



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



## Основные результаты научной деятельности

2021



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



# Основные результаты научной деятельности 2021

Гатчина • 2022



**Научные редакторы:**

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

**Составители:**

|                |                |
|----------------|----------------|
| Д. Н. Аристов  | В. В. Саранцев |
| С. И. Воробьев | М. В. Суясова  |
| Н. Н. Губанова | А. В. Титов    |
| А. Л. Коневега | О. Л. Федин    |
| А. И. Курбаков | С. Р. Фридман  |
| Р. А. Ниязов   | К. А. Шабалин  |

**Ответственный за выпуск**

С. И. Воробьев

**Основные результаты научной деятельности – 2021.** –  
Гатчина Ленинградской обл.: Издательство  
НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, 2022. – 135 с.

Данное издание представляет собой сборник кратких описаний наиболее существенных результатов научных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ за 2021 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.

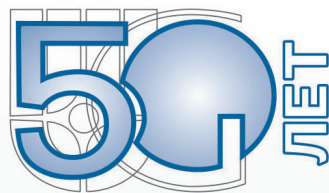
ISBN 978-5-86763-473-5

© НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, 2022

# Оглавление

- 7 Введение
- 11 Научные отделения
- 31 Теоретическая и математическая физика
- 45 Исследования с использованием нейтронов, фотонов и мюонов
- 55 Исследования с использованием протонов и ионов. Физика нейтрино
- 73 Биологические исследования
- 89 Ядерная медицина (производство изотопов, лучевая терапия, био- и нанотехнологии для медицины)
- 93 Физика ядерных реакторов и ускорителей
- 99 Прикладные исследования и разработки
- 111 Базовые установки
- 117 Научно-организационная деятельность





**НА ПИКЕ НАУКИ**



*Уважаемые коллеги, дорогие друзья!*

НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, отметивший в 2021 г. 50-летний юбилей со дня преобразования в самостоятельное научное учреждение, – 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.

Юбилейный год для НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ стал знаковым для всей российской науки. 8 февраля 2021 г. в рамках заседания Совета при Президенте Российской Федерации по науке и образованию при непосредственном участии Президента Российской Федерации В. В. Путина состоялся вывод реактора ПИК на энергетический режим работы, начались тестовые эксперименты на введенных в эксплуатацию первых пяти исследовательских станциях.

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





КОРНЕИ ПАВЛОВИЧ  
КОСТАТИНОВ



## Введение

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, Институт), отметивший в 2021 г. 50-летний юбилей со дня получения статуса самостоятельного научного учреждения, – 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 2021 г. в стенах Института трудилось 2 070 человек, из них 507 – научные сотрудники, 76 докторов наук и 256 кандидатов наук. Один сотрудник является членом-корреспондентом 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, построенный в 1970 г., отработал в 2021 г. 1 657 ч: опять оказывала влияние пандемия, связанная с распространением новой коронавирусной инфекции (COVID-19). Выполнялись работы по созданию на изохронном циклотроне Ц-80 офтальмологического тракта, имеющего энергию выведенного протонного пучка в диапазоне 40–80 МэВ, для планируемого в будущем исследовательского онкоофтальмологического комплекса протонной лучевой терапии; осуществлены моделирование и оптимизация тракта транспортировки пучков переменной энергии на Ц-80 для испытаний электронно-компонентной базы; проводились работы в рамках Курчатовского геонного центра.

В 2021 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. Одно из наиболее значимых событий Года науки и технологий в России – вывод нейтронного реактора ПИК на энергетический режим работы и начало тестовых экспериментов на введенных в эксплуатацию в 2020 г. в рамках выполнения Указа Президента РФ № 356 от 25.06.2019 пяти экспериментальных станциях в зале горизонтальных экспериментальных каналов РК ПИК: рефлектометре поляризованных нейтронов NERO-2; тестовом нейтронном рефлектометре ТНР; тестовом нейтронном спектрометре «Т-Спектр»; текстурном нейтронном дифрактометре ТЕХ-3; дифрактометре поляризованных нейтронов ДПН, – которые обеспечивают реали-





зацию базового набора нейтронных методик: дифрактометрию, рефлектометрию и спектрометрию.

2021 год хоть и прошел в режиме ограничений массовых мероприятий, но все же был насыщен событиями научной и общественной жизни, проведенными как в очной, так и в дистанционной форме. Институт организовал 14 общественно значимых мероприятий (совещания, конференции и школы), среди которых можно отметить: Рабочее совещание «Дифракция нейтронов – 2021», 7-ю Международную конференцию и 14-ю Международную школу молодых ученых и специалистов им. А. А. Курдюмова «Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами», I Летнюю школу Совета молодых ученых и специалистов НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, VI Международное совещание «Взаимодействие Дзюлошинского – Мория и экзотические спиновые структуры» (DMI-2021), V Всероссийскую конференцию «Фундаментальная гликобиология», VIII Всероссийский с международным участием молодежный научный форум Open Science 2021, VI Молодежную школу РК ПИК (Профессионализм. Интеллект. Карьера. «ПИК-2021») и др.

В 2021 г. состоялся первый выпуск из аспирантуры Института после получения новой лицензии на образовательную деятельность. Всего было выдано семь дипломов об окончании аспирантуры, подтверждающих успешное завершение третьей ступени высшего образования по четырем направленностям подготовки: «Генетика», «Физика атомного ядра и элементарных

частиц», «Физика конденсированного состояния» и «Биофизика».

В 2021 г. на обучение по очной форме в аспирантуру было зачислено 10 человек: 3 человека по направлению подготовки 06.06.01 «Биологические науки» (направленность 03.02.07 «Генетика») и 7 человек по направлению подготовки 03.06.01 «Физика и астрономия» (направленности: 01.04.02 «Теоретическая физика», 01.04.07 «Физика конденсированного состояния», 01.04.16 «Физика атомного ядра и элементарных частиц», 03.01.02 «Биофизика»).

В лабораториях Института в 2021 г. выполняли учебно-исследовательские и научные работы, проходили практику, готовили выпускные квалификационные работы бакалавров и специалистов, а также магистерские диссертации более 170 студентов вузов страны.

Данное издание представляет собой сборник кратких описаний наиболее существенных и значимых результатов научных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, полученных в 2021 г. Это описание предваряют обзоры руководителей научных отделений основных направлений деятельности Института, также отражена структура отделений. Далее приведены аннотации работ, представление которых обсуждено и рекомендовано учеными советами отделений. Помимо аннотации, для каждого результата в сборнике приведены ссылки на статьи ведущих отечественных и зарубежных изданий, в которых работа описана детально и где можно ознакомиться с ее полным содержанием.

Результаты работ сотрудников НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ опубликованы в 650 статьях, из них 446 публикаций проиндексированы в базе данных Web of Science, также представлено около 420 докладов на более чем 150 международных и российских конференциях.

В заключительном разделе дана общая информация об Институте.



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



**Физика высоких энергий**

**Молекулярная и радиационная биофизика**

**Перспективные разработки**

**Теоретическая физика**

**Нейтронные исследования**



## Научные отделения

- 12** Отделение теоретической физики
- 14** Отделение нейтронных исследований
- 18** Отделение физики высоких энергий
- 21** Отделение молекулярной и радиационной биофизики
- 26** Отделение перспективных разработок



## Отделение теоретической физики

Отделение теоретической физики (ОТФ), руководитель – д. ф.-м. н. Д. Н. Аристов, состоит из 7 секторов:

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

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

В ОТФ работают 50 научных сотрудников, из них 18 докторов наук и 22 кандидата 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 2021 г. был опубликован обзор, посвященный подходу обобщенных партонных распределений, – Generalized Parton Distribution (GPD), являющийся развитием метода амплитуды распределения для переходов (TDA) «барион – мезон». Новый метод GPD позволяет учесть класс жестких эксклюзивных реакций, для которых возможно описание в терминах коллинеарной факторизации квантовой хромодинамики (КХД). Предложен и согласован эксперимент в JLab Hall C в 2023 г. для проверки предсказаний нового метода.

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 2021 г. сотрудниками ОТФ был впервые вычислен непланарный вклад в аномальную размерность операторов твиста-2, что позволит проверить гипотезу за рамками лидирующего порядка.

Ранее было показано, что солитонная неабелева вихревая трубка (струна) в  $N = 2$  суперсимметричной КХД ведет себя как критическая суперструна. Причем состояния замкнутой суперструны, возникающие в четырех измерениях, идентифицируются с адронами такой суперсимметричной КХД. В работах 2021 г. для этой струны проверена солитонная калибровочно-струнная дуальность с AdS/CFT-соответствием. При вычислении корреляционных функций, нормируемых на  $SL(2, \mathbf{R})/U(1)$ -сигаре вертексных операторов, было продемонстрировано, что в ка-



налах с  $SL(2, \mathbf{R})$ -спином  $j < -1/2$  это соответствие работает, но в канале со спином  $j = -1/2$  дуальность теряется. Теоретический анализ будет продолжен.

Среди работ ОТФ в области теории конденсированного состояния можно отметить цикл статей, посвященный разработке микроскопической теории рамановского рассеяния на неупорядоченных массивах наночастиц неполярных кристаллов. Развитый подход позволяет не только описать положение и форму рамановского пика, но и с большой точностью извлечь из этого описания ряд важных параметров порошка. Методика успешно апробирована анализом большого массива экспериментальных данных.

Квантовые интерферометры, использующие эффект Ааронова – Бома, активно применяются для точного измерения магнитного поля. В последнее время в связи с технологическим

прогрессом активно обсуждается возможность использования топологических материалов в интерферометрах. В работах сотрудников ОТФ показано, что проходящие через такие интерферометры электроны приобретают спиновую поляризацию, величина которой может управляться магнитным потоком. Была также исследована возможность использования таких интерферометров для квантовых вычислений.

Сотрудниками ОТФ в течение 2021 г. опубликованы 53 исследовательские работы в рецензируемых журналах Web of Science и Scopus, представлены 26 докладов на международных и российских конференциях, прочитано 8 курсов лекций в Санкт-Петербургском государственном университете и Санкт-Петербургском национальном исследовательском Академическом университете им. Ж. И. Алферова РАН, 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 (заведующий – к. ф.-м. н. В. В. Рунов);
- физики кристаллов (заведующий – к. ф.-м. н. Ю. П. Черненко);
- исследования материалов (заведующий – д. ф.-м. н. А. И. Курбаков);
- нейтронных физико-химических исследований (заведующий – д. ф.-м. н. В. Т. Лебедев)

и группы электромагнитных свойств конденсированных сред (руководитель – к. ф.-м. н. О. В. Геращенко).

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

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

В ОНИ работают 104 научных сотрудника, из них 12 докторов наук и 52 кандидата 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).

При активном участии многих сотрудников ОНИ смонтированы на пучках нейтронов и введены в эксплуатацию первые пять исследовательских экспериментальных станций в зале го-



горизонтальных экспериментальных каналов реактора ПИК. Это рефлектометр поляризованных нейтронов NERO-2, тестовый нейтронный рефлектометр ТНР, тестовый нейтронный спектрометр «Т-Спектр», текстурный нейтронный дифрактометр ТХ-3 и дифрактометр поляризованных нейтронов (ДПН). Введенные в эксплуатацию экспериментальные станции обеспечивают реализацию базового набора нейтронных методик: дифрактометрию, рефлектометрию и спектрометрию.

Сейчас ученые и инженеры ОНИ разрабатывают новые физические установки для РК ПИК и уже начинают создавать их узлы. В области физики конденсированного состояния это порошковые дифрактометры D1 и D3; монокристалльные дифрактометры DC-1 и DIPOL; нейтронные спектрометры неупругого рассеяния IN1, IN2, IN3 и IN4; установки малоуглового рассеяния Tensor, Membrana, SANS-2 и SESANS. В области ядерной физики это источник ультрахолодных нейтронов (УХН), на котором будут располагаться гравитационная ловушка (GTRAP) и магнитная ловушка (MTRAP) для измерения времени жизни нейтрона, ЭДМ-спектрометр ( $n$ EDM), установка  $\beta$ -распада нейтрона, ЭДМ нейтрона кристалл-дифракционным методом (DEDM); установка «Нейтрино»; установка исследования множественности осколков деления (FISCO); спектрометр ядерных излучений (PROGRAS); установка нейтронно-активационного анализа (INAA), установка нейтронной радиографии.

2021 год был довольно успешным в научном плане. Научные группы, в которых ученые ОНИ были основными исполнителями, получили одну первую, одну вторую и две третьих премии на конкурсе лучших работ НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ. 2021 год оказался самым успешным за последние годы в плане защиты диссертаций. Сотрудники ОНИ защитили две докторские диссертации (В. Г. Зиновьев и Н. К. Плешанов – сейчас сотрудник Инжинирингового центра «Нейтронные технологии») и шесть кандидатских диссертаций (В. А. Лямкин, А. В. Чечкин, М. Х. Юзвюк, В. А. Матвеев, П. И. Коник, С. С. Лисин).

В 2021 г. коллаборация Vorexipo была удостоена престижной премии имени Джузеппе и Ванны Коккони Европейского физического общества

за выдающийся вклад в астрофизику элементарных частиц и космологию, а именно за новаторское наблюдение солнечных нейтрино из  $pp$ -цепочки и CNO-цикла. Среди 95 лауреатов несколько сотрудников ОНИ: А. В. Дербин, В. Н. Муратова, Д. А. Семенов, Е. В. Унжаков, И. С. Драчнев, Н. В. Ниязова, И. С. Ломская.

Стипендии DAAD (Германская служба академических обменов) получили восемь молодых сотрудников ОНИ.

За 2021 г. ученые ОНИ опубликовали 69 научных статей в журналах Web of Science и 1 книгу (В. В. Федоров «История и развитие физических представлений о строении окружающего мира»), в которой изложена история эволюции представлений о строении вещества от древних времен и до наших дней, затронуты задачи, решаемые в нейтронной физике, физике высоких энергий, вопросы ядерной и термоядерной энергетики.

Большим достижением ОНИ в нынешних непростых условиях была организация и проведение в 2021 г. шести научных школ и конференций.

В течение 2021 г. сотрудниками Отделения выполнялись работы в рамках 6 проектов РНФ и 10 проектов РФФИ, в которых руководителями были ученые из ОНИ.

В области исследований фундаментальных свойств материи в 2021 г. получены новые важные результаты. Поиск осцилляций реакторных антинейтрино на реакторе СМ-3 (Димитровград) позволяет определить параметры осцилляций нейтрино в стерильное состояние методом относительных измерений. Полученные на сегодняшний день результаты находят подтверждение при сравнении с результатами других экспериментов. В частности, совместный анализ экспериментов «Нейтрино-4» и BEST показывает достоверность обнаружения эффекта осцилляций нейтрино в стерильное состояние на уровне  $4,9\sigma$ . Достижение точности в рамках одного эксперимента до уровня  $5\sigma$  позволит говорить об обнаружении физики за рамками Стандартной модели (лаборатория физики нейтрона, зав. лаб. – д. ф.-м. н. А. П. Серебров).

В НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ продолжены измерения  $\beta$ -спектров ядер  $^{144}\text{Ce}$ – $^{144}\text{Pr}$  и  $^{210}\text{Bi}$  с  $\beta$ -спектрометрами на основе Si(Li)-детекторов. Бета-спектр  $^{144}\text{Pr}$  проанализирован

с целью поиска массивного нейтрино в интервале 0,01–2,6 МэВ. Результаты измерения  $\beta$ -спектра  $^{210}\text{Bi}$  с помощью созданного  $\beta$ -спектрометра по схеме «мишень – детектор» использовались коллаборациейorexino для выделения сигнала от CNO-нейтрино. Закончены измерения с детекторомorexino. Начат анализ полного набора данных для получения новых результатов по солнечным нейтрино, редким процессам и корреляциям с транзиентными источниками. Проведен анализ корреляций событий в детектореorexino с быстрыми радиовсплесками. Установлены новые ограничения на флюенс нейтрино всех флейвов, связанный с быстрыми радиовсплесками. Продолжен поиск временных корреляций сигналов детектораorexino и гравитационных волн, детектируемых детекторами LIGO, VIRGO, KAGRA. Продолжены работы в коллаборациях DarkSide и DEAP, ориентированных на поиск частиц темной материи. Получены новые данные по использованию SiPM для считывания сцинтилляционного сигнала, разделению изотопов Ar и чувствительности Ar-детектора к нейтрино от сверхновой звезды. Обработаны результаты эксперимента по поиску резонансного поглощения солнечных аксионов ядрами  $^{83}\text{Kr}$ , проводимого в Баксанской нейтринной обсерватории Института ядерных исследований РАН, которые позволили установить новые ограничения на константы связи и массу адронного аксиона (отдел полупроводниковых ядерных детекторов, рук. – д. ф.-м. н. А. В. Дербин).

Выполненные измерения сечения деления  $^{236}\text{U}(n, f)$  полностью перекрывают как диапазон энергий 1–20 МэВ (реакторный спектр), востребованный в современных ядерных технологиях и технологиях ближайшего будущего, так и наиболее трудную с экспериментальной точки зрения область 20–300 МэВ, критически важную для развития перспективных ADS-технологий (группа физики деления ядер, рук. – А. М. Гагарский).

Проведено исследование возможных систематических эффектов при измерении времени жизни нейтрона методом магнитного хранения УХН. Показано, что магнитное хранение УХН имеет огромное преимущество по сравнению с материальными ловушками. Наличие в магнитной ловушке на выпускном нейтроноводе магнит-

ного затвора, который прозрачен для деполаризованных нейтронов, позволяет проводить эксперименты по измерению времени жизни нейтрона с регистрацией всех возможных потерь УХН в процессе их хранения в ловушке (в режиме онлайн). Данная уникальная возможность отличает эти эксперименты от экспериментов с хранением УХН в материальных ловушках и позволяет принципиально исключить основные систематические эффекты, обусловленные потерями нейтронов при их хранении (лаборатория молекулярных и атомных пучков, зав. лаб. – к. ф.-м. н. В. Ф. Ежов).

В области физики конденсированного состояния с применением различных методов нейтронного рассеяния получены следующие наиболее важные результаты. По исследованию критических флуктуаций в  $\text{Mn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Si}/\text{Ge}$  сделан принципиальный для физики магнетизма в гелимагнетиках вывод, что два взаимодействия – ферромагнитный обмен и взаимодействие Дзялошинского – Мория – оказываются независимыми и их величиной можно по отдельности управлять, меняя концентрацию химических элементов в квазибинарных соединениях  $\text{Mn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Si}$  и  $\text{Mn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Ge}$  (лаборатория физики неупорядоченного состояния, зав. лаб. – к. ф.-м. н. В. В. Рунов, д. ф.-м. н. С. В. Григорьев).

Сравнительный анализ основного магнитного состояния в слоистых оксидах  $\text{A}_3\text{M}_2\text{SbO}_6$  с соотобразной сверхструктурой позволил описать механизмы формирования магнитных свойств и происхождения различных магнитных фазовых переходов в 2D-слоистых и фрустрированных соединениях. Качественные и количественные результаты работы могут быть использованы для теоретического обоснования общих механизмов и принципов формирования магнитного порядка в системах с пониженной размерностью и сильной фрустрацией обменных взаимодействий, а также поиска новых систем низкоразмерных магнетиков с уникальными квантовыми основными состояниями типа спиновой жидкости (лаборатория исследования материалов, зав. лаб. – д. ф.-м. н. А. И. Курбаков).

Исследования фазовых переходов и магнитной структуры в редкоземельных мультиферроиках-ферроборатах выявили решающую роль



одноионной анизотропии. Совместное использование нейтронного рассеяния и оптической спектроскопии высокого разрешения оказалось весьма продуктивным и дающим возможность решить сложную фундаментальную задачу – происхождение электрической поляризации в мультиферроиках-ферроборатах (лаборатория физики кристаллов, зав. лаб. – к. ф.-м. н. Ю. П. Черненко, д. ф.-м. н. И. В. Голосовский).

Выполнены исследования мультиферроика  $\text{Nd}_{0,8}\text{Tb}_{0,2}\text{Mn}_2\text{O}_5$  с использованием дифракции поляризованных нейтронов. Показано, что такая система обладает способностью порождать несколько магнитных фаз с подобными друг другу несоразмерными волновыми векторами. При низких температурах магнитное упорядочение имеет структуру в виде эллиптической спирали. Определены параметры эллиптичности. Разница в заселенности хиральных доменов может быть изменена приложением внешнего электрического поля в несколько киловольт на сантиметр, что свидетельствует о сильном магнитоэлектрическом взаимодействии (лаборатория физики кристаллов, зав. лаб. – к. ф.-м. н. Ю. П. Черненко, к. ф.-м. н. И. А. Зобкало).

Используя метод малоуглового рассеяния поляризованных нейтронов (SAPNS) впервые удалось оценить масштаб магнитных корреляций в материалах на основе восстановленного оксида графена (ВОГ). Полученный результат является уникальным, поскольку такую информацию невозможно получить другими методами. Эксперименты показали наличие малоуглового магнитно-ядерного интерференционного рассеяния как для нативного ВОГ, так и для композита на его основе в магнитных полях  $H$  порядка 1 Тл, что однозначно свидетельствует о наличии в изучаемых материалах намагниченных областей масштаба

1 000 Å (лаборатория физики неупорядоченного состояния, зав. лаб. – к. ф.-м. н. В. В. Рунов).

С помощью комплекса методов исследований определены структура и каталитические свойства тонких кремнеземных пленок, допированных наночастицами Pt и Pd, синтезированных с помощью золь-гель-метода. Установлено, что биметаллические наночастицы Pt-Pd размером 6–15 нм проявляют каталитическую активность, а наночастицы Pd размером около 6 нм реагируют на присутствие водорода изменением фотоотклика (ученый секретарь ОНИ к. ф.-м. н. Н. Н. Губанова).

В рамках теории спинового функционала плотности (SDFT) выполнены самосогласованные теоретические расчеты электронного спектра  $E\sigma(k)$  ферромагнитных пленок кобальта и его силицида под графеном, выращенных на карбиде кремния graphene-Co-SiC и graphene-Si-Co-SiC. Показано, что ферромагнитные пленки локализуются между буферным слоем и подложкой. Проведена геометрическая оптимизация обеих систем, вычислены плотности электронных состояний, найдено распределение магнитных моментов. Получено максимальное значение числа монослоев пленок железа и кобальта на гексагональном нитриде бора  $h$ -BN, обладающих перпендикулярной магнитной анизотропией (группа электромагнитных свойств конденсированных сред, рук. – к. ф.-м. н. О. В. Геращенко, д. ф.-м. н. С. М. Дунаевский).

Сотрудниками ОНИ в 2021 г. опубликованы 69 научных статей в рецензируемых журналах Web of Science (в т. ч. 53 статьи – в зарубежных изданиях), получены 1 патент и 1 свидетельство о государственной регистрации специализированных программ, защищены 2 докторские и 6 кандидатских диссертаций.

## Отделение физики высоких энергий

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

- физики элементарных частиц (заведующий – д. ф.-м. н. Г. Д. Алхазов);
  - релятивистской ядерной физики (заведующий – 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);
  - малонуклонных систем (и. о. заведующего – к. ф.-м. н. О. В. Миклухо);
  - 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 115 научных сотрудников, из них 14 докторов наук и 56 кандидатов наук.



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

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

В 2021 г. проводились следующие эксперименты.

1. На синхротронном комплексе СЦ-1000:
  - производство и изучение короткоживущих ядер на лазерном масс-спектрометрическом комплексе ИРИС;
  - изучение поляризационных эффектов в квазиупругом рассеянии протонов на ядрах;
  - исследование магнитных свойств материалов  $\mu$ SR-методом.



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



2. В Европейском центре ядерных исследований (ЦЕРН):

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

3. На электронных ускорителях Университета Бонна (Германия) – изучение структуры нуклонов в  $\gamma$ - $p$ -рассеянии.

4. На мезонной фабрике Института им. Пауля Шеррера (Швейцария) – поиск мюонного катализа реакции ядерного синтеза  $d^3\text{He}$ .

5. В Институте ядерной физики Общества Макса Планка (Гейдельберг, Германия):

- по прямому ультрапрецизионному измерению разности масс  $^{187}\text{Re}$ – $^{187}\text{Os}$ , которая необходима для определения эффективной массы антинейтрино;
- поиск мюонного катализа реакции ядерного синтеза  $d^3\text{He}$ .

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 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 2021 г. при участии сотрудников Отделения, – это обнаружение распада бозона Хиггса в мюоны в эксперименте CMS, первое прямое наблюдение квантово-хромодинамического эффекта «мертвый конус» в жестких протон-протонных взаимодействиях в эксперименте ALICE. Этот эффект был предсказан теоретиками нашего Института еще в 1991 г. (Ю. Л. Докшицер, С. И. Троян, В. А. Хозе), однако до последнего времени его наблюдение во многих экспериментах было затруднено. Сотрудники Отделения продолжают работы по изучению характеристик редких распадов элементарных частиц в эксперименте LHCb. За все время работы эксперимента LHCb открыто 55 новых адронных состояний, среди которых есть кандидаты в пенто- и тетрокварковые состояния. Сотрудники ОФВЭ продолжают поиск частиц темной материи в эксперименте ATLAS для установления новых, более строгих ограничений на сечение рождения таких частиц.

В 2021 г. большие усилия были сосредоточены на работах по подготовке детекторов CMS, ATLAS, LHCb и ALICE к работе в следующем этапе набора данных после проведенной модернизации коллайдерных детекторов в связи с тем, что в Сеансе-3 ожидается повышение светимости БАК.

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

коллайдера NICA (Nuclotron-based Ion Collider fAcility) в Дубне, направленного на исследование ядерной материи в 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 2021 г. опубликованы 180 научных работ в рецензируемых журналах, сделаны 43 доклада на российских и международных научных мероприятиях.



## Отделение молекулярной и радиационной биофизики

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

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

3 центров:

- центра доклинических и клинических исследований (заведующий – к. м. н. А. П. Трашков);
  - ресурсного центра (заведующий – к. б. н. Н. А. Верлов);
  - Курчатовского геномного центра (руководитель – к. б. н. А. А. Кульминская)
- и отдела инженерно-технического обеспечения (и. о. главного инженера – П. А. Сотников).

В Отделении работают 133 научных сотрудника, из них 13 докторов наук и 52 кандидата наук.



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

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

Последние годы отмечены стремительным выходом на арену научных исследований новой науки – протеомики. В научном сообществе наблюдается особый интерес к тому, на чем основана эта наука, как работают ее методы. Поиск, определение, разделение, количественный и ка-

чественный анализы белковых молекул, играющих роль в обеспечении функционирования организма, являются основными задачами протеомики. Протеом человека состоит из разнообразного и гетерогенного ряда генных продуктов/протеоформ/видов белков. Поиску среди этого многообразия протеомных форм, характерных для различных заболеваний, в частности мультиформенной глиобластомы (ГМФ), посвящена работа С. Н. Нарыжного (лаборатория протеомики), где на основании проведенного анализа показана возможность использования протеоформ гаптоглобина в качестве потенциального биомаркера плазмы, специфичного для ГМФ.

В ОМРБ на протяжении нескольких лет ведутся межлабораторные работы по изучению внеклеточных везикул (EVs, экзосом), которые играют важную роль во многих биологических процессах. Например, EVs участвуют в важных процессах развития мультиформенной глиобластомы,

включая злокачественную трансформацию и инвазию. Кроме того, экзосомы, секретируемые многими клетками, являются природными частицами, способными переносить большое количество нуклеиновых кислот и белков, сохраняя их стабильность. Однако от распределения этих частиц в тканях организма зависят эффективность и стратегия терапии на основе EVs. В исследовании, проведенном Т. А. Штам (лаборатория биосинтеза белка) с коллегами, показано, что EVs, выделенные из грейпфрута, эффективны при доставке экзогенных белков, в частности бычьего сывороточного альбумина (BSA) и белка теплового шока (HSP70). Кроме того, с использованием радиоактивной метки  $^{125}\text{I}$  оценено биораспределение EVs в различных тканях организма.

Другое важное наблюдение сделано в работе С. Н. Пчелиной (лаборатория молекулярной генетики человека), где исследуются мутации в гене *GBA1*, приводящие к болезни Гоше (БГ), которая, в свою очередь, является высоким фактором риска возникновения болезни Паркинсона (БП). Ген *GBA1* кодирует важный фермент лизосом – глюкоцереброзидазу (GCase). В результате мутаций нарушается 3D-структура GCase и ее транспорт в лизосому, что приводит к снижению активности фермента в лизосоме. Общность патогенеза данных заболеваний делает перспективной разработку стратегий, направленных на лечение БГ и БП, ассоциированной с мутациями в гене *GBA1* (GBA-БП). В работе А. Э. Копытовой (лаборатория молекулярной генетики человека) совместно с Г. Н. Рычковым (лаборатория молекулярной и клеточной биофизики) предложены возможный механизм действия амброксола и методика поиска перспективных фармакологических шаперонов. Кроме того, показано, что первичная культура макрофагов является подходящей моделью для тестирования эффективности препаратов, влияющих на активность GCase, и амброксол эффективно восстанавливает активность и концентрацию белка GCase, а также увеличивает его транспорт в лизосому.

Не осталось в стороне Отделение и от исследований актуального на сегодняшний день заболевания – коронавирусной инфекции (COVID-19), вызываемой коронавирусом тяжелого острого

респираторного синдрома 2 (SARS-CoV-2) из семейства коронавирусов HCoV. В работе Т. С. Усенко (лаборатория молекулярной генетики человека) впервые проведен анализ транскрипта COVID-19 у пациентов в момент поступления в отделение интенсивной терапии для оценки исхода заболевания в остром периоде (30 дней). С помощью биоинформатических методов выделен список из более чем 300 дифференциально экспрессирующихся генов (ДЭГ) и, в частности, определен путь активации рецепторов липопротеинов низкой плотности. Впервые показано снижение уровня экспрессии генов *STAB1*, *PPARG*, *CD36*, *ITGAV* и *ANXA2*, продукты которых вовлечены в метаболизм холестерина, у выживших по сравнению с умершими, что подтверждает важную роль изменений в метаболизме холестерина в определении исхода коронавирусной инфекции.

В другом исследовании Е. В. Семеновой (Центр доклинических и клинических исследований) проведено долгосрочное наблюдение за поведением гуморального иммунного ответа на инфекцию вируса SARS-CoV-2 и количественной оценкой уровней анти-SARS-CoV-2 иммуноглобулинов в крови здоровых доноров, живущих в условиях пандемии коронавируса, и пациентов, перенесших COVID-19. Динамика анти-SARS-CoV-2 IgG соответствует представлениям о «классическом» гуморальном иммунитете при вирусной инфекции. При этом было выявлено отличие поведения иммуноглобулинов IgA при инфицировании SARS-CoV-2 от поведения IgA для коронавирусов предыдущих поколений. Возможно, SARS-CoV-2-специфические IgA играют независимую роль в обеспечении защитного иммунитета при незначительных вирусных нагрузках, однако повышенный уровень IgA не является абсолютной защитой от заболевания COVID-19.

Традиционными для ОМПБ являются исследования в области микробиологии и биотехнологии. В работе сотрудников лаборатории энзимологии исследованы антибактериальные свойства фукоиданов из бурых водорослей *Fucus vesiculosus* Баренцева моря. Природные фукоиданы представляют собой полидисперсную смесь соединений, состав которых может сильно различаться



в зависимости от вида, среды обитания водорослей, а также способов выделения. Сравнивалось действие двух фракций сульфатированных полисахаридов с разной степенью очистки на микроорганизмы *Escherichia coli*, *Bacillus licheniformis*, *Staphylococcus epidermidis* и *Staphylococcus aureus*. Показано значительное бактериостатическое действие фукоиданов на клетки *E. coli* при отсутствии морфологических изменений, а на *S. epidermidis* и *S. aureus* действие заключалось в значительном уменьшении их размеров. В целом грубая фракция фукоиданов обнаруживала большую ингибирующую активность в отношении микробов по сравнению с очищенной.

Особое место занимают работы, посвященные восстановлению (репарации) различных генетических повреждений ДНК. Эти работы, традиционные для ОМРБ, выполнены на одноклеточных микроорганизмах – дрожжах *Saccharomyces cerevisiae*. У эукариот толерантность к повреждениям ДНК определяется двумя путями репарации: гомологичной рекомбинационной репарацией и путем, контролируемым RAD6-эпистатической группой генов. Моноубиквитилирование PCNA (proliferating cell nuclear antigen) опосредует путь, подверженный ошибкам, тогда как полиубиквитилирование стимулирует путь без ошибок. Безошибочный путь включает компоненты рекомбинационной репарации, однако факторы, которые действуют на этом пути, остаются в значительной степени неизвестными. В работе Е. А. Алексеевой (лаборатория генетики эукариот) проведен анализ функций белка Hsm3 в комплексе NuB4 у дрожжей *S. cerevisiae*. Ранее был определен новый участник безошибочного пути толерантности к повреждениям ДНК – продукт гена *HIM*, а механизм безошибочного пути обхода повреждений ДНК в мутанте *him1* действует через привлечение высокоошибочной полимеразы Pol $\eta$  для осуществления репаративного синтеза ДНК во время пострепликативной репарации генома. В ядре дрожжей ядерный комплекс NuB4 состоит из трех белков: Hat1, Hat2 и Hif1 – и физически взаимодействует с Hsm3p. Проведенный генетический анализ свойств трех мутантов *hsm3Δ*,

*hif1Δ* и *hat1Δ* представил доказательства того, что значительное повышение уровня dNTP подавляет *hsm3*- и *hif1*-зависимый мутагенез. Кроме того, мутации *hsm3Δ* и *hif1Δ* значительно снижают эффективность индукции экспрессии генов RNR (рибонуклеотидредуктазы) после УФ-облучения. Это снижение экспрессии служит причиной переключения точных полимераз на высокоошибочную полимеразу Pol $\eta$  в процессе репаративного синтеза ДНК. Таким образом, Pol $\eta$  отвечает за *hsm3*- и *hif1*-зависимый мутагенез, и белок Hsm3, подобно белку Hif1, может быть функциональной субъединицей комплекса NuB4 и участвовать в сборке хроматина в ходе репаративного процесса.

Взаимосвязь работы нервной системы, ее физиология и функционирование находятся под контролем различных генов. Для изучения различных аспектов функционирования нервной системы используют модельные организмы, в частности *Drosophila melanogaster*. В работе Е. В. Рябовой и П. А. Мелентьева (лаборатория экспериментальной и прикладной генетики) исследовано функционирование глиальных клеток в условиях нокаута гена *swiss cheese* в поверхностной глии (гематоэнцефалический барьер), а также в глии кортекса центральной нервной системы и обертывающей глии периферической нервной системы. Эти типы глиальных клеток обеспечивают гомеостаз в нервной ткани, защищая ее от внешних воздействий. В работе показано, что нокаут гена *swiss cheese* в поверхностной глии вызывает морфологические и функциональные изменения в субпериневральной глии, а в обертывающей глии – морфологические изменения структур, образуемых этими клетками. Кроме того, описаны изменения транскриптома при подавлении экспрессии гена *swiss cheese* в этих типах глии, а также обнаружено увеличение уровня активных форм кислорода. Выявленные изменения сопровождались снижением локомоторной активности мух. Полученные результаты указывают на значимую роль гена *swiss cheese* в нескольких типах глиальных клеток для обеспечения защиты нервной системы от окислительного стресса и в контроле двигательной активности особей. В следующей части исследования

с помощью подавления экспрессии гена *swiss cheese* в нейронах имаго *D. melanogaster* индуцировали нейродегенерацию в мозге. Это вызвало снижение продолжительности их жизни, а также уменьшение локомоторной активности и ухудшение памяти. Одновременно в мозге увеличивался уровень активных форм кислорода, накапливались липидные капли и снижалось количество митохондрий. Эти результаты позволяют предположить, что в ответ на дисфункцию продукта гена *swiss cheese* в нейронах развивается окислительный стресс и изменяется метаболизм липидов и что патологический процесс в ряде нейродегенеративных заболеваний, таких как наследственная спастическая параплегия, влечет нарушения митохондрий, липидных капель и эндоплазматического ретикулума.

Особого внимания заслуживают работы лаборатории биосинтеза белка. Изучение фундаментальных особенностей работы белоксинтезирующей системы (рибосомы) – сложная и актуальная задача. Возникновение и распространение антибиотикорезистентности у бактерий является одной из наиболее серьезных проблем в медицине, поскольку известные и давно используемые антибиотики со временем теряют свою эффективность. Одним из подходов к решению проблемы резистентности является тщательное изучение антибактериальных препаратов и механизмов резистентности к ним. В работе Е. В. Полесской и соавторов была создана система трансляции *in vitro*, состоящая из элементов белоксинтезирующей системы из *E. coli* с заменой одного из факторов элонгации на гетерологичный белок из термофильного микроорганизма *Thermus thermophilus*. При наличии в системе термофильного фактора EF-Tu скорости реакций связывания и декодирования в А-сайте снижались на порядок, в то время как наличие термофильного фактора EF-G не влияло на кинетические параметры факторзависимой транслокации и ингибирования. Это наблюдение означает, что процесс транслокации в значительной степени определяется взаимодействием тРНК и рибосомы и может эффективно катализироваться термофильным EF-G. В работе Е. М. Максимовой с коллегами проведено тщательное изучение антибакте-

риальных препаратов и механизмов резистентности к ним, а именно кинетическое и термодинамическое исследование влияния амикумадина А на основные этапы синтеза полипептидов. Показано, что антибиотик амикумадин А связывается вблизи кодона Е-сайта, стабилизирует мРНК, снижает скорость образования функционального 70S-инициаторного комплекса, способствует образованию ошибочных 30S-инициаторных комплексов, снижает скорость перемещения пептидил-тРНК из А-сайта в Р-сайт и уменьшает количество рибосом, способных к синтезу полипептидов. Таким образом он останавливает рост бактерий за счет ингибирования рибосомы во время трансляции.

