

Физика конденсированных сред

ОИЯИ обладает уникальной экспериментальной базой (импульсный реактор ИБР-2 и ускорительный комплекс DRIBs-III) для проведения фундаментальных и прикладных исследований в области физики конденсированного состояния вещества и в смежных областях (биология, медицина, материаловедение и т. д.), направленных на изучение структуры и свойств наносистем и новых материалов, биологических объектов и биотехнологий.

I. Нейтронные методы исследования

Нейтронные методы исследования вещества позволяют получать детальную информацию об атомной и магнитной структуре и динамике материалов на атомном и надатомном уровнях. В силу особенностей взаимодействия медленных нейтронов с веществом нейтронография является наиболее эффективным методом при определении положений легких атомов в окружении тяжелых, изучении распределения элементов с близкими атомными номерами, исследовании процессов изотопного замещения и магнитных структур.

Ожидаемые результаты

1. Физика и химия новых функциональных материалов

1.1. Определение характеристик атомной и магнитной структуры объемных и наноструктурированных функциональных материалов, проявляющих актуальные физические явления и перспективных для практических применений, в широком диапазоне термодинамических параметров, выявление роли структурных параметров и кластерообразования в формировании физических свойств — 2017–2023 гг.

1.2. Определение микроскопических механизмов возникновения магнитоэлектрического эффекта в сложных оксидах мультиферроиков — 2019–2023 гг.

1.3. Определение параметров кристаллической и магнитной структур новых форм простых оксидов переходных металлов, формирующихся в экстремальных условиях, — 2017–2021 гг.

1.4. Определение влияния микроструктуры электродов на протекание процессов заряда–разряда в малогабаритных источниках электрического тока — 2017–2021 гг.

1.5. Определение структуры и колебательных спектров молекулярных комплексов: ионно-молекулярных инклюзивных материалов и комплексов с переносом электрического заряда, структурных и динамических параметров водородных связей в биологически активных материалах — 2017–2019 гг.

2. Физика наносистем и наноразмерных явлений

2.1. Установление эффектов близости в магнитных слоистых наноструктурах и анализ их магнитных свойств в постоянных и переменных магнитных полях — 2017–2019 гг.

2.2. Определение структуры ряда актуальных наносистем на основе композиционных углерод- и кремнийсодержащих материалов, в том числе на основе фуллеренов, наноалмазов и их биоактивных производных, — 2017–2021 гг.

2.3. Исследование наносистем методом позитронной аннигиляционной спектроскопии (ПАС). Метод ПАС позволяет получать детальную информацию об атомной структуре материалов на атомном и субатомном уровнях. Основной целью исследований с помощью данного метода является диагностика дефектов (вакансий и дислокаций) в поверхностных слоях на глубине около 1–20 мг/см² (от 1 до 25 мкм в железе) в металлах, сплавах, полимерах,

полупроводниках, углероде и других материалах. Установка ПАС, разработанная в ОИЯИ с использованием уникального источника монохроматических позитронов, позволяет получать распределение дефектов по глубине образца и (при использовании одной из версий метода) определять типы дефектов. Основным применением метода ПАС является изучение приповерхностных слоев материалов (металлов и полупроводников), в которых различные имплантированные ионы изменяют свойства этих материалов. Это относится, в частности, к материалам, модифицированным путем имплантации тяжелых ионов или подвергнутых ионному или нейтронному облучению. Такие исследования открывают возможность экспериментального изучения механизма радиационного повреждения материалов, что имеет важное практическое значение при разработке конструкционных материалов для атомной энергетики, полупроводниковых компонентов в микроэлектронике (в том числе для космических аппаратов) и т. д. Исследования пористых материалов с помощью ПАС представляют особый интерес, так как данный метод, один из немногих, позволяет обнаруживать поры размером порядка нескольких нанометров. Такие исследования открывают новые возможности, связанные с изучением и разработкой перспективных материалов и мембран на основе полимеров и технологий синтеза химических катализаторов.

2.4. Структурная диагностика и изучение физических процессов на электрохимических интерфейсах в режиме функционирования (*in operando*) — 2017–2020 гг.

