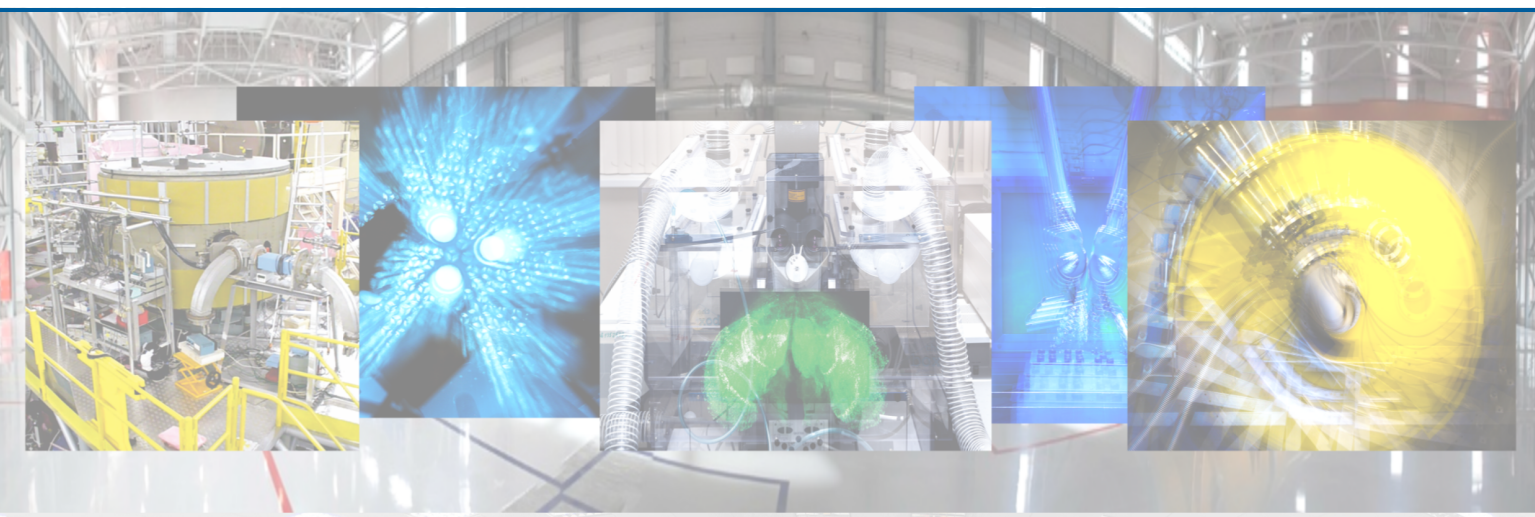
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»
Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»

Основные результаты научной деятельности

2023

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



Основные результаты научной деятельности 2023

Гатчина • 2024

Научные редакторы:
В. В. Воронин
С. В. Саранцева
С. И. Воробьев
В. И. Максимов
Е. В. Москвин

Составители:
Д. Н. Аристов
С. И. Воробьев
Н. Н. Губанова
А. Л. Коневега
А. И. Курбаков
Р. А. Ниязов
В. В. Саранцев
А. В. Титов
О. Л. Федин
С. Р. Фридман
К. А. Шабалин
В. М. Шахова

Ответственный за выпуск
С. И. Воробьев

Основные результаты научной деятельности – 2023. –
Гатчина Ленинградской обл.: Издательство
НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, 2024. – 134 с.

Данное издание представляет собой сборник кратких описаний наиболее существенных результатов научных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ за 2023 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 978-5-86763-490-2

© НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, 2024

Оглавление

7 Введение

11 Научные отделения

31 Теоретическая и математическая физика

43 Исследования с использованием нейтронов, фотонов и мюонов

51 Исследования с использованием протонов и ионов. Физика нейтрино

67 Биологические исследования

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

85 Физика ядерных реакторов и ускорителей

97 Прикладные исследования и разработки

103 Базовые установки

109 Научно-организационная деятельность

22 31 десятилетие науки и технологий

1956

1971

2011

2023

Уважаемые коллеги, дорогие друзья!

НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ – крупнейший многопрофильный научный центр России, осуществляющий комплекс фундаментальных и прикладных исследований широкого спектра направлений, входящий в состав Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», который в 2023 г. отметил свой 80-летний юбилей и 120-летие со дня рождения выдающихся ученых – академиков И. В. Курчатова и А. П. Александрова.

Согласно указу Президента Российской Федерации «О мерах по развитию синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры в Российской Федерации», а также в рамках мероприятий национального проекта «Наука и университеты» и Федеральной научно-технической программы развития синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры в Российской Федерации на 2019–2027 гг. в НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ успешно реализуются проекты на уникальной научной установке класса «мегасайенс» – реакторе ПИК. В 2023 г. в соответствии с Программой ввода исследовательской ядерной установки ПИК в эксплуатацию разработан технический проект модернизированной активной зоны на базе ТВС ПИК-2, изготовлен и поставлен первый эксплуатационный комплект ТВС ПИК-2. Активно продолжаются работы по изготовлению и поставке 20 научных станций.

В этом году в рамках создания новейшего отечественного научно-образовательного медицинского центра ядерной медицины НИЦ «Курчатовский институт» на базе действующего циклотрона Ц-80 активно проводились работы по созданию онкоофтальмологического комплекса (проект «Око») для пациентов Северо-Западного региона России и других регионов страны с внутриглазными опухолями, опухолями орбиты, поверхностно расположенными опухолями головы и шеи, а также по созданию инновационного радиоизотопного комплекса (проект «Изотоп») для наработки широкого спектра медицинских радионуклидов для диагностики и терапии онкологических заболеваний, болезней системы кровообращения, болезней нервной системы и иных заболеваний. В 2023 г. техническая готовность указанных объектов составила от 25 до 50 %.

Многолетние традиции, уникальные научный, технологический и кадровый потенциал – вот показатели высочайшего профессионализма, энергии и любви к своему делу мощной команды Курчатовского института – одного из крупнейших и признанных в мире исследовательских центров России, ведущего фундаментальные и прикладные исследования в различных областях.

Пусть и в дальнейшем работа высококвалифицированных специалистов, профессионалов своего дела, способствует процветанию и развитию российского государства и отечественной науки.

Президент НИЦ «Курчатовский институт» Михаил Валентинович Ковальчук

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 2023 г. в стенах Института трудились более 2 000 человек, из них около 400 – научные сотрудники, более 65 докторов и 220 кандидатов наук. Один сотрудник является членом-корреспондентом РАН, один – профессором РАН.

В составе Института функционируют пять основных 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 Тематическом плане по научно-исследовательским и опытно-конструкторским работам (НИОКР) в рамках исполнения государственного задания.

В Институте работают и создаются базовые установки для физических исследований. Ядерный 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 области ядерной физики, физики конденсированного состояния, радиационного материаловедения, радиобиологии, наработка радионуклидов для медицинских и технических целей. Протонный синхроциклотрон СЦ-1000 отметил в ноябре 2022 г. 55-летний юбилей физического пуска. Выполнялись работы по созданию на изохронном циклотроне Ц-80 радиоизотопного комплекса «Изотоп» для развития методов наработки радионуклидов и получения широкого спектра радиоизотопов для диагностики и терапии онкологических, сердечно-сосудистых, неврологических и офтальмологических заболеваний, а также работы по строительству онкоофтальмологического комплекса «Око» для лечения злокачественных новообразований глаза и орбиты.

В 2023 г. продолжались работы по реализации инвестиционных проектов по модернизации и реконструкции инженерно-технических систем реакторного комплекса ПИК (РК ПИК). Безусловно, этот год стал важным этапом на пути создания РК ПИК: закончены работы по объекту «Реконструкция лабораторного комплекса научно-исследовательского реакторного комплекса ПИК (этап 2)», получены положительное заключение Ростехнадзора о соответствии объекта капитального строительства от 05.06.2023 № 11-42.9, а также разрешение госкорпорации «Росатом» на ввод в эксплуатацию от 29.06.2023 № 1-12.7-04-02/05. В соответствии с Программой ввода исследовательской ядерной установки ПИК в эксплуатацию разработан технический проект модернизированной активной зоны на базе ТВС ПИК-2. Первый эксплуатационный комплект ТВС ПИК-2 в 2023 г. изготовлен и поставлен на РК ПИК.

Активно ведутся работы по изготовлению и поставке 20 экспериментальных станций. Перед НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ по-прежнему стоит амбициозная задача по реализации проекта мирового уровня – создание на базе высокопоточного исследовательского реактора ПИК Международного центра нейтронных исследований (МЦНИ).

Реализация проекта создания МЦНИ на базе РК ПИК осуществляется в рамках национального проекта «Наука и университеты» и в соответствии с Указом Президента РФ от 25.07.2019 № 356 «О мерах по развитию синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры в Российской Федерации», а также в рамках мероприятий Федеральной научно-технической программы развития синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры в Российской Федерации на 2019–2027 годы.

Высокопоточный исследовательский реактор ПИК предназначен для проведения широкого круга работ в области ядерной физики и физики элементарных частиц, физики конденсированного состояния, материаловедения, структурной и радиационной биологии и биофизики, радиационной физики и химии, а также для решения прикладных технических задач. Успешная реализация данного проекта позволит России занять одно из ведущих мест на мировых рынках оказания высокотехнологичных услуг по использованию

нейтронных и ядерных методов в разработке новых материалов и изделий, даст эффективный способ изучения свойств вещества и создания новых материалов.

МЦНИ позволит удовлетворить спрос в проведении нейтронных исследований всех заинтересованных потребителей, не только России и стран СНГ, но и других зарубежных стран. В состав МЦНИ вошли представители таких стран, как Беларусь, Узбекистан и Иран.

В рамках мероприятия федерального проекта «Развитие инфраструктуры для научных исследований и подготовки кадров» национального проекта «Наука и университеты» по созданию новейшего отечественного научно-образовательного медицинского центра ядерной медицины НИЦ «Курчатовский институт» на базе действующего циклотрона Ц-80 проводятся следующие работы:

– модернизация (создание) онкоофтальмологического комплекса (проект «Око») для пациентов Северо-Западного региона России и других регионов страны с внутриглазными опухолями, опухолями орбиты, поверхностно расположенными опухолями головы и шеи. Техническая готовность объекта на конец 2023 г. составила 50 %;

– создание инновационного радиоизотопного комплекса (проект «Изотоп») для наработки широкого спектра медицинских радионуклидов для диагностики и терапии онкологических заболеваний, болезней системы кровообращения, болезней нервной системы и иных заболеваний. В 2023 г. техническая готовность объекта – 25 %.

В НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ ведется подготовка кадров высшей квалификации по программам высшего образования – программам подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре по группам научных специальностей «Физические науки» и «Биологические науки».

В 2023 г. состоялся третий выпуск из аспирантуры Института. Всего было выдано пять дипломов об окончании аспирантуры, подтверждающих успешное завершение третьей ступени высшего образования по двум направленностям подготовки (по ФГОС ВО): «Физика конденсированного состояния» (два диплома), «Биофизика» (три диплома).

В лабораториях Института в 2023 г. выполняли учебно-исследовательские и научные работы, проходили практику, готовили выпускные квалификационные работы бакалавров и специалистов, а также магистерские диссертации около 240 студентов вузов страны.

Особое внимание НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ уделяет просветительской и образовательной деятельности среди населения Гатчины и Гатчинского муниципального района, стремясь популяризировать науку, заинтересовать молодежь в получении профильного физического и биологического образования, занимается организацией и проведением экскурсий на научные объекты Института, участвует в профориентационной работе со школьниками старших классов, проводит научно-популярные лекции, семинары и мастер-классы на различных площадках города и района, ведет практические занятия в течение каждого учебного года в научно-образовательном центре по углубленному изучению предметов естественно-научного цикла, активно вовлекает детей в проект «Молодые таланты», что, несомненно, способствует развитию интеллектуального потенциала города.

Данное издание представляет собой сборник кратких описаний наиболее существенных и значимых результатов научных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, полученных в 2023 г. Это описание предваряют обзоры руководителей научных отделений основных направлений деятельности Института. 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 Института в 2023 г. опубликованы в более чем 760 статьях, представлены в около 500 докладах на более чем 150 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

12 Отделение теоретической физики

14 Отделение нейтронных исследований

19 Отделение физики высоких энергий

22 Отделение молекулярной и радиационной биофизики

25 Отделение перспективных разработок

Отделение теоретической физики

Отделение теоретической физики (ОТФ), руководитель д. ф.-м. н. Д. Н. Аристов, состоит из 6 секторов:
– квантовой теории поля (заведующий – к. ф.-м. н. А. Н. Семенова);
– теории сильных взаимодействий (заведующий – к. ф.-м. н. К. М. Семенов-Тян-Шанский);
– феноменологии частиц (заведующий – д. ф.-м. н. А. В. Саранцев);
– физики высоких энергий (заведующий – д. ф.-м. н. А. В. Юнг);
– теории конденсированного состояния (заведующий – д. ф.-м. н. Д. Н. Аристов);
– теоретической ядерной и атомной физики (заведующий – д. ф.-м. н. А. В. Нефедов) и группы теории ядерных реакторов (руководитель – к. ф.-м. н. М. С. Онегин).
В ОТФ работают 49 научных сотрудников, из них 17 докторов наук и 17 кандидатов наук.

Д. Н. Аристов,
д. ф.-м. н.,
руководитель
Отделения

Исследования, проводимые в ОТФ, охватывают большинство областей современной теоретической физики: от квантовой теории поля и физики элементарных частиц до физики ядерных реакторов.

Традиционной темой исследований в ОТФ является изучение рассеяния при высоких энергиях. Работы сотрудников Отделения в течение долгого времени определяли мировой уровень в данной области. Среди новых результатов, полученных в 2023 г., можно отметить работу В. Е. Бунакова об экзотических процессах в столкновениях тяжелых ионов. Ранее было экспериментально обнаружено, что при определенных условиях быстрые α-частицы могут уносить больше энергии, чем вносят в систему налетающие тяжелые ионы. Был предложен теоретический механизм быстрого прямого квазиделения, позволяющий объяснить эту аномалию.

Развивая предложенный ранее подход к описанию ядро-ядерного рассеяния в теории Глаубера, разработали аналитический метод для вычисления глауберовских амплитуд во всех порядках теории. В рамках апробации метода были проведены расчеты полных и дифференциальных сечений рассеяния некоторых ядер друг на друге.

Относительно новым направлением исследований стало исследование гравитационных волн в «новой» теории относительности – эквивалента общей теории относительности (ОТО) Эйнштейна. В работах 2022 г. рассмотрены следствия из восьми возможных моделей такой теории и показано, что только две не противоречат ОТО и заслуживают дальнейшего изучения.

Среди работ ОТФ в области теории конденсированного состояния можно отметить ряд статей, традиционно посвященных неколлинеарным квантовым магнетикам. Кроме того, исследован характер одноэлектронных состояний в системе колец, образованных геликоидальными краевыми состояниями топологических изоляторов. Показано, что при определенных значениях потока магнитного поля через такие кольца в системе могут возникать парные локализованные состояния, которые образуют кубит. Интересно, что параметры этого кубита можно менять электрическим способом. Это открывает новые возможности в области квантовых вычислений.

Низкотемпературные свойства металлов с тяжелыми фермионами продолжают привлекать внимание исследователей. В рамках предложен-

ного ранее подхода к описанию систем с сильными межэлектронными корреляциями были рассмотрены транспортные свойства таких металлов, в частности магнетосопротивление и проводимость. Показано, что из-за неферми-жидкостного поведения оптическая проводимость демонстрирует скейлинговое поведение и необычную зависимость от частоты. Найдено хорошее согласие с экспериментальными наблюдениями.

Сотрудниками ОТФ в 2023 г. опубликованы 49 исследовательских работ в рецензируемых журналах Web of Science и Scopus, представлены 27 докладов на международных и российских конференциях, прочитаны 8 курсов лекций в Санкт-Петербургском государственном университете и Национальном исследовательском университете «Высшая школа экономики».

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. В. Г. Зиновьев);
– 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 (заведующая – к. х. н. Н. Н. Губанова);
– физики кристаллов (заведующий – к. ф.-м. н. Ю. П. Черненков);
– 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 научно-технического обеспечения эксперимента (руководитель – В. А. Поляков).
В ОНИ работают 107 научных сотрудников, из них 13 докторов наук и 44 кандидата наук.

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

Основными направлениями научной деятельности ОНИ 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 на настоящее время типах взаимодействий. 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, предсказания, создания и изучения разнообразных свойств новых материалов и новых физических явлений в них, разработка отечественных уникальных экспериментальных установок и аналитических методик для нейтронных исследований.

ОНИ является ответственным исполнителем в НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ трех тематических направлений. В рамках направления 2 «Исследования с использованием синхротронного излучения, нейтронов и в условиях сильных световых полей» ОНИ выполняет фундаментальные исследования в области физики конденсированного состояния с использованием рассеяния нейтронов, мюонов, рентгеновского и синхротронного излучения. В направлении 7 «Развитие ядерных технологий для создания атомной энергетики нового поколения» ОНИ реализует создание приборной базы для

экспериментальных исследований на реакторе ПИК. В направлении 10 «Исследования и разработки в области физики элементарных частиц, атомного ядра и физики высоких энергий, математической и теоретической физики» ОНИ проводит экспериментальные исследования с реакторными нейтронами и нейтрино, в сферу научной деятельности ОНИ в направлении 10 также входит «Физика ядра и элементарных частиц».

Во главу угла в настоящее время ставится создание приборной базы реакторного комплекса ПИК (РК ПИК). Ученые и инженеры ОНИ разрабатывают новые физические установки и создают установки первой, второй и третьей очереди.

Физические установки, создаваемые для РК ПИК, можно условно разделить на две категории: установки ядерной физики и физики конденсированных сред. Установки ядерной физики – это источник ультрахолодных нейтронов – ИУХН (ответственный исполнитель – В. А. Лямкин, научный руководитель – А. П. Серебров), установка «Нейтрино» (Р. М. Самойлов, А. П. Серебров), установка «Бета-распад нейтрона» (А. К. Фомин, А. П. Серебров), FISCO – установка исследования множественности осколков деления (А. М. Гагарский), DEDM – установка для измерения ЭДМ нейтрона кристалл-дифракционным методом (С. Ю. Семенихин, В. В. Федоров), INAA – установка нейтронно-активационного анализа и PROGRAS – спектрометр ядерных излучений (В. Г. Зиновьев), масс-сепараторный ядерно-лазерный комплекс ИРИНА (В. Н. Пантелеев, Отделение физики высоких энергий).

Установки физики конденсированных сред можно систематизировать по использованию разного типа рассеяния нейтрона на образце: трехосные спектрометры неупругого рассеяния тепловых нейтронов IN-1 (М. Х. Юзвюк, И. А. Зобкало), холодных нейтронов IN-2 (О. В. Усманов, И. А. Зобкало), поляризованных нейтронов IN-3 (А. Н. Матвеева, И. А. Зобкало); установки малоуглового рассеяния нейтронов TENZOR (Е. Г. Яшина, Е. А. Алтынбаев) и MEMBRANA (Л. А. Азарова, С. В. Григорьев); установка спин-эхо малоуглового рассеяния SESANS (К. Ю. Терентьев, Л. А. Аксельрод) и спин-эхо-спектрометр SEM (К. Ю. Терентьев); дифрактометры порошковые высокого разрешения D1 (В. А. Ульянов, А. И. Курбаков) и высокой интенсивности D3 (К. А. Дрожжов, И. В. Голосовский), монокристальный дифрактометр DC-1 (В. А. Поляков, Ю. П. Черненков); рефлектометры HARMONY (В. Г. Сыромятников) и SONATA (Е. Ю. Тарачева, Н. К. Плешанов).

2023 год был довольно успешным в научном плане. Научные группы, в которых ученые ОНИ были основными исполнителями, получили три первые, три вторые и две третьи премии на конкурсе лучших работ НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ.

Успешным 2023 г. оказался в плане защит диссертаций. Сотрудники ОНИ защитили три кандидатские диссертации (Е. А. Коновалова, Д. Д. Шапиро и А. О. Коптюхов), а А. К. Овсяников получил степень PhD в Институте кристаллографии Рейнско-Вестфальского технического университета Ахена (Германия).

Кроме основных работ по выполнению тематического плана научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР) НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ велись научные исследования в рамках пяти проектов Российского научного фонда, в которых руководителями были ученые из ОНИ. Отделение организовало и провело VI Конференцию по малоугловому рассеянию и рефлектометрии («МУРомец-2023») и V Школу «Нейтронные исследования конденсированного состояния» («НИКОНС-2023»).

В области исследований фундаментальных свойств материи в 2023 г. учеными ОНИ совместно с коллегами получено достаточно много новых важных результатов.

В научном направлении физики конденсированных состояний с применением различных методов исследований, в т. ч. с использованием нейтронного рассеяния разного типа, других разнообразных физических методик, численного моделирования и теоретических расчетов, получены следующие основные результаты.

Исследования с помощью методов малоуглового рассеяния нейтронов (МУРН) и малоуглового рентгеновского рассеяния (МУРР) организации хроматина в ядрах HeLa и ядрах HeLa с подавленной транскрипционной активностью демонстрируют корреляцию структуры объемного фрактала на масштабах 30–200 нм с высокой транскрипционной активностью ядра. Предложена модель

организации хроматина, согласно которой внутри плотно запакованного транскрипционно-неактивного («закрытого») хроматина, упакованного по принципу трехмерной кривой Пеано, находится система полостей, формирующая структуру транспортных каналов по принципу логарифмического фрактала, а транскрипционно-активный («открытый») хроматин образует объемно-фрактальные структуры внутри транспортных каналов или вблизи их границ (лаборатория физики неупорядоченного состояния, к. ф.-м. н. Е. Г. Яшина и д. ф.-м. н. С. В. Григорьев).

В экспериментах по малоугловому рассеянию поляризованных нейтронов в наклонной геометрии на аморфных ферромагнетиках обнаружена внутренняя, связанная со случайной анизотропией «эффективная энергетическая щель» в спектре спиновых волн сплава $Fe_{48}Ni_{34}P_{18}$ в широком диапазоне температур и магнитных полей. Величина «щели», равная 0,015 мэВ, измерена с точностью 0,002 мэВ, что является рекордным по своей точности достижением. Впервые экспериментально показано наличие линейной добавки в спектре спиновых волн, что подтверждает справедливость теории случайной анизотропии для аморфных ферромагнетиков (лаборатория физики неупорядоченного состояния, Л. А. Азарова и д. ф.-м. н. С. В. Григорьев).

Завершена и опубликована работа, где впервые для исследования сложной гетерогенной наносистемы «ядро – оболочка» Fe_3O_4–Mn_3O_4 с выявлением индивидуальных магнитных вкладов использовалась дифракция поляризованных нейтронов. Этот метод дает возможность определить отклик магнитной системы на приложенное магнитное поле через тензор локальной магнитной анизотропии (лаборатория физики кристаллов, д. ф.-м. н. И. В. Голосовский).

По данным рентгенофлуоресцентной спектроскопии, при синтезе алмазов (7,7 ГПа, 1800 °С) из смеси пентаэритрита и пиролизата дифталоцианина ($C_{64}H_{32}N_{16}Eu$) достигнута концентрация атомов Eu 51 ppm, что на два порядка выше, чем у природных и синтетических алмазов. Рентгеновская дифракция, сканирующая электронная микроскопия, рентгеновская оптическая люминесценция, рамановская и ИК-спектроскопия подтвердили образование высококачественных монокристаллов с европием и азотом, ~ 500 ppm (лаборатория нейтронных физико-химических исследований, д. ф.-м. н. В. Т. Лебедев).

Сополимеризацией в присутствии протонированных наноалмазов (DND Z+) получен коагулят сополимера типа Nafion с интегрированными алмазными частицами. Из него отлита мембрана A-DNDZp для водородных топливных элементов, обладающая уникальной структурой. За счет однородного распределения DND в мембране протонная проводимость остается на высоком уровне (лаборатория нейтронных физико-химических исследований, к. ф.-м. н. Ю. В. Кульвелис).

В 2023 г. завершился совместный российско-германский проект «Механизмы мультиферроичности в редкоземельных ортоферритах: роль взаимодействия Дзялошинского – Мория» (октябрь 2019 – февраль 2023). Основным результатом данной работы является описание спин-реориентационных переходов в редкоземельных ортоферритах $RFeO_3$ (R = Ho, Tb, Yb, Dy, Tm, Y) с точки зрения конкуренции обменных взаимодействий, получены величины параметров обменных взаимодействий и построены магнитные фазовые диаграммы для различных соединений (лаборатория физики кристаллов, к. ф.-м. н. А. К. Овсяников, зав. отделом – к. ф.-м. н. И. А. Зобкало).

В области ядерной физики в 2023 г. учеными ОНИ также получен целый ряд новых важных результатов.

Анализ результатов эксперимента «Нейтрино-4» и данных экспериментов GALLEX, SAGE и BEST подтверждает параметры нейтринных осцилляций, заявленные экспериментом «Нейтрино-4», и увеличивает достоверность до 5,8σ. Расширение нейтринной модели введением еще двух тяжелых стерильных нейтрино в соответствии с числом типов активных нейтрино, но с очень малыми углами смешивания, чтобы избежать термализации, позволяет довести вклад стерильных нейтрино в темную материю Вселенной до уровня 27 % и объяснить крупномасштабную структуру Вселенной. Для проверки эффекта осцилляций стерильного нейтрино на новом уровне точности (выше пяти стандартных отклонений) созданы новая установка и вторая нейтринная лаборатория. Если эффект подтвердится

на новом уровне точности, то это будет открытием стерильного нейтрино – элементарной частицы за пределами Стандартной модели (СМ). Однако расширение СМ нейтрино за счет введения еще двух тяжелых стерильных (правых) нейтрино в соответствии с числом типов активных нейтрино возможно. Тогда темную материю можно объяснить тяжелыми правыми нейтрино в рамках расширенного варианта СМ. Рассмотрено влияние стерильного нейтрино с массой порядка 1 эВ на процессы в ранней Вселенной. Показана возможность объяснения природы темной материи с помощью трех стерильных нейтрино и представлена динамика процесса формирования темной материи (лаборатория физики нейтрона, зав. лаб. – д. ф.-м. н., член-корреспондент РАН А. П. Серебров).

В составе коллаборации Borexino получены новые данные по солнечным CNO-нейтрино. Метод выделения интегрального направления (МВИН) использовался для включения в анализ всего набора данных Borexino – Фазы I + II + III. Наиболее точное измерение потока CNO-нейтрино получается путем объединения нового результата для CNO-нейтрино на основе МВИН с результатами спектрального анализа данных Фазы III. Полученная скорость взаимодействия CNO-нейтрино 6,7 + 1,2 – 0,8 отсчета в сутки на 100 т, что соответствует потоку $(6{,}7 + 1{,}2 - 0{,}8) \cdot 10^8$ см$^{-2} \cdot$ с$^{-1}$ с учетом осцилляций нейтрино. Определенная величина согласуется со стандартной солнечной моделью с высокой металличностью B16-GS98. В сочетании с результатами измерений потоков ^{7}Be- и ^{8}B-нейтрино, ранее полученными Borexino, модель B16-AGSS09met с низкой металличностью отвергается на уровне 3,2σ (отдел полупроводниковых ядерных детекторов, зав. отделом – д. ф.-м. н. А. В. Дербин).

Впервые выполнен поиск резонансного возбуждения первого ядерного уровня ^{169}Tm с энергией 8,4 кэВ солнечными аксионами с энергией 8,4 кэВ, потоки которых были нами вычислены. Для регистрации использовался болометр на основе тулиевого граната. В результате получено новое ограничение на константы связи аксиона с нуклонами $|(g^3_{AN} + g^0_{AN})| \leq 8{,}89 \cdot 10^{-6}$ (90 % у. д.), которое соответствует новым ограничениям на массу аксиона $m_A \leq 141$ эВ и $m_A \leq 244$ эВ в моделях KSVZ- и DFSZ-аксиона (отдел полупроводниковых ядерных детекторов, зав. отделом – д. ф.-м. н. А. В. Дербин).

Четыре кристалла $Tm_3Al_5O_{12}$ массой 10 г, диаметром 12 мм и высотой 12 мм каждый помещены в криогенную (10 мК) установку Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева. Можно ожидать, что с новыми кристаллами в подземной лаборатории чувствительность к $g_{A\gamma}$ и g_{Ae} будет сравнима с результатами ^{83}Kr-эксперимента. При этом для Tm отсутствует неопределенность в ядерных матричных элементах, которая может привести к существенному уменьшению вероятности регистрации аксиона в Kr-эксперименте (отдел полупроводниковых ядерных детекторов, зав. отделом – д. ф.-м. н. А. В. Дербин).

Создание оптических атомных часов на ядерном переходе 8,3 эВ в ^{229}Th означало бы новый уровень точности спектроскопических экспериментов. Сейчас уже было предложено получение изомерных ядер ^{299m}Th ядерными реакциями или возбуждением ^{299}Th до состояния 29 кэВ рентгеновскими лучами с последующим распадом до ^{299m}Th. Первый способ срабатывает один раз, мишень не подлежит вторичной переработке. Второй метод требует монохроматического источника рентгеновского излучения и имеет низкую эффективность. Авторы предлагают использовать сверхтонкое взаимодействие между дыркой во внутренних электронных оболочках тория и ядром для возбуждения ядра в изомерное состояние. У водородоподобного иона ^{229}Th^{89+} сверхтонкое расщепление в 1*s*-состоянии составляет около 0,7 эВ, и происходит сверхтонкое перемешивание ядерных состояний. Если удалить электрон, ядро перейдет в изомерное состояние с вероятностью около 10^{-3}. Существует близкая аналогия между водородоподобным ионом и атомом (или ионом в кристалле) с дыркой в *K*- или *L*-оболочках. Таким образом, также имеет место сверхтонкое смешивание основного и изомерного ядерных состояний. Хотя и теряются два порядка по сравнению с водородоподобным ионом, но теперь можно использовать твердые мишени с числом атомов ^{229}Th

около 10^{14} и более. Это позволяет производить гораздо больше изомерных ядер. Обнаружено, что с рентгеновским лучом мощностью 10 Вт при энергии 22 кэВ можно произвести 10^6 изомерных ядер за 6 с (лаборатория молекулярных и атомных пучков, д. ф.-м. н. М. Г. Козлов).

Эксперименты, проведенные в Институте им. Лауэ – Ланжевена (Гренобль, Франция), по выявлению асимметрий вылета легких заряженных частиц в индуцированном делении ядер ^{235}U холодными поляризованными нейтронами положили начало изучению нового эффекта, связанного с наличием в компаунд-ядрах ротационных состояний (ROT-эффекта). Эти исследования впервые доказали, что ранее введенные для описания спектров коллективных состояний ядра ротационные функции являются не просто удобным математическим аппаратом, а соответствуют реальному вращению ядра в пространстве. Позже теоретически и экспериментально было показано, что подобный эффект, зависящий также от вращения ядер, ориентированного с помощью поляризованных нейтронов, наблюдается при эмиссии из осколков деления как γ-квантов, так и нейтронов. На основании выполненных расчетов предлагается провести измерения сдвига углового распределения легких заряженных частиц в тройном делении поляризованными нейтронами ядер ^{241}Am и ^{245}Cm. Показано, что при определенной энергии нейтронов величина ROT-эффекта в указанных изотопах может быть в два раза выше, чем максимальное значение этого эффекта, найденное до настоящего времени. Кроме того, эксперименты с данными ядрами могут позволить увидеть преимущественное вращение делящихся ядер в направлении, противоположном тому, которое наблюдалось во всех изотопах, изученных ранее. Также выполнена оценка величины и знака ROT-эффекта для изотопов $^{239, 241}$Pu при их делении поляризованными нейтронами в резонансной энергетической области. На основании проведенных расчетов предлагается провести измерения сдвига углового распределения легких заряженных частиц в тройном делении поляризованными нейтронами изотопов плутония в области резонансов с E_n = 0,264 эВ для мишени ^{241}Pu и E_n = 0,294 эВ для мишени ^{239}Pu. Надежность интерпретации этих экспериментов будет выгодно отличаться от измерений, проведенных ранее при E_n = 4,5 мэВ. Преимущество связано с заметным ослаблением влияния резонансов, параметры которых могут вызывать определенное сомнение. Речь идет о резонансах, введенных при энергии нейтронов E_n < 0 эВ. Кроме того, в области этих двух резонансов доли примесных парциальных сечений со спином, отличающимся от спина самого резонанса, невелики. Важно, что величина ROT-эффектов, ожидаемых при указанных резонансных энергиях, будет существенно больше полученных ранее в холодной энергетической области (группа физики деления ядер, И. С. Гусева, А. М. Гагарский).

В НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ совместно с ООО «Топливная экологическая компания» исследована возможность применения технологий парового риформинга для ликвидации отходов 1–2-го классов опасности (в т. ч. утилизации жидких радиоактивных отходов, ионообменных смол – ИОС). Получено уменьшение массы ИОС в 20–40 раз при температурах 800–950 °С. Доказана стабильность карбонизированного зольного остатка по удержанию радиоактивных элементов. Дальнейшее развитие и промышленное применение данной технологии позволят значительно уменьшить объемы опасных отходов как на обычных предприятиях, так и на предприятиях «Росатома» (в плане переработки и уменьшения объемов радиоактивных отходов), а также себестоимость переработки и хранения опасных отходов. Начаты работы по НИОКР совместно с «Росатомом» (группа исследований слабых взаимодействий, к. ф.-м. н. И. С. Окунев, научный центр комплексной безопасности, к. ф.-м. н. А. В. Башаричев, В. Я. Сиротюк).

Сотрудниками ОНИ в 2023 г. опубликованы 93 научные статьи в рецензируемых журналах (в т. ч. 79 статей, зарегистрированных в системе Web of Science), получены 2 свидетельства о государственной регистрации специализированных программ, защищены 4 кандидатские диссертации.

Отделение физики высоких энергий

Отделение физики высоких энергий (ОФВЭ), руководитель – д. ф.-м. н. О. Л. Федин, состоит из 9 лабораторий:
– физики элементарных частиц (заведующий – д. ф.-м. н. В. Т. Ким);
– релятивистской ядерной физики (заведующий – к. ф.-м. н. Ю. Г. Рябов);
– короткоживущих ядер (заведующий – к. ф.-м. н. В. Н. Пантелеев);
– мезонной физики (заведующий – к. ф.-м. н. С. И. Воробьев);
– 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 3 научно-технических отделов:
– радиоэлектроники (руководитель – к. ф.-м. н. В. Л. Головцов);
– детекторов излучения (руководитель – к. ф.-м. н. Д. С. Ильин);
– вычислительных систем (руководитель – А. Е. Шевель).
В ОФВЭ работают 92 научных сотрудника, из них 13 докторов наук и 46 кандидатов наук.

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

Основными направлениями деятельности ОФВЭ являются экспериментальные исследования в области физики элементарных частиц и ядерной физики. Также в Отделении ведутся прикладные работы по разработке инновационных методов получения радиоизотопов для медицинских применений и исследования магнитных свойств материалов μSR-методом. ОФВЭ выполняет научные исследования, используя установки, имеющиеся в НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, и участвует в фундаментальных исследованиях, проводимых в передовых мировых ускорительных центрах.

Синхроциклотрон НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ СЦ-1000 – единственный действующий в России протонный ускоритель промежуточных энергий, объединяющий в удобном энергетическом диапазоне интересы ядерной физики и физики элементарных частиц, – попрежнему остается базовой установкой для Отделения.

В 2023 г. сотрудниками ОФВЭ на пучках синхроциклотрона СЦ-1000 проводились следующие работы:

– измерения методом резонансной лазерной спектроскопии в ионном источнике зарядовых радиусов и электромагнитных моментов основных и долгоживущих изомерных состояний нейтронно-дефицитных ядер на лазерном масс-спектрометрическом комплексе ИРИС (Исследование Радиоактивных Изотопов на Синхроциклотроне) – единственной в России ISOL-установке в линию с масс-сепаратором;

– изучение кластерной структуры ядер и поляризационных эффектов методом квазиупругого рассеяния протонов на ядрах на установке МАП (магнитный анализатор пролетный);

– исследование магнитных свойств материалов на мюонном пучке СЦ-1000 μSR-методом на единственной в России μSR-установке;

– изучение возможности применения кристаллов для формирования пучков на протонном

синхроциклотроне СЦ-1000, в т. ч. для установок адронной терапии.

На площадке Института сотрудники Отделения продолжают работы по созданию экспериментальных установок:

– для изучения реакции термоядерного синтеза поляризованных ядер дейтерия (PolFusion);

– для изучения свойств уникального изомера ^{229}Th (работа поддержана грантом РНФ № 22-22-00090), который является кандидатом на создание нового эталона частоты.

Сотрудники Отделения принимают участие в проведении эксперимента с фиксированной мишенью СПАСЧАРМ в НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ (Протвино) по исследованию поляризационных явлений в эксклюзивных и инклюзивных адронных реакциях в области энергий ускорителя У-70.

Одним из основных направлений деятельности ОФВЭ в 2023 г. было участие в проведении фундаментальных исследований на уникальных ускорительных установках в мировых научных центрах, таких как Большой адронный коллайдер (БАК) в Европейском центре ядерных исследований (ЦЕРН).

В 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. Кроме того, Отделение участвует в работах на лазерном масс-спектрометрическом комплексе ISOLDE, нацеленном на изучение короткоживущих ядер, а также в работах по изучению возможностей кристаллической коллимации пучков БАК (эксперимент UA9).

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 в 2023 г. при участии сотрудников Отделения, – это первое измерение зарядовой асимметрии в парном рождении топ- и антитоп-кварков в эксперименте ATLAS, наблюдение эффектов эволюции Балицкого – Фадина – Кураева – Липатова в двухструйных событиях с большим разделением по быстроте в эксперименте CMS, измерение сечения фоторождения чармония на ядрах при ультравысоких энергиях в эксперименте ALICE, наблюдение двух новых Ω_c^{*0}-барионов в эксперименте LHCb. Измеренная энергетическая зависимость сечения фоторождения чармония в эксперименте ALICE хорошо описывается расчетами, выполненными нашими сотрудниками в рамках пертурбативной квантовой хромодинамики с учетом эффектов экранировки ядерных глюонов задолго до измерения.

В 2023 г. эксперименты на БАК продолжили набор данных в рамках нового Сеанса-3. При участии сотрудников Отделения был успешно осуществлен запуск всех четырех детекторов на БАК, а также обеспечена бесперебойная работа всех подсистем, за которые отвечали сотрудники ОФВЭ, в течение набора данных в 2023 г. Сотрудники Отделения продолжают анализ экспериментальных данных, полученных в Сеансе-3.

За более чем 10 лет лазерно-спектроскопических исследований на установках ИРИС и ISOLDE сотрудниками ОФВЭ были получены новые данные о ядерных характеристиках (зарядовых радиусах, ядерных спинах, ядерных электромагнитных моментах) для диапазона изотопных цепочек от Au до At. Были проведены систематические исследования эволюции формы ядер в изотопных цепочках вблизи $Z = 82$, обнаружен и изучен эффект сосуществования формы в экзотических изотопах различных элементов. Также был обнаружен и исследован очень необычный эффект нечетно-четного поведения изотопов формы ядра вблизи $N = 104$, измерен сильный оболочечный эффект при $N = 126$. Для описания и объяснения обнаруженных эффектов сотрудниками ОФВЭ были разработаны атомные и ядерные теоретические подходы.

Одна из фундаментальных задач, осуществляемых в ОФВЭ, – исследование свойств ядерной материи в столкновениях тяжелых ионов. Выполнение этой задачи было начато в 80-х гг. в эксперименте PHENIX (Брукхейвенская националь-

ная лаборатория, США) и продолжено в эксперименте ALICE (ЦЕРН). В связи со строительством российского коллайдера NICA в Дубне, направленного на исследование ядерной материи в ионионных столкновениях, Отделение подключилось к работам по созданию многоцелевого детектора MPD (Multi-Purpose Detector) и разработке физической программы эксперимента. Коллаборация MPD объединила усилия более 500 участников из 40 научных центров 11 стран. Руководителем международной коллаборации MPD является ведущий научный сотрудник ОФВЭ профессор РАН В. Г. Рябов.

Отделение также принимает участие в конструкторской разработке концепции и физической программы исследований для второго детектора SPD (Spin Physics Detector) на коллайдере NICA. Эксперимент SPD нацелен на исследование спиновой зависимости сильного взаимодействия и спиновой структуры протона, а также для определения механизмов образования спиновых асимметрий в рождении частиц. Одним из руководителей международной коллаборации SPD является заведующий лабораторией физики элементарных частиц ОФВЭ В. Т. Ким.

К завершенным экспериментам с продолжающейся обработкой данных можно отнести измерение скорости мюонного захвата в дейтерии (эксперимент MuSun) и изучение мюонного катализа реакции ядерного синтеза d^3He 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;

– AMBER/NA66 – по измерению зарядового радиуса протона в упругом мюон-протонном рассеянии на выведенном пучке ускорителя SPS (ЦЕРН);

– SHiP – по поиску частиц скрытого сектора Стандартной модели (ЦЕРН);

– MPD и SPD на строящемся коллайдере NICA (Дубна);

– «Комптон» – по изучению поляризуемости нуклонов на проектируемом ускорителе ИНОК (Национальный центр физики и математики – НЦФМ, Саров).

Сотрудники Отделения приняли активное участие в разработке проекта научной программы создаваемого ускорителя ИНОК – комптоновского источника монохроматических γ-квантов НЦФМ.

Отделение участвует в создании установок на высокопоточном реакторе ПИК:

– ИРИНА (Исследование Радиоактивных Изотопов на НейтронАх) на высокопоточном реакторе ПИК – аналог установки ИРИС на СЦ-1000 для измерения методом резонансной лазерной спектроскопии в ионном источнике зарядовых радиусов и электромагнитных моментов основных и долгоживущих изомерных состояний нейтроноизбыточных ядер;

– ПИТРАП – для прямых высокоточных измерений масс (и времен жизни) нейтроноизбыточных нуклидов, участвующих в астрофизических *s*- и *r*-процессах.

Отдел трековых детекторов и отдел мюонных камер ОФВЭ ведут разработки новых газонаполненных детекторов, в т. ч. и нейтронных детекторов, для реактора ПИК, отдел радиоэлектроники – придетекторной и считывающей электроники для ряда экспериментов, проводимых Отделением.

Выполняются работы по разработке инновационных методов получения радиоизотопов на циклотроне Ц-80 НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ для медицинских применений (получены патенты на ряд высокотемпературных масс-сепараторных методов). Разрабатываемые методы позволят проводить предварительное «сухое» разделение мишенного вещества и целевого радионуклида. При этом полученный образец, сохраняя практически без потерь наработанный целевой радионуклид, имеет в несколько десятков раз меньшую интегральную активность, чем первоначально облученная мишень. В результате этого значительно упрощается процесс его дальнейшей обработки, а также значительно (больше чем на порядок) уменьшается количество жидких радиоактивных отходов по сравнению с традиционным химическим выделением.

Сотрудниками ОФВЭ в 2023 г. опубликована 321 научная работа в рецензируемых журналах, сделаны 38 докладов 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 4 лабораторий:
– экспериментальной генетики (заведующая – д. б. н. С. В. Саранцева);
– молекулярной генетики человека (заведующая – д. б. н. С. Н. Пчелина);
– молекулярной биофизики и нейтронных исследований (заведующий – к. ф.-м. н. А. Л. Коневега);
– биотехнологии (заведующая – к. б. н. А. А. Кульминская);
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 (руководитель – к. б. н. А. А. Кульминская)
и отдела инженерно-технического обеспечения (главный инженер – П. А. Сотников).
В Отделении работают 99 научных сотрудников, из них 8 докторов наук и 44 кандидата наук.

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

Основными направлениями деятельности ОМРБ являются фундаментальные и прикладные исследования в области молекулярной биологии, биофизики и биохимии, структурной биологии, молекулярной и медицинской генетики, ядерной медицины.

Ядерная медицина является наиболее активно развивающимся направлением деятельности ОМРБ. Уникальная инфраструктура научно-технологической площадки НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ предоставляет возможность осуществления полного цикла разработки и получения лабораторных образцов радиофармацевтических лекарственных препаратов, включая поисковые исследования и разработку молекул-носителей, разработку ядерных технологий по получению и очистке радиоактивных изотопов медицинского назначения, наработку изотопов, сборку радиофармацевтических лекарственных препаратов, доклинические исследования. В 2023 г. в рамках разработки отечественного инновационного тераностического препарата на основе изотопов тербия для проведения радиоиммунной терапии злокачественных новообразований различного гистологического типа, осуществляемой в коллаборации с НИЦ «Курчатовский институт», Санкт-Петербургским политехническим университетом Петра Великого (СПбПУ) и Московским государственным университетом им. М. В. Ломоносова, были разработаны и внедрены технологии производства препаратов изотопов ^{152}Tb, ^{161}Tb, а также циклотронного радионуклида ^{124}I на реакторных и ускорительных установках. Разработаны рекомбинантные молекулы-носители на основе моноклональных антител к антигенам опухоль-ассоциированной стромы. Разработана документация на готовую лекарственную форму радиофармпрепарата «Тербимаб», содержащего радиоизотоп ^{161}Tb. На базе кафедры медицинской физики СПбПУ продолжалась активная подготовка молодых кадров для ядерной медицины.

В лаборатории молекулярной биофизики и нейтронных исследований продолжаются исследования комбинированного воздействия ионизирующего облучения и таргетных препаратов, механизмов радиорезистентности, а также разработка новых средств доставки лекарственных препаратов в опухоль. Была исследована экспрессия гена *oct4*, поддерживающего стволо-

вой статус клеток на ранних стадиях развития, в клетках глиом. Экспрессия *oct4* была обнаружена во всех исследованных линиях глиом, но не детектирована в нормальной ткани взрослого головного мозга. Кроме того, были получены данные, что экспрессия *oct4* в глиомах может регулироваться клеточным метаболизмом. Была отработана методика нагрузки экстраклеточных везикул терапевтическими белками, а также продемонстрирована возможность захвата нагруженных экзосом растительного происхождения культивируемыми клетками человека.

В Отделении продолжает работу созданный в рамках Федеральной научно-технической программы развития генетических технологий Курчатовский геномный центр (КГЦ – ПИЯФ). В 2023 г. в КГЦ – ПИЯФ были продолжены работы по поиску ферментов для деградации и модификации различных органических полимеров. На основании скрининга микроорганизмов-продуцентов был разработан биокатализатор для деструкции ксантана на основе иммобилизованных в криогеле поливинилового спирта клеток симбиотической смеси, содержащей бактерии *Paenibacillus spp.*, *Cellulosimicrobium cellulans*. Полученный регенерирующий биокатализатор оказался способен осуществлять полную деполимеризацию ксантана в течение 40 циклов без потери активности, что может найти применение в нефтедобывающей и пищевой промышленности.