Проблеме возникновения и эволюции бактериальной резистентности посвящена работа Д. М. Байтина и И. В. Бахлановой (лаборатория молекулярной генетики). Эта способность бактерий основана на генетической изменчивости с последующей селекцией резистентных вариантов. При наличии сложной системы регуляции эволюционной адаптации, при которой путь горизонтального переноса генов резистентности не является единственным, бактериальные клетки адаптируются к действию антибиотиков с помощью активации механизма клеточного SOS-ответа и связанного с ним индуцированного мутагенеза. Для подавления эволюционных путей появления резистентности ведется поиск универсальных мишеней в виде критичных для метаболизма бактерии белков и ингибиторов к ним. Белок RecA функционально участвует в хромосомной трансформации, конъюгации, одновременно являясь индуктором мутагенеза, и поэтому представляет собой идеальную мишень для поиска блокирующих его активность соединений. Структура и функции RecA сохраняют высочайшую консервативность среди бактерий, в т. ч. патогенных. Сравнению различных стратегий поиска ингибирующих соединений и посвящена эта статья, в которой обосновываются преимущество и универсальность стратегии создания пептидных ингибиторов, представляющих собой функциональные фрагменты межмолекулярного интерфейса. Такие пептиды содержат только природные аминокислоты, которые

весьма специфичны для их мишеней и поэтому не обладают широкой областью побочного действия и нетоксичны для человека.

В 2021 г. сотрудниками ОМРБ опубликованы более 120 работ в рецензируемых журналах (48 – в зарубежных), сделаны 62 доклада на на-

учных конференциях. Активно готовится научная смена: в ОМРБ работают 26 аспирантов, обучающихся в аспирантуре НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, 8 сотрудников 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 (и. о. заведующего – к. ф.-м. н. М. В. Суюсова);
- 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 (заведующий – к. т. н. В. А. Соловей), 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 работает 51 научный сотрудник, из них 7 докторов наук и 27 кандидатов наук.



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

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

характеристикам синхроциклотрон СЦ-1000 с энергией протонов выведенного пучка 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 ускорительного отдела (УО) созданы пучки протонов переменной энергии от 60 до 1 000 МэВ. Диаметр полученных пучков ~ 30–80 мм,  $\Delta r/r$  находится в диапазоне 1,3–14 %, а интенсивность изменяется в диапазоне  $10^7$ – $10^{12}$  с<sup>-1</sup>.

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

Для 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 нанoeлектроники. Одним из основных условий их успешного применения является способность длительное время надежно функционировать

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

препараты высокого качества, недоступные для коммерческих циклотронов, в частности генераторные изотопы. Генераторные изотопы открывают путь для проведения позитронно-эмиссионной томографии в отдаленных от циклотрона медицинских центрах. В проекте также 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 1400 пациентов.

Лаборатория голографических информационно-измерительных систем (ЛГИИС) ОПР является одним из лидеров в области прецизионных измерений на масштабах нанометров. Для проведения этих исследований в ЛГИИС имеется современная уникальная подземная безвибрационная голографическая лаборатория. На базе этой лаборатории и стендов для синтеза линейных и радиальных голографических дифракционных решеток могут выпускаться 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 в сотые доли секунды. В 2015 г. в ЛГИИС впервые создана линейная голографическая решетка длиной 1300 мм и разрешением 1 нм. Работы ЛГИИС были отмечены на выставке «Армия-2015».

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 путем создания и встраивания в установку сегментированных анодных блоков. Модернизированная установка ИКАР была установлена на пучок и прошла необходимые пучковые испытания.

Открытие подледникового озера Восток в Антарктиде стало последним крупным географическим открытием XX в. Его исследование позволит получить уникальные данные о происхождении и эволюции форм жизни в экосистемах, которые характеризуются крайне высокой степенью олиготрофности (т. е. низкой концентрацией питательных веществ), а также экстремальными условиями. К ним относятся: ожидаемое чрезвычайно высокое содержание кислорода в воде (превышающее в 50–100 раз обычную для земных озер концентрацию), высокое давление – 350 бар, невозможность использования экосистемой солнечной энергии из-за крайне толстого слоя льда, покрывающего озеро. НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ является головной организацией по исследованию водной толщи озера. В этой программе активно участвуют сотрудники ОПР, ОМРБ и ОНИ. Перед Институтом стоит задача по разработке такой технологии проникновения в толщу водной среды озера, при которой будет исключено его загрязнение буровой жидкостью, заполняющей скважину. Эта задача требует разработки уникальных устройств, регистрирующих гидрофизические, гидрохимические и микробиологические параметры в режиме

онлайн, а также допускающих стерильный отбор проб воды и грунта в объемах, необходимых для проведения последующих лабораторных анализов.

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

Основным направлением исследований лаборатории химии и спектроскопии углеродных материалов (ЛХСУМ) ОПР является разработка новых производных фуллеренов и эндометаллофуллеренов, исследование их физико-химических свойств, радиационной стойкости и самоорганизации в водных растворах. Одной из наиболее важных научно-практических задач ЛХСУМ является разработка новых производных эндометаллофуллеренов, 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 не абсолютна, и поэтому небольшие количества токсичного радиоактивного металла могут высвобождаться в организм. С этой целью в лаборатории проводятся исследования радиационной стойкости эндометаллофуллеренов и их производных при облучении.

Основным направлением работы лаборатории квантовой химии ОПР является развитие методов расчета электронной структуры молекул и материалов, содержащих тяжелые элементы. Эта деятельность была стимулирована еще в начале 80-х гг. прошлого века необходимостью расчета необычных свойств в двухатомных молекулах с одним тяжелым атомом, знание которых необходимо для поиска на таких молекулах новой физики за пределами Стандартной модели. Его основой стал развиваемый лаборато-



рией двухшаговый метод, который позволил разделить структуру расчета таких молекул на два последовательных этапа: в валентной области и в области остова тяжелого атома. К настоящему времени точность, достигнутая в этих расчетах, является рекордной в мире. Сотрудники лаборатории не ограничились расчетами различных физико-химических свойств двухатомных молекул с полностью заполненными оболочками, локализованными в атомных остовах, и перешли к исследованиям электронной структуры и свойств существенно более сложных химических соединений. Разработка новых эффективных методов, алгоритмов и программных пакетов для прецизи-

онного моделирования электронной структуры и свойств соединений тяжелых элементов позволила начать систематическое исследование свойств соединений лантаноидов, актиноидов и тяжелых переходных металлов, перейти к расчетам твердофазных систем и провести исследование химических свойств сверхтяжелых элементов из «острова стабильности».

Сотрудниками ОПР в 2021 г. опубликованы 44 работы, которые индексируются в Web of Science и Scopus, сделаны более 60 докладов на российских и международных научных конференциях и семинарах, получены 5 патентов и свидетельств на изобретение.





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

$$\phi = 2k_1 L$$

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

$$r = (\sqrt{1+x^2} - x) / (\sqrt{1+x^2} + x)$$

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

$$t \exp(ik_1 l) / [t r^2 \exp(2ik_1 l)]$$

$$T = \int T(k) \cos \theta \, d\theta$$

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



# Теоретическая и математическая физика

- 32** Рождение инстантона квантовой хромодинамики в дифракционных процессах на Большом адронном коллайдере
- 33** Скалярные изоскалярные мезоны и скалярный глюбол из радиационных распадов  $J/\Psi$ -мезона
- 35** Амплитуды распределения для переходов «нуклон – мезон» и «нуклон – фотон»
- 36** Вычисление и исследование лидирующего непланарного вклада в аномальную размерность операторов твиста-2 в максимально расширенной суперсимметричной теории Янга – Милса
- 37** Расчет катиона  $^{179}\text{HfF}^+$  для поиска новой физики
- 38** «Подстраиваемый под соединение» потенциал внедрения – новый метод моделирования примесных актиноидов, лантаноидов и переходных металлов в материалах
- 39** Теоретическое исследование геликоидальных интерферометров Ааронова – Бома
- 40** Теория рамановского рассеяния света в нанопорошках неполярных кристаллов
- 41** Подход среднего поля для описания скирмионных решеток в центросимметричных фрустрированных антиферромагнетиках
- 42** Обобщенные релятивистские псевдопотенциалы для легких элементов
- 43** Критическая неабелева вихревая трубка и голография для теории «маленькой» струны



## Рождение инстантона квантовой хромодинамики в дифракционных процессах на Большом адронном коллайдере

М. Г. Рыскин<sup>1</sup>, В. А. Хозе<sup>1</sup>, V.V. Khoze<sup>2</sup>, D.L. Milne<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Отделение теоретической физики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

<sup>2</sup> Institute of Particle Physics Phenomenology of Durham University, England

Нетривиальное классическое решение – инстантон квантовой хромодинамики – было найдено еще в 1975 г. Инстантон играет важную роль в описании вакуума квантовой хромодинамики, в нарушении киральной инвариантности и т. п. Тем не менее до сих пор инстантон не удалось наблюдать на опыте.

В эксперименте инстантон должен выглядеть как сгусток большого числа изотропно распределенных частиц. Однако близкую структуру имеют и события, где одновременно сталкиваются несколько пар партонов.

Мы предложили искать инстантон на Большом адронном коллайдере (БАК) в дифракционных процессах, где вероятность многократных взаимодействий сильно подавлена. Если лидирующий протон уносит более 99,5 % импульса налетающего протона, на рождение новых частиц во взаимодействии другой пары партонов не остается энергии.

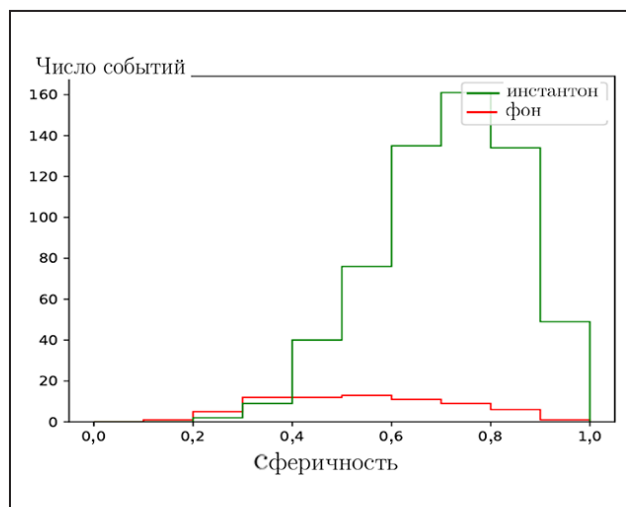
Инстантоны большого размера (малой массы) практически не наблюдаемы. Они распадаются на несколько мини-струй с энергией порядка 1 ГэВ. Такие же частицы образуются и при мягких взаимодействиях. Сечение рождения тяжелых инстантонов быстро падает с массой. Соответственно, мы ищем инстантоны с массой в районе 30–50 ГэВ. В этом случае, отбирая события с лидирующим протоном и большой множественностью вторичных частиц (более 20 заряженных частиц в интервале псевдобыстрот

от 0 до 2 с суммарной поперечной энергией более 15 ГэВ), но без струй с большими поперечными импульсами, удается получить сигнал, превышающий фон почти в 10 раз (рис.).

В случае инстантона распределение по сферичности  $S$  имеет пик при  $S \sim 0,7–0,8$ , а для фона ожидается довольно плоское распределение со слабо выраженным максимумом в районе  $S \sim 0,5$ .

Отметим, что ожидаемое сечение ( $\sim 1$  нб) еще достаточно велико и может наблюдаться на БАК.

Впервые было вычислено сечение образования тяжелого инстантона в процессах, где большие интервалы быстрот свободны от вторичных частиц (в т. ч. и в дифракционных процессах).



Распределение по сферичности для инстантона и фона при  $L = 1 \text{ пб}^{-1}$

# Скалярные изоскалярные мезоны и скалярный глюбол из радиационных распадов $J/\Psi$ -мезона

А. В. Саранцев<sup>1</sup>, И. И. Денисенко<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Отделение теоретической физики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

<sup>2</sup> Объединенный институт ядерных исследований

Радиационные распады  $J/\Psi$ -мезонов являются наиболее перспективным источником для поиска связанного состояния двух глюонов – глюбола. При радиационном распаде  $J/\Psi$ -мезона происходит аннигиляция с-кварка и антикварка в два глюона с излучением фотона (рис. 1). Глюоны переходят в резонансы, которые в свою очередь распадаются в стабильные мезоны. Высокостатистические данные по радиационным распадам  $J/\Psi$ -мезона в каналы  $\gamma\pi\pi$ ,  $\gamma KK$ ,  $\gamma\eta\eta$  и  $\gamma\eta\eta'$  были получены коллаборацией BESIII. Более того, коллаборация провела энергетически независимый парциально-волновой анализ данных, который показал, что в этих каналах рождаются только две парциальные волны с  $JP = 0+$  (скалярные состояния) и  $2+$  (тензорные состояния). Вклад скалярной волны и вклад доминантного мультиполя  $E1$  тензорной волны в реакциях  $J/\Psi \rightarrow \gamma\pi\pi$  и  $J/\Psi \rightarrow \gamma KK$  показан на рис. 2. Как видно,  $0+$ -волна имеет сложную структуру в районе масс 1500–2200 МэВ, в то время как в тензорной волне наблюдается рождение основных состояний  $f_2(1270)$  и  $f_2(1525)$ , и практически никакой другой структуры вплоть до массы 2200 МэВ.

Нами был проведен анализ скалярной волны совместно с данными по  $J/\Psi$ -распаду в каналы  $\gamma\eta\eta$ ,  $\gamma\eta\eta'$ ,  $\gamma\omega\phi$ ; пион-пионному рассеянию в каналы  $\pi\pi$ ,  $KK$ ,  $\eta\eta$ ,  $\eta\eta'$ ; протон-антипротонной аннигиляции в три мезона. Анализ проводился в рамках дисперсионного  $N/D$ -метода, учитывающего в полной мере свойства аналитичности и унитарности амплитуды рассеяния. В результате анализа были идентифицированы вклады 10 скалярных резонансов (в принципе, все 10 хорошо известны), которые можно отнести к двум группам по кварк-антикварковой конфигурации:

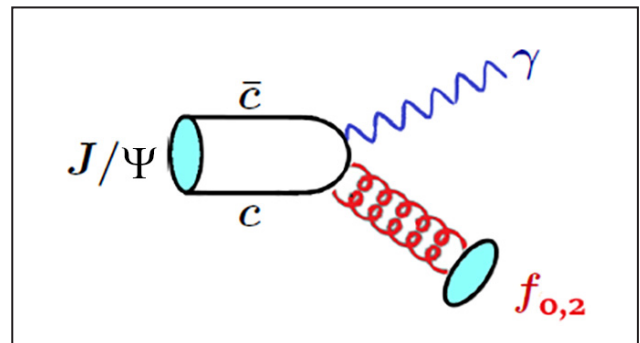


Рис. 1. Радиационный распад  $J/\Psi$ -мезона

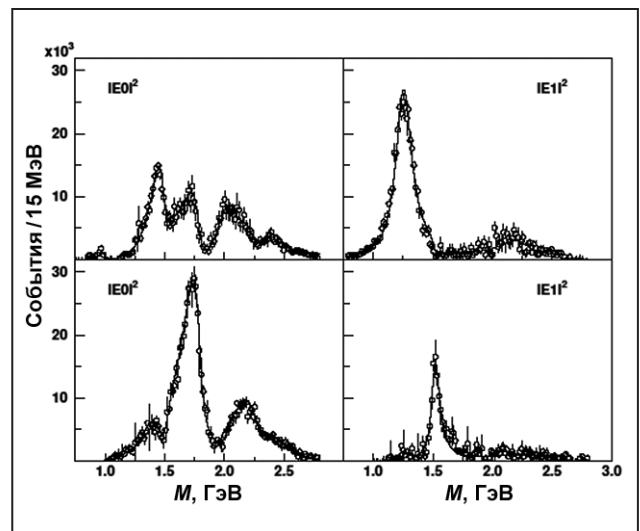


Рис. 2. Вклад скалярной (левая колонка) и доминантной (правая колонка) тензорных волн  $E1$  в  $J/\Psi \rightarrow \gamma\pi\pi$  (верхние графики) и  $J/\Psi \rightarrow \gamma KK$  (нижние графики) сечения реакций

преимущественно синглеты и октеты. Интенсивность рождения этих состояний и распада в различные конечные состояния приведены в таблице. Интенсивности в неучтенные конечные состояния рассчитаны для резонансов с массами меньше 1800 МэВ исходя из условия

Таблица. Интенсивность распада резонансов в различные конечные состояния в  $10^{-5}$ 

| $BR(J/\Psi \rightarrow \gamma f_0)$ | $\gamma_{\pi\pi}$ | $\gamma_{KK}$ | $\gamma_{\eta\eta}$ | $\gamma_{\eta\eta'}$ | $\gamma_{\omega\phi}$ | Потери      | Итог          |
|-------------------------------------|-------------------|---------------|---------------------|----------------------|-----------------------|-------------|---------------|
| $f_0(500)$                          | $105 \pm 20$      | $5 \pm 5$     | $4 \pm 3$           | $\sim 0$             | $\sim 0$              | $\sim 0$    | $114 \pm 21$  |
| $f_0(980)$                          | $1,3 \pm 0,2$     | $0,8 \pm 0,3$ | $\sim 0$            | $\sim 0$             | $\sim 0$              | $\sim 0$    | $2,1 \pm 0,4$ |
| $f_0(1370)$                         | $38 \pm 10$       | $13 \pm 4$    | $3,5 \pm 1,0$       | $0,9 \pm 0,3$        | $\sim 0$              | $14 \pm 5$  | $69 \pm 12$   |
| $f_0(1500)$                         | $9,0 \pm 1,7$     | $3 \pm 1$     | $1,1 \pm 0,4$       | $1,2 \pm 0,5$        | $\sim 0$              | $33 \pm 8$  | $47 \pm 9$    |
| $f_0(1710)$                         | $6 \pm 2$         | $23 \pm 8$    | $12 \pm 4$          | $6,5 \pm 2,5$        | $1 \pm 1$             | $7 \pm 3$   | $56 \pm 10$   |
| $f_0(1770)$                         | $24 \pm 8$        | $60 \pm 20$   | $7 \pm 1$           | $2,5 \pm 1,1$        | $22 \pm 4$            | $65 \pm 15$ | $181 \pm 26$  |
| $f_0(2020)$                         | $42 \pm 10$       | $55 \pm 25$   | $10 \pm 10$         | -                    | -                     | $38 \pm 13$ | $145 \pm 32$  |
| $f_0(2100)$                         | $20 \pm 8$        | $32 \pm 20$   | $18 \pm 15$         | -                    | -                     | $38 \pm 13$ | $108 \pm 25$  |
| $f_0(2200)$                         | $5 \pm 2$         | $5 \pm 5$     | $0,7 \pm 0,4$       | -                    | -                     | $38 \pm 13$ | $49 \pm 17$   |
| $f_0(2330)$                         | $4 \pm 2$         | $2,5 \pm 0,5$ | $1,5 \pm 0,4$       | -                    | -                     | -           | $8 \pm 3$     |

унитарности полученных амплитуд. Отметим, что полная интенсивность в неупругий канал хорошо совпадают с измеренной интенсивностью распада  $J/\Psi$  в  $\gamma 4\pi$ -канал.

Для резонансов с массами в районе 2000–2300 МэВ, где отсутствуют данные пион-пионного рассеяния и невозможно восстановить неупругость исходя из условия унитарности, мы просто разделили измеренную интенсивность распада  $J/\Psi$  в  $\gamma 4\pi$ -канал в этой области поровну на три состояния. Эта гипотеза нуждается в проверке. Интенсивности рождения для двух групп найденных резонансов отмечены как *черные квадраты* (синглеты) и *открытые кружки* (октетты) на рис. 3. Графики показывают специфическую картину интенсивности рождения резонансов с пиком в области масс 1850 МэВ и гауссовским распределением с шириной 350 МэВ. Единственное разумное объяснение этого явления – рождение глобола с массой 1850 МэВ, который смешивается с близлежащими кварк-антикварковыми состояниями.

Надо отметить, что массы найденных состояний хорошо согласуются с кварковой моделью, и дополнительного состояния, выходящего за рам-

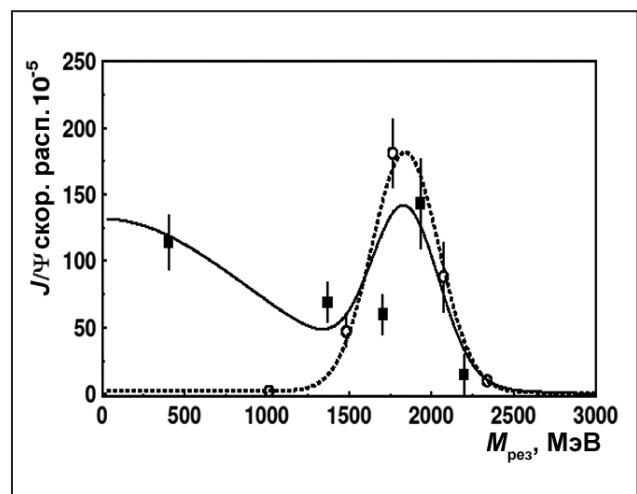


Рис. 3. Интенсивность рождения октетных (открытые кружки) и синглетных (полные квадраты) скалярных состояний в радиационных распадах  $J/\Psi$

ки этой классификации, найдено не было. Возможно, что масса и ширина дополнительного состояния совпала с характеристиками одного из стандартных кварк-антикварковых состояний и мы не смогли его идентифицировать, или глобол не образует полюса в плоскости рассеяния и реализуется только через смешивание с другими состояниями.



## Амплитуды распределения для переходов «нуклон – мезон» и «нуклон – фотон»

К. М. Семенов-Тян-Шанский<sup>1</sup>, А. А. Шайхутдинова<sup>1</sup>, В. Pire<sup>2</sup>, L. Szymanowski<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Отделение теоретической физики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

<sup>2</sup> Ecole Polytechnique, France

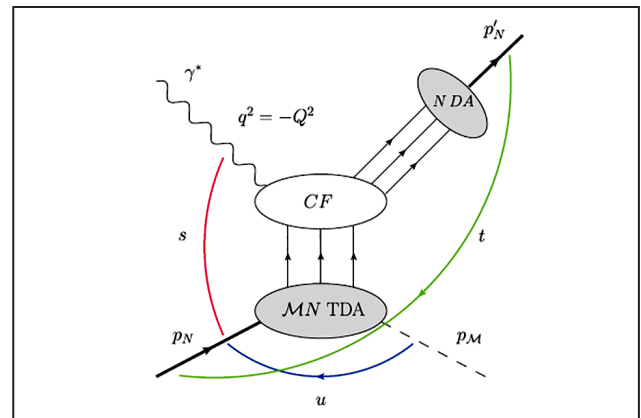
<sup>3</sup> National Centre for Nuclear Research, Poland

В специальной кинематике амплитуды жестких эксклюзивных процессов могут быть факторизованы в виде сверток жестких частей, допускающих описание в пертурбативной квантовой хромодинамике (КХД), и адронных матричных элементов нелокальных операторов КХД на световом конусе. Обобщение этого подхода для процессов жесткого эксклюзивного электророждения мезонов (или фотонов) в направлении «назад» на нуклонах  $e(k) + N(p_N) \rightarrow e(k') + \gamma^*(q) + N(p_N) \rightarrow e(k') + N'(p'_N) + M(p_M)$  в обобщенной бьеркеновской кинематике (большие  $q^2 = -Q^2$  и  $s = (q + p_N)^2$ , фиксированный  $x_B = Q^2/(2p_N q)$ , малое значение  $|u| = |(p_N - p_M)^2| \ll Q^2, W^2$ ) привело к необходимости определить новые непертурбативные объекты: нуклон-мезонные и нуклон-фотонные матричные элементы трехкварковых операторов на световом конусе. Эти величины получили название амплитуд распределения для переходов «нуклон – мезон» и «нуклон – фотон» (TDA). Механизм коллинеарной факторизации, использующий TDA, для жесткого подпроцесса  $\gamma^* N \rightarrow N' M$  представлен на рисунке.

Физическая картина, содержащаяся в TDA «нуклон – мезон» (и «нуклон – фотон»), является дальнейшим развитием описания на основе нуклонных обобщенных партонных распределений (GPD) и барионных амплитуд распределения (DA), волновых функций барионов на световом конусе. TDA «нуклон – мезон» описывают партонные корреляции между состояниями с различным барионным зарядом. Таким образом, доступными для исследования оказываются неминимальные фоковские компоненты волновых

функций адронов на световом конусе. Переход в TDA к пространству прицельного параметра позволяет получить фемтофотографии адронов под новым углом зрения.

Интерес к описанию жестких эксклюзивных процессов в подходе коллинеарной факторизации обеспечивается наличием большого числа международных экспериментальных проектов в этой области (JLab@12 GeV, PANDA@GSI-FAIR, JPARC). Особого внимания заслуживает подготовка программы исследований для планируемых к постройке электрон-ионных коллайдеров EIC и EicC. Кроме того, в настоящий момент коллаборацией CLAS (JLab, Ньюпорт-Ньюс, США) ведется подготовка детального эксперимента на установке CEBAF по электророждению псевдоскалярных мезонов в направлении «назад».



Механизм коллинеарной факторизации в ведущем порядке для жесткого подпроцесса  $\gamma^*(q) + N(p_N) \rightarrow N'(p'_N) + M(p_M)$ : MN TDA – амплитуда распределения для перехода «нуклон – мезон»; N DA – нуклонная функция распределения; CF – жесткая часть (коэффициентная функция)

1. Pire B., Semenov-Tian-Shansky K.M., Szymanowski L. // Phys. Rep. 2021. V. 940. P. 1–121.
2. Ayerbe Gayoso C., ..., Pire B., Semenov-Tian-Shansky K.M., ..., Szymanowski L. et al. // Eur. Phys. J. A. 2021. V. 57. No. 12. P. 342.
3. Pire B., Semenov-Tian-Shansky K.M., ..., Szymanowski L. arXiv:2201.12853 [hep-ph].

## Вычисление и исследование лидирующего непланарного вклада в аномальную размерность операторов твиста-2 в максимально расширенной суперсимметричной теории Янга – Миллса

В. Н. Велижанин<sup>1</sup>, В.А. Khiehl<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Отделение теоретической физики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

<sup>2</sup> Institute for Theoretical Physics II, Hamburg University, Germany

Исследование AdS/CFT-соответствия между максимально расширенной суперсимметричной теорией Янга – Миллса и теорией суперструн в пространстве анти-де Ситтера является одной из наиболее актуальных тематик в физике высоких энергий. Одними из основных объектов исследований в рамках дуальности между квантовой теорией поля и теорией суперструн являются составные операторы и их парные струнные состояния, при этом сравниваются результаты для размерностей операторов и квантовых поправок к ним и результаты для энергии соответствующих струнных состояний. За 20 лет изучения AdS/CFT-соответствия были разработаны эффективные методы, применяемые с обеих сторон дуальности и позволяющие получать результаты как для слабой, так и для сильной связи. Однако практически все эти замечательные результаты получены лишь в планарном случае. Выход за рамки планарного предела позволяет изучить новые аспекты AdS/CFT-соответствия между калибровочной теорией и теорией суперструн, в которой непланарность в квантовой теории поля соответствует петлевым поправкам в теории суперструн.

Непланарный вклад в аномальную размерность операторов твиста-2 в максимально расширенной суперсимметричной теории Янга – Миллса впервые появляется в четвертом порядке

теории возмущений, и для его вычисления стандартным расчетом соответствующих диаграмм Фейнмана были разработаны наши собственные, а также использованы сторонние общедоступные специализированные компьютерные программы. Полученные нами результаты вычислений для нескольких фиксированных значений Лоренцева спина операторов были затем использованы для нахождения лидирующего непланарного вклада в так называемую касповую аномальную размерность и общего вида лидирующего непланарного вклада в аномальную размерность операторов твиста-2 для произвольного Лоренцева спина операторов.

Наличие общего результата позволило впервые изучить аналитические свойства непланарного вклада и получить совершенно новую информацию о соответствующем вкладе в уравнениях эволюции Балицкого – Фадиной – Кураева – Липатова и обобщенном дважды логарифмическом уравнении, а также найти непланарные вклады в различных предельных случаях, в частности непланарный вклад в аномальную размерность одномагнетонного оператора в  $\beta$ -деформированной версии рассмотренной модели. Полученные результаты будут служить важнейшей проверкой для исследований эффектов непланарности в рамках AdS/CFT-соответствия.

1. Khiehl B.A., Velizhanin V.N. // Phys. Rev. Lett. 2021. V. 126. No. 6. P. 061603.

2. Khiehl B.A., Velizhanin V.N. // Nucl. Phys. B. 2021. V. 968. P. 115429.

## Расчет катиона $^{179}\text{HfF}^+$ для поиска новой физики

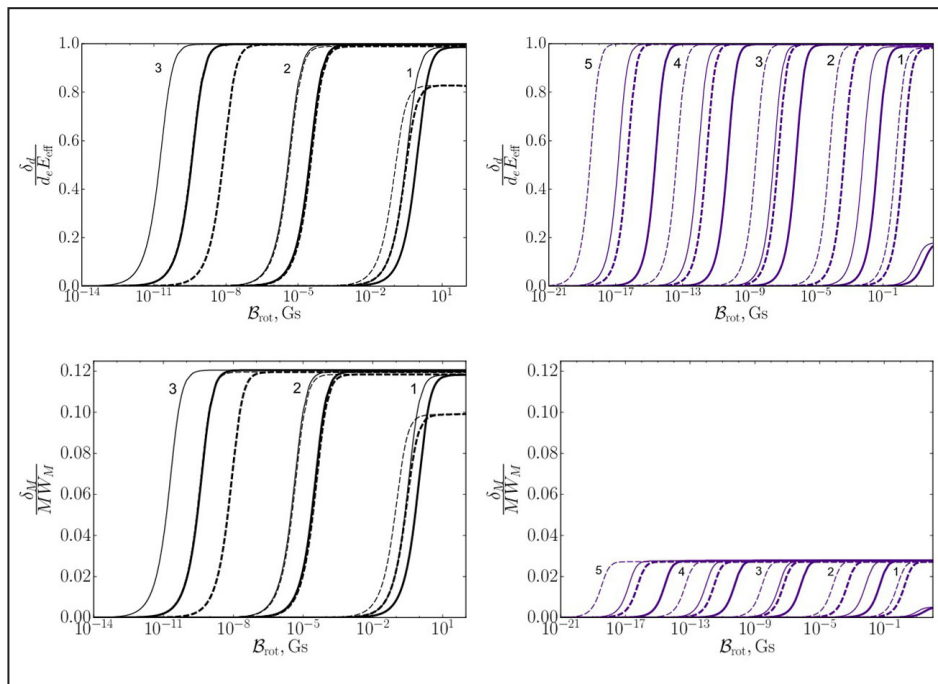
И. П. Курчавов, А. Н. Петров

Отделение перспективных разработок НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Ядерный магнитный квадрупольный момент (МКМ) является низшим  $T, P$ -нечетным магнитным моментом. Измерение МКМ позволяет установить ограничения на  $T, P$ -нечетные ядерные силы, электрический дипольный момент (ЭДМ) нейтронов, вакуумный угол квантовой хромодинамики  $\theta$ , хромо-ЭДМ кварков. Особенность экспериментов с захваченными ионами – использование вращающихся магнитных и электрических полей.

Нами рассчитаны уровни энергии и  $g$ -факторы как функции статического электрического поля. Такие расчеты необходимы для контроля и подавления систематических ошибок в эксперименте и определения схемы заселения уровней. На рисунке представлены полученные энергии

взаимодействия с электронным ЭДМ и МКМ ядра  $^{179}\text{Hf}$  как функции вращающегося магнитного поля для предложенных нами для эксперимента ( $F_1 = 7/2, F = 3$  и  $F_1 = 11/2, F = 5$ ) компонент сверхтонкой структуры основного вращательного уровня  $J = 1$  электронного состояния  $^3\Delta_1$   $^{179}\text{HfF}^+$ . Полный момент катиона  $\mathbf{F} = \mathbf{F}_1 + \mathbf{I}^2$ , где  $\mathbf{F}_1 = \mathbf{J} + \mathbf{I}^1, I^1 = 9/2$  и  $I^2 = 1/2$  – спины ядер гафния и фтора. Выбранные уровни имеют практически одинаковую чувствительность к ЭДМ и примерно в пять раз отличающуюся чувствительность к МКМ, что позволит различить эффекты электронного ЭДМ и МКМ в эксперименте. Следуя нашим результатам, данные уровни рассматривает группа Э. Корнелла для подготовки эксперимента.



Расщепления для  $^{179}\text{HfF}^+$  для  $F_1 = 7/2, F = 3$  (слева) и  $F_1 = 11/2, F = 5$  (справа), связанные с электрическим дипольным моментом (сверху) и магнитным квадрупольным моментом (снизу). Числа на графике соответствуют проекции  $\mathbf{F}$  на направление вращающегося поля (переменная ось). Тонкая линия для  $\omega = 150$  кГц, жирная – для  $\omega = 250$  кГц, где  $\omega$  – частота вращения полей. Сплошные и пунктирные линии различают компоненты дублетов Штарка. Вращающееся электрическое поле  $\epsilon_{\text{rot}} = 110$  В/см



## «Подстраиваемый под соединение» потенциал внедрения – новый метод моделирования примесных актиноидов, лантаноидов и переходных металлов в материалах

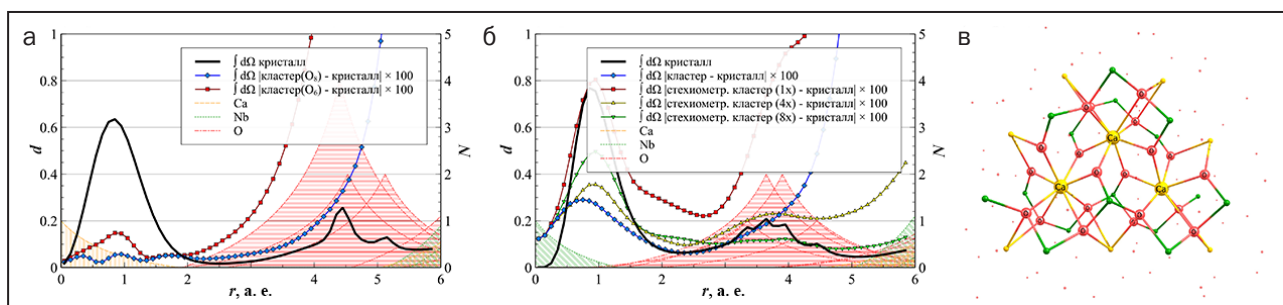
Д. А. Мальцев, Ю. В. Ломачук, В. М. Шахова, Н. С. Мосягин, Л. В. Скрипников, А. В. Титов  
Отделение перспективных разработок НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Расчеты с использованием потенциала внедрения (ПВ) кластера в кристалл важны для исследования локальных свойств и процессов, свойств примесных атомов в кристаллах, т. к. при этом становится возможным существенное увеличение точности расчета и упрощается моделирование заряженных дефектов. Метод «подстраиваемого под соединение» ПВ (compound-tunable embedding potential – СТЕР) заключается в моделировании окружения фрагмента «псевдоатомами», описываемыми псевдопотенциалами, построенными для заданного состояния «атома в соединении», и дополнительными дробными зарядами.

Исследованы примесные атомы (Ta и U) в кристалле ниобата кальция. Для фрагментов кристалла – кластеров, моделирующих кристалл  $\text{CaNb}_2\text{O}_6$ , – продемонстрирована высокая точность воспроизведения геометрии и электронной плотности (рис. а, б). В построенных кластерах сделаны замещения  $\text{Nb} \rightarrow \text{Ta}$  и  $\text{Ca} \rightarrow \text{U}$  с последующей релаксацией геометрии. Поскольку Nb и Ta близки по химическим и структурным свойствам, изменение структуры в расчетах после релаксации при замещении  $\text{Nb} \rightarrow \text{Ta}$  было

в пределах погрешностей используемых квантово-химических методов. Замещение  $\text{Ca} \rightarrow \text{U}$  – более сложный случай: кроме разницы химических и структурных свойств значительную роль играет разная степень окисления, приводящая к образованию заряженного дефекта (с зарядом +2 для  $\text{U}^{\text{IV}}$  и +4 для  $\text{U}^{\text{VI}}$ ). Расчеты показали существенное изменение локальной геометрии при таком замещении.

Минимальный кластер, включающий только ближайшее окружение центрального атома, не позволяет учесть компенсацию заряженных дефектов противоположно заряженными дефектами поблизости, что обычно происходит в реальных кристаллах. Для таких дефектов был построен кластер, включающий ближайшее окружение трех соседних атомов Ca (рис. в). В этом случае удалось воспроизвести геометрию и электронную плотность с высокой степенью точности и смоделировать два возможных дефекта. Для обоих случаев была учтена релаксация геометрии кластеров и рассчитаны значения химических сдвигов линий рентгеноэмиссионных спектров на атомах Nb и U.



Сравнение электронной плотности, полученной в периодических и кластерных расчетах  $\text{CaNb}_2\text{O}_6$  (а, б): черная линия – плотность в кристалле; цветные – разница между кристаллом и кластерами, умноженная на 100. Для окружения кальция построено два кластера с шестью и восемью соседями. Для окружения ниобия модель СТЕР сравнивается с моделями стехиометрических кластеров. Цветные пики показывают положение атомов решетки. Структура трехцентрового кластера, для которого были смоделированы нейтральные группы дефектов:  $\text{Ca} \rightarrow \text{U}^{\text{IV}}$  с одной и  $\text{Ca} \rightarrow \text{U}^{\text{VI}}$  с двумя компенсирующими вакансиями (в)

1. Lomachuk Yu.V., Maltsev D.A., Mosyagin N.S. et al. // Phys. Chem. Chem. Phys. 2021. V. 22. P. 17922.
2. Maltsev D.A., Lomachuk Yu.V., Shakhova V.M. et al. // Phys. Rev. B. 2021. V. 103. P. 205105.

