



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»
Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»



50 ЛЕТ
НА ПИКЕ НАУКИ



Основные результаты
научной деятельности

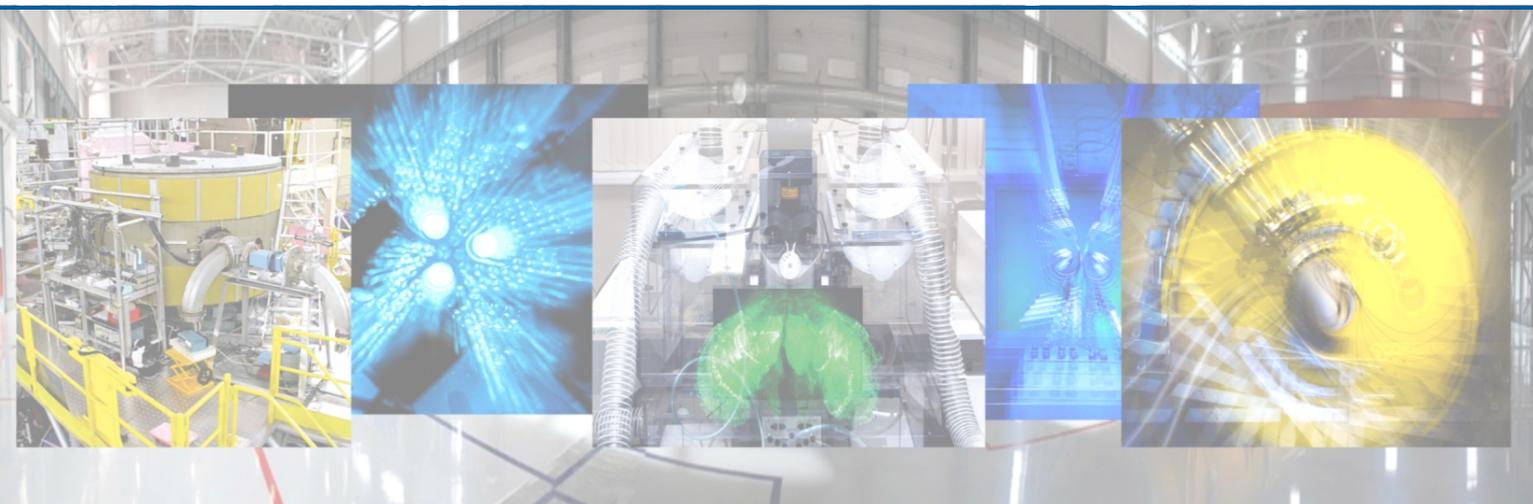
2020



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»
Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»



50 ЛЕТ
НА ПИКЕ НАУКИ



Основные результаты научной деятельности 2020

Гатчина • 2021

Научные редакторы:

В. В. Воронин
С. В. Саранцева
С. И. Воробьев

Составители:

Д. Н. Аристов	В. В. Саранцев
А. А. Воробьев	М. В. Суюсова
С. И. Воробьев	А. В. Титов
А. Л. Коневега	О. Л. Федин
А. И. Курбаков	С. Р. Фридман
М. А. Матвеев	Ю. П. Черненко
В. Ю. Петров	К. А. Шабалин

Ответственный за выпуск

С. И. Воробьев

Основные результаты научной деятельности – 2020. –

Гатчина Ленинградской обл.: Издательство
НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, 2021. – 134 с.

Данное издание представляет собой сборник кратких описаний наиболее существенных результатов научных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ за 2020 г. Помимо аннотации, для каждого результата в сборнике приведены ссылки на статьи ведущих отечественных и зарубежных изданий, в которых работа описана детально и где можно подробно ознакомиться с ее содержанием.

ISBN 978-5-86763-453-7

© НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, 2021

Оглавление

- 5** Введение
- 9** Научные отделения
- 29** Теоретическая и математическая физика
- 39** Исследования с использованием нейтронов и фотонов
- 55** Исследования с использованием протонов и ионов. Физика нейтрино
- 73** Молекулярная и радиационная биофизика
- 87** Ядерная медицина (производство изотопов, лучевая терапия, био- и нанотехнологии для медицины)
- 93** Физика ядерных реакторов и ускорителей
- 101** Прикладные исследования и разработки
- 109** Базовые установки
- 117** Научно-организационная деятельность



КОРНЕИ ПАВЛОВИЧ
КОСТАТИНОВ

Введение

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, Институт) – многопрофильный научный центр, ведущий фундаментальные и прикладные исследования в области физики элементарных частиц и высоких энергий, ядерной физики, физики конденсированного состояния, молекулярной и радиационной биофизики.

Научные работы сотрудников Института отмечены Ленинской и Государственными премиями, премиями Правительства РФ, академическими премиями. Три сотрудника избраны действительными членами, восемь сотрудников – членами-корреспондентами Российской академии наук (РАН). В 2020 г. в стенах Института трудилось 2 138 человек, из них 537 – научные сотрудники, 75 докторов наук и 261 кандидат наук. Двое сотрудников являются членами-корреспондентами РАН.

В составе Института функционируют пять научных отделений, объединенных общей инфраструктурой:

- теоретической физики;
- нейтронных исследований;
- физики высоких энергий;
- молекулярной и радиационной биофизики;
- перспективных разработок.

Программа научных исследований на долгосрочный и краткосрочный периоды изложена в Программе деятельности НИЦ «Курчатовский институт» и в Программе Института по научно-исследовательским и опытно-конструкторским работам (НИОКР) согласно государственному заданию.

Как и другие научные учреждения, входящие в состав НИЦ «Курчатовский институт», НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ активно участвует в различных международных проектах и сотрудничает по основным направлениям своей деятельности с крупнейшими международными научными центрами.

В Институте работают и создаются базовые установки для физических исследований. Исследовательский реактор ВВР-М, построенный в 1959 г., с 31 декабря 2015 г. находится в режиме длительного останова. На нем долгое время велись фундаментальные и прикладные исследования в об-

ласти ядерной физики, физики конденсированного состояния, радиационного материаловедения, радиобиологии, наработка радионуклидов для медицинских и технических целей. Протонный синхротрон СЦ-1000, построенный в 1970 г., отработал в 2020 г. на эксперимент 1 497 ч: сказалась пандемия, связанная с распространением новой коронавирусной инфекции COVID-19. Выполнялись работы по созданию на изохронном циклотроне Ц-80 офтальмологического тракта, имеющего энергию выведенного протонного пучка в диапазоне 40–80 МэВ, для планируемого в будущем исследовательского онкоофтальмологического комплекса протонной лучевой терапии, также осуществлены моделирование и оптимизация тракта транспортировки пучков переменной энергии на Ц-80 для испытаний электронно-компонентной базы.

В рамках Курчатовского геномного центра проводились мероприятия по созданию материально-технической базы для скрининга продуцентов, получения, анализа и модификации целевых белков, созданию исследовательской инфраструктуры для проведения пробоподготовки и анализа биологических образцов, содержащих нуклеиновые кислоты.

В 2020 г. продолжались работы по реализации инвестиционных проектов по модернизации и реконструкции инженерно-технических систем реакторного комплекса ПИК (РК ПИК). Этот год стал важным этапом на пути создания приборной базы РК ПИК. В 2020 г. в рамках выполнения Указа Президента РФ № 356 от 25.06.2019 введены в эксплуатацию пять экспериментальных станций в зале горизонтальных экспериментальных каналов РК ПИК: рефлектометр поляризованных нейтронов NERO-2, тестовый нейтронный рефлектометр ТНР, тестовый нейтронный спектрометр «Т-Спектр», текстурный нейтронный дифрактометр ТЕХ-3, дифрактометр поляризованных нейтронов ДПН. Введенные в эксплуатацию экспериментальные станции обеспечивают реализацию базового набора нейтронных методик, среди которых дифрактометрия, рефлектометрия и спектрометрия. На основании этой экспериментальной базы зарегистрирована уникальная научная установка «Международный центр нейтронных иссле-



дований на базе высокопоточного реактора ПИК» (УНУ «МЦНИ ПИК»).

Получены положительные экспертные заключения Научно-технического центра по ядерной и радиационной безопасности о безопасности при внесении изменений в условия действия лицензии от 06.07.2017 № ГН-03-108-3378 на эксплуатацию комплекса с исследовательским ядерным реактором ПИК, что позволило в условиях действия данной лицензии внести изменения № 2 от 10.12.2020, дающие право эксплуатации РК ПИК на мощности до 10 МВт.

2020 год хоть и прошел в режиме ограничений массовых мероприятий, но все же был насыщен событиями научной и общественной жизни, проведенными как в очной, так и в дистанционной форме. 6–7 февраля в Институте праздновался День российской науки. Совет молодых ученых и специалистов и Научно-образовательный центр подготовили программу мероприятий. Институт посетили школьники, с ними были проведены занятия, состоялся торжественный Ученый совет, на котором были вручены именные стипендии в честь выдающихся ученых, еще не так давно трудившихся в стенах Института: стипендия имени В. Н. Грибова за работы в области теоретической физики, стипендия имени С. Е. Бреслера за работы в области биологии. Завершил праздник ставший уже традиционным Зимний бал.

В конце февраля – первой половине марта состоялись традиционные Зимние научные школы НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ: 54-я Зимняя школа по физике ядра и элементарных частиц, 54-я Зимняя школа по физике конденсированного состояния и XXI Зимняя молодежная школа по биофизике и молекулярной биологии. Зимние школы включали в себя лекции известных ученых,

семинары и выступления участников по всем ключевым направлениям: физике атомного ядра и элементарных частиц, физике и технике реакторов, теоретической физике, физике конденсированного состояния, биофизике и молекулярной биологии. В работе Зимних научных школ приняли участие более 500 ученых и специалистов, представляющих Институт и другие ведущие научные организации России и зарубежья. В 2020 г. НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ организовал 11 общественно значимых мероприятий (совещаний, конференций и школ), среди которых можно отметить Международную конференцию «Дрозософила в генетике и медицине», Пятое рабочее совещание по неупругому рассеянию нейтронов «Спектрина-2020», VII Всероссийский молодежный научный форум Open Science 2020, IX Школу по физике поляризованных нейтронов «ФПН-2020» и юбилейную конференцию «Молодые таланты – 2020» программы «Школьная экологическая инициатива».

Данное издание представляет собой сборник кратких описаний наиболее существенных результатов научных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ в 2020 г. Это описание предваряют обзоры руководителей научных отделений основных направлений деятельности Института. Также отражена структура отделений. Далее приведены аннотации работ, представление которых обсуждено и рекомендовано учеными советами отделений. Помимо аннотации, для каждого результата в сборнике приведены ссылки на статьи ведущих отечественных и зарубежных изданий, в которых работа описана детально и где можно ознакомиться с ее полным содержанием.

Результаты работ сотрудников НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ опубликованы в 674 статьях, из них 473 публикации проиндексированы в базе данных WEB of Science, также представлено более 380 докладов на 114 международных и российских конференциях.

В заключительном разделе дана общая информация об Институте.



Директор НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ
С. Е. Горчаков

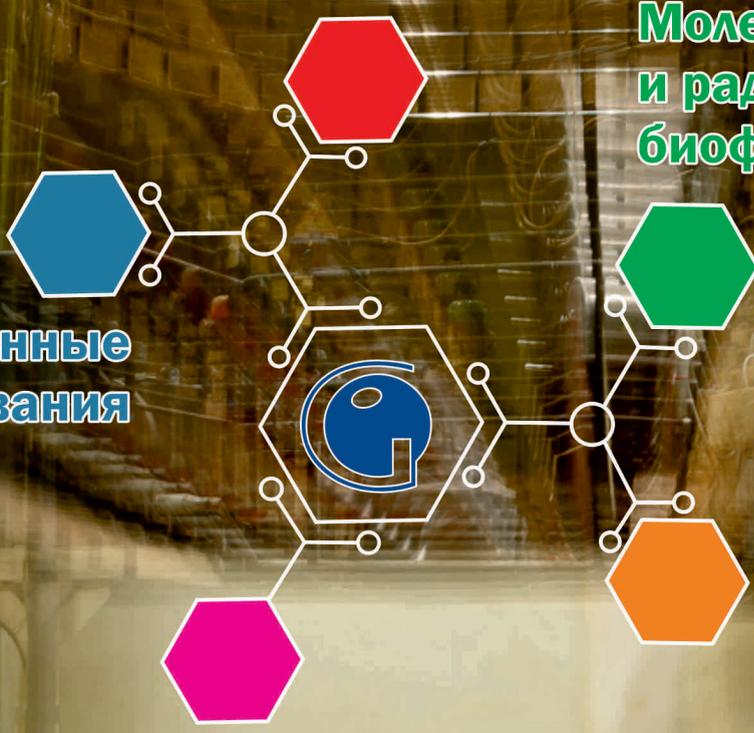
Физика высоких энергий

Молекулярная и радиационная биофизика

Нейтронные исследования

Перспективные разработки

Теоретическая физика



Научные отделения

- 10** Отделение теоретической физики
- 13** Отделение нейтронных исследований
- 17** Отделение физики высоких энергий
- 20** Отделение молекулярной и радиационной биофизики
- 24** Отделение перспективных разработок

Отделение теоретической физики

Отделение теоретической физики (ОТФ), руководитель – д. ф.-м. н. В. Ю. Петров, состоит из 7 секторов:

- теории электрослабых взаимодействий (и. о. заведующего – д. ф.-м. н. И. Т. Дятлов);
- теории сильных взаимодействий (заведующий – д. ф.-м. н. В. Ю. Петров);
- квантовой теории поля (заведующий – к. ф.-м. н. В. А. Кудрявцев);
- физики высоких энергий (и. о. заведующего – д. ф.-м. н. В. Ю. Петров);
- теории конденсированного состояния (заведующий – д. ф.-м. н. Д. Н. Аристов);
- теории ядра (заведующий – д. ф.-м. н. М. Г. Рыскин);
- теории атома (заведующий – д. ф.-м. н. А. И. Михайлов)

и группы теории ядерных реакторов (руководитель – к. ф.-м. н. М. С. Онегин).

В ОТФ работают 62 научных сотрудника, из них 26 докторов наук и 35 кандидатов наук.



В. Ю. Петров,
д. ф.-м. н.,
руководитель
Отделения

Исследования, проводимые в ОТФ, охватывают большинство областей современной теоретической физики: от физики элементарных частиц

и квантовой теории поля до физики ядерных реакторов.

Рассеяние при высоких энергиях – традиционная тема исследований в ОТФ. В течение долгого времени работы сотрудников Отделения определяли мировой уровень в данной области. В 2020 г. были вычислены амплитуды распределения для переходов «барион – мезон» и предложены обобщения этих амплитуд, а также off-forward партонных распределений в нуклоне.

Предложен метод вычисления лидирующих дважды логарифмических вкладов в структурные функции. Удалось зафиксировать область применимости реджевской асимптотики $x < 10^{-6}$.

В области квантовой теории поля предложен метод вычисления лидирующих инфракрасных

поправок в двумерных неперенормируемых эффективных теориях поля. Новый метод использует только общие свойства теории: унитарность, аналитичность и кроссинг. Разработан метод вычисления двухпетлевой поправки эффективной теории струн для петель Вильсона с произвольными многоугольными контурами.

ОТФ также является одним из мировых лидеров в области так называемой AdS/CFT-дуальности (анти-де Ситтер/конформная теория поля). Дуальность означает, что нетривиальная теория поля ($N = 4$ суперсимметричная теория Янга – Миллса) в четырехмерном пространстве-времени эквивалентна некоторой теории струны в пространстве анти-де Ситтера и оба подхода являются точно решаемыми. Фактически дуальность выражается в связи аномальных размерностей операторов в суперсимметричной теории со спектром струны в пространстве анти-де Ситтера. В работах 2020 г. сотрудниками ОТФ была предложена и точно решена новая нетривиальная теория в трехмерном пространстве-времени, обладающая AdS/CFT-дуальностью (так называемая fish net). Важно, что это первая точная решаемая теория, которая не обладает SUSY-симметрией. Хотя теория не унитарна, она оказывается очень близка к весьма популярным в настоящее время в теории конденсированного состояния SYK-теориям.

Невылетание кварков остается наиболее интересным и все еще не проясненным явлением в квантовой хромодинамике (КХД). Согласно современным представлениям, оно связано с линейным потенциалом (струной), который возникает между кварком и антикварком, введенным в качестве пробника в КХД. Был достигнут большой прогресс в понимании невылетания в суперсимметричных теориях, исследован реализующийся в этих теориях механизм *instead-of-confinement*. Рассматривалось также поведение кварков в этих теориях, и было показано, что здесь реализуется явление *color-flavor locking*, которое наблюдается и в природе при больших плотностях вещества.

В 2019 г. коллаборация LHCb объявила об открытии двух странных экзотических состояний – пентакварка и тетракварка с ненулевой странностью. В работе М. И. Эйдеса, В. Ю. Петрова и М. В. Полякова была предложена интерпретация пентакварка, согласно которой он представляет собой связанное состояние возбужденного состояния чармония и легкого странного бариона. В такой картине четность пентакварка должна быть обязательно «плюс». Вычислены массы всех частиц флейворного октета, в который должны входить пентакварк, и их ширины.

Показано, что тетракварк не может быть странным партнером уже известных экзотических состояний. Ни один из известных методов не может быть использован для описания этого состояния, и, по существу, теория должна быть развита заново.

Было продолжено изучение ядерной материи на основе правил сумм КХД. В 2020 г. были учтены трехчастичные силы, показано, что минимум энергии с их учетом оказывается близким к значению, известному из эксперимента.

К классической ядерной физике ближе другой цикл работ, выполненный в ОТФ в 2020 г. В нем в рамках многочастичной модели с учетом межнуклонных корреляций и спаривания проведены расчеты свойств нечетно-нечетных изотопов индия от ^{130}In до ^{138}In , расположенных вблизи дважды магического ядра ^{132}Sn , удаленного от линии стабильности.

В области атомной физики была вычислена для различных элементов ионизация внутренних оболочек атома при α -распаде ядра. Вычисляли вероятности $P_i(Q_\alpha)$ ионизации *K*-, *L*- и *M*-оболочек. Полученные данные важны для обработки спектров сверхтяжелых элементов, исследуемых методами объединенной α -, γ - и электронно-конверсионной спектроскопии.

Работы ОТФ в области теории конденсированного состояния представлены в сборнике статьями О. И. Утесова и А. В. Сыромятникова. Была рассмотрена модель фрустрированного антиферромагнетика с двуслойной анизотропией или дипольными силами в магнитном поле, направленном вдоль легкой оси. Хорошо известны два сценария фазовых переходов при увеличении поля: спин-флоп-переход в коллинеарном антиферромагнетике и переворот плоскости спирали в спиральном фрустрированном магнетике.

В данной работе было продемонстрировано, что возможны три других сценария, причем один из них наблюдается экспериментально. Было бы интересно найти примеры и других предложенных новых сценариев фазовых переходов.

На протяжении ряда лет в ОТФ развивается теория одномерных квантовых проволок. В работах 2020 г. было показано, что эта теория тесно связана с поведением краевых состояний в топологических изоляторах, и определены их характеристики. Свойства данных краевых состояний требуют дальнейшего изучения. Опубликованы также некоторые новые результаты, касающиеся точных решений в особых случаях для квантовых проволок.

Было продолжено изучение сильно коррелированных ферми-систем, в частности систем с тяжелыми фермионами в графене. Показано, что в магнитном поле сопротивление такой системы должно резко падать в соответствии с экспериментом.

Реакторная тематика в работах ОТФ 2020 г. была представлена исследованиями, посвященными реактору ПИК. Изучено выгорание тепло выделяющих сборок (ТВС) ПИК с выгорающими поглотителями, оценена потеря реактивности для одиночной ТВС от использования выгорающих поглотителей. Рассчитано влияние сталь-

ной оболочки выгорающих поглотителей на реактивность реактора. Продолжена работа над кодом SERPENT для сопровождения работы реактора ПИК. Рассчитана наработка нескольких типичных изотопов на реакторе ПИК с учетом выгорания.

Сотрудниками ОТФ в 2020 г. опубликовано 109 исследовательских работ в рецензируемых журналах Web of Science и Scopus, представ-

лено 37 докладов на международных и российских конференциях, прочитано 8 курсов лекций в Санкт-Петербургском государственном университете и Санкт-Петербургском национальном исследовательском Академическом университете им. Ж. И. Алферова РАН, организованы 2 конференции, приняты на работу в ОТФ 2 аспиранта Института.

Отделение нейтронных исследований

Отделение нейтронных исследований (ОНИ), руководитель – д. ф.-м. н. А. И. Курбаков, состоит из 4 отделов.

Отдел нейтронной физики (заведующий – член-корреспондент РАН д. ф.-м. н. А. П. Серебров) состоит из 4 лабораторий:

- физики нейтрона (заведующий – член-корреспондент РАН д. ф.-м. н. А. П. Серебров);
- рентгеновской и гамма-спектроскопии (заведующий – д. ф.-м. н. В. В. Федоров);
- ядерной спектроскопии (заведующий – д. ф.-м. н. И. А. Митропольский);
- молекулярных и атомных пучков (заведующий – к. ф.-м. н. В. Ф. Ежов)

и 2 групп:

- исследований слабых взаимодействий (руководитель – к. ф.-м. н. А. Н. Пирожков);
- физики деления ядер (руководитель – А. М. Гагарский).

Отдел исследований конденсированного состояния (заведующий – к. ф.-м. н. И. А. Зобкало) состоит из 4 лабораторий:

- физики неупорядоченного состояния (заведующий – к. ф.-м. н. В. В. Рунов);
 - физики кристаллов (заведующий – к. ф.-м. н. Ю. П. Черненко);
 - исследования материалов (заведующий – д. ф.-м. н. А. И. Курбаков);
 - нейтронных физико-химических исследований (заведующий – д. ф.-м. н. В. Т. Лебедев)
- и группы электромагнитных свойств конденсированных сред (руководитель – к. ф.-м. н. О. В. Геращенко).

Отдел полупроводниковых ядерных детекторов (руководитель – д. ф.-м. н. А. В. Дербин).

Отдел эксплуатации нейтронных станций на реакторе ПИК (руководитель – к. ф.-м. н. В. В. Тарнавич).

В ОНИ работает 121 научный сотрудник, из них 9 докторов наук и 48 кандидатов наук.



А. И. Курбаков,
д. ф.-м. н.,
руководитель
Отделения

Основными направлениями деятельности Отделения являются фундаментальные исследования в области физики ядра и элементарных частиц и физики

конденсированных состояний. Нейтрон представляет собой очень удобный исследовательский инструмент, поскольку он участвует во всех известных в настоящее время типах взаимодействия. Цель исследований, проводимых в ОНИ, – развитие и широкое внедрение методов и технических средств, использующих в первую очередь

нейтронное излучение, для изучения состава и фундаментальных свойств материи, создания и изучения свойств новых материалов и новых физических явлений в них, а также разработка отечественных уникальных экспериментальных установок и аналитических методик для нейтронных исследований.

Во главу угла в настоящее время ставится создание Международного центра нейтронных исследований на базе реактора ПИК. Разрабатываются и создаются уникальные физические установки.

ОНИ – главный исполнитель в НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ тематического направления «Исследования в области нейтронной физики» Программы деятельности НИЦ «Курчатовский институт». Сотрудники Отделения участвуют как исполнители в реализации и некоторых других направлений этой программы.

2020 год был довольно успешным в научном плане. Среди победителей конкурса на соискание премии имени И. В. Курчатова за 2019 г., результаты которого были объявлены в 2020 г., четыре работы, выполненные сотрудниками ОНИ: одна в области научных исследований и три студенческие работы. Коллектив, разработавший проект источника ультрахолодных нейтронов на основе сверхтекучего гелия для реакторного комплекса ПИК, получил премию имени А. П. Александрова за 2020 г. Научные группы, в которых ученые ОНИ были основными исполнителями, получили одну первую, три вторых и две третьих премии на конкурсе лучших работ НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ.

В течение 2020 г. сотрудниками Отделения выполнялись работы в рамках 5 проектов РФ и 10 проектов РФФИ, в которых руководителями были ученые из ОНИ.

В области исследований фундаментальных свойств материи с использованием нейтронов за последние годы получены новые важные результаты. Продолжаются эксперименты по поиску электрического дипольного момента (ЭДМ) и измерению времени жизни нейтрона в магнитной и гравитационной ловушках ультрахолодных нейтронов и исследования фундаментальных свойств и взаимодействий нейтрона кристаллодифракционными методами. Время жизни нейтрона является ключевой физической величиной как для определения параметров слабого взаимодействия, так и для описания процесса первичного нуклеосинтеза в астрофизике. Из данных, полученных в эксперименте по измерению ЭДМ нейтрона с помощью вращения спина нейтрона при прохождении его вблизи брэгговского отражения через совершенный кристалл без центра симметрии, определено лучшее ограничение на константу связи нового взаимодействия в рамках расширения Стандартной модели (СМ) $g_A^2 \leq 4,5 \cdot 10^{-24} (g^2 + 1/\lambda_A^2)$ (лаборатория рентгеновской и гамма-спектроскопии, зав. лаб. – д. ф.-м. н. В. В. Федоров).

Впервые измерены угловые распределения осколков при делении $^{240}\text{Pu}(n, f)$ в широкой области энергий нейтронов 1–200 МэВ. Для описания полученных данных разработан пакет

программ. С его помощью удалось описать энергетическую зависимость угловой анизотропии осколков деления в модели с небольшим числом параметров. Тем самым показана перспективность метода для получения новой информации о процессе деления. Установлено, что при делении ядер, помимо нейтронов, вылетающих из осколков деления, также имеется незначительная часть «разрывных» нейтронов, механизм испускания которых пока неизвестен. При этом угловое распределение «мгновенных» нейтронов не является изотропным в системе центра масс каждого из осколков деления (группа физики деления ядер, руководитель – А. М. Гагарский).

Впервые было показано, что спектроскопические эксперименты с хиральными молекулами чувствительны к псевдовекторному полю. Такое поле играет роль темной материи в некоторых современных космологических моделях. При правильном выборе молекулы можно повысить чувствительность к такому полю на 2-3 порядка и исследовать ранее недоступную область пространства параметров бозонных моделей темной материи (группа д. ф.-м. н. М. Г. Козлова).

Впервые исследованы электронные и колебательные спектры для молекулы, содержащей короткоживущий радиоактивный атом. На основании проведенных исследований подтверждена возможность эффективного лазерного охлаждения молекулы RaF. Полученные результаты являются решающим шагом на пути использования короткоживущих радиоактивных молекул в фундаментальных физических экспериментах по поиску новой физики за пределами СМ (лаборатория молекулярных и атомных пучков, зав. лаб. – к. ф.-м. н. В. Ф. Ежов).

В области физики конденсированного состояния сейчас наблюдается повышенный интерес исследователей к предсказанию, обнаружению и изучению новых необычных магнитных явлений, а также к поиску новых экзотических магнитных структур. Большое внимание уделяется таким объектам, как низкоразмерные системы, в которых квантовая природа проявляется на уровне макроскопических коллективных явлений. Необычные состояния демонстрируют

системы, в которых существуют фрустрации различной природы и анизотропия магнитных взаимодействий.

Экспериментальные исследования методом порошковой нейтронной дифракции соединения $\text{Li}_2\text{MnTeO}_6$ позволили описать новое физическое явление – скрытый магнитный порядок в треугольно-решеточном фрустрированном магнетике. Магнитная восприимчивость $\chi(T)$ демонстрирует очень необычное поведение: она описывается законом Кюри – Вейса при высокой температуре с температурой Кюри – Вейса $\Theta = -74$ К, не проявляет явных аномалий, указывающих на дальнейшее магнитное упорядочение при слабом магнитном поле. Однако в сильных магнитных полях характер изменения $\chi(T)$ демонстрирует максимум примерно при 9 К. По данным порошковой нейтронной дифракции, при 1,6 К магнитная структура $\text{Li}_2\text{MnTeO}_6$ описывается 120-градусной неколлинеарной спиновой структурой с вектором распространения $\mathbf{k} = (1/3, 1/3, 0)$. В спин-обменных взаимодействиях, оцененных по функционалу плотности, преобладает антиферромагнитный обмен ближайших соседей в каждой треугольной спиновой решетке. Установлено, что спиновая решетка сильно фрустрирована с $f = |\Theta|/T_N \approx 8$ и имеет двумерный магнитный характер в широком интервале температур выше T_N (лаборатория исследования материалов, зав. лаб. – д. ф.-м. н. А. И. Курбаков).

При исследовании мультиферроиков получен целый ряд новых результатов. Нейтронографией, измерениями намагниченности и диэлектрической проницаемости впервые обнаружена индуцированная геликоидальным магнитным порядком электрическая поляризация в соединении $^{160}\text{Gd}_2\text{BaCuO}_5$. Магнитоэлектрические взаимодействия как в соизмеримой, так и в несоизмеримой фазах обусловлены двухспиновыми и односпиновыми вкладами магнитных ионов, расположенных в нецентральных позициях. Показано, что новые мультиферроики со сложными $4f$ - $3d$ -взаимодействиями могут быть площадкой для поиска и синтеза новых магнитоэлектрических материалов, имеющих практическое применение. В мультиферроике-ферро-

борате $\text{HoFe}_3(\text{BO}_3)_4$ наблюдались серия фазовых переходов и интересные магнитоэлектрические свойства. Показано, что особенности магнитных свойств ферроборатов определяются энергетическими уровнями основного мультиплета в кристаллическом поле (группа д. ф.-м. н. И. В. Голосовского).

В отделе исследований конденсированного состояния несколькими группами проводится изучение фрактальной организации наноматериалов, полимеров и биологических объектов методом малоуглового рассеяния нейтронов и синхротронного излучения, в частности исследование структурной организации хроматина в ядре биологической клетки и изменение фрактальных свойств ДНК в ядрах куриных эритроцитов при механическом воздействии (группы Г. П. Копицы и д. ф.-м. н. С. В. Григорьева).

При активном участии многих сотрудников Отделения смонтированы на пучках нейтронов и введены в эксплуатацию пять исследовательских экспериментальных станций в зале горизонтальных экспериментальных каналов реактора ПИК. Это рефлектометр поляризованных нейтронов NERO-2, тестовый нейтронный рефлектометр ТНР, тестовый нейтронный спектрометр «Т-Спектр», текстурный нейтронный дифрактометр ТЕХ-3 и дифрактометр поляризованных нейтронов ДПН. Введенные в эксплуатацию экспериментальные станции обеспечивают реализацию базового набора нейтронных методик, среди которых дифрактометрия, рефлектометрия и спектрометрия.

Важнейшим научным направлением в ОНИ стала физика нейтрино. Накопленные данные на реакторе СМ-3 позволяют говорить о наблюдении эффекта осцилляций реакторных антинейтрино в стерильное состояние на уровне достоверности порядка трех стандартных отклонений (лаборатория физики нейтрона, зав. лаб. – д. ф.-м. н. А. П. Серебров). В десятку лучших мировых научных исследований 2020 г., по мнению редакции журнала *Physics World*, вошло открытие коллаборации Borexino с участием ученых НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ и НИЦ «Курчатовский институт» по обнаружению нейтрино, испускаемых в реакциях

так называемого цикла CNO (углерод – азот – кислород) на Солнце. Впервые экспериментально доказано, что Солнце черпает часть своей энергии в термоядерных процессах CNO-цикла (отдел полупроводниковых ядерных детекторов, руководитель – д. ф.-м. н. А. В. Дербин).

Сотрудниками ОНИ в 2020 г. опубликовано 76 научных статей в рецензируемых журналах

(55 – в зарубежных изданиях), сделано 88 научных докладов, представленных на международных и российских мероприятиях (49 устных, в основном онлайн), получено 1 свидетельство о государственной регистрации специализированных программ, защищены 1 докторская и 3 кандидатские диссертации.

Отделение физики высоких энергий

Отделение физики высоких энергий (ОФВЭ), научный руководитель – член-корреспондент РАН, д. ф.-м. н., профессор А. А. Воробьев; руководитель – д. ф.-м. н. О. Л. Федин, состоит из 10 лабораторий:

- физики элементарных частиц (заведующий – д. ф.-м. н. Г. Д. Алхазов);
 - релятивистской ядерной физики (заведующий – д. ф.-м. н. В. М. Самсонов);
 - короткоживущих ядер (заведующий – к. ф.-м. н. В. Н. Пантелеев);
 - мезонной физики (заведующий – к. ф.-м. н. С. И. Воробьев);
 - малонуклонных систем (заведующий – д. ф.-м. н. С. Л. Белостоцкий);
 - кристаллооптики заряженных частиц (заведующий – к. ф.-м. н. Ю. М. Иванов);
 - адронной физики (заведующий – д. ф.-м. н. О. Л. Федин);
 - физики экзотических ядер (заведующий – д. ф.-м. н. Ю. Н. Новиков);
 - барионной физики (заведующий – к. ф.-м. н. А. А. Дзюба);
 - криогенной и сверхпроводящей техники (заведующий – к. ф.-м. н. А. А. Васильев)
- и 4 научно-технических отделов:
- радиоэлектроники (руководитель – к. ф.-м. н. В. Л. Головцов);
 - трековых детекторов (руководитель – д. ф.-м. н. А. Г. Крившич);
 - вычислительных систем (руководитель – А. Е. Шевель);
 - мюонных камер (руководитель – В. С. Козлов).

В ОФВЭ работают 114 научных сотрудников, из них 15 докторов наук и 65 кандидатов наук.



А. А. Воробьев,
член-корреспондент РАН,
д. ф.-м. н., профессор,
научный руководитель
Отделения

Основными направлениями деятельности ОФВЭ являются экспериментальные исследования в области физики элементарных частиц и ядерной физики. Кроме того, в Отделении ведутся прикладные работы по разработке инновационных методов получения радиоизотопов для медицинских применений и исследования магнитных свойств материалов μ SR-методом. Отделение выполняет научные исследования, используя установки, имеющиеся в НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, а также участвуя в фундаментальных исследованиях передовых мировых ускорительных центров.

В 2020 г. проводились следующие эксперименты.

1. На синхроциклотроне СЦ-1000:

- производство и изучение короткоживущих ядер на лазерном масс-спектрометрическом комплексе ИРИС;
- изучение поляризационных эффектов в квазиупругом рассеянии протонов на ядрах;
- исследование магнитных свойств материалов μ SR-методом.



О. Л. Федин,
д. ф.-м. н.,
руководитель
Отделения

2. В Европейском центре ядерных исследований (ЦЕРН):

- участие в экспериментах CMS, ATLAS, LHCb, ALICE на Большом адронном коллайдере (БАК);
- производство и изучение короткоживущих ядер на лазерном масс-спектрометрическом комплексе ISOLDE;
- изучение возможностей кристаллической коллимации пучков БАК (эксперимент UA9).

3. На электронных ускорителях Университета Бонна (Германия):

- изучение структуры нуклонов в γ -р-рассеянии.

К завершенным экспериментам с продолжающейся обработкой данных можно отнести измерение скорости мюонного захвата в дейтерии (эксперимент MuSun) на мезонной фабрике Института им. Пауля Шеррера (Швейцария).

В числе новых проектов ОФВЭ – подготовка к экспериментам:

- «Протон» по измерению зарядового радиуса протона в упругом электрон-протонном рассеянии на ускорителе MAMI (Майнц, Германия);
 - AMBER/NA66 по измерению зарядового радиуса протона в упругом мюон-протонном рассеянии на выведенном пучке ускорителя SPS (ЦЕРН);
 - R3B, MATS, PANDA, CBM на ускорительном комплексе FAIR (Центр по изучению тяжелых ионов им. Гельмгольца, Германия);
 - SHiP по поиску частиц скрытого сектора Стандартной модели в ЦЕРН;
 - по поиску мюонного катализа ядерного синтеза $d^3\text{He}$ на мезонной фабрике Института им. Пауля Шеррера (Швейцария);
 - MPD на строящемся коллайдере NICA в Дубне,
- а также проекты:
- ИРИНА по получению и изучению короткоживущих ядер на высокопоточном нейтронном реакторе ПИК;
 - ПИТРАП по прецизионному измерению масс короткоживущих нейтроноизбыточных ядер на высокопоточном нейтронном реакторе ПИК;
 - РИЦ-80 по производству радиоизотопов для медицинских применений.

Одним из основных направлений деятельности ОФВЭ является участие в проведении

фундаментальных исследований на уникальных ускорительных установках в мировых научных центрах, таких как БАК в ЦЕРН, и на ускорительном исследовательском комплексе нового поколения в Европейском центре по исследованию ионов и антипротонов (FAIR).

В международном центре ЦЕРН ОФВЭ участвует в экспериментах CMS, ATLAS, LHCb и ALICE с начальных стадий проектирования и конструирования коллайдерных детекторов со значительным интеллектуальным и приборным вкладом в создание различных подсистем этих детекторов. После запуска БАК сотрудники ОФВЭ, наряду с другими участниками экспериментов, осуществляют постоянное сопровождение детекторов при проведении экспериментов, а также принимают участие в обработке экспериментальных данных. Продолжение анализа экспериментальных данных, полученных в Сеансе-2 (2015–2018), дает большое количество новых результатов.

Наиболее значимые из них, полученные непосредственно сотрудниками Отделения, – это установление новых более строгих ограничений на сечение рождения новых тяжелых бозонов Хиггса в эксперименте ATLAS, поиск новых асимптотических эффектов эволюции Липатова – Фаина – Кураева – Балицкого в двухструйных процессах при большом разделении по быстрой, в первых измерениях дифракционных процессов рассеяния протонов на ядрах в эксперименте CMS, обнаружение дважды Кабиббо-подавленного распада $\Xi_c^+ \rightarrow p\phi$ и открытие частицы с двойным очарованием Ξ_c^{++} в эксперименте LHCb, а также исследование в эксперименте ALICE энергетической зависимости сечения эксклюзивного жесткого фоторождения тяжелого кваркония, которые позволили извлечь из данных плотность мягких глюонов в нуклонах и ядрах, ответственную за формирование кварк-глюонной плазмы в центральных ионных столкновениях.

В 2020 г. по результатам, полученным в коллайдерных экспериментах, было опубликовано более 200 работ. Авторский список этих публикаций включает 35 ученых из ОФВЭ. Также большие усилия были сосредоточены на работах по модернизации коллайдерных детекто-

ров в связи с тем, что в Сеансе-3 ожидается повышение светимости работы БАК. В частности, в рамках программы усовершенствования детектора ATLAS сотрудники ОФВЭ завершили работы по созданию тонкозольных мюонных камер для передней части мюонного спектрометра детектора ATLAS.

Одна из фундаментальных задач, осуществляемая в ОФВЭ, – исследование свойств ядерной материи в тяжелоионных столкновениях. Выполнение этой задачи было начато в 80-х годах в эксперименте PHENIX (Брукхейвенская национальная лаборатория, США) и продолжено в эксперименте ALICE (ЦЕРН). После запуска ускорительного комплекса FAIR изучение тяжелоионных столкновений будет осуществляться в эксперименте CBM. В связи со строительством российского коллайдера NICA (Nuclotron-

based Ion Collider Facility) в Дубне, направленного на исследование ядерной материи в ионных столкновениях, Отделение подключилось к работам по созданию многоцелевого детектора MPD и разработке физической программы эксперимента. Отделение также принимает участие в конструкторской разработке концепции и физической программы исследований для второго детектора SPD на коллайдере NICA, который нацелен на изучение столкновений поляризованных частиц для исследования спиновой структуры нуклона.

Сотрудниками ОФВЭ в 2020 г. опубликовано 217 научных работ в рецензируемых журналах (212 – в зарубежных), сделан 21 доклад на российских и международных научных мероприятиях.

Отделение молекулярной и радиационной биофизики

Отделение молекулярной и радиационной биофизики (ОМРБ), руководитель – к. ф.-м. н. А. Л. Коневега, состоит из 13 лабораторий:

- биофизики макромолекул (заведующий – к. ф.-м. н. В. В. Исаев-Иванов);
- генетики эукариот (заведующий – д. б. н. В. Г. Королев);
- биосинтеза белка (заведующий – к. ф.-м. н. А. Л. Коневега);
- молекулярной генетики (заведующий – д. б. н. В. Н. Вербенко);
- биополимеров (заведующий – д. ф.-м. н. А. Л. Тимковский);
- молекулярной генетики человека (заведующая – д. б. н. С. Н. Пчелина);
- энзимологии (заведующая – к. б. н. А. А. Кульминская);
- экспериментальной и прикладной генетики (заведующая – д. б. н. С. В. Саранцева);
- медицинской биофизики (заведующий – д. б. н., профессор Л. А. Носкин);
- медицинской и биоорганической химии (заведующий – к. х. н. Ф. М. Ибатуллин);
- протеомики (заведующий – д. б. н. С. Н. Нарыжный);
- криоастробиологии (заведующий – к. б. н. С. А. Булат);
- молекулярной и клеточной биофизики (заведующий – к. ф.-м. н. Г. Н. Рычков);

3 центров:

- центра доклинических и клинических исследований (заведующий – к. м. н. А. П. Трашков);
- ресурсного центра (заведующий – к. б. н. Н. А. Верлов);
- Курчатовского геномного центра (заведующий – к. б. н. А. Ю. Конев)

и отдела инженерно-технического обеспечения (руководитель – П. А. Сотников).

В Отделении работают 139 научных сотрудников, из них 15 докторов наук и 55 кандидатов наук.



А. Л. Коневега,
к. ф.-м. н.,
руководитель
Отделения

Исследования ОМРБ посвящены наиболее значительным разделам молекулярной биологии, биофизики, молекулярной и медицинской генетики.

В Отделении активно ведутся исследования новой области на стыке молекулярной биологии и биоинформатики – протеомики. Протеом человека состоит из разнообразного и гетерогенного ряда генных продуктов/протеоформ/видов белков. Стремительно растущий объем информации о протеоформах, генерируемый различными методами, требует создания подхода для инвентаризации данных. В работе С. Н. Нарыжно-

го (лаборатория протеомики) представлена база данных протеоформ, основанная на информации, полученной путем разделения протеоформ с помощью двумерного электрофореза (2DE) с последующим анализом ESI LC–MS/MS. Описываются принципы и структура базы данных.

В ОМРБ на протяжении нескольких лет ведутся межлабораторные работы по изучению экстраклеточных везикул (ЭВ), которые играют важную роль во многих биологических процессах. Например, ЭВ участвуют в важных процессах развития мультиформной глиобластомы (GBM), включая злокачественную трансформацию и инвазию. ЭВ, секретируемые клетками глиобластомы, могут преодолевать гематоэнцефалический барьер и переносить молекулярный груз, полученный из опухоли, в периферическое кровообращение. Определение молекулярного состава ЭВ (экзосом), высвобождаемых клетками глиобластомы, представляется перспективным подходом для разработки неинвазивных мето-

дов обнаружения специфических маркеров экзосомальных белков в периферической крови. Целью исследования, проведенного Т. А. Штам (лаборатория биосинтеза белка) и С. Н. Нарыжным (лаборатория протеомики) с коллегами, было определение общих экзосомных белков, представленных в препаратах из разных клеточных линий, и поиск потенциальных биомаркеров глиобластомы в экзосомах. Обнаружена корреляция между повышенным уровнем белков глиальных клеток и их присутствием в экзосомах. Таким образом, было подтверждено присутствие многих потенциальных биомаркеров глиобластомы в экзосомах.

Кроме того, ЭВ играют важную роль в патогенезе болезни Паркинсона (БП). В настоящее время считается, что образование фибрилл α -синуклеина является ключевым звеном в патогенезе этого заболевания, а агрегаты данного белка обладают трансмиссивностью и способны распространяться от клетки к клетке посредством ЭВ. Показано, что размер и морфология ЭВ могут влиять на диффузионные свойства везикул и, возможно, на распространение α -синуклеиновой патологии при БП. В исследовании, выполненном А. К. Емельяновым (лаборатория молекулярной генетики человека), в качестве объекта изучения были использованы ЭВ, выделенные из спинномозговой жидкости (СМЖ) пациентов с БП. В работе впервые описано морфологическое разнообразие ЭВ СМЖ человека, включая группу пациентов с БП, а также предполагается наличие в биологических жидкостях человека субпопуляций ЭВ, потенциально обладающих различными специфическими функциями.

Другое важное наблюдение сделано в работе С. Н. Пчелиной (лаборатория молекулярной генетики человека), где впервые обнаружен феномен увеличенного размера и изменения морфологии ЭВ, полученных из плазмы крови пациентов с болезнью Гоше (БГ). При этом заболевании были показаны накопление нейротоксичных форм α -синуклеина в плазме крови, обусловленное мутациями в гене лизосомного фермента глюкоцереброзидазы (GBA), и обратная корреляция их уровня с активностью

данного фермента. Мутации в гене GBA повышают риск развития БП в 6–7 раз, а т. к. функция лизосом является критичной для секреции экзосом клетками, предположили, что дисфункция лизосом, происходящая вследствие снижения активности GBA, может влиять на пул ЭВ плазмы крови.

В работе Т. А. Штам в исследовании ЭВ, выделенных из плазмы и цельной крови пациентов с раком молочной железы (РМЖ) и здоровых женщин, была подробно описана морфология ЭВ. Показано, что часть циркулирующих в крови экзосом ассоциирована с поверхностью форменных элементов, их роль в диссеминации опухолевого процесса оставалась неясной. В исследовании *in vitro* продемонстрировано влияние пула экзосом цельной крови человека на основные этапы развития РМЖ: ангиогенез, способность клеток к миграции, инвазии, формированию межклеточных контактов. Определены некоторые молекулярные участники этих процессов.

Кроме фундаментальных исследований ЭВ, ведется разработка новых, оригинальных методов их выделения из разнообразных биологических источников.

В другом исследовании Т. А. Штам проведен сравнительный анализ четырех методов выделения ЭВ из плазмы крови человека: 1) последовательного ультрацентрифугирования, 2) ультрацентрифугирования с использованием «подушки» сахарозы, 3) агглютинации везикул лектинами растительного происхождения, 4) иммунопреципитации на латексных частицах. Кроме того, разработан и апробирован новый способ выделения ЭВ из плазмы крови с использованием реагента SubXTM. Метод основан на создании крупных конгломератов везикул за счет взаимодействия фосфатных групп мембранных фосфолипидов, возникающего в присутствии SubXTM. Эти крупные агрегаты могут быть седиментированы центрифугированием при относительно невысоких оборотах, что значительно упрощает процедуру выделения ЭВ. Добавление к полученному осадку избытка соли приводит к освобождению из агрегатов индивидуальных везикул.

Традиционными для ОМРБ являются исследования микробиологии и биотехнологии. В работе А. А. Кульминской и сотрудников (лаборатория энзимологии) совместно с ОНИ исследованы вопросы индукции зарождения, роста и агрегации биогенных кристаллов CaCO_3 . Индуцированные микроорганизмами осаждение и кристаллизация CaCO_3 считаются альтернативной «зеленой» технологией самовосстановления цементосодержащих материалов и представляют собой основу для разработки новых биоматериалов. Целью был поиск уреолитических кальцифицирующих микроорганизмов и анализ их способности к биоминерализации карбоната кальция во время их роста в средах с добавлением мочевины и без нее. Было обнаружено несколько микроорганизмов с высоким уровнем удельной активности уреазы, при этом резкое повышение pH среды, содержащей мочевины, приводило к эффективной биоминерализации CaCO_3 . Данные микроорганизмы полностью восстанавливают микротрещины в образцах цемента. Сделано предположение, что уреолитические микроорганизмы сохраняют свою способность индуцировать биоминерализацию CaCO_3 независимо от происхождения карбонат-ионов в клеточной среде, переключаясь между механизмами деградации мочевины и диссимиляции органических солей кальция.