В рамках работ по исследованию механизмов рекомбинации в изучении влияния низких доз ультрафиолетового излучения на физиологические процессы в клетках дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* было установлено, что киназа Rad53 играет ключевую роль как в репаративном УФ-мутагенезе при высоких дозах, так и в спонтанном репарационном мутагенезе при сверхнизких уровнях повреждения ДНК. Показано, что при сверхнизких уровнях повреждения ДНК роль безошибочной ветви пострепликативной репарации в защите от индуцированного мутагенеза является ключевой. Однако с увеличением уровней повреждения ДНК роль ветви безошибочной репарации быстро снижается.

В ходе работ по разработке и внедрению экологичных технологий и материалов в различных сферах инженерного строительства был использован процесс индуцированного микроорганизмами осаждения карбоната кальция. Для стабилизации больших объемов грунта необходимо получить значительное количество биомассы микроорганизмов, что повышает затраты на питательную среду для культивирования бактерий и составляет существенную часть технологии. Использование отходов пищевой и бумажной промышленности в качестве недорогих источников питательных веществ значительно снижает стоимость этого подхода. Предложены композиции микроорганизмов и питательных сред для их роста, пригодных для армирования почвы с заданными показателями механических характеристик грунта.

Прикладные исследования КГЦ – ПИЯФ тесно связаны с фундаментальными работами, проводимыми в различных лабораториях Отделения. Так, в 2023 г. в лаборатории биотехнологий в результате междисциплинарного исследования параметров и механизмов биоминерализации карбоната кальция была показана ключевая роль внеклеточной ДНК в индукции осаждения карбоната кальция при росте планктонной культуры *Bacillus subtilis*, сопряженной с образованием отдельных компонентов внеклеточного матрикса, и определены белковые мишени для дальнейшей разработки технологии ингибирования или активации процесса биоминерализации и формирования биопленок.

В лаборатории молекулярной генетики человека продолжались исследования по поиску потенциальных лекарственных соединений для терапии различных социально значимых заболеваний. С использованием комплексного подхода, сочетающего методы молекулярного моделирования взаимодействий химических соединений с белками-мишенями, методы химического синтеза и биологические исследования действия химических соединений на пациент-специфичных клетках, дифференцированных из индуцированных плюрипотентных стволовых клеток, было найдено соединение NCGC00241607, которое способно связываться с аллостерическими сайтами на поверхности глюкоцереброзидазы (GCase) и, соответственно, может выступать в качестве аллостерического фармакологического шаперона

GCase. Использование этого соединения может оказаться перспективным для терапии заболеваний человека, связанных с дисфункцией GCase: болезни Гоше и GBA-ассоциированной болезни Паркинсона. В лаборатории также продолжено исследование морфологии экстраклеточных везикул (ЭВ) подкожной и висцеральной жировой ткани (ПЖТ, ВЖТ) при ожирении и сахарном диабете 2-го типа. Показано, что в сравнении с везикулами, секретируемыми ПЖТ, для ЭВ, секретируемых ВЖТ, у пациентов с ожирением характерны увеличенный размер частиц и увеличение доли везикул с внутренними мембранными структурами.

В лаборатории экспериментальной генетики проведено исследование защитного действия фуллеренолов на модели болезни Хантингтона (БГ) у дрозофилы. БГ – нейродегенеративное заболевание человека, для которого отсутствует эффективное лечение. Окислительный стресс (ОС) является важным фактором развития БГ. В ходе работы была определена антиоксидантная активность фуллеренолов $C_{60}(OH)_{30}$ и $C_{120}O(OH)_{44}$, синтезированных в НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, и проверена их токсичность на клеточной культуре. Показано, что добавление в корм животных молекул гидроксилированного фуллерена C_{60} и димерного оксида $C_{120}O$ в концентрациях 0,2 и 0,01 мг/мл способно снизить уровень ОС и нейродегенеративные процессы в мозге мух.

В лаборатории молекулярной биофизики и нейтронных исследований продолжались работы по изучению молекулярных механизмов биосинтеза белка на бактериальных рибосомах и исследованию механизмов действия антибактериальных препаратов – ингибиторов этого процесса.

В 2023 г. сотрудниками лаборатории была разработана методика для детектирования коротких полипептидов, образующихся при биосинтезе белка на рибосоме. Предложен простой и быстрый способ анализа поэтапного синтеза полипептида с использованием флуорофора BODIPY при помощи электрофоретического разделения пептидов в полиакриламидном геле в денатурирующих условиях со сверхвысокой чувствительностью. Метод позволяет анализировать различные этапы синтеза белка, а также изучать механизмы работы ингибиторов трансляции.

Сотрудниками ресурсного центра продолжались исследования диагностического потенциала протеомики. Всего одна аномальная клетка, которая может проникать в окружающие ткани и мигрировать в другие органы, может вызвать опухоль. Протеомика может дать подробную информацию о ситуации с протеомом человека во время этой злокачественной трансформации и может дать ответы не только о количестве и распространенности белков, но также об их участии в метаболических путях, взаимодействиях, посттрансляционных модификациях, а также в синтезе и деградации белков.

Сотрудниками ОМРБ в 2023 г. опубликованы 68 работ в рецензируемых журналах (48 – в зарубежных), сделаны 76 докладов на научных конференциях. Активно готовится научная смена: в Отделении работают 22 аспиранта, обучающихся в аспирантуре НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ и других институтов, 5 сотрудников защитили кандидатские диссертации.

Отделение перспективных разработок

Отделение перспективных разработок (ОПР), руководитель д. ф.-м. н. А. В. Титов, состоит из 6 отделов:
– ускорительного (заведующий – к. т. н. В. И. Максимов), в состав которого входит лаборатория физики и техники ускорителей (заведующий – к. ф.-м. н. С. А. Артамонов);
– прикладной ядерной физики (заведующий – к. ф.-м. н. А. С. Воробьев), в состав которого входит лаборатория радиационной физики (заведующий – к. ф.-м. н. А. С. Воробьев);
– наноструктурированных материалов (заведующий – к. х. н. М. Е. Взнуздаев), в состав которого входят лаборатория химии и спектроскопии углеродных материалов (заведующая – к. ф.-м. н. М. В. Суясова) и 2 научные группы;
– квантовой физики и химии (заведующий – д. ф.-м. н. А. В. Титов), в который входят лаборатория квантовой химии (заведующий – д. ф.-м. н. А. Н. Петров) и 5 научных групп;
– оптических и информационных технологий (заведующий – к. т. н. А. С. Кадыров), в состав которого входят 3 группы;
– 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 28 кандидатов наук.

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

В ускорительном отделе (УО) 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 1 000 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 УО созданы пучки протонов переменной энергии от 60 до 1 000 МэВ. Диаметр полученных пучков ~ 30–80 мм, $\Delta p/p$ находится в диапазоне 1,3–14 %, а интенсивность изменяется в диапазоне 10^7–10^{12} $с^{-1}$.

Кроме основного протонного пучка из камеры синхроциклотрона одновременно с основным может выводиться 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 увеличить число пациентов.

Для проведения научных исследований имеются вторичные пучки $\pi^{\pm}$- и $\mu^{\pm}$-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 нано-

электроники. Одним из основных условий их успешного использования является способность надежно функционировать в радиационных полях космического пространства и верхних слоев атмосферы в течение длительного времени. Современные нормативные акты России 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 НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ начал функционировать специализированный центр радиационных испытаний на протонах с энергией 60–1 000 МэВ, включающий два стенда с системами диагностики пучка, современными приборами дозиметрии, автоматизированной системой обработки результатов и 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 ГНЕЙС синхроциклотрона СЦ-1000 силами группы физики деления ядер Отделения нейтронных исследований 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 возможно комплексное испытание радиоэлектроники как на пучках протонов переменной энергии, так и на пучках нейтронов со спектром, повторяющим спектр атмосферных нейтронов.

Силами УО ОПР и Научно-исследовательского института электрофизической аппаратуры им. Д. В. Ефремова проводятся работы по реализации проекта по созданию онкоофтальмологического и радиоизотопного комплексов на основе построенного изохронного циклотрона Ц-80 с переменной энергией протонов 40–80 МэВ и током выведенного пучка до 100 мкА. Высокая энергия ускоренного пучка в сочетании с высокой интенсивностью позволит производить радиоизотопы и радиофармпрепараты 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.

Сотрудники отдела прикладной ядерной физики (ОПЯФ) участвовали в четырех научных экспедициях в Антарктиду. В настоящее время продолжаются работы, направленные на подготовку к исследованиям подледникового озера Восток. Из-за высокой степени загрязненности существующая скважина к подледниковому озеру Восток протяженностью 3 769 м не может быть использована для изучения озера и совместного с ОМРБ поиска форм жизни в экстремальных условиях. Для решения поставленных научных задач требуется бурение новой скважины. В связи с этим была проанализирована возможность бурения новой, экологически чистой скважины за короткое время известными методами, предложен способ скоростного бурения силиконовой жидкостью и выполнен теплофизический расчет этого процесса. Также в ОПР продолжены работы по созданию уникального оборудования для изучения подледникового озера и рассматриваются варианты расширения комплекса научных исследований на станции «Восток» для получения новой информации в области фундаментальных научных знаний.

В лаборатории радиационной физики ОПЯФ на нейтронном времяпролетном спектрометре ГНЕЙС, созданном на базе СЦ-1000, продолжаются исследования реакции деления тяжелых ядер. В 2023 г. проведены измерения сечения деления и угловых распределений осколков деления ядер ^{236}U, ^{238}U и ^{243}Am при взаимо-

действии с нейтронами с энергией от 0,3 до 500 МэВ. Для данных ядер имеющаяся на сегодня точность определения сечения деления недостаточна и должна быть увеличена, как следует из программы развития атомной энергетики, основанной на реализации замкнутого топливного цикла и таких его систем, как ядерные энергетические установки (ЯЭУ) четвертого поколения и accelerated driven system (ADS). Поскольку точность расчетов сечений, выполненных с использованием стандартных методов и подходов, остается недостаточной для проведения инженерно-технических расчетов ЯЭУ, получение новых и надежных ядерных данных остается единственным способом уменьшить полную неопределенность сечений. Также сотрудниками ОПЯФ инициирована работа по созданию новых координатных детекторов для ядерно-физических измерений при высоких загрузках на основе многопроволочного газового электронного умножителя.

В отделе наноструктурированных материалов (ОНСМ) основным направлением исследований 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 лаборатории химии и спектроскопии углеродных материалов ОНСМ является разработка новых производных эндометаллофуллеренов, перспективных 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 неабсолютна, 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 их облучении.

Группа композитных материалов ОНСМ в 2023 г. осуществила значительный объем исследований новых производных эндометаллофуллеренов лютеция с фолиевой кислотой для целевой доставки к опухолевым клеткам. Группой синтезированы и охарактеризованы методами ИК- и КР-спектрометрии комплексы C_{60}PNIPAM и Lu@C_{2n}PNIPAM, определены температуры их агрегатного перехода. Эндометаллофуллерены лютеция гидроксилированы для последующих радиационных испытаний.

Группа радиационного модифицирования материалов ОНСМ проводит работы по радиационно-индуцированному синтезу комплексов фуллеренов с биополимерами. В частности, в 2023 г. группой осуществлен пробный радиационно-химический синтез биосовместимых полимеров на основе поливинилпирролидона и сополимеров с фуллереном C_{60}.

Основным направлением работы отдела квантовой физики и химии (ОКФХ) является развитие методов расчета электронной структуры молекул и материалов, содержащих тяжелые атомы. Целью является разработка методик и программ, которые дают возможность выполнять очень точные расчеты при наименьших вычислительных затратах. Это может быть достигнуто с помощью двухшаговых подходов, в которых расчет электронной структуры молекул с тяжелыми атомами (включая актиноиды, лантаноиды и тяжелые переходные металлы) и их физико-химических свойств разбит на два последовательных расчета: сначала в валентной области химического соединения (с использованием прецизионных релятивистских псевдопотенциалов), а затем в остовах тяжелых атомов (с использованием процедур восстановления четырехкомпонентной волновой функции). Эта работа была инициирована в начале 80-х гг. прошлого века важностью расчета и экспериментальных поисков эффектов несохранения временно́й инвариантности (T) и пространственной четности (P), включая поиски гипотетического электрического дипольного момента электрона (eЭДМ). Уже на протяжении последних 30 лет точность, достигаемая в этих расчетах, является рекордной в мире.

В последнее десятилетие сотрудники отдела не ограничиваются исследованиями P- и T,P-нечетных эффектов, спектроскопических и хими-

ческих свойств в молекулах и кластерах небольшого размера. Они перешли к более широкому кругу исследуемых физико-химических свойств и более сложным структурам, а именно к расчету электронной структуры и свойств материалов с тяжелыми атомами в составе. Разработанный на основе двухшаговых подходов метод подстроенного под соединение потенциала внедрения (ПСПВ) для выбранного фрагмента кристалла позволяет с очень высокой точностью описать действие окружения на данный фрагмент, и, соответственно, электронная структура самого фрагмента кристалла также воспроизводится должным образом. По сравнению с методами расширенной ячейки в рамках кластерного расчета с ПСПВ относительно просто рассматриваются и точечные дефекты, причем с точностью, недостижимой для методов расчета с периодическими граничными условиями. С ошибками менее 0,1 эВ для валентных энергий в таких расчетах можно учитывать локальное нарушение симметрии кристалла, релятивистские эффекты (включая брейтовские и квантово-электродинамические), межэлектронную корреляцию в рамках теории волновой функции, корректно рассматривать заряженные фрагменты кристалла, в т. ч. включающие атомы с незаполненными остовными оболочками, локализованные (нелинейные) квантовые процессы и т. д.

Разработка методов, алгоритмов и программных пакетов для прецизионного моделирования электронной структуры и свойств соединений тяжелых элементов позволила проводить систематическое исследование свойств молекул и материалов, содержащих лантаноиды, актиноиды и тяжелые переходные металлы, а также выполнять наиболее точные исследования химических и спектроскопических свойств соединений сверхтяжелых элементов из «острова стабильности». ОКФХ публикует более 30 статей в год в ведущих международных и российских научных журналах.

В отделе оптических и информационных систем лаборатория голографических информационно-измерительных систем (ЛГИИС) специализируется в области прецизионных измерений на масштабах нанометров. Для проведения этих исследований в ЛГИИС имеется уникальная подземная безвибрационная лаборатория. На базе этой лаборатории и стендов для синтеза линейных и радиальных голографических дифракционных решеток к настоящему времени выпущено 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. Специалисты группы фотофизики выполняют научные исследования по следующим трем основным направлениям. Первое – жидкокристаллическая (ЖК) модуляционная и дисплейная техника: процессы самоорганизации, батохромный спектральный сдвиг, модификация параметра порядка, увеличенная поляризуемость ЖК-мезофазы при наноструктурировании. Второе – поляризационные тонкопленочные наноструктурированные материалы с увеличенным дихроизмом пропускания. Третье – наноструктурированные упрочненные покрытия для материалов оптоэлектроники и солнечной энергетики.

Отдел информационных технологий и автоматизации (ОИТА) уже много лет принимает активное участие в проекте ATLAS Большого адронного коллайдера в ЦЕРН.

Сотрудники лаборатории информационно-вычислительных систем ОИТА заняты в разработке и поддержке различных программных комплексов для системы контроля детектора (DCS) и системы сбора данных (DAQ) эксперимента ATLAS. Отдел также занимается поддержкой локальной вычислительной сети Института, различных информационно-вычислительных систем на базе веб-технологий, а также информационных систем для обеспечения административно-хозяйственной деятельности Института. Конструкторско-технологическая группа отдела участвовала в работах по программе «Протон» Отделения физики высоких энергий для проведения исследований на мюонном пучке PS1 (ЦЕРН) с использованием установки ИКАР. Задача ОИТА заключалась в модернизации установки ИКАР путем создания и встраивания в установку сегментированных анодных блоков.

Сотрудниками ОПР в 2023 г. опубликованы 52 научные работы, которые индексируются в Web of Science и Scopus, сделаны более 100 докладов на российских и международных научных конференциях, а также получены 10 патентов и свидетельств результата интеллектуальной деятельности.

Теоретическая и математическая физика

32 Экзотические прямые процессы при столкновении тяжелых ионов

33 Новый подход к описанию ядро-ядерного рассеяния в теории Глаубера

34 Гравитационные волны в новой теории относительности

35 Обобщенные релятивистские псевдопотенциалы для легких элементов, моделирующие квантово-электродинамические эффекты

36 Спонтанное рождение e^-e^+-пар в низкоэнергетических столкновениях тяжелых ионов за рамками монопольного приближения

37 Транспортные свойства металлов с тяжелыми фермионами

38 Топологически защищенный кубит в геликоидальном кристалле

39 Алгебра кватернионов в 4*D*-пространстве-времени: калибровка Лоренца – дверь в невидимый мир темной материи и темной энергии

40 Масса электрона как основной параметр Стандартной модели

41 Сверхтонкие магнитные аномалии в спектрах изотопов калия

Экзотические прямые процессы при столкновении тяжелых ионов

В. Е. Бунаков

Отделение теоретической физики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Ранее в Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флерова (ЛЯР) Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ, Дубна) исследовались быстрые α-частицы, возникающие в реакциях столкновения тяжелых ионов. При этом были обнаружены летящие вперед α-частицы, уносящие практически всю энергию налетающего на мишень иона-снаряда (с учетом величины Q эндотермической двухчастичной реакции $I + T \longrightarrow \alpha + B$). Это значит, что максимальная энергия α-частиц в этих реакциях практически достигала двухтельного кинематического предела $E_\alpha^{(2)} = E_I - E_R - Q$, где E_R – энергия отдачи ядра B. Для объяснения передачи быстрой α-частице практически всей энергии и импульса налетающего иона требуется механизм, напрямую связывающий входной канал реакции с выходным без промежуточных ступеней, приводящих к распределению входных энергии и импульса по добавочным степеням свободы. В качестве таких механизмов нами были предложены прямая реакции срыва тяжелого остатка t с налетающего иона $I = \alpha + t$, приводящего к образованию ядра $B = T + t$, и реакция прямого замещения (knock-on reaction). В этой реакции налетающий ион I взаимодействует с α-частицей ядра-мишени и замещает ее в этом ядре, образуя новую систему $B = C + I$, где $C = (T - \alpha)$ – тяжелый остов мишени. Высвободившуюся при этом энергию (а также свой импульс) он передает улетающей α-частице.

В последнее время в ЛЯР ОИЯИ возобновились исследования реакций с тяжелыми ионами, приводящих к появлению быстрых α-частиц. При этом удалось изучить спектры α-частиц в непосредственной окрестности двухтельных кинематических пределов $E_\alpha^{(2)}$ для реакций с ионами ^{48}Ca, ^{56}Fe, падающими на мишени ^{181}Ta, ^{197}Au и ^{238}U при энергиях около 6 МэВ/нуклон. Главным и самым удивительным результатом этих экспериментов было наблюдение α-частиц с энергией, превосходящей двухтельный предел $E_\alpha^{(2)}$, т. е. быстрые α-частицы уносили больше энергии, чем вносили в систему налетающие тяжелые ионы.

Существенно отметить, что такие частицы наблюдались лишь в тех реакциях, для которых «эффективный» параметр делимости

$$\left(\frac{Z^2}{A}\right)_{\text{eff}} = \frac{4Z_1Z_2}{A_1^{1/3}A_2^{1/3}(A_1^{1/3} + A_2^{1/3})}$$

был не менее 32,0. Объяснить это можно тем, что в соответствии с макроскопической динамической моделью при сближении до контакта тяжелых ионов с достаточно большим эффективным параметром делимости слияние происходит в несколько стадий. Как только возникает конфигурация условного равновесия, при которой двойная ядерная система превращается в моноядро, начинается переход к симметричной форме и одновременно быстрое квазиделение – система может распасться, не успев образовать компаунд-ядро. Образующиеся осколки близки по заряду и массе к ионам входного канала. Именно на этом этапе еще не успевшая покинуть систему α-частица может получить часть энергии образовавшегося моноядра. Такой быстрый прямой процесс можно назвать прямым квазиделением.

1. *Бунаков В. Е., Пенионжкевич Ю. Э.* // Письма в ЭЧАЯ. 2023. Т. 20. Вып. 2. С. 118–126.
2. *Бунаков В. Е.* // Сб. тез. докл. 73-й Междунар. конф. по ядерной физике «ЯДРО-2023: фундаментальные вопросы и приложения». Саров: ФГУП «РФЯЦ – ВНИИЭФ», 2023. С. 38.

Новый подход к описанию ядро-ядерного рассеяния в теории Глаубера

Ю. М. Шабельский, А. Г. Шуваев

Отделение теоретической физики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Теория Глаубера применяется для описания рассеяния адронов и ядер при энергиях порядка нескольких сотен мегаэлектронвольт на частицу. Она показала себя очень эффективной для протон-ядерного рассеяния, где вычисленные амплитуды имеют достаточно простой аналитический вид. Ситуация значительно усложняется при переходе к рассеянию ядер на ядрах, где в амплитуде становится необходимым учитывать вклады высших порядков. Здесь обычно применялись или дополнительные упрощающие приближения, такие как оптическая модель, или использовалось численное моделирование по методу Монте-Карло.

Нами предложен аналитический способ вычисления глауберовских амплитуд, в котором амплитуда рассеяния двух ядер с массовыми числами A и B и прицельным параметром b вычисляется в виде

$$S_{AB}(b) = \frac{1}{Z(0,0)} \frac{\partial^A}{\partial u^A} \frac{\partial^B}{\partial u^B} Z(u,v)\Big|_{u=v=0},$$

а для производящей функции $Z(u, v)$ было получено замкнутое выражение через плотности распределения нуклонов в сталкивающихся ядрах, которое справедливо во всех порядках теории Глаубера и позволяет выполнять вычисления без каких-либо дополнительных предположений, кроме факта короткодействия ядерных сил. С его помощью были проведены расчеты полных и дифференциальных сечений рассеяния ядер ^{12}C–^{12}C, а также расчеты рассеяния ядер с гало – ^{8}B, ^{11}Li, ^{11}Be, ^{14}Be – на ядре ^{12}C.

Ядра с гало описываются как состояния из одного или двух нуклонов, образующих гало, и центрального кора. В таблице приведены среднеквадратичные радиусы этих ядер, вычисленные в теории Глаубера из данных по их сечениям рассеяния на ядре-мишени ^{12}C, а также по сечениям рассеяния на той же мишени ядер, которые играют роль кора. Результаты представлены для трех возможных конфигураций гало – G, O, 2S.

Вычисленные нами значения радиусов оказались примерно на 10 % больше величин, которые получались в оптической модели.

Таблица. Среднеквадратичные радиусы ядер, вычисленные в теории Глаубера

Структура ядра (кор + гало)	Сечение взаимодействия, мб		Среднеквадратичный радиус, фм			
	Кор	Гало	Кор	Типы гало		
				G	O	2S
^{8}B → ^{7}B + p	738 ± 9	784 ± 14 798 ± 6	2,47	2,95 3,36	2,95 3,36	2,93 3,31
^{11}Be → ^{10}Be + n	813 ± 10	942 ± 8	2,44	6,21	5,45	5,46
^{11}Li → ^{9}Li + 2n	796 ± 6	1 040 ± 60	2,47	5,51	5,35	5,36
^{14}Be → ^{12}Be + 2n	927 ± 18	1 139 ± 90	2,70	5,42	5,53	5,55

Shabelski Yu.M., Shuvaev A.G. // Phys. Part. Nucl. 2023. V. 54. No. 4. P. 630.

Гравитационные волны в новой теории относительности

А. Н. Семенова[1], В. П. Вандеев[1], А. В. Головнев[2]

[1] Отделение теоретической физики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ
[2] Centre for Theoretical Physics at the British University in Egypt, Egypt

Несмотря на грандиозные успехи теории относительности Эйнштейна в описании гравитационных явлений, она имеет ряд космологических сложностей, связанных в первую очередь с природой темных секторов. Это приводит нас к естественному заключению о том, что либо они состоят из неизвестных нам элементарных частиц, либо что гравитацию на определенных масштабах нужно описывать отличным от общей теории относительности (ОТО) образом. Мы рассматриваем трехпараметрическое обобщение телепараллельного эквивалента эйнштейновской общей теории относительности (TEGR), где плотность лагранжиана имеет вид

$$\frac{a}{4}T_{\alpha\beta\mu}T^{\alpha\beta\mu}+\frac{b}{2}T_{\alpha\beta\mu}T^{\beta\alpha\mu}-cT_{\mu}T^{\mu},$$

который при $a = b = c$ становится плотностью лагранжиана TEGR. В рамках этой теории основной геометрической характеристикой пространственно-временного многообразия является кручение:

$$T_{\alpha\beta\mu}=g_{\alpha\gamma}e^{\gamma}_{a}(\partial_{\beta}e^{a}_{\mu}-\partial_{\mu}e^{a}_{\beta}),\ T_{\mu}=g^{\alpha\beta}T_{\alpha\mu\beta},$$

а динамической переменной выступает тетрада e^{a}_{μ}, которая с помощью плоской метрики Минковского η_{ab} задает риманову метрику $g_{\mu\nu}=e^{a}_{\mu}e^{b}_{\nu}\eta_{ab}$.

В рамках этой теории мы рассматриваем линейные возмущения вакуумных уравнений движения над плоской тетрадой $e^{a}_{\mu}=\delta^{a}_{\mu}$ в виде

$$e^{0}_{0}=1+\phi,\ e^{0}_{i}=\partial_{i}\beta+u_{i},\ e^{i}_{0}=\partial_{i}\xi+v_{i},$$

$$e^{i}_{j}=1-\psi\delta_{ij}+\partial^{2}_{ij}\sigma+\partial_{j}c_{i}+\varepsilon_{ijk}(\partial_{k}s+w_{k})+\frac{1}{2}h_{ij},$$

где u_j, v_j, w_j, c_j – бездивергентные векторы; h_{ij} – симметричная, бесследовая и бездивергентная матрица. Эти возмущения упрощаются фиксацией калибровки $\sigma = 0$, $c_j = 0$, $\beta = \varsigma$. Вводится замена: $w_i=\varepsilon_{ijk}\partial_k\chi_k,\ M_i=\frac{u_i-v_i}{2},\ L_i=\frac{u_i+v_i}{2}$.

Тогда уравнения движения в первом порядке теории возмущения в двух моделях, обобщающих ОТО, имеют следующий вид.

1. При $2c = a + b$, где уравнения движения

$$\phi=\psi=0,\ s''-\Delta s=0,$$
$$M_i=0,\ L_i=-\chi_i',\ h_{ij}''-\Delta h_{ij}=0.$$

Откуда видно, что динамика метрических переменных ϕ, ψ, M_i, h_{ij} тождественна ОТО, а Лоренцевы переменные s, L_j, χ_j перестают быть полностью калибровочными, но так как они не входят в метрику, то на наблюдаемые величины влияния не окажут.

2. При $a = b = 3c$, где уравнения движения

$$\phi+\psi=\xi=0,\ M_i=0,$$
$$L_i'=-\Delta\chi_i,\ h_{ij}''-\Delta h_{ij}=0.$$

Здесь также видно, что тензорные переменные h_{ij} подчиняются волновому уравнению, вектор M_i тривиален, метрические скаляры обладают несколько большей свободой по сравнению с ОТО, а среди Лоренцевых переменных лишь скаляр s и вектор χ_i калибровочные, тогда как на остальные наложены связи.

Остальные шесть моделей даже в линейном порядке очень далеки от эквивалента ОТО, поэтому малоприменимы к описанию физики, а две указанные – интересны для дальнейшего исследования.

Golovnev A.V., Semenova A.N., Vandeev V.P. // JCAP. 2024. V. 2024. Iss. 1. P. 003.

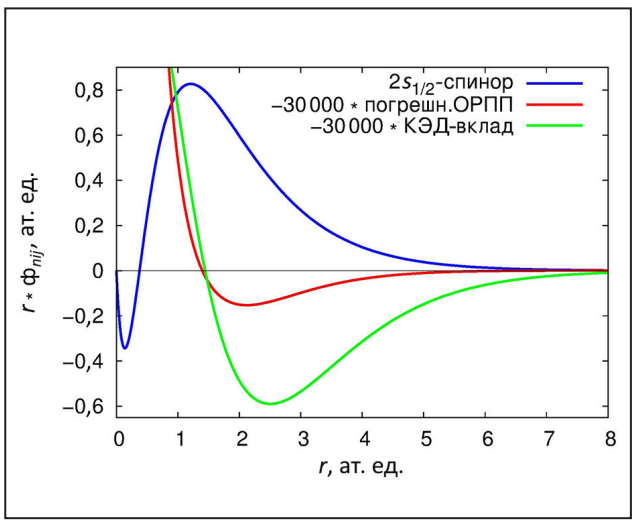
Обобщенные релятивистские псевдопотенциалы для легких элементов, моделирующие квантово-электродинамические эффекты

Н. С. Мосягин, А. В. Титов, А. В. Олейниченко, А. В. Зайцевский, А. М. Рыжков, В. М. Шабаев
Отделение перспективных разработок НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Модель псевдопотенциалов широко используется в теоретической химии и спектроскопии как средство эффективного исключения остовных оболочек атомов из явного рассмотрения. В НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ предложили совершенно иной вариант модели. Обобщенные релятивистские псевдопотенциалы (ОРПП) «пустых остовов» предназначены для имитации релятивистских и квантово-электродинамических (КЭД) эффектов в расчетах с явным описанием всех электронов молекулы, в т. ч. и остовных. Такие расчеты по экономичности сравнимы с обычными нерелятивистскими; между тем ОРПП с очень высокой точностью воспроизводят сложные для стандартного моделирования (и важные именно для относительно легких элементов!) эффекты, например обусловленные отличием межэлектронных взаимодействий от кулоновского отталкивания.

Как показано на рисунке, метод ОРПП позволяет достаточно точно воспроизвести даже малую релаксацию s-орбитали, которая наблюдается в расчете с гамильтонианом Дирака – Кулона – Брейта при учете КЭД-эффектов в рамках процедуры самосогласования. В валентной области (области после последнего максимума $2s_{1/2}$-спинора, изображенного *синей линией*), которая наиболее важна для химической связи и «валентных» типов свойств (например, дипольного момента), погрешность ОРПП (*красная линия*) мала даже по сравнению с очень малым вкладом от КЭД-эффектов (*зеленая линия*).

ОРПП «пустых остовов» успешно применены в Санкт-Петербургском государственном университете и Московском государственном университете им. М. В. Ломоносова для расчета вклада от КЭД-эффектов в потенциальную кривую для основного состояния молекулы CO. Интенсивные колебательно-вращательные переходы в молекуле CO легко наблюдаются как в поглощении, так и в испускании, они активно используются в различных диагностических задачах современной астрономической и лабораторной аналитической спектроскопии.



Нормированная радиальная часть большой компоненты $2s_{1/2}$-спинора для атома углерода. Умноженное на –30 000 изменение этой орбитали при включении квантово-электродинамических эффектов в процедуру самосогласования. Умноженная на –30 000 погрешность ее воспроизведения в расчете с помощью обобщенных релятивистских псевдопотенциалов (полученная как разница между расчетами с гамильтонианом Дирака – Кулона – Брейта с учетом квантово-электродинамических эффектов и с обобщенными релятивистскими псевдопотенциалами)

1. *Mosyagin N.S., Titov A.V., Oleynichenko A.V., Zaitsevskii A. et al.* // Abstr. of Reports of the XX Symp. on High Resolution Molecular Spectroscopy (HighRus-2023). Tomsk, 2023. P. 151.
2. *Мешков В. В., ..., Рыжков А. М., ..., Мосягин Н. С., Шабаев В. М.* // Журн. физ. хим. 2023. Т. 97. № 10. С. 1441–1446.

Спонтанное рождение e^-e^+-пар в низкоэнергетических столкновениях тяжелых ионов за рамками монопольного приближения

Р. В. Попов[1, 2], В. М. Шабаев[1, 2], И. А. Мальцев[2], Д. А. Тельнов[2], Н. К. Дулаев[1, 2], Д. А. Тумаков[2]

[1] *Отделение перспективных разработок НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ*

[2] *Санкт-Петербургский государственный университет*

Спонтанное рождение электрон-позитронных пар представляет собой один из ряда нелинейных и непертурбативных квантово-электродинамических эффектов, проявление которых предсказывается в сверхсильных электромагнитных полях. Наиболее известным процессом такого рода является швингеровское рождение пар в однородном электрическом поле с амплитудой порядка $E_{cr} \approx 1{,}3 \cdot 10^{16}$ В/см. Ожидается, что аналогичное явление будет наблюдаться в сверхкритических кулоновских полях тяжелых ядер. Для этого потенциал должен быть достаточно сильным, чтобы связанное состояние с наименьшей энергией достигло нижнего континуума, где оно преобразуется в резонанс. При условии, что это состояние изначально было свободным, в нижний континуум привносятся две дырки (из-за спинового вырождения). В этом случае резонанс может распасться с образованием двух электрон-позитронных пар. Для того чтобы одно ядро имело связанное состояние с энергией $-mc^2$, оно должно нести заряд $Z_{cr} \approx 173$, что невозможно. Реалистичным сценарием, при котором данное явление может иметь место, является столкновение двух ядер с суммарным зарядом $Z_1 + Z_2 > Z_{cr}$. Однако при таких столкновениях электрон-позитронные пары также рождаются динамически. Задача выделения сигнала спонтанного рождения пар из динамического фона является очень сложной. Несмотря на все усилия, экспериментально это явление до сих пор не наблюдалось.

Недавно мы предложили способ наблюдения следов, однозначно указывающих на переход в сверхкритический режим. Метод основан на анализе вероятности образования пар и позитронных спектров как функций расстояния наибольшего сближения R_{min} и параметра $\eta = E/E_0$, где E – энергия столкновения, а E_0 – энергия лобового столкновения с тем же R_{min}. Мы провели обширное исследование η-зависимости вероятностей рождения пар и энергетических спектров позитронов в монопольном приближении. Это исследование показало, что поведение как вероятности, так и спектров относительно η изменяется при достижении сверхкритического режима во время столкновений. Частная производная вероятности dP/dn при фиксированном R_{min} меняет свой знак с положительного на отрицательный, когда параметры столкновения находятся достаточно глубоко в сверхкритической области. Что касается позитронных спектров, мы обнаружили, что для докритических столкновений максимумы дифференциальной вероятности dP/de, соответствующие большему η, превышают максимумы, полученные для меньшего η. Для сверхкритических столкновений спектры демонстрируют противоположный порядок максимумов по отношению к η.

В нашей недавней работе по этой теме мы расширили технику численных расчетов за пределы монопольного приближения. С помощью этой техники мы выполнили расчеты вероятностей рождения пар и энергетических спектров позитронов для ряда докритических и сверхкритических столкновений. Результаты расчетов демонстрируют те же признаки перехода к сверхкритическому режиму, что и те, которые были обнаружены в рамках монопольного приближения. Более того, мы заметили усиление некоторых из них, а именно при фиксированном R_{min} производная dP/dn становится отрицательной при меньших зарядах ядер Z.

Popov R.V., Shabaev V.M., Maltsev I.A., Telnov D.A., Dulaev N.K., Tumakov D.A. // Phys. Rev. D. 2023. V. 107. P. 116014.

Транспортные свойства металлов с тяжелыми фермионами

В. Р. Шагинян

Отделение теоретической физики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Физики активно обсуждают природу квантового критического фазового перехода, определяющего низкотемпературные свойства металлов с тяжелыми фермионами. Важные экспериментальные наблюдения их транспортных свойств позволяют пролить свет на природу квантового критического фазового перехода.

В нашей работе мы рассматриваем транспортные свойства сильно коррелированных фермисистем, таких как металлы с тяжелыми фермионами и высокотемпературные сверхпроводники. Эти транспортные свойства определяются сильными межчастичными корреляциями, образующими в этих соединениях плоские полосы. Эти свойства не совпадают со свойствами обычных металлов. Теоретическое объяснение этих свойств представляет большой интерес.

Мы анализируем магнетосопротивление и показываем, что под действием магнитного поля оно становится отрицательным. Такое поведение необычно для типичных металлов, которые имеют положительное магнетосопротивление, пропорциональное квадрату приложенного магнитного поля.

В отличие от поведения транспортных свойств обычных металлов сильно коррелированные соединения обладают линейным температурным сопротивлением $\rho(T) \sim T$. Показано, что вблизи квантового фазового перехода, когда плотность электронных состояний расходится, квазиклассическая физика остается применимой для описания удельного сопротивления ρ сильно коррелированных металлов благодаря наличию поперечной звуковой коллективной моды, представляющей собой фононную моду в твердых телах. Отсюда следует, что при превышении температуры T температуры Дебая T_D ($T > T_D$) удельное сопротивление $\rho(T)$ изменяется линейно с температурой T, поскольку механизм формирования T-зависимости $\rho(T)$ представляет собой аналогичный электрон-фононный механизм, преобладающий при высоких температурах в обычных металлах. Следует отметить, что в металлах с тяжелыми фермионами T_D оказывается низкой по сравнению с T_D обычных металлов и составляет доли градусов Кельвина. Таким образом, в области T-линейного сопротивления электрон-фононное рассеяние приводит ко времени жизни квазичастиц, практически независимому от материала. Такое поведение наблюдалось в экспериментах и было ошибочно приписано так называемому планковскому пределу.

В нашей работе показано, что из-за неферми-жидкостного поведения действительная часть $R(w)$ частотно-зависимой оптической проводимости демонстрирует скейлинговое поведение и необычное степенное поведение от частоты $R(w) \sim w^{-1}$, а не известное поведение, которое типично для обычных металлов: $R(w) \sim w^{-2}$. Мы также объяснили скейлинговое поведение оптической проводимости.

Все наши теоретические построения являются оригинальными, других объяснений вышеперечисленным экспериментам нет. Наши теоретические выкладки иллюстрируются и сравниваются с соответствующими экспериментальными данными. Полученные результаты находятся в хорошем согласии с экспериментальными наблюдениями.

Shaginyan V.R. et al. // Symmetry. 2023. V. 15. Iss. 11. P. 2055.

Топологически защищенный кубит в геликоидальном кристалле

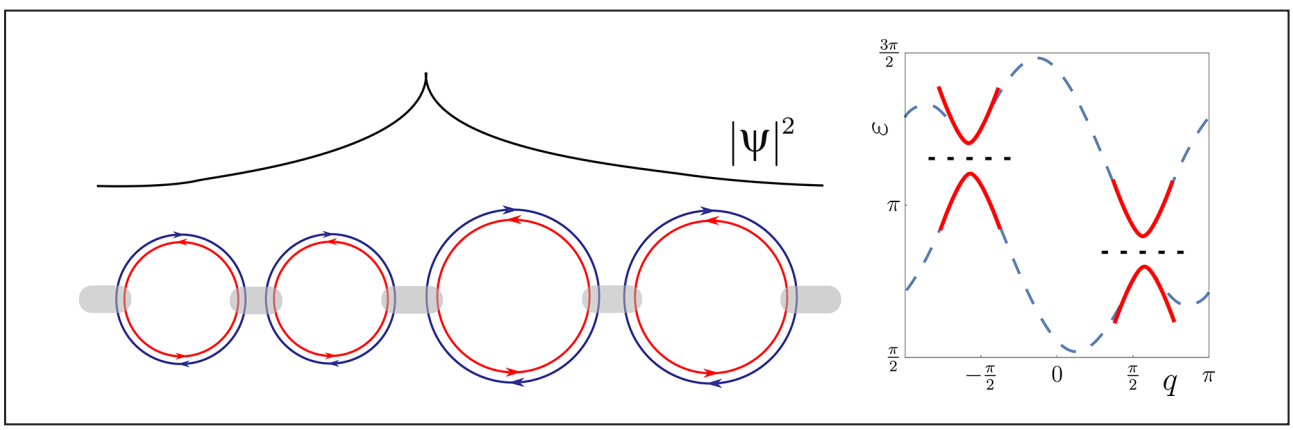
Р. А. Ниязов[1], Д. Н. Аристов[1], В. Ю. Качоровский[2]

[1] *Отделение теоретической физики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ*
[2] *Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН*

Мы рассматриваем геликоидальный кристалл (ГК) – сверхрешетку, основанную на туннельносвязанных краевых состояниях, возникающих в массиве упорядоченных антиточек (АТ) на поверхности двумерного топологического изолятора (рис.). Подобные системы уже изучаются экспериментально. Теоретически индивидуальная АТ исследовалась ранее. Рассчитана зонная структура одномерного ГК, помещенного в магнитное поле. Показано, что при целых и полуцелых значениях магнитного потока через АТ запрещенные зоны ГК закрыты. При небольшом отклонении магнитного потока от этих значений появляются массивные конусы Дирака, энергетическое расстояние между которыми можно контролировать чисто электрическим методом (затворные электроды).

Также мы изучаем электрон-электронное взаимодействие в такой системе. Это приводит к мультикритическому поведению. Существует полностью неустойчивая мультикритическая неподвижная точка, разделяющая три фазы: независимые кольца, независимые плечи и киральные каналы с переворотом спина.

Наиболее значимо, что при наличии дефектов в ГК, например стенки между кольцевыми областями большого и малого радиусов, возникает пара локализованных состояний (топологически защищенный кубит) с энергиями, лежащими в середине запрещенной зоны массивных конусов Дирака. Расщепление между энергетическими уровнями кубита может управляться как магнитным полем, так и чисто электрически. Возможность чисто электрического высокотемпературного управления кубитами открывает широкие возможности для применения в области квантовых вычислений.



Локализованное, топологически защищенное состояние вблизи дефекта в геликоидальном кристалле и его энергетический спектр (*черные пунктирные линии*)

Ниязов Р. А., Аристов Д. Н., Качоровский В. Ю. // Письма в ЖЭТФ. 2023. Т. 118. Вып. 5. С. 376–383.

Алгебра кватернионов в 4*D*-пространстве-времени: калибровка Лоренца – дверь в невидимый мир темной материи и темной энергии

В. И. Сбитнев

Отделение нейтронных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Распределение материи во Вселенной показано на рисунке в виде круговых диаграмм. Диаграмма *а* показывает наличие темной энергии, темной материи и видимой материи, из которых соткана Вселенная: на фоне темных энергии и материи, занимающих 96 % всей диаграммы, видимой материи отведено всего лишь 4 %. Образно говоря, если темная материя и темная энергия составляют основную массу бескрайнего океана Вселенной, то видимая материя представляется мимолетной пеной на нем.

Автор привлекает алгебру кватернионов, которая изоморфна алгебре группы *SU*(2), где вместо комплексно-злачных матриц σ_0, σ_x, σ_y, σ_z ранга 2 представлены кватернионы η_0, η_x, η_u, η_z матрицами ранга 4 с действительными коэффициентами: $\eta_x^2 = \eta_y^2 = \eta_z^2 = \eta_x\eta_y\eta_z = -\eta_0$. В базисе кватернионов тензор плотности энергии-импульса выглядит так:

$$T = i\varepsilon\eta_0 + p_x\eta_x + p_y\eta_y + p_z\eta_z - \mathcal{D}^T\phi. \qquad (1)$$

Здесь ε, p_x, p_y, p_z представляют плотности энергии и импульса вдоль координат *x*, *y*, *z* как видимой (барионной) материи, так и электромагнитного поля. Скалярное поле $\phi = \phi_0 + \phi_1$ – это неопределенная добавка к электромагнитным ϕ_0 и гравитомагнитным ϕ_1 частям данного тензора. Конечной целью является вывод гравитомагнитных уравнений

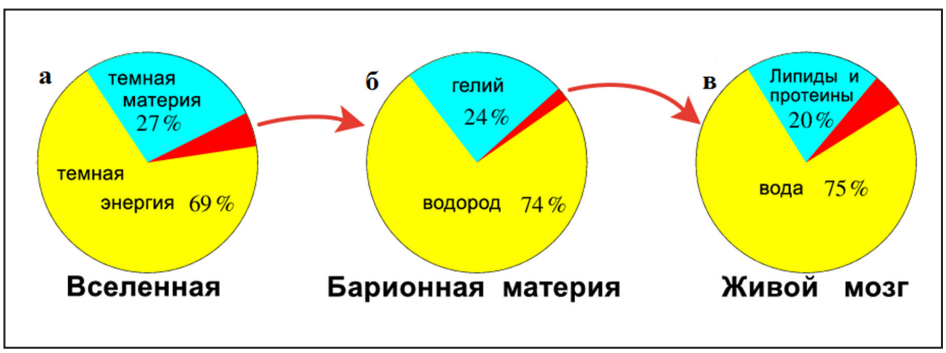
$$\begin{cases} (\nabla\cdot\boldsymbol{\mathfrak{E}}) = 4\pi\wp, & [\nabla\times\boldsymbol{\mathfrak{E}}] - \dfrac{1}{c}\dfrac{\partial}{\partial x}\boldsymbol{\mathcal{B}} = 0, \\ (\nabla\cdot\boldsymbol{\mathcal{B}}) = 0, & [\nabla\times\boldsymbol{\mathcal{B}}] + \dfrac{1}{c}\dfrac{\partial}{\partial x}\boldsymbol{\mathfrak{E}} = -\dfrac{4\pi}{c}\boldsymbol{\mathfrak{J}}. \end{cases} \qquad (2)$$

Для достижения этой цели на некотором этапе требуется принять калибровку Лоренца:

$$\text{trace}\,\mathcal{D}T = -\left(\frac{1}{c}\frac{\partial\varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial p_x}{\partial x} + \frac{\partial p_y}{\partial y} + \frac{\partial p_z}{\partial z} + \Box\phi\right)\eta_0 = 0. \qquad (3)$$

Производящие дифференциальные операторы $\mathcal{D}$, $\mathcal{D}^T$ и д'Аламбертиан $\Box = \mathcal{D}\mathcal{D}^T$ действуют в 4*D*-пространстве-времени с заданным на нем кватернионным базисом η_0, η_x, η_u, η_z.

Уравнение (3) открывает дверь в невидимый мир скалярных полей ϕ_0 и ϕ_1, имеющих отношение к темной энергии и темной материи. Безмассовое поле ϕ_0 определяет темную энергию, а поле ϕ_1, наделенное массой, является носителем темной материи. На это волновое уравнение барионная материя действует через градиент плотности энергии.



