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

КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ 80 ДЛЯ СТРАНЫ И МИРА

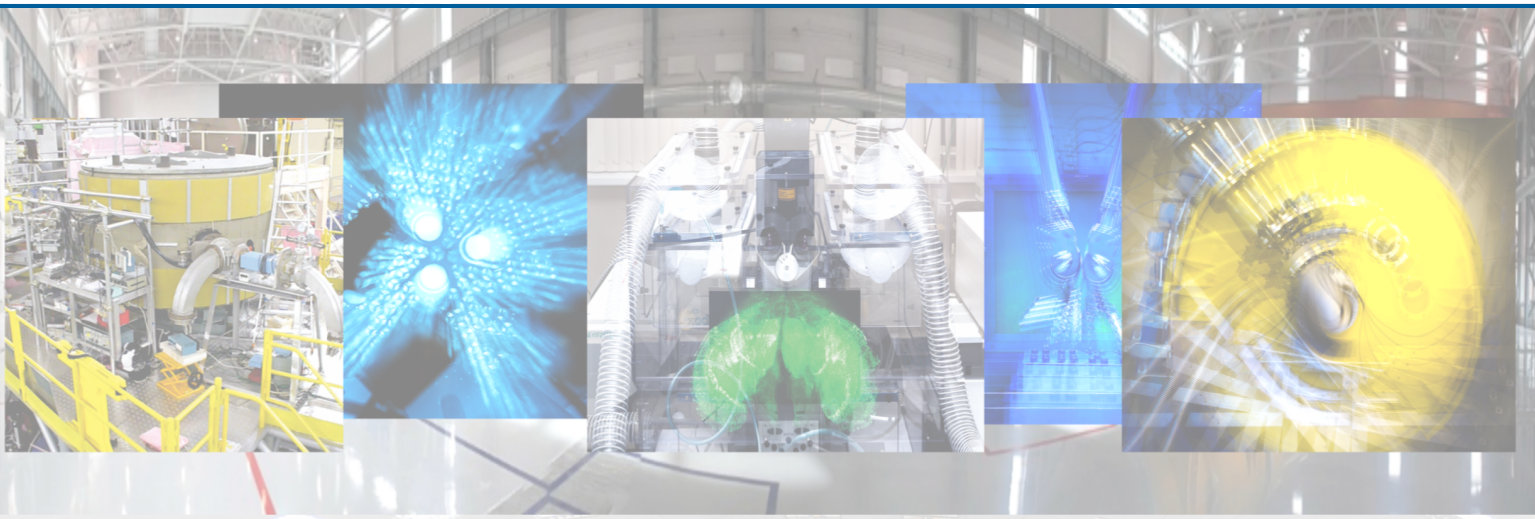


Основные результаты научной деятельности

2022

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

КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ 80 ДЛЯ СТРАНЫ И МИРА



Основные результаты научной деятельности 2022

Гатчина • 2023

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
М. В. Суясова
А. В. Титов
О. Л. Федин
С. Р. Фридман
К. А. Шабалин

Ответственный за выпуск
С. И. Воробьев

Основные результаты научной деятельности – 2022. –
Гатчина Ленинградской обл.: Издательство
НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, 2023. – 127 с.

Данное издание представляет собой сборник кратких описаний наиболее существенных результатов научных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ за 2022 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 978-5-86763-481-0

© НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, 2023

Оглавление

7 Введение

11 Научные отделения

29 Теоретическая и математическая физика

41 Исследования с использованием нейтронов, фотонов и мюонов

47 Исследования с использованием протонов и ионов. Физика нейтрино

65 Биологические исследования

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

77 Физика ядерных реакторов и ускорителей

83 Прикладные исследования и разработки

91 Базовые установки

101 Научно-организационная деятельность

2022
31
десятилетие
науки и технологий

КУРЧАТОВСКИЙ
ИНСТИТУТ

80
ДЛЯ СТРАНЫ И МИРА



1956

1971

2011

2022





Уважаемые коллеги, дорогие друзья!

НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ – многопрофильный междисциплинарный научный центр, который входит в состав Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» с самого начала его образования.

Согласно Указу 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 национального проекта «Наука и университеты» и Федеральной научно-технической программы развития синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры в Российской Федерации на 2019–2027 годы в НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ успешно реализуются проекты на уникальной научной установке класса «мегасайенс» – реакторном комплексе ПИК. В 2022 г. реактор ПИК был планово выведен на очередной уровень мощности до 10 МВт. Активно ведутся работы по изготовлению и поставке 20 экспериментальных станций.

В этом году был сделан серьезный шаг и в части развития ядерной медицины. В 2022 г. завершены проектные работы и получены положительные заключения Главгосэкспертизы на строительство на базе циклотрона 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 онкоофтальмологического комплекса «Око» для лечения злокачественных новообразований глаза и орбиты. Данные комплексы станут частью Научно-образовательного центра ядерной медицины – структуры НИЦ «Курчатовский институт».

Многолетние традиции, уникальный научный, технологический и кадровый потенциал – вот показатели высочайшего профессионализма, энергии и любви к своему делу мощной команды Курчатовского института!

Сегодня НИЦ «Курчатовский институт» – один из крупнейших и признанных в мире исследовательских центров России, ведущий 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 2022 г. в стенах Института трудились 2 028 человек, из них 452 – научные сотрудники, 66 докторов наук и 241 кандидат наук. Один сотрудник является членом-корреспондентом РАН, один – профессором РАН.

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

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

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

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

В Институте работают и создаются базовые установки для физических исследований. Исследовательский реактор ВВР-М, построенный в 1959 г., с 31 декабря 2015 г. находится в режиме длительного останова. На нем долгое время велись фундаментальные и прикладные исследования в области ядерной физики, физики конденсированного состояния, радиационного материаловедения, радиобиологии, а также 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 2022 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 – реактор был планово выведен на очередной уровень мощности до 10 МВт. 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 – созданию 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.

Работа по реализации проекта МЦНИ на базе РК ПИК, энергетический пуск реактора ПИК для проведения фундаментальных и прикладных ис-



следований с использованием нейтронов позволят повысить и усилить роль российских исследовательских проектов и ученых в международной научно-технической кооперации. В результате реализации проекта МЦНИ на базе РК ПИК будут продолжены исследования свойств магнитных материалов и биологических объектов, получены новые знания о свойствах экзотических ядер и фундаментальных взаимодействий, а также разработаны новые технологии для исследования динамики и распределения потока нейтронов.

Институт в 2022 г. организовал более 15 общественно значимых мероприятий (совещания, конференции и школы), среди которых можно отметить: Шестое рабочее совещание по неупругому рассеянию нейтронов «Спектрина-2022», 8-ю Международную конференцию и 14-ю Международную школу молодых ученых и специалистов им. А. А. Курдюмова «Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами», II Летнюю школу Совета молодых ученых и специалистов НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, V Школу «Нейтронные исследования конденсированного состояния» («НИКОНС-2022»), IX Всероссийский с международным участием молодежный научный форум Open Science 2022, VII Молодежную школу РК ПИК (Профессионализм. Интеллект. Карьера. «ПИК-2022»), XI Школу по физике поляризованных нейтронов «ФПН-2022» и др.

В 2022 г. состоялся второй выпуск из аспирантуры Института. Всего было выдано шесть дипломов об окончании аспирантуры, подтверждающих успешное завершение третьей ступени высшего образования по четырем направленностям подготовки (по ФГОС ВО): «Теоретическая физика» (один диплом), «Физика конденсированного состояния» (один диплом), «Физика атомного ядра и элементарных частиц» (один диплом) и «Генетика» (три диплома).



В 2022 г. на обучение в аспирантуру Института было принято 13 человек: 8 человек по группе научных специальностей 1.3. «Физические науки» и 5 человек по группе научных специальностей 1.5. «Биологические науки».

В лабораториях Института в 2022 г. выполняли учебно-исследовательские и научные работы, проходили практику, готовили выпускные квалификационные работы бакалавров и специалистов, а также магистерские диссертации более 240 студентов вузов страны.

Данное издание представляет собой сборник кратких описаний наиболее существенных и значимых результатов научных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, полученных в 2022 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 НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ в 2022 г. опубликованы в более чем 600 статьях, из них более 380 публикаций проиндексированы в базе данных Web of Science, также представлено около 470 докладов на более чем 180 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
18 Отделение физики высоких энергий
21 Отделение молекулярной и радиационной биофизики
24 Отделение перспективных разработок

Отделение теоретической физики

Отделение теоретической физики (ОТФ), руководитель – д. ф.-м. н. Д. Н. Аристов, состоит из 6 секторов:
– теории сильных взаимодействий (заведующий – к. ф.-м. н. К. М. Семенов-Тян-Шанский);
– квантовой теории поля (заведующий – к. ф.-м. н. В. А. Кудрявцев);
– 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. И. Михайлов) и группы теории ядерных реакторов (руководитель – к. ф.-м. н. М. С. Онегин).
В ОТФ работают 50 научных сотрудников, из них 18 докторов наук и 26 кандидатов наук.



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

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

Традиционной темой исследований в ОТФ является изучение рассеяния при высоких энергиях. Работы сотрудников Отделения в течение долгого времени определяли мировой уровень в данной области. В работах М. Г. Рыскина с соавторами изучается эксклюзивное рождение J/ψ-мезонов при энергиях Большого адронного коллайдера. Уже давно было предложено использовать этот процесс как способ очень точного измерения глюонной структурной функции при малых x. В работе 2022 г., вошедшей в сборник, предложено использовать также данные по Y-мезонам для получения информации о распределениях глюонов при очень малых x и различных энергиях.

Гипотеза о так называемой AdS/CFT-дуальности (анти-де Ситтер/конформная теория поля) привлекает большое внимание теоретиков, и ОТФ является одним из мировых лидеров в этой области. Дуальность означает, что нетривиальная теория поля ($N = 4$ суперсимметричная теория Янга – Миллса) в четырехмерном пространстве-времени эквивалентна некоторой теории струны в пространстве анти-де Ситтера и оба подхода являются точно решаемыми. Фактически дуальность выражается в связи аномальных размерностей операторов в суперсимметричной теории со спектром струны в пространстве анти-де Ситтера. В работах 2022 г. сотрудниками ОТФ был продолжен анализ аномальной размерности операторов твиста-2, важной для проверки AdS/CFT-гипотезы. Было получено обобщенное дважды логарифмическое уравнение, что может привести как к предсказаниям для аналитически продолженной аномальной размерности, так и к восстановлению общего вида аномальной размерности из уже имеющихся результатов.

Ранее было показано, что солитонная неабелева вихревая трубка (струна) в $N = 2$ суперсимметричной квантовой хромодинамике (КХД) ведет себя как критическая суперструна. Причем состояния замкнутой суперструны, возникающие в четырех измерениях, идентифицируются с адронами такой суперсимметричной КХД. В работах 2022 г. исследовался отклик этой струны на введение ненулевых масс кварков в четырехмерную КХД. Показано, что эффект конечных масс сводится к ненулевому потоку 3-формы Неве – Шварца через 3-сферу на конифолде. Решение

возникающих уравнений показывает, что конифолд вырождается в пространство меньшей размерности, при этом возникает абелева теория с двумя кварковыми ароматами. Теоретический анализ будет продолжен.

Среди работ ОТФ в области теории конденсированного состояния можно отметить ряд статей, посвященных анализу элементарных возбуждений в неколлинеарных квантовых магнетиках. Одна из таких известных систем – антиферромагнетик Гейзенберга со спином 1/2 на треугольной решетке, для которой имеющиеся теоретические подходы неудовлетворительны. В работе 2022 г. проведено исследование динамических свойств этой модели новым, специально разработанным методом. Продемонстрировано хорошее согласие с имеющимися численными и экспериментальными данными.

Неколлинеарные магнетики считаются перспективными материалами для создания новых приборов, в частности запоминающих устройств. В последние годы активно исследуются магнитные скирмионы и их упорядоченные массивы – скирмионные кристаллы. В работе 2022 г. сотрудниками ОТФ предложено описание скирмионного кристалла в виде суммы стереографических проекций для одиночных скирмионов. Исследована магнитная динамика такого кристалла, численно найдена зонная структура спектра магнонов в скирмионной сверхрешетке.

Использование неколлинеарных магнетиков подразумевает знание параметров модели для их описания. В работе 2022 г. для экспериментального определения этих параметров предложен метод малоуглового рассеяния нейтронов. Был рассчитан спектр магнонов в полностью поляризованной фазе при наличии магнитного поля и взаимодействия Дзялошинского – Мория интерфейсного типа. Выявлен ряд особенностей рассеяния в зависимости от ориентации приложенного поля, и показано, что наблюдаемые в эксперименте карты рассеяния напрямую связаны с параметрами микроскопической модели, применяемой для описания таких систем.

Сотрудниками ОТФ в течение 2022 г. опубликованы 49 исследовательских работ в рецензируемых журналах Web of Science и Scopus, представлены 38 докладов на международных и российских конференциях, прочитано 8 курсов лекций в Санкт-Петербургском государственном университете, Санкт-Петербургском национальном исследовательском Академическом университете им. Ж. И. Алферова РАН и Национальном исследовательском университете «Высшая школа экономики», принят на работу в Отделение 1 аспирант Института.

Отделение нейтронных исследований

Отделение нейтронных исследований (ОНИ), руководитель – д. ф.-м. н. А. И. Курбаков, состоит из 4 отделов.
Отдел нейтронной физики (заведующий – член-корреспондент РАН д. ф.-м. н. А. П. Серебров) состоит из 4 лабораторий:
– физики нейтрона (заведующий – член-корреспондент РАН д. ф.-м. н. А. П. Серебров);
– рентгеновской и гамма-спектроскопии (заведующий – д. ф.-м. н. В. В. Федоров);
– ядерной спектроскопии (заведующий – д. ф.-м. н. И. А. Митропольский);
– молекулярных и атомных пучков (заведующий – к. ф.-м. н. В. Ф. Ежов)
и 2 групп:
– исследований слабых взаимодействий (руководитель – к. ф.-м. н. А. Н. Пирожков);
– физики деления ядер (руководитель – А. М. Гагарский).
Отдел исследований конденсированного состояния (заведующий – к. ф.-м. н. И. А. Зобкало) состоит из 4 лабораторий:
– физики неупорядоченного состояния (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 эксплуатации нейтронных станций на реакторе ПИК (руководитель – к. ф.-м. н. В. В. Тарнавич).
В ОНИ работают 167 научных сотрудников, из них 11 докторов наук и 48 кандидатов наук.



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

Основными направлениями деятельности ОНИ являются фундаментальные исследования в области физики ядра и элементарных частиц и физики конденсированного состояния. 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 – основной исполнитель в НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ тематического направления «Исследования в области нейтронной физики» Программы деятельности НИЦ «Курчатовский институт». Сотрудники Отделения участвуют как исполнители в реализации и некоторых других направлений этой программы.

Во главу угла в настоящее время ставится разработка и создание уникальных физических установок для реакторного комплекса ПИК (РК ПИК). Ученые и инженеры ОНИ сейчас разрабатывают новые физические установки для РК ПИК, создают установки первой очереди, заканчивают проектирование и начинают уже создавать отдельные узлы установок второй и третьей очереди.

Физические установки, создаваемые для РК ПИК, можно условно разделить на две категории: установки ядерной физики и установки физики конденсированных сред. Установки ядерной физики – это источник ультрахолодных нейтронов, установки «Нейтрино», «Бета-распад нейтрона», установка исследования множественности осколков деления FISCO, установка DEDM (ЭДМ нейтрона кристалл-дифракционным методом), установка нейтронно-активационного анализа INAA, спектрометр ядерных излучений PROGRAS, установка ИРИНА (Исследование Радиоактивных Изотопов на НейтронАх). Установки физики конденсированных сред можно систематизировать по использованию разного типа рассеяния нейтрона на образце: спектрометры неупругого рассеяния нейтронов IN-1, IN-2 с использованием холодных нейтронов, IN-3 с использованием поляризованных нейтронов; установки малоуглового рассеяния нейтронов TENZOR и MEMBRANA; спин-эхоспектрометры SESANS и SEM; дифрактометры порошковые D1 и D3 и монокристальный дифрактометр DC-1; рефлектометры HARMONY и SONATA.

2022 год был довольно успешным в научном плане. Научные группы, в которых ученые ОНИ были основными исполнителями, получили четыре первые, две вторые и четыре третьи премии на конкурсе лучших работ НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ. Работа «Поиск стерильного нейтрино в эксперименте „Нейтрино-4” и результаты измерений» А. П. Сереброва и соавторов была признана лучшей работой Института. Такого успеха на конкурсе лучших работ (11 премий) Отделение не добивалось ранее никогда. Кроме основных работ по выполнению тематического плана НИОКР НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, велись научные исследования в рамках двух проектов РФФИ и шести проектов РНФ, в которых руководителями были ученые из ОНИ. Большим достижением Отделения в нынешних непростых условиях были организация и проведение четырех научных школ и конференций.

В области исследований фундаментальных свойств материи в 2022 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.

Методами дифракции и неупругого рассеяния нейтронов определены параметры магнитных взаимодействий, полевой и температурной эволюции магнитных структур $R\mathrm{FeO_3}$-соединений, демонстрирующих значительные магнитоэлектрические взаимодействия. В 2022 г. получены параметры магнитных взаимодействий в $\mathrm{TbFeO_3}$ и показана значительная разница между энергией изотропного обмена ближайших ионов Fe^{3+} в плоскости *ab* и в направлении *c*. Показаны температурные изменения магнитной анизотропии для разных фаз в $\mathrm{TbFeO_3}$ и $\mathrm{YbFeO_3}$. Построена магнитная фазовая диаграмма $\mathrm{YbFeO_3}$ (лаборатория физики кристаллов, зав. лаб. – к. ф.-м. н. Ю. П. Черненков, к. ф.-м. н. И. А. Зобкало).

Установлены параметры, управляющие магнитной структурой и динамикой целого класса нецентросимметричных кубических гелимагнетиков со взаимодействием Дзялошинского – Мория (ДМ). Разработана методика малоуглового рассеяния поляризованных нейтронов по измерению жесткости спиновых волн в гелимагнетиках. В 2022 г. исследованы гелимагнетики $\mathrm{Fe_{1-x}Co_xSi}$ и предложена теория, уточняющая модель Бака – Йенсена, в которой преобладание кристаллографической анизотропии над взаимодействием ДМ приводит к ферромагнитному упорядочению в системе. Описаны сценарии этого перехода в зависимости от температуры и магнитного поля вблизи x_c (лаборатория физики неупорядоченного состояния, зав. лаб. – к. х. н. Н. Н. Губанова, д. ф.-м. н. С. В. Григорьев).

Методами дифракции поляризованных и неполяризованных нейтронов исследованы особенности магнитных свойств мультиферроиков $R\mathrm{Mn_2O_5}$ и $R\mathrm{MnO_3}$ (*R* – редкоземельный элемент) на микроскопическом уровне. В работах 2022 г. показано, что в $\mathrm{DyMnO_3}$ существует сильное *R*-Mn-взаимодействие, что обеспечивает контролируемые марганцем и диспрозием режимы для магнитоупорядоченной фазы, а также необычно длительные процессы релаксации магнитной структуры. Полученные результаты обладают

общностью, необходимой для построения теоретических моделей несобственных мультиферроиков и прогнозирования создания новых функциональных материалов (лаборатория физики кристаллов, к. ф.-м. н. И. А. Зобкало).

Продолжено изучение механизмов формирования дальнего магнитного порядка в слоистых оксидах с треугольной сверхструктурой магнитных ионов методом дифракции неполяризованных нейтронов. В 2022 г. определены типы магнитного упорядочения в основном состоянии сильно фрустрированных слоистых теллуратов A_2MTeO_6 с сотовой кристаллической и треугольной магнитной сверхструктурами в одном слое (лаборатория исследования материалов, зав. лаб.– д. ф.-м. н. А. И. Курбаков).

Работы по изучению биогенных магнитных структур магнитотактических бактерий направлены на выяснение механизма ориентации некоторых видов одноклеточных организмов в магнитном поле Земли и разработку биотехнологии получения биогенных магнитных наночастиц (магнитосом) для тераностики ряда заболеваний. В 2022 г. обработаны данные по нелинейному магнитному отклику магнитосом для шести культур магнитотактических бактерий. Получены оценки их магнитных параметров. Обнаружен двухмодовый характер распределения по магнитным моментам. Наличие двух фракций связано с деградацией исходных магнитных цепочек. Показано изменение состояния магнитосом при длительном хранении бактерий (группа электромагнитных свойств конденсированных сред, рук. – к. ф.-м. н. О. В. Геращенко, В. В. Дериглазов).

Проведены синтез и аттестация углеродного криогеля (лаборатория физики неупорядоченного состояния, Г. П. Копица). Углеродный криогель, полученный путем трехстадийного синтеза, включающий в себя образование геля из смеси резорцин-формальдегидных смол с последующими лиофильной сушкой и пиролизом в азоте при 800 °С, был исследован комплементарными методами: рентгенофлуоресцентного анализа, рамановской спектроскопии, ИК-фурье-спектроскопии, дифференциального термического и термогравиметрического анализа, сканирующей электронной микроскопии, гелиевой пикнометрии, низкотемпературной адсорбции азота, малоуглового рассеяния рентгеновских лучей и малоуглового рассеяния нейтронов (МУРН). Продемонстрированы возможности использования метода вариации контраста в МУРН для исследования пористой структуры материалов на основе криогелей, аэроглей, пирогелей и т. д.

Предложено и исследовано новое поколение композиционных мембран типа Aquivion® с добавками частиц детонационного наноалмаза (ДНА) для водородных топливных элементов (лаборатория нейтронных физико-химических исследований, зав. лаб. – д. ф.-м. н. В. Т. Лебедев, к. ф.-м. н. Ю. В. Кульвелис). Проведенные электрохимические исследования мембран в составе мембранно-электродных блоков также показали наилучшие характеристики при 0,5 вес. % ДНА, значительно превосходящие параметры немодифицированной мембраны (без алмазов).

Предложено экспериментальное доказательство логарифмической фрактальной структуры ботанических деревьев. Когда-то давно, ничего не зная про фракталы, Леонардо да Винчи сформулировал закон роста дерева, согласно которому площадь сечения веток ниже заданной точки ветвления равна сумме площадей сечений дочерних ветвей выше этой точки ветвления. Авторы данной работы использовали метод численного анализа Фурье, про который Леонардо, естественно, ничего не знал, для идентификации логарифмических фрактальных свойств двумерных объектов, а затем применили его для изучения строения реальных деревьев с использованием их фотографий. Показано, что структура дерева определяется законом сохранения площади боковой поверхности ветвей до и после ветвления, а значит, жизнь дерева «течет» по поверхности дерева или дерево живет по законам двумерного пространства, а закон Леонардо должен быть изменен или дополнен (лаборатория физики неупорядоченного состояния, д. ф.-м. н. С. В. Григорьев).

В области ядерной физики в 2022 г. учеными ОНИ получен ряд новых важных результатов. Выполнен анализ результата эксперимента «Нейтрино-4» и результатов других экспериментов по поиску стерильного нейтрино. Сделана оценка вклада в плотность энергии Вселенной стерильных нейтрино с параметрами Δm^2_{14} = 7,3 эВ^2 и $\sin^2 2\theta_{14}$ = 0,33, измеренными в эксперименте

«Нейтрино-4». Обсуждена проблема противоречия между измеренными параметрами стерильного нейтрино и наблюдаемыми космологическими ограничениями (лаборатория физики нейтрона, зав. лаб. – д. ф.-м. н. А. П. Серебров).

При поиске резонансного поглощения солнечных аксионов ядрами ^{83}Kr совместно с Институтом ядерных исследований РАН получены новые данные для константы связи аксиона с электроном g_{Ae} на основе результатов эксперимента в Баксанской нейтринной обсерватории. Достигнутая чувствительность для масс аксиона ~ 1 кэВ рекордна и близка к астрофизическим ограничениям. Сотрудники ОНИ провели поиск нейтринных событий в детекторе Borexino в корреляции с 74 гравитационными событиями (ГС), зарегистрированными детекторами LIGO, VIRGO. Анализировались сигналы с энергиями > 250 кэВ в окне ±1 000 с, соответствующем времени регистрации ГС. Статистически значимого превышения 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. Совместно с участниками международной коллаборации Borexino в 2022 г. получены новые результаты по регистрации нейтрино из CNO-цикла на Солнце. Группой НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ выполнены прецизионные измерения β-спектра ^{210}Bi, результаты которых использовались для определения вклада в фон Borexino от ^{210}Bi при анализе сигналов от CNO-нейтрино. Результаты получены с использованием β-спектрометров двух типов (отдел полупроводниковых ядерных детекторов, рук. – д. ф.-м. н. А. В. Дербин).

Красные сверхгиганты — самые большие из звезд (масса примерно от 5 до 100 масс Солнца). Их существование заканчивается взрывом сверхновой звезды II типа, оставляющим после себя лишь черную дыру или нейтронную звезду. Работа стимулирована тем, что для исследования процесса необходимо измерять изменение температуры красных сверхгигантов перед их взрывом. Было предложено измерять температуру электронов сравнением относительной интенсивности двух линий. Одной из наиболее устойчивых и интенсивно изучаемых проблем рентгеновской астрономии является несоответствие современной теории и наблюдений отношения интенсивностей двух переходов Fe XVII, имеющих решающее значение для диагностики плазмы, получивших название 3C и 3D. Вспышка красного сверхгиганта произошла 16 сентября 2020 г. За звездой — предшественницей сверхновой звезды – SN 2020tlf следили. Телескопы гавайской Обсерватории Кека наблюдали за красным сверхгигантом уже на протяжении 130 дней, словно за тикающей бомбой, готовой взорваться в любой момент. Текущее экспериментальное отношение $R_{эксп} = f_{3C}/f_{3D} = 3{,}51(2)_{стат}(7)_{сист}$ согласуется с проведенным расчетом $R_{теор} = 3{,}55(2)$, а также с некоторыми предыдущими теоретическими предсказаниями. Чтобы исключить любые неопределенности, связанные с измеренным отношением, определили отдельные естественные ширины линий и величины осцилляторов 3C- и 3D-переходов, которые также хорошо согласуются с теорией. Это наконец разрешает многолетнюю загадку осцилляторов Fe XVII (лаборатория молекулярных и атомных пучков, зав. лаб. – к. ф.-м. н. В. Ф. Ежов, д. ф.-м. н. М. Г. Козлов).

Выполнено исследование распределения изотопов урана в растворах на границе полярной и неполярной сред для создания γ-спектроскопической методики определения содержания изотопов урана в экстракционно-адсорбционных процессах. Предложен новый способ химического обогащения урана по легким изотопам, основанный на экстракции урана в кислой среде полярным органическим экстрагентом. На границе раздела полярной и неполярной сред изотопы урана распределены по высоте в соответствии с их атомным номером (лаборатория ядерной спектроскопии, зав. лаб. – д. ф.-м. н. И. А. Митропольский, д. ф.-м. н. В. Г. Зиновьев).

Сотрудниками ОНИ в 2022 г. опубликованы 62 научные статьи в рецензируемых журналах, получено 1 свидетельство о государственной регистрации специализированных программ.

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 4 научно-технических отделов:
– радиоэлектроники (руководитель – к. ф.-м. н. В. Л. Головцов);
– трековых детекторов (руководитель – д. ф.-м. н. А. Г. Крившич);
– вычислительных систем (руководитель – А. Е. Шевель);
– мюонных камер (руководитель – В. С. Козлов).
В ОФВЭ работают 97 научных сотрудников, из них 13 докторов наук и 50 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. Кроме того, в Отделении ведутся прикладные работы по разработке инновационных методов получения радиоизотопов для медицинских применений и исследования магнитных свойств материалов μSR-методом. Отделение выполняет научные исследования, используя установки, имеющиеся в НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, а также участвуя в фундаментальных исследованиях передовых мировых ускорительных центров.

В 2022 г. проводились следующие эксперименты.

1. На синхроциклотроне НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ:

– производство и изучение короткоживущих ядер на лазерном масс-спектрометрическом комплексе ИРИС;

– изучение поляризационных эффектов в квазиупругом рассеянии протонов на ядрах;

– изучение магнитных свойств материалов μSR-методом,

а также на других установках Института:

– эксперимент PolFusion по изучению реакции термоядерного синтеза поляризованных ядер дейтерия;

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

2. В Европейском центре ядерных исследований (ЦЕРН):

– участие в экспериментах CMS, ATLAS, LHCb, ALICE на Большом адронном коллайдере (БАК);

– производство и изучение короткоживущих ядер на лазерном масс-спектрометрическом комплексе ISOLDE;

– изучение возможностей кристаллической коллимации пучков БАК (эксперимент UA9).

3. На мезонной фабрике Института им. Пауля Шеррера (Швейцария) – поиск мюонного катализа реакции ядерного синтеза d^3He.

4. В Центре по изучению тяжелых ионов им. Гельмгольца (Дармштадт, Германия) – измерение масс сверхтяжелых элементов с помощью ловушки Пеннинга SHIPTRAP.

5. В Институте ядерной физики Общества Макса Планка (Гейдельберг, Германия) – по прямому ультрапрецизионному измерению разности масс ^{187}Re–^{187}Os, которая необходима для определения эффективной массы антинейтрино, с помощью ловушки Пеннинга PENTATRAP.

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

В числе новых проектов ОФВЭ – подготовка к экспериментам:

– «Протон» – по измерению зарядового радиуса протона в упругом электрон-протонном рассеянии на ускорителе MAMI (Майнц, Германия);

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

– R3B, MATS, PANDA, CBM на ускорительном комплексе FAIR (Центр по изучению тяжелых ионов им. Гельмгольца, Германия);

– SHiP – по поиску частиц скрытого сектора Стандартной модели в ЦЕРН;

– MPD и SPD на строящемся коллайдере NICA в Дубне,

а также следующие проекты:

– ИРИНА – по получению и изучению короткоживущих ядер на высокопоточном нейтронном реакторе ПИК;

– ПИТРАП – по прецизионному измерению масс короткоживущих нейтроноизбыточных ядер на высокопоточном нейтронном реакторе ПИК;

– РИЦ-80 – по производству радиоизотопов для медицинских применений.

Одним из основных направлений деятельности ОФВЭ является участие в проведении фундаментальных исследований на уникальных ускорительных установках в мировых научных центрах, таких как БАК в ЦЕРН, и на ускорительном исследовательском комплексе нового поколения в Европейском центре по исследованию ионов и антипротонов (FAIR).

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

Наиболее значимые из них, полученные в 2022 г. при участии сотрудников Отделения, – это уточнение констант взаимодействия бозона Хиггса с фермионами (кварками и лептонами) в экспериментах ATLAS и CMS, измерение сечения взаимодействия антигелия-3 с веществом в эксперименте ALICE, указание на эффекты *CP*-нарушения в распадах *B*- и *D*-мезонов в эксперименте LHCb. За все время работы эксперимента LHCb открыто 60 новых адронных состояний, среди которых есть кандидаты в пенто- и тетрокварковые состояния.

В 2022 г. большие усилия были сосредоточены на работах по запуску установок на коллайдере БАК после длительной остановки ускорителя и проведения модернизации коллайдерных детекторов. Отделение активно участвовало в модернизации детекторов. В НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ были созданы тонкозазорные камеры для передней части мюонного спектрометра ATLAS, новые мюонные камеры с улучшенной гранулярностью для эксперимента LHCb, проведена модернизация высоковольтного питания мюонной системы CMS, ранее созданной в Институте. При участии сотрудников ОФВЭ был успешно осуществлен запуск всех четырех детекторов на коллайдере БАК, а также обеспечена бесперебойная работа всех подсистем, за которые отвечали сотрудники Отделения, в течение набора данных в 2022 г.

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 национальная лаборатория, США) и продолжено в эксперименте ALICE (ЦЕРН). В связи со строительством российского коллайдера NICA (Nuclotron based Ion Collider fAcility) в Дубне, направленного на исследование ядерной материи в ион-ионных столкновениях, Отделение подключилось к работам по созданию многоцелевого детектора MPD и разработке физической программы эксперимента. ОФВЭ также принимает участие в конструкторской разработке концепции и физической программы исследований для второго детектора SPD на коллайдере NICA, который нацелен на изучение столкновений поляризованных частиц для исследования спиновой структуры нуклона.

Сотрудниками ОФВЭ в 2022 г. опубликованы 160 научных работ в рецензируемых журналах, сделан 31 доклад на российских и международных научных мероприятиях.

Отделение молекулярной и радиационной биофизики

Отделение молекулярной и радиационной биофизики (ОМРБ), руководитель – к. ф.-м. н. А. Л. Коневега, состоит из 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 114 научных сотрудников, из них 11 докторов наук и 47 кандидатов 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. В результате проведенной в 2022 г. реорганизации научный потенциал Отделения был консолидирован в составе семи научных подразделений: четырех лабораторий и трех центров.

Одним из интенсивно развивающихся направлений деятельности ОМРБ является ядерная медицина. Уникальная инфраструктура НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, объединяющая на единой научно-технической площадке два исследовательских реактора, два ускорителя, комплекс биомедицинских исследований, центр доклинических и клинических исследований, комплекс по обращению с радиоактивными отходами, предоставляет возможность осуществления полного цикла разработки и производства радиофармацевтических лекарственных препаратов, включая поисковые исследования и разработку молекул-носителей, разработку ядерных технологий по получению и очистке радиоактивных изотопов медицинского назначения, наработке изотопов, сборке радиофармацевтических лекарственных препаратов, а также доклинические исследования.

В рамках Федеральной научно-технической программы нейтронных и синхротронных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ является головной организацией, реализующей проект «Разработка отечественного инновационного тераностического препарата на основе изотопов тербия для проведения радиоиммунной терапии злокачественных новообразований различного гистологического типа». Проект, осуществляемый в коллаборации с НИЦ «Курчатовский институт», Санкт-Петербургским политехническим университетом Петра Великого и Московским государственным университетом им. М. В. Ломоносова, включает целый комплекс работ, направленных на создание условий для производства радиоизотопов на отечественной производственной базе, разработку биомолекулярных векторов для адресной доставки радионуклидов в опухоль, создание на их основе радиофармацевтического препарата, проведение доклинических

исследований, а также интенсивную подготовку молодых кадров для ядерной медицины. В 2022 г. были оптимизированы условия наработки и выделения радиоизотопов ^{152}Tb и ^{161}Tb, разработана оригинальная методика экстракционно-хроматографического выделения этих изотопов на коммерчески доступных сорбентах, реализована новая схема получения ^{152}Tb облучением тандемной мишени ^{151}Eu на изохронном циклотроне У-150, позволяющая повысить эффективность использования пучка α-частиц, запущено опытное производство изотопа ^{124}I. На моделях животных была показана противоопухолевая активность препарата на основе моноклонального антитела против рецептора 1-го типа сосудистого эндотелиального фактора – антиVEGFR1 и радиоактивного изотопа ^{161}Tb, создан значительный задел для производства и испытаний таргетирующих биоконъюгатов.

В Отделении продолжает продуктивную работу созданный несколько лет назад в рамках Федеральной научно-технической программы развития генетических технологий Курчатовский геномный центр (КГЦ – ПИЯФ). В 2022 г. в КГЦ – ПИЯФ был достигнут целый ряд как фундаментальных, так и прикладных результатов в области генетики и биотехнологии. В рамках работ по исследованию механизмов рекомбинации в биотехнологически важных одноклеточных микроорганизмах были проанализированы и обобщены успехи, достигнутые в целенаправленном редактировании ядерных генов зеленых водорослей *Chlamydomonas reinhardtii* при помощи таких инструментов редактирования генома, как нуклеазы систем CRISPR-Cas, нуклеазы цинковых пальцев (ZFN) и эффекторные нуклеазы, подобные активаторам транскрипции (TALE), разработан протокол редактирования генов зеленых водорослей *C. reinhardtii* с использованием предварительно собранных рибонуклеопротеинов CRISPR-Cas9.

В КГЦ – ПИЯФ были продолжены работы по поиску и идентификации микроорганизмов – продуцентов ферментов, вовлеченных в деградацию и модификацию различных органических полимеров. Так, в 2022 г. подведены итоги скрининга микроорганизмов – продуцентов ксантанолитического комплекса и разработан биокатализатор для деструкции ксантана на основе иммобилизованных в криогеле поливинилового спирта клеток симбиотической смеси, содержащей бактерии *Paenibacillus spp. Cellulosimicrobium cellulans*, что может найти применение в нефтедобывающей и пищевой промышленности. Предпринят поиск микроорганизмов, которые способны разлагать широкий спектр пластиковых отходов.

Исследование влияния экстракта бурых водорослей *Fucus vesiculosus*, экстракта лишайника *Cetraria islandica* и их смеси в составе ферментируемого зеленого чая на микробиом симбиотической культуры SCOBY и биохимические свойства комбучи показало потенциал водорослей и лишайников как функциональных добавок для получения безалкогольных ферментированных напитков с дополнительной нутрицевтической ценностью.

В ходе исследования механизмов биоминерализации была показана ключевая роль внеклеточной ДНК в индукции осаждения карбоната кальция при росте планктонной культуры *Bacillus subtilis*, сопряженной с образованием отдельных компонентов внеклеточного матрикса (внеклеточной ДНК, амилоидных белков и полисахаридов); определены белковые мишени для дальнейшей разработки технологии ингибирования или активации процесса биоминерализации и формирования биопленок.

В лаборатории молекулярной генетики человека продолжались исследования по поиску маркеров различных заболеваний. Найден чувствительный маркер болезни Паркинсона (БП) гексазилсфингозин (HexSph) – смесь глюкозилсфингозина и галактозилсфингозина, который может рассматриваться как биомаркер развития БП у носителей мутаций в гене *GBA1* (кодирует лизосомный фермент глюкоцереброзидазу). Концентрация HexSph может рассматриваться и как потенциальный биомаркер деменции с тельцами Леви и множественной системной атрофии.

В лаборатории экспериментальной генетики проведено исследование экспрессии гена *SNCA* человека, кодирующего белок α-синуклеин, а также его форм с мутациями A30P и A53T у *Drosophila melanogaster*. Показано, что развитие нейродегенерации зависит от продолжительности экспрессии гена *SNCA*. Экспрессия гена

в течение более длительного периода времени вызывает гибель дофаминергических нейронов, снижение уровня дофамина. Изучение влияния запуска и подавления экспрессии гена *SNCA* на развитие нейродегенеративного процесса у *D. melanogaster* необходимо для понимания начала и развития патологических изменений при БП и других синуклеопатиях, а также для определения временных интервалов «терапевтических окон», когда применяемая терапия будет эффективна.

В лаборатории молекулярной биофизики и нейтронных исследований были изучены структурные характеристики комплекса «миелопероксидаза – церулоплазмин – тромбин» с использованием методов малоуглового рассеяния нейтронов в сочетании с компьютерным моделированием. Миелопероксидаза (МПО) – димерный гемсодержащий фермент нейтрофилов и моноцитов, участвующий в реакциях врожденного иммунитета. Известно, что избыток церулоплазмина в крови подавляет ее активность, однако при воспалении активность МПО сохраняется за счет возможного частичного протеолиза церулоплазмина тромбином. В этом исследовании была построена полноатомная модель гетерогексамера *in silico* с учетом гликозилирования входящих в его состав белков и методом малоуглового рассеяния нейтронов получена структурная модель гетерогексамера.

Применение бинарных технологий, при которых поражающий эффект излучения дополнительно усиливается предварительным избирательным накоплением радиосенсибилизаторов в ткани-мишени, может значительно увеличить эффективность методов лучевой терапии. Привлекательным механизмом увеличения дозы является реакция захвата протонов атомом ^{11}B ($^{11}B + p \rightarrow 3\alpha + 8{,}7$ МэВ). Однако в результате исследования сенсибилизирующего потенциала борокаптата натрия ($(B_{12}H_{11}SH)Na_2$, BSH) при протонном облучении на пике Брэгга было доказано, что BSH обеспечивает лишь незначительное усиление эффекта протонного излучения на раковые клетки *in vitro* как при облучении протонами с энергией 200 МэВ на синхротроне СЦ-1000, так и 90 МэВ на медицинском протонном ускорителе, что подтверждает недостаточную эффективность ядерной реакции протонов с ядрами ^{11}B для объяснения наблюдаемых в ряде работ радиосенсибилизирующих эффектов препаратов бора при облучении злокачественных клеток человека протонами на пике Брэгга.

Потенциал комбинированного воздействия ионизирующего облучения и таргетных препаратов (GANT61 – малая молекула, которая ингибирует связывание транскрипционных факторов gli с ДНК) для терапии мультиформных глиобластом был также исследован на клеточных моделях. Злокачественные глиомы являются наиболее агрессивными опухолями головного мозга, которые не поддаются стандартному клиническому лечению и приводят к быстрой гибели пациентов. Облучение протонами может устранить различимые на томографии очаги опухоли, но «спящие» раковые стволовые клетки могут проникать в окружающую нормальную ткань и давать новые очаги, приводя к рецидиву. Было показано, что инкубация с GANT61 приводит к массовой гибели клеток глиом, не оказывая влияния на линии клеток, в которых нет активности gli, и значительно увеличивает чувствительность раковых клеток к облучению γ-радиацией или протонами. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности подходов, основанных на совместном использовании ингибитора GANT61 и облучения протонами или γ-радиацией, для терапии глиобластом.

