( $\text{Fe}_{10}$ ) [Wei et al., 2022].

Отметим, что возможность изготовления высокоэнтропийного сплава с использованием различных изотопов одного и того же химического элемента, хорошо различимых с помощью рассеяния нейтронов, может существенно облегчить задачи изучения атомного упорядочения и динамики этих сплавов. Предстоит решить также множество задач в области термомеханической обработки высокоэнтропийных сплавов, а также, например, разработать технологии их сварки [Li et al., 2021], в которых применение методов рассеяния нейтронов будет играть значительную роль.

Естественно, для оптимизации процессов производства готовых изделий требуются исследования кристаллографических текстур большого количества образцов, прошедших обработку при различных условиях. В настоящее время характерные времена измерения текстур на специализированном нейтронном дифрактометре в ЛНФ ОИЯИ составляют около суток, а на источниках нейтронов с установками с более высокими потоками, возможны измерения текстур в течение нескольких минут (например, [Onuki et al., 2016]).

Существенное повышение потока нейтронов на образце на установках нейтронного рассеяния на новом источнике нейтронов ЛНФ ОИЯИ позволит измерять кристаллографические текстуры в больших сериях образцов и исследовать изменения текстур материалов *in situ*, в процессе пластической деформации, рекристаллизации или фазовых превращений.

### 5.1.3. Бетоны и стёкла

С помощью *in situ* нейтронной томографии могут исследоваться процессы миграции воды в бетоне, подвергнутом градиентному нагреву до 300°C для изучения физических причин раскалывания бетона при воздействии высоких температур и разработки технологии повышения структурной устойчивости бетонных конструкций при пожарах [Dauti et al., 2018]. Благодаря высокой чувствительности тепловых нейтронов к водороду, было напрямую зарегистрировано движение границы между сухим и мокрым бетоном и сопутствующая аккумуляция влаги перед этой границей за счёт дегидратации, испарения, конденсации и переноса вследствие градиентов температуры и давления по микротрещинам в бетоне. Такое увеличение влажности приводит к повышению порового давления и может вызвать раскалывание бетона. Установлено, что скорость высыхания бетона и величина области с повышенной влажностью зависят от максимального размера частиц наполнителя бетона (частицы осадочных и метаморфических горных пород). Бетон с максимальным размером частиц наполнителя 8 мм высыхает быстрее за счёт более разветвлённой системы микротрещин, однако и размер области повышенной влажности в нём почти вдвое больше, чем в бетоне с максимальным размером частиц 4 мм (рисунок 5.5).

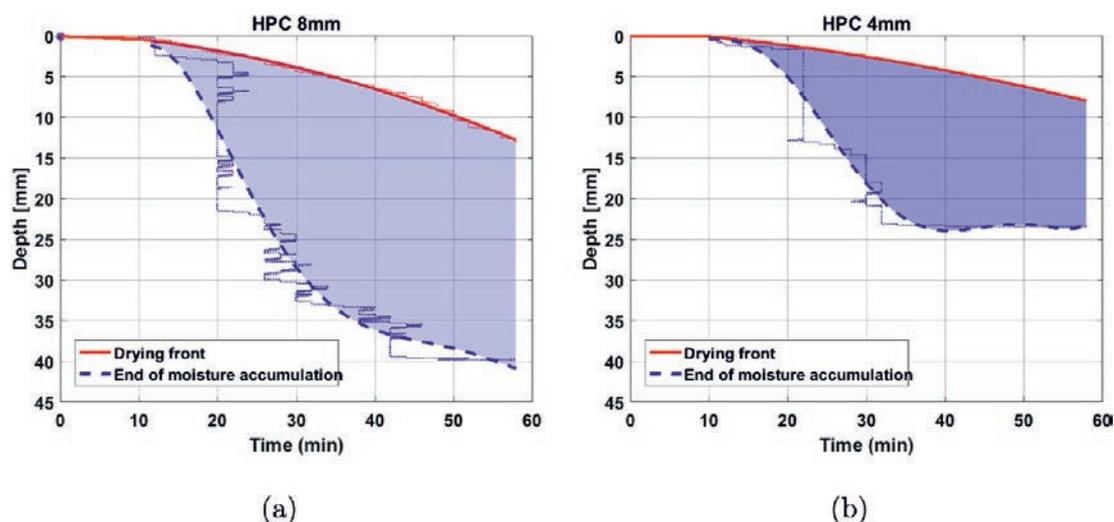


Рис. 5.5. Области повышенной влажности при высыхании бетона с максимальным размером частиц наполнителя 8 мм (a) и 4 мм (b) по данным нейтронной томографии [Dauti et al., 2018].

Время получения одного трехмерного нейтронного изображения составляет всего 1 минуту, однако этого можно достигнуть за счёт биннинга полученных данных и сопутствующего ухудшения пространственного разрешения до 200 мкм. Для изучения быстрых процессов с лучшим пространственным разрешением (20–50 мкм) необходимо значительное повышение потока нейтронов на установке. Принимая во внимание, что для восстановления трехмерных томографических данных необходимы сотни радиографических изображений, на более светосильных установках на перспективном импульсном источнике нейтронов возможно будет достичь суб-секундного временного разрешения при сохранении хорошего пространственного разрешения для проведения *in situ* томографических экспериментов.

Использование производственных отходов и ряда природных материалов в качестве дополнительных компонент связующего при производстве бетона может быть выгодно не только с экономической и экологической точек зрения, но и привести к созданию более прочных бетонов, стабильных в различных агрессивных средах. Так, добавка некоторых видов вулканического пепла в цемент приводит к формированию гидрата алюмо-силиката кальция C-A-S-H как связующего компонента прочного и устойчивого в морской воде бетона. С помощью квазиупругого рассеяния нейтронов [Kupwade-Patil et al., 2016] были получены индексы связанной воды, коэффициенты самодиффузии и средние длины скачков атомов на начальных стадиях затвердевания смесей портландцемента и вулканического пепла с разными средними размерами частиц. Установлено, что добавка небольшого количества более мелких частиц вулканического пепла (10 вес.%, размер зёрен 14 мкм) увеличивает индекс связанной воды (рисунок 5.6) и коэффициент самодиффузии, что означает большую концентрацию связанной «неподвижной» воды в материале. Увеличение размера частиц пепла или повышение их концентрации приводит к ускорению затвердевания, однако при этом в материале увеличивается количество свободной и подвижной воды и можно предположить, что при этом вулканический пепел не полностью вовлечён в процесс гидратации. Оптимального режима затвердевания и нужной итоговой прочности бетона можно достичь подбором концентрации и размера частиц вулканического пепла.

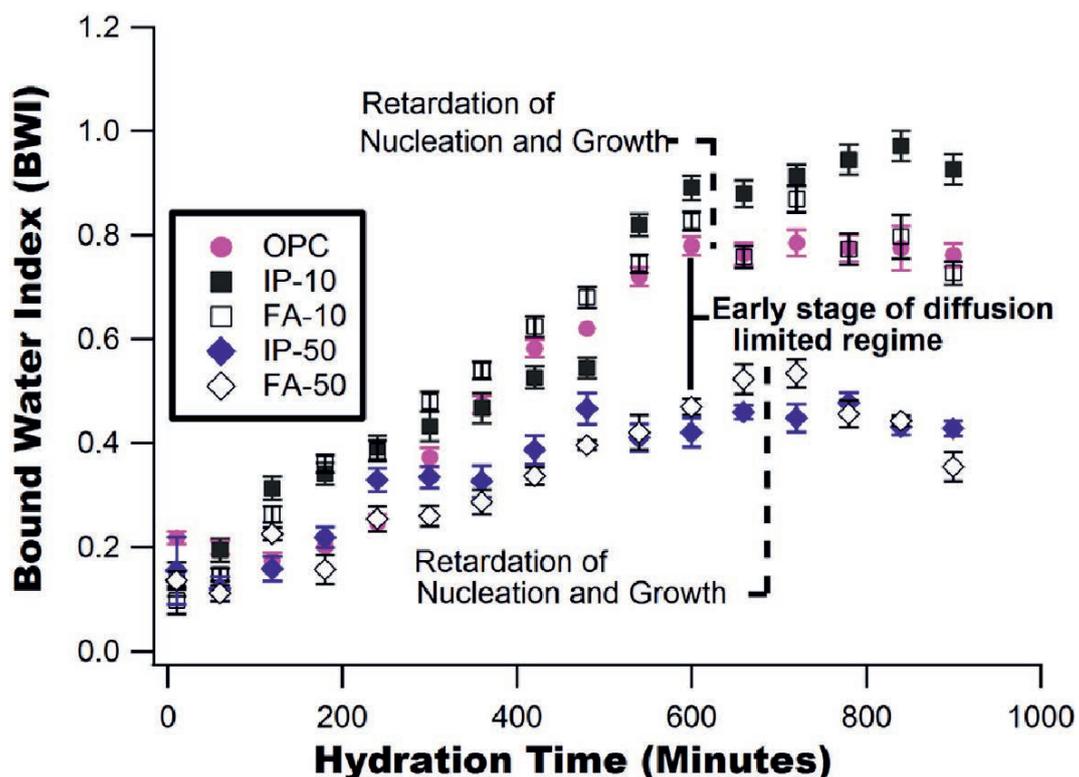


Рис. 5.6. Изменение индекса связанной воды при затвердевании портландцемента (OPC) и смесей портландцемента и вулканического пепла с размерами зёрен 17 мкм (IP) и 14 мкм (FA). Индекс 10 показывает, что в смеси содержится 10 вес.% вулканического пепла, 50 – 50 вес.% [Kupwade-Patil et al., 2016].

Стёкла на основе системы  $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  обладают высокими механическими свойствами, отличными оптическими свойствами и химической стойкостью. Поэтому они являются перспективными кандидатами для изготовления цементов и керамик, хранения

промышленных и ядерных отходов. Также есть указания, что  $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  стёкла входят в состав вещества коры и мантии Земли и их исследования будут способствовать лучшему пониманию условий и процессов, происходящих в литосфере. Физические свойства стекла определяются его химическим составом и структурой. В работе [Gong et al., 2021] для исследования структуры стекла, содержащего 42.3 вес.%CaO, 32.3 вес.%SiO<sub>2</sub>, 13.3 вес.%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и 5.2 вес.% MgO, были использованы методы полного рассеяния нейтронов и синхротронного излучения вместе с моделированием с помощью молекулярной динамики и теории функционала плотности. В результате была решена структура стекла (рисунок 5.7). Было установлено, что для ближайшего связывающего окружения с атомами кислорода, алюминий находится, в основном, в 4-координации с небольшой долей 5-координации, в то время как кальций и магний характеризуются более широким набором координаций со средними значениями  $-6.73$  и  $-5.15$ , соответственно. Анализ следующих ближайших соседей показал, что кальций более предпочтительно ассоциируется с кремнием и алюминием, формирующими каркас структуры. В исследованном стекле обнаружены нарушение правила Левенштейна, преимущественная ассоциация не связывающего кислорода с атомами кремния и другие интересные структурные особенности. Указывается, что для полного понимания связи состава, структуры и свойств таких стёкол при различных условиях требуются дальнейшие исследования, в том числе и *in situ* эксперименты по измерению полного рассеяния, для которых необходим высокий поток нейтронов в широком диапазоне переданных импульсов и низкий фон. И нейтронный поток, и фоновые условия должны быть существенно улучшены на установках на новом источнике ЛНФ ОИЯИ, открывая возможность для подобных экспериментов.

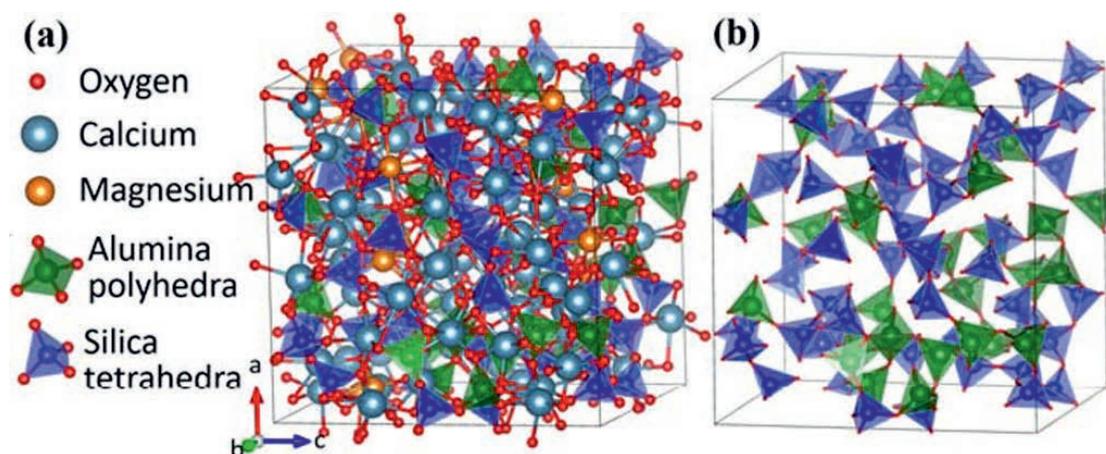


Рис. 5.7. Репрезентативная структура стекла  $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ , полученная после оптимизации с помощью теории функционала плотности (a); алюмосиликатный каркас структуры стекла (b) [Gong et al., 2021].

## 5.2. ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Понятие «функциональные материалы» объединяет огромное количество самых разнообразных материалов, которые сами по себе обладают различными свойствами и функциями. Сюда относятся металлы и сплавы, полимеры и керамики, нанокompозиты и металл-органические каркасы, магнитные жидкости и другие материалы, которые являются пьезо-, пиро- или сегнетоэлектриками, обладают магнитострикцией или эффектом памяти

формы, способны адсорбировать различные газы и так далее. Даже обзорные работы, посвящённые исследованиям функциональных материалов методами рассеяния нейтронов, как правило рассматривают лишь небольшую часть всех исследуемых материалов, свойств, методик (например, [Peterson & Papadakis, 2015]). Поэтому здесь и ниже будут рассмотрены лишь некоторые примеры исследования интересных материалов и систем.

### 5.2.1. Сплавы с эффектом памяти формы

Наиболее распространённым сплавом с памятью формы является нитинол (Ni–Ti с содержанием никеля несколько выше 50 ат.%), который обладает высокой прочностью, коррозионной стойкостью, коэффициентом восстановления формы, хорошей биосовместимостью. С помощью *in situ* дифракции нейтронов на образцах сплава Ni<sub>55</sub>Ti<sub>45</sub> было показано, что, несмотря на различную микроструктуру и текстуру литого, горячекатаного и штампованного образцов сплава, развитие преимущественных ориентировок зёрен при неупругой деформации в них происходит одинаково: направления [010] ориентируются вдоль приложенной механической нагрузки (рисунок 5.8) [Wang et al., 2021]. Данные нейтронографии позволили построить модель деформации сплава с памятью формы, учитывающую упругие деформации, возвращаемые и не возвращаемые при обратном мартенситном превращении пластические деформации, также включающую ориентацию разных вариантов мартенсита относительно внешней нагрузки.

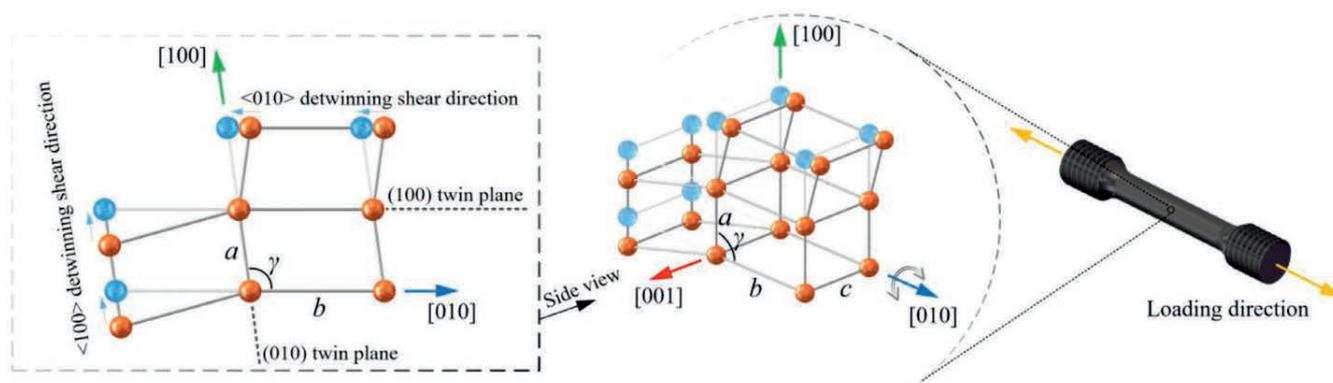


Рис. 5.8. Схема раздвойнивания сложного (010) + (100) двойника в моноклинном B19' мартенсите сплава Ni<sub>55</sub>Ti<sub>45</sub>: зёрна разворачиваются направлением [010] параллельно нагрузке для аккомодации сдвиговой деформации [Wang et al., 2021].

Нужно отметить, что диапазон температур термоупругого мартенситного превращения в Ni–Ti сплавах лежит ниже 100°C. Для некоторых применений, например, в аэрокосмической индустрии, необходимо разработать дешёвые, прочные, коррозионно-устойчивые сплавы с памятью формы, которые функционировали бы при температурах до 400°C [Ma et al., 2010]. Для этих целей одними из наиболее перспективных являются сплавы NiTi(Hf,Zr). Проведённые с помощью *in situ* дифракции нейтронов исследования сплава Ti<sub>29.7</sub>Ni<sub>50.3</sub>Hf<sub>10</sub>Zr<sub>10</sub> при его циклировании в области температур мартенситного перехода позволили обнаружить в материале 10% остаточного аустенита, не участвующего в превращении [Shuitcev et al., 2022]. Кроме того, обнаружено, что остаточный аустенит частично разупорядочен и одновременно с обратным мартенситным превращением в этом сплаве происходит упорядочение аустенита (рисунок 5.9). Так как атом Ti обладает отрицательной длиной когерентного рассеяния тепловых нейтронов, основные дифракционные пики аустенита в Ti<sub>29.7</sub>Ni<sub>50.3</sub>Hf<sub>10</sub>Zr<sub>10</sub> лишь на порядок интенсивнее сверхструктурных. При использовании рассеяния рентгеновских лучей или синхротронного излучения разница в интенсивностях таких пиков составляет более трёх

порядков, поэтому дифракция тепловых нейтронов представляется предпочтительным методом изучения упорядочения в подобных системах. Однако присутствие атомов Ti, а также большое сечение поглощения тепловых нейтронов атомами Hf, приводят к низкой интенсивности рассеяния нейтронов и к необходимости длительных измерений. Например, время измерения кристаллографической текстуры образцов сплава  $Ti_{29.7}Ni_{50.3}Hf_{10}Zr_{10}$  на установке SKAT реактора ИБР-2 ЛНФ ОИЯИ может быть оценено в ~ 10 суток, а учёт текстуры необходим для корректных структурных исследований. **Существенное повышение потока нейтронов на установках на новом источнике ЛНФ ОИЯИ позволит измерять кристаллографические текстуры высокотемпературных сплавов с памятью формы на основе NiTi(Hf,Zr) и других сплавов за значительно более короткое время и с большей точностью.**

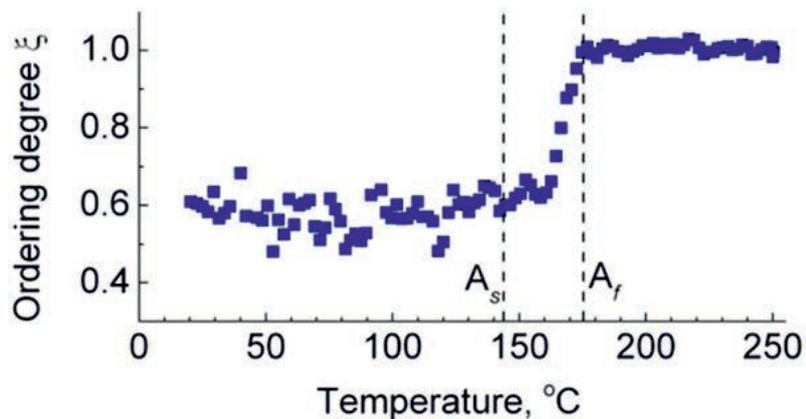


Рис. 5.9. Степень упорядочения аустенита при обратном мартенситном превращении в сплаве  $Ti_{29.7}Ni_{50.3}Hf_{10}Zr_{10}$  (без учёта слабой кристаллографической текстуры) [Shuitcev et al., 2022].

Функциональные сплавы на основе Mn-Cu характеризуются эффектом памяти формы с небольшим гистерезисом обратимой термдеформации, поэтому могут использоваться в течение множества температурных циклов без значительных потерь функциональных свойств. Измерения малоуглового рассеяния нейтронов сплавом Mn-13Cu помогло установить, что старение в течение 1-120 ч. в температурном диапазоне 400-560°C сопровождается расслоением сплава на Mn-обогащённую матрицу, содержащую всего 3.5-6.5 ат.% Cu, и Cu-обогащённые кластеры с содержанием Cu 40-46 ат.% [Sun et al., 2021a]. Объёмная доля кластеров с ростом времени или температуры старения практически не изменяется, однако средний объём кластеров значительно увеличивается, то есть происходит слияние кластеров меньшего размера. Также при больших температурах и временах старения было обнаружено выпадение  $\alpha$ -Mn, что может влиять на функциональные свойства сплава. Было установлено, что температуры мартенситного превращения пропорциональны содержанию Mn в матрице. Применение *in situ* нейтронной дифракции (рисунок 5.10) позволило установить, что в бинарном Mn-13Cu сплаве температуры магнитного и структурного переходов совпадают, а тетрагональное искажение структуры плавно изменяется пропорционально квадрату параметра дальнего магнитного порядка, что соответствует полуфеноменологической теории для таких сплавов.

Добавление 3 ат.% хрома к Mn-12Cu сплаву приводит к заметному уменьшению температур мартенситного превращения в сплаве и увеличению температурного гистерезиса превращения, а также разрушает прямую пропорциональность тетрагонального искажения и квадрата параметра дальнего магнитного порядка [Sun et al., 2021b].

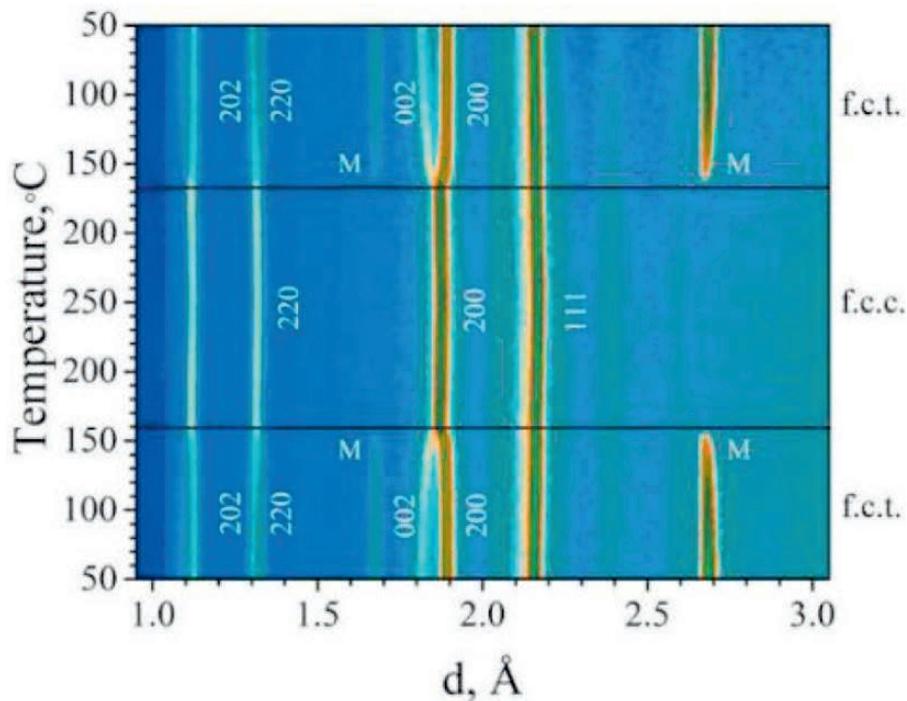


Рис. 5.10. Эволюция нейтронных дифракционных спектров в ходе цикла нагрева-охлаждения сплава Mn-13Cu, состаренного в течение 8 ч. при температуре 440°C, в области мартенситного превращения из гранецентрированной тетрагональной в гранецентрированную кубическую фазу и обратно. Антиферромагнитные пики обозначены M [Sun et al., 2021a].

Эти работы, проведённые на установках реактора ИБР-2, показывают, что для установления связи между составом функциональных сплавов, процессами их термомеханической обработки и необходимыми физическими свойствами, требуются измерения методами рассеяния нейтронов большого количества образцов. Нужно отметить, что из-за отрицательной длины когерентного рассеяния тепловых нейтронов атомом Mn, накопление дифракционных спектров образцов сплавов на основе Mn-Cu занимает значительное время. Дифрактограммы, измеренные с относительно невысокой статистикой (рисунок 5.11), позволяют определить фазовый состав сплава и основные структурные параметры, но делают невозможным количественный анализ микроструктурных особенностей материала, даже с использованием простых методов интегральной ширины. Можно лишь отметить, что магнитные пики значительно шире ядерных, таким образом, размер областей когерентного магнитного рассеяния, по-видимому, значительно меньше областей когерентного ядерного рассеяния. Из рисунков 5.10, 5.11 также видно, что антиферромагнитные пики в Mn-Cu сплавах сопоставимы по интегральной интенсивности с ядерными, что позволяет проводить анализ как кристаллографической, так и магнитной текстур с одинаковой точностью. Исследования магнитных текстур, а также их изменения при пластической деформации в присутствии магнитного поля или вблизи температур магнитного и структурного фазовых переходов, могут помочь в понимании физики и совершенствовании характеристик Mn-Cu сплавов и изделий из них.

Актуальным классом функциональных сплавов с эффектом памяти формы, в исследовании которых значительную роль играют методы рассеяния нейтронов: малоугловое рассеяние, дифракция, рефлектометрия, томография, являются сплавы с магнитным эффектом памяти формы [Río-López et al., 2021]. Как правило это сплавы Гейслера, среди которых наибольший интерес для промышленных и медицинских применений вызывает система Ni-

Mn-Ga, в которой удаётся достичь рекордных характеристик, например, значительных (> 10%) деформаций, индуцированных магнитным полем, или высоких (> 300°C) температур мартенситного превращения. Здесь интереснейшие и уникальные возможности предоставляет энергодисперсионная нейтронная радиография (рисунок 5.12), позволяющая исследовать морфологию двойников сплавов Гейслера на основе Ni-Mn-Ga, образующихся вследствие приложения внешнего магнитного поля, а также мозаичность кристаллов этих сплавов [Kabra et al., 2016].

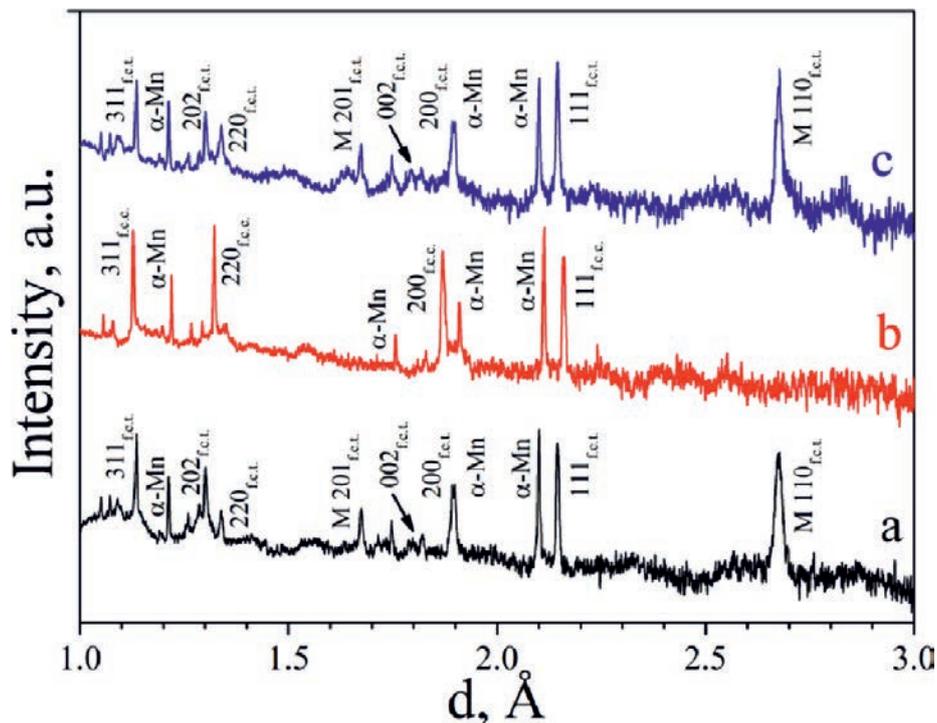


Рис. 5.11. Дифракционные спектры высокого разрешения сплава Mn-10Cu-4Cr, состаренного в течение 8 ч. при температуре 440°C, измеренные при комнатной температуре до нагрева (a), при температуре 250°C (b), и при комнатной температуре после охлаждения (c) [Sun et al., 2021b].