Процентное содержание: *а* – темной энергии, темной материи и видимой материи (*красный клин*) Вселенной; *б* – водорода, гелия и других тяжелых элементов (*красный клин*) видимой Вселенной; *в* – воды, липидов и белков, а также твердых компонентов (*красный клин*) в живом мозге, обозревающем Вселенную

Sbitnev V.I. Quaternion Algebra on 4*D* Spacetime: The Lorentz Gauge Is a Door to the Invisible World of Dark Matter and Dark Energy. 2023. 19 p. doi: 10.20944/preprints202311.1673.v1

Масса электрона как основной параметр Стандартной модели

С. И. Сухоручкин, З. Н. Сороко

Отделение нейтронных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Впервые проведен одновременный анализ всех 206 точно известных масс частиц из PDG2021 (рис.). Наблюдаемые точные кратные соотношения 1 : 3, 2 : 13 и 1 : 16 в положениях максимумов 16, 49 и 104 МэВ ($\approx m_\mu$ = 106 МэВ), 780 МэВ ($\approx m_\omega$ = 782 МэВ $\approx 6 \cdot 130$ МэВ = $= 6f_\pi$) и 1 774 МэВ ($\approx m_\tau$ = 1 777 МэВ) позволяют подтвердить единый параметр дискретности $\delta = 16m_e$ = 8,176 МэВ = $f_\pi / 16 \approx m_\omega / 6 \cdot 16$, близкий к 8,165 МэВ, удвоенному расщеплению массы пиона (4,5936(5) МэВ). Впервые получены соотношение между параметрами Стандартной модели массами лептонов и точное представление массы τ-лептона через удвоенные массы мюона и ω-мезона:

$$m_\tau = 2m_\mu + 2m_\omega \sim 2 \cdot 13 \cdot 16m_e - 2m_e + 2 \cdot 96 \cdot 16m_e. \qquad (1)$$

Массы лептонов и лептонное отношение $L = 207 = 13 \cdot 16 - 1$ соответствуют дырочной конфигурации, состоящей из 13 массовых и энергетических интервалов. Отношение 1 : 13 часто возникает при анализе стабильных интервалов в ядерных состояниях.

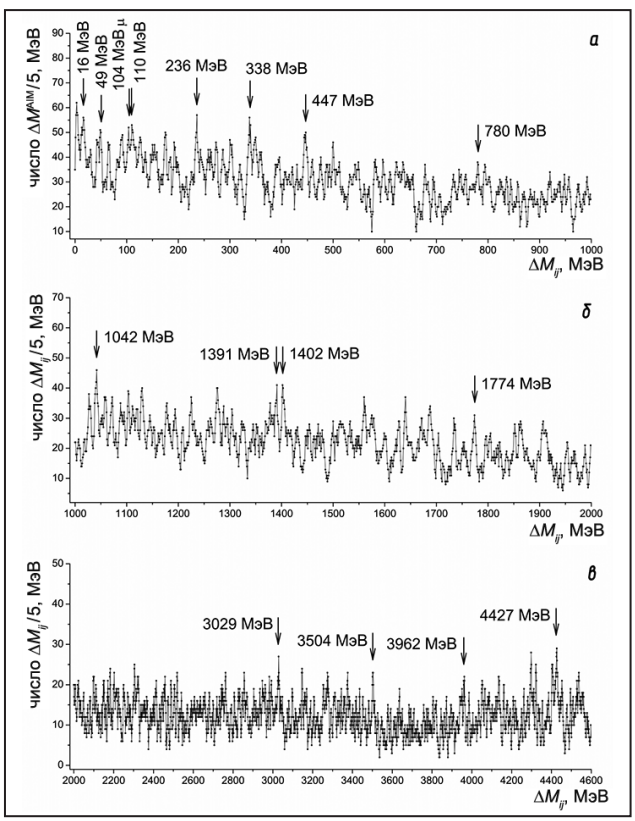
Аналогичные точные соотношения наблюдаются в массах нуклонов и электрона:

$$m_n = 115 \cdot 16m_e - m_e - \delta m_N / 8; \quad m_p = 115 \cdot 16m_e - m_e - 9\delta m_N / 8, \qquad (2)$$

где $\delta m_N = (m_n - m_p)$ – расщепление массы нуклона. О. И. Сумбаев и другие получили косвенное подтверждение выделенности параметров δm_N и m_e в анализе ядерных возбуждений. Параметр $\alpha/2\pi$ (радиационная поправка квантовой электродинамики к магнитному моменту электрона, примененная к массе электрона) находится в соотношении (3) с параметрами сверхтонкой и тонкой структур в положениях нейтронных резонансов ε″ = 1,34 эВ и ε′ = 1,2 кэВ, с M_q, M_Z (91 ГэВ) и массой скалярного бозона M_H^0 (125 эВ):

$$\alpha / 2\pi = 115{,}9 \cdot 10^{-5} = \varepsilon'' : \varepsilon' = \varepsilon' : 2m_e = = m_e : M_q = m_\mu : M_Z = M_q : 3M_H^0. \qquad (3)$$

Совместный анализ спектров масс частиц и энергий ядерных состояний демонстрирует универсальный характер параметров m_e и $\delta = 16m_e$ (соотношения (1–3)).



ΔM-распределение разностей масс частиц из PDG-2021. Максимумы при: *а* –16 МэВ = 2δ; 49 МэВ = 6δ, 104 МэВ ~ m_μ, 447 МэВ ~ M_q, 780 МэВ = $m_\omega = 6f_\pi = 6 \cdot 16\delta$; *б* – 1 042 МэВ = $8f_\pi$, 1 391–1 402 МэВ = $10m_\tau$, 1 774 МэВ ~ m_τ; *в* – 3 504 МэВ = $8M_q$, 3 962 МэВ = $9M_q$ и 4 427 МэВ = $10M_q$

Sukhoruchkin S.I. et al. // Proc. of the ISINN-29. JINR, E3-2023-58. Dubna, 2023. P. 121–128.

Сверхтонкие магнитные аномалии в спектрах изотопов калия

Ю. А. Демидов, М. Г. Козлов

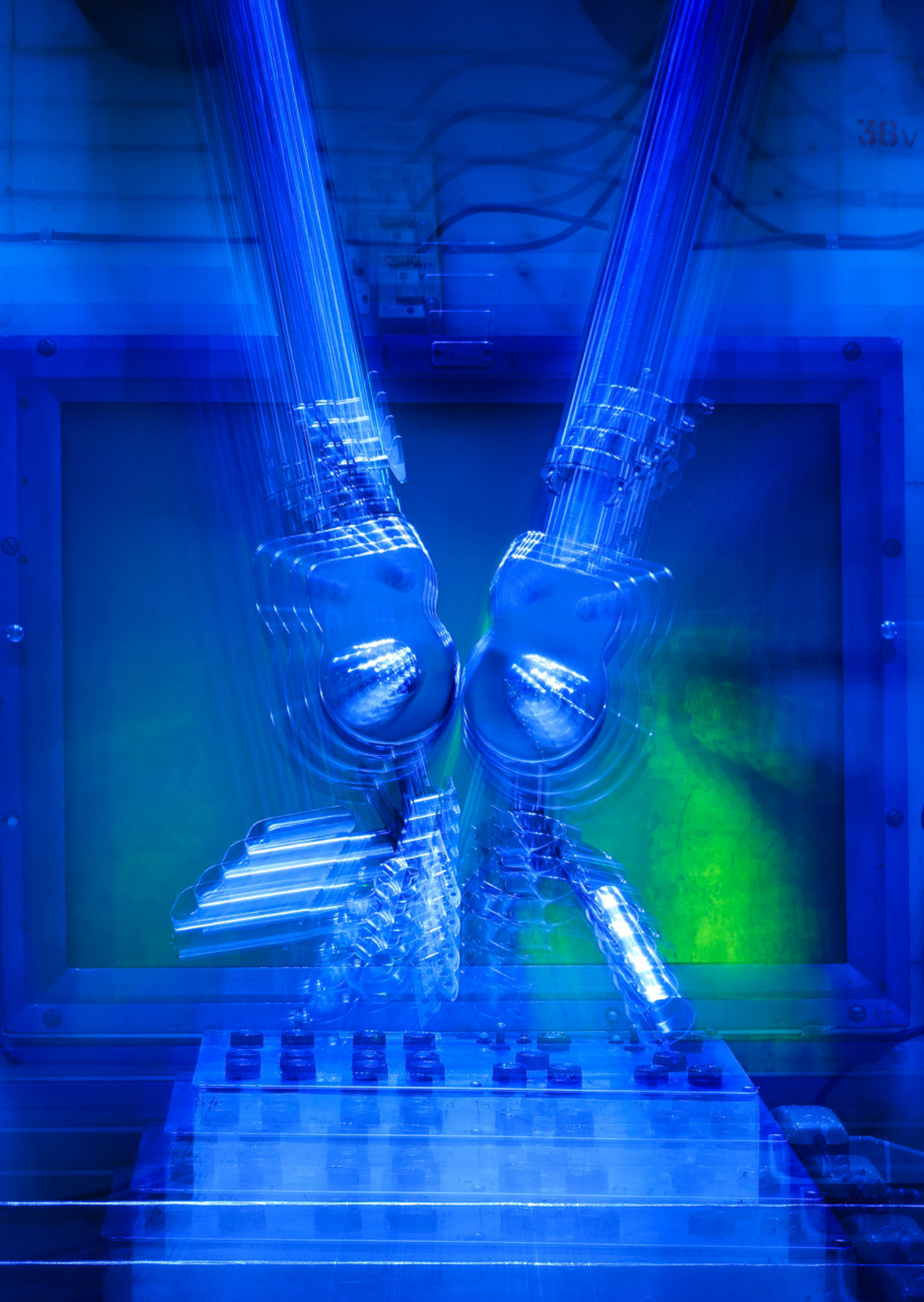
Отделение физики нейтронных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Выполнен расчет констант сверхтонкой структуры для низколежащих состояний атома калия с целью изучения изменений в распределении ядерной намагниченности в его изотопическом ряду. Магнитные дипольные константы сверхтонкой структуры (СТС) зависят от распределения заряда и намагниченности внутри атомного ядра. В приближении точечного ядра отношение постоянных СТС двух изотопов равно отношению их g-факторов. Учет распределения намагниченности и заряда по объему ядра приводит к поправкам Бора – Вайскопфа и Брейта – Розенталь соответственно. Эти поправки нарушают пропорциональность между константами СТС и ядерными g-факторами, что получило название сверхтонкой магнитной аномалии (СМА).

СМА в изотопическом ряду калия достигает довольно больших значений из-за сингулярности в поправке Бора – Вайскопфа при стремлении ядерного g-фактора к нулю. Большие поправки Бора – Вайскопфа характерны для изотопов с одним валентным протоном в состоянии $d_{3/2}$, поэтому нас интересуют изотопы калия и золота с такой конфигурацией ядер. Для расчета поправок Бора – Вайскопфа мы использовали атомно-ядерную факторизацию. При этом атомная часть поправки Бора – Вайскопфа одинакова для всех изотопов и может быть вычислена с высокой точностью. Атомная часть поправки Бора – Вайскопфа сильно зависит от заряда ядра. Выделив эту часть, мы можем сравнивать ядерные множители изотопов различных элементов. Ядерный множитель можно оценить, используя одночастичную модель ядра. Также ядерные множители могут быть извлечены из измеренных сверхтонких магнитных аномалий, если атомный множитель известен.

Согласно расчетам первое возбужденное состояние ($4p_{1/2}$) в нейтральном атоме калия практически не чувствительно к поправкам Бора – Вайскопфа и Брейта – Розенталь. Это позволяет оценить точность, с которой вычислены константы СТС. Достигнутая точность позволяет выполнить сравнение ядерных множителей, полученных на основании одночастичной ядерной модели, с извлеченными из экспериментальных данных для основного состояния атома калия. Показано, что при малых g-факторах ядерные множители, извлеченные из экспериментальных данных, сильно отличаются от предсказаний одночастичной ядерной модели. Аналогичное поведение ядерных множителей мы изучали ранее в изотопическом ряду золота. Мы предполагаем, что в таких случаях состояние валентного протона нельзя описать одной конфигурацией, и необходимо учитывать вклад смешивания ядерных конфигураций.

Demidov Yu.A., Kozlov M.G. et al. // Phys. Rev. C. 2023. V. 107. P. 024307.



Исследования с использованием нейтронов, фотонов и мюонов

44 Выявление индивидуальных магнитных вкладов в бимагнитных наночастицах «ядро – оболочка» Fe_3O_4–Mn_3O_4 методом порошковой дифракции поляризованных нейтронов

45 Надмолекулярная структура взаимопроникающих полимерных сеток на основе бактериальной целлюлозы и поли-1-винил-1,2,4-триазола: композиционные гидрогели и малоугловое рассеяние

47 Дисперсия спиновых волн в аморфных ферромагнетиках

48 Особенности магнетизма в мультиферроиках $Dy_{1-x}Ho_xMnO_3$

49 Расслоение магнитного и кристаллографического состояний в $Fe_{1-x}Rh_xGe$

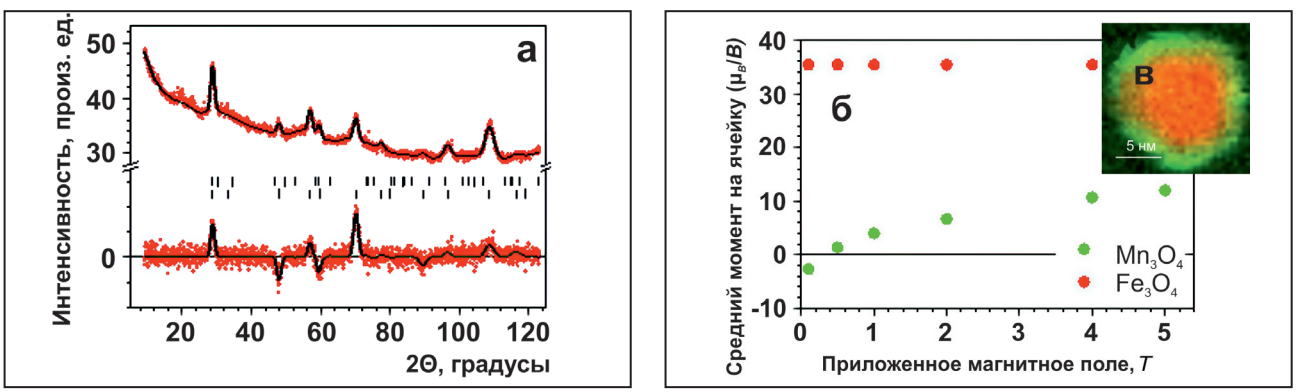
Выявление индивидуальных магнитных вкладов в бимагнитных наночастицах «ядро – оболочка» Fe_3O_4–Mn_3O_4 методом порошковой дифракции поляризованных нейтронов

И. В. Голосовский[1], И. А. Кибалин[2], А. Гукасов[2], A.G. Roca[3], A. López-Ortega[4, 5], M. Estrader[6, 7], M. Vasilakaki[8], K.N. Trohidou[8], T.C. Hansen[9], I. Puente-Orench[9, 10], E. Leliévre-Berna[9], J. Nogués[3, 11]

[1] *Отделение нейтронных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ*
[2] *Laboratoire Léon Brillouin, France*
[3] *Catalan Institute of Nanoscience and Nanotechnology, Spain*
[4] *Universidad Pública de Navarra – Departamento de Ciencias, Spain*
[5] *Universidad Pública de Navarra – INAMAT2, Spain*
[6] *Universitat de Barcelona – Departament de Química Inorgànica i Orgànica, Spain*
[7] *Universitat de Barcelona – Institut de Nanociència i Nanotecnologia, Spain*
[8] *Institute of Nanoscience and Nanotechnology, NCSR "Demokritos", Greece*
[9] *Institut Laue–Langevin, France*
[10] *Instituto de Nanociencia y Materiales de Aragón, Spain*
[11] *Catalan Institution for Research and Advanced Studies, Spain*

С помощью рассеяния поляризованных нейтронов исследованы локальная магнитная анизотропия и магнитный порядок в наночастицах «ядро – оболочка» Fe_3O_4–Mn_3O_4 (рис.). Показано, что в слабых полях магнитные моменты Fe_3O_4 и Mn_3O_4, усредненные по элементарной ячейке, антиферромагнитно связаны, тогда как в сильных полях моменты параллельны друг другу. Наблюдаемая переориентация магнитных моментов в оболочке Mn_3O_4 связана с постепенной эволюцией локальной магнитной восприимчивости от анизотропной к изотропной при увеличении поля. Кроме того, длина магнитной когерентности в ядре Fe_3O_4 демонстрирует необычную полевую зависимость, обусловленную конкуренцией между антиферромагнитным взаимодействием в интерфейсе и зеемановской энергией в поле.

Полученные результаты демонстрируют новые возможности количественного анализа данных порошковой дифракции поляризованных нейтронов для исследования сложных многофазных магнитных материалов.



Уточнение суммарной (*вверху*) и разностной (*внизу*) нейтронограмм при 5 кЭ (*а*). Зависимость усредненных по элементарной ячейке моментов Fe_3O_4 (*красные символы*) и Mn_3O_4 (*зеленые символы*) (*б*). Электронная микрофотография (EELS) наносистемы «ядро – оболочка» (*в*)

Golosovsky I.V., Kibalin I.A., Gukasov A., Roca A.G., López-Ortega A., Estrader M., Vasilakaki M., Trohidou K.N., Hansen T.C., Puente-Orench I., Leliévre-Berna E., Nogués J. // Small Methods. 2023. V. 7. Iss. 10. P. 2201725.

Надмолекулярная структура взаимопроникающих полимерных сеток на основе бактериальной целлюлозы и поли-1-винил-1,2,4-триазола: композиционные гидрогели и малоугловое рассеяние

Р. Ю. Смыслов[1, 2], Г. П. Копица[1], А. И. Емельянов[3], Ю. Е. Горшкова[4], С. А. Коржова[3], Н. В. Цвигун[5], А. К. Хрипунов[2], А. Е. Баранчиков[6], А. С. Поздняков[3]

[1] *Отделение нейтронных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ*
[2] *Институт высокомолекулярных соединений НИЦ «Курчатовский институт»*
[3] *Иркутский институт химии им. А. Е. Фаворского СО РАН*
[4] *Лаборатория нейтронной физики им. И. М. Франка Объединенного института ядерных исследований*
[5] *ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН*
[6] *Институт общей и неорганической химии им. Н. С. Курнакова РАН*

В работе представлены результаты синтеза и исследования новых композитных гидрогелей, представляющих собой взаимопроникающие полимерные сети (ВПС) на основе наногель-пленки (НГП) бактериальной целлюлозы (БЦ) как жесткоцепного полимера, и поли-1-винил-1,2,4-триазола (ПВТ) как гибкоцепного гидрофильного полимера, который способен обеспечить образцам эластичность и координирующую связь с ионами металлов.

Композитные гидрогели были синтезированы на основе бактериальной целлюлозы, продуцируемой *Komagataeibacter rhaeticus*, и поли-1-винил-1,2,4-триазола. Радикальную полимеризацию ПВТ проводили непосредственно в матрице БЦ, получая взаимопроникающие сетки. Для создания новых гидрогелей допировали ортофосфорной кислотой (ОФК) взаимопроникающие полимерные сетки БЦ – ПВТ, которые образуют комплексную связь с атомом азота мономерных звеньев ПВТ в четвертом положении гетерокольца.

Исследование организации надмолекулярной структуры (НМС) нативной БЦ, как и композитных гидрогелей на основе БЦ, содержащей комплекс ПВТ – ОФК, проводилось в широком диапазоне переданных импульсов $1{,}5 \cdot 10^{-4} < q < 0{,}3$ Å^{-1} с использованием методов ультра- и классического малоуглового рассеяния нейтронов (УМУРН и МУРН). Полученные данные МУРН и УМУРН показали, что нативная БЦ имеет двухуровневую иерархическую организацию НМС на микро- и мезоскопическом масштабах от 1,6 нм до 2,5 мкм (рис. *а*).

На первом структурном уровне наблюдалось рассеяние нейтронов ламелями, которые представляют собой наноленты БЦ (толщиной $T \cong 42$ нм и шириной $W \cong 140$ нм), состоящие из пучков микрофибрилл. Кроме того, был получен значимый результат: нативная БЦ имеет пик на кривой МУРН – УМУРН при $q_c \cong 0{,}0124$ нм$^{-1}$, при этом корреляционная длина $\xi = 2\pi/q_c$, характеризующая ближний порядок между нанолентами для нативной БЦ, равна ≈ 507 нм. На втором структурном уровне можно говорить об организации НМС по типу объемного фрактала с размерностью $D_{V2} = 1{,}95$ и верхней границей самоподобия $R_{c2} \approx 2{,}3$ мкм, что указывает на близость к гауссову распределению кристаллической фазы целлюлозы в НГП. Отмечено, что это хорошо согласуется с высоким содержанием воды в НГП и хорошими сорбционными свойствами нативной БЦ.

Установлено, что композиционные гидрогели БЦ – ПВТ и БЦ – ПВТ – ОФК также обладают двухуровневой иерархической НМС, включая ближний порядок с $\xi \approx 520$–540 нм. В то же время импрегнирование (наполнение) НГП БЦ сшитыми сегментами цепей ПВТ приводит к обволакиванию нанолент БЦ с образованием интерполимерного комплекса, что в свою очередь выражается в увеличении их толщины T от 42 до 70 нм и фрактальной размерности второго структурного уровня до $D_{V2} \cong 2{,}58$–$2{,}85$, т. е.

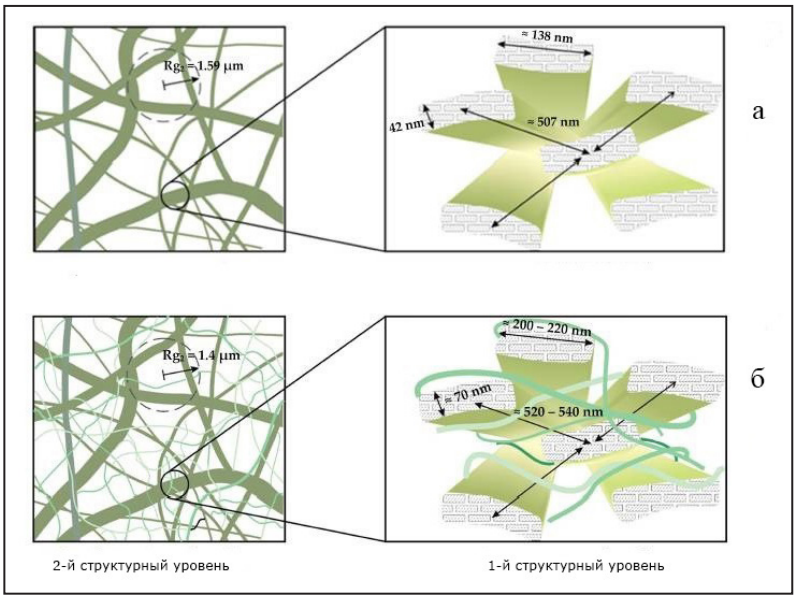


Схема структуры нативной бактериальной целлюлозы (*а*) и гидрогеля «бактериальная целлюлоза – поли-1-винил-1,2,4-триазола» (*б*)

к компактизации полимерного вещества внутри ВПС (рис. *б*).

Кроме того, представленная в данной работе иерархическая организация надмолекулярной структуры БЦ согласуется с моделью БЦ Брауна, которая ранее была подтверждена результатами Финка. Найденный на кривой МУР пик может быть референсом для проверки естественности НГП БЦ, а значит, его инвариантность может служить критерием для проверки возможных воздействий на НМС.

Smyslov R.Yu., Emel'yanov A.I., ..., Korzhova S.A., Gorshkova Yu.E., Khripunov A.K., ..., Tsvigun N.V., ..., Kopitsa G.P., ..., Pozdnyakov A.S. // Biomimetics. 2023. V. 8. Iss. 7. P. 520–536.

Дисперсия спиновых волн в аморфных ферромагнетиках

Л. А. Азарова[1], С. В. Григорьев[1], К. А. Пшеничный[1], О. И. Утесов[2]

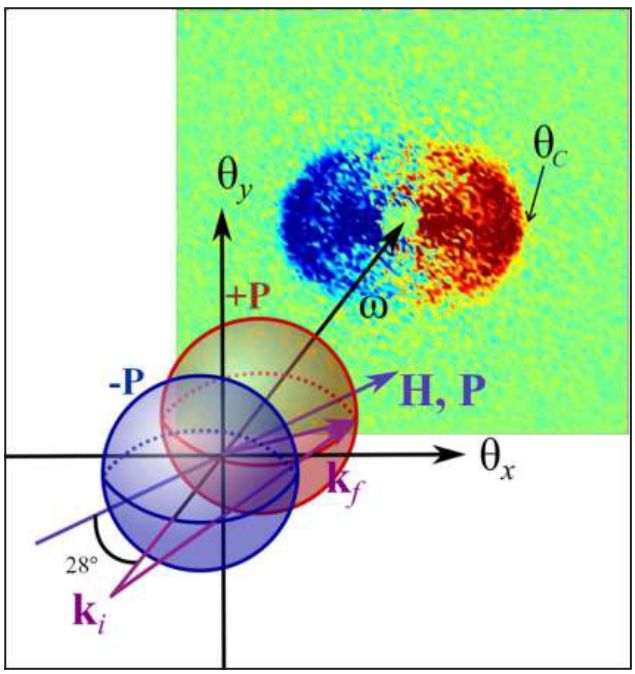
[1] Отделение нейтронных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ
[2] Отделение теоретической физики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Аморфные магнитные материалы представляют значительный интерес как с фундаментальной, так и с прикладной точек зрения. Наличие структурного, а также магнитного беспорядков играет важную роль в аморфных системах и приводит к тому, что их структурные и магнитные свойства могут быть довольно сложными.

В работе показана необходимость учета сложной, обусловленной случайной анизотропией модификации квадратичного закона дисперсии спиновых волн в аморфных ферромагнетиках. Продемонстрирована возможность учета этой модификации в виде линейной добавки в спектре спиновых волн, которая в экспериментах по нейтронному рассеянию может быть учтена как эффективная энергетическая щель. Использован уникальный Гатчинский метод малоуглового рассеяния поляризованных нейтронов с наклонной геометрией поля.

На рисунке представлена кинематическая схема рассеяния поляризованных нейтронов на спиновых волнах в аморфном ферромагнетике. В экспериментах обнаружена внутренняя, связанная со случайной анизотропией «эффективная энергетическая щель» в спектре спиновых волн сплава $Fe_{48}Ni_{34}P_{18}$ в широком диапазоне температур и магнитных полей. Величина щели, равная 0,015 мэВ, измерена с точностью 0,002 мэВ, что является рекордным по своей точности достижением.

Впервые экспериментально показано наличие линейной добавки в спектре спиновых волн, что подтверждает справедливость теории случайной анизотропии для аморфных ферромагнетиков.



Кинематическая схема рассеяния поляризованных нейтронов на спиновых волнах в аморфном ферромагнетике

1. *Azarova L.A., Pshenichniy K.A., Grigoriev S.V.* // J. Appl. Cryst. 2023. V. 56. Part. 1. P. 36–43.
2. *Grigoriev S.V., Azarova L.A., Pshenichnyi K.A., Utesov O.I.* // J. Exp. Theor. Phys. 2023. V. 137. No. 4. P. 463–473.

Особенности магнетизма в мультиферроиках $Dy_{1-x}Ho_xMnO_3$

И. А. Зобкало, М. И. Колков, А. Н. Матвеева, А. Г. Пшеничная, К. Ю. Терентьев

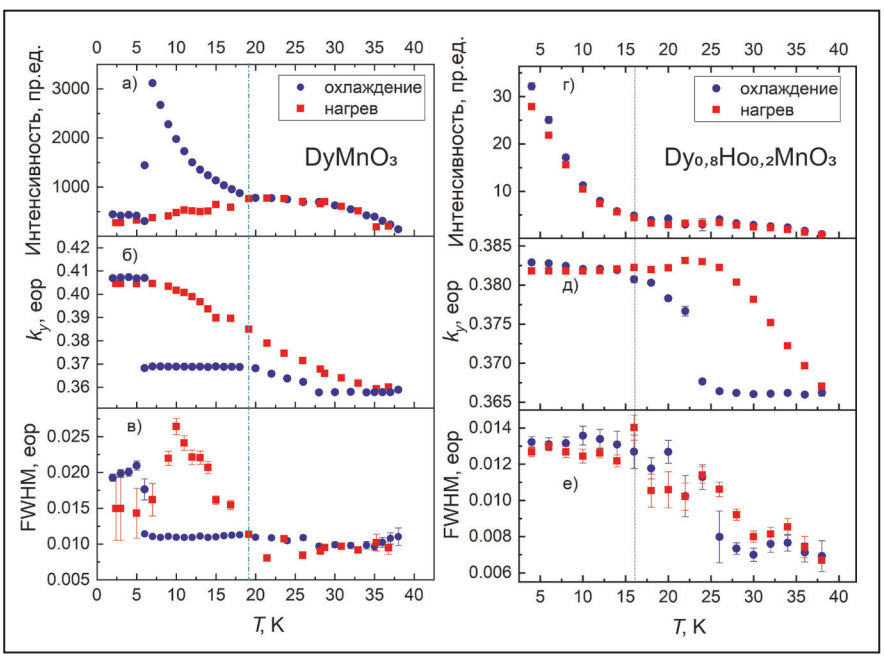
Отделение нейтронных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Методами нейтронной дифракции выполнены исследования мультиферроиков-ортоманганитов $DyMnO_3$ и $Dy_{0,8}Ho_{0,2}MnO_3$. Температурная эволюция магнитных сателлитов для обоих соединений демонстрирует значительный гистерезис (рис.), обусловленный взаимодействием двух магнитных подсистем – марганцевой и редкоземельной. Более значительные отличия в поведении параметров сателлитов при охлаждении и нагреве наблюдаются в $DyMnO_3$.

Для обоих соединений выполнены расчеты магнитных структур. В $DyMnO_3$ при низких температурах упорядочение марганцевой магнитной системы имеет вид циклоиды с компонентами типа A_yA_z. Расчеты магнитной структуры $DyMnO_3$ показывают сосуществование двух векторов распространения магнитной подсистемы диспрозия при температурах ниже T_{NR}: один, несоразмерный $\mathbf{k}_1$ = (0 k_y 0), соответствует вектору распространения магнитной структуры подсистемы Mn, другой – соразмерный $\mathbf{k}_2$ = (0 0,5 0) со структурой G_xA_y – для обоих векторов.

Впервые получена магнитная структура допированного соединения $Dy_{0,8}Ho_{0,2}MnO_3$. Частичное замещение Dy на Ho приводит к единому волновому вектору магнитной структуры марганцевой и редкоземельной подсистем, что благоприятно для генерации электрической поляризации за счет механизма обменной стрикции между марганцевой и редкоземельной магнитными подсистемами.

В $DyMnO_3$ магнитные моменты редкоземельных ионов лежат в плоскости *ab*, а в допированном составе $Dy_{0,8}Ho_{0,2}MnO_3$ появляется компонента вдоль оси *c*, т. е. характер редкоземельного магнитного упорядочения меняется. Продемонстрировано влияние внешнего электрического поля на магнитную киральность в $Dy_{0,8}Ho_{0,2}MnO_3$.



Температурные зависимости сателлита (2 k_y 1) для $DyMnO_3$ (*левая панель*) и $Dy_{0,8}Ho_{0,2}MnO_3$ (*правая панель*): *а*, *г* – интенсивности; *б*, *д* – векторы распространения; *в*, *е* – ширины пика

1. Matveeva A.N., Zobkalo I.A., ..., Terentjev K.Yu., Kolkov M.I. et al. // J. Magn. Magn. Mater. 2023. V. 569. P. 170415.
2. Матвеева А. Н., Зобкало И. А., Пшеничная А. Г. // Изв. РАН. Сер. физ. 2023. Т. 87. № 4. С. 567–572.
3. Matveeva A.N., Zobkalo I.A., ..., Kolkov M.I., Terentjev K.Yu. et al. // Phys. B: Condens. Matter. 2023. V. 658. Art. 414821.

Расслоение магнитного и кристаллографического состояний в $Fe_{1-x}Rh_xGe$

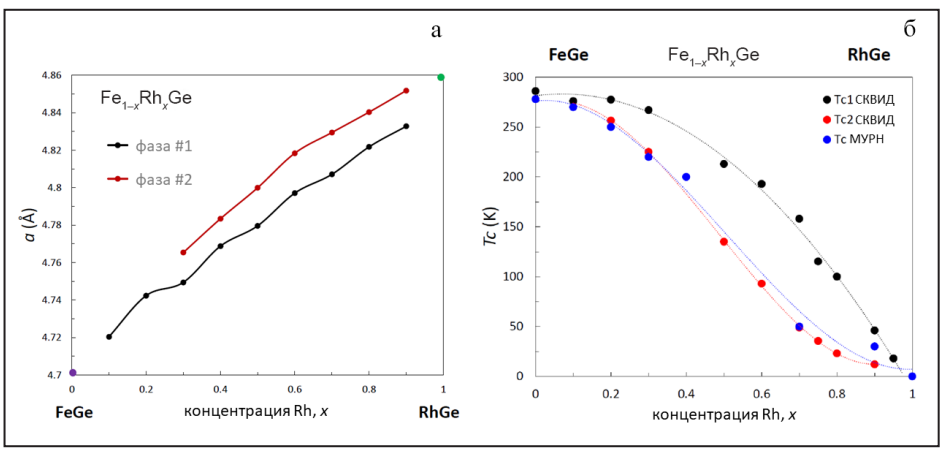
Е. В. Алтынбаев[1], С. В. Григорьев[2], Д. О. Сканченко[2]

[1] Инжиниринговый центр «Нейтронные технологии» НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ
[2] Отделение нейтронных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Проведено комплексное экспериментальное и теоретическое исследование соединений $Fe_{1-x}Rh_xGe$ во всем диапазоне концентраций $x \in [0,0–1,0]$ с использованием рентгеновской дифракции, малоуглового рассеяния нейтронов, магнитометрии и теоретических расчетов.

Эти соединения, синтезированные при высоком давлении, кристаллизуются в нецентросимметричную кубическую структуру B20. Отсутствие инверсионной симметрии в расположении магнитных атомов приводит к возникновению антисимметричного взаимодействия Дзялошинского – Мория и образованию магнитной спирали. В частности, магнитная система соединения FeGe упорядочивается в магнитную спираль при температурах ниже T_C = 278 K. Тем не менее известно, что бинарное соединение B20 RhGe проявляет слабый ферромагнетизм ниже T_m = 140 K и переходит в сверхпроводящее состояние при T_C = 4,5 K.

В то время как FeGe и RhGe являются однофазным гелимагнетиком и нетрадиционным сверхпроводником соответственно, для промежуточных составов $x \in [0,2–0,9]$ обнаружено внутреннее расщепление кристаллографического и магнитного состояний. Теоретический анализ стабильности двух обнаруженных фаз вместе с экспериментальными данными показывают, что это расщепление сохраняет общую пространственную группу и происходит внутри монокристаллитов, а не является следствием кристаллизации соединений с близкими значениями содержания Rh(Fe)-концентрации. Несмотря на кажущееся сходство, эти две фазы демонстрируют различные магнитные структуры с отчетливым ферро- и гелимагнитным характером.



Зависимости постоянных решетки от концентрации Rh в $Fe_{1-x}Rh_xGe$ (*а*). Концентрационная зависимость критических температур в $Fe_{1-x}Rh_xGe$ (*б*)

Skanchenko D.O., Altynbaev E.V., ..., Grigoriev S.V. et al. // J. Alloys Compd. 2023. V. 935. Part 2. Art. 167943.

Исследования с использованием протонов и ионов. Физика нейтрино

52 Сечение фоторождения чармония на ядрах при ультравысоких энергиях

53 Проявление эффектов БФКЛ-эволюции в двухструйных событиях с большим разделением по быстроте на Большом адронном коллайдере при энергии 2,76 ТэВ

54 Первое измерение событий с быстротными провалами в протон-ядерных соударениях на Большом адронном коллайдере, полученное в эксперименте CMS

55 Первое измерение зарядовой асимметрии в парном рождении топ- и антитоп-кварков в эксперименте ATLAS

56 Поиск магнитных монополей и частиц с высоким электрическим зарядом в эксперименте ATLAS

57 Наблюдение двух новых Ω_c^{*0}-барионов

58 Обнаружение атомного изомера в ^{208}Pb как нового кандидата в эталоны частоты (времени)

59 Эволюция формы в легких изотопах золота

61 Угловая анизотропия осколков деления и сечения деления $^{236, 238}$U нейтронами с энергией до 500 МэВ

62 Описание спектров кумулятивных протонов, пионов и фотонов в столкновениях тяжелых ионов промежуточных энергий на основе неравновесного гидродинамического подхода

63 Новые результаты коллаборации Borexino для солнечных CNO-нейтрино

64 Поиск низкоэнергетических сигналов от гравитационных событий с детектором Borexino

65 Поиск солнечных аксионов с энергией 8,4 кэВ, излучаемых в *M*1-переходе ядер ^{169}Tm

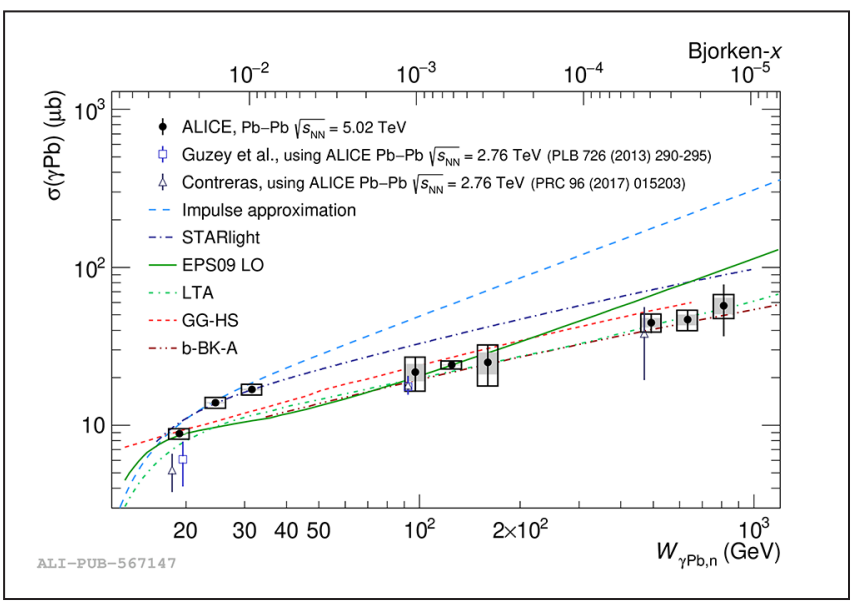
Сечение фоторождения чармония на ядрах при ультравысоких энергиях

Н. А. Бурмасов, М. Б. Жалов, В. В. Иванов, Е. Л. Крышень, М. В. Малаев, В. Н. Никулин, В. Г. Рябов, Ю. Г. Рябов, А. В. Ханзадеев

Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, коллаборация ALICE

В эксперименте ALICE на Большом адронном коллайдере (БАК) измерены распределения по быстроте сечений фоторождения J/ψ в ультрапериферических столкновениях (УПС) ядер свинца. Чармоний регистрировали по распаду в дилептонном канале в интервале $-4 < y < -2{,}5$, используя димюонный магнитный спектрометр, созданный при значительном вкладе группы НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ. Из измеренных в УПС распределений по быстроте определена энергетическая зависимость сечения фоторождения J/ψ на ядерной мишени свинца в интервале $20 < W_{\gamma N} < 800$ ГэВ, представленная на рисунке, в сравнении с теоретическими предсказаниями, включая LTA и EPS09, полученными в пертурбативной квантовой хромодинамике (КХД) с учетом эффектов экранировки ядерных глюонов.

Хотя быстрый рост сечения фоторождения с энергией замедляется экранировкой ядерных глюонов, явных признаков проявления нелинейного режима насыщения плотности глюонов в ядре еще не наблюдается. Полученные результаты важны для понимания физики жестких процессов и их описания в рамках пертурбативной КХД, а также для детального анализа адрон-ядерных взаимодействий в физике космических лучей при ультравысоких энергиях.



Энергетическая зависимость сечения фоторождения чармония на ядре свинца

1. *ALICE Collab., Acharya S., ..., Burmasov N., Ivanov V., Khanzadeev A., Kryshen E., Malaev M., Nikulin V., Ryabov V., Ryabov Yu., Zhalov M. et al.* // JHEP. 2023. Iss. 10. Art. 119.
2. *Kryshen E., ..., Zhalov M.* // Phys. Rev. C. 2023. V. 108. Iss. 2. P. 024904.

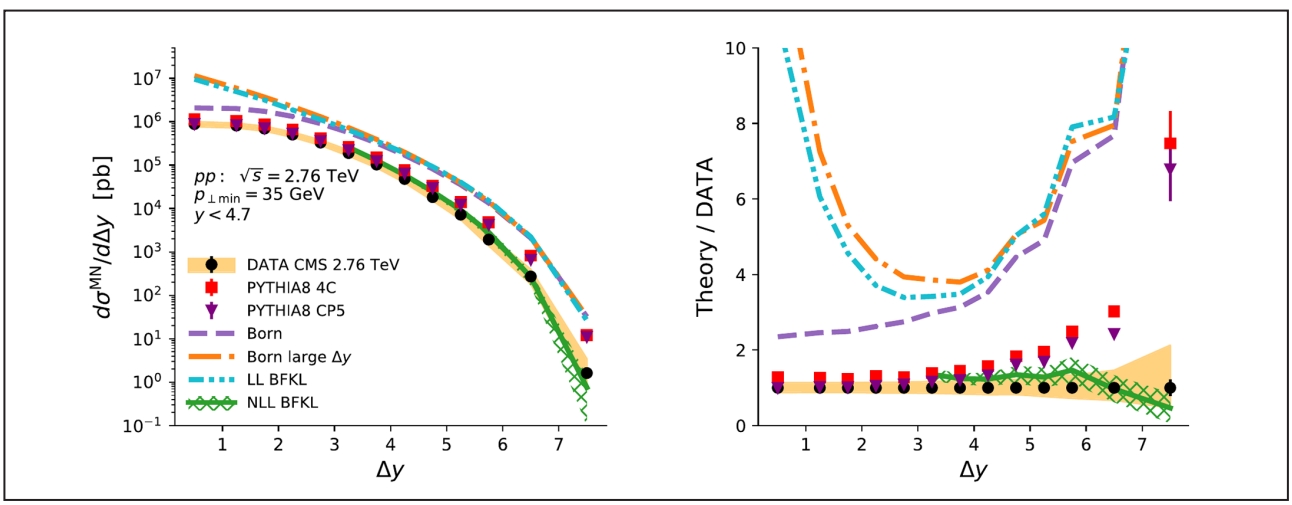
Проявление эффектов БФКЛ-эволюции в двухструйных событиях с большим разделением по быстроте на Большом адронном коллайдере при энергии 2,76 ТэВ

А. Ю. Егоров, В. Т. Ким

Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Получено новое свидетельство проявления эффектов эволюции Балицкого – Фадина – Кураева – Липатова (БФКЛ) в процессах образования пар адронных струй с большим разделением по быстроте в протонных столкновениях на Большом адронном коллайдере (БАК) при энергии 2,76 ТэВ в системе центра масс. Обнаружение проявлений эволюции БФКЛ является важной задачей, т. к. ожидается, что с ростом энергии на существующих и будущих коллайдерах вклады эволюции квантовой хромодинамики в высокоэнергетическом режиме БФКЛ станут доминирующими при поиске сигналов новой физики.

В данной работе впервые вычислены в рамках подхода БФКЛ с учетом следующих за ведущими вкладов сечения процесса образования пар адронных струй с большим разделением по быстроте в *pp*-столкновениях при энергии 2,76 ТэВ. Также проведены вычисления в других подходах и приближениях и сравнение результатов с результатами измерений эксперимента CMS. На рисунке представлены сечение рождения пар адронных струй с максимальной разницей быстроты между струями с поперечным импульсом выше определенного порога (такие пары струй называются парами Мюллера – Навеле), а также расчеты, основанные на эволюции Докшицера – Грибова – Липатова – Альтарелли – Паризи (ДГЛАП): PYTHIA8, Born, Born large Δy – и эволюции БФКЛ в главном логарифмическом приближении (LL BFKL) и в следующем за главным логарифмическом приближении (NLL BFKL). В настоящее время для расчетов сигнальных и фоновых событий при поиске новой физики на БАК используется эволюция ДГЛАП. Однако, как видно из рисунка, при условиях, доступных на БАК, расчет, основанный на БФКЛ, лучше воспроизводит результаты измерений при больших быстротах.



Сечение рождения пар струй Мюллера – Навеле в протонных столкновениях при энергии 2,76 ТэВ в системе центра масс. Сравнение результатов измерения CMS с результатами расчетов в различных приближениях: *слева* – величина сечения; *справа* – отношение результатов вычисления к результатам измерения

Egorov A.Iu., Kim V.T. // Phys. Rev. D. 2023. V. 108. Iss. 1. P. 014010.

Первое измерение событий с быстротными провалами в протон-ядерных соударениях на Большом адронном коллайдере, полученное в эксперименте CMS

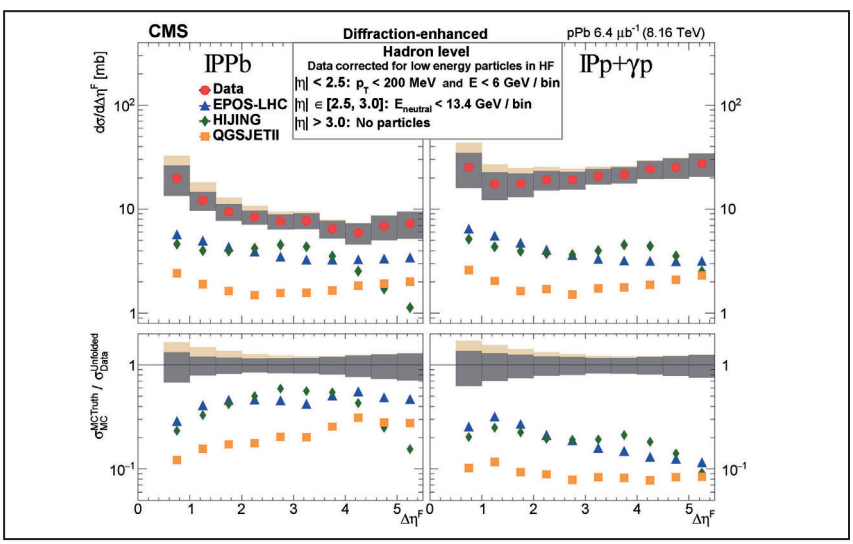
Е. В. Кузнецова, Д. Е. Соснов, В. Т. Ким, Г. Е. Гаврилов, В. Л. Головцов, Ю. М. Иванов, В. А. Мурзин, В. А. Орешкин, И. Б. Смирнов, В. В. Сулимов, Л. Н. Уваров, С. С. Волков, А. А. Воробьев

Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, коллаборация CMS

Основной вклад в процессы адрон-адронных и адрон-ядерных взаимодействий, изучаемых при высоких энергиях, вносят померон – объекты с квантовыми числами вакуума, связанные с фундаментальной природой сильных взаимодействий, описываемых квантовой хромодинамикой (КХД). В случае упругого и дифракционного рассеяний события характеризуются провалами в быстротных распределениях образованных частиц. В протон-ядерных столкновениях дифракционное рассеяние может помочь в исследовании пространственно-временной картины сильных взаимодействий при рассеянии в ядре и возможных нетривиальных эффектов цветового экранирования и антиэкранирования КХД.