## Теоретическое исследование геликоидальных интерферометров Ааронова – Бома

Р. А. Ниязов<sup>1</sup>, Д. Н. Аристов<sup>1</sup>, В. Ю. Качоровский<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Отделение теоретической физики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

<sup>2</sup> Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН

Открытие топологических материалов представляет собой возможность создания новой области наноразмерных устройств – топологической электроники. Устройства на их основе будут лучше передавать сигнал и быть устойчивыми к дефектам при производстве. Они очень привлекательны для исследования когерентных квантовых явлений и создания квантовых компьютеров.

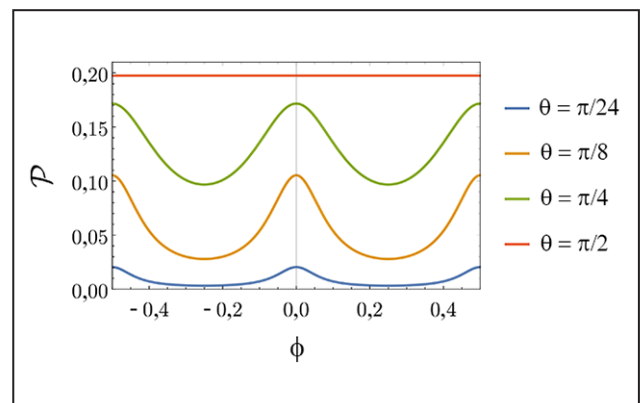
В данной научной работе исследовались двумерные топологические изоляторы. На краю таких материалов существуют одномерные проводящие состояния, в которых направление движения электрона однозначно связано с его проекцией спина (геликоидальные состояния). Немагнитные примеси не могут помешать движению электронов в таких состояниях из-за их топологической защиты, поэтому прохождение электронов происходит без диссипации.

Был теоретически исследован интерферометр Ааронова – Бома на основе геликоидальных краевых состояний (ГКС) двумерного топологического изолятора, исследована широкая область изменения температуры в системе, изучено влияние магнитных примесей на прохождение электронов.

Было показано, что при наличии магнитной примеси появляется квантовый вклад в коэффициенты прохождения электронов. Из-за эффекта Ааронова – Бома он быстро осциллирует при изменении магнитного потока, пронизывающего область, охватываемую ГКС. Такая чрезвычайно

резкая зависимость кондактанса и спиновой поляризации от магнитного потока открывает широкие возможности для приложений в области управляемой спиновой фильтрации (рис.) и чувствительных детекторов магнитных полей.

Также было продемонстрировано, что туннельный интерферометр на основе ГКС можно описать в терминах ансамбля, управляемых магнитным потоком кубитов. Число активных кубитов, участвующих в переносе заряда и спина, определяется отношением температуры к расстоянию между уровнями. Такой ансамбль кубитов может эффективно работать при высоких температурах и использоваться для квантовых расчетов. Это открывает широкие возможности для высокотемпературных квантовых вычислений.



Поляризация электронного пучка на выходе геликоидального интерферометра с увеличением силы рассеяния на магнитной примеси

## Теория рамановского рассеяния света в нанопорошках неполярных кристаллов

О. И. Утесов<sup>1</sup>, А. Г. Яшенкин<sup>1</sup>, С. В. Коняхин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Отделение теоретической физики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет им. Ж. И. Алферова РАН

Актуальная с прикладной точки зрения и активно развивающаяся область науки – физика и физическая химия наночастиц. Применения наночастиц разнообразны и включают создание композитных материалов, оптику, квантовые вычисления, возобновляемую энергетику, визуализацию процессов в биологических системах, адресную доставку лекарственных средств в организм и др. Важную роль в исследованиях играют кристаллические наночастицы, в т. ч. полупроводниковые и углеродистые (в частности, наноалмазы), и квантовые точки. Для использования в науке и практике необходимы аттестация и стандартизация размера, формы, фазового состава и морфологии поверхности частиц. Делается это с помощью довольно затратных (и зачастую разрушающих) методов просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения, порошковой рентгеновской дифракции, динамического рассеяния света, атомно-силовой микроскопии и т. п., поэтому крайне заманчиво научиться регулярно применять для аттестации частиц рамановскую спектроскопию, являющуюся простым, дешевым и очень мощным оптическим неразрушающим методом, позволяющим исследовать элементарные возбуждения кристаллов, в особенности фононы.

В текущем году было завершено построение микроскопической теории рамановских спектров неполярных кристаллических наночастиц, сформулированной в двух практически эквивалентных формах: атомистической (DMM-BPM) и континуальной (EKFG). Развита теория, включающая микроскопическое квантовое описание уширения линий оптических фононов за счет их рассеяния на дефектах кристалла, позволила

интерпретировать рамановский спектр гораздо точнее и лучше, чем это делалось в рамках общепринятой феноменологической модели фононного конфайнмента (PCM). Это дало возможность положительно разрешить поставленный вопрос об определении среднего размера наночастиц, дисперсии функции их распределения по размерам, форме (параметризованной числом граней кристаллита) и степени внутренней и поверхностной дефектности кристаллитов исходя из рамановского спектра ансамбля (порошка или суспензии) наночастиц.

Алгоритм расчета рамановского спектра нанопорошка состоит из нескольких этапов.

1. Определение спектра и волновых функций оптических фононных мод наночастицы. Для этих целей можно использовать либо атомистический метод динамической матрицы, либо его континуальный аналог – уравнение Клейна – Фока – Гордона в евклидовом пространстве с граничными условиями Дирихле.

2. Расчет интенсивности рассеяния света фононными модами в рамках стандартной модели поляризации связей или ее континуальной версии. Важный результат – моды делятся на два типа: рамановски активные и «молчащие».

3. Уширение фононных линий. Показано, что за конечную ширину линий в наноалмазах отвечают дефекты кристаллической структуры, и теоретически объяснена эмпирическая  $1/L$ -зависимость ширины линий от размера частицы.

4. Учет функции распределения частиц по размерам. Предложен метод, позволяющий добиваться существенного ускорения расчетов без потери качества за счет использования скейлинговых свойств EKFG-подхода.

1. Utesov O.I., Yashenkin A.G., Koniakhin S.V. // J. Phys. Chem. C. 2021. V. 125. No. 33. P. 18444.

2. Yashenkin A.G., Utesov O.I., Koniakhin S.V. // J. Raman Spectrosc. 2021. V. 52. Iss. 11. P. 1847.



# Подход среднего поля для описания скирмионных решеток в центросимметричных фрустрированных антиферромагнетиках

О. И. Утесов

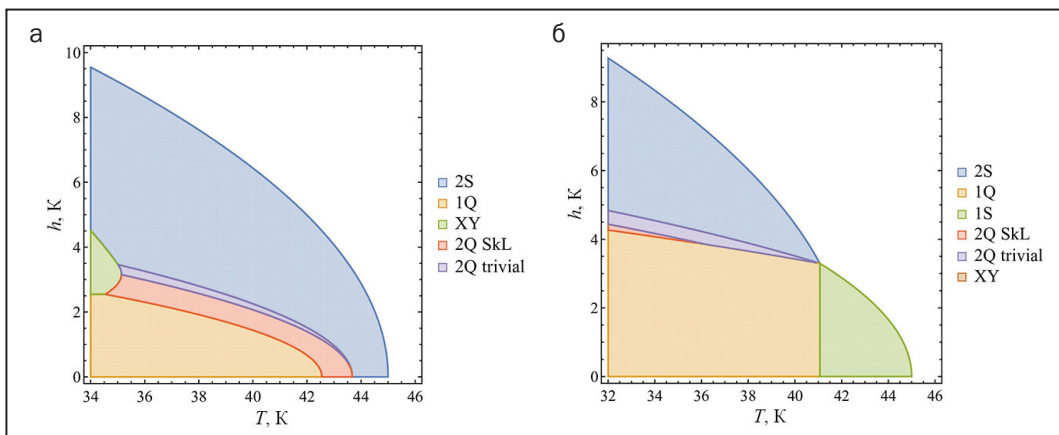
Отделение теоретической физики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Скирмионы и их упорядоченные массивы – скирмионные решетки – являются одними из наиболее широко и интенсивно исследуемых объектов в физике конденсированных сред. Важно, что этот интерес обусловлен не только разнообразием связанных физических явлений, но и возможностью практического применения данных структур. Последняя основана на нетривиальных топологических свойствах скирмионов.

Хорошо известно, что топологически нетривиальные спиновые структуры могут быть стабилизированы в нецентросимметричных спиральных магнетиках со взаимодействием Дзюлошинского – Мория, например в MnSi. Однако скирмионные решетки могут быть стабильными и в центросимметричных фрустрированных антиферромагнетиках высокой симметрии. В случае тетрагональной симметрии, помимо простых фаз, модулированных в одном направлении, возможно также появление фаз с двумя векторами модуляции, что наблюдалось экспериментально в веществе GdRu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>.

В данной работе был развит подход среднего поля для описания высокотемпературной части фазовой диаграммы тетрагонального фрустриро-

ванного магнетика с дипольными силами. Было показано, что в модели, учитывающей только обменное и магнетодипольное взаимодействие при понижении температуры, фаза с двумя векторами модуляции (суперпозиция двух винтовых спиралей) возникает как промежуточная (параметры модели были оценены для вещества GdRu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>). При этом с точки зрения топологических свойств она представляет собой мерон-антимеронную решетку со средним топологическим зарядом, равным нулю. Во внешнем магнитном поле эта фаза становится топологически нетривиальной квадратной скирмионной решеткой, которая, как показано в исследовании, является термодинамически стабильной в определенной области фазовой диаграммы (рис. а). В случае дополнительной анизотропии типа «легкая ось» достаточной силы была получена фазовая диаграмма, показанная на рис. б. Она хорошо описывает основные экспериментальные наблюдения в GdRu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>. Стоит отметить, что развитый подход сформулирован в простом аналитическом виде и может быть легко применен для описания фазовых диаграмм других веществ.



Фазовые диаграммы, полученные в рамках подхода среднего поля, развитого в данной работе

## Обобщенные релятивистские псевдопотенциалы для легких элементов

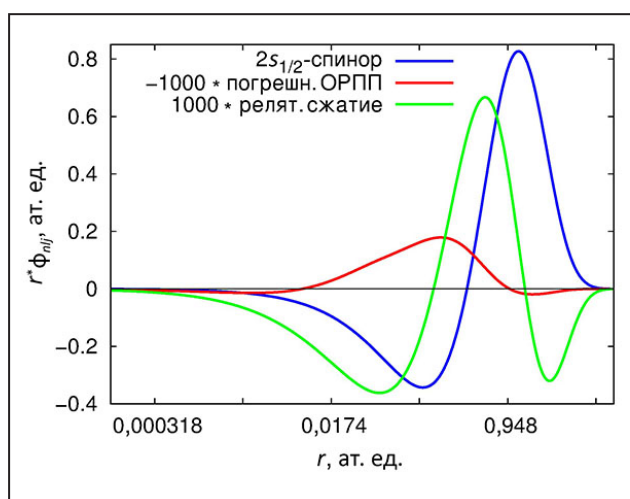
Н. С. Мосягин, А. В. Олейниченко, А. В. Зайцевский, А. В. Титов  
Отделение перспективных разработок НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

В 2021 г. было завершено построение нового поколения обобщенных релятивистских псевдопотенциалов (ОРПП) «пустых атомных островов» для элементов двух первых периодов таблицы Менделеева, предназначенных для прецизионного релятивистского моделирования электронной структуры и физико-химических свойств их соединений. Эти ОРПП предполагают, как и в случае стандартных (нерелятивистских) полнорасчетных расчетов, явное описание всех электронов атома, и их роль сводится исключительно к имитации релятивистских эффектов как одноэлектронных, так и двухэлектронных (брейтовских), как скалярных, так и зависящих от спина.

От стандартных методов описания таких эффектов новый подход отличают возможность совместного использования с моделью ОРПП тяжелых атомов и значительно более высокая экономичность. Как показано на рисунке, метод ОРПП позволяет с хорошей точностью воспроизвести общеизвестное релятивистское сжатие s-орбитали. В валентной области (области

последнего максимума  $2s_{1/2}$ -спинора, изображенного *синей линией*), которая наиболее важна для химической связи и «валентных» типов свойств (например, дипольного момента), погрешность ОРПП (*красная линия*) пренебрежима даже по сравнению с весьма небольшим релятивистским сжатием (*зеленая линия*).

Построенные ОРПП уже успешно применены в НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ и Московском государственном университете им. М. В. Ломоносова при расчете энергетических и радиационных свойств возбужденных электронных состояний молекулы монооксида углерода CO. CO – вторая по распространенности двухатомная молекула (после  $H_2$ ) во Вселенной. Подробные данные о ее спектроскопических свойствах необходимы для точного моделирования и мониторинга астрофизических, экологических и атмосферных явлений. Для многих приложений критически важной оказывается информация о запрещенных в нерелятивистском приближении (синглет-триплетных) электронных переходах CO.



Нормированная радиальная часть большой компоненты  $2s_{1/2}$ -спинора (по оси абсцисс использован логарифмический масштаб). Умноженное на 1000 релятивистское сжатие для этой орбитали (полученное как разница между релятивистским и нерелятивистским расчетами). Умноженная на  $-1000$  погрешность ее воспроизведения в расчете с помощью обобщенных релятивистских псевдопотенциалов (полученная как разница между расчетами с гамильтонианом Дирака – Кулона – Брейта и с обобщенными релятивистскими псевдопотенциалами)

1. Mosyagin N.S., Oleynichenko A.V., Zaitsevskii A.V. et al. // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf. 2021. V. 263. P. 107532.
2. Мосягин Н. С., ..., Титов А. В., Зайцевский А. В. // Сб. тезисов XXXIII Симпозиума «Современная химическая физика». М.: Доблесть, 2021. С. 120.

## Критическая неабелева вихревая трубка и голография для теории «маленькой» струны

Е. А. Иевлев, А. В. Юнг

Отделение теоретической физики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

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

Далее было показано, что неабелева вихревая струна в четырехмерной  $N = 2$  суперсимметричной КХД с калибровочной группой  $U(N = 2)$  и  $N_f = 4$ -ароматами кварков ведет себя как критическая суперструна. Это происходит из-за того, что шесть ориентационных и размерных модулей струны объединяются с четырьмя трансляционными и образуют десятимерное пространство, необходимое для критической суперструны. Спектр струнных состояний интерпретируется как спектр адронов в четырехмерной  $N = 2$  суперсимметричной КХД.

Эти состояния были найдены при помощи эквивалентности критической струны на конифолде и некритической струны на полубесконечной «сигаре», описываемой моделью Весса – Зумино – Новикова – Виттена с группой  $SL(2, \mathbf{R})/U(1)$ . Ранее был найден безмассовый гипермультиплет, отвечающий модулю комплексной структуры конифолда – шестимерного многообразия Калаби – Яу, на котором живет неабелева струна, а также низшие массивные состояния струны вплоть до спина 2. Все найденные состояния оказались барионами.

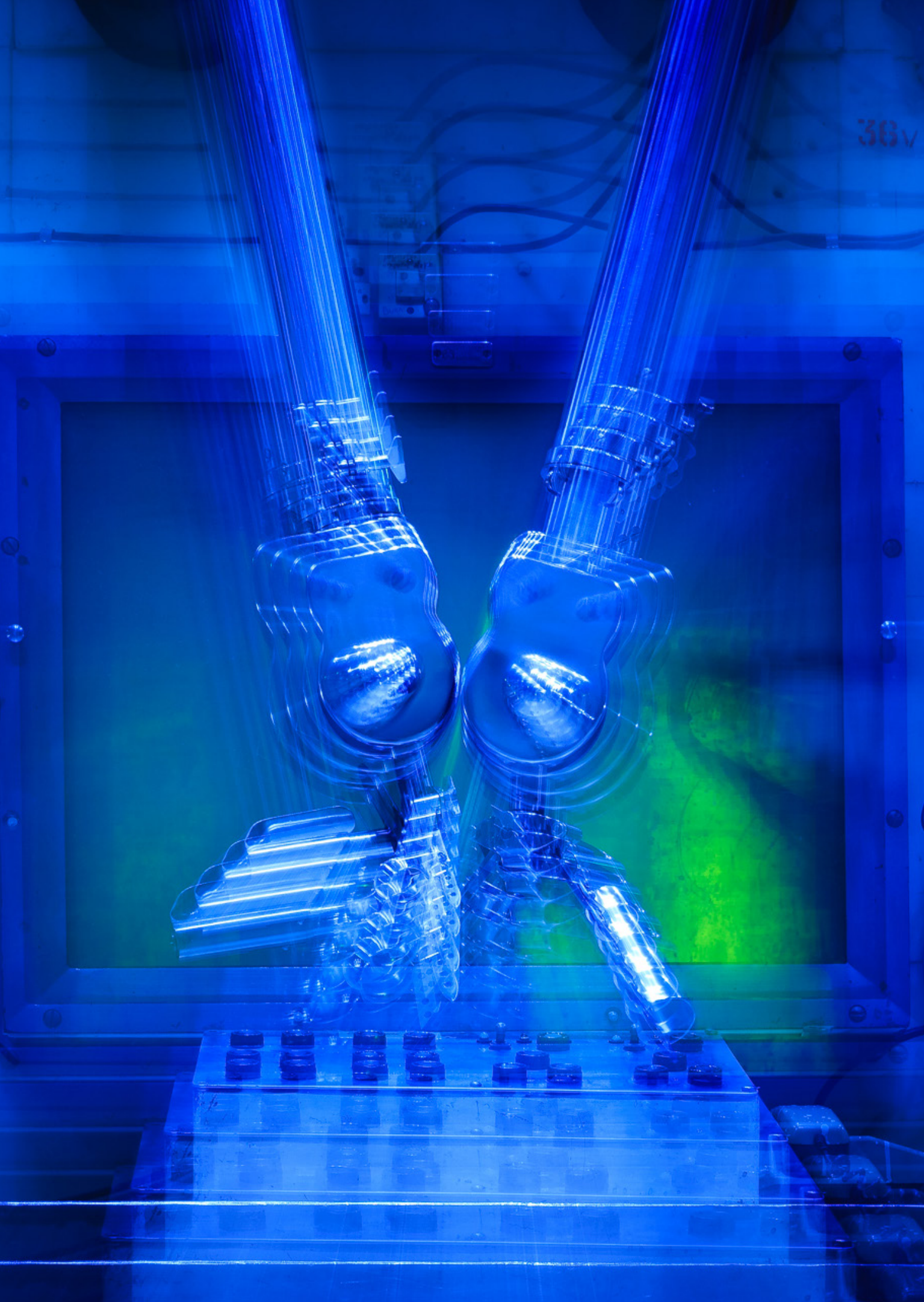
В данной работе ставится цель изучить эффективные взаимодействия адронных состояний. Для этого рассматриваются корреляционные функции нормированных вертексных операторов на  $SL(2, \mathbf{R})/U(1)$ -сигаре. Сигара представляет собой дополнительные измерения (к четырем измерениям «нашего» пространства). То, что операторы нормируемые, означает, что волновые функции, отвечающие этим состояниям, хорошо убывают вдоль сигары. Таким образом, эти состояния локализованы вблизи кончика сигары и тем самым действительно представляют собой физические состояния (адроны), живущие в четырехмерии.

Помимо прочего, при изучении корреляционных функций были определены каналы распада адронных состояний в зависимости от их квантовых чисел.

В работе также производится сравнение подхода к дуальности между калибровочной и струнной теориями, основанного на солитонной струне с голографической дуальностью типа AdS/CFT для теорий «маленькой струны». Такая дуальность для «маленькой струны» связывает корреляционные функции операторов вне массовой поверхности в теории поля с корреляционными функциями ненормируемых вертексных операторов на сигаре.

Было показано, что в большинстве каналов голографический подход действительно работает, потому что нормируемые и ненормируемые вертексные операторы с одинаковыми конформными размерностями связаны друг с другом отражением от кончика сигары. Однако оказывается также, что голография не работает для легчайших адронов с данным барионным зарядом.





## Исследования с использованием нейтронов, фотонов и мюонов

- 46 Поиск новых межнуклонных взаимодействий в рассеянии нейтронов на ядре
- 47 Сечение деления  $^{236}\text{U}$  нейтронами с энергией 1–200 МэВ и угловые распределения осколков
- 48 Дальний магнитный порядок в  $\text{Li}_2\text{MnGeO}_4$ , обусловленный короткодействующими спиновыми корреляциями
- 50 Исследования спин-волновой динамики и магнитных структур в мультиферроиках-ферроборатах с помощью рассеяния нейтронов
- 52 Магнитная структура соединения  $\text{Mn}_{0.9}\text{Fe}_{0.1}\text{Ge}$  в условиях квазигидростатического давления
- 53 Исследование феррожидкости с трехпроцентной концентрацией наночастиц  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  с помощью поляризованных мюонов

## Поиск новых межнуклонных взаимодействий в рассеянии нейтронов на ядре

В. В. Воронин, В. В. Федоров, Д. Д. Шапиро

Отделение нейтронных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

В настоящее время известны и достаточно хорошо изучены четыре фундаментальных взаимодействия, однако в рамках расширения Стандартной модели обсуждается возможное существование и ведется активный поиск новых сил, которые могут помочь в решении ряда открытых проблем. Эти силы могут быть как спинзависимыми, так и спиннезависимыми.

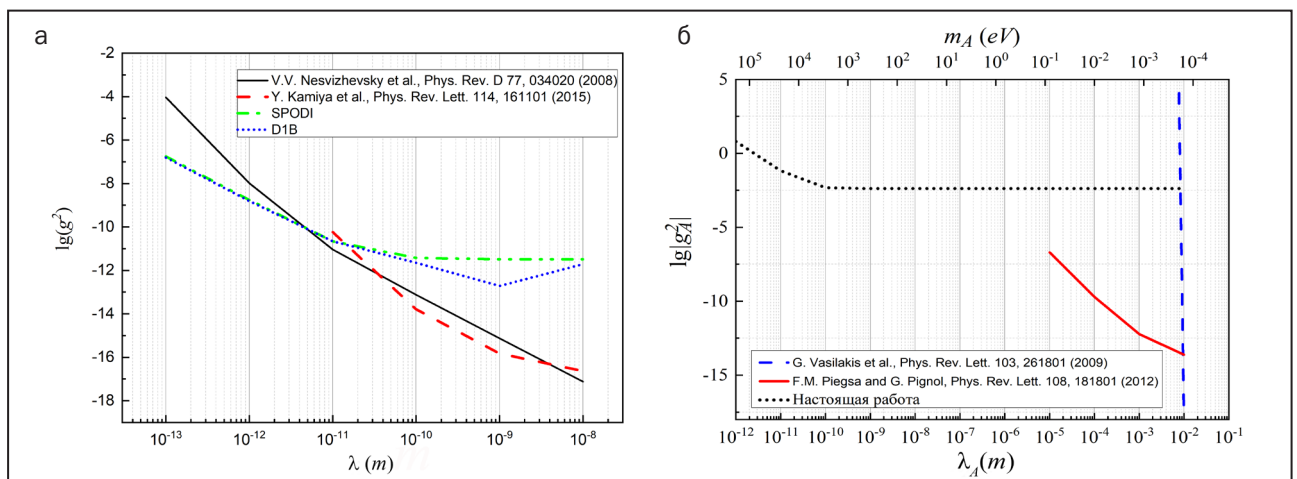
Для установления ограничений на константу связи спиннезависимого взаимодействия  $g$  нами было предложено использовать порошковую дифракцию нейтронов на кремнии. Суть метода состоит в исследовании зависимости амплитуды рассеяния кремния от переданного импульса.

В рамках настоящей работы был проведен расчет, показывающий состоятельность предложенной идеи. Из калибровочных данных дифрактометров SPODI (FRM II, Мюнхен, Германия) и D1B (ИЛЛ, Гренобль, Франция) были получены ограничения на  $g$  в зависимости от радиуса взаимодействия  $\lambda$ . Показано, что они находятся на уровне лучших существующих значений (рис. а).

Для улучшения ограничений нами был проведен эксперимент на дифрактометре D20 (ИЛЛ, Гренобль, Франция), где в качестве образца использовался калибровочный стандарт кремния NIST 640f массой 1,27 г. Измерения проводились при двух длинах волн – 1,3 и 2,4 Å, при четырех температурах – 4, 6, 77 и 300 К – на каждой длине волны. В настоящее время идет обработка полученных данных.

Для установления ограничений на константу связи спинзависимого взаимодействия  $g_A$  было предложено использовать результаты эксперимента по прохождению нейтрона через нецентросимметричный совершенный кристалл вблизи брэгговского отражения.

Существование подобного взаимодействия должно приводить к вращению спина нейтрона на некоторый угол, который и измерялся в эксперименте. Полученные ограничения оказались наилучшими в диапазоне радиусов взаимодействия  $\lambda_A = 10^{-12} - 10^{-5}$  м (рис. б).



Ограничения на  $g$  в зависимости от  $\lambda$  (а) и на  $g_A$  в зависимости от  $\lambda_A$  (б). Разрешенная область находится под линиями



## Сечение деления $^{236}\text{U}$ нейтронами с энергией 1–200 МэВ и угловые распределения осколков деления

А. С. Воробьев<sup>1</sup>, А. М. Гагарский<sup>2</sup>, О. А. Щербаков<sup>1</sup>, Л. А. Вайшнене<sup>3</sup>, А. Л. Барабанов<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Отделение перспективных разработок НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

<sup>2</sup> Отделение нейтронных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

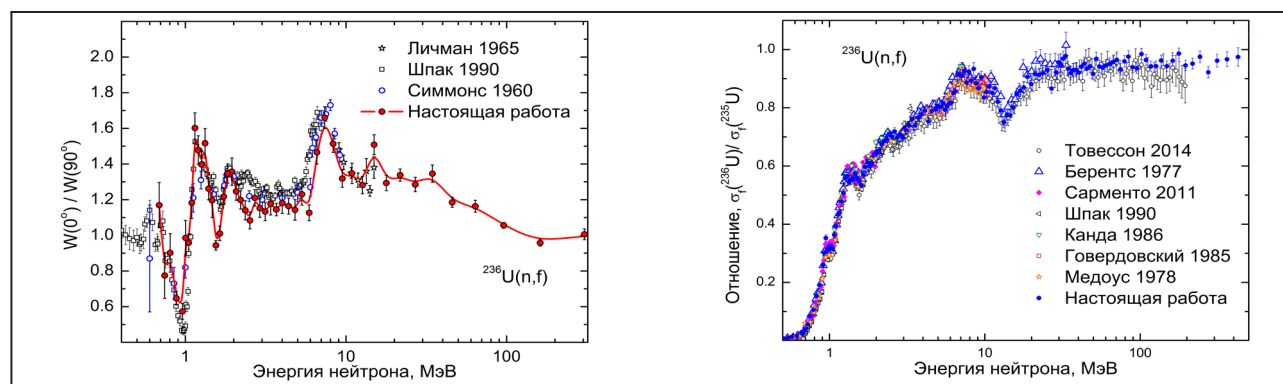
<sup>3</sup> Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

<sup>4</sup> НИЦ «Курчатовский институт»

Будущие планы развития атомной энергетики связаны с реализацией замкнутого топливного цикла и таких его систем, как ядерные энергетические установки (ЯЭУ) 4-го поколения и ADS-системы (Accelerated Driven System), т. е. ядерных реакторов с приводом от сильноточных протонных ускорителей с энергиями около 1 ГэВ. Создание таких систем призвано обеспечить безопасность и надежность ЯЭУ, их экономическую конкурентоспособность за счет меньшей стоимости жизненного цикла по сравнению с другими источниками энергии, а также более эффективное использование ядерного топлива при снижении количества ядерных отходов. Однако техническая реализация таких планов – это сложная и дорогостоящая задача, для решения которой необходимы надежные и точные ядерные данные. Важно отметить, что получение новых ядерных данных позволяет не только заполнить имеющиеся пробелы в экспериментальной базе данных, но и выполнить оценку, а также стимулирует создание

теоретических моделей, в результате чего разрабатываются расчетные коды, применяемые как для анализа результатов экспериментов, так и для инженерно-технических расчетов ЯЭУ.

В НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ на спектрометре ГНЕЙС, созданном на базе СЦ-1000, проведены измерения сечения деления и угловых распределений осколков деления ядра  $^{236}\text{U}$  при взаимодействии с нейтронами с энергией от 1 до 200 МэВ. Результаты представлены на рисунке. Отметим, что угловые распределения осколков деления  $^{236}\text{U}$  в области энергий нейтронов выше 15 МэВ получены впервые. В настоящее время ведется теоретический анализ полученных данных. Выполненные измерения полностью перекрывают как диапазон 1–20 МэВ (реакторный спектр), востребованный в современных ядерных технологиях и технологиях ближайшего будущего, так и наиболее трудную с экспериментальной точки зрения область 20–200 МэВ, критически важную для развития перспективных ADS-технологий.



Анизотропия угловых распределений осколков (слева) и сечения деления (справа)  $^{236}\text{U}$  в сравнении с данными других работ

1. Barabanov A.L., Vorobyev A.S., Gagarski A.M., Shcherbakov O.A., Vaishnene L.A. // Collect. Abstr. XXVIII Int. Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei. 2021. P. 104.
2. Barabanov A., Vorobyev A., Gagarski A., Shcherbakov O., Vaishnene L. // EPJ Web Conf. 2021. V. 256. P. 00003.

## Дальний магнитный порядок в $\text{Li}_2\text{MnGeO}_4$ , обусловленный короткодействующими спиновыми корреляциями

А. Н. Коршунов, А. И. Курбаков, А. Е. Сулопарова

Отделение нейтронных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

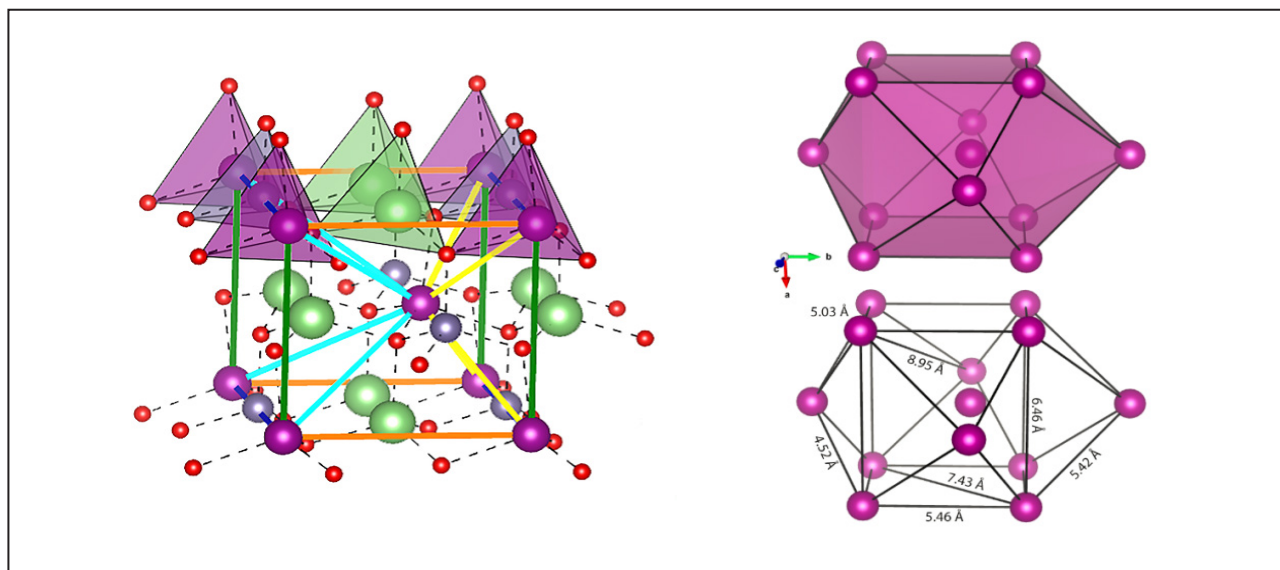
Данная работа посвящена одному из самых актуальных направлений в современной физике конденсированного состояния – исследованию магнетизма фрустрированных квазидвумерных оксидов с тригональной сверхструктурой магнитных ионов. С помощью рассеяния поляризованных и неполяризованных нейтронов изучены дальнедействующее магнитное упорядочение и короткодействующие спиновые корреляции в слоистом нецентросимметричном ортогерманате  $\text{Li}_2\text{MnGeO}_4$ .

Исследуемое в данной работе соединение принадлежит семейству  $A_2\text{MXO}_4$  ( $A = \text{Li, Na, Ag; } M = \text{Be, Mg, Mn, Fe, Co, Zn, Cd; } X = \text{Si, Ge}$ ), которое весьма разнообразно по типам структур и, главное, по демонстрируемым свойствам. Такой состав, где отношение  $A : M^{+2}$  ( $M$  в данном случае – переходный металл, ПМ) составляет  $2 : 1$ , т. е. в идеале два электрона на один ПМ считается в электрохимии очень перспективным для использования.

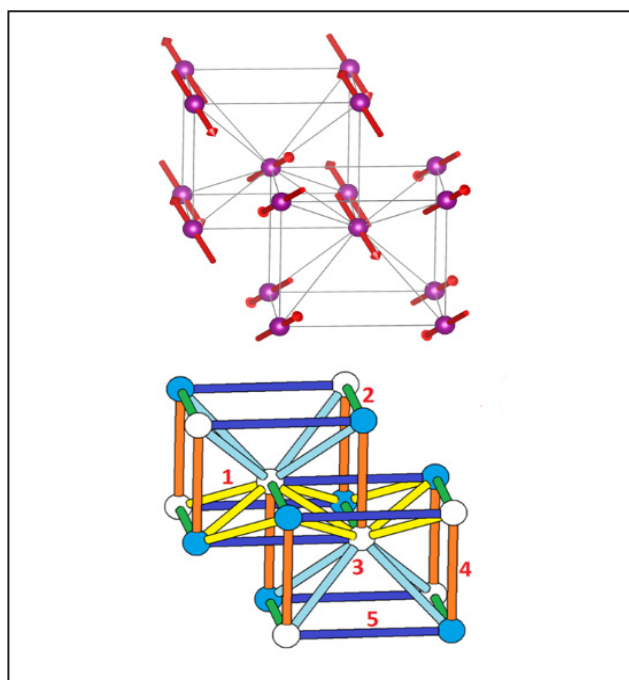
Совместное ритвельдовское уточнение данных порошковой синхротронной (SpLine BM25, ESRF, Франция) и нейтронной дифракции (дифрактометры HRPT и DMC, PSI, Швейцария) при комнатной температуре в пределах пространственной группы  $Pmn2_1$  позволило описать детали кристаллической структуры (рис. 1). В  $\text{Li}_2\text{MnGeO}_4$  все тетраэдры катионов направлены в том же самом направлении, перпендикулярном кислородным плотно упакованным слоям, и структура нецентросимметрична, т. е. подразумевает возможности наличия интересных нелинейных физических свойств, а для многих родственных составов, например  $\text{Li}_2\text{MnSiO}_4$ , половина тетраэдров имеет противоположную ориентацию. В результате параметр  $b$  удваивается, структура становится центросимметричной.

Низкотемпературные нейтронные измерения свидетельствуют об установлении в системе дальнего антиферромагнитного (АФМ) порядка с вектором распространения  $\mathbf{k} = (1/2 \ 1/2 \ 1/2)$  ниже  $T_N \approx 8$  К, что было отмечено по появлению дополнительных магнитных отражений. Симметричный анализ и последующий полнопрофильный анализ нейтронных экспериментальных данных определили спиновую структуру основного состояния в магнитной пространственной группе  $C_{2c}$  (# 9,41) (рис. 2). Она представляет собой неколлинеарное упорядочение атомов Mn с уточненным магнитным моментом  $4,9 \mu_B / \text{Mn}^{2+}$  при  $T = 1,7$  К, что соответствует насыщенному значению для высокоспиновой конфигурации  $S = 5/2$ .

Диффузное магнитное рассеяние было обнаружено на нейтронограммах при температурах несколько выше  $T_N$ . Его температурная эволюция была детально исследована с помощью рассеяния поляризованных нейтронов с последующим XYZ-поляризационным анализом на времяпролетном нейтронном спектрометре DNS (MLZ, Германия). Обратное моделирование данных диффузного рассеяния методом Монте-Карло показало в  $\text{Li}_2\text{MnGeO}_4$  развитие ближнего упорядочения, симметрия которого соответствует дальнему магнитному состоянию ниже  $T_N$ . Реконструированная радиальная спиновая парная корреляционная функция  $S(0) \cdot S(r)$  показала преобладающую роль АФМ-корреляций. Оказалось, что спиновые корреляции значимы только для ближайших магнитных соседей и практически исчезают при  $r \sim 12 \text{ \AA}$  при 10 К. Температурная зависимость диффузного рассеяния предполагает локальное упорядочение задолго до магнитного фазового перехода. В результате представлена исчерпывающая картина постепенного формирования магнитного упорядочения в  $\text{Li}_2\text{MnGeO}_4$ .