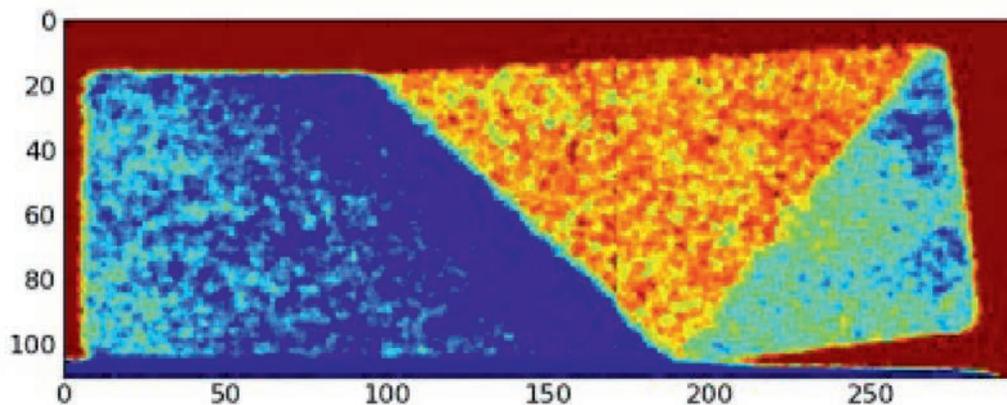


Рис. 5.12. Нейтронная радиография монокристалла Ni<sub>2</sub>MnGa, демонстрирующая спонтанное двойникование в магнитном поле [Kabra et al., 2016].

5.2.2. Самовосстанавливающиеся материалы

Интересным направлением, которое получило развитие в 21 веке, является разработка и исследование материалов, способных локально «залечивать» повреждения своей структуры. Из данных материалов можно создавать более надёжные и долговечные конструкции. Уже известны самовосстанавливающиеся («самозалечивающиеся») полимеры, бетон, керамики и даже электродные материалы. Весьма актуальны работы и по созданию самовосстанавливающихся сплавов [Zhang et al., 2020]. Примерами таких сплавов могут служить системы Fe–Au и Fe–Au–B–N. Во время старения этих сплавов, предварительно деформированных до деформаций 8 и 24%, при температуре 550°C были проведены эксперименты по малоугловому рассеянию нейтронов [Zhang et al., 2013]. Они показали, что при старении в деформированных образцах непрерывно происходит преципитация золота из матрицы сплава (рисунок 5.13). Добавление бора и азота замедляет кинетику осаждения золота. Золото оседает исключительно на дислокациях и границах зёрен из-за высокой энергии образования зародышей золота в железе. Вследствие эффективного «залечивания» дефектов атомами золота, время ползучести в сплаве Fe–Au существенно выше, чем в сплаве Fe–Cu, не обладающем таким свойством (рисунок 5.13).

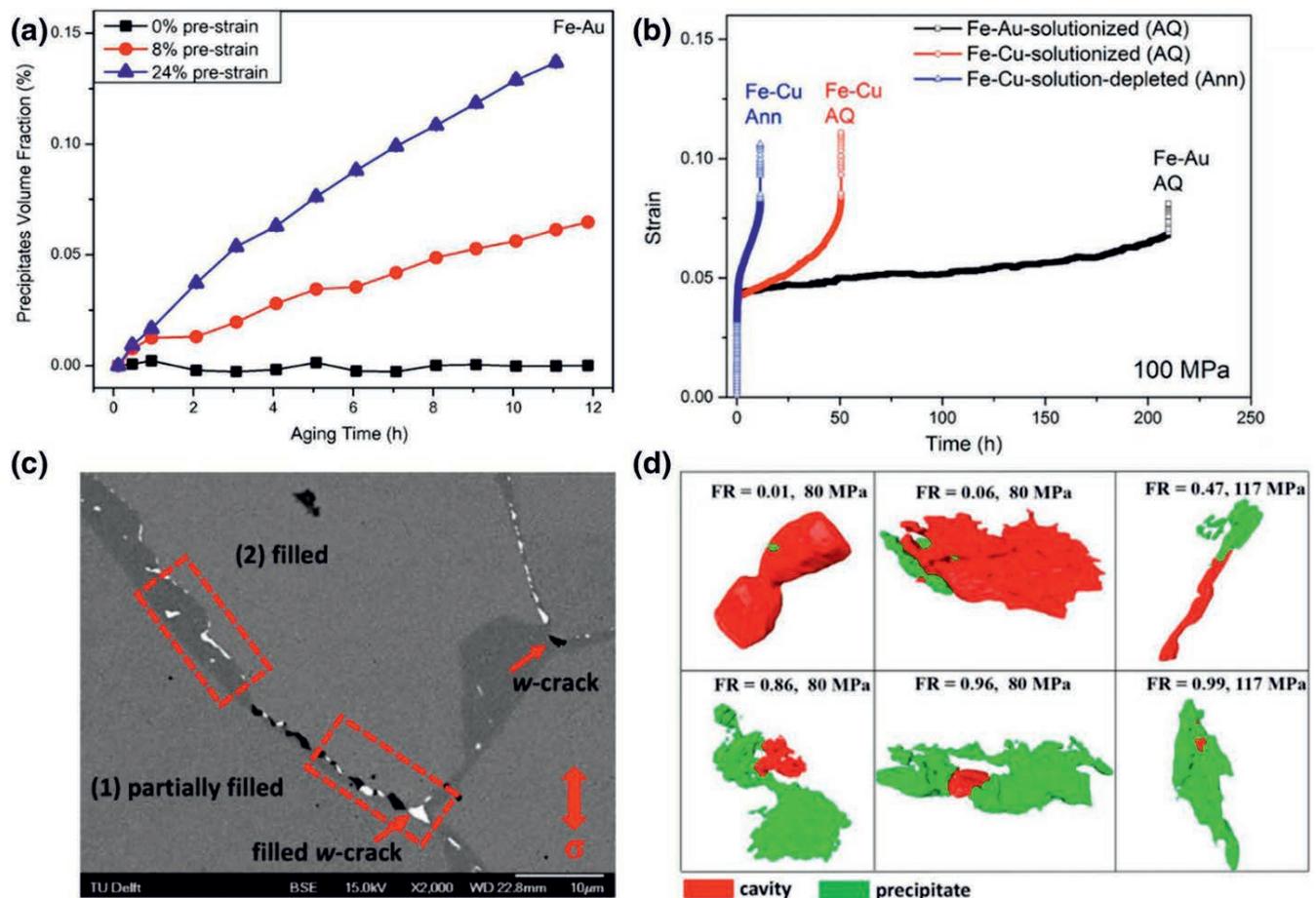


Рис. 5.13. Объём преципитатов золота в сплаве Fe–Au в зависимости от величины предварительной деформации (a); кривые ползучести сплавов Fe–Cu и Fe–Al при нагрузке 100 МПа (b); микрофотография заполненных и частично заполненных золотом пустот и микротрещин после ползучести (c); синхротронная микротомография различных пустот (d) [Zhang et al., 2020].

Активное развитие самовосстанавливающиеся материалы получили при разработке новых радио-вольтаических элементов. Выходная мощность бета-вольтаических элементов, использующих бета-активные изотопы, невелика. Элементы питания, использующие альфа-активные изотопы, могут иметь плотность энергии на шесть порядков выше, чем достижимо в электрохимических ячейках и функционировать на протяжении сотен лет, что обеспечивает им применение в космической отрасли, для питания аппаратуры в удалённых и труднодоступных регионах. Однако тяжёлые альфа-частицы серьёзно повреждают твёрдые полупроводники, что приводит к их быстрой деградации. Это ограничивает развитие альфа-вольтаиков. Выходом может являться использование жидкого самовосстанавливающегося полупроводника для преобразования энергии частиц в электрический заряд. В работе [Nullmeyer et al., 2018] с использованием метода полного рассеяния нейтронов показано (рисунок 5.14), что координация атомов в жидком полупроводнике Se-S практически не изменяется вплоть до максимальной полученной в исследовании дозы:  $4 \cdot 10^{11}$  Грей. Был сделан вывод, что жидкий Se-S обладает способностью восстанавливать радиационные повреждения, и, как следствие, его свойства практически не деградируют даже при высоких дозах облучения.

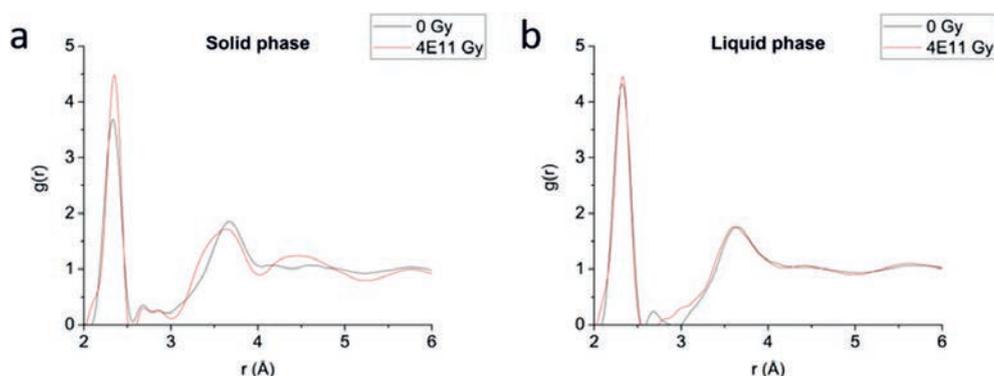


Рис. 5.14. Парные корреляционные функции в твёрдом (а) и жидком (б) Se-S. В твёрдой фазе видны различия в координации атомов до и после облучения, в жидкой фазе различия минимальны [Nullmeyer et al., 2018].

### 5.2.3. Метаматериалы

Метаматериалы — специально спроектированные структурированные композиты, приобретающие за счёт такой структуры свойства, не характерные для материала, из которого «выстроен» метаматериал, в том числе и не встречающиеся в природе. Схематично принцип построения метаматериала показан на рисунке 5.15.

Современные технологии уже позволяют производить трёхмерные метаматериалы с различными свойствами, например, ауксетики, материалы с отрицательным объёмным модулем, отрицательной плотностью, близким к нулю модулем сдвига, механической хиральностью, экзотическими электромагнитными и оптическими свойствами и др. [Kadic et al., 2019]. Потенциальные области применения метаматериалов также широки: «самосознающие» фильтры, датчики и актюаторы, действующие в отсутствие «обычных» источников питания и электронных компонент [Barri et al., 2021], линзы, радиопрозрачные поверхности, плащ-невидимка, сейсмоустойчивые конструкции, и др.

В настоящее время есть лишь единичные примеры исследований метаматериалов методами рассеяния нейтронов. Однако дифракция, малоугловое рассеяние нейтронов, рефлектометрия, томография и другие методы вполне могут использоваться для характеристики структуры и микроструктуры метаматериалов на различных «уровнях» его строения, показанных на рисунке 5.15 (а-d).

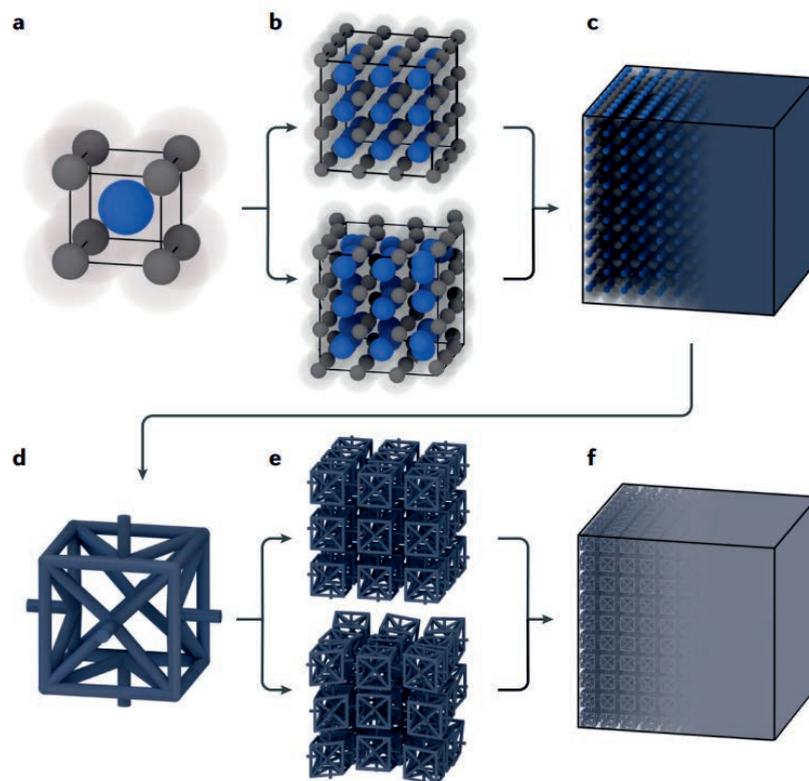


Рис. 5.15. Принцип построения трёхмерного метаматериала. Элементарная ячейка исходного материала (a); кристаллит/зерно исходного материала (b); исходный материал как эффективная (непрерывная) среда с соответствующими эффективными свойствами, такими как электрическая проводимость, оптический показатель преломления, модуль Юнга и т.п. (c); рационально спроектированная из эффективной среды — исходного материала — «элементарная ячейка» метаматериала; собранная из этих «элементарных ячеек» периодическая или аperiodическая трёхмерная структура метаматериала (e); представление метаматериала как новой эффективной среды с физическими свойствами, которые могут качественно и/или количественно выходить за рамки свойств исходного материала. Так, метаматериал с «элементарной ячейкой» (d), является ауксетиком [Kadic et al., 2019].

### 5.3. АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

В последнее десятилетие огромную популярность получили аддитивные технологии производства. Преимущества этого подхода состоят в том, что возможно изготавливать детали и компоненты сложной геометрии, а также минимизировать отходы производства. Существуют уже сложные изделия, изготовленные исключительно методами аддитивного производства, например, полностью функционирующий ракетный двигатель с «напечатанными» внутри корпуса каналами охлаждения [Nickels, 2018]. Современные аддитивные технологии, например, селективное лазерное плавление, селективное лазерное спекание и др. позволяют производить детали и компоненты из нескольких металлов, например, нержавеющей стали, сплавов титана и алюминия и др. [Hasanov et al., 2021]. Существует и ряд сложностей и проблем, связанных с дальнейшим развитием аддитивных технологий, таких как специфическая микроструктура и форма зёрен изготовленного материала, возможное присутствие в материале значительных остаточных напряжений, дефектов и пор, зачастую низкая усталостная прочность. Для решения этих проблем также применяются методы рассеяния нейтронов.

В работе [Sofras et al., 2022] с помощью *in situ* дифракции нейтронов и *ex situ* дифракции обратно рассеянных электронов были изучены особенности деформации объёмных образцов, изготовленных с помощью лазерного синтеза из порошка нержавеющей стали 304L на подложке (L-PDF) в атмосфере аргона. Было показано, что параметры синтеза позволяют контролировать кристаллографическую текстуру образцов, которая во многом обуславливает поведение материала в ходе неупругой деформации. Так, при растяжении со скоростью  $0.01 \text{ c}^{-1}$  в пластической области, в образце с исходной преимущественной ориентировкой осей  $\langle 111 \rangle$  параллельно направлению нагрузки наблюдалось наибольшее содержание  $\alpha'$  мартенсита, которое также увеличивалось с ростом деформации быстрее, чем в других образцах. На основании теоретических расчётов наилучшие деформационные свойства с точки зрения пластичности, индуцированной фазовым превращением, ожидалось в образцах с ориентировкой осей  $\langle 110 \rangle$  параллельно нагрузке, однако экспериментальные данные позволили установить, что ориентация  $\langle 111 \rangle$  вдоль нагрузки является наиболее благоприятной для облегчения эффектов пластичности, индуцированной фазовым превращением при растяжении. Обращает на себя внимание, что преимущественные ориентировки зёрен, измеренные с помощью дифракции нейтронов и дифракции обратно рассеянных электронов, в некоторых образцах совершенно различаются (рисунок 5.16), что указывает на необходимость использования методов, чувствительных к объёму материала (в данном случае, дифракции нейтронов) для изучения характеристик изделий, изготовленных аддитивными методами.

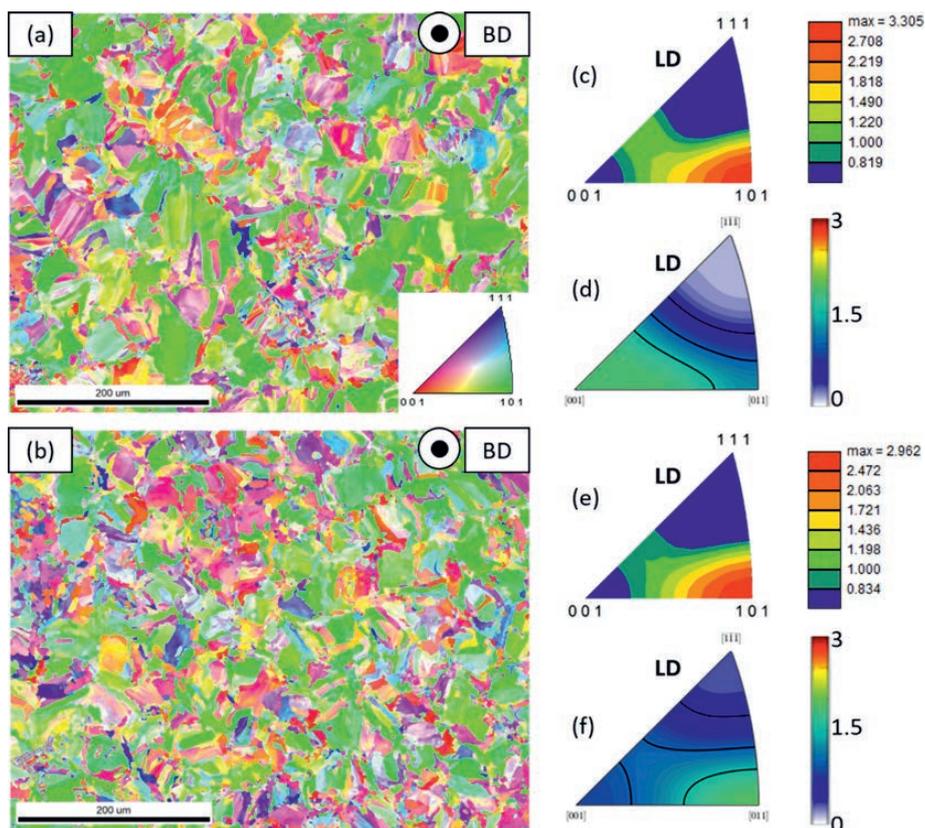


Рис. 5.16. Карта дифракции обратно рассеянных электронов (индикация ориентаций относительно направления приложенной нагрузки) (a); обратная полюсная фигура для направления нагрузки по данным дифракции обратно рассеянных электронов (c); обратная полюсная фигура для направления нагрузки по данным дифракции нейтронов (d) в образце С1 стали 304L. (b), (e), (f) – то же самое для образца С2. Образец С1 изготовлен с использованием лазера мощностью 150 Вт, и скоростью сканирования 450 мм/с; образец С2 – 100 Вт и 300 мм/с. BD – направление роста образца [Sofras et al., 2022].

В настоящее время аддитивные технологии являются одним из наиболее динамично развивающихся направлений «цифрового» производства. Принцип заключается в том, что изделие создается послойно, добавляя материал различными способами, например, наплавляя или напыляя металлический порошок, композитный или другой материал. Развитие аддитивных технологий требует применения современных методов контроля, таких как нейтронная томография [Podurets et al., 2021]. Переход от использования аддитивных технологий для прототипирования и изготовления отдельных деталей или узлов устройств к их промышленному применению в серийном производстве потребует огромного объёма исследовательской работы, в том числе и для дальнейшей оптимизации серийного производства. Уникальные возможности, предоставляемые методами рассеяния нейтронов, уже востребованы в этой области материаловедения и нет сомнений, что спрос на применение нейтронного рассеяния будет только возрастать в ближайшие десятилетия. **Одной из новых потенциальных возможностей на перспективном источнике нейтронов в ЛНФ ОИЯИ будет проведение *in situ* нейтронографических исследований непосредственно в процессе изготовления деталей и компонент при относительно небольших скоростях изготовления.**

### 5.4. НЕЙТРОННЫЕ МЕТОДЫ В ИССЛЕДОВАНИИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Методы рассеяния нейтронов позволяют изучать новые материалы, например, самовосстанавливающиеся материалы, высокоэнтропийные сплавы, изделия, полученные с помощью аддитивных технологий, метаматериалы и, несомненно, будут оставаться актуальными для исследований «традиционных» материалов: сталей, сплавов, керамик, подвергнутых различной термомеханической обработке.

Представленные данные показывают, что практически все методики рассеяния нейтронов, включая, например, дифракцию, малоугловое рассеяние, неупругое рассеяние, спин-эхо, энергодисперсионную радиографию и томографию и др., используются для исследований всевозможных конструкционных, функциональных, «умных», мета-, био- и наноматериалов и готовых изделий, а увеличение потока нейтронов на установках даст дополнительные возможности по улучшению точности измерений, расширению научных направлений и привлечению новых пользователей.

Всё чаще встречаются задачи, требующие измерения больших серий образцов, *in situ* измерений, в том числе с хорошим временным разрешением (например, *in situ* томография), уменьшения измеряемого объёма для проведения «локальных» измерений в объёмных образцах, прецизионных исследований микроструктуры, в том числе слабо рассеивающих нейтроны материалов. **Для решения этих задач требуется увеличение светосилы установок на выведенных пучках. Это возможно реализовать при создании перспективного импульсного источника нейтронов в ЛНФ ОИЯИ с оптимизацией всех параметров источника и установок на выведенных пучках.**



---

# Науки о Земле



В целом, объектами изучения наук о Земле являются состав, строение и динамика Земли, планет, метеоритов. Горные породы можно рассматривать как специфические материалы, сформировавшиеся при довольно ограниченном наборе условий, которые, однако, не всегда точно известны, но могут быть определены экспериментально.

Как и в материаловедении, для геофизических исследований широко применяются различные методы рассеяния нейтронов, которые зачастую предоставляют уникальную информацию о строении геоматериалов.

### 6.1. АТОМНАЯ СТРУКТУРА МИНЕРАЛОВ

Дифракция тепловых нейтронов позволяет установить положения атомов водорода в структуре различных минералов, таких, например, как фтор-дефицитный голубой топаз  $Al_2SiO_4(F,OH)_2$  из Падре Параисо, Бразилия [Precisvalle et al., 2021] или пробертит  $CaNa[B_5O_7(OH)_4] \cdot 3H_2O$  из Калифорнии, США [Gatta et al., 2022].

Структура голубого топаза (пространственная группа  $Pbnm$ ) представляет собой тетраэдрические группы  $(SiO_4)^{4-}$ , связанные с октаэдрическими цепочками  $Al[O_4(F,OH)_2]$ . Наклонные тетра- и окта-цепочки дополнительно связаны водородными связями. Изменение соотношения атомов F/OH, а также потенциальное упорядочение фтора и OH-групп могут привести к изменению симметрии структуры топаза. Соотношение F/OH важно не только для формирования конкретной кристаллической структуры, но и отражает процессы циркуляции флюидов в окружающих минерал породах.

Пробертит является великолепным минеральным сырьём бора (содержание  $B_2O_3$  около 50 вес.%). Он рассматривается как перспективная добавка к цементам для производства бетонных плит радио-биологической защиты, однако растворимость пробертита в цементях и его влияние на свойства получающегося материала пока не известны. Сеть водородных связей в пробертите очень сложная, 11 из 14 позиций кислорода участвуют в водородных связях в качестве доноров или акцепторов (рисунок 6.1). Дестабилизация водородных связей при изменении термодинамических условий может привести к фазовому переходу или распаду структуры.

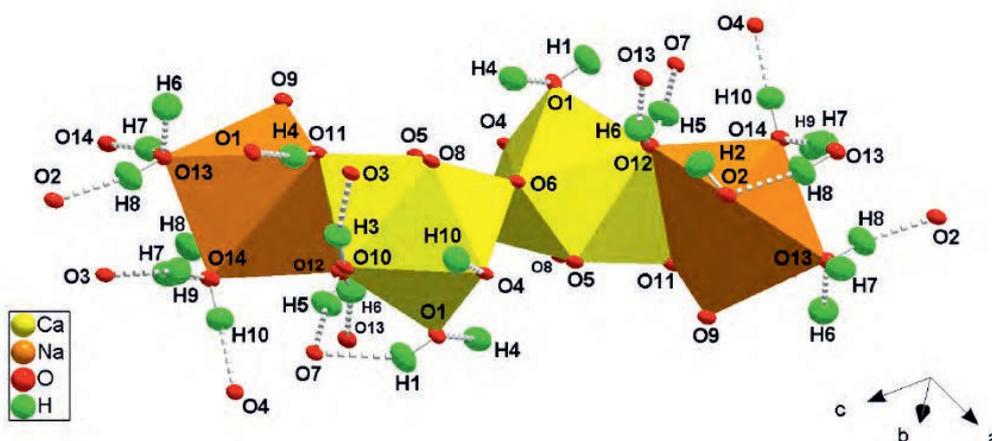


Рис. 6.1. Сеть водородных связей в структуре пробертита по данным дифракции нейтронов при температуре 20 К. Анизотропные эллипсоиды показывают смещения (70% вероятности) вследствие тепловых колебаний [Gatta et al., 2022].

Нейтроннографический структурный анализ также необходим, например, для изучения связанного водорода в мантийных породах. Присутствие гидроксильных групп в структуре минералов может существенно изменять их поведение при плавлении, фазовые соотношения, кинетику превращений, реологию и скорости сейсмических волн. Огромное значение для развития водородной энергетики имеют исследования природных источников  $H_2$  (например, процессы гидротермального изменения ультраосновных пород, радиолиза воды в ходе распада U, Th, K, активности анаэробных бактерий, распада метана в верхней мантии, окисление  $Fe^{2+}$ -содержащих минералов в присутствии воды и др.), а также процессов захвата образующегося  $H_2$  в литосфере (поглощение микропористыми породами, различные восстановительные реакции и др.) [Truche & Bazarkina, 2019].

Очевидно, что нейтроннографические исследования структуры минералов необходимы как для лучшего понимания геодинамических процессов, так и для рационального использования минерального сырья.

## 6.2. МАГНИТНАЯ СТРУКТУРА МИНЕРАЛОВ

Минерал гётит широко распространен в природе и находит свое применение в качестве компонента феррожидкостей, а также в производстве жёлтого пигмента. Детальные нейтроннографические исследования гётита в работе [Zepeda-Alarcon et al., 2014] подтвердили, что магнитные моменты железа коллинеарны и формируют две антиферромагнитно связанные подрешётки, расположенные параллельно оси  $c$  в группе симметрии  $Pb'nm$ . Присутствие магнитного дифракционного пика 100 и отсутствие пика 010 опровергает модель с наклонными по отношению к оси  $c$  магнитными моментами железа (рисунок 6.2).