Коллаборацией CMS впервые при энергиях Большого адронного коллайдера (8 ТэВ на нуклонную пару, почти в 300 раз выше, чем в предыдущих измерениях) было проведено измерение сечения событий с быстротными провалами, являющимися сигнатурой дифракционных процессов (рис.). Неожиданные результаты, полученные CMS в протон-свинцовых соударениях, впервые показали, что при сверхвысоких энергиях в дифракционных процессах с тяжелыми ядрами доминируют электромагнитные взаимодействия, в то время как вклад сильных взаимодействий за счет померонного обмена меньше в несколько раз. Таким образом, требуется учет доминирующего вклада электромагнитных процессов в дифракционных взаимодействиях с ядрами при высоких энергиях, в частности в физических генераторах Монте-Карло, использующихся при моделировании событий с космическими лучами сверхвысоких энергий в земной атмосфере.

Сотрудники ОФВЭ играли ведущую роль в представленном анализе, участвовали в наборе и обработке данных, а также в бесперебойной поддержке детектора CMS.



Сечения протон-ядерных взаимодействий как функция величины быстротного провала ($\Delta\eta^F$) в распределении образованных частиц: *слева* – события взаимодействий свинца с померoном, испущенным протоном; *справа* – процессы, вызванные соударением протонов с померонами и фотонами, испущенными ядром; *снизу* – отношение предсказаний генераторов событий Монте-Карло к данным CMS

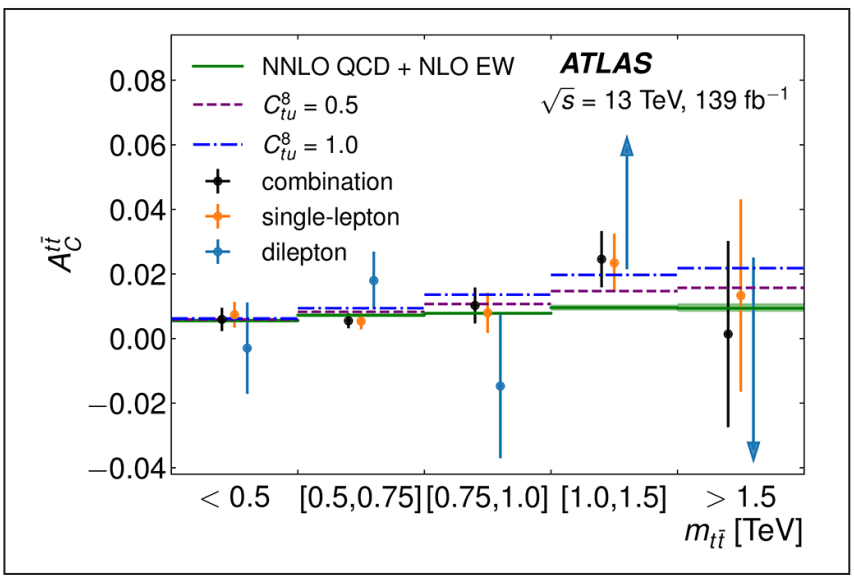
CMS Collab., Tumasyan A., ..., Gavrilov G., Golovtsov V., Ivanov Yu., Kim V., Kuznetsova E., Murzin V., Oreshkin V., Smirnov I., Sosnov D., Sulimov V., Uvarov I., Volkov S., Vorobyev A. et al. // Phys. Rev. D. 2023. V. 108. Iss. 9. P. 092004.

Первое измерение зарядовой асимметрии в парном рождении топ- и антитоп-кварков в эксперименте ATLAS

А. Е. Ежилов, М. П. Левченко, В. П. Малеев, Ю. Г. Нарышкин, Д. Пуджа, О. Л. Федин

Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, коллаборация ATLAS

В эксперименте ATLAS на Большом адронном коллайдере (БАК) выполнено измерение зарядовой и лептонной асимметрии в парном рождении топ- и антитоп-кварков. Для исследования использовались данные, полученные за второй период работы БАК с полной светимостью 139 фбн$^{-1}$. Эти исследования позволяют проверить предсказания квантовой хромодинамики (КХД) и исследовать потенциальный вклад физики за пределами Стандартной модели (СМ). Асимметрия между t и $\bar{t}$ возникает из-за интерференции амплитуд высших порядков в процессах $q\bar{q} \to t\bar{t}$ и $qg \to t\bar{t}q$, при этом вклад $q\bar{q}$-аннигиляции доминирует. Вследствие этих асимметрий топ-кварк (топ-антикварк) преимущественно рождается в направлении начального кварка (антикварка). Вклады образования пар топ- – антитоп-кварков от начальных состояний $q\bar{q}$ и qg существенно меньше, чем в доминирующем процессе слияния глюонов $gg \to t\bar{t}$, что ослабляет измеримую асимметрию. Инклюзивная зарядовая асимметрия рождения $t\bar{t}$, измеренная в эксперименте ATLAS, $A_C^{t\bar{t}} = 0{,}0068 \pm 0{,}0015$ со статистической значимостью 4,7 стандартного отклонения. Зависимость величины асимметрии от инвариантной массы $m_{t\bar{t}}$ показана на рисунке. Измеренные инклюзивные и дифференциальные зарядовые асимметрии согласуются с предсказаниями СМ в следующем за ведущим порядке (NLO) теории возмущений КХД. Измерения были проинтерпретированы в рамках эффективной теории поля, получены ограничения для значений нескольких коэффициентов Вильсона.



Зависимость зарядовой асимметрии $A_C^{t\bar{t}}$ от инвариантной массы $m_{t\bar{t}}$, полученная с учетом поправки на детекторные искажения. Показаны результаты для различных каналов регистрации пары $t\bar{t}$. *Пунктирные линии* – результаты расчетов асимметрии для двух различных значений коэффициента Вильсона C_{tu}^8

ATLAS Collab., Aaboud M., ..., Fedin O., Ezhilov A., Levchenko M., Maleev V., Naryshkin Yu., Pudzha D. et al. // JHEP. 2023. Iss. 08. Art. 077.

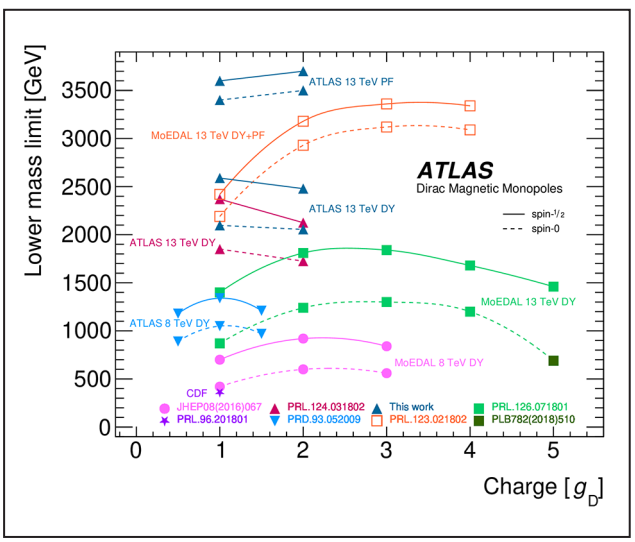
Поиск магнитных монополей и частиц с высоким электрическим зарядом в эксперименте ATLAS

А. Е. Ежилов, М. П. Левченко, В. П. Малеев, Ю. Г. Нарышкин, Д. Пуджа, О. Л. Федин

Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, коллаборация ATLAS

В эксперименте ATLAS на Большом адронном коллайдере (БАК) выполнен поиск магнитных монополей и частиц с высоким электрическим зарядом. Для исследования использовались данные, полученные за второй период работы БАК с полной светимостью 139 фбн$^{-1}$. Магнитные монополи могут рождаться в протон-протонных столкновениях в результате двух механизмов: Дрелла – Яна, в котором виртуальный фотон создает пару магнитных монополей, или слияния фотонов, в котором два виртуальных фотона, рождающихся при столкновении протонов, взаимодействуют, создавая пару магнитных монополей. При поиске в ATLAS рассматривались магнитные монополи с магнитным зарядом 1gD и 2gD, а также HECO 20e, 40e, 60e, 80e и 100e как со спином 0, так и со спином ½ в диапазоне масс 0,2–4 ТэВ. Условие квантования Дирака подразумевает, что монополь с зарядом 1gD будет иметь ионизирующую способность, сопоставимую с частицей, характеризуемой высоким электрическим зарядом (HECO), примерно равным 68,5e. Поскольку редкие фоновые процессы сложно смоделировать, фон в сигнальной области оценивается как 0,15 ± 0,04 (стат.) ± 0,05 (сист.) события путем экстраполяции событий с более низким ионизационным вкладом. Пределы, полученные для значений сечений Дрелла – Яна, примерно в три раза лучше, чем в предыдущих анализах, осуществленных с использованием данных 2015–2016 гг.

В настоящее время ATLAS является наиболее чувствительным экспериментом для поиска магнитных монополей в диапазоне зарядов 1–2gD, как показано на рисунке, и к HECO в диапазоне зарядов 20–100e.



Сравнение ограничений для массы монополей, полученных из данных Большого адронного коллайдера, набранных в течение Сеанса-1 и Сеанса-2 в *pp*-соударениях при рождении пары магнитных монополей в процессе Дрелла – Яна и процессе фотонного слияния. *Сплошная* и *пунктирная линии* представляют результаты вычислений для спина 0 и спина ½ соответственно

ATLAS Collab., Aad G., ..., Fedin O., Ezhilov A., Levchenko M., Maleev V., Naryshkin Yu., Pudzha D. et al. // JHEP. 2023. Iss. 11. Art. 112.

Наблюдение двух новых Ω_c^{*0}-барионов

Н. Ф. Бондарь, Н. И. Воропаев, А. А. Дзюба, К. А. Ившин, Д. С. Ильин, А. Г. Инглесси, П. В. Кравченко, 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

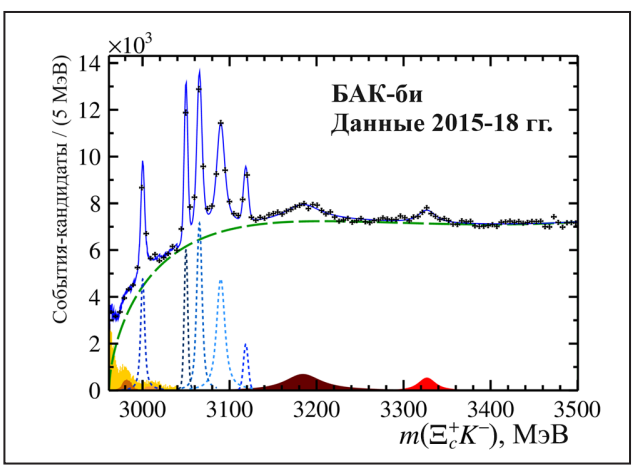
Одиночно очарованные барионы состоят из одного очарованного кварка и двух более легких кварков. Из-за большой разницы масс между очарованным и более легкими кварками спектр масс однократно очарованных барионов может быть систематически описан в эффективной теории. Ожидается множество возбужденных состояний из-за сложного взаимодействия трехкварковой системы, что делает их идеальным полигоном для испытаний теорий сильного взаимодействия.

В 2015 г. эксперимент LHCb объявил об одновременном открытии пяти возбужденных состояний Ω_c^{*0}, которые наблюдались в $\Xi_c^+K^-$-канале его распада. Некоторые теоретические интерпретации указывали на возможный вклад пентакварковых состояний в наблюдаемый спектр. Исследования были продолжены в том числе с использованием статистики, накопленной в ходе второго этапа работы Большого адронного коллайдера. Новый анализ данных показал, что помимо пяти узких пиков в спектре массы системы $\Xi_c^+K^-$ наблюдаются еще две широкие (резонансные) структуры. Первая располагается в районе 3 185, а вторая – около 3 327 МэВ/c^2 (рис.). Помимо этих особенностей в спектре наблюдается проявление частично восстановленных распадов $\Omega_c^{*0} \to \Xi_c'^+K^- \to \gamma\Xi_c^+K^-$, когда фотон из конечного состояния не регистрировался. Были определены массы и ширины новых массовых состояний, а также уточнены массы состояний, найденных ранее. Для новых состояний они составили:

$\Omega_c(3185)^0$: $m = 3\,185{,}1 \pm 1{,}7^{+7,4}_{-0,9} \pm 0{,}2$ МэВ/c^2, $\Gamma = 50 \pm 7^{+10}_{-20}$ МэВ;

$\Omega_c(3327)^0$: $m = 3\,327{,}1 \pm 1{,}2^{+0,1}_{-1,3} \pm 0{,}2$ МэВ/c^2, $\Gamma = 20 \pm 5^{+13}_{-1}$ МэВ.

Наблюдение новых барионов семейства Ω_c^0 дает новую информацию о сложном адронном спектре, позволяющую глубже понять сильное взаимодействие и лежащие в его основе принципы. Работа выполнена при участии специалистов НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ.



Распределение инвариантной массы кандидатов Ω_c^{*0} с наложением результатов подгонки. Наблюдавшиеся ранее возбужденные состояния Ω_c^0 показаны *синими пунктирными линиями*; вклад состояния $\Omega_c(3185)^0$ – *коричневой областью*; состояния $\Omega_c(3327)^0$ – *красной*. Вклад частично реконструированных распадов показан *желтым*, а *зеленая пунктирная линия* соответствует комбинаторному фону

LHCb Collab., Aaij R., ..., Bondar N., Chubykin A., Chulikov V., Dzyuba A., Ilin D., Inglessi A., Ivshin K., Kravchenko P., Sagidova N., Solovev A., Solovyev I., Voropaev N. et al. // Phys. Rev. Lett. 2023. V. 131. Iss. 15. P. 131902.

Обнаружение атомного изомера в ^{208}Pb как нового кандидата в эталоны частоты (времени)

С. А. Елисеев, Ю. Н. Новиков

Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, коллаборация PENTATRAP

Новое по физической природе состояние долгоживущей изомерии в атомах, обнаруженное в высоковозбужденных ионах ^{187}Re и ^{187}Os, открывает новые возможности фундаментальных исследований вне Стандартной модели и в то же время поиска нового, более точного эталона частоты (времени), играющего важнейшую роль во многих прикладных исследованиях. На установке PENTATRAP с пятью ионными ловушками в Институте ядерной физики Общества Макса Планка (Гейдельберг, Германия) было обнаружено новое высоковозбужденное состояние в ^{208}Pb^{41+} с энергией 31,2 ± 0,8 эВ и с периодом полураспада 26,5 ± 5,3 дня (рис. 1). Хотя фактор «качества» $\nu/\Delta\nu$ (где ν – частота перехода) для этого состояния уступает изомеру в ^{187}Re (рис. 2), большим преимуществом является принадлежность изомерного перехода в свинце ультрафиолетовому диапазону спектра в отличие от рентгеновского у ^{187}Re, что упрощает подбор лазерного сканирования для определения эталонного значения энергии.

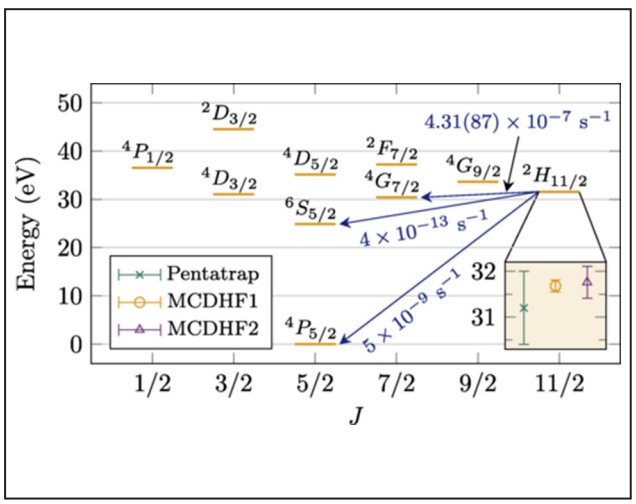


Рис. 1. Схема электронных уровней в ионе ^{208}Pb^{41+} и схема распада изомерного состояния. *В затемненном квадрате* дано сравнение экспериментальной величины с теоретическими расчетами

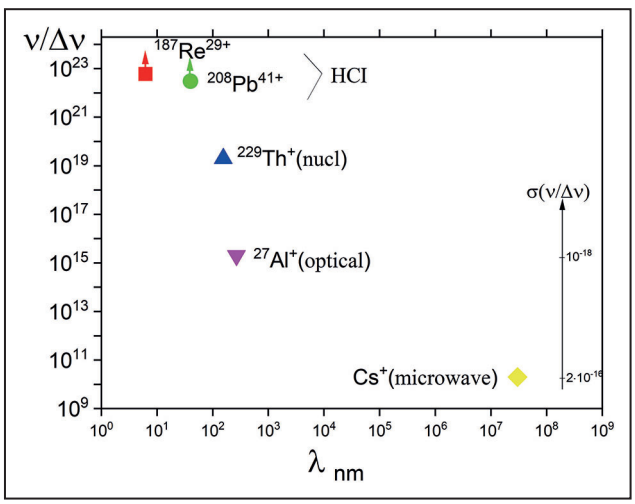


Рис. 2. Фактор «качества» для различных эталонов частоты в зависимости от длины волны изомерного излучения. Символ HCI означает высокозарядные ионы

Kromer K., ..., Novikov Yu.N., Eliseev S.A. et al. // Phys. Rev. Lett. 2023. V. 131. Iss. 22. P. 223002.

Эволюция формы в легких изотопах золота

А. Е. Барзах[1], Д. В. Федоров[1], П. Л. Молканов[1], М. Д. Селиверстов[1], С. Д. Просняк[2], Л. В. Скрипников[2]

[1] *Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ*
[2] *Отделение перспективных разработок НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ*

Исследование эволюции формы ядер – одно из важнейших направлений современной ядерной физики. Измерения изотопических сдвигов (ИС), позволяющие получить величины изменений средних квадратов зарядовых радиусов ядер ($\delta\langle r^2\rangle$), – один из основных источников информации о форме ядра, поскольку значения $\delta\langle r^2\rangle$ чувствительны даже к небольшим изменениям формы.

В нашем эксперименте методом лазерной спектроскопии в ионном источнике были измерены значения $\delta\langle r^2\rangle$ для основных и изомерных состояний нейтронно-дефицитных изотопов золота. Продвинутые атомные расчеты электронных факторов, необходимых для извлечения данных о $\delta\langle r^2\rangle$ из измеренных ИС, позволили уменьшить теоретическую погрешность $\delta\langle r^2\rangle$ до 2,7 %, что сравнимо с экспериментальными погрешностями.

Новые значения $\delta\langle r^2\rangle_{A,197}$ вместе с полученными ранее данными приведены на рис. 1. В предшествующих работах был обнаружен скачок деформации для ^{186}Au, за которым следует плато сильно деформированных изотопов $^{183-186}$Au. Нами показано, что это плато продолжается вплоть до ^{180}Au, а далее происходит «обратный скачок», свидетельствующий о возврате к сферичности у ^{179}Au (N = 100). За исключением ^{178}Au^{g,m}, где наблюдается сосуществование и чередование форм, остальные изотопы золота с N < 99 сохраняют форму, близкую к сферической.

На рисунке 2 сравнивается ход изменения $\delta\langle r^2\rangle$ (а значит, и деформации) вблизи середины нейтронной оболочки (N = 104) для различных изотопических цепочек в районе свинца (от $_{77}$Ir до $_{83}$Bi). Если изотопы свинца (Z = 82) остаются

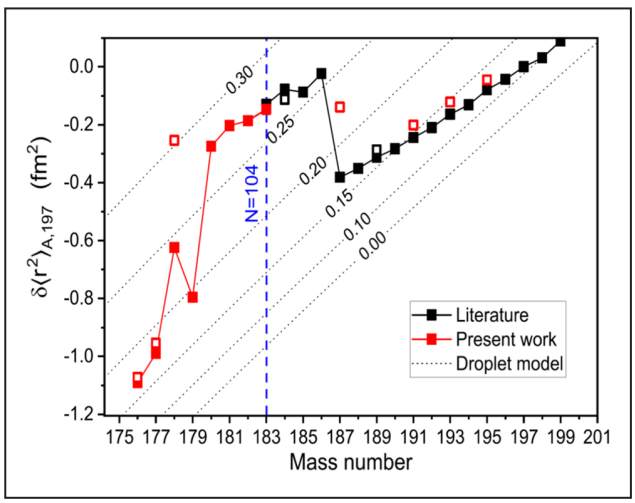


Рис. 1. Значения $\delta\langle r^2\rangle_{A,197}$ для основных (*заполненные символы*) и изомерных (*полые символы*) состояний ядер золота. *Линии* соответствуют предсказаниям капельной модели с фиксированной деформацией, значения которой приведены на этих линиях

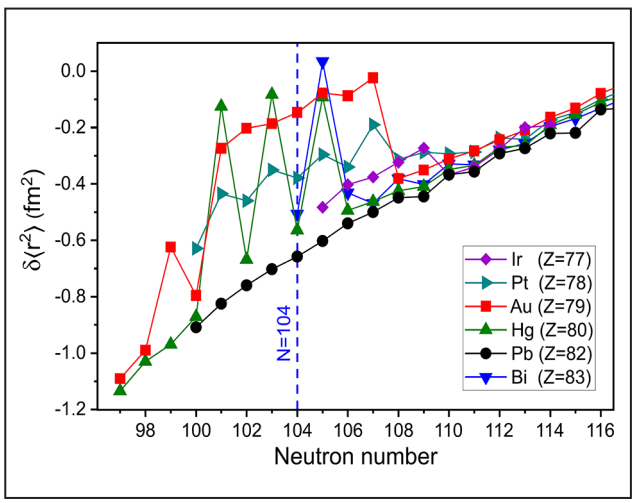


Рис. 2. Сравнение поведения $\delta\langle r^2\rangle$ вблизи середины нейтронной оболочки (N = 104) для различных изотопических цепочек в районе свинца. Данные для каждой цепочки сдвинуты по оси ординат для удобства сравнения

сферическими вплоть до $N = 100$, то для висмута и ртути ($Z = 83$ и 80) наблюдается чередование (стаггеринг) форм (нечетно-нейтронные изотопы при $N < 106$ сильно деформированы, а четно-нейтронные – близки к сферической форме). Менее выраженный стаггеринг наблюдается для изотопов платины ($Z = 78$), а деформация для изотопов иридия ($Z = 78$) растет плавно, не достигая больших значений. В контрасте со всеми этими моделями эволюции формы, изотопы золота ($Z = 79$) демонстрируют π-образную модель эволюции деформации с практически постоянной сильной деформацией при $100 < N < 108$. Таким образом, мы наблюдаем для золота уникальную модель эволюции формы, никогда прежде не встречавшуюся где-либо на карте нуклидов.

Произведены расчеты в рамках теории Хартри – Фока – Боголюбова со взаимодействием D1M и схематическим учетом смешивания конфигураций. Конфигурации для основного состояния подбирались так, чтобы у них были: 1) соответствующие эксперименту значения I^{π}; 2) значения магнитного момента, наиболее близкие к эксперименту; 3) энергии возбуждения < 1 МэВ относительно теоретического основного состояния. Теоретические и экспериментальные результаты хорошо согласуются между собой (рис. 3).

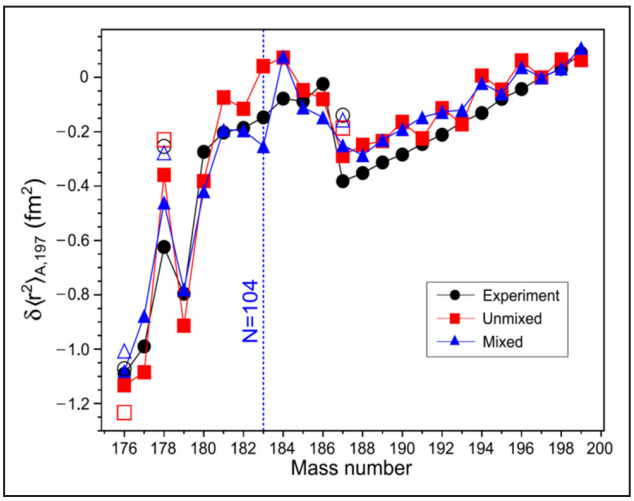


Рис. 3. Сравнение экспериментальных (*черные кружки*) и теоретических значений $\delta\langle r^2\rangle_{A,197}$ (*красные квадраты* – без смешивания конфигураций; *синие треугольники* – с учетом смешивания конфигураций)

Cubiss J.G., Barzakh A.E., Fedorov D.V., Molkanov P.L., Prosnyak S.D., Seliverstov M.D., Skripnikov L.V. et al. // Phys. Rev. Lett. 2023. V. 131. Iss. 20. P. 202501.

Угловая анизотропия осколков деления и сечения деления $^{236, 238}$U нейтронами с энергией до 500 МэВ

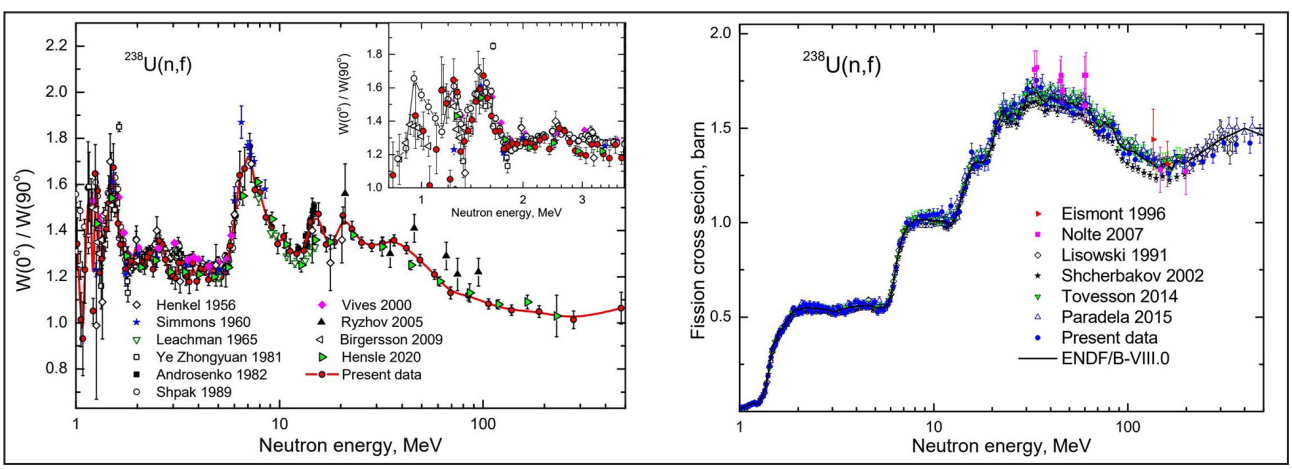
А. С. Воробьев[1], А. М. Гагарский[2], О. А. Щербаков[1], Л. А. Вайшнене[3], А. Л. Барабанов[4]

[1] Отделение перспективных разработок НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ
[2] Отделение нейтронных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ
[3] Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ
[4] НИЦ «Курчатовский институт»

Сечение деления и угловое распределение осколков деления – основные характеристики процесса деления. Их совместный теоретический анализ позволяет получить новую подробную информацию о барьерах деления, характеристиках ядер на барьерах, энергиях переходных состояний и роли предравновесных процессов во взаимодействии ядер с нейтронами. Все более точные данные по делению ядер необходимы для конструирования современных и будущих ядерных реакторов, для проектирования установок на базе ускорителей (ADS), в т. ч. мощных источников нейтронов.

На нейтронном времяпролетном спектрометре ГНЕЙС в НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ в одном эксперименте выполнены одновременные измерения зависимости угловой анизотропии осколков и сечений деления ядер ^{238}U и ^{236}U нейтронами в широком диапазоне энергий от 0,3 до 500 МэВ. Осколки деления регистрировались при помощи позиционно-чувствительных многопроволочных пропорциональных счетчиков низкого давления. Сечение реакции $^{236, 238}$U(*n*, *f*) измерялось относительно стандарта – сечения реакции ^{235}U(*n*, *f*). Результаты для реакции ^{238}U(*n*, *f*) представлены на рисунке. Сравнение полученных данных с результатами работ, выполненных ранее с использованием различных экспериментальных методик и источников нейтронов, демонстрирует общее согласие данных. Это свидетельствует о надежности использованного метода измерений и полученных результатов.

В дальнейшем планируется выполнить измерения на других изотопах, что значительно расширит круг доступных экспериментальных данных в этой области исследований.



Анизотропия угловых распределений осколков (*слева*) и сечения деления ^{238}U (*справа*) в сравнении с результатами других работ

1. *Vorobyev A.S., Gagarski A.M., Shcherbakov O.A., Vaishnene L.A., Barabanov A.L.* // JETP Lett. 2023. V. 117. No. 8. P. 557–565.
2. *Vorobyev A.S., Gagarski A.M., Shcherbakov O.A., Vaishnene L.A., Barabanov A.L. et al.* // Phys. Rev. C. 2023. V. 108. Iss. 1. P. 014621.

Описание спектров кумулятивных протонов, пионов и фотонов в столкновениях тяжелых ионов промежуточных энергий на основе неравновесного гидродинамического подхода

А. Т. Дьяченко[1], И. А. Митропольский[2]

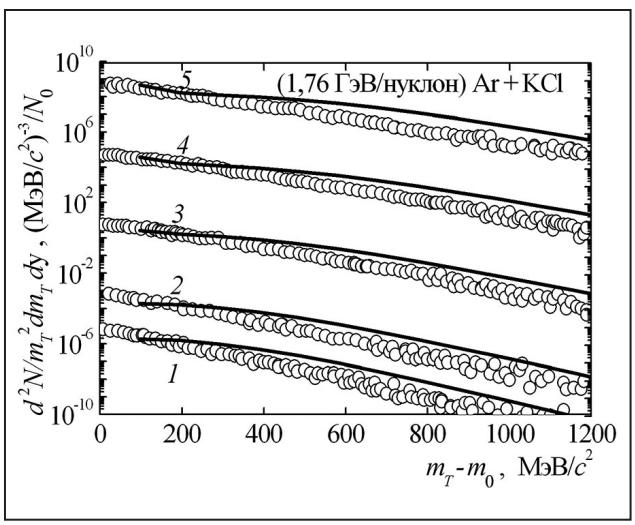
[1] Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ
[2] Отделение нейтронных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Ранее в работах авторов было показано, что локальное термодинамическое равновесие в процессе столкновения тяжелых ионов устанавливается не сразу, и было предложено совместно с уравнениями гидродинамики решать кинетическое уравнение. На стадии сжатия важна неравновесная компонента функции распределения, приводящая к формированию бесстолкновительной ударной волны подобно ударным волнам в расчетах по зависящему от времени методу Хартри – Фока.

В развитие гидродинамического подхода с неравновесным уравнением состояния были рассмотрены столкновения ядер ^{12}C с бериллиевой мишенью при энергиях налетающих ядер углерода 2,0 и 3,2 ГэВ/нуклон с испусканием протонов, пионов и фотонов, исследовавшиеся на ускорителе НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ. Спектры протонов содержат высокоэнергетическую кумулятивную часть, которую нам удалось описать в рамках неравновесного гидродинамического подхода с учетом поправки на микроканоническое распределение, а также мягкую часть спектра, которая содержит вклад от фрагментации. Получено хорошее согласие найденных нами спектров протонов, отрицательных пионов и фотонов с экспериментальными данными в отличие от расчетов Монте-Карло по модели молекулярной динамики и других каскадных моделей.

С теми же параметрами уравнения состояния мы провели расчеты энергетических спектров протонов в реакции Ar + KCl → *p* + *X* при энергии ядер Ar 1,76 ГэВ/нуклон, которые были получены коллаборацией HADES (Центр по изучению тяжелых ионов им. Гельмгольца, Германия). На рисунке приведены инвариантные двойные дифференциальные распределения протонов в зависимости от поперечной массы для разных интервалов быстрот. Получено хорошее согласие с экспериментальными данными, не уступающее более изощренному подходу.

Эти результаты представляют интерес при планировании экспериментов на ускорительном комплексе NICA (Объединенный институт ядерных исследований, Дубна).



Распределения протонов в зависимости от поперечной массы m_T в реакции Ar + KCl → *p* + *X*. *Точки* – экспериментальные данные; *кривые* соответствуют результатам расчета в интервалах быстрот *y*: *кривая 1* (· 10^2) для 0,1 < *y* < 0,15; *кривая 2* (· 10^4) для 0,2 < *y* < 0,25; *кривая 3* (· 10^8) для 0,4 < *y* < 0,45; *кривая 4* (· 10^{12}) для 0,6 < *y* < 0,65; *кривая 5* (· 10^{16}) для 0,8 < *y* < 0,85

Дьяченко А. Т., Митропольский И. А. // ЭЧАЯ. 2023. Т. 54. № 3. С. 566–580.

Новые результаты коллаборации Borexino для солнечных CNO-нейтрино

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, представила новые данные по солнечным нейтрино из CNO-цикла. Хотя CNO-цикл производит лишь 1 % всей солнечной энергии, он является определяющим для более массивных и горячих звезд. Поток CNO-нейтрино сильно зависит от содержания в Солнце элементов тяжелее гелия, что позволяет различить модели с высокой или низкой металличностью.

Для анализа полного набора данных Borexino, включающего все три фазы измерений, использовался метод выделения интегрального направления нейтрино (МВИН), который сопоставляет зарегистрированную позицию отдельных фотонов с известным положением Солнца. Наиболее точное измерение потока CNO-нейтрино получается путем объединения нового результата для CNO-нейтрино на основе МВИН с результатами спектрального анализа данных Фазы III (рис. 1). Полученная скорость взаимодействия CNO-нейтрино составила $6{,}7^{+1{,}2}_{-0{,}8}$ отсчетов в сутки на 100 т сцинтиллятора C_9H_{12}, что соответствует потоку $(6{,}7^{+1{,}2}_{-0{,}8}) \cdot 10^8$ см$^{-2}$ · с$^{-1}$, с учетом осцилляций нейтрино. Определенная величина потока согласуется со стандартной солнечной моделью с высокой металличностью B16-GS98. В сочетании с результатами измерений потоков ^{7}Be- и ^{8}B-нейтрино, ранее полученными Borexino, модель B16-AGSS09met с низкой металличностью отвергается на уровне 3,2σ (рис. 2).

Весомый вклад сотрудников Отделения нейтронных исследований связан с измерением с высокой точностью β-спектра ^{210}Bi, знание которого необходимо для анализа вклада от CNO-нейтрино.

Работа поддержана грантом РНФ № 21-12-00063.

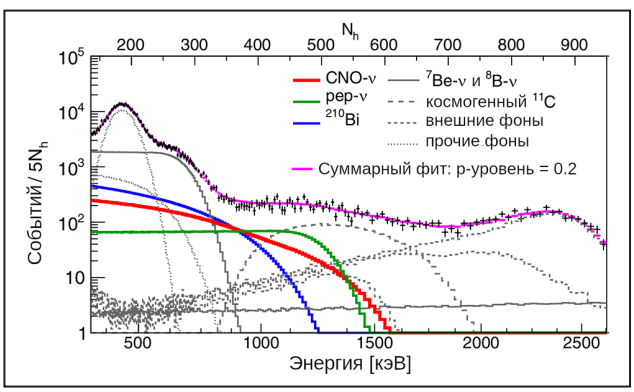


Рис. 1. Результаты подгонки измеренного спектра. Вклады CNO-нейтрино, ^{210}Bi и *pep*-нейтрино показаны *сплошными красными*, *синими* и *зелеными линиями* соответственно, другие спектральные компоненты (нейтрино ^{7}Be и ^{8}B, другие фоны) – *серым цветом*

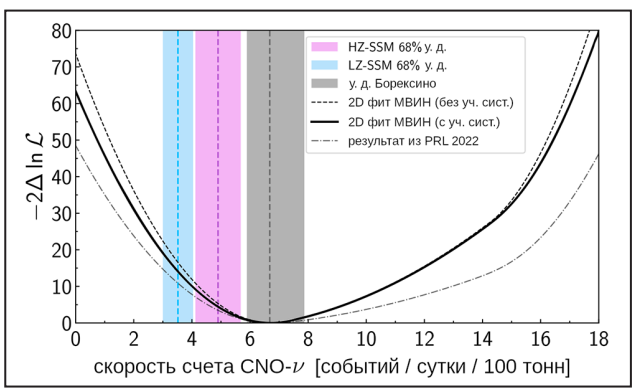


Рис. 2. Функция правдоподобия (−2ΔlnL) для скорости счета CNO-нейтрино. *Синие* и *фиолетовые вертикальные полосы* показывают 68%-ные доверительные интервалы для предсказаний стандартной солнечной модели B16-AGSS09met с низкой металличностью и B16-GS98 с высокой металличностью. Новый результат Borexino показан *серой вертикальной полосой*

Borexino Collab., Basilico D., ..., Derbin A., Drachnev I., Lomskaya I., Muratova V., Niyazova N., Semenov D., Unzhakov E. et al. // Phys. Rev. D. 2023. V. 108. Iss. 10. P. 102005.

Поиск низкоэнергетических сигналов от гравитационных событий с детектором 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

Сотрудники Института провели поиск нейтринных событий в детекторе Borexino в корреляции с 74 гравитационными событиями (ГС), зарегистрированными детекторами LIGO/VIRGO во время серий O1-O3. Детектор Borexino находился в режиме сбора данных, когда произошло 70 (из 87) слияний черных дыр, 2 слияния нейтронных звезд и 2 (из 4) слияний нейтронных звезд с черными дырами. ГС с участием нейтронных звезд должны сопровождаться излучением нейтрино. Анализировались сигналы в детекторе Borexino с энергией > 250 кэВ в окне ±1 000 с относительно времени регистрации ГС. Три варианта слияний черных дыр и нейтронных звезд во временном совпадении с данными Borexino анализировались отдельно. Ближайшее ГС – это слияние двух нейтронных звезд GW170817, произошедшее на $R = 40^{+7}_{-15}$ Мпк (рис. 1).

Статистически значимого превышения числа событий, регистрируемых Borexino во время прихода ГС, над фоном не наблюдалось. В результате установлены наиболее строгие верхние пределы на флюенсы нейтрино всех флейвов, связанных с ГС, для нейтрино с энергиями 0,5–5 МэВ. Рассматривались два спектра нейтрино: моноэнергетическая линия и спектр нейтрино, ожидаемый от вспышки сверхновой звезды (рис. 2). Такие же спектры рассматривались для электронных антинейтрино, регистрация которых происходит по реакции обратного β-распада.

Работа поддержана грантом РНФ № 21-12-00063.

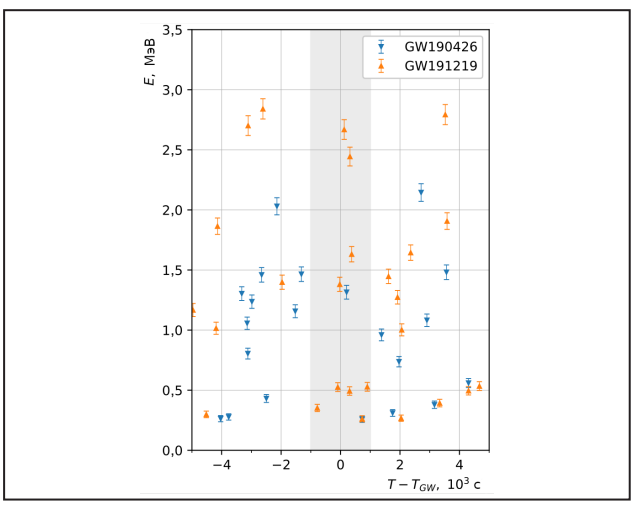


Рис. 1. События детектора Borexino с энергией более 0,25 МэВ в интервале ±5 000 с относительно гравитационных волн, вызванных слиянием двух нейтронных звезд, GW170817 и GW190425

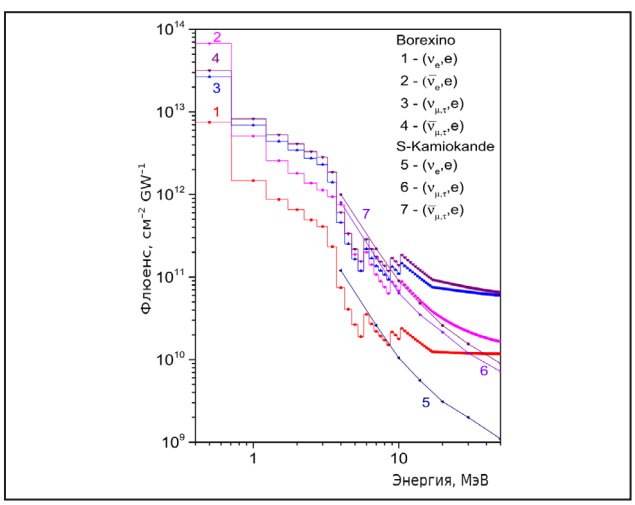


Рис. 2. Верхние пределы на флюенсы моноэнергетических нейтрино, полученные из временного корреляционного анализа событий (*ν*, *e*)-рассеяния и прихода 74 гравитационных волн (90 % у. д.). Ограничения 5, 6 и 7 получены коллаборацией S-Kamiokande для слияния двух нейтронных звезд GW 170817 из реакции (*ν*, *e*)-рассеяния

Borexino Collab., Basilico D., ..., Derbin A., Drachnev I., Lomskaya I., Muratova V., Niyazova N., Semenov D., Unzhakov E. et al. // Eur. Phys. J. C. 2023. V. 83. Iss. 6. Art. 538.

Поиск солнечных аксионов с энергией 8,4 кэВ, излучаемых в *M*1-переходе ядер ^{169}Tm

А. В. Дербин, И. С. Драчнев, В. Н. Муратова, Д. А. Семенов, М. В. Трушин, Е. В. Унжаков

Отделение нейтронных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Вероятность рождения и регистрации аксионов определяется их эффективными константами связи с фотонами, электронами и нуклонами. В данной работе рассматриваются излучение и поглощение аксионов в ядерном магнитном переходе, при этом излучение аксионов происходит на Солнце, а поглощение – на Земле. Чувствительность эксперимента определяется только константами связи аксиона с нуклонами g_{AN}. Эксперименты подобного рода были проведены ранее с ядрами ^{57}Fe, ^{7}Li и ^{83}Kr.

Цель работы – поиск монохроматических аксионов с энергией 8,41 кэВ, излучаемых в *M*1-переходе в ядрах ^{169}Tm на Солнце (проводится впервые). Для регистрации γ- и рентгеновских квантов и конверсионных и оже-электронов, возникающих при разрядке возбужденного уровня ^{169}Tm, использовался криогенный болометр на основе кристалла $T_3Al_5O_{12}$, работающий при температуре 10 мК.

Вычислен поток монохроматических солнечных аксионов с энергией 8,41 кэВ, связанный с разрядкой первого ядерного уровня ^{169}Tm, возбуждаемого за счет высокой температуры Солнца (рис. 1). Спектр, измеренный низкотемпературным болометром на основе кристалла тулиевого граната, показан на рис. 2. Аксионный пик с энергией 8,4 кэВ не наблюдался, число событий в нем меньше S_{lim} = 128 для 90 % у. д. Получено новое ограничение на константы связи аксиона с нуклонами $|g^3_{AN} + g^0_{AN}| \le 8{,}89 \cdot 10^{-6}$ (90 % у. д.), соответствующее новым ограничениям на массу аксиона $m_A \le 141$ эВ и $m_A \le 244$ эВ в моделях KSVZ- и DFSZ-аксиона соответственно.

Работа поддержана грантом РНФ № 22-22-00017.