**Рис. 1.** Связи между магнитными ионами  $Mn^{2+}$ , указывающие на основные пути спинового обмена (слева). Уточненная кристаллическая структура  $Li_2MnGeO_4$  с тетраэдрическим кислородным окружением (красные шары). Пурпурные, зеленые и серые шары показывают позиции Mn, Li и Ge соответственно в пространственной группе  $Pmn2_1$ . Все тетраэдры граничат друг с другом только через вершины. Общий вид искаженного кубооктаэдра, образованного 12 ближайшими соседями Mn (справа). На изображении снизу указаны основные расстояния между магнитными атомами при  $T = 1,7$  К



**Рис. 2.** Модели спиновой структуры  $Li_2MnGeO_4$  при  $T = 1,7$  К. Неколинейное упорядочение с использованием магнитной пространственной группы  $S_6c$  (сверху). Обменные пути коллинеарного спинового порядка, ожидаемого из DFT-расчетов; затененные и незатененные сферы представляют позиции  $Mn^{2+}$  со спинами вверх и вниз соответственно (снизу)



## Исследования спин-волновой динамики и магнитных структур в мультиферроиках-ферроборатах с помощью рассеяния нейтронов

И. В. Голосовский<sup>1</sup>, Б. З. Малкин<sup>2</sup>, А. А. Мухин<sup>3</sup>, М. Н. Попова<sup>4</sup>, М. Boehm<sup>5</sup>, А. Gukasov<sup>6</sup>

<sup>1</sup> Отделение нейтронных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

<sup>2</sup> Казанский (Приволжский) федеральный университет

<sup>3</sup> Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН

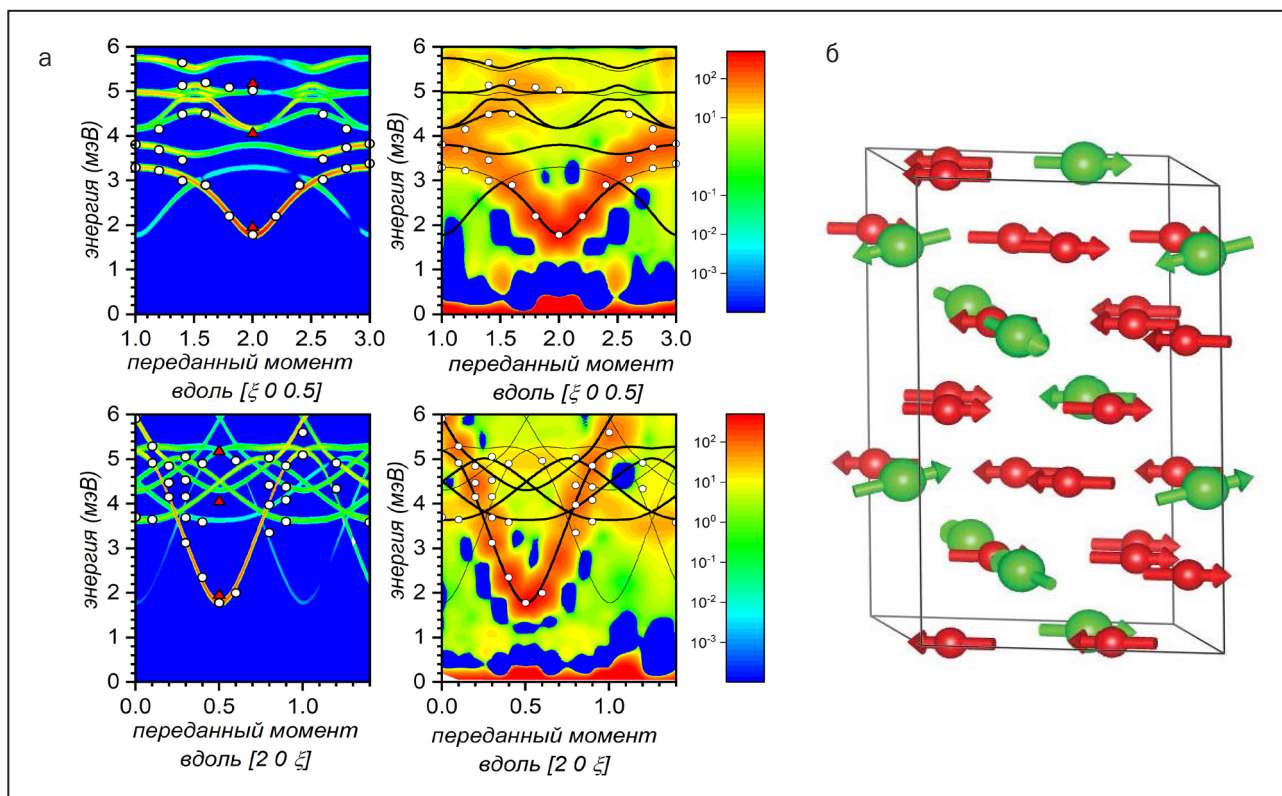
<sup>4</sup> Институт спектроскопии РАН

<sup>5</sup> Institut Laue–Langevin, France

<sup>6</sup> Laboratoire Léon Brillouin, France

В НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ продолжаются исследования мультиферроиков – материалов, в которых можно управлять магнитным порядком приложением электрического поля и, наоборот, индуцировать электрическую поляризацию магнитным полем, что открывает возможность практического приложения. Объекты исследований – мультиферроики-ферробораты. Интерес к этим материалам обусловлен сильной

зависимостью электрической поляризации от приложенного магнитного поля, что важно для практического применения. В этих соединениях реализуется либо магнитная структура типа «легкая плоскость» с моментами в плоскости, как в  $\text{NdFe}_3(\text{BO}_3)_4$ , либо структура «легкая ось» с моментами вдоль оси, как в  $\text{TbFe}_3(\text{BO}_3)_4$ , поэтому в смешанной системе  $\text{Nd}(\text{Tb})\text{Fe}_3(\text{BO}_3)_4$  следует ожидать сложных неколлинеарных магнитных



Пример спин-волновых спектров в  $\text{TbFe}_3(\text{BO}_3)_4$  для двух разных направлений (а): слева – расчет, справа – эксперимент. Магнитная структура типа «легкая плоскость» в  $\text{HoFe}_3(\text{BO}_3)_4$  (б)

структур. Действительно, с помощью упругого рассеяния на монокристаллах была обнаружена слабая неколлинеарность магнитной структуры, которая обусловлена взаимодействием Дзялошинского – Мория. Этот феномен может быть назван «слабым антиферромагнетизмом» по аналогии с хорошо известным «слабым ферромагнетизмом».

Эксперименты по неупругому рассеянию нейтронов показали сложную динамику магнитных возбуждений. Оказалось, что адекватное описание спин-волновых спектров (рис.) возможно только при учете большого числа обменных взаимодействий – до 12 координационных сфер. Из магнитных спектров определены величины обменных взаимодействий и параметров

анизотропии, причем обменное взаимодействие остается весьма заметным даже на очень больших расстояниях – до  $\sim 7 \text{ \AA}$ , что очень необычно.

В отличие от замещенной системы  $\text{Nd(Tb)Fe}_3(\text{BO}_3)_4$ , в ферроборате  $\text{HoFe}_3(\text{BO}_3)_4$  однозначно определить направление магнитных моментов при небольшом числе дифракционных рефлексов из нейтронографии не удается. Проблема была решена привлечением оптической спектроскопии высокого разрешения. Предложенная модель (см. рис.) была подтверждена измерениями на поляризованных нейтронах (flipping ratio) и согласуется с измеренными температурными зависимостями интенсивностей характерных рефлексов.

1. Golosovsky I.V., Mukhin A.A. et al. // PRB. 2021. V. 103. P. 214412.

2. Popova M.N., Golosovsky I.V., Gukasov A., Mukhin A.A., Malkin B.Z. et al. // PRB. 2021. V. 103. P. 094411.

## Магнитная структура соединения $Mn_{0,9}Fe_{0,1}Ge$ в условиях квазигидростатического давления

Е. В. Алтынбаев, С. В. Григорьев, Д. О. Сканченко

Отделение нейтронных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

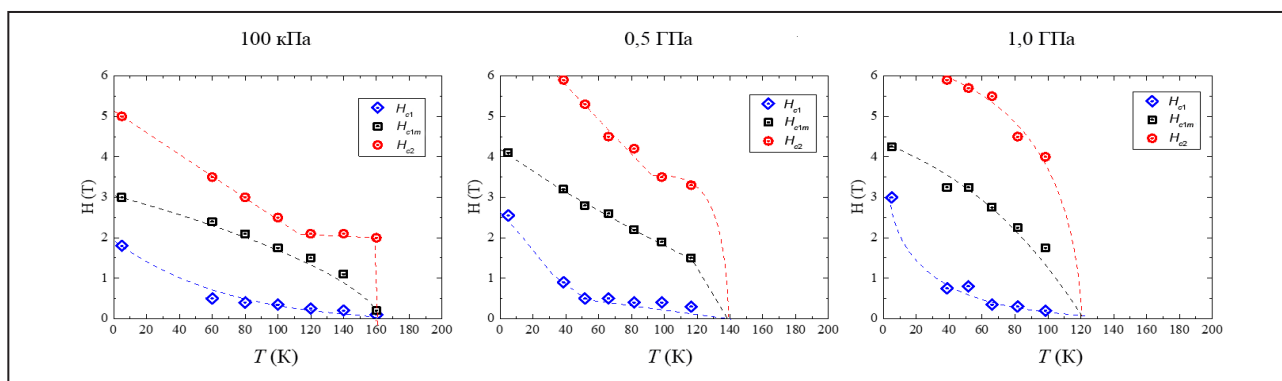
Методом малоуглового рассеяния нейтронов (МУРН) изучалась геликоидальная магнитная структура соединения  $Mn_{0,9}Fe_{0,1}Ge$  в условиях квазигидростатического давления до  $P = 1$  ГПа в широком диапазоне температур (5–300 К) и магнитных полей (0–5 Тл).

Измерения методом МУРН были выполнены на инструменте РА20 в Лаборатории им. Леона Бриллюэна (исследовательский реактор Orphée). В ходе исследования была разработана немагнитная ячейка высокого давления, которая соответствует стандартному положению образца и позволяет прикладывать давление до 1,2 ГПа. Небольшая модификация ячейки открывает возможность дальнейшего повышения давления до 2,5 ГПа.

В результате проведенных нами исследований была впервые построена фазовая диаграмма «поле – температура» ( $H-T$ ) для соединения  $Mn_{0,9}Fe_{0,1}Ge$  при различных давлениях вплоть до  $P = 1$  ГПа. Показано, что приложение давления при низких температурах приводит к процессу, обратному процессу замещения атомов Mn атомами Fe в соединении MnGe, а именно

к увеличению величин всех критических магнитных полей  $H_{c1}$ ,  $H_{c1m}$  и  $H_{c2}$  (рис.), что может свидетельствовать о стабилизации магнитной системы под воздействием внешнего давления, вызванное стремлением магнитной системы построить соизмеримую кристаллической магнитную структуру. Показано, что волновой вектор магнитной спирали увеличивается с ростом давления одновременно с уменьшением температуры магнитного упорядочения  $T_c$  со скоростью порядка 40 К/ГПа. Это может свидетельствовать о приближении магнитной системы к квантовому фазовому переходу в неупорядоченное состояние с ростом внешнего давления, который следует ожидать при приложении давления  $P = 4$  ГПа.

Поскольку замена атомов Mn на Fe в соединении  $Mn_{1-x}Fe_xGe$  изменяет как минимум два параметра, важных для стабилизации магнитной структуры, а именно концентрацию электронов и постоянную ячейки, применение высокого давления позволяет разделить эти две составляющие. Таким образом, удастся оценить влияние каждого процесса на эволюцию фазовой диаграммы «поле – температура».



Температурная зависимость критических полей, соответствующих началу процесса перехода поликристаллического образца в коническую фазу  $H_{c1}$  (а), окончанию процесса перехода в коническую фазу  $H_{c1m}$  (б) и переходу в ферромагнитную фазу  $H_{c2}$  (в) для соединения  $Mn_{0,9}Fe_{0,1}Ge$  при  $P = 100$  кПа, 0,5 ГПа, 1 ГПа соответственно



## Исследование феррожидкости с трехпроцентной концентрацией наночастиц $\text{CoFe}_2\text{O}_4$ с помощью поляризованных мюонов

С. И. Воробьев, А. Л. Геталов, Е. Н. Комаров, С. А. Котов, Г. В. Щербаков  
Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

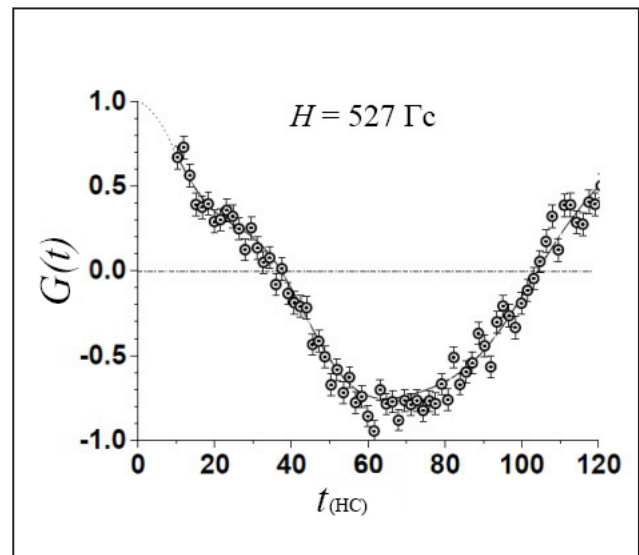
Магнитные жидкости на основе однодоменных магнитных наночастиц ферритов-шпинели, диспергированных в различных жидких средах, представляют определенный практический и научный интерес, обусловленный их особыми свойствами, которые вызваны наноразмерными эффектами. В настоящее время широко изучаются жидкости на основе однодоменных магнитных наночастиц ферритов-шпинели  $\text{MeFe}_2\text{O}_4$  (где  $\text{Me}$  – Cr, Mg, Fe, Co и Zn), диспергированных в различных жидких средах.

Исследования образца феррожидкости с трехпроцентной концентрацией наночастиц  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  были выполнены на  $\mu\text{SR}$ -установке, расположенной на выходе мюонного канала синхроциклотрона СЦ-1000 НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ. Пучок положительно заряженных мюонов со средним импульсом  $p_\mu = 90$  МэВ/с и импульсным разбросом  $\Delta p_\mu/p_\mu = 0,02$  (FWHM) имел продольную поляризацию  $P_\mu = 0,90\text{--}0,95$ .

Представлено экспериментальное исследование феррожидкости на основе магнитных наночастиц из молекул  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$ , диспергированных в  $\text{H}_2\text{O}$  с концентрацией наночастиц 3 %. В данном исследовании было определено, что структура и величина намагниченности феррожидкости зависят от вязкости самой жидкости. Показано, что при комнатной температуре (290 К) и внешнем магнитном поле 527 Гс наблюдаемая дополнительная намагниченность составляет  $\sim 20$  Гс.

В небольшой доле исследуемого образца ( $\sim 20$  %) наблюдается отрицательная намагниченность (диамагнетизм). При низкой температуре ( $\sim 30$  К) образец в магнитном поле ведет себя как парамагнетик.

Впервые экспериментально с помощью  $\mu\text{SR}$ -метода измерено магнитное поле внутри и в ближайшей окрестности наночастицы  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$ , которое составляет  $H = 1,96 \pm 0,44$  кГс. Таким образом, произведено прямое измерение намагниченности наноразмерного объекта.



Функция  $G(t)$  в ZFC-режиме во внешнем магнитном поле  $H = 527$  Гс; просуммированы спектры при температурах 26–100 К



# Исследования с использованием протонов и ионов. Физика нейтрино

- 56 Первое свидетельство распада бозона Хиггса в мюоны, полученное в эксперименте CMS
- 57 Первое прямое наблюдение квантово-хромодинамического эффекта «мертвый конус» в жестких протон-протонных взаимодействиях на Большом адронном коллайдере
- 59 Поиск частиц темной материи при ассоциативном рождении с калибровочным Z-бозоном в эксперименте ATLAS
- 60 Измерение поляризации одиночных топ-кварков и топ-антикварков в эксперименте ATLAS
- 61 Изучение характеристик редких распадов прелестных мезонов
- 62 Первое измерение зависимости от переданного импульса когерентного фоторождения  $J/\psi$  в ультрапериферических столкновениях ионов свинца на Большом адронном коллайдере и трехмерная картина ядерных глюонных распределений
- 64 Наблюдение обмена оддероном в данных по упругому  $pp$ - и  $p\bar{p}$ -рассеянию в экспериментах DO и TOTEM
- 65 Оболочечный эффект в зарядовых радиусах нейтронно-избыточных изотопов ртути
- 67 Эффект чередования форм в нейтронно-дефицитных изотопах висмута
- 68 Результаты эксперимента «Нейтрино-4» по поиску стерильного нейтрино
- 69 Прямое ультрапрецизионное измерение разности масс  $^{187}\text{Re} - ^{187}\text{Os}$  как пролог для определения эффективной массы антинейтрино
- 70 Прецизионные измерения  $\beta$ -спектра  $^{210}\text{Bi}$  для задач нейтринной физики
- 71 О спектре протонов в столкновениях тяжелых ионов  $^{12}\text{C} + ^9\text{Be}$  при энергиях 0,3–2,0 ГэВ/нуклон в рамках гидродинамического подхода

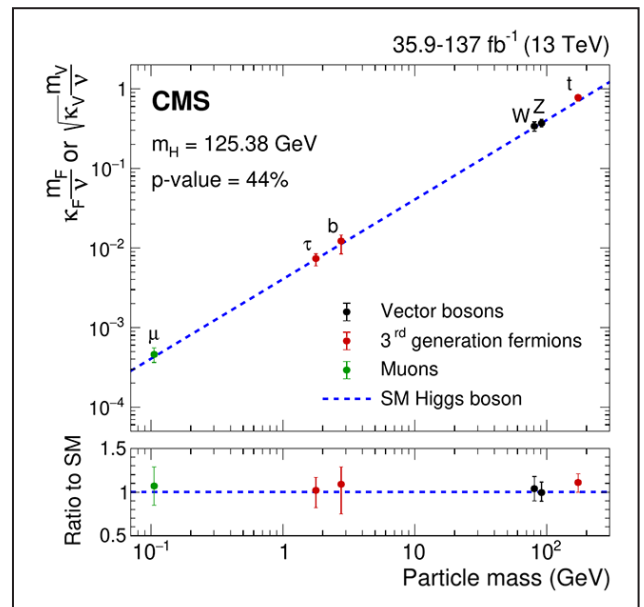


## Первое свидетельство распада бозона Хиггса в мюоны, полученное в эксперименте CMS

А. А. Воробьев, В. Т. Ким, Ю. М. Иванов, 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

Основные задачи современной физики высоких энергий – поиск эффектов новой физики и проверка Стандартной модели (СМ). Особенно актуальным является исследование свойств бозона Хиггса СМ, открытого в экспериментах ATLAS и CMS в 2012 г. Одно из ключевых направлений таких исследований – изучение симметрии поколений фермионов, т. е. кварков и лептонов. В настоящее время хорошо изучены распады бозона Хиггса во все три поколения кварков, но в случае лептонов наблюдался распад только в лептоны третьего поколения – тяжелые  $\tau$ -лептоны. Так как вероятность распада бозона Хиггса, согласно СМ, пропорциональна массе лептона, то число ожидаемых распадов в лептоны второго поколения – мюоны – должно быть более чем на порядок меньше, чем в тяжелые лептоны, что делает поиск такого распада сильно затрудненным.

При анализе данных Сеанса-2 Большого адронного коллайдера (2015–2018) с интегральной светимостью  $137 \text{ Фб}^{-1}$  при энергии 13 ТэВ, набранных в эксперименте CMS, было найдено первое свидетельство прямого распада бозона Хиггса в лептоны второго поколения  $H \rightarrow \mu\mu$  на уровне значимости  $3,0\sigma$ . Также было получено наиболее точное значение константы связи бозона Хиггса с мюонами. Сила сигнала составила  $1,19^{+0,40}_{-0,39}$  (стат.)  $^{+0,15}_{-0,14}$  (сист.). Полученные результаты находятся в пределах имеющихся неопределенностей в согласии с ожиданиями СМ (рис.).



Константы связи для фермионов ( $F$ ) и бозонов ( $V$ ) с коэффициентами модификации  $k_F$  и  $k_V$  и их отношения к ожидаемому в Стандартной модели в зависимости от массы частицы

Важнейшую роль в исследовании свойств бозона Хиггса СМ играет торцевой мюонный детектор (EMU) экспериментальной установки CMS, в разработку и создание которого весомый вклад внес НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ. Сотрудники Института активно участвуют в бесперебойной поддержке и модернизации мюонной системы EMU, а также в физическом анализе данных CMS.

## Первое прямое наблюдение квантово-хромодинамического эффекта «мертвый конус» в жестких протон-протонных взаимодействиях на Большом адронном коллайдере

Ю. Л. Докшицер<sup>1</sup>, С. И. Троян<sup>1</sup>, В. А. Хозе<sup>1</sup>, М. Б. Жалов<sup>2</sup>, В. В. Иванов<sup>2</sup>, Е. Л. Крышень<sup>2</sup>, М. В. Малаев<sup>2</sup>, В. Н. Никулин<sup>2</sup>, А. Ю. Рябов<sup>2</sup>, В. Г. Рябов<sup>2</sup>, Ю. Г. Рябов<sup>2</sup>, А. В. Ханзадеев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Отделение теоретической физики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

<sup>2</sup> Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Приоритетной фундаментальной проблемой в релятивистской ядерной физике и физике сильных взаимодействий в целом является исследование нового экстремального состояния материи – высокотемпературной кварк-глюонной плазмы (КГП), которая формируется в столкновении ультрарелятивистских ионов на адронных и ионных коллайдерах. Один из основных методов диагностики КГП – анализ потерь энергии релятивистскими кварками, которые рождаются в жестких партон-партонных взаимодействиях в зоне столкновения и пронизывают область сформированной КГП. Для оценки величины радиационных потерь энергии и транспортных коэффициентов, характеризующих вязкость кварк-глюонной среды, принципиально важен учет эффекта «мертвый конус» – подавления излучения глюонов релятивистскими тяжелыми кварками в узком конусе с зависящим от отношения массы кварка  $M$  к его энергии  $E$  угловым раствором относительно направления движения кварка. В пертурбативной квантовой хромодинамике (КХД) эффект «мертвый конус» был предсказан еще в 1991 г. Ю. Л. Докшицером, С. И. Трояном, В. А. Хозе (J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 1991. V. 17. P. 1602), однако до последнего времени его наблюдение во многих экспериментах было затруднено. Главным образом этому препятствовали сложности с восстановлением истинного направления движения кварка, точным определением размера конуса, а также с идентификацией и удалением из области конуса частиц, не связанных с излучением глюонов.

В эксперименте ALICE с участием сотрудников НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ проведено детальное изучение множественности адронов

в событиях жесткого протон-протонного взаимодействия с рождением адронных струй, инициированных массивными очарованными кварками. Прецизионные детекторы частиц в эксперименте ALICE, развитие методов обработки и анализа экспериментальных данных, детальное моделирование событий взаимодействия протонов при энергиях БАК с использованием существующих вычислительных мощностей позволили восстановить процесс излучения глюонов очарованным  $c$ -кварком. На рисунке 1 схематически показана такая реконструкция.

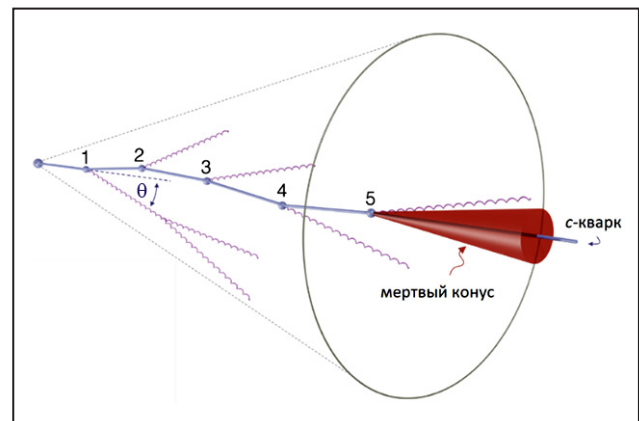
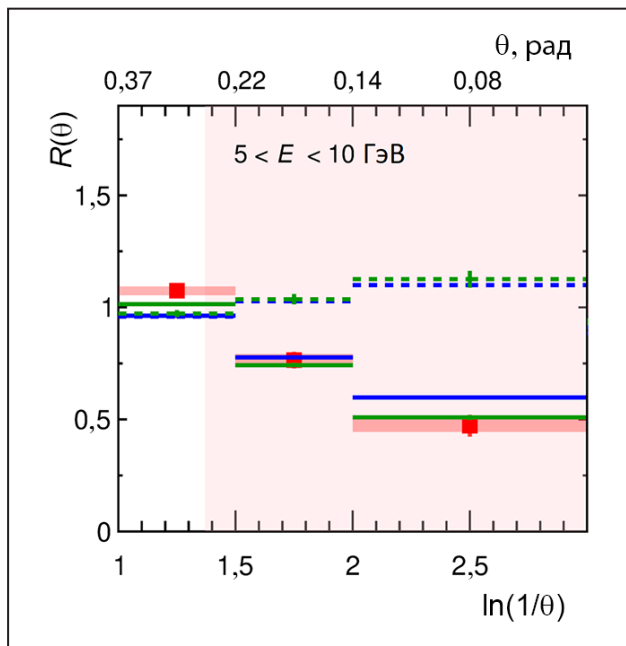


Рис. 1. Схема реконструкции процесса излучения глюонов очарованным  $c$ -кварком: сплошная линия – траектория движения  $c$ -кварка из вершины протон-протонного взаимодействия; волнистые – излученные глюоны

На рисунке 2 приведено извлеченное из данных отношение  $R(\theta)$  углового распределения излученных глюонов в струях, инициированных тяжелым очарованным кварком с энергией  $E$ , к аналогичному распределению в инклюзивных струях. В последнем случае эффект «мертвый конус» практически отсутствует, т. к. легкие кварки



**Рис. 2.** Отношение  $R(\theta)$  углового распределения излученных глюонов в струях, инициированных тяжелым очарованным кварком с энергией  $E$ , к аналогичному распределению в инклюзивных струях. Розовой полоской с красными маркерами показана величина отношения  $R(\theta)$ , извлеченная из данных в эксперименте ALICE, сплошными синими и зелеными линиями – значения  $R(\theta)$ , рассчитанные с помощью генераторов событий SHERPA и PYTHIA с учетом эффекта «мертвый конус», а пунктирными – без его учета

с  $M/E \ll 1$  и безмассовые глюоны с логарифмически растущей вероятностью излучают форвардные глюоны. Эти результаты демонстрируют двукратное подавление излучения глюонов в область малых углов тяжелым очарованным кварком по сравнению с излучением в ту же область легкими кварками.

Таким образом, в эксперименте ALICE удалось впервые не только надежно проявить теорети-

чески предсказанный эффект «мертвого конуса», но также, продемонстрировав, что кинематика рожденных адронов с разумной точностью воспроизводит кинематику КХД-партонов, убедительно подтвердить гипотезу локальной партон-адронной дуальности (LPHD), сформулированную теоретиками Ленинградского института ядерной физики им. Б. П. Константинова в 80-х гг. прошлого века.



## Поиск частиц темной материи при ассоциативном рождении с калибровочным Z-бозоном в эксперименте ATLAS

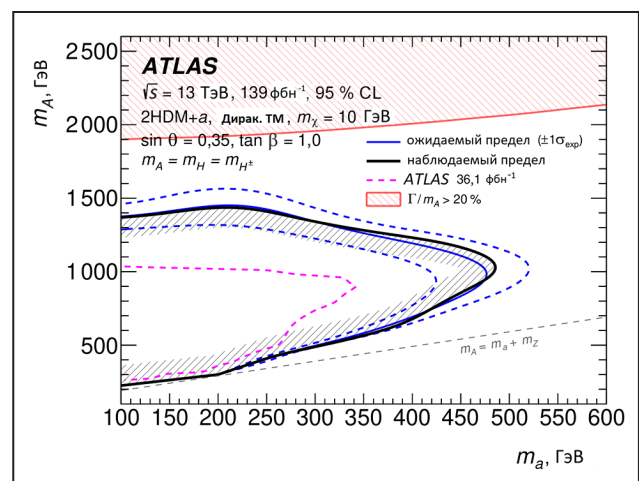
С. Г. Барсов, А. Е. Ежилов, М. П. Левченко, В. П. Малеев, Ю. Г. Нарышкин, Д. Пуджа, В. М. Соловьев, О. Л. Федин, В. А. Щегельский  
 Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, коллаборация ATLAS

Поиск частиц темной материи (ТМ) является одной из наиболее актуальных задач в экспериментах, проводимых на Большом адронном коллайдере (БАК). Существование ТМ следует из астрофизических наблюдений. Одним из кандидатов на роль частиц ТМ являются WIMP (слабовзаимодействующие массивные частицы). В эксперименте ATLAS был проведен поиск частиц ТМ в моно-Z-канале: в процессах с излучением калибровочного Z-бозона до взаимодействия кварков и его дальнейшим распадом на пару электронов или мюонов. Так как частицы ТМ не регистрируются, то признаком таких событий является наличие большой недостающей поперечной энергии. В ходе анализа данных учитывался вклад всех процессов Стандартной модели (СМ), которые являются физическим фоном.

По результатам обработки данных, накопленных во втором периоде работы БАК (2015–2018) при энергии  $pp$ -столкновений  $\sqrt{s} = 13$  ТэВ и полной светимости  $139 \text{ фб}^{-1}$ , отклонений от предсказаний СМ не обнаружено. Проведена интерпретация полученных результатов в модельно-независимом подходе с аксиально-векторным или векторным медиаторами и фиксированными значениями констант связи:  $g_\chi = 1,0$ ,  $g_q = 0,25$  и  $g_l = 0$ . Получены пределы на массу частиц ТМ в зависимости от массы медиатора (промежуточной частицы). При интерпретации результатов в рамках расширенной двухдублетной модели бозона Хиггса 2HDM + а с дополнительным псевдоскалярным медиатором, который является переносчиком взаимодействия между частицами СМ и частицами ТМ, получены

ограничения для значений параметров этой модели.

На рисунке показаны ограничения на массу медиатора  $m_a$  в зависимости от массы CP-четного псевдоскаляра  $m_A$ . Так, при  $m_a = 100$  ГэВ исключаются  $m_A$  в диапазоне от 200 ГэВ до 1,4 ТэВ, а при  $m_A = 1,05$  ТэВ интервал значений  $m_a$  – от 100 до 480 ГэВ. Кроме того, проведено сравнение с результатами, полученными в ходе экспериментов по прямому поиску частиц ТМ, в которых изучаются эффекты взаимодействия частиц ТМ с ядрами мишени. Верхние ограничения для сечений, полученные в эксперименте ATLAS, являются более строгими в области малых масс частиц ТМ:  $m_{\text{ТМ}} < 300$  ГэВ для спин-зависимых сечений и  $m_{\text{ТМ}} < 2$  ГэВ для спин-независимых сечений.



Ограничения для значений масс медиатора  $m_a$  в зависимости от массы псевдоскаляра  $m_A$ , полученные в эксперименте ATLAS при интерпретации в рамках модели 2HDM + а

## Измерение поляризации одиночных топ-кварков и топ-антикварков в эксперименте ATLAS

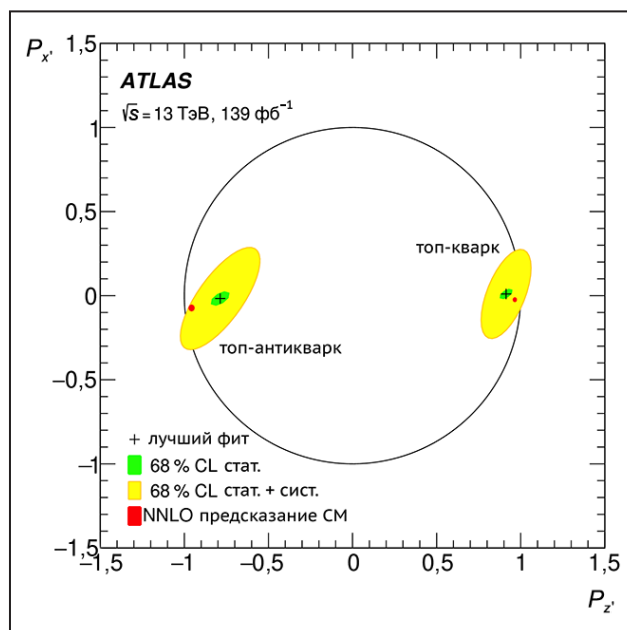
С. Г. Барсов, А. Е. Ежилов, М. П. Левченко, В. П. Малеев, Ю. Г. Нарышкин,  
Д. Пуджа, В. М. Соловьев, О. Л. Федин, В. А. Щегельский  
Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ,  
коллаборация ATLAS

Согласно предсказаниям Стандартной модели (СМ) рождение одиночных топ-кварков ( $t$ ) на адронных коллайдерах идет по трем модам: обмен виртуальным  $W$ -бозоном в  $t$ - или  $s$ -канале и ассоциативное рождение  $t$ -кварка и  $W$ -бозона. На Большом адронном коллайдере (БАК) в протон-протонных взаимодействиях  $t$ -канал является доминирующим процессом, который использовался для измерений, описанных в данной работе. В этом процессе легкий кварк из одного сталкивающегося протона взаимодействует с  $b$ -кварком из другого протона при помощи пространственноподобного виртуального  $W$ -бозона, рождая  $t$ -кварк и легкий кварк отдачи – так называемый спектаторный кварк.

Одиночные  $t$ -кварки и  $t$ -антикварки рождаются сильно поляризованными. Ожидается, что в  $t$ -канале  $t$ -кварки будут в основном поляризованы по направлению спектаторного кварка, а  $t$ -антикварки – в противоположном направлении. Согласно СМ ожидаемые величины поляризации  $t$ -кварков и  $t$ -антикварков по направлению спектаторного кварка составляют 0,90 и  $-0,86$  соответственно.

Измерение поляризации одиночных  $t$ -кварков и  $t$ -антикварков было проведено в эксперименте ATLAS на БАК на основе данных, накопленных при энергии сталкивающихся протонов 13 ТэВ с полной светимостью  $139 \text{ фб}^{-1}$ . Рассматривалась мода распада  $t \rightarrow Wb \rightarrow l^+vb$  для  $t$ -кварков и зарядово-сопряженная мода для  $t$ -антикварков. В качестве лептонов  $l^\pm$  рассматривались только электроны и мюоны. Вектор поляризации определялся в ортогональной системе координат, в которой ось  $z$  направлена по импульсу спектаторного кварка. Информация о спине  $t$ -квар-

ка передается продуктам его распада и поэтому может быть получена из их угловых распределений. В данном исследовании использовались угловые распределения лептонов  $l^\pm$ , поскольку их анализирующая способность близка к единице. Компоненты вектора поляризации определялись из аппроксимации распределения данных по переменной  $Q$ , зависящей от косинусов полярных углов импульсов лептонов  $l^\pm$  в заданной системе координат. На рисунке показаны измеренные  $x$ - и  $z$ -компоненты векторов поляризации. Измеренные  $z$ -компоненты составили  $0,91 \pm 0,10$  и  $-0,79 \pm 0,16$  для  $t$ -кварков и  $t$ -антикварков соответственно. Полученные результаты согласуются с предсказаниями СМ.



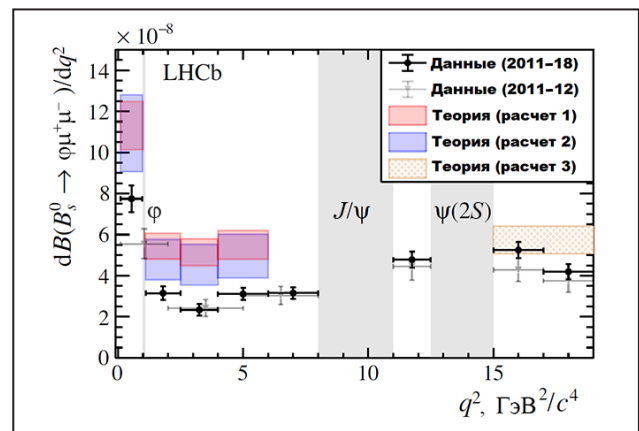
Измеренные  $x$ - и  $z$ -компоненты векторов поляризации  $t$ -кварков и  $t$ -антикварков в двумерном пространстве параметров поляризации

## Изучение характеристик редких распадов прелестных мезонов

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 Стандартной модели физики элементарных частиц распады прелестных мезонов с испусканием в конечном состоянии адрона и пары  $\mu^+\mu^-$  описываются при помощи петлевых диаграмм. Вероятность таких процессов существенно подавлена. При этом их дифференциальные характеристики могут быть рассчитаны теоретически с хорошей точностью. Отклонение экспериментально полученных результатов от теоретических предсказаний будет являться свидетельством существования новых фундаментальных частиц и взаимодействий, выходящих за рамки современной теории. Целью данной работы являлось изучение дифференциальных характеристик редких распадов  $B_s^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$ , а также поиск экспериментально не наблюдавшихся ранее распадов подобного типа.

Измерение угловых и массовых характеристик распада  $B_s^0 \rightarrow \phi(\rightarrow K^+K^-)\mu^+\mu^-$  производилось для набора данных, накопленных экспериментом LHCb в ходе первого и второго этапов работы Большого адронного коллайдера (2011–2018) при энергиях в системе центра масс взаимодействующих протонов 7, 8 и 13 ТэВ. Использование так называемых мультивариантных критериев отбора позволило выделить  $1530 \pm 52$  события-кандидата для этого распада. Для реконструированных частиц был проведен анализ массовых и угловых распределений. В частности, было получено распределение вероятности распада  $B_s^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$  в зависимости от  $q^2$  – квадрата массы мюонной пары (рис.). Также был исследован



Распределение вероятности распада  $B_s^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$  в зависимости от квадрата массы мюонной пары. Экспериментальные данные сравниваются с различными вариантами теоретического расчета: суммирование на световом конусе, а также численные (так называемые решеточные) расчеты в рамках квантовой хромодинамики

диапазон масс системы  $K^+K^-$ , располагающийся выше массы  $\phi$ -мезона.

Сравнение экспериментально полученных распределений  $d\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow \mu^+\mu^-)/dq^2$  с теоретическими расчетами показало расхождение между ними в области малых  $q^2$  на уровне 3,6 стандартного отклонения. Впервые обнаружен редкий распад  $B_s^0 \rightarrow f_2'(1525)\mu^+\mu^-$ . Работа выполнена при активном участии специалистов НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, внесших ключевой вклад в разработку и создание мюонной системы эксперимента LHCb, а также обеспечивших ее бесперебойную работу во время набора экспериментальных данных.

1. LHCb Collab., 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. // Phys. Rev. Lett. 2021. V. 127. P. 151801.
2. LHCb Collab., 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. 2021. V. 11. P. 43.