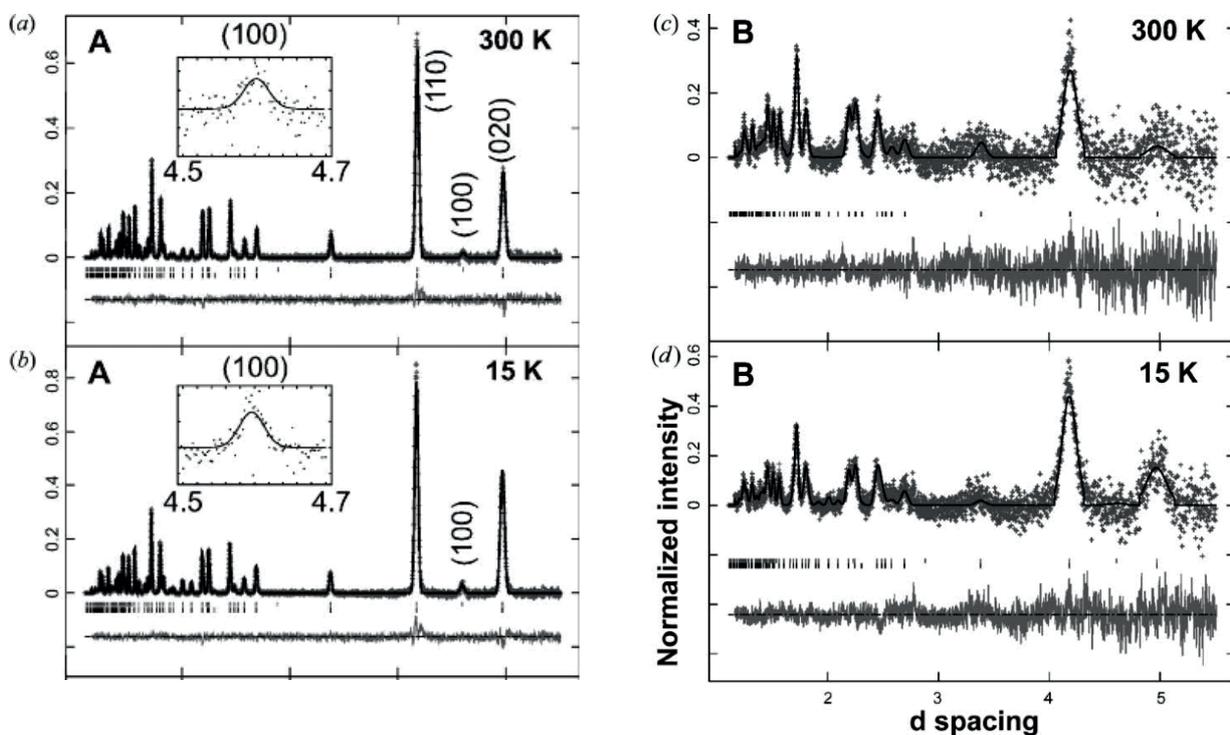


Рис. 6.2. Нейтроннограммы образцов гётита с размером зёрен  $\approx 100$  нм (a, b) и  $\approx 12$  нм (c, d) при 300 K (a, c) и 15 K (b, d). Пик (100) – магнитный. [Zepeda-Alarcon et al., 2014]

В нанокристаллическом (размер зёрен  $\approx 12$  нм) гётите обнаружено существенное уменьшение температуры Нееля по сравнению с хорошо кристаллизованным (размер зёрен  $\approx 100$  нм) гётитом. Систематические нейтронографические исследования необходимы для того чтобы установить связь между температурой Нееля, содержанием воды и размером и формой кристаллитов гётита. Такая информация важна не только для применений этого минерала в производстве, но и, например, при использовании гётита в палеомагнитных исследованиях, для реконструкции палеоклимата, поскольку с одной стороны магнитная восприимчивость при почвообразовании зависит от количества осадков, а с другой — магнитная восприимчивость антиферромагнетиков увеличивается с ростом температуры до точки Нееля, а затем падает по закону Кюри-Вейса и важно учитывать структурную и микроструктурную обусловленность температуры магнитного перехода

### 6.3. КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКИЕ ТЕКСТУРЫ И АНИЗОТРОПИЯ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД

Для многих средне- и крупнозернистых горных пород (гранит, гранодиорит, силвинит и др.) нейтронографический текстурный анализ является практически единственным способом количественного анализа преимущественных ориентировок (кристаллографических текстур) минералов, поскольку только измерение образцов размером  $\sim 10$ – $100$  см<sup>3</sup> позволяет получить достаточную статистику зёрен. Измерения кристаллографических текстур в больших сериях образцов, отобранных в некотором регионе Земли, позволяют изучить локальные деформационные и метаморфические процессы в литосфере.

В работе [Kerpler et al., 2021] были исследованы преимущественные ориентировки минералов в 30 образцах гнейсов и двух метабазитах из альпийского покрова Адула. Преимущественные ориентировки кварца в гнейсах существенно отличаются от зарегистрированных в альпийских кварцитах. Например, полюса к (0001) либо формируют максимум между нормалью к фолиации и нормалью к линейности (лежащей в плоскости фолиации), либо образуют широкий пояс с периферийным максимумом под углом к нормали фолиации. Однако во всех образцах наблюдается асимметрия преимущественных ориентировок кварца, указывающая на направление сдвиговой деформации сверху на север.

Для детального выяснения режима деформации кварца необходимы дальнейшие исследования на больших коллекциях образцов, с привлечением как нейтронной дифракции, так и дифракции обратно рассеянных электронов и математического моделирования. Помимо описания деформационной истории исследованных пород, данные нейтронографического текстурного анализа были использованы для расчёта эффективных упругих свойств массива породы и их изменения в зависимости от глубины в результате закрытия с глубиной присутствующих в породах пор и микротрещин. Результаты моделирования сравниваются с измерениями скоростей упругих волн, проведённых при разных давлениях, и таким образом оценивается закрытие трещин и пор при изменении давления. Преимуществом таких исследований является то, что применяются комплементарные методы исследований и ультразвуковые, и нейтронографические измерения, и нейтронная томография на одном и том же макроскопическом образце с линейными размерами несколько сантиметров. В гнейсе из альпийского покрова Тамбо обнаружено, что экспериментальным скоростям упругих волн, измеренных при давлении 100 МПа (рисунок 6.3), соответствует модель упругих свойств, содержащая 0.1 об.% первичных трещин, то есть трещин, параллельных пластинчатым зёрнам слюды, и 0.6 об.% вторичных трещин, пересекающих зёрна мусковита и свидетельствующих о том, что порода подвергалась растяжению параллельно плоскости фолиации.

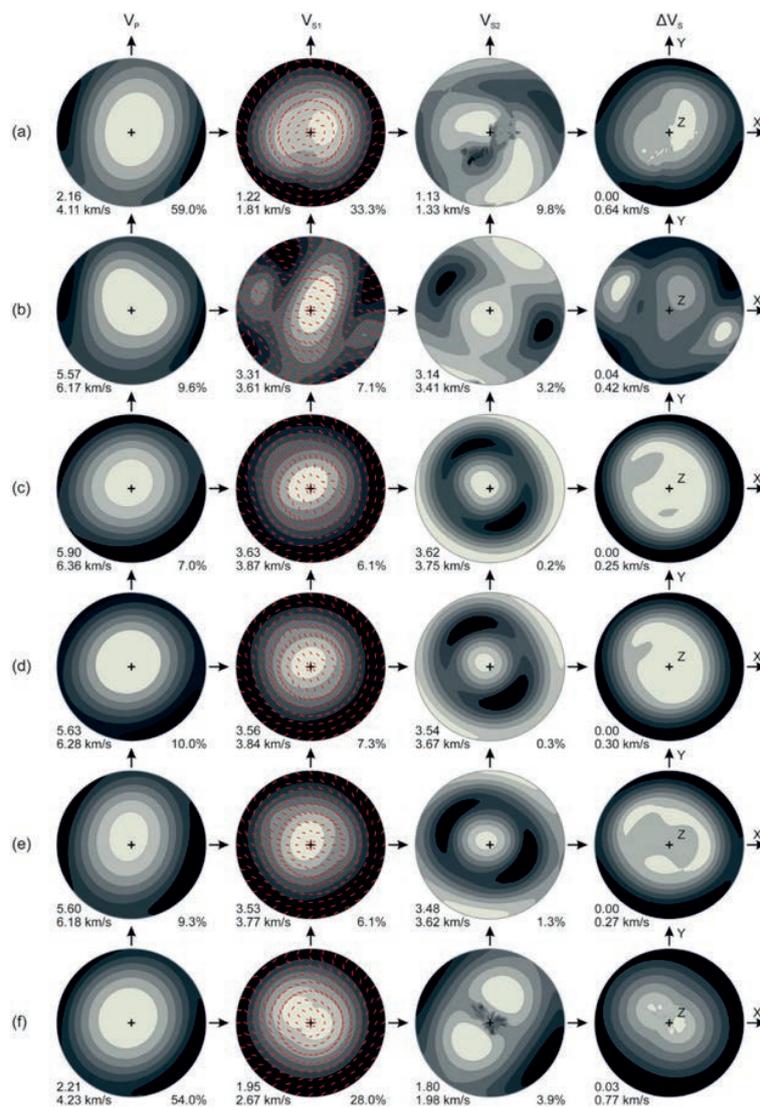


Рис. 6.3. Распределения групповых скоростей продольной и поперечных волн ( $V_p$ ,  $V_{S1}$ ,  $V_{S2}$ ) и расщепления продольных волн  $\Delta V_s$  в гнейсе: экспериментальные измерения при давлении 0.1 МПа (a); 100 МПа (b); модель без учёта трещин и пор (c); модель с 0.1 об.% первичных трещин (d); модель с 0.1 об.% первичных и 0.6 об.% вторичных трещин (e); модель с 2.6 об.% первичных и 1.0 об.% вторичных трещин (f). Поляризация быстрой S-волны показана красными линиями. Ось Z нормальна к фолиации, ось X параллельна линейности. Равноплощадные проекции, линейный масштаб [Vasin et al., 2017].

Нужно отметить, что моделирование процессов текстурообразования в породах, сложенных несколькими низкосимметричными минералами, с анизотропными свойствами и нетривиальной микроструктурой, весьма сложно как с помощью методов «среднего поля», так и с помощью метода конечных элементов. Однако нейтронографические исследования больших коллекций образцов пород могут быть использованы для создания расширенных баз данных ФРО минералов, включающие также минеральный состав пород, размеры и форму зёрен, термодинамические условия, скорости деформации, направления главных осей тензора механических напряжений и т.д. Затем эти базы можно использовать для тренировки нейронных сетей (AI), которые можно будет использовать для быстрой типизации ФРО и определения наиболее вероятных условий их формирования. В свою очередь, эти данные возможно будет использовать для моделирования анизотропных упругих свойств литосферы и

их эволюции с течением времени. Существенное повышение потока нейтронов на установках на новом источнике ЛНФ ОИЯИ позволит значительно сократить время измерения кристаллографических текстур геологических образцов, которое в настоящее время может составлять до нескольких суток.

#### 6.4. МИКРОСТРУКТУРА И ПРОНИЦАЕМОСТЬ ГОРНЫХ ПОРОД

Вопросы флюидонепроницаемости горных пород важны для решения задач захоронения отходов, добычи нефти и газа, геотермальной энергетики, моделирования сейсмических зон. В работе [Cheng et al., 2015] показано, что *in situ* нейтронная радиография может быть использована для изучения распространения флюида по трещинам породы. Было исследовано поступление воды в трещины в песчанике Береа (рисунок 6.4). Установлено, что распространение воды в повреждённой породе вокруг трещины очень быстрое, 2–3 см/с. Это связано с сочетанием капиллярного подъёма воды внутри трещины и распространения воды вдоль шероховатой поверхности трещины. Подъём воды вдоль шероховатой поверхности быстрее, чем по гладкой поверхности. В целом, методы нейтронной радиографии и томографии могут быть использованы не только для анализа внутренней структуры породы. Например, энергодисперсионная нейтронная томография может использоваться для оценки остаточных механических напряжений в различных частях образца. Для проведения таких исследований *in situ* требуется импульсный источник нейтронов с высоким потоком на установках на выведенных пучках.

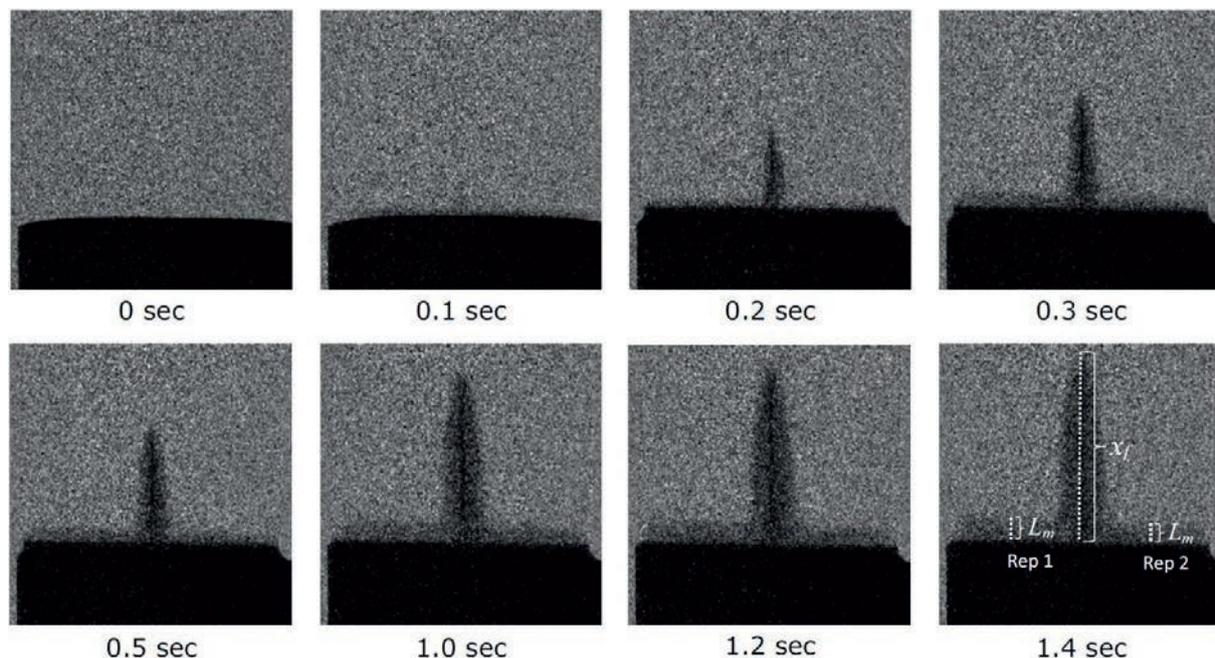


Рис. 6.4. Распространение воды вдоль продольной заполненной воздухом трещины в песчанике (проницаемость ~ 50 мД). Изображения нормированы, чтобы показывать только воду (чёрный цвет).  $L_m$  — длина распространения фронта смачивания в матрице песчаника,  $x_f$  — вдоль трещины. Ширина каждого изображения — 26 мм [Cheng et al., 2015].

Малоугловое рассеяние нейтронов также используется для получения ценной информации о внутренней структуре горных пород. В последние годы увеличивается количество работ по исследованию структуры пор и трещин в сланцах с целью

совершенствования процессов добычи сланцевого газа. В работе [Zhan et al., 2022] были исследованы образцы сланцев из южной части бассейна Сычуань. Глубина их залегания более 4 км. Бассейн Сычуань является одним из основных регионов добычи газа в Китае. Тектонические процессы привели к формированию различных пор в горных породах в этом регионе. С помощью малоуглового рассеяния нейтронов (рисунок 6.5) и метода адсорбции азота была проанализирована фрактальная структура пор в сланцах, установлена корреляция между фрактальной размерностью и минеральным составом, содержанием органики, пористостью, проницаемостью. Например, проницаемость и размерность поверхностного фрактала имеют отрицательную корреляцию: чем больше размерность, тем сложнее поверхность трещин и пор и тем выше сопротивление потоку газа.

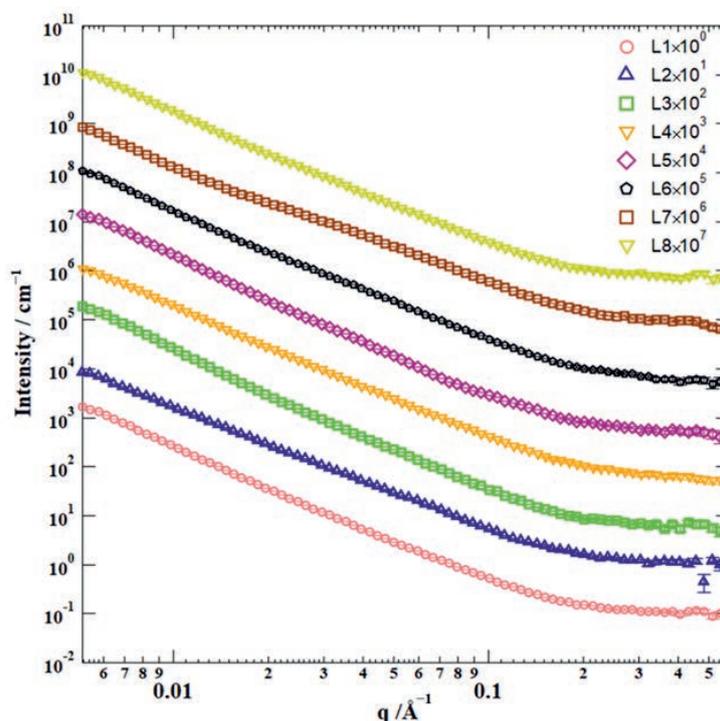


Рис. 6.5. Кривые малоуглового рассеяния нейтронов в различных сланцах из бассейна Сычуань [Zhan et al., 2022].

## 6.5. ПРОЦЕССЫ ДЕФОРМАЦИИ И РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД

Интересную возможность изучения разрушения горных пород предоставляет комплексное применение дифракции нейтронов, позволяющей отслеживать деформацию кристаллической структуры минералов, и регистрации акустической эмиссии для наблюдения событий образования и развития трещин [Nikitin & Vasin, 2010; Abe et al., 2014]. Такие исследования могут проводиться и в присутствии флюида, например, с прокачкой тяжёлой воды через крупный проницаемый образец [Gudehus et al., 2023]. Эти эксперименты представляют большой интерес для лучшего понимания механики горных пород, горных ударов и физики землетрясений.

В работе [Nikitin & Vasin, 2010] было показано, что одноосно сжатый небольшим (27 МПа) напряжением кварцит при нагреве выше температуры  $\alpha$ - $\beta$  перехода в кварце накапливает упругие деформации  $\sim 10^{-3}$ , которые по величине сопоставимы с теоретически рассчитанной для этого фазового превращения гипотетической сверхпластической деформацией (рисунок 6.6). Подобные деформации могут приводить к локальному растрескиванию породы вследствие

пониженного в температурной области фазового перехода предела прочности. При температурах выше фазового превращения в кварците были зарегистрированы интенсивные всплески акустической эмиссии, то есть, в породе возникают упругие колебания. Если такой процесс происходит в потенциальном очаге землетрясения, то он может вызвать макронеустойчивость очага по крайней мере по трем гипотетическим причинам. Во-первых, изменяется структура напряженного состояния и возникают области повышенных напряжений. Во-вторых, меняется прочность среды и возникают области пониженной прочности. Наконец, возникшая вибрация может играть роль триггерного эффекта.

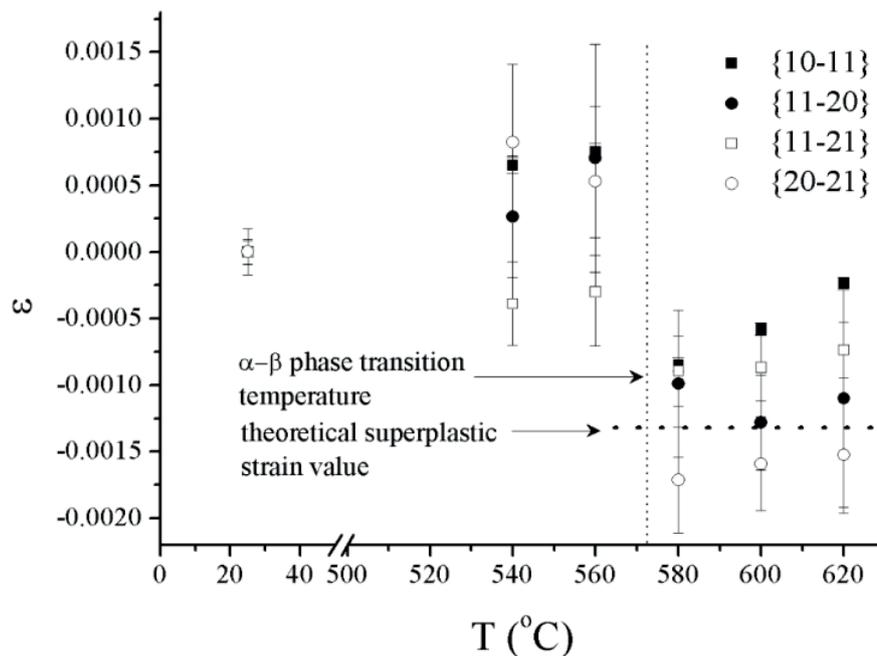


Рис. 6.6. Изменение относительных упругих деформаций вдоль нормалей к различным кристаллографическим плоскостям одноосно сжатого напряжением 27 МПа Шокшинского кварцита при его нагреве и фазовом переходе  $\alpha \rightarrow \beta$  кварц (при 573°C). Пунктирная горизонтальная линия показывает гипотетическую сверхпластическую деформацию при этом фазовом переходе. [Nikitin & Vasin, 2010]

Проведение подобных ценных для развития физики очага землетрясения экспериментов осложняется тем, что, как правило, для накопления нейтронных дифракционных данных требуется куда более значительное время, чем для генерации и регистрации событий акустической эмиссии. **Повышение светосилы установок на перспективном источнике нейтронов в ЛНФ ОИЯИ позволит существенно сократить время дифракционного эксперимента и осуществлять описанные исследования с лучшим временным разрешением.**

### 6.6. ОБЪЕМНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МИНЕРАЛОВ В МЕТЕОРИТАХ

С прошлого века было разработано довольно большое количество теоретических моделей, описывающих формирование различных типов метеоритов на основе экспериментальных данных по скорости охлаждения различных составных минералов метеоритов, петрологических данных, химического состава основных и второстепенных фаз или их текстурных ассоциаций в метеоритах. Так, для железокремнистых метеоритов (палласитов) была разработана модель,

предполагающая преимущественно фракционное плавление астероида при коллизии путем смешивания ранее отделенного металлического ядра и оливиновой мантии. Для понимания петрографии метеоритов возможно проведение исследований компонент метеоритов и их размеров, форм, текстур и пространственного расположения с помощью нейтронной томографии и комплементарных методов.

В качестве примера рассмотрим палласиты – это железокремнистые метеориты, состоящие из зёрен оливина и металлического сплава FeNi. Второстепенными фазами являются троилит FeS, шрейберсит, пироксен и фосфаты. Реконструкцией нейтронной томографии внутренней структуры метеорита Сеймчан [Kichanov et al., 2018a] представлено одно из нейтронных изображений исследуемого палласита (рисунок 6.7). Следует отметить, что соответствующие коэффициенты ослабления для нейтронов со средней длиной волны  $\sim 2 \text{ \AA}$  составляют: для железа ( $\Sigma_{\text{Fe}} = 0.151 \text{ см}^{-1}$ ) и никеля ( $\Sigma_{\text{Ni}} = 0.468 \text{ см}^{-1}$ ), что в несколько раз больше соответствующих коэффициентов для минерала оливина. Поэтому, в экспериментах по нейтронной радиографии металлические вкрапления и жилы хорошо контрастирует на фоне зёрен оливина. На рисунке 6.7 (b-d) представлено несколько изображений, соответствующих различным поперечным срезам исследуемого метеорита. Здесь темные области соответствуют округлым зернам оливина. Видно, что оливиновые зёрна занимают большую часть объёма исследуемого фрагмента, а внутри его объёма образуются крупные оливиновые кластеры.

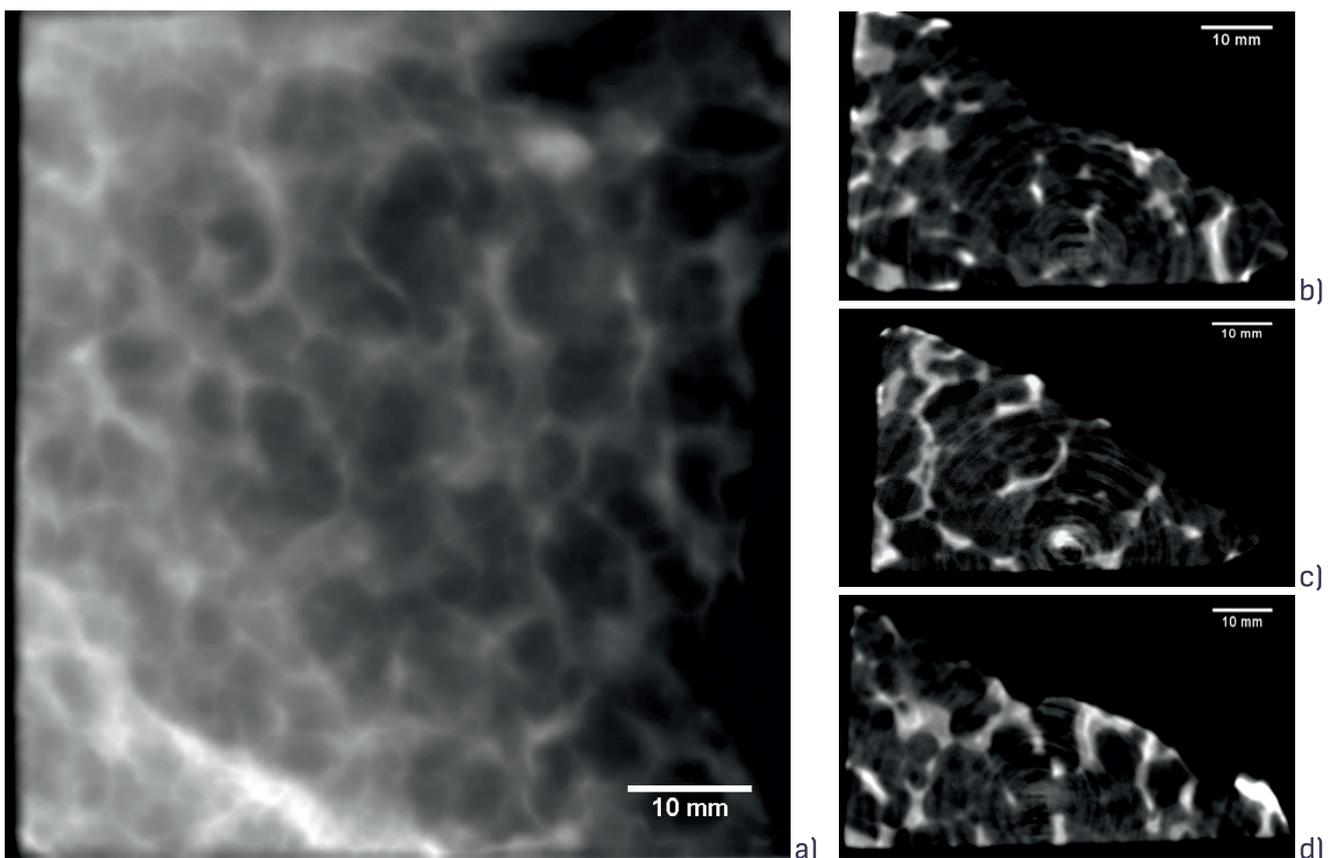


Рис. 6.7. а) Нейтронное радиографическое изображение фрагмента Сеймчанского метеорита. Светлые области соответствуют большим коэффициентам ослабления нейтронов в металлической компоненте. Темные области — это области высокого пропускания нейтронов в зернах оливина (b-d). Представлены примеры томографических срезов исследуемого палласита после процедуры восстановления томографии. Срезы соответствуют верхней (b), средней (c) и нижней (d) частям данного метеорита. [Kichanov et al., 2018a]

В результате анализа полученных изображений были рассчитаны объемная доля оливина в исследуемом фрагменте метеорита Сеймчан, которая составила 60.4%. Этот результат хорошо согласуется с ранее полученными данными.

Восстановленная 3D модель образца метеорита представлена на рисунке 6.8. [Kichanov et al., 2018a]

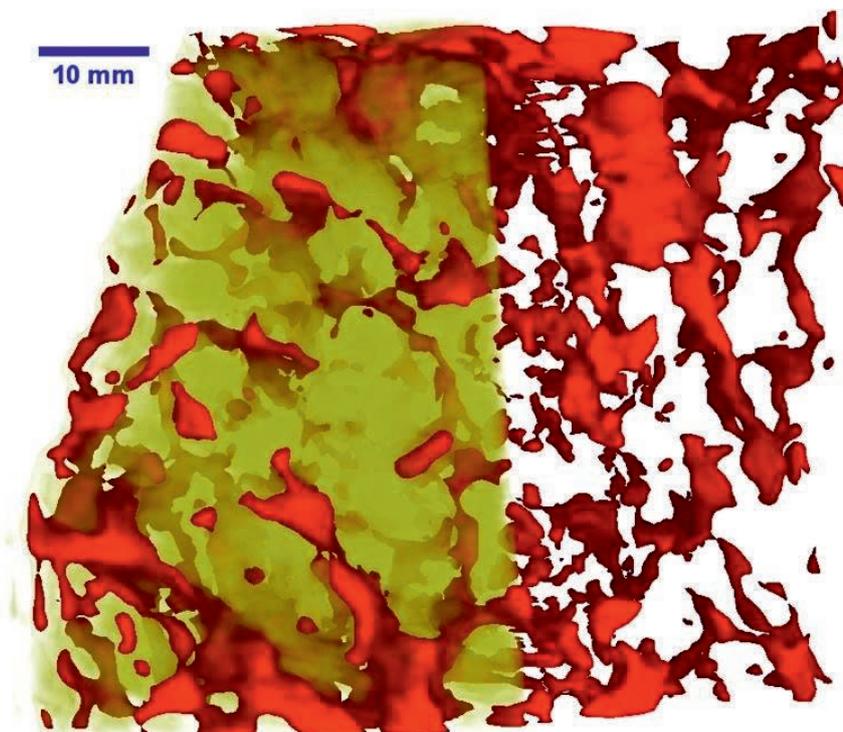
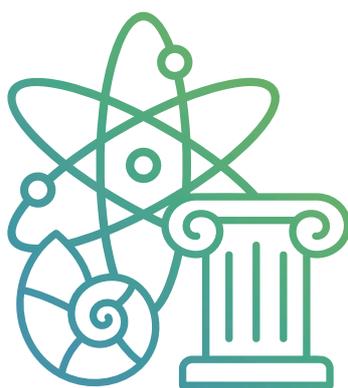


Рис. 6.8. Виртуальная трехмерная модель исследуемого фрагмента метеорита Сеймчан, полученная в процессе реконструкции данных нейтронной томографии. Металлические области отмечены более темным оттенком, а оливинный минерал – светлым. [Kichanov et al., 2018a]

### 6.7. НЕЙТРОННЫЕ МЕТОДЫ В ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

Рассеяние нейтронов имеет широкий спектр геофизических применений, для которых основными методами рассеяния нейтронов являются дифракция, радиография/томография и малоугловое рассеяние. Наиболее интересными представляются задачи исследования анизотропных упругих свойств литосферы и их эволюции с течением времени, исследования свойств пород в сложных коллекторах с целью добычи трудноизвлекаемых запасов углеводородов и эксперименты, способствующие развитию физики очага землетрясения.