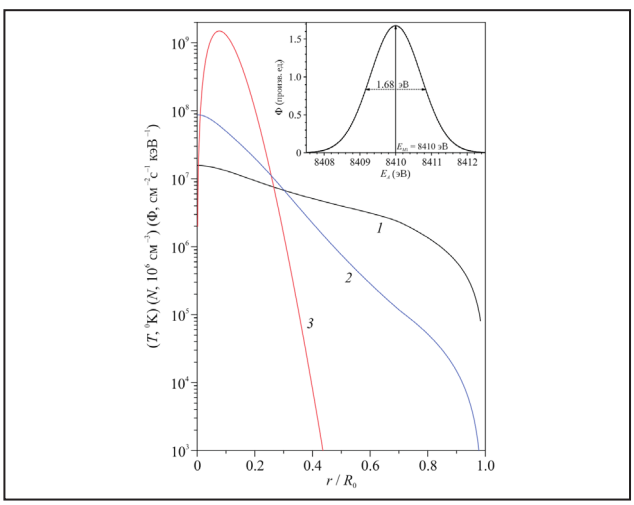


Рис. 1. Распределение температуры (*кривая 1*) и концентрации атомов ^{169}Tm (*кривая 2*) в зависимости от радиуса *r*. Поток аксионов из слоя r^2dr для отношения вероятностей излучения аксиона и γ-кванта $\omega_A/\omega_\gamma = 4 \cdot 10^{-14}$ и $dr = 5 \cdot 10^{-3} R_\odot$ (*кривая 3*). *На вставке* – энергетический спектр солнечных аксионов со средней энергией 8,41 кэВ

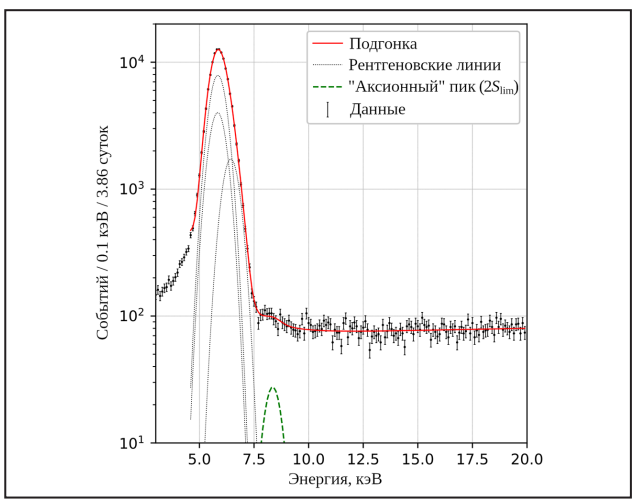
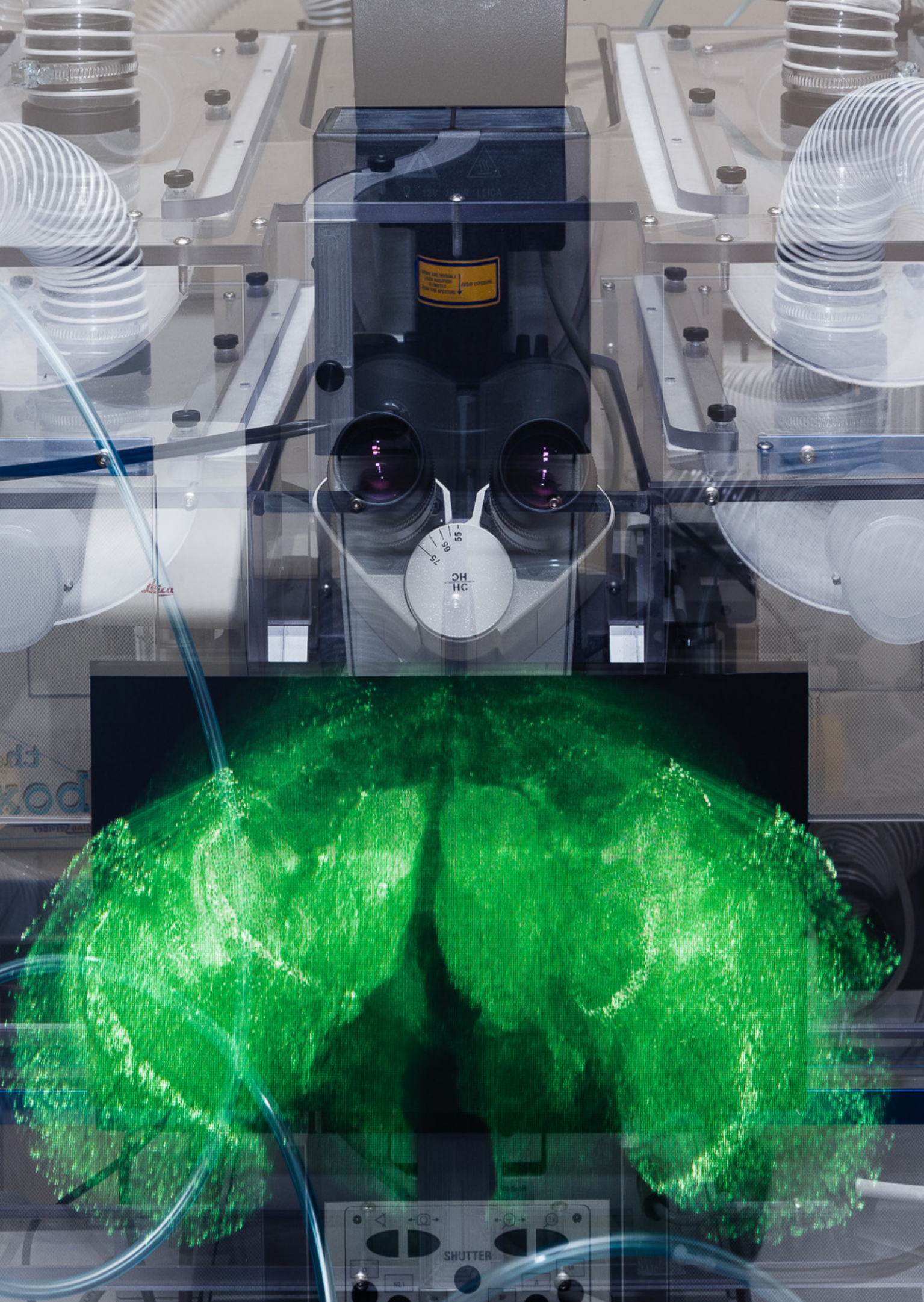


Рис. 2. Спектр $Tm_3Al_5O_{12}$ болометра и результаты подгонки теоретической формой. Показан ожидаемый «аксионный» пик с энергией 8,4 кэВ и числом событий, равным $2S_{lim}$

Дербин А. В., Драчнев И. С., Муратова В. Н., Семенов Д. А., Трушин М. В., Унжаков Е. В. // Письма в ЖЭТФ. 2023. Т. 118. Вып. 3. С. 154–158.


SHUTTER

Биологические исследования

68 Роль факторов сборки хроматина в индуцированном мутагенезе при низких уровнях повреждения ДНК

70 Цельноклеточный микробный консорциум LE-C1, иммобилизованный в криогеле поливинилового спирта, для деполимеризации ксантана

72 Усовершенствованная система детектирования полипептидов

73 Количественные аспекты протеома человека

74 Фуллеренолы предотвращают гибель нейронов и уменьшают окислительный стресс на модели болезни Хантингтона у дрозофилы

75 Криоэлектронная микроскопия экстраклеточных везикул жировой ткани пациентов с ожирением и сахарным диабетом 2-го типа

77 Потенциальные сайты связывания фармакологического шаперона NCGC00241607 с глюкоцереброзидазой и оценка его эффективности на пациент-специфичных клетках при болезни Гоше и Паркинсона

Роль факторов сборки хроматина в индуцированном мутагенезе при низких уровнях повреждения ДНК

Т. А. Евстюхина[1, 2], Е. А. Алексеева[1, 2], В. Т. Пешехонов[1, 2], И. И. Скобелева[1], Д. В. Федоров[1], В. Г. Королев[1, 2]

[1] Отделение молекулярной и радиационной биофизики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ
[2] Курчатовский геномный центр – ПИЯФ

Основная идея этого исследования заключалась в изучении влияния низких доз ультрафиолетового излучения на физиологические процессы, включая процессы репарации, в клетках дрожжей *Saccharomyces cerevisiae*. Известно, что гены домашнего хозяйства дрожжей эволюционно консервативны и имеют высокую степень гомологии с генами млекопитающих/человека. Таким образом, данные, полученные на модели дрожжей, могут быть экстраполированы на такой сложный организм, как организм млекопитающих. Наше исследование имеет фундаментальное значение и поможет лучше определить физиологические эффекты низких доз радиации на клеточном уровне.

Проблема облучения при низких дозах обсуждается в научной литературе уже несколько десятилетий, но невозможно прийти к общепринятому выводу о наличии каких-либо специфических особенностей облучения при низких дозах в отличие от острого облучения. Клетки используют пути эксцизионной репарации и толерантности к повреждениям ДНК без существенной задержки клеточного цикла для устранения низких уровней повреждения ДНК, таких как спонтанные повреждения оснований. Для генотоксических агентов существует порог дозы, ниже которого активация репарационных систем ДНК минимальна. Мы продемонстрировали, что с увеличением количества повреждений ДНК от сверхмалых до высоких *asf1*Δ-специфичный мутагенез катастрофически снижается (рис. 1). Аналогичная зависимость наблюдается для мутантов по генам, кодирующим субъединицы комплекса NuB4. Мы показали, что повышенные уровни дНТФ в начале репликации, вызванные инактивацией гена *SML1*, ответственны за высокий спонтанный репаративный мутагенез. Активность гена *SML1* регулируется киназой Rad53, которая играет ключевую роль в репаративном УФ-мутагенезе при высоких дозах, а также в спонтанном репарационном мутагенезе при сверхнизких уровнях повреждения ДНК.

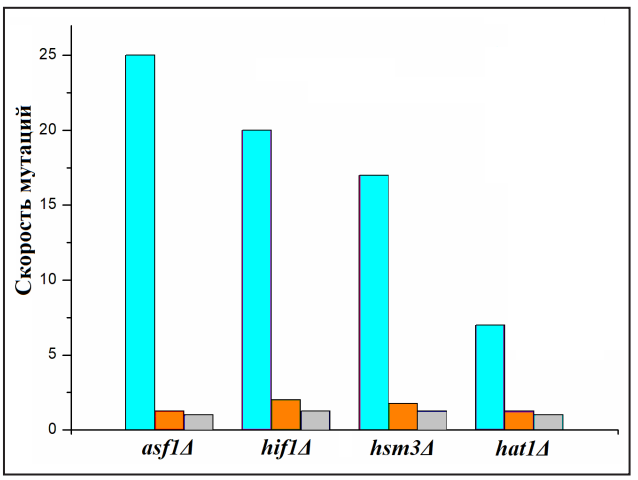


Рис. 1. Степень превышения частоты репарационного мутагенеза у различных мутантов над штаммом дикого типа при ультранизком (*синий*); низком 10 Дж/м^2 (*оранжевый*); высоком 180 Дж/м^2 (*серый*) уровнях повреждения ДНК. Ось *Y* показывает отношение частоты мутаций в мутанте к частоте мутаций в клетках дикого типа

В данном исследовании, используя мутации в генах, участвующих в контроле толерантности к повреждениям ДНК, мы показали, что при сверхнизких уровнях повреждения ДНК роль безошибочной ветви пострепликативной репарации в защите от индуцированного мутагенеза является ключевой. Однако с увеличением уровней повреждения ДНК роль ветви безошибочной репарации быстро снижается. Это снижение

эффективности мутагенеза связано с изменением активности киназы Rad53, вариабельностью активности комплекса RNR и повышением точности безошибочной ветви пострепликативной репарации (рис. 2).

В настоящей работе мы изучили роль шаперона Asf1 и различных субъединиц комплекса NuB4 в спонтанном и индуцированном мутагенезе при разных уровнях повреждения ДНК. Считается, что Hat1p (каталитическая субъединица комплекса NuB4) и связанные с ним факторы действуют выше Asf1p, поскольку было обнаружено, что Asf1p связан с вновь синтезированными гистонами, которые несут паттерн ацетилирования, характерный для действия Hat1p. Кроме того, недавно сообщалось о прямой физической ассоциации между Asf1 и комплексом NuB4, что указывает на возможность того, что комплекс NuB4 может напрямую переносить вновь синтезированные гистоны на Asf1p. Во время репарационной сборки хроматина белок Asf1 образует транзитный комплекс с комплексом NuB4. Анализ спонтанного мутагенеза у двойного мутанта *asf1Δ hat1Δ* показывает, что репарационный спонтанный мутагенез Asf1 полностью зависит от нормального функционирования комплекса NuB4 и в конечном счете от активности киназы Rad53.

Рис. 2. Относительный вклад безошибочной ветви пострепликативной репарации в репаративный мутагенез при различных уровнях повреждения ДНК дикого типа

Цельноклеточный микробный консорциум LE-C1, иммобилизованный в криогеле поливинилового спирта, для деполимеризации ксантана

Е. В. Журишкина[1, 2], Е. В. Энейская[1, 2], С. В. Швецова[1, 2], Л. В. Юрченко[1], К. С. Бобров[1, 2], А. А. Кульминская[1, 2]

[1] Отделение молекулярной и радиационной биофизики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ
[2] Курчатовский геномный центр – ПИЯФ

Ксантан – высокостабильный полисахарид с очень высокой молекулярной массой, продуцируемый бактериями *Xanthomonas campestris*, используемый как загуститель и стабилизатор в различных отраслях промышленности – от пищевой до нефтедобывающей. Результативное использование производных ксантана требует эффективных способов его деполимеризации. В отличие от известных химических подходов биологические методы считаются более экологичными и менее энергозатратными. Ввиду особенностей его химической структуры ксантан устойчив к биоразложению. Большинство микроорганизмов, за редким исключением, не способны деполимеризовать ксантан. Также очевидно, что один микроорганизм не всегда способен осуществлять исчерпывающую деградацию сложной молекулы ксантана. Решением может стать консорциум микроорганизмов, совместными усилиями разлагающих ксантан.

В результате скрининга ксантандеградирующих микроорганизмов среди микробных культур лабораторной коллекции было обнаружено бактериальное сообщество, названное впоследствии LE-C1, способное снижать вязкость ксантановой камеди (рис. 1). С учетом результатов морфологического и генетического анализов бактериальные штаммы KG5 и KG3 были идентифицированы как *Paenibacillus phytohabitans* KG5 и *Cellulosimicrobium cellulans* KG3 соответственно. Была подробно исследована ксантандеградирующая активность каждого из изолятов, а также консорциума LE-C1 в целом. Значения удельных активностей ксантаназы и вспомогательных ферментов, которые могут участвовать в деполимеризации ксантана, были следующими:

- ксантаназа – 19,6 ± 0,6 ед./г;
- β-глюкозидаза – 3,4 ± 0,1 ед./г;
- α-маннозидаза – 68,0 ± 2,0 ед./г;
- β-маннозидаза – 0,40 ± 0,01 ед./г;
- эндоглюканаза – 4,0 ± 0,1 ед./г;
- ксантанлиаза – 2,20 ± 0,07 ед./мг.

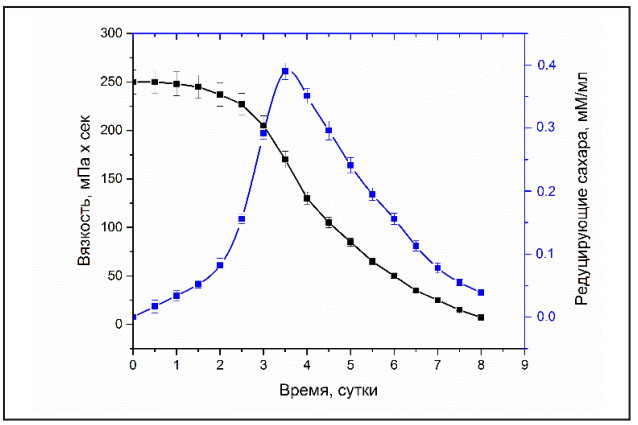


Рис. 1. Динамика деполимеризации ксантана из микробного препарата с наибольшим потенциалом при росте на жидкой среде, содержащей ксантан

Для повышения эффективности биодеградации ксантана был проведен сравнительный анализ трех биокатализаторов, созданных путем иммобилизации цельных клеток микробного консорциума LE-C1. Для каждого процесса осуществляется индивидуальный выбор матрицы, необходимых условий иммобилизации, т. к. следует обеспечить максимальную длительность процесса и многократное использование биокатализатора. Было проверено несколько различных носителей для иммобилизации. Результаты были различны: на некоторых носителях, например цеолите или с использованием альгината, иммобилизованные бактериальные клетки смогли быть активны

лишь от двух до шести раз. Наиболее эффективным носителем оказался криогель поливинилового спирта – ПВС (рис. 2). Полученный регенерирующийся биокатализатор оказался способен осуществлять полную деполимеризацию ксантана в течение каждого из 40 циклов без потери активности и деградации матрицы. Насколько нам известно, заключенный в матрицу поливинилового спирта консорциум LE-C1 – первый высокостабильный регенерируемый биокатализатор для простого и быстрого использования с целью деполимеризации или модификации сложного полисахарида ксантана.

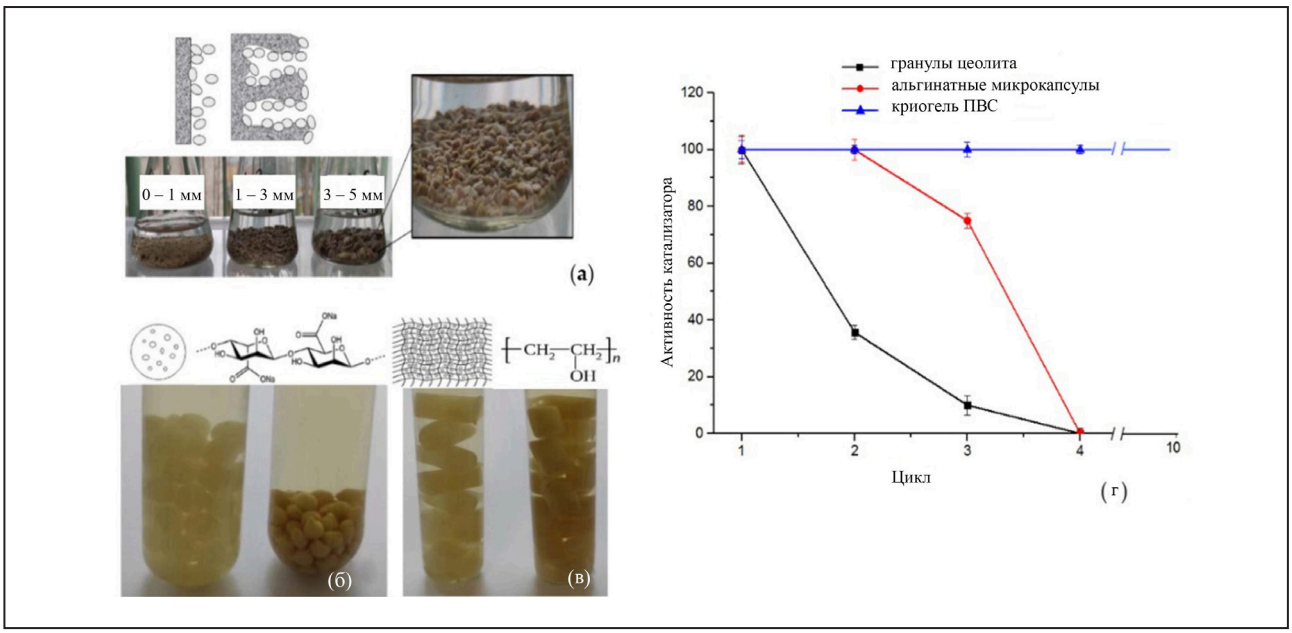


Рис. 2. Иммобилизация клеток консорциума LE-C1 тремя методами: *а* – адсорбция на цеолите; *б* – включение в альгинатные шарики; *в* – цилиндры из криогеля ПВС с клетками; *г* – количество рабочих циклов консорциума LE-C1, иммобилизованного адсорбцией на гранулах цеолита размером 0–1 мм (*черная линия*), в альгинатных микрокапсулах (*красная линия*) и в криогеле ПВС (*синяя линия*). Активность катализатора в первом цикле принимали за 100 %

Zhurishkina E.V., Eneyskaya E.V., Shvetsova S.V., Yurchenko L.V., Bobrov K.S., Kulminskaya A.A. // Catalysts. 2023. V. 13. Iss. 9. P. 1249.

Усовершенствованная система детектирования полипептидов

М. С. Биджиева, П. С. Касацкий, О. А. Толичева, Е. В. Полесскова, А. Л. Коневега

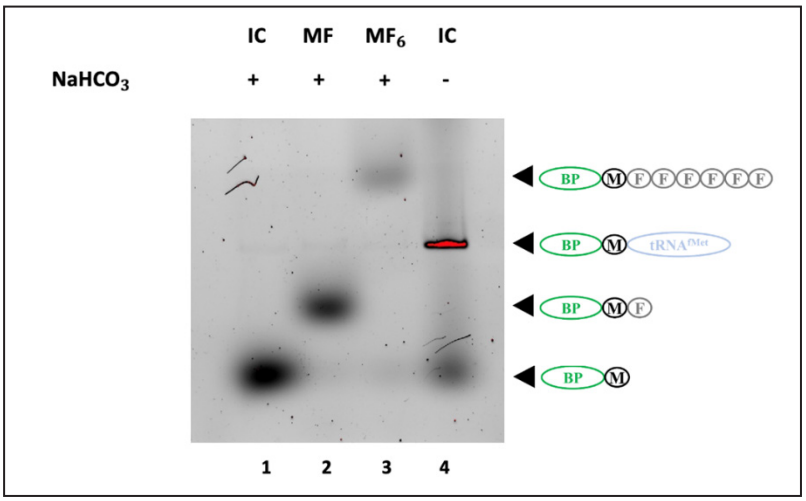
Отделение молекулярной и радиационной биофизики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Биосинтез белка, или трансляция, представляет собой сложный многостадийный процесс, изучение которого имеет фундаментальное и практическое значение. Существует ряд методов для анализа основных этапов трансляции. Однако многие из них имеют ограничения и недостатки, поэтому актуальной задачей является оптимизация существующих и разработка новых методов исследования биосинтеза белка.

Метод радиоактивного мечения, рутинно использовавшийся для анализа биосинтеза белка и механизмов действия ингибиторов трансляции на протяжении десятилетий, постепенно вытесняется использованием стабильных флуорофоров.

В данной работе представлен простой и быстрый способ анализа поэтапного синтеза полипептида с использованием флуорофора BODIPY при помощи электрофоретического разделения пептидов в полиакриламидном геле в денатурирующих условиях (рис.). Использование BODIPY-меченой инициаторной метионил-тРНК в реконструированной *in vitro* системе трансляции позволило нам визуализировать пошаговый синтез пептидов. Адекватность и эффективность работы системы были подтверждены контрольными экспериментами с использованием радиоактивных меток и ингибиторов биосинтеза белка с известными механизмами действия.

Описанный метод позволяет анализировать различные этапы синтеза белка, а также изучать механизмы работы ингибиторов трансляции. Уникальной особенностью разработанной системы является ее сверхвысокая чувствительность с порогом детектирования в области 0,1 пмоль полипептида. Среди остальных преимуществ метода стоит отметить простоту использования, короткую длительность эксперимента, дешевизну и экологичность.



Визуализация продуктов трансляции после разделения в полиакриламидном геле:
дорожка 1 – Bodipy-Met;
дорожка 2 – Bodipy-Met-Phe;
дорожка 3 – Bodipy-Met-Phe6;
дорожка 4 – Bodipy-Met-tRNAfMet и Bodipy-Met

Marina V., Bidzhieva M., ..., Kasatsky P., Tolicheva O., Paleskava A., ..., Konevega A. et al. // RNA. 2024. V. 30. P. 298–307.

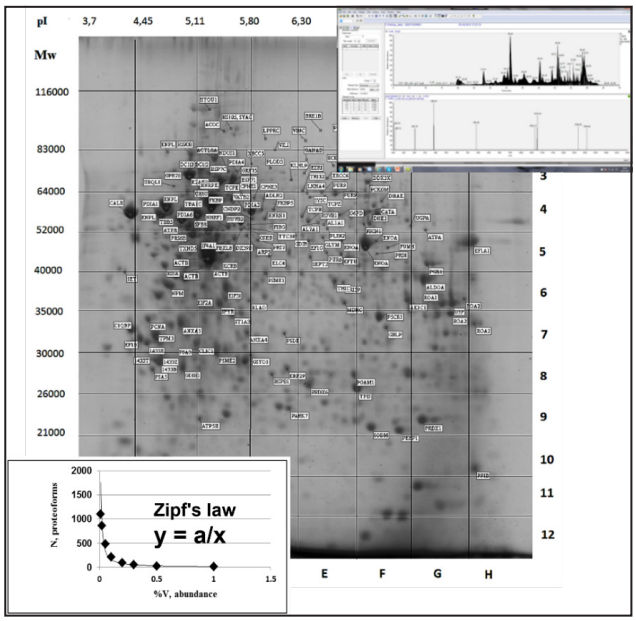
Количественные аспекты протеома человека

С. Н. Нарыжный

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

Число и идентичность белков и протеоформ, представленных в одной клетке человека (клеточном протеоме), являются фундаментальным биологическим вопросом. Ответ можно найти с помощью сложных и чувствительных методов протеомики, включая передовую масс-спектрометрию (МС) в сочетании с разделением с помощью гель-электрофореза и хроматографии. До сих пор биоинформатика и экспериментальные подходы применялись для количественной оценки сложности человеческого протеома.

В данном обзоре проанализирована количественная информация, полученная в результате нескольких крупномасштабных панорамных экспериментов, где для оценки клеточного протеома использовалась МС высокого разрешения в сочетании с жидкостной хроматографией или двумерным гель-электрофорезом – 2DE (рис.). Важно то, что, хотя все эти эксперименты проводились в разных лабораториях с использованием различных оборудования и алгоритмов расчета, основной вывод о распределении компонентов протеома (белков или протеоформ) был практически одинаковым для всех тканей или клеток человека. Это распределение подчиняется закону Ципфа и имеет формулу $N = A/x$, где N – количество протеоформ, A – коэффициент и x – предел обнаружения протеоформ по численности.



Графическое представление множества данных (2DE-электрофореза и масс-спектрометрии), использованных для построения формулы распределения компонентов протеома (белков или протеоформ) внутри клеток человека

Naryzhny S. // Int. J. Mol. Sci. 2023. V. 24. No. 10. P. 8524.

Фуллеренолы предотвращают гибель нейронов и уменьшают окислительный стресс на модели болезни Хантингтона у дрозофилы

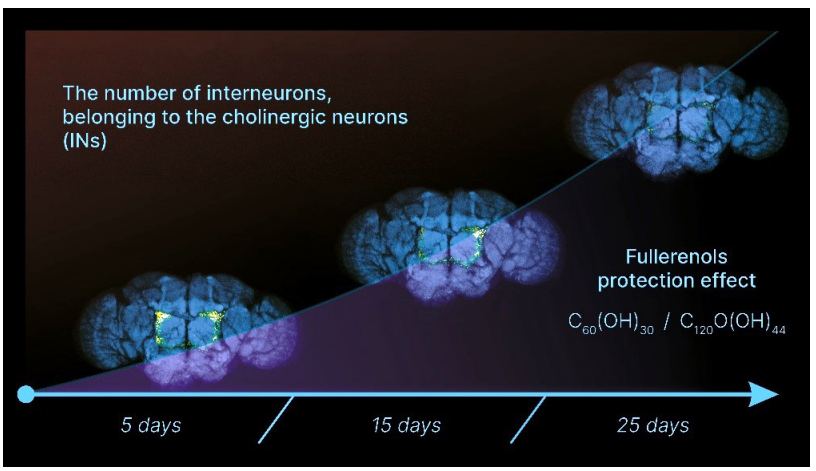
О. И. Большакова, А. А. Борисенкова, И. М. Голомидов, А. Е. Комиссаров, А. Д. Слободина, Е. В. Рябова, И. С. Рябоконь, Е. М. Латыпова, Е. Э. Слепнева, С. В. Саранцева

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

Болезнь Хантингтона (БГ) – одно из нейродегенеративных заболеваний человека, для которого не существует эффективного лечения. Одним из факторов патогенеза БГ является окислительный стресс (ОС). Его негативная роль описана как у пациентов с БГ, так и в экспериментальных моделях. Поэтому изучение роли ОС и поиск новых эффективных антиоксидантов является ключевым в разработке комплексного лечения БГ. Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено, что фуллерены и их производные являются мощными антиоксидантами, т. е. могут быть основой нейропротекторных фармпрепаратов, однако их необходимо всесторонне исследовать на модельных организмах.

В данной работе были использованы фуллеренолы $C_{60}(OH)_{30}$ и $C_{120}O(OH)_{44}$, синтезированные в НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ. Была определена их антиоксидантная активность и на культуре клеток проверена токсичность. Затем на трансгенной модели БГ на дрозофиле проанализирована их нейропротекторная активность. У мух с экспрессией в нервных клетках патогенного белка хантингтина с удлиненным числом полиглутаминовых повторов оценивали продолжительность жизни, поведение, уровень активных форм кислорода в мозге и возрастную нейродегенерацию, как общую, так и в отдельных группах нейронов.

Показано, что добавление в корм животных молекул гидроксилированного фуллерена C_{60} и димерного оксида $C_{120}O$ в концентрациях 0,2 мг/мл и 0,01 мг/мл соответственно снижает уровень ОС и нейродегенеративные процессы в мозге мух. Наибольший эффект наблюдается к 15-му дню жизни и снижается к 25-му дню, когда уровень активных форм кислорода в мозге мух достигает максимальных значений. При этом не было обнаружено изменений в продолжительности жизни и поведении животных. Нейропротекторная активность фуллеренолов на модели БГ была продемонстрирована впервые.



Графическое изображение зависимости гибели холинергических нейронов в мозге дрозофилы от возраста: *верхняя часть* рисунка – контроль; *нижняя* – после воздействия фуллеренов

Bolshakova O.I., Borisenkova A.A., Golomidov I.M., Komissarov A.E., Slobodina A.D., Ryabova E.V., Ryabokon I.S., Latypova E.M., Slepneva E.E., Sarantseva S.V. // Cells. 2023. V. 12. Iss. 1. P. 170.

Криоэлектронная микроскопия экстраклеточных везикул жировой ткани пациентов с ожирением и сахарным диабетом 2-го типа

В. В. Мирошникова[1, 2], К. В. Драчева[1, 2], Р. А. Камышинский[3], Е. В. Ястремский[3], Л. А. Гараева[1, 3], И. А. Побожева[1, 2], С. Б. Ланда[1, 2], К. А. Анисимова[2], С. Г. Баландов[2], З. М. Хамид[2], Д. И. Василевский[2], С. Н. Пчелина[1, 2], А. Л. Коневега[1, 3], Т. А. Штам[1, 3]

[1] *Отделение молекулярной и радиационной биофизики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ*
[2] *Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. акад. И. П. Павлова*
[3] *НИЦ «Курчатовский институт»*

В настоящем исследовании впервые в мире была выполнена криоэлектронная микроскопия экстраклеточных везикул (ЭВ, экзосомы) жировой ткани (ЖТ) человека. ЭВ – это сферические частицы с внешним липидным бислоем, которые осуществляют межклеточную коммуникацию посредством транспорта белков, липидов, мРНК и микроРНК и играют важную роль в различных физиологических и патологических процессах. Последние данные свидетельствует о том, что ЭВ ЖТ участвуют в регуляции энергетического метаболизма, чувствительности к инсулину и воспаления. Поэтому изменение количества и морфологии ЭВ при ожирении, секретируемых ЖТ, может быть ассоциировано с метаболическими нарушениями и развитием сопутствующих патологий.

Цель работы – изучение морфологии ЭВ подкожной и висцеральной жировой ткани (ПЖТ, ВЖТ) при ожирении и сахарном диабете 2-го типа (СД2) с помощью криоэлектронной микроскопии.

Образцы ПЖТ и ВЖТ были получены от лиц с ожирением, из них:

- с СД2 – семь человек (средний возраст – 47 ± 9 лет; индекс массы тела (ИМТ) – 47,5 ± 7,2; вес пациентов – от 108 до 173 кг);
- без СД2 – шесть человек (средний возраст – 39 ± 11 лет; ИМТ – 40,9 ± 5,5; вес пациентов – от 100 до 145 кг);

от девяти лиц контрольной группы без ожирения (средний возраст – 41 ± 8 лет; ИМТ – 24,0 ± 3,0; вес – 60–95 кг).

ЭВ были получены при культивировании эксплантов ПЖТ и ВЖТ *ex vivo* в течение 12 ч и последующем ультрацентрифугировании пулированных образцов культуральной среды. Концентрацию частиц определяли методом анализа траектории наночастиц на анализаторе NTA NanoSight® LM10 (Malvern Instruments). ЭВ были визуализированы с помощью криоэлектронного микроскопа Titan Krios 60–300 TEM/STEM (FEI, США). Подсчет частиц был произведен в программе ImageJ 1.53k. Статистическая обработка результатов выполнена с помощью программы SPSS 17.0.

Всего было проанализировано

– для ПЖТ:

- 334 ЭВ размером от 16 до 482 нм у пациентов с СД2,
- 434 ЭВ размером от 19 до 431 нм у пациентов без СД2,
- 1 014 ЭВ от 18 до 339 нм у лиц без ожирения;

– для ВЖТ:

- 532 ЭВ размером от 25 до 446 нм у пациентов с СД2,
- 494 ЭВ размером от 25 до 449 нм у пациентов без СД2,
- 581 ЭВ размером от 18 до 342 нм.

Среди ЭВ преобладали одиночные везикулы сферической формы (до 85 % для ПЖТ, до 66 % для ВЖТ), однако наблюдали ЭВ с двойной мембраной – «двойные» ЭВ (одна в другой), а также многослойные частицы (рис. 1). Доля частиц с внутренними мембранными структурами была выше среди ЭВ ВЖТ по сравнению с ПЖТ, p = 0,000 (рис. 2). Если рассмотреть ЭВ ВЖТ, то можно отметить, что для пациентов с ожире-

нием (с/без СД2) характерно увеличение доли везикул с внутренними мембранными структурами по сравнению с лицами без ожирения.

Установлено, что по размеру одиночные и двойные ЭВ ВЖТ были больше, чем ЭВ ПЖТ у пациентов с СД2 и у пациентов с ожирением без СД2 ($p < 0,01$). Например, средний размер одиночных везикул пациентов с СД2 составил 52 и 93 нм для ПЖТ и ВЖТ соответственно. У пациентов с ожирением без СД2 размеры одиночных везикул ПЖТ и ВЖТ составили 64 и 89 нм. Для контрольной группы такой закономерности не отмечено, размер везикул ПЖТ и ВЖТ не различался.

Таким образом, для ЭВ, секретируемых ВЖТ, при ожирении характерны увеличенный размер частиц и увеличение доли везикул с внутренними мембранными структурами в сравнении с везикулами, секретируемыми ПЖТ. При ожирении наблюдается также повышение секреции ВЖТ везикул с внутренними мембранными структурами у пациентов с ожирением (с/без СД2) по сравнению с контрольной группой. В целом наши данные свидетельствуют об измененном биогенезе ЭВ при ожирении.

Культивирование ЖТ и подготовка образцов ЭВ были выполнены в рамках проекта РФФИ № 20-015-00502. Эксперименты по криоэлектронной микроскопии ЭВ поддержаны грантом РНФ № 19-74-20146.

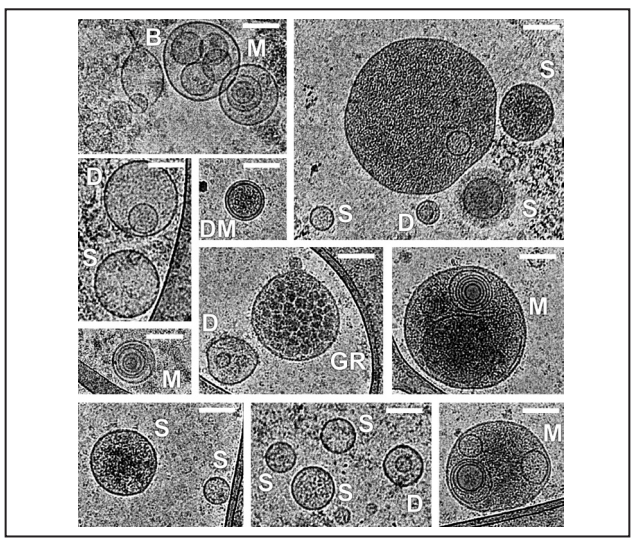


Рис. 1. Репрезентативные микрофотографии экстраклеточных везикул, секретируемых подкожной и висцеральной жировой тканью пациентов с ожирением. Наблюдаемые везикулы: S – одиночные; D – двойные; DM – двумембранные; M – многослойные; B – везикулы с поврежденной мембраной; GR – гранулированные. Масштаб – 100 нм

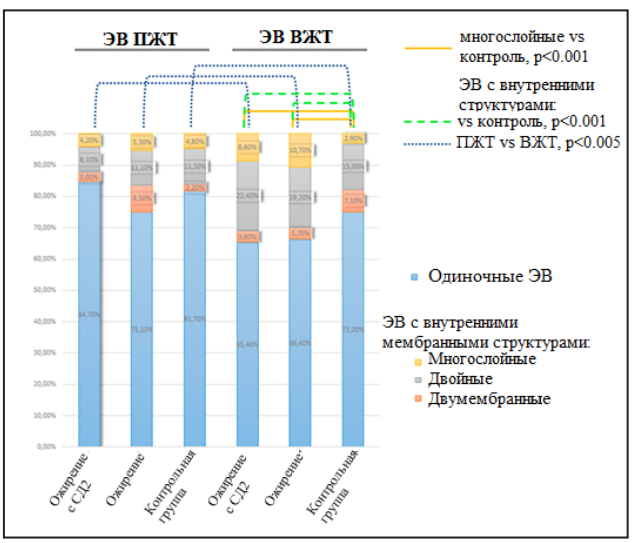


Рис. 2. Диаграмма распределения основных типов эсктраклеточных везикул жировой ткани:
ЭВ – экстраклеточные везикулы; ПЖТ – подкожная жировая ткань; ВЖТ – висцеральная жировая ткань; СД2 – сахарный диабет 2-го типа

Miroshnikova V.V., Dracheva K.V., Kamyshinsky R.A., Yastremsky E.V., Garaeva L.A., Pobozheva I.A., Landa S.B., Anisimova K.A., Balandov S.G., Hamid Z.M., Vasilevsky D.I., Pchelina S.N., Konevega A.L., Shtam T.A. // PLoS One. 2023. No. 18. V. 2. P. 0279652.

Потенциальные сайты связывания фармакологического шаперона NCGC00241607 с глюкоцереброзидазой и оценка его эффективности на пациент-специфичных клетках при болезни Гоше и Паркинсона

А. Э. Копытова[1, 2], Г. Н. Рычков[1, 3], А. А. Чеблоков[1], Е. В. Григорьева[4, 5], М. А. Николаев[1, 2], Е. С. Яркова[4], Д. А. Сорогина[4], Ф. М. Ибатуллин[1], Г. В. Байдакова[6], А. Д. Изюмченко[1, 2], Д. А. Богданова[1], В. М. Бойцов[7], А. В. Рыбаков[8], И. В. Милюхина[8], В. А. Безруких[9], Г. Н. Салогуб[9], Е. Ю. Захарова[6], С. Н. Пчелина[1, 2], А. К. Емельянов[1, 2]

[1] *Отделение молекулярной и радиационной биофизики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ*
[2] *Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. акад. И. П. Павлова*
[3] *Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого*
[4] *Институт цитологии и генетики СО РАН*
[5] *Национальный медицинский исследовательский центр им. акад. Е. Н. Мешалкина*
[6] *Медико-генетический научный центр им. акад. Н. П. Бочкова*
[7] *Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет РАН*
[8] *Институт мозга человека им. Н. П. Бехтеревой РАН*
[9] *Национальный медицинский исследовательский центр им. В. А. Алмазова*

Мутации в гене *GBA1* приводят к редкому аутосомно-рецессивному заболеванию – болезни Гоше (БГ) и являются фактором высокого риска болезни Паркинсона (БП): повышают риск развития БП до 8–10 раз. Ген *GBA1* кодирует лизосомный фермент глюкоцереброзидазу (GCase), который расщепляет лизосфинголипиды, а именно глюкозилцереброзид (GlcCer), до глюкозы и церамида. Общность патогенеза заболеваний человека, связанных с дисфункцией GCase, а именно БГ и GBA-ассоциированной БП (GBA-БП), позволяет говорить о том, что разрабатываемые таргетные препараты могут быть эффективны при обеих нозологиях.

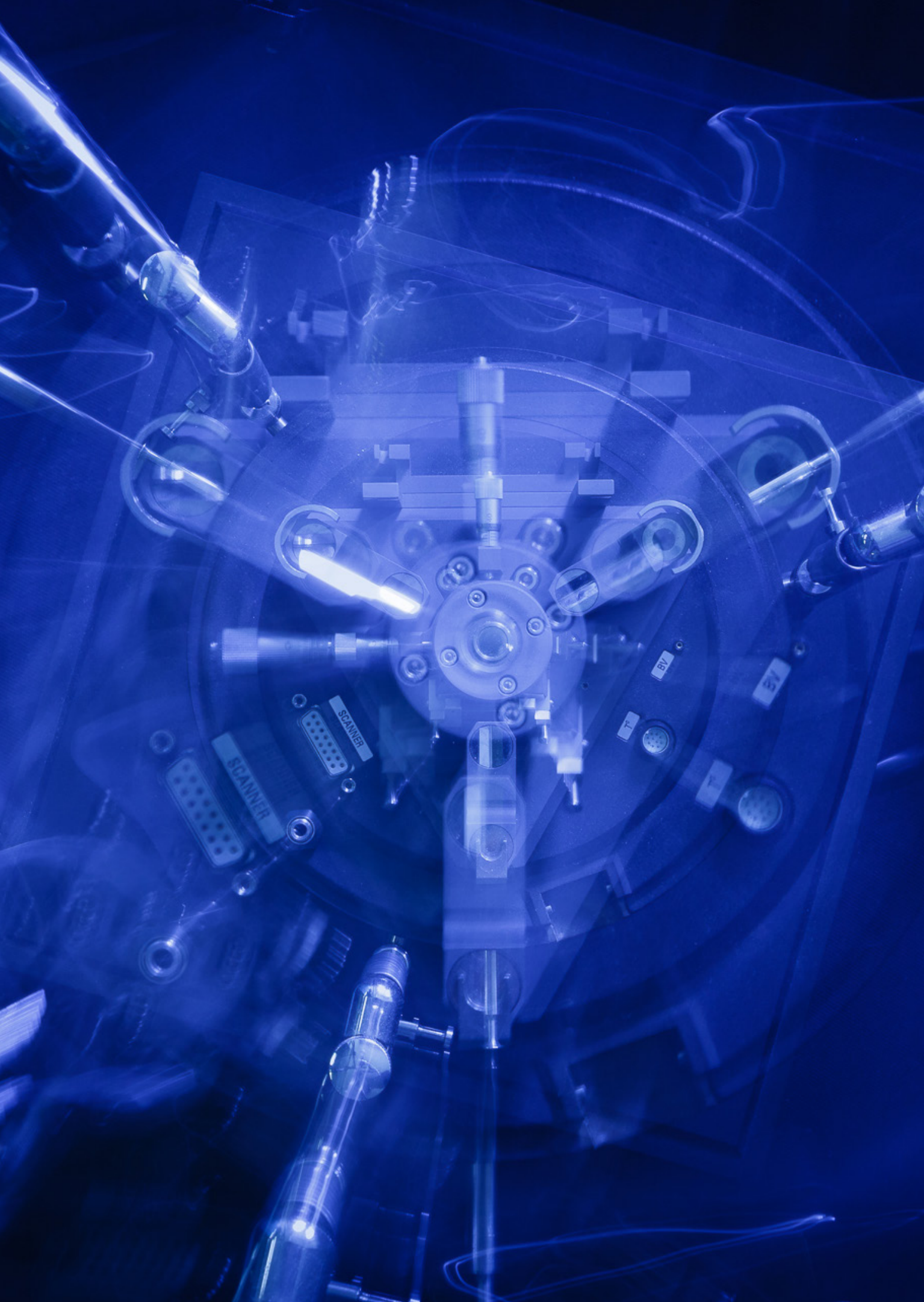
В нашем исследовании по разработке подходов к созданию новых лекарственных препаратов, действие которых направлено на повышение ферментативной активности GCase, был использован комплексный подход, сочетающий применение методов молекулярного моделирования взаимодействий химических соединений с белками-мишенями, химического синтеза соединений и биологических методов исследования действия химических соединений на пациент-специфичных клетках (первичная культура макрофагов и дофаминергические нейроны (ДА), дифференцированные из индуцированных плюрипотентных стволовых клеток (ИПСК)).

С использованием методов компьютерного моделирования *in silico* был описан механизм действия соединения NCGC00241607, показано, что данное соединение связывается с аллостерическими сайтами на поверхности GCase и, соответственно, может выступать в качестве аллостерического фармакологического шаперона GCase. Мы оценили влияние NCGC00241607 на активность GCase и относительный уровень белка, концентрацию субстрата в макрофагах пациентов с БГ и GBA-БП, а также в ДА-нейронах, полученных из ИПСК пациента с GBA-БП.

Наши результаты подтвердили возможность использования соединения NCGC00241607 в качестве фармакологического шаперона GCase аллостерического типа и показали его эффективность на пациент-специфичных клетках.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 22-25-00721.

Kopytova A.E., Rychkov G.N., Cheblokov A.A., Grigor'eva E.V., Nikolaev M.A., Yarkova E.S., Sorogina D.A., Ibatullin F.M., Baydakova G.V., Izyumchenko A.D. et al. // Int. J. Mol. Sci. 2023. V. 24. P. 9105.


SCANNER
SCANNER
BV

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

80 Метод верификации дозно-анатомических планов стереотаксической протонной терапии на базе ускорителя СЦ-1000 с помощью радиохромных пленок

82 Радиосенсибилизирующее действие наночастиц оксида железа в декстрановой оболочке на клетки злокачественной глиомы

83 Влияние протонного, тормозного и вакуумного ультрафиолетового излучений на микрогрибы аскомицеты и базидиомицеты

Метод верификации дозно-анатомических планов стереотаксической протонной терапии на базе ускорителя СЦ-1000 с помощью радиохромных пленок

Ф. А. Пак, Л. Г. Ваганян, Н. А. Кузора, А. И. Халиков, В. Н. Вербенко

Отдел медицинской радиологии НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Проведение терапии ионизирующим излучением всегда сопровождается средствами обеспечения гарантии безопасности и качества. К таким средствам относится система верификации, которая позволяет провести проверку плана лечения без риска для пациента.

В качестве системы верификации в протонной стереотаксической терапии на базе СЦ-1000 используются термолюминесцентные дозиметры, основной принцип действия которых основан на снятии светового потока с детекторов, пропорционального поглощенной энергии. Они обеспечивают приемлемое пространственное разрешение и независимость от вида и энергии излучения. Несмотря на все преимущества используемой системы верификации, гарантия качества подразумевает рассмотрение всех альтернативных решений для повышения эффективности и точности. Например, радиохромные пленки, особенность которых заключается в слабой зависимости от вида излучения и энергии, так же как у термолюминесцентных детекторов, обеспечивают высокое пространственное разрешение и быструю обработку данных по сравнению с термолюминесцентными детекторами. Радиохромные пленки активно используются в клинической практике фотонной лучевой терапии, но до настоящего времени реакция пленок на облучение протонами с энергией 1 000 МэВ не изучалась.

Целью данного исследования стала проверка возможности применения радиохромных пленок для верификации дозно-анатомических планов лечения вместо ранее применяемых термолюминесцентных детекторов.