## Первое измерение зависимости от переданного импульса когерентного фоторождения $J/\psi$ в ультрапериферических столкновениях ионов свинца на Большом адронном коллайдере и трехмерная картина ядерных глюонных распределений

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

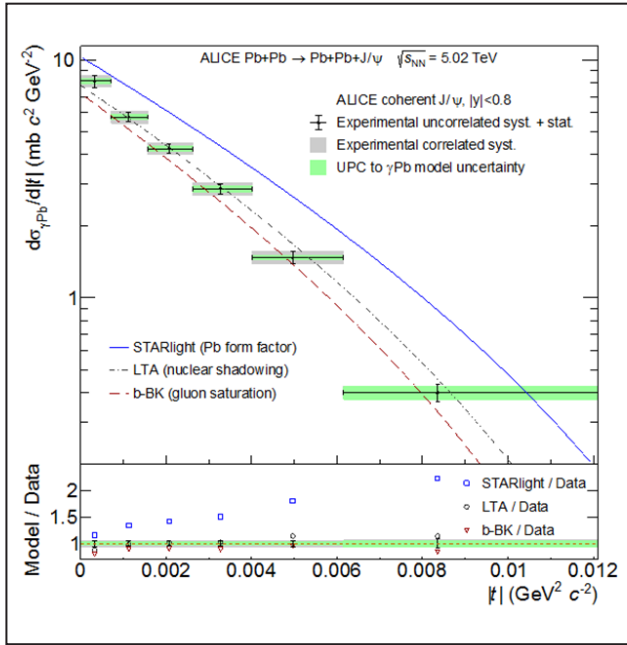
Важной частью физической программы измерений с тяжелыми ионами на Большом адронном коллайдере (БАК) является изучение ультрапериферических столкновений (УПС), отвечающих большим прицельным параметрам между сталкивающимися пучками ионов,  $b \gg R_A + R_B$  ( $R_A, R_B$  – радиусы сталкивающихся ядер). В этом случае короткодействующее сильное взаимодействие значительно подавлено и реакция осуществляется за счет излучения квазиреальных фотонов, которое обычно учитывается в рамках приближения эквивалентных фотонов Вайцзеккера – Вильямса. Высокие интенсивность и энергия образующихся таким образом потоков фотонов обеспечивают фотон-фотонные и фотон-ядерные (фотон-протонные) столкновения беспрецедентно высокой энергии, что позволяет изучать открытые вопросы структуры протонов и ядер в квантовой хромодинамике, а также искать проявления новой физики.

Фокусом измерений УПС на БАК является фоторождение чармониев ( $J/\psi, \psi'$ ) и легких  $\rho$ -мезонов. Первый процесс позволяет получить новые ограничения на ядерные глюонные распределения  $g_A(x, Q^2)$  при малых  $x$  вплоть до  $x \sim 6 \cdot 10^{-4}$  ( $x$  – доля импульса ядра, переносимая глюонами). Результаты этих измерений, которые обычно представляются в виде сечений УПС, проинтегрированных по переданному импульсу  $t$  при различных значениях быстроты  $J/\psi$ -мезона  $y$  (в центральной и форвардной областях), установили факт значительного подавления  $g_A(x, Q^2)$  при малых  $x$ , по сравнению с протоном, за счет ядерной глюонной экранировки.

Эксперимент ALICE при активном участии сотрудников ОФВЭ НИЦ «Курчатовский институт» –

ПИЯФ впервые измерил  $t$ -зависимость когерентного фоторождения  $J/\psi$ -мезонов в Pb–Pb-УПС в области центральных быстрот  $|y| < 0,8$  при 5,02 ТэВ, что соответствует области малых  $x \sim (0,3-1,4) \cdot 10^{-3}$ . Тем самым результаты предыдущих измерений УПС на БАК были расширены и была получена информация о пространственном распределении ядерных глюонов в представлении прицельного параметра, которое связано через двумерное преобразование Фурье с измеренной  $t$ -зависимостью. Таким образом, это измерение позволяет установить трехмерную картину ядерных глюонных распределений.

На рисунке представлены результаты эксперимента ALICE для зависимости от  $t$  фотон-ядерного сечения в шести областях по  $t$ . Очевидно, что данные отклоняются от  $t$ -зависимости, даваемой квадратом ядерного формфактора  $|F_A(t)|^2$ , которая заложена в широко использующийся Монте-Карло-генератор событий Starlight (*сплошная синяя кривая*). В то же время данные ALICE хорошо согласуются с предсказаниями теоретических подходов, где эффект ядерных экранировок скоррелирован с  $t$ -зависимостью. В частности, в подходе, основанном на приближении лидирующих твистов, который активно развивается сотрудниками ОФВЭ, эффект ядерных экранировок усиливается с уменьшением прицельного параметра за счет увеличения перекрытия нуклонов (увеличения ядерной плотности) по мере приближения к центру ядра (*зеленая пунктирно-прерывистая кривая, помеченная "LTA"*). Это ведет к уширению ядерного глюонного распределения в представлении прицельного параметра, что в свою очередь ведет к более узкой  $t$ -зависимости по сравнению с  $|F_A(t)|^2$ .



Результаты эксперимента ALICE для зависимости от  $t$  фотон-ядерного сечения в шести областях по  $t$

Схожее поведение предсказывается в подходе, который основан на модели цветowych диполей, где амплитуда рассеяния получается решением уравнения Балицкого – Ковчегова, зависящего от прицельного параметра и учитывающего эффект глюонного насыщения (красная прерывистая кривая, помеченная “b-BK”). Нижняя панель на рисунке показывает отно-

шение этих теоретических предсказаний к данным.

Эти результаты позволяют определить ядерные глюонные распределения как функцию  $x$  и прицельного параметра и тем самым прокладывают путь к трехмерной картине ядерных глюонных распределений, используя когерентное фоторождение чармониев на БАК.

1. Guzey V., Kryshen E., ..., Zhalov M. // Phys. Lett. B. 2021. V. 816. P. 136202.
2. ALICE Collab., Ivanov V.V., Khanzadeev A.V., Kryshen E.L., Malaev M.V., Nikulin V.N., Ryabov A.Yu., Riabov V.G., Ryabov Yu.G., Zhalov M.B. // Phys. Lett. B. 2021. V. 817. P. 136280.

## Наблюдение обмена оддероном в данных по упругому $pp$ - и $p\bar{p}$ -рассеянию в экспериментах D0 и TOTEM

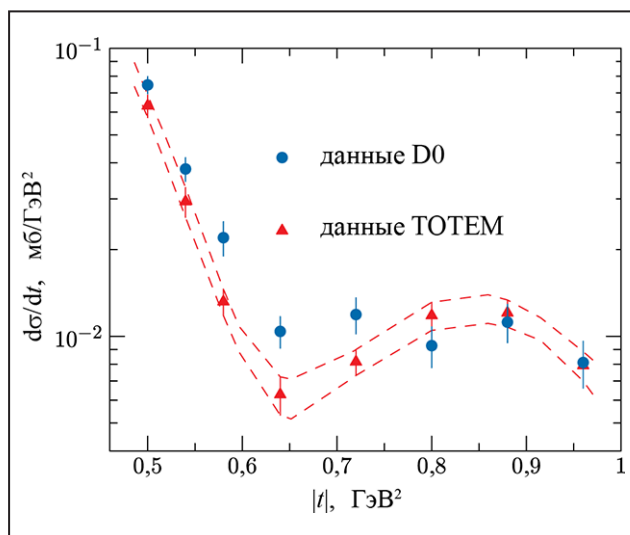
Г. Д. Алхазов, А. А. Лободенко, П. В. Неустроев, Л. Н. Уваров, С. Л. Уваров  
Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ,  
коллаборации D0 и TOTEM

Проведен сравнительный анализ дифференциального сечения упругого  $p\bar{p}$ -рассеяния, измеренного коллаборацией D0 при энергии 1,96 ТэВ в системе центра масс, с сечениями  $pp$ -соударений, измеренными коллаборацией TOTEM при энергиях 2,76, 7, 8 и 13 ТэВ в модельно-независимом подходе. Поперечные сечения, измеренные коллаборацией TOTEM, экстраполировались к энергии  $\sqrt{s} = 1,96$  ТэВ и сравнивались с сечением, измеренным коллаборацией D0, в области дифракционного минимума и второго дифракционного максимума (рис.). Эти два набора данных  $pp$ - и  $p\bar{p}$ -сечений при энергии 1,96 ТэВ различаются на уровне  $3,4\sigma$  и таким образом свидетельствуют об обмене в  $t$ -канале

бесцветным  $S$ -нечетным глюонным образованием, известным как оддерон.

Здесь следует добавить то, что коллаборация TOTEM провела также анализ своих данных по полному сечению  $pp$ -рассеяния и по отношению реальной к мнимой части амплитуды сильного взаимодействия в упругом рассеянии вперед и получила независимое свидетельство процесса обмена оддероном в  $pp$ -рассеянии со значимостью между  $3,4\sigma$  и  $4,6\sigma$ .

В результате суммарная значимость наблюдения процесса обмена оддероном в  $pp$ - и  $p\bar{p}$ -рассеянии превышает  $5\sigma$ , что может рассматриваться как открытие оддерона коллаборациями D0 и TOTEM.



Сравнение измеренного коллаборацией D0 при энергии  $\sqrt{s} = 1,96$  ТэВ дифференциального сечения  $p\bar{p}$ -рассеяния как функции от  $|t|$  (квадрата переданного четырехимпульса; синие кружки) с дифференциальными сечениями  $pp$ -рассеяния, измеренными коллаборацией TOTEM при энергиях  $\sqrt{s} = 2,76, 7, 8$  и  $13$  ТэВ и экстраполированными к энергии  $\sqrt{s} = 1,96$  ТэВ (красные треугольники). Штриховые линии обозначают ширину коридора оцененных ошибок ( $\pm 1\sigma$ ) экстраполированного сечения

## Оболочечный эффект в зарядовых радиусах нейтронно-избыточных изотопов ртути

А. Е. Барзах, Д. В. Федоров, П. Л. Молканов, М. Д. Селиверстов  
 Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, коллаборация IS598

Методом лазерной ионизационной спектроскопии в ионном источнике установки ISOLDE проведены измерения изотопических сдвигов и сверхтонкого расщепления атомных уровней радиоактивных изотопов  $^{206-208}\text{Hg}$  на атомном переходе  $\lambda = 254$  нм. Получены значения изменений среднеквадратичных зарядовых радиусов ( $\delta\langle r^2 \rangle$ ), магнитных дипольных и электрических квадрупольных моментов исследованных ядер. Для изучения изотопов ртути была использована новая модификация лазерного ионного источника, совмещенного с универсальным плазменным ионным источником.

Анализ магнитных моментов  $\mu$  ядер с числом нейтронов  $N = 127$  (в т. ч. впервые измеренного  $\mu(^{207}\text{Hg})$ ) показал, что главную роль в зависимости этой величины от числа протонов играет механизм связи нечетной частицы с колебаниями. Во втором порядке теории возмущений поправка к  $g$ -фактору  $g = \mu/I$ , связанная с колебаниями, пропорциональна обратному квадрату энергии нижнего колебательного  $2^+$ -состояния четно-четных ядер с тем же числом протонов –  $E(2^+)^{-2}$ . Наблюдаемая корреляция между значениями  $E(2^+)^{-2}$  и величинами  $g$ -факторов (рис. 1) свидетельствует в пользу предложенной интерпретации.

Обнаружены характерный излом в изотопической зависимости зарядовых радиусов ртути при  $N = 126$ , а также выраженный четно-нечетный эффект: радиусы нечетно-нейтронных изотопов оказываются меньше среднего арифметического радиусов их четно-нейтронных соседей (рис. 2).

Проведен теоретический анализ новых результатов и данных, полученных ранее для изотопов свинца, в рамках релятивистского подхода Хартри – Боголюбова (РХБ) и нерелятивистских моделей Хартри – Фока (НХФ). Для количественной

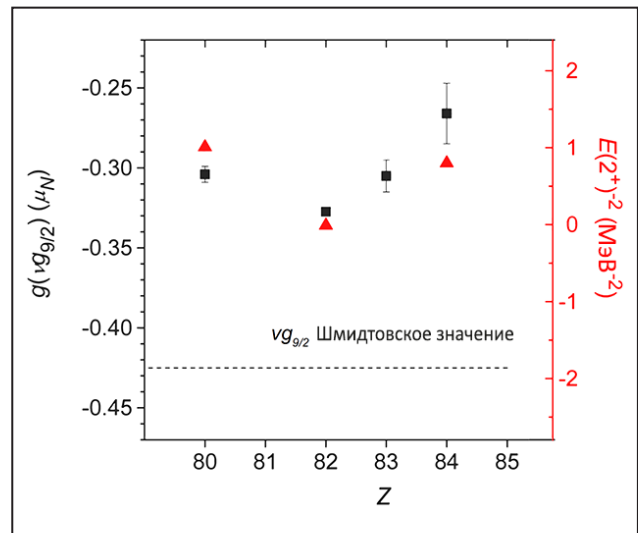


Рис. 1. Наблюдаемая корреляция между значениями  $E(2^+)^{-2}$  и величинами  $g$ -факторов: черные квадраты – экспериментальные значения  $g$ -факторов состояний  $vg_{9/2}$  у изотопов с  $N = 127$ ; пунктирная линия – шмидтовское значение  $g(vg_{9/2})$ ; красные треугольники – значения  $E(2^+)^{-2}$  у соответствующих четно-четных ядер с  $N = 126$

характеристики оболочечного эффекта вводится специальный индикатор

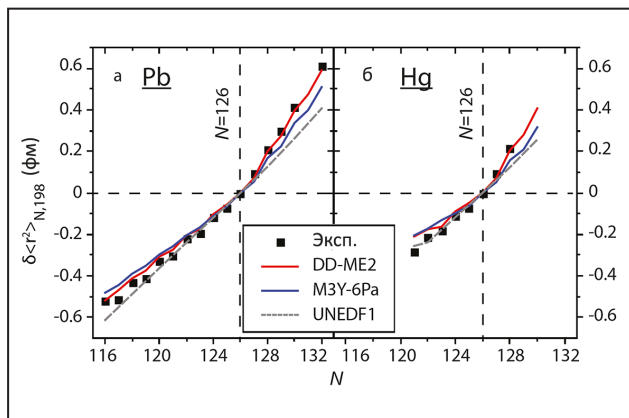
$$\Delta R^{(3)}(A) = 0,5[R(A + 2) + R(A - 2)] - R(A),$$

где  $R(A) = \langle r^2 \rangle^{1/2}(A)$  – среднеквадратичный зарядовый радиус изотопа рассматриваемого элемента с массой  $A$ .

Когда  $\Delta R^{(3)}(A) = 0$ , оболочечный эффект отсутствует.

На рисунке 3 экспериментальные значения этого индикатора сравниваются с теоретическими, полученными с использованием различных подходов: НХФ с функционалом UNEDF1, НХФ с функционалом МЗУ-Р6а (с модифицированным спин-орбитальным взаимодействием), НХФ с функционалом Фаянса  $[Fy(\Delta r)]$ , РХБ с функционалом DD-ME2. Столбец с маркировкой

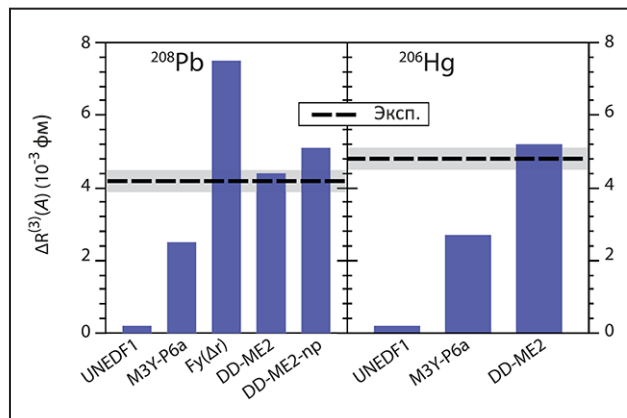




**Рис. 2.** Сравнение экспериментальных и теоретических значений  $\delta\langle r^2 \rangle$  для свинца (а) и ртути (б): черные квадраты – экспериментальные значения; линии – теоретические подходы, в рамках которых получены результаты

DD-ME2-np соответствует расчету РХБ с функционалом DD-ME2 при выключенном спаривании. Очевидно, что РХБ-расчет заметно лучше описывает эксперимент, чем нерелятивистские подходы.

В противоречии с принятой в настоящее время интерпретацией показано, что в рамках РХБ как излом при  $N = 126$ , так и четно-нечетный эффект в зарядовых радиусах в этом районе ну-



**Рис. 3.** Сравнение экспериментальных и теоретических значений индикатора  $\Delta R^{(3)}(A)$ : пунктир (погрешности показаны серой полосой) – экспериментальные значения; синие столбцы – теоретические подходы, в рамках которых получены результаты

клидной карты могут быть описаны уже на уровне среднего поля, а спаривание не играет важной роли в возникновении этих эффектов (см. рис. 3, где оболочечный эффект имеет место уже при выключенном спаривании). Предложен новый механизм для четно-нечетного эффекта, в основе которого лежит изменение заселенностей различных нейтронных орбиталей для четно-нейтронных и нечетно-нейтронных ядер.

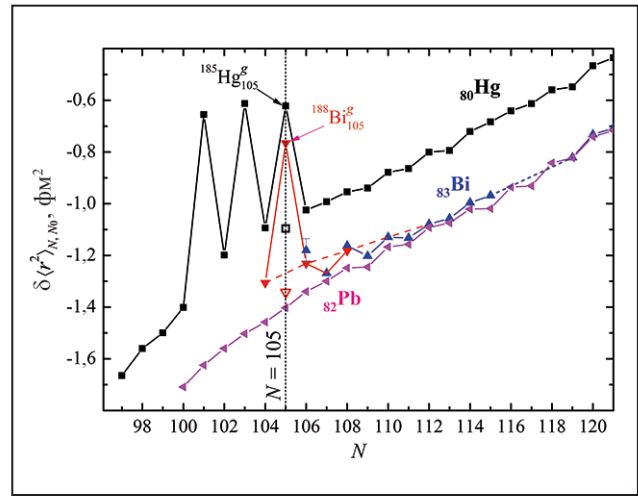
1. Day Goodacre T., ..., Barzakh A.E., ..., Fedorov D.V., ..., Molkanov P.L., ..., Seliverstov M.D. et al. // Phys. Rev. Lett. 2021. V. 126. P. 032502.
2. Day Goodacre T., ..., Barzakh A.E., ..., Fedorov D.V., ..., Molkanov P.L., ..., Seliverstov M.D. et al. // Phys. Rev. C. 2021. V. 104. P. 054322.

## Эффект чередования форм в нейтронно-дефицитных изотопах висмута

А. Е. Барзах, Д. В. Федоров, П. Л. Молканов, В. Н. Пантелеев, М. Д. Селиверстов  
 Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ,  
 коллаборация IS598

Методом лазерной ионизационной спектроскопии в ионном источнике установки ISOLDE проведены измерения изотопических сдвигов и сверхтонкого расщепления атомных уровней радиоактивных изотопов  $^{187-191}\text{Bi}$  на атомном переходе  $\lambda = 306,9$  нм. С помощью продвинутых атомных расчетов получены значения изменений среднеквадратичных зарядовых радиусов ( $\delta\langle r^2 \rangle$ ), магнитных дипольных и электрических квадрупольных моментов исследованных ядер. Рекордная чувствительность экспериментальной методики позволила провести измерения для изотопов со скоростью образования в мишени менее одного иона за 10 с.

Эффект чередования форм ядра был впервые обнаружен в цепочке изотопов ртути: нечетно-нейтронные изотопы с  $N = 101, 103, 105$  оказались сильно деформированными, в то время как их четно-нейтронные соседи ( $N = 102, 104, 106$ ) сохраняют форму, близкую к сферической (рис.). Обнаружение данного эффекта было признано одним из наиболее значимых достижений в экспериментальной ядерной физике за последние полвека. Спустя 50 лет после этого открытия нами обнаружен второй пример подобного необычного поведения – чередование форм для нейтронно-дефицитных изотопов висмута: если ядра  $^{187, 189}\text{Bi}$  и высокоспиновый изомер  $^{188}\text{Bi}$  имеют форму, близкую к сферической, то основное состояние ядра  $^{188}\text{Bi}$  сильно деформировано, о чем свидетельствует пилообразная изотопическая зависимость радиусов указанных ядер, аналогичная наблюдавшейся ранее для ртути. Отметим, что чередование форм в изотопах висмута имеет место при том же числе нейтронов, что и для ядер ртути ( $N = 105$ ; см. рис.).



Изменения среднеквадратичных зарядовых радиусов изотопов висмута (синие треугольники – литературные данные; красные треугольники – настоящая работа), ртути (черные квадраты) и свинца (фиолетовые треугольники)

В том же эксперименте измерен электрический квадрупольный момент  $^{188}\text{Bi}^g$ . Величина параметра деформации, извлекаемого из этого квадрупольного момента ( $\beta_0 = 0,25(7)$ ), прекрасно согласуется с параметром деформации, получаемым из данных по  $\delta\langle r^2 \rangle$  ( $\beta_r = 0,28(2)$ ), что однозначно подтверждает интерпретацию наблюдаемого эффекта.

Установлено также, что зарядовые радиусы изотопов висмута с  $N < 112$  заметно отклоняются от хода изотопической зависимости зарядовых радиусов сферических изотопов свинца (см. пунктирную линию на рис.). Теоретический анализ в рамках метода Хартри – Фока – Боголюбова свидетельствует о том, что это отклонение связано со смешиванием конфигураций с различной деформацией.

## Результаты эксперимента «Нейтрино-4» по поиску стерильного нейтрино

А. П. Серебров<sup>1</sup>, В. Г. Ивочкин<sup>1</sup>, Р. М. Самойлов<sup>1</sup>, А. К. Фомин<sup>1</sup>, В. Г. Зиновьев<sup>1</sup>, А. В. Черный<sup>1</sup>, О. М. Жеребцов<sup>1</sup>, М. Е. Чайковский<sup>1</sup>, М. Е. Зайцев<sup>1</sup>, А. А. Герасимов<sup>1</sup>, В. В. Федоров<sup>1</sup>, П. В. Неустроев<sup>2</sup>, С. С. Волков<sup>2</sup>, В. Л. Головцов<sup>2</sup>, А. Л. Петелин<sup>3</sup>, А. Л. Ижutow<sup>3</sup>, А. А. Тузов<sup>3</sup>, С. А. Сазонтов<sup>3</sup>, М. О. Громов<sup>3</sup>, В. В. Афанасьев<sup>3</sup>, М. Е. Зайцев<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Отделение нейтронных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, колаборация «Нейтрино-4»

<sup>2</sup> Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

<sup>3</sup> Государственный научный центр – Научно-исследовательский институт атомных реакторов

<sup>4</sup> Димитровградский инженерно-технологический институт НИЯУ МИФИ

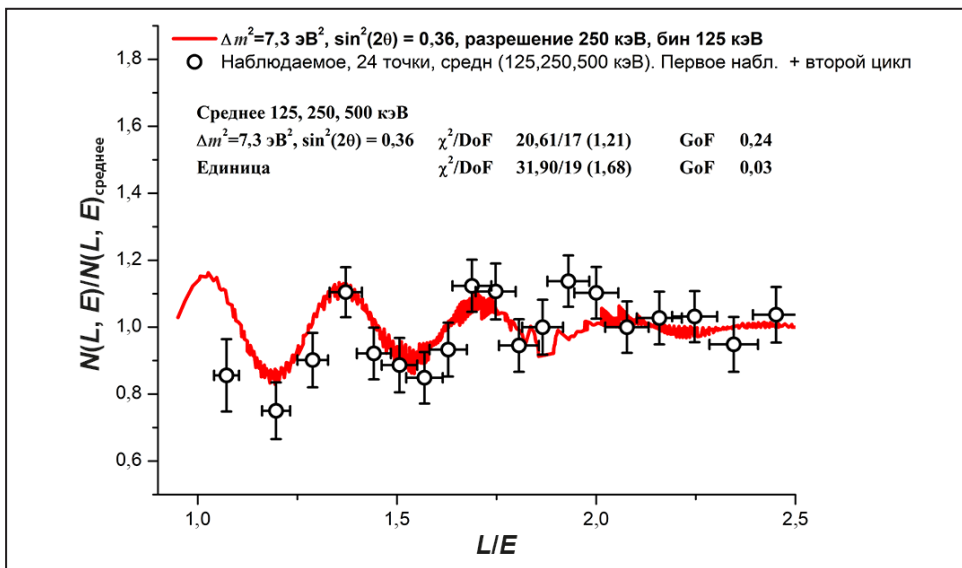
Эксперимент «Нейтрино-4», начатый в 2014 г. с моделью детектора, впоследствии был продолжен с полномасштабным детектором в 2016–2021 гг. Получены результаты измерений зависимостей потока реакторных антинейтрино и их спектра от расстояния до центра активной зоны реактора СМ-3 (Димитровград, Россия) в диапазоне 6–12 м. При использовании всех данных был проведен модельно-независимый анализ, чтобы определить параметры осцилляций  $\Delta m_{14}^2$  и  $\sin^2 2\theta_{14}$ .

Полученная методом когерентного сложения модельно-независимая зависимость отношения

$$R_{ik}^{\text{exp}} = (N_{ik} \pm \Delta N_{ik}) L_k^2 / K^{-1} \sum_k (N_{ik} \pm \Delta N_{ik}) L_k^2$$

от  $L/E_\nu$ , которая наглядно демонстрирует эффект осцилляций, показана на рисунке.

Выполнены анализ возможных систематических ошибок и Монте-Карло-моделирование эксперимента с учетом наличия эффекта на достигнутом уровне точности. В результате анализа можно сделать заключение о наблюдении эффекта осцилляций с параметрами  $\Delta m_{14}^2 = (7,30 \pm 0,13_{\text{стат}} \pm 1,16_{\text{сист}}) \text{ эВ}^2 = (7,30 \pm 1,17) \text{ эВ}^2$  и  $\sin^2 2\theta_{14} \approx 0,36 \pm 0,12_{\text{стат}}$  (2,9 $\sigma$ ) на уровне достоверности 2,9 $\sigma$ .



Зависимость R-отношения от  $L/E$  для нейтринного сигнала. Красная кривая – ожидаемая зависимость с параметрами осцилляций  $\Delta m_{14}^2 = 7,3 \text{ эВ}^2$  и  $\sin^2 2\theta_{14} = 0,36$ , соответствующими лучшей аппроксимации. Уровень достоверности наблюдения осцилляций – 2,9 $\sigma$ . Экспериментальные точки представлены как среднее по трем выборкам с разной шириной энергетических бинов (125, 250 и 500 кэВ)

## Прямое ультрапрецизионное измерение разности масс $^{187}\text{Re} - ^{187}\text{Os}$ как пролог для определения эффективной массы антинейтрино

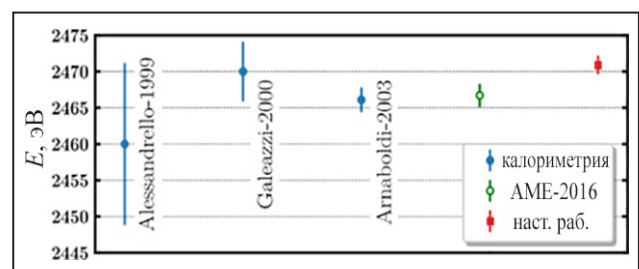
С. А. Елисеев, Ю. Н. Новиков, П. Е. Филянин –  
Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ,  
коллаборация PENTATRAP

Нуклид  $^{187}\text{Re}$  характеризуется самой малой из всех известных энергией  $\beta$ -распада между основными состояниями ядер, составляющей, по литературным данным, около 2,5 кэВ, чему соответствует самая малая разность масс  $^{187}\text{Re} - ^{187}\text{Os}$ , поэтому он рассматривается как один из наилучших кандидатов для определения абсолютного значения эффективной массы антинейтрино. Указанное значение энергии распада  $^{187}\text{Re}$  во много раз меньше энергии распада трития (18,6 кэВ), который активно используется установкой KATRIN для определения искомой массы. Разница масс обсуждаемой пары нуклидов измерялась ранее нашей группой на установке SHIPTRAP в Центре по изучению тяжелых ионов им. Гельмгольца в Дармштадте, а затем, с запуском системы PENTATRAP, была перенесена в Институт ядерной физики Общества Макса Планка в Гейдельберг.

Система PENTATRAP представляет собой башню из пяти ионных ловушек Пеннинга, в которой проводятся измерения резонансных частот возбуждения отдельных высокозарядных ионов  $^{187}\text{Re}^{29+}$  и  $^{187}\text{Os}^{29+}$ . Эти ионы образуются облучением материала мощным электронным пучком и проводятся в область ловушки сформированным пучком, протянутым в ионном канале от электронной пушки через магнитный масс-сепаратор. Один ион осмия и два иона рения одновременно запускаются в три ловушки, в которых производится измерение их циклотронных частот. Затем эти же ионы перемещаются в другой набор трех ловушек. Такая конфигурация эксперимента позволяет исключить временную неточность магнитного поля, что существенно сокращает систематическую неопределенность измерений и повышает их прецизионность.

PENTATRAP позволяет измерять массы с большей точностью во многом благодаря тому, что измерения проводятся для ионов с большими зарядами. Однако для целей нейтринной физики нужно знать массы нейтральных атомов, спектр  $\beta$ -распада которых (с вылетом антинейтрино) измеряется микрокалориметром. Чтобы перейти от разности ионных масс к разности нейтральных масс, нужно рассчитать разности энергий связи электронов в каждом ионе пары, что делается с очень хорошей точностью с помощью метода Дирака – Хартри – Фока.

Этот пересчет был выполнен коллаборацией PENTATRAP для обоих упомянутых выше пар нуклидов в 2021 г. Для разности масс нейтральных основных состояний  $^{187}\text{Re}$  и  $^{187}\text{Os}$  получено значение  $\Delta M = 2470,9 \pm 1,3$  эВ. Это прямое измерение ставит точку в вопросе о разности масс (граничной энергии распада  $^{187}\text{Re}$ ), разброс значений которой был вызван различными предыдущими экспериментами (рис.). Полученное значение граничной энергии  $\beta$ -распада с точностью в 1 эВ открывает возможность в анализе микрокалориметрического спектра получить с такой же точностью эффективную массу антинейтрино.



По оси ординат в единицах эВ отложены значения энергии распада, а различные эксперименты развернуты по оси абсцисс. Точка с величиной, полученной в настоящем эксперименте, окрашена красным цветом



## Прецизионные измерения $\beta$ -спектра $^{210}\text{Bi}$ для задач нейтринной физики

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

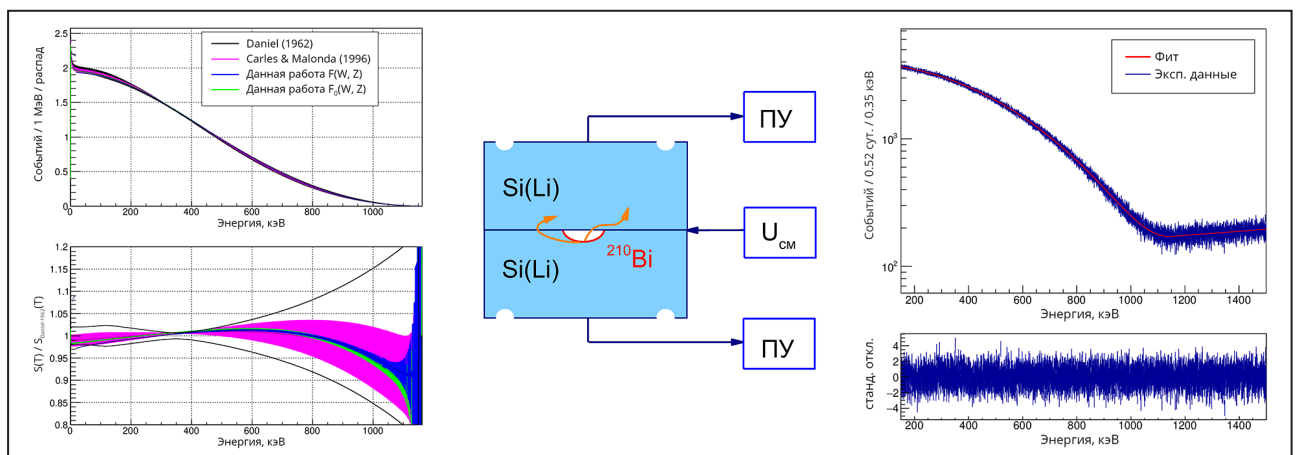
Изотоп  $^{210}\text{Bi}$  – элемент естественного радиоактивного ряда  $^{238}\text{U}$ . Как продукт распадов газа  $^{222}\text{Rn}$  и последующего долгоживущего  $^{210}\text{Pb}$ , изотоп  $^{210}\text{Bi}$  присутствует внутри и на поверхности всех конструкционных материалов. Точное измерение  $\beta$ -спектра  $^{210}\text{Bi}$  необходимо для моделирования фона современных детекторов нейтрино и частиц темной материи и для других низкофоновых экспериментов. Форма  $\beta$ -спектра  $^{210}\text{Bi}$  очень похожа на спектр электронов отдачи, возникающих при рассеянии солнечных CNO-нейтрино.

Международная коллаборация Borexino, в которой участвуют ученые НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, представила результаты обнаружения нейтрино, испускаемых в реакциях CNO-цикла на Солнце. Весомый вклад сотрудников ОНИ связан с измерением с высокой точностью  $\beta$ -спектра  $^{210}\text{Bi}$ , знание которого необходимо для анализа потока солнечных CNO-нейтрино.

Измерения  $\beta$ -спектра были проведены с Si-спектрометрами двух типов, разработанными и изготовленными в НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ (рис.). Для регистрации электронов в спектрометре, созданном по классической схеме «мишень – детектор», использовался Si(Li)-детектор диаметром 15 мм и толщиной 7 мм. Принципиальное отличие нового  $4\pi\beta$ -спектрометра состоит в функции отклика, которая близка к гауссовой, что не требует тщательного учета обратного рассеяния электронов от поверхности кристалла.

Таким образом, в результате двух независимых измерений значения параметров ядерного формфактора определены с точностью лучше процента и согласуются друг с другом.

Работа поддержана грантом РФФИ № 19-02-00097.



Спектр  $^{210}\text{Bi}$ , измеренный в схеме «мишень – детектор», в сравнении с результатами измерений в других работах (слева); схема  $4\pi\beta$ -спектрометра с Si(Li)-детекторами, предусилителями (ПУ) и напряжением смещения ( $U_{\text{см}}$ ) (в центре); спектр  $^{210}\text{Bi}$ , измеренный  $4\pi\beta$ -спектрометром, и результат подгонки теоретической формой  $\beta$ -спектра (справа)

1. Alekseev I.E., Bakhlanov S.V., Derbin A.V., Drachnev I.S., Kotina I.M., Lomskaya I.S., Muratova V.N., Niyazova N.V., Semenov D.A., Trushin M.V., Unzhakov E.V. // J. Phys.: Conf. Ser. 2021. V. 2103. P. 012144.
2. Bakhlanov S.V., Derbin A.V., Drachnev I.S., Kotina I.M., Lomskaya I.S., Muratova V.N., Niyazova N.V., Semenov D.A., Trushin M.V., Unzhakov E.V., Chmel E.A. // Instrum. Exp. Tech. 2021. V. 64. P. 190.

## О спектре протонов в столкновениях тяжелых ионов $^{12}\text{C} + ^9\text{Be}$ при энергиях 0,3–2,0 ГэВ/нуклон в рамках гидродинамического подхода

А. Т. Дьяченко, И. А. Митропольский

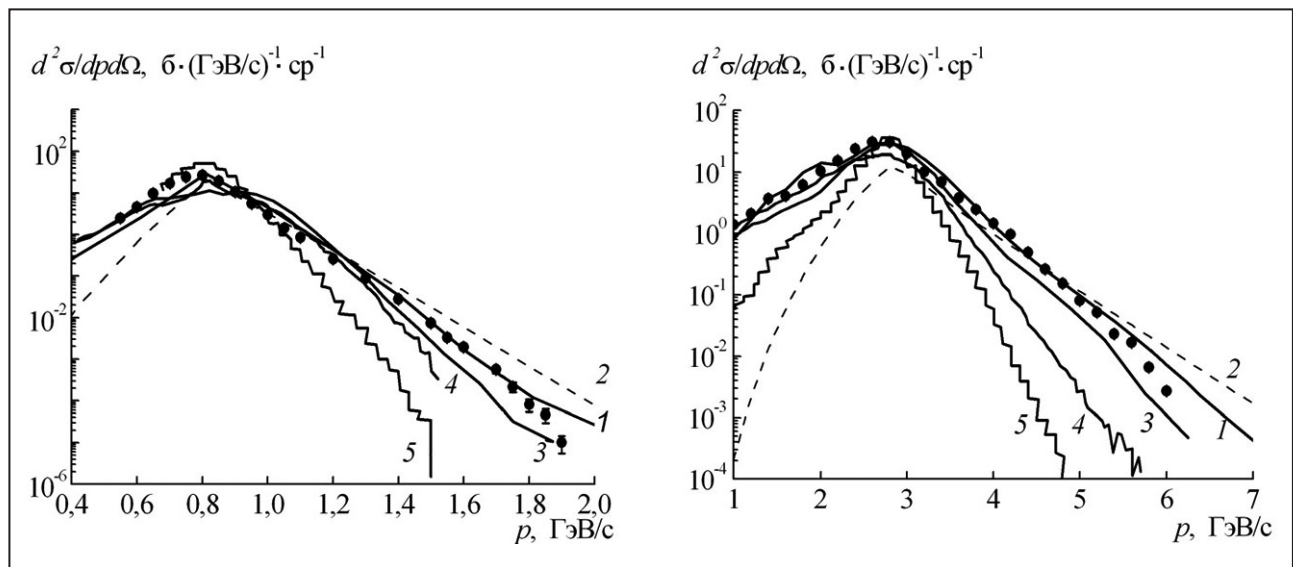
Отделение физики высоких энергий, Отделение нейтронных исследований  
НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

В процессе развития гидродинамического подхода с неравновесным уравнением состояния рассмотрены столкновения ядер  $^{12}\text{C}$  с бериллиевой мишенью при энергиях налетающих ядер углерода 0,3–2,0 ГэВ/нуклон с испусканием протонов под углом  $3,5^\circ$ .