В 2022 г. сотрудниками ОМРБ опубликовано более 115 работ в рецензируемых журналах (48 – в зарубежных), сделано 76 докладов на научных конференциях. Активно готовится научная смена: в ОМРБ работают 22 аспиранта, обучающихся в аспирантуре НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ и других институтов, 4 сотрудника Отделения руководят работами аспирантов из других учреждений.

Отделение перспективных разработок

Отделение перспективных разработок (ОПР), руководитель – д. ф.-м. н. А. В. Титов, состоит из 3 лабораторий:
– химии и спектроскопии углеродных материалов (заведующая – к. ф.-м. н. М. В. Суясова);
– голографических информационно-измерительных систем (заведующий – д. ф.-м. н. Б. Г. Турухано);
– квантовой химии (заведующий – д. ф.-м. н. А. В. Титов)
и 3 отделов:
– ускорительного (заведующий – к. т. н. Е. М. Иванов), в состав которого входит лаборатория физики и техники ускорителей (заведующий – к. ф.-м. н. С. А. Артамонов);
– прикладной ядерной физики (и. о. заведующего – к. ф.-м. н. К. Н. Ермаков), в состав которого входит лаборатория радиационной физики (заведующий – к. ф.-м. н. А. С. Воробьев);
– информационных технологий и автоматизации (заведующий – С. Б. Олешко), в состав которого входит лаборатория информационно-вычислительных систем (заведующий – С. Б. Олешко).
В ОПР работают 60 научных сотрудников, из них 8 докторов наук и 29 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 выводится второй пучок малой интенсивности – около 1 % основного пучка. Пучок может использоваться как для физических, так и для прикладных целей, в частности для проведения протонной лучевой терапии, что позволяет значительно увеличить число пациентов.

Для выполнения 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 наноэлектроники. Одним из основных условий их успешного применения является способность длительное время надежно функционировать в радиационных полях космического простран-

ства и верхних слоев атмосферы. В настоящее время нормативные акты РФ и стандарты ведущих стран мира включают обязательные испытания радиационной стойкости современной радиоэлектронной аппаратуры, используемой в авиационной и космической технике, относительно воздействия различных видов излучения. В 2015 г. на синхроциклотроне СЦ-1000 начал функционировать специализированный центр радиационных испытаний на протонах с энергией 60–1 000 МэВ, включающий два стенда с системами диагностики пучка, современными приборами дозиметрии, автоматизированной системой обработки результатов и актуальной 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 ОНИ и УО ОПР в 2015 г. завершено создание подобного нейтронного источника.

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

В ОПР силами УО и Научно-исследовательского института электрофизической аппаратуры им. Д. В. Ефремова проводятся работы по запуску многоцелевого циклотронного комплекса на основе построенного изохронного циклотрона Ц-80 с переменной энергией 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 планируется разработка сверхчистых медицинских изотопов с помощью магнитного сепаратора. Энергетический диапазон протонного пучка (60–70 МэВ) циклотрона Ц-80 позволяет создать единственный на сегодня в России офтальмологический центр для протонной терапии онкологических заболеваний органов зрения. Разработкой этого проекта давно занимается УО совместно с Институтом теоретической и экспериментальной физики им. А. И. Алиханова НИЦ «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ).

При создании оборудования для кабинета офтальмологии и планирования облучений будет использован огромный опыт, накопленный в НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ, где до 2010 г. сеансы протонной терапии прошли около 1 400 пациентов.

Лаборатория голографических информационно-измерительных систем (ЛГИИС) ОПР специализируется в области прецизионных измерений на масштабах нанометров. Для проведения этих исследований в ЛГИИС имеется уникальная подземная безвибрационная голографическая 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. В 2015 г. в ЛГИИС впервые создана линейная голографическая решетка длиной 1 300 мм и разрешением 1 нм.

Отдел информационных технологий и автоматизации (ОИТА) ОПР уже много лет принимает активное участие в проекте ATLAS Большого адронного коллайдера в ЦЕРН. Сотрудники лаборатории информационно-вычислительных систем 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 НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, 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», осуществляемых ОФВЭ, 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. Работы были выполнены в срок, и модернизированная установка ИКАР была установлена на пучок и прошла необходимые пучковые испытания.

Сотрудники отдела прикладной ядерной физики (ОПЯФ) ОПР 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 создание новой скважины. В связи с этим была проанализирована возможность бурения новой экологически чистой скважины за короткое время известными методами бурения, предложен способ скоростного бурения силиконовой жидкостью и выполнен теплофизический расчет процесса бурения. 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 2022 г. проведены измерения сечения деления и угловых распределений осколков деления ядра ^{238}U при взаимодействии с нейтронами с энергией от 1 до 200 МэВ. Для данного ядра 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 – единственный способ уменьшить полную неопределенность сечений. Также сотрудниками ОПЯФ инициирована работа новых координатных детекторов для ядерно-физических измерений при высоких загрузках на основе многопроволочного газового электронного умножителя.

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

Основным направлением работы лаборатории квантовой химии (ЛКХ) ОПР является развитие

релятивистских методов расчета электронной структуры молекул, содержащих тяжелые атомы. Эта активность была стимулирована еще в начале 80-х гг. прошлого века важностью расчета *P*- и *T*, *P*-нечетных эффектов в двухатомных молекулах. Основой расчетов стал развиваемый лабораторией двухшаговый метод, который дает возможность представить теоретическое исследование таких молекул в виде двух последовательных расчетов: сначала в валентной области, а затем в области остова тяжелого атома. Уже на протяжении 30 лет точность, достигаемая в этих расчетах, является рекордной в мире. В последнее десятилетие сотрудники лаборатории не ограничиваются исследованиями *P*- и *T*, *P*-нечетных эффектов, спектроскопических и химических свойств в молекулах и кластерах небольшого размера: они перешли к более широкому кругу исследуемых физико-химических свойств и более сложным структурам. 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». Ежегодно ЛКХ публикует более 25 статей в ведущих международных и российских научных журналах.

Сотрудниками ОПР в 2022 г. опубликованы 42 научные работы, которые индексируются в Web of Science и Scopus, сделаны более 50 докладов на российских и международных научных конференциях и научных семинарах НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, Санкт-Петербургского государственного университета и Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, получены 9 патентов и свидетельств результата интеллектуальной деятельности.



Теоретическая и математическая физика

30 Эксклюзивное рождение J/ψ- и Υ-мезонов при высоких энергиях в pp- и pPb-соударениях

31 Обобщение дважды логарифмического уравнения в $N = 4$ суперсимметричной теории Янга – Миллса

32 Деформация потоком 3-формы Неве – Шварца для критической неабелевой вихревой струны

33 Спиновая динамика антиферромагнетика со спином 1/2 на треугольной решетке

34 Малоугловое рассеяние нейтронов в полностью поляризованной фазе неколлинеарных магнетиков со взаимодействием Дзялошинского – Мория интерфейсного типа

35 Зонная структура магнонов в скирмионных кристаллах и метод стереографической проекции

36 Прогресс в изучении T, P-нечетных эффектов на молекулах

37 Комбинированный метод расчета электронной структуры материалов с лантаноидами на основе «подстраиваемого под соединение» потенциала внедрения

39 Спин-таутомерия эндоэдральных комплексов

Эксклюзивное рождение J/ψ- и Υ-мезонов при высоких энергиях в pp- и pPb-соударениях

М. Г. Рыскин[1], C.A. Flett[2], S.P. Jones[3], A.D. Martin[3], T. Teubner[4]

[1] *Отделение теоретической физики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ*
[2] *University of Jyväskylä, Finland*
[3] *Durham University, England*
[4] *University of Liverpool, England*

Изучение процессов рождения тяжелых векторных мезонов в ультрапериферических взаимодействиях на Большом адронном коллайдере (БАК) представляет большой интерес, т. к. позволяет измерить распределения глюонов в протоне в области очень малых x (< 0,001), недоступной для измерения другими методами.

Сечение эксклюзивного фоторождения векторных мезонов пропорционально квадрату обобщенной плотности глюонов (GPD) при $x = M_V^2/W_{\gamma p}^2$. Ранее эта плотность была получена нами при скейле, равном массе шармованного кварка, из анализа данных по образованию J/ψ-мезонов на БАК. Рассмотрение тяжелого Υ-мезона позволит определить плотность глюонов на более высоком скейле.

Соударения протона с ионом свинца дают возможность выделить процесс ультрапериферического фоторождения с лучшей точностью. Однако здесь необходимо учитывать возможность вторичных взаимодействий протона и векторного мезона внутри ядра свинца. Все эти эффекты были учтены в данной работе.

Описан формализм для вычисления сечений эксклюзивного образования векторных мезонов в протон-протонных и протон-ядерных соударениях в зависимости от быстроты мезона. Формализм учитывает следующие за главным логарифмическим приближением (NLO) поправки квантовой хромодинамики и вторичные перерассеяния протона и векторного мезона внутри ядра свинца.

Показано, что экспериментальные данные по рождению J/ψ- и Υ-мезонов на БАК позволят получить информацию о распределениях глюонов при очень малых x и различных скейлах. Используя распределения плотности глюонов, полученные ранее из данных по реакции $p + p \to p + J/\psi + p$, мы предсказали сечения образования J/ψ- и Υ-мезонов на БАК при энергиях $\sqrt{s_{pN}}$ = 5,02 и 8,16 ТэВ.

Представлены таблицы эффективных потоков фотонов, испускаемых протоном и ядром свинца при энергиях $\sqrt{s_{pN}}$ = 5,02 и 8,16 ТэВ с учетом вторичных взаимодействий внутри ядра свинца.

Flett C.A., Jones S.P., Martin A.D., Ryskin M.G., Teubner T. // Phys. Rev. D. 2022. V. 106. No. 7. P. 074021.

Обобщение дважды логарифмического уравнения в $N = 4$ суперсимметричной теории Янга – Миллса

В. Н. Велижанин

Отделение теоретической физики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

В работе исследовались поправки к дважды логарифмическому уравнению для аномальных размерностей операторов твиста-2. Дважды логарифмическое уравнение было одним из первых уравнений эволюции для величин, связанных с аномальными размерностями операторов твиста-2. Изначально в лидирующем порядке оно было получено в квантовой электродинамике (КЭД) в конце 60-х гг. сотрудниками Отдела теоретической физики Института. Позднее были обнаружены и другие уравнения эволюции для аномальных размерностей, структурных функций и других величин, связанных с высокоэнергетическим рассеянием частиц на ускорителях. Вычисление поправок к уравнениям эволюции является актуальной задачей как для феноменологического анализа в реалистических моделях, таких как КЭД и квантовая хромодинамика (КХД), так и для теоретических исследований, т. к. позволяет получить информацию об аналитических свойствах рассматриваемых величин.

Дважды логарифмическое уравнение возникает при рассмотрении процессов рассеяния электронов, позитронов или кварков при высокой энергии столкновения, когда при расчетах по теории возмущений возникают большие логарифмы от энергии, которые должны быть просуммированы во всех порядках теории возмущений. Такие большие логарифмы соответствуют полюсам в соответствующей аналитически продолженной аномальной размерности операторов твиста-2. Непосредственное вычисление поправок к дважды логарифмическому уравнению представляет довольно сложную задачу и до сих пор не было осуществлено прямым обобщением какого-либо из известных способов его получения в лидирующем порядке. Однако в последние годы был достигнут большой прогресс в вычислении связанных с этим уравнением аномальных размерностей операторов твиста-2 в $N = 4$ суперсимметричной теории Янга – Миллса, где общий результат известен до седьмого порядка теории возмущений включительно. Используя полученную нами ранее базу данных для аналитического продолжения функций, входящих в общий ответ для аномальной размерности, нам удалось обнаружить простой способ обобщения дважды логарифмического уравнения включением подлидирующих поправок. Анализ полученного уравнения показал, что возможно провести его дальнейшее упрощение, пересуммировав слагаемые в виде рациональной функции с простым знаменателем.

Полученное обобщенное дважды логарифмическое уравнение дает большое количество предсказаний для аналитически продолженной аномальной размерности операторов твиста-2 во всех порядках теории возмущений. Такая информация может служить как для проверки новых результатов для аномальной размерности операторов твиста-2, так и для восстановления общего вида аномальной размерности из различных имеющихся результатов, причем не только в сугубо теоретической $N = 4$ суперсимметричной теории Янга – Миллса, но и в реалистической КХД, где обобщенное дважды логарифмическое уравнение нарушается лишь незначительным образом.

Velizhanin V.N. // J. High Energ. Phys. 2022. Art. No. 176.

Деформация потоком 3-формы Неве – Шварца для критической неабелевой вихревой струны

А. В. Юнг

Отделение теоретической физики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Ранее М. Шифманом и А. Юнгом было показано, что солитонная неабелева вихревая трубка (струна) в $N = 2$ суперсимметричной квантовой хромодинамике (КХД) с калибровочной группой $U(2)$ и четырьмя кварковыми ароматами ведет себя как критическая суперструна. Четыре трансляционные моды объединяются с шестью ориентационными модами и образуют десятимерное пространство, необходимое для критичности суперструны. Это открывает возможности квантования такой струны и нахождения ее спектра. Состояния замкнутой суперструны, которые возникают в четырех измерениях, идентифицируются с адронами четырехмерной $N = 2$ суперсимметричной КХД. Ранее был найден безмассовый барион, отвечающий модулю комплексной структуры конифолда – шестимерного многообразия Калаби – Яу, на котором живет неабелева струна.

Целью данной работы было введение ненулевых масс кварков в четырехмерную КХД и исследование их отклика в теории критической суперструны. В частности, большой интерес представляет рассмотрение предела бесконечных масс, в котором некоторые кварки отщепляются. Такое рассмотрение позволило бы существенно расширить круг четырехмерных $N = 2$ суперсимметричных КХД, в которых адронный сектор описывается критическими суперструнами.

Основная идея работы состоит в том, что в эффективной десятимерной IIA-супергравитации, описывающей струну, эффект введения масс кварков в четырехмерной КХД сводится к ненулевому потоку 3-формы Неве – Шварца через 3-сферу на конифолде. Решены уравнения десятимерной гравитации, и вычислен скалярный потенциал для модуля комплексной структуры конифолда, генерируемый потоком 3-формы. Оказалось, что этот потенциал приводит к «убеганию вакуума на бесконечность». При этом варпфакторы метрики исчезают, а конифолд вырождается в пространство меньшей размерности. В четырехмерной теории это интерпретируется как деформация $N = 2$ суперсимметричной КХД с калибровочной группой $U(2)$ и четырьмя кварковыми ароматами в абелеву теорию с двумя кварковыми ароматами.

Yung A. // Phys. Rev. D. 2022. V. 106. P. 106019.

Спиновая динамика антиферромагнетика со спином 1/2 на треугольной решетке

А. В. Сыромятников

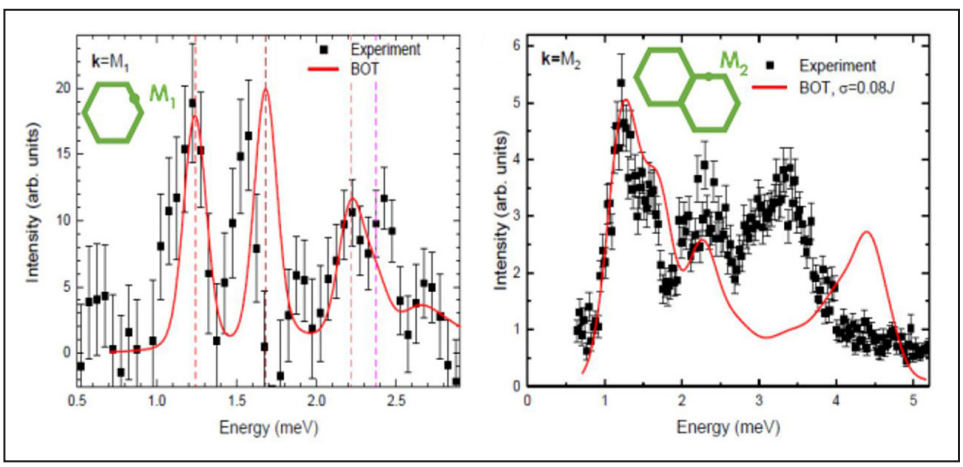
Отделение теоретической физики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

В современной теории сильно коррелированных систем множество коллективных явлений описывается в терминах элементарных возбуждений (квазичастиц), поэтому поиск и характеристика квазичастиц имеет принципиальное значение. В последнее время появляется все больше экспериментальных и численных свидетельств того, что в некоторых (квази)двумерных коллинеарных и неколлинеарных квантовых магнетиках стандартные аналитические методы даже качественно не описывают коротковолновые спиновые возбуждения. Одна из таких систем – антиферромагнетик Гейзенберга со спином 1/2 на треугольной решетке.

Целью работы было исследование динамических свойств этой модели новым методом, специально разработанным автором для изучения коротковолновой динамики.

Новым методом аналитически вычислялись динамические спиновые корреляторы в указанной модели, и результаты сравнивались с имеющимися численными результатами, а также с экспериментальными данными, полученными в соединении $Ba_3CoSb_2O_9$, которое хорошо описывается указанной моделью (рис.).

Было продемонстрировано качественное изменение спектра спиновых волн (элементарных возбуждений, известных из стандартных теорий), которое нельзя объяснить в рамках ни одного из имеющихся аналитических подходов и которое находится в прекрасном согласии с экспериментом. Кроме того, обнаружены новые коротковолновые квазичастицы, которые никогда не обсуждались ранее и которые дают заметные аномалии в динамическом спиновом коррелляторе, наблюдаемые экспериментально и численно.



Нейтронные данные, полученные в $Ba_3CoSb_2O_9$ в точках *M* на границе зоны Бриллюэна. Предложенный нами подход (BOT) хорошо описывает эти эксперименты (*красная линия*): можно считать, что согласие количественное при $\omega < 2{,}4$ мэВ и качественное при больших ω

Syromyatnikov A.V. // Phys. Rev. B. 2022. V. 105. P. 144414.

Малоугловое рассеяние нейтронов в полностью поляризованной фазе неколлинеарных магнетиков со взаимодействием Дзялошинского – Мория интерфейсного типа

О. И. Утесов

Отделение теоретической физики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

В работе было проведено теоретическое исследование особенностей малоуглового рассеяния нейтронов в полностью поляризованных фазах неколлинеарных магнетиков со взаимодействием Дзялошинского – Мория интерфейсного типа с целью их дальнейшей экспериментальной характеризации этим методом.

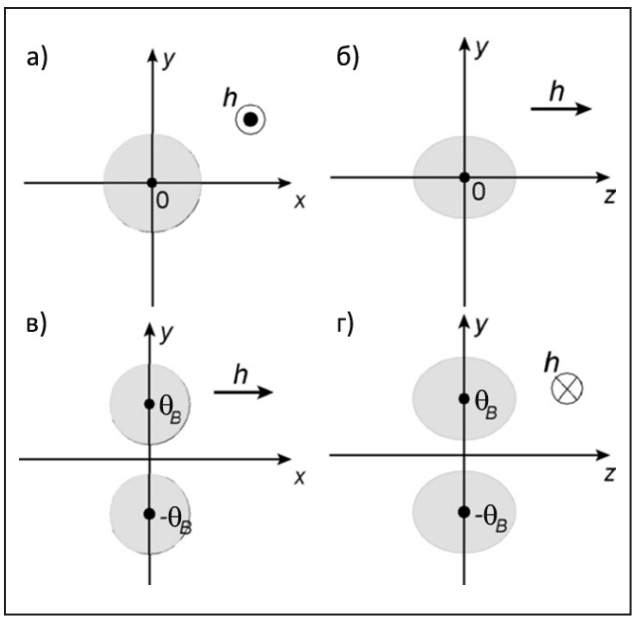
Неколлинеарные магнетики считаются перспективными материалами для создания новых приборов, в частности запоминающих устройств. Однако для их непосредственного использования требуется знание параметров, входящих в модели, для описания этих веществ. В данной работе для их экспериментального определения предложен метод малоуглового рассеяния нейтронов.

С помощью бозонного представления спиновых операторов в полностью поляризованной фазе неколлинеарных магнетиков со взаимодействием Дзялошинского – Мория интерфейсного типа были получены выражения для спектра магнонов при ориентации внешнего магнитного поля вдоль оси высокой симметрии и перпендикулярно ей. Также было учтено влияние одноионной анизотропии. Было показано, что в случае поля, перпендикулярного оси высокой симметрии, спектр магнонов является невзаимным и сдвинут относительно нуля на вектор модуляции циклоиды.

Полученные спектры магнонов с помощью известных формул для сечения рассеяния нейтронов позволили проанализировать так называемые карты малоуглового рассеяния, которые можно получить экспериментально в соединениях рассматриваемого типа.

Таким образом, были предложены и проанализированы четыре возможные геометрии эксперимента. Для каждой из них получено аналитическое выражение для кривой отсечки на карте рассеяния через параметры математической модели, описывающей систему (рис.).

Важно, что кривая отсечки может представлять собой эллипс, а не только окружность, как в случае кубических гелимагнетиков. Более того, в зависимости от направления поля ее центр может совпадать с началом координат или быть сдвинут на вектор модуляции циклоиды.



Карты малоуглового рассеяния нейтронов при разной ориентации внешнего магнитного поля: *а* – поле вдоль оси высокой симметрии *z*, детектор в плоскости *xy*; *б* – поле вдоль оси *z*, детектор в плоскости *yz*; *в* – поле в плоскости детектора *xy*; *г* – поле вдоль оси *x*, плоскость детектора *yz*

Utesov O.I. // Phys. Rev. B. 2022. V. 106. No. 17. P. 174408.

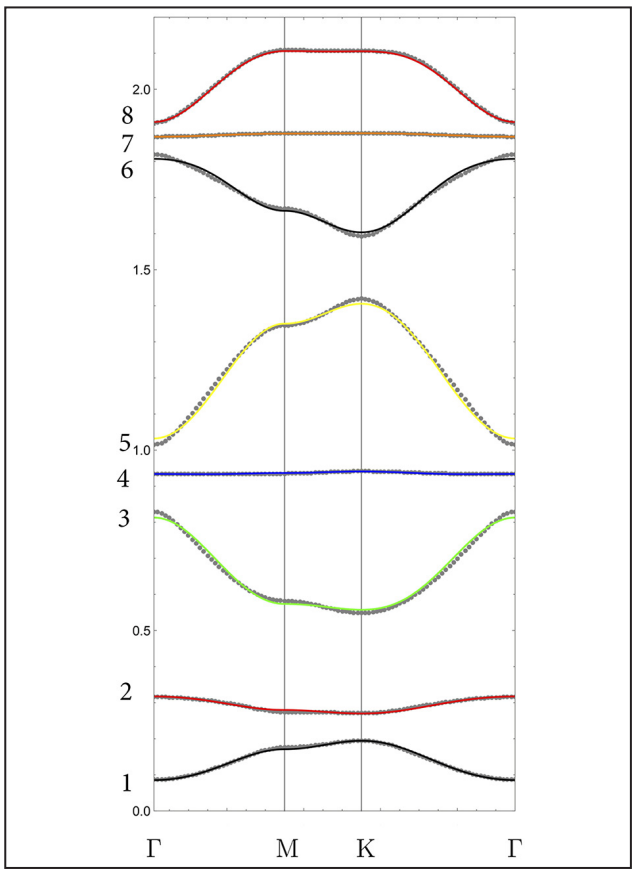
Зонная структура магнонов в скирмионных кристаллах и метод стереографической проекции

В. Е. Тимофеев, Д. Н. Аристов

Отделение теоретической физики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Решетки магнитных скирмионов (узелков намагниченности на масштабе десятков нанометров) были экспериментально обнаружены более 10 лет назад. Большой интерес к таким топологическим структурам связан с потенциальной возможностью создания новых сверхбыстрых и емких устройств оперативной памяти на их основе. Помимо практического интереса, большой академический интерес представляют и теоретические исследования этих материалов. Авторами работы ранее было предложено описание скирмионных конфигураций на основе метода стереографической проекции. В данном методе компоненты локальной намагниченности выражаются через функцию комплексного переменного, причем положение центров скирмионов отвечает особенностям этой функции.

Рассматривая зависящие от времени малые флуктуации вокруг оптимального статического решения, мы получили уравнения движения для магнонов (элементарных возбуждений локальной намагниченности), по своей структуре напоминающие уравнения Боголюбова – де Жена. Разработанный формализм был применен к широко известной модели двумерного ферромагнетика со взаимодействием Дзялошинского – Мория во внешнем магнитном поле, для которой основным состоянием в довольно широком диапазоне параметров является треугольная решетка блоховских скирмионов. В этой модели вычислены дисперсия низколежащих спиновых возбуждений (рис.), их волновые функции, кривизна Берри и топологические индексы зон. Также была исследована зависимость всех перечисленных выше характеристик от внешнего магнитного поля. Результаты работы могут быть применены для расчета наблюдаемых характеристик мультискирмионных систем и предсказаний их поведения.



Спектр магнонов в гексагональной зоне Бриллюэна. По оси абсцисс показана развертка вдоль линий, соединяющих симметричные точки зоны Бриллюэна – Г, М, К. Энергия по оси ординат приводится в единицах D^2/J

Timofeev V.E., Aristov D.N. // Phys. Rev. B. 2022. V. 105. P. 024422.

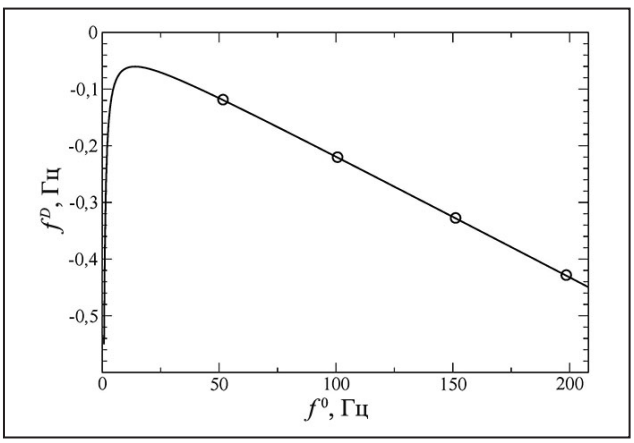
Прогресс в изучении *T*, *P*-нечетных эффектов на молекулах

А. Н. Петров, Л. В. Скрипников, А. В. Захарова, И. П. Курчавов, Д. Е. Майсон, Г. О. Пенязьков, А. В. Титов

Отделение перспективных разработок НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Разница энергий вследствие *T*, *P*-нечетных (*T* – обращение времени, *P* – пространственная инверсия) взаимодействий, уровней с противоположными проекциями углового момента (*M*) молекулы на направление внешнего электрического поля есть $E_M - E_{-M} = P_e(d_e E_{\text{eff}} + k_s E_s)$, где P_e – степень поляризации (*T*, *P*-нечетной) молекулы; d_e – электрический дипольный момент электрона (*e*ЭДМ); k_s – константа связи для скалярно-псевдоскалярного электрон-ядерного взаимодействия. Зная параметры P_e, E_{eff} и E_s, которые необходимо вычислить, можно извлечь значения d_e и k_s из измеренного расщепления $E_M - E_{-M}$. Ненулевой результат на современном уровне точности будет прямым свидетельством новой физики за рамками Стандартной модели. Начиная с 2017 г. считалось, что P_e для трехатомных молекул достигает единицы уже для небольших электрических полей. Нами показано, что это не так, и разработан метод расчета P_e, продемонстрированный на примере YbOH. Наши расчеты позволят корректно интерпретировать эксперименты на трехатомных молекулах. Затем метод был применен к катиону $LuOH^+$ и развит для расчета чувствительности трехатомных молекул к магнитному квадрупольному моменту ядра.

Эксперименты на трехатомных молекулах планируются как следующий, более точный этап экспериментов на двухатомных молекулах, исследования на которых успешно продолжаются. Недавно на катионе HfF^+ получено новое ограничение на *e*ЭДМ: $d_e < 4 \cdot 10^{-30}\ e \cdot$ см. Помимо измерения *e*ЭДМ, с высокой точностью измеряются и другие величины, например частоты f^0 и f^D, которые есть среднее значение и разность расщеплений Ω-дублетов во внешних вращающихся электрических и магнитных полях. Их обоснование из первых принципов очень важно как для развития современной молекулярной теории, так и для понимания возможных систематических ошибок в эксперименте. Результаты наших расчетов, которые учитывают множество возмущений в спектре молекулы (*черная кривая* на рис.), идеально воспроизводят экспериментальные данные (*черные кружки* на рис., которые нам предоставили L. Caldwell, T. Wright, J. Ye, E. Cornell). Аналогичная точность в сравнении с экспериментом достигнута для других комбинаций расщеплений Ω-дублетов. Наши расчеты позволили существенно уточнить значение молекулярного дипольного момента HfF^+ и объяснить расхождения расчетного и экспериментального времени для π/2-импульса.



Рассчитанная (*линия*) и экспериментальная (*кружки*) частота f^D как функция частоты f^0

1. *Petrov A., Zakharova A.* // Phys. Rev. A. 2022. V. 105. P. L050801.
2. *Maison D.E., Skripnikov L.V., Penyazkov G.O., ..., Petrov A.N.* // Phys. Rev. A. 2022. V. 106. P. 062827.
3. *Kurchavov I., Petrov A.* // Phys. Rev. A. 2022. V. 106. P. 062806.
4. *Petrov A.N., Skripnikov L.V., Titov A.V.* https://arxiv.org/abs/2302.02856

Комбинированный метод расчета электронной структуры материалов с лантаноидами на основе «подстраиваемого под соединение» потенциала внедрения

В. М. Шахова, Д. А. Мальцев, Ю. В. Ломачук, Н. С. Мосягин, Л. В. Скрипников, А. В. Титов

Отделение перспективных разработок НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

В лаборатории квантовой химии НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ разработан комбинированный метод моделирования электронной структуры материалов с использованием «подстраиваемых под соединение» псевдопотенциалов (Compound-Tunable PseudoPotentials – CTPP) и потенциалов внедрения (Compound-Tunable Embedding Potential – CTEP).

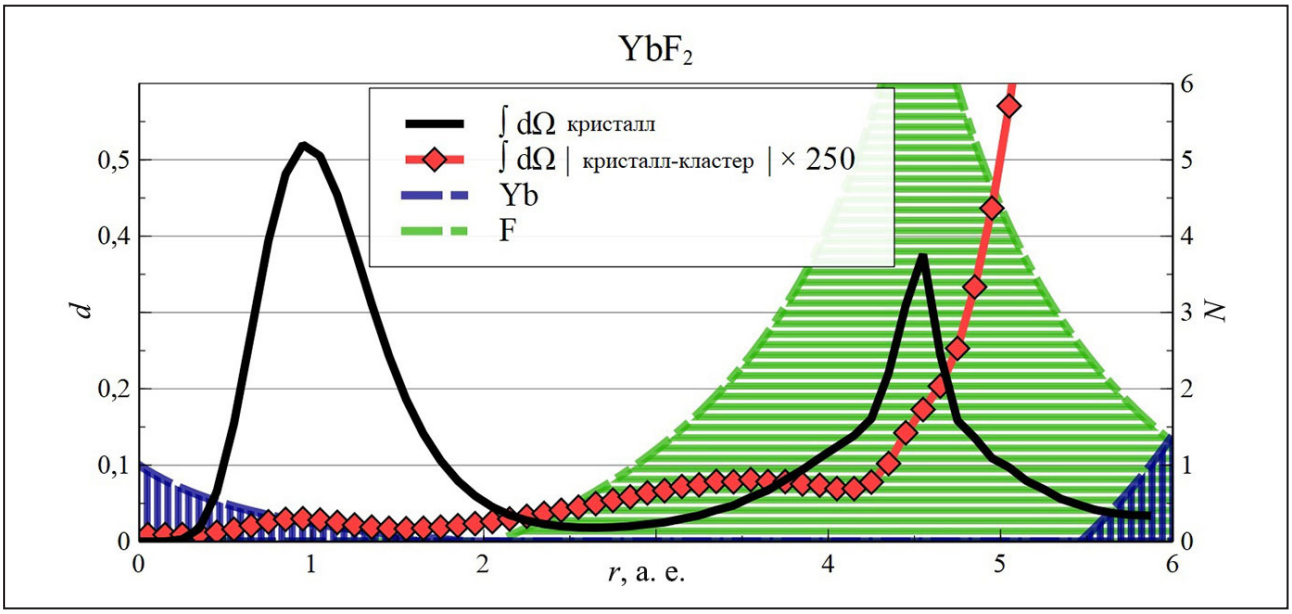
Построение CTEP для заданного фрагмента кристалла осуществляется в три этапа. На первом этапе программой CRYSTAL проводится расчет идеального кристалла с периодическими граничными условиями. На втором этапе программой также строятся короткодействующие large-core CTPPs для заданного кристалла. На третьем этапе выполняются кластерные расчеты фрагмента кристалла и строится дальнодействующий кулоновский потенциал окружения как часть CTEP: вырезается фрагмент кристалла минимально достаточного размера (тяжелый атом и его окружение), в пределах которого электронная плотность должна воспроизводиться с высокой точностью; атомы ближнего окружения фрагмента кристалла описываются точечными зарядами и CTPPs (т. е. псевдоатомами), чтобы учесть влияние на заданный фрагмент уже всего кристалла за вычетом атомов фрагмента. При этом предполагается, что релаксация окружения фрагмента кристалла пренебрежимо мала и вся система с учетом псевдоатомов ближнего окружения в целом электронейтральна.

С помощью этого комбинированного метода исследованы кристаллы с ионно-ковалентным типом связи и атомом лантаноида в периодической структуре (YbF_2, YbF_3, $YbCl_2$, $YbCl_3$) и получены следующие ключевые результаты.

1. В рамках периодических расчетов использование прецизионных псевдопотенциалов (small-core PP) для тяжелых атомов и насыщенных базисных наборов для всех атомов практически невозможно – вместо этого применяются менее точные псевдопотенциалы и «обрезанные» базисные наборы. Следовательно, точность расчетов на данном этапе находится на уровне 0,1 эВ для энергетических характеристик. Важно отметить, что для *f*-элементов типичная энергия возбуждения электрона составляет около 0,1 эВ. Отсюда следует, что метод исследования материалов с *f*-элементами как идеальных кристаллов с периодическими граничными условиями не позволяет получить точных результатов, поэтому необходимо использовать другой подход.

2. Модель фрагмента кристалла, построенная с помощью метода CTEP с использованием CTPP, воспроизводит электронную плотность из периодических расчетов в окрестности атома Yb с очень высокой точностью (рис.), т. е. практически не вносит дополнительные ошибки, кроме тех, что уже присутствуют в расчетах периодической структуры, взятой за основу при построении модели.

3. Как было отмечено выше, точность периодических расчетов находится на уровне 0,1 эВ для энергетических характеристик, что и обусловлено используемыми приближениями. В свою очередь, в кластерных расчетах методом CTEP возможно использовать и хорошие базисы, и псевдопотенциалы, поэтому связанные с ними ошибки вычислений могут быть кардинально уменьшены. Это показано в рамках анализа структурных параметров кристаллов и кластеров: уже в пилотных расчетах было достигнуто улучшение в 2–3 раза для тех параметров, которые хуже всего воспроизводились в расчетах с CRYSTAL.



Радиальная зависимость усредненных по сферам абсолютных разностей электронных плотностей кристалла YbF_2 (*черная линия*) и соответствующего ему кластера (*красная линия*), центрированная на атоме иттербия. *Заштрихованные пики* качественно представляют положение атомов фрагмента кристалла

Shakhova V.M., Maltsev D.A., Lomachuk Yu.V., Mosyagin N.S., Skripnikov L.V., Titov A.V. // Phys. Chem. Chem. Phys. 2022. V. 24. P. 19333–19345.

Спин-таутомерия эндоэдральных комплексов

С. Г. Семенов[1], М. Е. Бедрина[2], Т. А. Андреева[2], А. В. Титов[1, 2]

[1] Отделение перспективных разработок НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ
[2] Санкт-Петербургский государственный университет

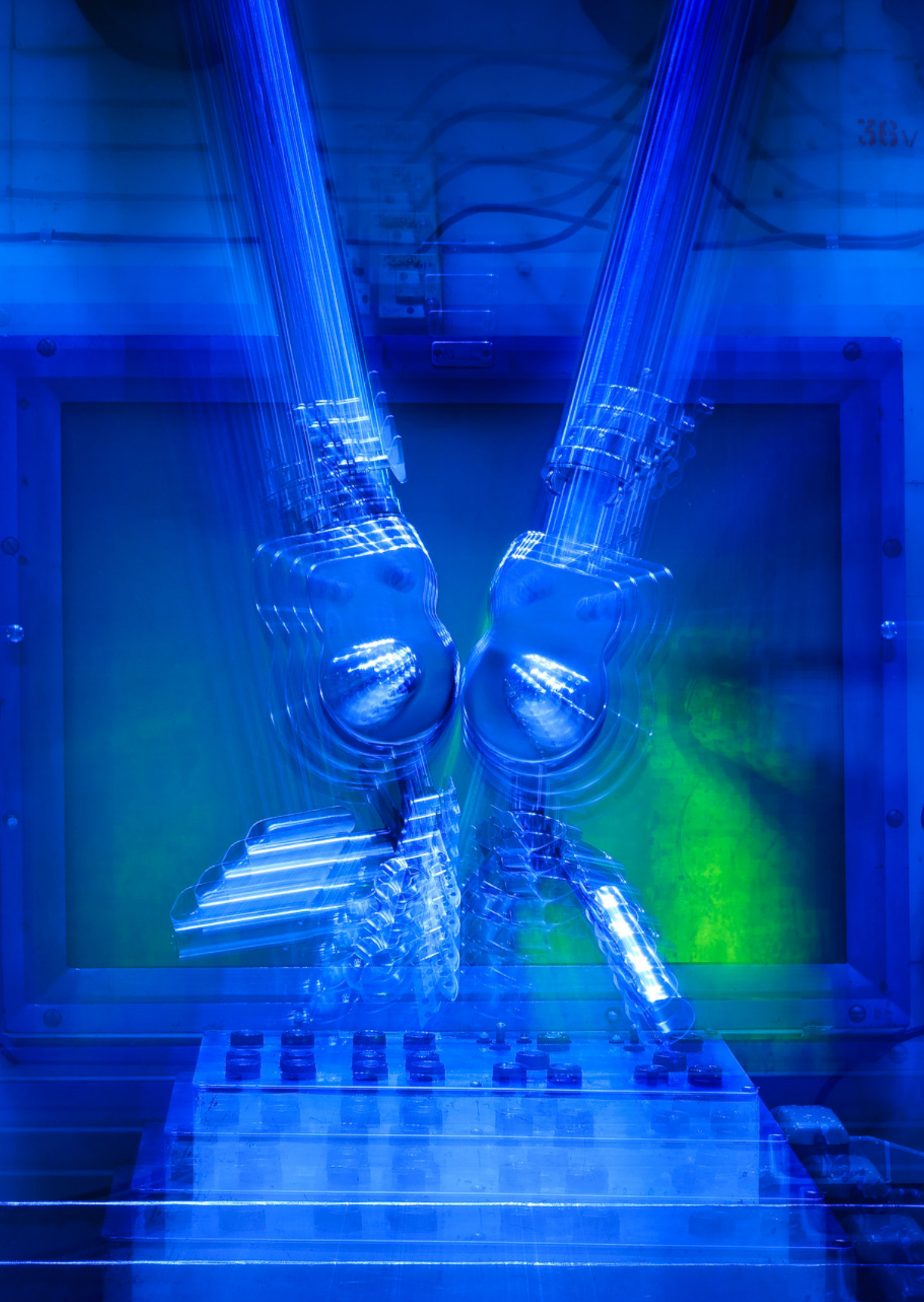
На примере $Eu@C_{60}$ нами исследована эндоэдральная спин-таутомерия – быстрое обратимое изменение равновесного положения частицы внутри полости, сопровождающееся изменением спина и колебательного спектра эндоэдрального комплекса.

Методом (U)PBE0/SDD определены структурные параметры и частоты колебаний комплекса в минимумах и седловых точках потенциала взаимодействия эндоатома с фуллереном. Множеству локальных минимумов отвечают неэквивалентные квазивырожденные эндоизомеры I и II. В равновесной структуре изомера I ядро лантаноида расположено под центром связи C=C, и реализуется η^2-координация эндоатома с двумя соседними атомами фуллерена в синглетном спиновом состоянии. В равновесной структуре изомера II оно расположено под шестиугольной гранью, и реализуется η^6-координация с циклогекса-1,3,5-триеновым фрагментом фуллерена в триплетном спиновом состоянии. Эндоатом европия сохраняет семь неспаренных электронов в 4*f*-оболочке. Степень вырождения изомера I совпадает с ее спиновой мультиплетностью (7 + 1 = 8); степень квазивырождения изомера II равна произведению спиновых мультиплетностей фуллерена и 4*f*-оболочки (3 · 8 = 24). Расчетные ИК-спектры изомеров существенно различаются.