Как и при решении задач в других областях знания, в геофизических применениях рассеяния нейтронов растёт спрос на измерения больших коллекций образцов, проведение *in situ* исследований при экстремальных условиях, в том числе с одновременным измерением некоторых физических свойств образца, повышение точности измерений. Эти запросы возможно будет выполнить на новом импульсном источнике нейтронов в ЛНФ ОИЯИ.



---

Исследования объектов культурного  
наследия и палеонтологии



С помощью метода нейтронной радиографии, за счет разной степени ослабления интенсивности нейтронного пучка при прохождении через материалы различного химического состава, плотности и толщины компонентов изучаемого объекта, можно получить информацию о внутреннем строении исследуемых материалов с пространственным разрешением на микронном уровне. Этот метод неразрушающего контроля характеризуется более глубоким проникновением в толщу исследуемого материала по сравнению с комплементарным методом рентгеновской радиографии и обладает преимуществами при исследовании материалов, одновременно содержащих как легкие элементы (например, водород или литий), так и тяжелые, (например, железо). Радиография дает двумерную проекцию объекта. Для получения трехмерного изображения используется метод томографии, где выполняется объемная реконструкция внутреннего строения исследуемого объекта из набора радиографических проекций, полученных при различных угловых положениях образца относительно направления пучка нейтронов [Podurets et al., 2021].



### 7.1. ИССЛЕДОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ

Исследования объектов культурного наследия с помощью естественно-научных методов важны для расширения и углубления знаний об исторических и археологических предпосылках появления этих объектов. Исследования позволяют определить место создания артефактов, пути их распространения, установить возраст, технологии изготовления, первоначальный облик и последующие изменения. Это позволяет получить новые данные о культуре, науке, ремеслах, технологиях, торговых связях, истории целых стран и народов. Следует отметить, что зачастую особенностью объектов культурного наследия является то, что в них могут совмещаться материалы с разными физико-химическими свойствами: металлы, вещества минерального и органического происхождения [Lehmann & Mannes, 2021; Kozlenko et al., 2019], поэтому применение взаимодополняющих методов для их изучения весьма важно [Kozlenko et al., 2016]. В частности, данные нейтронной визуализации могут быть дополнены рентгеновской визуализацией, а также исследованиями элементного, фазового и текстурного анализа материалов [Sedyshev et al. 2020; Gorini et al., 2007; Luzin et al., 2020].

Как отмечалось ранее, методы рассеяния нейтронов являются неразрушающими, поэтому они активно применяются в археологических и палеонтологических исследованиях, при изучении объектов культурного наследия. Например, данные по влиянию высоких температур на вибрационные и вращательные моды колебаний различных групп атомов костей человека могут быть использованы для анализа погребальных ритуалов древних людей [Marques et al., 2021]. Нейтронные дифракционные исследования показали изменение преимущественных ориентировок гидроксипатита в большой берцовой кости человека в ходе эволюции, зависимость кристаллографической текстуры кости от условий жизни древних людей и значительную анизотропию преимущественных ориентировок у современного человека [Vason, 1990].

Нейтронографический текстурный анализ применяется и для того, чтобы установить деформационную историю материалов. С помощью него удалось, например, получить информацию об условиях и температурах чеканки библейских бронзовых монет, датированных 1 веком до н.э. — 1 веком н.э. [Nagler et al., 2019]. Информация о структурных фазах, полученных со всего объема монеты с помощью дифракции нейтронов, позволяет выявить скрытые следы коррозии, например, наличие в материале монохлорида меди — нантокита, и предпринять меры для купирования «бронзовой болезни» и предотвращения разрушения артефакта.

Активное применение метода нейтронной томографии и радиографии в сфере сохранения объектов культурного (археологического) наследия в последнее десятилетие можно связать с действием специально ориентированных программ таких организаций, как МАГАТЭ (проект “Ancient Charm”), Европейского Совета (проект “Autentico”), где решались вопросы высокотехнологичных структурных исследований объектов культурного наследия и определения их подлинности. Так, по этим программам были определены подлинники и подделки античного и римского времени, меровингской эпохи, хранящиеся в европейских музеях. Несомненно, подобные программы в разных странах не потеряют своей актуальности еще многие десятилетия и в них активно будут использоваться нейтронный методы исследований.

В настоящее время в качестве мер, направленных на сохранение культурного наследия, применяются преимущественно неразрушающие методы и подходы, обеспечивающие одновременно физическую сохранность объекта исследования и получение максимально полной информации о его химическом составе, наличии внутренних дефектов, структурных особенностей. В частности, идет успешное сотрудничество между Объединенным институтом ядерных исследований и Институтом археологии Российской академии наук. Дополняющие друг друга археологические и физические исследования позволяют изучить большое количество ценных объектов из различных крупномасштабных археологических раскопок на территории Российской Федерации. При помощи ЛНФ ОИЯИ, данные направления развиваются и в странах-участницах ОИЯИ. Для археологических исследований и работ в сфере сохранения объектов культурного наследия метод нейтронной томографии и радиографии все еще относится к числу редких. Тем интереснее выглядят результаты исследования нескольких археологических объектов, в частности, миниатюрного сосуда для благовоний из раскопок могильника сарматского времени Чеботарев-V (раскопки Р.А. Мимохода) и фрагментов браслета и колта из Тверского клада 2014 г. (раскопки А.Н. Хохлова, С.А. Кунгурцевой).

Древнерусские ювелирные изделия — предмет многочисленных и многолетних специальных исследований начиная с первой половины XIX в., а вещи, найденные в составе кладов, сокрытых в момент трагических событий 1237–1238 гг., — объекты наиболее пристального внимания исследователей как один из достоверных источников реконструкции домонгольского периода истории и культуры России. В 2014 г. сотрудниками Института Археологии РАН при раскопках в г. Твери на территории Кремля, в здании Реального училища, был найден клад серебряных украшений, время сокрытия которого относится исследователями к концу зимы — началу весны 1238 г. В составе клада находилось не менее 59 украшений разных типов, сильно фрагментированных: это колты, подвески-рясны, трехбусинные височные кольца, медальоны и бусины от ожерелья, двустворчатый браслет, выполненные в традиционной технике зерни, скани и черни, по аналогиям датируемые XII — первой третью XIII вв. Предметы довольно сильно пострадали как в результате дальнейшей жизни города на данном участке, так и, видимо, в момент событий 1238 г. С учетом того факта, что нейтронная радиография и томография успешно использовались для анализа относительно крупных предметов римского периода, оружия, свинцовых скульптур и урн, этот

метод был задействован в исследованиях объектов из древнерусского клада [Сапрыкина и др., 2018; Kichanov et al., 2018b].

Один из этих предметов — фрагмент лучевого колта. Лучевой или звездчатый колт (рисунок 7.1) отличается от имеющихся в составе клада как размером (авторы находки дают реконструируемые размеры — 52x56 мм), так и сохранностью [Сапрыкина и др., 2019]. Колт относится к украшениям 1 группы, по форме лучей и стилистическим особенностям оформления близок парным колтам киевской работы первой половины XII в. из состава Тереховского клада 1876 г.

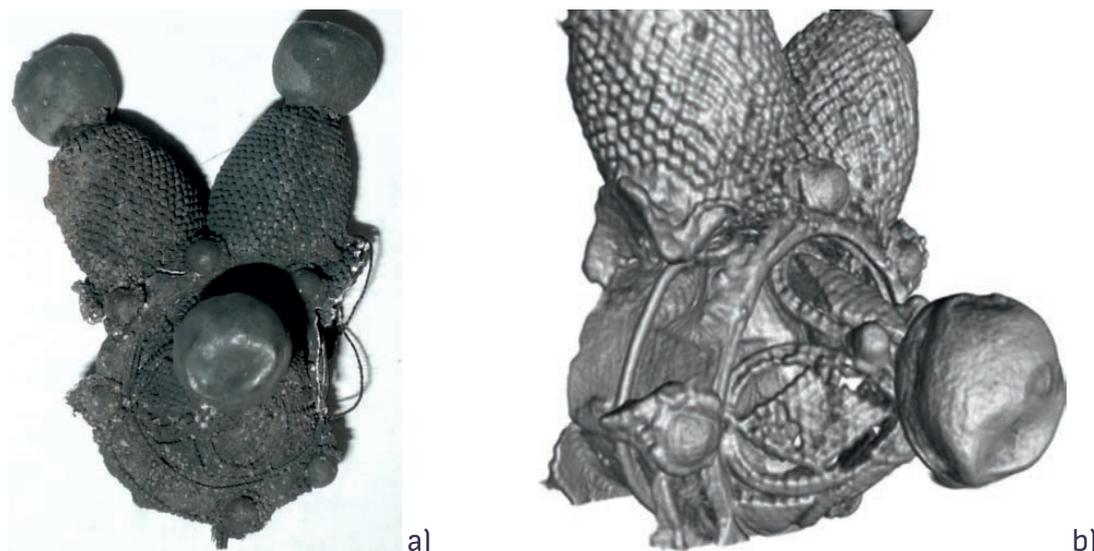


Рис. 7.1. Фотография (a) и восстановленная из данных нейтронной томографии 3D модель (b) древнерусского колта. Модель представлена после анализа трехмерных данных и процедуры виртуальной сегментации внешнего коррозионного слоя. [Сапрыкина и др., 2019]

Предварительное обследование на бинокулярном микроскопе показало, что на большинстве предметов не сохранилось золочения и чернения, а также оказались утраченными участки гравированного орнамента. Кроме того, отдельные украшения имеют визуальные признаки длительного, но опосредованного воздействия высоких температур (деформация, вмятины, характер серебра на сломе; следов «течения» металла не зафиксировано). Восстановленная с помощью нейтронной томографии трехмерная модель исследуемого объекта позволяет визуализировать как участки сборки отдельных деталей, так и внутренние элементы крепежа конструкции колта.

Метод нейтронной томографии, а также алгоритмы анализа трехмерных данных могут успешно применяться для сегментации восстановленных 3D данных, что открывает широкие возможности для виртуальной неразрушающей реконструкции корродированных объектов культурного наследия. В качестве примера приведем неразрушающую реконструкцию декоративных элементов на бронзовом браслете.

Фрагмент широкого двустворчатого браслета, который до начала реставрационных работ представлял собой плоскость между арками, со следами, которые могут быть интерпретированы и как разметка под гравировку, и как остаток сильно пострадавшего гравированного декора. На поверхности ни при микроскопическом обследовании, ни по результатам РФА-анализа не было зафиксировано остатков золочения; участки с чернением также не определялись. В результате экспериментов по нейтронной томографии удалось

получить данные о наличии золочения и размещении этих участков на арках и рифленых проволоках, пущенных по краю браслета, а также, вероятно, на застежках (рисунок 7.2). Остатки чернения расположены во всех орнаментальных зонах браслета: в нижнем и верхнем поле, в пространстве между арками [Kichanov et al., 2017]. Хорошо видно, что гравированный орнамент является полностью законченным, не нуждающемся в дополнительной доработке. Полученные результаты дают дополнительные возможности для определения древних мастерских, в которых были изготовлены артефакты.

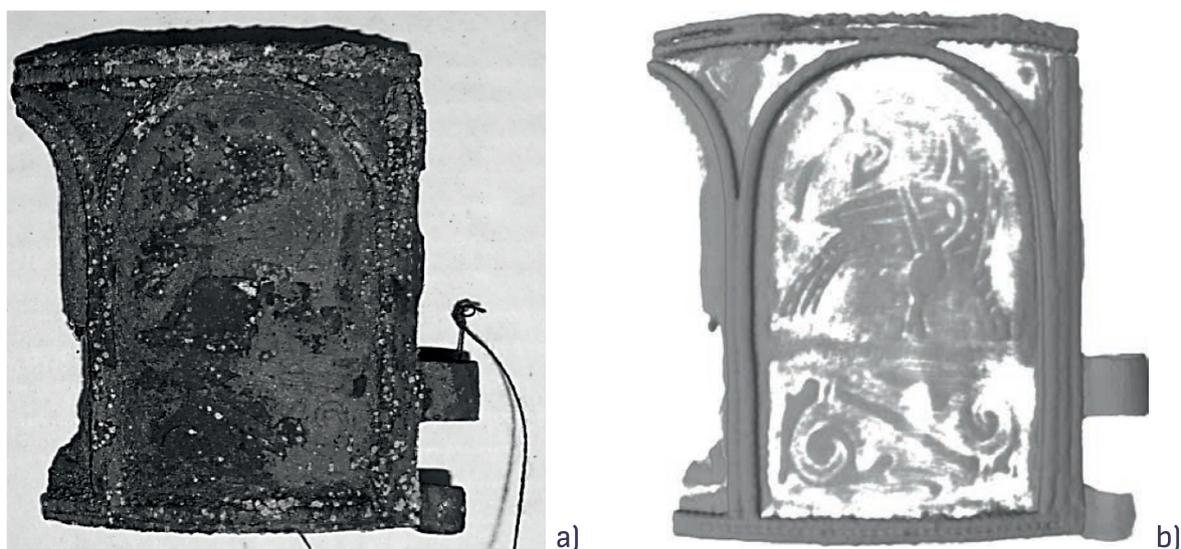


Рис. 7.2. Фотография (а) и восстановленная из данных нейтронной томографии 3D модель (б) фрагмента трёхстворчатого браслета. Восстановленная модель представлена после анализа трехмерных данных и процедуры виртуальной сегментации внешнего коррозионного слоя. [Kichanov et al., 2017]

Другим примером, является интересный для исследования предмет, найденный в Сочинской экспедиции Института археологии РАН, которая исследовала в Ростовской области нетронутое сарматское погребение. Оно датируется I в. н.э. и, судя по находкам — золотым и серебряным украшениям, принадлежало знатной женщине. В качестве удобного модельного объекта, демонстрирующего возможности различных алгоритмов анализа трёхмерных данных, выступает золотой флакон древней сарматской женщины (рисунок 7.3) из погребения "Чеботарев-5". На фотографии хорошо видны сохранившиеся ручки флакона и украшения на верхней части крышки. Однако внутренний объем закрытого флакона остается скрытым.

После процедуры реконструкции данных нейтронной томографии была получена 3D модель исследуемого флакона (рисунок 7.3). На восстановленной модели отчетливо видны области, соответствующие материалу внутреннего заполнения. Вещество представляет собой спекшуюся ("окаменевшую") массу. По сохранившемуся объему можно предположить, что в момент помещения сосудика в погребение эта масса занимала значительную часть объема сосуда, что позволяет говорить о достаточно высоком социальном и экономическом статусе погребенного. Отмечается в целом однородный состав сохранившихся остатков вещества. Возможно, полученные данные будут полезны при проведении дальнейших исследований по определению химического состава остатков благовоний.

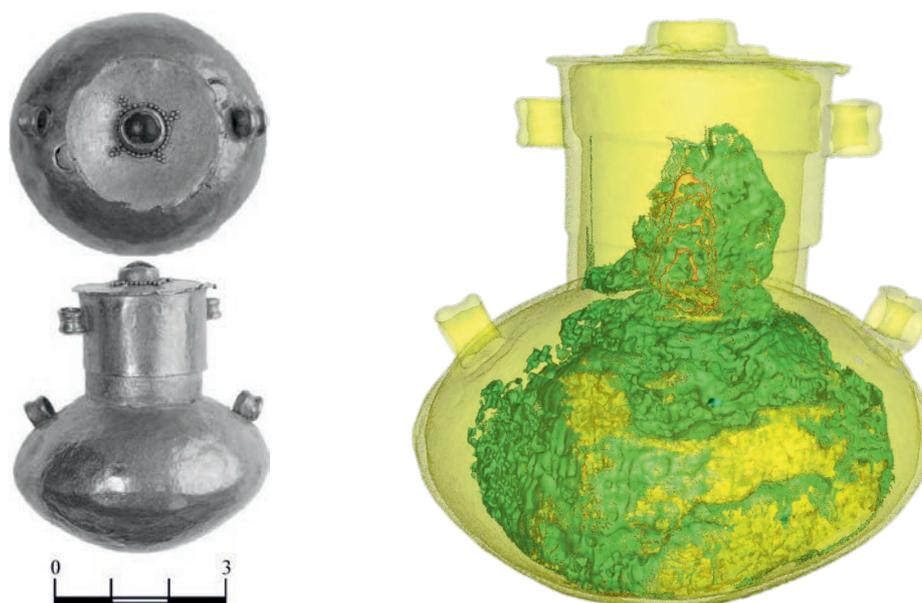


Рис. 7.3. Фотография и восстановленная из данных нейтронной томографии 3D модель золотого сосудика. Внутри сосудика обнаружено определенное содержимое – остатки благовоний

Представленные примеры наглядно показывают возможности, которые открывают нейтронные методы исследований в изучении культурного наследия и, безусловно, данное направление будет активно развиваться на перспективном источнике нейтронов в ЛНФ ОИЯИ с еще более высокими потоками нейтронов на установках, позволяя получить качественные результаты, с лучшим разрешением и за более короткое время измерений.

## 7.2. ИССЛЕДОВАНИЕ ПАЛЕОНТОЛОГИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Палеонтология – это уникальное сочетание всех научных дисциплин, которые рассказывают историю жизни на Земле, включая и историю человечества. Палеонтологические науки включают в себя такие сферы как палеоантропология, археология и смежные дисциплины. Это сложнейшая наука включает множество слоев знаний о том, что было в прошлом, и как оно играет определенную роль в истории и современном существовании животных и растений. Ископаемые окаменелые материалы относятся к останкам животных, растительные или гоминидные остатки, формирующие своего рода матрицу, такую как седиментальные породы, сохраняли древнейший материал на протяжении тысяч и миллионов лет. Неудивительно, что окаменелости обнаруживаются спустя миллионы лет либо через человеческую деятельность: добыча известняка или специальное исследование пещер, либо природные явления: эрозия почв, землетрясения.

Окаменелости и ископаемые материалы являются уникальными и довольно дефицитными дорогими объектами. Страны с обширными коллекциями природных ископаемых объектов проявляют особую заботу о своем природном наследии, поэтому постепенно роль неразрушающего контроля и соответствующих процедур анализа данных усиливается. В последние годы важным методом изучения внутреннего строения палеонтологических объектов стала рентгеновская томография и микротомография. Эти методы имеют большое значение для исследования редких и хрупких образцов, а также

типовых экземпляров, разрушение которых недопустимо. В ходе исследований были установлены ограничения метода, связанные, во-первых, с недостаточным контрастом, так как в составе ископаемых объектов вымершей флоры и фауны часто содержатся минералы, близкие друг к другу по поглощению рентгеновских лучей, а во-вторых, с размерами и толщиной объекта из-за недостаточной глубины проникновения рентгеновского излучения.

Нейтронная томография, как представитель методов неразрушающего контроля, характеризуется более глубоким, по сравнению с рентгеновским излучением, проникновением в толщу исследуемого материала, что позволяет исследовать достаточно крупные объекты, представляющие как научный, так и прикладной интерес. Высокое некогерентное сечение рассеяния нейтронов для водорода обуславливает высокий нейтронный радиографический контраст в исследованиях образцов, содержащих даже малые концентрации водородсодержащих компонент. Одна из таких задач – восстановление остатков или производных органических материй в окаменелых останках ископаемых животных или растений, то, чем и интересуется палеонтология.

Идея поиска органического вещества в строматолитах (колониях цианобактерий) не нова. Тем не менее, она не получила развития в этой области палеонтологии. По сравнению с рентгеновскими методами, нейтронная томография обладает преимуществами при исследовании таких материалов [Пахневич и др., 2013], одновременно содержащих как легкие элементы, такие как водород или литий, так и тяжелые металлы. Применяется она и для исследования палеонтологических и геологических объектов с целью выявления локализации водородсодержащего вещества, которое может быть представлено органическим веществом.

Исследованный строматолит состоит из нескольких минеральных фаз, хорошо отображающихся на виртуальных срезах рентгеновской микротомографии. Он имеет нечеткое слоистое строение, которое выражается в отсутствии четких границ между слоями. Один из слоев – песчаный или кварцевый. Песчинки образуют рыхлый слой, богатый пустотами и щелями между ними. На рисунке 7.4. представлены фотография и восстановленная трехмерная модель строматолита.

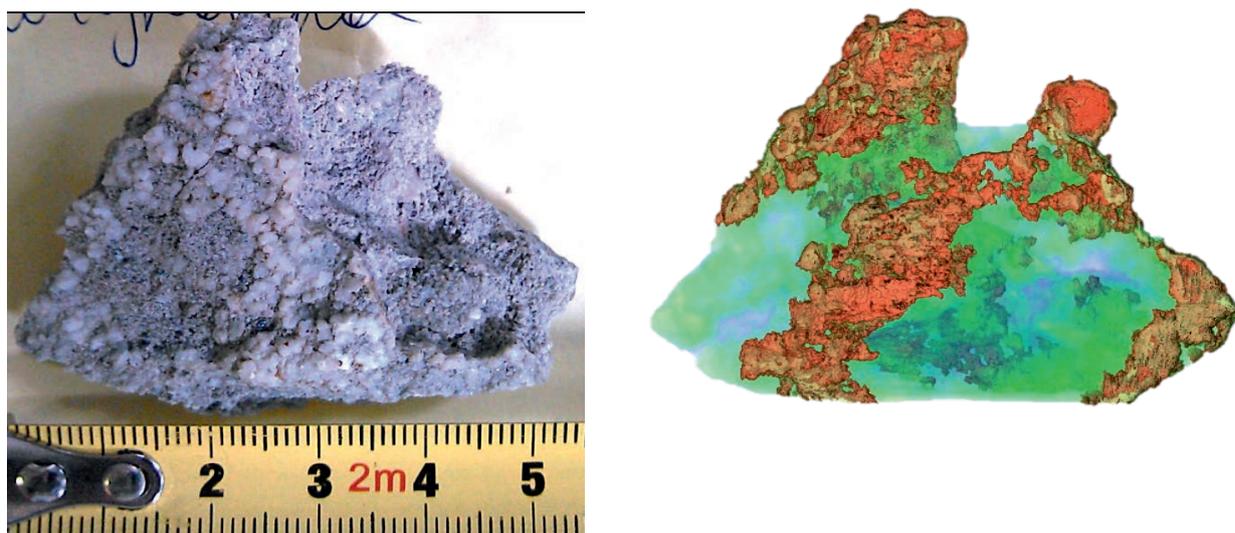


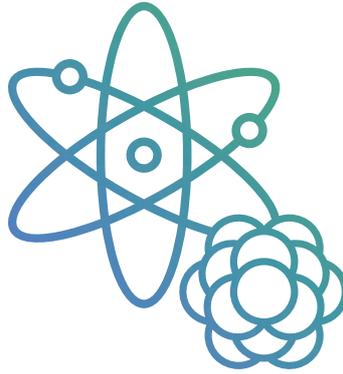
Рис. 7.4. Фотография (a) и восстановленная из данных нейтронной томографии трехмерная модель (b) исследуемого строматолита. На восстановленной модели более темные участки соответствуют остаткам колонии строматолита, богатым водородсодержащими компонентами. [Pakhnevich et al., 2020]

Из данных нейтронной радиографии удалось выявить контрастные участки, которые, вероятнее всего, соответствуют локализации водородсодержащего вещества, которое распространено в образце неравномерно: наблюдаются как мелкие скопления, так и крупные [Pakhnevich et al., 2020]. Первые чаще локализованы внутри образца. Крупные скопления вещества с высоким коэффициентом ослабления нейтронного пучка распространены в приповерхностных частях строматолита. В редких случаях они располагаются около крупных полостей и трещин внутри образца. По происхождению водородсодержащее вещество, обнаруженное благодаря нейтронам, может быть минералами с гидроксогруппой, которые являются результатом разложения органического вещества.

Благодаря высокой проникающей способности тепловых нейтронов, оказывается возможным исследовать преимущественные ориентировки зёрен в раковинах ископаемых моллюсков [Pakhnevich et al., 2022]. В комплексе с рентгенографическими исследованиями, методами электронной микроскопии и др., такие исследования помогают, например, обнаруживать родственные виды ископаемых моллюсков и проследить их эволюцию [Chaterigner et al., 2002].

### 7.3. НЕЙТРОННЫЕ МЕТОДЫ В ИССЛЕДОВАНИЯХ ОБЪЕКТОВ КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ И ПАЛЕОНТОЛОГИИ

Высокая информативность нейтронной визуализации при исследовании объектов культурного наследия и палеонтологических образцов, позволяет применять методы нейтронной радиографии и томографии для их изучения. Данные нейтронной визуализации могут быть дополнены исследованиями элементного, фазового и текстурного анализа артефактов, в частности на нейтронных дифрактометрах. Сочетание нейтронных методов рассеяния при исследовании объектов исторического наследия в сочетании с другими неразрушающими методами открывают новые возможности для их изучения, а также анализа и интерпретации данных в контексте исторических событий, технологий, существовавших в то время, торговых путей и т.д. Несомненно, на перспективном источнике нейтронов в ЛНФ ОИЯИ установки для применения данных методик будут широко востребованы не только учеными физического сообщества, но и ученым из других областей знаний.



---

Фундаментальная ядерная физика  
низких энергий



Несмотря на смещения центра тяжести исследований с нейтронами в физику конденсированного состояния вещества, нейтрон остаётся уникальным инструментом исследования в области фундаментальных взаимодействий, вопросов космологии и ядерной физики. Примером подобного рода исследований являются эксперименты по уточнению времени жизни нейтрона, поиску электрического дипольного момента нейтрона, поиск нейтрон-антинейтронных осцилляций, измерение гравитационной массы нейтрона, изучение фундаментальных симметрий в процессах с участием нейтрона, поиск новых типов взаимодействий.

Все эти исследования так или иначе направлены на экспериментальное обнаружение явлений, выходящих за рамки Стандартной Модели (СМ), которые могут дать подсказку к решению вопросов, стоящих сегодня перед теоретиками: почему в СМ столько свободных параметров, почему вещество доминирует над антивеществом, что из себя представляют «тёмная материя» и «тёмная энергия».

При этом эксперименты с нейтронами принадлежат к классу исследований на «границе интенсивности» — прецизионные эксперименты, в которых используются высокочувствительные детекторы и могут проявляться самые незначительные воздействия на исследуемую систему, связанные, например, с обменом тяжелыми виртуальными частицами. Они дополняют исследования на «границе энергии», когда строятся новые высокоэнергетические ускорители, на которых могут рождаться более тяжелые частицы, чем те, что могли наблюдаться ранее. Не менее важен и прогресс в исследованиях на «границе интенсивности». Он связан с интенсивностью исследуемых частиц (в нашем случае с увеличением доступных в экспериментах числом нейтронов), а также с предложением новых оригинальных подходов к постановке экспериментов, развитию методик и уникального оборудования.

Изучение ядерных реакций, вызванных нейтронами, является инструментом изучения фундаментальных симметрий на ядерном уровне, инструментом изучения глубокой перестройки ядерных систем, например, в процессе деления, который в свою очередь является источником редких ядер, находящихся далеко за границами стабильности. Данные о структурах ядер, которые могут быть получены из реакций с нейтронами, энергетические зависимости сечений нейтронных реакций по-прежнему актуальны и требуют дальнейшего уточнения. Соответствующие запросы формулируются экспертными группами МАГАТЭ.

Учитывая опыт ОИЯИ в международном сотрудничестве, предлагается оснастить новый источник нейтронов как можно более универсальной пучковой инфраструктурой, предоставляющей широкую возможность для модификации и модернизации ядерно-физических установок, которая может быть интересна максимально широкому кругу исследователей из разных стран.

По направлению исследований, задачи, которые предлагается решать на перспективном источнике нейтронов в ОИЯИ, можно условно разделить на три направления:

- фундаментальные взаимодействия, свойства нейтрона, физика УХН, нейтрино;
- нейтронно-ядерные взаимодействия;
- ядерно-физические методы определения изотопного состава вещества.