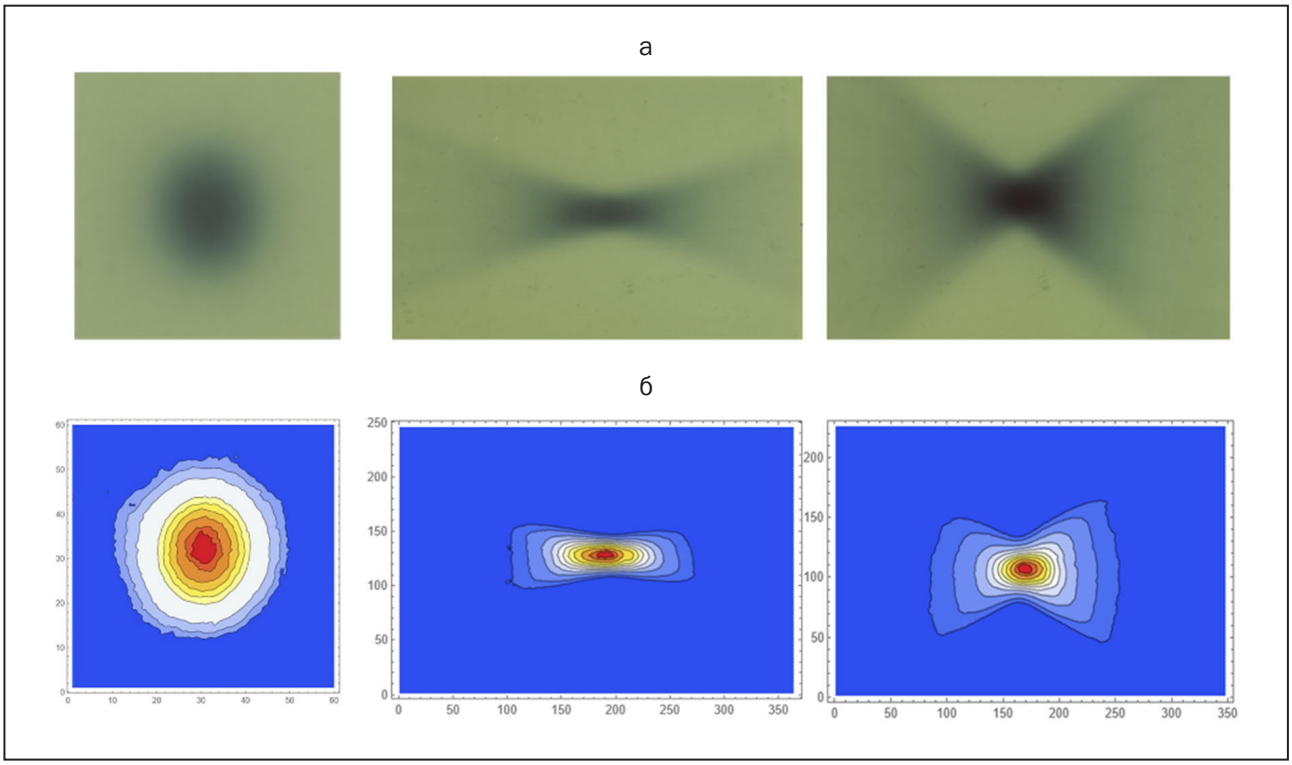
В качестве экспериментального образца была выбрана радиохромная пленка Gafchromic EBT2 от компании Ashland. Всего было проведено три эксперимента при различных параметрах пучка и дозах облучения.

В первом эксперименте рассматривалась общая реакции пленок на облучение протонным пучком с энергией 1 000 МэВ. Также исследовалась возможность проведения калибровки радиохромных пленок на данном пучке. Размер пучка составлял 10 × 10 мм (рис.). Исследуемый диапазон доз составлял от 1 до 40 Гр и основывался на технической документации, прилагаемой к самим пленкам.

Во втором эксперименте рассматривались возможность облучения при меньших размерах пучка и получение первого дозного распределения при стандартном режиме работы установки для перемещения пациента. При этом диапазон доз был ограничен по верхней границе до 35 Гр из-за результатов первого эксперимента.

В третьем эксперименте уже рассматривались разные режимы облучения, приближенные к используемым при лечении пациентов.

Результаты экспериментов показали, что облучение протонным пучком с энергией 1 000 МэВ не вызывает аномальных повреждений или других эффектов. Кроме того, были выведены и другие особенности в виде точки насыщения при граничной дозе облучения ниже 40 Гр. Результаты второго эксперимента показали, что радиохромные пленки можно использовать и при облучении стандартным размером пучка 6 × 6 мм. Также было доказано ограничение допустимого диапазона доз меньше 40 Гр. При этом было получено первое дозное распределение, которое можно сравнивать с распределением, наблюдаемым при моделировании в системе планирования. По данным второго эксперимента был разработан алгоритм обработки изображений пленок. В третьем эксперименте нами были получены различные дозные распределения, которые приближены к реальным режимам лечения.



Изображения радиохромных пленок: *а* – отсканированных после облучения; *б* – после цифровой обработки с указанием границ раздела дозного распределения

Таким образом, радиохромные пленки можно использовать для верификации в протонной стереотаксической терапии на базе СЦ-1000 в диапазоне доз от 1 до 35 Гр.

Пак Ф. А., Ваганян Л. Г., Халиков А. И. // Сб. аннот. XVII Курчатовской междисциплинарн. молодежн. научн. школы. М., 2023. С. 232.

Радиосенсибилизирующее действие наночастиц оксида железа в декстрановой оболочке на клетки злокачественной глиомы

В. А. Рыжов[1], А. В. Волницкий[1], Д. А. Амерканов[2, 3], Ф. А. Пак[3, 4], А. М. Голубев[5], А. В. Арутюнян[1], А. С. Спицына[1], В. С. Бурдаков[1], Д. В. Лебедев[1, 3], А. Л. Коневега[1, 3, 6], Н. Х. Чан[6], Т. А. Штам[1, 3], Я. Ю. Марченко[1]

[1] *Отделение молекулярной и радиационной биофизики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ*
[2] *Отделение перспективных разработок НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ*
[3] *НИЦ «Курчатовский институт»*
[4] *Отдел медицинской радиологии НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ*
[5] *Отделение нейтронных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ*
[6] *Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого*

В данном исследовании нами был изучен радиосенсибилизирующий потенциал биосовместимых наночастиц оксида железа в декстрановой оболочке на линиях клеток глиом A-172 и Gl-Tr *in vitro*. Глиома является наиболее распространенной злокачественной первичной опухолью головного мозга, для ее лечения в послеоперационный период применяют лучевую терапию. Увеличение эффективности дозы возможно при применении радиосенсибилизаторов, в качестве которых могут быть использованы наночастицы оксида железа.

В нашем исследовании клетки A-172 и GL-Tr, предварительно инкубированные с наночастицами в течение 24 ч, подвергали воздействию рентгеновского излучения с энергией 35 кэВ, γ-излучения (1,2 МэВ) или облучали протонами (200 МэВ) на пике Брэгга в диапазоне доз 0,5–6 Гр. Жизнеспособность клеток после облучения оценивали с помощью метода AlamarBlue и последующего окрашивания выживших клеток кристаллическим фиолетовым. Значительный эффект радиосенсибилизации наночастицами наблюдался в обеих клеточных линиях при рентгеновском облучении. В данном диапазоне энергий основной вклад в генерацию вторичных электронов на Fe_3O_4-ядре наночастиц дает фотоэффект. В γ-диапазоне слабое радиосенсибилизирующее действие за счет Комптон-эффекта было обнаружено только в линии Gl-Tr. Облучение протонами на пике Брэгга не приводило к статистически значимому эффекту сенсибилизации.

Совместная инкубация клеток с наночастицами приводила лишь к незначительному увеличению уровня активных форм кислорода (около 10 %) после рентгеновского облучения. Результаты позволяют предположить, что радиосенсибилизирующий эффект, вызванный поглощенными опухолевыми клетками наночастицами, вероятно, связан не с активными формами кислорода, а со вторичными электронами, генерируемыми Fe_3O_4-ядрами наночастиц при облучении.

Работа выполнена при поддержке РНФ, грант № 23-25-00273.

Tran N., Ryzhov V., Volnitskiy A., Amerkanov D., Pack F., Golubev A., Arutyunyan A., Spitsyna A., Burdakov V., Lebedev D., Konevega A., Shtam T., Marchenko Ya. // Int. J. Mol. Sci. 2023. V. 24. Iss. 20. P. 15150.

Влияние протонного, тормозного и вакуумного ультрафиолетового излучений на микрогрибы аскомицеты и базидиомицеты

Л. Г. Ваганян[1], А. М. Сницер[1], Ф. А. Пак[1], А. И. Халиков[1], Н. А. Кузора[1], А. А. Васильев[1], В. Н. Вербенко[1], И. Ю. Кирцидели[2], Г. Н. Зверева[3]

[1] Отдел медицинской радиологии НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ
[2] Ботанический институт им. В. Л. Комарова РАН
[3] Государственный оптический институт им. С. И. Вавилова

Грибы представляют собой группу эукариот с высокой радиационной устойчивостью. Эффекты радиационного облучения и механизмы, участвующие в защите клеток, относительно широко распространены и предсказуемы у всех эукариот. Однако устойчивость к радиации может широко варьироваться в зависимости от генетического фона, стадии развития, метаболизма и окружающей среды, что позволяет скорректировать возможность выживания после облучения на основе либо реакции организма, либо его физиологического состояния до облучения. Эта гипотеза предполагает, что ущерб, вызванный радиацией, вероятно, можно предотвратить. Многие микроорганизмы конститутивно синтезируют пигменты, такие как меланин и каротин. Известно, что эти пигменты могут защищать грибы от окислителей, экстремальных температур, ультрафиолетового излучения, химиотерапевтических препаратов и бактерицидных пептидов. Однако фактический механизм взаимодействия пигментов с ионизирующим излучением остается неисследованным.

Мы сравнили способность пяти микрогрибов, изолированных из экстремальных условий полярных широт и представляющих разнообразные аскомицеты и базидиомицеты, противостоять воздействию трех экологически значимых факторов: УФ-С-лучей, быстрых электронов и протонов.

В экспериментах использовали штаммы микрогрибов *Rhodotorula colostri*, *Cladosporium herbarum*, *Pseudogymnoascus pannorum*, *Exophiala xenobiotica* и *Aureobasidium pullulans* (вегетативные и спорообразующие клетки) в экспоненциальной и стационарной фазах развития. *C. herbarum* и *E. xenobiotica* содержали пигмент меланин, а *R. colostri* – каротин. В качестве источников вакуумного ультрафиолетового излучения (166–182 нм) использовались эксимерные лампы (Государственный оптический институт им. С. И. Вавилова) с мощностью излучения 1,8 мВт/см^2. В качестве источника фотонов применялся линейный ускоритель электронов Elekta Compact (Санкт-Петербург), индуцирующий тормозное излучение с энергией 6 МэВ (мощность дозы – 3,50 Гр/мин). Источником протонов являлся ускоритель СЦ-1000 (НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ) с энергией пучка 1 ГэВ (мощность дозы – 5 Гр/мин). Максимальная доза облучения фотонами составила 200 Гр, а протонами – 500 Гр.

В результате исследования для всех грибов и при всех видах излучения наблюдались активация процесса прорастания спор и конидий, подавление этого процесса, повреждение мембран клеток и деградация ДНК. При средних и больших дозах излучение вызывало временное торможение образования ростовых трубок, уменьшало длину зародышевых трубок. Частичное разрушение ДНК начиналось со средних доз. Различимые изменения поверхности пропагул визуально могли быть определены после больших доз. Наибольшую устойчивость к ионизирующему излучению показал меланинсодержащий штамм *E. xenobiotica*.

1. *Зверева Г. Н., Кирцидели И. Ю., Кузора Н. А., Ваганян Л. Г., Халиков А. И.* // Pulsed Lasers and Laser Applications (AMPL-2023): Mater. of the 16th Int. Conf. Tomsk, 2023. P. 77–78.
2. *Kirtsedeli I.Yu., Zvereva G.N., Vasilev A.A. et al.* // Biogenic—Abiogenic Interactions in Natural and Anthropogenic Systems 2022 (SPEES). 2023. https://doi.org/10.1007/978-3-031-40470-2_32

Физика ядерных реакторов и ускорителей

86 Разработка проекта, изготовление и поставка головного эксплуатационного комплекта тепловыделяющих сборок ПИК-2

88 Организация химического контроля тяжеловодных теплоносителей на реакторе ПИК

90 Применение ионохроматографического метода для определения общей жесткости в теплоносителях с высоким содержанием продуктов коррозии

91 Обеспечение ядерной и радиационной безопасности исследовательских ядерных установок НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

93 Верификация алгоритма оптимизации трактов транспортировки протонных пучков высокой энергии

95 Моделирование динамики пучка в изохронном циклотроне Ц-80

Разработка проекта, изготовление и поставка головного эксплуатационного комплекта тепловыделяющих сборок ПИК-2

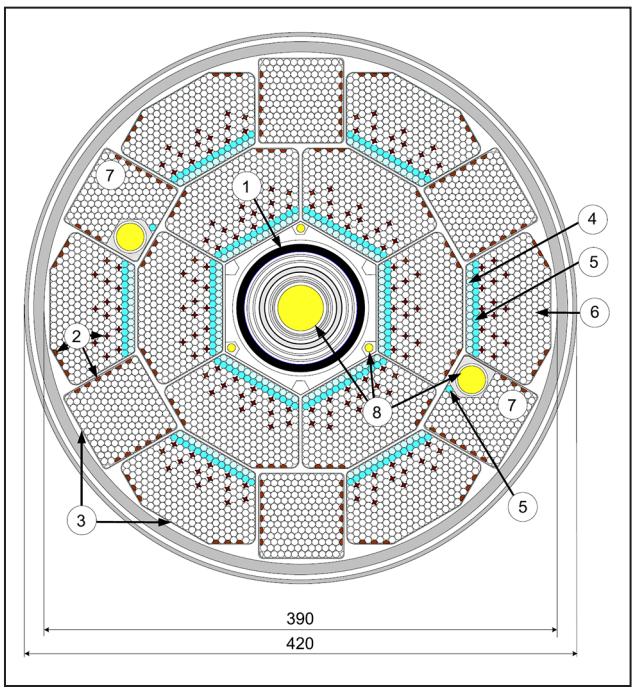
А. С. Захаров, А. Е. Киржаев, М. В. Румянцев, С. Л. Смольский, С. Р. Фридман

Отдел физики и техники реакторов и Управление эксплуатации комплекса ядерных установок НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Коллективами организаций: НИЦ «Курчатовский институт» (головная научная организация), АО «Ордена Ленина Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники им. Н. А. Доллежаля» (головная конструкторская организация), НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ (эксплуатирующая организация), АО «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов им. акад. А. А. Бочвара» (главный конструктор твэлов) – в соответствии с Дорожной картой разработки, постановки на производство и изготовление ТВС ПИК-2, имитаторов и вытеснителей ТВС для исследовательского реактора ПИК разработаны технические проекты модернизированной активной зоны на базе тепловыделяющих сборок (ТВС) ПИК-2 и всех ее элементов: твэлов, стержней выгорающего поглотителя (СВП), ТВС, вытеснителей ТВС, имитаторов ТВС. Выполнено обоснование безопасности реакторного комплекса ПИК (РК ПИК) с модернизированной активной зоной.

Технический проект содержит проектные решения по модернизированной активной зоне РК ПИК (рис.), позволяющие обеспечить эффективную и безопасную эксплуатацию реактора с увеличенной длительностью кампании, снизить потребление ТВС и организовать с минимальными затратами устойчивое топливное обеспечение реактора. Проект модернизированной активной зоны удовлетворяет требованиям федеральных норм и правил в области использования атомной энергии.

В 2023 г. головной эксплуатационный комплект ТВС ПИК-2, имитаторы ТВС и вытеснители ТВС изготовлены на АО «Машиностроительный завод» и Новосибирском заводе химконцентратов, осуществлена их приемка и доставка



Активная зона реактора ПИК с эксплуатационным комплектом тепловыделяющих сборок ПИК-2:
1 – поглощающие шторки из гафния;
2 – стержни выгорающего поглотителя крестообразного и полуцилиндрического профиля на основе $Gd_2O_3 + ZrO_2$;
3 – циркониевые чехлы тепловыделяющих сборок;
4 – твэлы с топливной загрузкой 0,38 номинала;
5 – твэлы с топливной загрузкой 0,69 номинала;
6 – твэлы с номинальным содержанием топлива;
7 – тепловыделяющие сборки с образцами-свидетелями применяемых конструкционных материалов;
8 – облучаемые образцы

в НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ на РК ПИК для отработки перегрузочных операций, проведения исследований гидравлических и нейтронно-физических характеристик реактора.

Разработанные ТВС головного комплекта позволяют обеспечивать максимальную длительность кампании реактора до 36 эффективных суток в режиме полной перегрузки активной зоны. Оптимальная длительность кампании в режиме

частичных перегрузок составляет 20–25 сут в зависимости от целей эксперимента и планируемых топливных затрат. В программе энергетического пуска предусмотрены варианты эксплуатации реактора с 16 и 18 ТВС с учетом расчетных и технологических неопределенностей.

В ходе выполнения программы энергопуска проверяется возможность достройки активной зоны до 18 ТВС. Определяются фактический запас реактивности и соответствие требованиям нормативной подкритичности, выполняется основной объем возможных физических экспериментов.

Освоение мощности на этапе до 30 МВт целесообразно начинать с загрузки 16 ТВС и 2 вытеснителей. В этом случае при переходе к полному числу 18 ТВС после начальной энерговыработки запас реактивности снижается и создаются более безопасные и удобные условия для исследований на нейтронных пучках с полностью выведенными поглощающими компенсирующими стержнями в отражателе.

В ходе приемочных испытаний головного комплекта ТВС ПИК-2 получены необходимые сведения для корректировки проекта и расчетных моделей ПИК-2 с учетом доработки конструкторской документации на заводе-изготовителе и снижения технологических неопределенностей, связанных с особенностями производства твэлов и СВП.

В 2023 г. подтверждены гидравлические характеристики первого контура по результатам опытной загрузки имитаторов ТВС ПИК-2 с СВП.

Мороко В. И., ..., Захаров А. С., Фридман С. Р. // Сб. тез. докл. VI Междунар. научн.-техн. конф. «Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики» (МНТК НИКИЭТ – 2023). М.: Изд-во АО «НИКИЭТ», 2023. С. 108–109.

Организация химического контроля тяжеловодных теплоносителей на реакторе ПИК

Т. В. Воронина

Управление эксплуатации комплекса ядерных установок
НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

В состав реакторной установки ПИК входят два тяжеловодных контура: тяжеловодного отражателя (ТВО) и жидкостного регулирования (ЖР), которые являются системами, важными для безопасности. Поэтому вопрос организации оптимального водно-химического режима (ВХР) и химического контроля (ХК) их теплоносителей актуален. Это связано с тем, что наиболее частой причиной неплановых остановов (до 80 %) ядерных установок является коррозионное повреждение оборудования. Важное условие обеспечения оптимального ВХР – достоверный и оперативный ХК теплоносителей. Такой контроль может быть организован с учетом физико-химических особенностей тяжелой воды (D_2O). Также требуется тщательное обоснование перечня контролируемых показателей и норм для каждого теплоносителя.

Объем ХК тяжелой воды контура ТВО был установлен на основе проектных и эксплуатационных документов, но опыт, полученный на этапах энергопуска реактора, показал необходимость корректировки. Объем ХК теплоносителя контура ЖР существующими документами определен не был, т. к. теплоносителем этого контура сначала являлся раствор нитрата гадолиния, который впоследствии заменили на D_2O. Поэтому необходимо было его разработать до заполнения системы тяжелой водой.

При определении перечня контролируемых показателей учитывали как возможные источники поступления примесей в теплоноситель, так и возможные источники образования примесей внутри теплоносителя при эксплуатации реактора. Для этого необходимо было знать условия эксплуатации, объем теплоносителя, перечень конструкционных материалов, состав и объем газовой подушки, технологию очистки.

Тяжеловодные системы реактора ПИК имеют заметные технологические отличия. Объем теплоносителя в ТВО (25,2 м^3) на порядок больше, чем в ЖР (2,6 м^3). Давление в контуре ЖР (1,3 МПа) выше, чем в ТВО (0,3 МПа). В качестве конструкционного материала в контуре ЖР использованы только аустенитные нержавеющие стали, а в ТВО кроме нержавеющих сталей применены также циркониевые и алюминиевые сплавы. Отличается газ в компенсаторе объема: в контуре ЖР – азот, в контуре ТВО – гелий. В состав системы химводоочистки (ХВО) ТВО входят выпарной аппарат и ионообменные фильтры, ХВО ЖР – выпарной аппарат и патронный перлитный фильтр. Исходя из этих данных оценили основные источники поступления загрязнений в эти системы и установили перечень контролируемых показателей.

При обосновании норм опирались на существующие нормы для теплоносителя первого контура, рекомендации специалистов АО «Ордена Ленина Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники им. Н. А. Доллежаля» и имеющийся опыт ХК (с 2010 г.). Было учтено, что существуют зависимости между контролируемыми показателями. Во-первых, удельная электрическая проводимость, которая является важнейшим показателем, характеризующим химическую чистоту теплоносителя, связана с диапазоном pH теплоносителя и содержанием в нем растворимых примесей. Во-вторых, прозрачность связана с содержанием нерастворимых примесей, в первую очередь продуктами коррозии по железу и алюминию.

Кроме этого, учитывали различия в физико-химических свойствах легкой и тяжелой воды. D_2O слабее ионизирована, чем H_2O: ионное про-

изведение D_2O равно $1{,}35 \cdot 10^{15}$, тогда как для H_2O – $1{,}0 \cdot 10^{14}$. Подвижность (предельная молярная проводимость) ионов тяжелой воды D^+ и OD^- на 40 % ниже, чем подвижность ионов легкой воды H^+ и OH^-. Это приводит к тому, что удельная электропроводимость идеально чистой D_2O ниже, чем идеально чистой H_2O. По расчету электропроводимость чистой D_2O при нейтральном pD = 0,014 мкСм/см, а чистой H_2O при нейтральном pH – 0,055 мкСм/см. Подвижность катионов и анионов в тяжелой воде ниже, чем в легкой в 1,21–1,26 раза. Растворимость солей в тяжелой воде на 10 % меньше, чем в легкой. На фотометрические и титриметрические измерения химических показателей D_2O, такие как массовая концентрация железа, алюминия и меди, окисляемость и общая жесткость, это не влияет. Однако при кондуктометрических и потенциометрических измерениях таких показателей, как pH и электропроводность, необходимо учитывать особенности тяжелой воды. Лабораторный контроль тяжелой воды должен выполняться на специально выделенном для этих целей оборудовании. Градуировку приборов, контролирующих тяжелую воду, необходимо выполнять на тяжелой воде.

В результате в 2022 г. был разработан и утвержден Регламент химического контроля водных теплоносителей и технологических сливов реактора ПИК, в который вошел объем химического контроля тяжеловодных систем реактора ПИК. Эти нормы с 2022 г. действуют на реакторе ПИК и обеспечивают безопасную эксплуатацию его систем ТВО и ЖР.

Воронина Т. В. // Сб. тез. докл. VI Междунар. научн.-техн. конф. «Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики» (МНТК НИКИЭТ – 2023). М.: Изд-во АО «НИКИЭТ», 2023. С. 136–137.

Применение ионохроматографического метода для определения общей жесткости в теплоносителях с высоким содержанием продуктов коррозии

Т. В. Воронина, Е. С. Виноградова, С. Н. Кузнецова

Управление эксплуатации комплекса ядерных установок
НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Контур жидкостного регулирования (ЖР) реактора ПИК относится к системе, важной для безопасной эксплуатации реактора, поэтому химический контроль качества его теплоносителя актуален. Контур представляет собой кольцевую полость толщиной 4 мм вокруг корпуса реактора, в зазорах которой циркулирует концентрированная тяжелая вода. Заполнение системы ЖР тяжелой водой было выполнено в конце декабря 2020 г. Мониторинг химических показателей теплоносителя проводится с 2021 г. по настоящее время. Сразу же после заполнения системы были обнаружены трудности с определением общей жесткости.

Классический метод определения общей жесткости в теплоносителях различных ядерных установок – титриметрический анализ. Он основан на комплексонометрическом титровании проб трилоном Б с применением индикатора хромового темно-синего. При анализе проб теплоносителя ЖР возникли сложности с определением конечной точки титрования (КТТ) из-за нечеткого цветового перехода вблизи точки эквивалентности. Было сделано предположение, что это связано с присутствием в теплоносителе ЖР примесей (мешающих ионов).

Контур ЖР работает в радиационно-напряженных условиях под азотной подушкой в условиях радиолиза теплоносителя. Скорее всего, причиной появления примесей являются коррозионные процессы. Основные конструкционные материалы контура ЖР – нержавеющие аустенитные стали марок 12Х18Н10Т и 08Х18Н10Т. Исходя из их химического состава, наиболее вероятными примесями являются Fe, Ni и Mn, что подтвердил атомно-эмиссионный анализ проб.

Для решения этой задачи было предложено использовать ионную хроматографию. Метод дает возможность расчетно-экспериментального определения общей жесткости по результатам измерения суммы массовых концентраций ионов Ca и Mg. Работы выполнялись на модельных растворах солей жесткости с добавлением и без добавления мешающих ионов коррозионного происхождения титриметрическим и ионохроматографическим методами. Для сравнения результатов, полученных двумя методами, концентрации Ca и Mg, измеренные с помощью хроматографа, пересчитывались в единицы определения общей жесткости (мкг-экв/дм^3).

В итоге пришли к заключению, что мешающего влияния Fe на результат определения общей жесткости не установлено. Оно затруднено и при высоком, и при низком содержании Fe в теплоносителе. Выявлено заметное влияние Ni на результат титрования. Экспериментальная оценка показала, что для проб с содержанием солей жесткости не менее 20 мкг-экв/дм^3 максимально допустимая концентрация Ni, при которой его присутствие еще не оказывает значимого влияния на результаты титриметрического анализа, равна 50 мкг/дм^3. Mn титруется совместно с ионами Ca и Mg при любой концентрации мешающего иона. Это приводит к завышению значений результатов титрования, но трудностей с определением КТТ не установлено. Ионохроматографический метод позволяет определять общую жесткость в широком диапазоне содержания ионов Ni и Mn, поэтому может быть применим для определения общей жесткости с погрешностью определения около 40 % независимо от наличия в растворе продуктов коррозионного происхождения.

Воронина Т. В., Виноградова Е. С., Кузнецова С. Н. и др. // Научн.-техн. сб. «Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок». Сосновый Бор, 2023. № 1 (31). С. 31–45.

Обеспечение ядерной и радиационной безопасности исследовательских ядерных установок НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

А. В. Коротынский, Я. В. Севрюкова, Д. С. Заплаткина

Управление ядерной и радиационной безопасности НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Эксплуатация исследовательских ядерных установок (ИЯУ) является одним из ключевых направлений в деятельности НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ. На площадке Института располагаются три ИЯУ: комплекс с исследовательским ядерным реактором ПИК (РК ПИК), комплекс с исследовательским ядерным реактором ВВР-М (РК ВВР-М), комплекс с критическим ядерным стендом «Физическая модель реактора ПИК» (КС ФМ ПИК).

Для любой ИЯУ, независимо от режима ее эксплуатации, является приоритетным обеспечение ядерной и радиационной безопасности (ЯРБ). В данном вопросе Институт придерживается комплексного подхода, включающего в себя:

– исполнение требований федеральных норм и правил в области использования атомной энергии, а также локальных нормативных актов и организационно-распорядительных документов эксплуатирующей организации;

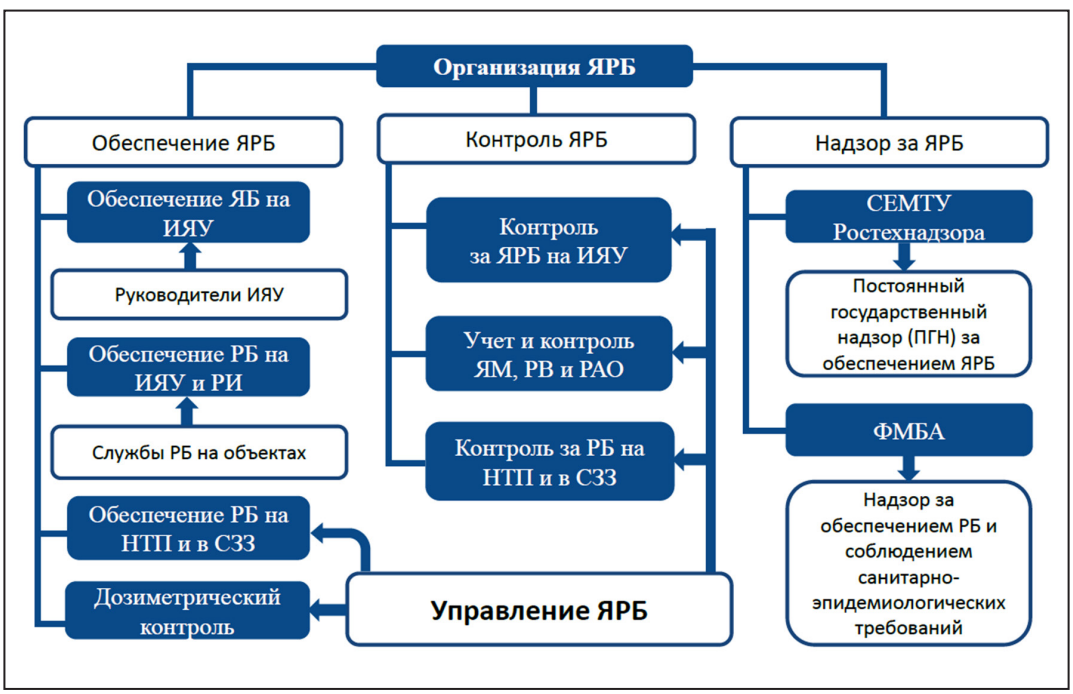
– проведение организационных и технических мероприятий, способствующих поддержанию и повышению уровня безопасности на ИЯУ Института;

– реализацию кадровой политики, направленной на укомплектование ИЯУ квалифицированным персоналом, организацию обучения и повышения квалификации, своевременное проведение противоаварийных тренировок и формирование культуры безопасности;

– осуществление комплекса контрольных мероприятий, включающих контроль ЯРБ, радиационный контроль, учет и контроль ядерных материалов, радиоактивных веществ и радиоактивных отходов, контроль качества, сопровождение лицензируемой деятельности.

Структурная схема обеспечения ЯРБ ИЯУ Института приведена на рисунке.

В части организационно-технических мероприятий по обеспечению ЯРБ выполняются:



Структурная схема обеспечения ядерной и радиационной безопасности НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

– плановое техническое обслуживание оборудования и элементов систем, важных для безопасности, своевременные ремонтные работы;

– техническое освидетельствование элементов конструкции ИЯУ и производственный контроль;

– продление сроков эксплуатации или замена элементов;

– разработка технических решений, направленных на повышение уровня безопасности;

– создание автоматизированной системы мониторинга радиационной обстановки.

Согласно требованиям законодательства и федеральных норм и правил в области использования атомной энергии деятельность по эксплуатации ИЯУ НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ ведется в соответствии с условиями действия лицензий, выданных Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору.

В рамках осуществления очередного этапа ввода в эксплуатацию реактора ПИК – энергетического пуска с комплектом тепловыделяющих сборок нового типа – предусмотрены мероприятия по доработке систем и оборудования ИЯУ ПИК, направленные на повышение их безопасности и надежности.

Планируются работы по замене экспериментальных каналов, подготовка к монтажу и монтаж экспериментальных устройств – научных станций и источников нейтронов. В целом реализация проекта «Создание приборной базы реакторного комплекса ПИК» осуществляется с учетом выполненного обоснования безопасности при сооружении и эксплуатации РК ПИК.

В связи с окончанием многолетнего периода эксплуатации в режиме работы на мощности РК ВВР-М и КС ФМ ПИК выполняются мероприятия по продлению назначенного срока эксплуатации после 2025 г. важных для безопасности систем, зданий и сооружений. В период эксплуатации РК ВВР-М и КС ФМ ПИК в режиме длительного останова осуществляются регламентные процедуры по поддержанию в работоспособном состоянии необходимых технологических систем и оборудования.

В рамках реализации федеральной целевой программы «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2016–2020 годы и на период до 2035 года» в 2023 г. осуществлен вывоз с территории Института накопленного отработавшего ядерного топлива реактора ВВР-М.

Латыпов Р. Х., ..., Коротынский А. В., ..., Севрюкова Я. В., Заплаткина Д. С. // Сб. тез. докл. XXIII Росс. конф. «Безопасность исследовательских ядерных установок». Димитровград: АО «ГНЦ НИИАР», 2023. С. 8–10.

Верификация алгоритма оптимизации трактов транспортировки протонных пучков высокой энергии

Д. А. Амерканов, С. А. Артамонов, Е. М. Иванов, В. А. Тонких

Отделение перспективных разработок НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Расчет трактов протонных пучков высоких энергий заключается в отслеживании траекторий пучков по каналу транспортировки от источника. Для проведения таких расчетов разработан программный код Proton_MK на основе метода Монте-Карло.

Пучок от ускорителя задается в виде многомерного распределения Гаусса в фазовом пространстве x, x', z, z', $\Delta p/p$. В случае когда в транспортном канале установлен поглотитель, параметры пучка после поглотителя рассчитываются с помощью GEANT4. Алгоритм позволяет рассчитывать любые параметры пучка: интенсивность, пространственную или фазовую плотность, распределение энергии и т. д. В программу включен блок оптимизации параметров пучка. Метод случайного поиска с корректировкой на основе анализа промежуточных результатов (так называемый метод статистического градиента) используется для получения глобального максимума функции нескольких переменных.

Алгоритм Proton_MK был апробирован на канале Р3 синхроциклотрона СЦ-1000 (рис. 1). Энергия пучка протонов 1 000 МэВ была уменьшена с помощью поглотителя и доведена до мишени через коллиматор в стене.

Мишенью служил сцинтилляционный профилометр, на котором были получены профили пучка для энергий 200 и 900 МэВ.

Для моделирования профилей пучка на мишени использовался алгоритм Proton_MK, входными данными для которого были параметры пучка после поглотителя, полученные в GEANT4, а также состав элементов канала Р3.

Тракт транспортировки состоит из стандартных магнитных элементов, расположенных в разных положениях: квадрупольных линз, различных типов магнитов, обеспечивающих отклонение пучка в разные стороны. В линейном приближении связь между входными и выходными координатами и скоростями в транспортном элементе можно получить с помощью матрицы перехода, которая различна для каждого элемента.

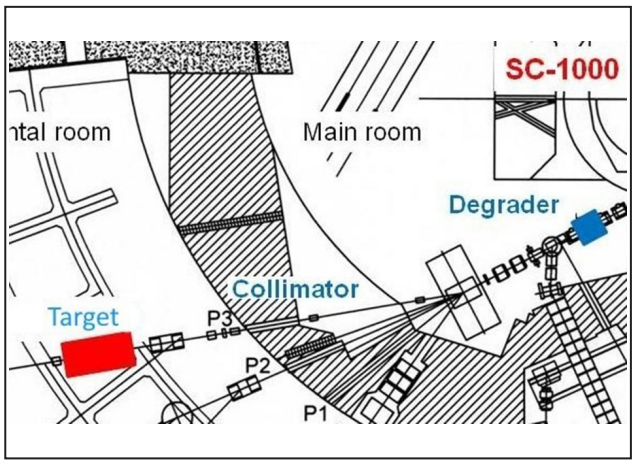


Рис. 1. Схема эксперимента с использованием алгоритма Proton_MK на синхроциклотроне СЦ-1000

При той же конфигурации каналов по алгоритму рассчитывались параметры пучка на мишени. Реальные профили пучка на мишени были также получены с помощью сцинтилляционного профилометра.

Показаны следующие результаты: алгоритмические расчеты для пучков протонов с энергией 200 и 900 МэВ (рис. 2); измерения профилей реальных пучков протонов с энергией 200 и 900 МэВ (рис. 3). Результат сравнения размеров пучков для энергий 200 и 900 МэВ представлен в таблице.

По результатам измерения профилей пучков различных энергий и сравнения их с расчетными профилями пучков был сделан вывод о корректности алгоритма.

Алгоритм Proton_MK был протестирован на реальном пучке с энергиями 200 и 900 МэВ. Полученные результаты свидетельствуют о том, что

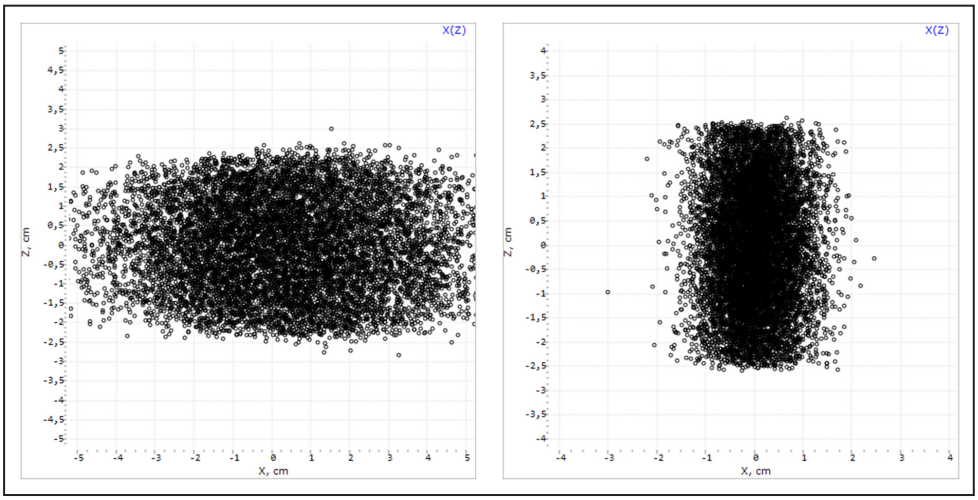


Рис. 2. Смоделированные профили пучков протонов с энергией 200 МэВ (*слева*) и 900 МэВ (*справа*)

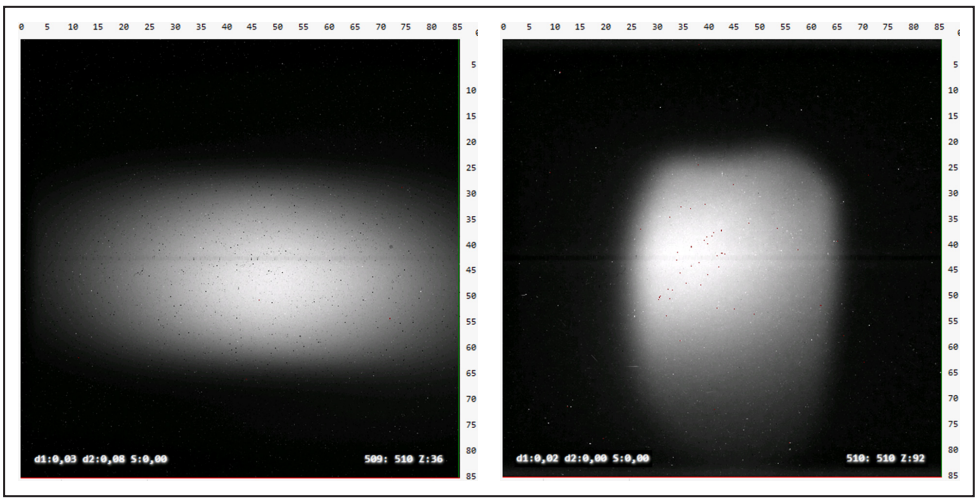


Рис. 3. Измеренные профили пучков протонов с энергией 200 МэВ (*слева*) и 900 МэВ (*справа*)

Таблица. Сравнение размеров протонных пучков для энергий 200 и 900 МэВ

Энергия пучка, МэВ	Реальный размер пучка, см	Размер смоделированного пучка, см	Ошибка, %
200	4,6 ×10	5 × 11	9
900	4,2 × 5,2	4 × 5	5

данный алгоритм может быть использован при проектировании и настройке каналов транспортировки пучков протонов высоких энергий. Ошибка расчета связана с тем, что алгоритм учитывает только линейные процессы для осевой частицы, уровень вакуума при расчете не учитывается.

Amerkanov D.A., Artamonov S.A., Ivanov E.M., Tonkikh V.A. // Сб. матер. XXVIII Междунар. конф. «Росс. конф. по ускорителям заряженных частиц» (RuPAC'23). Новосибирск, 2023. С. 71–73.

Моделирование динамики пучка в изохронном циклотроне Ц-80

Д. А. Амерканов, С. А. Артамонов, Е. М. Иванов, В. А. Тонких

Отделение перспективных разработок НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

В лаборатории физики и техники ускорителей ускорительного отдела ОПР разработан комбинированный метод моделирования динамики заряженных частиц в изохронных циклотронах с использованием либо модельного 3*D* магнитного поля, либо экспериментального поля, измеренного в медианной плоскости (Ц-80).

В ускорителях циклотронного типа определение координат и скоростей частицы в начальный момент времени (r, φ, z, dr/dt, $d\varphi/dt$, dz/dt) эквивалентно заданию ее положения в шестимерном фазовом объеме (r, P_r, z, P_z, W, φ_{rf}), где $P_r = \partial r/\partial\varphi$, $P_z = \partial z/\partial\varphi$ – так называемые радиальный и аксиальный (вертикальный) импульсы частицы; E – ее полная энергия; φ_{rf} – ее фаза по отношению к ускоряющему напряжению на дуантах. Обычно рассматривают распределения частиц на фазовых плоскостях: радиальной – (r, P_r), вертикальной – (z, P_z), а также на плоскости «энергия – высокочастотная фаза» – (E, φ_{rf}). Поскольку невозможно точно знать, каким образом распределены частицы в сгустке во время ускорения, то, исходя из заранее определенных, т. е. предполагаемых поперечного и продольного, размеров пучка, как правило, полагают, что частицы в сгустке имеют распределение по Гауссу.

При задании распределений частиц в сгустке на фазовых плоскостях необходимо согласовать их параметры с параметрами магнитной системы ускорителя. Для этой цели в предложенном методе на первом его этапе программой Step1 реализована процедура построения на базе равновесных статических орбит, так называемых оптимальных фазовых эллипсов Eigen Values, которые характеризуют согласованность магнитной системы изучаемого циклотрона с параметрами поперечного движения пучка ионов в нем.

Вводя некоторое наперед заданное значение A_r амплитуд свободных, например радиальных, колебаний равновесной частицы, затем, увеличивая A_r, можно получить набор эллипсов, характеризующих магнитную систему циклотрона. При этом в какой-то момент мы перейдем сепаратрису (поперечную), и движение станет неустойчивым, эллипсы перестанут формироваться. Так мы находим аксептанс для этого радиуса r в ускорителе и оптимальный эллипс. Все частицы ускоряемого сгустка должны быть внутри этого эллипса. Их параметры r_i и P_{r_i} (i = 1, 2 ... N, где N – число частиц в сгустке) можно определить при помощи генератора случайных чисел таким образом, чтобы они попали внутрь эллипса с тем или иным вероятностным интервалом.

Аналогично генерируются начальные данные для частиц сгустка, заполняющих полученный таким же образом эллипс на фазовой плоскости (z, P_z). В результате мы получаем возможность перейти ко второй части предложенного метода (программа Step2) и приступить к решению уравнений движения всех частиц в сгустке с учетом и электрического поля, имея в качестве начальных значений результаты первого этапа. При этом реализована возможность выполнять расчеты для выбранного магнитного поля, например, сначала только с главными гармониками, затем к ним подключить последовательно паразитные гармоники: первую, первую + вторую, первую + вторую + третью. Это позволит выявить их роль в динамических процессах в Ц-80.

Программа согласования параметров распределения частиц в ускоряемом пучке на фазовых плоскостях с параметрами изохронного циклотрона Ц-80: свид. о гос. рег. программы для ЭВМ № 2023688974 / Амерканов Д. А., Артамонов С. А., Иванов Е. М., Тонких В. А.; дата гос. рег. 25.12.2023.

20
gr
30
gr

Прикладные исследования и разработки

98 Внедрение органических отходов в процесс биологической стабилизации почвы

99 Внеклеточная ДНК – триггер бактериальной биоминерализации

101 Разработка и исследование композитных материалов с повышенными характеристиками по радиационной защите

Внедрение органических отходов в процесс биологической стабилизации почвы

Д. А. Головкина[1, 2], Е. В. Журишкина[1, 2], А. Д. Филиппова[3], А. Е. Баранчиков[3], И. М. Лапина[1, 2], А. А. Кульминская[1, 2]

[1] Отделение молекулярной и радиационной биофизики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ
[2] Курчатовский геномный центр – ПИЯФ
[3] Институт общей и неорганической химии им. Н. С. Курнакова РАН

В последнее время заметно усилился интерес к использованию экологичных материалов и технологий в различных сферах инженерного строительства. Индуцированное микроорганизмами осаждение карбоната кальция – перспективная инновационная технология среди инженерных разработок, которая использует уреолитические штаммы бактерий, широко распространенные в природе, способные индуцировать минерализацию карбоната кальция в результате своей метаболической активности с окружающей средой. Однако высокая стоимость компонентов и хрупкость обработанного грунта ограничивают его широкое применение и выход на рынок. Одним из возможных решений может стать использование органических отходов на разных этапах технологии, что позволит удешевить процесс биологической стабилизации и решить вопрос утилизации и переработки некоторых побочных продуктов производств.

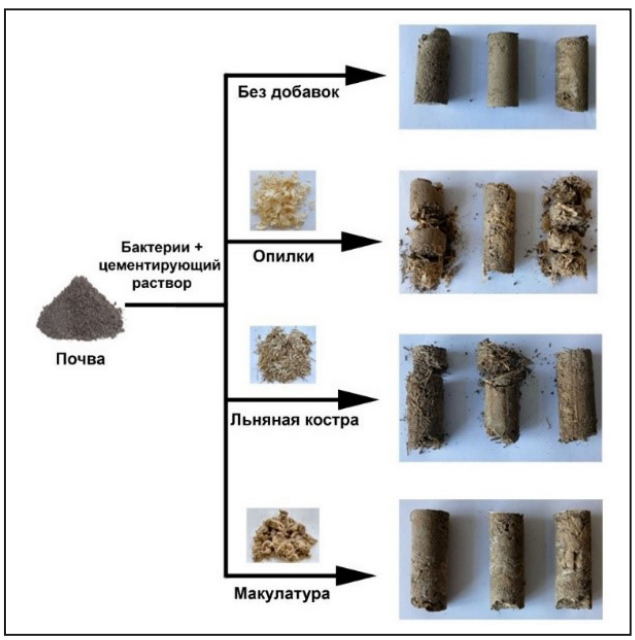
Для биостабилизации больших объемов грунта необходимо получить значительное количество биомассы микроорганизмов.