Энергетические барьеры, соответствующие седловым точкам между минимумами, очень малы. Они не препятствуют перемещению эндоатома по классическим траекториям под 20 шестиугольными гранями фуллеренового полиэдра в обход 12 пятиугольных граней. Изомеры I и II различаются числом неспаренных электронов (7 и 9) и колебательным спектром, но имеют практически совпадающие энергии связи эндоатома с фуллереном $E_b \approx 2{,}25$ эВ и близкие величины равновесных расстояний между ядром европия и ядрами соседних атомов углерода: 256 пм в изомере I и 265 пм в изомере II.

Несохранение спина комплексом, включающим тяжелый эндоатом лантаноида (Eu, Yb и др.), позволяет рассматривать η^2- и η^6-изомеры I и II как эндоэдральные спин-таутомеры, подверженные влиянию магнитного поля.

Semenov S.G., Bedrina M.E., Andreeva T.A., Titov A.V. // Eur. Phys. J. D. 2022. V. 76. P. 253.
https://doi.org/10.1140/epjd/s10053-022-00583-4



Исследования с использованием нейтронов, фотонов и мюонов

42 Соизмеримый геликоидальный порядок в слоистом треугольном магнетике Na_2MnTeO_6

43 Влияние магнитных примесей на сверхпроводимость в LaH_{10}

44 Баланс слабых взаимодействий определяет магнитную фазовую диаграмму ортоферритов $RFeO_3$

45 Экспериментальное доказательство логарифмической фрактальной структуры ботанических деревьев

Соизмеримый геликоидальный порядок в слоистом треугольном магнетике Na_2MnTeO_6

А. И. Курбаков, А. Е. Суслопарова

Отделение нейтронных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Низкоразмерные магнитные системы чувствительны к незначительным изменениям параметров обменного взаимодействия, ответственным за образование спин-жидких или дальнодействующих упорядоченных спиновых основных состояний, и к эффектам одноионной анизотропии при следовании разным протоколам в случаях типа Гейзенберга и типа Изинга. Треугольные магнитные системы подвержены фрустрациям из-за конкуренции взаимоисключающих связей. Семейство тригонально-слоистых четвертичных теллуратов A_2MnTeO_6 (*A* – одновалентный металл) предоставляет возможность настраивать параметры межслоевого обменного взаимодействия, не затрагивая параметры магнитного обмена в слоях. Ионы четырехвалентного марганца со спином $S = 3/2$ в A_2MnTeO_6 (пр. гр. *P-31c*) образуют разбавленную треугольную сетку внутри слоя, разделенного ионами шестивалентного теллура (рис. 1). Расположение центрированных октаэдров $Mn^{4+}O_6$ и $Te^{6+}O_6$ с общими ребрами сотовое.

Соединение Na_2MnTeO_6 испытывает антиферромагнитный порядок при T_N = 5,5 K, которому предшествуют короткодействующие корреляции при температурах, значительно превышающих температуру упорядочения. Обнаружено, что решение для спиновой структуры соответствует магнитной шубниковской группе *R-3*'c'. Ионы Mn^{4+} в октаэдрическом окружении образуют треугольную сеть, в которой все спины направлены из центра каждого треугольника. Магнитная структура в Na_2MnTeO_6 соизмерима, является спиновой 120-градусной спиралью с вектором распространения **k** = (1/3, 1/3, 1/3) (рис. 2), в отличие от планарной спиновой структуры в структурно-эквивалентном Li_2MnTeO_6 с вектором магнитного распространения **k** = (1/3, 1/3, 0).

Сравнительное исследование Na_2MnTeO_6 и Li_2MnTeO_6 выявило важный аспект влияния межслойной связи на магнетизм в слоистых квазидвумерных магнетиках с фрустрированным взаимодействием внутри слоев, когда магнитные ионы формируют треугольную АФМ-структуру. Небольшие вариации межслоевых обменных взаимодействий вызывают качественное изменение основного магнитного состояния.

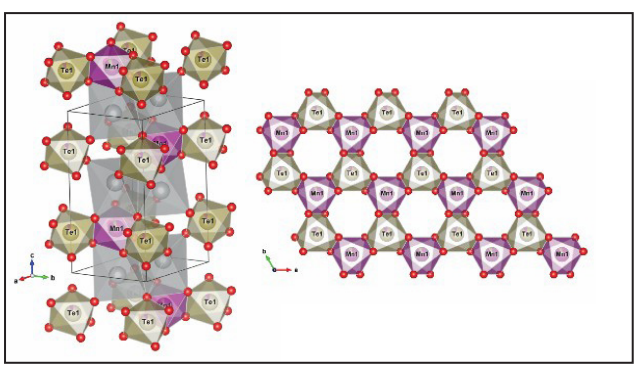


Рис. 1. Слоистая кристаллическая структура Na_2MnTeO_6 (*слева*). Проекция магнитного слоя $(MnTeO_6)^{2-}$ на плоскость *ab*, в которой чередуются октаэдры MnO_6 и TeO_6, имеющие общие ребра (*справа*)

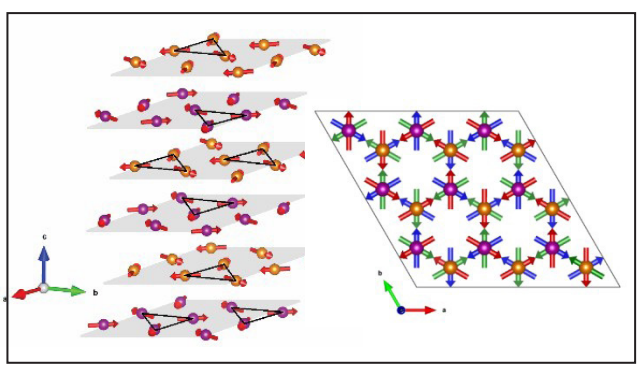


Рис. 2. Спиновая структура Na_2MnTeO_6. *Слева* – спиновые треугольники (*сплошные линии*). Справа – проекция магнитной структуры на плоскость *ab*; три упорядочивающих слоя (*стрелки разного цвета*); ионы, находящиеся на соседних уровнях по координате *z* и меняющие направления спина (*разные цвета*)

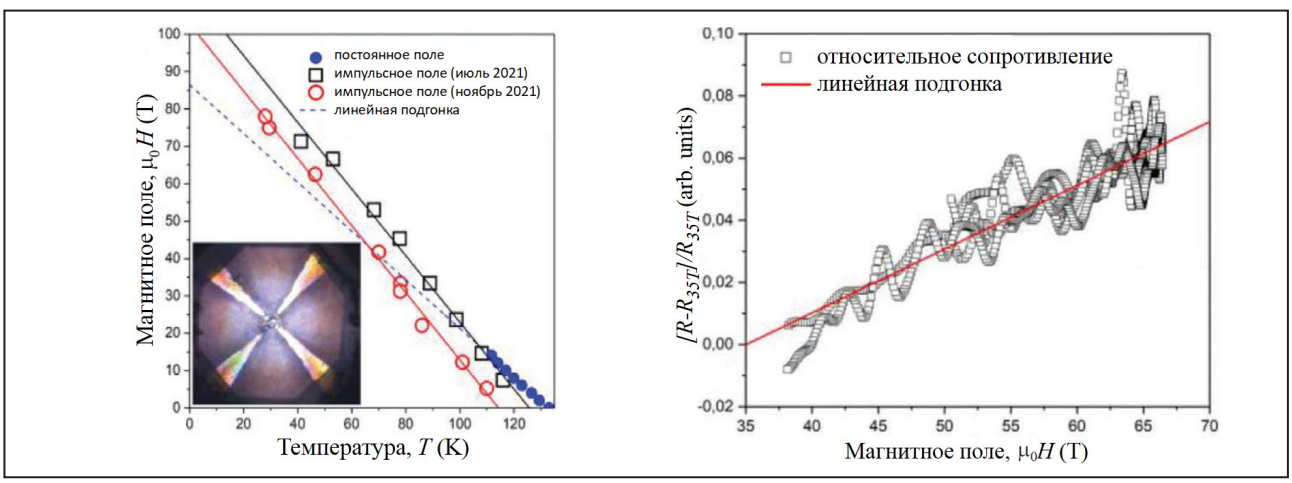
Kurbakov A.I., Susloparova A.E., Pomjakushin V.Yu. et al. // Phys. Rev. B. 2022. V. 105. P. 064416.

Влияние магнитных примесей на сверхпроводимость в LaH_{10}

А. А. Быков[1], К. Ю. Терентьев[1], Д. В. Семенок[2], D. Zhou[2], M. Galasso[2], А. Г. Квашнин[2], А. Р. Оганов[2], И. А. Троян[3], А. Г. Иванова[3], А. Ю. Серегин[3], И. С. Любитин[3], А. В. Садаков[4], О. А. Соболевский[4], К. С. Перваков[4], В. М. Пудалов[4], И. А. Круглов[5], А. В. Черепахин[6]

[1] *Отделение нейтронных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ*
[2] *Сколковский институт науки и технологий*
[3] *Институт кристаллографии им. А. В. Шубникова РАН*
[4] *Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН*
[5] *Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н. Л. Духова*
[6] *Институт физики им. Л. В. Киренского СО РАН*

Полигидриды – это новый класс сверхпроводящих материалов с чрезвычайно высокими критическими параметрами, которые очень перспективны для технических применений. Однако исследование таких материалов осложняется большими критическими магнитными полями H_{c2}, превышающими 120–160 Т. В нашей работе обнаружено, что частичная замена атомов La магнитными атомами Nd приводит к значительному подавлению сверхпроводимости в LaH_{10}: каждый атомный процент Nd вызывает снижение T_c на 10–11 К, помогая контролировать критические параметры этого соединения. Сильные импульсные магнитные поля до 68 Т помогли впервые исследовать магнитные фазовые диаграммы (рис. *слева*) эффекта Холла, магнитосопротивления (рис. *справа*). Как ни странно, $(LaNd)H_{10}$ демонстрирует совершенно линейную зависимость $H_{c2}(T)$, которая вызывает вопрос о применении для полигидридов модели Вертхамера – Гельфанда – Хоэнберга. Подавление сверхпроводимости в LaH_{10} магнитными атомами и неподавление немагнитными (например, Y, Al, C) в соответствии с теоремой Андерсона дает новые экспериментальные доказательства изотропного (s-типа) характера конвенциального электрон-фононного спаривания в $(LaNd)H_{10}$.



H-T-фазовая диаграмма $(La_{0,91}Nd_{0,09})H_{10}$ (*слева*). Линейный характер магнитосопротивления в импульсных магнитных полях 37–67 Т при 105 К (*справа*). На *вставке* – фотография образца в алмазной наковальне при 170 ГПа. Видны напыленные электрические контакты

Semenok D.V., Troyan I.A., Sadakov A.V., Zhou D., Galasso M., Kvashnin A.G., Ivanova A.G., Kruglov I.A., Bykov A.A., Terent'ev K.Yu., Cherepakhin A.V., Sobolevskiy O.A., Pervakov K.S., Seregin A.Yu., ..., Pudalov V.M., Lyubutin I.S., Oganov A.R. // Adv. Mater. 2022. V. 34. Publ. No. 2204038.

Баланс слабых взаимодействий определяет магнитную фазовую диаграмму ортоферритов RFeO$_3$

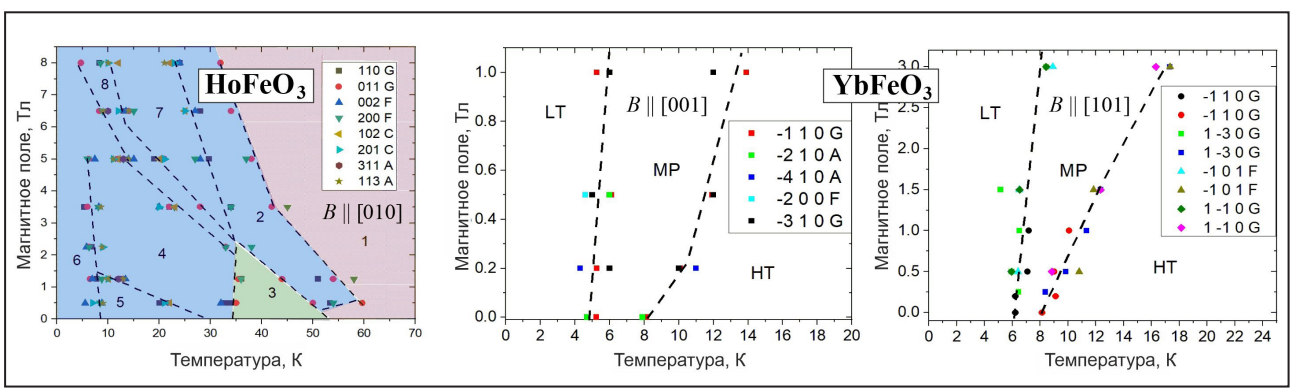
И. А. Зобкало, А. К. Овсяников, К. Ю. Терентьев, О. В. Усманов

Отделение нейтронных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Методами неупругого рассеяния нейтронов, а также нейтронной дифракции во внешних магнитных полях выполнены исследования магнитных взаимодействий в мультиферроиках-ортоферритах RFeO$_3$ (R = Ho, Tb, Yb).

Измеренная температурная эволюция энергетической щели в магнонном спектре RFeO$_3$ позволила получить температурную зависимость магнитной анизотропии. В случае, когда магнитные моменты железа имеют преимущественное направление вдоль оси c (фаза Г4), анизотропия имеет тип «легкая плоскость», тогда как в фазе Г2 при ориентации спинов железа в основном вдоль оси b доминирует анизотропия типа «легкая ось».

Показано, что между энергией обмена в плоскости ab и вдоль c (рис.) есть существенная разница, что ранее не принималось во внимание: для HoFeO$_3$ J_{ab}^{Fe-Fe} = 4,764(5) меВ, J_c^{Fe-Fe} = = 4,901(5) меВ, для TbFeO$_3$ J_{ab}^{Fe-Fe} = 4,55(2) меВ, J_c^{Fe-Fe} = 4,77(1) меВ. Получены также параметры обменных взаимодействий между ионами железа, следующими за ближайшими соседями, J_{nnn}^{Fe-Fe} = 0,10(2)–0,15(1), между железной и редкоземельной подрешетками, J^{Fe-R} ~ –0,026(2), а также параметры обмена внутри редкоземельной подрешетки, J^{R-R} ~ 0,035(5), и параметры антисимметричного обмена, $D1$ = 0,12(2)–0,13(3), $D2$ = 0,08(2)–0,10(3). Наши исследования показывают, что RFeO$_3$ имеют богатую фазовую диаграмму во внешнем магнитном поле (см. рис.) Обмен внутри Fe-подсистемы является наиболее сильным и играет основную роль во всем диапазоне температур ниже T_N. Однако менее сильные взаимодействия существенно влияют на магнитную структуру. В результате тонкого баланса между этими слабыми взаимодействиями реализуется та или иная последовательность ориентационных переходов.



Магнитные фазовые диаграммы HoFeO$_3$, YbFeO$_3$

1. *Ovsianikov A.K., Usmanov O.V., Zobkalo I.A., ..., Terentjev K.Yu. et al.* // J. Magn. Magn. Mater. 2022. V. 557. P. 169431.
2. *Ovsianikov A.K., Usmanov O.V., Zobkalo I.A., ..., Terentjev K.Yu. et al.* // J. Magn. Magn. Mater. 2022. V. 563. P. 170025.

Экспериментальное доказательство логарифмической фрактальной структуры ботанических деревьев

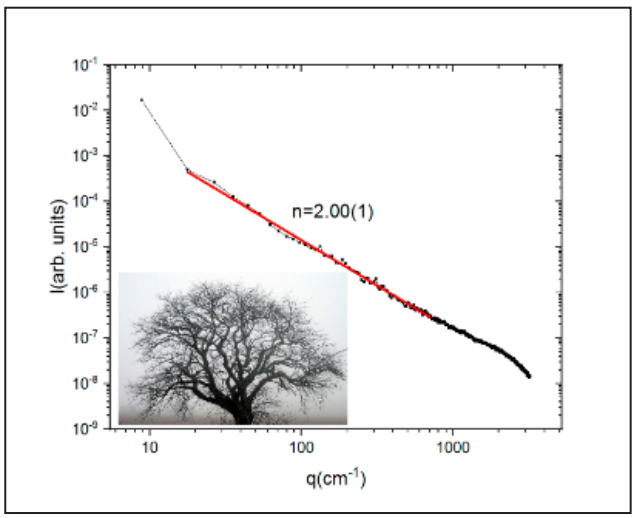
С. В. Григорьев, О. Д. Шнырков, П. М. Пустовойт, Е. Г. Яшина, К. А. Пшеничный
Отделение нейтронных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Много веков назад Леонардо да Винчи сформулировал закон роста дерева как правило сохранения площади. Согласно этому правилу площадь сечения веток ниже заданной точки ветвления равна сумме площадей сечений дочерних ветвей выше этой точки ветвления: $d_i^2 = n \cdot d_{i+1}^2$, где d – диаметр ветви и n – количество ветвей.

Этот закон можно переформулировать в терминах очень специфической фрактальной структуры – логарифмического фрактала. Мы использовали метод численного анализа Фурье для идентификации логарифмических фрактальных свойств двумерных объектов, а затем применили его для изучения ветвящейся системы реальных трехмерных деревьев через их проекцию на двумерное пространство, т. е. по их фотографиям. Для разных видов деревьев мы наблюдаем q^{-2} – затухание спектральной интенсивности, характеризующей ветвящуюся структуру и обусловленной логарифмической фрактальной структурой в двумерном пространстве (рис.).

Исследования проекций различных типов и различных индивидов деревьев показали, что необходимо либо заменить, либо дополнить правило сохранения площади Леонардо новым правилом, применяемым к произведению диаметра d и длины l ветвей: $d_i \cdot l_i = n \cdot d_{i+1} \cdot l_{i+1}$. Приходится признать, что правило Леонардо действует только в том случае, если длина ветви следующего поколения в $\sqrt{n}$ раз меньше, чем у предыдущего, т. е. при условии $l_i = \sqrt{n} \cdot l_{i+1}$. В случае если оба правила выполнены, можно сформулировать закон для объема для разных поколений ветвей дерева: объем (масса) всех ветвей следующего поколения в d_i/d_{i+1} раз меньше, чем у предыдущего поколения.

Иными словами, само дерево в трехмерном пространстве не является логарифмическим фракталом, в то время как его проекции как сверху, так и сбоку имеют структуру логарифмического фрактала. Можно сделать вывод, что жизнь дерева течет по законам двумерного пространства.



Результат исследования фотографии дуба методом фурье-анализа. Кривая спектральной интенсивности в зависимости от обратной координаты q имеет участок с наклоном, близким к 2, что соответствует логарифмической фрактальной структуре

1. Grigoriev S.V., Shnyrkov O.D., Pustovoit P.M., Iashina E.G., Pshenichnyi K.A. // Phys. Rev. E. 2022. Iss. 105. P. 044412.
2. Григорьев С. В. // Наука и жизнь. 2022. № 11. С. 56–59.



Исследования с использованием протонов и ионов. Физика нейтрино

48 Поиски распадов бозона Хиггса на частицы темной материи в эксперименте ATLAS

49 Измерение сечений рождения *Z*-бозона в *pp*-взаимодействиях при $\sqrt{s}$ = 13 ТэВ

50 Обнаружение экспериментом CMS указаний на проявление БФКЛ-эффектов в двухструйных событиях с большим интервалом быстроты в *pp*-соударениях при энергии 2,76 ТэВ

51 Первое наблюдение рождения одиночного топ-кварка и фотона в эксперименте ATLAS

52 О перспективах измерения аномального магнитного момента τ-лептона в ультрапериферических взаимодействиях на Большом адронном коллайдере

54 Обнаружение изомера формы и низколежащей вращательной полосы с сильной положительной деформацией в полумагическом ^{187}Pb

55 Прямая высокоточная масс-спектрометрия сверхтяжелых элементов на установке SHIPTRAP

56 Исследование структуры легких экзотических ядер методом упругого протон-ядерного рассеяния в инверсной кинематике с помощью активной мишени ИКАР

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

60 Развитие неравновесного гидродинамического подхода для описания эмиссии высокоэнергетических частиц при столкновениях тяжелых ионов

61 Первое измерение направления солнечных нейтрино с энергией менее 1 МэВ с детектором Borexino

62 Новые ограничения на константу связи аксиона с электроном для солнечных аксионов

63 Поиск низкоэнергетических сигналов от быстрых радиовсплесков с детектором Borexino

Поиски распадов бозона Хиггса на частицы темной материи в эксперименте ATLAS

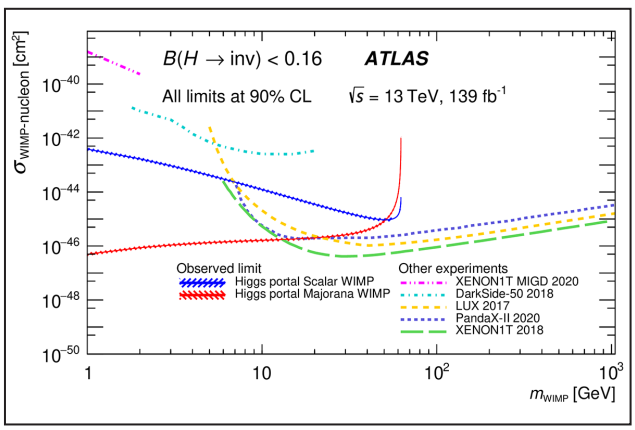
С. Г. Барсов, В. Т. Грачев, А. Е. Ежилов, М. П. Левченко, В. П. Малеев, Ю. Г. Нарышкин, Д. Пуджа, В. М. Соловьев, О. Л. Федин, Г. В. Федотов, В. А. Щегельский

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

Поиски новой физики, т. е. процессов, которые не описывает Стандартная модель (СМ), являются наиболее важной задачей экспериментов, проводимых на Большом адронном коллайдере (БАК). Одно из этих направлений – поиск частиц темной материи (ТМ). В моделях Higgs Portal (портала Хиггса) предсказан распад бозона Хиггса на слабо взаимодействующие массивные частицы (Weakly Interacting Massive Particles – WIMP), которые являются одним из наиболее вероятных кандидатов на роль частиц ТМ.

Поиск таких распадов был проведен в эксперименте ATLAS в протон-протонных взаимодействиях с использованием данных, полученных за весь второй период работы БАК (2015–2018) и соответствующих полной светимости 139 фб$^{-1}$. Так как частицы ТМ не детектируются экспериментальной установкой, необходимым признаком таких событий является наличие большой недостающей поперечной энергии, которая определяется по сумме поперечных компонент импульсов зарегистрированных частиц.

Для анализа данных отбирались события с двумя заряженными лептонами (электронами или мюонами) противоположных знаков заряда с инвариантной массой в области массы Z-бозона и недостающей поперечной энергией. По результатам проведенного исследования отклонений от предсказаний СМ не было обнаружено. Получен наблюдаемый верхний предел на невидимый распад бозона Хиггса 19 %. На рисунке показано сравнение верхних пределов на не зависящее от спина сечение взаимодействия частиц ТМ с нуклонами, полученное в эксперименте ATLAS, с экспериментами по так называемому прямому поиску частиц ТМ. Как следует из сравнения, в эксперименте ATLAS получены более сильные ограничения в области масс частиц ТМ меньше 10 ГэВ.



Сравнение верхних пределов для спин-независимого сечения рассеяния частиц темной материи на нуклонах, полученное в эксперименте ATLAS и в экспериментах по прямому поиску частиц темной материи, в зависимости от предполагаемой массы частицы темной материи

ATLAS Collab., Aad G., ..., Barsov S., Ezhilov A., Fedin O., Fedotov G., Gratchev V., Levchenko M., Maleev V., Naryshkin Yu., Pudzha D., Schegelsky V., Solovyev V. et al. // JHEP. 2022. Iss. 8. Art. No. 104. https://doi.org/10.1007/JHEP08(2022)104

Измерение сечений рождения Z-бозона в pp-взаимодействиях при $\sqrt{s}$ = 13 ТэВ

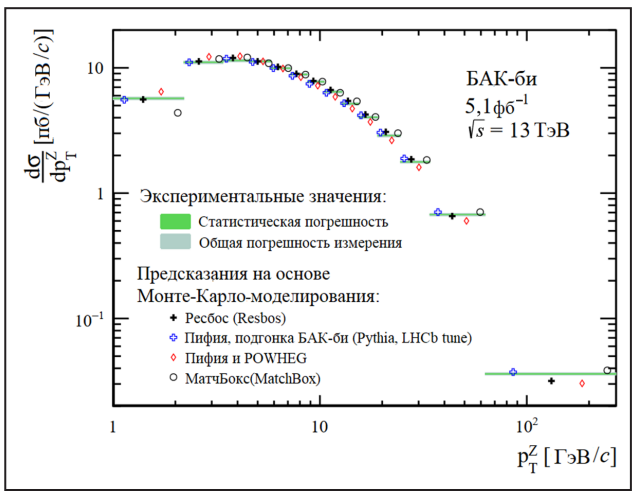
Г. Д. Алхазов, А. В. Андреянов, Н. Ф. Бондарь, А. А. Воробьев, Н. И. Воропаев, А. А. Дзюба, К. А. Ившин, Д. С. Ильин, А. Г. Инглесси, С. Н. Котряхова, П. В. Кравченко, О. Е. Маев, Д. А. Майсузенко, Н. Р. Сагидова, А. Н. Соловьев, И. Н. Соловьев, А. Д. Чубыкин, В. В. Чуликов

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

В рамках пертурбативной квантовой хромодинамики сечение рождения калибровочных бозонов Z^0 вычисляется в третьем порядке теории (N^3LO), поэтому особый интерес представляет сравнение экспериментально измеренных сечений с точными теоретическими предсказаниями. Также экспериментальное измерение сечений рождения Z^0 в кинематической области, доступной в эксперименте LHCb, который проводится на Большом адронном коллайдере (БАК), позволит существенно уменьшить неопределенность партонных распределений для валентных кварков, несущих как малые ($x \sim 5 \cdot 10^{-5}$), так и большие ($x \sim 0{,}8$) доли импульса протона. Следует отметить, что для области больших x наблюдаются противоречия между результатами предыдущих измерений (эксперименты SeaQuest и NuSea). Целью данной работы являлось изучение интегрального и дифференциальных сечений рождения калибровочных бозонов Z^0 в протон-протонных взаимодействиях в области быстрот ($2{,}0 < y^Z < 4{,}5$), соответствующей малым (относительно оси пучков) углам вылета Z^0.

Измерение характеристик рождения Z^0-бозона производилось при помощи выделения событий распада $Z^0 \to \mu^+\mu^-$ в наборе данных, накопленных экспериментом LHCb в ходе второго этапа работы БАК (2016–2018) при энергии в системе центра масс взаимодействующих протонов 13 ТэВ. Выделено 796 000 событий-кандидатов. Для реконструированных частиц был проведен анализ угловых распределений и распределений по поперечному импульсу. Интегральные, дифференциальные и дважды дифференциальные сечения рождения Z^0-бозона получены при следующих кинематических условиях, определяющих чувствительный объем детектора: масса мюонной пары от 60 до 120 ГэВ/c^2, поперечные импульсы мюонов более 20 ГэВ/c, псевдобыстроты мюонов от 2,0 до 4,5.

Экспериментальные данные находятся в хорошем согласии с теоретическими предсказаниями, скорректированными с учетом кинематических условий эксперимента (рис.). Работа выполнена при активном участии специалистов НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ.



Сечение рождения Z^0-бозона в зависимости от его поперечного импульса для интервала быстрот $2{,}0 < y^Z < 4{,}5$. Также приведены теоретические предсказания, полученные на основе Монте-Карло-моделирования

LHCb Collab., Aaij R., ..., Alkhazov G., ..., Andreianov A., ..., Bondar N., ..., Chubykin A., Chulikov V., ..., Dzyuba A., ..., Ilin D., ..., Inglessi A., ..., Ivshin K., ..., Kotriakhova S., Kravchenko P., ..., Maev O., ..., Maisuzenko D., ..., Sagidova N., ..., Solovev A., Solovyev I., ..., Vorobyev A., ..., Voropaev N. et al. // JHEP. 2022. Iss. 7. Art. No. 026. https://doi.org/10.1007/JHEP07(2022)026

Обнаружение экспериментом CMS указаний на проявление БФКЛ-эффектов в двухструйных событиях с большим интервалом быстроты в *pp*-соударениях при энергии 2,76 ТэВ

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

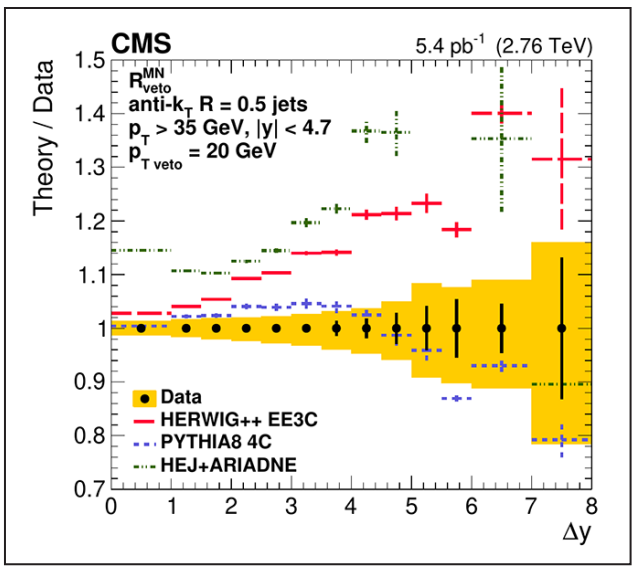
Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, коллаборация CMS

Поиск проявлений эффектов эволюции Балицкого – Фадина – Кураева – Липатова (БФКЛ) является одной из важнейших задач физики взаимодействия частиц при высоких энергиях. При достаточно высоких энергиях режим БФКЛ-эволюции квантовой хромодинамики (КХД) должен стать доминирующим, поэтому знание величины энергии, с которой этот режим станет определяющим, важно для дальнейшего развития описания процессов рассеяния при высоких энергиях. Для поисков новой физики при сверхвысоких энергиях необходимо прецизионное описание эффектов КХД в рамках БФКЛ-эволюции.

Эксперимент «Компактный мюонный соленоид» (КМС, коллаборация CMS) провел исследования по поиску эффектов эволюции БФКЛ в двухструйных событиях с большим интервалом быстрот между струями в *pp*-соударениях при энергии 2,76 ТэВ в специальном сеансе Большого адронного коллайдера (БАК) с малой величиной вероятности перекрытия одновременных *pp*-соударений (pile-up). Наиболее чувствительными к эффектам БФКЛ являются измерения различных (инклюзивных, квазиэксклюзивных, с наибольшими быстротами – Мюллера – Навеле) сечений процессов образования адронных струй с большим интервалом быстроты между струями и отношения их сечений. Для увеличения чувствительности к эффектам БФКЛ группой НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ был предложен дополнительный вариант двухструйного сечения с вето на дополнительные струи.

В 2022 г. эксперимент CMS обнаружил указания на проявления эффектов эволюции БФКЛ в отношениях (рис.) при отклонении измеренного двухструйного сечения с вето на дополнительные струи от предсказаний стандартных генераторов. Дальнейшие измерения новых наблюдаемых данных при других энергиях БАК могут определить роль БФКЛ-эволюции.

НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ внес большой вклад в создание CMS-детектора. Его сотрудники участвуют в бесперебойной поддержке и модернизации детектора, активно занимаются анализом полученных данных.



Сравнение предсказаний имеющихся расчетов с помощью Монте-Карло-генераторов к измеренным данным CMS для отношений двухструйных сечений с вето на дополнительные струи. Стандартные генераторы HERWIG и PYTHIA, описывающие другие многочисленные данные, не описывают двухструйные процессы с большим интервалом быстроты между струями с вето на дополнительные струи

CMS Collab., Tumasyan A., ..., Egorov A., Gavrilov G., Golovtsov V., Ivanov Yu., Kim V., Kuznetsova E., Murzin V., Oreshkin V., Smirnov I., Sosnov D., Sulimov V., Uvarov L., Volkov S., Vorobyev A. et al. // JHEP. 2022. Iss. 3. Art. No. 189. https://doi.org/10.1007/JHEP03(2022)189

Первое наблюдение рождения одиночного топ-кварка и фотона в эксперименте ATLAS

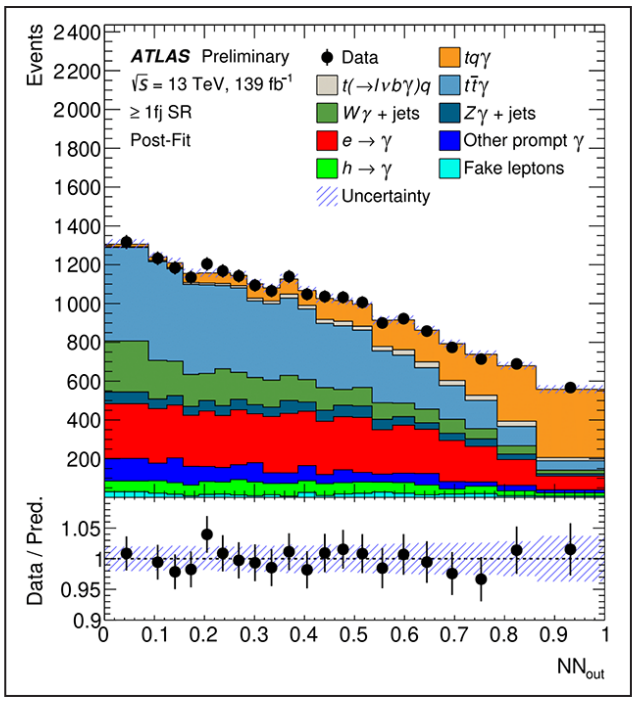
С. Г. Барсов, В. Т. Грачев, А. Е. Ежилов, М. П. Левченко, В. П. Малеев, Ю. Г. Нарышкин, Д. Пуджа, В. М. Соловьев, О. Л. Федин, Г. В. Федотов, В. А. Щегельский

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

Изучение свойств топ-кварка является одним из приоритетных направлений физической программы эксперимента ATLAS. В частности, поиски редких процессов рождения топ-кварка имеют фундаментальное значение как для проверки Стандартной модели (СМ), так и для поиска физики за ее пределами. В эксперименте ATLAS с использованием данных, полученных в протон-протонных взаимодействиях за весь второй период работы (2015–2018), было проведено исследование с целью обнаружения процесса рождения одиночного топ-кварка и фотона. Этот процесс интересен тем, что он чувствителен к величине константы связи топ-кварка с фотоном.

Для анализа данных отбирались события с одним фотоном, одним электроном или мюоном, одной струей, ассоциированной с *b*-кварком, и недостающей поперечной энергией $E_T^{\text{miss}} > 30$ ГэВ. Основными фоновыми процессами для данной реакции являются: рождение двух топ-кварков с фотоном ($tt\gamma$), рождение *W*-бозона с фотоном ($W\gamma$) и события с «ложными фотонами», которые являются либо электронами, либо адронами, но ошибочно идентифицированы как фотоны.

Для отделения событий процесса $tq\gamma$ от фоновых использовался алгоритм, построенный на основе нейронных сетей. На рисунке показано сравнение предсказаний СМ с экспериментальными данными по переменной отклика нейронной сети. Полученное сечение процесса рождения одиночного топ-кварка и фотона равно $688 \pm 23\ (\text{стат.})^{+75}_{-71}(\text{сист.})$ фб, что согласуется с предсказаниями СМ: 515^{+36}_{-42} фб. Статистическая значимость полученного результата составляет 9,3 стандартного отклонения.



Сравнение предсказаний Стандартной модели с результатами измерений. Гистограмма событий исследуемого процесса $tq\gamma$ показана *оранжевым цветом*, данные – *черными точками*. На *нижней панели* показано отношение экспериментально полученного спектра к предсказаниям Стандартной модели

ATLAS Collab. e-Print: 2302.01283. 16 p. Submitted to PRL.

О перспективах измерения аномального магнитного момента τ-лептона в ультрапериферических взаимодействиях на Большом адронном коллайдере

Н. А. Бурмасов[1], Е. Л. Крышень[1], Р. Лавичка[2], П. Бюлер[2]

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

[2] *Stefan Meyer Institute for Subatomic Physics, Austria*

Ультрапериферические столкновения (УПС) – особый тип столкновений тяжелых ионов, в которых сильные взаимодействия подавляются, что дает возможность для исследования двухфотонных взаимодействий, в частности процесса рождения пар τ-лептонов и измерения их аномального магнитного момента. Измерение аномальных магнитных моментов лептонов a_l – актуальное направление поиска новой физики, о чем свидетельствуют результаты по прецизионному измерению a_μ. Измерение аномального магнитного момента τ-лептона a_τ представляет особый интерес, т. к. a_τ оказывается в 280 раз более чувствительным к эффектам за пределами Стандартной модели по сравнению с a_μ. Время жизни τ-лептонов мало, поэтому для измерения a_τ приходится использовать косвенные методы. Так, измерения сечения рождения пар τ-лептонов, чувствительных к a_τ, позволили эксперименту DELPHI установить одно из наиболее сильных ограничений $-0{,}052 < a_\tau < 0{,}013$.

Теоретические исследования показали возможность измерения a_τ в УПС. Для измерения сечения рождения τ-лептонных пар нужно производить отбор событий с продуктами распада τ-лептонов без дополнительной активности в детекторе (рис. 1). Около 80 % распадов τ-лептона приводят к образованию одного заряженного лептона или адрона и нескольких нейтральных, а в остальных 20 % случаев образуются три заряженные частицы в конечном состоянии. Для отбора ультрапериферических столкновений часто используют различные триггеры, например наличие одного или нескольких лептонов с большим поперечным импульсом. Поэтому для отбора событий с рождением τ-лептонных пар целесообразно исследовать распад одного из τ-лептонов на электрон или мюон, а второго – на одну или три заряженные частицы.

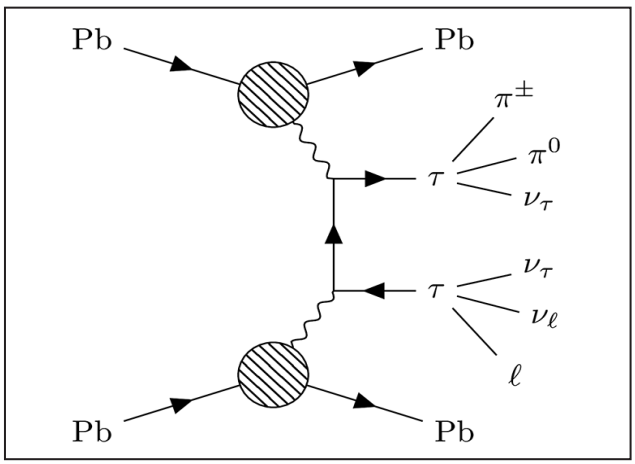


Рис. 1. Распады τ-лептона в ультрапериферических столкновениях

Следуя этой стратегии, в эксперименте ATLAS удалось отобрать приблизительно 650 событий во всех каналах распада τ-лептона из данных Сеанса-2 с интегральной светимостью L = 1,44 нбн$^{-1}$ и получить ограничения на a_τ: (−0,058; −0,012) ∪ (−0,006; 0,025). Эксперименту CMS удалось отобрать в общей сложности приблизительно 100 событий из данных Сеанса-2 с интегральной светимостью L = 0,4 нбн$^{-1}$ и установить пределы на a_τ на уровне (−0,088; 0,056).

Большая часть пар τ-лептонов имеет низкий поперечный импульс, поэтому значительная часть событий оказывается недоступной для реконструкции в экспериментах ATLAS и CMS из-за триггерных ограничений. Эксперимент ALICE может значительно улучшить полученные результаты по измерению a_τ путем регистрации продуктов распадов τ-лептонов при малых поперечных импульсах.

Для случая ALICE было проведено полное моделирование детектора с использованием спе-

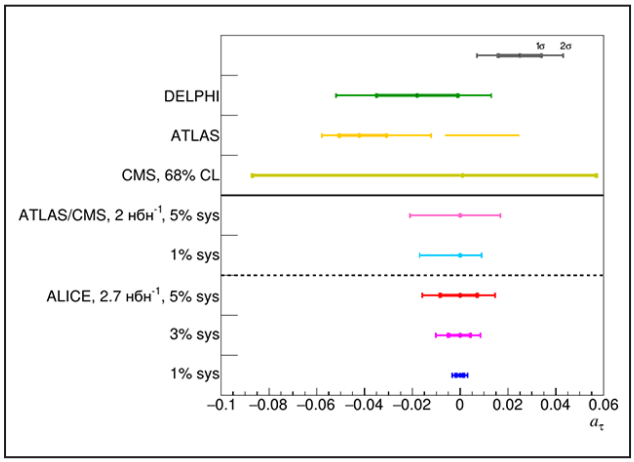


Рис. 2. Предсказания и результаты измерений a_τ на Большом адронном коллайдере

циально разработанного генератора событий Upcgen, и получены распределения по поперечному импульсу электронов из распада τ для различных значений a_τ. Распределения были использованы для оценки ограничений на a_τ, которые могут быть получены в Pb–Pb-столкновениях при энергии $\sqrt{s_{NN}}$ = 5,02 ТэВ и интегральной светимости L = 2,7 нбн$^{-1}$, ожидаемой в первый год работы эксперимента на этапе Сеанса-3. Проведенные расчеты показывают, что в течение одного года эксперимент ALICE может отобрать приблизительно 70 000 сигнальных событий, что значительно больше объема данных, который использовался для анализа в экспериментах ATLAS и CMS.