Для решения этих задач необходима следующая инфраструктура:

- источник ультрахолодных (УХН) и очень холодных нейтронов (ОХН);
- пучок холодных нейтронов с максимальной интенсивностью и минимальной примесью быстрых нейтронов и гамма-квантов;
- пучок холодных поляризованных нейтронов с максимальной интенсивностью и

- минимальной примесью быстрых нейтронов и гамма-квантов;
- «горячий источник» с прерывателем для сокращения длительности нейтронной вспышки и поляризатором;
- каналы для активационного анализа с лабораторией для работы с открытыми источниками.

## 8.1. ФИЗИКА ЗА ПРЕДЕЛАМИ СТАНДАРТНОЙ МОДЕЛИ И СВОЙСТВА НЕЙТРОНА

К настоящему моменту Стандартная модель (СМ) является крайне успешной теорией, от предсказаний которой не обнаруживается существенных отклонений, либо отклонения могут быть устранены. Тем не менее, особенности СМ (большое количество параметров, усложнение теории при добавлении новых эффектов), а также необходимость решения проблемы темной материи и соотношения вещества/антивещества требуют проведения новых исследований как для определения границ применимости СМ, так и для поиска и изучения явлений, лежащих за пределами СМ.

### 8.1.1. Время жизни нейтрона

Время жизни является фундаментальной характеристикой любой элементарной частицы. В экспериментах по физике высоких энергий времена жизни могут измеряться различными способами, например, по ширинам резонансных пиков на спектрах инвариантных масс [CMS collaboration, 2015], используя широко известное соотношение  $\tau = \hbar/\Gamma$ . Другим вариантом является извлечение времени жизни частицы из характеристик ее треков (пути, пройденного частицей от рождения до распада и ее скорости), измеряемых с помощью трековых детекторов. В этом отношении нейтрон уникален: с одной стороны, он живет очень долго по меркам элементарных частиц, с другой – интенсивные нейтронные потоки могут быть получены сравнительно просто. Эти обстоятельства позволяют измерять время жизни нейтрона двумя разными способами: пучковым методом и методом хранения ультрахолодных нейтронов (УХН) в ловушке. Интересно, что эти два подхода к настоящему времени дают систематически разные результаты:

1. В «бутылочном методе» измеряется время жизни нейтрона путем хранения (УХН) в материальной или магнитной бутылке (ловушке) и подсчетом их оставшегося количества через некоторое время. Последний результат  $\tau = 878,3 \pm 0,3$  с [Strumia, 2022]. Последний результат по ссылке из другой работы:  $877.75 \pm 0.28$  с [Gonzalez et al., 2021]

2. В «пучковом методе» измеряется скорость  $\beta$ -распада нейтронов, находящихся в пучке. Подсчитывается количество протонов, рожденных в результате распада. Получен результат  $888 \pm 2$  с [Strumia, 2022], последний результат по ссылке из другой работы –  $887.7 \pm 1.2$  [stat]  $\pm 1.9$  [syst] [Yue et al., 2013].

Эти результаты расходятся более, чем на  $4.6\sigma$  (рисунок 8.1), что противоречит Стандартной модели, в соответствии с которой время жизни не зависит от способа измерения. Одним из объяснений данного феномена, может быть, существование иных каналов распада нейтрона, кроме бета-распада. Так как продукты этих распадов еще не наблюдались, предполагается, что ими могут быть частицы темной материи. Возможность таких процессов может привести к потере массы нейтронными звездами из-за перехода нейтронов в темную материю, что ограничит массу этих объектов двумя массами Солнца [Strumia, 2022].

Прямое наблюдение распадов нейтрона только на частицы темной материи (так называемый невидимый распад,  $n \rightarrow \chi\chi$ ), или же  $n \rightarrow \chi\chi\chi$  (распад на частицы темной материи и частицы материи) возможны на нейтринных детекторах.

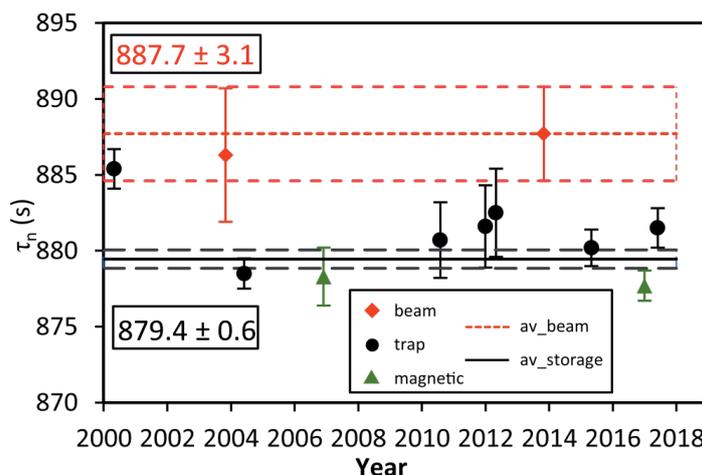


Рис. 8.1. Текущий статус экспериментов по измерению времени жизни нейтрона. Отчетливо видно систематическое расхождение результатов пучковых измерений и экспериментов с хранением УХН. [Serebrov, 2018]

К настоящему времени достигнуты следующие результаты: для невидимого распада в эксперименте SNO [SNO Collaboration, 2019]:  $\tau > 2.5 \cdot 10^{29}$  лет, для «видимого» распада результат SuperKamiokande составляет более  $5.5 \cdot 10^{32}$  лет [Takhistov et al., 2015].

В целом, можно заключить, что проблема расхождений времен жизни нейтрона, полученных при разных способах измерений, пока достаточно далека от разрешения, но, вместе с тем, не исключается наличие неучтенных систематических ошибок эксперимента. **Следует отметить, что в настоящее время поставлено существенно меньше экспериментов на пучке, чем экспериментов с хранением нейтронов. Создание нового высокопоточного импульсного источника нейтронов в ОИЯИ будет способствовать восполнению этого пробела.** В рамках подготовки к выполнению этих экспериментов в ЛНФ ОИЯИ ведется разработка методики по непосредственному измерению потока нейтронов в высокоинтенсивных пучках, которая позволит поставить пучковый эксперимент, идеологически близкий к эксперименту по хранению нейтронов. Также рассматривается возможность создания вакуумированного нейтроновода, в котором можно будет разместить аппаратуру для регистрации протонов с целью проведения «традиционного» пучкового эксперимента.

### 8.1.2. Нарушение P и T-инвариантности

Долгое время предполагалось, что уравнения, описывающие физические процессы, инвариантны относительно инверсии пространственных координат, замены частиц на античастицы или обращения времени. Однако, в 1950-е при исследовании распадов заряженных K-мезонов были обнаружены свидетельства несохранения P-четности.

Наглядным экспериментом, в котором проявляется несохранение P-четности, является опыт Wu [Wu et al., 1957], в котором наблюдалась анизотропия вылета электронов бета-распада относительно направления спина распадающегося  $^{60}\text{Co}$ . Масштаб данного эффекта достаточно велик, и он не представляет больших сложностей в наблюдении. Иначе обстоит дело с ядерными процессами, в которых тоже происходит нарушение P-четности, значительно меньшее по масштабу и обусловленное слабой компонентой ядерных сил. Тем не менее, в некоторых ядрах происходит усиление P-нечетного эффекта:

- основной переход между состояниями подавлен и к нему примешивается другой за счет P-нечетных сил – так называемое структурное усиление;
- переход происходит из высоковозбужденного состояния ядра, в котором посредством

слабых сил смешиваются  $S (JP=1/2^+)$  и  $P (JP=1/2^-; 3/2^-)$  состояния.

$P$ -нечетные эффекты могут наблюдаться в самых различных процессах:

- циркулярной поляризации гамма-квантов, испущенных ядрами после захвата нейтрона [Alberi et al., 1972], возникающей из-за смешивания гамма-перехода разрешенной мультипольности (например, перехода с моментом  $1$ , и не изменяющего четность,  $M1$ ) с переходом, изменяющим четность и уносящим ту же величину момента ( $E1$ );
- асимметрия в направлении вылета гамма-кванта “по спину – против спина” относительно направления спина нейтрона, вызывающего радиационный захват;
- асимметрия в направлении вылета одного из осколков (легкого или тяжелого) относительно направления спина нейтрона, вызывающего деление ядра;
- зависимость пропускания продольно поляризованных нейтронов через неполяризованную мишень от спиральности налетающих нейтронов.

Исследование  $P$ -нечетных эффектов имеет достаточно длительную историю. Экспериментальным подтверждением существования явления усиления стали результаты, полученные в ЛНФ ОИЯИ для резонансов в  $^{117}\text{Sn}$ ,  $^{139}\text{La}$ ,  $^{81}\text{Br}$  [Alfimenkov, 1983], величина наблюдаемых  $P$ -нечетных эффектов 10 %.

В настоящее время данные исследования продолжают представлять большой интерес и могут проводиться на перспективном источнике нейтронов в ОИЯИ на новом уровне точности с применением современной электроники. При изучении  $P$ -нечетных эффектов в угловых распределениях  $\gamma$ -квантов критически важно выделять отдельные  $\gamma$ -переходы при возбуждении конкретных состояний. Примерами работ в данном направлении, ведущимися в настоящее время, могут быть эксперименты на ускорительном комплексе J-PARC. Из полученных угловых распределений  $\gamma$ -квантов извлекались парциальные нейтронные ширины исследуемых резонансов, необходимые для оценки величины матричного элемента слабого взаимодействия, нарушающего пространственную четность [Okudaira, 2018; Okudaira, 2023; Koga 2022]. Схема использованной в этих работах экспериментальной установки приведена на рисунке 8.2. Гамма-кванты регистрировались спектрометрической системой, состоящей из 25 детекторов из сверхчистого германия, что позволяло наблюдать исследуемый эффект в выделенной  $\gamma$ -линии.

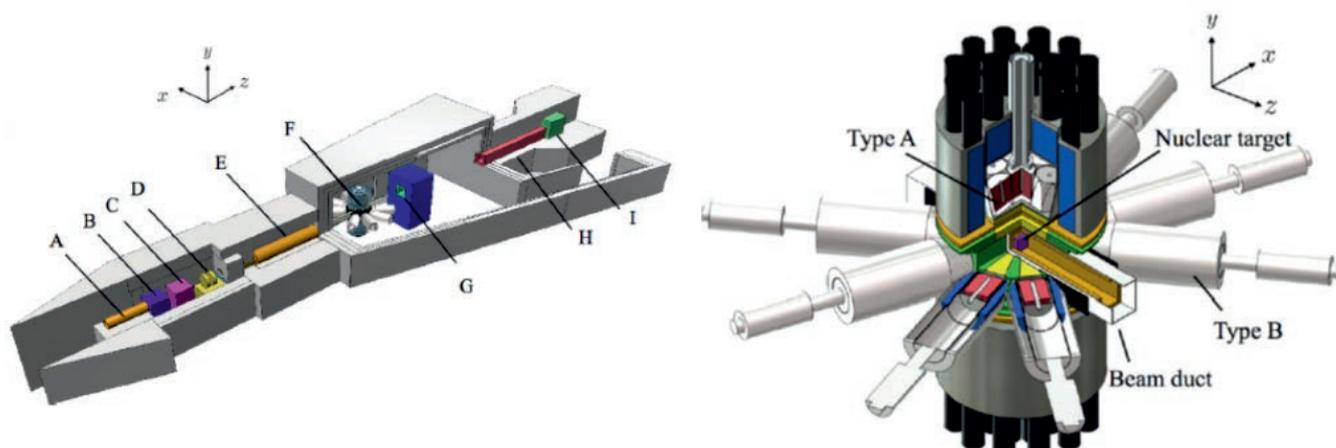


Рис. 8.2. Схема спектрометра на основе германиевых детекторов на инструменте ANNRI (Accurate Neutron–Nucleus Reaction Measurement Instrument), J-PARC для измерения угловых распределения  $\gamma$ -квантов. A, E, G – коллиматоры, B, D – чопперы, F – сборка из германиевых детекторов, H, I – beam stop.

Представленная схема экспериментальной установки достаточно универсальна для исследования  $\gamma$ -излучения, испускаемого в нейтрон-ядерных реакциях. Применение аналогичной установки на новом нейтронном источнике может быть целесообразно не только для исследования параметров низколежащих резонансных состояний, но и, например, для исследования выходов продуктов деления, аналогично работе [Michelagnoli, 2018].

Особый интерес представляет поиск Т-нарушения в нейтрон-ядерных реакциях, что, согласно СРТ-теореме, эквивалентно CP-нарушению. К настоящему моменту этот эффект наблюдался только в распадах  $K^0$  и  $B^0$  – мезонов. Обнаружение нарушения Т-инвариантности в ядерных реакциях станет важным шагом к подтверждению универсальности слабого взаимодействия. В работе [Okudaira, 2018] сделана оценка возможного усиления нарушения Т-инвариантности в окрестности р-волнового резонанса. Предположения об одинаковом механизме нарушения пространственной и временной четности были высказаны в работе [Gudkov, 1992], поэтому подробное изучение Р-четных и -нечетных эффектов открывает возможности наблюдения эффектов несохранения временной четности в нейтронно-ядерных взаимодействиях.

Одним из возможных экспериментов по проверке нарушения Т-инвариантности является опыт типа “поляризация-асимметрия” детально обсуждаемый в [Беда, 2007], схема которого приводится на рисунке 8.3.

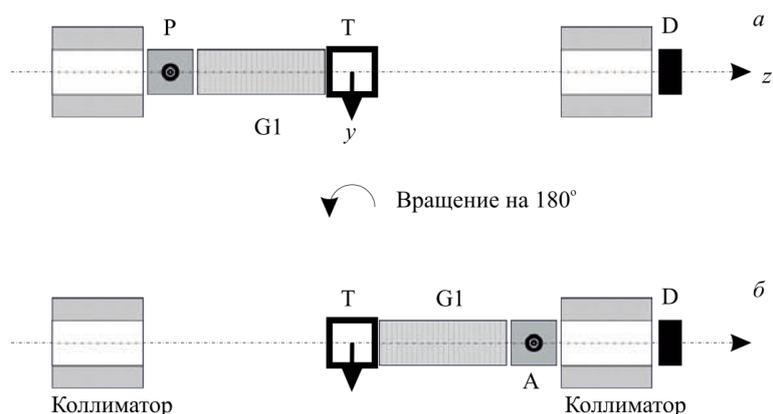


Рис. 8.3. Схема эксперимента типа “поляризация-асимметрия”. А-анализатор, Р-поляризатор, G1-система транспортировки, поддерживающая поляризацию нейтронов. Т-поляризованная мишень, D-детектор нейтронов. Источник: [Беда, 2007].

Идея предлагаемого эксперимента состоит в следующем: неполяризованный пучок нейтронов с постоянной интенсивностью  $I$  проходит через поляризатор и поляризованную мишень, после чего регистрируется детектором нейтронов. В этом случае скорость счета детектора будет  $N_1$ . Применение операции обращения времени к этому эксперименту должно приводить к тому, что нейтроны, двигаясь в направлении “от детектора”, последовательно проходят через мишень и поляризатор. Достичь такого эффекта можно поворотом установки на  $180^\circ$  вокруг оси, перпендикулярной направлению нейтронного пучка. При отсутствии нарушения Т-инвариантности скорость счета нейтронного детектора  $N_2$  будет равна  $N_1$ . Ожидаемая величина эффекта в настоящее время не определена.

Организация исследований по поиску и исследованию нарушения Р и Т-инвариантности возможна на новом источнике нейтронов, для чего потребуются создание выделенных каналов поляризованных нейтронов.

## 8.2. НЕЙТРОННАЯ ОПТИКА

### 8.2.1. Нестационарная квантовая механика и нейтронная оптика в случае больших ускорений

Нейтрон является весьма удобным объектом для изучения нестационарных квантовых явлений, когда параметры, описывающие взаимодействие нейтронной волны с объектом, зависят от времени. Нестационарное воздействие на нейтронную волну позволяет существенным образом менять интенсивность, длину волны, направление ее распространения. В ЛНФ имеется богатый опыт как теоретических, так и экспериментальных исследований в этой области (рисунок 8.4) [Frank et al., 2016; Кулин и др., 2019].

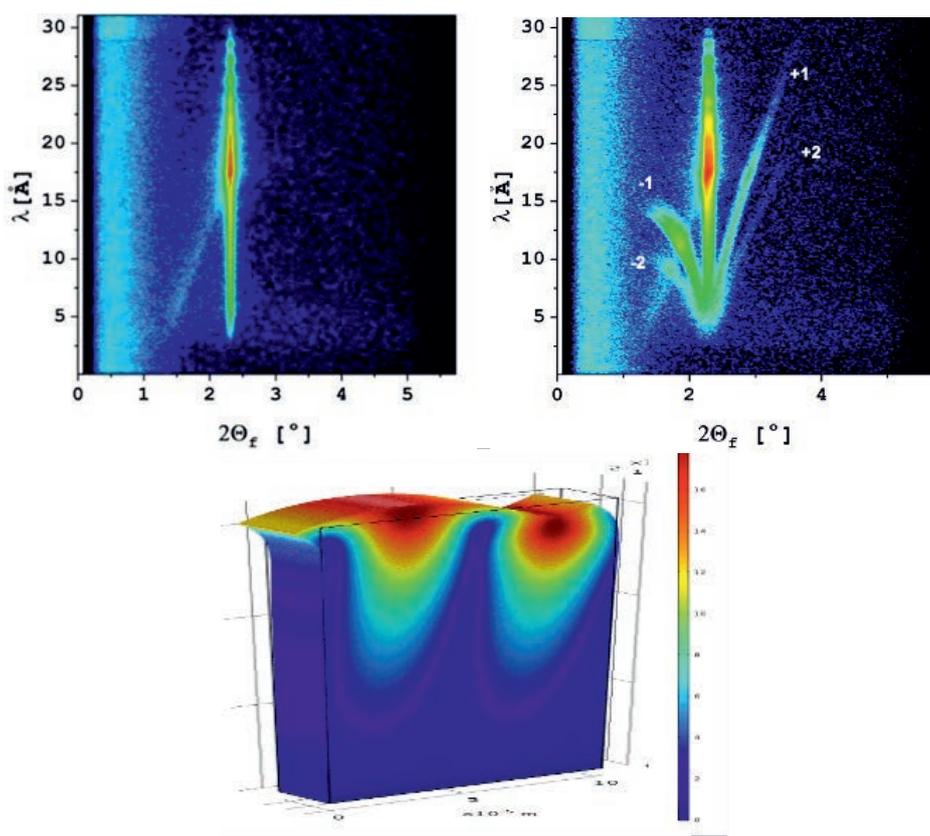


Рис. 8.4. 2D картина рассеяния холодных нейтронов на образце-монокристалле  $\text{LiNbO}_3$  в отсутствии ПАВ (слева); 2D картина рассеяния при дифракции холодных нейтронов на бегущей ПАВ (посередине), показаны номера порядков дифракции; характерная расчетная картина деформации поверхности при возбуждении ПАВ (справа), цветом показана величина смещение атомов из положения равновесия.

Большой интерес представляет исследование неупругого рассеяния нейтронов, в частности УХН, на поверхностных акустических волнах (ПАВ). ПАВ возникают из-за периодических колебаний приповерхностного слоя вещества, которое движется с переменной скоростью и ускорением. Для ПАВ с частотой десятков МГц это ускорение достигает значения  $10^7 g$ . Поэтому экспериментальное исследование этого явления можно рассматривать не только как наглядную демонстрацию нестационарного квантового эффекта, но и как чувствительный тест для проверки справедливости общепринятых законов нейтронной оптики в случае больших ускорений. Сам факт наблюдения эффекта нестационарной дифракции в геометрии отражения свидетельствует о том, что время формирования

отраженной волны в веществе по крайней мере меньше периода колебания поверхности. Вместе с тем вопрос о времени отражения нейтронных и рентгеновских волн в условиях превышения угла скольжения критического угла полного внутреннего отражения сегодня остается открытым [Бушуев и Франк 2018]. Любая экспериментальная информация, проливающая свет на этот вопрос, является очень важной. Проведение эксперимента с предельно высокими частотами колебания вещества, не менее 1 ГГц, позволит получить ответы на этот вопрос. Перспективный импульсный источник нейтронов в ЛНФ ОИЯИ является наиболее подходящим для решения таких задач.

Большой задел имеется в теоретическом исследовании задач о прохождении и отражении нейтронов от осциллирующих резонансных структур [Захаров и др., 2020; Zakharov et al., 2021]. Из этих исследований следует, что существенный результат на конечную картину оказывает не столько большое время взаимодействия, сколько его сочетание с фактом ускоренного движения образца. Экспериментальное подтверждение этих результатов представляет большой интерес и может быть выполнено на перспективном источнике нейтронов в ОИЯИ.

### 8.2.2. Нейтронная микроскопия

Принципиальная возможность создания нейтронного микроскопа была продемонстрирована экспериментально с УХН [Франк, 1987] еще в конце 80-х годов прошлого столетия. Активное развитие в последнее десятилетие неразрушающих методов анализа структуры образцов с помощью нейтронов – нейтронная радиография, а также совершенствование элементов нейтронной оптики возродило интерес к нейтронной микроскопии. Это привело к созданию группой MIT совместно с NIST нейтронного микроскопа на холодных нейтронах [Khaykovich et al., 2011; Liu et al., 2013; Hussey et al., 2021]. Почти одновременно в PSI также был создан нейтронный микроскоп для холодных нейтронов [Trtik et al., 2015], который уже перешел в стадию пользовательского инструмента.

Нейтроны обладают набором уникальных свойств, которые делают их более подходящими, чем свет, электроны или рентгеновские лучи, для изучения физических и химических свойств и процессов, происходящих внутри объекта. Отсутствие монотонной зависимости длины рассеяния от атомного числа или заряда ядер, как это имеет место, например, для рентгеновских лучей, приводит к существенному различию в показателях преломления не только для близких химических элементов, но и для изотопов одного элемента. С величиной показателя преломления связаны коэффициенты отражения и пропускания нейтронов. Поэтому вещества с различным, но близким химическим составом могут существенно различаться своими нейтронно-оптическими свойствами. Отрицательная длина рассеяния протона отличает водород от большинства других элементов, входящих в состав органических веществ. Благодаря различному содержанию водорода довольно близкие по составу вещества могут заметно отличаться нейтронно-оптическими свойствами. В связи с этим, нейтронный микроскоп может быть особенно полезен в биологических исследованиях.

Благодаря наличию у нейтрона магнитного момента, нейтронный микроскоп может быть полезен для получения информации о магнитной структуре исследуемого объекта. Использование поляризованных нейтронных пучков позволит измерять магнитные характеристики материалов.

Получаемый контраст в изображении в нейтронных микроскопах на холодных нейтронах основывается на изменении интенсивности пучка за счет поглощения или рассеяния в образце. Использование УХН в этом случае имеет ряд преимуществ. В частности, это увеличение контраста за счет роста сечения всех процессов как  $1/v$ , где  $v$  – скорость нейтрона. В работе [Masalovich et al., 1996] был предложен подход, который позволяет совместить

нейтронный микроскоп на УХН с методом фазового контраста, что открывает возможности исследования объектов, достаточно прозрачных для нейтронов.

### 8.2.3. Спин-эхо для УХН

Проблема времени взаимодействия в квантовой механике является предметом дискуссий на протяжении довольно длительного времени. Подход к измерению времени, которое частица проводит в потенциальной области через ларморовскую прецессию спина нейтрона в магнитном поле, предложенный в [Базь, 1966], был успешно использован в ряде экспериментов с нейтронным спин-эхо на холодных нейтронах, в частности, было измерено время туннелирования через резонансную потенциальную структуру, нейтронный интерференционный фильтр, а также время отражения от брэгговской структуры [Франк и др., 2002].

Создание спин-эхо спектрометра для УХН, а также методика, развитая группой ЛНФ, позволит продолжить исследования по времени взаимодействия на новом уровне чувствительности на перспективном источнике нейтронов.

### 8.2.4. Гравитационная спектроскопия и проверка слабого принципа эквивалентности

Нейтроны являются одними из наиболее подходящих объектов для исследования гравитационного взаимодействия элементарных частиц. Хотя гравитационные эксперименты с нейтронами имеют более чем полувековую историю, существующие экспериментальные данные довольно скудны и заметно уступают по точности результатам, полученным с атомными интерферометрами. Наиболее точные оценки на фактор эквивалентности получены из обработки эксперимента Майера-Лейбница и Кестера [Maier-Leibnitz et al., 1962; Koester, L., 1976] по измерению длины когерентного рассеяния нейтронов ядрами. Последний анализ этих результатов проведенный Шмидмайером [Schmiedmayer, 1989], позволил декларировать точность фактора эквивалентности на уровне  $3 \times 10^{-4}$ .

В квантовых гравитационных экспериментах с нейтронным интерферометром, в которых наблюдали вызванный гравитацией сдвиг фазы волновой функции нейтронов было получено расхождение [Littrell et al., 1997] между экспериментальным и теоретическим фазовыми сдвигами на уровне 1% с погрешностью, меньшей на порядок. Результаты более позднего эксперимента [Zou et al., 2000], точность которого была равна 0.9 %, не устранила эту проблему. В эксперименте с нейтронным спин-эхо спектрометром, измеренная величина вызванного гравитацией сдвига фазы согласуется с расчетом на уровне 0.1%, в то время как общая точность измерения составила 0.25%.

Группой ЛНФ в эксперименте [Франк и др., 2007], в котором изменение энергии нейтрона, падающего на известную высоту в гравитационном поле Земли, компенсировалось квантом энергии  $\hbar\Omega$ , который передавался нейтрону посредством нестационарного взаимодействия с движущейся дифракционной решеткой, удалось получить точность подтверждения справедливости слабого принципа эквивалентности на уровне  $2 \times 10^{-3}$ .

В экспериментах по исследованию переходов между квантовыми состояниями, возникающими при квантовании энергии вертикального движения ультрахолодных нейтронов группой TU Wien [Cronenberg et al., 2015] была получена точность  $4 \times 10^{-3}$ , сравнивая с результатом группы ЛНФ.

В настоящее время предложен новый подход к эксперименту со свободным падением с УХН [Zakharov et al., 2016]. Идея состоит в измерении значения времени пролета нейтронов для разных эквидистантных линий дискретного энергетического спектра с точно известным расстоянием между линиями (рисунок 8.5). В этом методе не требуется знать ни начальную

энергию нейтронов, ни геометрические параметры установки. Постановка такого эксперимента на новом источнике УХН вполне могла бы дать возможность продвинуться в точности.

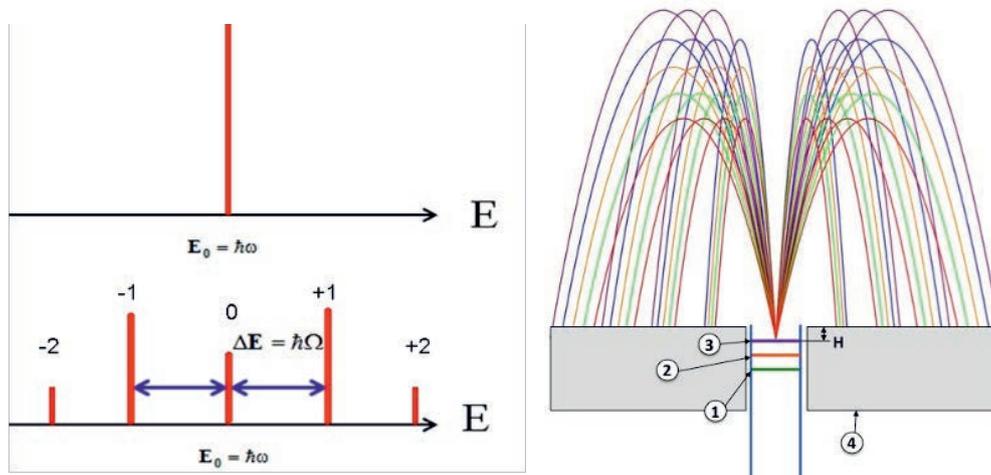


Рис. 8.5. Формирование дискретного энергетического спектра нестационарным квантовым устройством (слева); Принципиальная схема УХН эксперимента со свободным падением нейтрона (справа): 1- нейтронный интерференционный фильтр (монокроматор), 2- нестационарное квантовое устройство, 3- Фурье-прерыватель, 4- кольцевой детектор.

## 8.3. ФИЗИКА ДЕЛЕНИЯ

### 8.3.1. Исследование T-нечетных эффектов в делении

Деление тяжёлых ядер – процесс с огромным энерговыделением (около 200 МэВ), что делает возможным протекание различных экзотических процессов (рождение мезонов, деление с испусканием трёх и более фрагментов). Также среди продуктов деления возможен поиск связанных состояний нейтронов – динейтронов, тетранейтронов и т.д. Исследование TRI- и ROT-эффектов, приводящих к асимметрии испускания осколков деления и вторичных частиц (легких заряженных частиц, гамма-квантов и нейтронов) при изменении поляризации налетающих нейтронов, позволяет более полно исследовать механизм деления.