Другим примером разработки новых биоматериалов является пример биоразлагаемой бактериальной целлюлозы (БЦ). БЦ, синтезированную штаммом *Gluconacetobacter hansenii*, впервые обрабатывали целлобиогидролазой из дрожжевого гриба *Scytalidium candidum* ЗС. Ферментативный гидролиз существенно повлиял на кристаллическую и надмолекулярную структуры нативной БЦ. Эксперименты *in vitro* и *in vivo* не выявили цитотоксического эффекта от добавления фермента к повязкам БЦ и показали в целом положительное влияние на лечение обширных ожогов III степени, значительно ускоряя заживление ран у крыс. Полученные результаты могут служить основой для дальнейшей разработки эффективных биоразлагаемых повязок для заживления ран на основе гидролизованной БЦ.

Традиционными для ОМРБ являются работы по репарации генетических повреждений. У эукариот толерантность к повреждениям ДНК определяется двумя путями репарации: гомологичной рекомбинационной репарацией и путем, контролируемым RAD6-эпистатической группой генов. Моноубиквитинирование PCNA опосредует путь, подверженный ошибкам, тогда как полиубиквитинирование стимулирует путь без ошибок. Безошибочный путь включает компоненты рекомбинационной репарации, однако факторы, которые действуют на этом пути, остаются в значительной степени неизвестными. В работе Е. А. Алексеевой (лаборатория генетики эукариот) определен новый участник безошибочного пути толерантности к повреждениям ДНК, продукт гена *HIM*, а механизм безошибочного пути обхода повреждений ДНК в мутанте *him1* действует через привлечение высокоошибочной полимеразы Pol η для осуществления репаративного синтеза ДНК во время пострепликативной репарации генома.

Особого внимания заслуживают работы лаборатории биосинтеза белка. В работе Д. С. Виноградовой была создана система чувствительного, быстрого и точного анализа взаимодействий биомолекул в процессе инициации трансляции, в результате чего определено новое направление в механизме строгого ответа. Был показан ингибирующий эффект молекулы ppGpp на процесс инициации трансляции, выявлена ключевая роль молекулы матричной РНК в этом процессе. Кроме того, впервые было показано, что при повышенной концентрации молекулы ppGpp в неблагоприятных условиях клетка может использовать rppGpp для инициирования процесса биосинтеза белка.

В работе Е. В. Полесской с помощью крио-ЭМ была получена структура комплекса рибосомы с антибиотиком с разрешением 2,1 Å, что на настоящий момент является рекордным среди опубликованных крио-ЭМ-структур рибосомных комплексов. Показано, что более выраженное ингибирование биосинтеза белка диритромицином, по сравнению с его предшественником эритромицином, является следствием расположения гидрофобного радикала дири-

тромицина: он направлен в просвет выходного тоннеля, частично его закрывает, что приводит к нарушению нормального прохождения растущего пептида сквозь тоннель, и ингибирует синтез полипептидной цепочки.

За 2020 г. сотрудниками ОМРБ опубликовано более 110 работ в рецензируемых журналах

(48 – в зарубежных), сделано более 57 докладов на международных научных конференциях. Активно готовится научная смена, в лабораториях Отделения выполняют научно-исследовательские проекты более 30 аспирантов (в т. ч. 23 по программе аспирантуры НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ).

Отделение перспективных разработок

Отделение перспективных разработок (ОПР), руководитель – д. ф.-м. н. А. В. Титов, состоит из 3 лабораторий:

- голографических информационно-измерительных систем (заведующий – д. ф.-м. н. Б. Г. Турухано);
 - квантовой химии (заведующий – д. ф.-м. н. А. В. Титов);
 - химии и спектроскопии углеродных материалов (заведующий – к. ф.-м. н. А. А. Борисенкова)
- и 3 отделов:

- ускорительного (заведующий – к. т. н. Е. М. Иванов), в состав которого входит лаборатория физики и техники ускорителей (заведующий – к. ф.-м. н. С. А. Артамонов);
- прикладной ядерной физики (заведующий – к. т. н. В. А. Соловей), в состав которого входят 2 лаборатории:

- радиационной физики (заведующий – к. ф.-м. н. А. С. Воробьев);
- электронного и программного обеспечения (заведующий – к. т. н. В. А. Соловей);

- информационных технологий и автоматизации (заведующий – С. Б. Олешко), в состав которого входит лаборатория информационно-вычислительных систем (заведующий – С. Б. Олешко).

В ОПР работают 67 научных сотрудников, из них 9 докторов наук и 25 кандидатов наук.



А. В. Титов,
д. ф.-м. н.,
руководитель
Отделения

В ОПР сосредоточены базовые ускорительные установки НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ. В первую очередь это уникальный по своим

характеристикам синхроциклотрон СЦ-1000 с энергией протонов выведенного пучка 1000 МэВ и током 1 мкА. Он позволяет проводить широкий круг научных и прикладных исследований в различных областях: от ядерной физики до медицины.

Основными его отличительными чертами являются:

- высокоэффективная система вывода (30 %), что в пять раз превышает эффективность стандартной регенеративной системы;
- система временной растяжки выведенного протонного пучка, которая позволяет увеличить коэффициент временного заполнения пучка с 2 до 85 %.

Для ряда физических и прикладных исследований требуются пучки протонов других энергий. С этой целью на СЦ-1000 силами Ускорительного отдела (УО) созданы пучки протонов переменной энергии от 60 до 1000 МэВ. Диаметр полученных пучков $\sim 30\text{--}80$ мм, $\Delta p/p$ находится в диапазоне 1,3–14 %, а интенсивность изменяется в диапазоне $10^7\text{--}10^{12}$ с $^{-1}$.

Кроме основного протонного пучка из камеры синхроциклотрона одновременно с основным выводится второй пучок малой интенсивности – около 1 % основного пучка. Пучок может использоваться как для физических, так и для прикладных целей, в частности для проведения протонной лучевой терапии, что позволяет значительно снизить стоимость облучения пациентов.

Для проведения научных исследований имеются вторичные пучки π^\pm - и μ^\pm -мезонов, получаемые на внешней мезонообразующей мишени. В камере ускорителя в результате однооборотного сброса протонного пучка на внутреннюю нейтронообразующую свинцовую мишень генерируется нейтронный пучок с энергией нейтронов от 10^{-2} эВ до 950 МэВ.

Совершенствование космической и авиационной техники в значительной степени связано

с использованием элементов микро- и наноэлектроники. Одним из основных условий их успешного применения является способность длительное время надежно функционировать в радиационных полях космического пространства и верхних слоев атмосферы. В настоящее время нормативные акты РФ и стандарты ведущих стран мира включают обязательные испытания радиационной стойкости современной радиоэлектронной аппаратуры, используемой в авиационной и космической технике, относительно воздействия различных видов излучения. В 2015 г. на синхроциклотроне СЦ-1000 начал функционировать специализированный центр радиационных испытаний на протонах с энергией 60–1000 МэВ, включающий два стенда с системами диагностики пучка, современными приборами дозиметрии, автоматизированной системой обработки результатов и современной инфраструктурой для пользователей.

Международный нормативный документ JEDEC STANDARD предписывает проводить испытания электронных компонент и радиоизделий в потоках нейтронов со спектром, который подобен атмосферному спектру нейтронов. На нейтронном источнике ГНЕИС синхроциклотрона СЦ-1000 силами группы физики деления ядер ОНИ и УО ОПР в 2015 г. завершено создание подобного нейтронного источника.

Высокая интенсивность нейтронного пучка позволяет проводить ускоренные испытания электроники: 1 ч экспозиции изделия на пучке эквивалентен 100 годам пребывания в полете. Таким образом, в НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ с 2015 г. действует универсальный центр испытаний радиационной стойкости элементов электронной компонентной базы, в котором отныне возможно комплексное испытание радиоэлектроники как на пучках протонов переменной энергии, так и на пучках нейтронов со спектром, повторяющим спектр атмосферных нейтронов.

В ОПР силами УО и Научно-исследовательского института электрофизической аппаратуры им. Д. В. Ефремова проводятся работы по запуску многоцелевого циклотронного комплекса на основе построенного изохронного циклотрона Ц-80 с переменной энергией прото-

нов 40–80 МэВ и током выведенного пучка до 100 мкА. Высокая энергия ускоренного пучка в сочетании с высокой интенсивностью позволит производить радиоизотопы и радиофармацевтические препараты высокого качества, недоступные для коммерческих циклотронов, в частности генераторные изотопы. Генераторные изотопы открывают путь для проведения позитронно-эмиссионной томографии в отдаленных от циклотрона медицинских центрах. В проекте также предусмотрено развитие метода создания сверхчистых медицинских изотопов с помощью магнитного сепаратора. Энергетический диапазон протонного пучка (60–70 МэВ) циклотрона Ц-80 позволяет создать единственный на сегодня в России офтальмологический центр для протонной терапии онкологических заболеваний органов зрения. Разработкой этого проекта давно занимается УО совместно с Институтом теоретической и экспериментальной физики им. А. И. Алиханова НИЦ «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ).

При создании оборудования для кабинета офтальмологии и планирования облучений будет использован огромный опыт, накопленный в НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ, где до 2010 г. сеансы протонной терапии прошли около 1400 пациентов.

Лаборатория голографических информационно-измерительных систем (ЛГИИС) ОПР является одним из мировых лидеров в области прецизионных измерений на масштабах нанометров. Для проведения этих исследований в ЛГИИС имеется современная уникальная подземная безвибрационная голографическая лаборатория. На базе этой лаборатории и уникальных стендов для синтеза линейных и радиальных голографических дифракционных решеток выпускается 14 наименований нанотехнологических устройств и приборов, среди которых: фотоэлектрические преобразователи линейных и угловых перемещений, длиномеры, двух-, трех-, четырех- и более координатно-измерительные машины, радиусомеры, плоскомеры, поворотные столы для измерения с разрешением 10 нм и сотых долей секунды. В 2015 г. впервые в мире в ЛГИИС создана линейная голографическая решетка длиной 1300 мм и разрешением 1 нм.

Работы ЛГИИС были отмечены на выставке «Армия-2015».

Отдел информационных технологий и автоматизации ОПР обеспечивает работу локальной вычислительной сети Института, включая вычислительный кластер, а также узла ГРИД-сети WLCG. В 2015 г. одним из основных направлений деятельности отдела стало создание центра обработки данных на реакторе ПИК (ЦОД ПИК). С вводом в эксплуатацию этого центра в 2017 г. вычислительные возможности для сотрудников НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ значительно возросли. Сотрудники лаборатории информационно-вычислительных систем принимают активное участие в проектах ATLAS и WLCG в Европейском центре ядерных исследований (ЦЕРН). В сферу их деятельности входят разработка и модификация программного обеспечения для систем хранения данных WLCG (GridFTP, DPM, SRM) с целью увеличения производительности передачи данных при условии сохранения совместимости с существующими клиентами и конфигурациями на ГРИД-сайтах, а также ввод в эксплуатацию и поддержка программных средств реконструкции событий для субдетекторов проекта ATLAS. Полученный опыт работы с самыми современными технологиями распределенных вычислений и обработки данных помогут в организации работы ЦОД ПИК.

Открытие подледникового озера Восток в Антарктиде стало последним географическим открытием XX в. Его исследование позволит получить уникальные данные о происхождении и эволюции форм жизни в экосистемах, которые характеризуются крайне высокой степенью олиготрофности (т. е. низкой концентрацией питательных веществ), а также экстремальными условиями. К ним относятся: ожидаемое чрезвычайно высокое содержание кислорода в воде (превышающее в 50–100 раз обычную для земных озер концентрацию), высокое давление – 350 бар, невозможность использования экосистемой солнечной энергии из-за крайне толстого слоя льда, покрывающего озеро. НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ является головной организацией по исследованию вод-

ной толщи озера. В этой программе активно участвуют сотрудники ОПР, ОМРБ и ОНИ. Перед Институтом стоит сложнейшая техническая задача по разработке такой технологии проникновения в толщу водной среды озера, при которой будет исключено его загрязнение буровой жидкостью, заполняющей скважину. Эта задача требует разработки уникальных устройств, регистрирующих гидрофизические, гидрохимические и микробиологические параметры в режиме онлайн, а также допускающих стерильный отбор проб воды и грунта в объемах, необходимых для проведения последующих лабораторных анализов.

В НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ изготовлено оборудование, предназначенное для исследования водной толщи озера Восток. До отправки этого оборудования в Антарктиду необходимо провести его глубоководные испытания. Были проведены испытания созданного оборудования на глубоководных местах Ладожского озера, а в 2014, 2015 и 2018 гг. – на станции «Восток». Испытания прошли успешно.

При непосредственном участии сотрудников лаборатории электронного и программного обеспечения ОПР введены в эксплуатацию пять исследовательских экспериментальных станций в зале горизонтальных экспериментальных каналов реактора ПИК. На всех пяти станциях используется электронное обеспечение, созданное сотрудниками ОПР, а на трех станциях – программное обеспечение, разработанное ими.

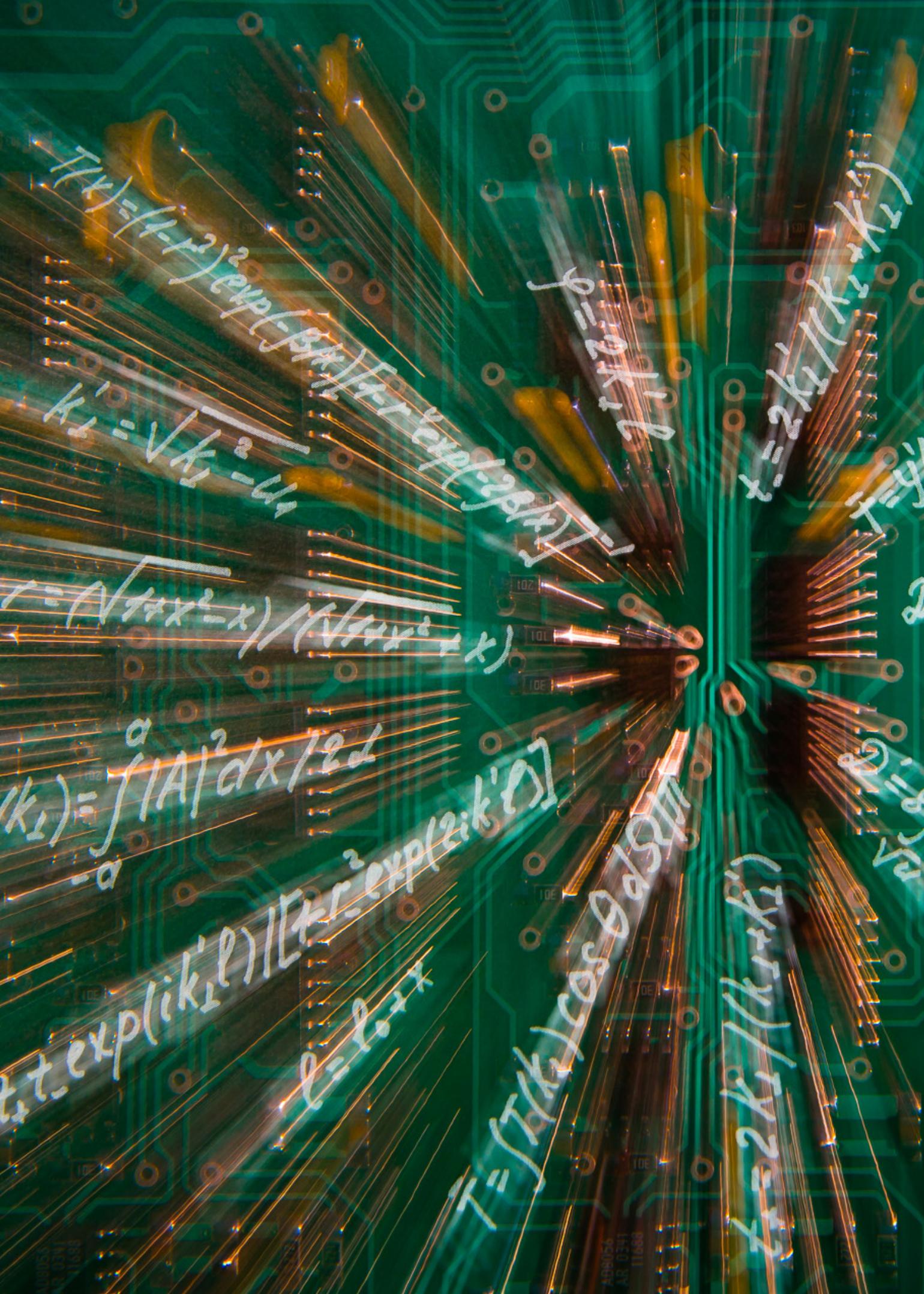
Основным направлением работы лаборатории квантовой химии ОПР является развитие методов расчета электронной структуры молекул, содержащих тяжелые элементы. Эта деятельность была стимулирована еще в начале 80-х гг. прошлого века необходимостью расчета P - и CP -нечетных эффектов в тяжелых двухатомных молекулах. Основой расчетов стал развиваемый лабораторией двухшаговый метод, который позволил разделить структуру расчета таких молекул на два последовательных расчета: в валентной области и в области остова атома. К настоящему времени точность, достигнутая в этих расчетах, стала рекордной в мире. Сотрудники лаборатории не ограничились расчетами P -

и *CP*-нечетных эффектов и перешли к более сложным структурам. Разработка методов, алгоритмов и программных пакетов для прецизионного моделирования электронной структуры и свойств соединений тяжелых элементов позволила начать систематическое исследование свойств соединений лантаноидов, актиноидов и тяжелых переходных металлов, перейти к расчетам твердофазных систем и провести исследование химических свойств сверхтяжелых элементов из «острова стабильности».

Основным направлением исследований лаборатории химии и спектроскопии углеродных материалов (ЛХСУМ) ОПР является разработка новых производных фуллеренов и эндометаллофуллеренов, исследование их физико-химических свойств, радиационной стойкости и самоорганизации в водных растворах. Одной из наиболее важных научно-практических задач ЛХСУМ является разработка новых производных эндометаллофуллеренов, перспектив-

ных в качестве систем адресной доставки лекарственных препаратов. Обычно используемые радиофармацевтические препараты содержат радиоизотоп в комплексе с хелатирующим агентом, достаточно прочно связывающим радиоактивный атом и препятствующим его связыванию с компонентами крови и другими тканями организма. Однако стабильность такого хелатного комплекса не абсолютна, и поэтому небольшие количества токсичного радиоактивного металла могут высвобождаться в организм. С этой целью в лаборатории проводятся исследования радиационной стойкости эндометаллофуллеренов и их производных при облучении.

Сотрудниками ОПР в 2020 г. опубликовано 45 работ, которые индексируются в Web of Science и Scopus, сделано более 40 докладов на российских и международных научных конференциях и семинарах, получено 13 патентов.



$$\psi(x) = \frac{1}{\sqrt{2k_1}} \exp(-\beta x) / \sqrt{1 + \beta^2} \exp(-\beta x)$$
$$k_1' = \sqrt{k_1^2 - \beta^2}$$

$$\psi = \frac{1}{\sqrt{2k_1}} \exp(-\beta x)$$
$$x = 2k_1 / (k_1 + k_2)$$

$$r = \frac{\sqrt{1+x^2} - x}{\sqrt{1+x^2} + x}$$

$$|k_1\rangle = \int_{-a}^a |A|^2 dx / 2a$$

$$t \exp(ik_1' l) / [t r^2 \exp(2ik_1' l)]$$
$$l = l_0 + x$$

$$T = \int T(k) \cos \theta \delta l \delta l$$

$$t = 2k_1 / (k_1 + k_2)$$

Теоретическая и математическая физика

- 30 Новые странные экзотические частицы
- 32 Расчет свойств узких оптических переходов многозарядных ионов для оптических стандартов частоты
- 33 Струнный барион $N = 2$ суперсимметричной квантовой хромодинамики из $2D-4D$ -соответствия
- 34 Конкуренция фаз во фрустрированных анизотропных антиферромагнетиках в сильном магнитном поле
- 35 Релятивистский метод связанных кластеров в пространстве Фока: новый уровень точности прогнозирования свойств соединений тяжелых элементов
- 36 Универсальный скейлинг энергопотребления биологических систем различной массы

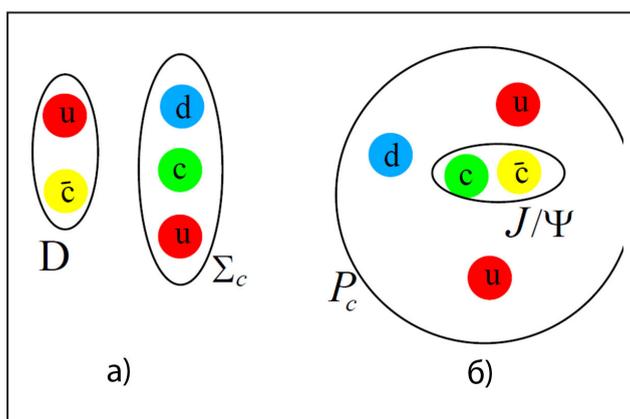
Новые странные экзотические частицы

М. И. Эйдес, В. Ю. Петров, М. В. Поляков

Отделение теоретической физики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Недавно коллаборация LHCb открыла два новых экзотических состояния: тетракварк $ccsu$ и пентакварк анти-с $csud$. Эти частицы немедленно были интерпретированы как странные партнеры уже известных экзотических адронов – нестранных пентакварков и тетракварков.

Целью данной работы было показать, что открытие странного пентакварка свидетельствует в пользу сценария хадрочармония. Напомним, что было предложено два сценария: дейтонного типа (рис. а) и хадрочармониум (рис. б).



Два сценария для пентакварков (а, б)

В рамках первого сценария экзотические частицы возникают в виде флейворных мультиплетов – октетов или декуплетов. Масса странного кварка понимается как возмущение, а расщепление внутри мультиплетов дается формулой Гелл-Манна – Окубо. В конкретной модели коэффициенты в этой формуле могут быть вычислены и массы всех частиц предсказаны однозначно. Это было сделано еще в первых наших работах, и предсказания затем исправлялись в соответствии с появляющимися данными с LHCb.

Однако масса нового странного пентакварка не отвечает предсказаниям этих работ: вновь открытые частицы слишком тяжелые. Действительно, странные адроны должны иметь массу на 150–200 МэВ больше, чем нестранные, а потому странные партнеры известных пентакварков должны иметь массу 4 600–4 700 МэВ и пока неизвестны.

Можно тем не менее попытаться интерпретировать новые пентакварки в этом сценарии. Тогда они часть октета с соответствующими нестранными партнерами, но можно показать, что в указанный интервал масс состояния с четностью «минус» попасть не могут. Можно, однако, найти требуемые состояния в секторе с четностью «плюс» среди большого количества перекрывающихся адронов в этом секторе (табл.). Таким образом, этот сценарий однозначно предсказывает, что четность странного пентакварка – «плюс».

В рамках дейтонного сценария вообще сомнительно, что экзотика возникает в виде флейворных мультиплетов. Состояния дейтонного типа возникают в виде тонкого равновесия притяжения и отталкивания. Это равновесие немедленно разрушается массой странного кварка, которая велика в масштабе дейтонной ямы. Эта яма, скорее всего, вообще не возникает в секторе странных кварков (это, кстати, причина, почему не существует странного дейтона). Странные пентакварки могут быть какими-то возбужденными состояниями в секторе с четностью «минус», но механизма их образования в этом сценарии не видно. В любом случае разные сценарии предсказывают разные четности открытых пентакварков.

Ситуация, однако, гораздо хуже для тетракварков. Здесь невозможно применить ни первый,

Таблица. Состояния хадрочармония с четностью «плюс»

Частица	Энергия связи, МэВ	Масса, МэВ	Спин-четность
$\eta_c(2S)N$	176,1	4 401	$1/2^-$
$\chi_{c1}(1P)N$	44,2	4 406	$3/2^+, 1/2^+$
$h_c(1P)N$	43,9	4 421	$1/2^+, 3/2^+$
$\chi_{c2}(1P)N$	43,7	4 452	$5/2^+, 3/2^+$

ни второй сценарий. Тяжелые кварки не могут быть на больших расстояниях. Они притягивают друг друга и формируют дикварк малого размера. Этот дикварк – цветной и может находиться в шести- или антитрехцветном состоянии. Он находится в центре большого цветного «мезона». Однако взаимодействие этих двухцветных частиц неизвестно и не может быть вычислено ни одним из известных методов. Соответственно, нельзя предсказать спектр этих тетракварков

и их нельзя интерпретировать как партнеров каких-либо известных частиц.

Подведем итоги: обычное представление о том, что открытые состояния являются странными партнерами известной экзотики, не обосновано. Это может быть правдой в сценарии хадрочармониума. Однако странные тетракварки не являются партнерами никакой известной экзотики. В настоящее время неизвестны методы, которые могли бы описать эти частицы.

Расчет свойств узких оптических переходов многозарядных ионов для оптических стандартов частоты

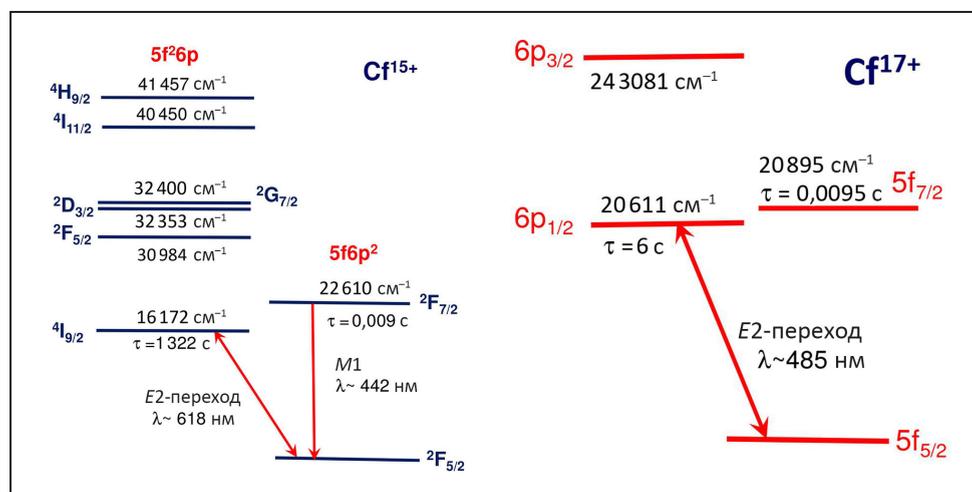
М. Г. Козлов, И. И. Тупицын, А. И. Бондарев, С. Г. Порсев
 Отделение нейтронных исследований, Отделение теоретической физики
 НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Использование оптических часов на атомах и однократных ионах позволило достичь относительной точности измерения частоты на уровне 10^{-18} . Такие часы не только дают возможность разрабатывать новые технологии, но и являются чрезвычайно чувствительным инструментом для поиска новой физики за пределами Стандартной модели. В последнее время теоретически предсказано существование узких оптических переходов у многих многозарядных ионов (МЗИ). Параллельно с этим экспериментально доказана возможность охлаждать МЗИ и удерживать их в ионных ловушках. Это открывает возможность использовать МЗИ для создания оптических часов нового поколения. Малые размеры и низкая чувствительность МЗИ к внешним возмущениям позволяют надеяться повысить точность таких оптических часов и их чувствительность к новой физике еще на 1–2 порядка.

Спектры МЗИ слабо изучены, а поиск узких оптических переходов представляет большие экспериментальные трудности, поэтому важно максимально точно предсказать положение таких

линий теоретически. Мы разработали методы расчетов сложных многоэлектронных МЗИ и провели прецизионные расчеты ионов Ir^{17+} , Cf^{15+} и Cf^{17+} . Для иона Ir^{17+} мы рассчитали свойства «часового» перехода и большого числа $M1$ - и $E1$ -переходов. Для $M1$ -переходов получено хорошее согласие с имеющимися экспериментальными данными. Мы объяснили, почему до сих пор не удавалось обнаружить $E1$ -переходы, и предсказали частоты нескольких сильных линий, которые можно наблюдать.

Для ионов Cf^{15+} и Cf^{17+} мы рассчитали длины волн узких переходов, пригодных для создания оптических часов (рис.), и оценили для них все основные систематические эффекты. Эти оценки показали, что оба иона являются перспективными кандидатами для создания оптических часов. Ион Cf^{17+} выглядит немного предпочтительнее за счет более простой структуры уровней и наличия «магической» частоты удерживающего поля в ловушке, позволяющей подавить систематические эффекты, вызываемые малыми смещениями иона.



Рассчитанные спектры ионов Cf^{15+} и Cf^{17+} . Стрелками показаны возможные часовые переходы. Для метастабильных уровней указаны времена жизни

1. Porsev S.G., ..., Bondarev A.I., Kozlov M.G., Tupitsyn I.I. et al. // Phys. Rev. A. 2020. V. 102. P. 012802-1-9.
2. Cheung C., ..., Porsev S.G., Kozlov M.G., Tupitsyn I.I., Bondarev A.I. // Phys. Rev. Lett. 2020. V. 124. P. 163001-1-6.

Струнный барион $N = 2$ суперсимметричной квантовой хромодинамики из $2D-4D$ -соответствия

Е. А. Иевлев, А. В. Юнг

Отделение теоретической физики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Проблема конфайнмента (невыветания цвета) в квантовой хромодинамике (КХД) – одна из основных нерешенных фундаментальных проблем теоретической физики высоких энергий. К сожалению, КХД находится в режиме сильной связи, поэтому аналитические методы исследования динамики этой теории наткнулись в течение многих лет на непреодолимые трудности. Одним из перспективных подходов, который все же мог бы помочь в изучении физики в сильной связи, является рассмотрение суперсимметричных аналогов КХД.

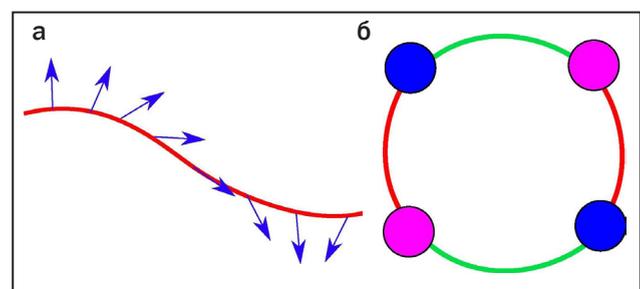
Неабелевы трубки потока (вихри) были обнаружены в $N = 2$ суперсимметричной КХД в 2003 г. в работе А. Юнга с К. Кониши и его группы, а также независимо Ханани и Тонгом. Отличительная черта неабелевых струн – наличие ориентационных нулевых мод струны, вращающих ее поток по группе $SU(N)$ (рис. а). Теория неабелевых струн развивалась в течение ряда лет в работах А. Юнга и М. Шифмана. Неабелевы вихри оказались альтернативой абелевым абрикосовским струнам при описании неабелевого механизма конфайнмента монополей.

В 2015 г. было показано, что в четырехмерной $N = 2$ суперсимметричной КХД с калибровочной группой $U(N = 2)$, четырем ароматами кварков и D -членом Файе – Илиополуса неабелев вихрь ведет себя как критическая суперструна. Это происходит из-за того, что четыре трансляционные моды струны вместе с шестью ориентационными модами образуют десятимерное пространство, необходимое для того, чтобы суперструна стала критической. Далее была детально изучена теория суперструны, возникающая на неабелевом вихре, в частности описан спектр низколежащих струнных состояний. Состояния замкнутой

суперструны, возникающие в четырех измерениях, идентифицируются с адронами четырехмерной $N = 2$ суперсимметричной КХД.

При исследовании спектра методами теории струн было найдено безмассовое состояние, которое интерпретируется как барион $N = 2$ КХД (рис. б). В данной работе мы подтверждаем его наличие чисто теоретико-полевыми методами. Для этого мы изучаем двумерную конформную теорию на поверхности неабелевой струны – взвешенную $N = (2,2)$ суперсимметричную $WCP(2,2)$ -модель. Ее таргет-пространство – шестимерное некомпактное многообразие Калаби – Яу, называемое конифолдом. Используя $2D-4D$ -соответствие, мы показываем, что деформация комплексной структуры конифолда отвечает возникновению хиггсовской ветви в четырехмерной $N = 2$ КХД. Модулярным параметром на этой хиггсовской ветви оказывается вакуумное ожидание безмассового BPS-бариона, ранее найденного из теории струн.

Эти результаты являются важным вкладом в решение одной из фундаментальных задач теоретической физики высоких энергий – нахождения спектра адронов из первых принципов.



Ориентационные моды на неабелевой струне (а); струнный барион, представляющий собой замкнутую струну с нанизанными на нее четырьмя монополями (б)

Конкуренция фаз во фрустрированных анизотропных антиферромагнетиках в сильном магнитном поле

О. И. Утесов, А. В. Сыромятников

Отделение теоретической физики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

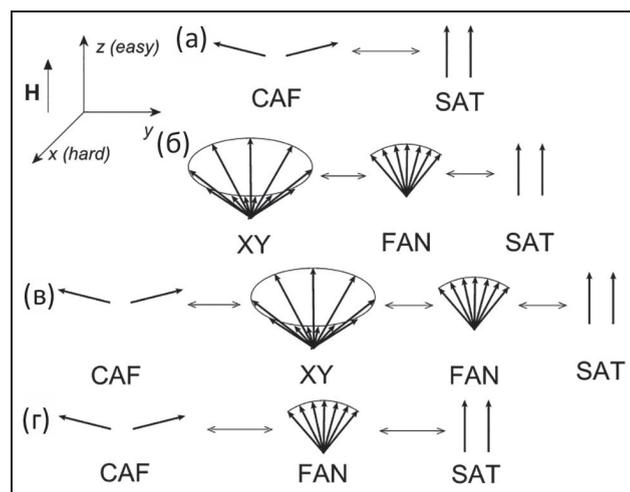
Мультиферроики – вещества, сочетающие в одной фазе несколько различных упорядочений, – одна из самых популярных тем исследований в современной физике конденсированных сред. С прикладной точки зрения такие материалы могут быть использованы при создании перспективных электронных приборов. Специально выделяют мультиферроики спиновой природы, в которых электрическая поляризация появляется в определенных магнитных фазах. В таких веществах наблюдался гигантский магнитоэлектрический эффект.

Особенно важными в данном контексте оказались неколлинеарные магнитные фазы с нарушенной инверсионной симметрией, в которых разрешено возникновение электрической поляризации. Спиральное магнитное упорядочение может быть обусловлено фрустрацией обменных взаимодействий. Это делает исследование фазовых переходов, включающих геликоидальные фазы, важной задачей.

В данной работе изучались свойства фрустрированных анизотропных антиферромагнетиков при низких температурах в сильном магнитном поле вблизи поля насыщения. Это исследование расширяет результаты нашей предыдущей работы, где были исследованы последовательности фазовых переходов в той же модели, но в слабых полях.

На уровне классической энергии было продемонстрировано, что в исследуемой модели стандартный для антиферромагнетиков спин-флип-переход (рис. а) не реализуется, даже если перпендикулярная полю анизотропия достаточно велика, чтобы сделать скошенную антиферромагнитную фазу (CAF) более выгодной, чем коническая спиральная (XY). Показано, что в рас-

сматриваемой модели с перпендикулярной полю анизотропией XY-фаза становится неустойчивой вблизи поля насыщения и переходит в веерную (FAN) фазу посредством изинговского фазового перехода. В зависимости от параметров оказываются возможными три последовательности фазовых переходов (рис. б–г). Во всех них перед переходом в насыщенную фазу (SAT) система проходит через веерную фазу. Были получены аналитические результаты для полей соответствующих переходов, они показали отличное соответствие с результатами численного моделирования методом Монте-Карло. Также было продемонстрировано, что развитая теория позволяет описать все пять фазовых переходов по магнитному полю, приложенному вдоль легкой оси, и два перехода по полю вдоль средней оси в мультиферроике $MnWO_4$.



Сценарии фазовых переходов во фрустрированных анизотропных антиферромагнетиках с двуслойной анизотропией (ось z – легкое направление намагничивания, ось x – трудное) в сильных полях (близких к полю насыщения) вдоль оси z

Релятивистский метод связанных кластеров в пространстве Фока: новый уровень точности прогнозирования свойств соединений тяжелых элементов

А. В. Зайцевский, А. В. Олейниченко, Н. С. Мосягин, А. В. Титов

Отделение перспективных разработок НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Современный уровень точности и надежности прогнозирования энергетических, радиационных, электрических и других свойств атомов, молекул и кластеров из первых принципов не вполне соответствует быстро растущим возможностям современных экспериментальных технологий. В то же время именно этим уровнем определяются перспективы развития многих областей науки – от получения вещества при сверхнизких температурах, прецизионной спектроскопии и поиска новой физики в низкоэнергетических («настошных») экспериментах до спектроскопической регистрации сверхтяжелых элементов и создания новых материалов.

В лаборатории квантовой химии (ЛКХ) НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ ведутся работы по созданию средств моделирования систем, включающих атомы тяжелых элементов, которые позволили бы поднять точность прогнозирования свойств на качественно новый уровень. В основу этих средств положена хорошо известная физически прозрачная и, в принципе, (до сих пор только «в принципе») допускающая последовательное улучшение результатов релятивистская теория связанных кластеров в пространстве Фока (ТСКПФ).

Разработки ЛКХ позволили:

– многократно расширить круг молекулярных систем, для которых возможно моделирование, за счет устранения численных неустойчивостей (техника динамического сдвига энергетических знаменателей и экстраполяции к выключенному сдвигу) и развития принципов реализации ТСКПФ для электронных оболочек молекул

и кластеров с несколькими неспаренными электронами; в частности, появилась реальная возможность исследования электронных возбуждений в молекулах соединений ранних актинидов;

– прогнозировать «неэнергетические» характеристики электронных переходов (вероятности радиационных переходов, недиагональные матричные элементы сверхтонких взаимодействий), ранее недоступные или требующие неприемлемых затрат для моделирования в рамках ТСКПФ;

– поднять точность расчетных характеристик на беспрецедентно высокий уровень за счет расширения представления кластерного оператора (учета более сложных независимых процессов рассеяния электронов на электронах).

Из уже выполненных приложений новых разработок можно отметить:

– определение изменений констант магнитного дипольного сверхтонкого взаимодействия при образовании химической связи;

– расчет вероятностей электронных переходов в оптических циклах в молекулах соединений тяжелых элементов, перспективных для прямого лазерного охлаждения;

– прецизионные исследования спин-орбитальных взаимодействий и интенсивностей запрещенных по спину переходов в легких молекулах;

– достижение точности воспроизведения энергий электронных переходов в атомах тяжелых элементов (Tl, Pb), создающей реальную возможность моделирования спектроскопических экспериментов с их сверхтяжелыми гомологами.

1. Oleynichenko A.V., Zaitsevskii A.V., Skripnikov L.V. et al. // Symmetry. 2020. V. 12. No. 7. P. 1101.

2. Zaitsevskii A.V., Oleynichenko A.V. et al. // Symmetry. 2020. V. 12. No. 11. P. 1845.

Универсальный скейлинг энергопотребления биологических систем различной массы

А. М. Макарьева, А. В. Нефедов

Отделение теоретической физики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Проблема взаимосвязи уровня энергопотребления и упорядоченности сложных систем приобрела в последние годы большую актуальность в связи с обсуждаемыми стратегиями изменения основных источников энергии, используемых цивилизацией. В литературе можно встретить утверждения о том, что в процессе эволюции живых организмов скорость их энергопотребления на единицу массы возрастала, что это увеличение является мерой прогрессивного развития живых систем и что современная цивилизация с ее растущим энергопотреблением является особой точкой этого прогресса.

С другой стороны, высокая скорость энергопотребления характерна для неустойчивых, распадающихся объектов, взрывоподобно разрушающих свою окружающую среду. Поскольку основное свойство жизни – устойчивость, эволюционный прогресс может проявляться на уровне экосистем и выражаться не в росте энергопотребления, а в увеличении эффективности управления окружающей средой, которую жизнь поддерживает в оптимальном для себя состоянии.

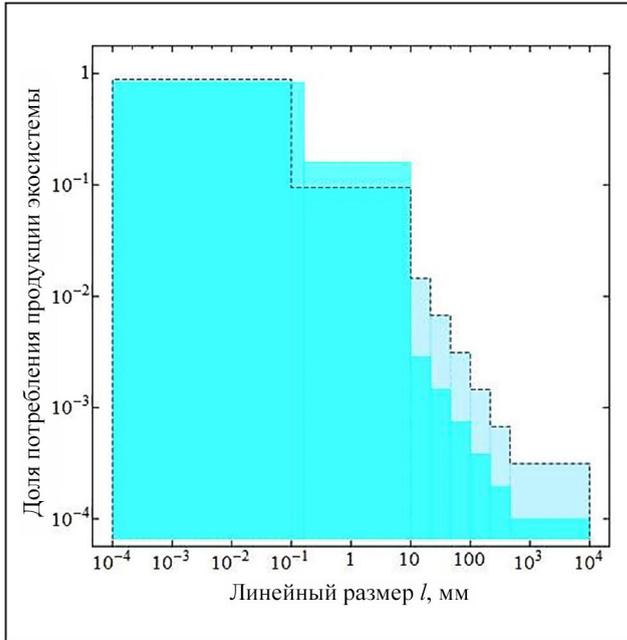
В основополагающих работах В. Г. Горшкова в 1980 и 1981 гг. были выявлены основные универсальные принципы энергопотребления биологических систем. Живые организмы, появившиеся на разных этапах эволюционного процесса, от бактерий до млекопитающих, расходуют на единицу массы примерно одинаковую мощность, порядка нескольких ватт на килограмм. Впоследствии это утверждение было продемонстрировано посредством анализа нескольких тысяч биологических видов. В устойчивых экосистемах, напротив, потребление энергии на единицу площади организмами уменьша-

ется с ростом их размера. Наибольшую долю продукции экосистемы потребляют мельчайшие организмы (бактерии и грибы).

Развитие этих фундаментальных идей привело к формулировке нового представления о роли увеличения размера тела организмов в процессе эволюции жизни. Крупные организмы, сохраняя универсальную скорость энергопотребления на единицу объема, развивают при этом увеличивающиеся пропорционально линейному размеру скорости потребления энергии на единицу площади, которые могут на порядок и более превосходить скорость производства энергии в процессе поддерживаемого солнечным излучением фотосинтеза. Таким образом, крупные животные действуют как локальные разрушители биомассы экосистемы, а их эволюционное появление может быть интерпретировано как признак распада (старения) алгоритма жизни как такового.

Оказывается, что распределение потребления потоков энергии в зависимости от размера тел гетеротрофов, характерное для устойчивых экосистем суши, сохраняется и в экосистемах океана. Это свидетельствует об универсальном характере этого распределения, поскольку биомасса экосистем суши (в основном древесина) превышает биомассу океана, где фотосинтез осуществляется преимущественно одноклеточным фитопланктоном, по крайней мере на два порядка величины (рис.). При потреблении большей части продукции мельчайшими организмами устойчивость организации экосистемы достигается за счет действия закона больших чисел.

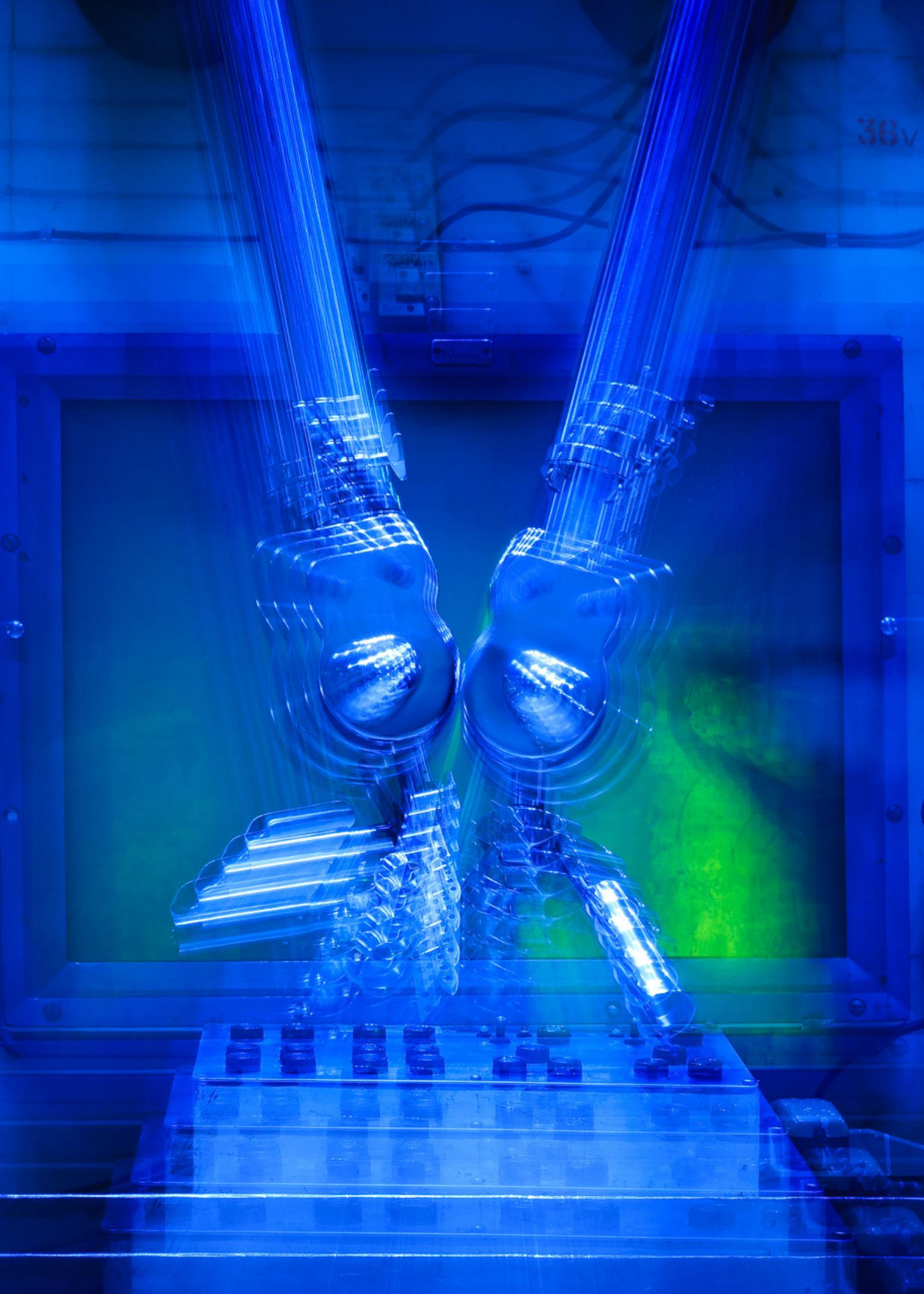
Эти результаты являются важным вкладом в решение одной из фундаментальных междисциплинарных задач современной науки – опре-



Распределение потребления продукции экосистем по организмам разных размеров в океане (сплошная гистограмма) и в естественных экосистемах суши (пунктирная гистограмма). Полная площадь под гистограммой нормирована на единицу

деление принципов поддержания устойчивости живых систем в условиях нарастающих в глобальном масштабе экологических и климатических катаклизмов. Относительные флуктуации, вносимые огромным числом мельчайших организмов, перерабатывающих большую часть потока энергии, малы. Крупным организмам, вынужденным в силу своих размеров разрушать живую биомассу, отводится малый поток энергии. Эта малость ограничивает их потенциальное разрушительное воздействие.

Цивилизация потребляет около 10 % первичной продуктивности биосферы, т. е. в 10 раз больше, чем отведено крупным животным. Биосфера и окружающая среда стремительно разрушаются. Для продолжения своего существования нашей цивилизации необходимо вернуться в диапазон устойчивости, сократив антропогенное воздействие на естественные экосистемы (в первую очередь малонарушенные леса, выполняющие климаторегулирующую функцию) по крайней мере на порядок величины.