Результаты для трех возможных значений систематических ошибок (1, 3, 5 %) показаны на рис. 2. У эксперимента ALICE есть возможность получить конкурентоспособные результаты даже при самом пессимистичном уровне ошибок. Уровень 1 % можно попытаться достичь измерением отношения сечения процесса $\gamma\gamma \rightarrow \tau\tau$ к сечению рождения пар лептонов $\gamma\gamma \rightarrow ee(\mu\mu)$ для исключения дополнительных систематических погрешностей.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 21-52-14006) и АНФ (грант 5277-N).

1. *ATLAS Collab.* arXiv: 2204.13478.
2. *CMS Collab.* arXiv: 2206.05192.
3. *Burmasov N., Kryshen E., Bühler P., Lavicka R.* // Comput. Phys. Commun. 2022. V. 277. P. 108388.

Обнаружение изомера формы и низколежащей вращательной полосы с сильной положительной деформацией в полумагическом ^{187}Pb

А. Е. Барзах

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

На установке Argonne Gas-Filled Analyzer (Argonne National Laboratory) проведен эксперимент по γ-спектроскопии полумагического ^{187}Pb. Обнаружены изомер формы (E = 308 кэВ, $T_{1/2}$ = 5,15(15) мкс) и вращательная полоса на нем, оказавшаяся идентичной вращательной полосе на нильссоновском состоянии 7/2$^-$[514] с большой положительной деформацией в изотоническом ядре ^{185}Hg (рис.). С учетом совпадения этих полос новому изомеру приписана та же конфигурация. Задержка перехода 308 кэВ [(7/2$^-$) → 3/2$^-$; $B(E2)$ = 5,6(2) · 10^{-4} В. ед.] объясняется разной формой начального (сильно деформированного) и конечного (сферического) состояний, что приводит к возникновению изомерии формы. Энергия возбуждения изомера оказалась приблизительно в два раза ниже, чем энергия известных внедренных 0$^+$-состояний в соседних изотопах $^{186, 188}$Pb, что связано с различием спаривательной щели (Δ) для сферических и деформированных конфигураций. Энергию границы полосы E_i в нечетно-нейтронных ядрах Pb можно представить как $E_i = E_{i,0} + \Delta_i$, где индекс i принимает значения s (сферический), o (деформированный, сплюснутый) и p (деформированный, вытянутый), а $E_{i,0}$ – энергия при выключенном спаривании.

Мы использовали энергии 0$^+_{2,3}$-состояний в ^{186}Pb в качестве $E_{o,0}$ и $E_{p,0}$. Предполагая $E_{s,0}$ = 0, получаем $E_s = \Delta_s$ = 1 259 кэВ, где спаривательная щель Δ_s вычислена по стандартной трехчленной формуле с использованием энергии связи $^{186, 187, 188}$Pb. Деформированные, сплюснутые и вытянутые, 0$^+$-состояния в ^{186}Pb имеют энергии 532 и 650 кэВ соответственно, при этом оба состояния сильно смешаны друг с другом. Граница полосы вращательных состояний с положительной деформацией при выключенном спаривании находится между наблюдаемыми смешанными 0$^+$-состояниями, т. е. $E_{p,0}$ = 595(60) кэВ. Спаривательная щель для деформированного 7/2$^-$[514]-состояния может быть вычислена с помощью энергий связи ядер Pt с тем же числом нейтронов (N = 104–106): Δ_p(7/2$^-$[514]) = 1 011 кэВ.

Таким образом, E_p = 595(60) + 1 011 = = 1 606(60) кэВ и E_{theor}(7/2$^-$[514], ^{187}Pb) = $E_p - E_s$ = = 347(60) кэВ в хорошем согласии с экспериментальными данными: E_{exp}(7/2$^-$[514], ^{187}Pb) = = 308 кэВ. Тот же механизм отвечает за чередование форм в ядрах Hg и π-образный ход деформации у изотопов Au вблизи середины нейтронной оболочки N = 104.

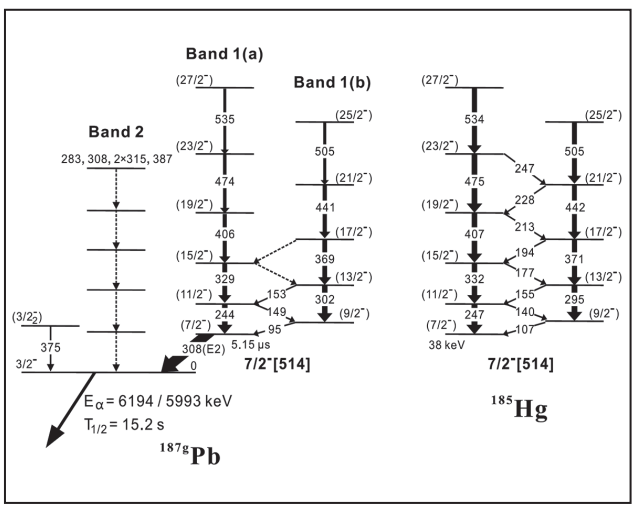


Схема уровней ^{187}Pb и фрагмент схемы уровней ^{185}Hg

Zhang W.Q., ..., Barzakh A.E. et al. // Phys. Lett. B. 2022. V. 829. P. 137129.

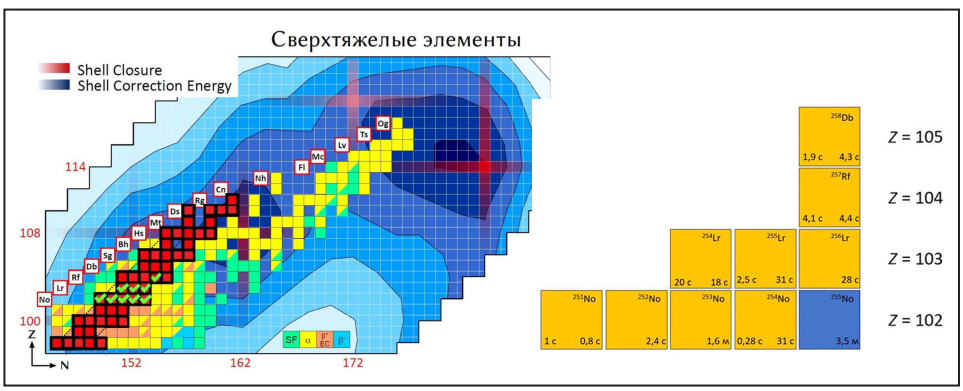
Прямая высокоточная масс-спектрометрия сверхтяжелых элементов на установке SHIPTRAP

О. И. Безроднова, Ю. И. Гусев, С. А. Елисеев, Н. С. Мартынова, Ю. В. Нечипоренко, Ю. Н. Новиков, П. Е. Филянин, С. В. Ченмарев

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

Система SHIPTRAP – две ионные ловушки Пеннинга, установленные в линию с сепаратором SHIP, разделяющим продукты реакции «слияние – испарение» на мишенях при бомбардировке их ионами с линейного ускорителя UNILAC в GSI–FAIR (Германия). Это единственный в мире комплекс, способный прямым способом прецизионно измерять массы нуклидов сверхтяжелых элементов периодической системы. Продукты реакций Pb, Bi + ^{48}Ca, ^{50}Ti в виде ионов попадают в газовую камеру, где тормозятся и теряют заряд до 1–2^{+}. Затем ионы фокусируются в пучок, банчируются, замедляются и направляются в тандем ионных ловушек, в одной из которых производится «очищение» по массе, а во второй – возбуждение внешним радиочастотным излучением «запертых» ионов в пространстве около 100 мкм в высокооднородном магнитном и аксиальном электростатическом полях. Циклотронная частота, непосредственно связанная с массой нуклида, измеряется методом ее фазового отображения на позиционно-чувствительном детекторе, расположенном вне магнитного поля ловушки. Чувствительность установки в эксперименте – около одного иона в день, что соответствует сечению реакции порядка десятка нанобарн. Относительная точность определения масс составила величину $\Delta m/m \sim 10^{-9}$.

Нуклиды, массы которых были измерены прямым способом с привязкой к калибровочному источнику ^{133}Cs, показаны на фрагменте карты нуклидов, приведенном *в правой части* рисунка. Пользуясь этими значениями масс и известными из литературы энергиями в цепочках α-распадов, связывающих измеренные нуклиды с другими сверхтяжелыми элементами, был получен массовый ландшафт части сверхтяжелой области. *На левой части* рисунка этот массив показан нуклидами, окрашенными *красным цветом с черной окантовкой*, среди которых нуклиды с прямо измеренными массами отмечены *зелеными галочками*. Полученные данные подтвердили сделанные нами ранее выводы о наличии двух небольших островков устойчивости при значениях нейтронов N = 152 и 162 на пути к ожидаемому большому острову стабильности сверхтяжелых элементов.



Ландшафт сверхтяжелых нуклидов, массы которых определены в настоящей работе (*красные квадраты в левой части*), и нуклиды с измеренными массами (*в правой части*)

Kaleja O., ..., Bezrodnova O., ..., Chenmarev S., ..., Eliseev S., ..., Filianin P., ..., Gusev Yu., ..., Martynova N., ..., Novikov Yu. et al. // Phys. Rev. C. 2022. V. 106. P. 054325.

Исследование структуры легких экзотических ядер методом упругого протон-ядерного рассеяния в инверсной кинематике с помощью активной мишени ИКАР

Г. Д. Алхазов, А. А. Воробьев, А. В. Добровольский, А. Г. Инглесси, Г. А. Королев, Л. О. Сергеев, А. В. Ханзадеев, В. И. Яцюра

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

Для изучения пространственного распределения материи в легких экзотических ядрах физики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ предложили в 1992 г. новый подход – измерение поперечных сечений протон-ядерного упругого рассеяния в инверсной кинематике с использованием активной мишени ИКАР. Изучение экзотических ядер в этом подходе было начато в 1993 г. и завершено в 2022 г. Эксперименты проводились на ускорительном комплексе Центра по изучению тяжелых ионов им. Гельмгольца (Дармштадт, Германия). На рисунке изображена схема экспериментальной установки.

Основным компонентом экспериментальной установки был разработанный в Институте ионизационный спектрометр ИКАР. Пучки исследуемых ядер взаимодействовали с ядрами водорода в спектрометре ИКАР, который одновременно служил газовой мишенью и детектором протонов отдачи. Сигналы с электродов ИКАР давали информацию об энергии T_R протонов отдачи, его угле рассеяния θ_R и координате взаимодействия Z_v. Квадрат четырехимпульса, передаваемого в процессе рассеяния, вычислялся по формуле $|t| = 2mT_R$, где m – масса протона отдачи. Величина $|t|$ определялась также по углу рассеяния налетающего ядра θ_S, который измерялся системой многопроволочных пропорциональных камер PC1–PC4, расположенных до и после детектора ИКАР. Сцинтилляционные счетчики S1–S3 использовались для идентификации частиц пучка по времени пролета и по величине dE/dx. Сцинтилляционный детектор VETO работал в режиме антисовпадений, отбирая только частицы пучка, летящие на расстоянии не более 10 мм от оси камеры. Дипольный магнит ALADIN и система сцинтилляционных детекторов за ним позволяли исключить каналы неупругого рассеяния, в которых происходил развал рассеиваемых ядер в рабочем объеме ИКАР. В результате проведенных экспериментов были измерены абсолютные сечения $d\sigma/dt$ упругого рассеяния протонов с энергией 0,7 ГэВ/нуклон в диапазоне передаваемых импульсов $0{,}002 \le |t| \le 0{,}05$ (ГэВ/c)^2 на ядрах ^{4}He, ^{6}He, ^{8}He, ^{6}Li, ^{8}Li, ^{9}Li, ^{11}Li, ^{12}Be, ^{14}Be, ^{12}C, ^{14}C, ^{15}C, ^{16}C, ^{17}C, ^{7}Be и ^{8}B.

Измеренные поперечные сечения анализировались с использованием теории многократного

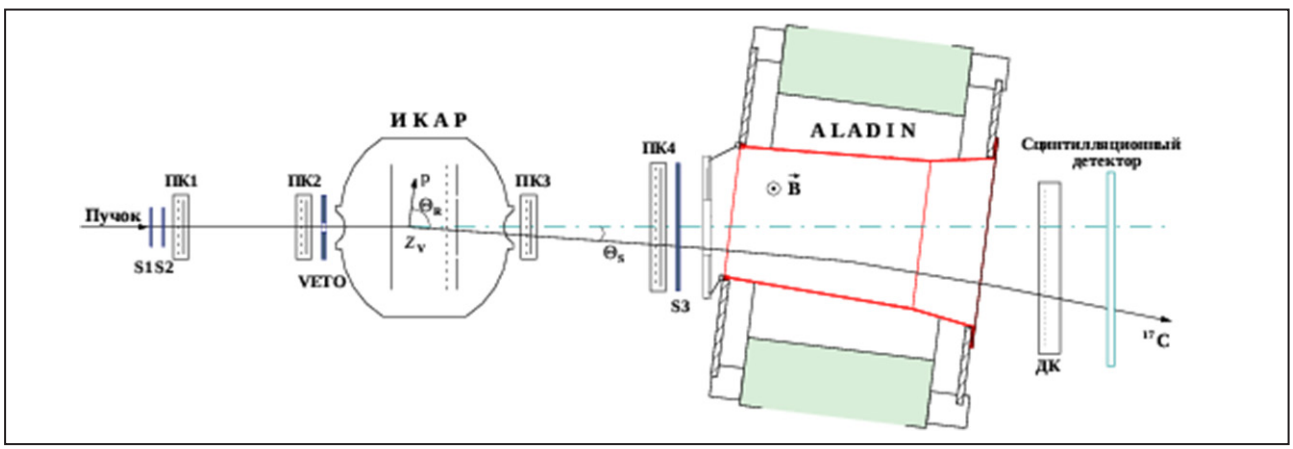


Схема экспериментальной установки. Показан только один из шести модулей ИКАР

рассеяния Глаубера и применением четырех параметризаций феноменологических распределений ядерной плотности: SF (симметризованное распределение Ферми), GH (гауссиан – гало), GG (гауссиан – гауссиан) и GO (гауссиан – осциллятор), каждое из которых содержит два свободных параметра, которые находились в результате подгонки рассчитываемых сечений к экспериментальным данным. Были найдены распределения ядерной материи и определены величины R_m среднеквадратичных радиусов ядерной материи. Величины R_m в пределах соответствующих ошибок в основном согласуются с результатами других работ по анализу полных сечений реакций или взаимодействия (табл.). Мы определили не только величины R_m, но и радиусы ядерного кора R_c и радиусы R_h ядерного гало (радиусы R_v распределений валентных нуклонов). Отношение $\kappa = R_v/R_c$ может служить количественной характеристикой размера гало.

Среди изученных ядер наибольшее гало наблюдалось у ^{11}Li, у которого было получено максимальное значение величины κ (κ = 2,7(3)). Нейтронное гало и, соответственно, относительно большая величина κ наблюдались в ядрах ^{6}He (κ = 1,8(3)), ^{14}Be (κ = 1,9(2)) и ^{15}C (κ = (1,8(2)). Хотя энергия связи S_n валентного нейтрона в ^{17}C мала (S_n = 0,728 МэВ), найденная величина κ для этого ядра (κ = 1,6(2)) не указывает на наличие гало. Отсутствие гало в ядре ^{17}C объясняется тем, что валентный нейтрон в ^{17}C находится в *d*-состоянии. В случае ядра ^{8}B наблюдено протонное гало достаточно большой величины (κ = 1,9(1)).

Предложенный в НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ метод для изучения структуры легких экзотических ядер оказался очень эффективным и позволил изучить размеры и пространственную структуру следующих ядер: $^{4, 6, 8}$He, $^{6, 8, 9, 11}$Li, $^{7, 12, 14}$Be, ^{8}B и $^{12, 14, 15, 16, 17}$C (см. табл.).

Таблица. Результаты, полученные для ядер изотопов He, Li, Be, B, C*

Ядро	Упругое рассеяние протонов (данная работа)				Сечение реакции
	R_m, фм	R_c, фм	R_v, фм	$\delta_{пр}$, фм	R_m, фм
^{4}He	1,49(3)	–	–	0,06(6)	1,57(4)
^{6}He	2,45(10)	1,88(12)	3,31(28)	0,74(14)	2,50(5)
^{8}He	2,53(8)	1,55(15)	3,22(14)	0,83(10)	2,52(3)
^{6}Li	2,44(7)	2,11(17)	3,00(34)	–0,02(15)	2,36(3)
^{8}Li	2,50(6)	2,48(7)	2,58(48)	0,46(12)	2,39(6)
^{9}Li	2,44(6)	2,20(6)	3,12(28)	0,48(11)	2,34(6)
^{11}Li	3,71(20)	2,53(3)	6,85(58)	1,72(26)	3,50(9)
^{7}Be	2,42(4)	1,86(14)	3,01(19)	–0,23(10)	2,36(6)
^{12}Be	2,71(6)	2,36(6)	4,00(28)	0,47(9)	2,59(6)
^{14}Be	3,25(11)	2,77(6)	5,28(43)	1,12(15)	3,10(15)
^{8}B	2,58(6)	2,25(3)	4,24(25)	–0,51(9)	2,61(8)
^{12}C	2,34(5)	–	–	0,00(10)	2,35(2)
^{14}C	2,42(5)	–	–	0,07(9)	2,33(7)
^{15}C	2,59(5)	2,41(5)	4,36(38)	0,36(9)	2,54(4)
^{16}C	2,70(6)	2,41(5)	4,20(26)	0,46(10)	2,74(3)
^{17}C	2,68(5)	2,57(5)	4,05(47)	0,39(9)	2,76(3)

* Толщины нейтронной шубы $\delta_{пр} = R_n - R_p$ (где R_p – среднеквадратичные радиусы протонных распределений) были получены из наших данных по величинам R_m с использованием известных значений величин ядерных зарядовых радиусов.

Алхазов Г. Д., Воробьев А. А., Добровольский А. В., Королев Г. А., Ханзадеев А. В. // Физ. элемент. частиц и атомн. ядра. 2022. Т. 53. Вып. 3. С. 661–691.

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

Мегасайенс-проект NICA (Nuclotron based Ion Collider fAcility) находится на завершающем этапе строительства в Объединенном институте ядерных исследований (Дубна) и включает в себя создание ускорительного комплекса и нескольких экспериментальных установок. Ускорительный комплекс состоит из источника тяжелых ионов и протонов, линейных ускорителей, сверхпроводящих кольцевых ускорителей Booster и Nuclotron и двух сверхпроводящих колец коллайдера NICA, имеющих длину ~ 500 м. Пучки ионов в коллайдере NICA сталкиваются в двух областях, где будут расположены экспериментальные установки MPD и SPD.

Эксперимент SPD в настоящее время находится в стадии разработки и нацелен на изучение спиновой физики в столкновениях поляризованных пучков протонов и дейтронов. Эксперимент MPD предназначен для изучения столкновений тяжелых релятивистских ядер в диапазоне энергий $\sqrt{s_{NN}}$ = 4–11 ГэВ при максимальной светимости пучков тяжелых ионов 10^{27} см$^{-2}$ · с$^{-1}$. Помимо коллайдера пучок из ускорителя Nuclotron также может быть выведен в зал экспериментальной установки BM@N. В первые годы работы в коллайдере будут сталкиваться ядра Bi с энергией взаимодействия в системе центра масс, равной $\sqrt{s_{NN}}$ = 9,2 ГэВ. Светимость пучков будет на два порядка ниже проектной и соответствовать частоте столкновения пучков ионов ~ 50 Гц.

Столкновение тяжелых ядер при энергиях коллайдера NICA позволяет изучать фазовую диаграмму состояния КХД-материи в режиме умеренных температур и больших барионных плотностей, превышающих плотность в обычных ядрах в 5–8 раз. Теоретические расчеты предсказывают, что в таких условиях может реализовываться фазовый переход первого рода из адронной материи в кварк-глюонную плазму, также предсказывается существование критической точки. Исследования в данной области фазовой диаграммы тесно связаны с космологией, поскольку подобные состояния могут реализовываться в центрах компактных нейтронных звезд, а также при их слиянии.

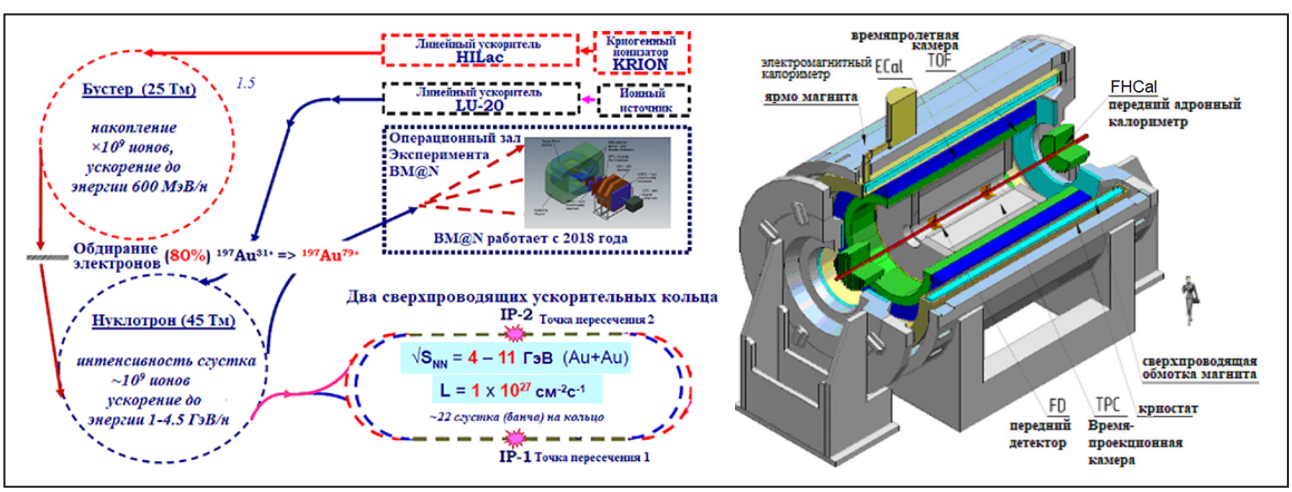
В области энергий комплекса NICA будут работать эксперименты HADES и CBM в Германии, NA61 в Европейском центре ядерных исследований. В той же области энергий проводилась программа сканирования по энергии (BES I и BES II) на коллайдере RHIC в США, результаты которой обрабатываются в настоящее время. Эксперименты BM@N и MPD на комплексе NICA будут работать в достаточно конкурентной среде. Основные преимущества эксперимента MPD заключаются в возможности проведения программы сканирования по энергии взаимодействия и размеру сталкивающихся ядер (*pp*, *p*–*A*, *A*–*A*). Эксперимент MPD будет обладать постоянным, большим и однородным аксептансом во всех взаимодействующих системах, что выгодно его отличает от экспериментов на фиксированной мишени.

За последние годы был достигнут большой прогресс в строительстве ускорительного комплекса NICA. В начале 2023 г. закончился четвертый цикл работы ускорительного комплекса NICA, в котором были задействованы источник ионов, линейный ускоритель, сверхпроводящие кольцевые ускорители Booster и Nuclotron. Ускорительный комплекс в данной конфигурации использовался для ускорения пучка тяжелых ионов (Xe) и его транспортировки до экспериментального зала детектора BM@N. Ускоритель проработал несколько месяцев, и эксперимент BM@N набрал более 500 млн событий столкновения ядер Xe-CsI

при энергиях пучка 3,8 и 3 А · ГэВ для физических анализов. В настоящее время продолжается монтаж сверхпроводящих магнитов в туннеле коллайдера NICA. В конце 2023 г. должен пройти первый технологический запуск коллайдера для проверки различных подсистем, пока без пучков. В 2024 г. планируется провести первый запуск всего комплекса с реальными пучками.

Схематическое изображение детектора MPD показано на рисунке *слева*. Детектор был разработан как 4π-спектрометр, способный регистрировать заряженные адроны, электроны и фотоны в столкновениях тяжелых ионов при высокой светимости. В первоначальном виде в состав установки будут входить времяпроекционная камера большого объема (TPC) для восстановления треков заряженных частиц и их идентификации в области малых и промежуточных импульсов через измерение ионизационных потерь частиц в рабочем газе детектора, времяпролетная система (TOF) для идентификации частиц в области промежуточных и больших поперечных импульсов и электромагнитный калориметр (ECAL) для измерения энергий фотонов и электронов. Детекторные подсистемы расположены внутри сверхпроводящего соленоида с полем 0,5 Т. Передние детекторы FFD и FHCAL будут использоваться для триггера, измерения центральности ядерных столкновений и плоскости реакции. Детектор MPD будет модернизирован, в его состав будут добавлены внутренний кремневый трекер (ITS) для восстановления вершин распадов *B*- и *C*-мезонов и передние спектрометры. Все подсистемы детектора MPD первой фазы находятся на финальной стадии производства и испытаний. В 2024 г. можно ожидать ввод детектора в эксплуатацию и получение первых экспериментальных данных. Физическая программа эксперимента MPD имеет много общего с программами других экспериментов по изучению столкновений тяжелых ионов. Основная цель исследований – получение ограничений для уравнения состояния плотной ядерной материи и поиска партонных степеней свободы и критических сигнатур при высоких барионных плотностях.

Сотрудниками ОФВЭ была разработана и поставлена газовая система основного трекового детектора MPD – времяпроекционной камеры TPC. Разрабатываются методики для экспериментального исследования различных физических явлений: рождения короткоживущих резонансов, фотонов, диэлектронного континуума, идентифицированных адронов и векторных мезонов в столкновениях тяжелых ядер. Было разработано программное обеспечение для реконструкции сигналов, измеряемых в электромагнитном калориметре ECAL. Осуществляется руководство работой международных физических групп и управление коллаборацией MPD в составе ее исполнительного комитета.



Схематическое изображение комплекса NICA (*слева*) и экспериментальной установки MPD (*справа*)

MPD Collab. // Eur. Phys. J. A. 2022. V. 58. No. 7. P. 140. arXiv 2202.08970.

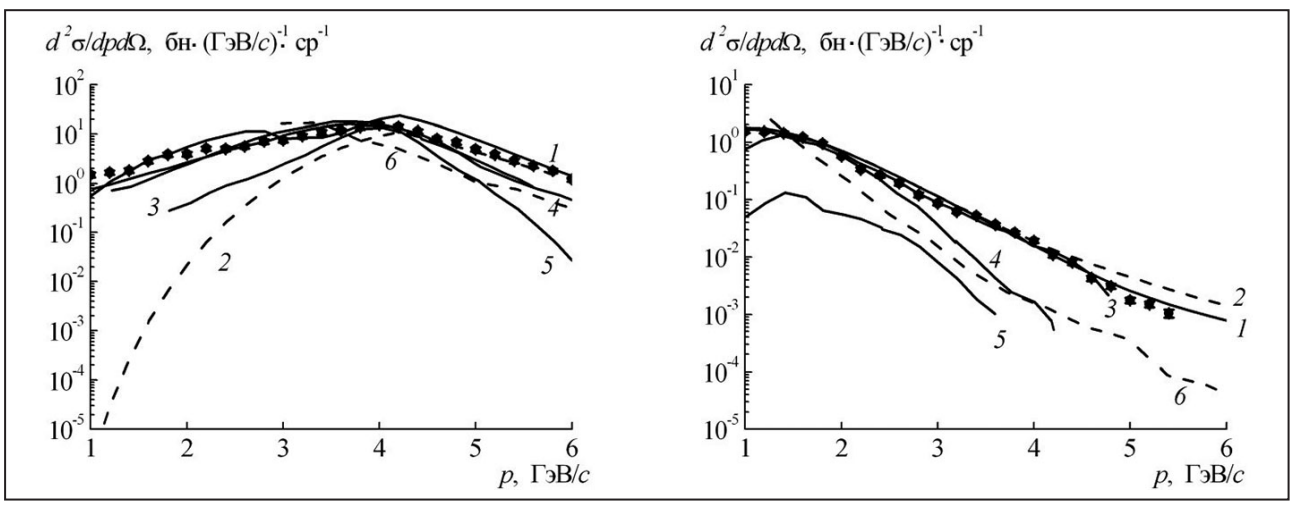
Развитие неравновесного гидродинамического подхода для описания эмиссии высокоэнергетических частиц при столкновениях тяжелых ионов

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

С целью развития гидродинамического подхода для описания столкновений тяжелых ионов промежуточных энергий предложено совместно с решением уравнений гидродинамики решать кинетическое уравнение. Это позволило включить в рассмотрение неравновесную компоненту и успешно описать двойные дифференциальные сечения испускания протонов, пионов и фотонов при столкновениях ядер углерода с бериллиевой мишенью в области энергий 2,0–3,2 ГэВ/нуклон. Полученное описание экспериментальных данных оказалось лучше, чем в каскадных моделях и моделях квантовой молекулярной динамики (рис.).

Весьма важным явилось включение в рассмотрение эффектов ядерной вязкости, найденной нами в релаксационном τ-приближении для кинетического уравнения, а также поправки на микроканоническое распределение, проявляющейся в области высокоэнергетических «хвостов» спектров протонов. В области малых импульсов протонов определяющий вклад в сечение дает учет фрагментации, проведенный нами в статистической модели. Проведенные расчеты воспроизводят экспериментальные данные по выходам протонов и пионов как для средних, так и для тяжелых ядер в области промежуточных и высоких энергий и могут быть применены к области энергий строящегося в Дубне ускорительного комплекса NICA. Описание спектров жестких фотонов указывает на то, что в нашем подходе могут быть учтены эффекты короткодействующих корреляций (SRC).



Импульсные распределения протонов (*слева*) и отрицательных пионов (*справа*), испускаемых в реакции $^{12}C + {}^{9}Be \rightarrow p(\pi^-) + X$ под углом 3,5° при энергии ядер ^{12}C 3,2 ГэВ/нуклон. Экспериментальные данные, полученные в эксперименте FRAGM (НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ), показаны *точками*. *Кривая 1* – результат расчетов в рамках гидродинамического подхода; *2* – то же, но без учета поправки на микроканоническое распределение. *Кривые 3–5* – результаты расчетов по транспортным кодам: *3* – каскадная модель; *4* – транспортная модель кварк-глюонных струн; 5 – модель квантовой молекулярной динамики, встроенной в пакет GEANT4. *Кривая 6* – наш расчет по коду HSD (адронная струнная динамика)

1. *D'yachenko A.T., Mitropolsky I.A.* // Phys. Atom. Nucl. 2022. V. 85. Iss. 6. P. 1053–1062.
2. *D'yachenko A.T., Mitropolsky I.A.* // Phys. Part. Nucl. 2022. V. 53. No. 2. P. 505–512.

Первое измерение направления солнечных нейтрино с энергией менее 1 МэВ 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

Выполнены измерения потока солнечных нейтрино с энергией менее 1 МэВ с помощью черенковского излучения в сцинтилляторе детектора Borexino. При анализе используется различная временная зависимость вероятности излучения черенковских и сцинтилляционных фотонов (рис. 1). Результат достигнут с помощью нового метода, который сопоставляет зарегистрированную позицию отдельных фотонов с известным положением Солнца (рис. 2). Используя события в интервале от 0,54 до 0,74 МэВ, отобранные по черенковскому излучению, мы установили, что скорость взаимодействия ^{7}Be-нейтрино составляет 52 ± 13 событий в день на 100 т, что согласуется с предсказаниями Стандартной солнечной модели и предыдущими спектроскопическими результатами эксперимента Borexino. Впервые продемонстрирована возможность использования черенковского излучения для солнечных нейтрино с энергией менее 1 МэВ в большом сцинтилляционном детекторе с высоким световыходом. Получено экспериментальное доказательство возможности будущей гибридной реконструкции событий с одновременным использованием как черенковских, так и сцинтилляционных фотонов.

Работа поддержана грантом РНФ № 21-12-00063.

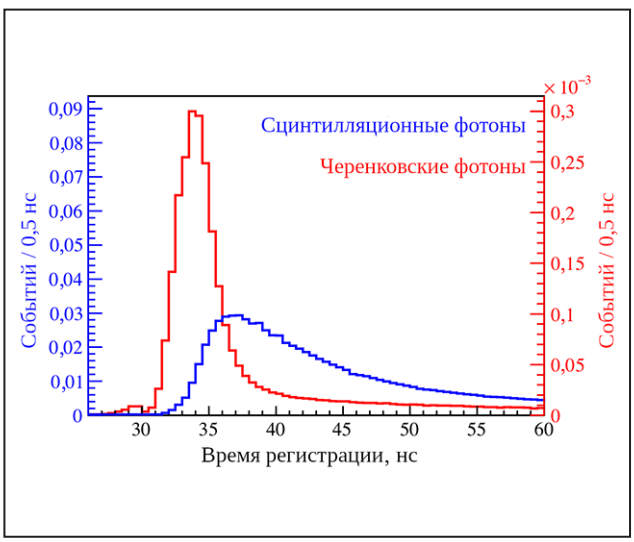


Рис. 1. Временная зависимость вероятности высвечивания черенковских и сцинтилляционных фотонов в сцинтилляторе Borexino. Для наглядности площади кривых нормированы на единицу, реальная доля черенковских фотонов составляет лишь 0,4 %

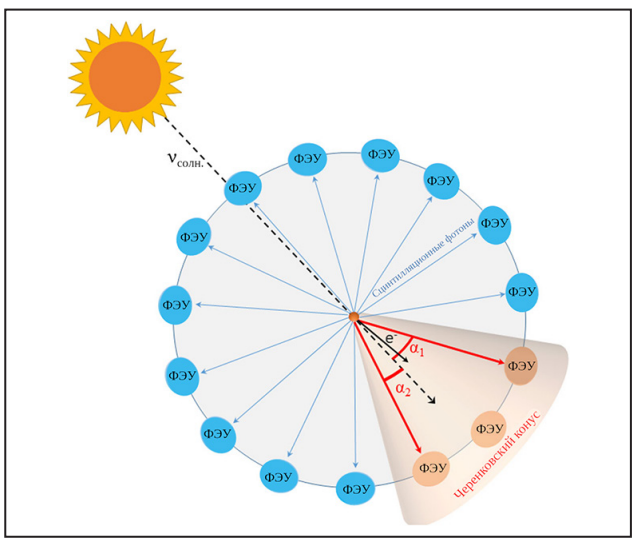


Рис. 2. Показаны геометрия рассеяния солнечных нейтрино на электроне и угол, в котором сработают фотоэлектронные умножители от черенковских фотонов

1. *Borexino Collab., Agostini M., ..., Derbin A., ..., Lomskaya I., ..., Muratova V., ..., Semenov D., ..., Unzhakov E. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2022. V. 128. P. 091803.
2. *Borexino Collab., Agostini M., ..., Derbin A., ..., Lomskaya I., ..., Muratova V., ..., Semenov D., ..., Unzhakov E. et al.* // Phys. Rev. D. 2022. V. 105. P. 052002.

Новые ограничения на константу связи аксиона с электроном для солнечных аксионов

А. В. Дербин[1], И. С. Драчнев[1], М. С. Микулич[1], В. Н. Муратова[1], Е. В. Унжаков[1], Ю. М. Гаврилюк[2], А. Н. Гангапшев[2], В. В. Казалов[2], В. В. Кузьминов[2], Д. А. Текуева[2], С. П. Якименко[2]

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

[2] Институт ядерных исследований РАН

Аксионы появились в теории как результат решения *CP*-проблемы сильных взаимодействий. Несмотря на отрицательные результаты интенсивных экспериментальных поисков, они продолжают оставаться хорошо обоснованными кандидатами на роль частиц темной материи. Привлекательные астрофизические указания на существование аксионов связаны с аномальной прозрачностью Вселенной для высокоэнергетических γ-квантов и с излишне быстрым охлаждением некоторых звездных систем по сравнению с теоретическими моделями.

В работе выполнен поиск резонансного возбуждения 1-го ядерного уровня ^{83}Kr с энергией 9,4 кэВ солнечными аксионами, потоки которых зависят от константы связи аксионов с электронами g_{Ae}. Для регистрации γ-квантов, рентгеновского излучения, конверсионных и ожэ-электронов, возникающих при разрядке ядерного уровня, использовался газовый пропорциональный счетчик, расположенный в низкофоновой установке в Баксанской нейтринной обсерватории. Спектр, измеренный счетчиком за 777 сут, показан на рис. 1. Аксионный пик с энергией 9,4 кэВ не наблюдался. Получено новое ограничение на константы связи аксиона с электроном и нуклонами $|g_{Ae}(g^3_{AN} - g^0_{AN})| \leq 1{,}50 \cdot 10^{-17}$ (90 % у. д.; рис. 2), соответствующее новым ограничениям на массу аксиона $m_A \leq 320$ эВ и $m_A \leq 4{,}6$ эВ в моделях KSVZ- и DFSZ-аксиона соответственно.

Работа поддержана грантом РНФ № 22-22-00017.

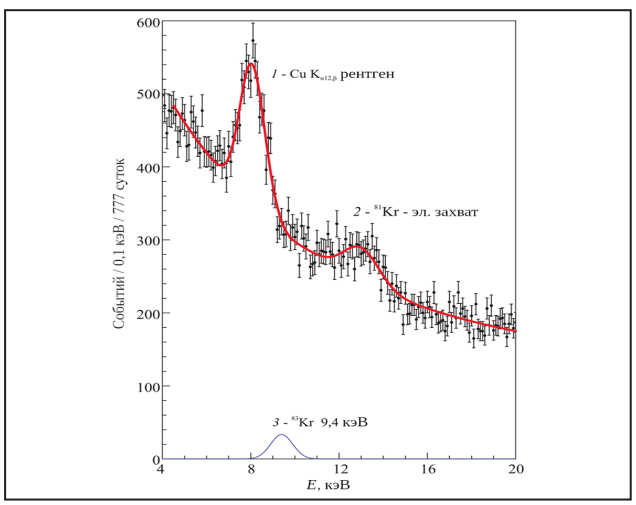


Рис. 1. Спектр пропорционального счетчика и результаты подгонки теоретической формой. Показан ожидаемый аксионный пик с энергией 9,4 кэВ и числом событий, равным 3σ (*кривая 3*)

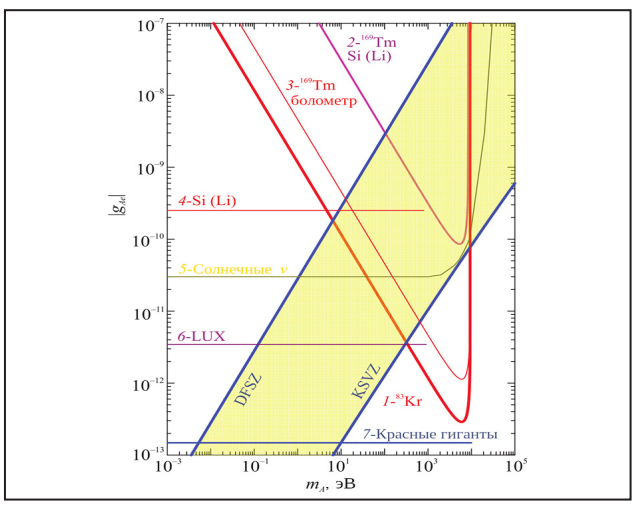


Рис. 2. Верхние пределы на константу g_{Ae}, полученные в настоящей работе (*кривая 1*), в сравнении с результатами экспериментов по резонансному поглощению аксионов ядром ^{169}Tm и поиску аксиоэлектрического эффекта с Si(Li)-детектором и жидкоксеноновым детектором LUX, ограничениями из нейтринной светимости Солнца и астрофизическими ограничениями

Гаврилюк Ю. М., Гангапшев А. Н., Дербин А. В., Драчнев И. С., Казалов В. В., Кузьминов В. В., Микулич М. С., Муратова В. Н., Текуева Д. А., Унжаков Е. В., Якименко С. П. // Письма в ЖЭТФ. 2022. Т. 116. Вып. 1. С. 13–19.

Поиск низкоэнергетических сигналов от быстрых радиовсплесков 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

Быстрые радиовсплески (БРВ) – единичные радиоимпульсы длительностью несколько миллисекунд с очень высокой интенсивностью излучения. Впервые БРВ были обнаружены в 2007 г. Наблюдаемая дисперсия радиосигнала указывает на их внегалактическое происхождение. Хотя существует ряд моделей БРВ, включая такие оригинальные, как конверсия аксионных звезд в фотоны в магнитном поле, природа БРВ остается загадкой. Оцениваемая частота БРВ составляет 2 000 событий в сутки на все небо.

Был выполнен поиск нейтринных событий в корреляции с 42 наиболее интенсивными БРВ с использованием данных детектора Borexino в период 2007–2021 гг. Мы искали сигналы с энергией более 250 кэВ в пределах временного окна ±1 000 с относительно времени обнаружения конкретного БРВ (рис. 1). Был применен альтернативный подход, основанный на поиске характерной формы спектра электронов отдачи, возникающих при рассеянии нейтрино, в суммарном спектре детектора Borexino. Рассматривались два спектра нейтрино: моноэнергетическая линия и спектр, ожидаемый от вспышки сверхновой звезды. Такие же спектры рассматривались для электронных антинейтрино, регистрация которых происходит по реакции обратного β-распада. Статистически значимого превышения над фоном не наблюдалось. Были установлены наиболее строгие верхние пределы на флюенсы нейтрино всех ароматов, связанных с БРВ, в диапазоне энергий нейтрино 0,5–5,0 МэВ (рис. 2).