Вынужденное деление ядер  ${}^Z A(n, f)$  происходит с формированием высоковозбужденного и сильно деформированного промежуточного состояния ядра  ${}^Z(A+1)$ , которое зачастую имеет вращательную природу. В этом случае продукты деления приобретают тангенциальную составляющую скорости в начальный момент разрыва шейки деформированного ядра, направленную перпендикулярно оси деформации. Траектория осколка вместо прямолинейной, обусловленной кулоновским отталкиванием осколков, становится гиперболической и отклоняется от первоначального положения оси деформации на некоторый малый угол  $\Delta\theta$ . Измерение этого угла дает представление о скорости вращения ядра.

Эффект вращения ядра, так называемый ROT-эффект, впервые был обнаружен в угловых распределениях  $\alpha$ -частиц тройного деления ядра  ${}^{235}\text{U}$  холодными поляризованными нейтронами [Goennenwein, 2007]. Однако, траектории движения  $\alpha$ -частиц тройного деления, образующихся в момент разрыва ядра, частично поворачиваются вместе с осью деления, поскольку на их движение существенно влияет кулоновское поле разлетающихся осколков (рисунок 8.6.). Поэтому для определения угла поворота именно оси деления (величина ROT-эффекта) в тройном делении необходимы детальные траекторные расчеты [Guseva, 2007].

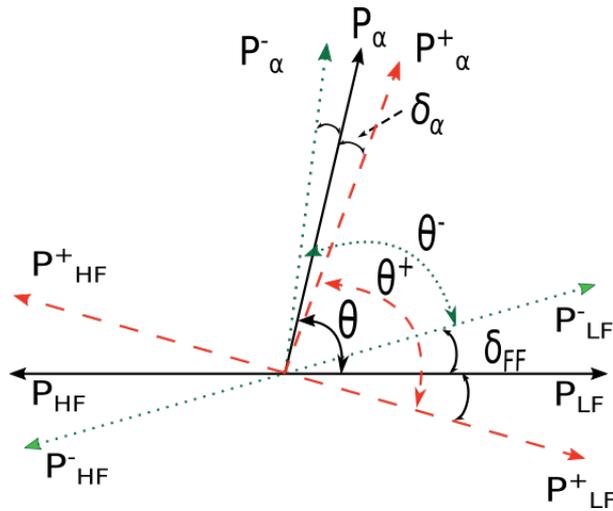


Рис. 8.6. Схематическое изображение формирования сдвига углового распределения  $\alpha$ -частиц тройного деления. PLF, PHF — начальные направления легкого и тяжелого фрагментов соответственно;  $P_\alpha$  — движение  $\alpha$ -частицы в момент разрыва. «+» и «-» обозначают конечные направления объекта для противоположных направлений поляризации нейтрона.

В качестве метки ориентации оси деформации перед развалом ядра могут служить так называемые мгновенные  $\gamma$ -кванты, испускаемые возбужденными осколками деления. В момент разрыва шейки делящегося ядра, спины возбужденных осколков деления оказываются выстроены в плоскости, ортогональной оси, соединяющей центры масс двух осколков, и их ориентации не изменяются при отклонении траектории осколков от первоначального направления оси деформации. Важно заметить, что для  $\gamma$ -квантов, в отличие от  $\alpha$ -частиц, определение угла поворота не требует траекторных расчетов и является в этом смысле модельно-независимым. Данный факт существенно упрощает исследование ROT-эффекта.

Пример конструкции экспериментальной установки для регистрации корреляций  $\gamma$ -квантов и направлений вылета осколков приведен на рисунке 8.7.

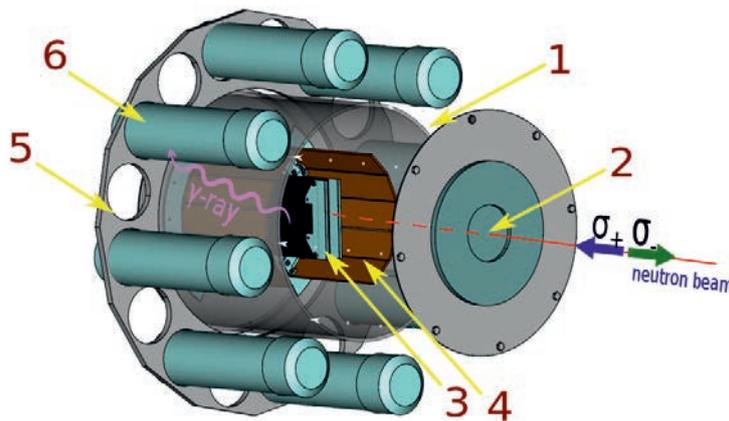


Рис. 8.7. Схема экспериментальной установки по исследованию ROT-эффекта по корреляциям  $\gamma$ -квантов и осколков деления. 1 — камера деления, 2 — входное Al окно камеры, 3, 4 — детекторы осколков деления на основе позиционно-чувствительных многопроволочных пропорциональных счетчиков низкого давления (стартовые и стоповые детекторы), 5 — держатель, 6 — сцинтилляционные пластиковые детекторы  $\gamma$ -квантов и нейтронов. Делящаяся мишень находится в центре, между стартовых детекторов.

Особый интерес представляет исследование ROT-эффекта в резонансной области, так как именно резонансные состояния позволяют выделить отдельные каналы, характеризующиеся четко определенным (и известным) набором квантовых чисел. В частности, наблюдаемые TRI и ROT эффекты в делении на данный момент являются единственными источниками надежной информации о квантовом числе  $K$ , характеризующем каналы деления. Изучение наиболее низких резонансных состояний может быть выполнено на импульсном источнике, несмотря на большую длительность вспышки (рисунок 8.8).

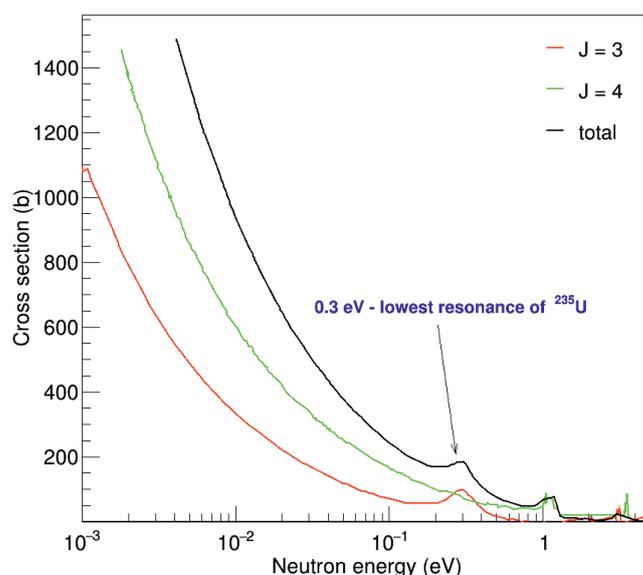


Рис. 8.8. Спиново-разделённые сечения деления для  $^{235}\text{U}$ . Красная линия соответствует спину  $J = 3$ , Зеленая линия соответствует спину  $J = 4$ , черная линия соответствует полному сечению.

В 2018 г. впервые удалось провести измерение ROT-эффекта для гамма-квантов в делении  $^{235}\text{U}$  в низколежащем резонансе 0.3 эВ. Полученные результаты согласуются с теорией, однако для дальнейшего изучения квантово-механических свойств процесса деления целесообразно продолжение этих работ с целью получения данных для более высоколежащих резонансов, а также для других ядер. В частности, в качестве кандидатов предложены ядра  $^{241}\text{Am}$  и  $^{245}\text{Cm}$ .

### 8.3.2. Исследование и поиск редких мод деления

Другим возможным направлением работ, успешно развивающимся как в ЛНФ ОИЯИ, так и в ЛЯР ОИЯИ является изучение редких мод деления. Обычно, в результате деления образуется два осколка, но иногда, вместо обычного «двойного деления», наблюдается процесс более высокой множественности с вылетом одного и более дополнительных фрагментов, которые легче основных осколков деления (рисунок 8.9). Причиной этого процесса является кластеризация – образование устойчивых групп нуклонов внутри ядер. Вероятность таких процессов быстро падает с ростом множественности продуктов. Интересным направлением исследований является определение природы деления с испусканием трех и более фрагментов: испускаются они непосредственно в момент разрыва одновременно с тяжелыми осколками, или же являются продуктами их распада? В частности, в случае четверного деления помимо двух тяжелых фрагментов рождается два легких, которые могут быть испущены в момент разрыва ядра («истинное четверное деление»), или же при распаде нестабильного легкого продукта тройного деления, например  $^7\text{Li}^*$ ,  $^8\text{Be}$ ,  $^9\text{Be}^*$  («псевдочетверное» деление). Эти процессы могут быть разделены кинематически.

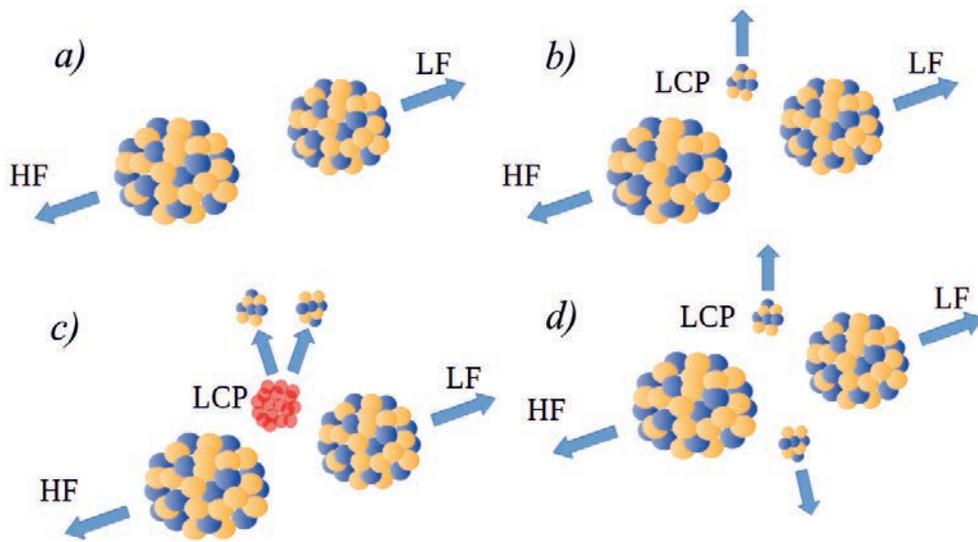


Рис. 8.9. a) обычное, "двойное" деление, b) тройное деление, c) псевдо-четверное деление, d) истинное четверное деление.

Исследование редких мод деления может быть выполнено с использованием современных достижений техники эксперимента. Пример схемы постановки эксперимента приведен на рисунке 8.10.

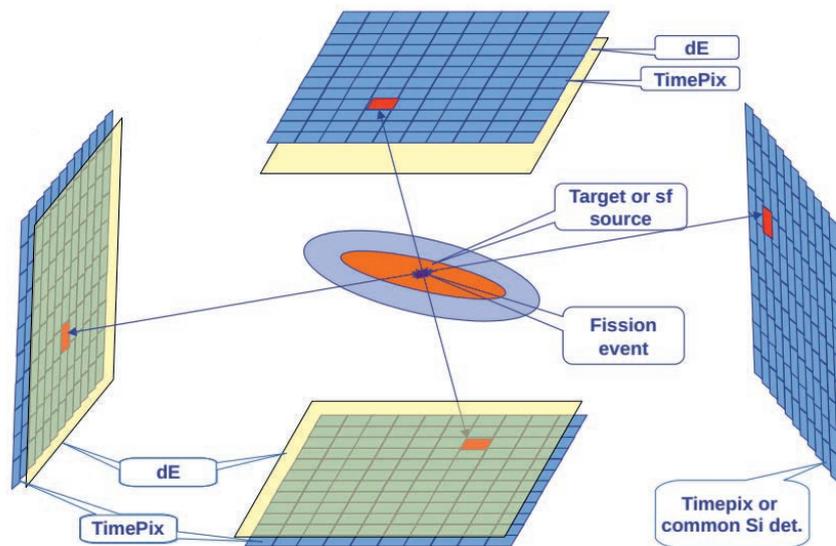


Рис. 8.10. Пример схемы постановки эксперимента для исследования редких мод деления.

Идентификация продуктов происходит с помощью позиционно-чувствительных  $E$ - $\Delta E$  телескопов. Детекторы такого типа могут предоставлять многопараметрическую пособытийную спектроскопическую информацию (положение, энергия и время, тип) для практически любых заряженных частиц. Кроме того, сочетание с анализом отслеживания событий обеспечивает улучшенное соотношение сигнал/шум с высоким подавлением фоновых и нежелательных событий. Примеры идентификации легких продуктов деления приведены на рисунке 8.11.

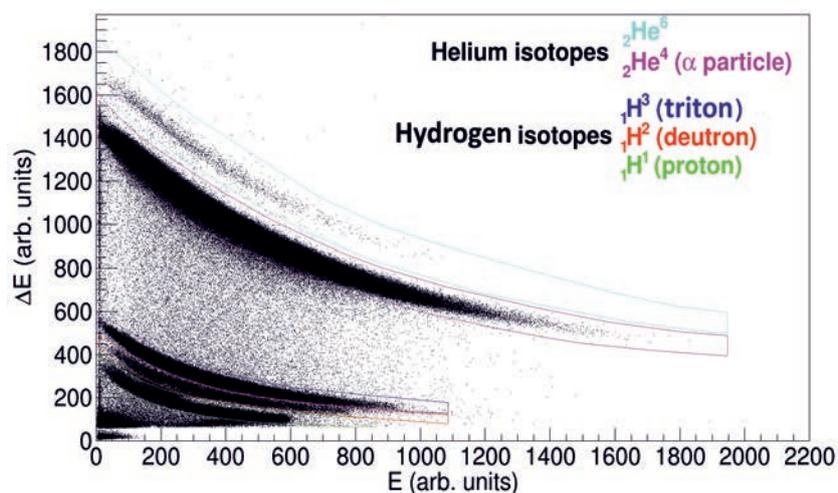


Рис. 8.11.  $\Delta E$ - $E$  спектр легких тройных и четверных частиц.

Исследование физики деления является перспективным направлением работ, которое будет развиваться на новом источнике нейтронов. Для проведения подобных экспериментов необходим интенсивный поляризованный пучок нейтронов в низкоэнергетической резонансной области.

## 8.4. ПОЛУЧЕНИЕ ЯДЕРНЫХ ДАННЫХ

Получение и актуализация ядерных данных является важной составляющей научной программы перспективного источника нейтронов в ЛНФ. Точные сведения о сечениях нейтрон-ядерных реакций необходимы для проектирования энергетических и исследовательских реакторов нового поколения, развития техники наработки изотопов для промышленного и медицинского применения, разработки новых радиоизотопных источников энергии, элементного анализа и других областей человеческой деятельности [Bernsein, 2015].

Можно выделить следующие основные направления работ по получению ядерных данных, которые будут проводиться на перспективном источнике нейтронов в ОИЯИ:

- Сечения активации для дозиметрических целей.
- Сечения деления и выходы продуктов деления для широкого диапазона энергий налетающих нейтронов.
- Данные по распаду радиоактивных изотопов, в том числе, короткоживущих.

### 8.4.1. Сечения активации для дозиметрических целей

В дозиметрии использование стандартов является одной из наиболее распространенных методик. Их применение зачастую существенно проще непосредственного измерения потоков частиц. Точность получаемых в этой методике результатов ограничивается сверху имеющимися неопределенностями сечений реакций на эталонных элементах. Выбор этих эталонных или «стандартных» образцов, в основном, определяется практическими соображениями, например, желательна плавная энергетическая зависимость и большая величина сечения; процесс должен быть легко наблюдаем в распространенных типах детекторов и т.д.

В частности, для измерения нейтронных потоков рекомендованы реакции  $H(n,n)$ ,  ${}^3\text{He}(n,p)$ ,

${}^6\text{Li}(n,t)$ ,  ${}^{10}\text{B}(n,\alpha)$ ,  ${}^{10}\text{B}(n,\alpha1\gamma)$ ,  $\text{Au}(n,\gamma)$  и  ${}^{235}\text{U}(n,f)$ . Вместе с тем, этот список может быть дополнен. Одним из возможных направлений работ на новом нейтронном источнике может стать проверка пригодности отдельных реакций захвата для использования в качестве новых стандартов и высокоточное измерение сечений захвата по запросу групп, занимающихся созданием баз оцененных данных.

## 8.4.2. Сечения деления и выходы продуктов деления для широкого диапазона энергий налетающих нейтронов

Корректная информация о процессе деления тяжелых ядер необходима для множества приложений: оптимизация теоретических моделей, моделирование ядерных реакторов нового поколения и систем ADS. Точные оценки выходов продуктов деления важны для развития методов наработки изотопов для промышленного и медицинского применения.

К настоящему моменту основная информация о сечениях деления, множественности нейтронов и выходах продуктов деления доступна для процессов, происходящих под действием тепловых нейтронов, некоторый недостаток информации существует для резонансной области и быстрых нейтронов вплоть до 14 МэВ. Существует большая потребность в данных для реакций под действием нейтронов высоких энергий.

Востребованные для целей мониторинга нейтронных полей и оценки соотношения U/Pu в ядерном топливе выходы продуктов деления известны с недостаточной точностью. Для развития теоретических моделей необходимы данные по полным кинетическим энергиям продуктов деления в зависимости от энергии налетающих нейтронов, соответствующие образованию конкретных ядер-продуктов. Необходимы тщательные измерения спектров гамма-квантов, испускаемых распадающимися радиоактивными фрагментами для более простого определения выходов продуктов деления для дальнейшего анализа условий облучения делящихся материалов. Выходы мгновенных гамма-квантов востребованы для развития методики элементного анализа. Наиболее полная к настоящему времени подборка данных такого типа создана по результатам измерений в 1970-х [Demidov, 1978], высокая востребованность этой информации подчеркивается в [Bernsein, 2015] и [Hurst, 2021].

Для выполнения обсуждаемых исследований имеет смысл добиваться наиболее высокой интенсивности нейтронного потока (особенно для измерений по полным кинетическим энергиям продуктов деления в зависимости от энергии налетающих нейтронов с привязкой к выходам отдельных продуктов деления) и минимального фона.

Для измерения характеристик гамма-излучения целесообразно создание спектрометрических систем аналогичных описанным в разделе 8.1.2.

## 8.4.3. Данные по распаду радиоактивных изотопов, в том числе, короткоживущих

Значение информации о временах жизни и каналах распада радиоактивных ядер сложно переоценить. Изотопные источники ионизирующего излучения широко применяются в медицинских целях, для дефектоскопии и дезинфекции, могут быть использованы в качестве меток при исследовании потоков различных жидкостей. Данные о распадах нейтронно-избыточных продуктов деления необходимы для планирования режимов работы реакторов и периодичности перегрузок топлива.

Реакция деления является уникальным источником нейтронно-избыточных ядер. Среди продуктов деления  ${}^{238}\text{U}$  наблюдалось более 800 различных нуклидов, при распаде которых излучаются электроны, антинейтрино, а в случае большого нейтронного избытка – запаздывающие нейтроны. Испускаемые радиоактивными ядрами заряженные частицы могут

вызывать образование дефектов в оболочках ТВЭЛов и контейнерах для хранения радиоактивных материалов, также они вносят вклад в тепловыделение в реакторе. Информация о временах жизни ядер, излучающих запаздывающие нейтроны и спектрах этих нейтронов, зависимости выходов фрагментов деления в цепочке распада которых присутствуют испускающие запаздывающие нейтроны нуклиды от энергии частиц, вызвавших деление, имеют большое значение для моделирования реакторов нового поколения.

Секцией ядерных данных МАГАТЭ сформированы списки наиболее востребованных данных по распаду продуктов деления [INDC(NDS)-0499, 2006; INDC(NDS)-0676, 2014; INDC(NDS)-0643, 2016], среди которых представлены ядра с ожидаемыми временами жизни от долей секунд ( $^{87}\text{Sr}$ ) до десятков дней ( $^{89}\text{Sr}$ ), большая часть предлагаемых к исследованию изотопов живет десятки секунд.

Измерение характеристик распада радиоактивных ядер, рождающихся в результате деления и распада продуктов деления, является одним из возможных направлений работ по накоплению ядерных данных на новом источнике нейтронов. Импульсная работа источника может быть существенным преимуществом при исследовании короткоживущих (~микросекунды) радиоактивных ядер.

### 8.5. ИСТОЧНИК ЭКЗОТИЧЕСКИХ ЯДЕР И ИССЛЕДОВАНИЯ НА РАДИОАКТИВНЫХ ПУЧКАХ

Исследование нейтронно-избыточных ядер представляет большой интерес для понимания изоспиновой симметрии ядерных сил, поиска новых магических чисел, проверки корректностей параметров ядерных моделей, полученных на стабильных и долгоживущих ядрах.

Нейтронно-избыточные ядра получают в хорошо изученном процессе деления тяжелых ядер из-за того, что соотношение  $N/Z$  в тяжелых долгоживущих ядрах больше, чем в средних стабильных. При делении ядер нейтронами распределение осколков по заряду и массе концентрируется в области магических чисел, которое сглаживается с ростом энергии налетающих нейтронов.

Целесообразность создания фабрики экзотических ядер на новом источнике нейтронов обсуждалась в [Аксенов, 2021]. В качестве источника экзотических нуклидов может быть использована реакция деления тяжелых ядер, что уже реализовано в ряде проектов: SPIRAL [Lewitowicz, 2008], FIPPS [Michelagnoli, 2018], PARRNe [Lau, 2003].

На реакторе ПИК планируется создание установки PITRAP [Novikov, 2019]. В этом проекте в активной зоне реактора будет размещаться делящаяся мишень из  $^{235}\text{U}$  (фольга массой 1.5 г., толщиной 10 мкм, площадью 150 см<sup>2</sup>). Продукты деления будут доставляться в источник ионов потоком гелия по капилляру  $\varnothing$  1 мм (давление 0.2–0.3 МПа). Полученные ионы затем проходят через масс-сепаратор и накапливаются в ловушках Пеннинга для дальнейшего изучения.

Ожидаемый поток нейтронов в месте расположения мишени:  $3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ . Предполагается, что использование данного источника позволит получить на входе в ловушки значимое количество экзотических ядер, в том числе, неизвестных в настоящее время.

В соответствии с представленной на рисунке 8.12. диаграммой, на источнике PITRAP получается достаточное для изучения количество ранее неизвестных ядер с  $96 < N < 124$  и  $56 < Z < 72$ .

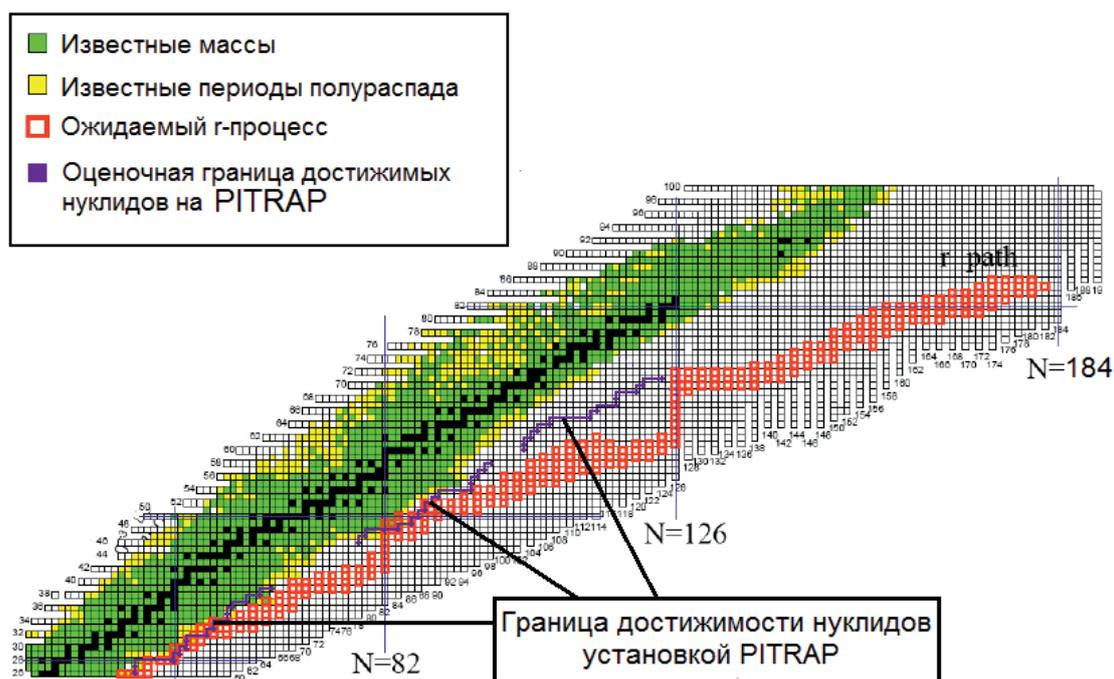


Рис. 8.12. Фрагмент N–Z диаграммы с обозначенной границей достижимости экзотических ядер на источнике “PITRAP”

На новом источнике нейтронов в ЛФФ ОИЯИ исследование экзотических ядер может развиваться в двух направлениях:

1. Исследование непосредственно продуктов деления, поступающих из делящейся мишени (аналогично проекту PITRAP).
2. Использование продуктов деления для создания радиоактивных пучков и дальнейшего синтеза сверхтяжелых ядер и/или исследование ядерных реакций с экзотическими ядрами (в обратной геометрии).

Свидетельством актуальности работ по исследованию экзотических нейтронно-избыточных ядер может быть значительное количество близких по тематике проектов в ведущих научных центрах: HIRFL [Yang, 2013], SPIRAL2 [Dolegieviez, 2019], ISOLDE [Catherall, 2018].

## 8.6. ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЙТРИНО И ДРУГИХ РЕДКИХ СОБЫТИЙ

### 8.6.1. Оценка спектров антинейтрино для целей мониторинга состояния реактора

Ядерные реакторы являются мощными источниками антинейтрино (около  $10^{21}$  в секунду на ГВт), испускаемых при  $\beta$ -распаде нейтронно-избыточных продуктов деления. Такой интенсивный поток антинейтрино позволяет применять сравнительно компактные нейтринные детекторы. Мониторинг антинейтринного потока от реактора является одним из перспективных методов контроля режима работы реактора и позволяет оценивать накопление  $\beta$ -радиоактивных ядер. Информация о спектрах антинейтрино, испускаемых при  $\beta$ -распаде, может быть получена путем спектрометрии сопутствующих электронов. В настоящее время есть два способа расчета “опорных” спектров реакторных антинейтрино. Первый –

моделирование суммарного спектра на основе известных данных о выходах продуктов деления, цепочках их распадов и спектров  $\beta$ -электронов [Fallot, 2012]. Второй – предполагает непосредственное измерение спектров электронов, испускаемых делящейся мишенью и последующий пересчет в спектры антинейтрино с использованием “эффективных” зарядов продуктов деления [von Feilitzsch, 1972]. Первый метод требует высоких точностей информации о выходах и спектрах  $\beta$ -электронов для большого (около 800) числа продуктов деления и дочерних изотопов, которая доступна не для всех возможных продуктов деления. Второй метод также требует информацию о выходах (около 30) продуктов деления для корректного расчета эффективного заряда получившихся радиоактивных ядер, но количество этих ядер существенно меньше.

Актуальность работ по всестороннему исследованию спектров  $\beta$ -электронов и точному определению выходов продуктов деления также подкрепляется обнаружением так называемой аномалии малой дистанции, проявляющейся в недостатке наблюдаемых электронных нейтрино на малых расстояниях от источника по сравнению с модельными представлениями [Mention, 2011]. В настоящее время существование этого эффекта не является подтвержденным с достаточной значимостью. Одним из возможных объяснений этого эффекта является гипотеза стерильного нейтрино.

### 8.6.2. Непосредственное исследование реакторных нейтрино

Большой поток антинейтрино от ядерных реакторов делает перспективным исследование их свойств с применением сравнительно компактных детекторов, размещаемых недалеко от активной зоны. Энергетический спектр реакторных антинейтрино полностью удовлетворяет условию полной когерентности упругого рассеяния на ядре. ОИЯИ хорошо известен своей реакторной программой нейтрино, включающей такие эксперименты, как DANSS [Skrobova, 2023], GEMMA [Beda, 2013], nuGeN [Alekseev, 2022] и др. В этой связи представляется перспективным создание на перспективном импульсном источнике ОИЯИ новой площадки для изучения нейтрино (Neutrino Study New Site – NSNS).