36V

Исследования с использованием нейтронов и фотонов

- 40 Дифракционное усиление на семь порядков эффекта Штерна – Герлаха для нейтрона в кристалле
- 42 Новый эксперимент по поиску солнечных аксионов с $Tm_3Al_5O_{12}$ криогенным болометром
- 43 Исследование угловых распределений осколков деления ^{240}Pu нейтронами с энергией 1–200 МэВ
- 44 Исследование структуры барьера деления и свойств переходных состояний в нейтронных резонансах
- 45 Особенности магнитного упорядочения в новом хиральном магнетике $MnSnTeO_6$
- 47 Структура и кинетика анионного обмена в слоистых двойных гидроксидах
- 49 Взаимодействие Дзялошинского – Мория в мультиферроиках $NdMn_2O_5$
- 50 Возникновение фазы скирмионной решетки в соединении $MnGe$ в результате химического замещения
- 51 Скачок фрактальных свойств ДНК в ядрах куриных эритроцитов при механической деформации
- 53 1D-цериевые водородофосфатные аэрогели: неуглеродистые ультралегкие монолитные аэрогели

Дифракционное усиление на семь порядков эффекта Штерна – Герлаха для нейтрона в кристалле

В. В. Воронин, С. Ю. Семенихин, Д. Д. Шапиро, Ю. П. Брагинец, В. В. Федоров –
 Отделение нейтронных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ,
 В. В. Несвижевский, M. Jentschel – Institut Laue–Langevin,
 А. И. Иоффе – Jülich Centre for Neutron Science,
 Я. А. Бердников – Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

В рамках подготовки эксперимента по проверке принципа эквивалентности для нейтронов кристалл-дифракционным методом проведено исследование дифракционного усиления малых воздействий на нейтрон при углах дифракции, близких к прямому. Измерено пространственное расщепление нейтронного пучка на два с противоположными направлениями спина в слабом градиенте магнитного поля (~ 3 Гс/см) при дифракции по Лауэ в кристалле (аналог эксперимента Штерна – Герлаха). В эксперименте была применена двухкристальная схема (общий размер кристалла $130 \times 130 \times 218$ мм), где внешняя сила $\pm F_w$, действующая на дифрагирующий нейтрон в кристалле (рис. 1), немного изменяет направление его движения (и/или длину волны), т. е. параметр отклонения от условия Брэгга, и, соответственно, изменяет амплитуды прямой и отраженной кристаллографическими плоскостями волн в кристалле.

На рисунке 1 сплошными и пунктирными линиями показаны траектории Като нейтронов с противоположными проекциями спина в «слабопоглощаемых» кристаллом состояниях, отвечающих одной из двух ветвей дисперсионной поверхности нейтрона в кристалле. В условиях эксперимента (большая толщина кристалла и большие углы Брэгга) нейтроны в состояниях, принадлежащих другой ветви, практически полностью поглощаются кристаллом кремния (Si) за счет эффекта Бормана, и соответствующие траектории Като исчезают.

Результатом является существенное изменение направления нейтронного тока в кристалле и искривление нейтронной траектории Като, что приводит к пространственному сдвигу ней-

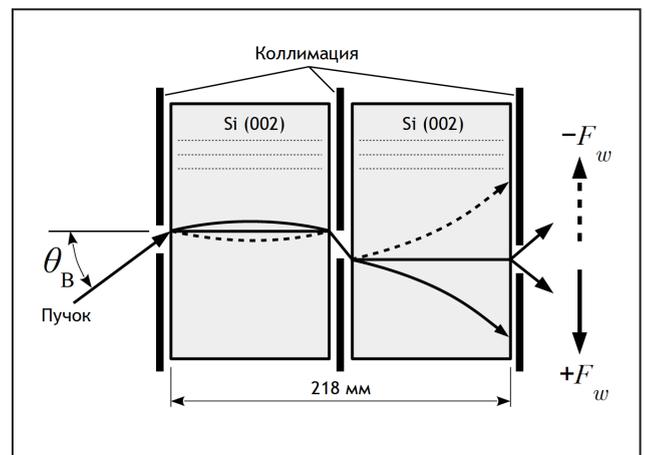


Рис. 1. Двухкристальная схема эксперимента с прямой коллимацией пучка нейтронов (вид сверху), где $\pm F_w$ – это внешняя сила, действующая на нейтрон в кристалле

тронного пучка на выходной грани второго кристалла.

Эффект дифракционного усиления отклонения направления нейтрона внутри кристалла хорошо известен и может достигать $\sim 10^5$ – 10^6 . Однако в эксперименте мы использовали дополнительный коэффициент усиления, связанный с большими углами дифракции. При увеличении угла время пребывания нейтрона в кристалле, а значит и время воздействия на него силы, растет пропорционально величине $\tan \theta_B$. Таким образом, появляется дополнительная возможность усиления и высокая чувствительность к внешним силам, действующим на нейтрон в кристалле. В нашем случае для плоскости кристалла кремния (220) значение дифракционного коэффициента усиления составляет $K_e^{(220)} = 2,1 \cdot 10^5 \cdot \tan^2 \theta_B$ и достигает величины $1,1 \cdot 10^7$ для максимального угла Брэгга 82° в эксперименте.

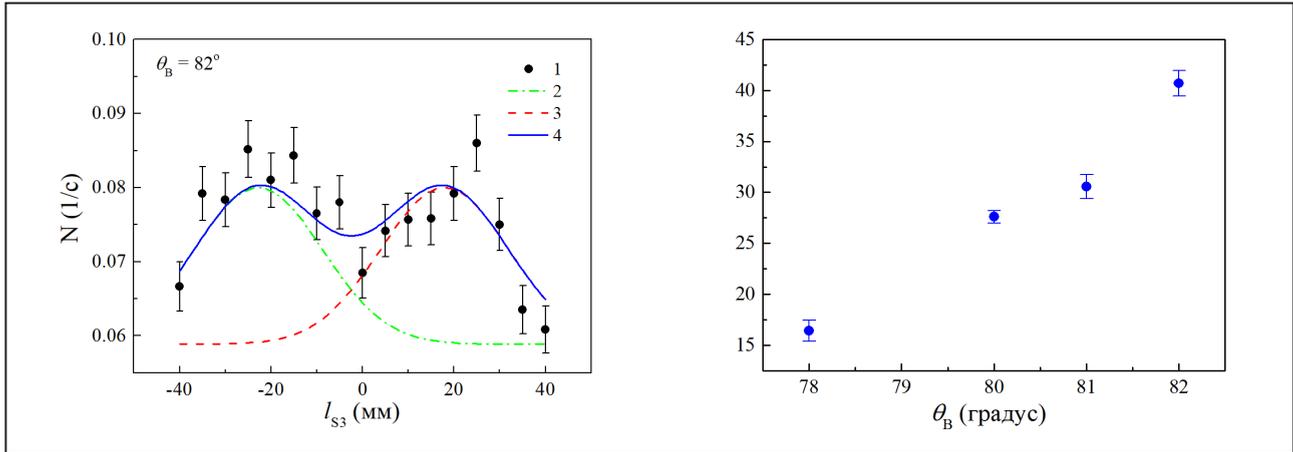


Рис. 2. Пространственное распределение интенсивности на выходной поверхности рабочего кристалла при градиенте 3 Гс/см в области пучка нейтронов и угле дифракции 82° (слева); расстояние между положениями максимумов двухкристалльных линий для двух проекций спина в зависимости от угла дифракции (справа)

Эксперимент проводился на пучке холодных нейтронов в Институте им. Лауэ – Ланжевена (Гренобль, Франция). Результаты измерений показаны на рис. 2. Поскольку пучок нейтронов не поляризован, то для разных проекций спина нейтрона рефлексы смещаются в противоположные стороны относительно центра исходного пучка. На рисунке 2, слева, черными точками показаны экспериментальные данные, кривые 2 и 3 – подгоночные кривые (Гаусс) для двух рефлексов с разной проекцией спина, а 4 – их сумма. На рисунке 2, справа, показана зависимость расстояния между положениями максимумов двухкристалльных линий (кривые 2 и 3 на рис. 2 слева) для двух проекций спина от угла дифракции.

При максимальном угле 82° расщепление достигает $4,1 \pm 0,1$ см. Для сравнения: пространственное расщепление для нейтронов с длиной волны 3,8 Å (что соответствует углу 82°), свободно летящих в таком же ортогональном градиенте на пролетной базе 21,8 см (полная длина рабочего кристалла), легко вычисляется и составляет $3,9 \cdot 10^{-7}$ см. Среднее значение градиента по пучку в эксперименте составило $\sim 3,12 \pm 0,09$ Гс/см, что согласуется с измерениями магнитного поля магнитометром (рис. 3).

Таким образом, измеренное значение коэффициента усиления составило $K_{\text{exp}} \sim 2 \cdot 10^5 \cdot \tan^2 \theta_B$, что хорошо согласуется с теорией.

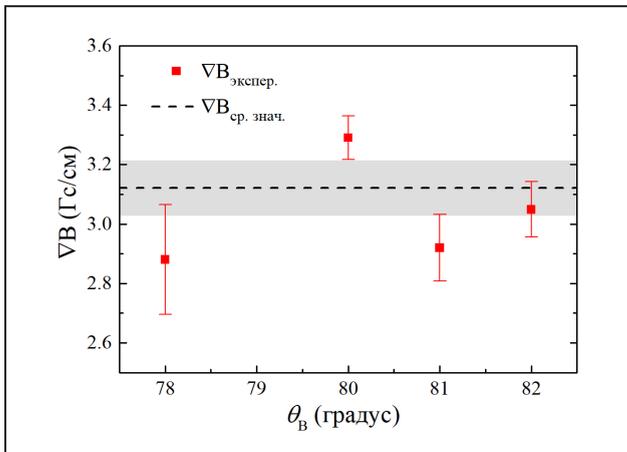


Рис. 3. Градиент величины магнитного поля в зависимости от угла дифракции (красные точки) и его среднее значение (пунктирная линия)

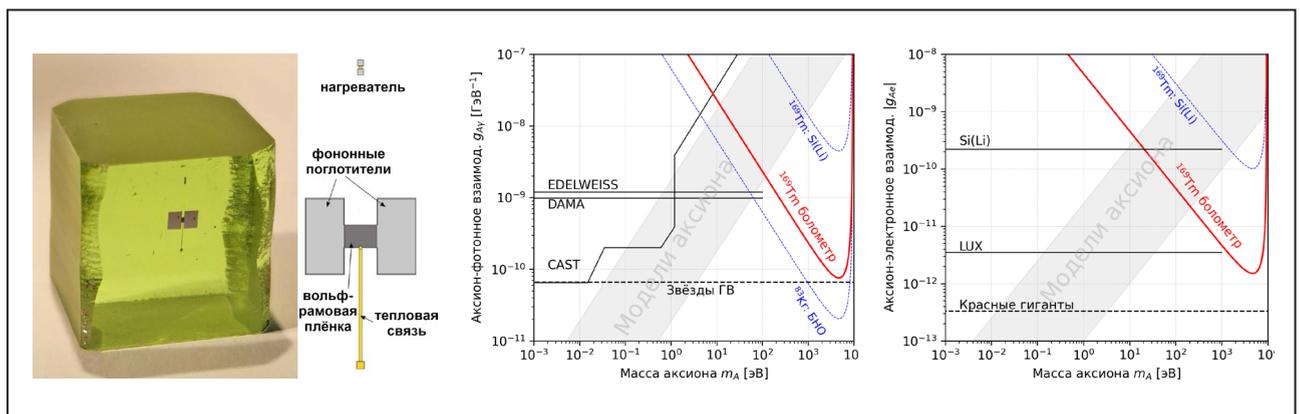
Новый эксперимент по поиску солнечных аксионов с $Tm_3Al_5O_{12}$ криогенным болометром

С. В. Бахланов, А. В. Дербин, И. С. Драчнев, А. М. Кузмичев, И. С. Ломская,
В. Н. Муратова, Д. А. Семенов, М. В. Трушин, Е. В. Унжаков
Отделение нейтронных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Интенсивные экспериментальные поиски аксионов и ALPs поддерживаются в настоящее время двумя основными обстоятельствами: во-первых, аксионы решают *CP*-проблему сильных взаимодействий и, во-вторых, являются хорошо мотивированными кандидатами на роль частиц темной материи. Более того, существование аксионов и ALPs могло бы объяснить слишком быстрое охлаждение ряда классов звезд и аномальную прозрачность Вселенной для γ -квантов с энергией порядка 1 ТэВ.

Сотрудники отдела полупроводниковых ядерных детекторов Отделения нейтронных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ предложили и совместно с отечественными и зарубежными институтами провели поиск

резонансного поглощения солнечных аксионов ядрами ^{169}Tm . Новый подход заключается в использовании кристалла $Tm_3Al_5O_{12}$ как болометрического криогенного детектора для поиска резонансного возбуждения первого ядерного уровня изотопа ^{169}Tm (8,4 кэВ) солнечными аксионами: $A + ^{169}Tm \rightarrow ^{169}Tm^* \rightarrow ^{169}Tm + \gamma$ (8,41 кэВ). Измерения, проведенные с восьмиграммовым кристаллом в течение 6,6 сут, позволили установить новые ограничения на константы связи аксиона с фотонами $g_{A\gamma}$ и электронами g_{Ae} : $|g_{A\gamma}(g_{0AN} + g_{3AN})| \leq 1,44 \cdot 10^{-14} \text{ ГэВ}^{-1}$ и $|g_{Ae}(g_{0AN} + g_{3AN})| \leq 2,81 \cdot 10^{-16}$. Полученные ограничения исключили новую область возможных значений констант связи аксиона с фотонами и электронами и масс аксиона (рис.).



Кристалл $Tm_3Al_5O_{12}$ с нанесенным термистором TES (слева). Ограничения на константы связи $g_{A\gamma}$ и g_{Ae} в сравнении с результатами других экспериментов и предсказаниями теоретических KSVZ- и DFSZ-моделей аксиона (в центре и справа)

Исследование угловых распределений осколков деления ^{240}Pu нейтронами с энергией 1–200 МэВ

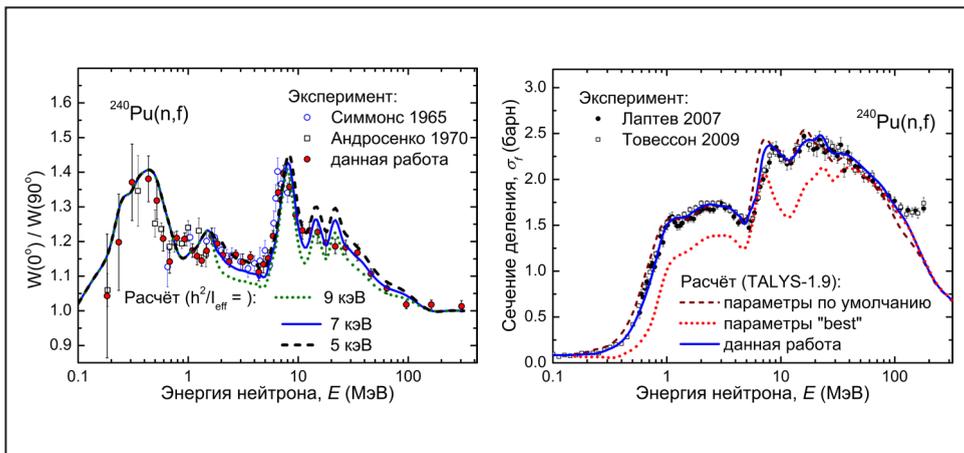
А. С. Воробьев, А. М. Гагарский, О. А. Щербаков, Л. А. Вайшнене –
 Отделение перспективных разработок, Отделение нейтронных исследований,
 Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ,
 А. Л. Барабанов – НИЦ «Курчатовский институт»

К настоящему времени накоплены довольно обширные данные по полным сечениям деления множества ядер нейтронами низких и промежуточных энергий до 200 МэВ. Однако систематические исследования дифференциальных сечений деления в таком же широком диапазоне энергий нейтронов начались лишь в последнее десятилетие. Это связано с тем, что все более точные данные по делению необходимы для конструирования современных и будущих ядерных реакторов и проектирования установок на базе ускорителей (accelerator-driven systems), в т. ч. мощных источников нейтронов. Кроме того, развитие существующих и разработка новых теоретических подходов к описанию деления невозможны без их верификации с использованием разнообразных и высокоточных экспериментальных данных по полным и дифференциальным сечениям деления, чувствительным к различным аспектам механизма деления.

Нами выполнены измерения для широкого набора ядер-мишеней: ^{233}U , ^{235}U , ^{238}U , ^{232}Th , ^{237}Np , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{209}Bi , $^{\text{nat}}\text{Pb}$, а также предложен метод теоретического описания полученных результатов. При этом для ядер-актинидов ^{233}U , ^{237}Np , ^{239}Pu и ^{240}Pu измерения в области выше 20 МэВ выполнены впервые, тогда как для ^{209}Bi и $^{\text{nat}}\text{Pb}$ подобные измерения на нейтронных источниках с непрерывным спектром ранее вообще не проводились.

Сравнение экспериментальных данных и модельных расчетов (рис.) свидетельствует о том, что предложенный подход может быть использован для получения новой информации как о реакциях при промежуточных энергиях, так и о процессе деления в т. ч. о барьерах деления, характеристиках ядер на барьерах, параметрах переходных состояний.

Работа поддержана грантом РФФИ № 18-02-00571.



Анизотропия угловых распределений осколков деления ^{240}Pu (слева) и сечения деления ^{240}Pu (справа) в сравнении с результатами расчета

1. Barabanov A.L., Vorobyev A.S., Gagarski A.M., Shcherbakov O.A., Vaishnene L.A. // Bull. Rus. Acad. Sci: Phys. 2020. V. 84. No. 4. P. 397.
2. Vorobyev A.S., Gagarski A.M., Shcherbakov O.A., Vaishnene L.A., Barabanov A.L. et al. // Bull. Rus. Acad. Sci: Phys. 2020. V. 84. No. 10. P. 1245.
3. Vorobyev A.S., Gagarski A.M., Shcherbakov O.A., Vaishnene L.A., Barabanov A.L. // JETP Lett. 2020. V. 112. Iss. 6. P. 323.

Исследование структуры барьера деления и свойств переходных состояний в нейтронных резонансах

О. А. Щербаков, А. С. Воробьев, А. М. Гагарский, Л. А. Вайшнене
 Отделение перспективных разработок, Отделение нейтронных исследований,
 Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

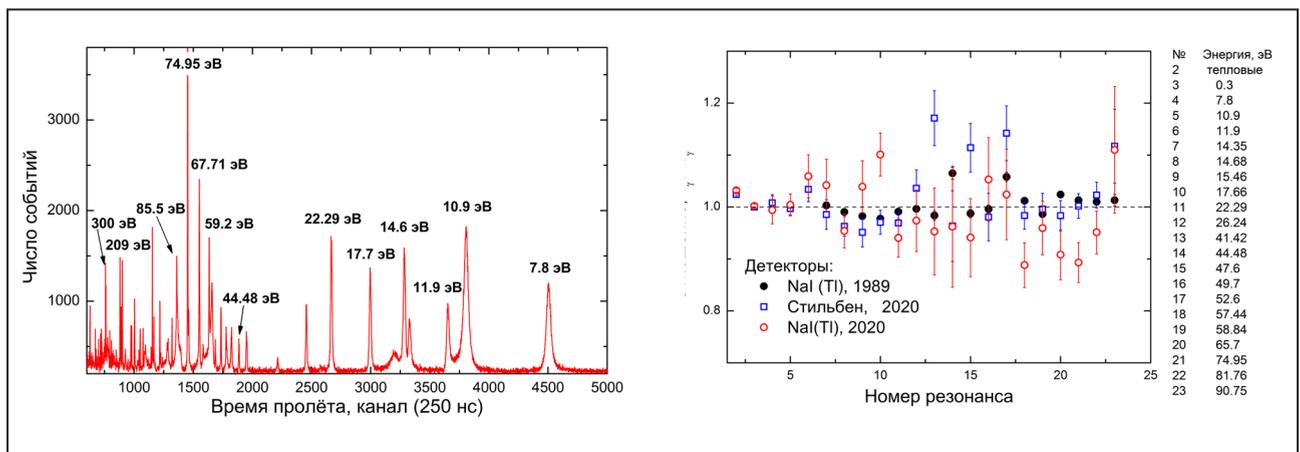
Свойства высоковозбужденных состояний тяжелых ядер, возникающих в результате поглощения резонансных нейтронов низких энергий, могут быть получены в результате анализа экспериментальных данных о $(n, \gamma f)$ -реакции. Плотность и структура уровней вблизи и ниже энергии связи нейтрона, тип и мультипольность радиационных переходов между ними, структура барьеров деления и переходных состояний – вот далеко не полный перечень представляющих интерес физических величин.

Экспериментальные исследования $(n, \gamma f)$ -реакции в данной работе проводились при помощи измерений множественности γ -квантов и нейтронов деления, а также энергетических спектров и полной энергии γ -квантов деления ^{235}U и ^{239}Pu резонансными нейтронами с энергией 1–300 эВ. Измерения были выполнены на 45-метровой пролетной базе пучка № 2 нейтронного времяпролетного спектрометра ГНЕЙС, работающего на базе синхроциклотрона СЦ-1000

НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ. На рисунке приведены результаты измерений множественности γ -квантов деления ^{239}Pu , полученные с использованием различных детекторов.

В результате анализа полученных данных удалось выполнить экспериментальную оценку ширины $(n, \gamma f)$ -реакции для 1^+ -резонансов ^{239}Pu , которая в пределах достигнутой статистической точности данных согласуется с наиболее точной оценкой, выполненной ранее другими авторами. Также были выполнены теоретические расчеты ширин $(n, \gamma f)$ -реакции и спектров предделительных γ -квантов для ядра ^{239}Pu с использованием различных вариантов модели радиационной силовой функции. Для получения однозначного надежного вывода о механизме предделительных γ -переходов требуется повысить статистическую точность данных, поэтому набор статистики будет продолжен.

Работа поддержана грантом РФФИ № 19-02-00116.



Времяпролетный спектр от осколков деления $^{239}\text{Pu}(n, f)$ в интервале энергий 0,7–300 эВ (слева) и множественность γ -квантов для хорошо разрешенных резонансов при делении $^{239}\text{Pu}(n, f)$ (справа)

Особенности магнитного упорядочения в новом хиральном магнетике MnSnTeO_6

А. И. Курбаков, М. Д. Кучугура

Отделение нейтронных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Открытие скирмионных фаз привлекло особое внимание к взаимодействию между сложным магнетизмом и кристаллическими симметриями, в частности сцеплению структурной и магнитной хиральности. Последние несколько лет активно изучается хиральный антиферромагнетик MnSb_2O_6 (пространственная группа $P321$), который вызывает большой интерес проявлением магнитоэлектрического эффекта – созданием и переключением электрической полярности путем воздействия магнитным полем. Необычные физические свойства MnSb_2O_6 стимулируют интерес к получению и исследованию его структурных аналогов. Однако оказывается, что в серии MSb_2O_6 все катионы M^{2+} , размер которых превышает Mn^{2+} ($\text{M} = \text{Cd}, \text{Ca}, \text{Sr}, \text{Pb}, \text{и Ba}$), порождают структурный тип розиаита, тогда как все стабильные соединения с катионами M^{2+} , меньшими, чем Mn^{2+} ($\text{M} = \text{Mg}, \text{Co}, \text{Ni}, \text{Cu}, \text{Zn}$), относятся к структурному типу трирутила. Структуры розиаита и трирутила центросимметричны и поэтому менее интересны, чем хиральный MnSb_2O_6 . Чтобы найти структурные аналоги MnSb_2O_6 , мы осуществили гетеровалентные замены. Наиболее близким к MnSb_2O_6 должен быть его изоэлектронный двойник – MnSnTeO_6 .

В данной работе подробно изучен новый слоистый оксид MnSnTeO_6 с редчайшим сочетанием магнитных свойств. Он обладает двумерным магнетизмом, мультиферроизмом, а также связанной кристаллической и магнитной хиральностью. Такой уникальный набор свойств делает новое соединение перспективным для электроники будущего, основанной на квантовых эффектах. Структура, статические и динамические магнитные свойства были всесторонне изучены как экспериментально (с помощью рентгеновской и нейтронной порошковой дифракции, намагниченности, удельной теплоемкости, диэлектрической

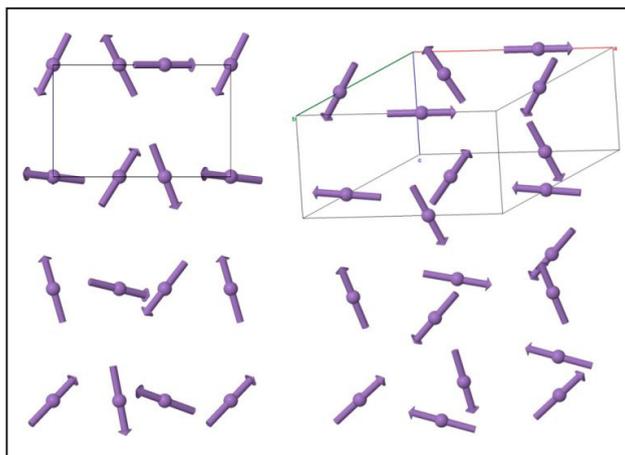


Рис. 1. Модель магнитной структуры: 2D-распределение Mn-спинов в ab -плоскости (слева); 3D-пространственное распределение спинов (справа). Также показана кристаллографическая элементарная ячейка

проницаемости и методом ЭПР), так и теоретически с помощью расчетов DFT *ab initio* в рамках спин-поляризованного обобщенного градиентного приближения.

MnSnTeO_6 изоструктурен MnSb_2O_6 (пр. гр. $P321$) и не показывает никакого структурного перехода между 3 и 300 К. Магнитные ионы марганца формируют слоистую структуру из искаженной треугольной решетки в плоскости ab . Измерения магнитной восприимчивости и удельной теплоемкости показывают две аномалии. Первая, при $T_N \sim 9,8$ К, связана с формированием дальнего магнитного порядка, который, как было показано посредством нейтронографии, имеет вектор распространения $\mathbf{k} = (0; 0; 0,183)$. Магнитное основное состояние MnSnTeO_6 имеет сложную природу, формируется в результате фрустраций и описывается набором циклоид (рис. 1).

Наиболее сильным магнитным взаимодействием является «правовинтовое» между ионами Mn соседних плоскостей. Его природа –

сверх-сверхобменное взаимодействие посредством перекрывающихся p -орбиталей двух атомов кислорода из соседних MnO_6 -октаэдров вдоль одной из диагоналей боковой грани призмы Mn_6 . Взаимодействие вдоль второй диагонали той же грани пренебрежимо мало.

Термодинамические параметры демонстрируют дополнительную аномалию на температурных зависимостях $\chi(T)$, $C_p(T)$ и $\varepsilon(T)$ при $T^* \sim 4,9$ К, которая характеризуется значительным температурным гистерезисом, но не может быть связана с каким-либо изменением структуры и соответствующим фазовым переходом первого рода. Явное увеличение диэлектрической проницаемости при T^* отражает связь диэлектрической и магнитной подсистем, ведущую к формированию и развитию спонтанной электрической

поляризации. Расчеты *ab initio* показывают, что, в отличие от наивных ожиданий, наибольшая обменная связь происходит не между ионами Mn в одной треугольной плоскости, а между плоскостями вдоль диагоналей. Обменные связи ведут себя по-разному в двух типах доменов (хиральность) из-за разницы в супер-суперобменных взаимодействиях. На пути обменов вдоль одной диагонали есть два иона кислорода, а между ионами Mn, образующими пути вдоль другой диагонали, ничего нет. Эти два иона кислорода действуют как эффективная среда и предоставляют свою $2p$ -орбиталь для обменного взаимодействия. На основе обобщенных данных всех исследований построена магнитная фазовая диаграмма нового хирального магнетика MnSnTeO_6 (рис. 2).

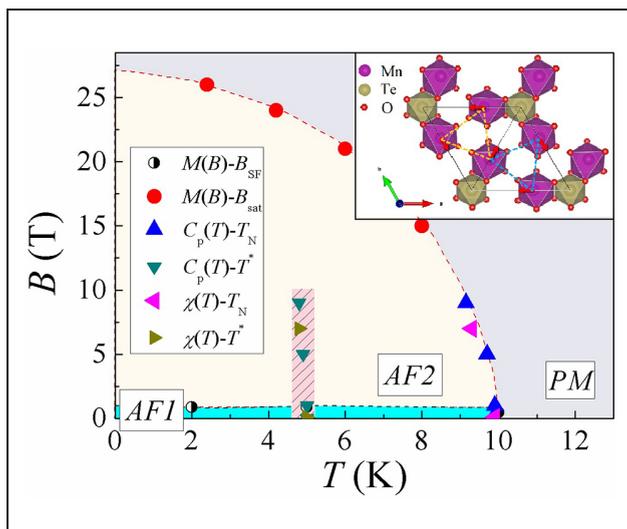


Рис. 2. Магнитная фазовая диаграмма MnSnTeO_6 .

На вставке – полидრальный вид первого слоя в кристаллической структуре MnSnTeO_6 , образованный октаэдрами MnO_6 (пурпурный цвет) и TeO_6 (желтый). Стрелки демонстрируют направления магнитных моментов. Параллелограмм, образованный прямыми линиями, показывает кристаллографическую элементарную ячейку

Структура и кинетика анионного обмена в слоистых двойных гидроксидах

М. Х. Юзвюк, И. А. Зобкало

Отделение нейтронных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Слоистые двойные гидроксиды (СДГ) – слоистые соединения на основе структуры брусита ($Mg[OH]_2$), обладающие анионообменной способностью, благодаря которой СДГ выступают в качестве наноконтейнеров или нанорезервуаров для хранения и выделения различных соединений в их анионной форме (органических, неорганических, биомолекул). Одним из перспективных применений СДГ является область коррозионной защиты. СДГ могут хранить в себе ингибиторы коррозии и выделять их «по требованию»: в зависимости от условий окружающей среды (например, pH, наличия агрессивных частиц), т. е. служить в качестве новых нетоксичных защитных материалов. Проведены *in situ* синхротронные исследования кристаллической структуры Zn–Al слоистых двойных гидроксидов, полученных на металлической подложке (алюминиевый сплав AA2024, Zn), а также процессов анионного обмена в них. Эксперименты проводились на установке PETRA III в синхротронном центре DESY (Гамбург, Германия). Анионный обмен происходил между «родительским» анионом NO_3^- и «гостевыми» Cl^- , SO_4^{2-} (стимуляторы коррозии), VO_x^{y-} (ингибитор). Было показано, что в результате реакции обмена нитрат-анионов (NO_3^-) на хлорид-анионы (Cl^-) в СДГ пространственная группа остается неизменной ($R3m$) на обоих типах подложек. При обмене «нитрат – сульфат» (SO_4^{2-}) происходит смена пространственной группы с $R3m$ на $P3$ как на Zn, так и на AA2024. Анионный обмен «нитрат – ванадат» (VO_x^{y-}) приводит к образованию двух кристаллических фаз СДГ – VO_x на цинковой поверхности. Предположительно, это СДГ с анионами $V_2O_7^{4-}$ и $V_4O_{12}^{4-}$.

Анионные обмены были изучены с использованием универсального подхода к описанию протекания твердотельных реакций – модели

Аврами – Ерофеева. В результате были получены такие параметры реакций, как константа скорости, время начала реакции, а также сделаны выводы о типе реакций обмена.

На рисунке 1 приведена полная картина реакции анионного замещения на примере обмена «нитрат – сульфат», основанная на изменении интенсивности базисных отражений.

Анионные обмены «нитрат – хлорид» и «нитрат – сульфат» протекают в две стадии с образованием промежуточной кристаллической фазы, которая представляет собой СДГ с родительскими и гостевыми анионами одновременно (рис. 2). Первая стадия характеризуется двумерной, вторая – одномерной диффузионно-контролируемой реакцией с замедлением зародышеобразования. Это означает, что скорость реакции определяется скоростью, с которой гостевые анионы Cl^- и SO_4^{2-} проникают в межслоевые галереи,

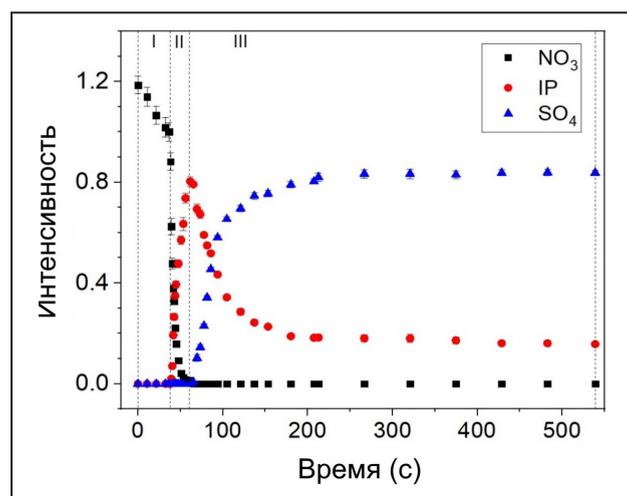


Рис. 1. График зависимости интегральной интенсивности базисных пиков от времени: распад Zn – СДГ – NO_3^- (квадраты), формирование и превращение промежуточной фазы (кружки) и формирование Zn – СДГ – SO_4^{2-} (треугольники)

с эффектом замедления зародышеобразования по краям слоев. В результате обмена в обоих случаях происходит полное исчезновение родительской кристаллической фазы СДГ – NO_3 , однако до конца реакции сохраняется промежуточная фаза. Реакция обмена «нитрат – ванадат», в отличие от вышеописанных, протекает в одну стадию, но с образованием двух конечных кристаллических фаз; предположительно, это фазы СДГ – V_2O_7 и СДГ – V_4O_{12} . Реакции характеризуются дву-

мерным процессом с мгновенным зародышеобразованием. Данный обмен не завершается полным выделением нитрат-анионов, в отличие от двух предыдущих.

Проведенный анализ показывает, что СДГ эффективно поглощают агрессивные анионы (Cl^- , SO_4^{2-}) из окружающей среды, а также способны служить наноконтейнерами для ингибиторов коррозии (VO_x^{y-}).

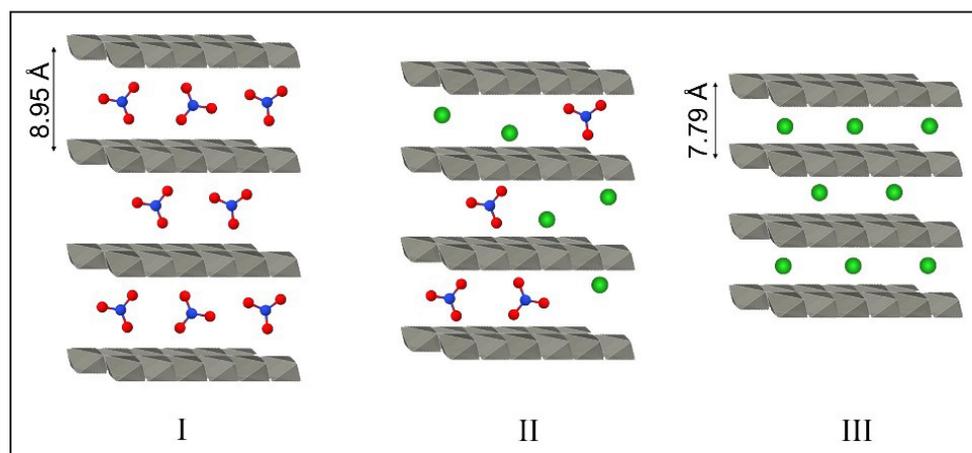


Рис. 2. Схематичное представление процесса анионного обмена через промежуточную фазу (I–III)

Взаимодействие Дзялошинского – Мория в мультиферроиках NdMn_2O_5

И. А. Зобкало, А. Н. Матвеева, С. В. Гаврилов
 Отделение нейтронных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

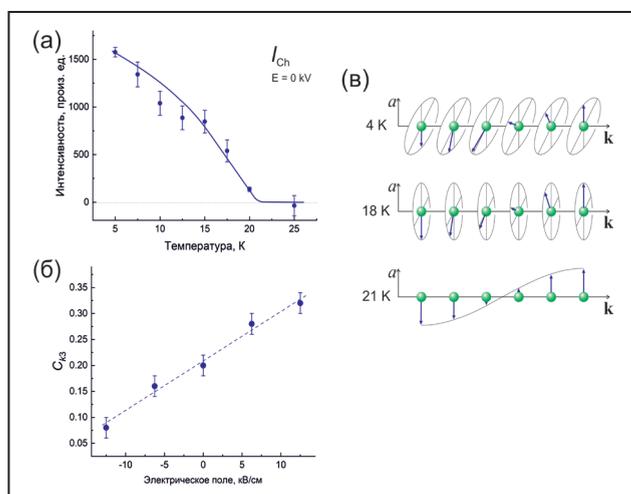
Мультиферроики представляют собой вещества, где одновременно присутствуют две спонтанные упорядоченные фазы разной природы. Такие функциональные материалы могут быть использованы для решения проблем в энерго- и ресурсосберегающих технологиях, для передачи энергии без потерь, для систем накопления энергии. С уникальными свойствами мультиферроиков связана фундаментальная проблема – изучение происхождения механизмов магнитоэлектрической связи в магнитоиндуцированных сегнетоэлектриках.

Редкоземельные манганаты RMn_2O_5 (R – редкоземельный элемент) демонстрируют наиболее впечатляющие примеры связи между магнитными и электрическими свойствами. Несмотря на многочисленные экспериментальные и теоретические исследования, механизмы происхождения сегнетоэлектрической поляризации в этих веществах не могут быть однозначно определены. Методами дифракции поляризованных нейтронов проведены исследования NdMn_2O_5 , которые напрямую свидетельствуют о наличии антисимметричных взаимодействий в исследуемых соединениях, ранее лишь предполагавшихся.

Показано, что в NdMn_2O_5 антисимметричное взаимодействие Дзялошинского – Мория (ДМ) отчетливо проявляется в магнитных фазах, в которых наблюдается сегнетоэлектрическая поляризация. В магнитных фазах, где отсутствует взаимодействие ДМ, также отсутствует поляризация. Это позволяет сделать предположение о том, что взаимодействие ДМ индуцирует сегнетоэлектрическую поляризацию в соединениях RMn_2O_5 .

Полученные зависимости нейтронного хирального рассеяния от внешнего электрического поля также позволяют сделать вывод о тесной связи антисимметричных взаимодействий и сегнетоэлектрической поляризации в RMn_2O_5 (рис.). Проведенный теоретический анализ на качественном уровне подтвердил возможность существования отличного от нуля взаимодействия ДМ в RMn_2O_5 . Показано, что структура соединений RMn_2O_5 обладает некоторой «мягкостью», что приводит к возникновению и сосуществованию нескольких магнитных структур с подобными волновыми векторами в одном кристалле.

Температурная зависимость хирального рассеяния в NdMn_2O_5 (а); зависимость средней хиральности от приложенного электрического поля в режиме FC (б); схема температурной трансформации хиральной структуры типа «эллиптическая спираль» в нехиральную структуру типа «спиновая волна» (в)



Возникновение фазы скирмионной решетки в соединении MnGe в результате химического замещения

Е. В. Алтынбаев, С. В. Григорьев

Отделение нейтронных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

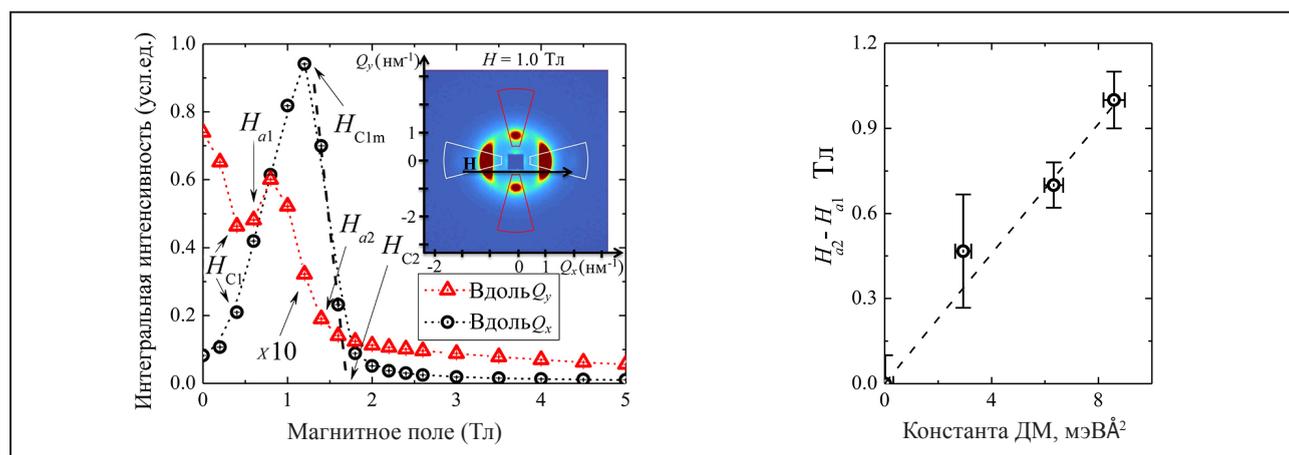
Методом малоуглового рассеяния нейтронов (МУРН) была исследована эволюция фазовой диаграммы «магнитное поле – температура» ($H-T$) соединений $Mn_{1-x}Fe_xGe$ со значениями параметра $x = 0,0; 0,1; 0,2$ и $0,3$.

Измерения методом МУРН были выполнены на инструментах PA20 в Лаборатории им. Леона Бриллюэна (исследовательский реактор Orphée) и SANS-1 в Центре им. Хайнца Майера-Лейбница (исследовательский реактор FRM-II). На рисунке (слева, вставка) показан пример карты МУРН для образца соединения $Mn_{0,7}Fe_{0,3}Ge$ при температуре $T = 100$ К во внешнем поле $H = 0,8$ Тл, также показана зависимость интегральной интенсивности рассеяния нейтронов в направлении вдоль и перпендикулярно внешнему магнитному полю.

В результате проведенных исследований удалось доказать отсутствие фазы скирмионной

решетки в соединении MnGe и ее возникновение с ростом концентрации Fe в соединениях $Mn_{1-x}Fe_xGe$. Факт существования A-фазы в столь широком диапазоне температур $30 < T < 140$ К дополнительно подтверждает нестабильность спиновой структуры геликоидальных магнетиков на основе MnGe (рис., справа). В то же время линейная зависимость полевого диапазона существования скирмионной решетки в исследованных соединениях дополнительно указывает на отсутствие взаимодействия Дзялошинского – Мория (ДМ) при формировании геликоидальной структуры в соединении MnGe (рис., слева).

Полученные результаты подчеркивают ключевую роль взаимодействия ДМ при формировании A-фазы и существенно расширяют возможности в управлении плотностью и областью существования скирмионной решетки.



Зависимость интенсивности рассеяния нейтронов на образце соединения $Mn_{0,7}Fe_{0,3}Ge$ от величины внешнего поля, проинтегрированной в направлении вдоль (черные круги) и перпендикулярно (красные треугольники) внешнему полю, при температуре $T = 100$ К (слева). Пример карты МУРН и область интегрирования для образца соединения $Mn_{0,7}Fe_{0,3}Ge$ при температуре $T = 100$ К во внешнем магнитном поле $H = 0,8$ Тл показаны на вставке. Зависимость усредненного по температуре полевого диапазона области существования A-фазы ($H_{a1} - H_{a2}$) от теоретически рассчитанной величины константы Дзялошинского – Мория для соединений $Mn_{1-x}Fe_xGe$ (справа)

Скачок фрактальных свойств ДНК в ядрах куриных эритроцитов при механической деформации

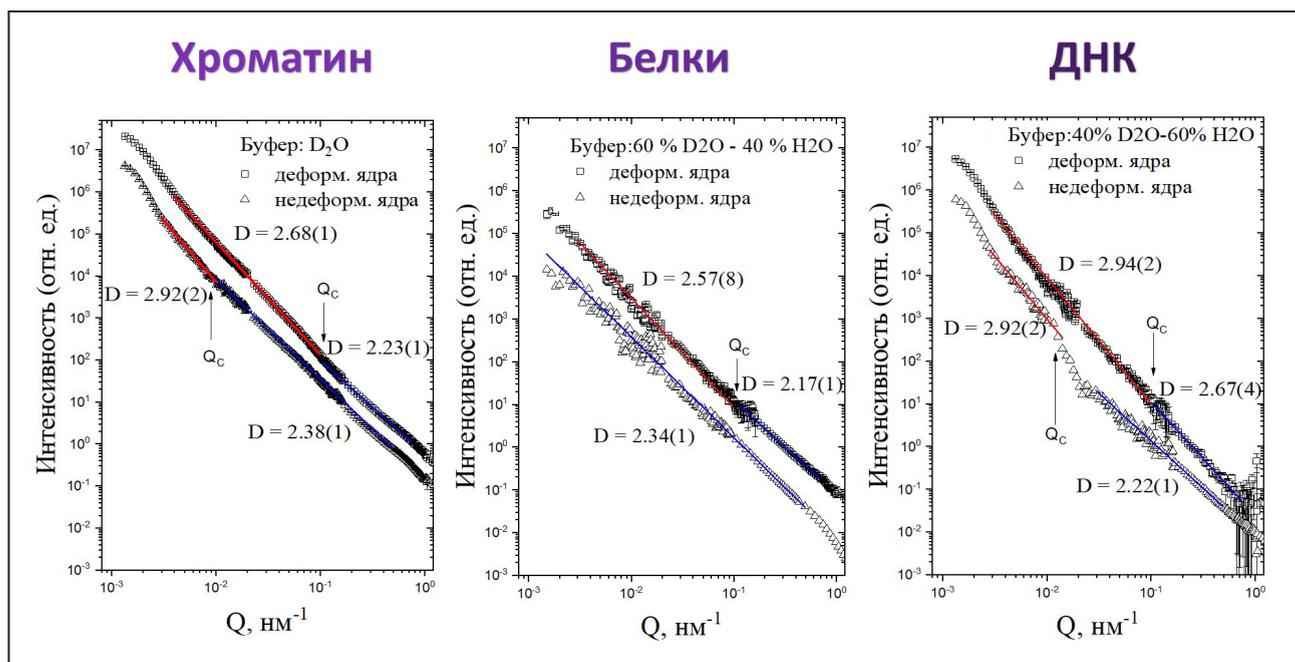
С. В. Григорьев, Е. Г. Яшина, В. Ю. Байрамуков, М. В. Филатов, Р. А. Пантина, Е. Ю. Варфоломеева – Отделение нейтронных исследований, Отделение молекулярной и радиационной биофизики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Интерес к вопросу о том, как двуспиральная нить ДНК, гигантская по меркам биохимии, уложена в ядре клетки размером в несколько микрон, не ослабевает в течение нескольких десятилетий, несмотря на колоссальный прогресс в биологии, генетике и особенно в технологиях исследования биологической клетки. Работа является частью цикла исследований, посвященных поиску универсальных принципов крупномасштабной организации хроматина, а также изучению его физических свойств и их изменений при различных воздействиях.

С помощью метода малоуглового рассеяния нейтронов показано, что пространственная организация хроматина в ядре куриных эритроцитов описывается бифрактальной моделью, обусловленной бифрактальной природой ДНК (рис.). При этом ДНК устроена как массовый

фрактал с низкой плотностью ($D = 2,2$) для меньшего масштаба и способна конденсироваться в логарифмический фрактал ($D = 3$) в большем масштабе. Логарифмический фрактал подразумевает иерархическую разветвленную структуру, подобную трехмерному сферически-симметричному дереву складок, что обеспечивает максимальную доступность любого участка извне и максимально компактную плотную структуру. По-видимому, такая структура характерна для живых систем.