Работа поддержана грантом РНФ № 21-12-00063.

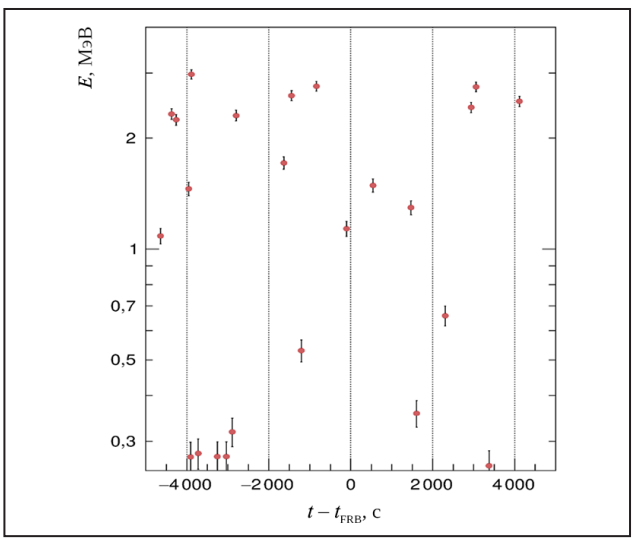


Рис. 1. События детектора Borexino с энергией более 0,25 МэВ в интервале ±5 000 относительно прихода наиболее интенсивного быстрого радиовсплеска в нашей Галактике (FRB 200428)

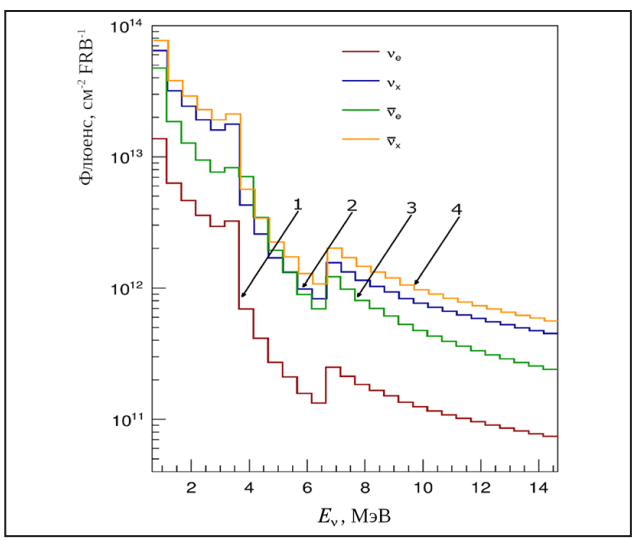
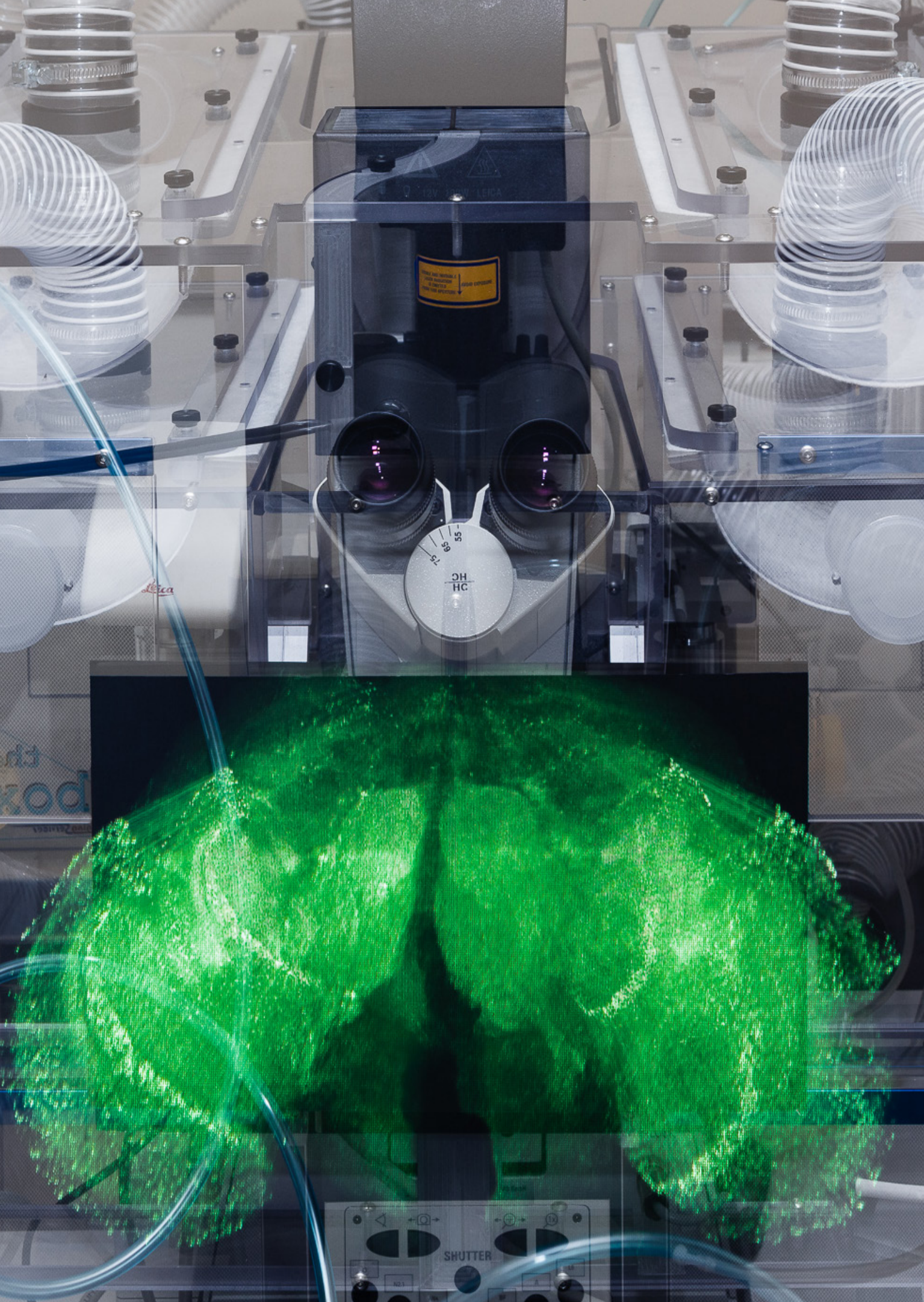


Рис. 2. Верхние пределы на флюенсы моноэнергетических нейтрино от 42 наиболее интенсивных быстрых радиовсплесков (90 % у. д.)

Borexino Collab., Appel S., ..., Derbin A., ..., Drachnev I., ..., Lomskaya I., ..., Muratova V., ..., Semenov D., ..., Unzhakov E. et al. // Eur. Phys. J. C. 2022. V. 82. No. 3. P. 278.


SHUTTER

Биологические исследования

66 Нарушение активности гидролаз сфинголипидов в крови пациентов с деменцией с тельцами Леви и пациентов с множественной системной атрофией

67 Может ли оценка концентрации гексозилсфингозина крови быть маркером GBA-ассоциированной болезни Паркинсона?

69 Снижение экспрессии α-синуклеина способствует замедлению развития ранней нейропатологии в модели болезни Паркинсона у дрозофилы

70 Внеклеточные везикулы как носители холестерина, не связанного с липопротеинами

71 Изучение структуры комплекса миелопероксидазы церулоплазмина и α-тромбина методами молекулярного моделирования и МУРН

Нарушение активности гидролаз сфинголипидов в крови пациентов с деменцией с тельцами Леви и пациентов с множественной системной атрофией

Т. С. Усенко[1, 2], К. А. Сенкевич[1, 2], А. И. Безрукова[1], Г. В. Байдакова[3], К. С. Башарова[1], А. С. Журавлев[1], Е. В. Грачева[4], А. В. Кудреватых[4], И. В. Милюхина[2, 4], И. В. Красаков[5], Л. А. Хубларова[6], И. В. Фурсова[6], Д. В. Захаров[6], А. А. Тимофеева[2], Ю. А. Иришина[4], Е. И. Пальчикова[6], Н. М. Залуцкая[6], А. К. Емельянов[1, 2], Е. Ю. Захарова[3], С. Н. Пчелина[1, 2, 7]

[1] *Отделение молекулярной и радиационной биофизики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ*
[2] *Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. акад. И. П. Павлова*
[3] *Медико-генетический научный центр им. акад. Н. П. Бочкова*
[4] *Институт мозга человека им. Н. П. Бехтеревой РАН*
[5] *Всероссийский центр экстренной и радиационной медицины им. А. М. Никифорова МЧС России*
[6] *Национальный медицинский исследовательский центр психиатрии и неврологии им. В. М. Бехтерева*
[7] *Институт экспериментальной медицины*

Синуклеинопатии — группа нейродегенеративных заболеваний, к которым относятся болезнь Паркинсона (БП), деменция с тельцами Леви (ДТЛ) и множественная системная атрофия (МСА). В основе патогенеза синуклеинопатий лежит накопление и агрегация белка α-синуклеина в головном мозге, но молекулярные механизмы синуклеинопатий остаются неизвестными. Последние данные показали, что ДТЛ и БП характеризуются изменением активности лизосомных ферментов, что подтверждает гипотезу о роли дисфункции лизосом в патогенезе синуклеинопатий. Исследований, посвященных оценке активности лизосомных ферментов при МСА, ранее не проводилось.

В данное исследование было включено 163 пациента с БП, 44 пациента с ДТЛ, 30 пациентов с МСА и 159 неврологически здоровых индивидуумов (контроль). Оценка активности лизосомных ферментов (GCase, GLA ASMase) и соответствующих субстратов сфинголипидов (HexSph, LysoGb3, LysoSM) проводилась с помощью высокоэффективной жидкостной хроматографии с тандемной масс-спектрометрией (ВЭЖХ – МС/МС) в крови. Оценка экспрессии генов (*GBA*, *GLA*, *SMPD1*), кодирующих соответствующие исследуемые ферменты (GCase, GLA ASMase), проводилась с помощью количественной полимеразной цепной реакции в режиме реального времени с зондами TaqMan в клетках CD45+ периферической крови, полученных методом магнитного сортинга.

Показано снижение экспрессии гена *SMPD1*, который кодирует кислую сфингомиелиназу (ASMase), в клетках CD45+ у пациентов с МСА по сравнению с контролем. В то же время активность ASMase была снижена в крови пациентов с МСА и пациентов с ДТЛ по сравнению с пациентами с БП, а также у пациентов с МСА по сравнению с контролем. Также показана повышенная концентрация гексозилсфингозина (HexSph) у пациентов с МСА и пациентов с ДТЛ по сравнению с пациентами с БП и контролем.

Данное исследование является основополагающим для дальнейших работ, посвященных роли метаболизма сфинголипидов в патогенезе синуклеинопатий. Изменение концентрации HexSph может рассматриваться как потенциальный биомаркер МСА и ДТЛ.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 20-015-00116.

Usenko T.S., Senkevich K.A., Bezrukova A.I., Baydakova G.V., Basharova K.S., Zhuravlev A.S., Gracheva E.V., Kudrevatykh A.V., Miliukhina I.V., Krasakov I.V., Khublarova L.A., Fursova I.V., Zakharova D.V., Timofeeva A.A., Irishina Y.A., Palchikova E.I., Zalutskaya N.M., Emelyanov A.K., Zakharova E.Yu., Pchelina S.N. // Mol. Neurobiol. 2022. V. 59. No. 4. P. 2277–2287.

Может ли оценка концентрации гексозилсфингозина крови быть маркером GBA-ассоциированной болезни Паркинсона?

А. Э. Копытова[1], Т. С. Усенко[1, 2], Г. В. Байдакова[3], М. А. Николаев[1, 2], К. А. Сенкевич[1, 2], А. Д. Изюмченко[1], А. А. Тюрин[2], И. В. Милюхина[2, 4], А. К. Емельянов[1, 2], Е. Ю. Захарова[3], С. Н. Пчелина[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] *Медико-генетический научный центр им. акад. Н. П. Бочкова*
[4] *Институт мозга человека им. Н. П. Бехтеревой РАН*

Мутации в гене *GBA1* приводят к редкому аутосомно-рецессивному заболеванию – болезни Гоше (БГ) и являются фактором высокого риска болезни Паркинсона (БП). При этом риск развития БП повышается в 8–10 раз у гетерозиготных носителей мутаций в гене *GBA1*. Ген *GBA1* кодирует лизосомный фермент глюкоцереброзидазу (GCase), который расщепляет лизосфинголипиды, а именно глюкозилцереброзид (GlcCer), до глюкозы и церамида. При БГ снижение активности GCase в лизосомах приводит к накоплению GlcCer и глюкозилсфингозина (GlcSph), образующегося при деацетилировании GlcCer. При развитии БП у носителей мутаций в гене *GBA1* (GBA-БП) также наблюдается незначительное, но статистически значимое снижение активности GCase и повышение концентрации гексозилсфингозина (HexSph) (смеси GlcSph и галактозилсфингозина (GalSph)) в крови (рис.).

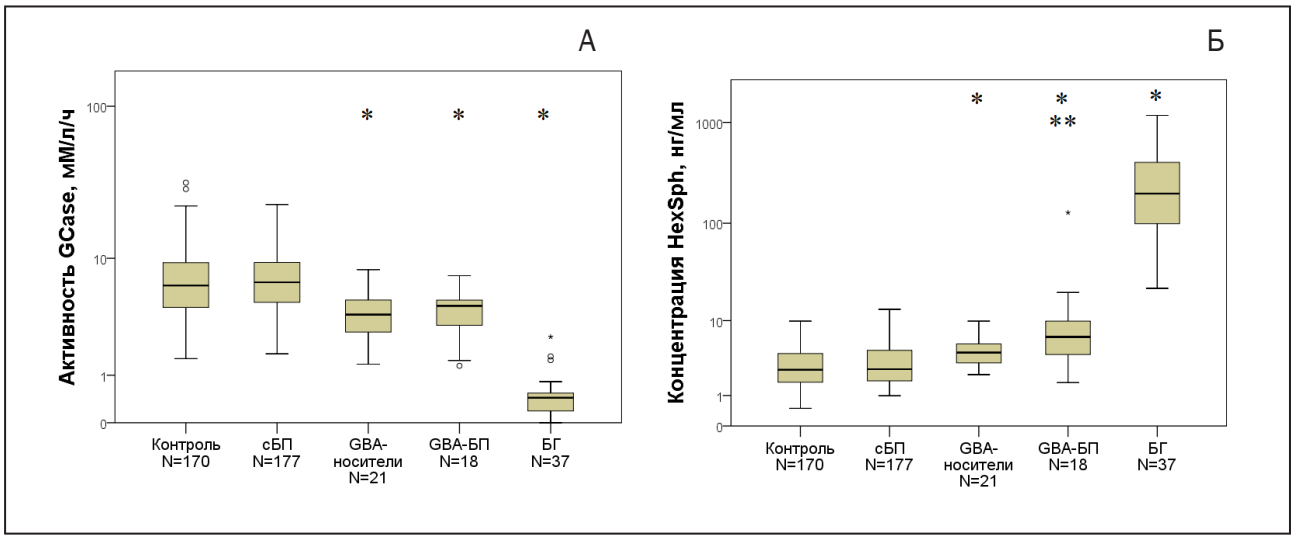
Мутации в гене *GBA1* обладают низкой пенетрантностью в отношении развития БП. Так, у пациентов в возрасте 80 лет и старше клиническая картина заболевания развивается у 9–30 % носителей мутаций в гене *GBA1*. До сих пор остается неизвестным, что является триггером развития БП у носителей мутаций в гене *GBA1*.

В рамках данной работы была сопоставлена активность GCase и концентрация HexSph в крови пациентов с GBA-БП и спорадической БП (сБП), БГ, бессимптомных носителей мутаций в гене *GBA1* (GBA-носители), а также лиц контрольной группы с использованием метода высокоэффективной жидкостной хроматографии в сочетании с тандемной масс-спектрометрией. Как и ожидалось, в группе пациентов с БГ наблюдалось значительное снижение активности GCase и повышение концентрации HexSph в периферической крови.

Впервые показано снижение активности GCase и повышение концентрации HexSph в крови не только у пациентов с GBA-БП, но и у бессимптомных гетерозиготных носителей мутаций в гене *GBA1* как по сравнению с контролем, так и со сБП. Важно отметить, что концентрация HexSph в крови была статистически значимо выше у пациентов с GBA-БП по сравнению с бессимптомными GBA-носителями. Подобных различий не наблюдали при оценке активности GCase. Пациенты с GBA-БП и GBA-носители были стратифицированы в группы в зависимости от тяжести мутаций в гене *GBA1*: носители «легких» и «тяжелых» мутаций соответственно (табл.). Интересно отметить, что повышенная концентрация HexSph в крови оставалась статистически значимо ассоциирована с БП только у носителей «легких» мутаций в гене *GBA1*.

Таким образом, полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что оценка HexSph в крови является более чувствительным маркером БП и может быть рассмотрена в качестве биомаркера развития БП у носителей мутаций в гене *GBA1*.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 19-15-00315.



Активность GCase (*а*) и концентрация HexSph (*б*) в крови исследуемых групп пациентов: * – $p < 0,05$ по сравнению с контролем; ** – $p < 0,05$ по сравнению с GBA-носителями

Таблица. Клинические и биохимические данные пациентов исследуемых групп

Группа пациентов	Пол (м/ж)	Возраст, лет	Мутации в гене *GBA1*	Активность GCase, мМ/л/ч, медиана (мин. – макс.)		Концентрация HexSph, нг/мл, медиана (мин. – макс.)	
Контроль (*N* = 170)	70/100	62,6 ± 10,3	Н/д	6,39 (1,54–32,13)		2,59 (0,49–9,87)	
сБП (*N* = 177)	68/109	64,4 ± 10,1	Н/д	6,74 (1,73–23,01)		2,63 (0,98–13,23)	
GBA-носители (*N* = 21)	8/13	55,2 ± 2,8	11 – N370S 1 – N227S 6 – L444P 1 – L327P 1 – M124T 1 – G241R	3,84 (1,34–8,31)		4,32 (2,22–9,88)	
				«Легкие» мутации *GBA1* (*N* = 15)	«Тяжелые» мутации *GBA1* (*N* = 6)	«Легкие» мутации *GBA1* (*N* = 15)	«Тяжелые» мутации *GBA1* (*N* = 6)
				3,48 (1,35–8,31)	4,15 (2,61–5,69)	3,89 (2,54–9,88)	4,59 (2,22–6,35)
GBA-БП (*N* = 18)	8/10	59,9 ± 2,5	10 – L444P 8 – N370S	4,49 (1,29–7,53)		6,65 (1,68–127,44)	
				«Легкие» мутации *GBA1* (*N* = 8)	«Тяжелые» мутации *GBA1* (*N* = 9)	«Легкие» мутации *GBA1* (*N* = 8)	«Тяжелые» мутации *GBA1* (*N* = 9)
				4,60 (1,29–6,89)	3,99 (1,48–7,53)	7,62 (2,36–12,23)	5,39 (1,68–127,44)
БГ (*N* = 37)	16/21	22,0 ± 3,56	Н/д	0,29 (0,01–0,66)		634,68 (185,76–1523,40)	
Значение *p*	*p* = = 0,985	*p* = 0,151	Н/д	*p* < 0,05		*p* < 0,05	

Kopytova A.E., Usenko T.S., Baydakova G.V., Nikolaev M.A., Senkevich K.A., Izyumchenko A.D., Tyurin A.A., Miliukhina I.V., Emelyanov A.K., Zakharova E.Yu., Pchelina S.N. // Mov. Disord. 2022. V. 37. No. 8. P. 1779–1781.

Снижение экспрессии α-синуклеина способствует замедлению развития ранней нейропатологии в модели болезни Паркинсона у дрозофилы

И. М. Голомидов, Е. М. Латыпова, Е. В. Рябова, О. И. Большакова, А. Е. Комиссаров, С. В. Саранцева

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

Болезнь Паркинсона (БП) – это нейродегенеративное заболевание, характеризующееся образованием телец Леви и прогрессирующей потерей дофаминергических нейронов в черной субстанции головного мозга. Тельца Леви преимущественно состоят из белка α-синуклеина, который играет ключевую роль в патофизиологии БП. Альфа-синуклеин кодируется геном *SNCA*, расположенным на 4-й хромосоме. В настоящее время описано шесть мутаций в гене *SNCA*, ассоциированных с семейной формой заболевания. Экспрессия гена *SNCA* человека, а также его форм с мутациями A30P и A53T у *Drosophila melanogaster* с использованием температурно-зависимой системы UAS–GAL4/GAL80 в течение определенных промежутков времени позволяет оценить степень развития нейропатологии.

В нашем исследовании экспрессия гена *SNCA* запускалась только на взрослой стадии развития линий дрозофилы в течение одной или двух недель с последующим подавлением экспрессии гена вплоть до четвертой недели жизни мух. Было продемонстрировано, что степень развития нейродегенерации существенно зависит от продолжительности экспрессии гена *SNCA*. Экспрессия гена в течение более длительного периода времени вызывала гибель дофаминергических нейронов, снижение уровня дофамина и локомоторной активности. Важно отметить, что подавление экспрессии гена *SNCA* приводило к элиминации растворимой фракции α-синуклеина в отличие от нерастворимой фракции. После блокирования экспрессии гена *SNCA* мы не наблюдали дальнейшего развития нейропатологии. Таким образом, мы склонны предполагать, что растворимая форма α-синуклеина вносит больший вклад в развитие патологии на ранних стадиях заболевания.

В этой работе мы изучили влияние запуска и подавления экспрессии гена *SNCA* на развитие нейродегенеративного процесса у *D. melanogaster*. Проведение таких исследований необходимо для понимания начала и прогрессирования патологических изменений при БП и других синуклеопатиях, а также для определения временных интервалов «терапевтических окон», когда развивающиеся дегенеративные изменения все еще обратимы и применяемая терапия наиболее эффективна.

Golomidov I.M., Latypova E.M., Ryabova E.V., Bolshakova O.I., Komissarov A.E., Sarantseva S.V. // J. Neurogenet. 2022. V. 36. Iss. 1. P. 1–10.

Внеклеточные везикулы как носители холестерина, не связанного с липопротеинами

С. Б. Ланда[1, 2], Н. А. Верлов[1], Н. Д. Федорова[1], М. В. Филатов[1], Р. А. Пантина[1], В. С. Бурдаков[1], Е. Ю. Варфоломеева[1], В. Л. Эмануэль[2]

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

Экстраклеточные частицы (ЭЧ) плазмы крови отличаются крайней гетерогенностью и разнообразным происхождением, обнаруживаются во всех биологических жидкостях: крови, моче, слюне и грудном молоке – и кондиционированных средах после культивирования в них клеток перевиваемых клеточных линий. Размеры ЭЧ лежат в диапазоне от десятка нанометров до 10 мк. Среди ЭЧ можно выделить экзомеры (< 50 нм), экзосомы (30–150 нм), эктосомы, или выпадающие микровезикулы (100–1 000 нм), апоптотические тела (1 000–5 000 нм), миграсомы (500–3 000 нм) и крупные онкосомы (1 000–10 000 нм). Среди перечисленных видов ЭЧ принято выделять малые ЭЧ (sEP) – экзомеры и экзосомы и ЭЧ промежточного/большого размера (*m*/lEP) – частицы всех остальных подтипов. Поскольку размеры могут перекрываться для отнесения конкретной ЭЧ к тому или иному подтипу, полагаться исключительно на их размер недостаточно. Необходимо учитывать особенности морфологии ЭЧ, в частности наличие внутренней полости, наличие бислойной липидной мембраны, плотность и наличие или отсутствие определенных белков и липидов. Существенным фактором является и биогенез ЭЧ.

Известно, что холестерин составляет существенную часть липидов экзомеров. В зависимости от источника поступления выделяют два основных пути метаболизма холестерина: экзогенный (с пищей) и эндогенный. Экзогенный холестерин в ограниченном количестве всасывается в кишечнике в составе липидных мицелл. Далее он в составе хиломикронов достигает гепатоцитов, где подвергается эстерификации либо превращается в соли желчных кислот. Биосинтез эндогенного холестерина из ацетил-КоА осуществляется в основном в гепатоцитах и в следовых количествах – в энтероцитах тонкого кишечника. Часть холестерина выводится с желчью, а другая – подвергается эстерификации.

Цель настоящей работы – изучить экзомеры и экзосомы, выявить общие свойства и особенности экзомеров, а также предпринять попытку выявить хотя бы некоторые метаболические процессы в клетке и организме в целом, которые приводят к образованию экзомеров.

Было показано: 1) экзомеры являются полноценными ЭЧ, т. к. несут тетраспаниновые маркеры CD9, CD63 и CD81; 2) синтез экзомеров не связан с гибелью клеток; 3) экзомеры не могут быть ассоциированы с липопротеинами, т. к. не несут биомаркеров, характерных для липопротеинов, и наоборот; 4) холестерин играет существенную роль в продукции экзомеров клетками, но не влияет на продукцию экзосом; 5) концентрация экзомеров в организме коррелирует с концентрацией холестерина в плазме, но слабо коррелирует с концентрацией холестерина в липопротеинах. То есть не весь холестерин в плазме связан с липопротеинами, как считалось до настоящего момента.

Таким образом, экзомеры играют существенную роль в транспорте холестерина, причем эти эффекты наблюдаются не только *in vitro*, но и *in vivo*.

Landa S., Verlov N., Fedorova N., Filatov M., Pantina R., ..., Burdakov V., Varfolomeeva E., Emanuel V. // Membranes. 2022. V. 12. P. 618.

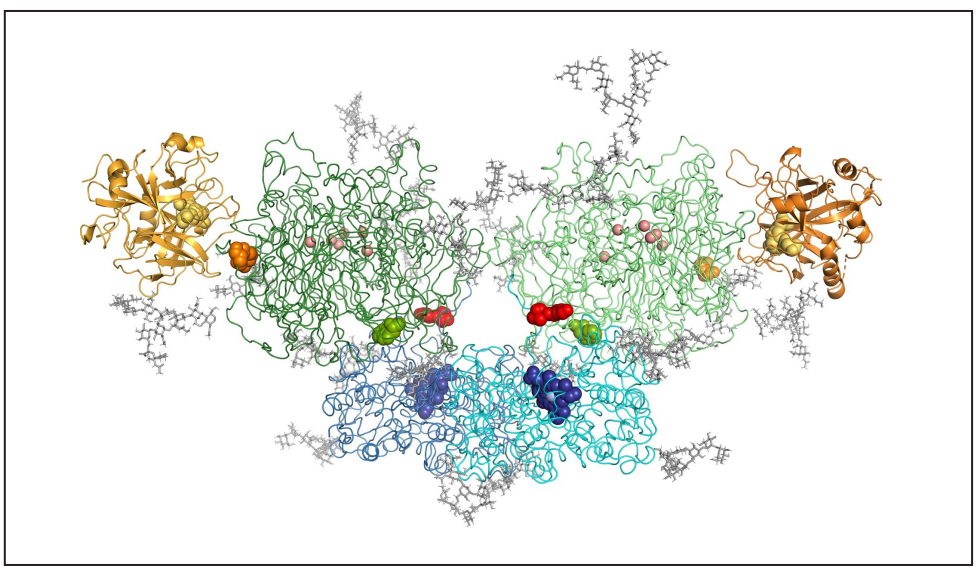
Изучение структуры комплекса миелопероксидазы церулоплазмина и α-тромбина методами молекулярного моделирования и МУРН

Я. А. Забродская, В. В. Егоров, А. В. Швецов, Н. Д. Федорова

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

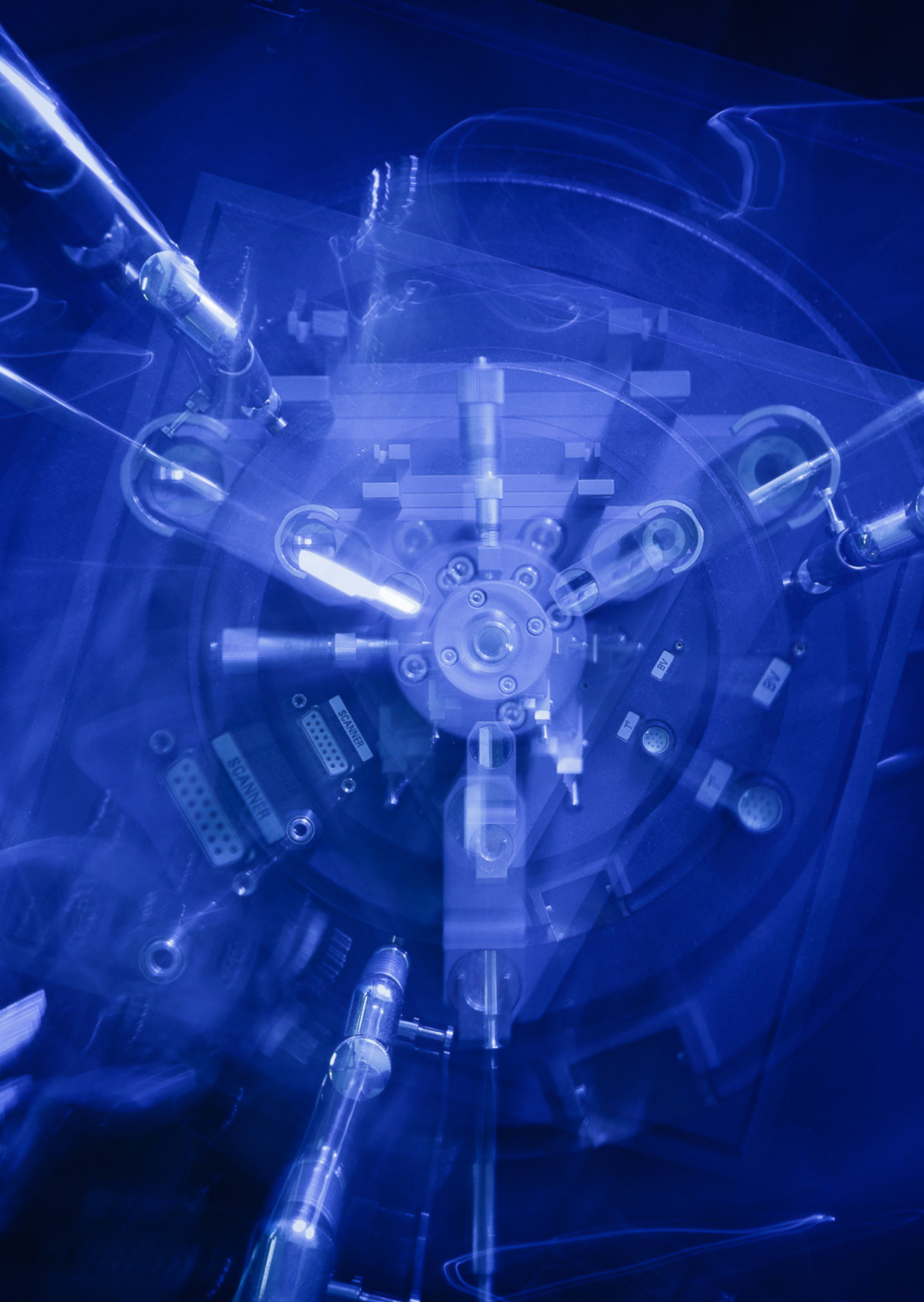
Миелопероксидаза (МПО) – димерный гемсодержащий фермент нейтрофилов и моноцитов, принимающий участие в реакциях врожденного иммунитета. В процессе дегрануляции нейтрофилов МПО экспонируется, что приводит к образованию нейтрофильных внеклеточных ловушек и мембранных тубуловезикулярных отростков (или цитоменов). В последнее десятилетие широко изучалось специфическое связывание МПО с эритроцитами, тромбоцитами, нейтрофилами, эндотелиальными клетками и рядом компонентов внеклеточного матрикса. Использование гепарина в качестве растворимого конкурента значительно увеличивало высвобождение МПО из внеклеточного матрикса и клеточной поверхности. МПО катализирует образование хлорноватистой кислоты (HOCl) и других активных форм галогенов с цитотоксическими свойствами.

Работа посвящена изучению структурных характеристик комплекса «миелопероксидаза – церулоплазмин – тромбин» с использованием методов малоуглового рассеяния нейтронов в сочетании с компьютерным моделированием (рис.), а также методом поверхностного плазмонного резонанса и твердофазного ферментного анализа. Ранее нами было показано, что функционирование активной миелопероксидазы при воспалении, несмотря на наличие в крови избытка церулоплазмина, подавляющего ее активность, возможно за счет частичного протеолиза церулоплазмина тромбином. В этом исследовании гетерогексамер «миелопероксидаза – церулоплазмин – тромбин» был получен *in vitro*. Построение полноатомной модели гетерогексамера *in silico* с учетом гликозилирования входящих в его состав белков подтвердило отсутствие стерических барьеров для образования белок-белковых контактов. Показано, что частичный протеолиз церулоплазмина не влияет на его способность связываться с миелопероксидазой, и методом малоуглового рассеяния нейтронов получена структурная модель гетерогексамера.



Структурная модель комплекса TRB-CP-MPO-MPO-CP-TRB, полученного в результате докинга, с учетом гликозилирования: MPO – *синий*; CP – *зеленый*; TRB – *желтый*; N-сахара – *серый*. Гем показан *синими сферами* в молекулах миелопероксидазы, атомы железа представлены *голубыми сферами*

Zabrodskaya Ya.A., Egorov V.V., ..., Shvetsov A.V., ..., Fedorova N.D. et al. // BioMetals. 2022. V. 35. P. 1157–1168.


SCANNER
SCANNER
BV

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

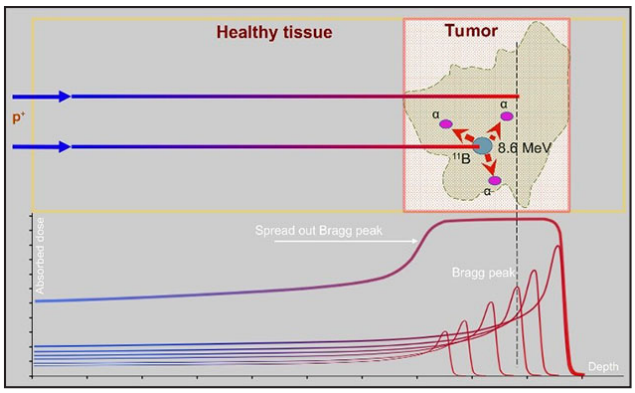
74 Экспериментальное подтверждение терапии протонного захвата бора на клеточных моделях

Экспериментальное подтверждение терапии протонного захвата бора на клеточных моделях

Т. А. Штам[1, 2, 3], В. С. Бурдаков[1, 2], А. В. Гарина[1, 2, 4], Л. А. Гараева[1, 2, 4], Н. Х. Тран[4], А. В. Волницкий[1, 2], Е. Куус[4, 5], Д. А. Амерканов[2, 6], Ф. А. Пак[2, 7], Г. И. Андреев[5], А. И. Любинский[5], К. А. Шабалин[1, 2], Н. А. Верлов[1, 2], Е. М. Иванов[6], В. Ф. Ежов[8], Д. В. Лебедев[1, 2], А. Л. Коневега[1, 2, 4]

[1] *Отделение молекулярной и радиационной биофизики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ*
[2] *НИЦ «Курчатовский институт»*
[3] *Институт цитологии РАН*
[4] *Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого*
[5] *Центр протонной терапии Медицинского института им. Березина Сергея*
[6] *Отделение перспективных разработок НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ*
[7] *Отдел медицинской радиологии НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ*
[8] *Отделение нейтронных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ*

Целью данного цикла исследований была оценка сенсибилизирующего потенциала борсодержащих соединений при протонном облучении на пике Брэгга культивируемых клеток глиомы. Протонная терапия используется для лечения многих видов злокачественных опухолей. Протоны быстро теряют энергию в течение последних нескольких миллиметров проникновения в ткани, что приводит к резко локализованному пику поглощенной дозы, называемому пиком Брэгга. Значительно увеличить эффективность методов лучевой терапии может применение бинарных технологий, при которых поражающий эффект протонного излучения дополнительно усиливается предварительным избирательным накоплением радиосенсибилизаторов в тканимишени. Бор-протонзахватная терапия возникла в результате исследований по ускорению частиц для повышения биологической эффективности протонной терапии. Предполагалось, что механизм, ответственный за увеличение дозы, связан с реакциями захвата протонов атомом ^{11}B: $^{11}B + p \rightarrow 3\alpha + 8{,}7$ МэВ (рис.). Имеются некоторые экспериментальные доказательства того, что биологическая эффективность протонов значительно выше для ^{11}B-содержащих клеток рака простаты или молочной железы. Измеренные показатели выживаемости опухолевых клеток при бор-протонзахватных экспериментах давали основание для вывода, что если в дальнейшем



Схематическое представление бор-протонзахватной терапии

полученные данные подтвердятся как *in vitro*, так и в доклинических исследованиях, то эти результаты представляют собой важный прорыв в терапии рака с использованием пучков ускоренных протонов.

С учетом противоречивости данных литературы, а также малочисленности экспериментальных исследований в этой области целью представленного цикла работ стало выявление сенсибилизирующих эффектов соединений бора при облучении протонами в пике Брэгга. Другими словами, основной задачей работы являлась экспериментальная проверка на клеточных культурах данных, представленных в работе Cirrone с соавторами, что в случае их подтверждения открывало бы перспективу для апробации бор-протонзахватной

терапии на животных моделях и проведения клинических исследований. В целом, проведенные работы находятся на мировом уровне исследований в данной области.

В первой из представленных работ была предпринята попытка выяснить, будет ли иметь место эффект усиления летальности опухолевых клеток глиом, содержащих ^{11}B, при облучении протонами в условиях пика Брэгга. В экспериментах были использованы две опухолевые линии клеток глиом, A172 и Gl-Tr, полученные из независимых источников, и в качестве контроля – неопухолевые фибробласты DF-2 кожи век взрослого донора, что является обычно принятым набором в подобных экспериментальных работах. В качестве борсодержащего препарата использовали тетраборат натрия ($Na_2B_4O_7$). Облучение клеточных культур протонами проводилось на синхроциклотроне СЦ-1000 НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, где был создан пучок протонов с энергией 200 МэВ и всеми настройками для локализации облучаемых клеток в область пика Брэгга. С особой тщательностью был проведен подбор концентрации тетрабората натрия, т. к. выяснилось, что все три линии клеток по-разному инактивируются при различных концентрациях борсодержащего соединения. Окончательной полезной находкой оказалось параллельное изучение летальности выбранных клеточных линий как от действия пучка протонов, так и γ-излучения ^{60}Co в присутствии выбранных концентраций ^{11}B. Неожиданно сенсибилизирующий эффект тетрабората натрия был определен не только для протонов, но и для γ-облучения, что свидетельствовало не только о физической природе воздействия бора на жизнеспособность облученных опухолевых клеток, но и о специфическом биологическом эффекте, оказываемом выбранным борсодержащим препаратом. Проведенные эксперименты с тетраборатом натрия оставили вопрос о возможности и эффективности бор-протонзахватной терапии открытым.

Второе исследование является продолжением и развитием первой работы. Отличительной особенностью этой статьи является кратно возросшее количество экспериментальных данных по инактивации уже трех опухолевых клеточных линий: двух глиом, A172 и Gl-Tr, и одной линии опухоли простаты, Du145. В исследование был привлечен дополнительный ^{11}B-содержащий препарат – боркаптат натрия ($B_{12}H_{11}SH$), содержащий в три раза больше атомов бора в молекуле. Диапазон использованных концентраций борсодержащих препаратов также сильно возрос (до 160 или 250 млн$^{-1}$). При облучении в условиях пика Брэгга использовались как применявшиеся ранее протоны с энергией 200 МэВ, так и терапевтические с энергией 89,7 МэВ. Данные по выживаемости клеток фиксировались как с помощью подсчета выживших клонов, так и с помощью метаболического MTT-теста. Все результаты подвергались тщательной статистической обработке. Тем не менее и в этом расширенном круге экспериментов не удалось убедительно подтвердить возможность повышения эффективности ^{11}B-протонзахватной терапии опухолевых заболеваний, скорее наоборот.

В работе показано, что боркаптат натрия обеспечивает лишь незначительное усиление эффекта протонного излучения на опухолевые клетки *in vitro*.

Представленные исследования потенциала различных соединений бора для повышения эффективности протонной терапии заведомо претендует на оригинальность. Очевидно, что в случае подтверждения опубликованных ранее данных и апробации бор-протонзахватной терапии на животных моделях возможно внедрение этой технологии в медицинскую практику ввиду того, что борсодержащий препарат боркаптат натрия зарегистрирован и применяется для бор-нейтронзахватной терапии. Однако ряд теоретических работ, а также представленные результаты экспериментальных исследований не подтверждают сенсибилизирующие свойства ^{11}B при облучении опухолевых клеток протонами на пике Брэгга. Тем не менее такие отрицательные результаты тоже однозначно вносят значительный вклад как в научную, так и в практическую стороны вопроса о потенциале бор-протонзахватной терапии.