3. Физика и химия комплексных жидкостей и полимеров

3.1. Сравнительный анализ структурных аспектов стабилизации дисперсных систем и сложных жидкостей, в том числе биорелевантных систем, с немагнитными и магнитными наночастицами, в объеме и на межфазных границах — 2017–2023 гг.

3.2. Определение структурных характеристик магнитных эластомеров и карбосилановых дендримеров, перспективных для технологических применений, — 2017–2019 гг.

4. Молекулярная биология и фармакология

4.1. Определение структурных характеристик липидных наносистем, моделирующих верхний слой кожи человека и млекопитающих, в интересах изучения процессов транспорта лекарственных средств через кожу. Определение морфологии фосфолипидной транспортной наносистемы — 2017–2021 гг.

4.2. Определение структурных и функциональных характеристик биологических наносистем: макромолекул белка, ДНК, РНК и их комплексов — 2019–2023 гг.

4.3. Анализ структурных особенностей взаимодействия наночастиц и функциональных комплексов на их основе с биологическими макромолекулами в объеме и на границах раздела, влияния структурной и кластерной устойчивости наносистем на биосовместимость сложных растворов — 2017–2020 гг.

5. Материаловедение и инженерные науки

5.1. Определение внутренних напряжений в конструкционных материалах ядерных реакторов, промышленных материалах и изделиях: композитах, армированных системах, металлокерамиках, сплавах с памятью формы — 2017–2023 гг.

5.2. Определение особенностей внутреннего строения метеоритов и построение 3D-моделей их основных фракций — 2020–2023 гг.

5.3. Изучение метаморфических, геодинамических и эволюционных процессов в литосфере по данным о текстурах глубинных и приповерхностных горных пород. Выявление природы сейсмической анизотропии — 2017–2021 гг.

5.4. Разработка модели твердотельных поликристаллических материалов для прогнозирования их упругих, прочностных и тепловых свойств с учетом влияния текстуры, включений, пор и микротрещин — 2021–2023 гг.

II. Оптические методы исследований

В последние несколько лет исследования в области физики конденсированных сред дополнились и обогатились спектроскопией и микроскопией комбинационного рассеяния на базе современного лазерного сканирующего конфокального микроскопа КАРС.

Научные направления

Рамановская спектроскопия и микроскопия. Спектрально-микроскопические исследования мембранных белков, клеток и организмов.

Ап-конверсионная люминесценция. Исследование структурно-люминесцентных характеристик наностеклокерамик.

Ожидаемые результаты

1. Выявление роли липидов и детергентов в кристаллизации мембранных белков методами рамановской и КАРС-спектроскопии.

2. Создание концепции *in meso* кристаллизации мембранных белков на основе рамановской, КАРС- и ГКР-спектроскопии и микроскопии.

3. Демонстрация возможностей усиленной рамановской спектроскопии и микроскопии (в том числе 3D-визуализации) в изучении различных клеток и микроорганизмов.

4. Интеграция рамановской спектроскопии с атомно-силовой микроскопией (рамановская АСМ): спектроскопия/микроскопия с разрешением до 10 нм.

5. Получение высокоэффективного преобразования ИК-излучения в ап-конверсионную люминесценцию в наностеклокерамических матрицах, допированных ионами редкоземельных элементов (Er, Eu, Pr, Tm, Yb и др.), и выработка рекомендаций по их практическому применению.

III. Прикладные исследования с тяжелыми ионами

Методы, сочетающие облучение тяжелыми ионами и физико-химическую обработку, обеспечивают уникальные возможности изменения свойств материалов для создания новых функциональных структур. Основное внимание будет уделяться модификации материалов в наноразмерной области и исследованию эффектов, вызываемых тяжелыми ионами в веществе, с целью изучения фундаментальных механизмов этих эффектов и разработки их применения в нанотехнологиях. Исследования будут проводиться с целью создания новых типов трековых мембран и функциональных материалов на их базе, которые могут применяться в различных технологических процессах и в медицине.