Возможный список исследований, которые можно провести на NSNS:

- Разработка и тестирование новых типов детекторов нейтрино. ОИЯИ имеет опыт разработки детекторов нейтрино разных типов, в частности, работы по изучению нейтрино ведутся в Лаборатории ядерных проблем (ЛЯП) [Skrobova, 2023; Beda, 2013; Alekseev, 2022]. ЛЯП разрабатывает новые детекторы нейтрино с учетом различных подходов к распознаванию нейтринных событий. Такие детекторы могут быть развернуты на новом полигоне изучения нейтрино на импульсном источнике нейтронов в ОИЯИ для проведения исследований в области техники детектирования нейтрино, а также для выполнения ряда физических исследований, описанных ранее.
- Измерение спектра электронных антинейтрино. Получение спектра при высоких энергиях и исследование короткоживущих продуктов деления. Некоторые короткоживущие изотопы могут иметь каналы бета-распада с высокой энергией, в которых могут рождаться высокоэнергетичные антинейтрино (что может привести к образованию антинейтрино с высокой энергией). Информация о короткоживущих изотопах со временем распада менее долей секунды, образующихся при делении ядер, практически отсутствует. В то же время распад с высокой энергией может привести к значительно большей энергии отдачи в процессе когерентного упругого нейтрино-ядерного рассеяния (CEvNS), чем обычно считается. Например, максимальное упругое рассеяние антинейтрино с энергией 10 МэВ на германии приводит к максимальной энергии отдачи около 500 эВ. Измерение такой энергии

доступно только специальным уникальным HPGe-детектором. Напротив, нейтрино с энергией 20 МэВ может генерировать сигнал с энергией 2–2,5 кэВ, что превышает энергетический порог почти для всех обычных HPGe-детекторов больших размеров. Число взаимодействий нейтрино такой высокой энергии, которое можно обнаружить, резко увеличится. Обнаружение антинейтрино высоких энергий в совпадении с импульсом источника может быть единственным способом получить информацию о существовании таких высокоэнергетических бета-переходов в природе. Это также могло бы стать критически важным вкладом для экспериментов, направленных на прецизионные исследования нейтрино, таких как RICOCHET [Augier, 2023], JUNO [JUNO, 2022] и других (при участии ОИЯИ).

- Поиск аксионоподобных частиц большой массы [Krasznahorkay, 2019]. Высокоэнергетические гамма-переходы в продуктах деления могут являться индикатором существования и некоторых других экзотических явлений, например, нового скалярного бозона большой массы [Krasznahorkay, 2016; Feng, 2016; Cartlidge, 2016; Krasznahorkay, 2019]. Таким образом, обнаружение неожиданных гамма-излучений (результат распада преобразования бозон-гамма внутри детектора) в совпадении с реакторным импульсом может свидетельствовать об его обнаружении и будет проявлением такого широко искомого нового скалярного бозона. Также возможен поиск стерильного нейтрино.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные вызовы современной цивилизации, стоящие перед человечеством, связаны с ростом численности населения, заботой о здоровье и экологии, доступностью чистой воды, продуктов питания и энергии, средств связи, хранения и обработки больших массивов данных, решением транспортных проблем, обеспечением комфортности и безопасности жизни и многим другим. Поскольку масштабы и актуальность этих и других проблем общества становятся все более очевидными, возникают новые задачи для исследователей в физике конденсированных сред и изучении мягкого вещества, которые ставятся перед учеными стран-участниц ОИЯИ промышленностью, экономикой, обществом и академическим сообществом. Экспериментальная база Объединенного института ядерных исследований должна соответствовать самому передовому уровню, чтобы иметь возможность ответить на эти вызовы. Очевидно, что этому будет способствовать и расширение возможностей по использованию коллективного доступа к установкам на перспективном импульсном источнике нейтронов в Лаборатории нейтронной физики – единственном импульсном высокопоточном источнике нейтронов в странах-участницах ОИЯИ.

Физика конденсированного состояния объединяет исследования фундаментальных свойств вещества, возникающих в результате взаимодействия большого числа атомов и электронов. Сложный характер этих взаимодействий приводит к особенностям строения различных материалов, которые интересны в различных областях физики, химии, биологии, геологии и астрономии, а также практически во всех технических областях. Ряд задач по исследованию структуры и динамики конденсированных сред и мягкого вещества в науках о жизни и в области наук о Земле, в изучении наносистем, в материаловедении, в том числе, исследовании функциональных и магнитных материалов, применяемых в информационных системах, химии, энергетике, исследовании и сохранении культурного наследия, экологии и др. могут быть выполнены либо только методами нейтронного рассеяния, либо в сочетании с другими методами, комплементарными нейтронным [Белушкин и др., 2011; Лебедев и др., 2021].

Концентрация в ОИЯИ на перспективном исследовательском источнике нейтронов установок на выведенных пучках, работающих в большом диапазоне длин волн и переданных импульсов, специализированных для выполнения исследований для решения широкого круга научных и прикладных задач в области конденсированных сред, мягкого вещества и ядерной физики дает уникальные возможности для исследователей из стран-участниц ОИЯИ решить поставленные задачи.

С каждым годом все больше растет интерес к пониманию архитектуры живых систем и процессов, происходящих в них. Такое понимание поможет создавать новые биоматериалы и развивать биотехнологии, управлять биосистемами и организмами, создавать системы с заданными характеристиками, развивать природоподобные технологии. Приведем лишь малую долю биологических объектов, которые имеют большой потенциал для исследования и которым будет уделяться повышенное внимание в ближайшие десятилетия:

- макромолекулы (белки, ДНК, РНК, липиды);
- биологические мембраны и мембранные белки;
- неупорядоченные белки;
- сложные биоконплексы (ферментативные системы, белок-липидные, белок-нуклеиновые комплексы и т.д.);
- сигнальные системы (рецепторы, фотосистемы);

- биогибридные материалы;
- ткани;
- органеллы и живые клетки и др.

Для их исследования необходимо применение и развитие на установках на выведенных пучках ряда методов нейтронного рассеяния, таких как малоугловое рассеяние нейтронов; дифракция для макромолекулярных кристаллов; рефлектометрия; нейтронная спектроскопия (неупругое рассеяние, неупругое спин-эхо, квазиупругое рассеяние); нейтронная томография и нейтронный активационный анализ. Установки для реализации данных методов, несомненно, должны быть установлены на выведенных пучках на перспективном источнике нейтронов в ЛНФ ОИЯИ. Методы рассеяния нейтронов будут и далее широко применяться и в медицине, и фармацевтике, например, для изучения новых передовых лекарств. Отдельным, большим направлением исследований на новом источнике нейтронов могут стать исследования в области радиобиологии.

Реализация научной программы на новом источнике нейтронов в ЛНФ ОИЯИ в области исследования мягких конденсированных сред и наносистем внесет крупный вклад в этой области научных исследований и окажет значительное влияние на наше понимание этих материалов и их потенциальных применений. Программа объединит разнообразное сообщество исследователей из разных областей, включая материаловедение, химию, физику и биотехнологии. При поддержке международного научного сообщества пользователей и благодаря достижениям в области методов рассеяния нейтронов программа откроет новые горизонты в исследованиях в области материаловедения, будет способствовать получению новых прорывных результатов и разработке новых актуальных для практических применений систем. Одним из ключевых факторов здесь станет высокая плотность потока на установках на выведенных пучках нового источника нейтронов.

Отметим наблюдающиеся тенденции в области наносистем и мягкого конденсированного вещества, которые, как можно ожидать, будут иметь развитие в течение следующих 20 лет. Первое, что однозначно имеет место, это непрерывное усложнение структуры систем в сторону комплексности, неоднородности и иерархичности. Второе, это усложняющаяся динамика исследуемых и применяемых систем. Для получения функциональных материалов новые системы должны откликаться на изменяющиеся внешние параметры и, следовательно, находиться в неравновесном состоянии. Необходимо изучать неравновесные процессы, перестроения, динамику в потоках и иерархические во времени явления. Также будут оставаться актуальными фундаментальные исследования (до тех пор, пока не будет достигнуто глубокое понимание взаимодействий и процессов в нано- и мезо системах).

Одной из основных комплексных задач для нейтронного рассеяния станет детальная характеристика структуры и динамики материалов на масштабах от  $\sim 1$  нм до  $\sim 10$  мкм. Ключевыми нейтронными методами для решения этих задач являются: малоугловое рассеяние, рефлектометрия и нейтронная спектроскопия (неупругое рассеяние). Высокая плотность потока нейтронов на образце позволит получать новую информацию об исследуемых системах, открывая возможности для разработки новых актуальных систем и углубления фундаментального понимания взаимодействий и неравновесных процессов в комплексных структурах.

Для эффективного решения этих задач потребуются высокосветосильные малоугловые и

ультрамалоугловые установки с быстродействующими 2D позиционно-чувствительными детекторами. Для первой установки, в том числе, важен широкий доступный  $q$ -диапазон. В области рефлектометрии для проведения исследований в представленных научных направлениях будут востребованы инструменты высокого разрешения с низким фоном в обеих геометриях (вертикальная и горизонтальная плоскости рассеяния), а также рефлектометр среднего или низкого разрешения с горизонтальной плоскостью для кинетических исследований. Актуально создание дополнительных установок для эффективных измерений незеркального рассеяния (характерные размеры структур  $\sim 10\text{--}10^5\text{ нм}$ ) и малоуглового рассеяния в скользящей геометрии (GISANS) на масштабах от единиц ангстрем до сотен нанометров.

Для исследований релаксации и энергетических спектров наносистем и мягкого вещества потребуются создание комплекса нейтронных спектрометров, включая спин-эхо спектрометры.

Отдельно также отметим непрерывный рост качества компьютерных методов моделирования. Можно ожидать, что через 20 лет применение моделирования в нейтронных исследованиях станет «не преимуществом, а обязанностью» на всех этапах эксперимента — подготовке, проведении измерений и обработке результатов. В настоящее время развитие исследований наносистем и мягких конденсированных сред происходит очень быстро и направлено по большому счету «вширь» (большое число гибридных материалов, сложных систем на основе существующих материалов). Эта тенденция будет сохраняться, и в будущем неизбежно создание «библиотек» (возможно управляемых с помощью AI систем) для автоматизации разработки новых материалов. Одной из главных общих задач здесь является регулярная разработка самособирающихся структур для решения комплексных задач в медицине, технологии, пищевой промышленности и др. Эта задача требует развития всестороннего понимания структуры и динамики составляющих компонентов во всех масштабах размеров и времени с высоким разрешением. Решению этих задач хорошо соответствуют результаты, полученные в исследованиях с применением методов рассеяния нейтронов.

Изучению магнетизма в магнитных слоях и тонких пленках с помощью рефлектометрии с поляризованными нейтронами, несомненно, будет уделяться повышенное внимание. С миниатюризацией эффекты будут проявляться на меньших масштабах с усилением роли границ и влияния на состояние электронной системы. Понимание роли новых механизмов взаимодействия приведет не только к пониманию фундаментальных законов низкоразмерного магнетизма, но и позволит использовать их для конструирования систем с заданными магнитными и транспортными свойствами, например, для устройств магнитной памяти, инжекторов поляризованных электронов и др. Также важным и перспективным направлением исследований является изучение систем с нетривиальным магнитным упорядочением.

Для исследования сверхпроводящих и магнитных слоистых гетероструктур на перспективном источнике нейтронов в ОИЯИ необходимо наличие нескольких рефлектометров. Интенсивный поток нейтронов на установках на выведенных пучках позволит определять с высокой точностью корреляцию распределения концентрации элементов и намагниченности для широкого спектра элементов, исследовать тонкие магнитные эффекты, связанные с изменением намагниченности  $<1\%$ .

На перспективном источнике нейтронов в ОИЯИ также необходимо создание спектрометров неупругого рассеяния нейтронов с большой областью покрытия ( $Q - \omega$ ) пространства и высокой плотностью потока нейтронов на образце, что позволит проводить измерения четырехмерной функции закона рассеяния  $S(Q_x, Q_y, Q_z, \omega)$ . В обозримом будущем эта технология измерения неупругого рассеяния нейтронов (NPN), несомненно, будет дальше

совершенствоваться и пользоваться все большим спросом у пользовательского сообщества.

Интерес к исследованиям методом неупругого рассеяния нейтронов, в частности, будет оставаться высоким в силу трех обстоятельств:

- Нейтрон имеет магнитный момент. Магнитное неупругое рассеяние нейтронов не имеет конкурента в лице неупругого рассеяния на синхротронных источниках.
- Магнитное НРН позволяет получать детальную, спектроскопическую информацию о динамике исследуемого материала на микроскопическом уровне, что не может быть достигнуто каким-либо другим методом.
- Синтез новых материалов, содержащих магнитоактивные атомы, приводит к появлению множества новых интересных систем, требующих детального изучения магнитной динамики как с целью понимания их фундаментальных физических свойств, так и для их использования в прикладных задачах.

Практически все методики рассеяния нейтронов, включая дифрактометрию, в том числе инженерную и текстурный анализ, неупругое рассеяние, малоугловое рассеяние, спин-эхо, энергодисперсионную радиографию и томографию и другие, будут использоваться для исследований всевозможных конструкционных, функциональных, «умных», мета-, био- и наноматериалов и готовых изделий. Рассеяние нейтронов позволяет решать огромное количество задач в самых разных областях материаловедения и энергетики, в том числе тех, которые будут представлять интерес в ближайшие десятилетия: изучение новых материалов для перспективных источников тока, например, К-ионные, мультивалентные металл-ионные аккумуляторы, водородные топливные ячейки, а также материалов для атомных станций и источников энергии на основе ядерного синтеза, самовосстанавливающихся материалов, высокоэнтропийных сплавов, изделий, полученных с помощью аддитивных технологий, метаматериалов и т.д. Изучение «традиционных» материалов, например, сталей, сплавов, керамик, подвергнутых различной термомеханической обработке, будет оставаться актуальным. Также широк спектр геофизических применений, для которых основными методами рассеяния нейтронов являются дифракция, радиография/томография и малоугловое рассеяние. Наиболее интересными представляются задачи исследования анизотропных упругих свойств литосферы и их эволюции с течением времени, исследования свойств пород с целью добычи трудноизвлекаемых запасов углеводородов и эксперименты, способствующие развитию физики очага землетрясения.

Создание перспективного источника нейтронов также даст возможность повысить интенсивность потока нейтронов на микрообразцах при проведении экспериментов по изучению атомной и магнитной структуры и свойств функциональных материалов при экстремальных внешних условиях (воздействие внешнего высокого давления и низкой температуры), что будет являться важным фактором для проведения данных исследовательских работ на новом, более высоком качественном уровне. Безусловно, на новом источнике нейтронов в составе установок на выведенных пучках должны быть дифрактометры для исследования микрообразцов при внешних экстремальных условиях (высокое давление, низкие температуры и др.).

Большой интерес со стороны научного сообщества из разных отраслей знаний получают методики нейтронной радиографии и томографии. Их применение на импульсном источнике нейтронов, в том числе в сочетании с другими методами, дает дополнительные возможности и имеет перспективы развития, а также расширение областей применения от изучения

культурного наследия до инженерных науки и геофизики.

Для решения большинства задач с высокой точностью и оптимальным временем измерения требуется увеличение светосилы установок на выведенных пучках нейтронов. Это возможно реализовать на новом импульсном высокопоточном источнике нейтронов с оптимизацией всех параметров источника и установок на выведенных пучках: дифрактометров, спектрометров неупругого рассеяния, рефлектометров, установок малоуглового рассеяния и др.

Следует также выделить ряд задач, решение которых необходимо для более полного выполнения научных исследований методами нейтронного рассеяния:

- Необходимо предусмотреть комплексные системы окружения образца, например, создающие на образце магнитное поле, с возможностью изменения температуры образца и его одно- или трёхосного сжатия/растяжения, оптимизированных для измерений при многодетекторной конфигурации спектрометров, топливные ячейки, системы, одновременно создающие сверхвысокие давления и низкие температуры и др.
- На новом нейтронном источнике требуется наличие нескольких типов замедлителей. Например, для исследований магнитных структур материалов необходимы холодные нейтроны, а для экспериментов по полному рассеянию или глубоко неупругому рассеянию нейтронов – эпитепловые.
- Для решения некоторых задач следует рассмотреть возможность комбинирования методов рассеяния нейтронов на одной установке, например, дифракции и малоуглового рассеяния, дифракции и томографии/радиографии, дифракции и неупругого рассеяния нейтронов.
- Поскольку время проведения некоторых экспериментов фиксировано и может быть весьма значительным (десятки часов), как, например, в *in situ* исследованиях при нагреве/охлаждении, циклировании механической нагрузки или магнитного поля с постоянной скоростью, при изучении кинетики длительных процессов, будет полезным некоторое «дублирование» функций нейтронных инструментов, чтобы ряд экспериментов можно было провести на другой установке, пока «основная» занята. В отдельных случаях целесообразно предусмотреть совместное использование нескольких комплементарных нейтронных методов (рентгеновское рассеяние и томография, ядерно-магнитный резонанс, электронная и крио-электронная микроскопия, молекулярное моделирование, динамическое светорассеяние, регистрация акустической эмиссии, позитронная аннигиляционная спектроскопия и т.д.). Необходимо предусмотреть возможность и пространство для организации таких экспериментов на установках на выведенных пучках.
- Очевидно, что потребуются совершенствование методов накопления и обработки данных. Требуется предусмотреть вычислительные мощности для моделирования сложных мультикомпонентных систем и развивать системы с искусственным интеллектом.
- Требуется создание лаборатории для производства дейтерированных соединений и дейтерирования биологических объектов.

- Необходимо развивать возможности для время-разрешенных экспериментов (запуск процессов светом, сигнальными химическими молекулами, ионной силой, давлением, температурой и т.д.).

Нейтронный активационный анализ получил широкое применение в качестве мощного аналитического метода в экологических и биологических исследованиях, археологии. Несомненно, ввиду высокой чувствительности и богатому опыту его использования, данный метод будет востребован научным сообществом на перспективном источнике нейтронов в ЛНФ.

Нейтрон — уникальный объект исследования в области фундаментальных взаимодействий и вопросах космологии. Примером подобного рода исследований являются эксперименты по уточнению времени жизни нейтрона, поиску электрического дипольного момента нейтрона, поиск нейтрон-антинейтронных осцилляций, измерение гравитационной массы нейтрона, изучение фундаментальных симметрий в процессах с участием нейтрона, поиск новых типов взаимодействий. Все эти исследования так или иначе направлены на поиск так называемой «новой физики» — экспериментального обнаружения явлений, выходящих за рамки Стандартной Модели (СМ), которые могут дать подсказку к решению вопросов, стоящих сегодня перед теоретиками: почему в СМ столько свободных параметров, почему вещество доминирует над антивеществом, что из себя представляют «тёмная материя» и «тёмная энергия». При этом эксперименты с нейтронами принадлежат к классу исследований на «границе интенсивности» — прецизионные эксперименты, в которых используются высокочувствительные детекторы и могут проявляться самые незначительные воздействия на исследуемую систему, связанные, например, с обменом тяжелыми виртуальными частицами. Они дополняют и конкурируют с исследованиями на «границе энергии», когда строятся новые ускорители на высокие энергии, на которых могут рождаться более тяжелые частицы, чем те, что могли наблюдаться ранее. Несомненно, большим направлением исследований на новом источнике нейтронов будут исследования в области физики деления, нейтронной оптики, изучении нейтронно-избыточных ядер и др.

С момента своего зарождения нейтронная ядерная физика продемонстрировала свою эффективность, став основой ядерной энергетики, инструментом изучения ядерной структуры и свойств фундаментальных взаимодействий. Задачи, стоявшие перед этой областью исследований в начале 21 века [Аксёнов, 2000], во многом актуальны и сегодня. Они перекликаются с вопросами, которые были сформулированы международным научным сообществом при обсуждении перспектив развития ядерной физики [NuPECC, 2024].

Исследования в ЛНФ в области ядерной физики всегда имели широкий спектр направлений и были открыты новым тематикам. Этот подход сделал возможным провести работы по обнаружению ультрахолодных нейтронов (УХН) [Shapiro, 1968], которые в дальнейшем оказались очень эффективным инструментом для изучения фундаментальных взаимодействий. Последнее десятилетие показало, что направление исследований с УХН являются чрезвычайно перспективным. Ультрахолодные нейтроны стали использоваться для исследований квантовых систем и поиска «новой физики» за рамками Стандартной модели (поиску новых типов взаимодействий, зеркальных миров и т.п.). Новый интенсивный источник УХН на перспективном источнике нейтронов в ЛНФ ОИЯИ позволит вывести эти исследования на новый уровень.

Поэтому критически необходимо создание канала с ультрахолодными нейтронами на перспективном импульсном источнике нейтронов в ЛНФ ОИЯИ и выделение нескольких исследовательских каналов для размещения установок для проведения исследований в области фундаментальной ядерной физики и выполнения методических работ.

Отдельным перспективным направлением на новом источнике нейтронов в ЛНФ могут стать исследования в области физики нейтрино.

Таким образом, исследования в интересах стран-участниц Объединенного института ядерных исследований по предложенным научным направлениям, которые, как показывает предварительный анализ, не потеряют свою актуальность в течение ближайших 20 лет, могут быть выполнены на планируемом к созданию в Лаборатории нейтронной физики им. И.М. Франка ОИЯИ новом перспективном импульсном исследовательском источнике нейтронов с передовыми установками на выведенных пучках с учетом детальной проработки методик, элементов установок и их оптимизацией в сочетании с параметрами источника, а также развитием вспомогательной лабораторной и вычислительной базы.

1. Аксенов, В.Л., Боголюбов, Н.Н., Плакида Н.М., (1992). ТМФ, 93, № 3, с.371–383. Doi: 10.1007/BF01016392
2. Аксёнов, В.Л., (2000). ЭЧАЯ. 31(6): р. 1303–1342.
3. Аксенов, В.Л., Балагуров, А.М., (2016). УФН, т.186, 3, с. 293 –320
4. Аксенов, В.Л. и др., (2021). ЭЧАЯ, т. 52, 1349
5. Аксенов, В.Л. и др., (2023) .ЭЧАЯ, т.54, вып. 4, с. 898–935
6. Базь, А.И., (1966). Ядерная Физика, 4, 252
7. Беда, А. Г., (2007). ЭЧАЯ, 38, 1477
8. Белушкин, А.В. и др., (2011). Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, No 9, с. 18–46
9. Бушуев В.А., Франк А.И., (2018). УФН, 188, 1049–1062, Doi: 10.3367/UFNr.2017.11.038235
10. Захаров, М. А. и др., (2020). Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 1, 9
11. Козленко, Д.П. и др., (2021). Кристаллография, том 66, No 2, с. 311–322, Doi: 0.31857/S0023476121020077
12. Кулин, Г. В. и др., (2019). ЖЭТФ, 156, 868,
13. Лебедев, Д.В. и др, (2021). Кристаллография, том 66, No 2, с. 242–255, Doi: 10.31857/S0023476121020107
14. Назаров, В.М. и др., (1985). Краткие сообщения ОИЯИ №6–85, УДК 621.039.573
15. Одарченко, А.Н., Сергиенко, А.А., (2015). Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1(6(73)), 57–61. Doi: 10.15587/1729-4061.2015.37919
16. Пахневич, А.В. и др., (2013). статья в книге «Эволюция биосферы с древнейших времен до наших дней. К 85-летию Г.А. Заварзина» ред. Л.М. Мельников, С.В. Рожнов., с.106
17. Сапрыкина, И.А. и др., (2018). Российская археология, №3. 36–42. Doi: 10.31857/S086960630001631-3
18. Сапрыкина, И.А. и др., (2019). Кристаллография, т.64, №1, 152–155. Doi: 10.1134/S0023476119010235
19. Сумин, В. В. и др., (2010). Физика твёрдого тела. Т. 52 (5), с. 930–933.
20. Франк, А.И. и др., (2002). Письма в ЖЭТФ, 75, 729
21. Франк, А.И. и др., (2007). Письма в ЖЭТФ, 86, 255
22. Франк, А.И., (1987). УФН, 151, с.229
23. Abd-El-Aziz, A. S. et al., (2020). Macromol. Chem. Phys., 221 (16), 2000216. Doi:10.1002/macp.202000216.
24. Abe, J. et al., (2014). Mater. Sci. Forum, 777, 219–224. Doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.777.219
25. Ahmed, R., et al., (2011). Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials. Vol. 4, Issue 8, 2043–2054, Issue 8, Pages 2043–2054 Doi:10.1016/j.jmbbm.2011.07.003
26. Al-Ayoubi, S. R. et al., (2017). Phys. Chem. Chem. Phys., 19, 14230–14237 Doi: 10.1039/C7CP00705A
27. Alberi, J. L. et al. (1972). Phys. Rev. Lett., 29, 518.
28. Alekseev I. et al., (2022). Physical Review D 106.5, 2022, ISSN 2470–0010, <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.106.L051101>
29. Alfimov V. P., et al., (1983). Nucl. Phys., A 398, 93.
30. Antonov, V.E. et al. (2022). J. Alloys Compd., 905, 164208. Doi: 10.1016/j.jallcom.2022.164208
31. Arbe, A., et al., (2020). Polymers (Basel), 12 (12), 3067. Doi:10.3390/polym12123067.

32. Ashkar, R. et al., (2018). *Acta Cryst.* D74, 1129–1168
33. Avdeev, M. V., & Aksenov, V. L., (2011). *Physics–Uspekhi*, 53 (10), 971–993. Doi:10.3367/UFNe.0180.201010a.1009.
34. Avdeev, M.V. et al., (2019). *Applied Surface Science* 486 287–291. Doi: 10.1016/j.apsusc.2019.04.241
35. Augier C. et al., (2023). *European Physical Journal C* 83.1, ISSN 1434–6044, <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-022-11150-x>
36. Bacon, G.E., (1990). *Proc. Roy. Soc. B*, 240, 363–370. Doi: 10.1098/rspb.1990.0042
37. Barbinta–Patrascu, M–E. et al., (2021). *Materials*. 14, 4726. Doi: 10.3390/ma14164726
38. Bardeen J. et al., (1957). *Phys. Rev.* 106, 162. Doi:10.1103/PhysRev.106.162
39. Barri, K. et al., (2021). *Nano Energy*, 86, 106074. Doi: 10.1016/j.nanoen.2021.106074
40. Beda A.G. et al., (2013). *Phys. Part. Nuclei Lett.* 10, 139–143 (2013). <https://doi.org/10.1134/S1547477113020027>
41. Bernstein, L. et al., (2015). *Nuclear data needs and capabilities for applications*. Lawrence Berkley national laboratory, Berkley, USA. Doi: 10.48550/arXiv.1511.07772
42. Berts, I. et al., (2014). *Advanced engineering materials.*, Volume16, Issue11, 1340–1350, Doi: 10.1002/adem.201400009
43. Bokuchava, G., (2020). *Nucl. Instrum. Meth. A*, 964, 163770. Doi: 10.1016/j.nima.2020.163770
44. Bokuchava, G. & Petrov, P., (2020). *Metals*, 10, 632. Doi: 10.3390/met 10050632
45. Bolshakova, I. et al., (2015). *Nuclear Fusion*, 55(8), 083006. 10.1088/0029–5515/55/8/083006
46. Bousset, L. et al., (2014). *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) – Proteins and Proteomics*, Volume 1844, Issue 7, 1307–1316
47. Bozin, E.S. et al., (2015). *Phys. Rev. B*, 91, 054521. Doi: 10.1103/PhysRevB.91.054521
48. Cartlidge E., (2016). *Nature*. doi:10.1038/nature.2016.19957
49. Catherall R. et al., (2017). *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics: Nucl. Part. Phys.* 44, 094002
50. Chaterigner, D., (2002). *Mater. Sci. Forum*, 408–412, 1687–1692. Doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.408–412.1687
51. Chen, W., (2023). *Nat. Commun.*, 14, 2660. Doi: 10.1038/s41467-023-38254-6
52. Chen, Z. et al., (2017). *Soft Matter*, 13 (47), 8980–8989. Doi:10.1039/C7SM02058A.
53. Cheng, C.–L. et al., (2015). *Adv. Water Resour.*, 77, 82–89. Doi:10.1016/j.advwatres.2015.01.010
54. Chiesa, A. et al., (2017). *Phys. Rev. Lett.* 119, 217202. Doi: 10.1103/PhysRevLett.119.217202
55. Christianson, A.D. et al., (2008). *Nature*, 456, p. 930. Doi: 10.1038/nature07625
56. Chua, Y. et al., (2017). *J. Chem. Phys.*, 146 (10), 104501. Doi:10.1063/1.4977737.
57. Cisse, A. et al., (2021). *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 12 (51), 12402–12410
58. CMS collaboration., (2015). *arXiv preprint*, arXiv:1507.06656
59. Cobo, I. et al., (2015). *Nature Mater* 14, 143–159. Doi:10.1038/nmat4106
60. Colmenero, J. & Arbe, A., (2013). *J. Polym. Sci. Part B Polym. Phys.*, 51 (2), 87–113. Doi:10.1002/polb.23178
61. Cronenberg, G. et al., (2015). *Proceedings of the EPS Conference on High Energy Physics 2015*, 408
62. Datta S. et al., (2011). *Journal of Molecular Biology*, Volume 406, Issue 2, Pages 205–214, ISSN 0022–2836, Doi: 10.1016/j.jmb.2010.11.051.
63. Dauti, D. et al., (2018). *Cement Concrete Res.*, 111, 41–55. Doi: 10.1016/j.cemconres.2018.06.010.