1. *Shtam T., Burdakov V., Garina A., Garaeva L., Tran N.H., Volnitskiy A., Kuus E., Amerkanov D., Pack F., Andreev G., Lubinskiy A., Shabalin K., Verlov N., Ivanov E., Ezhov V., Lebedev D., Konevega A.* // Sci. Rep. 2023. V. 13. P. 1341.
2. *Tran N.H., Shtam T.A., ..., Konevega A.L., Lebedev D.V.* // Biomedicines. 2023. V. 11. P. 1727.



Физика ядерных реакторов и ускорителей

78 Обоснование ресурса и продление срока эксплуатации экспериментальных каналов реактора ПИК

79 Использование выгорающих поглотителей в реакторе ПИК для увеличения длительности кампании

81 Корректировка регламента на основе опыта химического контроля теплоносителей реактора ПИК с 2012 по 2021 г.

Обоснование ресурса и продление срока эксплуатации экспериментальных каналов реактора ПИК

А. Е. Киржаев[1], В. И. Попов[2], Р. М. Рамазанов[2], С. Р. Фридман[1]

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

[2] НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»

Срок эксплуатации экспериментальных каналов (ЭК) реактора ПИК из алюминиевых сплавов ПИК.32.000, ПИК.33.000, ПИК.37.000, ПИК.38.000, ПИК.56.000 и центрального экспериментального канала (ЦЭК) ПИК.51.000 был обоснован соответственно до 31 марта и 31 декабря 2022 г. Для продления срока эксплуатации ЭК в соответствии с разработанной программой «Оценка технического состояния и остаточного ресурса экспериментальных каналов реактора ПИК» № 22-УЭ-ПИК-19.00П в 2022 г. выполнен комплекс мероприятий по неразрушающему контролю и техническому освидетельствованию. Проведены обследование доступных мест наружных поверхностей ЭК ПИК.33.000 и ЦЭК ПИК.51.000 с использованием видеокамеры внутри бака тяжеловодного отражателя (ТВО), осмотр внутренней поверхности и ультразвуковой контроль толщины стенок каналов, пневматические испытания герметичности алюминиевых каналов. Получены и обсуждены данные контроля водно-химического режима (ВХР) ТВО.

Анализ и уточненная оценка текущего состояния ЭК позволили обосновать срок службы алюминиевых каналов не менее чем на шесть лет, до окончания 2024 г. при выполнении требований ВХР в среде бака ТВО. Начало отсчета срока службы определено временем установки каналов в бак ТВО в конце 2018 г. после зачистки от коррозионных повреждений. Принято, что расчетная скорость роста питтингов составляет не более 0,2 мм/год. Это в два раза превышает максимальную экспериментально полученную оценку в ходе коррозионных испытаний. Определение остаточного ресурса оболочки по критерию потери прочности проводили на канале ПИК.56.000 с минимальной толщиной стенки.

Срок эксплуатации ЦЭК ограничивается достижением флюенса нейтронов с $E > 1$ МэВ – $3{,}3 \cdot 10^{21}$ см$^{-2}$, что примерно соответствует энерговыработке реактора ПИК – 4 800 МВт · сут. ЦЭК включен в список оборудования, недоступного для контроля, поэтому продление его срока эксплуатации возможно на основе испытаний образцов-свидетелей по программе «Исследование образцов-свидетелей реактора ПИК в процессе эксплуатации» № ПМ.240-2180. В настоящее время программа № 240-2180 в части образцов из циркониевого сплава Э-125 выполняется, в пазы направляющей ПИК.23.050 загружены навески с образцами, их первая выгрузка намечена при достижении энерговыработки реактора ПИК ~ 610 МВт · сут.

По результатам положительного анализа полученных результатов исследований обосновано продление срока эксплуатации ЭК реактора ПИК и выпущено техническое решение, согласованное головной конструкторской организацией АО «Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехнологий им. Н. А. Доллежаля», головной материаловедческой организацией НИЦ Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», позволяющее эксплуатировать: алюминиевые каналы реактора ПИК до 31 декабря 2024 г.; ЦЭК – до флюенса нейтронов с $E > 1$ МэВ – $3{,}3 \cdot 10^{21}$ см$^{-2}$.

1. Обоснование ресурса экспериментальных каналов реактора ПИК НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ. Техническая справка НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей» № 220930-01-С. 2022.
2. О сроке эксплуатации экспериментальных каналов реактора ПИК. Техническое решение № 22 УЭ-ПИК-35.00ТР от 28.10.2022.

Использование выгорающих поглотителей в реакторе ПИК для увеличения длительности кампании

Н. С. Жихарева[1], К. А. Коноплев[2], М. С. Онегин[1]

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

[2] Отдел физики и техники реакторов НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

В настоящее время в НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ вводится в эксплуатацию высокопоточный реактор ПИК для научных исследований. Для увеличения длительности кампании принято решение разработать новый проект активной зоны, согласно которому тепловыделяющие сборки (ТВС) будут заменены на ТВС с выгорающими поглотителями. В первую очередь предполагается заменить стальные вытеснители на выгорающие поглотители на основе Gd_2O_3. Другие изменения предполагают увеличение загрузки урана на 20 %, замену стальных кожухов ТВС на циркониевые, а также изменение схемы профилирования топлива в кассетах. Все эти меры существенно увеличивают начальный запас реактивности, достигающий 13 % без учета отравления гадолинием в начале кампании.

Особенностью реактора ПИК является относительно небольшой вес регулирующих устройств, так что суммарная эффективность всех органов управления не превышает 7 % по реактивности. Отрицательный вклад в реактивность в начале работы реактора вносит наработка ^{135}Xe, достигающая 4 %. Таким образом, при начальном запасе реактивности около 7 % после отравления ксеноном на дальнейшее отравление и выгорание топлива остается запас реактивности всего около 2–3 %. Это приводит к коротким кампаниям реактора, ~ 7 сут. Для компенсации ксенонового отравления можно использовать выгорающие поглотители, но при нахождении в активной зоне они должны выгорать за время, сравнимое с наработкой ксенона, т. е. иметь сечение захвата нейтронов, сравнимое с сечением захвата ^{135}Xe. Максимальное сечение захвата тепловых нейтронов имеют изотопы гадолиния ^{155}Gd и ^{157}Gd, которые содержатся в естественной смеси. Максимальное сечение нейтронного захвата $2{,}54 \cdot 10^5$ б имеет ^{157}Gd. Это в 10 раз меньше, чем для ^{135}Xe, поэтому темп выгорания гадолиния в активной зоне будет существенно меньше темпа наработки ксенона и не позволит компенсировать уменьшение начального запаса реактивности реактора за счет отравления.

В реакторе ПИК имеется центральная водная полость с расположенным в ней по центру центральным экспериментальным каналом (ЦЭК). Плотность потока тепловых нейтронов в нем более чем в 10 раз превышает плотность потока нейтронов в активной зоне. Это приводит к тому, что гадолиний в нем выгорает за время, сравнимое с наработкой ксенона в активной зоне, что позволяет значительно уменьшить эффект снижения начального запаса реактивности за счет наработки ксенона.

Дополнительно в активной зоне реактора в разрабатываемых ТВС также предполагается использовать гадолиниевые выгорающие поглотители в виде стержня, полуцилиндра или крестообразной формы, совпадающей с формой твэлов. Стержневые выгорающие поглотители (СВП) в форме полуцилиндра ставятся на место стальных вытеснителей в пусковой конструкции ТВС, имеющих такую же форму, и устанавливаются по периметру, крестообразные выгорающие поглотители замещают часть твэлов. При загрузке стартовых ТВС со свежим топливом также возможно использование боросодержащих циркониевых стержней цилиндрической формы вместо части твэлов. Существенно снижая запас реактивности в начале цикла, они позволяют выйти на установившийся режим работы реактора с перегрузками.

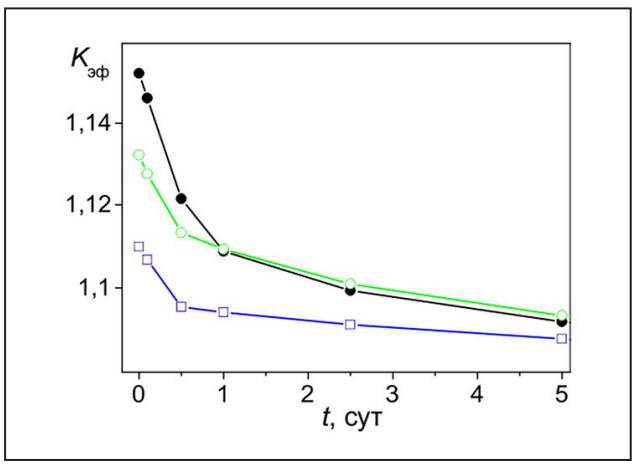
Для увеличения выгорания гадолиния в реакторе ПИК предлагается применять СВП с малым содержанием гадолиния, аналогичные использу-

емым в транспортных реакторах. Как и в транспортных реакторах, предлагается использовать два вида СВП на основе гадолиния: с низким содержанием гадолиния при замене ими вытеснителей в ТВС и с высоким в крестообразных СВП при замене части твэлов. Это позволит, с одной стороны, существенно уменьшить начальное скачкообразное изменение реактивности реактора за счет его отравления, с другой – обеспечит большую длительность работы на номинальной мощности без перезагрузок топлива.

Исследованиями установлено, что помещение в ЦЭК реактора ПИК с высокой плотностью потока тепловых нейтронов выгорающего поглотителя на основе гадолиния позволяет существенно уменьшить скачкообразное изменение реактивности за счет ксенонового отравления в начале реакторной кампании. Другим эффективным средством его снижения в начале цикла является использование СВП с низким содержанием гадолиния вместо вытеснителей в ТВС. Суммарно эти две меры уменьшают скачкообразное изменение реактивности в течение первых 5 сут работы реактора на номинальной мощности с 4,68 до 1,82 % (рис.).

Для уменьшения запаса реактивности реактора при пуске можно использовать СВП в виде стержней с сечением крестообразной формы с номинальным или повышенным содержанием гадолиния в них. Расчетами показано, что гадолиний почти полностью выгорает в активной зоне в течение 45 сут. При этом потери от замены 132 твэлов на СВП в конце кампании составляют ~ 0,5 % по реактивности, или 3,8 % начального запаса реактивности.

Проанализирована реактивность, обусловленная быстрым выгоранием поглотителей после нажатия кнопки аварийной защиты в начале кампании. Показано, что реактор остается ядерно безопасным в этом случае.



Зависимость коэффициента размножения нейтронов в течение первых 5 сут работы реактора на номинальной мощности без выгорающих поглотителей в активной зоне (●), с выгорающим поглотителем в центральном экспериментальном канале (○), с выгорающим поглотителем в центральном экспериментальном канале и вытеснителях в тепловыделяющих сборках (□)

Zhihareva N.S., Konoplev K.A., Onegin M.S. // Atom. Energ. 2022. V. 131. No. 5. P. 249–254.

Корректировка регламента на основе опыта химического контроля теплоносителей реактора ПИК с 2012 по 2021 г.

Т. В. Воронина, Е. С. Виноградова

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

В состав реакторной установки ПИК входят 20 водных систем, включая системы, важные для безопасности, требующие химического контроля (ХК) теплоносителей. Кроме организации лабораторного контроля проб теплоносителей на должном уровне необходимо тщательное обоснование норм для каждого теплоносителя.

На основе опыта эксплуатации и ХК водных систем реактора ПИК за 2012–2021 гг. предложены и обоснованы изменения, которые необходимо было внести в действовавший регламент ХК водных теплоносителей и технологических сливов реактора ПИК (№ 19РК-047.00 Р), был разработан и утвержден новый регламент ХК (№ 22РК-027.00 Р). Корректировка ХК коснулась теплоносителей систем первого контура, тяжеловодного отражателя (ТВО), жидкостного регулирования (ЖР), основного и аварийного промежуточных контуров (ОПК, АПК), включая перечень контролируемых показателей и нормы для них.

1. Устранено несоответствие норм, установленных для теплоносителя первого контура на входе в реактор и на выходе из реактора. Для контроля процесса наводораживания предложено дополнительно определять концентрации растворенного кислорода и пероксида водорода и рассмотреть возможность создания системы непрерывного контроля растворенных газов на базе отечественных анализаторов. Обосновано повышение предельно допустимого значения для удельной электрической проводимости теплоносителя до 4 мкСм/см, т. к. установленная норма (2 мкСм/см) не соответствует диапазону по pH = 5,0–7,0. При pH = 5,0 удельная электрическая проводимость идеально чистой воды по расчету равна 3,6 мкСм/см только за счет ионов H^+ и OH^-. При работе реактора на мощности в теплоносителе идут процессы радиолиза, которые при наличии кислорода и азота в воде приводят к образованию нитратов, а при избытке растворенного водорода – аммиака, поэтому необходим одновременный контроль водородного показателя pH, концентрации нитрат-ионов и ионов аммония.

2. Опыт ХК теплоносителей ОПК и АПК показал, что повторный анализ теплоносителя необходим только после выполнения технических мероприятий, направленных на улучшение качества воды (частичная или полная замена воды в системе, введение реактивов для корректировки pH и др.). Большой объем теплоносителя в этих контурах не позволяет химическим показателям быстро изменяться, имеет место высокая инертность процессов, ежедневный анализ проб неинформативен. Удельная электропроводность, pH и общая жесткость теплоносителя ОПК превышали предельно допустимые концентрации весь период контроля, т. к. трубопроводы системы на 99 % изготовлены из углеродистой стали (ст. 20). Фактически ОПК реактора ПИК – аналог второго контура энергетических реакторов типа ВВЭР. Для контуров такого типа оптимален щелочной водно-химический режим, при котором удельная электропроводность не нормируется, диапазон pH – до 10,0. До ввода в эксплуатацию установки очистки ОПК было предложено использовать эти нормы.

3. Для контроля процессов радиолиза и коррозии в тяжеловодных контурах ТВО и ЖР необходимо дополнительно определять концентрации растворенных в теплоносителе кислорода и дейтерия, концентрацию нитратов (в теплоносителе ЖР) и прозрачность.

Воронина Т. В. Регламент химического контроля водных теплоносителей и технологических сливов реактора ПИК № 22РК-027.00 Р. Гатчина, 2022. 29 с.

20
gr
30
gr

Прикладные исследования и разработки

84 База данных EXFOR-NSR – система для сохранения ядерных знаний и управления данными

85 Синтез и аттестация углеродного криогеля

86 Композиционные мембраны с наноалмазами для водородных топливных элементов

87 Паровой риформинг как метод утилизации жидких радиоактивных отходов

88 Нанодлиномер голографический с подшипником скольжения

База данных EXFOR-NSR – система для сохранения ядерных знаний и управления данными

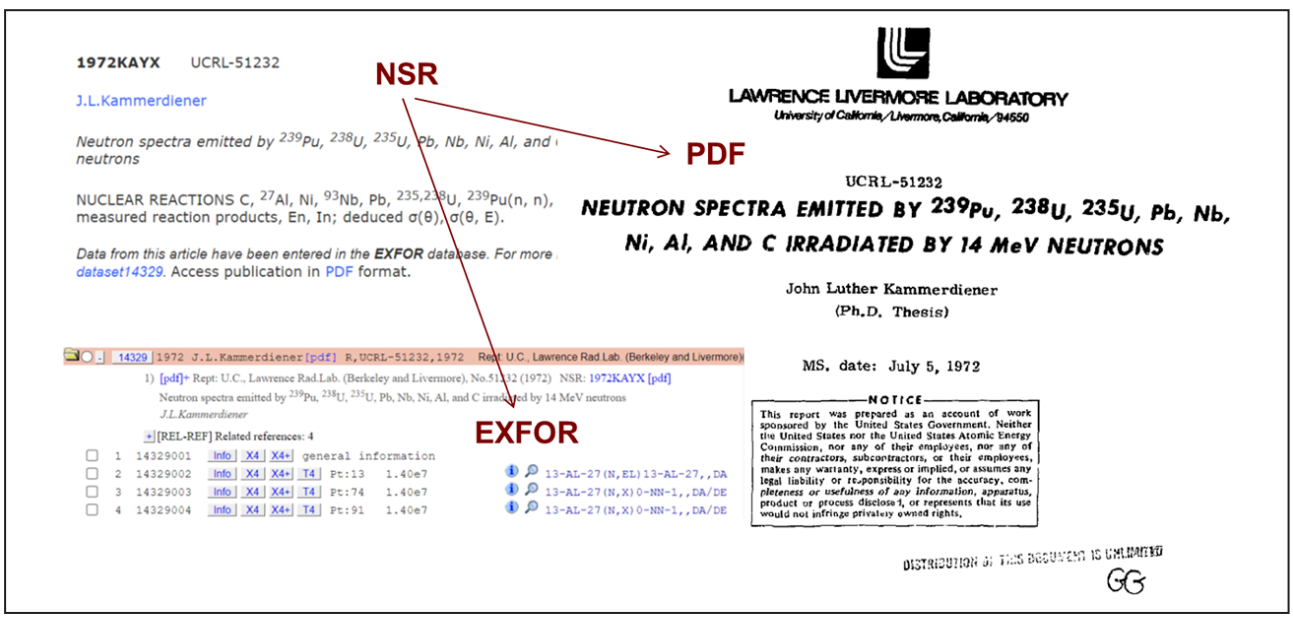
А. А. Родионов, Г. И. Шуляк

Отделение нейтронных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Текущие потребности ядерной физики и технологий предполагают наличие полных, хорошо документированных и легко поддающихся проверке ядерных данных. Базы данных Experimental Nuclear Reaction Data (EXFOR) и Nuclear Science References (NSR) содержат подборки, основанные на публикациях, а также данных, полученных от авторов посредством частных сообщений. Вторичные библиотечные материалы и частные коммуникации часто представляют собой узкое место для деятельности по проверке, компиляции, оценке и распространению ядерных данных. Чтобы решить эту проблему, библиографические материалы были отсканированы в формате PDF и загружены в реляционную базу данных.

Полные файлы публикации в формате PDF были сохранены в реляционной базе данных. Эта уникальная коллекция компиляций ядерных данных и вспомогательных публикаций открывает множество возможностей для приложений машинного обучения. Она дополняет основные ядерные библиотеки и ориентирована на процедуры сбора и оценки ядерных данных.

Веб-интерфейсы для авторизованного и общедоступного доступа к базе данных ядерных публикаций EXFOR–NSR были реализованы в Национальном ядерном центре обработки данных США (https://www.nndc.bnl.gov) и Секции ядерных данных МАГАТЭ (https://www-nds.iaea.org). На рисунке предлагаемая система иллюстрируется примером получения данных о нейтронных спектрах (EXFOR) и текста оригинальной публикации (PDF) по библиографической ссылке (NSR).



Данные по нейтронным спектрам из диссертации J.L. Kammerdiener: NSR – библиографическая ссылка; EXFOR – ядерные данные; PDF – публикация

Zerkin V.V., ..., Rodionov A.A., Shulyak G.I. // JINST. 2022. V. 17. No. 3. P. 03012–03015.

Синтез и аттестация углеродного криогеля

Г. П. Копица[1], B. Matović[2], S. Butulija[2], T. Minović Arsić[2], I. Cvijović-Alagić[2], Ю. Е. Горшкова[3], С. Ю. Котцов[4]

[1] *Отделение нейтронных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ*
[2] *Vinča Institute of Nuclear Sciences – National Institute of the Republic of Serbia, Serbia*
[3] *Лаборатория нейтронной физики им. И. М. Франка Объединенного института ядерных исследований*
[4] *Институт общей и неорганической химии им. Н. С. Курнакова РАН*

Криогели – высокопористые твердофазные материалы, получаемые путем лиофильной сушки гелей и их последующей термообработки в инертной атмосфере. Особый класс криогелей – углеродные криогели (УК), обладающие большой удельной площадью поверхности и пористостью, высокой электропроводностью и термомеханической стабильностью, что делает возможным их использование в качестве компонентов каталитических систем, сверхлегких конструкционных материалов, сорбентов, суперконденсаторов и т. д.

УК, полученный путем трехстадийного синтеза, включающего в себя образование геля из смеси резорцин-формальдегидных смол с последующими лиофильной сушкой и пиролизом в азоте при 800 °C, был исследован методами: рентгенофлуоресцентного анализа, рамановской спектроскопии, ИК-фурье-спектроскопии, дифференциального термического и термогравиметрического анализа, сканирующей электронной микроскопии, гелиевой пикнометрии, низкотемпературной адсорбции азота, малоуглового рентгеновского рассеяния (МУРР) и малоуглового рассеяния нейтронов (МУРН). МУРР позволяет получать более полную информацию об организации структуры пористых материалов, т. к. рассеяние рентгеновских лучей происходит на границе раздела фаз «твердое тело – поры». Однако с помощью этого метода невозможно разделить вклад рассеяния от открытых и закрытых пор в общую интенсивность рассеяния – необходимо использовать технику вариации контраста в МУРН.

Поскольку плотности амплитуд длин рассеяния ρ углерода ($\approx 7 \cdot 10^{10}$ см$^{-2}$) и тяжелой воды D_2O ($\approx 6{,}34 \cdot 10^{10}$ см$^{-2}$) очень близки, в экспериментах МУРН может быть применена методика изменения контраста. Использование D_2O в качестве адсорбата позволяет достичь практически нулевого контраста ($\langle\rho^2\rangle \approx 0$) между твердой фазой УК и системой открытых пор, заполненных D_2O. В этом случае МУРН будет возникать на границе раздела твердой фазы УК и закрытых пор и определяться контрастом:

$$\langle\rho^2\rangle = (\rho_{CC(D_2O)} - \rho_{close\ pore})^2 \cdot (\varphi_{CC} + \varphi_{D_2O}) \cdot \varphi_{close\ pore},$$

где φ_{CC} – объем твердой фазы аэрогеля; $\varphi_{D_2O} = \varphi_{open\ pore}$ – объем открытых пор, заполненных D_2O; $\varphi_{close\ pore}$ – объем закрытых пор, причем $\varphi_{CC} + \varphi_{D_2O(open\ pore)} + \varphi_{close\ pore} = 1$.

Показано, что синтезированный УК – аморфный материал с высокой открытой пористостью (≈ 82,5 %) и трехмодальным распределением открытых пор по размерам $dV(r)$ с максимумами $r_{p1} \approx 3$ нм, $r_{p2} \approx 15$ нм и $r_{p3} \approx 30$ нм соответственно и содержанием микропор $r \leq 2$ нм. Использование МУРН с техникой вариации контраста и адсорбцией D_2O УК позволило отдельно изучить структуру открытых и закрытых пор, оценить объемную долю закрытых пор ($\varphi_{close\ pore} \approx 1$ %) и общую пористость ($\varphi_{total} \approx 83{,}5$ %) полученного УК.

Были показаны возможности использования метода вариации контраста в МУРН для исследования пористой структуры материалов на основе криогелей, аэрогелей, пирогелей и т. д.

Matović B., Gorshkova Yu.E., Kottsov S.Yu., Kopitsa G.P., Butulija S., Minović Arsić T., Cvijović-Alagić I. // Diamond Relat. Mater. 2022. V. 121. P. 108727–108735.

Композиционные мембраны с наноалмазами для водородных топливных элементов

Ю. В. Кульвелис[1], В. Т. Лебедев[1], О. Н. Примаченко[2], А. В. Швидченко[3], Н. В. Глебова[3], Н. П. Евлампиева[4]

[1] Отделение нейтронных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ
[2] Институт высокомолекулярных соединений РАН
[3] Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН
[4] Санкт-Петербургский государственный университет

Исследованы структура и свойства композиционных мембран на основе сополимера типа Aquivion® с добавками частиц детонационного наноалмаза (ДНА), обладающего положительным ζ-потенциалом. Ранее было показано, что такой тип наноалмазов, имеющий на поверхности атомы водорода, наиболее успешно модифицирует процесс протонной проводимости в увлажненных мембранах за счет достаточно однородного распределения частиц алмаза в полимерной матрице.

По данным малоуглового рассеяния нейтронов на образцах мембран, иономерный пик при $q \sim 2$ нм$^{-1}$ в присутствии алмазов сохраняется, что характеризует сохранение структуры проводящих каналов в полимерной матрице (рис. 1). В сочетании с данными сканирующей электронной микроскопии (рис. 2) показано, что положительный заряд наночастиц алмаза обеспечивает достаточно однородное их распределение в полимерной матрице в виде небольших кластеров размерами до 200–300 нм даже при большом содержании алмазов (до 5 вес. %). Оптимальные проводящие и механические свойства композиционная мембрана имеет при 0,5 вес. % ДНА.

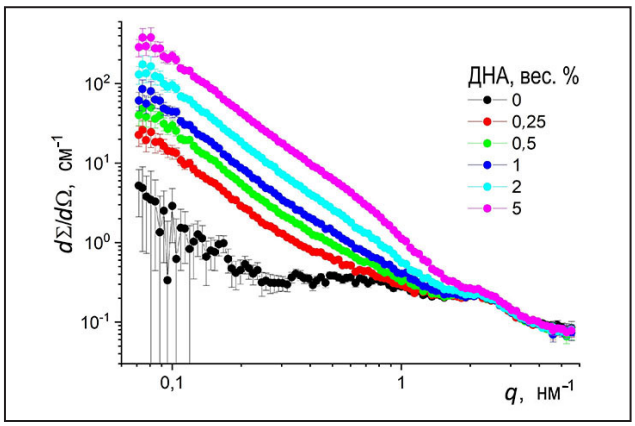


Рис. 1. Малоугловое рассеяние нейтронов на мембранах типа Aquivion® с содержанием ДНА 0–5 вес. %

Проведенные электрохимические исследования мембран в составе мембранно-электродных блоков также показали наилучшие характеристики при 0,5 вес. % ДНА, значительно превосходящие параметры немодифицированной мембраны (без алмазов). Показана перспективность применения полученных мембран для работы в водородных топливных элементах с рабочими температурами до 120 °С.

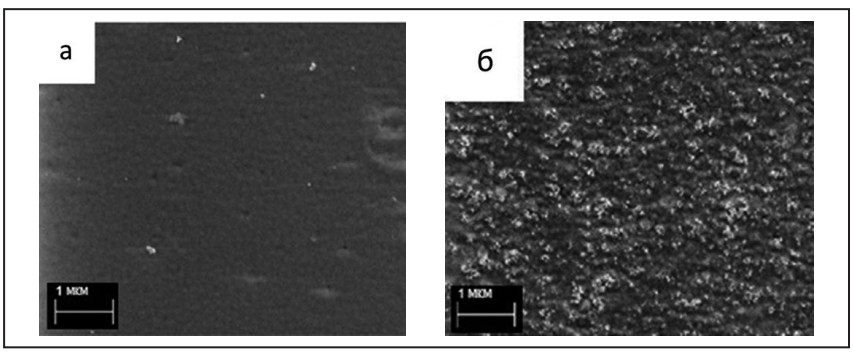


Рис. 2. Изображения сканирующей электронной микроскопии мембран типа Aquivion® с детонационными наноалмазами: *а* – 0 % детонационных наноалмазов (без наноалмазов); *б* – 5 вес. % детонационных наноалмазов

Primachenko O.N., Kulvelis Yu.V., ..., Glebova N.V., ..., Shvidchenko A.V., ..., Yevlampieva N.P., Lebedev V.T. et al. // Membranes. 2022. V. 12. Art. No. 827.

Паровой риформинг как метод утилизации жидких радиоактивных отходов

А. В. Башаричев[1], И. С. Окунев[2], В. Я. Сиротюк[1], В. А. Голиков[3]

[1] Научный центр комплексной безопасности НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ
[2] Отделение нейтронных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ
[3] ООО «Топливная экологическая компания», Санкт-Петербург

В соответствии с Федеральным законом от 11.07.2011 № 190-ФЗ «Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» накопленные радиоактивные отходы, отнесенные к удаляемым радиоактивным отходам, должны быть извлечены, переработаны, кондиционированы и захоронены.

До 2030 г. предстоит вывезти 83 000 отработавших топливных сборок и переработать 3 000 т отработанного ядерного топлива.

Планируется вывести из эксплуатации 82 ядерно и радиационно опасных объекта, законсервировать 7 промышленных уран-графитовых реакторов, реабилитировать 4,3 млн м^2 территории.

В НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ совместно с ООО «Топливная экологическая компания» исследуется возможность применения технологии утилизации жидких радиоактивных отходов (ЖРО), в т. ч. ионообменной смолы с использованием стеклоуглерода для сорбции радиоактивного загрязнения и возможность конденсации на лигнине.

По методике парового риформинга ЖРО переводятся на углеродный сорбент, образующийся в результате водородного разложения лигнина.

Стеклоуглерод и углеродный зольный остаток с радиоактивностью возможно утилизировать по обычным методикам стеклования, цементирования и битумирования с увеличением прочности компаунда за счет специфической структуры углеродной добавки.

Отличительными особенностями предлагаемой технологии являются использование микроволновой энергии для получения перегретого пара, создание в реакторе зон сушки, карбонизации и конверсии с однородным по сечению распределением температуры.

В результате исследований по утилизации жидких токсичных отходов с использованием перегретого высокотемпературного пара получен твердый углеродистый остаток с содержанием металлов, в т. ч. драгоценных.

Данная технология показала свою эффективность при утилизации отходов 1–3-го классов опасности, поэтому ее возможно использовать и при утилизации ЖРО после проведения дополнительных исследований и уточнения особенностей по применению.

Проведены испытания по утилизации ионообменных смол перегретым паром с результатом уменьшения массы обрабатываемых образцов и исследования по применению стеклоуглерода для утилизации загрязненных радиоактивных отходов в качестве сорбента и оценки сорбционной способности стеклоуглерода отдельных радионуклидов из водных растворов с положительным результатом снижения удельной активности воды.

Дальнейшее развитие и в перспективе промышленное применение предложенной технологии позволят значительно уменьшить образование опасных отходов на полигонах и шламохранилищах с уменьшением себестоимости переработки опасных отходов.

Башаричев А. В., Окунев И. С., Сиротюк В. Я., Голиков В. А. // Сб. тезисов Четвертой Междунар. научн.-практич. конф. «Охрана окружающей среды и обращение с радиоактивными отходами научно-промышленных центров». Сергиев Посад, 2022. С. 5–6.

Нанодлиномер голографический с подшипником скольжения

Б. Г. Турухано, Н. Турухано, С. Н. Ханов, О. Г. Ермоленко

Отделение перспективных разработок НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

В настоящее время человечество пытается использовать наноразмерные объекты. Важным результатом таких процессов является создание российского наноизмерительного длиномера голографического с подшипником скольжения (ДГПС) с рекордным разрешением в 10 нм и выше.

Подшипник скольжения (ПС, рис. 1) – это узел, осуществляющий связь между двумя движущимися относительно друг друга деталями, причем одна из них может быть неподвижна. Подшипник устанавливается с элементом скольжения (ЭС, рис. 2) на поверхности одного из узлов и будет перемещаться по нему, повторяя его характеристики с наименьшими искажениями и передавая это движение другому узлу.

ДГПС позволяет увеличить точность перемещения и дает возможность перемещения по плоскости по любой траектории. Он служит промежуточным звеном, связывающим два узла одного или разных механизмов, передает движение одного узла относительно другого с наименьшими потерями и искажениями. Это обеспечивается выявленными в устройстве факторами: 1) уменьшением динамических погрешностей; 2) уменьшением влияния пылевых частиц и температуры на узлах подшипника из-за возможности использования материалов с малым коэффициентом температурного расширения; 3) повышением устойчивости к коррозии, т. к. узлы подшипника выполнены из материалов с высокой твердостью; 4) возможностью работы без смазки в силу конструктивных особенностей ЭС, содержащего канавки, а также из-за использования ЭС-материалов, обладающих микроканавками; 5) отсутствием электропроводности при подборе соответствующих материалов; 6) возможностью перемещения по плоскости по любой траектории.

Такая совокупность признаков в ДГПС позволяет: 1) повысить точность перемещения механического узла по опорной поверхности; 2) уменьшить влияние температуры; 3) работать без смазки; 4) обладать устойчивостью к коррозии; 5) исключить электропроводность; 6) перемещать его по плоскости по любой траектории.

До начала работы собирается голографический ПС (ГПС) из узлов, показанных на рис. 1*а*, *б*, в т. ч. из платформы *4*, шарика *5* (жестко фиксированного верхней полусферой 8 к платформе *4* путем склеивания), ЭС *1*, нити *12* и корпуса *10*. Затем ПС устанавливается во внешнем устройстве, где он будет в дальнейшем функционировать между двумя узлами этого устройства, один

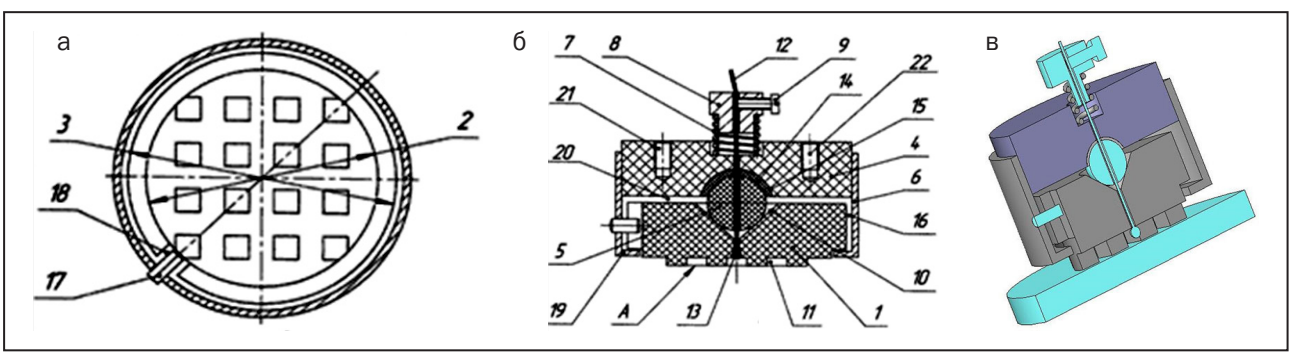


Рис. 1. Общий вид голографического подшипника скольжения (*а–в*)

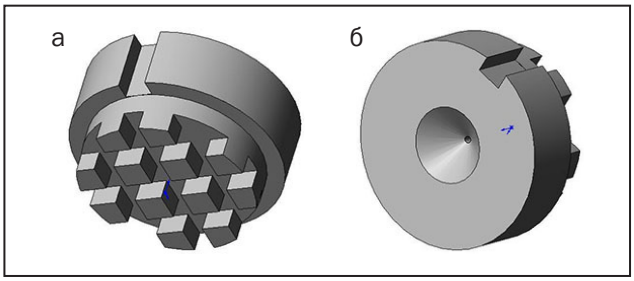


Рис. 2. Элемент скольжения. Вид со стороны: *а* – опорной поверхности; *б* – платформы

из которых неподвижен (рис. 3, узел *3*) и жестко связан с ПС, второй подвижен (см. рис. 3, узел *2*). ЭС *1* ПС устанавливается над плоскостью *А*, содержащей канавки *11* (рис. 1*б*), на опорной поверхности *2* (рис. 3), по которой он будет перемещаться, входя с ней в соприкосновение. При этом ЭС устанавливается так, чтобы в дальнейшем можно было осуществить движение под углом 45° по направлению паза *18*. Для этого ось паза *18* должна совпадать с направлением перемещения. Под каждой площадкой на стороне *А* – ЭС образуется воздушная подушка, что исключает присасывание ЭС к опорной поверхности, и ЭС получает дополнительную возможность перемещения по данной опорной поверхности.

Для определения погрешности, вводимой ПС при его применении в системе ДГПС, был использован высокоточный цифровой длиномер голографический ДГ-30 с разрешением 0,01 мкм (см. рис. 1). При исследовании определялась плоскостность поверхности плиты *2* (см. рис. 3), которая перемещалась во время испытания по опорной поверхности габродиабазовой платформы. Отклонение от плоскостности поверхности габродиабазовой платформы, на которой устанавливалась плита *2* (±0,02 мкм/300 мм), и погрешность самого голографического длиномера ДГ-30 (0,01 мкм/30 мм) в сумме должны быть меньше, чем ожидаемая величина погрешности ПС, включая его важный параметр – биение.

Во время эксперимента ДГ вместе с ПС неподвижны относительно исследуемой подвижной плиты, расположенной на габродиабазовой платформе. При этом длиномер голографический ДГ-30 позволяет отслеживать отклонения от плоскостности поверхности исследуемой плиты. На рисунке 4 видно, что погрешность всех используемых в эксперименте элементов: длиномера ДГ-30 с ПС, исследуемой плиты и габродиабазовой платформы – оказалась меньше ±0,045 мкм (90 нм) на длине 180 мм.

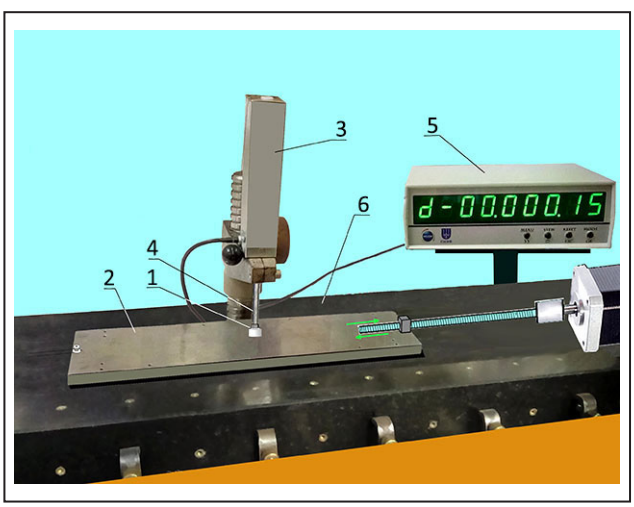


Рис. 3. Длиномер голографический с подшипником скольжения в процессе работы: *1* – подшипник скольжения; *2* – исследуемая металлическая плита; *3* – длиномер голографический ДГ-30; *4* – шток длиномера; *5* – блок управления длиномера; *6* – поверхность габродиабазовой опорной плиты

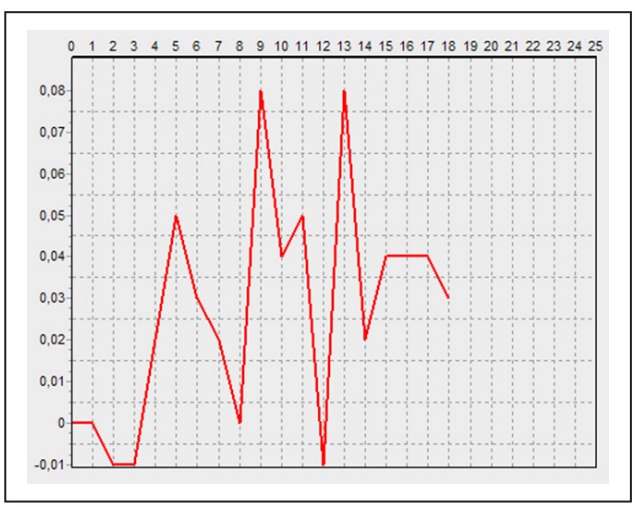
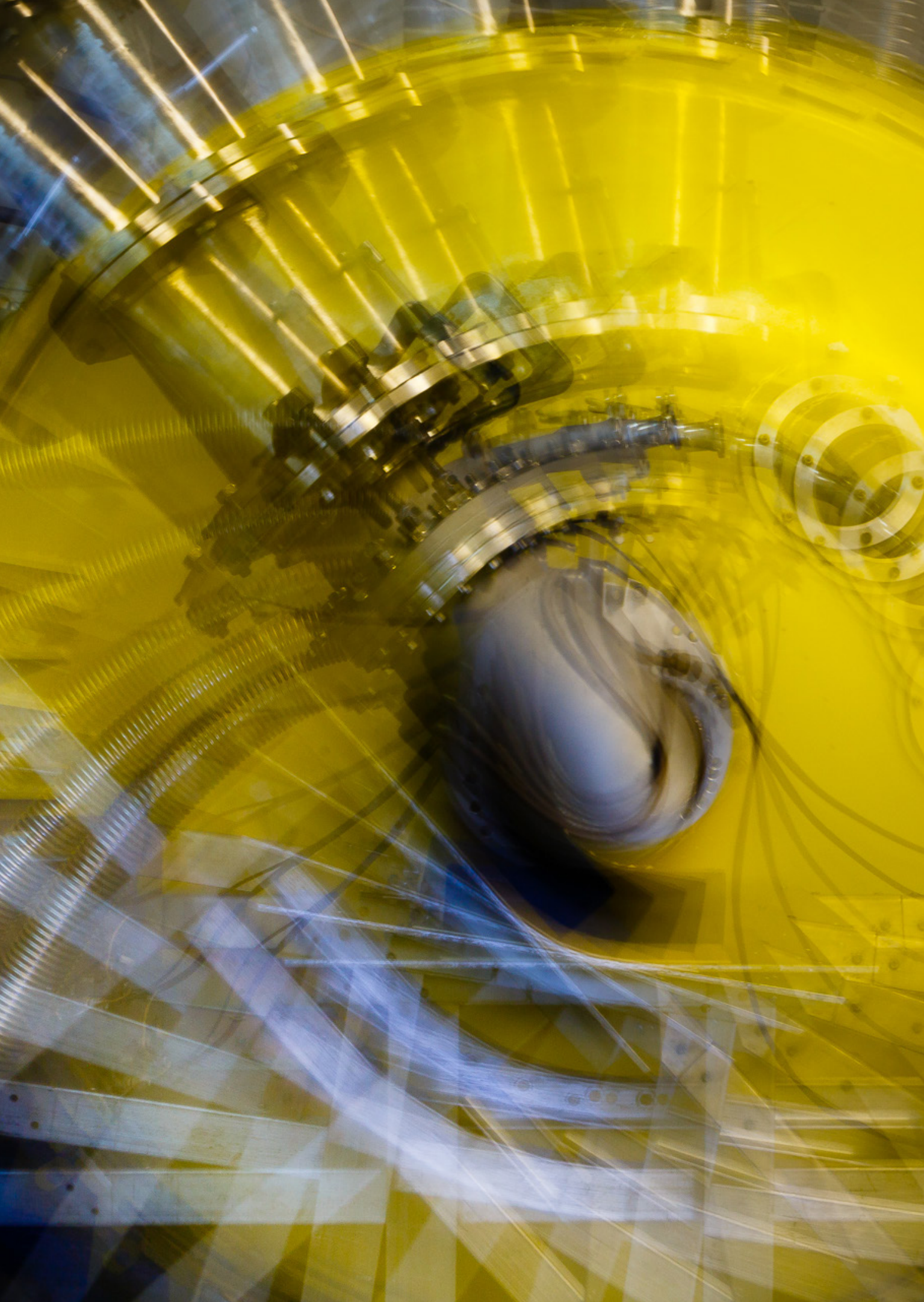


Рис. 4. График сканирования габродиабазовой плиты с помощью самоустанавливающегося и самоочищающегося безлюфтового подшипника скольжения

Турухано Б. Г., Турухано Н., Ханов Н. С., Ермоленко О. Г. // Наноиндустрия. 2022. Т. 15. № 2. С. 150–158.