Центрифугирование ядер, расположенных на подложке, приводит к колоссальному механическому напряжению, которое трансформирует ядро из шара (в нативных условиях) в диск и таким образом изменяет его внутреннюю структуру, т. е. его механические и фрактальные свойства. С помощью техники вариации контраста



Малоугловое рассеяние нейтронов на недеформированных (треугольники) и деформированных (квадраты) ядрах куриных эритроцитов в тяжелой воде D₂O (хроматин), в 60 % D₂O (только белки) и в 40 % D₂O (только ДНК)

в малоугловом рассеянии нейтронов были измерены парциальные сечения нейтронов для хроматина, белков и ДНК деформированных и недеформированных ядер. Высота диска недеформированного ядра, измеренная методом атомно-силовой микроскопии, совпадает с фрактальной границей (~ 600 нм), характеризующая тип хроматина в меньшем масштабе как жесткий, а в большем масштабе – как мягкий. Хроматин в ядрах характеризуется как жесткий свободно упакованный массовый фрактал в меньшем масштабе и как мягкий плотно упакованный логарифмический фрактал в большем масштабе.

Механическое воздействие переключает фрактальные свойства ДНК с жесткого, но неплотно упакованного массового фрактала на мяг-

кий, но плотно упакованный логарифмический фрактал, который показывает способность ДНК ядер куриных эритроцитов к такой трансформации. Это преобразование может происходить при увеличении плотности в ходе естественного жизненного цикла или под действием механического давления.

Показано, что внутренняя структура ядер куриных эритроцитов может быть существенно изменена под действием механического напряжения. Этот эксперимент показывает взаимосвязь между механическими и структурными свойствами ДНК на крупном масштабе порядка сотен нанометров и открывает путь для манипуляции этими свойствами.

1D-цериевые водородофосфатные аэрогели: неуглеродистые ультралегкие монолитные аэрогели

Г. П. Копица – Отделение нейтронных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, Институт химии силикатов им. Б. П. Гребенщикова РАН,
Т. О. Козлова, А. Е. Баранчиков, Д. А. Козлов, А. В. Гавриков, А. Д. Япрынцева, К. Б. Устинович, В. К. Иванов – Институт общей и неорганической химии им. Н. С. Курнакова РАН,
Т. О. Козлова, Д. А. Козлов – Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,
A. Chennevière – Université Paris–Saclay, Laboratoire Léon Brillouin

Аэрогели – уникальные материалы, обладающие специфической пространственной структурой, которая обуславливает высокую удельную поверхность, сверхвысокую пористость, регулируемые диапазоны плотности, низкую теплопроводность и диэлектрическую проницаемость, низкую скорость распространения звука и т. д. На сегодняшний день получено множество аэрогельных материалов, причем наибольшее внимание в последние годы уделяется сверхлегким углеродосодержащим аэрогелям (плотностью 1–10 мг/см³), в первую очередь аэрогелям на основе графена или оксида графена, а также сверхлегким возобновляемым и биоразлагаемым аэрогелевым материалам, получаемым из биомассы растительных клеток.

Неорганические аэрогели обычно обладают более высокой плотностью, чем углеродистые аэрогели. Типичными примерами являются кремнеземные аэрогели и аэрогели на основе других оксидов металлов (Al₂O₃, SnO₂, TiO₂ и т. д.). В большинстве случаев структура неорганических аэрогелей, полученных с использованием бестемплатных подходов (например, с использованием обычного золь-гель-метода), представляет собой трехмерную открытую сеть, собранную с использованием NP_s оксидов металлов.

В данной работе были проанализированы условия образования сверхлегких монолитных цериевых водородофосфатных (CeP) лиогелей

за счет агрегации гибких неорганических волокон в прочную сеть с использованием обычного одностадийного бестемплатного золь-гель-процесса без применения каких-либо органических гелеобразователей. Установлены оптимальные условия получения монолитных CeP-лиогелей в зависимости от типа неорганического гелеобразователя и соотношения «раствор CeP : раствор гелеобразователя». Показано, что каркас CeP способен удерживать огромное количество жидкости (во влажных гелях до 20 000 молекул воды на атом Ce) и служит прекрасным исходным материалом для производства сверхлегких аэрогелей. Выявлено, что сверхкритическая сушка лиогелей, синтезированных с использованием трехмолекулярных (ЗМ) водных растворов HNO₃ и H₃PO₄, приводит к образованию монолитных церийсодержащих фосфорных аэрогелей. Волокнистая 1D-структура полученных аэрогелей была подтверждена комплексом аналитических методов, которые также показали, что общий объем пор в конечном продукте увеличивается в несколько раз с увеличением соотношения «раствор CeP : раствор гелеобразователя». Установлено, что использование в качестве гелирующего агента ЗМ-ортофосфорной кислоты при соотношении раствора CeP к ЗМ-раствору H₃PO₄ как 1 : 50 при концентрации CeP = 0,1 М позволяет получить чисто неорганический CeP-аэрогель плотностью до 1 мг/см³.



Исследования с использованием протонов и ионов. Физика нейтрино

- 56 Измерение вероятности распада $\Xi_c^0 \rightarrow \pi^- \Lambda_c^+$
- 57 Прецизионное измерение массы бозона Хиггса в канале распада на два фотона в эксперименте CMS
- 58 Первое наблюдение рождения трех электрослабых бозонов на Большом адронном коллайдере в эксперименте CMS
- 59 Поиск нового тяжелого нейтрального бозона Хиггса в распаде на четыре лептона в эксперименте ATLAS
- 60 Наблюдение событий с рождением четырех t -кварков в эксперименте ATLAS
- 61 Фемтоскопия в протон-протонных взаимодействиях на Большом адронном коллайдере – новый метод исследования потенциалов взаимодействия нестабильных барионов
- 63 Первое наблюдение спин-орбитального эффекта в кварк-глюонной плазме на Большом адронном коллайдере
- 64 Когерентное фоторождение ρ^0 -мезонов в ультрапериферических столкновениях ядер на Большом адронном коллайдере
- 65 Эффект ядерных экранировок Глаубера – Грибова в некогерентном фоторождении ρ^0 -мезонов в ультрапериферических столкновениях ядер на Большом адронном коллайдере
- 66 Наблюдение структуры в поляризации рассеянных протонов в инклюзивной реакции (p, p') с ядром ${}^9\text{Be}$ при энергии 1 ГэВ
- 67 Обнаружение явления долгоживущей высоковозбужденной атомной изомерии
- 68 Сверхтонкая аномалия и магнитные моменты изотопов золота
- 69 Распределения ядерной материи в нейтроноизбыточных ядрах ${}^{14-17}\text{C}$ из данных по упругому рассеянию протонов промежуточной энергии в инверсной кинематике
- 70 Регистрация солнечных CNO-нейтрино в эксперименте Borexino
- 71 Эмиссия высокоэнергетичных протонов и фотонов и рождение подпороговых пионов в столкновениях тяжелых ионов в гидродинамическом подходе с неравновесным уравнением состояния

Измерение вероятности распада $\Xi_c^0 \rightarrow \pi^- \Lambda_c^+$

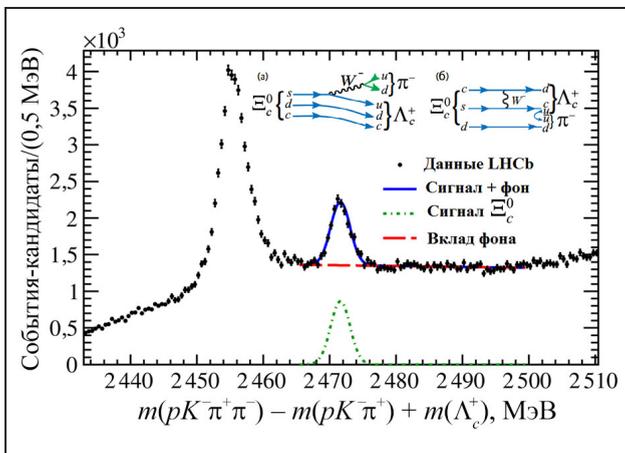
Г. Д. Алхазов, А. В. Андреянов, Н. Ф. Бондарь, А. А. Воробьев, Н. И. Воропаев, А. А. Дзюба, К. А. Ившин, Д. С. Ильин, А. Г. Инглесси, С. Н. Котряхова, П. В. Кравченко, О. Е. Маев, Д. А. Майсузенко, Н. Р. Сагидова, А. Н. Соловьев, И. Н. Соловьев, А. Д. Чубыкин, В. В. Чуликов
 Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, коллаборация LHCb

Слабые распады основных состояний Ξ_c -барионов идут преимущественно по каналам, не содержащим очарованных частиц. Однако для таких частиц возможен и переход с сохранением очарования, например $\Xi_c^0 \rightarrow \pi^- \Lambda_c^+$. На уровне кварковых диаграмм такие переходы описываются или при помощи распада s-кварка, или процесса слабого рассеяния (рис., вставка). Для Ξ_c^- -барионов возможен подобный распад с сохранением прелестного квантового числа. Однако из-за структуры слабого взаимодействия, отсутствия в первом порядке теории изменяющих аромат нейтральных токов ощутимый вклад дает только диаграмма с распадом s-кварка. Сравнение относительных вероятностей распадов для очарованных и прелестных барионов поможет выделить вклад обменной диаграммы.

В 2020 г. экспериментом LHCb обнародовано исследование, посвященное измерению вероятности распада $\Xi_c^0 \rightarrow \pi^- \Lambda_c^+$. Этот распад был обнаружен группой анализа данных НИЦ «Кур-

чатовский институт» – ПИЯФ в данных, набранных в 2011–2012 гг. в ходе первого этапа работы Большого адронного коллайдера при энергиях взаимодействующих протонов 7 и 8 ТэВ. Измерение вероятности распада проводилось для данных, накопленных в 2017–2018 гг. при энергии 13 ТэВ. Отбор с применением методов машинного обучения позволил выделить 6320 ± 230 событий-кандидатов для этого процесса (см. рис.). В качестве нормировочных каналов использовались распады Λ_c^+ и Ξ_c^+ -барионов с известными парциальными ширинами, а также на предположениях о симметрии процессов рождения барионов, содержащих тяжелые кварки.

В результате была впервые измерена парциальная ширина для исследуемого распада. Ее величина составила $B(\Xi_c^0 \rightarrow \pi^- \Lambda_c^+) = (0,55 \pm 0,02 \text{ (стат.)} \pm 0,18 \text{ (сист.)}) \cdot 10^{-2}$. С точки зрения теории этот результат может быть объяснен за счет конструктивной интерференции процессов распада s-кварка и слабого рассеяния.



Распределение для отобранных событий-кандидатов по массе системы $\pi^- \Lambda_c^+$. Линиями показано описание части спектра, соответствующей распадам типа $\Xi_c^0 \rightarrow \pi^- \Lambda_c^+$. На вставке – кварковые диаграммы, описывающие такие распады: а – распад s-кварка; б – процесс слабого рассеяния

Прецизионное измерение массы бозона Хиггса в канале распада на два фотона в эксперименте CMS

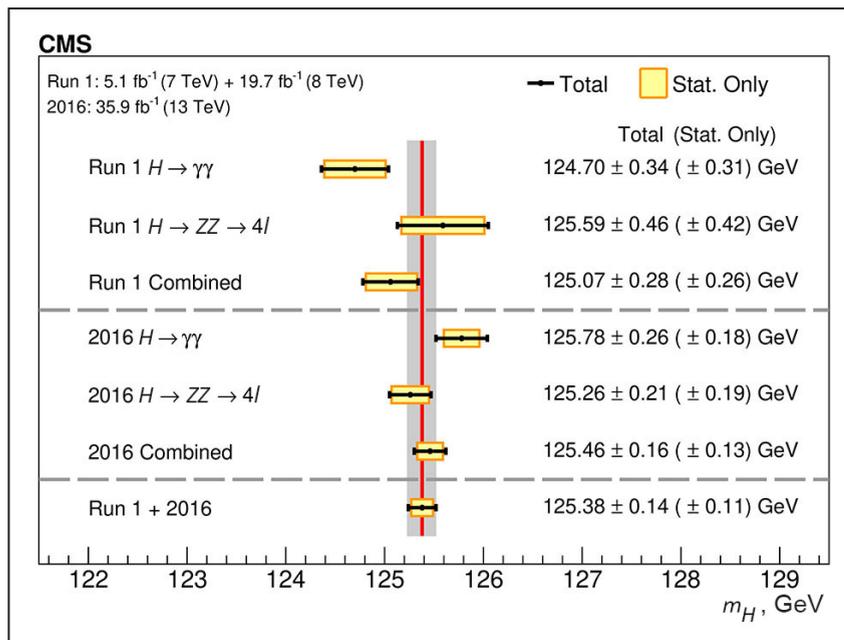
А. А. Воробьев, В. Л. Головцов, Ю. М. Иванов, В. Т. Ким, Е. В. Кузнецова, П. М. Левченко, В. А. Мурзин, В. А. Орешкин, И. Б. Смирнов, Д. Е. Соснов, В. В. Сулимов, Л. Н. Уваров, Л. А. Щипунов – Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, коллаборация CMS

Одной из основных задач современной физики высоких энергий является исследование свойств бозона Хиггса Стандартной модели, открытого в экспериментах ATLAS и CMS в 2012 г.

Набор данных 2016 г. с интегральной светимостью 35,9 фб⁻¹, набранных в эксперименте CMS, был проанализирован для бозона Хиггса в канале распада $H \rightarrow \gamma\gamma$. В CMS были внедрены новые методы анализа для повышения точности измерения наряду с новым методом оценки систематической неопределенности ECAL. Измененное значение массы бозона Хиггса в канале распада на два фотона составило $m_H = 125,78 \pm 0,26$ ГэВ. Это измерение было объединено с недавним измерением той же величины в эксперименте CMS в канале распада $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$,

что дало значение $m_H = 125,46 \pm 0,16$ ГэВ. Кроме того, когда результат Сеанса-2 с набором данных 2016 г. был объединен с аналогичным измерением, проведенным в Сеансе-1 при 7 и 8 ТэВ, значение массы бозона Хиггса оказалось равным $m_H = 125,38 \pm 0,14$ ГэВ. В настоящее время это наиболее точное измерение массы бозона Хиггса (рис.).

Важную роль в исследовании свойств бозона Хиггса играет торцевой мюонный детектор (EMU) экспериментальной установки CMS, в разработку и создание которых весомый вклад внес НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ. Сотрудники Института активно участвуют в физическом анализе данных CMS.



Сводка измеренных масс бозона Хиггса в каналах распада $H \rightarrow \gamma\gamma$ и $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ и для их комбинации

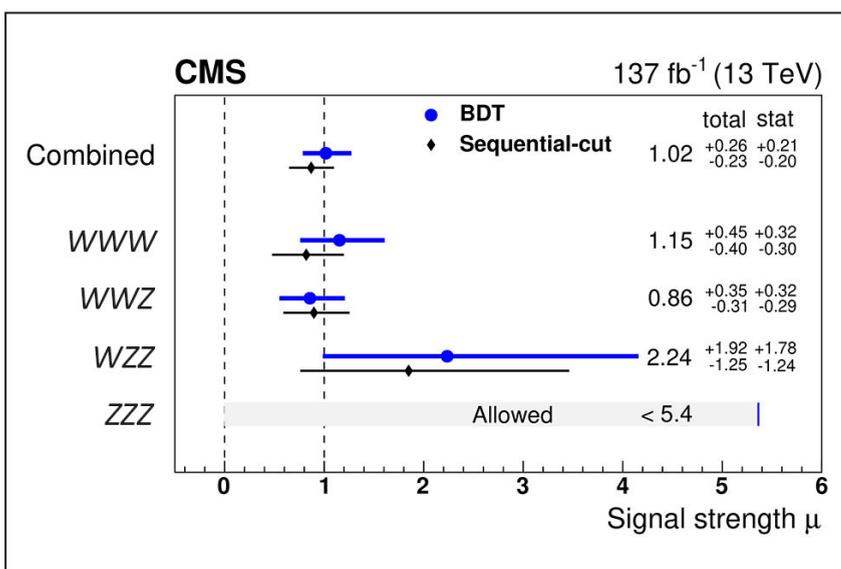
Первое наблюдение рождения трех электрослабых бозонов на Большом адронном коллайдере в эксперименте CMS

А. А. Воробьев, Г. Е. Гаврилов, В. Л. Головцов, Ю. М. Иванов, В. Т. Ким, Е. В. Кузнецова, П. М. Левченко, В. А. Мурзин, В. А. Орешкин, И. Б. Смирнов, Д. Е. Соснов, В. В. Сулимов, Л. Н. Уваров – Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, колаборация CMS

Выполнено первое наблюдение совместно рожденья трех массивных калибровочных бозонов (VV с $V = W, Z$) в pp -столкновениях при 13 ТэВ. Данный процесс интересен тем, что предсказания Стандартной модели (СМ) для подобных случаев включают неабелевый характер теории электрослабых взаимодействий. Этот процесс также чувствителен к физике за пределами СМ. Анализ основан на данных CMS с интегральной светимостью 137 фб^{-1} . Поиски отдельных каналов процессов образования WWW , WWZ , WZZ и ZZZ выполнены в конечных состояниях с тремя, четырьмя, пятью и шестью лептонами (e, μ) или с двумя лептонами одного знака, плюс одна или две струи. Наблюдаемая (ожидаемая) значимость объединенного сигнала образования VVV составляет

5,7 (5,9) стандартного отклонения, а соответствующее измеренное сечение процесса относительно предсказания СМ – $1,02 \pm 0,23$ (0,26). Значения статистической значимости отдельных процессов WWW и WWZ составляют 3,3 и 3,4 стандартного отклонения соответственно. Измеренные сечения образования отдельных трехбозонных процессов (рис.) также хорошо согласуются с предсказаниями СМ.

Важную роль в исследовании свойств электрослабых бозонов играет торцевой мюонный детектор (EMU) экспериментальной установки CMS. В разработку и создание данных приборов весомый вклад внес НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, сотрудники которого активно участвуют в физическом анализе данных CMS.



Значения наилучшего соответствия силы сигнала для анализа на основе ускоренного логического выбора (BDT) и анализа последовательных кинематических обрезаний. Для образования ZZZ показан верхний предел 95 % CL

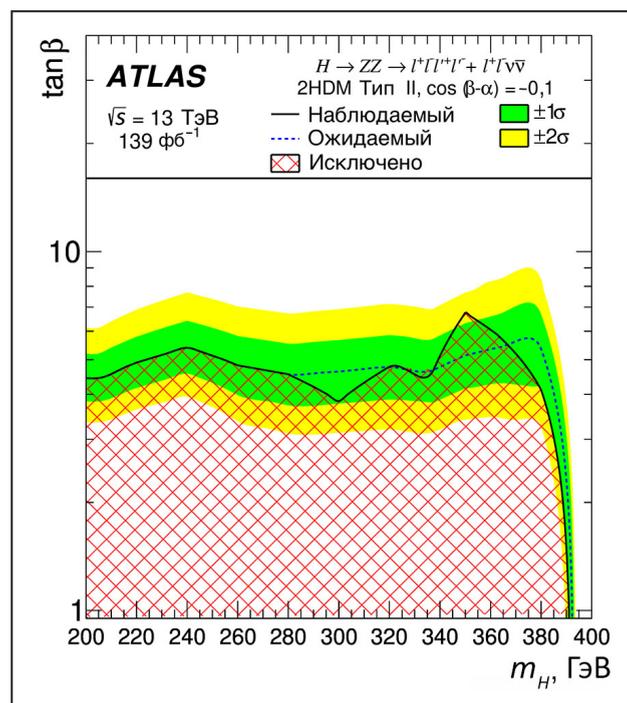
Поиск нового тяжелого нейтрального бозона Хиггса в распаде на четыре лептона в эксперименте ATLAS

О. Л. Федин, С. Г. Барсов, А. Е. Ежилов, М. П. Левченко, В. П. Малеев, Ю. Г. Нарышкин, Д. Пуджа, В. М. Соловьев, В. А. Щегельский
 Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, коллаборация ATLAS

Поиск новой физики, т. е. процессов, которые не описывает Стандартная модель (СМ), является наиболее важной задачей экспериментов, проводимых на Большом адронном коллайдере (БАК). В эксперименте ATLAS был проведен поиск нового тяжелого нейтрального бозона Хиггса, который предсказывается двухдублетной моделью бозона Хиггса, в его распаде на четыре лептона ($4l$ или $2l2\nu$, где $l = e, \mu$ – электроны и мюоны, а ν – нейтрино). При анализе данных использовались кинематические распределения по инвариантной массе (в случае распада на четыре заряженных лептона) или по так называемой поперечной массе при распаде на два заряженных лептона и два нейтрино. Рассматривались два механизма рождения новых тяжелых бозонов Хиггса: глюон-глюонное слияние и слияние векторных бозонов – при различных гипотезах для ширины резонанса, который может быть узким (narrow width approximation – NWA) или широким (large width approximation – LWA). Учитывались эффекты интерференции процессов рождения нового тяжелого бозона Хиггса и бозона Хиггса СМ, а также процессов рождения нового тяжелого бозона Хиггса и пары Z-бозонов.

По результатам анализа данных, накопленных во втором периоде работы БАК (2015–2018 гг.) при энергии pp -столкновений $\sqrt{s} = 13$ ТэВ и полной светимости 139 фб^{-1} , отклонений от предсказаний СМ не обнаружено. Получены верхние пределы для сечения рождения нового нейтрального бозона Хиггса в зависимости от его массы m_H в интервале от 200 фб ($m_H = 400$ ГэВ)

до 2,6 фб ($m_H = 2$ ТэВ) для процесса слияния глюонов и в интервале от 87 фб ($m_H = 250$ ГэВ) до 169 фб ($m_H = 1,8$ ТэВ) для процесса слияния векторных бозонов. Интерпретация результатов проведена в рамках двухдублетной модели бозона Хиггса. Получены ограничения для значений параметров этой модели. На рисунке показаны верхние ограничения на параметры $\tan\beta$ (отношение вакуумных средних двух дублетов полей Хиггса) в зависимости от m_H .



Верхние ограничения для параметров $\tan\beta$ и m_H 2HDM-модели на уровне достоверности 95 %, полученные в эксперименте ATLAS

Наблюдение событий с рождением четырех t -кварков в эксперименте ATLAS

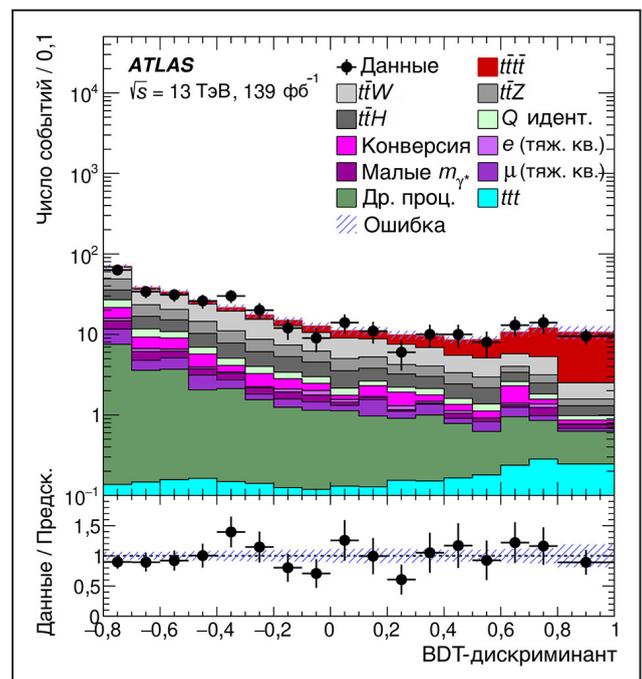
С. Г. Барсов, А. Е. Ежилов, М. П. Левченко, В. П. Малеев, Ю. Г. Нарышкин, Д. Пуджа, В. М. Соловьев, О. Л. Федин, В. А. Щегельский – Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, коллаборация ATLAS

Топ-кварк (t) является наиболее тяжелой из всех известных на данный момент элементарных частиц Стандартной модели (СМ). Следовательно, он имеет большую величину константы связи с бозоном Хиггса СМ, а также, как предсказывается во многих моделях за рамками СМ, большую величину константы с новыми частицами, появляющимися в этих моделях. В этом отношении редкие процессы с участием t -кварка особенно интересны для изучения. Одним из таких процессов является рождение четырех t -кварков ($t\bar{t}t\bar{t}$), которое предсказывается в СМ, но до сих пор не было обнаружено.

В СМ t -кварк почти в 100 % случаев распадается на W -бозон и b -кварк. Следовательно, в событиях с рождением $t\bar{t}t\bar{t}$ будет наблюдаться распад $t\bar{t}t\bar{t} \rightarrow W^+W^-W^+W^-b\bar{b}b\bar{b}$.

В эксперименте ATLAS на Большом адронном коллайдере был проведен поиск событий с рождением четырех топ-кварков в данных, накопленных при энергии сталкивающихся протонов 13 ТэВ и соответствующих полной светимости 139 фб^{-1} . Для отделения сигнальных событий от фоновых использовалась дискриминирующая переменная, полученная с помощью мультивариационного анализа данных методом BDT (boosted decision trees). Сечение рождения $t\bar{t}t\bar{t}$ определялось из фитирования распределения отобранных событий в данных по этой переменной (рис.). Наблюдаемая (ожидаемая) статистическая значимость сигнала от рождения $t\bar{t}t\bar{t}$

составила 4,3 (2,4) стандартного отклонения, что является свидетельством в пользу существования данного процесса. Измеренное сечение рождения четырех топ-кварков составило 24_{-6}^{+7} фб , что согласуется с сечением, предсказанным в рамках СМ ($12,0 \pm 2,4 \text{ фб}$), на уровне 1,7 стандартного отклонения.



Распределение по дискриминирующей переменной BDT для числа отобранных событий в данных и предсказанного числа событий для сигнала и фона после фитирования. В нижней части рисунка показано отношение числа событий в данных к предсказанному числу событий

Фемтоскопия в протон-протонных взаимодействиях на Большом адронном коллайдере – новый метод исследования потенциалов взаимодействия нестабильных барионов

М. Б. Жалов, В. В. Иванов, Е. Л. Крышень, М. В. Малаев, В. Н. Никулин,
А. Ю. Рябов, В. Г. Рябов, Ю. Г. Рябов, А. В. Ханзадеев, В. М. Самсонов
Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ,
коллаборация ALICE

В 2020 г. коллаборация ALICE опубликовала в журнале Nature результаты изучения низкоэнергетического взаимодействия гиперонов $\Xi^-(dss)$ и $\Omega^-(sss)$ с протонами. Знание барион-барионных потенциалов является одной из ключевых проблем в ядерной физике, физике нейтронных звезд и в решении более глобальной задачи построения фундаментальной теории сильных взаимодействий, квантовой хромодинамики (КХД), в непертурбативной области.

В терминах фундаментальных степеней свободы КХД – кварков и глюонов – значительный прогресс был достигнут в определении барион-барионных потенциалов из вычислений на решетке с их верификацией сравнением с экспериментальными данными. При построении эффективных теорий поля на адронном уровне также требуются константы взаимодействия, извлекаемые из экспериментальных данных.

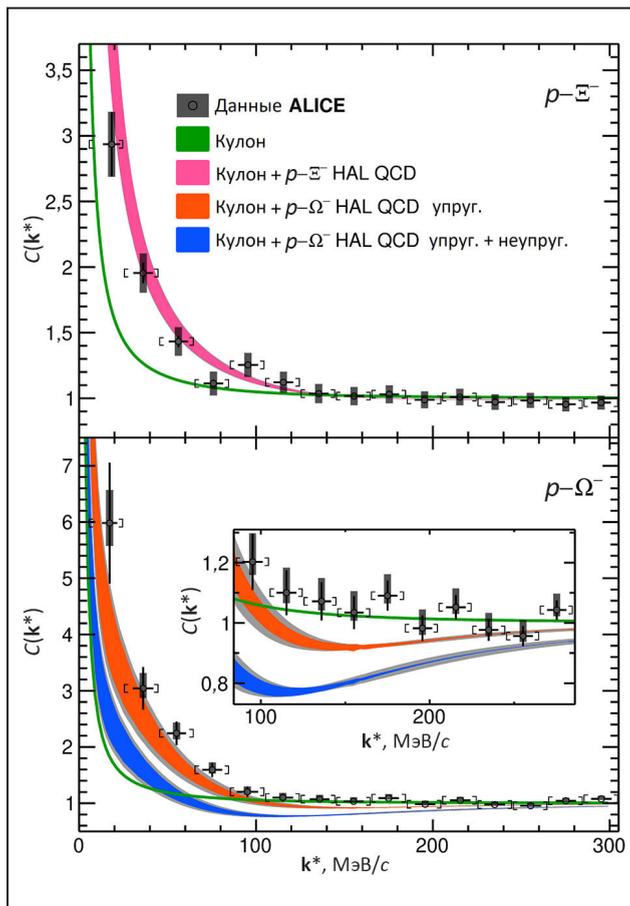
Традиционный метод экспериментального исследования потенциала взаимодействия низкоэнергетических адронов, их упругого рассеяния неприменим в случае нестабильных барионов из-за их малого времени жизни. В эксперименте ALICE предложен новый подход к решению этой задачи методом фемтоскопии. В ядерной физике высоких энергий данный метод, сформулированный по аналогии с эффектом интерферометрии Хэнбери Брауна – Твисса в астрономии, активно используется для определения размера области протон-протонного и ядро-ядерного взаимодействия в событиях с большой множественностью рожденных частиц.

В основе метода – сравнение экспериментальной корреляционной функции $C^{\text{exp}}(\mathbf{k}^*)$ пар частиц с относительным импульсом $|\mathbf{k}^*|$ с теоретически смоделированной корреляционной

функцией $C^{\text{theor}}(\mathbf{k}^*) = \int S(\mathbf{r}) |\Psi(\mathbf{k}^*, \mathbf{r})|^2 d\mathbf{r}$. Это позволяет извлечь из данных функцию источника $S(\mathbf{r})$, описывающую пространственное распределение области испускания частиц, если известна волновая функция пары детектируемых коррелированных частиц $\Psi(\mathbf{k}^*, \mathbf{r})$. В ультрарелятивистских протон-протонных столкновениях с большой множественностью рожденных частиц корреляции между протонами и гиперонами сравнительно низких энергий возникают благодаря их взаимодействию в конечном состоянии.

В эксперименте ALICE из большого массива данных по протон-протонным столкновениям при энергии $\sqrt{s} = 13$ ТэВ были отобраны события с pp -, $p\Xi^-$ - и $p\Omega^-$ -парами с относительными импульсами $|\mathbf{k}^*|$ в интервале $20 < |\mathbf{k}^*| < 300$ МэВ/с и определены экспериментальные корреляционные функции $C_{pp}^{\text{exp}}(\mathbf{k}^*)$, $C_{p\Xi}^{\text{exp}}(\mathbf{k}^*)$ и $C_{p\Omega}^{\text{exp}}(\mathbf{k}^*)$. Потенциал pp -взаимодействия при низких энергиях известен из анализа данных по упругому рассеянию. Это позволяет учесть pp -взаимодействие в конечном состоянии решением уравнения Шредингера, найти $\Psi_{pp}(\mathbf{k}^*, \mathbf{r})$ и из фемтоскопического анализа pp -данных извлечь функцию источника $S_{pp}(\mathbf{r})$.

На рисунке показано сравнение измеренных $C_{p\Xi}^{\text{exp}}(\mathbf{k}^*)$ и $C_{p\Omega}^{\text{exp}}(\mathbf{k}^*)$ с теоретическими корреляционными функциями для $p\Xi^-$ - и $p\Omega^-$ -пар $C_{p\Xi}^{\text{theor}}(\mathbf{k}^*)$ и $C_{p\Omega}^{\text{theor}}(\mathbf{k}^*)$. При моделировании $C_{p\Xi}^{\text{theor}}(\mathbf{k}^*)$ и $C_{p\Omega}^{\text{theor}}(\mathbf{k}^*)$ использована функция источника $S_{pp}(\mathbf{r})$, модифицированная с учетом сильных распадов короткоживущих резонансов и коллективных потоков. Волновые функции коррелированных $p\Xi^-$ - и $p\Omega^-$ -пар вычислены ре-



Сравнение измеренной в эксперименте ALICE корреляционной функции и смоделированной теоретически с использованием гиперон-протонных потенциалов из расчетов HAL QCD на решетках

шением уравнения Шредингера с кулоновским взаимодействием и гиперон-протонными потенциалами из решеточных расчетов HAL QCD (Hadron to Atomic nuclei from Lattice QCD). В расчетах HAL QCD для взаимодействия $p\Omega^-$ предсказывается сильное притяжение, которое может приводить к образованию связанного со-

стояния с энергией связи 2,5 МэВ. Столь же сильное притяжение предсказано для $p\Xi^-$ в области $0,5 < r < 2$ фм, но при $r < 0,2$ фм притяжение сменяется отталкиванием. Такое поведение потенциалов отражается в поведении корреляционных функций $C_{p\Xi}^{\text{theor}}(\mathbf{k}^*)$ и $C_{p\Omega}^{\text{theor}}(\mathbf{k}^*)$. Зеленой линией показаны корреляции, обусловленные только кулоновским притяжением, а розовой и оранжевой – с учетом сильного взаимодействия. Неупругие каналы ($p\Xi^- \rightarrow \Lambda\Lambda, \Sigma\Sigma, \Lambda\Sigma, \dots$) в $p\Xi^-$ -взаимодействии практически не влияют на поведение корреляционной функции. Включение неупругих каналов ($p\Omega^- \rightarrow \Xi\Lambda, \Xi\Sigma$) при анализе $p\Omega^-$ -корреляций (голубая линия по сравнению с оранжевой) приводит к расхождению с данными. Их роль требует более детального изучения процессов с перестройкой странности в $p\Omega^-$ -взаимодействии.

Поведение экспериментальных корреляционных функций подтверждает предсказанное HAL QCD притяжение в сильном взаимодействии гиперонов Ξ^- и Ω^- с протонами, но не согласуется с существованием связанного состояния в системе $p\Omega^-$, которое проявляется как локальный минимум в $C_{p\Omega}^{\text{theor}}(\mathbf{k}^*)$ при $100 < |\mathbf{k}^*| < 300$ МэВ/с. Такой минимум отсутствует в измеренной корреляционной функции $C_{p\Omega}^{\text{exp}}(\mathbf{k}^*)$ во всей области импульсов $|\mathbf{k}^*| < 300$ МэВ/с.

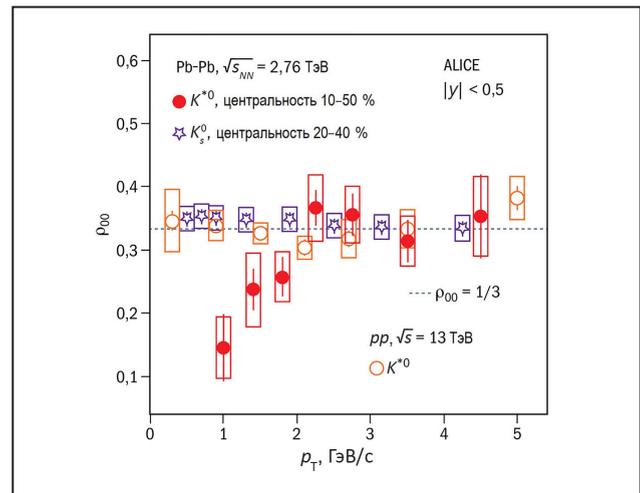
Эти результаты демонстрируют потенциальные возможности метода фемтоскопии в исследовании сильных барион-барионных взаимодействий при низких энергиях и восстановлении барион-барионных потенциалов вплоть до расстояний порядка 10^{-14} см при использовании данных по столкновению ультрарелятивистских протонов на Большом адронном коллайдере.

Первое наблюдение спин-орбитального эффекта в кварк-глюонной плазме на Большом адронном коллайдере

М. Б. Жалов, В. В. Иванов, Е. Л. Крышень, М. В. Малаев, В. Н. Никулин, В. Г. Рябов, Ю. Г. Рябов, **В. М. Самсонов**, А. В. Ханзадеев
 Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, коллаборация ALICE

Основная цель эксперимента ALICE – исследование свойств сильно взаимодействующей кварк-глюонной плазмы (КГП), формирующейся в области взаимодействия сталкивающихся ультрарелятивистских ядер. В полуцентральных столкновениях, благодаря неоднородному распределению нуклонов в ядрах и ненулевым прицельным параметрам, в сформированном в зоне взаимодействия кварк-глюонном сгустке кварки (антикварки) могут обладать орбитальным угловым моментом L , перпендикулярным к плоскости реакции. Спин-орбитальное взаимодействие кварков в КГП может приводить к их поляризации вдоль L и при переходе КГП в адронный газ к поляризации адронов в процессах рекомбинации поляризованных кварков и антикварков.

Коллаборацией ALICE проведен анализ данных по выходу короткоживущего векторного $K^*(892)^0$ -мезона при адронизации КГП с целью измерения ориентации спина $K^*(892)^0$ относительно плоскости реакции в полуцентральных Pb-Pb-столкновениях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 2,76$ ТэВ и в pp -столкновениях при $\sqrt{s_{NN}} = 13$ ТэВ. Для неполяризованного векторного мезона вероятность состояний со спиновыми проекциями 1, 0 и -1 одинакова, равна 1/3, и угловое распределение продуктов распада $K^*(892)^0$ по отношению к оси квантования должно быть изотропно. Асимметрия углового распределения позволяет измерить величину ρ_{00} , определяющую вероятность нахождения векторного $K^*(892)^0$ -мезона в состоянии с нулевой проекцией спина. Отклонение ρ_{00} от значения 1/3 свидетельствует о поляризации $K^*(892)^0$ -мезона. Результаты анализа представлены на рисунке. В Pb-Pb-столкновениях величина ρ_{00} заметно



Зависимость измеренного ρ_{00} от поперечного импульса векторного мезона

меньше 1/3 в области малых поперечных импульсов $p_T \sim 1$ ГэВ/с. В pp -столкновениях, в которых вероятность возникновения большого углового момента мала, измеренные величины ρ_{00} согласуются с 1/3 во всем диапазоне измерений по поперечному импульсу. Измеренная ранее в аналогичных условиях поляризация рожденного в Pb-Pb-взаимодействиях Λ -гиперона оказалась близкой к нулю в пределах 1σ . С учетом этого обнаруженный на уровне 3σ эффект поляризации векторного мезона можно рассматривать как свидетельство заметной роли спин-орбитальных взаимодействий в эволюции КГП, формирующейся в полуцентральных взаимодействиях тяжелых ионов при энергиях Большого адронного коллайдера, и как указание на возможность различного механизма адронизации при формировании векторных мезонов и барионов в процессе перехода КГП в адронную фазу.

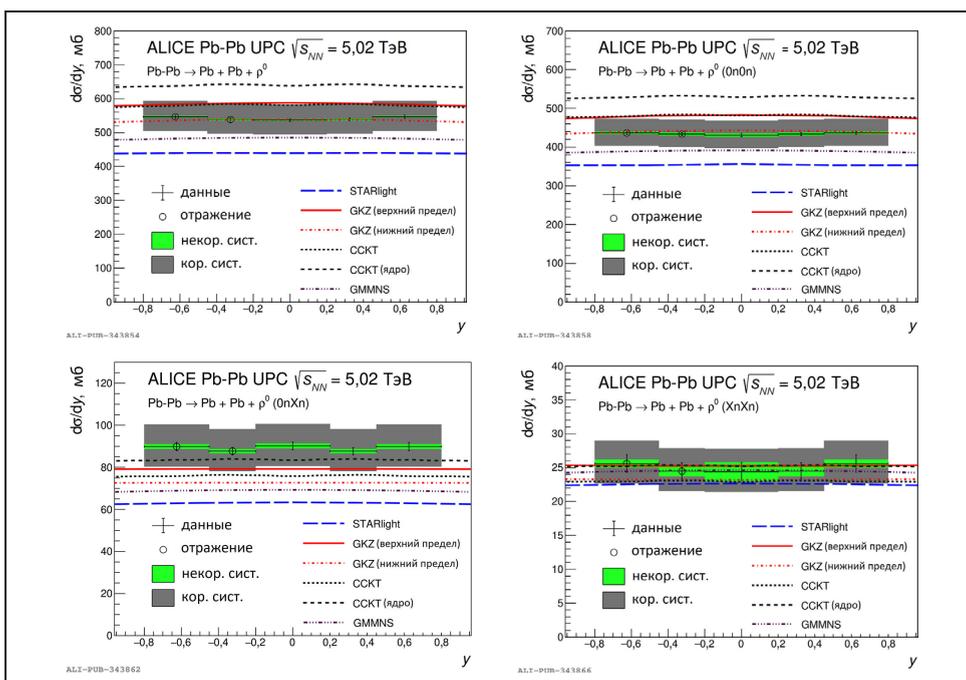
Когерентное фоторождение ρ^0 -мезонов в ультрапериферических столкновениях ядер на Большом адронном коллайдере

В. А. Гузей, М. Б. Жалов, В. В. Иванов, Е. Л. Крышень, М. В. Малаев, В. Н. Никулин, В. Г. Рябов, Ю. Г. Рябов, **В. М. Самсонов**, А. В. Ханзадеев
 Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, коллаборация ALICE

Сечение когерентного фоторождения ρ^0 -мезона в ультрапериферических столкновениях ядер свинца при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 5,02$ ТэВ измерено коллаборацией ALICE в интервале быстрот $y < |0,8|$. Большой заряд ядер свинца ($Z = 82$) в значительной степени компенсирует малость константы электромагнитного взаимодействия α_{em} . В результате процесс когерентного фоторождения может сопровождаться возбуждением ядер благодаря дополнительному обмену одним или несколькими фотонами сравнительно низких энергий с последующим распадом путем испускания нейтронов. Это позволяет измерить сечение фоторождения в каналах с разным числом нейтронов: $0n0n$ – без дополнительного обмена; $0n1n$ – с возбуждением только одного из сталкивающихся ядер, распадающегося

с вылетом одного и больше нейтронов; канал $XnXn$, когда оба сталкивающихся ядра дополнительно возбуждаются.

Результаты измерений представлены на рисунке вместе с набором теоретических предсказаний для этих сечений, полученных в рамках различных моделей описания процесса когерентного фоторождения легких векторных мезонов на ядрах. Из сравнения видно, что разработанный в НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ подход GKZ (Гузей – Крышень – Жалов), основанный на использовании модели Грибова – Глаубера для фотон-ядерного рассеяния и модифицированной модели векторной доминантности для адронной структуры фотона, с разумной точностью описывает экспериментальные данные.



Сравнение измеренных в эксперименте ALICE сечений когерентного фоторождения ρ^0 -мезона в ультрапериферических столкновениях ядер свинца при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 5,02$ ТэВ с теоретическими предсказаниями

Эффект ядерных экранировок Глаубера – Грибова в некогерентном фоторождении ρ^0 -мезонов в ультрапериферических столкновениях ядер на Большом адронном коллайдере

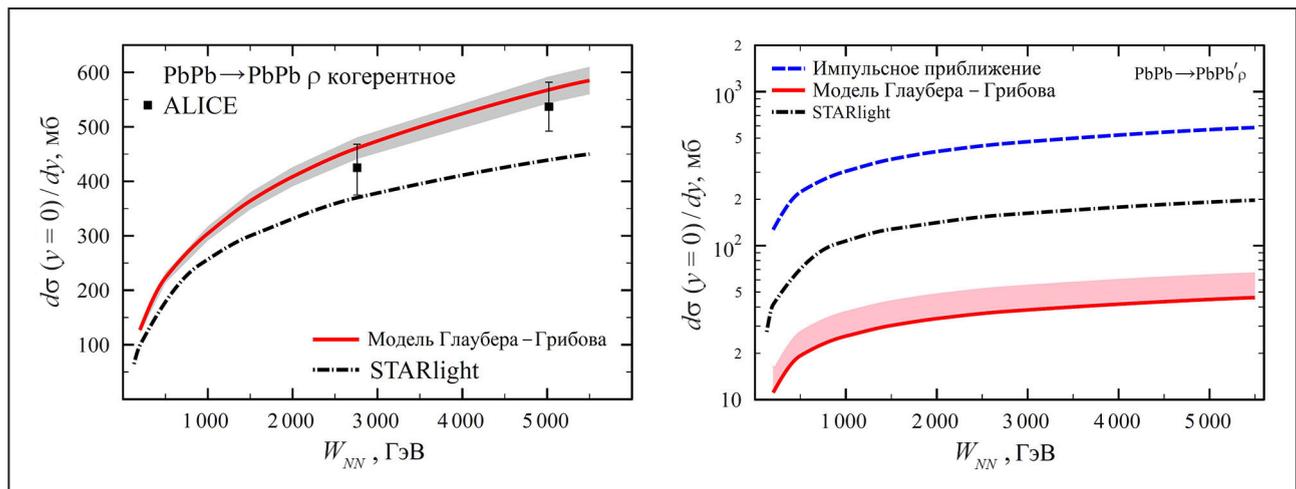
В. А. Гузей, М. Б. Жалов, Е. Л. Крышень

Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Развитый в НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ подход, основанный на использовании модели Глаубера – Грибова для фотон-ядерного рассеяния и модифицированной модели векторной доминантности для адронной структуры фотона, с разумной точностью (рис., левая панель) описывает экспериментальные данные ALICE по когерентному фоторождению ρ^0 -мезонов в ультрапериферических столкновениях ядер на Большом адронном коллайдере (БАК). Это делает обоснованным использование аналогичного подхода для предсказания сечения некогерентного фоторождения ρ^0 -мезона в ультрапериферических столкновениях ядер свинца в кинематике БАК.

Показано (рис., правая панель), что ядерные экранировки в этом процессе значительны

и приводят к подавлению на порядок сечения некогерентного фоторождения ρ^0 -мезона на ядре $\sigma_{\gamma A \rightarrow \rho A'}$ по сравнению с оценкой в импульсном приближении, в рамках которого $\sigma_{\gamma A \rightarrow \rho A'} = A \sigma_{\gamma N \rightarrow \rho N}$. При этом около 70 % эффекта подавления обусловлено глауберовским упругим перерассеянием, а примерно 20–25 % связано с учетом грибовских неупругих экранировок. Сравнивая предсказанные в нашей работе сечения с сечениями, вычисленными в рамках обычно используемого при анализе данных комплекса программ STARlight, мы показали, что использованные в STARlight теоретически необоснованные приближения завышают сечения некогерентного фоторождения ρ^0 -мезона на ядрах почти в четыре раза по сравнению с расчетами в модели Глаубера.



Сравнение результатов расчетов сечений фоторождения ρ^0 -мезона в ультрапериферических столкновениях ядер свинца в модели Глаубера – Грибова с расчетами в STARlight, импульсном приближении и эксперимента ALICE

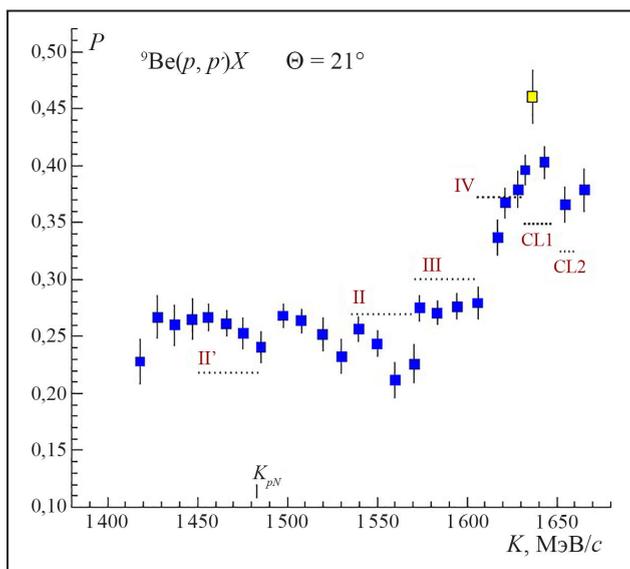
Наблюдение структуры в поляризации рассеянных протонов в инклюзивной реакции (p, p') с ядром ${}^9\text{Be}$ при энергии 1 ГэВ

Г. М. Амальский, В. А. Андреев, С. Г. Барсов, Г. Е. Гаврилов, А. А. Жданов, А. А. Изотов, Д. С. Ильин, А. Ю. Киселев, Н. Г. Козленко, П. В. Кравченко, Д. А. Майсузенко, О. В. Миклухо, В. И. Мурзин, Д. В. Новинский, А. В. Шведчиков
 Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

На протонном пучке синхроциклотрона НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ измерена поляризация (P) в инклюзивной реакции как функция импульса рассеянного протона (K). Измерения проводились с помощью прецизионного магнитного спектрометра, оснащенного поляриметром на пропорциональных камерах.