Спектры протонов содержат высокоэнергетическую кумулятивную часть спектра, которую нам удалось ранее описать в рамках гидродинамического подхода с учетом поправки на микроканоническое распределение, а также мягкую часть спектра, которая содержит вклад от фрагментации.

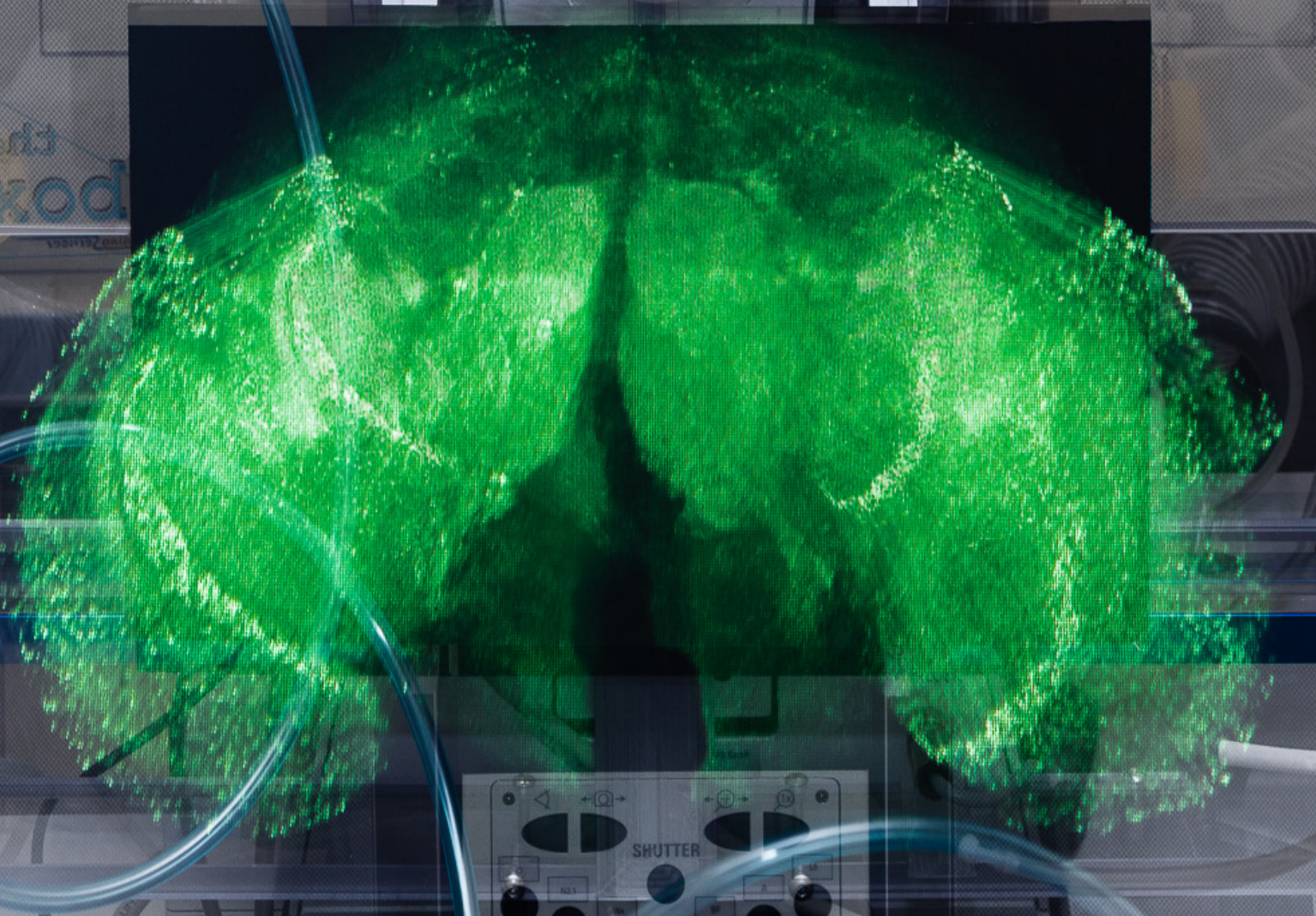
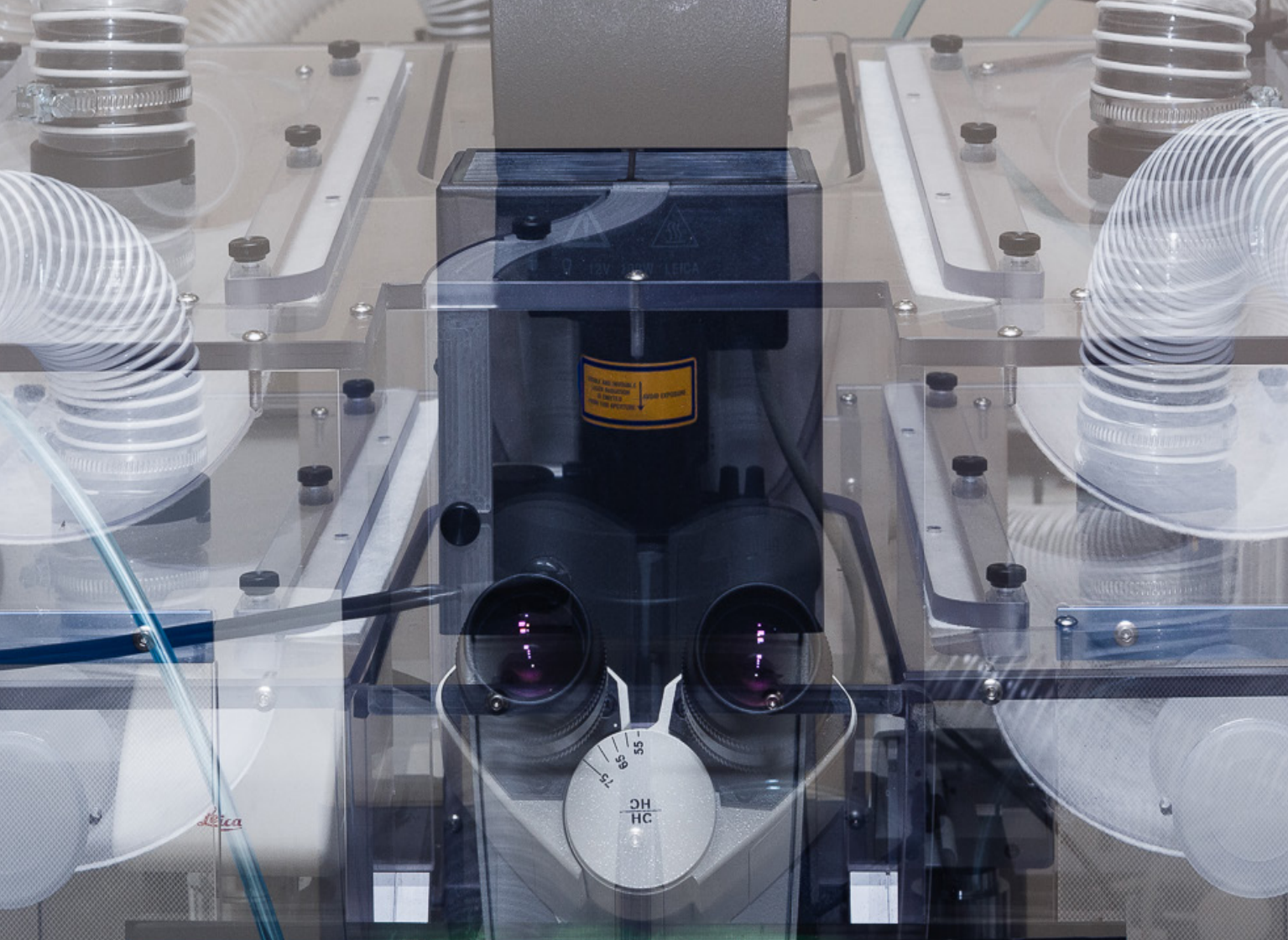
В данной работе мы учли вклад протонов от фрагментации на основе статистического механизма. На рисунке результаты расчетов срав-

ниваются с экспериментальными данными. В области малых импульсов при всех энергиях наш расчет воспроизводит экспериментальные данные, что обусловлено вкладом от протонов, образующихся в результате фрагментации для перекрывающихся и неперекрывающихся частей сталкивающихся ядер. Поправка на микроканоническое распределение проявляется в высокоимпульсной области распределений протонов. Если не учитывать вклад от фрагментации и не вводить поправку на микроканоническое распределение (*штриховые кривые 2*), то в мягкой области спектра расчетные кривые недооценивают экспериментальные данные, а в кумулятивной области идут выше экспериментальных точек.



Импульсные распределения протонов в реакции  $^{12}\text{C} + ^9\text{Be} \rightarrow p + X$  при энергии  $^{12}\text{C}$  0,3 ГэВ/нуклон (слева) и 2,0 ГэВ/нуклон (справа): кривая 1 – наш расчет; штриховая кривая 2 – наш расчет без учета поправки на микроканоническое распределение и без учета вклада от фрагментации; точки – экспериментальные данные (Абрамов Б. М. и др., 2015); кривые 3–5 – результаты расчетов по транспортным кодам (см. там же): кривая 3 – каскадная модель; кривая 4 – транспортная модель кварк-глюонных струн; кривая 5 – модель квантовой молекулярной динамики, встроенной в пакет GEANT4







## Биологические исследования

- 74 Оценка гаптоглобина и его протеоформ как маркеров глиобластомы
- 75 Генетический анализ функции белка Hsm3 в комплексе у дрожжей *Saccharomyces cerevisiae*
- 76 Транскриптомный анализ выявил снижение экспрессии генов активации рецепторов липопротеинов низкой плотности у пациентов, выживших после тяжелой формы COVID-19
- 77 Амброксол повышает ферментативную активность глюкоцереброзидазы (GCase) и восстанавливает количество и транслокацию GCase в первичных макрофагах пациентов с болезнью Гоше и паркинсонизмом
- 78 Морфологические и функциональные последствия нокадауна гена *swiss cheese* в глиальных клетках *Drosophila melanogaster*
- 79 Потеря функции гена *swiss cheese* в нейронах приводит к нейродегенерации, сопровождающейся аномалиями митохондрий, накоплением активных форм кислорода и липидных капель в мозге дрозофилы
- 80 Многогранный механизм ингибирования бактериальной трансляции амикумацином A
- 81 Дифференциальный вклад белковых факторов и 70S-рибосомы в удлинение белковой цепи
- 82 Таргетные методы подавления клеточного SOS-ответа в ходе терапии эволюционной устойчивости к антибиотикам
- 83 Антибактериальные свойства фукоиданов из бурых водорослей *Fucus vesiculosus* Баренцева моря
- 85 Долгосрочный мониторинг развития и угасания ответов IgA и IgG на SARS-CoV-2-инфекцию
- 87 Доставка функциональных экзогенных белков везикулами растительного происхождения в клетки человека *in vitro*



## Оценка гаптоглобина и его протеоформ как маркеров глиобластомы

С. Н. Нарыжный<sup>1</sup>, Н. Л. Ронжина<sup>1</sup>, О. К. Легина<sup>1</sup>, Н. В. Клопов<sup>1</sup>, Р. А. Пантина<sup>1</sup>, Е. С. Зорина<sup>2</sup>, М. Г. Завьялова<sup>2</sup>, В. Г. Згода<sup>2</sup>, Ф. Ю. Кабаченко<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Отделение молекулярной и радиационной биофизики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

<sup>2</sup> Научно-исследовательский институт биомедицинской химии им. В. Н. Ореховича

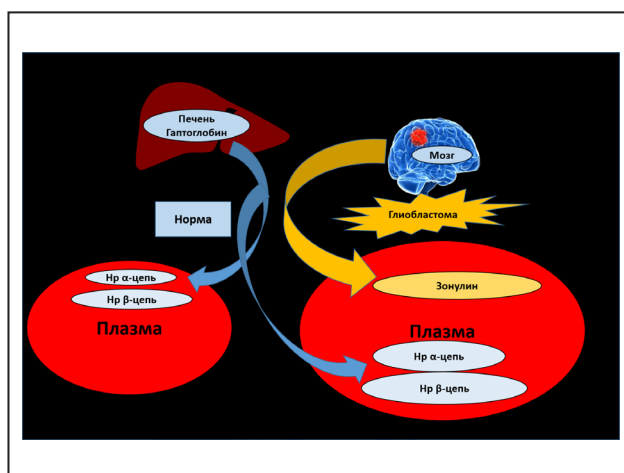
<sup>3</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Гаптоглобин (Hr) представляет собой гликопротеин плазмы крови, играющий важную роль в защите тканей и предотвращении окислительного повреждения. Гаптоглобин является острофазным белком, его концентрация в плазме изменяется при патологии, а также консервативным белком и предметом исследований в качестве потенциального биомаркера многих заболеваний, в т. ч. злокачественных новообразований. Ген *Hr* человека является полиморфным и контролирует синтез трех основных фенотипов: гомозиготных Hr1-1 и Hr2-2 и гетерозиготных Hr2-1, определяемых комбинацией аллельных вариантов, которые передаются по наследству. Многочисленные исследования показывают, что по фенотипу гаптоглобина можно судить о предрасположенности человека к различным заболеваниям. Кроме того, Hr подвергается различным посттрансляционным модификациям. Мультиформная глиобlastома (ГМФ) является наиболее злокачественной первичной опухолью головного мозга.

В нашем исследовании мы анализировали состояние протеоформ Hr в плазме и клетках с помощью одномерного (SDS-PAGE) и двумерного электрофореза (2DE) с последующей масс-спектрометрией (LC ES-MS/MS) или иммунодетекцией (вестерн-блоттинг). Мы обнаружили, что

уровни протеоформ  $\alpha$ 2- и  $\beta$ -цепей повышены в плазме пациентов с глиобlastомой. Непроцессированная форма Hr2-2 (PreHr2-2, зонулин) с необычными биофизическими параметрами ( $pI/Mw$ ) также была обнаружена в плазме больных ГМФ и клетках глиобlastомы (рис.).

В целом наши данные показывают возможность использования протеоформ Hr в качестве потенциального биомаркера плазмы, специфичного для ГМФ.



Графическое представление возможного попадания в кровь процессированных форм гаптоглобина из печени и непроцессированной формы гаптоглобина (зонулина) из опухоли мозга

1. Naryzhny S.N., Ronzhina N.L., Zorina E.S., Kabachenko F.Yu., Zavalova M.G., Zgoda V.G., Klopov N.V., Legina O.K., Pantina P.A. // Int. J. Mol. Sci. 2021. V. 22. P. 6533.

2. Нарыжный С. Н., Легина О. К. // Биомед. хим. 2021. Т. 67. № 2. С. 105.

## Генетический анализ функции белка Hsm3 в комплексе у дрожжей *Saccharomyces cerevisiae*

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

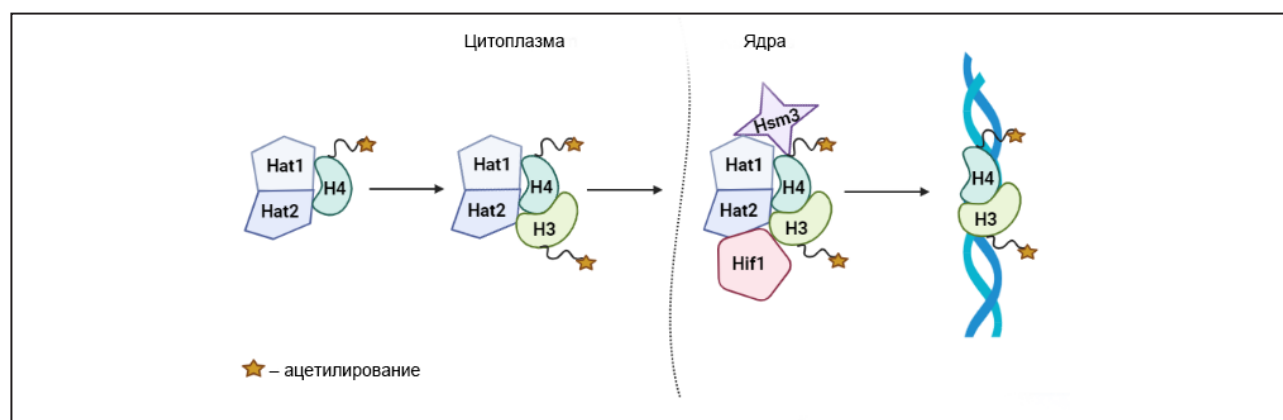
Отделение молекулярной и радиационной биофизики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

В ядерном компартменте дрожжей ядерный комплекс NuB4 состоит из трех белков: Hat1, Hat2 и Hif1 – и взаимодействует с рядом других факторов. В частности, показано, что комплекс NuB4 физически взаимодействует с Hsm3p. Ранее было показано, что ген *HSM3* участвует в контроле репликативного и репаративного спонтанного мутагенеза и адаптивного мутагенеза, а мутанты *hsm3Δ* увеличивают частоту мутаций, индуцированных различными мутагенами. Ранее считалось, что ген *HSM3* контролирует лишь некоторые второстепенные процессы репарации в клетке, однако позднее было высказано предположение, что он выполняет шаперонную функцию с участием в сборке протеасом.

В данной работе мы провели генетический анализ свойств трех мутантов: *hsm3Δ*, *hif1Δ* и *hat1Δ*. Мы представили доказательства того, что значительное повышение уровня dNTP подавляет *hsm3*- и *hif1*-зависимый мутагенез. Кроме того,

мутации *hsm3Δ* и *hif1Δ* значительно снижают эффективность индукции экспрессии генов RNR (рибонуклеотидредуктазы) после УФ-облучения. Это снижение экспрессии служит причиной переключения точных полимераз на высокоошибочную полимеразу Polη в процессе репаративного синтеза ДНК и определяет высокий УФ-индуцированный мутагенез, особенно в небипримидиновых сайтах (NBP-сайтах) у мутантов *hsm3* и *hif1*.

Таким образом, мы доказали, что Polη отвечает за *hsm3*- и *hif1*-зависимый мутагенез. Результаты, представленные в этой работе, показывают, что генетические свойства мутации *hsm3* полностью аналогичны свойствам мутации *hif1* и *him1*. На основании этого сделано заключение, что белок Hsm3, подобно белку Hif1, может быть функциональной субъединицей комплекса NuB4 и участвовать в сборке хроматина в ходе репаративного процесса (рис.)



Модель, описывающая потенциальный механизм действия белка Hsm3p в составе комплекса NuB4, и приблизительный механизм действия Hsm3p как субъединицы комплекса гистонацетилтрансферазы NuB4. Скорее всего, Hsm3p включается в комплекс Hat1p/Hat2p, как и Hif1p

## Транскриптомный анализ выявил снижение экспрессии генов активации рецепторов липопротеинов низкой плотности у пациентов, выживших после тяжелой формы COVID-19

И. Н. Власов<sup>1</sup>, А. А. Пантелеева<sup>2,3</sup>, Т. С. Усенко<sup>2,3</sup>, М. А. Николаев<sup>2,3</sup>, А. Д. Изюмченко<sup>2</sup>, Е. Г. Гаврилова<sup>3</sup>, И. В. Шлык<sup>3</sup>, В. В. Мирошникова<sup>2,3</sup>, М. И. Шадрина<sup>1</sup>, Ю. С. Полушин<sup>3</sup>, С. Н. Пчелина<sup>2,3,4</sup>, П. А. Слонимский<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт молекулярной генетики НИЦ «Курчатовский институт»

<sup>2</sup> Отделение молекулярной и радиационной биофизики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

<sup>3</sup> Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. акад. И. П. Павлова

<sup>4</sup> Курчатовский геномный центр – ПИЯФ

Коронавирусная инфекция (COVID-19) вызывается коронавирусом тяжелого острого респираторного синдрома 2 (SARS-CoV-2) из семейства коронавирусов НСоV.

Для выявления генетических биомаркеров летального исхода тяжелой формы COVID-19, требующей интенсивной терапии и реанимации, мы впервые провели исследование по анализу транскриптома у пациентов на момент поступления в отделение интенсивной терапии с ретроспективной оценкой исхода заболевания в остром периоде (30 дней). Мы получили лимфоциты периферической крови от пяти выживших пациентов с тяжелой формой COVID-19 и трех пациентов, умерших от инфекции в отделении интенсивной терапии. Для каждого образца проведено РНК-секвенирование. Полученные сырые данные были обработаны с помощью биоинформатических подходов с использованием трех различных пайплайнов. В результате были идентифицированы списки дифференциально-экспрессирующихся генов (ДЭГ) для каждого пайплайна: 1038, 866, 516 соответственно, а также список ДЭГ (в количестве 361), общих для всех трех используемых в исследовании пайплайнов.

На следующем этапе был проведен анализ обогащения функциональных групп генов для списка ДЭГ трех пайплайнов и для 361 общего ДЭГ. В результате были выявлены общие для всех пайплайнов пути: путь активации рецепторов липопротеинов низкой плотности (GO: 0005041), дифференцировка лейкоцитов (GO: 0002521) и активность рецептора карго-молекул (GO: 0038024). Нами впервые показано снижение уровня экспрессии генов *STAB1*, *PPARG*, *CD36*, *ITGAV* и *ANXA2*, продукты которых вовлечены в метаболизм холестерина, у выживших по сравнению с умершими. Исследование впервые позволило идентифицировать гены, дифференциально-экспрессирующиеся в лимфоцитах периферической крови пациентов с тяжелой формой COVID-19 с различными исходами (умер/выжил). Наши данные подтверждают важную роль изменений в метаболизме холестерина в определении исхода коронавирусной инфекции.

Работа выполнена при финансовой поддержке Курчатовского геномного центра – ПИЯФ в рамках программы развития центров генетических исследований мирового уровня (соглашение № 075-15-2019-1663).

## Амброксол повышает ферментативную активность глюкоцереброзидазы (GCase) и восстанавливает количество и транслокацию GCase в первичных макрофагах пациентов с болезнью Гоше и паркинсонизмом

А. Э. Копытова<sup>1</sup>, Г. Н. Рычков<sup>1,2,3</sup>, М. А. Николаев<sup>1,4</sup>, Г. В. Байдакова<sup>5</sup>, А. А. Чеблоков<sup>1</sup>, К. А. Сенкевич<sup>1,4</sup>, Д. А. Богданова<sup>1</sup>, О. И. Большакова<sup>1</sup>, И. В. Милюхина<sup>1,4,6</sup>, В. А. Безруких<sup>7</sup>, Г. Н. Салогуб<sup>7</sup>, С. В. Саранцева<sup>1</sup>, Т. С. Усенко<sup>1,4</sup>, Е. Ю. Захарова<sup>5</sup>, А. К. Емельянов<sup>1,4,6</sup>, С. Н. Пчелина<sup>1,4,6</sup>

<sup>1</sup> Отделение молекулярной и радиационной биофизики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

<sup>3</sup> Курчатовский геномный центр – ПИЯФ

<sup>4</sup> Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. акад. И. П. Павлова

<sup>5</sup> Медико-генетический научный центр им. акад. И. П. Бочкова

<sup>6</sup> Институт экспериментальной медицины

<sup>7</sup> Национальный медицинский исследовательский центр им. В. А. Алмазова

Мутации в гене *GBA1* приводят к болезни Гоше (БГ) и являются высоким фактором риска болезни Паркинсона (БП). Ген *GBA1* кодирует фермент лизосом глюкоцереброзидазу (GCase). В результате мутаций нарушается фолдинг и транспорт GCase в лизосому, вследствие чего снижается активность этого фермента. Общность патогенеза данных заболеваний делает перспективной разработку стратегий, направленных на лечение БГ и обладающих нейропротекторным действием при лечении БП, ассоциированной с мутациями в гене *GBA1* (ГБА-БП).

На сегодняшний день не существует нейропротекторной терапии при БП, а также терапии при БГ с поражением нервной системы. В качестве активаторов ферментативной активности GCase перспективным является использование фармакологических шаперонов (ФШ) – небольших молекул, способных стабилизировать мутантную форму GCase и способствующих ее правильной сборке и транспорту в лизосомы. Проблема заключается в том, что большинство известных ФШ GCase являются ингибиторами активного сайта фермента. Согласно данным литературы амброксол (ABX), известный в фармакологии уже более 50 лет в качестве муколитического препарата, рассматривается как один из перспективных ФШ

GCase, однако механизм его действия не описан, и остается неизвестным, насколько варьирует межиндивидуальная эффективность его действия.

В результате проведенной работы показано, что первичная культура макрофагов является подходящей моделью для тестирования эффективности препаратов, влияющих на активность GCase не только у пациентов с БГ, но и ГБА-БП. Показано эффективное восстановление ферментативной активности и количества белка GCase, увеличение его транспорта в лизосомы, снижение концентрации лизосфинголипидов на первичной культуре макрофагов в присутствии ФШ ABX у пациентов с БГ. Проведенное нами молекулярное моделирование связывания ABX с мутантной формой GCase N370S *in silico* предполагает, что ABX может действовать как в качестве ингибитора фермента, так и аллостерического ФШ, что подтверждает гипотезу о том, что данный препарат может оказаться более эффективным ФШ GCase по сравнению с ФШ ингибиторно-активаторного типа. Выявление новых потенциальных мест связывания химических веществ, расположенных на поверхности GCase, открывает перспективу виртуального скрининга новых неингибирующих ФШ.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 17-75-20159.



## Морфологические и функциональные последствия нокадауна гена *swiss cheese* в глиальных клетках *Drosophila melanogaster*

Е. В. Рябова, П. А. Мелентьев, А. Е. Комиссаров, Н. В. Сурина,  
Е. А. Иванова, С. В. Саранцева

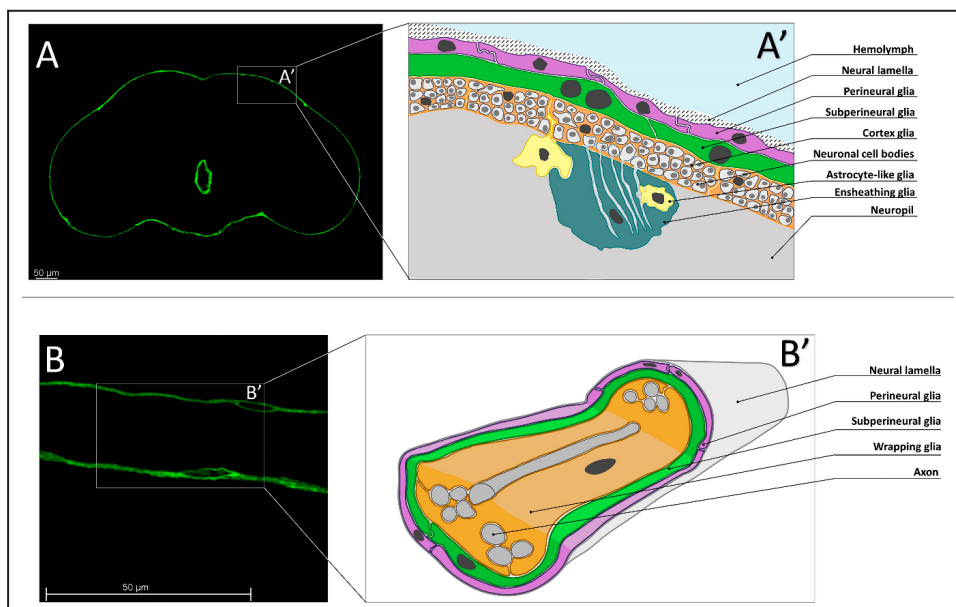
Отделение молекулярной и радиационной биофизики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Глиальные клетки чрезвычайно важны для работы нервной системы, и их физиология и функционирование находятся под контролем различных генов. Для изучения аспектов функционирования глиальных клеток используют модельные организмы, в частности *Drosophila melanogaster* (рис.). Мы исследовали последствия подавления экспрессии гена *swiss cheese* в поверхностной глии (образует гематоэнцефалический барьер), а также в глии кортекса центральной нервной системы и обертывающей глии периферической нервной системы. Эти типы глиальных клеток обеспечивают гомеостаз в нервной ткани, защищая ее от внешних воздействий и регулируя метаболизм нейронов.

Мы выявили, что нокадаун гена *swiss cheese* в поверхностной глии вызывает морфологические и функциональные изменения в субпери-

невральной глии: уменьшается число ядер клеток, нарушается проницаемость гематоэнцефалического барьера мозга. Нокадаун исследуемого гена в обертывающей глии вызывает морфологические изменения структур, образуемых этими клетками. Мы охарактеризовали изменения транскриптома при подавлении экспрессии гена *swiss cheese* в данных типах глии, а также обнаружили увеличение уровня активных форм кислорода. Выявленные изменения сопровождались снижением локомоторной активности мух, проанализированной в тесте на отрицательный геотаксис.

Полученные результаты свидетельствуют о значимой роли экспрессии гена *swiss cheese* в нескольких типах глиальных клеток для обеспечения защиты нервной системы от окислительного стресса и в контроле двигательной активности особей.



Глиальные клетки в нервной системе *Drosophila melanogaster*: A, B – оптический срез мозга и брюшного нерва взрослой особи; зеленый цвет – GFP в клетках субпериневральной глии; A', B' – схематичное изображение глиальных клеток в мозге и брюшных нервах взрослой особи. Масштаб – 50 мкм

## Потеря функции гена *swiss cheese* в нейронах приводит к нейродегенерации, сопровождающейся аномалиями митохондрий, накоплением активных форм кислорода и липидных капель в мозге дрозофилы

П. А. Мелентьев, Е. В. Рябова, Н. В. Сурина, Д. Р. Жмуйдина, А. Е. Комиссаров, Е. А. Иванова, С. В. Саранцева

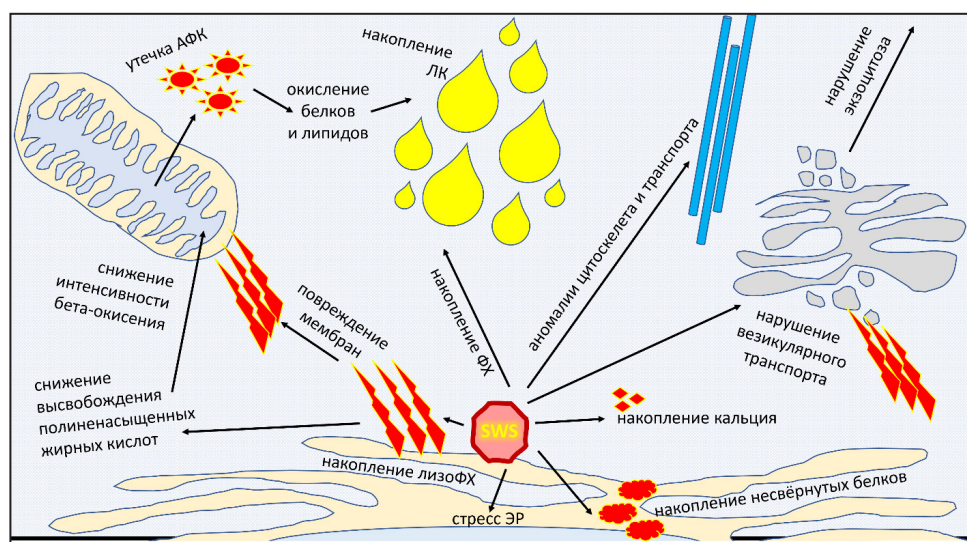
Отделение молекулярной и радиационной биофизики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Плодовая мушка *Drosophila melanogaster* широко используется как модель для изучения генетических основ и физиологических механизмов развития различных нейропатологий.

В нашей работе, выполненной в ОМРБ НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, мы создали модель, воспроизводящую причину развития нейродегенеративных заболеваний, вызванных дисфункцией белка NTE/PNPLA6 у человека. С помощью подавления экспрессии гена *swiss cheese* в нейронах имаго *Drosophila melanogaster* мы индуцировали нейродегенерацию в мозге особей. Это вызвало снижение продолжительности их жизни, а также уменьшение локомоторной активности и ухудшение памяти. Вместе с тем в мозге увеличивался уровень активных форм кислорода и накапливались липидные капли, снижался сигнал флуоресцентно-

меченых митохондрий, однако митохондрии в мозге имели схожую с контролем морфологию. Напротив, в длинных аксонах крыла увеличивалось число фрагментированных округлых митохондрий, которые, по данным литературы, можно отнести к нефункциональным.

Эти результаты позволяют предположить, что в ответ на дисфункцию SWS/NTE/PNPLA6 в нейронах развивается окислительный стресс и изменяется метаболизм липидов. Мы предполагаем, что патологический процесс в ряде нейродегенеративных заболеваний, таких как наследственная спастическая параплегия, вовлекает нарушения митохондрий, липидных капель и эндоплазматического ретикулума. Ген *swiss cheese* и его ортологи, в т. ч. NTE/PNPLA6, являются важными регуляторами этого процесса (рис.).



Схематичное представление патогенетических процессов, развивающихся в клетке при дисфункции SWS/NTE/PNPLA6 в нейронах. Изображены эндоплазматический ретикулум (ЭР), митохондрия, аппарат Гольджи, липидные капли (ЛК), микротрубочки, активные формы кислорода (АФК)

## Многогранный механизм ингибирования бактериальной трансляции амикумацином А

Е. М. Максимова, Д. С. Виноградова, П. С. Касацкий, Е. В. Полесскова, А. Л. Коневега  
Отделение молекулярной и радиационной биофизики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

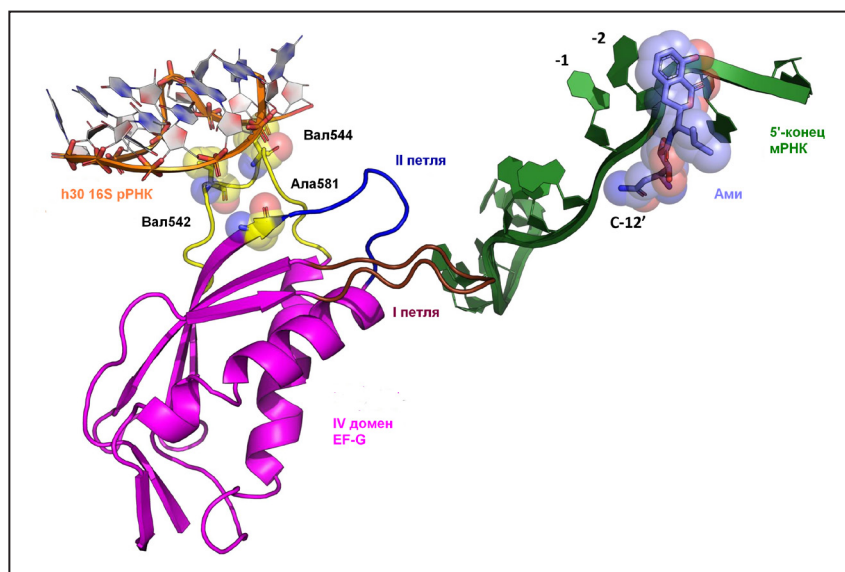
Распространение антибиотикорезистентности у бактерий является одной из наиболее актуальных проблем в медицине, ведь известные и давно используемые антибиотики со временем теряют свою эффективность. Одним из путей преодоления этой проблемы является тщательное изучение антибактериальных препаратов и механизмов резистентности к ним.

В данной работе мы провели кинетическое и термодинамическое исследование влияния амикумацина А (Ами) на основные этапы синтеза полипептидов.

Ами останавливает рост бактерий, ингибируя рибосому во время трансляции. Ами связывается вблизи кодона Е-сайта и стабилизирует мРНК, что относительно необычно и подразумевает уникальный способ ингибирования трансляции. Мы показываем, что Ами снижает скорость образования функционального 70S-инициаторного комплекса в 30 раз. Кроме того, Ами способствует

образованию ошибочных 30S-инициаторных комплексов, однако IF3 препятствует их переходу к трансляции. На ранних стадиях элонгации Ами не нарушает EF-Tu-зависимое связывание тРНК в А-сайт или образование пептидной связи. С другой стороны, Ами снижает скорость перемещения пептидил-тРНК из А-сайта в Р-сайт и значительно уменьшает количество рибосом, способных к синтезу полипептидов.

Наши данные показывают, что Ами постепенно снижает активность транслирующих рибосом, что может оказаться основным ингибирующим механизмом Ами. Действительно, использование мутантных вариантов EF-G, придающих устойчивость к Ами (Гли542Вал, Гли581Ала или вставка 544Вал), приводит к полному восстановлению функциональности рибосом. Возможно, изменения транслокации, вызванные такими вариантами EF-G, компенсируют потерю активности, вызванную Ами.