Базовые установки

92 Ход выполнения программы энергетического пуска реактора ПИК в 2022 г.

94 Измерение потока нейтронов на выведенных пучках реактора ПИК

95 Выход реактора ПИК на мегаваттные мощности и первые экспериментальные результаты

97 Оценка потока нейтронов на спаллейшн-источнике синхроциклотрона НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

98 Координатные детекторы для высоких загрузок на основе многопроволочного газового электронного умножителя

99 Разработка концепции считывающей электроники трековой системы эксперимента SPD на коллайдере NICA

Ход выполнения программы энергетического пуска реактора ПИК в 2022 г.

А. С. Захаров[1], А. С. Полтавский[2], С. Р. Фридман[1]

[1] Отдел физики и техники реакторов НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

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

В 2022 г. был продолжен поэтапный ввод в эксплуатацию реактора ПИК с учетом обеспечения надежной работы систем, важных для безопасности, на мощности до 10 МВт.

Коллективами организаций, участвовавшими в проведении энергетического пуска: НИЦ «Курчатовский институт» (головная научная организация), АО «Ордена Ленина Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники им. Н. А. Доллежаля» (головная конструкторская организация), ЗАО «Научно-производственная организация «Спецпроект» (головная проектная организация), НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ (эксплуатирующая организация), осуществлено выполнение подэтапа 3-10 первого этапа программы энергетического пуска реакторного комплекса ПИК (РК ПИК) в диапазоне мощности до 7 МВт. Работы проводились в соответствии с условиями действия лицензии Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору № ГН-03-108-3378 от 06.07.2017 и Изменениями № 1–5, дающими право на эксплуатацию реактора ПИК на мощности до 10 МВт.

В ходе реализации подэтапа 3-10 программы энергетического пуска РК ПИК выполнены:

– планируемые критические эксперименты, нейтронно-физические и гидродинамические измерения на определенных уровнях мощности в диапазоне до 10 МВт, подтверждающие проектные характеристики РК ПИК;

– загрузка трех навесок с образцами-свидетелями металла в пазы направляющей ПИК.23.050;

– проверка градуировки рабочих органов системы управления и защиты – компенсирующих стержней и шторок;

– тарировка аппаратуры контроля нейтронного потока АСУЗ-03Р по результатам облучения нейтронно-активационных детекторов в наклонном и вертикальном экспериментальных каналах в поддиапазонах 100 Вт и 100 кВт;

– эксперименты по измерению гидродинамического эффекта реактивности в соответствии с этапами рабочей программы № 21РК-002.00Пр;

– последовательный выход на уровни мощности реактора 200, 400, 800, 2 000, 5 000, 7 000 кВт (рис.) с проверкой работы реакторных систем и экспериментального оборудования исследовательских станций на выведенных нейтронных пучках;

– необходимые испытания и физические измерения при выходе реактора на мегаваттные уровни мощности;

– экспериментальные работы на научных станциях,

также измерены параметры радиационной обстановки в помещениях РК ПИК и на научно-технической площадке Института при выходе реактора на уровень мощности до 10 МВт.

Общая энерговыработка реактора составила около 46 000 кВт · ч (1,92 МВт · сут).

Расчетное сопровождение экспериментов обеспечивалось комплексом аттестованных программ для ЭВМ, включая MCNP, MCU-5, и других, используемых для обоснования безопасности при эксплуатации РК ПИК.

Подтверждено штатное функционирование системы АСУЗ-03Р с учетом выявленных особенностей на малых уровнях мощности работы реактора. Система обеспечивает защиту реактора даже в условиях малых мощностей при крайне низких значениях плотности потока нейтронов. Установлено, что гидродинамический эффект реактивности остается стабильным на всех этапах увеличения мощности реактора. Подтверждено,

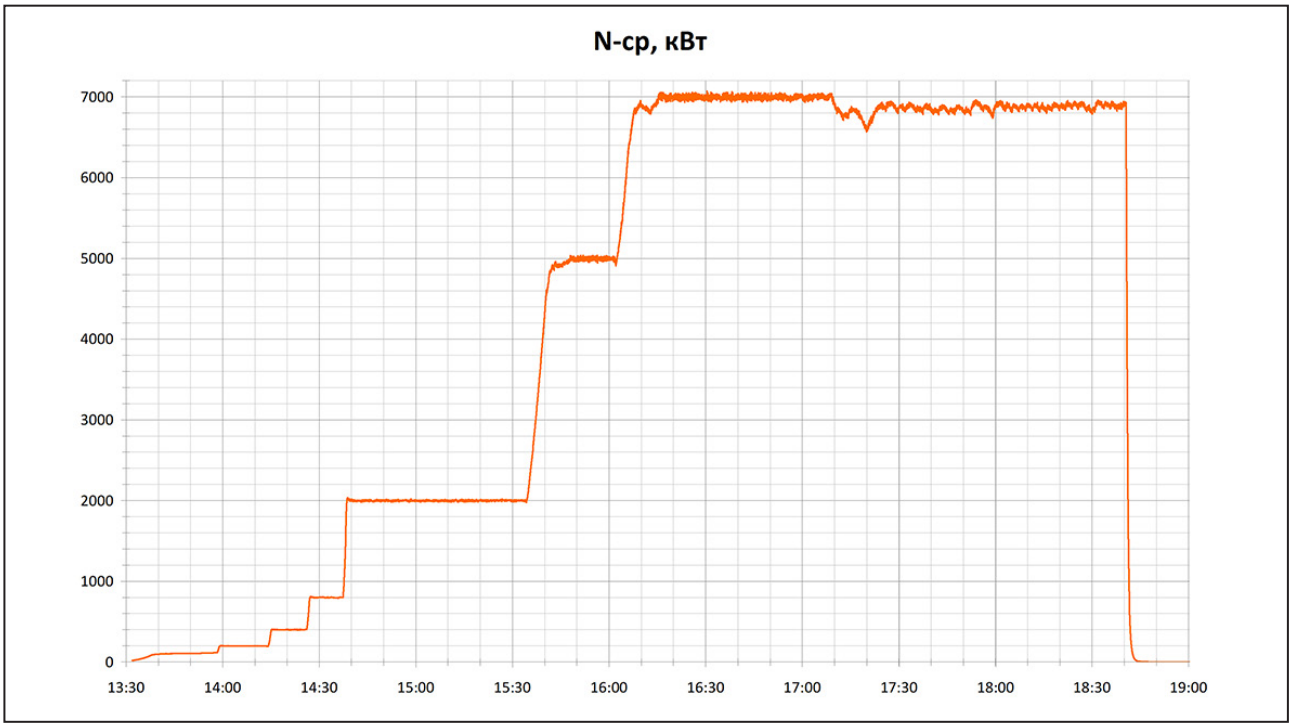


График выхода на уровень мощности 7 МВт

что система радиационного контроля РК ПИК позволяет надежно и оперативно фиксировать радиационную обстановку в помещениях РК ПИК. Полученные результаты физических измерений соответствуют ожидаемым эффектам и параметрам, приведенным в документах, обосновывающим безопасность РК ПИК.

Проведенные испытания подтвердили соответствие систем проектным требованиям и способность данных систем обеспечивать установленные эксплуатационные пределы безопасности. Эксперименты на научных станциях выполнены в полном объеме.

По итогам проведенных испытаний выполнен анализ работы задействованного оборудования, сформулированы выводы и рекомендации, определены ближайшие задачи по подготовке к следующим этапам энергетического пуска.

Отчет «Результаты проведения подэтапа 3-10 первого этапа программы энергетического пуска реактора ПИК». Инв. № 22-РК-037.00 От. Гатчина, 2022. 78 с.

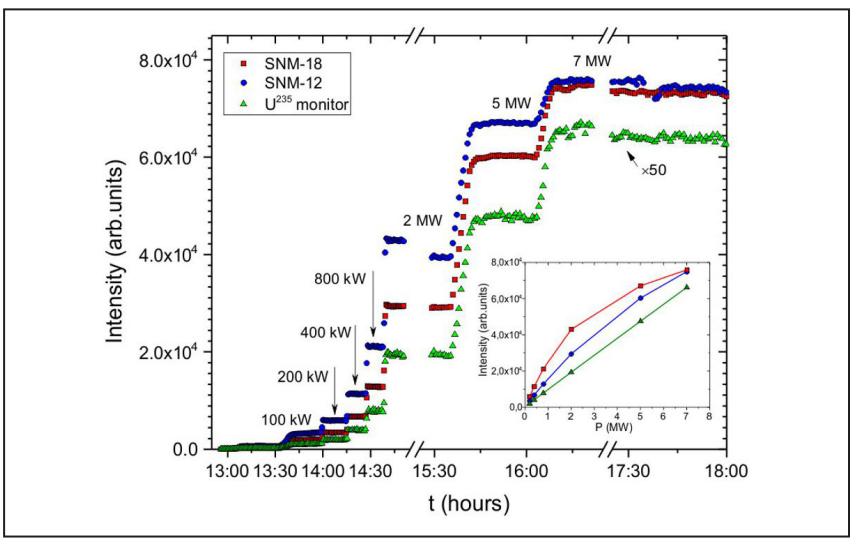
Измерение потока нейтронов на выведенных пучках реактора ПИК

В. В. Воронин[1], А. В. Гартвик[1], С. В. Григорьев[1], М. В. Дьячков[2], Д. А. Ипатов[1], В. А. Матвеев[2], С. В. Гаврилов[1], В. В. Тарнавич[1], В. Г. Сыромятников[2], А. О. Полюшкин[1], К. А. Пшеничный[1], В. А. Ульянов[2], В. Г. Зиновьев[1]

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

Высокопоточный исследовательский реактор ПИК выведен на мегаваттные мощности. Реактор находится в режиме поэтапного ввода в эксплуатацию, и в марте 2022 г. достигнута мощность 7 МВт. Реактор предназначен для работы на выведенных пучках, на которых построены первые пять нейтронных станций и проведены первые тестовые эксперименты. Двумя независимыми методами было измерено абсолютное значение потока тепловых нейтронов на выходе канала ГЭК-10 реактора ПИК. Проведены измерения интегральной интенсивности нейтронов на выведенном пучке канала ГЭК-10 в зависимости от времени в ходе вывода реактора на мощность 7 МВт. Для регистрации интенсивности нейтронов одновременно использовались три детектора: низкоэффективный детектор на основе ^{235}U (трансмиссионный монитор), ^{3}He-детектор СНМ-12, расположенный в касательной геометрии относительно пучка, и дополнительно установленный на прямом пучке ^{3}He-детектор СНМ-18. Измерены спектры нейтронных пучков на двух нейтронвыводящих каналах.

Зависимость интенсивности нейтронов от времени для различных детекторов представлена на рисунке. На *вставке* показана зависимость интегральной интенсивности нейтронов от мощности реактора. По данным низкоэффективного трансмиссионного монитора, интенсивность нейтронов линейна с увеличением мощности реактора и достигнет потока порядка 10^9 см$^{-2}\cdot$с$^{-1}$ на выходе из канала ГЭК-10 при мощности реактора 100 МВт. Мониторы на основе ^{3}He демонстрируют очевидный просчет при повышении мощности реактора.



Графики изменения интенсивности в режиме реального времени. *Вставка* – зависимость интегральной интенсивности нейтронов на выведенном канале от мощности реактора

Voronin V.V., Gartvik A.V., Gavrilov S.V., Grigoriev S.V., Diachkov M.V., Ipatov D.A., Matveev V.A., Tarnavich V.V., Syromyatnikov V.G., Polushkin A.O., Pshenichnyi K.A., Ulyanov V.A., Zinoviev V.G. // Neutron News. 2022. V. 33. Iss. 4. P. 13–16.

Выход реактора ПИК на мегаваттные мощности и первые экспериментальные результаты

В. В. Воронин[1], С. В. Гаврилов[1], А. В. Гартвик[1], М. В. Дьячков[2], Д. А. Ипатов[1], Н. А. Коваленко[1], В. А. Матвеев[2], В. Г. Сыромятников[2], В. В. Тарнавич[1], В. А. Ульянов[2]

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

В 2021 г. осуществлен переход реактора ПИК на энергетический режим работы этапа освоения мощности реактора до 10 МВт. В марте 2022 г. была достигнута мощность реактора 7 МВт, что подтвердило высокую квалификацию персонала и продемонстрировало устойчивую и надежную работу реактора и технологических систем.

Идет подготовка к переходу от пусковой активной зоны к эксплуатационному комплекту тепловыделяющих сборок, обеспечивающих удовлетворительную длительность цикла работы реактора порядка 25 сут между перегрузками топлива. Концепция нового топлива для реактора ПИК основана на использовании серийных тепловыделяющих элементов (твэлов) реактора СМ с повышенной загрузкой ^{235}U, применении выгорающего поглотителя и модернизации конструкции самой топливной кассеты. В настоящее время ведется подготовка к заключению контракта с предприятиями АО «ТВЭЛ» госкорпорации «Росатом» на поставку первой партии нового топлива в 2023 г.

Одновременно с увеличением мощности реактора идет создание комплекса экспериментального оборудования для проведения научных экспериментов.

Наиболее эффективное использование источника нейтронного излучения возможно, если высокоэффективные пучки нейтронов, выводимые из высокопоточного реактора, доставляются без значительных потерь к ультрасовременным экспериментальным установкам, позволяющим проводить самые передовые исследования во всех перечисленных выше областях. Поэтому обе составляющие, т. е. высокая производительность самого источника нейтронов и современный уровень приборной базы, имеют равное значение для успешной реализации научных программ Международного центра нейтронных исследований на реакторе ПИК. Таким образом, один из основных принципов общей концепции создания экспериментальных станций – совершенствование приборной базы – должен идти рука об руку с совершенствованием источника.

Работы по оснащению реактора ПИК комплексом современного оборудования осуществляются в рамках проекта «Создание приборной базы реакторного комплекса ПИК» (сроки выполнения 2019–2024 гг.). В декабре 2020 г. пять исследовательских станций реакторного комплекса ПИК были введены в эксплуатацию. К ним относятся:

– тестовый нейтронный рефлектометр ТНР, предназначенный для испытаний нейтронных поляризующих и неполяризационных зеркал нейтроноводов и других нейтронно-оптических устройств, в т. ч. для прикладных задач самого реакторного комплекса;

– текстурный дифрактометр ТЕХ-3 для задач текстурной дифрактометрии, в т. ч. прикладных исследований текстуры конструкционных и технических материалов;

– дифрактометр поляризованных нейтронов ДПН для исследований особенностей магнитного упорядочения в кристаллических структурах;

– рефлектометр поляризованных нейтронов NERO-2 для исследований поверхностных структур, границ раздела, тонких пленок и многослойных структур как магнитных, так и немагнитных материалов;

– тестовый нейтронный спектрометр «Т-Спектр» для измерений времяпролетным методом нейтронного спектра на выходе экспериментальных каналов реактора и нейтроноводов.

Экспериментальные работы на пяти станциях проводились на этапе перехода реактора на энергетический режим работы, предполагающий выход на тепловую мощность 10 МВт. К ним относится серия методических экспериментов, таких как измерение абсолютного нейтронного потока на горизонтальном экспериментальном канале № 10, изучение характеристик разработанных в НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ четырехмодового формирователя (поляризатора) нейтронного пучка на рефлектометре ТНР и нейтронно-оптического формирователя (поляризатора) на рефлектометре NERO-2 и др.

В рамках работы по освоению мощности реактора до 10 МВт и вводу в эксплуатацию пяти исследовательских нейтронных станций, перечисленных выше, был подготовлен перечень нейтронно-физических расчетов для обоснования биологической защиты на предмет соответствия требованиям ОСПОРБ 99/2010. Экспериментальные установки размещались на горизонтальных каналах ГЭК-2, 3, 8, 9, 10. Для каждого из них были рассчитаны плотности потока нейтронов на внешнем срезе разборной защиты реактора ПИК, которые в дальнейшем использовались в качестве исходных данных для моделирования биологической защиты нейтронных станций.

Для определения конструкции и материального состава биологической защиты для каждой рассматриваемой установки была разработана математическая модель и рассчитаны пространственные распределения уровня мощности эквивалентной дозы (МЭД).

При работе реактора на мощности 7 МВт были выполнены измерения радиационного фона в экспериментальном зале горизонтальных экспериментальных каналов для оценки эффективности разработанной биологической защиты. Результаты измерения для некоторых точек представлены в таблице. Расчетное значение полной МЭД (нейтроны и γ-кванты) для рассматриваемой мощности составляет 4,2 мкЗв/ч на поверхности защиты.

Для всех рассматриваемых случаев, за исключением установки ДПН, измеренные МЭД от нейтронов и γ-квантов не превышают расчетных значений, полученных на этапе моделирования. Незначительное превышение полной МЭД для блока защиты ДПН, вероятно, связано с неточностью монтажа, что может быть решено за счет компенсирующих мероприятий в дальнейшем.

Таблица. Результаты измерений радиационного фона на установках в экспериментальном зале горизонтальных экспериментальных каналов

Установка	Показания		Точка измерения
	γ, мкЗв/ч	$\gamma + n$, мкЗв/ч	
ДПН	2,5	6,4	Фронтально на корпусе блока защиты ДПН
«Т-Спектр»	0,8	1,8	Фронтально на корпусе блока защиты «Т-Спект». 30 см от оси пучка
NERO-2	1,6	1,8	Слева на корпусе блока защиты NERO-2
ТНР	3,2	3,8	Слева на корпусе блока защиты ТНР
ТЕХ-3	1,5	1,7	Слева на корпусе блока защиты ТЕХ-3

1. *Ковальчук М. В., Воронин В. В., Гаврилов С. В., Гартвик А. В., Дьячков М. В., Ипатов Д. А., Матвеев В. А., Тарнавич В. В., Ульянов В. А.* // Кристаллография. 2022. Т. 67. № 5. С. 785–794.
2. *Voronin V.V., Gartvik A.V., Gavrilov S.V., Grigoriev S.V., Diachkov M.V., Ipatov D.A., Matveev V.A., Tarnavich V.V., Syromyatnikov V.G., Polushkin A.O., Pshenichnyi K.A., Ulyanov V.A., Zinoviev V.G.* // Neutron News. 2022. V. 33. Iss. 4. P. 13–16.
3. *Diachkov M.V., Matveev V.A., Syromyatnikov V.G., Tarnavich V.V., Ulyanov V.A.* First Neutron Measurements at Reflectometers TNR and NERO-2 // Neutron News. GNNW-2023-0001 to be published.

Оценка потока нейтронов на спаллейшн-источнике синхроциклотрона НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

К. В. Ершов[1], И. Е. Алексеев[2], С. Е. Белов[2]

[1] Отделение нейтронных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ
[2] АО «Радиевый институт им. В. Г. Хлопина»

В эксперименте использовалась внутренняя свинцовая мишень синхроциклотрона НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, на которую периодически направлялся протонный пучок с энергией 1 ГэВ. Длительность протонного импульса – 10 нс при частоте повторения 50 Гц. Интенсивность протонного пучка составляет $3 \cdot 10^{11}$ протонов на импульс ($1{,}5 \cdot 10^{13}$ $с^{-1}$). Фактор множественности нейтронов при данной конфигурации эксперимента ~ 20, поэтому такой источник может давать до $3 \cdot 10^{14}$ протонов/с в 4π-геометрии.

Для замедления нейтронов в эксперименте использовались канистры с водой емкостью 24 л. На рисунке изображена схема их расстановки. Видно, что канистры располагались перед мишенью, чтобы уменьшить поток протонов, проходящий через мониторы, т. к. протоны рассеиваются преимущественно вперед, нейтроны – почти изотропно. Мониторы были изготовлены из отожженной нержавеющей стали с элементным составом, предварительно определенным методом рентгенофлуоресцентного анализа, и прикреплены к канистрам.

Программа для расчета переноса частиц PHiTs использовалась для расчета потока нейтронов, протонов и определения активности мониторов. В результате было показано, что необходимо установить пять канистр с водой для получения потока тепловых нейтронов с примесью высокоэнергетических (нетепловых) нейтронов не более 1 %. Активность пленок площадью 0,5 $мм^2$ должна составлять от нескольких десятков до нескольких сотен беккерелей.

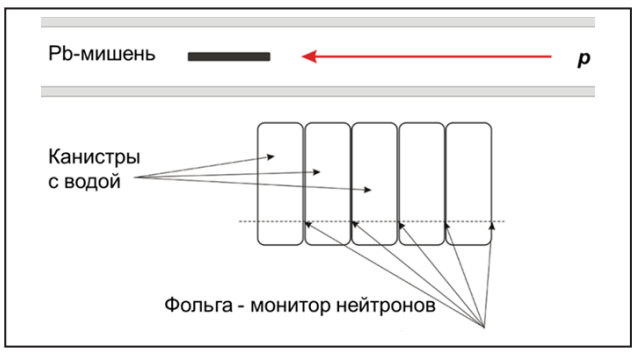


Схема эксперимента

После облучения на синхроциклотроне на спектрометре с детектором из сверхчистого германия измерялись γ-спектры активированной нейтронами фольги. Хотя нейтроны имеют энергию от 0,025 эВ до 1 ГэВ и возможно большое число реакций, наиболее вероятными оказались (n, γ)-реакции с образованием ^{99m}Tc и ^{51}Cr. Сечения этих реакций зависят от энергии нейтронов, что позволяет оценить спектр нейтронов по активации мишени. Из сравнения результатов γ-спектроскопии и Монте-Карло-расчетов в пакете PHiTs был получен средний поток нейтронов на наиболее удаленном от мишени образце 10^8 $см^{-2} \cdot с^{-1}$ с примесью высокоэнергетических нейтронов не более 1 %.

Основной вывод эксперимента – изменением конфигурации замедлителя можно получить потоки нейтронов с любыми распределениями по энергии, как существующими в реакторах, так и «новыми», для создания стендов и проведения экспериментов по трансмутации.

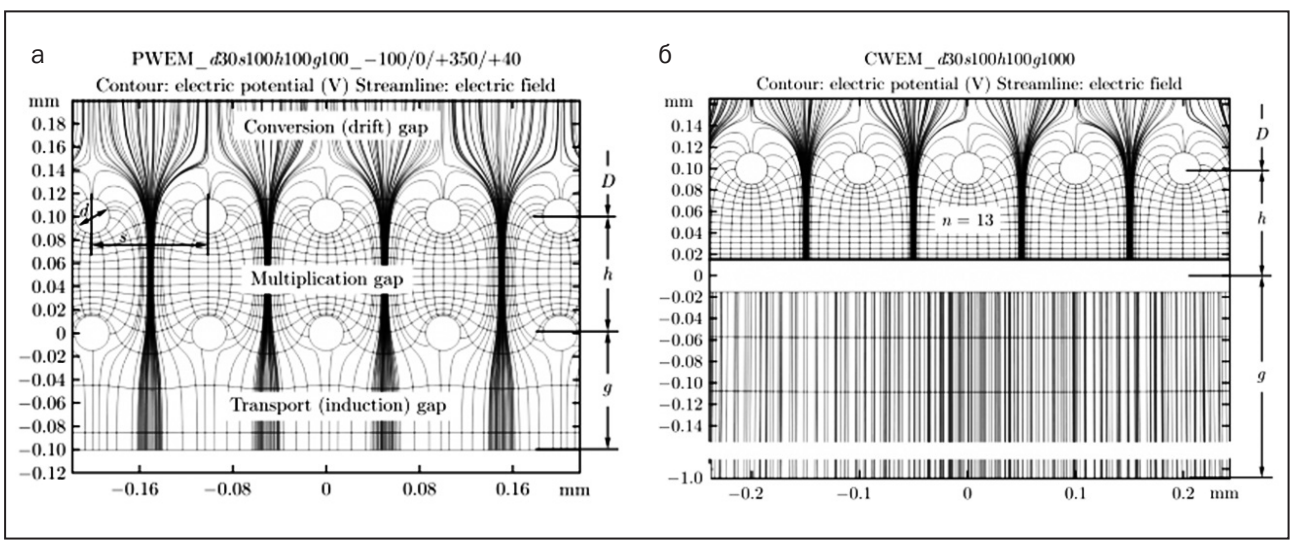
Алексеев И. Е., Белов С. Е., Ершов К. В. // Изв. РАН. Сер. физ. 2022. Т. 86. № 9. С. 1315–1319.

Координатные детекторы для высоких загрузок на основе многопроволочного газового электронного умножителя

А. П. Кащук[1], В. Г. Баев[2], О. В. Левицкая[1], С. А. Мовчан[3]

[1] *Отделение перспективных разработок НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ*
[2] *Институт энергетики НАН Беларуси, Республика Беларусь*
[3] *Объединенный институт ядерных исследований*

В работе представлены электрические поля, варианты конструкции и характеристики новых координатных детекторов, выполненных на основе многопроволочного газонаполненного электронного умножителя (рис. *а*, *б*). По сравнению с микроструктурным детектором GEM здесь можно получить координаты непосредственно с проволочек с существенно меньшим количеством вещества на пути частиц для Al–Mg-провода и практически без органики, содержащей водород, что важно для нейтронных детекторов. В этом техническом решении лавинное умножение первичного заряда происходит между проволочками, что обеспечивает на три порядка более высокую загрузочную способность при субмиллиметровом пространственном разрешении по сравнению с классической проволочной камерой. При условии $s \approx \pi d$ обеспечивается 100%-ная эффективность передачи первичных электронов в область умножения, а при $h \approx s$ уменьшается рабочее напряжение и повышается надежность. При малом h легко ввести поддерживающие спейсеры, выполненные известным методом фотолитографии и травления пленочного фоторезиста, как в детекторе MicroMegas, для обеспечения планарности электродов и монолитности конструкции, при этом повышается быстродействие устройства.



Линии напряженности электрического поля и эквипотенциали, показанные в плоскости, перпендикулярной электродам многопроволочного газонаполненного электронного умножителя с параллельными (*а*) и взаимно ортогональными (*б*) проволочками при d = 30 мкм, s = 100 мкм, h = 100 мкм

1. *Кащук А. П., Баев В. Г., Левицкая О .В., Мовчан С. А.* // Письма в ЭЧАЯ. 2022. Т. 19. № 4. С. 259–270.
2. *Kashchuk A.P., Baev V.G., Levitskaya O.V., Movchan S.A.* // Phys. Part. Nucl. Lett. 2022. V. 19. No. 4. P. 353–361.

Разработка концепции считывающей электроники трековой системы эксперимента SPD на коллайдере NICA

В. Т. Ким, Е. В. Кузнецова, С. Г. Барсов, С. А. Буланова, А. В. Зеленов, В. П. Малеев, С. Г. Насыбулин, Д. Е. Соснов, О. Л. Федин

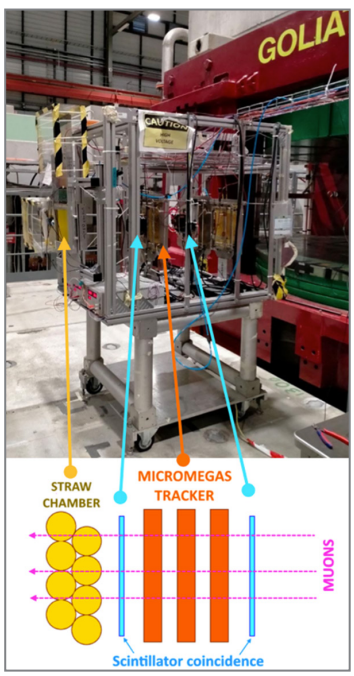
Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, коллаборация SPD

Эксперимент Spin Physics Detector (SPD) – один из экспериментов мегасайенс-проекта NICA, в котором в данный момент участвуют более 300 ученых и инженеров из 12 стран. Эксперимент SPD нацелен на изучение сильных взаимодействий в поляризованных и неполяризованных протон-протонных и дейтрон-дейтронных соударениях. Планируется провести исследования спиновой структуры протонов и легких ядер и их трехмерных партонных распределений. В 2021 г. был представлен и утвержден концептуальный дизайн детектора SPD. В конце 2022 г. был представлен технический проект детектора SPD.

Группа ученых НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ участвует в разработке трековой системы (ТС) детектора SPD, основанной на тонкостенных дрейфовых трубках, технологии изготовления трубок ТС, программного обеспечения, а также в разработке физической программы исследования физики многопартонных взаимодействий и экзотических многокварковых резонансов.

В 2022 г. НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ совместно с Объединенным институтом ядерных исследований участвовал в разработке концепции считывающей электроники ТС SPD. Для определения требований к считывающей электронике было проведено три тестовых измерения на пучке ускорителя SPS в Европейском центре ядерных исследований, с использованием прототипов модулей ТС с несколькими видами специализированных интегральных схем (ASIC): VMM3a, VMM3 и Tiger (рис.).

В настоящее время продолжается обработка полученных данных тестовых измерений. Предварительные результаты по требованиям к считывающей электронике ТС SPD были переданы разработчикам специализированных интегральных схем ASIC. На основе обработанных данных будут получены реалистичные параметризации треков. Далее с помощью разрабатываемого программного обеспечения группами ученых НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ и Объединенного института ядерных исследований на основе пакета GARFIELD будет получено моделирование отклика ТС SPD.



Прототип считывающей электроники трековой системы SPD для тестовых измерений с разными видами ASIC на пучке ускорителя SPS в Европейском центре ядерных исследований

Bautin V., ..., Kuznetsova E., Maleev V., ..., Sosnov D., Zelenov A. et al. // Nucl. Instrum. Meth. A. 2023. V. 1047. P. 167864.




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


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




РЕАКТОР ПИК

Научно-организационная деятельность

102 Кадровый состав

105 Количественные показатели научной и образовательной деятельности

110 Награды. Премии

115 Научные мероприятия

120 Новости науки

Кадровый состав



Впервые ученому НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ присвоено почетное звание «Профессор РАН». Ведущий научный сотрудник ОФВЭ Виктор Германович Рябов стал профессором Российской академии наук. Почетное ученое звание, присуждаемое Президиумом РАН за научные достижения национального или международного уровня, а также за активное участие в реализации основных задач и функций академии, присвоено решением РАН в мае 2022 г.

Виктор Рябов работает в лаборатории релятивистской ядерной физики ОФВЭ с 1996 г. Область его научных интересов – экспериментальное исследование механизмов рождения легких адронов в столкновениях тяжелых ультрарелятивистских ядер и изучение свойств субъядерной материи в условиях экстремально высоких барионных плотностей и температур, разработка и создание детекторов для современных экспериментальных установок.

С 1998 г. Виктор Германович Рябов является членом международной коллаборации PHENIX на RHIC (Брукхейвенская национальная лаборатория, США), с 2010 г. – коллаборации ALICE на Большом адронном коллайдере (Европейский центр ядерных исследований, Швейцария), с 2018 г. – коллаборации MPD на коллайдере NICA (Объединенный институт ядерных исследования, Дубна).

В. Г. Рябов внес большой вклад в разработку оригинальных методик анализа экспериментальных данных, позволяющих измерять свойства адронов и фотонов (выходы, угловые распределения и т. д.) в условиях беспрецедентно высоких множественностей частиц, достигаемых в столкновениях тяжелых релятивистских ядер на коллайдерах NICA, RHIC и LHC.

Звание «Профессор РАН» учреждено в 2015 г. Присваивается российским ученым не старше 50 лет, осуществляющим научно-исследовательскую или научно-образовательную деятельность в различных областях знания и не являющимся членами РАН. Всего из ныне живущих ученых звание «Профессор РАН» имеют 715 человек. До этого момента в списке не было представителей НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ.

Численность сотрудников

Профессиональные квалификационные группы должностей	2020	2021	2022
Всего без учета совместителей	1 987	1 970	1 878
Всего научных сотрудников	473	462	405
Из них с должностью			
руководителя	66	60	57
главного научного сотрудника	9	9	9
ведущего научного сотрудника	44	44	38
старшего научного сотрудника	146	140	126
научного сотрудника	83	83	58
младшего научного сотрудника	59	53	51
прочие научные сотрудники	66	73	66
С ученой степенью			
доктора наук	62	59	53
кандидата наук	215	203	177
С ученым званием			
академика	–	–	–
члена-корреспондента	2	1	1
профессора	8	6	5
доцента (с. н. с.)	80	74	65

Сведения о научном стаже сотрудников

Должность	Численность	В том числе со стажем		
		до 5 лет	более 5 лет	более 10 лет
Зав. лабораториями и отделами	57	–	6	51
Главные научные сотрудники	9	–	–	9
Ведущие научные сотрудники	38	1	1	36
Старшие научные сотрудники	126	3	9	114
Научные сотрудники	58	4	14	40
Младшие научные сотрудники	51	26	12	13

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	71	84	44	45	161	51
С ученой степенью						
доктора наук	–	–	6	9	38	75
кандидата наук	1	33	26	26	91	58
Не имеют ученой степени	70	51	12	10	32	39
С ученым званием						
академика	–	–	–	–	–	–
члена-корреспондента	–	–	–	–	1	77
профессора	–	–	–	–	5	83
доцента (с. н. с.)	–	–	–	4	61	73

Численность и средний возраст научных сотрудников по должностям

Должность	2020		2021		2022	
	Численность	Средний возраст	Численность	Средний возраст	Численность	Средний возраст
Главный научный сотрудник	9	83	9	83	9	78
Ведущий научный сотрудник	44	68	44	68	38	67
Старший научный сотрудник	146	62	146	62	126	61
Научный сотрудник	83	50	83	50	58	49
Младший научный сотрудник	59	32	59	32	51	33
Руководитель	66	62	66	62	57	61
Прочие научные сотрудники	66	27	66	27	66	28

Структура и штатная численность за 5 лет

Категория персонала	2018	2019	2020	2021	2022
Научный персонал	489,2	435,5	450,2	430,4	423,3
Научно-технический персонал	251,8	290,7	296,05	299,4	275,4
Административно-хозяйственный персонал	1 181,4	1 253,1	1 290,15	1 318,2	1 346,6
Младший обслуживающий персонал	32,5	32,5	31,5	31,5	31,5
Всего по штатному расписанию	1 954,9	2 011,8	2 067,9	2 079,5	2 076,8

Количественные показатели научной и образовательной деятельности

В НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ выполнены все мероприятия, а также достигнуты все целевые индикаторы и показатели, запланированные на 2022 г., в т. ч. за счет субсидии на финансовое обеспечение выполнения государственного задания на 2022 г. (плановый период 2023 и 2024 гг.).

Сотрудники Института в 2022 г. были авторами и соавторами 604 статей, из них 383 публикации, проиндексированные в базе данных Web of Science («Сеть науки») и ассоциированные с НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, что составляет 63,4 % 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
2018	689/507
2019	714/465
2020	674/473
2021	650/446
2022	604/383

Динамика участия в научных мероприятиях за 5 лет

Год	Количество фактов участия в выставочной деятельности, конференциях, на форумах и т. д.
2018	420
2019	422
2020	387
2021	417
2022	472

Число полученных в 2022 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
3	3	16	22

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

Вид правоохранительного документа	2018	2019	2020	2021	2022
Патенты на изобретения	7	10	5	7	3
Патенты на полезные модели	4	2	8	1	3
Свидетельства на программы для ЭВМ	25	12	13	19	16
Свидетельства на базы данных	1	–	–	–	–
Зарегистрированные ноу-хау	3	–	–	–	–
Всего	40	24	26	27	22

В 2022 г. научные исследования сотрудников Института были поддержаны грантами РФФИ (8) и РНФ (18), 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 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». Имелось два гранта 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 2022 г. в рамках выполнения Программы деятельности НИЦ «Курчатовский институт» на 2018–2022 гг. сотрудники Института защитили 10 кандидатских диссертаций.

Подготовка кадров высшей квалификации за 5 лет

Год	Общее число диссертаций / диссертации на соискание ученой степени доктора наук
2018	8/2
2019	7/–
2020	9/3
2021	12/2
2022	10/–

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 2022 г. состоялся второй выпуск из аспирантуры Института. Всего было выдано 6 дипломов об окончании аспирантуры, подтверждающих успешное завершение обучения по программам аспирантуры как третьей ступени высшего образования по 4 направленностям подготовки: «Теоретическая физика» (1 диплом), «Физика конденсированного состояния» (1 диплом), «Физика атомного ядра и элементарных частиц» (1 диплом) и «Генетика» (3 диплома).



В 2022 г. на обучение в аспирантуру Института было принято 13 человек (в соответствии с установленными приказом Министерства науки и высшего образования РФ от 29.04.2021 № 346 контрольными цифрами приема (КЦП)): 8 человек по группе научных специальностей 1.3. «Физические науки» (КЦП 03.06.00 «Физика и астрономия»), 5 человек по группе научных специальностей 1.5. «Биологические науки» (КЦП 06.06.00 «Биологические науки»).

Общая численность аспирантов на конец 2022 г. составляла 49 человек.

В 2022 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 2023/24 учебный год. Были получены КЦП по группам научных специальностей: 1.3. «Физические науки» – 2 места, 1.5. «Биологические науки» – 1 место.

В 2022 г. доля молодых ученых (исследователи без ученой степени, кандидаты наук до 35 лет и доктора наук до 40 лет) в общем количестве сотрудников, занятых в исследованиях и разработках, в НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ составила 30 %.

В подразделениях НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ в 2022 г. выполняли учебно-исследовательские и научные работы, проходили практику, готовили выпускные квалификационные работы бакалавров и специалистов, а также магистерские диссертации 244 студента вузов Санкт-Петербур-

га (Санкт-Петербургского государственного университета (СПбГУ), Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого и т. д.) и других городов Российской Федерации.

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

Год	Количество студентов
2018	122
2019	127
2020	154
2021	175
2022	244

В 2022 г. заключено 5 договоров с новыми вузами, география приема практикантов расширяется: Иркутский национальный исследовательский технический университет, Донской государственный технический университет, Воронежский государственный университет, Самарский государственный технический университет, Севастопольский государственный университет. 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 20 заявок на участие в целевом конкурсе. Так, в 2022 г. было заключено 9 договоров на целевое обучение.

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

В рамках реализации национального проекта «Образование» Институт с ноября 2022 г. 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».

С июня 2022 г. 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».

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 2022 г. состоялись творческие конкурсы, олимпиады, экологические акции, в которых приняли участие около 3 000 юных жителей Гатчины и Гатчинского района.

Награды. Премии

НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ является активно функционирующим институтом, идущим в ногу с современными научными тенденциями, о чем свидетельствуют многочисленные 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 2022 г. среди победителей традиционно есть работы и сотрудников НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ.

В области научных исследований победила работа «Метод прецизионного теоретического исследования материалов, содержащих лантаноиды, актиноиды и переходные металлы», выполненная в лаборатории квантовой химии ОПР (*А. В. Титов, Ю. В. Ломачук, Н. С. Мосягин, Д. А. Мальцев, В. М. Шахова*). Ученые разработали прецизионный комбинированный метод моделирования электронной структуры материалов, содержащих *f*- (лантаноиды и актиноиды) или тяжелые *d*-элементы как периодически упорядоченных атомов в кристалле, так и в качестве примесных атомов (Compound-Tunable Embedding Potential method – CTEP). Известные в мире методы расчета периодических структур позволяют в лучшем случае достичь точности ~ 0,1 эВ для энергетических свойств, что недостаточно для надежного расчета соединений *f*- и *d*-элементов, имеющих атомные возбуждения на этом же уровне энергии или даже меньше. Победивший в конкурсе подход нацелен на точность ~ 0,01–0,03 эВ в соответствии с возможностями составляющих его и других разрабатываемых в лаборатории квантовой химии методов.