Описание структуры в поляризации, наблюдаемой при угле рассеяния $\Theta = 21^\circ$ (рис.): импульсные интервалы II, III и IV, обозначенные отрезками пунктирной линии, отвечают преимущественно квазиупругому рассеянию ${}^9\text{Be}(p, p'NC)X$ на плотных двух-, трех- и четырехнуклонных корреляциях (NC) в ядре, подобных легким ядрам ${}^2\text{H}$, ${}^3\text{He}$ (${}^3\text{H}$) и ${}^4\text{He}$. В интервале II' существенный вклад дает квазиупругое рассеяние на двухнуклонной корреляции с последующим распадом ее на два нуклона

с равными и противоположно направленными импульсами, превышающими импульс Ферми ($K_F \sim 250$ МэВ/с). Импульсный интервал CL1 соответствует квазиупругому рассеянию ${}^9\text{Be}(p, p'X)Y$ на остаточных ядрах (X) ${}^7\text{Li}$, ${}^6\text{He}$ (${}^6\text{Li}$) и ${}^5\text{He}$ в отмеченных выше реакциях. В этом интервале наблюдается широкий пик в импульсном распределении рассеянных протонов. В интервале CL2 наблюдается более узкий пик в импульсном распределении, соответствующий квазиупругому рассеянию ${}^9\text{Be}(p, p'{}^8\text{Be})n$ на восьминуклонном кластере (${}^8\text{Be}$). Обнаружение этого пика подтверждает модель ядра ${}^9\text{Be}$, в рамках которой ядро состоит из твердого кора, подобного ядру ${}^8\text{Be}$, и слабосвязанного с ним нейтрона (n). Впервые измерена поляризация в упругом рассеянии протонов на этом коре.



Результат измерения поляризации вторичных протонов в реакции (p, p') с ядром ${}^9\text{Be}$ (синие квадраты); измеренная поляризация в упругом рассеянии протонов на ядре ${}^4\text{He}$ (желтый квадрат); K_{pN} – импульс, соответствующий максимуму квазиупругого пика в рассеянии протонов пучка на ядерных нуклонах

Обнаружение явления долгоживущей высоковозбужденной атомной изомерии

С. А. Елисеев, Ю. Н. Новиков, П. Е. Филянин –
 Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ,
 коллаборация Института ядерной физики Общества Макса Планка,
 Гейдельбергского университета им. Рупрехта – Карла и Университета Сорбонны

В системе PENTATRAP в Институте ядерной физики Общества Макса Планка в Гейдельберге с участием лаборатории физики экзотических ядер НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ наблюдалось состояние иона $^{187}\text{Re}^{29+}$, живущее дольше суток и имеющее необычайно высокую энергию возбуждения 202 ± 2 эВ. Это долгоживущее состояние было зафиксировано при измерении спектра циклотронных частот, напрямую связанных с массами нуклидов. Тщательный теоретический анализ показал, что полученные экспериментальные величины энергии и времени жизни обнаруженного состояния могут объясняться попаданием спина внешнего электрона в «спиновую ловушку», приводящим к сильному запрету распада уровня (рис. 1). Подтверждением правильности такой интерпретации послужило обнаружение аналогичного состояния

в ионе $^{187}\text{Os}^{30+}$ с энергией 207 ± 3 эВ, имеющего ту же изоэлектронную структуру.

Выполненный эксперимент закладывает начало новому направлению – долгоживущей высокоэнергетичной атомной спектроскопии. С одной стороны, он может представлять интерес в физике за пределами Стандартной модели микромира через ее составляющую – квантовую электродинамику, которая весьма чувствительна к процессам с очень высоким запретом к разрядке. С другой стороны, обнаруженная метастабильность привлекает внимание в силу практического приложения, т. к. частотный фактор разрядки (отношение частоты перехода к его ширине) превосходит на много порядков эту величину для всех известных эталонов частоты (рис. 2, на котором частотный фактор для разных нуклидов показан в зависимости от длины волны).

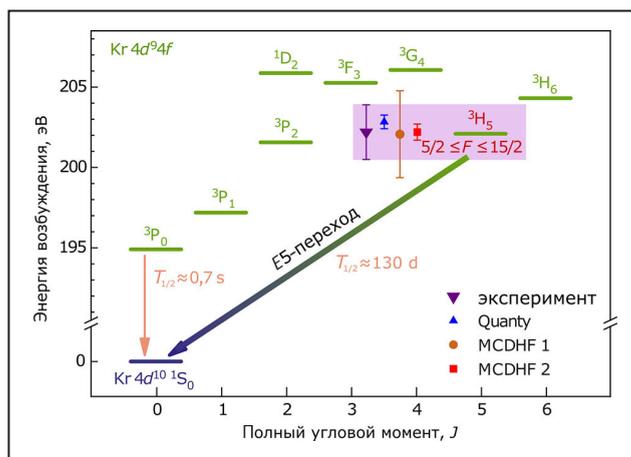


Рис. 1. Высокозапретный E5-переход с изомера

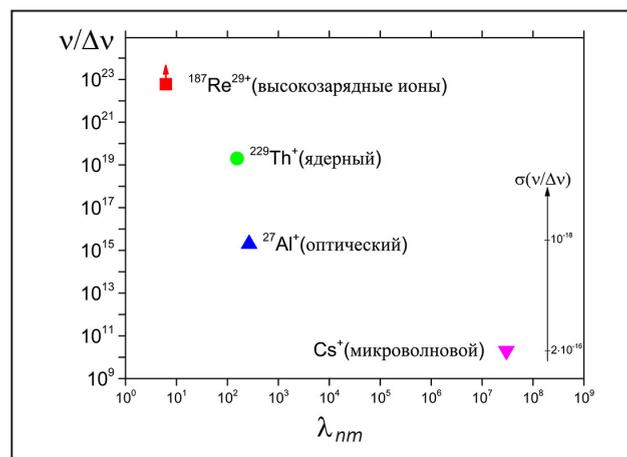


Рис. 2. Сравнение частотных качеств нуклидов

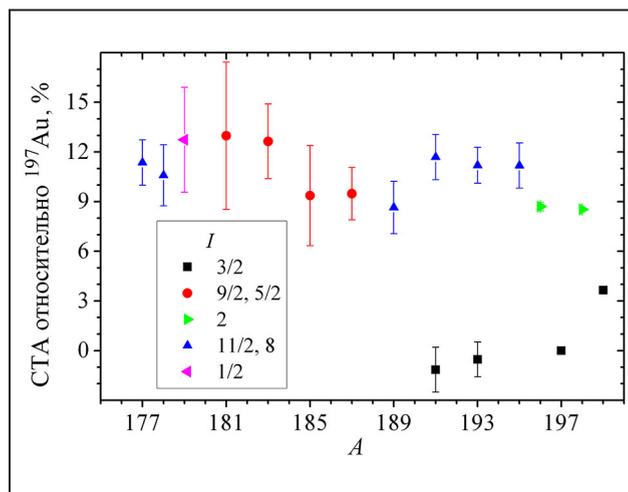
Сверхтонкая аномалия и магнитные моменты изотопов золота

А. Е. Барзах, Д. В. Федоров, П. Л. Молканов, М. Д. Селиверстов, М. Г. Козлов, Ю. А. Демидов
Отделение физики высоких энергий, Отделение перспективных разработок
НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Сверхтонкая аномалия (СТА) – явление, обусловленное неточностью атомного ядра, из-за чего отношение констант сверхтонного расщепления атомных линий для разных изотопов не совпадает с отношением соответствующих магнитных моментов. Основной вклад в СТА определяется распределением намагниченности по объему ядра. Исследование СТА позволяет получить информацию об этом распределении.

Явление СТА известно достаточно давно, однако до последнего времени экспериментальные данные о СТА ограничивались в основном стабильными и долгоживущими изотопами, что тормозило развитие теории. В наших работах новый метод получения данных о СТА впервые был использован для длинной цепочки изотопов, вплоть до ядер, удаленных от полосы стабильности на 20 массовых единиц. В основе этого метода лежит наблюдение о том, что разные атомные состояния обладают различной чувствительностью к распределению намагниченности ядра. Измеряя константы сверхтонкой структуры для атомных состояний $6s\ ^2S_{1/2}$ и $6p\ ^2P_{1/2}$ в золоте, мы получаем разности СТА для указанных атомных состояний. С помощью атомных расчетов из этих разностей получены величины СТА относительно стабильного изотопа ^{197}Au (рис.).

В ходе эксперимента методом лазерной ионизационной спектроскопии в ионном источнике проведены измерения изотопических сдвигов



Сверхтонкая аномалия в изотопах золота

и сверхтонного расщепления атомных уровней для изомерных и основных состояний ядер золота $^{177, 178, 187, 191, 193, 195}\text{Au}^m$, $^{178, 180, 182}\text{Au}^g$. Магнитные моменты исследованных ядер вычислены с учетом измеренных значений СТА, ранее измеренные магнитные моменты изотопов золота откорректированы с учетом СТА. Впервые получены данные о СТА для цепочки изотопов с самыми различными свойствами (ядра сферические, деформированные, неаксиальные, с сильным кориолисовым возмущением и т. д.), что открывает возможность для развернутого теоретического анализа факторов, влияющих на распределение намагниченности в ядре, а также для проверки атомных расчетов.

1. Barzakh A.E., ..., Demidov Yu.A., ..., Fedorov D.V., ..., Kozlov M.G., ..., Molkanov P.L., ..., Seliverstov M.D. et al. // Phys. Rev. C. 2020. V. 101. Iss. 3. P. 034308.
2. Barzakh A.E., ..., Fedorov D.V., ..., Molkanov P.L., ..., Seliverstov M.D. et al. // Phys. Rev. C. 2020. V. 101. Iss. 6. P. 064321.
3. Harding R.D., ..., Barzakh A.E., ..., Fedorov D.V., ..., Molkanov P.L., ..., Seliverstov M.D. et al. // Phys. Rev. C. 2020. V. 102. Iss. 2. P. 024312.
4. Cubiss J.G., ..., Barzakh A.E., ..., Fedorov D.V., ..., Molkanov P.L., ..., Seliverstov M.D. et al. // Phys. Rev. C. 2020. V. 102. Iss. 4. P. 044332.

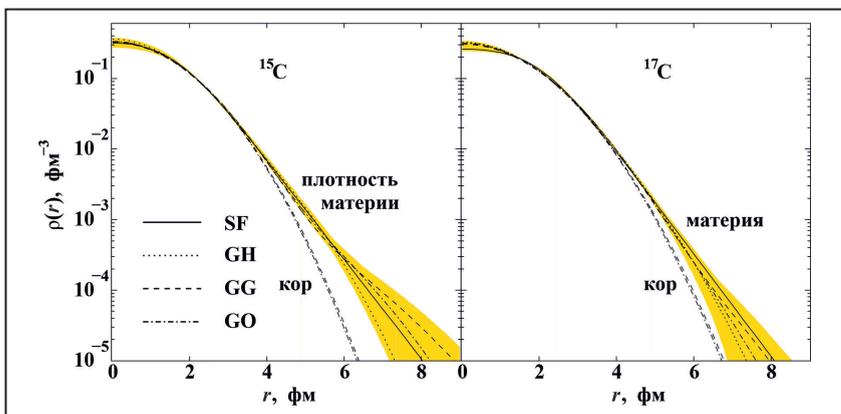
Распределения ядерной материи в нейтроноизбыточных ядрах $^{14-17}\text{C}$ из данных по упругому рассеянию протонов промежуточной энергии в инверсной кинематике

Г. Д. Алхазов, А. А. Воробьев, А. В. Добровольский, А. Г. Инглесси, Г. А. Королев, Г. Е. Петров, Л. О. Сергеев, А. В. Ханзадеев, В. И. Яцюра
 Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, коллаборация IKAR

С целью изучения пространственных распределений материи в нейтроноизбыточных ядрах $^{14-17}\text{C}$ были измерены абсолютные дифференциальные сечения упругого $p^{14-17}\text{C}$ -рассеяния в области малых углов в инверсной кинематике при энергии 0,7 ГэВ/нуклон. Эксперимент проводился в Центре по изучению тяжелых ионов им. Гельмгольца (GSI) в Дармштадте. Основной частью экспериментальной установки была созданная в НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ ионизационная камера ИКАР, которая наполнялась водородом при давлении 10 бар. ИКАР служила одновременно газовой мишенью и детектором протонов отдачи. Протоны отдачи регистрировались в ИКАР в совпадении с рассеянными частицами пучка. Анализ формы измеренных дифференциальных сечений позволяет определить распределения ядерной материи и радиусы ядерных кора и гало.

Измеренные сечения были проанализированы с использованием теории многократного рассеяния Глаубера и применением четырех параметризаций феноменологических распределений ядерной плотности, обозначенных как

SF, GH, GG, GO. Были определены средне-квадратичные радиусы ядерной материи $R_m = 2,42(5)$ фм, $R_m = 2,59(5)$ фм, $R_m = 2,70(6)$ фм и $R_m = 2,68(5)$ фм соответственно у ядер ^{14}C , ^{15}C , ^{16}C и ^{17}C . Полученные распределения плотности для ядер ^{15}C и ^{17}C показаны на рисунке. Отношение радиуса распределения валентных нуклонов R_v к радиусу кора R_c , $\kappa = R_v/R_c$, может указывать на существование гало в изученных ядрах. Теория обычно предсказывает величину $\kappa \leq 1,3$ для легких ядер без гало и значения $\kappa \approx 2$, или даже больше, для ядер с гало. Согласно данной работе для ядра ^{15}C получена величина $\kappa = 1,8$, что можно рассматривать как указание на то, что у ядра ^{15}C имеется небольшое гало. Нейтронный избыток в ^{17}C больше, чем в ^{15}C , а энергия отделения S_n валентных нейтронов в ^{17}C весьма мала, $S_n = 0,73$ МэВ, поэтому можно предположить, что у ядра ^{17}C также имеется нейтронное гало. Однако относительно малое значение параметра κ , полученное в данной работе для ^{17}C , а именно $\kappa = 1,6$, не согласуется с предположением о том, что у ядра ^{17}C имеется нейтронное гало.



Распределения плотности материи ядер ^{15}C и ^{17}C , полученные в результате анализа измеренных сечений с использованием параметризаций распределений плотности GG, GO, GH и SF

Регистрация солнечных CNO-нейтрино в эксперименте Borexino

А. В. Дербин, И. С. Драчнев, И. С. Ломская, В. Н. Муратова, Н. В. Ниязова, Д. А. Семенов, Е. В. Унжаков – Отделение нейтронных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, коллаборация Borexino

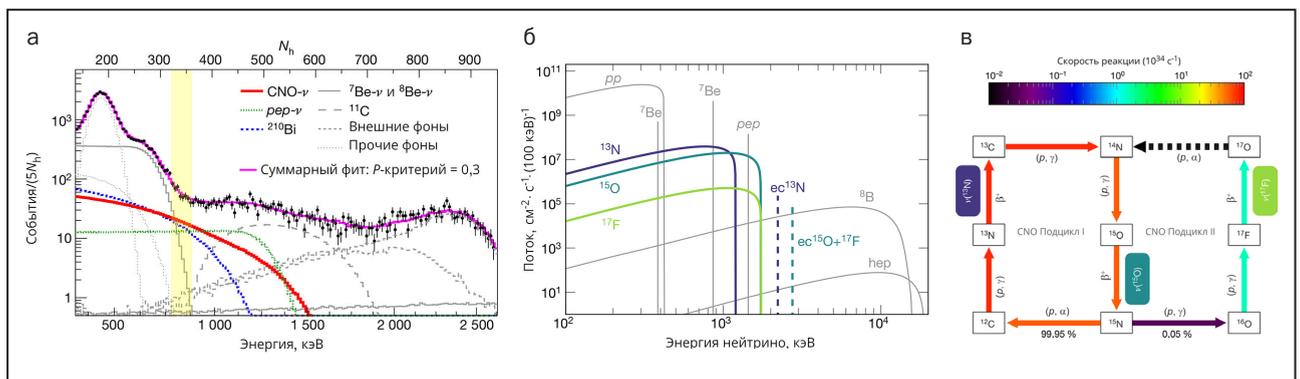
Международная коллаборация Borexino, в которой участвуют ученые НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ и НИЦ «Курчатовский институт», представила результаты обнаружения нейтрино, испускаемых в реакциях так называемого CNO-цикла на Солнце.

Ядерный синтез водорода в гелий в звездах происходит посредством двух процессов: протон-протонной (pp) цепи, включающей только изотопы водорода и гелия, и цикла «углерод – азот – кислород» (CNO), в котором синтез катализируется ядрами C, N и O. CNO-цикл производит лишь 1 % всей солнечной энергии и является второстепенным для Солнца, однако для более массивных и горячих звезд этот цикл является определяющим. Так, уже для звезд с массой полтора Солнца он отвечает за половину всей

вырабатываемой энергии. CNO-цикл, имеющий первостепенное значение для всей астрофизики, был предсказан теоретически и до сих пор не имел прямого экспериментального подтверждения. Важность CNO-нейтрино для Солнца состоит в том, что их поток сильно зависит от содержания элементов тяжелее гелия в Солнце, что позволяет различить модели Солнца с высокой или низкой металличностью.

Весомый вклад сотрудников Отделения нейтронных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ связан с измерением с высокой точностью β -спектра ^{210}Bi , знание которого необходимо для анализа вклада от CNO-нейтрино (рис.).

Работа поддержана грантом РФФИ № 19-02-00097.



Спектр сигналов Borexino (а): красная кривая – вклад, связанный с рассеянием CNO-нейтрино на электроны, синяя – фон от β -распадов ^{210}Bi ; теоретический спектр солнечных CNO-нейтрино в сравнении с нейтрино из pp -цепочки, ранее зарегистрированными в эксперименте Borexino (б); схема самых интенсивных реакций CNO-цикла (в)

1. Borexino Collab., Agostini M., Derbin A., Drachnev I., Lomskaya I., Muratova V., Semenov D., Unzhakov E. et al. // Nature. 2020. V. 587. P. 577.
2. Borexino Collab., Agostini M., Derbin A., Drachnev I., Lomskaya I., Muratova V., Semenov D., Unzhakov E. et al. // Eur. Phys. J. C. 2020. V. 80. Iss. 11. P. 1091.
3. Alekseev I.E., ..., Derbin A.V., Drachnev I.S., ..., Lomskaya I.S., Muratova V.N., Niyazova N.V., Semenov D.A., ..., Unzhakov E.V. // Phys. Rev. C. 2020. V. 102. P. 064329.

Эмиссия высокоэнергетичных протонов и фотонов и рождение подпороговых пионов в столкновениях тяжелых ионов в гидродинамическом подходе с неравновесным уравнением состояния

А. Т. Дьяченко, И. А. Митропольский

Отделение физики высоких энергий, Отделение нейтронных исследований
НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

При описании динамики столкновений тяжелых ионов промежуточных энергий использован гидродинамический подход с неравновесным уравнением состояния с учетом эффектов ядерной вязкости и поправки на микроканоническое распределение. Расчетные двойные дифференциальные сечения испускания протонов и фотонов при столкновениях различных ядер оказались в согласии с имеющимися экспериментальными данными (рис. 1). В этом подходе удалось воспроизвести высокоимпульсные распределения протонов в реакции $^{12}\text{C} + ^9\text{Be} \rightarrow p + X$ при энергии ионов ^{12}C 300, 600, 950 и 2000 МэВ/нуклон, а также энергетические спектры жестких фотонов для реакции $^{12}\text{C} + ^9\text{Be} \rightarrow \gamma + X$ при энергии ионов углерода 2 и 3,2 ГэВ/нуклон.

Понижение порога рождения пионов при столкновении тяжелых ионов происходит благодаря

коллективным эффектам и внутреннему движению нуклонов. Описание временной эволюции образующейся неравновесной области включает стадии сжатия и расширения с учетом ядерной вязкости. Вычисленные при этом энергетические спектры пионов при подпороговых энергиях реакции 84 и 94 МэВ/нуклон находятся в согласии с имеющимися экспериментальными данными (рис. 2).

Новое в данном – включение в рассмотрение эффектов ядерной вязкости, найденной нами в релаксационном приближении для кинетического уравнения. Это не добавило новых параметров при описании временной эволюции ядерных столкновений. При описании испускания протонов и фрагментов учет вязкости среды оказался несущественным, а вылет пионов весьма чувствительным к величине вязкости.

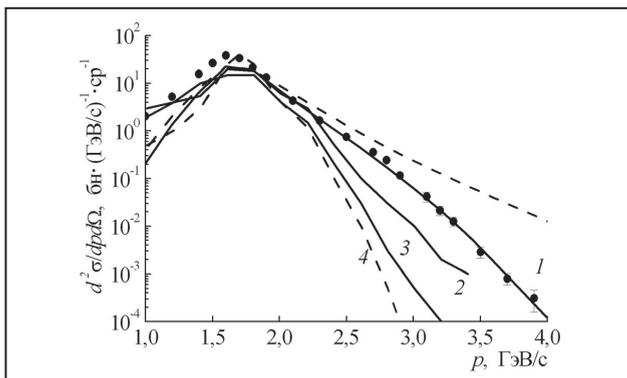


Рис. 1. Импульсное распределение протонов, испускаемых в реакции $^{12}\text{C} + ^9\text{Be} \rightarrow p + X$ под углом $3,5^\circ$ при энергии ионов ^{12}C 950 МэВ/нуклон. Сплошная кривая 1 – расчет в гидродинамическом подходе; штриховая кривая – то же, но без учета поправки на микроканоническое распределение; точки – экспериментальные данные; кривые 2–4 – результаты расчетов по транспортным кодам

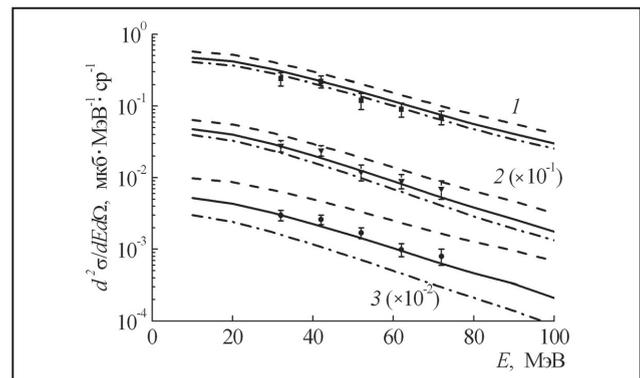
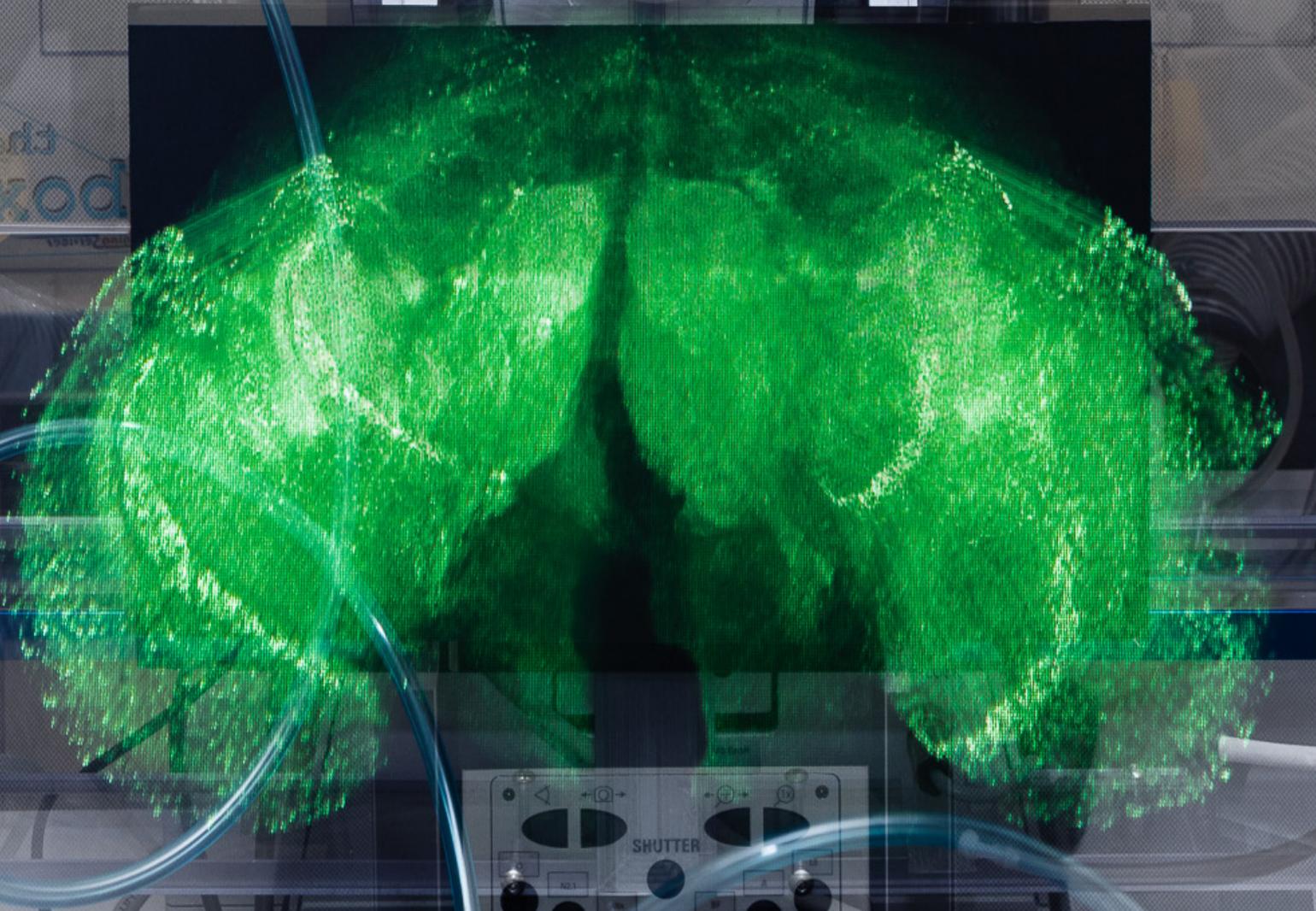
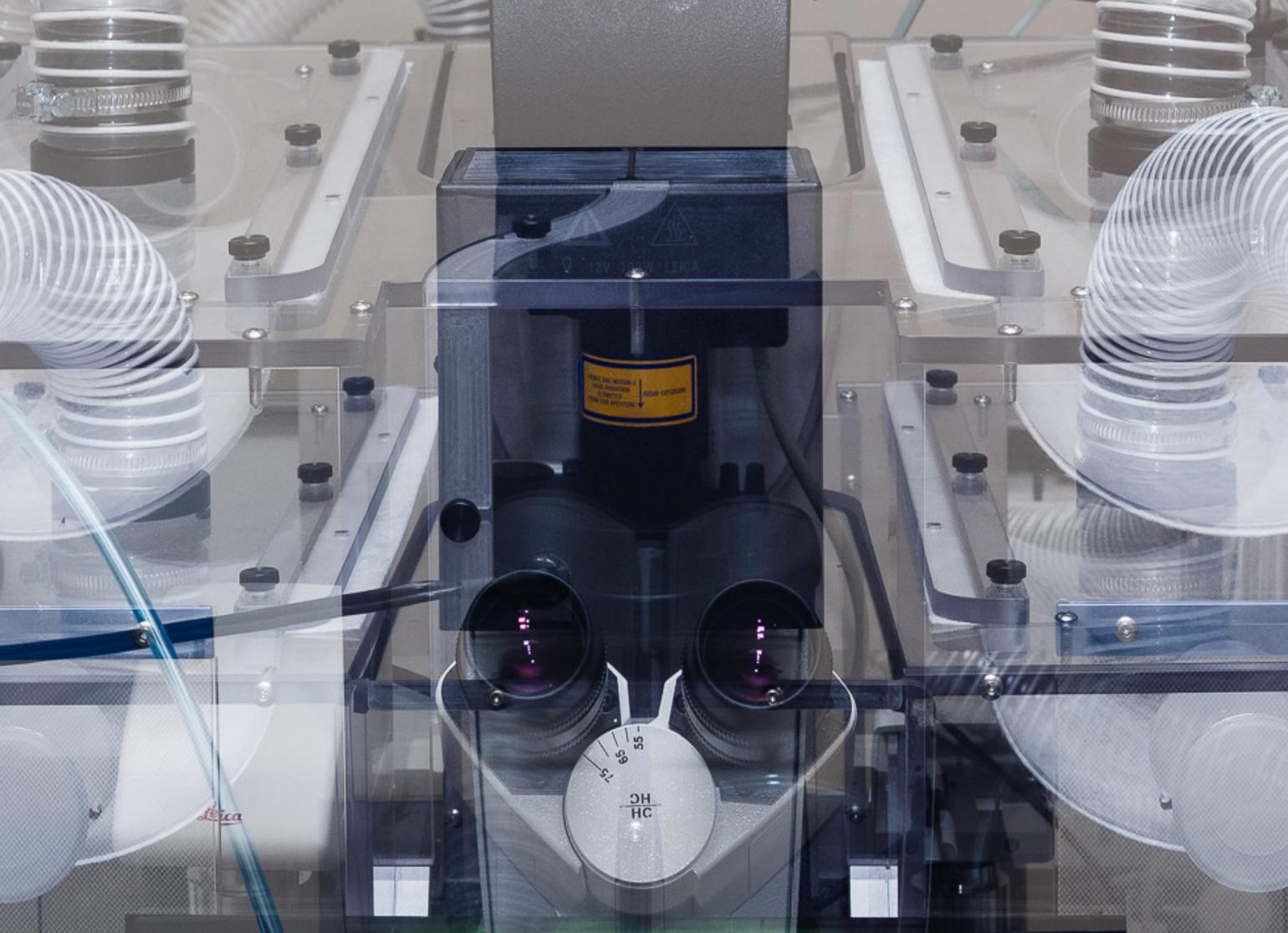


Рис. 2. Расчетные (сплошные линии) и экспериментальные (точки) инклюзивные двойные дифференциальные сечения испускания π^+ -мезонов под углом наблюдения 90° в реакциях рассеяния ионов ^{16}O с энергией 94 МэВ/нуклон на ядрах ^{27}Al (кривая 1), ^{58}Ni (кривая 2) и ^{197}Au (кривая 3). Сплошные кривые соответствуют времени релаксации $\tau = 1/(\sigma v_r)$; штриховые кривые – $\tau_1 = 3\tau/2$; штрихпунктирные кривые – $\tau_2 = 2\tau/3$

1. Дьяченко А. Т., Митропольский И. А. // ЯФ. 2020. Т. 83. С. 317–325.

2. Дьяченко А. Т., Митропольский И. А. // Изв. РАН. 2020. Т. 84. С. 508–514.



Молекулярная и радиационная биофизика

- 74 Участие гена *HIM1* дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* в безошибочной ветви пострепликативной репарации и роль Pol η в *him1*-зависимом мутагенезе
- 75 Протеом экзосом, продуцируемых глиобластомными клетками, как источник биомаркеров
- 76 Механизм улучшения ингибирующей активности макролидов по данным крио-ЭМ-структуры высокого разрешения диритромицина, связанного с 70S-рибосомой *Escherichia coli*
- 77 Как иницирующая рибосома справляется с ppGpp в процессе трансляции мРНК
- 78 Экзосомы плазмы крови у пациентов с болезнью Гоше
- 80 Апробация нового способа выделения экзосом из плазмы крови человека
- 81 Криоэлектронная микроскопия экстраклеточных везикул спинномозговой жидкости при болезни Паркинсона
- 83 Кальцифицирующие бактерии проявляют гибкость при индукции минерализации CaCO₃ в разных условиях
- 84 Экзосомы плазмы и цельной крови: поиск молекулярных механизмов участия везикул в ключевых этапах прогрессии рака молочной железы

Участие гена *HIM1* дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* в безошибочной ветви пострепликативной репарации и роль *Polη* в *him1*-зависимом мутагенезе

Е. А. Алексеева, Т. А. Евстюхина, В. Т. Пешехонов, В. Г. Королев

Отделение молекулярной и радиационной биофизики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

У эукариот толерантность к повреждениям ДНК определяется двумя путями репарации: гомологичной рекомбинационной репарацией и путем, контролируемым RAD6-эпистатической группой генов. Моноубиквитинирование PCNA опосредует путь, подверженный ошибкам, тогда как полиубиквитинирование стимулирует путь без ошибок. Безошибочный путь включает компоненты рекомбинационной репарации, однако факторы, которые действуют на этом пути, остаются в значительной степени неизвестными.

Ответ на повреждение ДНК хорошо охарактеризован у дрожжей *Saccharomyces cerevisiae*. Он включает три группы белков, участвующих в различных типах репарации ДНК, которые называются эпистатическими группами: RAD3, RAD52 и RAD6.

Чтобы проверить гипотезу о том, что ген *HIM1* может участвовать в контроле безошибочной ветви пострепликативной репарации (RAD6-путь), мы удалили ген *MMS2* из мутанта *him1* и штамма дикого типа. УФ-индуцированный мутагенез у штамма *mms2* заметно ниже, чем у *him1*, но близок к уровню мутагенеза у штамма дикого типа. Мы показали, что *mms2Δ* эпистатирует к *him1Δ*, а УФ-индуцированный мутагенез в мутанте *him1Δ* зависит от *Mms2*. Эти результаты убедительно свидетельствуют о том, что ген *HIM1* участвует в безошибочной ветви обхода повреждений.

Мы предположили, что причиной *him1*-опосредованного УФ-индуцированного мутагенеза является замена *Polδ* на высокоошибочную *Polη* во время синтеза ДНК в брешах, образующихся после разрушения D-петли. Мы

удалили ген *RAD30*, который кодирует *Polη* в штамме дикого типа и мутанте *him1*. УФ-индуцированный мутагенез в двойном мутанте *him1 rad30* был таким же, как и у одиночного мутанта *rad30*.

На основании этих результатов можно предположить, что в процессе пострепликативной репарации в мутанте *him1* *Polη* осуществляет репаративный синтез в незаполненных брешах. Чтобы понять роль *Polη* в *him1*-зависимом мутагенезе, были определены спектры мутаций в локусе *CAN1* у штаммов *him1* и двойном мутанте *him1 rad30* после облучения UVC. Полученные данные показывают значительную роль *Polη* в *him1*-зависимом мутагенезе.

Чтобы проверить гипотезу о том, что концентрация dNTP регулирует выбор полимеразы для удлинения D-петли, мы исследовали УФ-облученные клетки *him1* на повышенную экспрессию гена *RNR3*. Экспрессия *RNR3* увеличивается в клетках дикого типа семикратно. Как следствие, концентрация dNTP также значительно увеличивалась, в то время как в мутанте *him1* увеличение не превышало двукратного.

Наши эксперименты показали, что значительное повышение уровня dNTP подавляет *him1*-зависимый мутагенез. Таким образом, это исследование идентифицирует ген *HIM1* как новый член безошибочного пути толерантности к повреждениям ДНК. Интересно, что механизм безошибочного пути обхода повреждений ДНК в мутанте *him1* действует через привлечение полимеразы *Polη* для осуществления репаративного синтеза ДНК во время пострепликативной репарации генома.

Протеом экзосом, продуцируемых глиобластомными клетками, как источник биомаркеров

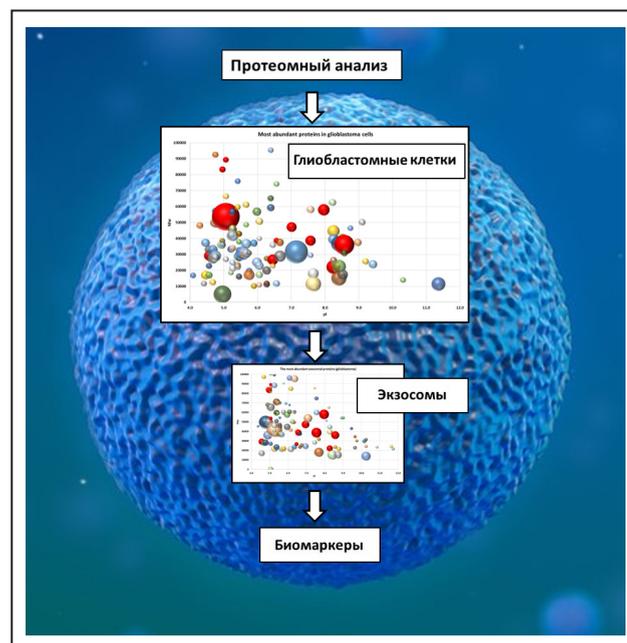
С. Н. Нарыжный, А. В. Волницкий, В. Ю. Байрамуков, Л. А. Гараева, Т. А. Штам –
Отделение молекулярной и радиационной биофизики,
Отделение нейтронных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ,
А. Т. Копылов, Е. С. Зорина – Научно-исследовательский институт
биомедицинской химии им. В. Н. Ореховича,
Р. А. Камышинский – НИЦ «Курчатовский институт»,
А. Г. Шлихт – Дальневосточный федеральный университет

Экстраклеточные везикулы (ЭВ) участвуют в важных процессах развития мультиформной глиобластомы, включая злокачественную трансформацию и инвазию. ЭВ, секретлируемые клетками глиобластомы, могут преодолевать гематоэнцефалический барьер и переносить молекулярный груз, полученный из опухоли, в периферическое кровообращение. Таким образом, определение молекулярного состава ЭВ (экзосом), высвобождаемых клетками глиобластомы, представляется перспективным подходом для разработки неинвазивных методов обнаружения специфических маркеров экзосомальных белков в периферической крови.

Целью настоящего исследования было определение общих экзосомных белков, представленных в препаратах из разных клеточных линий, и поиск потенциальных биомаркеров глиобластомы в экзосомах. Мы провели протеомный анализ экзосом (рис.), полученных из кондиционированной культуральной среды пяти линий клеток глиобластомы. Был сформирован список из 133 белков, общих для всех этих образцов. На основании полученных данных были построены карты виртуального двумерного электрофореза белков, представленных в экзосомах клеток глиобластомы, и проведен анализ онтологии генов

белков экзосом. Обнаружена корреляция между повышенным уровнем белков глиальных клеток и их присутствием в экзосомах.

Таким образом, было подтверждено присутствие многих потенциальных биомаркеров глиобластомы в экзосомах.



Графическое отображение использованного протеомного анализа

Механизм улучшения ингибирующей активности макролидов по данным крио-ЭМ-структуры высокого разрешения диритромицина, связанного с 70S-рибосомой *Escherichia coli*

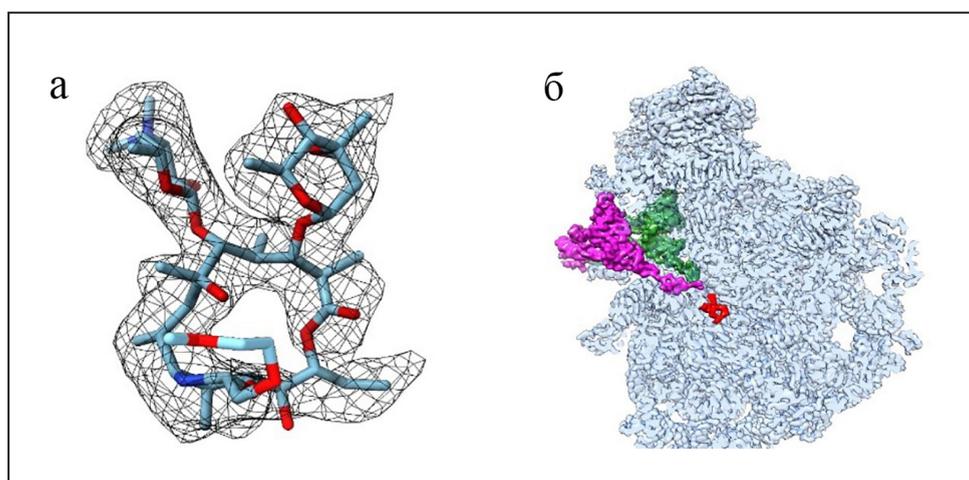
Е. Б. Пичкур, Е. В. Полесскова, П. С. Касацкий, А. Г. Мясников, А. Л. Коневега
Отделение молекулярной и радиационной биофизики
НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Возникновение и распространение бактериальных штаммов, устойчивых к применяемым антибиотикам, приобретает угрожающие масштабы. Одним из вариантов решения данной проблемы является изучение молекулярного механизма действия известных антибиотиков для направленного улучшения применяемых в терапии веществ. Целью настоящего исследования являлось изучение биохимических и структурных аспектов связывания антибиотика диритромицина (ДИР) с бактериальной рибосомой (рис.) для объяснения улучшенной биологической активности ДИР по сравнению с его предшественником эритромицином (ЭРИ).

Основная отличительная особенность ДИР от ЭРИ – наличие гидрофобного радикала, который, очевидно, и является причиной двукратного увеличения ингибиторной активности данного антибиотика по сравнению с ЭРИ. Биохимические исследования показали, что наличие гидрофобного радикала не приводит к повышению прочности связывания ДИР с рибосомами,

а структурные данные указывают на то, что ДИР образует только канонические контакты, ранее обнаруженные для ЭРИ. Основываясь на данных, полученных при помощи крио-ЭМ, мы предполагаем, что более выраженное ингибирование биосинтеза белка является следствием расположения гидрофобного радикала ДИР: он направлен в просвет выходного туннеля, частично его закрывает, что приводит к нарушению нормального прохождения растущего пептида сквозь туннель, и ингибирует синтез полипептидной цепочки.

Таким образом, анализ структуры функционально-активного рибосомного комплекса методом крио-ЭМ позволил выяснить молекулярный механизм повышенной ингибиторной активности антибиотика ДИР. Разрешение полученного комплекса 2,1 Å является на сегодняшний день рекордным среди опубликованных крио-ЭМ-структур рибосомных комплексов и может стать фундаментом для их дальнейших исследований.



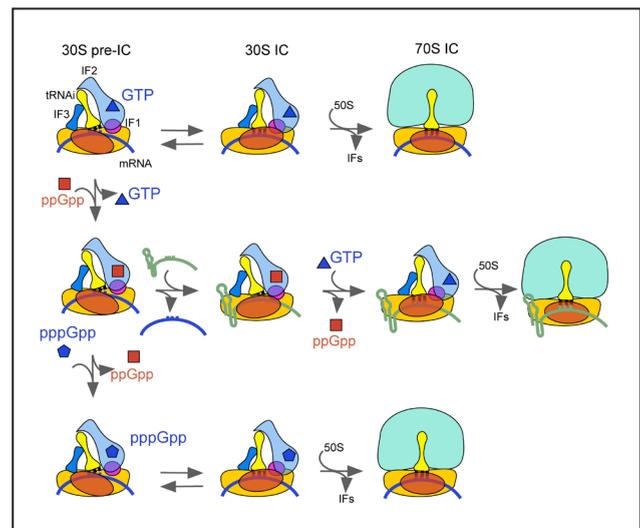
Структура диритромицина (ДИР) в комплексе с 70S-рибосомой: а – карта кулоновского потенциала ДИР (черная сетка); в модели соединения атомы углерода окрашены в голубой цвет, азота – в синий, кислорода – в красный; б – расположение ДИР (красный) на большой рибосомной субъединице (светло-голубой). тРНК в А- и Р-сайтах показаны пурпурным и зеленым цветами соответственно

Как иницирующая рибосома справляется с ppGpp в процессе трансляции мРНК

Д. С. Виноградова, Е. М. Максимова, П. С. Касацкий, Е. В. Полесскова, А. Л. Коневега – Отделение молекулярной и радиационной биофизики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, V. Zegarra, J. Alberto Nakamoto, P. Milon – Centre for Research and Innovation, Faculty of Health Sciences of Peruvian University of Applied Sciences

Для эффективной борьбы с патогенами необходимо понимание молекулярного механизма наиболее уязвимых процессов жизнедеятельности клетки. При возникновении стрессовых условий, таких как аминокислотное голодание, резкие перепады температуры, недостаток фосфора, железа или жирных кислот, активируется механизм строгого ответа, и клетка выживает за счет экономии своих ресурсов. Строгий ответ опосредуется накоплением в клетке большого количества малой регуляторной молекулы гуанозинтетрафосфата – ppGpp. Сложившаяся гипотеза о регулировании клеточной активности в неблагоприятных условиях среды через этап транскрипции не давала ответа на вопрос о том, каким образом бактериальная клетка сохраняет возможность синтеза жизненно важных для нее белков.

В своей работе мы определили новое направление действия строгого ответа через этап трансляции и выявили ключевую роль молекулы матричной РНК. Мы показали ингибирующий механизм действия молекулы ppGpp на процесс инициации трансляции, который является динамическим и зависит от матричной РНК, участвующей в образовании инициаторного комплекса (рис.). Наличие специального структурированного участка в 5'-нетранслируемой области мРНК определяет устойчивость к ингибирующему действию гуанозинтетрафосфата. Кроме того, впервые было показано, что при повышенной концентрации молекулы ppGpp в неблагоприятных



Модель инициации трансляции во время строгого ответа

условиях клетка может использовать pppGpp для иницирования процесса биосинтеза белка. Однако в данном случае для эффективного образования инициаторного комплекса требуется больше ресурсов.

В рамках данной работы с использованием передовых методик флуоресцентной спектроскопии: остановленного потока и микротермофореза – мы создали систему чувствительного, быстрого и точного анализа взаимодействий биомолекул в процессе инициации трансляции, что открывает для нас новые возможности в изучении влияния лигандов, а также действия малых молекул, таких как антибиотики, на процесс биосинтеза белка.

Экзосомы плазмы крови у пациентов с болезнью Гоше

*Т. А. Штам, С. Н. Нарыжный, Д. Г. Кулабухова, Л. А. Гараева, К. А. Сенкевич,
С. Б. Ланда, Е. Ю. Варфоломеева, Н. А. Верлов, Т. С. Усенко, А. Л. Шварцман,
Е. Ю. Захарова, А. К. Емельянов, С. Н. Пчелина –*

*Отделение молекулярной и радиационной биофизики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ,
Т. А. Штам, Л. А. Гараева, Р. А. Камышинский, С. Н. Пчелина – НИЦ «Курчатовский институт»,
С. Н. Нарыжный, А. Т. Копылов, Е. С. Зорина – Научно-исследовательский институт
биомедицинской химии им. В. Н. Ореховича*

Ранее нами показано накопление нейротоксичных форм α -синуклеина в плазме крови пациентов с болезнью Гоше (БГ), обусловленной мутациями в гене лизосомного фермента глюкоцереброзидазы (*GBA*), и обратная корреляция их уровня с активностью данного фермента. Известно, что мутации в гене *GBA* повышают риск развития болезни Паркинсона (БП) в 6–7 раз во всех популяциях. Однако следует отметить, что БП развивается не у всех носителей мутаций и не у всех пациентов с БГ. Понимание молекулярных основ развития заболевания будет способствовать разработке новых методов лечения данных патологий.

Доминирующей в настоящее время гипотезой является влияние дисфункции лизосом на формирование и распространение нейротоксических форм белка α -синуклеина. Предполагается, что в распространении α -синуклеина могут принимать участие экстраклеточные везикулы размером 40–100 нм (экзосомы). Так как функция лизосом является критичной для секреции экзосом клетками, мы предположили, что дисфункция лизосом, происходящая вследствие снижения активности *GBA*, может влиять на пул экстраклеточных везикул плазмы крови.