64. Davies, N. et al., (2021). *Molecular Therapy: Nucleic Acid*, Volume 24, 4, 369–384, DOI: 10.1016/j.omtn.2021.03.00
65. de Gennes, P. G., (1971). Reptation of a Polymer Chain in the Presence of Fixed Obstacles. *J. Chem. Phys.*, 55 (2), 572–579. Doi:10.1063/1.1675789.
66. Demidov, A.M. et al., (1978). *Atlas of Gamma-Ray Spectra from the Inelastic Scattering of Reactor Fast Neutrons*, Moscow, Atomizdat.
67. Devyaterikov, D.I. et al., (2022). *J. Surf. Investig.* 16, 839–842. Doi: 10.1134/s1027451022050299
68. Dolegieviez, P. et al., (2019). *Proc. 10th International Particle Accelerator Conference (IPAC'19)*, 844
69. Draper, E. et al., (2020). *Matter*, 2, 764–778. DOI: 10.1016/j.matt.2019.12.028
70. Eberle, A. P. R. & Porcar, L., (2012). Flow-SANS and Rheo-SANS Applied to Soft Matter. *Curr. Opin. Colloid Interface Sci.*, 17 (1), 33–43. Doi:10.1016/j.cocis.2011.12.001.
71. Eremets, M.I. et al., (2022). *J. Supercond. Nov. Magn.*, 35, 965–977. Doi: 10.1007/s10948-022-06148-1
72. Erikamp, M. et al., (2015). *J. Phys. Chem. B*, 119, 14, 4842–4848, Doi: 10.1021/acs.jpcc.5b01017
73. Eves B.J. et al., (2021). *RSC Chem. Biol.*, 2, 1232–1238. Doi: 10.1039/D1CB00001B
74. Falloot M. et al., (2012). *PRL* 109, 202504
75. Fan, Y. & Wang, Y., (2019). *Curr. Opin. Colloid Interface Sci.*, 42, 1–16. Doi:10.1016/j.cocis.2019.02.011.
76. Faupel, F. et al., (2010). *Adv. Eng. Mater.*, 12 (12), 1177–1190. Doi:10.1002/adem.201000231.
77. Feldman, T.B. et al., (2019). *Biochim. Biophys. Acta Biomembr.* 1861(10). Doi: 10.1016/j.bbamem.2019.05.022.
78. Feng Jonathan L. et al., (2016). *Phys. Rev. Lett.* 117 (7): 071803. arXiv:1604.07411. doi: 10.1103/PhysRevLett.117.071803
79. Frank, A.I. et al., (2016). *Journal of Physics: Conference Series*, 746, 012053
80. Frontasyeva, M. et al., (2020). *Report of the ICP Vegetation Moss Survey Coordination Centre*, JINR, ISBN 978-5-9530-0508-1
81. Gao, L. et al., (2023). *Chin. J. Struct. Chem.*, 42(5), 100048. Doi: 10.1016/j.cjsc.2023.100048
82. Gapon, I. V. et al., (2017). *J. Phys. Conf. Ser.*, 848 (1). Doi:10.1088/1742-6596/848/1/012015.
83. Gatta, G.D. et al., (2022). *Am. Mineral.*, 107(7), 1378–1384. Doi: 10.2138/am-2022-8086
84. Genix, A.-C. et al., (2006). *Macromolecules*, 39 (11), 3947–3958. Doi:10.1021/ma060370t.
85. Genix, A.-C. & Oberdisse, J. (2015). *Curr. Opin. Colloid Interface Sci.*, 20 (4), 293–303. Doi:10.1016/j.cocis.2015.10.002.
86. Gochev, G. G. et al., (2019). *J. Phys. Chem. B*, 123 (50), 10877–10889. Doi:10.1021/acs.jpcc.9b07733.
87. Goennenwein, F. et al., (2007). *Phys. Lett. B* 652, 13
88. Gong, K. et al., (2021). *Phys. Rev. Materials*, 5, 015603. Doi: 10.1103/PhysRevMaterials.5.015603
89. Gorini, G. et al., (2007). *Nuovo Cim. C* 30, 47–58. Doi:10.1393/NCC/I2006-10035-9
90. Gonzalez, F. M. et al., (2021). *Phys. Rev. Lett.*, vol. 127. 162501.
91. Goremychkin, E. et al., (2018). *Science* 359, 186–191. Doi: 10.1126/science.aan0593
92. Gudehus, G. et al., (2023). *Acta Geotech.*, 18, 951–969. Doi: 10.1007/s11440-022-01513
93. Gudkov V. P., (1992). *Phys. Rev.* 212, 77,
94. Guseva I.S. et al., (2007). *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 71, 367

95. Haberl, B. et al., (2022). *Sci. Rep.*, 13, 4741. Doi: /10.1038/s41598-023-31295-3
96. Haertlein, M. et al., (2016). *Methods in Enzymology*. Academic Press, Volume 566, Pages 113–157, ISSN 0076-6879, ISBN 9780128030493
97. Hasanov, S. et al., (2021). *J. Manuf. Mater. Process*, 6, 4. Doi: 10.3390/jmmp6010004
98. Hellsing, M. et al., (2014). *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Volume 460, 460–467, Doi: 10.1016/j.colsurfa.2013.11.038
99. Hirota, Y. et al., (2022). *Bioengineering*, 9, 599. Doi: 10.3390/bioengineering9100599.
100. Hollamby, M. J. et al., (2012). *Langmuir*, 28 (9), 4425–4433. Doi:10.1021/la203097x.
101. Hurst, A.M. et al., (2021). *NIM A*, 995, 165095
102. Hussey, D.S. et al., (2021). *NIM A*, 987, 164813
103. Isaksson, H. et al., (2017). *Bone*, 103:295–301. Doi: 10.1016/j.bone.2017.07.022
104. Ivankov, O. et al., (2021). *Sci Rep* 11, 21990, Doi:10.1038/s41598-021-01347-7
105. Jones, H. et al., (2017), *Atmospheric Environment*, Volume 161, 274–287, Doi: 10.1016/j.atmosenv.2017.04.025.
106. Joo, M.R. et al., (2023). *J. Alloys Compd.*, 934, 167868. Doi: 10.1016/j.jallcom.2022.167868
107. Josts, I. et al., (2018). *Structure*. 26, 1072–1079
108. Juranyi, F. et al., (2015). *EPJ Web Conf.*, 83, 02008. Doi: 10.1051/epjconf/20158302008
109. JUNO collaboration, (2022). *Progress in Particle and Nuclear Physics*, Volume 123, 103927, <https://doi.org/10.1016/j.pnpnp.2021.103927>.
110. Kabra, S. et al., (2016). *J. Phys.: Conf. Ser.*, 746, 012056. Doi: 10.1088/1742-6596/746/1/012056
111. Kadic, M. et al., (2019). *Nature Reviews Physics*, 1, 198–210. Doi: 10.1038/s42254-018-0018-y
112. Keppler, R. et al., (2021). *Solid Earth*, 12, 2303–2326. Doi: 10.5194/se-12-2303-2021
113. Khaydukov, Yu. et al., (2013). *JETP Lett.* 98, 107–110. Doi: 0.48550/arXiv.1306.2173
114. Khaydukov, Yu. et al., (2019). *Phys. Rev. B* 99, 140503(R). Doi: 10.1103/PhysRevB.99.140503
115. Khaykovich, B. et al., (2011), *NIM A*, 631, 98
116. Kichanov, S. et al., (2017). *JINR NEWS*, 1, 20–23.
117. Kichanov, S. et al., (2018a). *Meteoritics & Planetary Science*, 53, 10, 2155–2164, Doi:10.1111/maps.13115
118. Kichanov, S. et al., (2018b). *J. Imaging*, 4(2), 25. Doi: 10.3390/jimaging4020025
119. Kim, D-H. et al., (2011). *Science*, 333, 838–843. Doi:10.1126/science.1206157
120. Koester, L., (1976). *Phys. Rev. D*, 14, 907
121. Klein, R.A. et al., (2023). In: *Comprehensive Inorganic Chemistry III (Third Edition)*, Editors: Reedijk, J. & Poeppelemeier, K.R. 3–50. Doi: 10.1016/B978-0-12-823144-9.00028-5
122. Koga, J. et al., (2022). *Physical Review C*, 105, 054615. <https://arxiv.org/pdf/2202.06222.pdf>
123. Kosova, N.V. et al., (2015). *Journal of Solid State Electrochemistry*. Doi: 10.1007/s10008-015-3015-4.
124. Kovalevsky, A. et al., (2018). *Structure* 26, 383–390
125. Kovalevsky, A. et al., (2020). *Method. Enzymol.*, 634, 257–279. Doi: 10.1016/bs.mie.2019.12.002
126. Kozlenko, D.P. et al., (2021). *npj Quantum materials* 6: 19, Doi:10.1038/s41535-021-00318-5; <http://www.jinr.ru/posts/uchenye-Inf-oiyai-vyyavili-novye-svoystva-magnitnyh-analogov-grafena/>].

127. Kozlenko, D.P. et al., (2016). *Physics of Particles and Nuclei Letters*, 13, 3, 346–351. Doi: 10.1134/S1547477116030146
128. Kozlenko, D.P. et al., (2019). *Scientific reports* 9, 4464. Doi: 10.1038/s41598-019-41184-3
129. Krueger, S. et al., (2021). *Mol. Pharmaceutics*, 18, 1, 359–376, Doi: doi.org/10.1021/acs.molpharmaceut.0c00986
130. Krasznahorkay A.J. et al., (2016). *Physical Review Letters*. 116 (42501): 042501. arXiv:1504.01527. doi:10.1103/PhysRevLett.116.042501
131. Krasznahorkay, A. J. et al. (2019). arXiv preprint arXiv:1910.10459.
132. Kubovcikova, M. et al., (2016). *J. Magn. Magn. Mater.*, 2017, 427, 67–70. Doi:10.1016/j.jmmm.2016.10.104.
133. Kupwade-Patil, K. et al., (2016). *Cement Concrete Res.*, 86, 55–62. Doi: 10.1016/j.cemconres.2016.04.011
134. LaMer, V. K. & Dinegar, R. H., (1950). *J. Am. Chem. Soc.*, 72 (11), 4847–4854. Doi:10.1021/ja01167a001.
135. Lau C. et al., (2003). *NIM B*, 204, 257.
136. Lehmann, E. & Mannes, D., (2021). In: *Spectroscopy, Diffraction and Tomography in Art and Heritage Science*, Editors Adriaens, M., and Dowsett, M. Chapter 5. Doi: 10.1016/B978-0-12-818860-6.00009-X
137. Leung, C.M. et al. (2022). *Nat Rev Methods Primers* 2, 33, Doi: 0.1038/s43586-022-00118-6
138. Lewitowicz M., (2008). *Nuclear Physics A* 805, 519
139. Li, J. et al., (2021). *J. Manuf. Process.*, 68, 293–331. Doi: 10.1016/j.jmapro.2021.05.042
140. Liang, X.Z. et al. (2020). *Materialia*, 9, 100524. Doi: 10.1016/j.mtla.2019.100524
141. Liberton, M. et al., (2013). *Journal of Biological Chemistry*, ISSN: 0021-9258, Vol: 288, Issue: 5, 3632–3640
142. Littrell, K. C. et al., (1997). *Phys. Rev. A*, 56, 1767
143. Liu, D. et al., (2013). *Applied Physics Letters*, 102, 183508
144. Liu, J. et al., (2020). *J. Mater. Chem. A*, 8, 21151–21162. Doi: 10.1039/d0ta06600a
145. Lopez-Rubio, A., & Gilbert, E.P., (2009). *Food Sci. Technol.*, 20, 576–586. Doi: 10.1016/j.tifs.2009.07.008
146. Lutz, J.-F. et al., (2016). *Nat. Rev. Mater.*, 1 (5), 16024. Doi:10.1038/natrevmats.2016.24.
147. Luzin, V. et al., (2020). *Neutron diffraction texture analysis for numismatics. Metallurgy in Numismatics 6: Mines, Metals and Money: Ancient World Studies in Science, Archaeology and History.* editor / Kenneth A. Sheedy ; Gillan Davis. London : The Royal Numismatic Society, pp. 239–246 (Royal Numismatic Society Special Publications).
148. Ma, J. et al., (2010). *Int. Mater. Rev.*, 55, 257–315. Doi: 10.1179/095066010X12646898728363
149. Magazù, S. et al., (2012). *Life*, 2(4), 364–376; Doi:10.3390/life2040364
150. Maier-Leibnitz, H. et al., (1962). *Physik*, 14, 738
151. Malamud, F. et al., (2018). *J. Nucl. Mater.*, 510, 524–538. Doi: 10.1016/j.jnucmat.2018.08.003
152. Mamontov, E. et al., (2021). *Medicina*. 57,1343, doi.org/10.3390/medicina57121343
153. Maric, S. et al., (2014). *Acta Crystallogr. D Biol. Crystallogr.* 70(Pt 2):317–28. doi: 10.1107/S1399004713027466. Epub 2014 Jan 29. PMID: 24531466.
154. Marques, M.P.M. et al., (2021). *R. Soc. Open Sci.*, 8, 210774. Doi: 10.1098/rsos.210774
155. Martel, A. et al., (2017). *Journal of the American Chemical Society*, 139 (1), 137–148
156. Martins, M.L. et al., (2019). *Water dynamics in MCF-7 breast cancer cells: a neutron scattering descriptive study.* *Sci Rep* 9, 8704

157. Masalovich, S.V. et al., (1996). *J.Phys. Soc. Jpn.* 65, Suppl. A159
158. Matsuo, T. et al., (2013). *Journal of the Physical Society of Japan*, 82, SA020
159. Mention G. et al., (2011). *Phys. Rev. D* 83, 073006
160. Metzke, R. W. et al., (2011). *Phys. Med. Biol.* 56, N1, Doi: 10.1088/0031-9155/56/1/N01
161. Midtgaard, S. et al., (2018). *The FEBS Journal* 285, 357–371
162. Michelagnoli C. et al., (2018). *EPJ Web of Conferences* 193, 04009  
<https://doi.org/10.1051/epjconf/201819304009>
163. Minezaki, Y. et al., (1996). *Biophysical Chemistry*, Volume 58, Issue 3, Pages 355–363
164. Mortensen, K. & Annaka, M., (2018). *ACS Macro Lett.*, 7 (12), 1438–1442.  
Doi:10.1021/acsmacrolett.8b00792.
165. Mortensen, K. et al., (2018). *Phys. Rev. Lett.*, 120 (20), 207801.  
Doi:10.1103/PhysRevLett.120.207801.
166. Murphy, R. P. et al., (2020). *Soft Matter*, 16 (27), 6285–6293. Doi:10.1039/D0SM00941E.
167. Murugova, T.N. et al., (2011). *Neutron News*, 22:3, 11 14,
168. Nagler, S.E. et al., (2019). *J. Anal. Methods Chem.*, 6164058. Doi: 10.1155/2019/6164058
169. Nagy, G., (2011). *Biochem J* 1, 436 (2): 225–230.
170. Naing, S-H., (2018). *Biophysical Journal* 114, 602–608
171. Nasu, M. et al., (2022). *Journal of Power Sources*, 530, 231251. Doi:  
10.1016/j.jpowsour.2022.231251.
172. Nekhoroshkov, P. et al., (2021). *Journal of Food Composition and Analysis*, Volume 98, 103825.
173. Nickels, L., (2018). *Metal Powder Report*, 73(3), 148–150. Doi: 10.1016/j.mprp.2018.03.050
174. Nikitenko, Y.V. & Zhaketov, V.D., (2022), *Phys. Part. Nuclei* 53, 1089–1125. Doi:  
10.1134/S1063779622060065
175. Nikitin, A.N., & Vasin, R.N., (2010). *Neutron News*, 21(4), 20–24. Doi:  
10.1080/10448632.2010.519637
176. Novikov Yu.N., (2019), *Eurasian Journal of Physics and Functional Materials*. 3, 63
177. Nullmeyer, B.R. et al., (2018). *Scientific Reports*, 8, 12404. Doi: 10.1038/s41598-018-30815-w
178. NuPECC, (2024). *Long Range Plan 2024. Perspectives in Nuclear Physics*.
179. O'Donnell, L.F., & Greenbaum, S.G., (2020). *Batteries*, 7, 3. Doi: 10.3390/batteries7010003
180. Okudaira T. et al., (2018). *Phys. Rev. C* 97, 034622.
181. Okudaira T. et al., (2023). *Phys. Rev. C*. 107, 054602 <https://arxiv.org/pdf/2212.10889v1.pdf>;
182. Onuki, Y. et al., (2016). *J. Appl. Crystallogr.*, 49, 1579–1584. Doi: 10.1107/S160057671601164X
183. Owoeni, O. et al., (2018), *Journal of Colloid and Interface Science*, Volume 524, 279–288, Doi:  
10.1016/j.jcis.2018.03.089.
184. Pakhnevich, A.V. et al., (2020). *Paleontological Journal*, 54, 8, 936–945. Doi:  
10.1134/S0031030120080122
185. Pakhnevich, A.V. et al., (2022). *Biology*, 11(9), 1300. Doi: 10.3390/biology11091300
186. Pambou, E. et al., (2018). *Langmuir*, 34, 11, 3395–3404, Doi: 10.1021/acs.langmuir.8b00143
187. Peters, J., et al, (2016). *Exp. Report 8-04-761*, ILL, Doi:10.5291/ILL-DATA.8-04-761
188. Peters, J. et al., (2017). *Eur. Phys. J. E* 40, 68
189. Peterson, V.K., & Papadakis, C.M., (2015). *IUCr*, 2, 292–304. Doi:  
10.1107/S2052252514026062
190. Podurets, K.M. et al., (2021). *Crystallography Reports*, 66, 2, 254–266. Doi:

10.1134/S1063774521020115

191. Polte, J. et al., (2012). *ACS Nano*, 6 (7), 5791–5802. Doi:10.1021/nn301724z.
192. Ponthieu, M. et al., (2013). *J. Phys. Chem. C*, 117(37), 18851–18862. Doi: 10.1021/jp405803x.
193. Precisvalle, N. et al., (2021). *Scientific Reports*, 11, 2666. Doi: 10.1038/s41598-021-82045-2
194. Rakovich, A. et al., (2010). *Nano Lett.* 10, 7, 2640–2648, Doi:10.1021/nl1013772
195. Río-López, N.A. et al., (2021). *Metals*, 11, 829. Doi: 10.3390/met11050829
196. Ryzhykau, Y.L. et al., (2021). *Sci Rep* 11, 10774 Doi: 10.1038/s41598-021-89613-6
197. Santamaria, A. et al., (2022). *Journal of the American Chemical Society* 144 (7), 2968–2979, Doi: 10.1021/jacs.1c09856
198. Sedyshev, P. et al., (2020). *Physics of Particles and Nuclei Letters*. 17. 389–400. Doi:10.1134/S1547477120030139.
199. Serebrov A.P. et al., (2018). *Phys. Rev. C*, 97, 055503
200. Schirò, G. et al., (2012). *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 3 (8), 992–996
201. Schmiedmayer, J., (1989). *NIM A*, 284, 59
202. Shah, A.R. et al., (2021). *J. Phys.: Materials*, 4, 042008. Doi: 10.1088/2515-7639/ac24ec
203. Shapiro, F.L., (1968). *Soviet Physics Uspekhi*, 11(3): p. 345.
204. Shugare, Sh. et al., (2012). *Soft Matter*, 8, 2494–2502. DOI:10.1039/C2SM06476F
205. Shuitcev, A. et al., (2022). *J. Alloys Compd.*, 899, 163322. Doi: 10.1016/j.jallcom.2021.163322
206. Shull, C. G., & Wollan, E. O., (1948). *Science*, 108(2795), 69–75.
207. Skrobova N., (2023). *Phys. Atom. Nucl.* 2023. V. 86. P. 544–550.
208. Slastanova, A., Campbell, R. A., Islas, L., Welbourn, R. J. L., R. P. Webster, J., Vaccaro, M., Chen, M., Robles, E., Briscoe, W. H., (2021). *J. Colloid Interface Sci.*, 2022, 606, 1064–1076. Doi:10.1016/j.jcis.2021.08.014.
209. Smolyaninova, V.N. et al., (2015). *Scientific Reports*, 5, 15777. Doi: 10.1038/srep15777
210. Smolyaninova, V.N. et al., (2019). *Phys. Rev. B*, 100, 024515. Doi: 10.1103/PhysRevB.100.024515
211. SNO Collaboration, (2019). *Phys. Rev. D* 99, 032008. Doi: 10.48550/arXiv.1812.05552
212. Sofras, C. et al., (2022). *Materials & Design*, 219, 110789. Doi: 10.1016/j.matdes.2022.110789
213. Strumia, A., (2022). *Journal of High Energy Physics*, 67, 1.
214. Stuhmann, H.B., (2023). *Eur. Phys. J. E* 46, 41. Doi: <https://doi.org/10.1140/epje/s10189-023-00295-6>
215. Sumnikov, S.V. et al. (2022). *J. Alloys Compd.*, 928, 167116. Doi: 10.1016/j.jallcom.2022.167116
216. Sun, L. et al., (2021a). *J. Alloys Compd.*, 853, 157061. Doi: 10.1016/j.jallcom.2020.157061
217. Sun, L. et al., (2021b). *J. Alloys Compd.*, 884, 161082. Doi: 10.1016/j.jallcom.2021.161082
218. Suner, S. et al., (2018). In *Woodhead Publishing Series in Biomaterials, Stimuli Responsive Polymeric Nanocarriers for Drug Delivery Applications, Volume 1*, 453–500, DOI: 10.1016/B978-0-08-101997-9.00021-7
219. Takahashi, N. et al., (2011). *Journal of the Physical Society of Japan*, 80, SB007
220. Takhistov, V. et al., (2015). *Phys. Rev. Lett.*, 115, 121803.
221. Tatarskiy, D., (2020). *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 509, 166899. Doi: /10.1016/j.jmmm.2020.166899
222. Tatsuhito, M. et al., (2022). *Molecular Dynamics of Lysozyme Amyloid Polymorphs Studied by Incoherent Neutron Scattering Frontiers in Molecular Biosciences, Front. Mo. Biosci.*, Volume 8. Doi: 10.3389/fmolb.2021.812096

223. Tehei, M. and Zaccai, G., (2007). *The FEBS Journal*, 274: 4034–4043.  
<https://doi.org/10.1111/j.1742-4658.2007.05953.x> Doi: 10.1111/j.1742-4658.2007.05953.x
224. Texeira, S.C.M., (2019). *Curr. Opin. Colloid In.*, 42, 99–109. Doi: 10.1016/j.cocis.2019.05.001
225. Theis-Bröhl, K., Saini, A., Wolff, M., Dura, J. A., Maranville, B. B., Borchers, J. A., (2020). *Nanomaterials*, 10 (6), 1231. Doi:10.3390/nano10061231.
226. Thompson, K. et al., (2013). *Langmuir*, 29, 14, 4594–4602, Doi: 10.1021/la304312y
227. Toolan, D. et al., (2022), *Advanced functional materials*, Volume 32, Issue13, 2109252 Doi: 10.1002/adfm.202109252
228. Törnquist, E. et al., (2021). *Phys. Med. Biol.*, 66, 135016. Doi: 10.1088/1361-6560/ac02d4
229. Tropin, T. V.; Karpets, M. L.; Kosiachkin, Y.; Gapon, I. V.; Gorshkova, Y. E.; Aksenov, V. L. *Fullerenes, Nanotub. Carbon Nanostructures*, 2021, 29 (10), 819–824. Doi:10.1080/1536383X.2021.1901276.
230. Trtik, P. et al., (2015), *Physics Procedia*, 69, 169.
231. Truche, L., & Bazarkina, E.F., (2019), *E3S Web of Conferences*, 98, 03006. Doi: 10.1051/e3sconf/20199803006
232. Vasin, R.N. et al., (2017). *Geophys. J. Int.*, 209, 1–20. Doi: 10.1093/gji/ggw487
233. Vékás, L.; Bica, D.; Avdeev, M. V., (2007). *China Particuology*, 5 (1–2), 43–49. Doi:10.1016/j.cpart.2007.01.015.
234. von Feilitzsch, F. et al., (1982). *Physics Letters B.*, 118, 162
235. Wang, H. et al., (2022a). *Int. J. Hydrogen Energ.*, 47, 28585–28604. Doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.06.158
236. Wang, T. et al., (2022b). *BBA – Gen. Subjects*, 1866 (11), 130206. Doi: 10.1016/j.bbagen.2022.130206
237. Wang, Z. et al., (2021). *Acta Mater.*, 202, 135–148. Doi: 10.1016/j.actamat.2020.10.049
238. Wei, D. et al., (2022). *Int. J. Plasticity*, 158, 103417. Doi: 10.1016/j.ijplas.2022.103417
239. Wienhold, K.S. et al., (2020). *Appl. Phys. Lett.*, 116, 120504. Doi: 10.1063/5.0003997
240. Witek, M. et al. (2021). *Polymers*, 13, 2426. Doi: 10.3390/polym13152426
241. Wu, C. S. et al., (1957). *Phys. Rev.*, 105, 1413.
242. Wu, W. et al., (2018). *Appl. Phys. Lett.*, 112, 253501. Doi: 10.1063/1.5026066
243. Wu, Z. et al., (2023). *Trends Food Sci. Tech.*, 138, 57–73. Doi: 10.1016/j.tifs.2023.05.017
244. Wuithschick, M.; Birnbaum, A.; Witte, S.; Sztucki, M.; Vainio, U.; Pinna, N.; Rademann, K.; Emmerling, F.; Kraehnert, R.; Polte, J. *Turkevich*, (2015). *ACS Nano*, 9 (7), 7052–7071. Doi:10.1021/acsnano.5b01579.
245. Xu, X. et al., (2019). *Mater. Sci. Eng. A*, 754, 512–520. Doi: 10.1016/j.msea.2019.03.046
246. Yaklin, M. A., Duxbury, P. M.; Mackay, M. E., (2008), *Soft Matter*, 4 (12), 2441. Doi:10.1039/b807565d.
247. Yang J.C. et al., (2013). *NIM B.*, 317, 263
248. Yearley, E.J. et al., (2013). *Biophys. J.*, 105, 720–731. Doi: 10.1016/j.bpj.2013.06.043
249. Yee, A.W. et al., (2019). *Nat. Commun.*, 10, 925
250. Yeh, V. et al., (2020). *Biology*, 9(11), 396, Doi:10.3390/biology9110396
251. Yue, A. T. et al., (2013). *Phys. Rev. Lett.*, 111, 222501.
252. Zaccai, G. et al., (2016), *Sci Rep* 6, 31434: Doi: 10.1038/srep31434
253. Zaccai, G. et al., (2022). *EPJ Web of Conferences* 272, 01009 Doi:10.1051/epjconf/202227201009
254. Zakharov, M.A. et al., (2016). *Journal of Physics: Conference Series*, 746, 012050

255. Zakharov, M.A. et al., (2021). *Physics Letters A*, 420, 127748
256. Zepeda-Alarcon, E. et al., (2014). *J. Appl. Crystallogr.*, 47, 1983–1991. Doi: 10.1107/S1600576714022651
257. Zhaketov, V.D. et al., (2023). *Physics of the Solid State*, Vol. 65, No. 7. Doi: 10.21883/PSS.2023.07.56393.35H
258. Zhan, H. et al., (2022). *Fractal Fract.*, 6, 484. Doi: 10.3390/fractalfract6090484
259. Zhang, S. et al., (2013). *Acta Mater.*, 61, 7009–7019. Doi: 10.1016/j.actamat.2013.08.015
260. Zhang, S. et al., (2020). *Acta Met. Sinica*, 33, 1167–1179. Doi: 10.1007/s40195-020-01102-3
261. Zhang, X. et al., (2022). *J. Alloys Compd.*, 899, 163254. Doi: 10.1016/j.jallcom.2021.163254
262. Zhao, J.K., (2013). *Physics Procedia*, 42, 39 – 45
263. Zinicovscaia, I. et al., (2020). *Materials*, 13(16), 3624; Doi: 10.3390/ma13163624
264. Zouw, G. et al., (2000), *Nucl. Inst. Meth. A*, 440, 568

**Направления научных исследований на перспективном импульсном  
источнике нейтронов в ЛНФ ОИЯИ**

**Том I**

**Отпечатано с файлов, предоставленных ЛНФ ОИЯИ**

**Подписано в печать 18.06.2025**

**Формат 60 × 84/8. Усл. печ. л. 16,28. Уч.-изд. л. 13,2. Тираж 150. Заказ № 61123.  
Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований  
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6  
E-mail: [publish@jinr.ru](mailto:publish@jinr.ru)  
[www.jinr.ru/publish/](http://www.jinr.ru/publish/)**



ЛНФ, 2025  
ОИЯИ, ул. Жолио-Кюри, 6,  
141980 Дубна, Россия