Модель расположения амикумацина А (Ами) в Е-сайте рибосомного комплекса. Модель представляет взаимодействие Ами (голубой цвет) с 5'-концом мРНК (зеленый) и подразумеваемое взаимодействие 16S рРНК (оранжевый) с аминокислотами (желтый), EF-G (пурпурный), обеспечивающее устойчивость к Ами. Консервативные петли I и II EF-G показаны коричневым и синим цветами соответственно, тРНК Р-сайта – светло-серым цветом (PDB: 4V7D, 4V5F, 4W2F, 4V9O)

## Дифференциальный вклад белковых факторов и 70S-рибосомы в удлинение белковой цепи

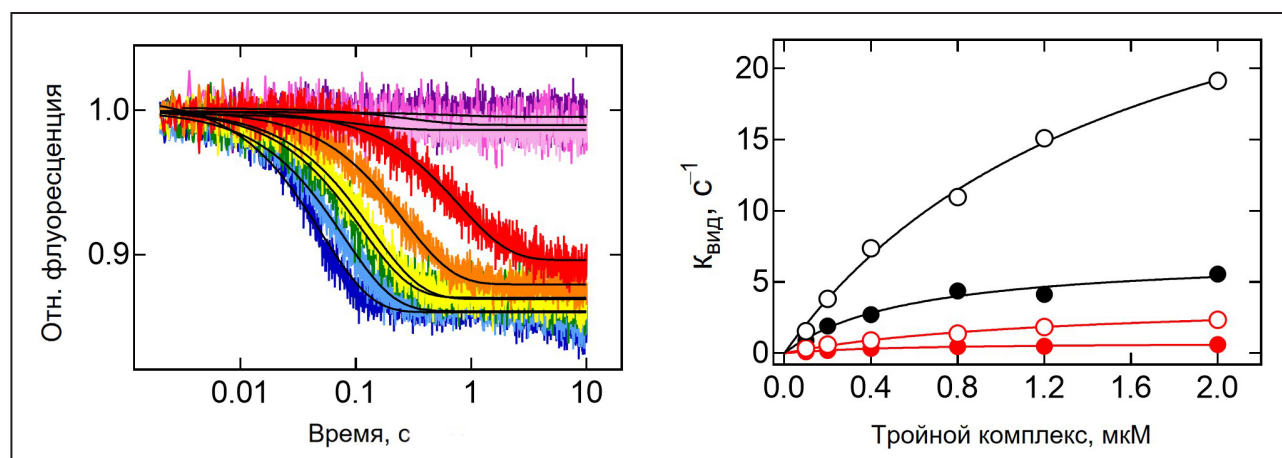
Е. В. Полесскова, Е. М. Максимова, Д. С. Виноградова, П. С. Касацкий,  
С. В. Кириллов, А. Л. Конева

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

Рост полипептидной цепи происходит за счет быстрой и согласованной работы рибосом и белковых факторов элонгации EF-Tu и EF-G. Однако точный вклад каждого из этих компонентов в общий баланс скорости поступательного движения остается до конца не изученным.

В нашей работе мы создали систему трансляции *in vitro*, состоящую из элементов *Escherichia coli* с заменой одного из факторов элонгации на гетерологичный белок из термофильного микроорганизма *Thermus thermophilus*. Скорости реакций связывания и декодирования в А-сайте снижались на порядок в присутствии

термофильного EF-Tu, что указывает на то, что кинетика доставки аминоксил-тРНК определяется свойствами фактора элонгации (рис.). В то же время термофильный EF-G не влиял на кинетические параметры факторзависимой транслокации и не изменял эффекты ингибиторов транслокации (спектиномицина, гиромоциина В, виомицина и стрептомицина), что свидетельствует о том, что процесс транслокации в значительной степени определяется взаимодействием тРНК и рибосомы и может эффективно катализироваться термофильным EF-G даже при субоптимальных температурах.



Кинетика связывания в А-сайте. Слева – временная зависимость взаимодействия рибосомного комплекса (0,05 мкМ) с возрастающими количествами тройного комплекса (0,1 мкМ, красный цвет; 0,2 мкМ, оранжевый; 0,4 мкМ, желтый; 0,8 мкМ, зеленый; 1,2 мкМ, голубой; 2 мкМ, синий), содержащего EF-Tu из *E. coli*, при 37 °С. Реакция в присутствии ингибиторов связывания в А-сайте кирромицина (150 мкМ, светло-сиреневый) и тетрациклина (30 мкМ, сиреневый) или буфера (фиолетовый). Справа – концентрационные зависимости видимых констант скорости ( $K_{\text{вид}}$ ) от тройного комплекса (0,1–2 мкМ). Значения  $K_{\text{вид}}$  оценивались методом одноэкспоненциальной аппроксимации временных кривых, как показано слева для скоростей реакций в А-сайте с EF-Tu из *E. coli* при 20 °С (черные кружки), при 37 °С (черные выколотые кружки), EF-Tu из *T. thermophilus* при 20 °С (красные кружки) или при 37 °С (красные выколотые кружки)



## Таргетные методы подавления клеточного SOS-ответа в ходе терапии эволюционной устойчивости к антибиотикам

А. П. Якимов, И. В. Бахланова, Д. М. Байтин

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

Эволюция бактериальной резистентности основывается на генетической изменчивости с возможностью последующей селекции резистентных вариантов. Бактерии обладают сложной и элегантной системой регуляции эволюционной адаптации, при которой путь получения генов резистентности с помощью горизонтального переноса не является единственным. В отсутствие специфического механизма защиты бактериальные клетки адаптируются к действию антибиотиков с помощью активации механизма клеточного SOS-ответа и связанного с ним индуцированного мутагенеза.

Таким образом, для подавления эволюционных путей появления резистентности ведется поиск универсальных мишеней в виде критических для метаболизма бактерий белков. Например, недавно выявлены небольшие химические молекулы – «компаунды», которые специфически ингибируют такие белки репликации и рекомбинации, как SSB, RecBCD, LexA, PolV, RecA. Тем не менее сам по себе подход по ингибированию большинства белков, на наш взгляд, не является оптимальным по целому ряду причин. Значение конкретного белкового регулятора варьирует в зависимости от штамма и эволюционного пути возникновения устойчивости, а следовательно,

степень полезности таких ингибиторов остается неопределенной.

Белок RecA функционально участвует в хромосомной трансформации, конъюгации, одновременно являясь индуктором мутагенеза, и представляет собой идеальную мишень для поиска блокирующих его активность соединений. Структура и функции RecA сохраняют высочайшую консервативность среди бактерий, в т. ч. патогенных.

В последнее время было предпринято множество попыток поиска ингибиторов белка RecA. Первая стратегия заключается в поиске методами *in silico* или *in vitro* скрининга природных или синтетически синтезированных соединений, в своем большинстве ингибиторов АТФазы. При этом ни один «компаунд», основанный на скрининге, не гарантирует исключительной селективности и даже может иметь токсичность. Вторая стратегия заключается в создании пептидных ингибиторов, представляющих собой функциональные фрагменты межмолекулярного интерфейса. Такие пептиды содержат только природные аминокислоты, которые весьма специфичны для их мишеней и поэтому не обладают широкой областью побочного действия и нетоксичны для человека.

Реализация второй стратегии, на взгляд авторов, имеет наибольшую перспективу.

## Антибактериальные свойства фукоиданов из бурых водорослей *Fucus vesiculosus* Баренцева моря

О. Н. Айрапетян<sup>1</sup>, Е. В. Журишкина<sup>1</sup>, Д. В. Лебедев<sup>1</sup>, А. А. Кульминская<sup>1</sup>, И. М. Лапина<sup>1</sup>,  
Е. Д. Облuchинская<sup>2</sup>, Ю. А. Скорик<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Отделение молекулярной и радиационной биофизики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

<sup>2</sup> Мурманский морской биологический институт РАН

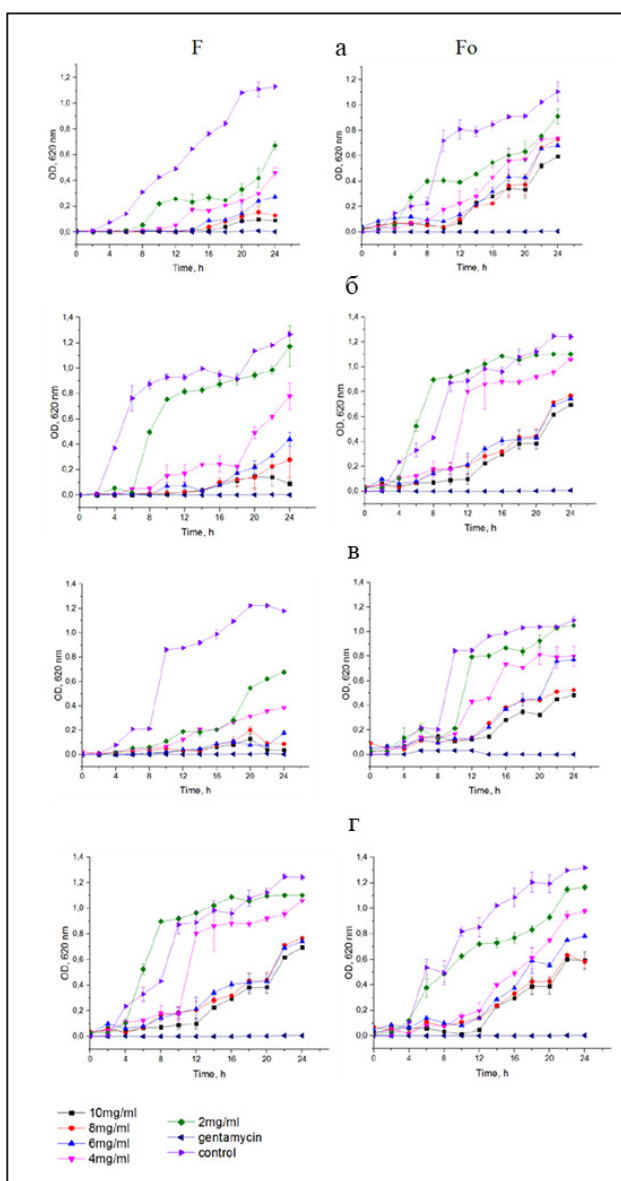
<sup>3</sup> Институт высокомолекулярных соединений РАН

Фукоиданы – сульфатированные полисахариды из клеточных стенок бурых водорослей, обладающие широким спектром биологической активности, – рассматриваются как многообещающие противомикробные препараты, которые в некоторой степени могут заменить использование сильных химических антисептиков и антибиотиков. Природные фукоиданы – полидисперсные соединения, состав которых может сильно различаться в зависимости от вида, среды обитания водорослей и способов выделения и очистки полисахаридов.

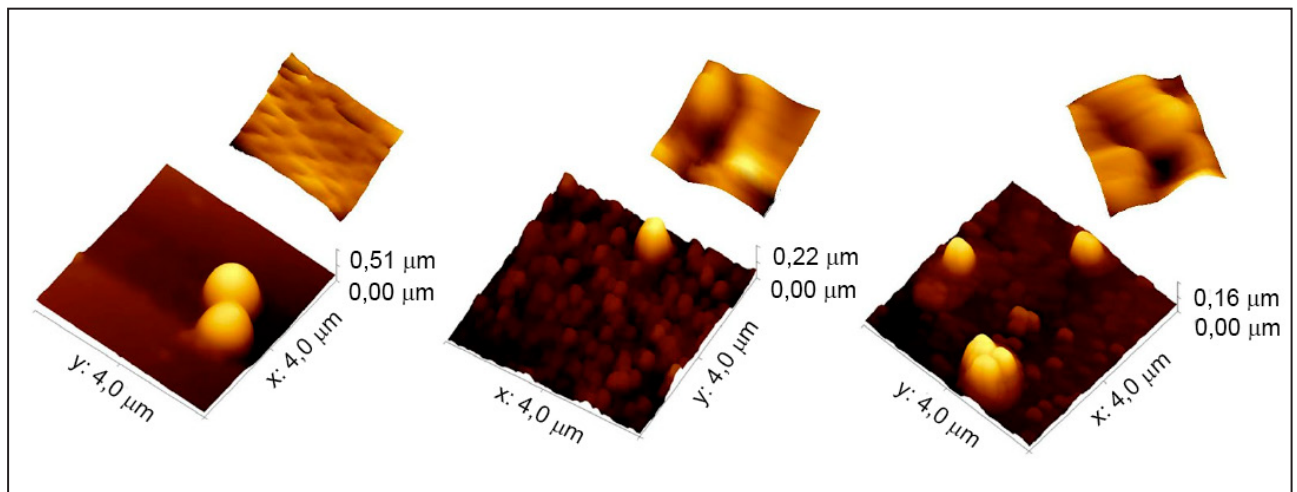
Цель работы – исследование антибактериальных свойств двух фракций сульфатированных полисахаридов разной степени очистки из бурых водорослей *Fucus vesiculosus* в отношении *Escherichia coli*, *Bacillus licheniformis*, *Staphylococcus epidermidis*, *Staphylococcus aureus*.

Фукоиданы оказывали бактериостатический эффект на рост всех исследуемых микроорганизмов, минимальная ингибирующая концентрация (МИК) варьировалась в пределах от 4 до 6 мг/мл, при этом бактерии *E. coli* проявляли наибольшую чувствительность к обеим фракциям полисахаридов, тогда как в целом грубая фракция фукоиданов обнаруживала большую ингибирующую активность в отношении микробов по сравнению с очищенной (рис. 1).

Анализ морфологических изменений у бактерий после обработки фукоиданами при значениях МИК в течение 24 ч при помощи атомно-силовой микроскопии (АСМ) показал, что целостность всех бактериальных клеток сохранялась, что коррелирует с выявленными бактериостатическими, а не бактерицидными свойствами исследуемых полисахаридов. У грамположительных бактерий



**Рис. 1.** Кривые роста бактерий, обработанных фукоиданами в течение 24 ч (F – грубая фракция, Fo – очищенная фракция): а – *E. coli*; б – *B. licheniformis*; в – *S. aureus*; г – *S. epidermidis*. Каждое значение представляет собой среднее значение  $\pm$  стандартное отклонение для трех повторов



**Рис. 2.** АСМ-изображения бактерий *S. epidermidis*, обработанных фукоиданами в течение 24 ч: слева – контроль; посередине – после обработки грубой фракцией фукоидана; справа – после обработки очищенной фракцией фукоидана. На вставках показаны топограммы поверхности в поле 0,5 x 0,5 мкм

наблюдалось значительное уменьшение размера, сопровождающееся некоторым увеличением шероховатости поверхности (рис. 2), что могло указывать на изменение свойств клеточной стенки из-за влияния фукоиданов на метаболизм бактерий или связывание фукоидана с поверхностью клетки. Несмотря на выраженное бактериостатическое действие фукоиданов в отношении *E. coli*, у этих бактерий не было замечено никаких морфологических изменений – возможно,

из-за наличия внешней мембраны. Похоже, что изменения в морфологии клеток, наблюдаемые у грамположительных бактерий, представляют собой следствие бактериальной адаптации, а не механизм ингибирования роста фукоиданами. Мы наблюдали значительное уменьшение размеров *S. aureus* и *S. epidermidis* при обработке сульфатированными полисахаридами. Для палочковидных бактерий ни один из фукоиданов не оказал существенного влияния на размер клеток.

## Долгосрочный мониторинг развития и угасания ответов IgA и IgG на SARS-CoV-2-инфекцию

А. В. Иванов<sup>1</sup>, Е. В. Семенова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Клиника высоких медицинских технологий им. Н. И. Пирогова Санкт-Петербургского государственного университета

<sup>2</sup>Отделение молекулярной и радиационной биофизики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Гуморальный иммунитет выполняет ключевую защитную роль от патогенов, ограничивая инфекцию и предотвращая повторное инфицирование в будущем. Изучение гуморального звена иммунологии COVID-19, формирующего защитный пул специфических антител, определение выраженности и длительности такой иммунной защиты после контакта с SARS-CoV-2 и при оценке эффективности противовирусных вакцин, эпидемиологический мониторинг и отслеживание этапов формирования популяционного иммунитета – важнейшие направления борьбы с пандемией.

Цель работы – 9-месячный мониторинг развития и угасания гуморального иммунного ответа на инфекцию SARS-CoV-2 с количественной оценкой уровней анти-SARS-CoV-2 иммуноглобулинов в крови здоровых доноров, живущих в условиях пандемии коронавируса, и перенесших COVID-19 пациентов. Исследования проводились в Клинике высоких медицинских технологий им. Н. И. Пирогова СПбГУ. В проекте участвовало 180 человек: 84 мужчины и 96 женщин. С периодичностью 10–14 дней фиксировались данные теста на инфекцию SARS-CoV-2 методом ОТ-ПЦР и определялись уровни специфических IgA и IgG с помощью ИФА (иммуноферментного анализа, ELISA). В качестве антигена использовался рекомбинантный S1-домен гликопротеина шипа SARS-CoV-2. За время наблюдения общее число тестирований (ПЦР + ИФА) на 1 человека достигало 27–30.

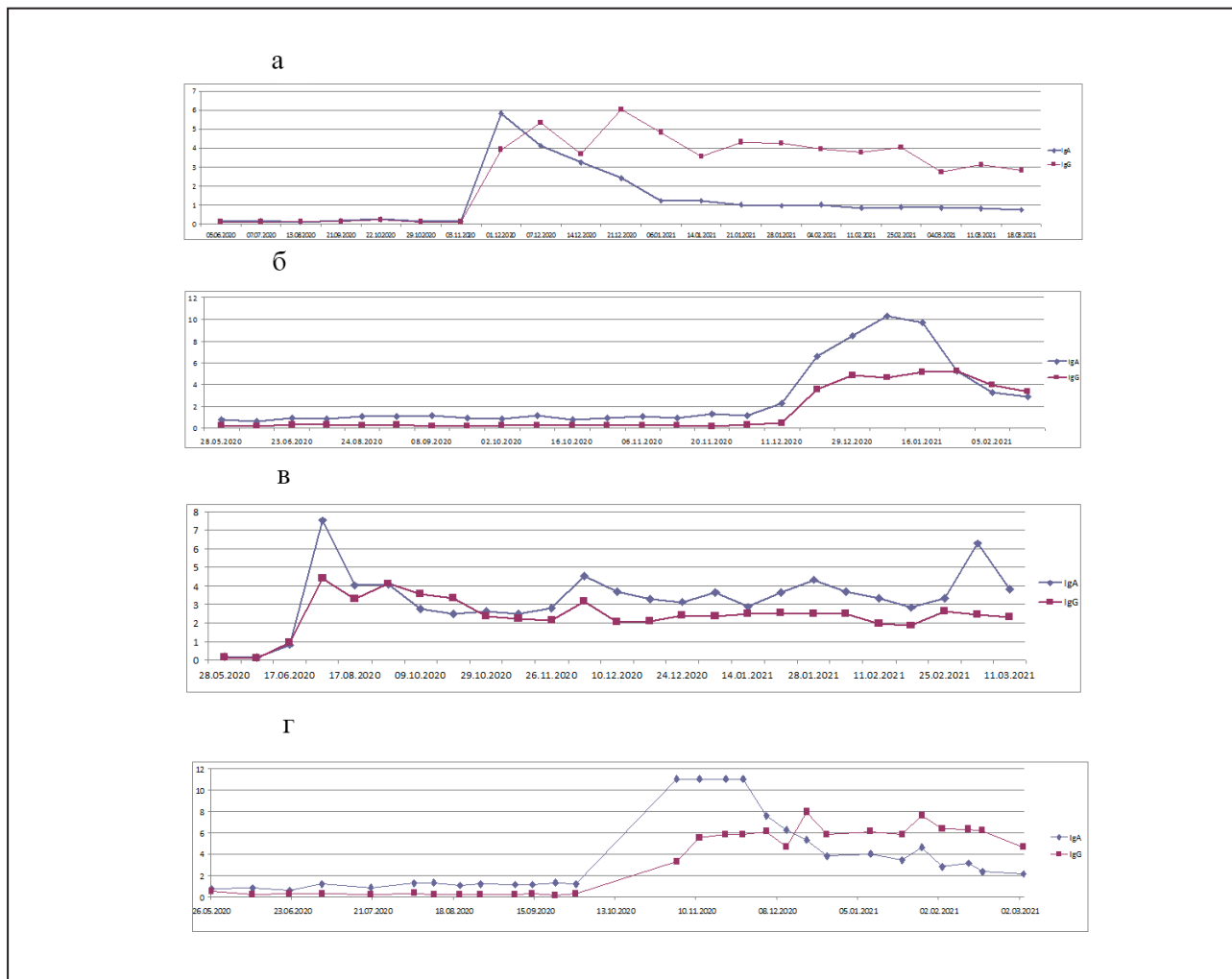
COVID-19 был диагностирован у 51 человека: 26 мужчин и 25 женщин. У всех этих людей сформировался устойчивый гуморальный иммунный

ответ против SARS-CoV-2, сохраняющийся не менее 6 мес., т. е. естественно инфицированные пациенты обладают способностью бороться с повторным заражением в течение достаточно длительного времени.

Индивидуальный иммунный статус обладал рядом особенностей. На рисунке приведены наиболее характерные примеры изменения уровней анти-SARS-CoV-2 IgA и IgG в плазме крови некоторых участников проекта, у которых в разное время был диагностирован (ОТ-ПЦР) COVID-19. У значительной группы участников проекта (39 %) IgA появлялись первыми, их уровень рос на более ранней стадии, достигая значительных показателей уже через 2 нед. после начала заболевания. Это был более сильный и устойчивый ответ, чем в случае IgG. Максимальные значения концентрации IgA наблюдались примерно через месяц после постановки диагноза «COVID-19». В дальнейшем плазменный IgA длительное время оставался на достаточно высоком уровне (ratio ~ 3) и у трети переболевших COVID-19 пациентов уровень IgA превышал уровень IgG. Характер поведения IgA значительно отличается от такового для коронавирусов предыдущих поколений. Динамика анти-SARS-CoV-2 IgG соответствует представлениям о «классическом» гуморальном иммунитете при вирусной инфекции.

Обращает на себя внимание достаточно большая группа людей (более 15 %), у которых на протяжении всего периода наблюдений фиксировались повышенные уровни плазменного анти-SARS-CoV-2 IgA (ratio от 0,8 до 2,4). С течением времени среднее значение уровня анти-SARS-CoV-2 IgA постепенно увеличивалось (ra-





Характерные примеры изменения с течением времени уровней анти-SARS-CoV-2 IgA и IgG в плазме крови участников проекта с диагностированным COVID-19: а – относительно «классический» вариант гуморального иммунного ответа на перенесенное вирусное заболевание (IgA упал до значений нормы; IgG постепенно снижается); б – характерный пример динамики уровней IgA и IgG (после болезни концентрация иммуноглобулинов А и G в плазме снизилась, но осталась на достаточно высоких уровнях (ratio ~ 3)); в – пример длительного сохранения относительно высоких уровней антител после болезни; г – пример заболевания на фоне повышенного IgA (изменение уровней IgA и IgG у единственного представителя группы людей с изначально повышенным уровнем IgA, у которого в октябре 2020 г. был диагностирован COVID-19). По оси абсцисс – даты проведения анализов; по оси ординат – ratio иммуноглобулинов. Синие значки – IgA; красные значки – IgG

tio 0,8–1,2) в этой группе. Возможно, SARS-CoV-2-специфические IgA играют независимую роль в обеспечении защитного иммунитета при незначительных вирусных нагрузках, однако повышенный уровень IgA не является абсолютной защитой от заболевания Covid-19. У одного из членов

этой группы через 4 мес. наблюдений был диагностирован COVID-19.

Необходимы дальнейшие исследования функций вирусспецифических анти-SARS-CoV-2-антител и их защитной эффективности с течением времени.

1. Ivanov A.V., Semenova E.V. // J. Med. Virol. 2021. V. 93. P. 5953.
2. Федорова Н. Д., Иванов А. В., Семенова Е. В. и др. // БФХ. 2021. Т. 6. С. 115.
3. Иванов А. В., Семенова Е. В. // Матер. X Междунар. научно-практ. конф. «Молекулярная диагностика». 2021. Т. 2. С. 384.

## Доставка функциональных экзогенных белков везикулами растительного происхождения в клетки человека *in vitro*

Л. А. Гараева<sup>1</sup>, Р. А. Камышинский<sup>2</sup>, Ю. В. Киль<sup>1</sup>, Е. Ю. Варфоломеева<sup>1</sup>, Н. А. Верлов<sup>1</sup>, Е. С. Комарова<sup>3</sup>, Ю. С. Гармай<sup>1</sup>, С. Б. Ланда<sup>1</sup>, В. С. Бурдаков<sup>1</sup>, А. Г. Мясников<sup>1</sup>, И. А. Винников<sup>4</sup>, Б. А. Маргулис<sup>3</sup>, И. В. Гужова<sup>3</sup>, А. М. Каганский<sup>5</sup>, А. Л. Коневега<sup>1</sup>, Т. А. Штам<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Отделение молекулярной и радиационной биофизики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

<sup>2</sup> НИЦ «Курчатовский институт»

<sup>3</sup> Институт цитологии РАН

<sup>4</sup> Шанхайский университет Цзяотун, Китай

<sup>5</sup> Дальневосточный федеральный университет

Экстраклеточные везикулы (EVs), в частности экзосомы, представляют собой окруженные липидным бислоем нановезикулы, секретируемые многими клетками. На сегодняшний день, в силу того что EVs являются природными частицами, способными переносить большое количество нуклеиновых кислот и белков, сохраняя их стабильность, разработка систем доставки терапевтических биомолекул на основе EVs вызывает широкий интерес у научного сообщества.

Тем не менее на пути использования полученных из биологических жидкостей EVs в качестве доставщиков терапевтических агентов стоит ряд этических и производственных ограничений. Поэтому EVs растительного происхождения (PEVs) являются более перспективными для решения таких задач. Считается, что PEVs биосовместимы, биоразлагаемы и могут быть получены в значительном количестве.

Цель данного исследования – оценить эффективность доставки экзогенных функциональных белков PEVs к клеткам человека *in vitro*.

В настоящей работе PEVs из грейпфрутового сока были выделены методом ультрацентрифугирования, после чего охарактеризованы по размеру, концентрации и морфологии при помощи анализа траектории наночастиц, динамического светорассеяния, атомно-силовой микроскопии и криоэлектронной микроскопии, что позволило получить высококачественные изображения мембранных везикул грейпфрута. Большая часть

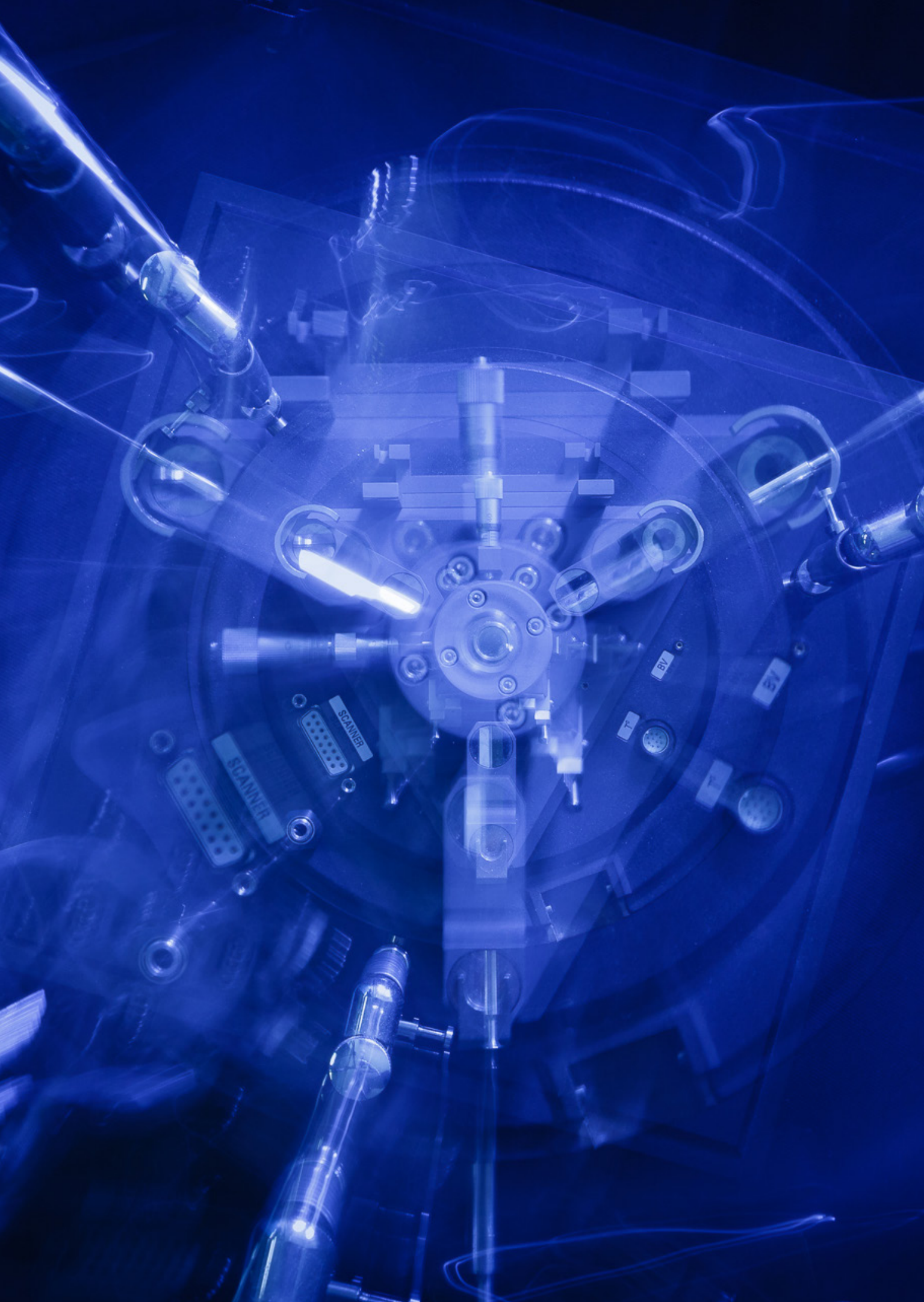
везикул имела сферическую форму, образованную липидным бислоем.

При использовании модели культивирования клеток *in vitro* было показано, что EVs грейпфрута (GF-EVs) высокоэффективны для доставки экзогенных белков бычьего сывороточного альбумина (BSA) и белка теплового шока (HSP70), меченных Alexa flour 647, в клетки аденокарциномы толстой кишки человека HCT-116 и DLD1. Кроме того, была подтверждена функциональная активность белков, доставленных в клеточные линии человека при помощи растительных везикул *in vitro*.

В ходе работы также была произведена оценка распределения в тканях GF-EVs, нагруженных BSA, меченым радиоактивным <sup>125</sup>I (<sup>125</sup>I-BSA) *in vivo*. Биораспределение оценивали количественно с помощью  $\gamma$ -подсчета *ex vivo*. Радиоактивность наблюдалась в легких, мочевом пузыре, матке и яичниках, в печени, селезенке, почках, сердце, а также в образцах мозга. Было продемонстрировано, что <sup>125</sup>I-BSA, нагруженный в GF-EVs, более эффективно распределяется по кровотоку и накапливается в различных тканях организма.

Результаты данного исследования доказывают возможность использования нативных PEVs в системах доставки терапевтических агентов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФ в рамках гранта № 19-74-20146.



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

- 90 Разработка и оптимизационный расчет трактов протонных пучков в проекте ядерной медицины НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ



## Разработка и оптимизационный расчет трактов протонных пучков в проекте ядерной медицины НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Д. А. Амерканов, С. А. Артамонов, Е. М. Иванов, В. И. Максимов, Г. А. Рябов, В. А. Тонких  
Отделение перспективных разработок НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

В НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ разрабатывается проект комплекса ядерной медицины на базе изохронного циклотрона Ц-80, ускоряющего отрицательные ионы водорода. Предусматривается проектирование нового здания, перенос в него Ц-80 и создание станций по разработке новых методов получения радионуклидов и радиофармпрепаратов (этап «Изотоп» на рис. 1, справа от циклотрона, обозначен «А»). Предлагается также создание комплекса протонной терапии заболеваний органов зрения (этап «Око» на рис. 1, слева от циклотрона, обозначен «В»). Для этих целей требуется модернизация выводной системы циклотрона Ц-80, чтобы разработать и реализовать одновременный вывод двух пучков. Один пучок с интенсивностью ~ 100 мкА и энергией 40–80 МэВ будет использован для производства изотопов, второй – для офтальмологии с энергией ~ 70 МэВ и интенсивностью до 10 мкА.

На рисунке 2 представлена расчетная оптимизированная линия транспортировки пучка и его

оггибающие к мишенным станциям «Изотоп». Аналогичные данные отражены на рис. 3 для станции «Око».

Оптимизация трактов транспортировки частиц выполнялась с помощью созданной в НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ программы Proton\_MC, которая выполняет расчет и оптимизацию методом Монте-Карло. Оптимальные параметры магнитных элементов пучка для этапа «Изотоп» находились при условиях минимальных потерь частиц в тракте транспортировки и размера пучка на мишени не менее 20 мм (чтобы пучок обладал максимальной интенсивностью). На рисунке 4 для примера качества пучка «Изотоп» приведен его портрет для самого удаленного направления Т4.

Тракт доставки протонного пучка «Око» удовлетворяет специальным требованиям: энергия пучка 60–70 МэВ; диаметр пучка на входе в процедурную ~ 60 мм; однородность пучка в этой зоне не менее 90 %; угол расходимости пучка ~ 1 мрад.

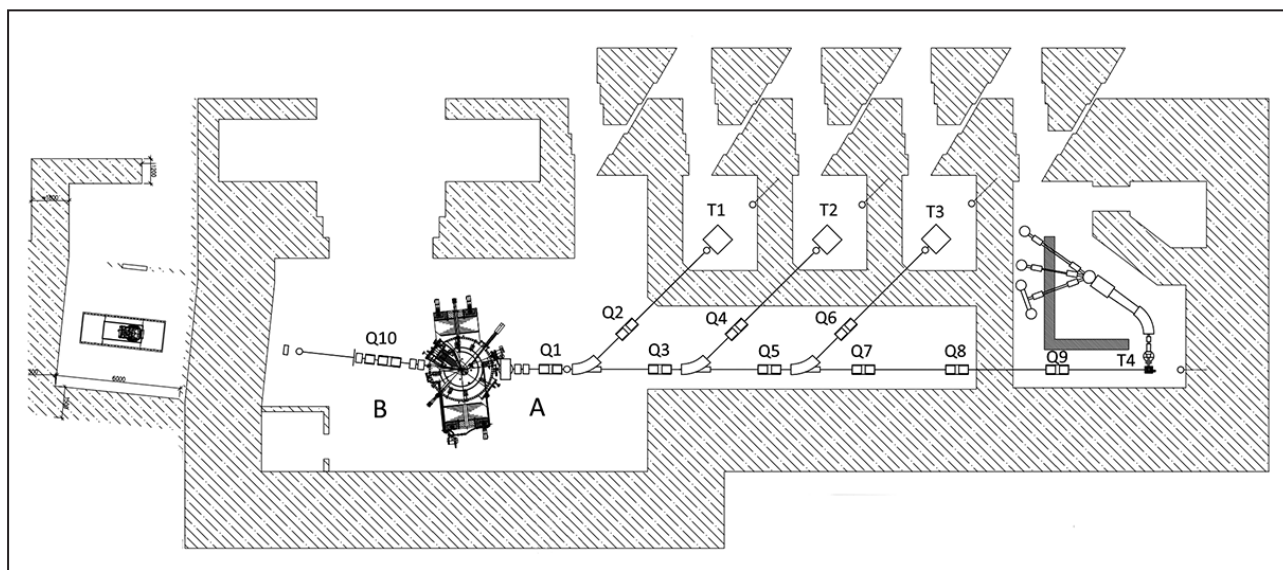
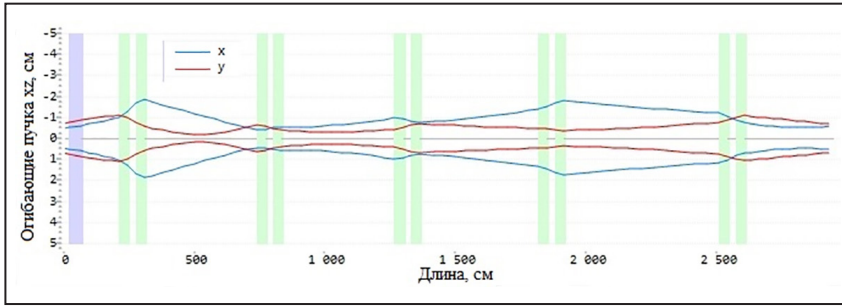
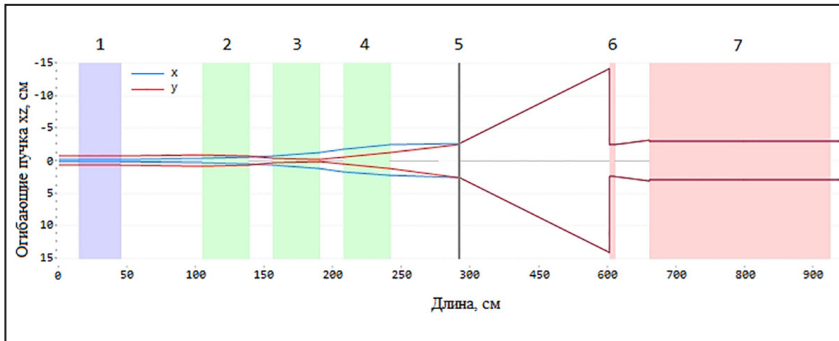


Рис. 1. Проект ядерной медицины: А – линии «Изотоп»; В – линия «Око»; Q1–Q9 – дублеты магнитных линз; Q10 – триплет магнитных линз; T1–T4 – мишенные станции



**Рис. 2.** Огибающие пучка для станции T4 (в качестве примера): X – горизонтальная плоскость; Z – вертикальная плоскость



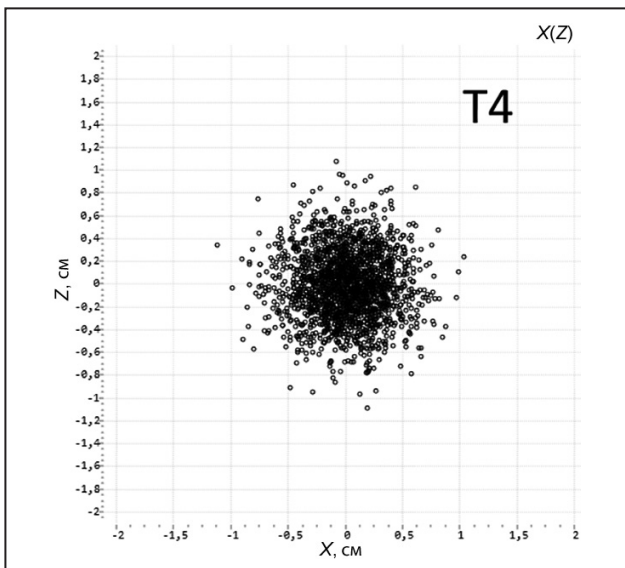
**Рис. 3.** Схема тракта для офтальмологии и огибающие пучка для станции «Око»: 1 – магнит-корректор; 2–4 – линзы триплета; 5 – рассеиватель пучка (пластина из тантала); 6 – коллиматор; 7 – защитная стена перед процедурной

Для формирования пучка, удовлетворяющего требованиям этапа «Око», был сконструирован тракт с пассивным рассеивателем из танталовой фольги толщиной 300 мкм.