Мы сопоставили размер и белковый состав экстраклеточных везикул, полученных из плазмы крови от восьми пациентов с БГ и восьми человек контрольной группы. Экстраклеточные везикулы выделяли методом последовательного ультрацентрифугирования. Выделенные везикулы были охарактеризованы с использованием

криоэлектронной микроскопии (рис. 1), анализа траектории наночастиц (NTA-анализа) и методом динамического светорассеяния (ДНС). Присутствие маркера экзосом белка теплового шока 70 (БТШ 70) и тетраспонинов было оценено с использованием методов вестерн-блоттинга и точной цитометрии. Белковый состав экзосом (протеом экзосом) был оценен с использованием масс-спектрометрии (shotgun analysis).

Мы впервые описали увеличенный размер и измененную морфологию экзосом, полученных из плазмы крови пациентов с БГ (рис. 2). Увеличенный размер экзосом пациентов с БГ, по сравнению с лицами контрольной группы, был продемонстрирован при проведении криоэлектронной микроскопии и ДНС ($p < 0,0001$, $p < 0,001$ соответственно) и подтвержден при оценке mode size с использованием NTA ($p < 0,02$). Криоэлектронная микроскопия продемонстрировала увеличение количества двух- и многослойных везикул в плазме крови пациентов с БГ.

Мы показали увеличение уровня поверхностных маркеров (CD9, CD63, CD81) и БТШ 70 на поверхности экзосом у пациентов с БГ. Протеомный профайлинг белкового состава экзосом не выявил белков, ранее ассоциированных с БП. Впервые показано, что дисфункция лизосом при БГ может приводить к выраженному изменению в размере и морфологии экзосом плазмы крови.

Исследование поддержано грантами РФФИ № 18-015-00262А и РНФ № 19-15-00315, 19-74-20146.

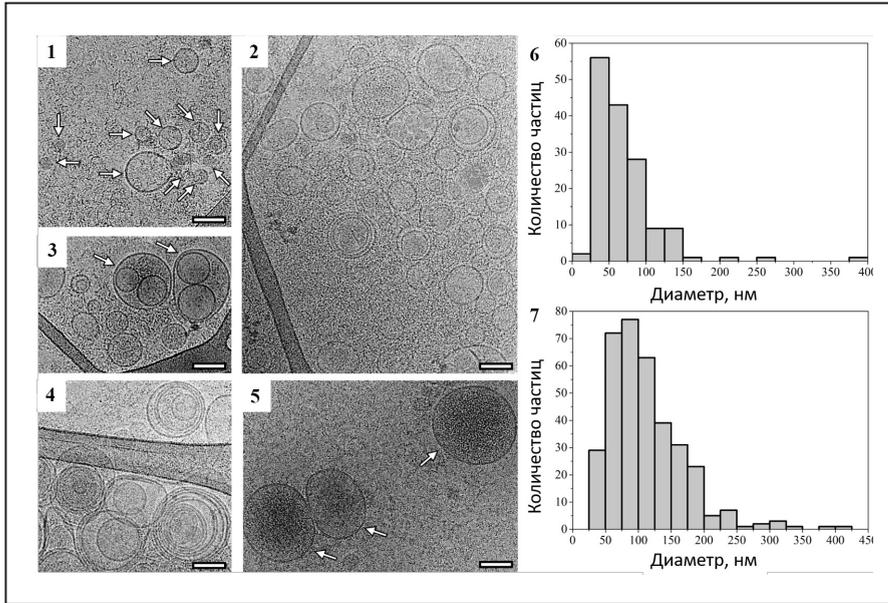


Рис. 1. Результат криоэлектронной микроскопии экстраклеточных везикул, выделенных из плазмы крови пациента контрольной группы (1) и пациента с болезнью Гоше (2, 5); везикулы с выраженным изменением электронной плотности (3, 5); многослойные везикулы (4). Масштаб – 100 нм. Распределение везикул по размеру: 6 – пациент контрольной группы; 7 – пациент с болезнью Гоше

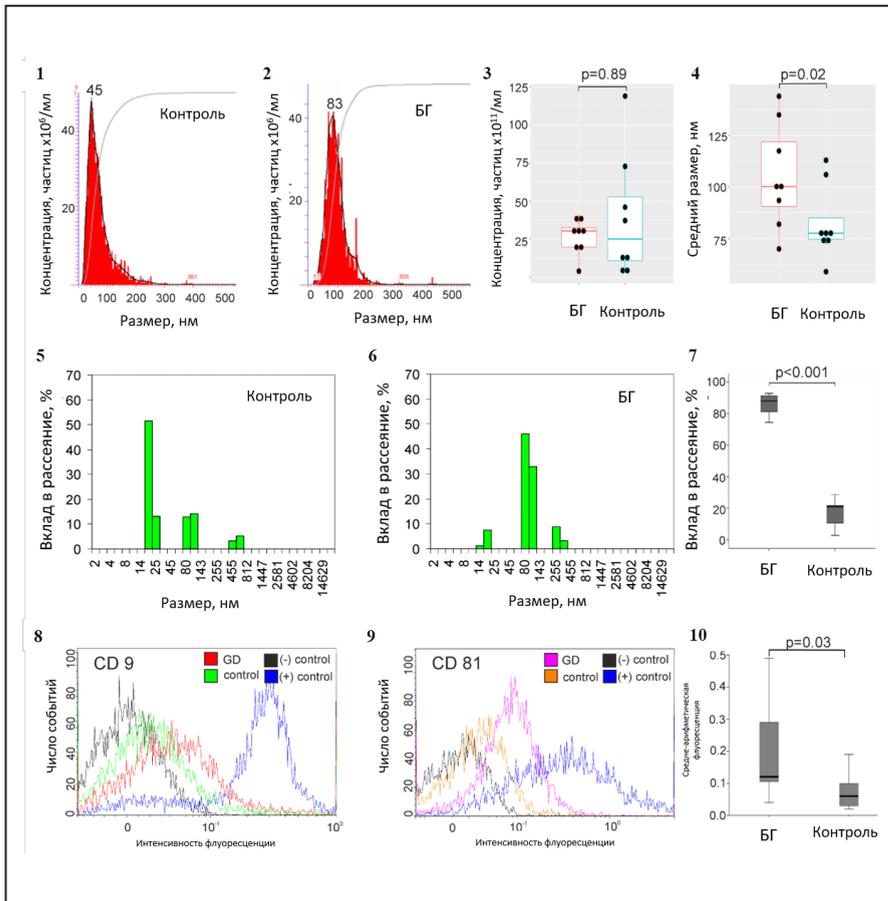


Рис. 2. Характеристика экстраклеточных везикул, полученных из плазмы крови пациентов с болезнью Гоше (БГ) и лиц контрольной группы. Определение размера и концентрации методом NTA: 1 – пациент контрольной группы; 2 – пациент с БГ. Различий в концентрации между группами не наблюдали (3), в то время как выявили изменение размера ($p = 0,02$) (4). Результаты характеристики методом ДЛС: 5 – пациент контрольной группы; 6 – пациент с БГ (ось X – диаметр частиц, нм; ось Y – вклад в картину рассеяния, %); 7 – вклад в рассеяние частиц размером 100 нм в диаметре выше в группе пациентов с БГ, чем у лиц контрольной группы ($p < 0,001$). Результаты проточной цитометрии на поверхностные маркеры экзосом CD9 (8) и CD81 (9) пациента с БГ и пациента контрольной группы. Интенсивность флуоресценции выше у пациентов с БГ, чем у лиц контрольной группы (10)

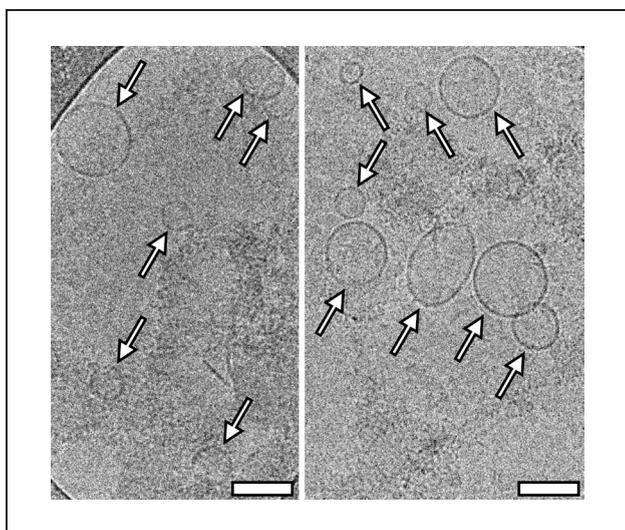
Апробация нового способа выделения экзосом из плазмы крови человека

Т. А. Штам, Я. А. Забродская, Н. А. Верлов, В. С. Бурдаков, Л. А. Гараева, А. Л. Коневега – Отделение молекулярной и радиационной биофизики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, В. И. Евтушенко – Российский научный центр радиологии и хирургических технологий им. акад. А. М. Гранова, Р. А. Камышинский – НИЦ «Курчатовский институт», Р. Б. Самсонов, Л. М. Забегина, М. А. Слюсаренко, Н. С. Никифорова, А. В. Малек – Национальный медицинский исследовательский центр онкологии им. Н. Н. Петрова Минздрава России

В исследовании проведен сравнительный анализ четырех методов выделения внеклеточных везикул из плазмы крови человека, описанных ранее в литературе: 1) последовательного ультрацентрифугирования, 2) ультрацентрифугирования с использованием «подушки» сахарозы, 3) агглютинации везикул лектинами растительного происхождения, 4) иммунопреципитации на латексных частицах.

Кроме того, разработан и апробирован новый способ выделения внеклеточных везикул из плазмы крови с использованием реагента SubX™. Метод основан на создании крупных конгломератов везикул за счет взаимодействия фосфатных групп мембранных фосфолипидов, возникающего в присутствии SubX™. Эти крупные агрегаты могут быть седиментированы центрифугированием при относительно невысоких оборотах. Добавление к полученному осадку избытка соли приводит к освобождению из агрегатов индивидуальных везикул. Размерные характеристики частиц, выделенных с помощью реагента SubX™, попадают в размеры, принятые для экзосом в литературе. Однако, по данным анализа траекторий наночастиц, концентрация частиц, выделенных в присутствии SubX™, значительно ниже, чем концентрация везикул, выделенных одним из традиционных способов.

Для оценки структуры везикулы, выделенные в присутствии реагента SubX™, были визуализированы с помощью криоэлектронной



Криоэлектронные микрофотографии экзосом, выделенных из плазмы крови разработанным новым методом с использованием реагента SubX™. Масштабные отрезки – 100 нм

микроскопии (рис.). На репрезентативных фрагментах изображений отчетливо видны везикулы, ограниченные двухслойной биологической мембраной. Размер визуализируемых частиц около 100 нм, что соответствует размеру везикул экзосомального происхождения.

В целом полученные результаты демонстрируют наличие своих достоинств и недостатков у каждого способа выделения везикул. Однако новый способ выделения экзосом с использованием реагента SubX™ вполне может быть выбран как рутинный метод выделения экзосом из плазмы крови человека.

Криоэлектронная микроскопия экстраклеточных везикул спинномозговой жидкости при болезни Паркинсона

А. К. Емельянов, Т. А. Штам, Л. А. Гараева, Н. А. Верлов, И. В. Милюхина, С. Н. Пчелина, А. Л. Коневега – Отделение молекулярной и радиационной биофизики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ,

А. К. Емельянов, И. В. Милюхина, А. В. Кудреватых, С. Н. Пчелина – Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. акад. И. П. Павлова,

Т. А. Штам, Р. А. Камышинский, Л. А. Гараева, Н. А. Верлов, С. Н. Пчелина, А. Л. Коневега – НИЦ «Курчатовский институт»,

Р. А. Камышинский – ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Московский физико-технический институт,

Л. А. Гараева, А. Л. Коневега – Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,

И. В. Милюхина, А. В. Кудреватых, С. Н. Пчелина – Институт экспериментальной медицины, Г. В. Гаврилов – Военно-медицинская академия им. С. М. Кирова МО РФ,

Ю. М. Забродская – Российский научно-исследовательский нейрохирургический институт им. проф. А. Л. Поленова

В настоящее время считается, что образование фибрилл альфа-синуклеина является ключевым звеном патогенеза болезни Паркинсона (БП), а агрегаты данного белка обладают трансмиссивностью и способны распространяться от клетки к клетке посредством экстраклеточных везикул (ЭВ). Показано, что размер и морфология ЭВ могут влиять на диффузионные свойства везикул и, возможно, на распространение α -синуклеиновой патологии при БП. В связи с этим изучение данных характеристик представляется актуальной задачей для понимания роли ЭВ в патогенезе рассматриваемого заболевания.

В настоящем исследовании в качестве объекта изучения были использованы ЭВ, выделенные с использованием ультрацентрифугирования из спинномозговой жидкости (СМЖ) пациентов с БП ($N = 7$, средний возраст – $67,6 \pm 7,8$ года) и лиц контрольной группы ($N = 7$, средний возраст – 48 ± 7 лет). Группа сравнения состояла из пациентов с различными нейрохирургическими патологиями и не страдающих паркинсонизмом: эпидермоидная киста ($N = 1$), вазоневральный конфликт ($N = 2$), постгипоксическая энцефалопатия ($N = 2$), субарахноидальное

кровоизлияние ($N = 1$), арахноидальная киста ($N = 1$). Все образцы ЭВ были охарактеризованы с использованием анализа траекторий наночастиц (nanoparticle tracking analysis – NTA), проточной цитофлуориметрии и криоэлектронной микроскопии. На основании размера везикул и наличия экзосомального маркера CD9 на их поверхности было показано, что большинство ЭВ в исследуемых образцах представлены в виде экзосом. Как в группе пациентов с БП, так и в группе сравнения был описан широкий спектр ЭВ СМЖ различного размера и морфологии (рис. 1, 2). При этом большинство везикул определенной формы обнаруживалось в обеих исследуемых группах. Также в образцах ЭВ как пациентов с БП, так и лиц контрольной группы было выявлено увеличение размера многослойных ЭВ по сравнению с одиночными везикулами ($p < 0,0001$).

Таким образом, проведенное исследование позволило впервые описать морфологическое разнообразие ЭВ СМЖ человека, включая группу пациентов с БП, а также предположить наличие в биологических жидкостях человека субпопуляций ЭВ, потенциально обладающих различными специфическими функциями.

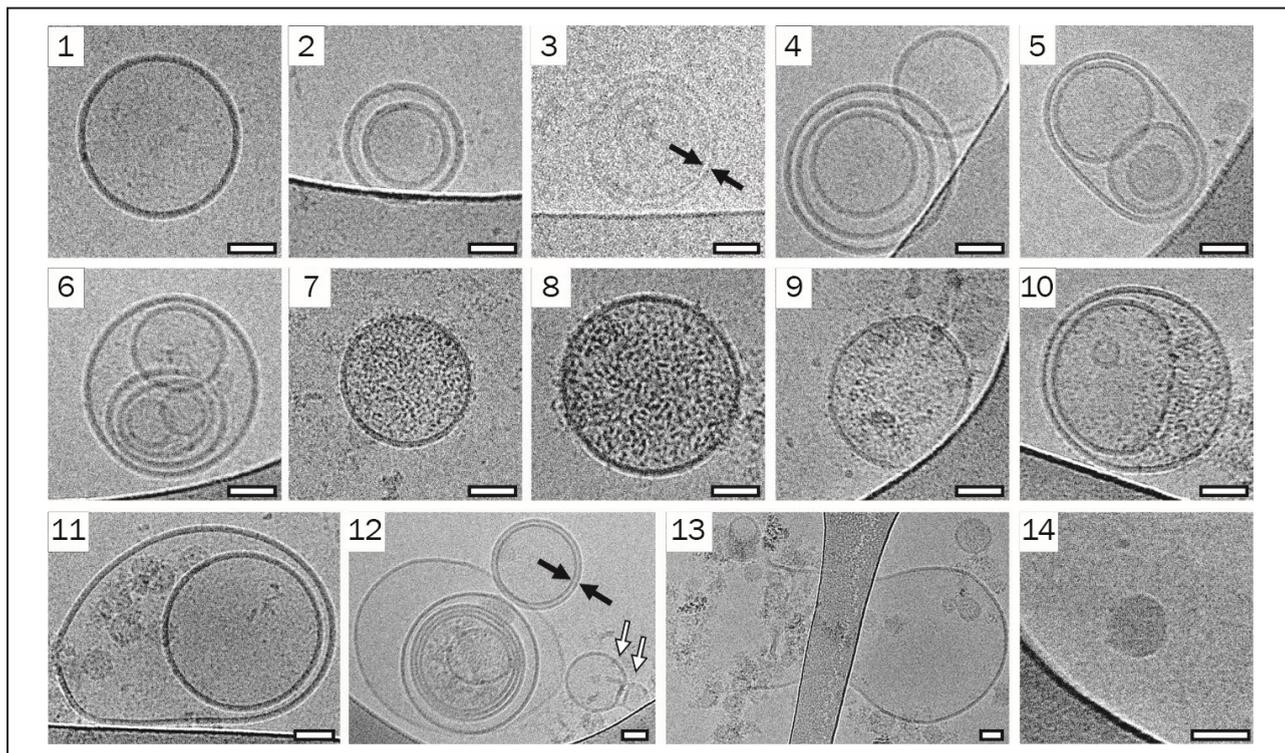


Рис. 1. Криоэлектронные микрофотографии экстраклеточных везикул, выделенных из пулированной спинномозговой жидкости пациентов с болезнью Паркинсона: 1 – одиночные; 2, 11 – двойные; 3, 12 – с двойной мембраной; 3–6, 12 – многослойные; 7–10, 12 – с повышенной электронной плотностью внутри; 11, 13 – с разорванной мембраной; 14 – частицы с повышенной электронной плотностью, но без мембраны. Указаны везикулы с двойной мембраной (черные стрелки) и везикула в виде кегли (белые стрелки). Масштабные отрезки – 50 нм

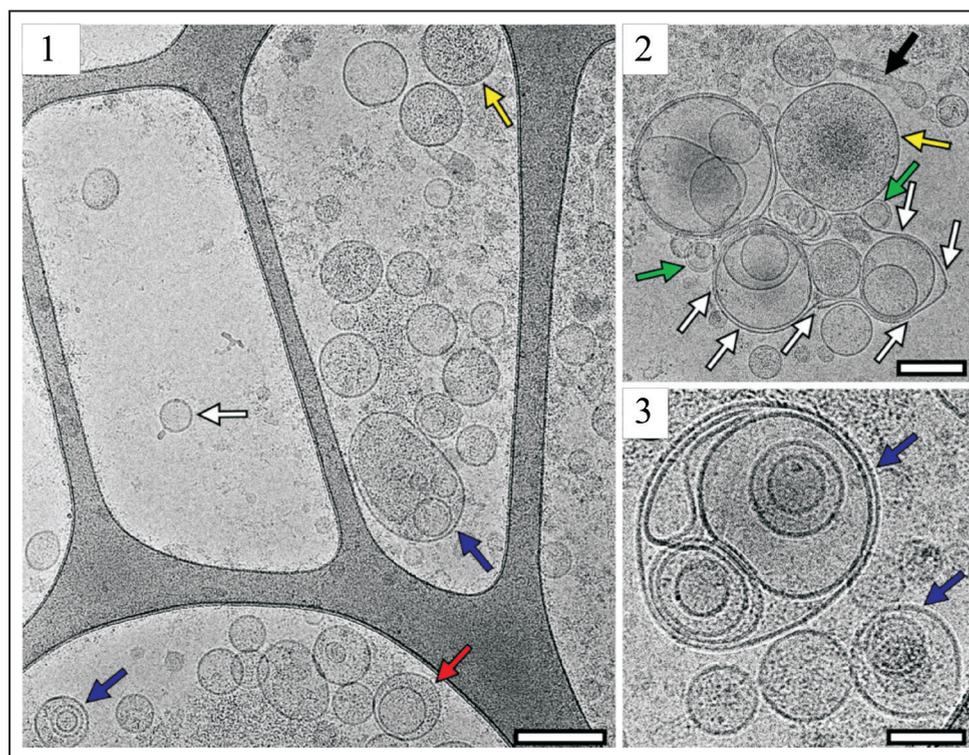


Рис. 2. Криоэлектронные микрофотографии экстраклеточных везикул, выделенных из пулированной спинномозговой жидкости лиц группы сравнения: 1 – одиночные (белая стрелка), двойные (красная стрелка), многослойные (синие стрелки) и с повышенной электронной плотностью внутри (желтая стрелка); 2 – с двойной мембраной (зеленые стрелки), с повышенной электронной плотностью внутри (желтая стрелка), в виде «мешочка» (белые стрелки), удлиненные (черная стрелка); 3 – многослойные (синие стрелки). Масштабные отрезки составляют 200 нм для рисунков 1, 2 и 100 нм для рисунка 3

Кальцифицирующие бактерии проявляют гибкость при индукции минерализации CaCO_3 в разных условиях

Д. А. Головкина, Е. В. Журишкина, Л. А. Иванова, К. С. Бобров, А. А. Кульминская, А. Е. Соколов, Г. П. Копица – Отделение молекулярной и радиационной биофизики, Отделение нейтронных исследований, Курчатовский геномный центр НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, А. Е. Баранчиков – Институт общей и неорганической химии им. Н. С. Курнакова РАН, А. Э. Машарский – Ресурсный центр «Развитие молекулярных и клеточных технологий» Научного парка Санкт-Петербургского государственного университета, Н. В. Цвигун – ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН

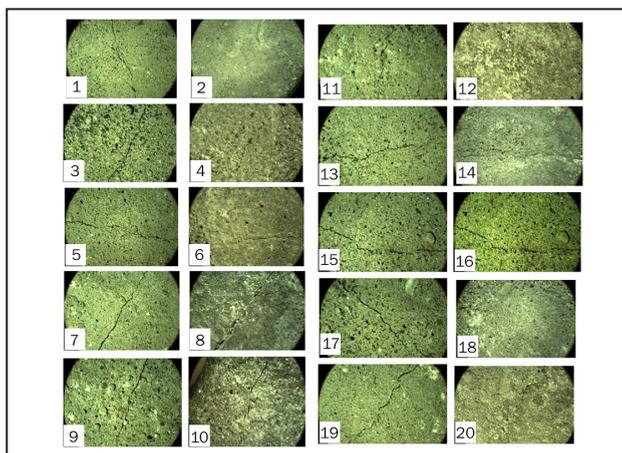
Индукцированные микроорганизмами осаждение и кристаллизация CaCO_3 – альтернативная «зеленая» технология самовосстановления цементосодержащих материалов, представляющая собой основу для разработки новых биоматериалов, но некоторые вопросы о роли бактерий в индукции зарождения, роста и агрегации биогенных кристаллов CaCO_3 остаются дискуссионными.

Нашей целью был поиск уреолитических кальцифицирующих микроорганизмов и анализ их способности к биоминерализации карбоната кальция во время их роста в средах с добавлением мочевины и без нее. Было обнаружено девять микроорганизмов с высоким уровнем удельной активности уреазы, а резкое повышение pH среды, содержащей мочевины, приводило к эффективной биоминерализации CaCO_3 . В среде с дефицитом мочевины все уреолитические бактерии также вызывали осаждение CaCO_3 , хотя и при более низких значениях pH. Было обнаружено, что пять штаммов (*Bacillus licheniformis* DSMZ 8782, *B. cereus* 4b, *Staphylococcus epidermidis* 4a, *Micrococcus luteus* BS52, *M. luteus* 6) полностью восстанавливают микротрещины в образцах цемента (рис.).

Тщательные исследования наиболее перспективного штамма *B. licheniformis* DSMZ 8782 выявили более низкую скорость полиморфной трансформации карбоната кальция в среде с дефицитом мочевины, чем в среде, содержащей мочевины. Мы предполагаем, что уреолитичес-

кие микроорганизмы сохраняют свою способность индуцировать биоминерализацию CaCO_3 независимо от происхождения карбонат-ионов в клеточной среде, переключаясь между механизмами деградации мочевины и диссимиляции органических солей кальция.

Работа выполнена при финансовой поддержке Курчатовского геномного центра НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ в рамках программы развития центров генетических исследований мирового уровня, соглашение № 075-15-2019-1663.



Типичные микрофотографии заполнения микротрещин выбранными штаммами. Слева – незаполненные трещины, справа – те же трещины после культивирования бактерий на поверхности образцов в течение месяца:

1, 2 – *B. licheniformis* DSMZ 8782; 3, 4 – *B. cereus* 4b; 5, 6 – *B. cereus* 168; 7, 8 – *B. cereus* BSP; 9, 10 – *E. coli* DH5 α , отрицательный контроль; 11, 12 – *S. epidermidis* 4a; 13, 14 – *M. luteus* 6; 15, 16 – *B. subtilis* 170; 17, 18 – *M. luteus* BS52; 19, 20 – *B. subtilis* K51

Экзосомы плазмы и цельной крови: поиск молекулярных механизмов участия везикул в ключевых этапах прогрессии рака молочной железы

Т. А. Штам – Отделение молекулярной и радиационной биофизики
НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ,
М. Ю. Коношенко, К. В. Проскура, О. С. Тутанов, С. Н. Тамкович –
Институт химической биологии и фундаментальной медицины СО РАН,
Г. Д. Сагарадзе, А. Ю. Ефименко – Московский государственный университет
им. М. В. Ломоносова,
Е. И. Орлова, А. Ю. Александрова – Национальный медицинский исследовательский центр
онкологии им. Н. Н. Блохина,
Р. А. Камышинский – НИЦ «Курчатовский институт»,
Н. В. Юнусова – Научно-исследовательский институт онкологии Томского национального
исследовательского медицинского центра РАН

Внеклеточные везикулы встречаются во многих биологических жидкостях человека, содержат белки, нуклеиновые кислоты и липиды и могут участвовать в доставке биологической информации клеткам-реципиентам, тем самым модулируя их поведение и потенциально участвуя в патогенезе многих заболеваний человека, в т. ч. онкологических. Опухолевые экзосомы стимулируют ангиогенез, увеличивают подвижность опухолевых клеток и повышают их инвазивный потенциал. Обнаружено, что часть циркулирующих в крови экзосом ассоциирована с поверхностью форменных элементов (экзосомы-ассФЭК), однако их роль в диссеминации опухолевого процесса остается неясной. В данном исследовании мы проанализировали участие в некоторых этапах канцерогенеза экзосом, выделенных из плазмы и цельной крови здоровых женщин и больных раком молочной железы (РМЖ).

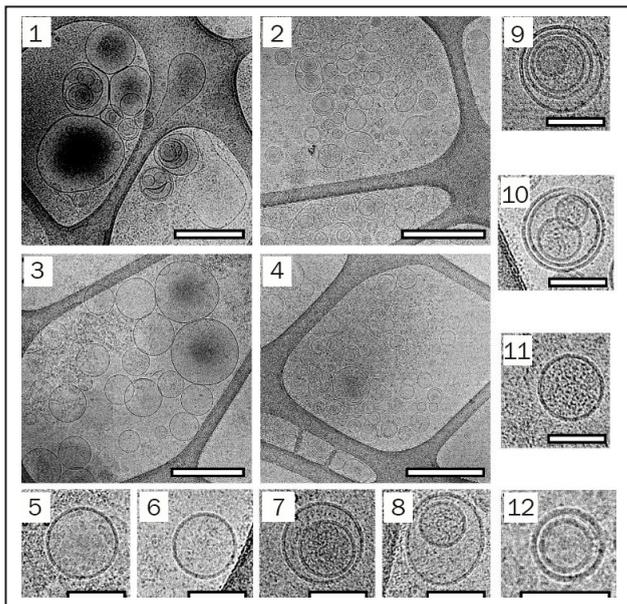
Исследования инициированы в Институте химической биологии и фундаментальной медицины СО РАН и выполнены коллективом авторов из нескольких исследовательских центров. Методом криоэлектронной микроскопии впервые получен набор изображений экзосом, выделенных из цельной крови пациентов с РМЖ и здоровых женщин. Образцы исследованных везикул из цельной крови включали в себя пул экзосом-ассФЭК. На всех фрагментах изображений отчетливо видны везикулы, ограниченные двухслойной

биологической мембраной, размер везикул около 100 нм, что соответствует размеру экзосом (рис.). Среди полученных изображений преобладали одиночные везикулы круглой формы, но также наблюдали и наличие экзотических вариантов везикул, окруженных бислойной мембраной, включая двойные, многослойные частицы, частицы с различной электронной плотностью внутри мембраны.

Таким образом, в работе впервые была детально охарактеризована морфология экзосом, выделенных из цельной крови пациентов с РМЖ и здоровых доноров. В исследовании *in vitro* продемонстрировано влияние пула экзосом цельной крови человека на основные этапы развития РМЖ: ангиогенез, способность клеток к миграции, инвазии, формированию межклеточных контактов. Определены некоторые молекулярные участники этих процессов. В том числе в этом исследовании продемонстрировано, что экзосомы плазмы крови и цельной крови пациентов с РМЖ имеют разные уровни экспрессии связанных с канцерогенезом миРНК (miR-92a и miR-25-3p), могут индуцировать ангиогенез, эпителиально-мезенхимальный переход и подвижность псевдонормальных клеток (MCF10A) и клеток РМЖ (SKBR-3) и, следовательно, способствуют распространению опухоли. Выявлено разнонаправленное влияние экзосом цельной крови здоровых доноров на диссеми-

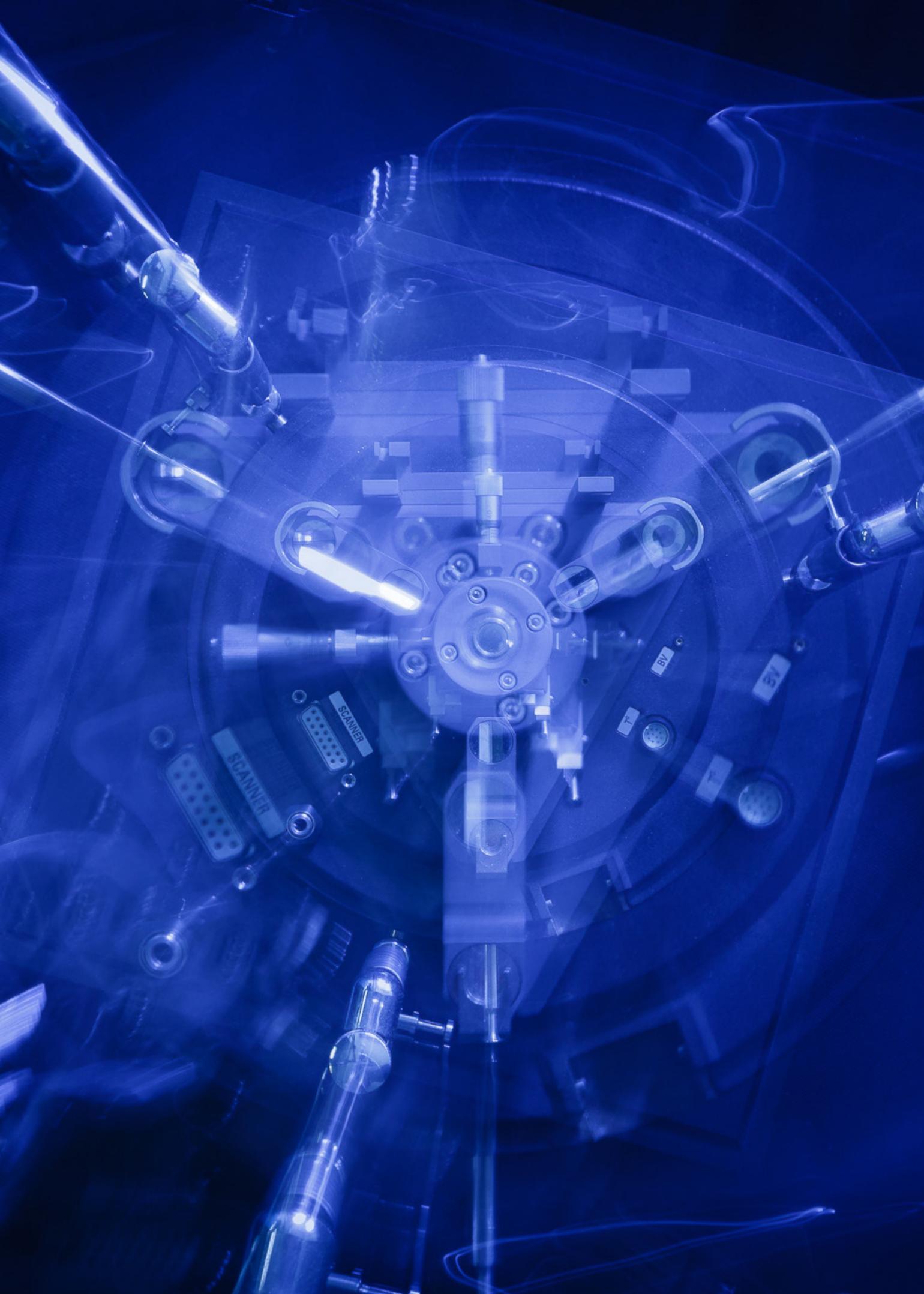
нацию опухоли: они подавляют ангиогенез, скорость миграции и общую длину пути клеток MCF10A и в то же время стимулируют эпителиально-мезенхимальный переход клеток MCF10A и SKBR-3 и скорость миграции злокачественных. Кроме того, экзосомы плазмы крови здоровых доноров обладают способностью стимулировать прометастатические свойства клеток SKBR-3.

Таким образом, все экзосомы крови (экзосомы плазмы и ассоциированные с поверхностью форменных элементов крови) принимают участие в регуляции ключевых этапов опухолевой прогрессии: эпителиально-мезенхимального перехода, миграции клеток и стимуляции ангиогенеза. Исследования морфологии везикул с помощью криоэлектронной микроскопии выполнены при поддержке РФФ (проект № 19-74-20146).



Морфология экзосом плазмы (1, 3) и цельной крови (2, 4) здоровых доноров (1, 2) и пациентов с раком молочной железы (3, 4). Показаны везикулы: одиночные (5, 6); двойные (7, 8, 12); многослойные (9, 10); двухмембранные (9–11); с электронно-плотным грузом (7, 9, 11). Масштабные отрезки на панелях 1–4 – 500 нм; на панелях 5–12 – 100 нм

1. Tutanov O., Proskura K., Kamyshinsky R., Shtam T., ..., Tamkovich S. // *Front. Oncol.* 2020. V. 10. P. 580891.
2. Konoshenko M., Sagaradze G., Orlova E., Shtam T., Proskura K., Kamyshinsky R., Yunusova N., Alexandrova A., Efimenko A., Tamkovich S. // *Int. J. Mol. Sci.* 2020. V. 21. Iss. 19. P. 7341.



Ядерная медицина (производство изотопов, лучевая терапия, био- и нанотехнологии для медицины)

- 88 Новый метод получения генераторного радионуклида $^{212}\text{Pb}/^{212}\text{Bi}$
- 89 Разработка системы планирования протонной терапии, алгоритм расчета дозы

Новый метод получения генераторного радионуклида $^{212}\text{Pb}/^{212}\text{Bi}$

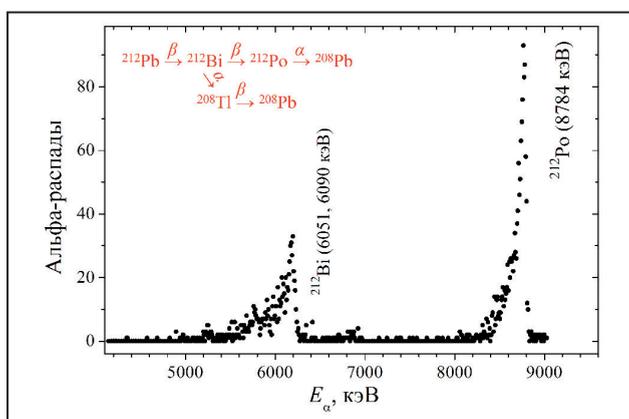
В. Н. Пантелеев, А. Е. Барзах, Д. В. Федоров, В. С. Иванов,
П. Л. Молканов, С. Ю. Орлов, М. Д. Селиверстов, Ю. М. Волков
Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Использование мишеней на основе урана или тория на протонных пучках различных энергий позволяет получать радиоизотопы – эмиттеры α -частиц. Фармпрепараты на основе радионуклидов α -эмиттеров наиболее безопасны и эффективны для лечения злокачественных опухолей на самой ранней стадии их развития. Одно из основных преимуществ использования α -частиц – очень короткий пробег в биологической ткани (около 50–90 мкм). По этой причине действие радионуклида, распадающегося α -распадом, хорошо локализовано и не опасно для здоровых тканей, окружающих пораженное место. В основном для терапии используются радионуклиды α -излучатели: ^{223}Ra ($T_{1/2} = 11,4$ сут), ^{224}Ra ($T_{1/2} = 3,66$ сут), ^{225}Ac ($T_{1/2} = 10,0$ сут) – и радиоизотопы ^{212}Bi , ^{212}Pb .

На радиоизотопном комплексе РИЦ-80, строящемся в НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, будет использован масс-сепараторный метод получения медицинских радионуклидов высокой изотопной чистоты, включая упомянутые α -эмиттеры. В работе представлены результаты экспериментов по применению нового метода высокотемпературного выделения радионукли-

да ^{212}Pb из мишени на основе карбида тория высокой плотности, облученной на пучке синхроциклотрона СЦ-1000. Карбид тория плотностью около 6 г/см^3 облучался в течение 24 ч протонным пучком синхроциклотрона СЦ-1000 с энергией 1 ГэВ и интенсивностью около 0,1 мкА. Масса мишени – 1 г. Через месяц радиационного охлаждения мишень была помещена в графитовый контейнер и нагрета в вольфрамовом нагревателе вакуумного испытательного стенда. В процессе нагревания мишени выделяющиеся радионуклиды высаживались на охлаждаемый медный коллектор. Для селективного выделения ^{212}Pb мишеный материал нагревался в течение 1 ч до температуры $1230 \text{ }^\circ\text{C}$ в высоком вакууме (давление около 10^{-5} мбар). Эффективность испарения ^{212}Pb составила величину выше 90 %. На рисунке представлен α -спектр изотопов ^{212}Bi и ^{212}Po , дочерних по отношению к ^{212}Pb .

Данную работу можно рассматривать как первый этап исследований мишенного материала на основе карбида тория высокой плотности для получения тяжелых радионуклидов – α -распадчиков высокой изотопной чистоты.



Альфа-спектр изотопов ^{212}Bi и ^{212}Po , дочерних по отношению к ^{212}Pb , измеренный на медном коллекторе

Разработка системы планирования протонной терапии, алгоритм расчета дозы

Н. И. Мамедова, Ф. А. Пак, А. И. Халиков, Д. Л. Карлин, Н. А. Кузора,
Д. С. Брожик, О. М. Жидкова, А. А. Васильев
Отдел медицинской радиологии НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

В настоящее время в Медицинском протонном комплексе на базе синхроциклотрона СЦ-1000 для исследовательской деятельности используется пучок протонов с энергией 1 ГэВ, который также успешно применялся для лучевой терапии локализованных внутричерепных заболеваний. Ранее перед проведением лучевой терапии поглощенную дозу в терапевтическом очаге и критических структурах оценивали путем простых математических расчетов, однако бурный прогресс за последние десятилетия в области медицинской диагностики и развития компьютерных технологий привел к появлению трехмерного компьютерного планирования облучения, что дает возможность рассчитывать конформное распределение дозы и оценивать вероятности осложнений в критических структурах.

Для соответствия современным требованиям в области лучевой терапии в 2020 г. была начата разработка собственной системы дозно-анатомического планирования протонной лучевой терапии с энергией 1 ГэВ. Главным элементом системы является алгоритм для расчета распределения дозы с использованием современных методов моделирования, включающих в себя учет: 1) сходимости/расходимости пучка, 2) рассеяния протонов в веществе, 3) изменения

линейной передачи энергии вдоль траектории, 4) «размытия» дозного распределения за счет вторичных частиц. Для реализации данного алгоритма был выбран метод Монте-Карло с дальнейшей аналитической параметризацией. Расчет методом Монте-Карло реализуется с использованием набора библиотек Geant4, в частности модуля Hadrontherapy. На рисунке 1 представлена траектория первичных протонов, а также возникающих вторичных частиц в водном слое толщиной 3 м, рассчитанная в Geant4. При валидации расчета Монте-Карло для энергии протонов 1 ГэВ получено хорошее согласие с литературными данными.

Кроме алгоритма расчета дозы в системе планирования реализована трехмерная реконструкция DICOM-изображений с возможностью визуализации различных по типу структур (скелетной, мышечной, соединительной тканей). В процессе разработки – ручное и полуавтоматическое оконтуривание структур на диагностических изображениях, а также автоматическое оконтуривание негомогенностей (рис. 2). Ведется работа по совмещению DICOM-изображений различных модальностей (КТ, МРТ, ПЭТ) для наиболее достоверного определения местоположения и размера терапевтических очагов.

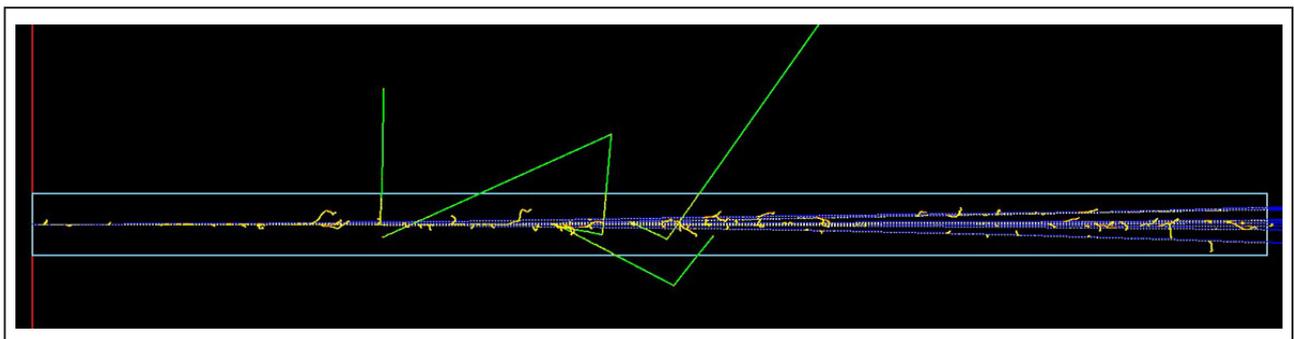


Рис. 1. Моделирование прохождения протонов с энергией 1 ГэВ через водный слой: синий цвет – первичные протоны; желтый – электроны; зеленый – фотоны; красный – вторичные протоны

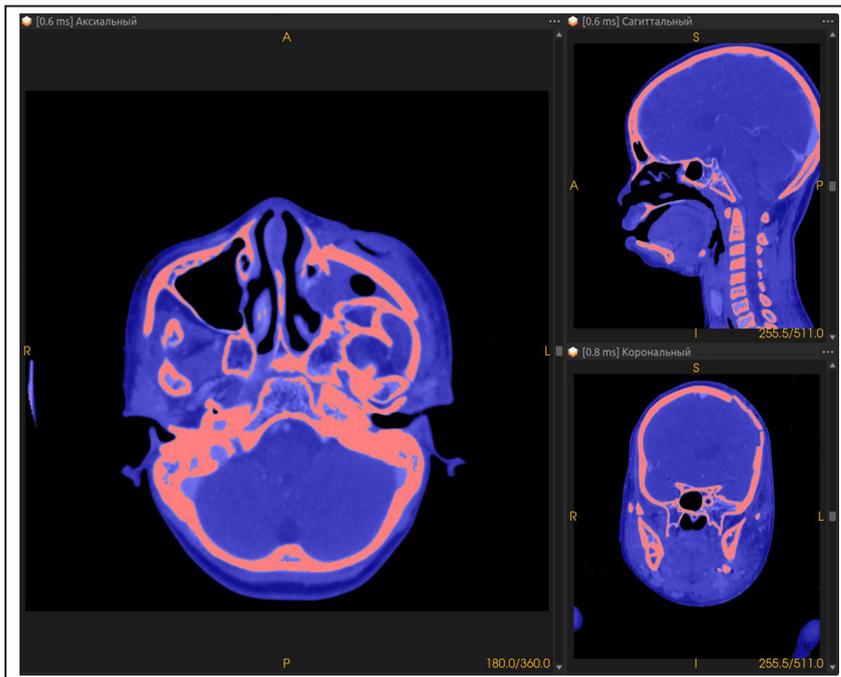


Рис. 2. Оконтурирование негетогенностей

Помимо основного алгоритма расчета дозы с учетом метода Монте-Карло предложен математический метод расчета глубинных дозных распределений от мононаправленного пучка протонов с энергией 1 ГэВ при ротационном методе облучения. Рассматривается модель протонного пучка в первом приближении без учета его взаимодействия со средой. Проведено сравнение результатов расчета с экспериментальными дозными распределениями, полученными методом термолюминесцентной дозиметрии (рис. 3). Сравнение данных показало, что отклонение расчета от эксперимента составляет

не более 10 % в центральной области, представляющей интерес. В дальнейшем планируется ввести коррективы в теоретическую модель для учета физических особенностей взаимодействия протонов с веществом, увеличить статистику и определить область применения разработанного метода расчета.

В 2020 г. сотрудниками лаборатории медицинской физики по результатам проведенных исследований было опубликовано пять научных статей, в т. ч. проиндексировано в базе данных Scopus, пять тезисов докладов, а также представлено семь докладов на научных конференциях.

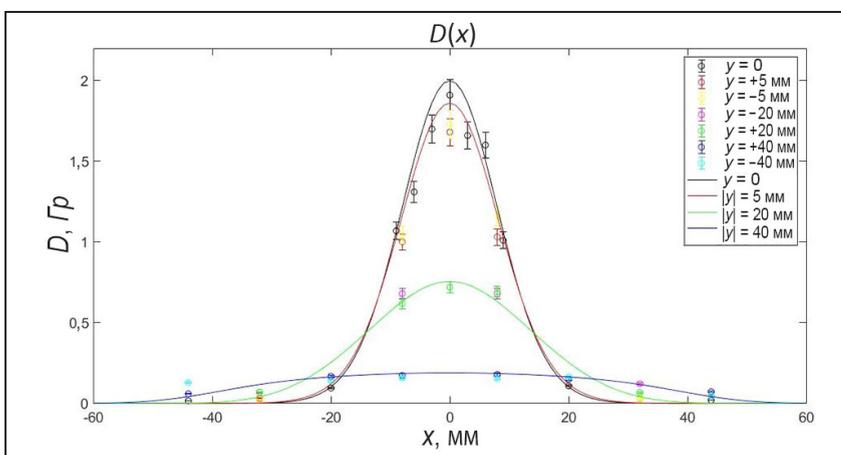


Рис. 3. Сравнение расчетных (сплошные линии) и экспериментальных данных



Физика ядерных реакторов и ускорителей

- 94 Статус установки извлечения трития из тяжелой воды реактора ПИК
- 95 Исследование коррозионной стойкости алюминиевых материалов экспериментальных каналов реактора ПИК
- 97 Исследование возможности наработки изотопов Es и Bk в реакторе ПИК
- 98 Сравнение потоков нейтронов, измеренных с помощью ^3He -пропорциональных газовых детекторов и рассчитанных с помощью пакета RHITS

Статус установки извлечения трития из тяжелой воды реактора ПИК

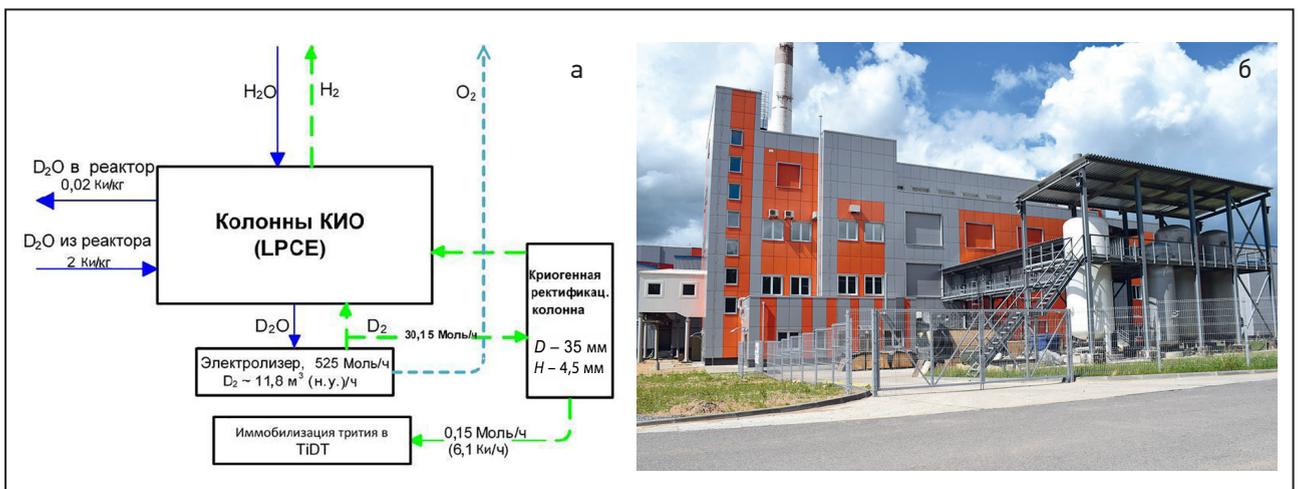
С. Д. Бондаренко, И. А. Алексеев, Т. В. Васянина, О. А. Федорченко
Управление ввода в эксплуатацию реактора ПИК, Отдел физики и техники реакторов
НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

В НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ продолжают работы по созданию многофункциональной установки извлечения трития (УИТ) из тяжелой воды реактора ПИК. Установка будет поддерживать концентрацию трития в тяжелой воде реактора на уровне не более $7,4 \cdot 10^{10}$ Бк/кг (2 Ки/кг), для чего необходимо извлекать из тяжеловодного контура реактора до $1,1 \cdot 10^{16}$ Бк трития (30 000 Ки) в год. Также установка будет поддерживать изотопный состав тяжелой воды по дейтерию на уровне не менее 99,8 ат. %.