Среди студенческих работ победила работа *Екатерины Ивановой* «Ген *swiss cheese Drosophila melanogaster* и его роль в сперматогенезе», выполненная на базе ОМРБ. Работа расширяет имеющиеся на данный момент сведения о функциях гена *swiss cheese* и впервые показывает важность его нормального функционирования для обеспечения фертильной функции самцов дрозофилы. Как хорошо известно, дрозофилы – излюбленный инструмент генетиков, который используется в генетическом моделировании некоторых человеческих заболеваний, включая болезни Паркинсона, Хантингтона и Альцгеймера.

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

Номинация конкурса	2018	2019	2020	2021	2022
В области научных исследований	2	1	1	–	1
В области инженерных и технологических разработок	1	–	–	–	–
Среди работ молодых научных сотрудников и инженеров-исследователей	3	1	2	3	–
Среди студенческих работ	1	3	1	1	1
Всего	7	5	4	4	2

В 2022 г. 8 сотрудников НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ были удостоены **именных научных стипендий губернатора Ленинградской области на 2022–2023 гг.**: 6 сотрудников – в категории «ведущие ученые» и 2 сотрудника в категории «молодые ученые».

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

- *О. Ю. Андреев*, ведущий научный сотрудник лаборатории квантовой химии ОПР;
- *Е. С. Кропотова*, научный сотрудник лаборатории биополимеров ОМРБ;
- *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.



17 марта 2022 г. в НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ прошло торжественное заседание Ученого совета, посвященное 50-летию присвоения учреждению имени Б. П. Константинова (10 марта 1972 г. приказом первого директора Ленинградского института ядерной физики АН СССР Олега Игоревича Сумбаева на основании Постановления Президиума Академии наук СССР от 10.02.1972 № 203 и в соответствии с Постановлением Совета Министров РСФСР от 20.01.1972 № 49 Институту было присвоено имя Бориса Павловича Константинова).



В рамках заседания состоялось награждение сотрудников НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ наградами Министерства науки и высшего образования РФ, губернатора Ленинградской области, НИЦ «Курчатовский институт», администрации Гатчинского муниципального района в честь празднования 50-летия Института.

Семь молодых работников НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ в соответствии с приказом Министерства науки и высшего образования РФ от 31.01.2022 № 37 к/н были удостоены **нагрудного знака «Молодой ученый»**.



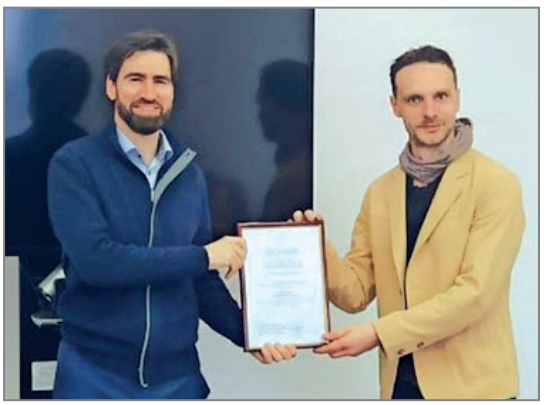
Заместитель директора по эксплуатации ядерных установок НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ *Сергей Лаврович Смольский* удостоен **медали «За заслуги в освоении атомной энергии»**. 29 декабря 2022 г. правительственную награду ему вручил губернатор Ленинградской области Александр Юрьевич Дрозденко.

Заместитель руководителя ОПР, кандидат физико-математических наук, председатель гатчинского общества «Жители блокадного Ленинграда» *Константин Николаевич Ермаков* удостоен одной из выс-

ших наград города Гатчины – **почетного знака «Гатчина – город воинской славы»**. Соответствующее решение было принято городским советом депутатов 24 июня 2022 г., награждение состоялось 22 ноября 2022 г. в Гатчинском дворце на торжественном собрании в честь 226-летия со дня присвоения Гатчине статуса города.

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.

Научный сотрудник лаборатории квантовой химии ОПР *Юрий Ломачук* удостоен премии за вклад в развитие науки и техники в Ленинградской области в категории «За достижения в области цифровых и информационных технологий». Заместитель председателя правительства Ленинградской области, председатель комитета экономического развития и инвестиционной деятельности Дмитрий Ялов лично вручил награду ученому в День российской науки, 8 января 2023 г.



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 (с 2022 г.), научная деятельность которых была неразрывно связана с Институтом. Стипендии присуждаются ежегодно по следующим номинациям:



Д. В. Чубуков



П. А. Мелентьев

- 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 2022 г. 5 молодым ученым присудили данные именные стипендии.

Стипендия имени С. Е. Бреслера за работы в области биологии присуждена лаборанту-исследователю ОМРБ *Л. А. Гараевой* («Везикулы растительного происхождения как переносчики биоактивных молекул»). ***Стипендию имени В. Н. Грибова*** за работы в области теоретической физики получил лаборант-исследователь ОТФ *В. П. Вандеев* («Анализ уравнения девиации геодезических в статических пространствах различной размерности»). ***Стипендия имени Г. М. Драбкина*** за работы в области физики конденсированного состояния присуждена младшему научному сотруднику ОНИ *А. Е. Суслопаровой* («Изучение особенностей кристаллической структуры и спинового состояния семейства теллуратов A_2MnTeO_6 (A = Li, Na, Ag, Tl) методом нейтронной дифракции»). ***Стипендия имени В. М. Лобашева*** за работы в области ядерной физики присуждена двум молодым сотрудникам: лаборанту-исследователю ОПР *С. Д. Просняку* («Развитие теоретических методов изучения намагниченности ядер для определения магнитных моментов с помощью исследования электронной структуры») и лаборанту-исследователю ОФВЭ *В. В. Чуликову* («Изучение рождения очарованных барионов во взаимодействии протонов высоких энергий»).

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., продолжает получать *Д. В. Чубуков* (СП-1213.2021.2 «Исследование свойств молекулярных систем и их применения для поиска *P*, *T*-нечетных взаимодействий в природе»). *П. А. Мелентьев* получал **стипендию Правительства Российской Федерации для студентов и аспирантов** очной формы обучения на 2021/22 учебный год. *О. И. Утесов* продолжал получать поддержку в рамках **гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук** на научное исследование МК-1366.2021.1.2 «Изучение свойств спиральных магнетиков с интерфейсным взаимодействием Дзялошинского – Мория».



О. И. Утесов

В апреле 2022 г. в правительстве Ленинградской области состоялось вручение губернатором Ленинградской области государственных наград РФ и наград Ленинградской области лучшим представителям различных отраслей народного хозяйства, социальной сферы, культуры и науки.

Сотруднику ОТФ *Р. А. Ниязову* губернатор Ленинградской области Александр Юрьевич Дрозденко вручил свидетельство на право **получения гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук** № МК-2918.2022.1.2 в направлении «Физические науки» по теме «Теоретическое исследование шумовых характеристик топологических квантовых интерферометров».



А. Ю. Дрозденко (*слева*) и Р. А. Ниязов

За большой вклад в развитие науки, техники и технологий, многолетний добросовестный труд **Почетной грамотой Правительства Российской Федерации** был награжден профессор, доктор физико-математических наук, почетный работник науки и техники Российской Федерации, главный научный сотрудник лаборатории физики элементарных частиц ОФВЭ *Георгий Дмитриевич Алхазов*.



Г. Д. Алхазов

На конкурсе научных работ НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ 2022 г. комиссия рассмотрела 33 работы 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 почетное наименование «**Лучшая работа НИЦ „Курчатовский институт" – ПИЯФ**» работе «Поиск стерильного нейтрино в эксперименте „Нейтрино-4" и результаты измерений» (*А. П. Серебров*, *В. Г. Ивочкин*, *Р. М. Самойлов*, *А. К. Фомин*, *В. Г. Зиновьев*, *П. В. Неустроев*, *В. Л. Головцов*, *С. С. Волков*, *А. В. Черный*, *О. М. Жеребцов*, *М. Е. Чайковский*, *А. Л. Петелин*, *А. Л. Ижутов*, *А. А. Тузов*, *С. А. Сазонтов*, *М. О. Громов*, *В. В. Афанасьев*, *М. Е. Зайцев*, *А. А. Герасимов*, *В. В. Федоров*).

Первыми премиями были отмечены следующие работы:

- ***в области ядерной физики низких энергий*** «Дифракционное усиление на 7 порядков эффекта Штерна – Герлаха для нейтрона в кристалле» (*В. В. Воронин*, *С. Ю. Семенихин*, *Д. Д. Шапиро*, *Ю. П. Брагинец*, *В. В. Федоров*, *Я. А. Бердников*, *A. Ioffe*, *M. Jentschel*, *V.V. Nesvizhevsky*);

• ***в области ядерной физики высоких энергий*** «Первое прямое наблюдение квантово-хромодинамического эффекта „мертвый конус” в жестких протон-протонных взаимодействиях на Большом адронном коллайдере» (*Ю. Л. Докшицер*, *С. И. Троян*, *В. А. Хозе*, *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.* (*коллаборация ALICE*));

• ***в области физики конденсированного состояния*** «Исследование магнитных структур и спин-волновой динамики в мультиферроиках-ферроборатах с помощью рассеяния нейтронов» (*И. В. Голосовский*, *А. И. Васильев*, *Б. З. Малкин*, *А. А. Мухин*, *М. Н. Попова*, *И. А. Гулим*, *E. Ressouche*, *M. Boehm*);

• ***в области биологических исследований*** «Экзосомы – переносчики терапевтического экзогенного белка Hsp70 в клетки человека» (*Л. А. Гараева*, *Ю. В. Киль*, *Е. Ю. Варфоломеева*, *Н. А. Верлов*, *Ю. П. Гармай*, *С. Б. Ланда*, *В. С. Бурдаков*, *А. Г. Мясников*, *А. Л. Коневега*, *Т. А. Штам*);

• ***в области методических исследований*** «Теория рамановского рассеяния света в нанопорошках неполярных кристаллов» (*О. И. Утесов*, *А. Г. Яшенкин*, *С. В. Коняхин*, *И. Н. Тертеров*, *А. В. Сиклицкая*, *Д. Солнышков*);

• ***в области прикладных исследований*** «Новый способ химического обогащения урана легкими изотопами» (*В. Г. Зиновьев*, *И. А. Митропольский*, *И. С. Окунев*, *Д. А. Румянцева*, *А. П. Серебров*, *П. А. Сушков*, *Т. М. Тюкавина*, *Г. И. Шуляк*);

• ***монографии и учебные пособия*** «Амплитуды распределения для переходов и жесткие эксклюзивные реакции с изменением барионного числа» (*К. М. Семенов-Тян-Шанский*, *B. Pire*, *L. Szymanowski*).

Научные мероприятия

Общеинститутские семинары

11 января. Ядерный семинар ОФВЭ. *В. Г. Рябов.* «Поляризационные эффекты в столкновениях тяжелых ионов на LHC».

13 января. Теоретический семинар по ФКС. *А. В. Сыромятников.* «Кластерное представление спиновых операторов 1/2 для изучения экзотических фаз и спиновой динамики в магнетиках. Часть 3. *J*1–*J*2-модель на квадратной решетке».

13 января. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ. *А. П. Серебров.* «Стерильное нейтрино и нейтринная модель 3 + 1 в свете существующих экспериментальных данных».

18 января. Ядерный семинар ОФВЭ. *А. Ю. Егоров.* «Поиски асимптотических КХД-эффектов БФКЛ на CMS».

20 января. Теоретический семинар по ФКС. *А. В. Сыромятников.* «Кластерное представление спиновых операторов 1/2 для изучения экзотических фаз и спиновой динамики в магнетиках. Часть 4. Антиферромагнетик Гейзенберга на квадратной решетке в сильном магнитном поле».

25 января. Ядерный семинар ОФВЭ. *Д. Е. Соснов.* «MK-генераторы событий для дифракционных адронных и ядерных соударений при высоких энергиях EPOS–LHC, QGSYET II и PYTHIA».

27 января. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ. *Ю. Л. Докшицер.* «Как кварки продираются сквозь холодное ядро и горячую кварк-глюонную среду. Пол-ответа».

1 февраля. Ядерный семинар ОФВЭ. *К. А. Ившин.* «Разделение тройной (H2, D2, HD) смеси изотопов водорода в рамках эксперимента по D^3He-мезокаталитическому синтезу».

3 февраля. Теоретический семинар по ФКС. *А. В. Сыромятников.* «Кластерное представление спиновых операторов 1/2 для изучения экзотических фаз и спиновой динамики в магнетиках. Часть 5. Антиферромагнетик Гейзенберга на треугольной решетке в магнитном поле».

10 февраля. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ. *Д. С. Горбунов* (Институт ядерных исследований РАН). «Легкие стерильные нейтрино».

15 февраля. Ядерный семинар ОФВЭ. *В. В. Чуликов.* «Изучение функций перехода в протон-протонных взаимодействиях».

22 февраля. Ядерный семинар ОФВЭ. *Д. В. Федоров.* «Эксперименты на установке ISOLDE (CERN)».

24 февраля. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ. *Д. С. Горбунов* (Институт ядерных исследований РАН). «Проблемы с описанием космологических данных в Lambda–CDM».

1 марта. Ядерный семинар ОФВЭ. *А. Е. Шевель.* «Искусственный разум и возвышение искусственных нейронных сетей».

3 марта. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ. *М. Г. Козлов.* «Поиск вариации фундаментальных постоянных на больших красных смещениях».

15 марта. Ядерный семинар ОФВЭ. *М. Е. Взнуздаев.* «Измерение зарядового радиуса протона. Эксперименты PRES и AMBER. Технические особенности и статус».

22 марта. Ядерный семинар ОФВЭ. *В. В. Лукашевич.* «Нарушение *CP*-инвариантности в трансмиссии нейтронов».

24 марта. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ. *Ф. Ф. Карпешин* (Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева). «Встряска как определяющий механизм двойного безнейтринного *e*-захвата».

29 марта. Ядерный семинар ОФВЭ. *О. В. Миклухо.* «Наблюдение структуры в высокоимпульсных спектрах вторичных протонов в инклюзивном рассеянии $^{12}C(p, p')X$ под углами 21 и 24,5° при энергии 1 ГэВ (импульсные интервалы s4 и s5)».

31 марта. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ. *А. П. Серебров.* «Стерильное нейтрино и темная материя».

5 апреля. Ядерный семинар ОФВЭ. *С. И. Манаенков.* «Роль ферми-статистики в глауберовских амплитудах рассеяния».

7 апреля. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ. *М. И. Стрикман.* «Короткодействующие нуклонные корреляции и EMC-эффект».

12 апреля. Ядерный семинар ОФВЭ. *О. Е. Маев.* «Новый детектор LHCb после модернизации. Статус и перспективы».

14 апреля. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ. *М. Г. Рыскин.* «Динамика дифракционной диссоциации в адронных процессах».

19 апреля. Ядерный семинар ОФВЭ. *А. Н. Соловьев.* «Источники поляризованных атомов и ионов дейтерия в эксперименте PolFusion».

21 апреля. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ. *В. А. Хозе.* «Исследование *t*-кварков – одна из центральных задач физики элементарных частиц при высоких энергиях».

26 апреля. Ядерный семинар ОФВЭ. *Д. В. Новинский.* «Измерение асимметрии и поляризации λ-гиперона в эксперименте СПАСЧАРМ (НИЦ «Курчатовский институт» – ИВФЭ)».

27 апреля. Теоретический семинар ОПР. *И. А. Митропольский.* «Систематика ядерных радиусов на основе искусственных нейронных сетей с нечеткой логикой».

28 апреля. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ. *М. Г. Рыскин.* «КХД-инстантон в дифракционных событиях».

12 мая. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ. *Ю. Л. Докшицер.* «КХД-50».

17 мая. Ядерный семинар ОФВЭ. *В. А. Орешкин.* «Недавние результаты по обмену цветовыми синглетами в *pp*-соударениях на БАК».

19 мая. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ. *А. В. Шуваев.* «Производящая функция для амплитуд ядерного рассеяния в теории Глаубера».

24 мая. Ядерный семинар ОФВЭ. *Т. А. Штам.* «Применение препаратов бора для повышения эффективности лучевой терапии».

26 мая. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ. *В. А. Хозе.* «Кулоновские пороговые эффекты при рождении пары *WW* и перспективы прецизионного измерения массы *W*-бозона».

31 мая. Ядерный семинар ОФВЭ. *Н. А. Бурмасов.* «Поиск новой физики в ультрапериферических столкновениях на Большом адронном коллайдере».

7 июня. Ядерный семинар ОФВЭ. *В. А. Гузей.* «Вклад ультрапериферических столкновений в распределение по щели в быстроте в протон-ядерных столкновениях на БАК».

14 июня. Ядерный семинар ОФВЭ. *Тан Найнг Со* (Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН). «Облученные космическими лучами метеоритные оливины как инструмент поиска сверхтяжелых элементов в природе (по материалам докторской диссертации)».

16 июня. Теоретический семинар по ФКС. *В. Т. Тимофеев.* «Динамика скирмионных кристаллов в подходе стереографической проекции».

16 июня. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ. *Ю. Л. Докшицер.* «КХД-струи (что, как и почему)».

21 июня. Ядерный семинар ОФВЭ. *И. Б. Смирнов.* «Алгебраические методы реконструкции координат в катодных стриповых камерах».

28 июня. Ядерный семинар ОФВЭ. *А. А. Дзюба.* «Проверка лептонной универсальности в распадах прелестных частиц».

30 июня. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ. *В. В. Федоров.* «Динамическая дифракция нейтронов. Усиленный эффект Штерна – Герлаха для нейтрона в кристалле».

20 сентября. Ядерный семинар ОФВЭ. *Х. У. Абраамян* (Объединенный институт ядерных исследований). «Наблюдение структур в спектрах инвариантных масс пар фотонов при ~ 17 и ~ 38 МэВ/c^2».

22 сентября. Общеинститутский семинар. *Л. В. Григоренко* (Объединенный институт ядерных исследований). «Исследования экзотических ядер на установке ACCULINNA-2. Перспективы ядерной физики низких энергий в РФ».

27 сентября. Ядерный семинар ОФВЭ. *А. Н. Никитенко* (НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ). «Поиски дополнительных бозонов Хиггса на Большом адронном коллайдере».

29 сентября. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ. *Н. Н. Николаев* (Институт теоретической физики им. Л. Д. Ландау РАН). «Спин частиц в накопителях (COSY, PTR, NICA) как детектор аксионов».

6 октября. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ. *Ю. Г. Нарышкин.* «Поиск темной материи в экспериментах DAMA/LIBRA и COSINE-100».

11 октября. Ядерный семинар ОФВЭ. *В. В. Абрамов* (НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ). «Поляризационные явления при высоких энергиях».

13 октября. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ. *Ю. Л. Докшицер.* «Адроны и высокие энергии (часть 1)».

18 октября. Ядерный семинар ОФВЭ. *Е. В. Кузнецова.* «Трековые детекторы на основе тонкостенных дрейфовых трубок».

19 октября. Семинар ОПР. *А. М. Альтмарк* (Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)). «Кильватерное ускорение протонов».

25 октября. Ядерный семинар ОФВЭ. *Д. Д. Шапиро.* «Экспериментальный поиск новых типов межнуклонных взаимодействий, выходящих за рамки Стандартной модели, с помощью нейтронного рассеяния».

26 октября. Семинар ОПР. *А. А. Захаров.* «Криосферные исследования в Антарктиде».

27 октября. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ. *Ю. Л. Докшицер.* «Адроны и высокие энергии (часть 2)».

1 ноября. Ядерный семинар ОФВЭ. *Л. К. Гладилин* (Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцына Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова). «Изучение *B*-физики в эксперименте ATLAS на LHC».

3 ноября. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ. *М. Г. Рыскин.* «Скрытые проблемы в партонных анализах».

8 ноября. Ядерный семинар ОФВЭ. *А. Т. Дьяченко.* «Развитие неравновесного гидродинамического подхода при описании эмиссии высокоэнергетических частиц в столкновениях тяжелых ионов промежуточных энергий (от столкновений солитонов к образованию темной материи)».

10 ноября. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ. *Ю. Л. Докшицер.* «Адроны и высокие энергии (часть 3)».

15 ноября. Ядерный семинар ОФВЭ. *С. И. Степанов.* «Исследование величины и механизма образования заряда атмосферного плазмоида».

16 ноября. Семинар ОПР. *Айдемир Тимур* (Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)). «Композиты на основе наночастиц FeCo: получение, структура и свойства (по материалам кандидатской диссертации)».

17 ноября. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ. *М. Г. Рыскин.* «Загадочная аномалия в поведении обобщенной электрической поляризуемости протона».

22 ноября. Ядерный семинар ОФВЭ. *Ю. М. Иванов.* «Эксперимент по расщеплению протонного пучка изогнутым кристаллом на синхроциклотроне ПИЯФ».

24 ноября. Общеинститутский семинар. *С. В. Григорьев.* «Экспериментальное доказательство логарифмической фрактальной структуры лиственных деревьев».

24 ноября. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ. *Ю. Л. Докшицер.* «Адроны и высокие энергии (часть 4)».

29 ноября. Ядерный семинар ОФВЭ. *В. Г. Королев.* «Нематериальная основа жизни».

1 декабря. Теоретический семинар по ФКС. *Д. А. Давлетбаева* (Санкт-Петербургский государственный университет). «Исследование поведения вязкости вблизи точки фазового перехода в сверхтекучее состояние». *Д. А. Евдокимов* (Санкт-Петербургский государственный университет). «Редукция диаграмм Фейнмана в стохастической модели турбулентности в пространствах высокой размерности». *А. В. Треногин* (Санкт-Петербургский государственный университет). «Развитие методов расчетов многопетлевых диаграмм в динамических теориях».

1 декабря. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ. *И. И. Страковский* (Университет Джорджа Вашингтона, США). «Экспериментальная проверка предсказанного в пертурбативной КХД скейлингового поведения жестких эксклюзивных процессов на примере фоторождения легких мезонов».

6 декабря. Ядерный семинар ОФВЭ. *А. В. Андреянов.* «Изучение поляризованного *dd*-синтеза в эксперименте PolFusion. Мотивация эксперимента и методика анализа экспериментальных данных».

8 декабря. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ. *Ю. Л. Докшицер.* «Адроны и высокие энергии (часть 5)».

15 декабря. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ. *Ю. Л. Докшицер.* «Адроны и высокие энергии (часть 6)».

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 2022 г. при участии Института было организовано более 15 мероприятий (совещаний, конференций и школ).

**Научные мероприятия, проведенные в 2022 г.
в целях повышения квалификации молодых ученых**

Наименование мероприятия	Дата проведения	Место проведения	Количество участников
Совещание по неупругому рассеянию нейтронов «Спектрина-2022»	21–23 июня	НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ (Гатчина)	> 40
8-я Международная конференция и 14-я Международная школа молодых ученых и специалистов им. А. А. Курдюмова «Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами»	3–9 июля	пос. Крестцы Новгородской обл.	~ 100
II Летняя школа Совета молодых ученых и специалистов НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ	26–28 августа	д. Скамья Сланцевского р-на Ленинградской обл.	50
V Школа «Нейтронные исследования конденсированного состояния» («НИКОНС-2022»)	24–28 октября	Санкт-Петербургский государственный университет (Санкт-Петербург)	> 50
IX Всероссийский с международным участием молодежный научный форум Open Science 2022	16–18 ноября	НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ (Гатчина)	> 220
VII Молодежная школа реактора ПИК (Профессионализм. Интеллект. Карьера. «ПИК-2022»)	19–30 сентября	НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ (Гатчина)	40
XI Школа по физике поляризованных нейтронов «ФПН-2022»	14–15 декабря	НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ (Гатчина)	> 50

Также в течение 2022 г. сотрудники Института участвовали в работе более 185 международных и российских конференций, было сделано около 470 докладов.

Новости науки





18 мая 2022 г. на базе НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ прошло совместное заседание коллегий Министерства образования и Государственного комитета по науке и технологиям Республики Беларусь, Министерства науки и высшего образования и Министерства просвещения Российской Федерации. На мероприятии обсудили перспективы формирования единого научно-технологического и образовательного пространства Союзного государства и совместный план реализации молодежной политики.

Российские и белорусские научные организации совместно проводят исследования в различных сферах, включая биомедицину, наносистемы, ядерную энергетику, а также в транспортной и космической отрасли.

Президент НИЦ «Курчатовский институт» Михаил Ковальчук отметил, что сближение российской и белорусской науки является важным проектом для встраивания бывших советских республик в единую исследовательскую инфраструктуру. Он добавил, что этот опыт переводит совместное наследие в сфере науки на качественно новый уровень.

«Россию и Белоруссию всегда связывали тесные взаимоотношения. Связи в науке, и в том числе в сфере меганауки, поддерживались весьма интенсивно. Особенно плодотворными были контакты между университетами. Но сегодня, с моей точки зрения, наша совместная деятельность в науке приобрела новое дыхание», – отметил Михаил Ковальчук.



25–29 июля 2022 г. в пос. Большие Коты на Байкале состоялась школа-конференция «Современные проблемы химической физики и теоретической химии», организованная совместными усилиями Иркутского государственного университета и НИЦ Курчатовский институт» – ПИЯФ. В ней приняли участие 45 докладчиков из Санкт-Петербурга, Москвы, Нижнего Новгорода и Иркутска.

Первая рабочая сессия открылась серией докладов, посвященных разработке новых материалов на основе нанотрубок и фуллеренов. Молекулы фуллеренов представляют собой выпуклые замкнутые многогранники, образованные 20 и более атомами углерода (наиболее известными являются C_{60} и C_{70}).

Значительная часть представленных докладов была связана с изучением атомов и соединений тяжелых и сверхтяжелых элементов, которые представляют серьезную трудность для теории, прежде

всего в связи с необходимостью учитывать релятивистские эффекты. Представлены результаты исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ в области разработки как оригинальных расчетных подходов, так и в области их последовательного применения для прецизионного описания электронной плотности лантаноидов и трансурановых элементов. Оживленное обсуждение вызвали доклады, посвященные поиску возможных нарушений *P*, *T*-четности, описывающих симметрию пространства и времени. Доклад, с которого началось это обсуждение, носил знаковое название «Поиск новой физики на молекулах».



Ученые НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ приняли участие в Международной конференции по нейтронному рассеянию ICNS-2022, которая проходила с 21 по 25 августа в Буэнос-Айресе (Аргентина). ICNS является крупнейшим мировым форумом для ученых, практикующих рассеяние нейтронов на исследовательских источниках мегакласса. Конференция ICNS проводится раз в четыре года. Она привлекает к себе ученых практически со всего света: Австралии, Северной и Южной Америк, Европы и Азии.

ICNS-2022 стала крупнейшей международной платформой для обмена последними яркими достижениями в области науки о рассеянии нейтронов, включая широкий круг тем, а именно: науки о мягкой материи, биологию и биотехнологию, физику конденсированного состояния, магнетизм и сверхпроводимость, химию твердого тела, энергетику, науки о конструкционных и функциональных материалах, нейтронную физику и, наконец, нейтронные установки и нейтронные источники.

Это была первая крупная нейтронная конференция в постковидное время. Она прошла в гибридном формате с 360 участниками в режиме онлайн и 190 учеными, которые прибыли в Буэнос-Айрес для того, чтобы принять непосредственное участие в дискуссиях на полях этого форума. Россию представляли около 20 ученых из нейтронных центров Санкт-Петербурга, Дубны, Екатеринбурга. Работниками НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ было представлено более 20 устных и стендовых докладов, из них о достижениях в области создания новых станций на реакторе ПИК – семь докладов, четыре доклада связаны с науками о жизни и три доклада – об изучении магнитных материалов.



Специалисты НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ приняли участие в педагогическом акселераторе. 26–27 августа 2022 г. на базе загородного центра детско-юношеского творчества «Зеркальный» прошел «Педагогический акселератор 2022–2023» – выездной семинар руководителей общеобразовательных организаций – получателей грантов правительства Санкт-Петербурга на оснащение общеобразовательных организаций современными средствами обучения. Организаторами семинара выступили Комитет по образованию правительства Санкт-Петербурга, Академия постдипломного педагогического образования и Центр регионального и международного сотрудничества.

С 2021 г. в Санкт-Петербурге государственным общеобразовательным организациям предоставляется грантовая поддержка на оснащение современными средствами обучения и воспитания в целях повышения качества общего образования. Благодаря этому в 95 общеобразовательных организациях Санкт-Петербурга, которые являются получателями грантов в 2021 и 2022 гг., создаются

предпрофессиональные классы по следующим направлениям: «Инженерный класс», «ИТ-класс», «Гуманитарно-технологический класс», «Химико-биологический класс», «Медицинский класс», «Педагогический класс», «Кадетский класс» и «Медиакласс». С сентября 2022 г. в пяти общеобразовательных организациях Санкт-Петербурга будут открыты предпрофессиональные классы по направлению «Курчатовский класс». НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ будет выступать научным партнером для организаций, в которых образуются предпрофессиональные классы по направлению «Курчатовский класс». В предпрофессиональных классах осуществляется интеграция общего и дополнительного образования, ориентирующего школьников на профессиональный выбор дальнейшего образовательного маршрута.



26–28 августа 2022 г. состоялось выездное мероприятие – II Летняя школа Совета молодых ученых и специалистов НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ. Мероприятие постепенно приобретает статус ежегодного, что открывает руководителям возможность поощрения молодых работников, активно проявивших себя в профессиональной и общественной жизни Института в течение года.

Открытие Школы началось с организованной участниками Совета молодых ученых и специалистов (СМУС) деловой игры «Повышение личностной эффективности». Программа Школы состояла из нескольких блоков: «Актуальные темы и проекты НИЦ „Курчатовский институт" – ПИЯФ», «Молодежная политика в НИЦ „Курчатовский институт" – ПИЯФ» и «Экология в НИЦ „Курчатовский институт" – ПИЯФ».

В рамках обсуждения молодежной политики в Институте провели диалог с участниками Школы председатель СМУС Н. А. Петрова на тему «Что такое молодежная политика и пути ее развития в НИЦ „Курчатовский институт" – ПИЯФ» и начальник Центра по подготовке персонала С. А. Шека на тему «Возможности карьерного роста молодых работников Института, или Как бесплатно повысить свою квалификацию». После блока лекций был организован круглый стол, на котором состоялось обсуждение методов нематериальной мотивации молодых ученых и специалистов. Результаты обсуждений организаторы Школы планируют довести до руководства Института.



С 19 по 30 сентября на базе Центра по подготовке персонала (ЦПП) НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ проходила VII Молодежная школа реактора ПИК (Профессионализм. Интеллект. Карьера. «ПИК-2022»).

Программа Школы была насыщенной и разнообразной. Организаторы поставили своей целью включить в нее не только практические профессиональные знания, но и занятия, направленные на развитие личностных навыков.

Всю первую неделю обучения перед участниками с серией вебинаров выступали коллеги из Екатеринбурга. На протяжении пяти дней «школьники» изучали основы тайм-менеджмента, эмоционального интеллекта, принципы коммуникации, самопрезентации и обратной связи, учились профилактике профессионального выгорания. Каждая лекция завершалась небольшими практическими заданиями. В результате была сформирована рейтинговая система, на основе которой были выявлены и награждены ценными призами самые активные и старательные участники.

Вторая неделя прошла в традиционном формате: участники слушали лекции приглашенных преподавателей, посвященные культуре безопасности на объектах использования атомной энергии. Эта важная и актуальная тема вызвала много уточняющих вопросов к лекторам и неофициальных дискуссий среди участников Школы, многие из которых работают непосредственно с источниками ионизирующего излучения.

В последний день Молодежной школы участники прошли тестирование по пройденному материалу, получили сертификаты и сфотографировались на память.



НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ стал еще одной площадкой работы 35-го Совета Международной ассоциации академий наук, заседание которого взяло старт в Москве еще 26 сентября.

Участники Совета 29 сентября посетили с экскурсией реакторный комплекс ПИК и биологический комплекс НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, где познакомились с передовыми достижениями российских ученых в области ядерной физики и биофизики.

30 сентября на базе НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ прошло 1-е заседание Общественного совета базовой организации государств – участников СНГ по развитию исследовательской инфраструктуры класса «мегасайенс». В нем приняли участие около 40 человек, в т. ч. руководители ведущих вузов и исследовательских институтов России, Армении, Беларуси, Казахстана, Киргизии, Таджикистана. Председателем заседания выступил президент Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» Михаил Ковальчук.

Участники заседания обсудили возможности научных организаций государств – участников СНГ в области исследовательской инфраструктуры класса «мегасайенс». Это установки для синхротронных и нейтронных исследований, исследовательские реакторы, высокопроизводительные вычислительные комплексы – все, что обеспечивает создание самого современного и готового к новым вызовам научного ландшафта на постсоветской территории.



С 24 по 28 октября 2022 г. НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ совместно с Санкт-Петербургским государственным университетом (СПбГУ) организовали и провели V Школу «Нейтронные исследования конденсированного состояния» («НИКОНС-2022»). Школа проходила очно на кафедре ядерно-физических методов исследования СПбГУ (Петергоф), при этом все лекции и семинарские занятия транслировались в режиме онлайн на широкую аудиторию интернета.

Школа «НИКОНС» проводится уже пятый год и призвана обеспечить знакомство широкого круга научной молодежи с методиками рассеяния нейтронов в исследованиях физики и конденсированного состояния. Аудитория школы – студенты магистратуры естественных факультетов, аспиранты и молодые специалисты, которые уже ведут экспериментальные исследования в области конденсированного состояния, но еще не знакомы с методами нейтронного рассеяния. СПбГУ пригласил на Школу «НИКОНС-2022» коллег из Института физики металлов УрО РАН (Екатеринбург) для повышения квалификации и расширения кругозора молодых сотрудников, задействованных в разработке

концепции и проектировании нейтронных станций компактного источника нейтронов импульсного типа DARIA. Всего на Школу зарегистрировались 49 участников, из них 16 студентов и 27 молодых ученых.



В период осенних каникул, с 28 октября по 3 ноября, для учащихся семи петербургских школ впервые прошла профильная научная смена «Коды Курчатова». В течение недели 125 старшеклассников из общеобразовательных организаций Санкт-Петербурга, в которых в партнерстве с НИЦ «Курчатовский институт» создаются предпрофессиональные классы по направлению «Курчатовский класс», слушали лекции, выполняли практические задания, участвовали в мастер-классах и круглых столах.

Профильная смена «Коды Курчатова» проведена в рамках соглашения о сотрудничестве между правительством Санкт-Петербурга и НИЦ «Курчатовский институт». Занятия для ребят проводили работники НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ и НИЦ «Курчатовский институт».



В НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ с 16 по 18 ноября прошел IX Всероссийский с международным участием молодежный научный форум Open Science 2022. Всего в этом году в форуме приняли участие более 220 человек из разных уголков России.

Главное преимущество форума Open Science – возможность познакомиться с новыми актуальными направлениями, технологиями, а также представить результаты своей работы научной общественности. За девять лет существования форум набрал обороты и превратился в мощную площадку для обмена опытом среди молодых ученых.

Основными направлениями форума в 2022 г. стали физика атомного ядра и частиц, теоретическая физика, физика конденсированного состояния, физика и техника реакторов и ускорителей, биофизика, биомедицина, генетика, материаловедение и наноструктурированные материалы. Отдельным событием форума можно выделить микросимпозиум Курчатовского геномного центра – ПИЯФ «Биоинформатика, биоинженерия, генетические технологии».

17 ноября состоялось торжественное награждение победителя второго конкурса видеороликов Science Talk («Свободно о науке – 2022») – ученика 11-го класса СОШ № 9 Гатчины Магеррамова Самира.

На конкурс Самир представил видеоролик о процессе своей работы над книгой об оседлых птицах Ленинградской области. Стоит отметить, что сама книга – настоящий шедевр прикладного творчества и каллиграфии, созданный на основе собранных юным автором уникальных сведений о жизни зимующих птиц Ленинградской области. Работа над этим проектом, по словам автора, заняла целых 11 месяцев. Самир – единственный, кто без нареканий и с первого раза выполнил все конкурсные требования. Кроме того, на решение жюри повлиял тот факт, что тема работы Самира отвечает экологической тематике, которую развивает и продвигает НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ.

В прошлом году Самир уже становился призером конкурса Science Talk. Тогда он занял третье место с работой «Книга о лекарственных растениях Ленинградской области», а в этом году сумел улучшить свой результат.

Ценный приз за победу в конкурсе Самир получил из рук директора НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ С. Е. Горчакова. Награждая победителя, директор поздравил его с победой, отметил высокое качество проделанной работы, похвалил за упорство и выразил уверенность, что следующая награда будет более высокого уровня.





В активную фазу вошел проект, реализуемый научно-образовательным центром НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ в рамках соглашений о сотрудничестве с образовательными центрами «Точка роста», созданными в сельских школах Гатчинского муниципального района в рамках реализации национального проекта «Образование». 23 ноября 2022 г. состоялось подписание соглашений, в которых Институт официально выступает в качестве социального партнера школ в проекте и будет расширять проведение лекционной, экскурсионной и практической работы с учащимися, обеспечивать научное сопровождение центров, а также принимать участие в тематических сменах «Инженерный лагерь». Одной из основных целей сетевого проекта является повышение образовательного потенциала обучающихся по программам естественно-научной направленности.

13 декабря 2022 г. на базе «Точки роста» Пудостьской СОШ прошла первая лекция «Перспективы современной биологии» Андрея Юрьевича Черненкова, начальника управления образования, кандидата биологических наук. В формате видеоконференции лекцию прослушали обучающиеся всех центров «Точка роста» Гатчинского муниципального района, а также сетевых школ этих центров. В общей сложности в лекции приняли участие 350 гатчинских школьников 8–11-х классов.

В период с 1 по 3 декабря в Парке науки и искусства «Сириус» прошел II Конгресс молодых ученых. В основе этого масштабного мероприятия, которое уже назвали ключевым событием 2022 г. в рамках Десятилетия науки и технологий, лежат задачи популяризации науки, привлечения молодых ученых в сферу исследований и разработок, а также использования науки для решения важных задач государства. Участниками форума стали молодые ученые из различных регионов России, руководители научных организаций, представители органов власти, ректоры ведущих вузов и представители бизнеса. Среди них – работники НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ. Мероприятие собрало более 3 000 участников из России и нескольких десятков других стран, создав тем самым уникальную атмосферу для общения, обмена идеями, трендами и опытом.



Форум встретил участников насыщенной программой: экспертные сессии, панельные дискуссии, круглые столы, научные доклады и лекции. В рамках деловой программы одновременно шли мероприятия по более чем 10 тематикам. Ключевыми темами для обсуждения стали климат, природоподобные технологии, развитие инженерного и математического образования, сохранение продовольственной безопасности, обеспечение пассажирского авиасообщения, поддержка молодых ученых, искусственный интеллект, электроника, развитие Арктики, Сибири и Дальнего Востока, медицина.

НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ также представил на выставочном стенде конгресса некоторые из своих лучших экспериментальных разработок – оптическую секцию нейтроноводной системы реакторного комплекса ПИК, а также экспериментальные узлы тестового нейтронного рефлектометра THR.

В последний день проведения конгресса произошло событие, ставшее еще одним поводом для гордости за НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ. В рамках деловой программы старшему научному сотруднику лаборатории квантовой химии Леониду Скрипникову в торжественной обстановке было вручено удостоверение и фрачной знак премии Президента Российской Федерации в области науки и инноваций для молодых ученых за 2021 г. Награды вручал помощник президента Российской Федерации Андрей Александрович Фурсенко.



В НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ прошла традиционная итоговая конференция по программе «Школьная экологическая инициатива» – «Молодые таланты – 2022».

После перерыва, связанного с антиковидными ограничениями, конференция вернулась в свой привычный очный формат: около 260 детей от пяти лет и старше из разных образовательных учреждений Гатчины, Гатчинского района и Санкт-Петербурга заполнили конференц-зал Института своим смехом и замечательными концертными номерами. Все они – лауреаты и победители второго этапа художественного и литературного конкурсов «Школьной экологической инициативы», т. е. самые что ни на есть герои праздника – юные художники и писатели, любящие и берегущие свою планету. В зале также присутствовали старшие друзья экологического движения – депутаты, представители общественности, администрацию Гатчинского муниципального района представлял заместитель главы администрации по развитию социальной сферы М. В. Кравчук.



XI Школа по физике поляризованных нейтронов «ФПН-2022» прошла в стенах НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ 14 и 15 декабря 2022 г. Тематика Школы ФПН этого года охватывала такие области физики, как актуальные задачи для физики поляризованных нейтронов, техника поляризованных нейтронов, малоугловое рассеяние, рефлектометрия, дифракция поляризованных нейтронов, а также установки нейтронного рассеяния. В Школе приняли участие около 60 ученых из НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, Института физики металлов им. М. Н. Михеева УрО РАН, Объединенного института ядерных исследований, Санкт-Петербургского государственного университета и других ведущих институтов.

По материалам пресс-центра Института

Основные результаты научной деятельности
2022

Оформление обложки *Т. А. Парфеевой*
Корректоры *Н. В. Силинская, Е. С. Степовая, 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. 293, тир. 50, уч.-изд. л. 11,8; 26.07.2023.