В первой части нашей работы в качестве основного компонента питательной среды использовался экстракт из отработанных пивоваренных дрожжей. Показано, что большинство отобранных в работах ранее штаммов при росте на разработанной среде увеличивают показатели биомассы и уреазной активности по сравнению со стандартной питательной средой.

Для удовлетворения необходимых требований инженерного строительства необходимо добиться заданных показателей механических характеристик грунта. Для придания дополнительной прочности часто используются методы армирования почвы натуральным волокном.

Во второй части нашей работы был исследован эффект от внесения целлюлозосодержащих отходов в качестве укрепляющих добавок в почву при проведении биостабилизации (рис.). Добавление макулатуры привело к повышению механических параметров обработанного грунта в несколько раз по сравнению с контрольным образцом без добавок.

Полученные результаты показывают потенциал микробиологической стабилизации почвы с использованием органических отходов на разных этапах технологии.



Образцы почвы, обработанные бактериальной суспензией и цементирующим раствором, с тремя видами добавок органических отходов

Golovkina D.A., Zhurishkina E.V., Filippova A.D., Baranchikov A.E., Lapina I.M., Kulminskaya A.A. // Appl. Sci. 2024. V. 14. P. 62.

Внеклеточная ДНК – триггер бактериальной биоминерализации

Л. А. Иванова[1, 2], Г. П. Копица[3], В. В. Егоров[2, 4], Я. А. Забродская[5, 6], А. А. Шалджан[6], А. Е. Баранчиков[7], Н. В. Цвигун[8], А. Н. Лихолай[9], А. Д. Япрынцев[7], Д. А. Головкина[1, 2], Е. В. Журишкина[1, 2], Ю. Е. Горшкова[10], Д. В. Лебедев[1], А. А. Кульминская[1, 2]

[1] *Отделение молекулярной и радиационной биофизики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ*
[2] *Курчатовский геномный центр – ПИЯФ*
[3] *Отделение нейтронных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ*
[4] *Институт экспериментальной медицины*
[5] *Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого*
[6] *Научно-исследовательский институт гриппа им. А. А. Смородинцева Минздрава РФ*
[7] *Институт общей и неорганической химии им. Н. С. Курнакова РАН*
[8] *ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН*
[9] *Центр молекулярных и клеточных технологий Научного парка СПбГУ*
[10] *Лаборатория нейтронной физики им. И. М. Франка Объединенного института ядерных исследований*

Впервые была показана ключевая роль ДНК-компоненты внеклеточного бактериального матрикса в процессе биоминерализации на модели планктонной культуры *Bacillus cereus*. Биоминерализация – процесс осаждения минералов живыми организмами – широко распространен и в природе, и в клинической практике. Так, для многих бактерий характерно осаждать карбонат кальция в почве и горных породах, а также образовывать инкрустированные биопленки, вызывающие образование зубного камня или закупорку стационарных мочевых катетеров. Нами впервые было исследовано взаимное влияние процессов образования внеклеточного матрикса биопленки и процесса бактериальной биоминерализации, протекающих параллельно (рис. 1), а также установлена роль основных макромолекул матрикса в осаждении $CaCO_3$ и структуре минералов.

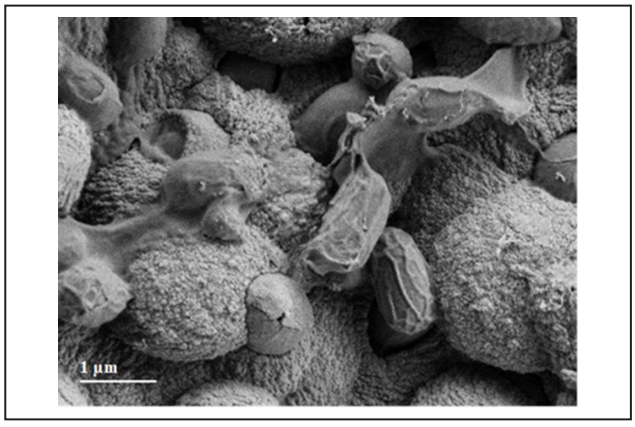


Рис. 1. Полученное с помощью растрового электронного микроскопа изображение *Bacillus cereus*, внеклеточного матрикса и осадка карбоната кальция, образованного в процессе биоминерализации, индуцированной *B. cereus*

С помощью широкого спектра микроскопических методов было показано, что внеклеточная ДНК (вДНК), входящая в состав бактериального матрикса, служила матрицей осаждения карбоната кальция как в бактериальной системе (рис. 2*а*), так и в бесклеточной с добавлением экзогенной ДНК (рис. 2*б*). Исключение ДНК-компоненты из бактериальной системы с помощью фермента ДНКзы I приводило к радикальному замедлению биоминерализации, изменению полиморфного состава осадка, а также его кристаллической и надмолекулярной структуры, исследуемых широким спектром методов, включающих инфракрасную спектроскопию, рентгенофлуоресцентный анализ, методы малоуглового рентгеновского рассеяния и малоуглового рассеяния нейтронов (рис. 3).

Полученные результаты не только расширяют представления о механизмах бактериальной биоминерализации, но и указывают пути решения

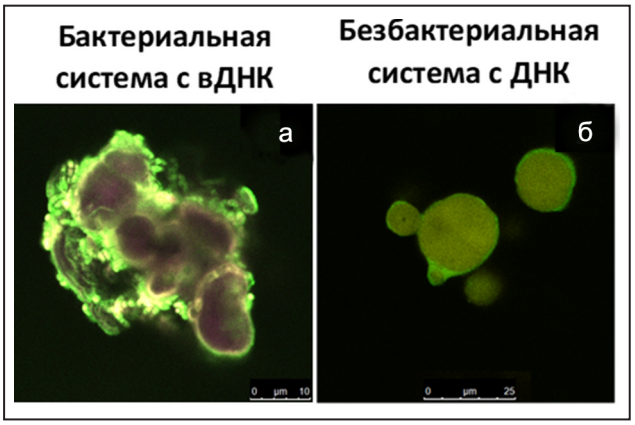


Рис. 2. Изображение конфокальной микроскопии осадков карбоната кальция: *а* – осажденного в процессе биоминерализации, индуцированной *B. cereus* (окраска: *зеленый* – тиофлавин (амилоидные структуры); *розовый* – 7 AAD (ДНК)); *б* – осажденного в бесклеточной системе с добавлением экзогенной ДНК (окраска: *зеленый* – Sytox green (вДНК); *желтый* – автофлуоресценция $CaCO_3$)

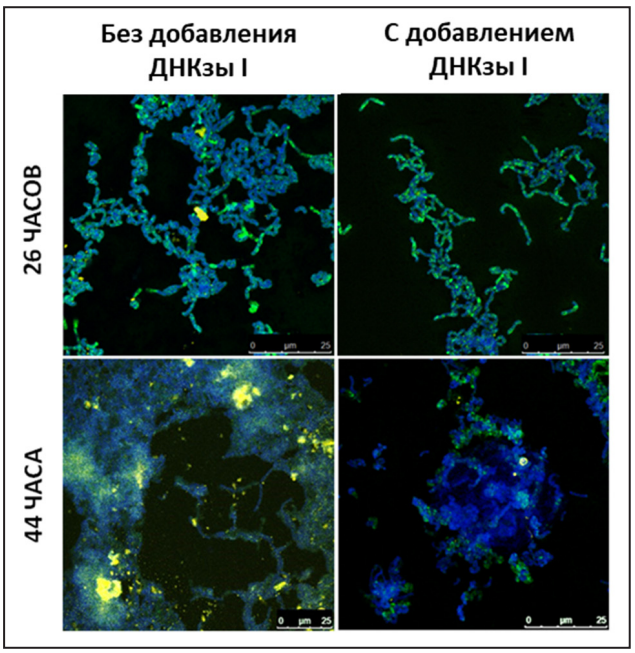


Рис. 3. Изображение конфокальной микроскопии культуры *B. cereus* при добавлении фермента ДНКзы (*справа*) и без него (*слева*). Окраска: *синий* – бромфеноловый синий (белковые структуры); *зеленый* – Sytox green (вДНК); *желтый* – автофлуоресценция $CaCO_3$

важных клинических задач, таких как борьба с инкрустированными биопленками. Кроме того, полученные результаты способствуют развитию современных экологичных технологий строительства, актуальных для средней полосы России, а также южных регионов.

1. *Ivanova L.A., Golovkina D.A., Zhurishkina E.V., Gorshkova Yu.E., Yapryntsev A.D., Baranchikov A.E., Tsvigun N.V., Kopitsa G.P., Kulminskaya A.A., Lebedev D.V.* // Minerals. 2023. V. 13. Iss. 6. P. 740.
2. *Ivanova L.A., Egorov V.V., Zabrodskaya Ya.A., Shaldzhyan A.A., Baranchikov A.Ye., Tsvigun N.V., Lykholay A.N., Yapryntsev A.D., Lebedev D.V., Kulminskaya A.A.* // NPJ Biofilms Microbiomes. 2023. V. 9. Art. 9.

Разработка и исследование композитных материалов с повышенными характеристиками по радиационной защите

В. В. Тарнавич, Ю. О. Четвериков, А. А. Быков

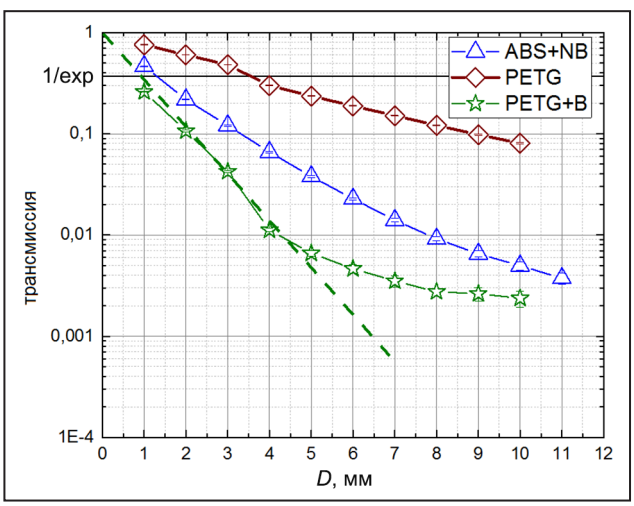
Отделение нейтронных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

В работе исследуются образцы нейтронной защиты из пластиковых композитных материалов с борсодержащим порошком с относительной массовой долей 25–37 %, изготовленных с использованием метода наплавления нитей (FFF). В качестве матричных материалов используются акрилонитрилбутадиенстирольные (ABS) и полиэтилентерефталатгликолевые (PETG) пластики, тогда как содержащие бор наполнители – порошки нитрида бора и аморфного бора.

Добавление борсодержащих порошков в пластиковую нить для 3*D*-печати позволяет повысить эффективность защиты от тепловых нейтронов. Популярные и удобные в печати неэластичные пластики – ABS и PETG – могут быть использованы для изготовления каркасных конструкций, корпусов электронных устройств и узлов приборов, конструктивных соединительных элементов, опор и держателей элементов нейтронной оптики или облученных образцов и материалов, коллиматоров, щелей и диафрагм. Используемые борсодержащие материалы с низкой твердостью (гексагональный нитрид бора и аморфный бор) не снижают срок службы оборудования для 3*D*-печати и обеспечивают возможность простой механической обработки изделий после изготовления.

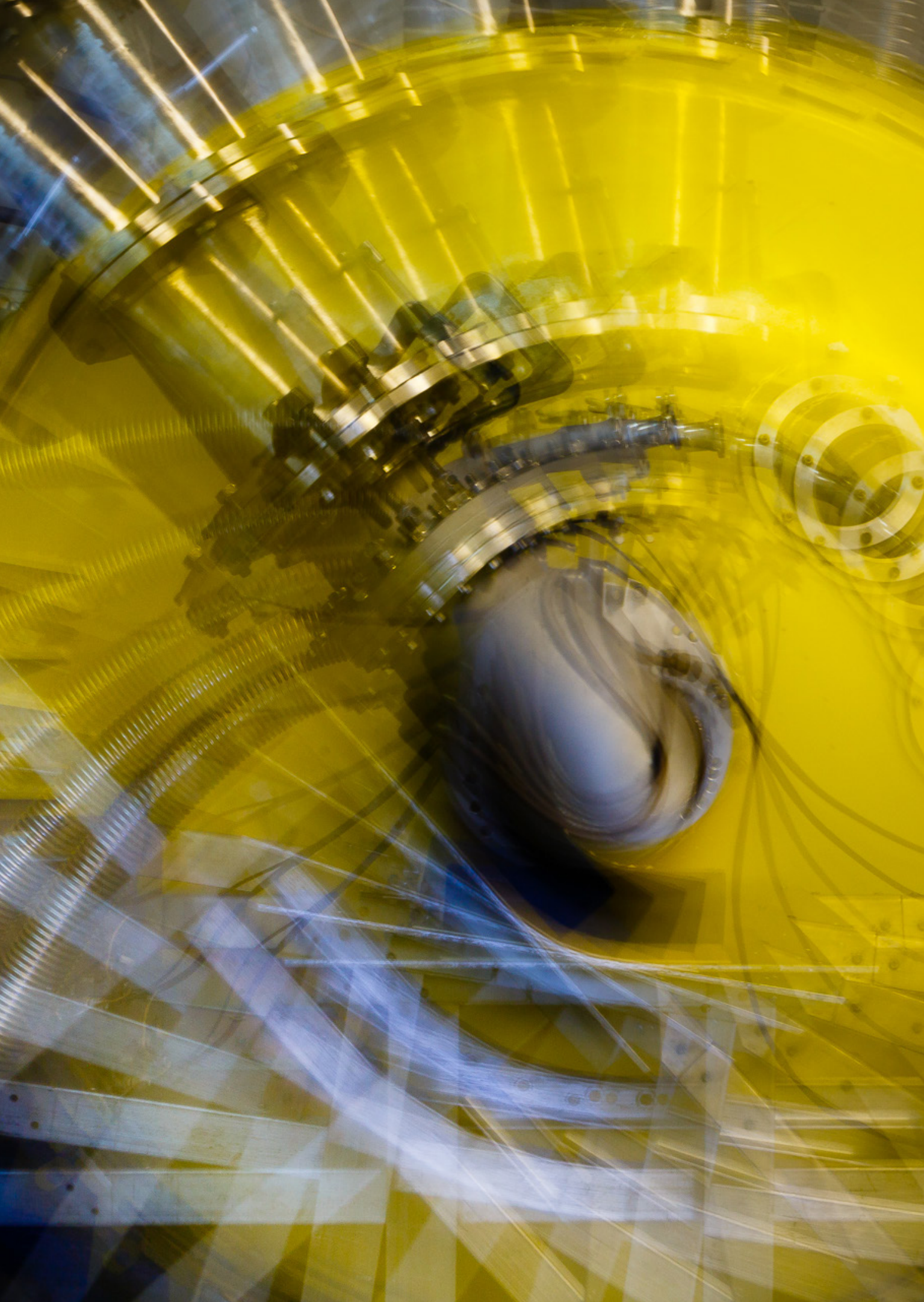
По результатам измерений нейтронного поглощения на монохроматическом пучке реактора ИР-8 (основная монохроматическая линия – 2,4 А) введение бора в пластик позволяет уменьшить глубину проникновения тепловых нейтронов в 2,4 раза: с 3,1 мм для образца ABS-пластика без бора до 1,3 мм для борированного образца (рис.).

Механические испытания на растяжение и изгиб демонстрируют охрупчивание композитных материалов с введением содержащих бор порошков. В испытаниях образцов с бором прочность уменьшается на 40–55 %, и разрушение образцов происходит без пластической деформации, тогда как в образцах пластиков ABS и PETG области пластических деформаций на диафрагмах испытаний занимают заметную часть.



Трансмиссия тепловых нейтронов образцов пластиков и композитов: ABS+BN – ABS с нитридом бора; PETG+B – PETG с аморфным бором

Chetverikov Yu.O., Bykov A.A., ..., Tarnavich V.V. // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A. 2023. V. 1055. Art. 168406.



Базовые установки

104 Синхроциклотрон НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

106 Перспективы исследования экстремальных состояний ядерного вещества в эксперименте MPD на ускорителе NICA

Синхроциклотрон НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Д. А. Амерканов, С. А. Артамонов, Е. М. Иванов

Отделение перспективных разработок НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Уникальная ядерно-физическая установка научно-исследовательский ускорительный комплекс СЦ-1000 (синхроциклотрон СЦ-1000) является базовой экспериментальной установкой НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ. Ток внутреннего пучка протонов синхроциклотрона $I_{внутр}$ = 3 мкА, ток выведенного пучка $I_{выв}$ = 1 мкА. Энергия выведенного протонного пучка E = 1000 МэВ, $\Delta E/E$ = 1 %. Реализована возможность получения энергий выведенного протонного пучка в диапазоне 100–900 МэВ с шагом 100 МэВ. Кроме того, на синхроциклотроне реализована возможность получения пучков частиц второго и третьего поколений: π- и μ-мезонных пучков обоих знаков, а также пучка нейтронов.

Таким образом, уникальность ускорительной базы НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ определяют как параметры самого синхроциклотрона, так и созданные на нем экспериментальные установки и комплексы:

- мюонный канал и μSR-установка;
- π1-мезонный канал высоких энергий;
- π2-мезонный канал низких энергий;
- масс-сепараторный комплекс ИРИС;
- нейтронный времяпролетный спектрометр ГНЕЙС;
- магнитный анализатор пролетный;
- комплекс радиационных испытаний электронной компонентной базы на радиационную стойкость в протонных и нейтронных пучках.

В настоящее время работы ускорителя лимитируются количеством групп эксплуатации (пульт), а также зависят от количества рабочих часов в месяце и составляют величину от 370 ч/мес. (≈ 15 сут) до 490 ч/мес. (≈ 20 сут).

На рисунке 1 показана динамика работы синхроциклотрона в 2023 г. Провал в диаграмме в период «апрель – июнь» связан с ремонтными работами элементов высокочастотной системы. Период «июнь – октябрь» связан с запретом включения синхроциклотрона из-за проводимых строительных работ.

На рисунке 2 показано распределение времени работы различных групп исследователей на синхроциклотроне в 2023 г.

Следует отметить расширение географии пользователей услуг синхроциклотрона СЦ-1000. Так,

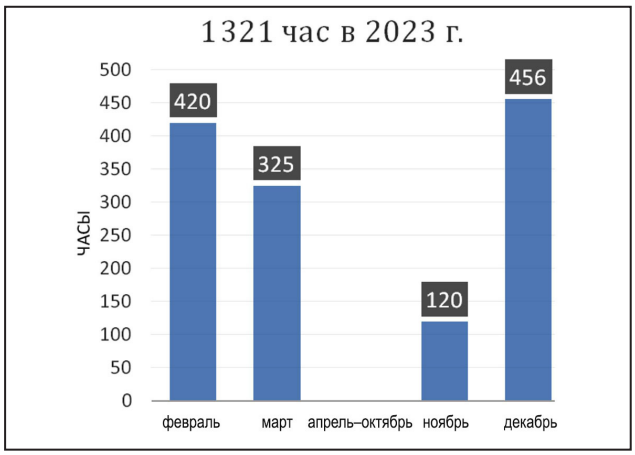


Рис. 1. Динамика работы синхроциклотрона СЦ-1000 в 2023 г.

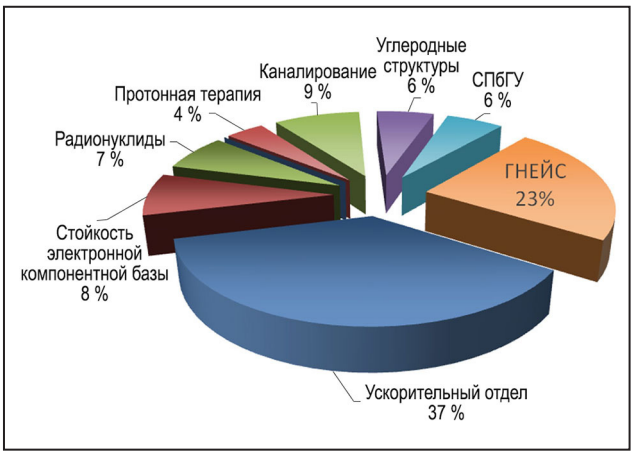


Рис. 2. Распределение времени работы СЦ-1000 по различным направлениям исследований в 2023 г.

помимо традиционного пользователя – ОФВЭ – протонными пучками синхроциклотрона пользовались ОМРБ, ОПР, ООО «НПП Астроориентир», Санкт-Петербургский государственный университет, Университет науки и технологий МИСИС, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Объединенный институт ядерных исследований, Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики им. акад. Е. И. Забабахина.

В 2023 г. заключено и выполнено силами ускорительного отдела договоров на сумму 4 377 600 руб. Кроме того, совместно с сотрудниками лаборатории физики и техники ускорителей опубликованы 19 работ различной значимости. Дополнительно к этим работам получены свидетельства о регистрации трех программ для ЭВМ, а также два патента на изобретения. В рамках 55-й Зимней школы ПИЯФ была организована и проведена секция ядерной медицины и физики ускорителей (ЯМФУ). На секции ЯМФУ сотрудниками отдела и приглашенными лекторами прочитаны 20 лекций.

Продолжается разработка теоретических методов, алгоритмов и программ для исследования динамических процессов в изохронном циклотроне Ц-80.

1. *Shaginyan V.R., ..., Artamonov S.A.* // Magnetism. 2023. V. 3. Iss. 3. P. 180–203.
2. *Амерканов Д. А., ..., Иванов Е. М. и др.* // Письма в ЖЭТФ. 2023. Т. 118. № 7–8. С. 551–556.
3. *Максимов В. И., ..., Амерканов Д. А., Артамонов С. А., Иванов Е. М.* // Сб. матер. XVIII Междунар. конф. «Росс. конф. по ускорителям заряженных частиц» (RuPAC'23). Новосибирск, 2023. С. 150–154.
4. Программа согласования параметров распределения частиц в ускоряемом пучке на фазовых плоскостях с параметрами изохронного циклотрона Ц-80: свид. о гос. рег. программы для ЭВМ № 2023688974 / Амерканов Д. А., Артамонов С. А., Иванов Е. М., Тонких В. А.; дата гос. рег. 25.12.2023.

Перспективы исследования экстремальных состояний ядерного вещества в эксперименте MPD на ускорителе NICA

Н. А. Бурмасов, А. Т. Дьяченко, М. Б. Жалов, Г. А. Залите, Д. А. Иванищев, Д. О. Котов, Е. Л. Крышень, М. В. Малаев, А. Ю. Рябов, В. Г. Рябов, Ю. Г. Рябов, О. Л. Федин, А. В. Ханзадеев

Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

В Объединенном институте ядерных исследований (Дубна) продолжается реализация мегасайенс-проекта NICA (Nuclotron based Ion Collider fAcility). Строительство коллайдера и экспериментальной установки MPD планируется закончить в течение ближайшего года с выходом на работу с пучками в 2025 г.

В настоящее время обсуждается возможность использования детектора MPD для изучения столкновений тяжелых релятивистских ядер на фиксированной мишени. Для этого в вакуумную трубу коллайдера NICA будет установлена мишень-проволока диаметром 50–100 мкм, смещенная от центра канала на ~ 1 см и расположенная близко к торцу центрального барреля экспериментальной установки MPD (рис. 1). Реализация подобной программы исследований позволит:

- расширить диапазон энергий столкновения ядер, изучаемый в эксперименте MPD, до $\sqrt{s_{NN}}$ = 2,4 ГэВ;
- решить проблему уменьшающейся частоты ядерных столкновений при уменьшении энергии взаимодействия, характерную для работы ускорителя в коллайдерном режиме;
- провести измерение столкновений одних и тех же ядер при одной и той же энергии в экспериментах BM@N и MPD для расширения динамического диапазона измерений и проведения сравнительных анализов для проверки и подтверждения получаемых результатов.

Сотрудники Отделения физики высоких энергий провели исследование возможности использования экспериментальной установки MPD для изучения столкновений тяжелых релятивистских ядер на фиксированной мишени. Показано, что триггерная система эксперимента MPD, состоящая из передних кварцевых черенковских счетчиков (FFD), передних адронных калориметров (FHCAL) и времяпролетной системы (TOF), позволяет эффективно отбирать события, соответствующие столкновениям ядер, в случае использования пучков ядер Xe или Bi и проволоки-мишени, сделанной из вольфрама, меди или золота. Из-за конструкционных ограничений проволочка-мишень не может находиться дальше ~ 85 см от геометрического центра экспериментальной установки вдоль оси пучка. Из-за сдвига системы центра масс это приводит к ограничению по быстроте фазового объема, доступного для изучения в экспериментальной установке. Тем не менее результаты моделирования работы экспериментальной установки при расположении проволоки-мишени при z = –85 см показали, что экспериментальная установка MPD позволяет измерять характеристики легких и тяжелых идентифицированных адронов (π, K, ρ, ω, p, Λ, Σ, Ξ и т. д.) в области нулевых быстрот y_{CMS} ~ 0 в широкой области поперечных импульсов. Определенные сложности возникают с регистрацией более тяжелых адронов, таких как протоны, в области положительных быстрот и малых поперечных импульсов. Тем не менее измерение таких частиц во всем диапазоне поперечных импульсов остается возможным в асимметричном диапазоне быстрот [–0,5; 0].

Сотрудники Отделения подготовили предложение по проведению экспериментальных исследований на детекторе MPD с целью измерения свойств короткоживущих адронных резонансов $\rho(770)$, $K^*(892)$, $\phi(1020)$, $\Sigma(1385)$, $\Lambda(1520)$ и др. Из-за малого времени жизни существенная часть резонансов может распадаться в файерболе, а дочерние частицы – участвовать в адронной фазе ядерных столкновений, взаимодействуя с ок-

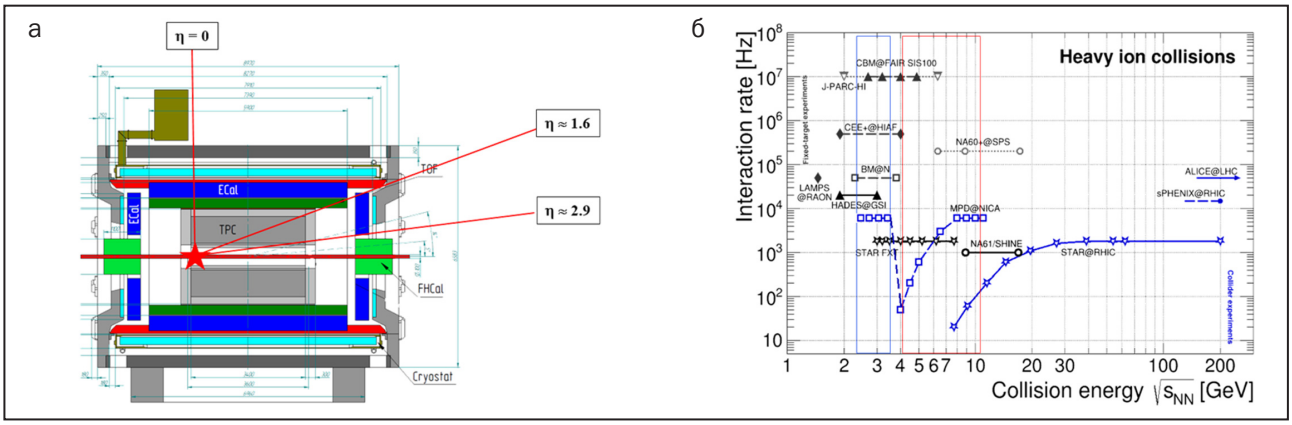


Рис. 1. Схематическое изображение экспериментальной установки MPD и расположения проволоки-мишени (*а*). Частота ядерных столкновений в зависимости от энергии взаимодействия (*б*): *красные* и *синие прямоугольники* – диапазоны энергий, доступные для изучения в эксперименте MPD при работе коллайдера NICA в режиме коллайдера и с фиксированной мишенью соответственно

ружающими частицами. Выходы таких резонансов в конечном состоянии будут определяться временами жизни резонансов и адронной фазы, ее плотностью и адронными сечениями. Добавление программы по экспериментальному изучению свойств короткоживущих резонансов в физическую программу эксперимента позволит проверить качество описания свойств адронной фазы ядерных столкновений в различных физических моделях.

Моделирование работы экспериментальной установки MPD показало, что она обеспечивает эффективное восстановление адронных распадов короткоживущих резонансов за счет идентификации дочерних адронов через измерение их ионизационных потерь в подсистеме TPC и времени лета в подсистеме TOF, а также восстановления вторичных вершин слабых распадов K^0_s и Λ и использования соответствующих топологических критериев отбора. На рисунке 2 показано сравнение восстановленных и реально сгенерированных дифференциальных спектров рождения резонансов для случая Bi + Bi-столкновений при энергии $\sqrt{s_{NN}}$ = 9,2 ГэВ. Видно, что восстановленные спектры хорошо согласуются со сгенерированными в пределах неопределенностей, что свидетельствует о значительных возможностях экспериментальной установки.

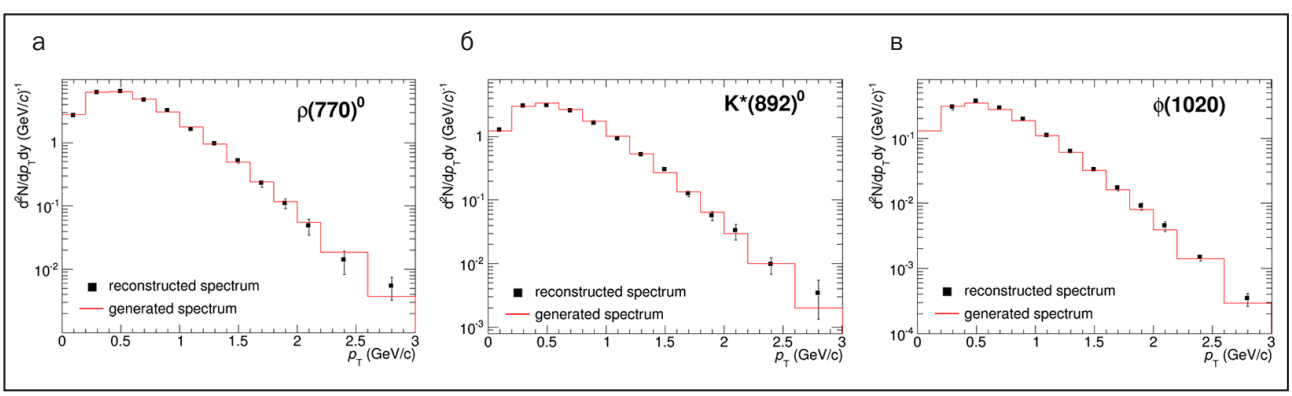


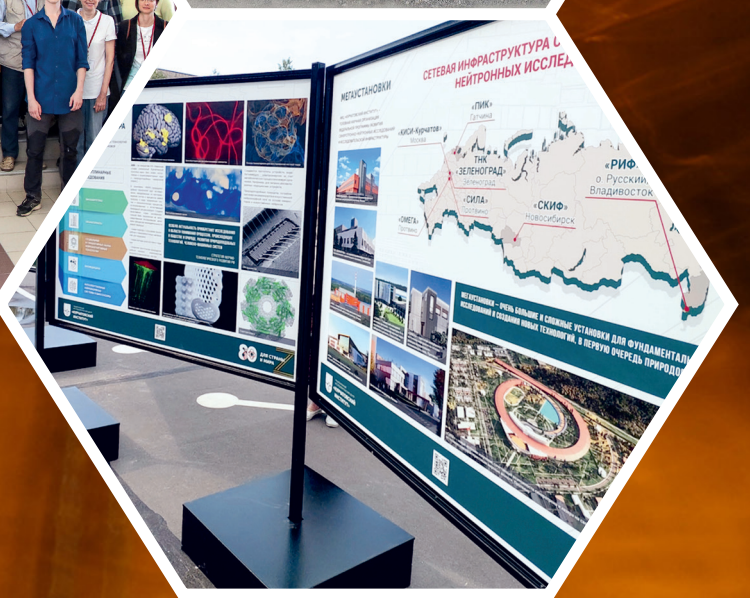
Рис. 2. Сравнение восстановленных (*черные точки*) и реально сгенерированных (*красные линии*) дифференциальных спектров рождения мезонов: *а* – $\rho(770)^0$; *б* – $K^*(892)^0$; *в* – $\phi(1020)$ для случая Bi + Bi-столкновений при энергии $\sqrt{s_{NN}}$ = 9,2 ГэВ

MPD Collab., Riabov V. // XXV Int. Baldin Seminar on High Energy Physics Problems “Relativistic Nuclear Physics and Quantum Chromodynamics”. Dubna, 2023. https://indico.jinr.ru/event/3694/contributions/22464/attachments/16738/28529/MPD-NICA_VRiabov_ISHEPP2023.pdf

NATIONAL RESEARCH CENTER «KURCHATOV INSTITUTE»
HIGH FLUX RESEARCH REACTOR PIK

РЕАКТОР ПИК

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»
ФГБУ «Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова»


МЕГАУСТАНОВКИ
«ПИК»
«ТНК «ЗЕЛЕНОГРАД»
«СИЛА»
«ОМЕГА»
«СКИФ»
Новосибирск
«РИФ»
о. Русский, Владивосток

Научно-организационная деятельность

110 Кадровый состав

112 Количественные показатели научной и образовательной деятельности

118 Награды. Премии

123 Научные мероприятия

128 Новости науки

Кадровый состав

Численность сотрудников

Профессиональные квалификационные группы должностей	2021	2022	2023
Всего без учета совместителей	1 970	1 878	1 868
Всего научных сотрудников	462	405	383
Из них с должностью			
руководителя	60	57	55
главного научного сотрудника	9	9	8
ведущего научного сотрудника	44	38	37
старшего научного сотрудника	140	126	111
научного сотрудника	83	58	52
младшего научного сотрудника	53	51	48
прочие научные сотрудники	73	66	70
С ученой степенью			
доктора наук	59	53	53
кандидата наук	203	177	162
С ученым званием			
академика	–	–	–
члена-корреспондента	1	1	1
профессора	6	5	5
доцента (с. н. с.)	74	65	62

Сведения о научном стаже сотрудников

Должность	Численность	В том числе со стажем		
		до 5 лет	более 5 лет	более 10 лет
Зав. лабораторией и отделом	52	–	6	51
Главный научный сотрудник	8	–	–	8
Ведущий научный сотрудник	37	1	1	35
Старший научный сотрудник	111	5	5	101
Научный сотрудник	52	8	13	31
Младший научный сотрудник	48	24	13	11

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	72	77	42	40	151	51
С ученой степенью						
доктора наук	–	–	5	9	39	69
кандидата наук	1	31	24	23	82	58
Не имеют ученой степени	71	46	13	8	30	39
С ученым званием						
академика	–	–	–	–	–	–
члена-корреспондента	–	–	–	–	1	79
профессора	–	–	–	–	5	84
доцента (с. н. с.)	–	–	–	4	58	74

Численность и средний возраст научных сотрудников по должностям

Должность	2021		2022		2023	
	Численность	Средний возраст	Численность	Средний возраст	Численность	Средний возраст
Главный научный сотрудник	9	80	9	78	8	79
Ведущий научный сотрудник	44	66	38	67	37	69
Старший научный сотрудник	140	61	126	61	111	61
Научный сотрудник	83	51	58	49	52	49
Младший научный сотрудник	53	32	51	33	48	34
Руководитель	60	63	57	61	55	60
Прочие научные сотрудники	73	30	66	28	70	28

Структура и штатная численность за 5 лет

Категория персонала	2019	2020	2021	2022	2023
Научный персонал	435,5	450,2	430,4	423,3	395,5
Научно-технический персонал	290,7	296,05	299,4	275,4	253,2
Административно-хозяйственный персонал	1 253,1	1 290,15	1 318,2	1 346,6	1 401,9
Младший обслуживающий персонал	32,5	31,5	31,5	31,5	32,5
Всего по штатному расписанию	2 011,8	2 067,9	2 079,5	2 076,8	2 083,1

Количественные показатели научной и образовательной деятельности

В НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ выполнены все мероприятия, а также достигнуты все целевые индикаторы и показатели, запланированные на 2023 г., в т. ч. за счет субсидии на финансовое обеспечение выполнения государственного задания на 2023 г. (плановый период – 2024 и 2025 гг.).

Сотрудники Института в 2023 г. были авторами и соавторами 763 статей, из них 559 публикаций проиндексированы в базе данных Web of Science («Сеть науки») и ассоциированы с НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, что составляет 73,3 % 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
2019	714/465
2020	674/473
2021	650/446
2022	604/383
2023	763/559

Динамика участия в научных мероприятиях за 5 лет

Год	Количество фактов участия в выставочной деятельности, конференциях, на форумах и т. д.
2019	422
2020	387
2021	417
2022	472
2023	506

Число полученных в 2023 г. международных и российских патентов, правообладателем которых является НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, по виду охранных документов

Объекты патентного права по виду охранных документов			
Патент на изобретение	Патент на полезную модель	Свидетельство на программу для ЭВМ	Всего
9	–	14	23

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

Вид правоохранительного документа	2019	2020	2021	2022	2023
Патент на изобретение	10	5	7	3	9
Патент на полезную модель	2	8	1	3	–
Свидетельство на программу для ЭВМ	12	13	19	16	14
Всего	24	26	27	22	23

В 2023 г. научные исследования сотрудников Института были поддержаны грантами РФФИ (1) и РНФ (24), также имелась поддержка Министерства науки и высшего образования РФ в форме субсидии на реализацию отдельных мероприятий Федеральной научно-технической программы развития синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры на 2019–2027 гг., утвержденной Правительством Российской Федерации от 16.03.2020 № 287 «Об утверждении Федеральной научно-технической программы развития синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры на 2019–2017 годы» в рамках национального проекта «Наука и университеты», а также субсидии на осуществление государственной поддержки создания и развития центра геномных исследований мирового уровня «Курчатовский геномный центр». Имелся один грант президента Российской Федерации на проведение фундаментальных и прикладных научных исследований по приоритетным направлениям науки, технологий и техники Российской Федерации для молодых российских ученых – кандидатов наук и докторов наук.

В 2023 г. в рамках выполнения Программы деятельности НИЦ «Курчатовский институт» на 2023–2027 гг. сотрудники Института защитили 9 кандидатских и 1 докторскую диссертацию.

Подготовка кадров высшей квалификации за 5 лет

Год	Общее число диссертаций / диссертации на соискание ученой степени доктора наук
2019	7/–
2020	9/3
2021	12/2
2022	10/–
2023	10/1

Повышение квалификации работников Института выполняется в соответствии с положением об организации обучения (повышения квалификации, переподготовки) работников НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, утвержденного приказом от 21.08.2023 № 555, и на основании поданных заявок на обучение работников от руководителей структурных подразделений Института.

В 2023 г. было обучено более 200 работников по 80 направлениям повышения квалификации и профессиональной переподготовки, кроме того, 1 200 работников Института прошли внутреннее обучение по темам: «Охрана труда», «Оказание первой помощи».

Также в НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ действует кадровый резерв, реализована система наставничества на основании положений, утвержденных приказами директора Института.

НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ на основании лицензии от 02.06.2017 № 2599 (Л035-00115-47/00097282) на осуществление образовательной деятельности (бессрочно) и свидетельства о государственной аккредитации от 06.07.2020 № 3414 (бессрочно), выданных Федеральной службой по надзору в сфере образования и науки (Рособрнадзор), ведет обучение по программам высшего образования – программам подготовки научных и научно-педагогических кадров высшей квалификации в аспирантуре по очной форме обучения за счет бюджетных ассигнований федерального бюджета.

Подготовка осуществляется в соответствии с требованиями федеральных государственных образовательных стандартов высшего образования (ФГОС ВО) по следующим направлениям подготовки.

- 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»;

в соответствии с федеральными государственными требованиями по научным специальностям в соответствии с Номенклатурой, утвержденной приказом Министерства науки и высшего образования РФ от 24.02.2021 № 118:

1.3.3. «Теоретическая физика» (физ.-мат. науки),
1.3.8. «Физика конденсированного состояния» (физ.-мат. науки),
1.3.15. «Физика атомных ядер и элементарных частиц», «Физика высоких энергий» (физ.-мат. науки),
1.5.2. «Биофизика» (физ.-мат. науки),
1.5.4. «Биохимия» (биол. науки),
1.5.7. «Генетика» (биол. науки),
3.3.3. «Патологическая физиология» (биол. науки).

В 2023 г. на обучение в аспирантуру Института было принято 3 человека в соответствии с установленными приказом Министерства науки и высшего образования РФ от 29.04.2022 № 400 контрольными цифрами приема (КЦП): 2 человека по группе научных специальностей 1.3. «Физические науки», 1 человек по группе научных специальностей 1.5. «Биологические науки».

В 2023 г. состоялся третий выпуск из аспирантуры Института. Всего было выдано 5 дипломов об окончании аспирантуры, подтверждающих успешное завершение обучения по программам аспирантуры как третьей ступени высшего образования по 2 направленностям подготовки (по ФГОС ВО): «Физика конденсированного состояния» (2 диплома), «Биофизика» (3 диплома).

Общая численность аспирантов на конец 2023 г. составляла 43 человека.

В 2023 г. Институт участвовал в открытом конкурсе Министерства науки и высшего образования РФ по распределению КЦП граждан на обучение по программам аспирантуры за счет бюджетных ассигнований федерального бюджета на 2024/25 учебный год. Были получены КЦП по группам научных специальностей: 1.3. «Физические науки» – 3 места, 1.5. «Биологические науки» – 3 места.

В 2023 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 30,4 %.

В подразделениях НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ в 2023 г. выполняли учебно-исследовательские и научные работы, проходили практику, готовили выпускные квалификационные работы бакалавров и специалистов, а также магистерские диссертации 239 студентов вузов Санкт-Петербурга (Санкт-Петербургского государственного университета (СПбГУ), Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета) и т. д.) и других городов Российской Федерации.

В 2023 г. заключено 4 договора с новыми вузами и 1 ссузом, география приема практикантов расширяется: Донской государственный технический университет, Новосибирский государственный технический университет, Самарский государственный технический университет, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Петровский колледж. Уже в следующем году студенты будут проходить практику в подразделениях НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ. Ответственным подразделением за организацию практики, стажировок является Центр по подготовке персонала.

Помимо практик в качестве привлечения молодежи в НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ действует целевой прием на обучение, в соответствии с которым после обучения для трудоустройства гарантированно придут молодые специалисты. Ежегодно подается около 25 заявок на участие в целевом конкурсе. Так, в 2023 г. было заключено 10 договоров на целевое обучение.

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

Год	Количество студентов
2019	127
2020	154
2021	175
2022	244
2023	239

НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, стремясь популяризировать науку и заинтересовать молодежь в получении профильного естественно-научного образования, занимается организацией и проведением экскурсий по объектам Института: на ускорительный комплекс (СЦ-1000 и Ц-80), реакторный комплекс ПИК, в Отделение молекулярной и радиационной биофизики и другие научные подразделения, участвует в профориентационной и просветительской работе со школьниками.

В соответствии с договором от 28.12.2018 «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», МБОУ «Гатчинская СОШ № 2», МБОУ «Гатчинская СОШ № 7», АНОО «Гатчинская гимназия «Апекс», МБОУ ДО «ГЦНО «Центр информационных технологий», МБУ «Централизованная библиотечная система города Гатчины», МБОУ ДО «Информационно-методический центр») сотрудниками Института ведется работа с обучающимися, включающая чтение научно-популярных лекций, отбор перспективных учащихся и проведение с ними практических занятий по углубленному изучению физики, биологии, химии и математики.

Мероприятия, проведенные НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ в 2023 г.

Наименование мероприятия	Время проведения	Количество участников / охват аудитории
Научно-популярная лекция, приуроченная к памятным датам: 80-летию прорыва блокады Ленинграда и 120-летию со дня рождения выдающихся ученых И. В. Курчатова и А. П. Александрова, «Наука на войне: вклад отечественных ученых в Великую Победу» – для учащихся школ Санкт-Петербурга и Гатчинского района Ленинградской области	Январь	> 40
День российской науки	Февраль	> 50
Тематическая профильная смена «Коды Курчатова» для обучающихся из 11 образовательных организаций Санкт-Петербурга	Март	125
Специальная «интеллектуальная смена» для одаренных учеников школ Гатчинского муниципального района, участвующих во Всероссийской олимпиаде школьников	Март	~ 40
Конкурс видеороликов «Science Talk: свободно о науке»	Май – ноябрь	> 25
Конкурс детского рисунка «Наука глазами детей»	Сентябрь – ноябрь	150
Участие в акции «Неделя без турникетов», проводимой в рамках Всероссийского проекта «Работай в России», организованной для школьников Гатчинским филиалом ГКУ «Центр занятости населения Ленинградской области»	В течение года	> 400
Лекции для школьников Ленинградской области и Санкт-Петербурга в рамках взаимодействия с филиалом Российского общества «Знание» в Ленинградской области и участие во всероссийском проекте «В гостях у ученого»	В течение года	> 500
Серия научных постов (публикаций) в социальной сети «ВКонтакте»	В течение года	> 1 000
Мероприятия программы «Школьная экологическая инициатива», «Эко-шоу», летний научно-экологический лагерь «ЭКО-2023», сборник «Молодые таланты – 2023»	В течение года	> 2 000
Курс лекций для учащихся 10-х классов, лабораторный практикум по физике и биологии для учащихся 11-х классов Академической гимназии им. Д. К. Фаддеева СПбГУ	В течение года	~ 40
Курс лекций для учащихся центров образования «Точка роста» школ Гатчинского муниципального района	В течение года	~ 600
Курс научно-популярных лекций для учащихся 9–11-х классов Гатчины и Гатчинского муниципального района	В течение учебного года	> 300
Экскурсии для учащихся и учителей Санкт-Петербурга и Ленинградской области	В течение года	> 3 000

В рамках реализации национального проекта «Образование» Институт осуществляет взаимодействие с образовательными центрами «Точка роста» в школах Гатчинского муниципального района, среди которых: МБОУ «Вырицкая СОШ № 1», МБОУ «Дружногорская СОШ», МБОУ «Большеколпанская СОШ», МБОУ «Пудостьская СОШ», МБОУ «Никольская СОШ», МБОУ «Пригородная СОШ», МБОУ «Коммунарская СОШ № 3», МБОУ «Лукашевская СОШ».