Будут разрабатываться новые методы получения ультрачистых изотопов, а также детально изучаться свойства нуклидов, имеющих перспективы практического применения.

Дальнейший прогресс исследований будет обеспечен благодаря полномасштабному развитию экспериментальной базы, включающему как модернизацию существующих и разработку специализированных ускорителей, так и создание прецизионных инструментов для изучения микро- и наноструктурных характеристик материалов.

Набор экспериментальных методов будет пополнен современными аналитическими методиками, включая сканирующую и просвечивающую электронную микроскопию высокого разрешения, атомную силовую микроскопию, сканирующую томографию, фотоэлектронную рентгеновскую спектроскопию, дисперсионную по энергии, кристаллодифракционную спектроскопию рентгеновского излучения и другие дополнительные методы.

Ионно-трековые методики будут использоваться в сочетании с технологиями тонких пленок, многослойных покрытий и новых перспективных материалов (графенов, плазмониевых материалов).

Ожидаемые результаты

1. Детальное исследование эффектов, вызываемых тяжелыми ионами в веществе, с целью развития нанотехнологических приложений пучков ускоренных ионов.
2. Исследование радиационной стойкости материалов при воздействии многозарядных ионов, включая тестирование микроэлектронных схем космической техники.
3. Синтез наноструктурированных материалов и изучение их оптических, электрических и магнитных свойств.
4. Создание нового поколения трековых мембран с заданными свойствами и перспективных материалов на их базе для применения в оптике, медицине, биохимии и создания сенсоров.
5. Развитие гибридных нанотехнологий, сочетающих методы ионно-трековой технологии и технологии покрытий, тонких слоев и поверхностной модификации.
6. Получение радиоизотопов для ядерной медицины и радиозэкологических исследований на пучках γ -квантов, нейтронов, α -частиц и тяжелых ионов.
7. Создание специализированных каналов облучения на новом ускорителе ДЦ-280 и модернизированном ускорителе У-400R.
8. Развитие исследований в области нанотехнологий в новом лабораторном корпусе ЛЯР в рамках Международного инновационного центра нанотехнологий (совместный проект ОИЯИ и Роснано).

График финансирования (тыс. долл. США)

	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	Итого
Материалы и оборудование	500,0	500,0	500,0	500,0	500,0	500,0	500,0	3 500,0

Радиобиология и астробиология

Радиобиологические исследования в период 2017–2023 гг. будут сосредоточены на изучении механизмов действия ускоренных тяжелых заряженных частиц на молекулярном, клеточном, тканевом и организменном уровнях биологической организации. Особое внимание будет уделено изучению нарушений в центральной нервной системе экспериментальных животных, поскольку ЦНС необходимо рассматривать как «критическую» систему при оценке риска радиационного воздействия на организм космонавтов при осуществлении межпланетных полетов.

Астробиологические исследования будут направлены на решение центрального вопроса, связанного с образованием пребиотических соединений, лежащих в основе формирования живых систем: что является первичным в зарождении жизни — генетика или

метаболизм. Планируемые исследования нацелены на разработку единых теоретических и экспериментальных подходов с учетом возможного влияния на феномен возникновения жизни таких факторов, как энергетический, эволюционный, протометаболический и фактор древней окружающей среды. Вторым направлением исследований в области астробиологии является поиск и изучение микрофоссилий в метеоритах и раннедокембрийских земных породах с помощью электронной микроскопии и методов ядерной физики.