Научно-исследовательские работы по разработке технологии изотопной очистки тяжелой воды и созданию установки выполнены в НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ. Основными элементами УИТ, блок-схема которой показана на рис. а, являются: колонны изотопного обмена «вода – водород» на гидрофобном катализаторе (LPCE), колонна криогенной ректифика-

кации изотопов водорода, электролизер и система для иммобилизации трития в форме TiDT. В УИТ существует возможность переработки тяжеловодных отходов с получением кондиционной тяжелой воды, в т. ч. тяжелой воды, глубоко очищенной от трития. Переработка отходов тяжелой воды одновременно с извлечением трития и протия из тяжелой воды реактора улучшит функциональность и экономическую эффективность установки извлечения трития.

В 2020 г. завершено сооружение здания УИТ (рис. б) и наружных сетей, закуплены оборудование и приборы. Выполнен монтаж приборов и трубопроводов аналитических лабораторий. Оборудование основной технологии установлено, выполняется монтаж трубопроводов. Завершен монтаж общетехнологических систем, вентиляционных систем, спецканализации, спецсети. Планируется выполнение пусконаладочных работ.



Установка извлечения трития из тяжелой воды реактора ПИК: а – блок-схема; б – здание

Исследование коррозионной стойкости алюминиевых материалов экспериментальных каналов реактора ПИК

Т. В. Воронина, С. Р. Фридман – Управление ядерной и радиационной безопасности, Отдел физики и техники реакторов НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, Р. М. Рамазанов – Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей» им. И. В. Горынина НИЦ «Курчатовский институт»

Целью работ являлось обоснование коррозионной стойкости материалов алюминиевых экспериментальных каналов (ЭК) реактора ПИК НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ в тяжелой воде (D_2O) на контрольных образцах из сплавов АМгЗ и АД1 с различными пассивирующими покрытиями.

Актуальность работы обоснована неопределенностью скорости развития питтингов на ЭК, эксплуатирующихся в тяжелой воде, и необходимостью продления ресурса каналов после эксплуатации в тяжеловодном отражателе во время физического пуска реактора ПИК и в режиме длительного останова в течение шести лет.

Для проведения коррозионных испытаний использовали по 30 образцов из алюминиевых сплавов АМгЗ по ГОСТ 17232-99 и АД1 по ГОСТ 4784-97 с размерами $5 \times 30 \times 50$ мм, с различной подготовкой поверхности. Внешний вид образцов приведен на рис. 1.

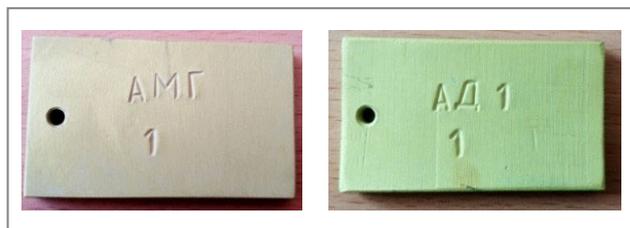


Рис. 1. Внешний вид образцов для коррозионных испытаний

Для проведения коррозионных испытаний была спроектирована и изготовлена установка с баком объемом ~ 100 л из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т. Бак оборудован съемной герметичной крышкой, системами подогрева и термостатирования, краном для слива воды.

Внутри бака расположена система подвешивания для образцов, исключающая их контакт друг с другом и стенками бака и также изготовленная из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т (рис. 2).



Рис. 2. Внешний вид установки для коррозионных испытаний

Для испытаний использовали тяжелую воду, подготовленную по регламенту для реактора ПИК. В период испытаний, продолжавшихся в течение 6500 ч при температуре $60^\circ C$, проводили ревизии, обследование образцов и химический анализ тяжелой воды.

Практически на всех образцах, в т. ч. с питтингами, при экспозициях в среде ~ 1500 , ~ 3500 и ~ 6500 ч выявлено значимое увеличение массы. В среднем для всех образцов величина удельного привеса находилась в пределах $0,7-1,0$ мг/см² и слабо зависела от времени выдержки в воде. В условиях эксплуатации,

близких к условиям в баке тяжеловодного отражателя реактора ПИК, по косвенным данным, скорость общей коррозии находилась в диапазоне 0,03–0,2 мкм/год.

Выделены два сценария нарушения нормальной эксплуатации ЭК с питтингами. Первый – потеря герметичности. Один или несколько питтингов развиваются с большой скоростью и вызывают потерю негерметичности канала при его подросе на всю толщину стенки. При этом данный сценарий не влияет на прочность канала. При оценке предельного состояния по условию потери герметичности (предельная глубина питтинга 0,75 от исходной толщины стенки) может быть рекомендована верхняя оценка скорости роста питтингов – 1,20 мм/год.

Второй – потеря прочности. Консервативно принимается, что питтинги на поверхности каналов продолжают развиваться со средней скоростью. Тогда цепочка питтингов может образовывать на поверхности подобие трещины. В этом случае следует оценивать прочность канала с постулируемой трещиной. При оценке предельного состояния ЭК по прочности (предельная глубина цепочки питтингов от исходной толщины стенки) рекомендована скорость роста питтингов 0,25 мм/год.

Анализ химического состава тяжелой воды на промежуточных и конечном этапах испытаний подтвердил высокую коррозионную стойкость материалов образцов со всеми видами подготовки поверхности. Отсутствие заметных коррозионных повреждений образцов в данных испытаниях главным образом связано с низким содержанием в тяжелой воде ионов железа.

В ходе работ не подтвердилось преимущество серноокислого анодного оксидирования сплавов АМгЗ и АД1 над хромовокислым анодным оксидированием, поэтому в настоящее время следует рекомендовать в качестве защиты ЭК от коррозии анодное покрытие Ан. Окс. Хром., как и предусмотрено конструкторской документацией на ЭК.

На реакторном комплексе ПИК имеется экспериментальное оборудование и отработаны методики проведения долговременных коррозионных испытаний различных материалов в тяжелой воде, позволяющие проводить необходимые исследования. В частности, продолжением работ в этой области стало бы исследование стойкости сварных соединений АМгЗ + АМг5 при наклонной установке образцов в легкой и тяжелой воде, содержащей ионы железа Fe^{2+} в количестве порядка 0,1–0,5 мг/л и не содержащей таковых.

Исследование возможности наработки изотопов Es и Bk в реакторе ПИК

М. С. Онегин

Отделение теоретической физики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

В мире существуют только два высокопоточных реактора, где возможна наработка транскюриевых изотопов. Это реактор HFIR (Ок-Ридж, США) и реактор SM-3 (Димитровград, Россия). В реакторе ПИК в центральном экспериментальном канале достигается рекордная плотность потока тепловых нейтронов, что позволяет нарабатывать в канале транскюриевые изотопы. В настоящее время проектируется устройство активной зоны реактора для штатной эксплуатации. В активной зоне реактора, в дополнение к центральному экспериментальному каналу, могут быть организованы места для облучения ампул с изотопами.

Проводится сравнение условий облучения в центральном экспериментальном канале и активной зоне реактора. Для этого сравниваются спектры нейтронов, плотности потоков нейтронов, а также рассчитываются усредненные по спектру сечения основных ядерных реакций, влияющих на наработку конечных изотопов. Проводится аппроксимация основных сечений реакций с использованием теплового сечения, резонансного интеграла и факторов Весткотта. Для реалистичных мишеней из кюрия и калифорния рассчитывается количество наработанных эйнштейния и берклия, а также проводится сравнение скоростей наработки в активной зоне и центральной водной полости. Проводится верификация расчетов по коду MCNP по наработке изотопов аналитическими расчетами, а также расчетами по программе SCALE.

Показано, что в активной зоне реактора количество наработанных изотопов эйнштейния и берклия может быть больше в 4–5 раз на то же количество сырьевых изотопов, однако при этом для наработки в активной зоне требуется приблизительно вдвое большее время. Обсуждаются основные неопределенности константного обеспечения, которые влияют на расчет скорости наработки эйнштейния в мишени. Основную неопределенность по наработке относительно долгоживущего изотопа ^{254}Es вносят неопределенности сечений взаимодействия нейтронов с ядром ^{253}Es , особенно изомерного отношения для реакции радиационного захвата нейтрона.

Изотопы берклия и эйнштейния, полученные в макроскопических количествах, необходимы для синтеза сверхтяжелых элементов. Получение таких элементов на фабрике сверхтяжелых элементов в Дубне позволяет продвигаться в подтверждении гипотезы о наличии острова стабильности в области нейтронно-обогащенных сверхтяжелых изотопов. Другим востребованным изотопом, нашедшим широкое применение как источник нейтронов, является изотоп ^{252}Cf . Изотоп ^{249}Bk может являться побочным продуктом наработки изотопа ^{252}Cf в центральном экспериментальном канале реактора.

Таким образом, реактор ПИК, в дополнение к реактору SM-3, может использоваться для наработки транскюриевых изотопов для фундаментальных и прикладных исследований.

Сравнение потоков нейтронов, измеренных с помощью ^3He -пропорциональных газовых детекторов и рассчитанных с помощью пакета PHITS

Л. А. Аксельрод, Г. П. Диденко, К. В. Ершов, В. Г. Зиновьев, И. А. Митропольский –
 Отделение нейтронных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ
 С. Е. Белов – Радиевый институт им. В. Г. Хлопина

При разработке системы радиационной защиты и замедлителя нейтронов для Pu-Be-источника нейтронов необходимо знать его спектр. Поток нейтронов от радиоактивного источника зависит от энергии первичных α -частиц, количества примесей, размера зерен диоксида плутония и других технологических факторов. В соответствии с заводской спецификацией было выполнено моделирование Pu-Be-источника с использованием программы PHITS версии 3.10. Эта программа описывает перенос заряженных частиц, нейтронов, γ -квантов и тяжелых ионов методом Монте-Карло. Характер расчетного спектра также зависит от размера зерен диоксида плутония (рис. 1).

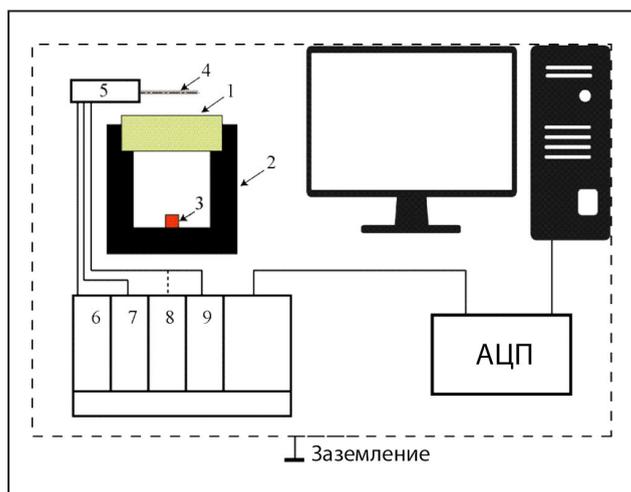


Рис. 1. Схема экспериментального стенда: 1 – замедлитель; 2 – контейнер; 3 – источник; 4 – счетчик СМН-50; 5 – предусилитель; 6, 7 – низковольтное и высоковольтное питание; 8 – цифровой счетчик; 9 – спектрометрический усилитель

Для проверки моделирования использовался стенд (рис. 2), который состоял из контейнера, изготовленного из борированного полиэтилена,

но вместо обычной крышки мы использовали замедлитель с различными сочетаниями «чистого» и борированного полиэтилена. Источник имел активность $2,4 \cdot 10^{11}$ Бк по α -распаду и давал изотропный поток 10^7 см $^{-2}$ · с $^{-1}$ в момент изготовления (за два года до нашего эксперимента).

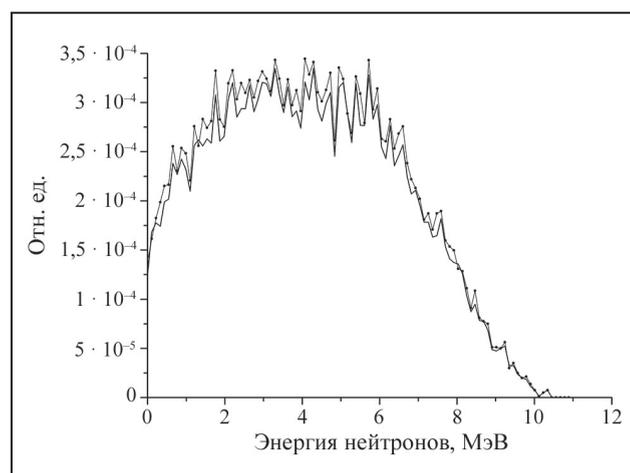


Рис. 2. Расчетный нейтронный спектр Pu-Be-источника: сплошная линия – зерна диоксида плутония размером 5,6 мкм; линия с точками – зерна размером 5,0 мкм

Были проведены эксперименты с различными конфигурациями замедлителя. Все амплитудные спектры, полученные в результате измерений, оказались подобными и отличались только амплитудой. Для определения фона между источником и детектором помещались полиэтиленовые листы до тех пор, пока скорость счета не переставала меняться. Последнее значение и принималось за уровень фона. В измерениях также использовался позиционно-чувствительный ^3He -наполненный детектор производства НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ для проверки и подготовки его к включению в приборную базу реактора ПИК.

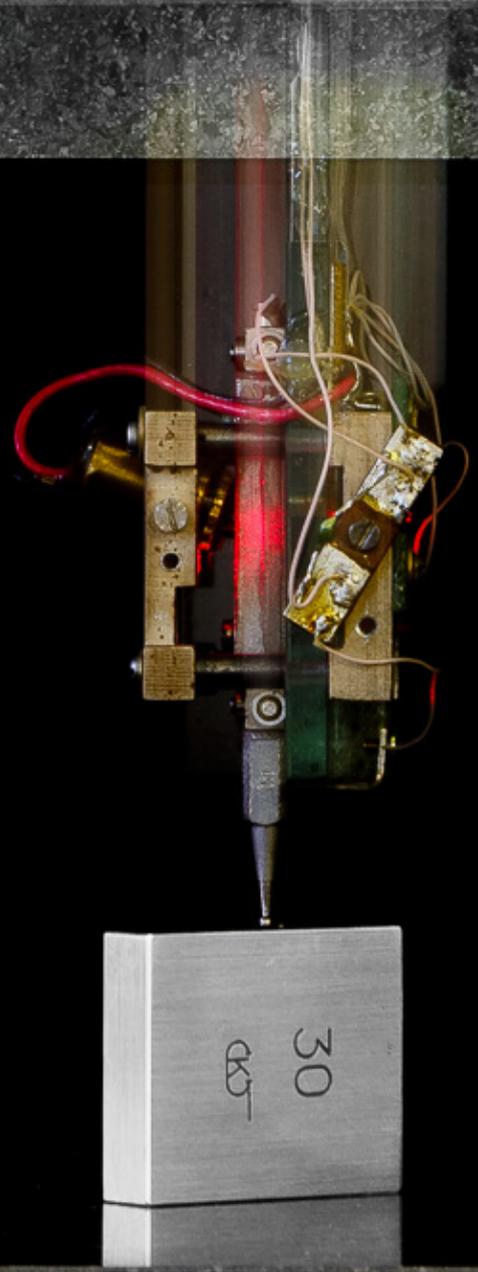
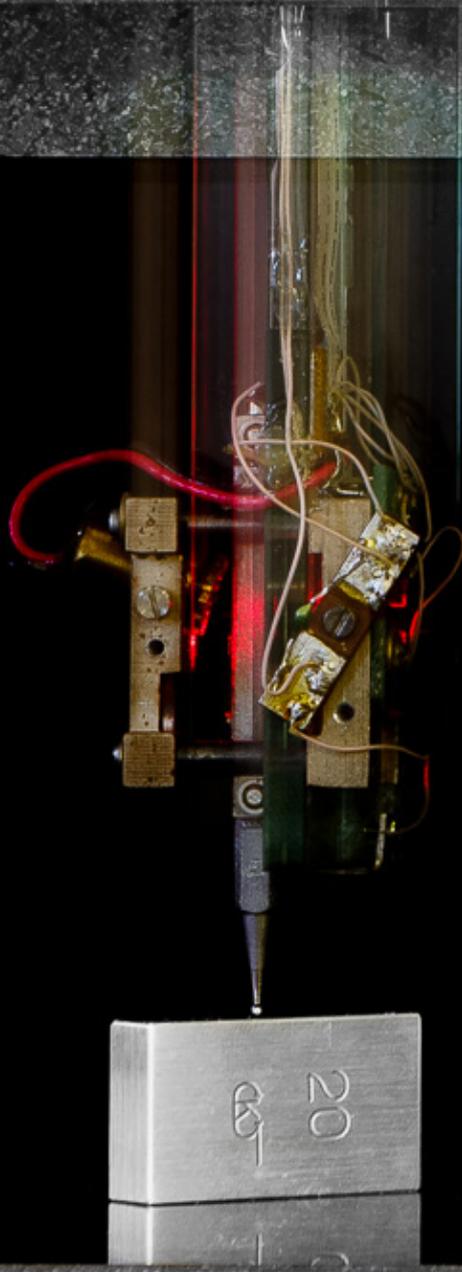
Проведенные расчеты с использованием программы PHITS качественно описывают полученные экспериментальные данные, но хорошего количественного согласия достичь не удалось. Одна из причин этого заключается в том, что состав материалов в точности неизвестен и может содержать неучтенные примеси, поглощающие нейтроны.

Модельные расчеты, в частности, показали, что максимальное поглощение нейтронов осуществляется при содержании бора в полиэтилене на уровне 2–4 %. Далее число нейтронов, покидающих систему, увеличивается при увеличении концентрации бора, т. е. поглощение уменьшается (за счет нейтронов высоких энергий). Выяснить, имеет ли этот факт физическую причину или это особенность программного пакета, можно при помощи эксперимента с детектором,

позволяющим регистрировать быстрые нейтроны, либо в эксперименте на синхроциклотроне (установка ГНЕЙС), где можно использовать времяпролетную методику.

На данном этапе сравнение расчетных и экспериментальных данных позволило сделать следующие выводы:

- использованный метод моделирования оказался достаточно надежным;
- совпадение экспериментальных и расчетных результатов зависит только от средневзвешенной энергии нейтронов, а не от распределения их по энергиям;
- для измерения спектра Pu-Be-источника нужно использовать детектор быстрых нейтронов, и такой эксперимент планируется;
- концентрация бора в защите имеет значение, близкое к оптимальному.



Прикладные исследования и разработки

- 102** Кристаллическая и надмолекулярная структуры бактериальной целлюлозы после гидролиза целлобиогидролазой из *Scytalidium candidum* ЗС: основы для разработки биоразлагаемых повязок для ран
- 103** База данных для инвентаризации протеоформных профилей: «2DE-паттерн»
- 104** Композитные протонпроводящие мембраны с наноалмазами
- 105** Модернизация мюонного спектрометра детектора ATLAS
- 106** Сведения о работах лаборатории голографических информационно-измерительных систем за 2020 г.

Кристаллическая и надмолекулярная структуры бактериальной целлюлозы после гидролиза целлобиогидролазой из *Scytalidium candidum* ЗС: основы для разработки биоразлагаемых повязок для ран

Л. А. Иванова, Е. В. Энейская, В. С. Бурдаков, Н. А. Верлов, А. А. Кульминская, Г. П. Копица – Отделение молекулярной и радиационной биофизики, Отделение нейтронных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ,

А. Е. Баранчиков, К. Б. Устинович – Институт общей и неорганической химии им. Н. С. Курнакова РАН,

Т. В. Хамова – Институт химии силикатов им. И. В. Гребенщикова РАН,

Ю. Е. Горшкова – Лаборатория нейтронной физики им. И. М. Франка Объединенного института ядерных исследований,

Н. В. Цвигун – ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН,

Е. В. Зиновьев, М. С. Асадулаев, А. С. Шабунин, А. М. Федюк – Лаборатория экспериментальной хирургии Научно-исследовательского центра Санкт-Петербургского государственного педиатрического медицинского университета

Бактериальную целлюлозу (БЦ), синтезированную штаммом *Glucanacetobacter hansenii* ATCC 10821, впервые обрабатывали целлобиогидролазой из дрожжевого гриба *Scytalidium candidum* ЗС (СВНС). Кристаллическая и надмолекулярная структуры БЦ исследованы на разных стадиях гидролиза целлобиогидролазой с использованием различных физических и микроскопических методов. Ферментативный гидролиз существенно повлиял на кристаллическую и надмолекулярную структуры нативной БЦ, в которой трехмерная полимерная сетка состояла из нанолент толщиной $T \approx 8$ нм и шириной $W \approx 50$ нм, а также обладала развитой удельной поверхностью $S_{\text{ВЕТ}} \approx 260 \text{ м}^2 \cdot \text{г}^{-1}$. Биodeградация в течение 24 ч привела к 10%-ному уменьшению среднего размера кристаллов D_{hkl} БЦ, к двукратному увеличению размеров нанолент и удельной поверхности $S_{\text{ВЕТ}}$ до $\approx 100 \text{ м}^2 \cdot \text{г}^{-1}$.

Атомно-силовые и сканирующие электронные микроскопические изображения показали разрушение микроструктуры БЦ после ферментативной обработки, а также образование и накопление субмикронных частиц в ячейках трехмерной полимерной сети. Эксперименты *in vitro* и *in vivo* не выявили цитотоксического эффекта от добавления фермента к повязкам БЦ и показали в целом положительное влияние на лечение обширных ожогов III степени, значительно ускоряя заживление ран у крыс.

Таким образом, на наш взгляд, полученные результаты могут служить основой для дальнейшей разработки эффективных биоразлагаемых повязок для заживления ран на основе гидролизованной БЦ.

Работа выполнена при поддержке НИЦ «Курчатовский институт» (приказ от 25.06.2019 № 1363).

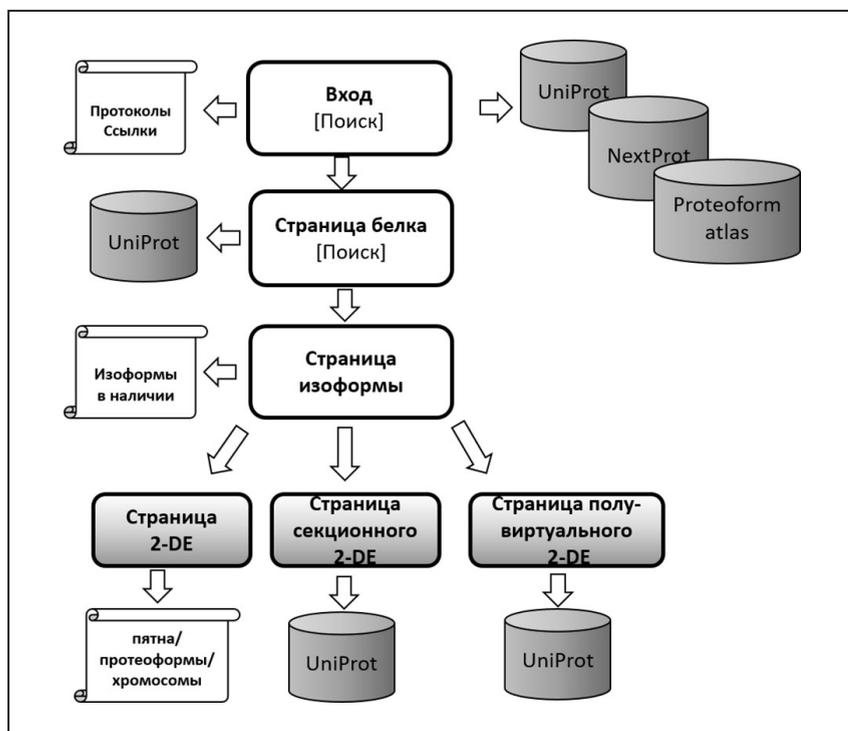
База данных для инвентаризации протеоформных профилей: «2DE-паттерн»

С. Н. Нарыжный, Н. В. Клопов, Н. Л. Ронжина, О. А. Клейст, Н. В. Белякова, О. Л. Легина – Отделение молекулярной и радиационной биофизики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, Е. С. Зорина, В. Г. Згода – Научно-исследовательский институт биомедицинской химии им. В. Н. Ореховича

Протеом человека состоит из разнообразного и гетерогенного ряда генных продуктов/протеоформ/видов белков. Из-за растущего объема информации о протеоформах, генерируемых различными методами, нам нужен удобный подход для инвентаризации данных. Здесь мы представляем базу данных протеоформ, основанную на информации, полученной путем разделения протеоформ с помощью двумерного электрофореза (2DE) с последующим анализом ESI LC-MS/MS. Описываются принципы и структура базы данных. База данных называется «2DE-паттерн» (рис.), поскольку она содержит несколько изоформ-ориентированных

паттернов протеоформ, разделенных в соответствии с принципами 2DE. Базой данных можно свободно пользоваться по адресу <http://2de-pattern.pnpi.nrcki.ru>.

Пользователь начинает с верхней *Entry page*, где можно найти выбор параметров поиска. В зависимости от выбора будет открыта страница (*Protein page*) желаемого белка. Далее представляется возможность выбора изоформы этого белка. На странице *Isoform page* доступен выбор данных для изоформы из трех типов шаблона 2DE: *2-DE page*, *Sectional 2-DE page* или *Semi-virtual 2-DE page*.



Блок-схема базы данных протеоформ «2DE-паттерн»

Композитные протонопроводящие мембраны с наноалмазами

Ю. В. Кульвелис, В. Т. Лебедев, В. Ю. Байрамуков

Отделение нейтронных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Разработан новый подход для улучшения протонной проводимости перфторированных мембран водородных топливных элементов. Мембраны из сополимера с короткими боковыми цепями (Aquivion®) модифицировали функционализированными наночастицами алмаза. Внедренные в полимерную матрицу карбоксилированные алмазы при умеренном содержании усиливали проводимость мембранного материала при сохранении его высокой механической прочности (рис. 1). Усовершенствованный способ приготовления композиционных мембран из суспензий в *N,N*-диметилформамиде (метод полива) позволил сохранить общую структуру каналов в мембранах в присутствии наноалмазов, что подтверждено данными рассеяния нейтронов, демонстрирующими иономерный пик (рис. 2).

Таким образом, авторами предложен новый подход направленного формирования дополнительных областей проводимости за счет частиц алмаза, связанных с полимерными цепями,

когда вдоль поверхности алмазов идет ускоренная диффузия протонов по прыжковому механизму Гротгуса от центров адсорбции протонов с переходом к протонопроводящим каналам в полимерной матрице, покрытым сульфогруппами. Полученные композитные перфторированные мембраны типа Aquivion с наноалмазами обеспечивают повышенный эффект протонной проводимости по температурно-зависимому механизму. При низких температурах карбоксилированные наноалмазы представляют собой резервуары, которые аккумулируют протоны. При повышении температуры накопленные протоны проникают в систему проводящих каналов, увеличивая проводимость. Достигнутый эффект усиления протонной проводимости при 50 °С и хорошие механические свойства композитных мембран открывают перспективы улучшения характеристик класса мембранных материалов данного типа в топливных элементах при рабочих температурах до 130 °С.

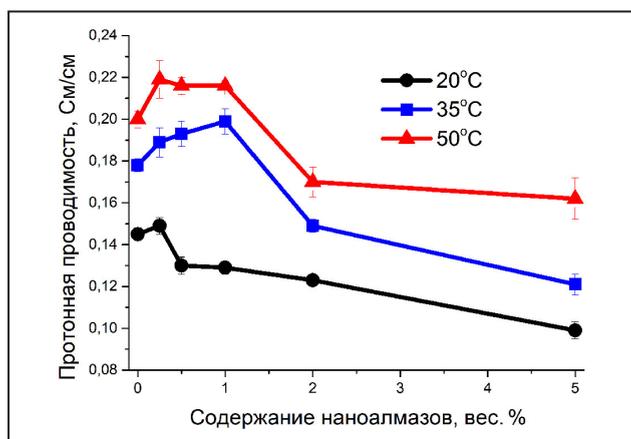


Рис. 1. Протонная проводимость композиционных мембран при 20, 35 и 50 °С в зависимости от содержания наноалмазов

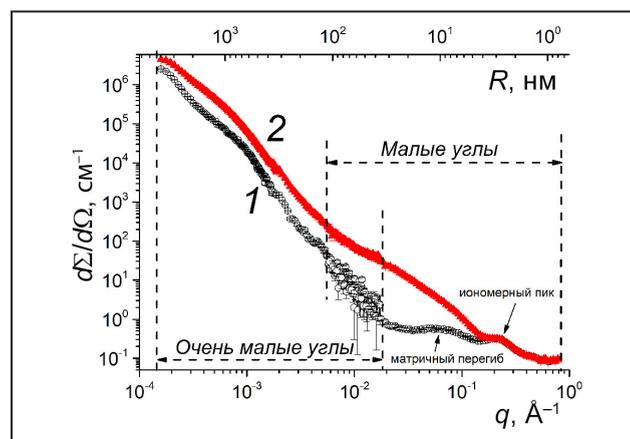


Рис. 2. Рассеяние нейтронов в малых и очень малых углах на сухих образцах мембран: 1 – образец без наноалмазов; 2 – композиционная мембрана с 5 вес. % наноалмазов

Модернизация мюонного спектрометра детектора ATLAS

С. Г. Барсов, В. Т. Грачев, А. Е. Ежилов, М. П. Левченко, В. П. Малеев,
Ю. Г. Нарышкин, Д. Пуджа, В. М. Соловьев, О. Л. Федин, В. А. Щегельский
Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ,
коллаборация ATLAS

В ходе программы модернизации, идущей сейчас и запланированной на ближайшие годы, светимость Большого адронного коллайдера (БАК, ЦЕРН) будет увеличена в пять раз по сравнению с проектной. Увеличение светимости ускорителя необходимо для более детального исследования свойств бозона Хиггса, а также для повышения чувствительности экспериментов к проявлениям новой физики в диапазоне энергий выше 1 ТэВ. Для работы эксперимента ATLAS в условиях повышенной светимости необходимо иметь триггерную систему, способную эффективно выделять лептоны средних энергий в более жестких фоновых условиях, чем ныне существующие. Для мюонного спектрометра это требует замены передней части существующего мюонного трекера (малых мюонных колес) на детектор, способный обеспечивать точное восстановление трека мюона и триггер. Новые малые мюонные колеса (НМК) спроектированы для работы в условиях повышенной светимости, $L = (2-5) \cdot 10^{34} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, которая ожидается на модернизированном ускорителе БАК.

В НМК используются два технологически разных детектора: тонкозазорные стриповые камеры (сТЗК) в качестве основного триггера и микроячеистые камеры для прецизионного восстановления трека мюона. сТЗК – многопроволочные пропорциональные камеры с тонким газовым промежутком, равным 1,4 мм, при шаге анодных проволок из золоченого вольфрама 1,8 мм. Катодные плоскости представляют собой печатные платы толщиной 1,3 мм, поверх которых располагается слой препрега

толщиной 200 мкм, на который нанесен резистивный графитовый слой. Один катод разделен на прямоугольные пады, использующиеся в триггере для определения области поиска сигнала на стрипах с шагом 3,2 мм, расположенных на противоположном катоде, и проволоках. Камеры должны работать в режиме полунасыщения при напряжении 2,85 кВ, что соответствует коэффициенту газового усиления $2 \cdot 10^5$. Отдельные камеры собираются в модули (квадруплеты), состоящие из четырех сТЗК-камер. Рабочая площадь камер разного типа – от 0,7 до 2,3 м².

сТЗК-квадруплеты для НМК-детектора производились в России, Израиле, Канаде, Китае и Чили. НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ отвечал за изготовление самых больших 36 QL3-квадруплетов площадью 2,3 м². Производство и тестирование всех квадруплетов завершено в ноябре 2020 г. Все они были отправлены в ЦЕРН, где сейчас идет сборка НМК-детекторов (рис.).



Сборка первого нового малого мюонного колеса типа А в ЦЕРН

Сведения о работах лаборатории голографических информационно-измерительных систем за 2020 г.

Б. Г. Турухано

Отделение перспективных разработок НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Лаборатория голографических информационно-измерительных систем (ЛГИИС) в 2020 г. продолжила разработку универсальной углоизмерительной машины – УИМ. Создана базовая конструкция УИМ, разработаны и изготовлены наноизмерительные линейный и угловой голографические датчики – ЛГД и УГД, входящие в составе УИМ. Разработана специальная программа для системы управления перемещениями линейного и радиального датчиков.

Датчик линейных перемещений ЛГД позволяет увеличить точность и разрешение при измерении линейных размеров во всем измеряемом диапазоне перемещений до метра и более вне зависимости от качества направляющих системы. Таким образом, имеет место расширение диапазона обрабатываемых или исследуемых объектов при сохранении высокой точности и разрешения измерительной системы. Задача предложенного изобретения – определение погрешности, вносимой в величину измерения перемещений, обусловленной возникновением муаровых полос от неточных направляющих ЛГД.

Неточность изготовления направляющих ЛГД, по которым двигается одна из решеток, влияет на величину периода интерференционных полос (муаровых полос), а следовательно, на величину самого перемещения, поэтому для измерения длины используют не эту величину, а величину обтюраторных полос, т. к. они не зависят (инвариантны) от качества направляющих.

Задача решается не путем улучшения качества направляющих посредством их механической обработки, что дорого, исключительно сложно и практически невозможно, особенно при больших длинах (до метра и более), а путем осуществления в реальном времени цифровой

компенсации погрешности, вносимой появлением муаровых полос, возникающих в результате перемещения каретки, содержащей одну из решеток датчика, по его направляющей на величину перемещения или длины поверяемого или изготавливаемого изделия.

В связи с необходимостью исследования точностных характеристик датчиков ЛГД и УГД было создано устройство и оснащена метрологическая система в подземной части антивибрационной и термостатированной лаборатории. С помощью этого же устройства осуществлена аттестация прецизионного линейного датчика японской фирмы Mitutoyo, который используется в Отделении физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ при проведении экспериментов. Аттестация проведена с использованием прецизионного метрологического линейного голографического датчика ЛГД-700 ЛГИИС. Точность японского датчика оказалась в три раза меньше, чем у датчика ЛГИИС.

В лаборатории был разработан, изготовлен и прошел испытания высокоточный шпиндель. С помощью стенда НАНО ИПС-2 (рис. 1) исследовались радиальные биения шпинделя наноизмерительного одноосевого поворотного стола голографического. Радиальные биения шпинделя меняются от 0,05 до 0,38 мкм за один его оборот, а аксиальные – от 0,2 до 0,45 мкм.

Также испытания шпинделя проводились с помощью наноизмерительного голографического длиномера ДГ-30 (рис. 2), признанного средством измерения согласно Свидетельству о поверке, выданному Государственным комитетом РФ по стандартизации и метрологии № 112511-7-121/10, и Свидетельству об утверждении типа средства измерений RU.C.27.001.A № 100899, выданному Федеральным агент-

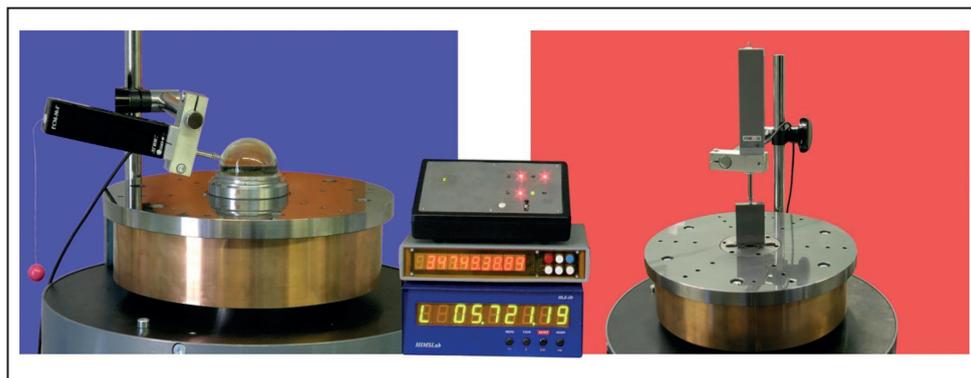


Рис. 1. Стенд НАНО ИПС-2 для исследования круглости деталей, их радиальных и аксиальных биений с использованием дальномера голографического ДГ-100



Рис. 2. Дальномер голографический ДГ-30 с выходом на автономный блок индикации

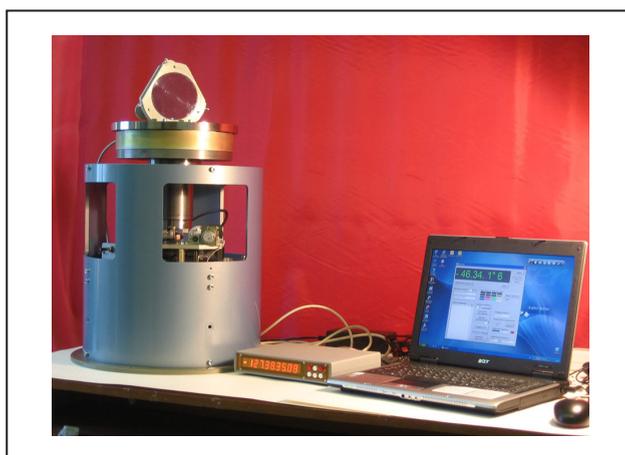


Рис. 3. Наноизмерительный двухшпindelный зеркальный гониометр НАНО ДЗГ

ством по техническому регулированию и метрологии.

Точность ДГ-30 – $\pm 0,05$ мкм, разрешение – 0,01 мкм на длине 30 мм. Величины биения этого шпинделя оказались не более 0,2 мкм.

Исследования радиальных и аксиальных биений шпинделя с наноточностью необходимы для калибровки шпинделей, встроенных в ультрапрецизионные углоизмерительные системы:

1) угловые наноизмерительные датчики (см. рис. 1) на базе высокоточных голографических решеток R, обладающих потенциальной точностью до сотых долей угловой секунды;

2) углоизмерительные машины, необходимые для аттестации и калибровки кодовых дисков;

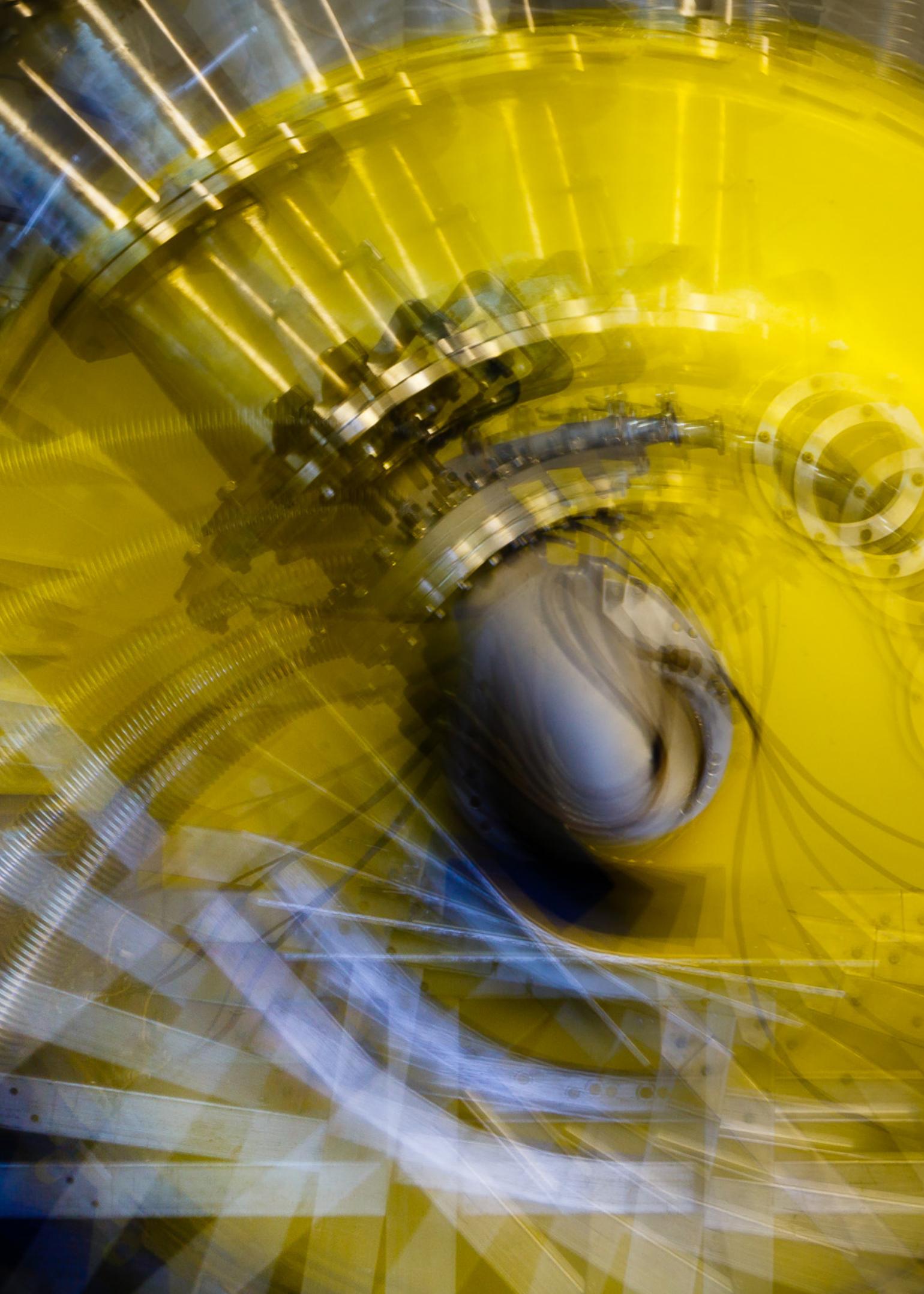
3) наноизмерительные поворотные столы высокой точности, применяемые в системах наведения, а также для калибровки электродвигателей для космических систем: ультрапрецизионный наноизмерительный двухшпindelный зеркальный гониометр – НАНО ДЗГ (рис. 3) и ультрапрецизионный двухшпindelный наноизмерительный поворотный стол голографический – одноосевой стенд НАНО ИПС-2;

4) системы в станках особо высокой точности класса С по СТ СЭВ 3111-81 с числовым программным управлением, производящие узлы и детали для космических систем с целью повышения их точности и надежности.

1. Турухано Б. Г. и др. // Приборы и сист. Управл., контроль, диагност. 2020. № 9. С. 24–28.

2. Turukhano B.G. et al. // Наноиндустрия. 2020. № 6. С. 384–390.

3. Датчик линейных перемещений: пат. РФ на полезную модель № 201730 / Турухано Б. Г., Турухано И. А., Турухано Н.; дата приоритета 29.10.2020.



Базовые установки

- 110** Программа энергетического пуска реактора ПИК на мощности до 10 МВт
- 111** Запуск экспериментальных станций первой очереди на реакторе ПИК
- 112** Работа синхроциклотрона СЦ-1000 для обеспечения научной и экспериментальной деятельности НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ в 2020 г.

Программа энергетического пуска реактора ПИК на мощности до 10 МВт

А. С. Захаров, А. С. Полтавский

*Отдел физики и техники реакторов, Управление ядерной и радиационной безопасности
НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ*

В марте – апреле 2019 г. были проведены гидравлические испытания с имитаторами топливных сборок, в ходе которых осуществлены измерения характеристик первого контура и его основного оборудования при различных конфигурациях загрузки активной зоны для валидации расчетных моделей исследовательской ядерной установки ПИК.

Подготовлены отчеты о верификации всех программ для ЭВМ, используемых при обосновании безопасности следующего этапа энергопуска – достижения мощности 10 МВт. В рамках выполнения Программы энергетического пуска исследовательской ядерной установки ПИК разработана Программа испытаний в режиме освоения мощности до 10 МВт, которая определяет порядок выхода на уровень мощности до 10 МВт, объем и методы выполнения испытаний и экспериментов, а также порядок разгрузки активной зоны после их завершения.

Особенностью экспериментов в режиме освоения мощности до 10 МВт является ограничение энерговыработки величиной 2–5 МВт · сут, которая обеспечивает безопасные условия выполнения работ по модернизации элементов и систем, важных для безопасности, и плановой замене отдельных каналов в отражателе в рамках проекта «Создание приборной базы реакторного комплекса ПИК НИЦ „Курчатовский институт“ – ПИЯФ» до перехода к этапу освоения мощности 100 МВт.

В 2020 г. начато проведение испытаний и экспериментов, в числе которых:

– размещение в наклонных и вертикальных экспериментальных каналах нейтронно-актива-

ционных детекторов (НАД), выход в критическое состояние с 12 тепловыделяющими сборками (ТВС) и 6 алюминиевыми имитаторами ТВС в активной зоне, облучение НАД на мощности, первичная тарировка аппаратуры контроля нейтронного потока;

– проверка симметричности и фактического положения тяжелых рабочих органов системы управления и защиты (шторок) по результатам перекомпенсации в критическом состоянии;

– измерение эффектов реактивности при заполнении контура жидкостного регулятора тяжеловодным теплоносителем;

– измерение барометрического, расходного и температурного коэффициентов реактивности;

– проверка работы автоматического регулятора мощности;

– юстировка научной аппаратуры и эксперименты на пяти исследовательских нейтронных станциях.

Работы выполняются коллективами организаций НИЦ «Курчатовский институт» (головная научная организация), АО «Ордена Ленина Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники им. Н. А. Доллежалея» (головная конструкторская организация), ЗАО «НПО „Спецпроект“» (головная проектная организация) и НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ (эксплуатирующая организация).

Полученные на этапе освоения мощности до 10 МВт результаты послужат основой для обоснования безопасности и надежности работы систем на следующем этапе энергетического пуска – достижении номинальной мощности 100 МВт.