Институт принимает участие в реализации проекта «Курчатовские классы» на базе школ Санкт-Петербурга: заключены договоры о сотрудничестве с ГБОУ «СОШ № 257 Пушкинского района», ГБОУ «Гимназия № 631 Приморского района», ГБОУ «СОШ № 334 Невского района», ГБОУ «СОШ № 703 Московского района», ГБОУ «Гимназия № 406 Пушкинского района», ГБОУ «СОШ № 47 Петроградского района», ГБОУ «Лицей № 395 Красносельского района»,

ГБОУ «Лицей № 226 Фрунзенского района», ГБОУ «Гимназия № 171 Центрального района», ГБОУ «СОШ № 225 Адмиралтейского района», ГБОУ «Лицей № 281 Адмиралтейского района», ГБОУ «Лицей № 179 Калининского района», ГБОУ «Гимназия № 426 Петродворцового района», ГБОУ «СОШ № 77 Петроградского района».

В Научно-образовательном центре НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, а также на территории Института читаются лекции, проводятся мастер-классы, викторины и 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 школ Санкт-Петербурга: 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 Института в частности. Используются VR-продукты для демонстрации, а также интерактивный и физический макеты установок, разработанные сотрудниками Центра по подготовке персонала.

В рамках соглашения о сотрудничестве между СПбГУ и НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ сотрудники Института читают лекции и проводят лабораторные практикумы 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 «Школьная экологическая инициатива» – «Молодые таланты», направленный на экологическое воспитание детей и подростков. В 2023 г. состоялись творческие конкурсы, олимпиады, экологические акции, в которых приняли участие около 3 000 юных жителей Гатчины, Гатчинского района, Ленинградской области, Санкт-Петербурга и других регионов Российской Федерации.

Награды. Премии

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

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 2023 г. среди победителей традиционно есть работы и авторские коллективы НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ.

Среди работ молодых научных сотрудников и инженеров-исследователей победила работа *Р. А. Ниязова* «Интерферометрия на основе геликоидальных краевых состояний», выполненная на базе ОТФ. Полученные в работе результаты помогут объяснить текущие эксперименты с двумерными топологическими изоляторами, стимулировать проведение экспериментальных измерений транспортных характеристик электронов в зависимости от магнитного поля в высокотемпературном режиме и найти новые области применения геликоидальных квантовых интерферометров. Это может быть важно со стороны возможного применения в спинтронике, детектировании магнитного поля, а также квантовых вычислениях.

Динамика получения премии имени И. В. Курчатова сотрудниками НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ за 5 лет

Номинация конкурса	2019	2020	2021	2022	2023
В области научных исследований	1	1	–	1	–
В области инженерных и технологических разработок	–	–	–	–	–
Среди работ молодых научных сотрудников и инженеров-исследователей	1	2	3	–	1
Среди студенческих работ	3	1	1	1	–
Всего	5	4	4	2	1

В 2023 г. 7 сотрудников НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ продолжали получать **именные научные стипендии губернатора Ленинградской области на 2022–2023 гг.**: 2 сотрудника – в категории «молодые ученые» и 5 сотрудников в категории «ведущие ученые».

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

- *О. Ю. Андреев*, ведущий научный сотрудник лаборатории квантовой химии ОПР;
- *В. Т. Лебедев*, заведующий лабораторией нейтронных физико-химических исследований ОНИ;
- *С. Н. Пчелина*, заведующая лабораторией молекулярной генетики человека ОМРБ;
- *О. В. Сироткина*, ведущий научный сотрудник ОМРБ;
- *А. К. Фомин*, ведущий научный сотрудник лаборатории физики нейтрона ОНИ.

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

- *А. Э. Копытова*, аспирант ОМРБ;
- *В. А. Лямкин*, научный сотрудник ОНИ.

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.

Премию губернатора Ленинградской области за вклад в развитие науки и техники в Ленинградской области получил ведущий научный сотрудник ОНИ доктор физико-математических наук *А. К. Фомин*. Его работа «Разработка программного обеспечения для моделирования экспериментов с ультрахолодными нейтронами и нейтрино» победила в номинации «За достижения в области цифровых и информационных технологий».

Премия губернатора Ленинградской области первой степени за лучшую научно-исследовательскую работу присуждена младшему научному сотруднику ОМРБ кандидату биологических наук *А. Э. Копытовой*. Она занимается разработкой новых таргетных препаратов для терапии болезни Паркинсона и болезни Гоше.

Заместитель председателя правительства Ленинградской области – председатель комитета экономического развития и инвестиционной деятельности Д. А. Ялов лично вручил награды ученым в День российской науки.

Заместитель руководителя ОПР по науке кандидат физико-математических наук *Константин Николаевич Ермаков* получил благодарность уполномоченного по правам человека в Российской Федерации Т. Н. Москальковой. Многие годы Константин Николаевич совмещает научную деятельность с общественной: в настоящее время является председателем гатчинского общества «Жители блокадного Ленинграда» и общественным помощником уполномоченного по правам человека в Ленинградской области С. С. Шабанова, который и вручил К. Н. Ермакову высокую награду. Благодарность вынесена за активную общественную деятельность по защите прав и свобод человека и гражданина.

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, В. М. Лобашеве и А. А. Воробьеве, 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,
- стипендия имени А. А. Воробьева за работы в области физики высоких энергий и физики элементарных частиц.

В 2023 г. 5 молодым сотрудникам Института присудили данные именные стипендии.

Стипендия имени С. Е. Бреслера за работы в области биологии в этом году присуждена лаборанту-исследователю ОМРБ *А. Э. Копытовой* за работу «Восстановление функции глюкоцереброзидазы

с использованием фармакологических шаперонов на пациент-специфичных клетках при болезни Паркинсона и болезни Гоше».

Стипендия имени В. Н. Грибова за работы в области теоретической физики присуждена лаборанту-исследователю ОТФ *А. С. Щербакову* за работу «Динамический диамагнетизм в легкоплоскостном антиферромагнетике в наклонном магнитном поле».

Стипендия имени Г. М. Драбкина за работы в области физики конденсированного состояния присуждена лаборанту-исследователю ОНИ *Д. О. Сканченко* за работу «Эволюция магнитной фазовой диаграммы в соединениях $Mn_{1-x}Fe_xGe$ под воздействием внешнего квазигидростатического давления».

Стипендия имени В. М. Лобашева за работы в области ядерной физики присуждена лаборанту-исследователю ОНИ *И. С. Ломской* за работу «Поиск редких низкоэнергетических событий от астрофизических источников с детектором Borexino».

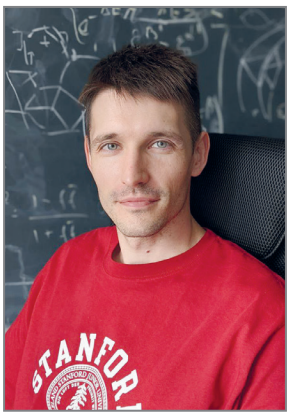
Лауреатом ***стипендии имени А. А. Воробьева*** за работы в области физики высоких энергий и физики элементарных частиц стал лаборант-исследователь ОФВЭ *Д. Пуджа* за работу «Модернизация передней части мюонного спектрометра детектора ATLAS».

Конкурс на соискание именных стипендий – прекрасная традиция, которая поощряет научную молодежь Института ярче проявлять творческую активность, повышая планку своей исследовательской деятельности, а также хранит и продолжает память о тех, кто долгие годы вел коллектив НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ к научным высотам.

Д. В. Чубуков

Стипендию Президента Российской Федерации для молодых ученых и аспирантов, осуществляющих перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики на 2021–2023 гг., продолжал получать *Д. В. Чубуков* (СП-1213.2021.2 «Исследование свойств молекулярных систем и их применения для поиска *P, T*-нечетных взаимодействий в природе»).

Сотрудник ОТФ *Р. А. Ниязов* проводил свои исследования в рамках **гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук** № МК-2918.2022.1.2 в научном направлении «Физические науки» по теме «Теоретическое исследование шумовых характеристик топологических квантовых интерферометров».



Р. А. Ниязов

На конкурсе научных работ НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ 2023 г. комиссия рассмотрела 26 работ по 8 направлениям: «Теоретическая физика», «Ядерная физика низких энергий», «Биологические исследования», «Физика конденсированного состояния», «Ядерная физика высоких энергий», «Методические исследования», «Прикладные исследования», «Монографии и учебные пособия».

На основании экспертных оценок после всестороннего обсуждения комиссия решила присудить премии следующим работам.

Первые премии:

• ***в области ядерной физики высоких энергий*** – «Первое измерение *t*-зависимости сечения когерентного фоторождения J/Ψ в ультрапериферических столкновениях ядер свинца на БАК и трехмерная картина ядерных

глюонных распределений» (*ALICE Collab., 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 и др.*);

• ***в области теоретической физики*** – «Поиск инстантона КХД в дифракционных процессах на БАК» (*М. Г. Рыскин, В. А. Хозе, V.V. Khoze, D. Milne, M. Tasevsky*); «Новый теоретический метод изучения спиновой динамики в магнетиках со спином ½» (*А. В. Сыромятников, А. Ю. Актерский*);

• ***в области физики конденсированного состояния*** – «Магнетизм слоистых теллуратов A_2MnTeO_6 (*A* = Li, Na, Ag, Tl) с сотовой кристаллической и треугольной магнитной подрешетками» (*А. И. Курбаков, А. Е. Суслопарова, Е. Л. Вавилова, А. Н. Васильев, Т. М. Васильчикова, Д. А. Гафуров, К. В. Захаров, Е. А. Зверева, В. Б. Налбандян, Г. В. Раганян, H.-J. Koo, V. Pomjakushin, M.-H. Whangbo*);

• ***в области биологических исследований*** – «Апробация эффективности бор-протон-захватной терапии на клеточных моделях» (*Т. А. Штам, В. С. Бурдаков, А. В. Гарина, Л. А. Гараева, А. В. Волницкий, Д. А. Амерканов, Ф. А. Пак, К. А. Шабалин, Н. А. Верлов, Е. М. Иванов, В. Ф. Ежов, Д. В. Лебедев, А. Л. Коневега, Е. Куус, Г. Андреев, А. Любинский*);

• ***в области методических исследований*** – «Исследование систематических эффектов в экспериментах по измерению времени жизни нейтрона методом хранения УХН в магнитных ловушках» (*А. З. Андреев, Б. А. Базаров, А. Г. Глушков, В. Ф. Ежов, В. А. Князьков, Н. А. Коврижных, Г. Б. Крыгин, В. Л. Рябов, P. Geltenbort*);

• ***в области прикладных исследований*** – «Источник ультрахолодных нейтронов для РК ПИК» (*А. П. Серебров, В. А. Лямкин, А. К. Фомин, А. О. Коптюхов, М. С. Онегин, Н. А. Коваленко*);

• ***монографии и учебные пособия*** – «История и развитие физических представлений о строении окружающего мира» (*В. В. Федоров*).

Вторые премии:

• ***в области ядерной физики низких энергий*** – «Неравновесный гидродинамический подход для описания эмиссии высокоэнергетических вторичных частиц в столкновениях тяжелых ионов промежуточных энергий» (*К. А. Гриднев, А. Т. Дьяченко, И. А. Митропольский, W. Greiner*); «Прямые высокопрецизионные измерения масс сверхтяжелых нуклидов на установке SHIPTRAP» (*SHIPTRAP Collab., Ю. И. Гусев, С. А. Елисеев, Т. В. Конева, Ю. В. Нечипоренко, Ю. Н. Новиков, А. В. Попов, С. В. Ченмарев, О. И. Безроднова, Г. К. Воробьев, Н. С. Мартынова, Д. А. Нестеренко, П. Е. Филянин и др.*);

• ***в области ядерной физики высоких энергий*** – «Поиски невидимых распадов бозона Хиггса на частицы темной материи в эксперименте ATLAS» (*ATLAS Collab., 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 и др.*);

• ***в области теоретической физики*** – «Теоретические исследования нейтроноизбыточных и нейтронодефицитных нечетно-нечетных ядер областей *A* ~ 100 и *A* ~ 132» (*В. И. Исаков*);

• ***в области биологических исследований*** – «Матрица повсюду: внеклеточная ДНК является связующим звеном между биопленкой и минерализацией в планктонной культуре *Bacillus cereus*» (*Л. А. Иванова, Д. В. Лебедев, А. А. Кульминская, В. В. Егоров, Я. А. Забродская, А. Е. Баранчиков, А. Н. Лихолай, Н. В. Цвигун, А. А. Шалджян, А. Д. Япрынцев*);

• ***в области методических исследований*** – «Атомно-силовая микроскопия для исследования механических характеристик внеклеточных частиц плазмы крови» (*В. Ю. Байрамуков, В. С. Бурдаков, С. Б. Ланда, Н. Д. Федорова, М. В. Филатов, Т. А. Штам, А. С. Букатин, Р. А. Камышинский, Е. Б. Пичкур, М. Н. Стародубцева, И. А. Челнокова*);

• ***в области прикладных исследований*** – «Определение отношения интенсивностей линий 3*C* и 3*D* иона Fe^{16+} для диагностики плазмы в астрофизике» (*М. Г. Козлов, С. Г. Порсев, В. А. Ерохин и др.*).

Третьи премии:

• ***в области ядерной физики низких энергий*** – «Поиск резонансного поглощения солнечных аксионов ядрами ^{83}Kr» (*А. В. Дербин, И. С. Драчнев, М. С. Микулич, В. Н. Муратова, Е. В. Унжаков,*

З. А. Ахматов, *С. С. Березин*, *Ю. М. Гаврилюк*, *А. Н. Гангапшев*, *В. В. Казалов*, *В. В. Кузьминов*, *Д. А. Текуева*, *А. Х. Хоконов*, *С. П. Якименко*); «Оболочечный эффект в зарядовых радиусах нейтронно-избыточных изотопов ртути» (*А. Е. Барзах*, *П. Л. Молканов*, *М. Д. Селиверстов*, *Д. В. Федоров и др*);

• ***в области ядерной физики высоких энергий*** – «Измерение сечений рождения *Z*-бозона в *pp*-взаимодействиях при $\sqrt{s}$ = 13 ТэВ» (*LHCb Collab.*, *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*, *П. В. Кравченко*, *О. Е. Маев*, *Д. А. Майсузенко*, *Н. Р. Сагидова*, *А. Н. Соловьев*, *И. Н. Соловьев*, *А. Д. Чубыкин*, *В. В. Чуликов и др.*);

• ***в области теоретической физики*** – «Влияние сверхпроводимости на форму плоской зоны» (*В. Р. Шагинян*, *С. А. Артамонов*, *М. Я. Амусья*, *G.S. Japaridze*, *A.Z. Msezane*);

• ***в области физики конденсированного состояния*** – «Исследование магнитного поведения двущелевых сверхпроводников» (*А. А. Быков*, *С. В. Григорьев*, *Н. Е. Савицкая*, *К. Ю. Терентьев и др.*);

• ***в области биологических исследований*** – «Обмен холестерина и тяжесть течения COVID-19» (*Т. С. Усенко*, *В. В. Мирошникова*, *А. И. Безрукова*, *К. С. Башарова*, *А. Д. Изюмченко*, *М. А. Николаев*, *С. Б. Ланда*, *С. Н. Пчелина*, *И. Н. Власов*, *Е. Г. Гаврилова*, *А. А. Пантелеева*, *Ю. С. Полушин*, *П. А. Слонимский*, *М. И. Шадрина*, *И. В. Шлык*);

• ***в области прикладных исследований*** – «Компактный нейтронный источник на базе радионуклида ^{252}Cf и кремниевого полупроводникового детектора, предназначенный для проведения калибровки детекторов темной материи и нейтринных детекторов: часть первая – исследования радиационной стойкости Si(Li)- и Si-ПБ-детекторов» (*Н. В. Базлов*, *С. В. Бахланов*, *Е. Ф. Бубнов*, *А. В. Дербин*, *И. С. Драчнев*, *Д. В. Иванов*, *Г. А. Изегов*, *О. И. Коньков*, *А. М. Кузьмичев*, *И. М. Котина*, *И. С. Ломская*, *М. С. Микулич*, *В. Н. Муратова*, *Н. В. Ниязова*, *Д. А. Семенов*, *М. В. Трушин*, *Е. В. Унжаков*, *Е. А. Чмель*, *Д. В. Данилов*, *И. Д. Чернобровкин*).

Конкурсная комиссия отметила ***специальной премией*** многолетнюю работу *С. И. Сухоручкина* в области систематики ядерных данных, оригинальные результаты и преданность избранному направлению исследований.

Научные мероприятия

Общеинститутские семинары

17 января. Ядерный семинар ОФВЭ. *Г. Е. Гаврилов.* «Происхождение спонтанного самоподдерживающегося тока в пропорциональных камерах экспериментов на LHC (по результатам исследований детекторов LHCb и CMS)».

19 января. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ. *И. И. Страковский* (Университет Джорджа Вашингтона, США). «Легкие барионные резонансы: ограничения и перспективы (автор посвятил доклад Я. И. Азимову)».

24 января. Ядерный семинар ОФВЭ. *А. А. Дзюба.* «Изучение рождения *Z*-бозонов в *pp*-взаимодействиях при $\sqrt{s}$ = 13 ТэВ в эксперименте LHCb».

31 января. Ядерный семинар ОФВЭ. *В. В. Кольцов* (Радиевый институт им. В. Г. Хлопина). «Ядерные изомеры как инструмент для исследования влияния нулевых колебаний электромагнитного поля на вероятность спонтанных электромагнитных переходов».

2 февраля. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ. *Г. Б. Сафронов* (Институт ядерных исследований РАН). «Глубоководный нейтринный телескоп Baikal-GVD: цель эксперимента, состояние установки и последние результаты».

7 февраля. Ядерный семинар ОФВЭ. *Н. П. Топчиев* (Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН). «Высокоэнергичная γ-астрономия и современное состояние проекта „ГАММА-400“».

9 февраля. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ. *М. Г. Рыскин.* «Поляризации в инклюзивных процессах (non-perturbative effects)».

14 февраля. Ядерный семинар ОФВЭ. *В. В. Кореньков* (Лаборатория информационных технологий им. М. Г. Мещерякова Объединенного института ядерных исследований). «Распределенные и гибридные вычисления для масштабных научных проектов».

15 февраля. Семинар ОПР. *В. С. Бобровников* (Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН). «Исследование радиационного старения материалов на пучке быстрых нейтронов в ИЯФ СО РАН».

16 февраля. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ. *А. П. Серебров.* «Результат эксперимента „Нейтрино-4“, стерильные нейтрино и темная материя, четвертое нейтрино и постоянная Хаббла».

21 февраля. Ядерный семинар ОФВЭ. *А. В. Дербин.* «Регистрация солнечных CNO-нейтрино в эксперименте Borexino».

28 февраля. Ядерный семинар ОФВЭ. *А. Ю. Воронин* (Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН). «Квантовые гравитационные состояния антиводорода и изучение гравитационных свойств антиводорода в эксперименте GBAR, CERN».

1 марта. Теоретический семинар ОПР. *А. В. Зайцевский.* «Моделирование возбужденных состояний и электронных переходов ThO».

2 марта. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ. *А. П. Серебров.* «Эксперимент „Нейтрино-4“. Сравнение результатов с другими экспериментами».

7 марта. Ядерный семинар ОФВЭ. *В. М. Мочалов* (НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ). «Исследование спиновых эффектов на установке СПАСЧАРМ на ускорителе У-70».

9 марта. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ. *Ю. А. Кульчицкий* (Объединенный институт ядерных исследований). «Исследование KNO-скейлинга в *pp*-взаимодействиях при энергиях от 0,9 до 13 ТэВ на данных эксперимента ATLAS на БАК».

21 марта. Ядерный семинар ОФВЭ. *Н. В. Никитин* (физический факультет Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ). «Неравенства Белла и их нарушение».

23 марта. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ. *Аурел Булгак* (Университет штата Вашингтон, США). «Раскрытие многих аспектов динамики неравновесного деления ядер: квантовый подход в реальном времени».

28 марта. Ядерный семинар ОФВЭ. *М. В. Смирнов* (Университет им. Фридриха – Александра, Центр астрофизики в Эрлангене, Германия). «Нейтринная физика в эксперименте KM3NeT/ORCA».

30 марта. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ. *В. М. Шабаев* (Санкт-Петербургский государственный университет, НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ). «Как можно наблюдать распад вакуума в низкоэнергетических столкновениях тяжелых ионов».

4 апреля. Ядерный семинар ОФВЭ. *В. А. Орешкин.* «Современный статус измерений свойств бозона Хиггса в CMS».

6 апреля. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ. *И. И. Страковский* (Университет Джорджа Вашингтона, США). «Пороговое фоторождение векторных мезонов: от омеги до ипсилона».

11 апреля. Ядерный семинар ОФВЭ. *М. Д. Селиверстов.* «Исследование процессов эффузии, поверхностной и лазерной ионизации в мишенно-ионном устройстве для проекта ИРИНА».

13 апреля. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ. *А. В. Иванчик* (Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН). «Нейтринная астрофизика. Космологические нейтрино».

18 апреля. Ядерный семинар ОФВЭ. *В. А. Мурзин.* «Поиск тяжелых резонансов на детекторе CMS Большого адронного коллайдера».

20 апреля. Теоретический семинар по ФКС. *А. Е. Суслопарова.* «Магнетизм слоистых теллуратов A_2MnTeO_6 (A = Li, Na, Ag, Tl) с сотовой кристаллической и треугольной магнитной подрешетками».

25 апреля. Ядерный семинар ОФВЭ. *С. А. Елисеев* (Институт ядерной физики Общества Макса Планка, Германия). «Ловушки Пеннинга для фундаментальной физики на примере установок SHIPTRAP и PENTATRAP».

16 мая. Ядерный семинар ОФВЭ. *С. Г. Барсов.* «Аномалия внутренней парной конверсии (X17). Новые измерения в Atomki и другие планируемые»; *А. Б. Гриднев.* «Может ли быть бозон X17 адроном?»

18 мая. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ. *Г. И. Рубцов* (Институт ядерных исследований РАН). «Проблемы и вызовы физики космических лучей ультравысоких энергий».

23 мая. Ядерный семинар ОФВЭ. *Н. И. Воропаев.* «Прецизионное исследование редкого и сверхредкого распадов пиона. Эксперимент PIONEER».

24 мая. Семинар ОМРБ. *Ю. В. Котелевцев* (Центр нейробиологии и нейрореабилитации им. В. Л. Зельмана Сколковского института науки и технологий). «Фармакологическая, транскриптомная и клеточная терапия экспериментальных моделей дегенеративных заболеваний».

30 мая. Ядерный семинар ОФВЭ. *А. Е. Барзах.* «Магнитные моменты ядер вблизи магических чисел».

1 июня. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ. *Ю. Л. Докшицер.* «Грибовский сценарий конфайнмента легких кварков».

1 июня. Теоретический семинар по ФКС. *А. А. Ваулин* (Институт физики металлов им. М. Н. Михеева УрО РАН). «Несоизмеримые магнитные структуры и ближний магнитный порядок в редкоземельных интерметаллидах Ho_3Co, Ho_7Rh_3, R_5Pd_2 (R = Ho, Er)».

6 июня. Ядерный семинар ОФВЭ. *С. И. Манаенков.* «Феноменология когерентного электророждения векторных мезонов на бесспиновой мишени».

8 июня. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ. *В. Ф. Ежов.* «Измерения времени жизни нейтронов: состояние и перспективы».

13 июня. Ядерный семинар ОФВЭ. *П. Л. Молканов.* «Исследование изотопов золота методом лазерной спектроскопии».

20 июня. Ядерный семинар ОФВЭ. *Д. В. Федоров.* «CERN–MEDICIS: производство перспективных радионуклидов для ядерной медицины».

12 сентября. Ядерный семинар ОФВЭ. *А. Ю. Егоров.* «Поиск эффектов БФКЛ-эволюции при образовании пар адронных струй с большим разделением по быстроте в *pp*-взаимодействиях при энергиях Большого адронного коллайдера (по материалам кандидатской диссертации)».

19 сентября. Ядерный семинар ОФВЭ. *Ю. В. Нечипоренко.* «Сверхтяжелые нуклиды и перспективы их изучения».

20 сентября. Семинар ОМРБ. *С. Ю. Таскаев* (Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирский государственный университет). «Ускорительный источник нейтронов VITA и его приложения».

21 сентября. Общеинститутский семинар. *А. А. Захаров.* «Концепция детектора сверхбольшого объема для высокоэнергетичных нейтрино».

26 сентября. Ядерный семинар ОФВЭ. *В. Т. Ким.* «Процессы рассеяния при высоких энергиях в режиме БФКЛ с учетом следующих за ведущими вкладами».

3 октября. Ядерный семинар ОФВЭ. *В. В. Сулимов.* «Гравитационные волны. Поиски и открытия».

5 октября. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ. *Ф. Ф. Карпешин* (Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева). «Резонансная оптическая накачка 8,3-эВ изомера ^{229m}Th».

10 октября. Ядерный семинар ОФВЭ. *В. П. Незнамов* (Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики). «Квантовая электродинамика с пустым фермионным вакуумом. Возможности экспериментальной верификации».

11 октября. Теоретический семинар ОПР. *А. Н. Петров.* «Расчет систематических эффектов в эксперименте по поиску электрического дипольного момента электрона на катионе HfF^+».

12 октября. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ. *И. И. Страковский* (Университет Джорджа Вашингтона, США). «Проявление экзотического P_c (4312)+ в данных эксперимента GlueX по энергетической зависимости сечения процесса $\gamma p \to J/\psi$?»

17 октября. Ядерный семинар ОФВЭ. *Ю. Г. Нарышкин.* «Первое наблюдение эффекта „квантовой запутанности“ при анализе спиновых корреляций в парном рождении топ- и антитоп-кварков в эксперименте ATLAS».

19 октября. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ. *В. А. Хозе.* «Процессы центрального эксклюзивного рождения на БАК (избранные вопросы)».

24 октября. Ядерный семинар ОФВЭ. *В. В. Чуликов.* «Изучение рождения очарованных барионов в эксперименте LHCb».

25 октября. Теоретический семинар ОПР. *А. Н. Петров.* «Электронные матричные элементы для расчета *l*-удвоения в YbOH».

31 октября. Ядерный семинар ОФВЭ. *О. В. Зенин* (НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ). «Адронный вклад в аномальный магнитный момент мюона: оценка с использованием базы данных полных сечений ИФВЭ».

2 ноября. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ. *М. Г. Рыскин.* «Перестройка цветовых потоков и инклюзивное рождение J/ψ-мезонов».

7 ноября. Ядерный семинар ОФВЭ. *В. В. Лукашевич.* «Нарушение симметрий при рассеянии нейтронов и группа Лоренца».

8 ноября. Теоретический семинар ОПР. *А. С. Румянцев.* «Тензорное разложение и его применение для ускорения решения уравнений метода связанных кластеров».

14 ноября. Ядерный семинар ОФВЭ. *А. Е. Шевель.* «Мониторинг больших технических систем».

15 ноября. Теоретический семинар ОПР. *С. А. Гуревич* (Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН). «Кластеры углерода и кремния и новые материалы на их основе».

16 ноября. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ. *В. А. Хозе.* «Центральное эксклюзивное рождение на БАК (часть 2) – сага о ди-мезонах».

21 ноября. Ядерный семинар ОФВЭ. *А. И. Львов* (Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН). «Комптоновское рассеяние и поляризуемости нуклонов».

22 ноября. Теоретический семинар ОПР. *И. М. Саитов* (Объединенный институт высоких температур РАН). «Образование проводящего состояния разогретого плотного водорода при сверхвысоких давлениях; первопринципное исследование (по материалам докторской диссертации)».

23 ноября. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ. *Е. Л. Крышень.* «Фоторождение векторных мезонов в ультрапериферических столкновениях на Большом адронном коллайдере (материалы докторской диссертации)».

23 ноября. Теоретический семинар по ФКС. *А. Н. Матвеева.* «Особенности магнитного упорядочения мультиферроиков на основе оксида марганца».

28 ноября. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ. *А. М. Федотов* (Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»). «КЭД-процессы в лазерных полях экстремальной интенсивности».

30 ноября. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ. *А. В. Нефедьев* (Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН). «Об экзотических адронах, состоящих из тяжелых кварков».

5 декабря. Ядерный семинар ОФВЭ. *Л. В. Григоренко* (Объединенный институт ядерных исследований). «Замысел и научная программа перспективного комптоновского источника монохроматических γ-квантов НЦФМ».

7 декабря. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ. *Б. Б. Войцеховский.* «Поиск „темного“ фотона с позитронным пучком в JLab».

12 декабря. Ядерный семинар ОФВЭ. *Д. Пуджа.* «Эксперимент AMS-02 на МКС».

14 декабря. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ. *М. Г. Рыскин.* «События без адронов на большом интервале быстрот во взаимодействиях протонов с ядрами».

14 декабря. Теоретический семинар по ФКС. *В. Е. Тимофеев.* «Динамическая восприимчивость скирмионного кристалла».

19 декабря. Ядерный семинар ОФВЭ. *О. В. Миклухо.* «Наблюдение структуры в спектре рассеянных протонов под углом 21 градус в области импульсов, охватывающей квазиупругий *pN*-пик, в инклюзивной реакции (p, p') с ядром ^{12}C при энергии 1 ГэВ».

21 декабря. Теоретический семинар по ФКС. *Д. Н. Аристов.* «Низколежащие моды скирмионного кристалла».

Конференции, школы, совещания

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

В 2023 г. при участии Института было организовано 20 мероприятий (совещаний, конференций и школ).

**Научные мероприятия, проведенные в 2023 г.
в целях повышения квалификации молодых ученых**

Наименование мероприятия	Дата проведения	Место проведения	Количество участников
XXII Зимняя молодежная школа по биофизике и молекулярной биологии	27 февраля – 4 марта	Санкт-Петербург	> 200
VI Конференция по малоугловому рассеянию и рефлектометрии («МУРомец-2023»)	21–23 июня	НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ (Гатчина)	~ 100
9-я Международная конференция и 15-я Международная школа молодых ученых и специалистов им. А. А. Курдюмова «Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами»	3–9 июля	Саров	~ 100
III Летняя школа Совета молодых ученых и специалистов НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ	25–27 августа	д. Скамья Сланцевского района Ленинградской обл.	50
VI Школа «Нейтронные исследования конденсированного состояния» («НИКОНС-2023»)	19–20 октября	Санкт-Петербургский государственный университет (Санкт-Петербург)	> 40
X Всероссийский с международным участием молодежный научный форум Open Science 2023	15–17 ноября	НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ (Гатчина)	~ 300
VIII Молодежная школа реактора ПИК (Профессионализм. Интеллект. Карьера. «ПИК-2023»)	25–29 сентября	НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ (Гатчина)	42
Первая Всероссийская студенческая конференция с международным участием «Наука и практика – 2023» / Science and Practice – 2023	22–24 ноября	Санкт-Петербургский государственный университет (Санкт-Петербург), НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ (Гатчина)	~ 100
Конкурс профессионального мастерства «Лучшие в профессии»	29–30 ноября	НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ (Гатчина)	40
Школа кадрового резерва	6 декабря	НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ (Гатчина)	40
Цикл семинаров по развитию компетенций персонала и личностного роста	В течение года	НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ (Гатчина)	300
Теоретические и практические (семинары и стажировка) занятия для оперативного персонала РК ПИК	В течение года	НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ (Гатчина)	80

Также в течение 2023 г. сотрудники Института участвовали в работе более 105 международных и российских конференций, были сделаны более 500 докладов.

Новости науки

С 27 февраля по 4 марта в Курортном районе Санкт-Петербурга проходила Зимняя молодежная школа НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ по биофизике и молекулярной биологии. В церемонии открытия мероприятия принял участие президент НИЦ «Курчатовский институт», научный руководитель Школы М. В. Ковальчук, который поприветствовал собравшихся студентов, аспирантов, молодых ученых и научных сотрудников российских и зарубежных академических учреждений и прочитал для них лекцию «Природоподобие и современные вызовы».

Молодежная конференция, лекции известных ученых, тематические столы, интеллектуальные игры, мастер-классы, спортивные и культурные мероприятия – комбинация насыщенной научной программы и увлекательного неформального общения Зимней школы, дающая возможность молодым биологам обменяться опытом с коллегами, получить новые знания и идеи для будущих исследований.

В Ленинградской области прошла 55-я Зимняя школа ПИЯФ, проводившаяся Институтом с 13 по 18 марта 2023 г. под Лугой. В течение недели для старшекурсников, аспирантов и молодых научных сотрудников ведущие ученые читали лекции по различным аспектам теоретической и экспериментальной физики атомного ядра, элементарных частиц, атомной физики, астрофизики, космологии, физики и техники реакторов, ядерной медицины и ускорительной физики.

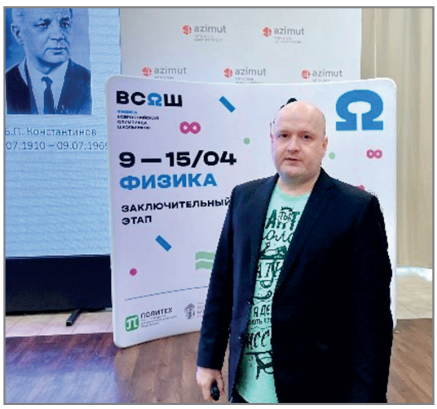
В работе Школы приняли участие около 200 молодых исследователей из различных вузов и научных институтов России, а также из Беларуси, Казахстана и Узбекистана. Молодые участники рассказывали о своих работах в секционных и стендовых сессиях.

21 марта на базе ВДЦ «Смена» состоялась встреча молодых юнармейцев с представителем НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ А. В. Дзенковским. Он прочитал лекцию, в которой рассказал об истории Института, направлениях исследований, исследовательских установках и планах на будущее. В общей сложности лекцию прослушали более 200 человек. Ребята с большим интересом узнавали об устройстве и особенностях реакторных комплексов и ускорителей, задавали множество вопросов о деятельности Института, а также о практическом применении результатов научного труда.

С 27 по 30 марта, во время школьных каникул, в Санкт-Петербурге прошла вторая тематическая профильная смена «Коды Курчатова». На шести площадках старшеклассники из школ, в которых открыты «Курчатовские классы», слушали лекции и участвовали в мастер-классах. Занятия прово-

дили аспиранты и научные сотрудники НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ. В отличие от осенней смены, посвященной физике, темой весенней смены была генетика.

В последний день тематической смены в Академии талантов в Каменноостровском дворце прошла конференция участников проекта в рамках XIII Петербургского международного образовательного форума. Перед участниками конференции с лекцией об установках мегакласса Института выступил ученый секретарь С. И. Воробьев.



13 апреля в отеле «Азимут» в Санкт-Петербурге участники заключительного этапа Всероссийской олимпиады школьников по физике встретились с учеными.

НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ на этой встрече представлял начальник Управления образования кандидат биологических наук А. Ю. Черненков. На лекции в рамках тематической сессии «Физика и передовые технологии» он рассказал о направлениях исследований и главных научных установках Института. Более 300 участников олимпиады со всех уголков России узнали, как развивался НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, чем сегодня занимаются его сотрудники и как стать одним из них.

С 29 мая по 9 июня на базе НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ был проведен летний научно-экологический лагерь «ЭКО-2023» – одна из важных частей в рамках реализации проекта «Молодые таланты» программы «Школьная экологическая инициатива». Организатором лагеря стал Научно-образовательный центр (НОЦ) Института. За 2 недели для 40 увлеченных наукой учеников 5–6-х и 8–10-х классов Гатчинской средней общеобразовательной школы № 9 с углубленным изучением отдельных предметов НОЦ провел интенсивную программу, состоявшую из образовательных семинаров, практикумов и мастер-классов по экологии, химии, физике, генетике, а также научных игр, полевых практик и профориентационных мероприятий, направленных на знакомство с научной деятельностью Института.

Главную свою задачу лагерь выполнил на 100 процентов: ребята получили полное представление о деятельности Института, смогли получить знания и практические навыки, собрать достаточный материал для создания своих исследовательских и научно-практических работ.

С 21 по 23 июня на базе НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ проходила Конференция по малоугловому рассеянию и рефлектометрии («МУРомец-2023»). Это шестое в ряду мероприятий по изучению нанообъектов и наноструктур методами рассеяния нейтронов и рентгеновского излучения.

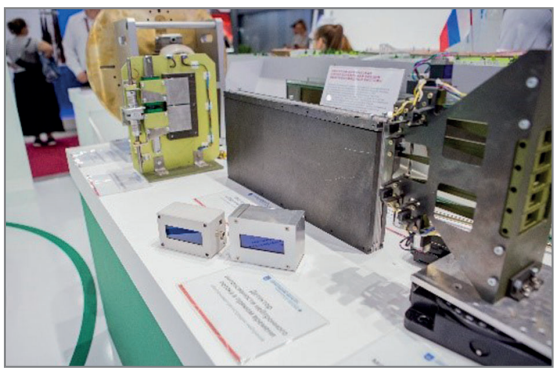
Вся серия конференций обусловлена окончанием фазы строительства высокопоточного реактора ПИК в НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ и приурочена к переводу реакторного комплекса в фазу вывода на энергетическую мощность и оснащения реактора экспериментальным оборудованием.

Не менее важной задачей конференции является активизация деятельности научного сообщества России в области малоуглового рассеяния нейтронов и нейтронной рефлектометрии.

Тематика мероприятия охватывает многие области науки, в которых методы малоуглового рассеяния и рефлектометрии играют важную роль незаменимого инструмента в исследовании объектов физики, химии, биологии, материаловедения.

В конференции принимают участие около сотни ученых, представляющих различные научные организации, в т. ч. НИЦ «Курчатовский институт», Объединенный институт ядерных исследований, Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, Сумгаитский государственный университет, Институт физики металлов УрО РАН, Донецкий национальный университет и др.

В научную программу включены следующие темы: «Малоугловое рассеяние и рефлектометрия для магнетизма», «Для химии и материаловедения», «Для биологии», «Методики и инструменты малоуглового рассеяния и рефлектометрии».



С 14 по 20 августа на территории конгрессно-выставочного центра «Патриот» состоялся IX Международный военно-технический форум «Армия-2023». Мероприятие является ведущей мировой выставкой вооружения и военной техники, а также представляет собой авторитетную площадку передовых идей и разработок в интересах Вооруженных сил Российской Федерации. От НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ на форуме было представлено семь экспонатов, в число которых вошли нейтронно-оптическая суперзеркальная секция нейтроноводной системы реакторного комплекса ПИК, прерыватель нейтронного пучка, формирующий нейтронные импульсы, позиционно-чувствительный газоразрядный счетчик нейтронов, управляемая 2*D*-диафрагма, формирующая размеры нейтронного пучка, прямо показывающий интенсиметр нейтронного излучения, фокусирующее в вертикальной плоскости нейтронный пучок устройство и многоканальный нейтронный коллиматор с применением оксида гадолиния.

16 августа 2023 г. в общественном пространстве «Бульвар науки» в Гатчине открыта уличная экспозиция «Коды Курчатова», приуроченная к 80-летию Курчатовского института и посвященная становлению и развитию атомного проекта, биографиям великих физиков-ядерщиков академиков И. В. Курчатова и А. П. Александрова, установкам «мегасайенс».

23 августа экспозицию посетили руководители Гатчинского муниципального района (ГМР): глава ГМР В. А. Филоненко и глава администрации ГМР Л. Н. Нещадим.

Выставка рассказывает о том, как рождалась традиция «быть первыми для страны и мира», как создавался мирный атом и советский атомный флот, зачем Курчатов и Александров спасали генетику, как междисциплинарная команда ученых в наши дни развивает новые природоподобные технологии и почему наука – это интересно, красиво и перспективно. Один из стендов посвящен мегаустановкам, в частности высокопоточному исследовательскому реактору ПИК в Гатчине.

25–27 августа Совет молодых ученых и специалистов НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ провел III Летнюю школу. Она с успехом прошла на территории туристской базы «Причудье».

Знакомство участников друг с другом, с деятельностью Института и обсуждение вопросов развития – вот основные цели Школы. Приглашенные лекторы рассказали участникам из разных подразделений Института о проектах, реализуемых в НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, и возможных путях развития молодых специалистов в каждом подразделении.

Для участников был организован круглый стол в формате well-being, на котором обсудили волнующие молодых ученых и специалистов вопросы. Лидеры молодежного движения Наталья Петрова и Светлана Шека обсудили с участниками нематериальную стимуляцию каждого работника и выслушали все пожелания молодых сотрудников Института.

С 3 по 6 октября 2023 г. на базе НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ состоялась III Всероссийская конференция с международным участием «Дрозофила-2023». Всего в Гатчине собралось около сотни ученых из различных институтов страны, использующих дрозофилу в своих научных работах, чтобы обсудить современные проблемы фундаментальных и прикладных аспектов исследований, проводимых на ней.

В ходе конференции, посвященной исследованиям на дрозофиле, ученые обсудили актуальные вопросы генетики, молекулярной и клеточной биологии, физиологии, нейробиологии, моделирования заболеваний, эволюционных процессов и др. В программе конференции доклады участников, постерная сессия, круглый стол, конкурс работ молодых ученых и интересная культурная программа.

С 15 по 17 ноября прошел X Всероссийский с международным участием молодежный научный форум Open Science 2023, объединивший около 300 человек – студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов из российских и зарубежных научных институтов. Мероприятие традиционно было организовано силами Совета молодых ученых и специалистов НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ при поддержке дирекции Института.

Насыщенная научная программа форума включала устные и стендовые доклады, запоминающиеся выступления пленарных лекторов из НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, Объединенного института ядерных исследований, Федерального исследовательского центра «Фундаментальные основы биотехнологии» РАН, Института биохимии им. А. Н. Баха РАН.

За свою десятилетнюю историю форум превратился в самобытное, узнаваемое научное событие, число его участников выросло в шесть раз, а организаторам удалось донести до научной молодежи главную идею мероприятия – только объединив усилия и знания в самых разных областях науки

и технологий, можно найти решение глобальных проблем, затрагивающих как все человечество, так и каждого из нас в отдельности.

В рамках заключительного дня форума состоялось награждение победителей конкурса рисунка «Наука глазами детей». Для победителей была организована обзорная экскурсия в НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, в ходе которой ребят познакомили с историей и перспективами развития Института, продемонстрировали его физический макет и интерактивный макет реакторного комплекса ПИК. Также детям и их родителям представилась уникальная возможность оказаться в сердце реактора ПИК, примерив очки виртуальной реальности с разными сценариями отработки действий на пульте управления реактора.

С 22 по 24 ноября на базе физического факультета Санкт-Петербургского государственного университета в Петергофе при участии НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ состоялась Первая Всероссийская студенческая конференция с международным участием Science and Practice 2023. Конференция проводилась в рамках празднования 80-летия НИЦ «Курчатовский институт» и 120-летия со дня рождения академиков И. В. Курчатова и А. П. Александрова.

Основными участниками конференции стали российские и иностранные студенты, обучающиеся по техническим и естественно-научным специальностям. Участники конференции прослушали пленарные выступления приглашенных докладчиков, а также представили свои устные и постерные доклады.

С 28 по 30 ноября делегация НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ приняла участие в работе III Конгресса молодых ученых, который прошел на федеральной территории «Сириус». Молодые ученые познакомились с экспозициями и посетили мероприятия конгресса. Представители Института все дни работали на экспозиции, организованной Национальным исследовательским центром. Выставка была посвящена 80-летию НИЦ «Курчатовский институт» и рассказывала об истории Курчатовского института, заслугах его основателей И. В. Курчатова и А. П. Александрова, а также о ключевых направлениях сегодняшней работы. В рамках направления развития установок класса «мегасайенс» был представлен реакторный комплекс ПИК.

Со 2 по 8 декабря сотрудники НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ приняли участие в международной конференции по нейтронному рассеянию AOCNS-2023, которая проходила в г. Дунгуань (Китай).

AOCNS-2023 является одним из самых крупных мировых форумов для ученых, практикующих рассеяние нейтронов на исследовательских источниках мегакласса. Конференция AOCNS проводится каждые четыре года под патронажем Ассоциации нейтронного рассеяния Азии и Океании (AONSA), которая включает в себя ассоциации Австралии, Китая, Индии, Южной Кореи, Японии. Российское

нейтронографическое общество имеет статус наблюдателя в AONSA. AOCNS-2023 играет важную роль в серии региональных нейтронных конференций наряду с Американской конференцией по рассеянию нейтронов ACNS и Европейской конференцией по рассеянию нейтронов ECNS. В конференции приняли участие более 400 ученых.

Россию представляли два десятка специалистов из российских нейтронных центров – Гатчины, Дубны, Екатеринбурга. Сотрудниками НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ было представлено 13 устных и стендовых докладов. В докладах ученые Института представили свои достижения в области создания новых станций на реакторе ПИК и в области исследования физики конденсированного состояния с помощью рассеяния нейтронов.

НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ присвоен статус базовой организации государств – участников СНГ в области развития высокопроизводительных вычислений и обработки больших данных. Это решение было принято на очередном, 100-м заседании Экономического совета СНГ, которое состоялось в Москве 8 декабря 2023 г.

Функции базовой организации – координация в странах Содружества работы по развитию информационно-коммуникационной инфраструктуры, моделирования, обработки, хранения и анализа больших данных, в т. ч. для проектов класса «мегасайенс».

Страны СНГ заинтересованы в экспертной оценке научных программ, направленных на развитие технологий и математического обеспечения для высокопроизводительных вычислений. Кроме того, НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ будет содействовать развитию исследовательских и образовательных программ в государствах СНГ, а также повышению квалификации специалистов в профильной области базовой организации.

В рамках просветительской деятельности и популяризации науки НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ традиционно ведет большую работу. В течение года силами сотрудников двух подразделений Института – Научно-образовательного центра (НОЦ) и Управления образования – было проведено большое количество мероприятий для учащихся школ.

Продолжается реализация сетевого проекта Института с центрами образования «Точка роста» школ Гатчинского муниципального района в рамках реализации национального проекта «Образование».

В 2023 г. на базе центров «Точка роста» НОЦ было организовано шесть тематических лекций. Все занятия проводились с применением технологий интернет-трансляций, с помощью которых к ним подключались слушатели из других учебных заведений среднего образования – участников проекта. Благодаря применению таких технологий лекции прослушали порядка 2 100 учеников.

По материалам пресс-центра Института

Основные результаты научной деятельности
2023

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

Отпечатано в издательско-полиграфическом отделе
НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ на Konica Minolta AccurioPrint C4065

188300, Гатчина Ленинградской обл., мкр. Орлова роща, д. 1
Зак. 283, тир. 150, уч.-изд. л. 12,6; 15.05.2024.