Основные направления исследований

- 1. Исследования механизмов формирования молекулярных нарушений структуры ДНК и их репарации при действии тяжелых заряженных частиц различных энергий**
 - 1.1. Будут исследованы повреждения в ядрах индивидуальных клеток и проведен анализ тонкой структуры кластерных повреждений ДНК.
 - 1.2. Будет оценено влияние распределения различных видов повреждений ДНК на способность клеток к репарации.
 - 1.3. Планируется выяснить механизмы и описать динамику белкового узнавания кластерных повреждений ДНК и их последующей репарации.
- 2. Исследования закономерностей и механизмов образования генных и структурных мутаций в клетках млекопитающих и человека при действии тяжелых заряженных частиц различных энергий**
 - 2.1. Будут исследованы особенности мутагенного действия редко- и плотноионизирующих излучений на клетки млекопитающих и человека.
 - 2.2. Будет проанализировано и сопоставлено мутагенное действие излучений разного качества на клетки прокариот и эукариот.
 - 2.3. Будут выяснены механизмы «генетической нестабильности» клеток млекопитающих и человека.
- 3. Исследования механизмов повреждения и восстановления морфологических и функциональных нарушений в сетчатке глаза и различных отделах центральной нервной системы при действии тяжелых заряженных частиц различных энергий**
 - 3.1. Будут изучены морфологические, цитологические, нейрохимические и молекулярно-физиологические нарушения в сетчатке глаза и структурах центральной нервной системы.
 - 3.2. Будут исследованы модификации поведенческих функций у облученных животных.
 - 3.3. В экспериментах на приматах будет оценено влияние излучений разного качества на элементы операторской деятельности.
 - 3.4. Будут исследованы нейрофизиологические и нейрохимические механизмы, лежащие в основе этих процессов.
- 4. Математическое моделирование радиационно-индуцированных эффектов ионизирующих излучений с разной ЛПЭ на молекулярном и клеточном уровне. Разработка и анализ математических моделей молекулярных механизмов нарушений структуры и функций центральной нервной системы в результате действия заряженных частиц высоких энергий**
 - 4.1. Будут разработаны математические модели, описывающие восстановление радиационно-индуцированных повреждений.

- 4.2. Планируется усовершенствовать модели, описывающие этапы повреждения ДНК при действии ионизирующих излучений разного качества и процессы репарации ДНК.
- 4.3. Будут разработаны модели, описывающие действия радиации на структуры и функции ЦНС, в частности, модели нарушения передачи сигналов, ионной регуляции и функционирования синапсов, нарушения экспрессии генов и синтеза белков и нейрогенеза в гиппокампе.

5. Радиационные исследования

- 5.1. Будет продолжено физическое обеспечение радиобиологических экспериментов на ядерно-физических установках ОИЯИ.
- 5.2. Будут продолжены работы по проектированию комплекса NISA в части конструирования и расчета биологических защит, прогнозирования радиационной обстановки на объекте и в окружающей среде, оценки уровней наведенной активности оборудования, оценки дозовой нагрузки персонала и организации мероприятий по радиационной безопасности, создания систем радиационного контроля.
- 5.3. В рамках сотрудничества ЛРБ с ЛНФ ОИЯИ и ИКИ РАН в области ядерной планетологии планируется провести исследования характеристик и калибровки приборов на созданном экспериментальном стенде ДАН с различными моделями планетарных грунтов.

6. Астробиологические исследования

- 6.1. Будет исследована возможность самосборки 3',5'-циклических нуклеотидов в системе формамид + метеоритное вещество при действии высокоэнергетичных заряженных частиц.
- 6.2. Для исследования механизма реакций синтеза нуклеозидов будет выполнено облучение ускоренными тяжелыми заряженными частицами сахаров и нуклеиновых оснований, полученных в предыдущих экспериментах при облучении протонами формамида в присутствии вещества метеоритов.
- 6.3. Будет изучен синергетический эффект при синтезе биомолекул под действием облучения формамида в присутствии аминокислот.
- 6.4. Будет изучено one-pot фосфорилирование нуклеозидов при протонном облучении формамида в присутствии вещества метеоритов и неорганических фосфатов.
- 6.5. Будет продолжен поиск и изучение микрофоссилий в метеоритах и раннедокембрийских земных породах с помощью электронной микроскопии.
- 6.6. Будут определены критерии и разработаны методики определения земного заражения образцов метеоритного вещества микроорганизмами для предотвращения ошибок в идентификации их внеземного происхождения.
- 6.7. Будет проанализирован элементный состав космической пыли и других материалов внеземного происхождения с использованием многоэлементного нейтронного активационного анализа на реакторе ИБР-2.