Запуск экспериментальных станций первой очереди на реакторе ПИК

В. В. Тарнавич, П. С. Матвеев, Д. А. Ипатов, А. Е. Соколов, К. А. Пшеничный, А. В. Сизов, А. О. Полюшкин, С. В. Гаврилов, И. А. Зобкало, В. А. Ульянов, М. А. Дьячков, С. О. Сумбаев, В. А. Матвеев, Д. В. Тыц, В. А. Соловей, М. Р. Колхидашвили
 Отделение нейтронных исследований, Отделение перспективных разработок,
 Инжиниринговый центр «Нейтронные технологии» НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Создание и введение в эксплуатацию пяти экспериментальных станций первой очереди на реакторе ПИК – составная часть решения задач развития синхротронных и нейтронных исследований, обеспечения создания и развития исследовательской инфраструктуры в РФ. Работы выполнены во исполнение Указа Президента РФ от 25.07.2019 № 356 «О мерах по развитию синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры в Российской Федерации».

В зале горизонтальных экспериментальных каналов реактора ПИК смонтированы на пучках нейтронов и введены в эксплуатацию пять исследовательских экспериментальных станций. Это рефлектометр поляризованных нейтронов NERO-2, тестовый нейтронный рефлектометр ТНР, тестовый нейтронный спектрометр «Т-Спектр»,

текстурный нейтронный дифрактометр ТЕХ-3 и дифрактометр поляризованных нейтронов ДПН (рис.). Введенные в эксплуатацию пять экспериментальных станций обеспечивают реализацию базового набора нейтронных методик: дифрактометрии, рефлектометрии и спектрометрии.

Были проведены нейтронно-физические испытания станций, выполнены тестовые эксперименты. Подготовлен коллектив для эксплуатации станций, создана инженерная инфраструктура, наработаны механизмы взаимодействия со службами технической поддержки, т. е. создан научно-технический, а также технологический задел для последующей реализации полномасштабного комплекса экспериментального оборудования, создаваемого в рамках проекта «Создание приборной базы реакторного комплекса ПИК» (сроки выполнения – 2019–2024 гг.).



Установки первой очереди РК ПИК:
 а – рефлектометр NERO-2;
 б – тестовый нейтронный рефлектометр ТНР;
 в – тестовый спектрометр «Т-Спектр»;
 г – текстурный нейтронный дифрактометр ТЕХ-3;
 д – дифрактометр поляризованных нейтронов ДПН

Работа синхроциклотрона СЦ-1000 для обеспечения научной и экспериментальной деятельности НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ в 2020 г.

Е. М. Иванов, С. А. Артамонов, Л. А. Сухоруков
 Отделение перспективных разработок НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Одной из базовых установок НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ является синхроциклотрон СЦ-1000 (рис. 1). Он находится в успешной эксплуатации с 1970 г. Основные параметры синхроциклотрона приведены в таблице.



Рис. 1. Синхроциклотрон СЦ-1000

Таблица. Основные параметры СЦ-1000

Характеристика	Величина
Диаметр полюса	7,0 м
Ток обмотки	5 400 А
Ускоряемая частица	Протоны
Энергия пучка	1 000 МэВ
Ток выведенного пучка	До 1 мкА

Синхроциклотрон СЦ-1000 используется для фундаментальных исследований в физике элементарных частиц, изучения структуры атомных ядер и механизмов ядерных реакций, в различных областях физики твердого тела. Также СЦ-1000 широко привлекается и для прикладных работ, например по радиационным испытаниям и ядерно-медицинским исследованиям.

СЦ-1000 является надежной, успешно и стабильно работающей установкой в РФ, на которой можно получать целый набор переменных энергий 100–1 000 МэВ, но основное время СЦ-1000 работает в режиме 1 000 МэВ. С ноября 2019 г. по ноябрь 2020 г. синхроциклотрон отработал на эксперимент 1 497 ч. На рисунке 2 показано распределение времени работы СЦ-1000 по месяцам, а на рис. 3 – по различным направлениям исследований.

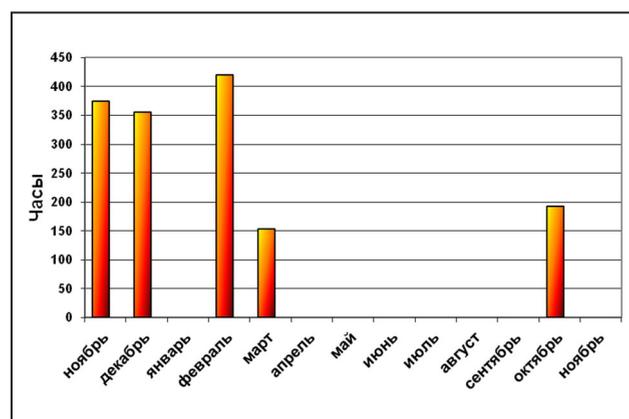


Рис. 2. Время работы СЦ-1000 в 2019–2020 гг.

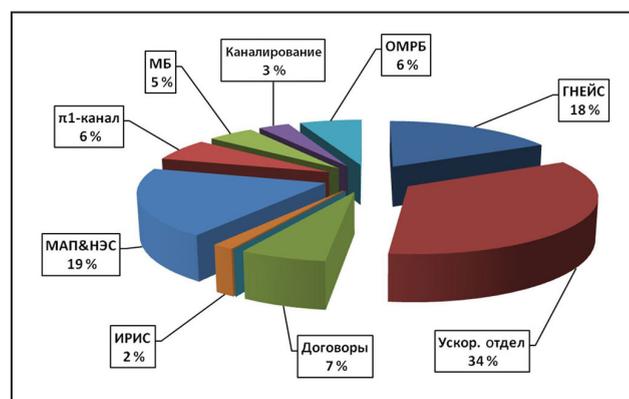


Рис. 3. Распределение времени работы СЦ-1000 по различным направлениям исследований

На протонных пучках СЦ-1000 выполнены следующие исследования

1. В рамках гранта РФФИ № 19-02-00005 на масс-сепараторе ИРИС продолжены онлайн- и офлайн-тесты нового мишенно-ионного устройства с ионным источником, изготовленным из монокристаллического вольфрама с повышенной работой выхода.

2. По плану научно-исследовательской работы (НИР) на двухплечевом магнитном спектрометре МАП&НЭС был выполнен ряд пионерских работ по изучению структуры атомных ядер с массовыми числами 9, 28, 56 и 90.

3. В рамках НИР по комплексной теме «Биомедицинские технологии» выполнена работа по исследованию влияния препаратов, содержащих ^{11}B , на эффективность терапевтического воздействия протонного пучка на животных моделях злокачественных опухолей.

4. В рамках разнообразной договорной деятельности выполнены следующие работы:

- разработка и создание моделей рака предстательной железы, экспрессирующего ПСМА (простатспецифический мембранный антиген), и плоскоклеточного рака головы и шеи у экспериментальных животных (для нужд Российского научного центра радиологии и хирургических технологий им. акад. А. М. Гранова);

- «Развитие методического и технического обеспечения радиационных исследований и испытаний опухолей гипофиза на пучках протонов СЦ-1000».

5. В рамках НИР «Модернизация УПСТ» продолжены следующие работы:

- измерение дозных полей с использованием термoluminesцентного дозиметра;
- эксплуатационные испытания нового дозиметрического оборудования.

6. В соответствии с тематическим планом научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР) в рамках государственного задания на 2020 г. и на плановый период 2021 и 2022 гг. на синхротронном СЦ-1000 были продолжены работы по исследованию радиационной стойкости фуллеренов и их производных.

7. В соответствии с тематическим планом НИОКР в рамках государственного задания на 2020 г. была продолжена разработка проекта

комплекса РИЦ-80 по производству радиоизотопов медицинского назначения на базе циклотрона Ц-80. Получены новые результаты на основе инновационного высокотемпературного метода выделения медицинских радионуклидов – α -эмиттеров ^{212}Pb и ^{224}Ra из мишени карбида тория высокой плотности.

8. Было продолжено выполнение программы сотрудничества с ГК «Роскосмос» и Министерством обороны РФ в области испытаний электро-радиоизделий на радиационную стойкость к воздействию тяжелых заряженных частиц.

На нейтронных пучках СЦ-1000 выполнены следующие исследования

На времяпролетном спектрометре ГНЕИС проведены работы в области фундаментальной и прикладной ядерной физики:

- в рамках гранта РФФИ № 18-02-00571 (2018–2020) осуществлены измерения угловых распределений и анизотропии осколков при делении тяжелых ядер нейтронами промежуточных энергий. Проведен модельный анализ полученных результатов. Выполняется совместно с Отделением нейтронных исследований и Отделением физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ при участии НИЦ «Курчатовский институт»;

- в рамках гранта РФФИ № 19-02-00116 (2019–2021) проводились исследования структуры барьера деления и свойств переходных состояний в нейтронных резонансах. Выполняется совместно с Отделением нейтронных исследований и Отделением физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ;

- в рамках договора с АО «Государственный научный центр Российской Федерации – Физико-энергетический институт им. А. И. Лейпунского» № 984-600-2/2019/6659 (2019–2021) «Экспериментальные исследования взаимодействия нейтронов с ядрами актинидов для отечественной библиотеки ядерно-физических данных БРОНД четвертого поколения» выполнены измерения сечений деления ^{240}Pu и ^{237}Np нейтронами промежуточных энергий 1–200 МэВ. Актуальность проведенных исследований связана с непрерывно растущими требованиями к точности и полноте систем ядерных данных, которые использу-

ются при разработке новейших ядерных технологий, прежде всего в ядерной энергетике;

- в рамках ФЦП № 14.607.21.0200 «Создание инновационной технологии производства новейших систем регистрации нейтронного излучения для решения задач по физике конденсированного состояния» (2018–2020) продолжены испытания трансмиссионного монитора потока тепловых нейтронов с энергией 0,01–1 эВ для экспериментов на пучках реактора ПИК.

На пучках π - и μ -мезонных каналов СЦ-1000 выполнены следующие исследования

В НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ в рамках тематического плана НИР планируется и готовится цикл экспериментов по изучению изотопической инвариантности в процессах образования η -мезона около порога и CUSP-эффекта в реакции перезарядки. С этой целью продолжено создание магнитного спектрометра на базе π -мезонного канала синхроциклотрона СЦ-1000. Намечено получить импульсное разрешение канала $\sim 0,5\%$, что подтверждает Монте-Карло-моделирование оптики π -мезонного канала. Осуществлена экспериментальная настройка протонного триплета для фокусировки протонного пучка на мезонообразующую мишень. Получена фокусировка в горизонтальной плоскости $\sigma = 2$ мм. Работы по созданию магнитного спектрометра будут продолжены.

На основе работ, проведенных на СЦ-1000, были опубликованы следующие материалы

1. Амерканов Д. А., Артамонов С. А., Иванов Е. М., Михеев Г. Ф., Рябов Г. А., Тонких В. А. // Научн.-техн. сб. конф. «Радиационная стойкость электрон. сист.» (Стойкость-2020). М., 2020. Вып. 23. С. 46–47.

2. Амерканов Д. А., Ермаков К. Н., Иванов Е. М., Иванов Н. А., Лобанов О. В., Пашук В. В. // ВАНТ. 2020. № 1. С. 13–17.

3. Артамонов С. А., Иванов Е. М., Рябов Г. А., Тонких В. А., Амерканов Д. А. // Яд. физ. и инжир. 2020. Т. 83. № 10. С. 1–5.

4. Брожик Д. С., Жидкова О. М., Иванов Е. М., Карлин Д. Л., Кузора Н. А., Лазарев В. И., Максимов В. И., Мамедова Н. И., Пак Ф. А., Рябов Г. А.,

Халиков А. И. Препринт НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ 3045. Гатчина, 2020. 48 с.

5. Брожик Д. С., Мамедова Н. И., Пак Ф. А., Васильев А. А., Халиков А. И. // Молодежн. конф. по теор. и эксп. физ. (МКТЭФ-2020). 2020. Т. 2. С. 7.

6. Васильев А. А., Голиков И. Г., Мамедова Н. И., Пак Ф. А., Жигалова М. В., Карлин Д. Л., Брожик Д. С., Халиков А. И., Василевская И. В. // Мед. физ. 2020. № 5. С. 5–12.

7. Волницкий А. В., Гараева Л. А., Бурдаков В. С., Разгильдина Н. Д., Лебедев Д. В., Амерканов Д. А., Пак Ф. А., Верлов Н. А., Коневега А. Л., Штам Т. А. // Сб. тезисов XXI Зимней молодежн. школы по биофиз. и молекул. биол. Гатчина, 2020. С. 48–49.

8. Воробьев А. С., Гагарский А. М., Щербakov О. А., Вайшнене Л. А., Барабанов А. Л. // Письма в ЖЭТФ. 2020. Т. 112. Вып. 6. С. 343–351.

9. Котб О. М., Брожик Д. С., Вербенко В. Н., Гулевич Е. П., Ежов В. Ф., Карлин Д. Л., Пак Ф. А., Пастон С. В., Поляничко А. М., Халиков А. И., Чихиржина Е. В. // Биофизика. 2021. Т. 66. № 2. С. 240–247.

10. Разгильдина Н. Д., Гараева Л. А., Волницкий А. В., Бурдаков В. С., Верлов Н. А., Амерканов Д. А., Пак Ф. А., Лебедев Д. В., Коневега А. Л., Штам Т. А. // Сб. тезисов XXI Зимней молодежн. школы по биофиз. и молекул. биол. Гатчина, 2020. С. 183–184.

11. Artamonov S.A., Ivanov E.M., Riabov G.A., Tonkikh V.A., Amerkanov D.A. // Phys. At. Nucl. 2020. V. 83. No. 12. P. 1700–1704.

12. Barabanov A.L., Vorobyev A.S., Gagarski A.M., Shcherbakov O.A., Vaishnene L.A. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2020. V. 84. No. 4. P. 397–402.

13. Lebedev D., Garaeva L., Burdakov V., Volnitskiy A., Razgildina N., Garina A., Amerkanov D., Pак F., Shabalin K., Ivanov E., Ezhov V., Konevega A., Shtam T. // Rad. Conf. Proc. 2020. V. 4. P. 1–4.

14. Miklukho O.V., Kisselev A.Yu., Amalsky G.M., Andreev V.A., Barsov S.G., Gavrilov G.E., Zhdanov A.A., Izotov A.A., Ilyin D.S., Kozlenko N.G., Kravchenko P.V., Maysuzenko D.A., Murzin V.I., Novinskiy D.V., Shvedchikov A.V. // Phys. At. Nucl. 2020. V. 83. No. 3. P. 431–441.

15. Panteleev V.N., Barzakh A.E., Batist L.Kh., Fedorov D.V., Ivanov V.S., Moroz F.V., Molkanov P.L., Orlov S.Yu., Seliverstov M.D., Volkov Yu.M. // Nucl. Inst. Meth. Phys. Res. B. 2020. V. 463. P. 364.
16. Seliverstov M., Barzakh A., ..., Fedorov D., Fedoseev V., ..., Molkanov P., Panteleev V. et al. // Hyperf. Interact. 2020. V. 241. P. 40.
17. Vorobyev A.S., Gagarski A.M., Shcherbakov O.A., Vaishnene L.A., Barabanov A.L. // JETP Lett. V. 112. No. 6. P. 323–331.
18. Устройство для радиационного экспресс-облучения электроники авиакосмического назначения протонами с использованием синхротрона: пат. РФ на изобретение № 2720494 / Артамонов С. А., Иванов Е. М., Михеев Г. Ф., Анашин В. С., Крылов Д. Г., Чубунов П. А.; дата приоритета 02.10.2019.; опубл. 30.04.2020.
19. Программа поиска статических равновесных орбит и параметров движения в изохронном циклотроне на суперпериоде. Свид. о гос. рег. программы для ЭВМ № 2020612261 / Артамонов С. А.; дата гос. рег. 19.02.2020.
20. Программа READ PSI. Свид. о гос. рег. программы для ЭВМ № 2020661440 / Геталов А. Л., Воробьев С. И., Комаров Е. Н., Котов С. А., Щербаков Г. В.; дата гос. рег. 23.09.2020.



Научно-организационная деятельность

- 118** Кадровый состав
- 120** Количественные показатели научной
и образовательной деятельности
- 124** Награды. Премии
- 128** Научные мероприятия

Кадровый состав

Численность сотрудников

Профессиональные квалификационные группы должностей	2018	2019	2020
Всего без учета совместителей	1 973	1 962	1 987
Всего научных сотрудников	490	473	473
<i>Из них с должностью</i>			
руководителя	65	68	66
главного научного сотрудника	9	9	9
ведущего научного сотрудника	43	42	44
старшего научного сотрудника	157	151	146
научного сотрудника	97	86	83
младшего научного сотрудника	55	58	59
прочие научные сотрудники	64	59	66
<i>С ученой степенью</i>			
доктора наук	66	66	62
кандидата наук	230	218	215
<i>С ученым званием</i>			
академика	-	-	-
члена-корреспондента	2	2	2
профессора	12	9	8
доцента (с. н. с.)	90	87	80

Сведения о научном стаже сотрудников

Должность	Численность	В том числе со стажем		
		до 5 лет	более 5 лет	более 10 лет
Зав. лабораториями и отделами	38	2	2	34
Главные научные сотрудники	9	-	-	9
Ведущие научные сотрудники	44	2	-	42
Старшие научные сотрудники	146	10	10	126
Научные сотрудники	83	10	23	50
Младшие научные сотрудники	59	28	22	9

Численность научных сотрудников по возрастным группам

Профессиональные квалификационные группы должностей	Возраст, лет					
	20–29	30–39	40–49	50–59	60 и старше	средний возраст
Всего научных сотрудников	84	88	47	65	189	52
<i>С ученой степенью</i>						
доктора наук	-	-	6	10	46	69
кандидата наук	5	36	28	41	105	58
Не имеют ученой степени	79	52	13	14	38	40
<i>С ученым званием</i>						
академика	-	-	-	-	-	-
члена-корреспондента	-	-	-	-	2	83
профессора	-	-	-	-	8	82
доцента (с. н. с.)	-	-	-	4	76	72

Численность и средний возраст научных сотрудников по должностям

Должность	2018		2019		2020	
	Численность	Средний возраст	Численность	Средний возраст	Численность	Средний возраст
Главный научный сотрудник	9	81	9	82	9	83
Ведущий научный сотрудник	43	68	42	69	44	68
Старший научный сотрудник	157	61	151	62	146	62
Научный сотрудник	97	51	86	51	83	50
Младший научный сотрудник	55	31	58	32	59	32
Руководитель	65	64	68	63	66	62
Прочие научные сотрудники	64	26	59	27	66	27

Структура и штатная численность за 5 лет

Категория персонала	2016	2017	2018	2019	2020
Научный персонал	529,4	503,9	489,2	435,5	450,2
Научно-технический персонал	244,5	241,8	251,8	290,7	296,05
Административно-хозяйственный персонал	1 158,8	1 121,9	1 181,4	1 253,1	1 290,15
Младший обслуживающий персонал	24,5	32,5	32,5	32,5	31,5
Всего по штатному расписанию	1 957,2	1 900,1	1 954,9	2 011,8	2 067,9

Количественные показатели научной и образовательной деятельности

В НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ выполнены все мероприятия, а также достигнуты все целевые индикаторы и показатели, запланированные на 2020 г., в т. ч. за счет субсидии на финансовое обеспечение выполнения государственного задания на 2020 г.

Сотрудники Института в 2020 г. были авторами и соавторами 674 статей, из них 473 публикации, проиндексированные в базе данных WEB of Science («Сеть науки») и ассоциированные с НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, что составляет 70,2 % от общего количества опубликованных статей.

Динамика числа публикаций, ассоциированных с НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, за 5 лет

Год	Общее число публикаций / публикации, индексируемые в базе данных WEB of Science
2016	569/398
2017	592/426
2018	689/507
2019	714/465
2020	674/473

Динамика участия в научных мероприятиях за 5 лет

Год	Количество фактов участия в выставочной деятельности, конференциях, на форумах и т. д.
2016	340
2017	466
2018	420
2019	422
2020	387

Число полученных в 2020 г. международных и российских патентов, правообладателем которых является НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, по виду охраняемых документов

Объекты патентного права по виду охраняемых документов			
Патент на изобретение	Патент на полезную модель	Свидетельство на программу для ЭВМ	Всего
5	8	13	26

Динамика числа охранных документов, правообладателем которых является НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, за 5 лет

Вид правоохранительного документа	2016	2017	2018	2019	2020
Патенты на изобретения	3	4	7	10	5
Патенты на полезные модели	4	5	4	2	8
Свидетельства на программы для ЭВМ	5	6	25	12	13
Свидетельства на базы данных	2	1	1	-	-
Зарегистрированные ноу-хау	1	-	3	-	-
Всего	15	16	40	24	26

В 2020 г. научные исследования сотрудников Института были поддержаны грантами РФФИ (34) и РНФ (14), также имелась поддержка Минобрнауки России в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 гг.».

В 2020 г. в рамках выполнения Программы деятельности НИЦ «Курчатовский институт» на 2018–2022 гг. сотрудники Института защитили 6 кандидатских и 3 докторские диссертации.

Подготовка кадров высшей квалификации за 5 лет

Год	Общее число диссертаций / диссертации на соискание ученой степени доктора наук
2016	13/2
2017	11/1
2018	8/2
2019	7/-
2020	9/3



В соответствии с приказом Рособнадзора от 06.07.2020 № 722 Институту выдано свидетельство о государственной аккредитации программ высшего образования – программ подготовки научно-педагогических кадров высшей квалификации в аспирантуре (серия 90A01 № 0003632, рег. № 3414 от 06.07.2020; лицензия от 02.06.2017 № 2599) в соответствии с требованиями ФГОС ВО по 2 направлениям:

- 03.06.01 «Физика и астрономия» по направленностям: 01.04.02 «Теоретическая физика», 01.04.07 «Физика конденсированного состояния», 01.04.16 «Физика атомного ядра и элементарных частиц», 03.01.02 «Биофизика»;
- 06.06.01 «Биологические науки» по направленности 03.02.07 «Генетика».

На ближайшие 6 лет все программы обучения в аспирантуре НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ имеют государственную ак-

кредитацию. Сведения о наличии у Института свидетельства о государственной аккредитации программ аспирантуры официально внесены в реестр организаций, осуществляющих образовательную деятельность по имеющим государственную аккредитацию образовательным программам.

В 2020 г. на обучение в аспирантуру (очная форма) было зачислено 11 человек: 4 человека по направлению подготовки 06.06.01 «Биологические науки» (направленность 03.02.07 «Генетика») и 7 человек по направлению подготовки 03.06.01 «Физика и астрономия» (направленности: 01.04.02 «Теоретическая физика», 01.04.07 «Физика конденсированного состояния», 01.04.16 «Физика атомного ядра и элементарных частиц», 03.01.02 «Биофизика»).

Общая численность аспирантов на конец 2020 г. составляла 49 человек.

В 2020 г. НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ участвовал в открытом конкурсе Минобрнауки России по распределению контрольных цифр приема (КЦП) граждан на обучение по программам аспирантуры за счет бюджетных ассигнований федерального бюджета на 2021/22 учебный год. Были получены КЦП по направлениям подготовки: 03.06.01 «Физика и астрономия» – 8 мест, 06.06.01 «Биологические науки» – 4 места.

В 2020 г. доля молодых ученых (исследователей без ученой степени, кандидатов наук до 35 лет и докторов наук до 40 лет) в общем количестве сотрудников, занятых в исследованиях и разработках, в НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ составила 28 %.

В лабораториях Института в 2020 г. выполняли учебно-исследовательские и научные работы, проходили практику, готовили выпускные квалификационные работы бакалавров и специалистов, а также магистерские диссертации более 150 студентов вузов страны.

Динамика численности студентов профильных вузов, проходивших практику в Институте в рамках выполнения Программы деятельности НИЦ «Курчатовский институт», за 5 лет

Год	Количество студентов
2016	105
2017	101
2018	122
2019	127
2020	154

НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, стремясь популяризировать науку и заинтересовать молодежь в получении профильного физического и биологического образования, занимается организацией и проведением экскурсий по территории и объектам Института (в частности, на ускорительные комплексы СЦ-1000 и Ц-80, реакторный комплекс ПИК, реактор ВВР-М, в Отделение молекулярной и радиационной биофизики и другие научные подразделения) и участвует в профориентационной работе со школьниками старших классов.

В соответствии с договором о сотрудничестве и совместной деятельности между администрацией Гатчинского муниципального района Ленинградской области и НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ и в рамках действующих соглашений о сотрудничестве с образовательными учреждениями (МБОУ «Гатчинский лицей № 3 им. Героя Советского Союза А. И. Перегудова», МБОУ «Гатчинская СОШ № 9 с углубленным изучением отдельных предметов», АНОО «Гатчинская гимназия «Апекс», МБОУ ДО «ГЦНО «Центр информационных технологий», МБОУ «Гатчинская СОШ № 2») сотрудниками Института ведется работа со старшеклассниками, включающая чтение научно-популярных лекций, отбор перспективных учащихся и проведение с ними практических занятий по углубленному изучению физики, биологии, химии и математики.

В научно-образовательном центре НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ читаются лекции и проводятся факультативные занятия по углубленному изучению отдельных тем по физике и биологии для учащихся школ Гатчины и Гатчинского района, в рамках которых ученики знакомятся с достижениями современной науки и техники. Активно ведется профориентационная работа с учащимися ведущих школ Санкт-Петербурга и Ленинградской области, а также студентами вузов всего Северо-Западного региона. Проводятся научно-популярные лекции (в т. ч. выездные – на территории школ), экскурсии в структурные подразделения Института, пропагандирующие достижения российской науки и тем самым повышающие интерес к научным профессиям в целом и деятельности НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ в частности.

В рамках соглашения о сотрудничестве между Санкт-Петербургским государственным университетом (СПбГУ) и НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ сотрудники Института читают лекции и проводят лабораторные работы по учебной образовательной программе «Конвергенция и наукоемкие технологии» для учащихся 10-х и 11-х классов Академической гимназии им. Д. К. Фаддеева СПбГУ.

В НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ ведется уникальный проект по программе «Школьная экологическая инициатива», направленный на экологическое воспитание детей и подростков и отмечающий в 2020 г. 30-летний юбилей. В 2020 г. состоялись творческие конкурсы, олимпиады, экологические акции, в которых приняли участие около 5 000 юных жителей Гатчины и Гатчинского района. За 30 лет своего существования проект «Школьная экологическая инициатива» объединил более 100 тыс. участников.



Награды. Премии

НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ является активно функционирующим институтом, идущим в ногу с современными научными тенденциями, о чем свидетельствуют многочисленные премии и стипендии сотрудников Института.

Активное участие сотрудников Института в конкурсе на соискание **премии имени И. В. Курчатова** стало уже доброй традицией. Особенно приятно, что его организаторы привлекают к участию не только ведущих и молодых ученых и инженеров, но также и студентов. В 2019 г. среди победителей – работы и авторские коллективы НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ.

В области научных исследований в числе лучших названа работа *С. В. Григорьева, Е. В. Алтынбаева, К. А. Пшеничного, Е. В. Москвина, С. В. Малеева* «Спиновая хиральность и энергетический ландшафт кубических геликоидальных магнетиков».

Среди работ молодых научных сотрудников и инженеров-исследователей одной из лучших признана работа *О. И. Утесова* «Фазовые переходы в мультиферроиках со спиральной магнитной структурой».

Среди студенческих работ в список победителей вошли магистерские диссертации *Л. А. Азаровой* «Исследование фрактальных свойств ксерогелей диоксида циркония при различных температурах отжига», *А. О. Петровой* «Выбор оптимальных параметров времяпролетного нейтронного спектрометра на стационарных и импульсных источниках» и *А. О. Коптюхова* «Тепловой режим источника ультрахолодных нейтронов на реакторе ВВР-М».

В 2020 г. **в области научных исследований** в числе лучших признана работа «Структурно-функциональные исследования действия антибиотиков на прокариотические рибосомы» коллектива авторов (*А. Л. Коневега, Е. В. Полесскова, П. С. Касацкий, А. Г. Мясников, Е. Б. Пичкур*).

Среди работ молодых научных сотрудников и инженеров-исследователей в список победителей вошли работы *Е. Г. Яшиной* «Исследование структурной организации хроматина в ядре биологической клетки методами малоуглового рассеяния нейтронов», *Л. В. Скрипникова* и *Д. В. Чубукова* «Изучение эффектов нарушения фундаментальных дискретных симметрий в тяжелых атомах и двухатомных молекулах».

Среди студенческих работ победила работа *Н. В. Суриной* «Анализ морфологии и функций глиальных клеток на модели болезни Альцгеймера *Drosophila melanogaster*».

Динамика получения премии имени И. В. Курчатова сотрудниками НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ за 2012–2020 гг.

Номинация конкурса	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
В области научных исследований	1	1	1	1	3	–	2	1	1
В области инженерных и технологических разработок	1	–	2	1	–	1	1	–	–
Среди работ молодых научных сотрудников и инженеров-исследователей	–	1	2	2	3	1	3	1	2
Среди студенческих работ	–	–	3	4	5	2	1	3	1
Всего	2	2	8	8	11	4	7	5	4

В ежегодном конкурсе научных работ на соискание премии имени академика А. П. Александрова в НИЦ «Курчатовский институт» за 2020 г. победителями стали: А. П. Серебров, В. А. Лямкин, А. К. Фомин, А. О. Коптюхов и Д. В. Прудников с работой «Источник ультрахолодных нейтронов на основе сверхтекучего гелия для РК ПИК».

Динамика получения премии имени академика А. П. Александрова сотрудниками НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ за 2015–2020 гг.

Номинация конкурса	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Основное отделение конкурса	1	-	1	1	-	1
Молодежное отделение конкурса	-	2	-	-	-	-
Всего	1	2	1	1	-	1

В 2020 г. правительством Ленинградской области оказывалась поддержка 8 работ сотрудников НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, удостоенных **именных научных стипендий губернатора Ленинградской области**: 4 сотрудника получили именную научную стипендию губернатора Ленинградской области в категории «молодые ученые» и 4 сотрудника – в категории «ведущие ученые».

Именные стипендиаты губернатора Ленинградской области в категории «ведущие ученые»:

- А. К. Емельянов, старший научный сотрудник ОМРБ. «Эпигенетические нарушения при болезни Паркинсона»;
- Н. С. Мосягин, старший научный сотрудник ОПР. «Генерация нового поколения релятивистских эффективных потенциалов остова для легких элементов таблицы Менделеева, предназначенных для высокоточных предсказаний свойств их соединений»;
- С. И. Воробьев, и. о. заведующего лабораторией ОФВЭ. «Исследование наноструктурированных магнитных систем с помощью μ SR-метода на синхротроне ПИЯФ»;
- Д. В. Федоров, заместитель заведующего лабораторией ОФВЭ. «Лазерно-спектроскопические исследования эволюции форм ядер на масс-сепараторных комплексах».

Именные стипендиаты губернатора Ленинградской области в категории «молодые ученые»:

- К. А. Ившин, научный сотрудник ОФВЭ. «Разработка и создание детектора протонов отдачи для прецизионного измерения радиуса протона (эксперимент „Протон”)»;
- Р. М. Самойлов, младший научный сотрудник ОНИ. «Приборный комплекс „Нейтрино” на исследовательском реакторе ПИК»;
- П. А. Мелентьев, аспирант, лаборант-исследователь ОМРБ. «Изучение генетических основ молекулярных и клеточных механизмов старения»;
- Т. С. Усенко, научный сотрудник ОМРБ. «Дисфункция лизосом при синуклеинопатиях».

Накануне Нового года стали известны имена лауреатов **премий губернатора Ленинградской области** за вклад в развитие науки и техники в Ленинградской области и за лучшую исследовательскую работу.

Лауреатом премии губернатора Ленинградской области за вклад в развитие науки и техники в Ленинградской области «За достижения в области фундаментальных и прикладных исследований» в номинации «Естественные и технические науки» стал старший научный сотрудник ОПР кандидат физико-математических наук Л. В. Скрипников.



Лауреатом премии губернатора Ленинградской области III степени за лучшую научно-исследовательскую работу для молодых ученых стала научный сотрудник ОМРБ кандидат биологических наук *Т. С. Усенко*.

Для молодых ученых и специалистов НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, демонстрирующих существенные успехи в научных исследованиях, были учреждены **именные стипендии** в знак признания заслуг и в память о выдающихся ученых С. Е. Бреслере, В. Н. Грибове, Г. М. Драбкине и В. М. Лобашеве, научная деятельность которых была неразрывно связана с Институтом. Стипендии присуждаются ежегодно по следующим номинациям:

- стипендия имени С. Е. Бреслера за работы в области биологии;
- стипендия имени В. Н. Грибова за работы в области теоретической физики;
- стипендия имени Г. М. Драбкина за работы в области физики конденсированного состояния;
- стипендия имени В. М. Лобашева за работы в области ядерной физики.



В 2020 г. 4 молодых сотрудника Института получили данные **именные стипендии**.

Стипендию имени В. Н. Грибова за работы в области теоретической физики получил младший научный сотрудник лаборатории квантовой химии ОМР Д. В. Чубуков. **Стипендия имени С. Е. Бреслера** за работы в области биологии присуждена лаборанту-исследователю лаборатории экспериментальной и прикладной генетики ОМРБ *Е. В. Рябовой*, лаборанту-исследователю лаборатории биофизики белка ОМРБ *Н. В. Колчиной*

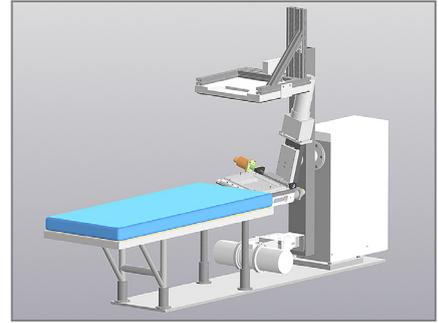
и лаборанту-исследователю лаборатории биосинтеза белка ОМРБ *О. В. Шулениной*. В 2020 г. стипендии имени **В. М. Лобашева** за работы в области ядерной физики и имени **Г. М. Драбкина** за работы в области физики конденсированного состояния решено было не присуждать.

Работа «Программный комплекс EXP-T для высокоточного квантово-механического моделирования электронных состояний и свойств систем», результаты которой представил младший научный сотрудник ОМР Александр Олейниченко, выполненная совместно с другими работниками ОМР: главным научным сотрудником доктором физико-математических наук *А. В. Зайцевским* и старшим научным сотрудником кандидатом физико-математических наук *Л. В. Скрипниковым*, а также профессором *Е. Элиавом* из Тель-Авивского университета (Израиль), на научной конференции «Суперкомпьютерные дни в России – 2020» была отмечена дипломом за лучший научный доклад.

Заведующий лабораторией физики экзотических ядер ОФВЭ профессор *Ю. Н. Новиков* получил статус доверительного рецензента ведущего научного издательства IOP Publishing, штаб-квартира которого находится в Бристоле (Великобритания). Юрий Николаевич получил его одним из первых в этой учрежденной номинации по результатам рейтинга и без каких-либо подтверждающих тренингов и сертификатов. В дипломе и сопроводительном письме издательства говорится, что статус доверительного рецензента IOP подтверждает, что профессор Ю. Н. Новиков «продемонстрировал исключительно высокий уровень компетентности в области рецензирования».



Младший научный сотрудник лаборатории медицинской физики Отдела медицинской радиологии Федор Пак победил в международном конкурсе асов компьютерного 3D-моделирования для предприятий в номинации «Молодой профессионал». На конкурс он представил проект установки протонной стереотаксической терапии (УПСТ), которая предназначена для лечения пациентов. Лечебный стол может вращаться вокруг вертикальной оси на 40° , а прибор – фиксатор головы – совершать маятниковые движения на угол 36° вокруг горизонтальной оси.



Конкурс проводится ежегодно компанией «Аскон» для предприятий – пользователей программы «Компас-3D» и привлекает внимание специалистов из разных отраслей, готовых продемонстрировать свои навыки инженерного мастерства. Из представленных более 1 000 проектов было выбрано всего лишь 10 лучших. Федор Пак получил грамоту и кубок.



На конкурсе научных работ НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ 2020 г. комиссия рассмотрела 34 работы по 8 научным направлениям деятельности Института.

На основании экспертных оценок после всестороннего обсуждения по решению комиссии:

- первую премию в области ядерной физики высоких энергий получила работа «Исследование энергетической зависимости сечения жесткого КХД-процесса $\gamma p \rightarrow J/\Psi p$ в экспериментах LHCb и ALICE на LHC»

(Г. Д. Алхазов, Н. Ф. Бондарь, А. А. Воробьев, А. А. Дзюба, М. Б. Жалов, В. В. Иванов, С. Н. Котряхова, Е. Л. Крышень, О. Е. Маев, М. В. Малаев, В. Н. Никулин, М. Г. Рыскин, В. Г. Рябов, Ю. Г. Рябов, Н. Р. Сагидова, В. М. Самсонов, А. В. Ханзадеев, А. Д. Чубыкин (коллектива НИЦ «Курчатовский институт»));

- в области теоретической физики лучшей признана работа «Неабелевы струны в $N = 1$ суперсимметричной КХД» (Е. А. Иевлев, А. В. Юнг);

- в области физики конденсированного состояния победила работа «Магнетизм двумерных слоистых оксидов с сотообразной сверхструктурой магнитных ионов» (А. Н. Коршунов, А. И. Курбаков, А. Л. Малышев, С. Ю. Подчезерцев, А. Н. Васильев, Т. М. Васильчикова, М. А. Евстигнеева, Е. А. Зверева, В. Б. Налбандян, Г. В. Раганян, М. И. Стратан, И. Л. Шукаев, F. Damaу, R. Klingeler, C. Koo, J. Park, I. Safiulina);

- в области биологических исследований первая премия присуждена работе «Особенности взаимодействия диригитромицина с рибосомами двух бактериальных видов» (А. Л. Коневега, Е. В. Полесскова, П. С. Касацкий, Е. Б. Пичкур, А. Г. Мясников, Н. Ф. Хабибулина, А. Г. Терещенков, Е. С. Комарова, Е. А. Сыроегин, Д. И. Ширяев, В. Г. Карцев, А. А. Богданов, О. А. Донцова, П. С. Сергиев, И. А. Остерман, Ю. С. Поликанов);

- в области прикладных исследований лучшей названа работа «Защитные мембраны на горизонтальных экспериментальных каналах реактора ПИК» (К. А. Коноплев).

По итогам конкурса были премированы 23 работы.



Научные мероприятия

Общеинститутские семинары

- 9 января. Семинар ОМРБ.** Ю. С. Поликанова. (Department of Biological Sciences Department of Pharmaceutical Sciences University of Illinois at Chicago, USA). «Визуализация молекул с помощью PyMOL и создание изображений для публикаций».
- 14 января. Ядерный семинар ОФВЭ.** Д. А. Иванищев. «Перспективы исследования тепловых фотонов в эксперименте МРД на ускорителе NICA».
- 21 января. Ядерный семинар ОФВЭ.** М. В. Смирнов (Университет им. Сунь Ятсена, Китай). «Эксперимент JUNO: статус и физика».
- 28 января. Ядерный семинар ОФВЭ.** А. Л. Геталов. « μ SR-исследования магнитной жидкости с 3%-ной концентрацией наночастиц CoFe_2O_4 ».
- 4 февраля. Ядерный семинар ОФВЭ.** Г. Д. Шабанов. «Гатчинский разряд в Китае и в России – исследование продолжается».
- 6 февраля. Теоретический семинар по ФКС.** С. В. Андреев. «Спаривание дипольных экситонов в полупроводниковых гетероструктурах».
- 11 февраля. Ядерный семинар ОФВЭ.** С. И. Манаенков. «Существует ли пентакварк θ^+ ?»
- 13 февраля. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ.** М. Г. Рыскин. «Физика ДГЛАП и БФКЛ».
- 18 февраля. Ядерный семинар ОФВЭ.** А. Е. Шевель. «Тенденции в развитии информационной инфраструктуры в ядерно-физических центрах».
- 20 февраля. Теоретический семинар по ФКС.** А. Н. Поддубный (Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН). «Взаимодействие двух фотонов с массивом атомов в волноводе».
- 20 февраля. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ.** М. Г. Рыскин. «Физика ДГЛАП и БФКЛ (часть 2)».
- 25 февраля. Ядерный семинар ОФВЭ.** Ю. Г. Нарышкин. «Поиск новой физики в процессах парного рождения t -кварков в эксперименте ATLAS».
- 27 февраля. Теоретический семинар по ФКС.** С. В. Малеев. «Спиновая хиральность и поляризованные нейтроны».
- 3 марта. Ядерный семинар ОФВЭ.** В. А. Гузей. «Проект электрон-ионного коллайдера в США».
- 4 марта. Семинар ОПР.** Н. В. Каманина. «Модификация свойств неорганических и органических материалов методами лазерных нанотехнологий».
- 5 марта. Теоретический семинар по ФКС.** А. С. Щербаков. «Спектр магнонов и спиновый резонанс в антиферромагнетике с большой одноионной анизотропией типа „легкая плоскость”».
- 10 марта. Ядерный семинар ОФВЭ.** В. А. Кузнецов. «Времяпролетные детекторы на базе пластических сцинтилляторов: обзор, принципы работы и калибровки».
- 12 марта. Общеинститутский семинар по ФКС.** Н. К. Плешанов. «Нейтронная спиновая оптика (по материалам докторской диссертации)».

- 17 марта. Ядерный семинар ОФВЭ.** А. Е. Барзах. «Лазерный ионный источник. История, статус и перспективы».
- 10 июня. Семинар ОМРБ.** Н. В. Цыган. «Воздействие COVID-19 на нервную систему: патогенез и клинические особенности».
- 15 сентября. Ядерный семинар ОФВЭ.** И. А. Митропольский. «Систематика ядерных радиусов на основе нейронных сетей».
- 17 сентября. Теоретический семинар по ФКС.** С. Е. Андреев. «Спин-орбитальный распад дипольных биэкситонов в сверхтекучей фазе».
- 17 сентября. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ.** А. П. Серебров. «Анализ результатов эксперимента „Нейтрино-4” по поиску стерильного нейтрино и сравнение с результатами других экспериментов».
- 22 сентября. Ядерный семинар ОФВЭ.** А. А. Дзюба. «Новые результаты LHCb по исследованию тетракварков».
- 23 сентября. Семинар ОМРБ.** Н. В. Колчина. «Молекулярные механизмы связывания коротких пептидов с днДНК и глобулярными белками».
- 29 сентября. Ядерный семинар ОФВЭ.** Е. Н. Комаров, С. Г. Шерман. «Билинейное разложение полного сечения реакций $dd \rightarrow n^3\text{He}$, $dd \rightarrow p^3\text{H}$ по парциальным амплитудам».
- 6 октября. Ядерный семинар ОФВЭ.** А. Б. Гриднев. «Пороговые аномалии в ядерных реакциях».
- 20 октября. Ядерный семинар ОФВЭ.** Д. Е. Соснов. «Первое наблюдение дифракционных процессов в протон-ядерных соударениях на БАК детектором CMS».
- 29 октября. Теоретический семинар по ФКС.** Н. Е. Савицкая. «Динамические фазовые переходы в модели принятия решения на меняющейся во времени сети».
- 3 ноября. Ядерный семинар ОФВЭ.** Д. В. Новинский. «Поляризационная программа исследований на ускорителе У-70 в Протвино: эксперимент СПАСЧАРМ».
- 10 ноября. Ядерный семинар ОФВЭ.** М. Д. Селиверстов. «Высокоэффективный многоцелевой ионный источник. Применение в медицине и ядерной физике».
- 25 ноября. Семинар ОПР.** К. Рейх (Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН). «Электронные свойства сильнолегированных полупроводниковых наноструктур».
- 26 ноября. Семинар ОМРБ.** С. В. Григорьев. “Switch of Fractal Properties of DNA in Chicken Erythrocytes Nuclei by Mechanical Stress”. («Переключение фрактальных свойств ДНК в ядрах эритроцитов цыплят при механическом воздействии».)
- 3 декабря. Теоретический семинар по ФКС.** М. Звонарев. “Mobile Impurity in a Quantum Fluid”. («Подвижная примесь в квантовой жидкости».)
- 24 декабря. Теоретический семинар по ФКС.** О. И. Утесов. «Последовательности фазовых переходов во фрустрированных анизотропных антиферромагнетиках во внешнем магнитном поле».

Конференции

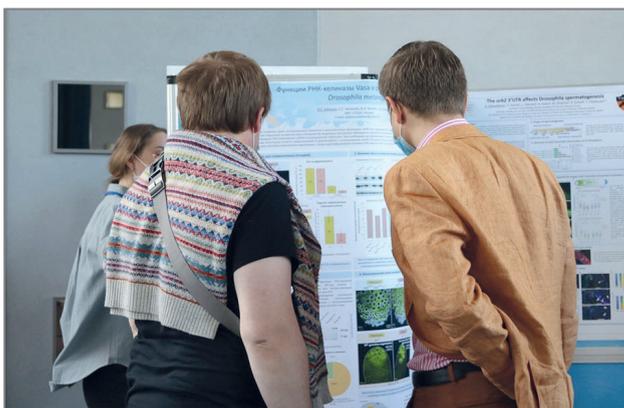
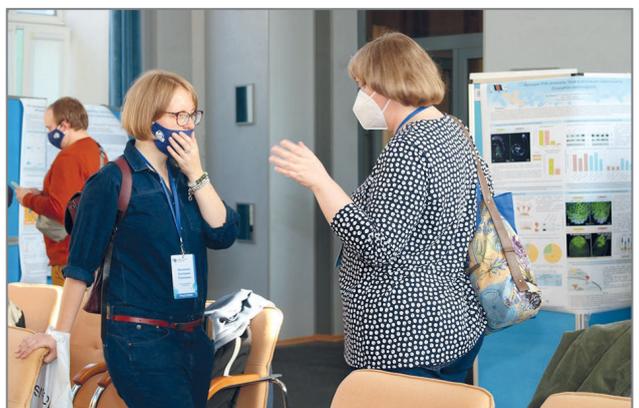
В рамках широкого спектра тематик научных исследований, осуществляемых в НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, организуются собственные конференции, лектории и рабочие совещания, в которых участвуют ведущие научные центры России и зарубежья.

В 2020 г. при участии Института было организовано 11 мероприятий (совещания, конференции и школы).

Проведенные мероприятия

1. День науки. **6–7 февраля.**
2. XXI Зимняя молодежная школа по биофизике и молекулярной биологии. **24–29 февраля.**
3. 54-я Зимняя школа ПИЯФ по физике ядра и элементарных частиц. **10–15 марта.**
4. 54-я Зимняя школа ПИЯФ по физике конденсированного состояния «ФКС-2020». **16–21 марта.**
5. Экологический праздник «Экошоу-2020». **25 сентября.**
6. V Молодежная школа реактора ПИК «Профессионализм. Интеллект. Карьера. ПИК-2020». **7–25 сентября.**
7. Международная конференция «Дрозософила в генетике и медицине». **30 сентября – 2 октября.**
8. Пятое рабочее совещание по неупругому рассеянию нейтронов «Спектрина-2020». **11–12 ноября.**
9. VII Всероссийский молодежный научный форум Open Science 2020. **18–20 ноября.**
10. Юбилейная конференция «Молодые таланты – 2020» программы «Школьная экологическая инициатива». **9 декабря.**
11. IX Школа по физике поляризованных нейтронов «ФПН-2020». **10–11 декабря.**







Основные результаты научной деятельности 2020

Оформление обложки *Т. А. Парфеевой*
Корректоры *Н. В. Силинская, Е. С. Степовая*
Компьютерная обработка, верстка *Е. В. Веселовской, А. О. Павловой*

Отпечатано в издательско-полиграфическом отделе
НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ на Konica Minolta bizhub PRO C1060L

188300, Гатчина Ленинградской обл., мкр. Орлова роща, д. 1
Зак. 357, тир. 300, уч.-изд. л. 12,5; 27.05.2021.