Протонный пучок с энергией 70 МэВ, выведенный из ускорителя, транспортируется до танталовой фольги, на которой триплетом линз формируется размер пучка диаметром ~ 30 мм. Оптимизация тракта транспортировки протонного пучка на данном участке также выполнялась с помощью программы Proton\_MC. Результаты

прохождения протонов через танталовую фольгу толщиной 300 мкм, полученные с использованием программы GEANT4, являлись начальными условиями программы Proton\_MC при дальнейшей транспортировке расходящегося протонного пучка в свободном пространстве ~ 3,7 м.

Коллиматор, имеющий оптимальную длину по пучку 100 мм и диаметр 50 мм, установленный перед защитной стеной, окончательно формирует пучок с заданными условиями.



**Рис. 4.** Размер пучка на мишени T4





## Физика ядерных реакторов и ускорителей

- 94 Алгоритм расчета и оптимизации трактов протонных пучков высокой энергии методом Монте-Карло
- 95 Фокусирующие свойства магнитной структуры изохронного циклотрона с большим углом спиральности полюсных наконечников
- 97 Экспериментальная установка для исследования изотопного обмена на гидрофобном платиновом катализаторе



## Алгоритм расчета и оптимизации трактов протонных пучков высокой энергии методом Монте-Карло

Д. А. Амерканов, Е. М. Иванов, Г. А. Рябов, В. А. Тонких  
Отделение перспективных разработок НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

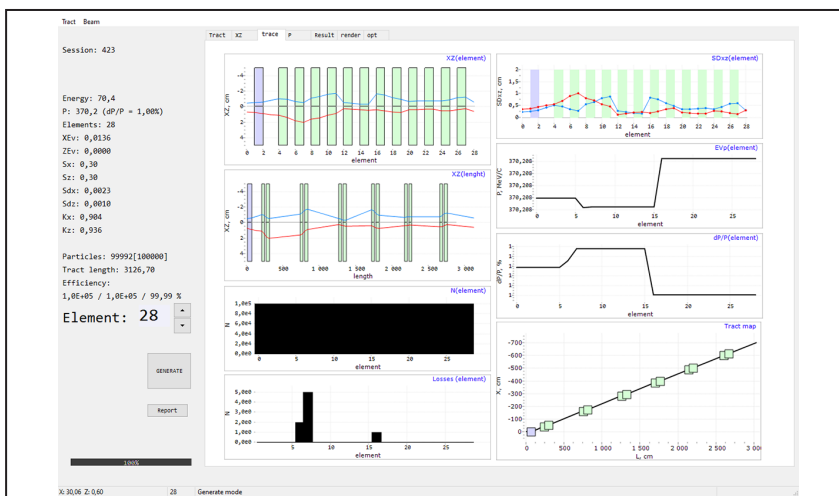
Расчет трактов пучка состоит в вычислении траекторий пучка протонов вдоль транспортного канала от источника до мишени с целью определения выходных параметров пучка. Для проведения таких вычислений с использованием метода Монте-Карло был разработан алгоритм Proton\_MK.

Пучок протонов вводится в виде многомерно-го гауссова распределения в фазовом пространстве  $x, x', z, z', \Delta p/p$ , который определяет набор начальных условий для частицы на входе в канал. Канал транспортировки состоит из отдельных элементов: квадрупольных линз, различных магнитов, свободных промежутков. В линейном приближении связь между входными и выходными координатами и скоростями в элементе канала можно получить с помощью матрицы перехода, причем для каждого элемента матрица имеет индивидуальную структуру. Расчет траектории частицы вдоль канала происходит путем последовательного применения матриц перехода через его отдельные участки. На выходе каждого элемента сравниваются координаты  $x$  и  $z$  с апертурами.

Если частица выходит за пределы апертуры, то она прекращает свое движение вдоль канала и выбывает из пучка. В результате многократного повторения такой процедуры на выходе каждого элемента получается набор частиц, позволяющий отследить все основные параметры пучка.

В случае установки поглотителя в транспортном канале параметры пучка после поглотителя рассчитываются с помощью GEANT4. Выходной файл GEANT4 может использоваться как входные данные для Proton\_MK. Алгоритм позволяет рассчитывать любые параметры пучка: интенсивность, пространственную или фазовую плотность, распределение энергии и др. В Proton\_MK включен блок оптимизации параметров пучка – это метод случайного поиска с коррекциями на основе анализа промежуточных результатов для получения глобального максимума функции многих переменных.

Алгоритм был опробован при расчетах трактов транспортировки пучка для циклотрона Ц-80. Интерфейс программы Proton\_MK приведен на рисунке.



Интерфейс программы Proton\_MK

## Фокусирующие свойства магнитной структуры изохронного циклотрона с большим углом спиральности полюсных наконечников

Д. А. Амерканов, С. А. Артамонов, Е. М. Иванов, Г. А. Рябов, В. А. Тонких  
 Отделение перспективных разработок НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Магнитные структуры с большим углом спиральности полюсных наконечников используются, как правило, в сверхпроводящих изохронных циклотронах, а также в «теплых» циклотронах, ускоряющих Н<sup>-</sup>-ионы. Особенности таких структур были исследованы в ряде работ как до, так и после появления надежных программ, позволяющих достаточно точно вычислять трехмерные магнитные поля. В связи с созданием в НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ изохронного Н<sup>-</sup>-циклотрона с энергией протонов 40–80 МэВ такие исследования были продолжены как в расширенном 2D-приближении, так и в рамках современных 3D-вычислений.

Как известно, частоты вертикальных колебаний, определяющие фокусировку по вертикали для каждого радиуса  $r$  рабочей области, могут быть выражены в цилиндрической системе координат с помощью приближенной формулы:

$$v_z^2 \approx -k + F \cdot S(r, \gamma); \quad S(r, \gamma) = 1 + 2tg^2\gamma, \quad (1)$$

где  $k$  – показатель роста среднего (изохронного) магнитного поля  $\langle B(r) \rangle$ ,

$$k = \frac{r}{\langle B \rangle} \frac{d\langle B \rangle}{dr} \approx \frac{2W}{E_0};$$

$W$  – кинетическая энергия;  $E_0 = 938,28$  МэВ – масса покоя протона;  $\gamma$  – геометрическая спиральность (ГС) магнитного поля (угол между радиус-вектором и касательной к сектору для заданного значения  $r$ ).

При этом азимутальная вариация магнитного поля определяется флаттером  $F(r)$ :

$$F(r) = \langle (B - \langle B \rangle)^2 \rangle / \langle B \rangle^2,$$

где  $\langle \dots \rangle = (2\pi)^{-1} \int_0^{2\pi} \dots d\theta$ .

Таким образом, исходя из выражения (1), при проектировании новых магнитных структур необходимо стремиться к росту в рабочей области

циклотрона как флаттера  $F$ , так и фактора  $S(r, \gamma)$ , чтобы их произведение было больше  $k$ .

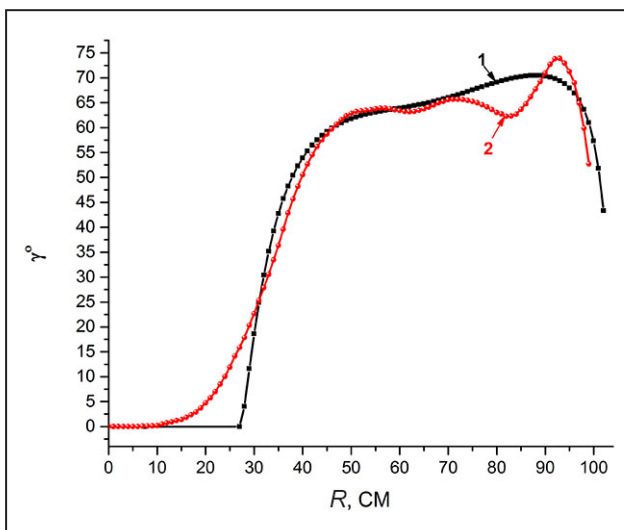
Известно, что для прямых секторов флаттер  $F$  максимальный, а  $S(r, \gamma) = 1$ , т. е.  $\gamma = 0$ . Однако часто, исходя из имеющихся возможностей и других соображений (например, параметры существующего магнита уже определены и их нельзя изменить без переделки), приходится искать некий компромиссный вариант магнитной структуры. В частности, если при уже заданных некоторых параметрах системы не удастся достичь необходимой вертикальной фокусировки частиц в проектируемом ускорителе только за счет флаттера магнитного поля (перепада поля от долины к сектору), то для ее увеличения привлекают еще и краевую фокусировку, которая возникает в таких структурах за счет введения искривленных боковых поверхностей секторов (большой угол геометрической спиральности  $\gamma$ ).

Такая ситуация, во-первых, характерна для сверхпроводящих циклотронов, поскольку в сильном магнитном поле сверхпроводящих обмоток ферромагнитные сектора достигают насыщения и не могут обеспечить необходимую фокусировку только за счет перепада поля от холма к долине. Во-вторых, аналогичная ситуация возникает и для изохронных циклотронов, ускоряющих отрицательные ионы водорода. Здесь часто сознательно ограничивают максимальное поле в холме ускорителя (т. е. уменьшают флаттер) для уменьшения потерь Н<sup>-</sup>-ионов на их электродиссоциацию. Тем самым введение в структуру большой спиральности с  $S(r, \gamma) > 1$  позволяет обеспечить необходимую фокусировку.

В данной работе мы предложили подход для анализа любой проектируемой магнитной структуры с большим углом спиральности полюсных наконечников циклотрона, опираясь на приближенные 2D- и точные 3D-вычисления.

Часть результатов работы была получена в 2D-приближении. Для этой цели был разработан метод факторов заполнения, позволяющий выбирать зазоры в холме и долине любой проектируемой магнитной структуры. Введение в рамках предложенного подхода безразмерного параметра  $x = r/N/g_h$  ( $r$  – текущий радиус;  $N$  – число элементов периодичности;  $g_h$  – зазор в холме) позволяет исследовать возможное поведение флаттера от радиуса циклотрона и обоснованно согласовать разумный выбор величины геометрической спиральности  $\gamma$  с другими параметрами циклотрона. Здесь уместно отметить, что расчет флаттера в виде аналитической зависимости представляет собой сложную задачу как в 2D-, так и в 3D-приближении, и поэтому всюду использовались приближенные методы.

3D-вычисления позволили уточнить, модифицировать и найти оптимальные параметры выбранной в рамках 2D-приближения магнитной структуры. При этом было выявлено, что важную роль в таких структурах играет так называемая магнитная спиральность  $\gamma_{MC}$  (МС), которая определяется как  $\text{tg}\gamma_{MC} = r \cdot d\Phi_N/dr$ , где  $\Phi_N$  – фаза основной гармоники в разложении магнитного поля циклотрона в ряд Фурье.



Следует подчеркнуть, что в 3D-подходе для Ц-80 обнаружены два новых важных эффекта, касающихся МС и ГС и неизвестных ранее: эффект «проникновения» и эффект «отставания». Суть их отражает рисунок. Видно, что МС приводит к нежелательному изменению вертикальной фокусировки на радиусах менее 35 см. Здесь это названо эффектом «проникновения» МС в область прямых секторов циклотрона, т. е. структуру с большим углом спиральности целесообразно применять на радиусах более чем 35 см. Следовательно, такая структура хорошо работает на радиусах, превышающих зазор в долине. Таким образом, обнаруженный эффект «проникновения» легко объясняет повсеместное использование на практике в разных циклотронах прямых секторов в центральной области.

С другой стороны, из рисунка видно, что на радиусах  $\sim 75 \leq r \leq 88$  см имеет место «отставание» МС поля от ГС. Их максимальное отличие друг от друга может достигать  $\sim 7^\circ$ , что при спиральности в  $\sim 65^\circ$  приводит к  $\sim 30\%$ -му нежелательному уменьшению фокусировки, поэтому эффект «отставания» необходимо учитывать при проектировании магнитных структур новых циклотронов, когда опираются, как правило, только на ГС.

Углы спиральности (в градусах) в зависимости от радиуса циклотрона Ц-80: 1 – геометрическая спиральность  $\gamma$ ; 2 – магнитная спиральность  $\gamma_{MC}$  – производная основной гармоники магнитного поля, полученная в 3D-вычислениях и измерениях магнитного поля

## Экспериментальная установка для исследования изотопного обмена на гидрофобном платиновом катализаторе

Д. А. Кузьмин, О. А. Федорченко, А. А. Брык, И. А. Алексеев

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

В настоящее время в НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ продолжается работа по вводу в эксплуатацию установки извлечения трития (УИТ). В ее основе используется процесс химического изотопного обмена (ХИО), для реализации которого в системе «вода – водород» используют катализатор активации молекулярного водорода марки РХТУ-ЗСМ.

Катализатор РХТУ-ЗСМ представляет собой сферические гранулы носителя СДВБ (сополимера стирола и дивинилбензола) диаметром 0,8–1 мм, на которые нанесена платина. Количество платины в катализаторе 0,8–1,2 масс. %.

Для оптимизации технологического процесса за счет вклада стадии каталитического обмена была собрана экспериментальная установка по изучению каталитической активности образцов катализатора (рис.).

Водород природного состава из электролизера поступает в преднасытитель, где насыщается парами воды с известной концентрацией дейтерия и трития при 90 °С. Далее парогазовая смесь поступает в насытитель, где температура задается другим термостатом в пределах 50–85 °С. Тем самым после выхода водорода из насытителя он предельно насыщен парами воды при заданной температуре. Для предотвращения конденсации путь до реактора подогревается. Далее водород с парами воды поступает в прямоточный реактор (аппарат КИО), обогреваемый до температуры 50–100 °С электрическим нагревателем, где происходит каталитический изотопный обмен на слое катализатора. Перед ним и после установлены две термопары для более точного определения температуры. Выходящая из реактора пароводородная смесь поступает в конденсатор, охлаждаемый водопроводной водой. Остаточные пары улавливаются силикагелевой ловушкой,

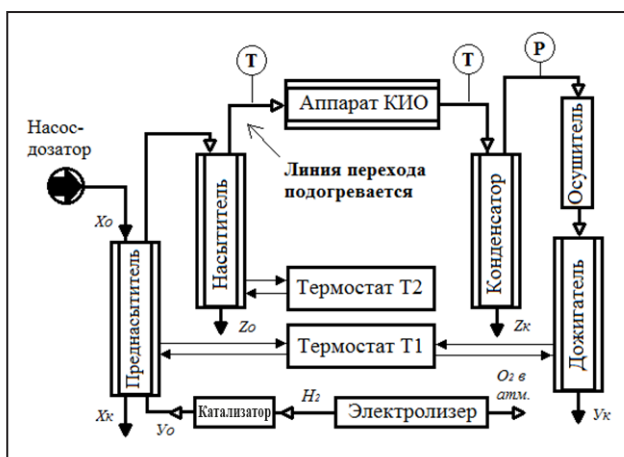


Схема экспериментальной установки по изучению каталитической активности образцов катализатора

кой, а сухой газ поступает в дожигатель, где окисляется в избытке кислорода до воды.

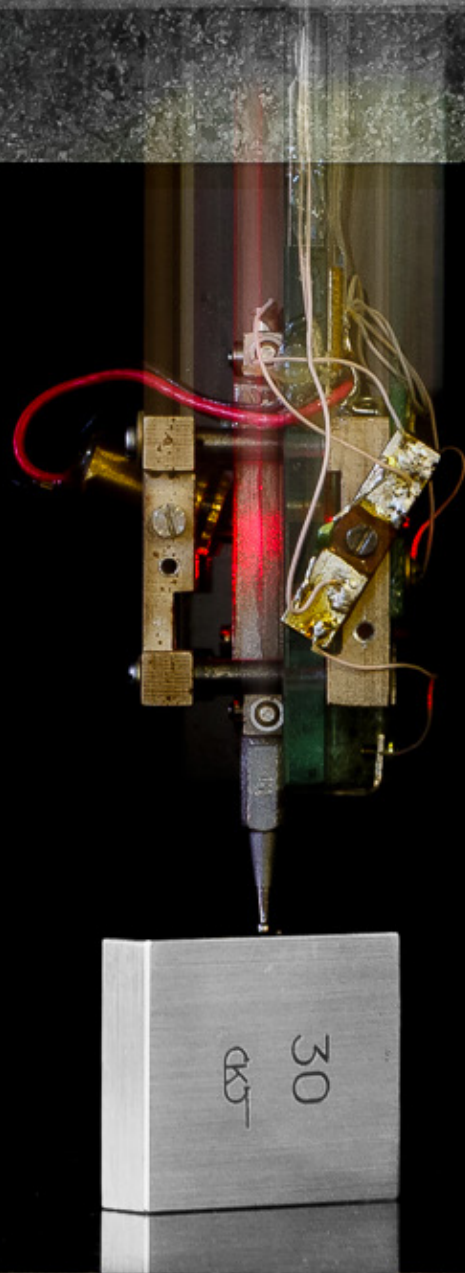
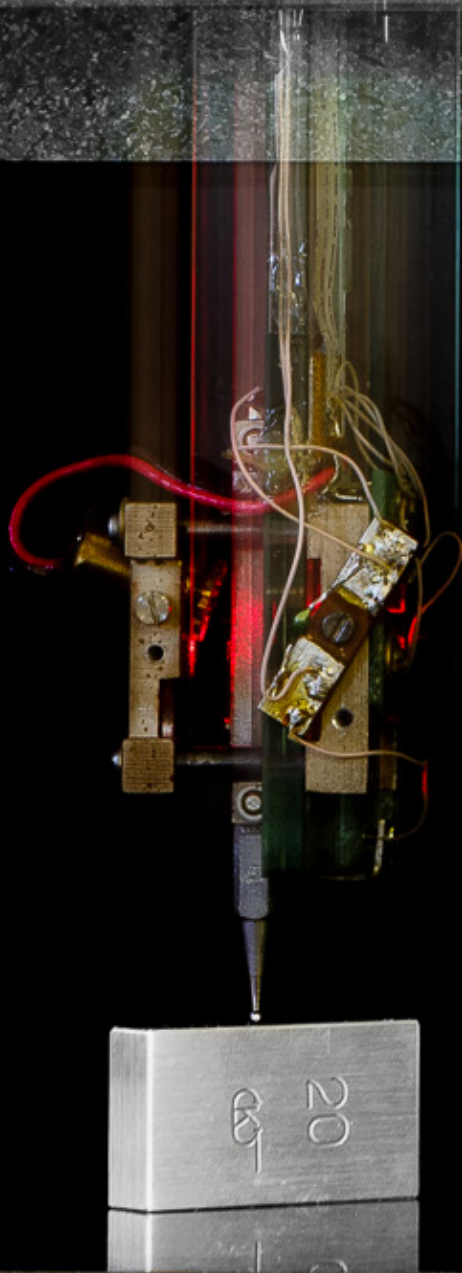
Пробоотборников три: насытитель, конденсатор, дожигатель. Анализ воды на количество дейтерия производится на ИК-спектрофотометре Nicolet iS50R FT-IR, а трития – на приборе Hidex 300 SL.

Особенности установки:

- насыщение газа происходит на слое спирально-призматической насадки, которая находится в термостатируемой стеклянной трубке, а не с помощью барботера;
- независимая регулировка температур в насытителе и прямоточном реакторе;
- варьирование расхода водорода путем регулировки силы тока на электролизере.

На данный момент проведено большое количество экспериментов при разных условиях работы катализатора. Ведется наработка данных для математического моделирования процесса изотопного обмена, происходящего в прямоточном реакторе.





## Прикладные исследования и разработки

- 100 Переработка металлосодержащих гальванических шламов в смесевые водорастворимые металлоуглеродные структуры
- 101 Оценка биораспределения мезенхимальных стволовых клеток в доклинической модели почечного туберкулеза с помощью измерений нелинейного магнитного отклика
- 102 Новый способ химического обогащения урана легкими изотопами
- 103 Структура протонпроводящих мембран по данным рассеяния нейтронов и рентгеновских лучей
- 104 Изучение радиационной стойкости кремниевых детекторов при облучении  $\alpha$ -частицами и осколками деления
- 105 Исследование радиационной эрозии многопроводочных пропорциональных камер в экспериментах на Большом адронном коллайдере
- 106 Применение модифицированного перлита для решения проблем технологической и химической безопасности Арктического региона
- 107 Портативный наноизмерительный голографический плоскомер
- 108 Высокоразрешающий цифровой голографический микроскоп для отражающих объектов
- 109 Компьютерная инфраструктура современной физической лаборатории

## Переработка металлосодержащих гальванических шламов в смесевые водорастворимые металлоуглеродные структуры

В. П. Седов<sup>1</sup>, А. А. Борисенкова<sup>1,2</sup>, С. В. Фомин<sup>1</sup>, М. В. Суясова<sup>1,3</sup>, Д. Н. Орлова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Отделение перспективных разработок НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)

<sup>3</sup> Санкт-Петербургский университет государственной противопожарной службы МЧС России

Разработанные к настоящему моменту технологии переработки металлосодержащих гальванических шламов требуют применения многостадийных процессов с использованием большого числа разнообразных, в т. ч. токсичных, реагентов (химические методы) либо большого расхода энергии (электрохимические методы). Эти технологии предназначены для переработки шлама постоянного состава конкретного производства и не могут быть применены при резких колебаниях химического состава шлама.

В настоящей работе предложена технологическая схема, позволяющая получать из отходов гальванических производств с высоким выходом смесевые водорастворимые металлоуглеродные наноструктуры. Разработанная схема переработки гальванических шламов включает в себя последовательные операции синтеза смесевого металлофталоцианинового пигмента, пиролиза металлофталоцианинов, синтеза фуллереносодержащей сажи путем электродугового испарения композитных электродов, содержащих пиролизат металлофталоцианинов, экстракции из сажи фуллеренов и металлофуллеренов и синтеза их водорастворимых производных. Данная схема предполагает использование необезвоженных гальванических шламов, имеющих влажность 80–85 %, без специальной подготовки. Переработка гальванических шламов по предложенной

схеме позволит уже на первой стадии получать товарный продукт – металлофталоцианиновый пигмент, пригодный для окрашивания полимеров, бумаги, строительных материалов (наполнителей, цементов и т. д.).

Установлено, что все металлы, входящие в состав железосодержащих и медьсодержащих гальванических шламов, способны образовывать стабильные комплексы с фталоцианином и металлофуллерены. Содержащиеся в гальванических шламах металлы способствуют повышенному выходу фуллеренов. В случае применения пиролизатов металлофталоцианинов, синтезированных из гальванических шламов, при электродуговом синтезе металлофуллеренов возможно применение электродов, изготовленных из низкосортного графита, что экономически выгодно. При переработке гальванических шламов по предлагаемой схеме можно получать водорастворимые смесевые металлосодержащие фуллерены с количественным выходом, в состав которых входят все металлы исходного гальванического шлама.

Результаты работы обладают практической значимостью, т. к. разработанная комплексная технология решает проблему обезвреживания отходов и сокращения их объемов путем переработки в товарную продукцию токсичных соединений тяжелых цветных металлов.

## Оценка биораспределения мезенхимальных стволовых клеток в доклинической модели почечного туберкулеза с помощью измерений нелинейного магнитного отклика

В. В. Дериглазов<sup>1</sup>, Я. Ю. Марченко<sup>2</sup>, В. А. Рыжов<sup>2</sup>, М. А. Шевцов<sup>3</sup>, Н. М. Юдинцева<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Отделение нейтронных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

<sup>2</sup> Отделение молекулярной и радиационной биофизики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

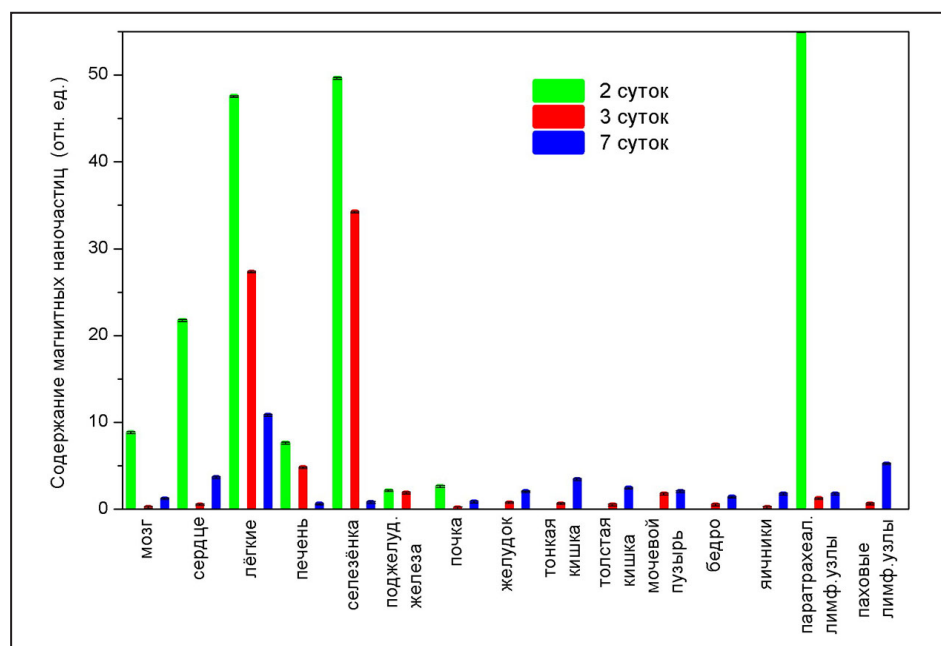
<sup>3</sup> Институт цитологии РАН

Предварительные исследования обнаружили перспективность использования мезенхимальных стволовых клеток (МСК) в терапии социально значимой болезни – туберкулеза, в частности, для адресной доставки лекарственных средств. Изучалась кинетика биораспределения и накопления стволовых клеток в органах и тканях при их внутривенном введении подопытным кроликам. В качестве модели и маркеров терапевтических средств использовались наночастицы магнетита размером 10 нм в оболочке декстрана, обладающие суперпарамагнитными свойствами, предварительно введенные в стволовые клетки в процессе 24-часовой коинкубации.

Препарированные образцы тканей различных органов подопытных животных исследовались методом нелинейного отклика на второй гармони-

ке намагниченности  $M_2$ . Аппроксимация зависимостей  $M_2$  от статического магнитного поля численными решениями кинетического уравнения Фоккера – Планка позволила определить намагниченности насыщения и магнитные параметры находящихся в них магнитных центров, по которым определено биораспределение наночастиц и, следовательно, стволовых клеток в различных органах.

Кинетика накопления наночастиц в сердце, легких, печени, селезенке, мозге, желудке и других органах туберкулезных кроликов (на 2, 3 и 7 сутки после инъекции МСК) представлена на рисунке. Полученные данные позволили определить параметры модели, описывающей кинетику накопления и выведения стволовых клеток исследованными органами.



Биораспределение магнитных наночастиц в органах инфицированных кроликов через 2, 3 и 7 суток после инъекции наночастиц



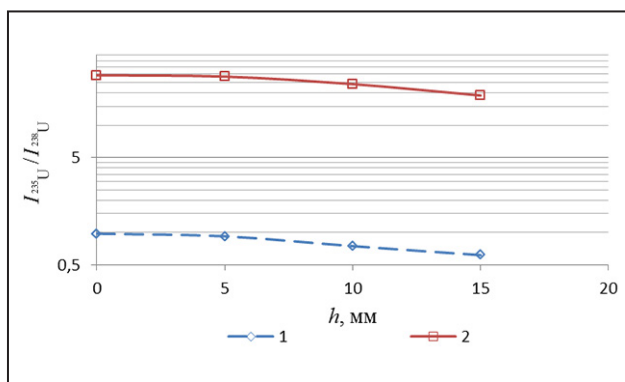
## Новый способ химического обогащения урана легкими изотопами

В. Г. Зиновьев, Д. А. Румянцева, И. А. Митропольский, А. П. Серебров,  
П. А. Сушков, Т. М. Тюкавина, Г. И. Шуляк, И. С. Окунев  
Отделение нейтронных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Для увеличения чувствительности  $\gamma$ -спектрометрического метода определения элементного и изотопного состава образцов использовалась адсорбция комплекса  $UO_2(NO_3)_2 \cdot 2TB\Phi$  на поверхности полипропилена ( $C_3H_6$ )<sub>n</sub> в экстракционной системе на основе раствора азотной кислоты и экстрагента трибутилфосфата (ТБФ). Молекула ТБФ является полярной и поверхностно-активной молекулой. Такие дифильные молекулы, взаимодействуя одновременно с полярными и неполярными средами, самопроизвольно накапливаются на границе их раздела. Неполярным компонентом служила емкость из полипропилена. В приграничной пленке из ориентированных молекул комплекса  $UO_2(NO_3)_2 \cdot 2TB\Phi$  изотопы урана распределены по высоте в соответствии с их атомным весом. В результате верхняя часть пленки содержит уран, обогащенный легкими изотопами урана  $^{234}U$  и  $^{235}U$ .

Изотопное распределение определено из расчета отношений интенсивностей линий  $\gamma$ -излучения с энергиями 185,739 и 92,7 кэВ ( $I_{185}/I_{92}$ ) и энергиями 185,739 и 1000,997 кэВ ( $I_{185}/I_{1001}$ ). На рисунке приведены зависимости измеренных отношений интенсивностей аналитических линий  $I_{185}/I_{92}$  и  $I_{185}/I_{1001}$ , которые пропорциональны обогащению урана по изотопам  $^{234}U$  и  $^{235}U$  на разной глубине от поверхности раствора.

Таким образом, экспериментально показано, что полипропилен (неполярный компонент)



Отношения интенсивностей аналитических линий  $I_{185}/I_{92}$  (линия 1) и  $I_{185}/I_{1001}$  (линия 2) в зависимости от глубины  $h$  отбора образца

прочно удерживает комплекс  $UO_2(NO_3)_2 \cdot 2TB\Phi$  в верхней части на границе раздела полярной и неполярной фаз. При этом более легкие изотопы урана собираются в верхних слоях пленки, состоящей из молекул комплекса  $UO_2(NO_3)_2 \cdot 2TB\Phi$ . Концентрация легких изотопов увеличилась:

- по  $^{234}U$  с  $0,0016 \pm 0,0003$  ат. % в исходном растворе до  $0,017 \pm 0,002$  ат. %,
- по  $^{235}U$  с  $0,471 \pm 0,007$  ат. % в исходном растворе до  $1,49 \pm 0,02$  ат. %.

Эти результаты подтверждены методом рентгенофлуоресцентного анализа распределения концентрации урана вдоль оси симметрии стакана в направлении от поверхности раствора до дна стакана.

## Структура протонопроводящих мембран по данным рассеяния нейтронов и рентгеновских лучей

Ю. В. Кульвелис<sup>1</sup>, В. Т. Лебедев<sup>1</sup>, О. Н. Примаченко<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Отделение нейтронных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

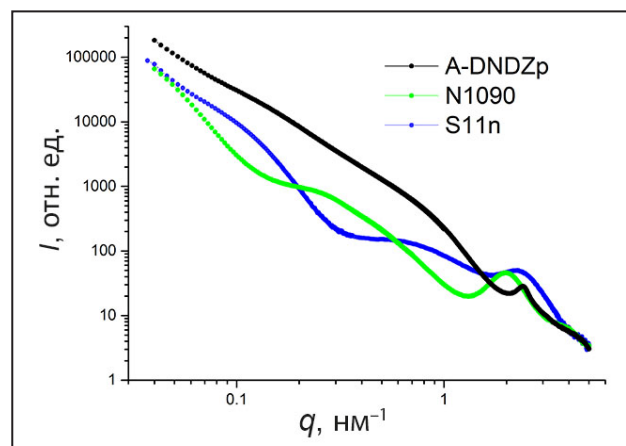
<sup>2</sup> Институт высокомолекулярных соединений РАН

В целях создания более эффективных и экономичных водородных топливных элементов разработаны новые протонопроводящие мембраны на основе матриц Nafion® и Aquivion® (перфторированных сополимеров с различной длиной боковых цепей), модифицированных детонационными наноалмазами. Усовершенствован метод приготовления мембран с повышенными проводящими свойствами за счет введения в полимерный раствор малых количеств ( $\leq 1$  масс. %) детонационных наноалмазов размером 4–5 нм с привитыми к поверхности группами (Н, ОН, СООН, SO<sub>3</sub>H), удаления растворителя и осаждения смеси на твердую подложку.

Наиболее успешно комбинированный механизм проводимости для мембран типа Aquivion® реализуется в присутствии протонированных алмазов (положительно заряженных типа Z+) либо несущих сульфокислотные группы. В структуре мембран, по данным малоуглового рассеяния нейтронов, при внедрении алмазов сохраняется иономерный пик при величине вектора рассеяния  $q \sim 2 \text{ нм}^{-1}$ , что означает сохранение основных структурных элементов в полимерной матрице – гидрофильных проводящих каналов и их взаимного расположения.

Аналогичные структурные данные были получены для серии мембран типа Nafion® с наноалмазами Z+. Однако протонная проводимость этих мембран существенно снижается в присутствии 2–3 вес. % алмазов. Для более глубокой

интеграции алмазных частиц в полимерную матрицу проведен эксперимент по приготовлению сополимера (эмульсионная сополимеризация) типа Nafion® в смеси с наноалмазами Z+. Полученная композитная мембрана демонстрирует суженный иономерный пик на кривых рентгеновского рассеяния, смещенный в сторону увеличения  $q$  (рис.). Такие изменения отражают усиление упорядочения каналов при уменьшении поперечного расстояния между ними в условиях высокого обогащения алмазами (4,1 вес. %) вследствие более однородного распределения в материале мембраны, показавшей хорошие проводящие свойства.



Малоугловое рентгеновское рассеяние на композиционной мембране A-DNDZp, полученной сополимеризацией в присутствии алмазов, в сравнении с другими мембранами типа Nafion® (N1090) и Aquivion® (S11n) без алмазов

1. Primachenko O.N., ..., Kulvelis Yu.V. et al. // J. Fluor. Chem. 2021. V. 244. P. 109736.
2. Kulvelis Yu.V., Primachenko O.N., ..., Lebedev V.T. et al. // Russ. Chem. Bull. 2021. V. 70. No. 9. P. 1713.
3. Lebedev V.T., Kulvelis Yu.V., ..., Primachenko O.N. et al. // J. Surf. Inv. 2021. V. 15. No. 5. P. 939.
4. Primachenko O.N., ..., Kulvelis Yu.V., Lebedev V.T. // Polym. Adv. Technol. 2021. V. 32. No. 4. P. 1386.

## Изучение радиационной стойкости кремниевых детекторов при облучении $\alpha$ -частицами и осколками деления

Н. В. Базлов, А. В. Дербин, И. С. Драчнев, И. М. Котина, О. И. Коньков,  
М. С. Микулич, В. Н. Муратова, М. В. Трушин, Е. В. Унжакон  
Отделение нейтронных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

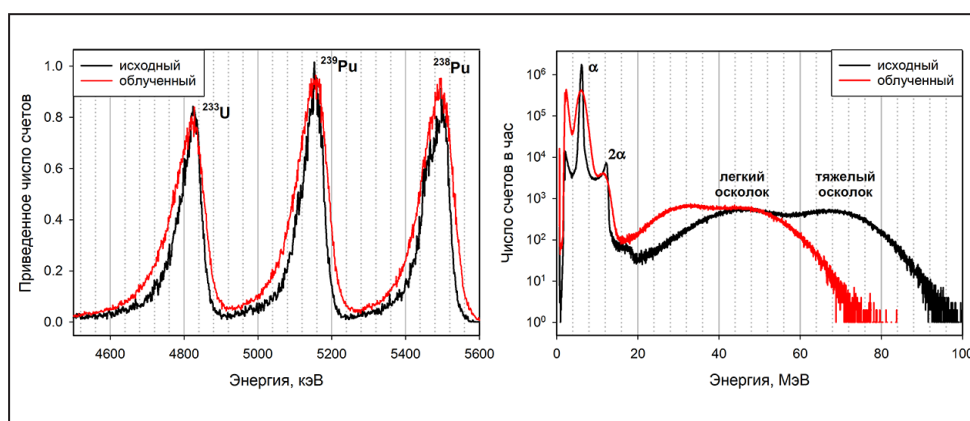
В ряде ядерно-физических экспериментов кремниевые полупроводниковые детекторы вынуждены работать при интенсивных уровнях облучения  $\alpha$ -частицами и осколками деления. Высокие уровни облучения приводят к образованию большого количества радиационных дефектов в материале детектора, серьезно ухудшающих рабочие параметры прибора.

Для изучения радиационной стойкости полупроводниковых детекторов использовалась специально созданная экспериментальная установка для регистрации спектров осколков деления и  $\alpha$ -частиц и определения эксплуатационных признаков деградации детектора, таких как ухудшение энергетического разрешения и отношения «сигнал/шум», рост обратного тока и т. д. Исследовались два типа Si-детекторов, изготовленных в НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ: кремниеволитиевые Si(Li)-*p-i-n*-детекторы и кремниевые поверхностно-барьерные детекторы.

Проведенные исследования показали, что длительное облучение  $\alpha$ -частицами ведет к ухудше-

нию разрешающей способности детектора вследствие роста обратного тока (рис.). В то же время облучение осколками деления радионуклида  $^{252}\text{Cf}$  приводит к последовательному сдвигу положения пиков осколков деления в сторону меньших энергий (см. рис.). Установленный линейный характер происходящих с ростом дозы облучения изменений позволяет оценить критическую дозу, при превышении которой детектор окажется непригодным для решения конкретных исследовательских задач. Так, например, было показано, что перекрытие сигналов осколков деления и  $\alpha$ -частиц (см. рис.) при детектировании продуктов распада  $^{252}\text{Cf}$  произойдет при экспозиции порядка  $10^9$  осколков деления, после чего детектор окажется непригодным для детектирования сигналов от осколков деления. Дополнительные эксперименты были посвящены определению типа и концентрации радиационных дефектов, образовавшихся в облученных детекторах.

Работа поддержана грантом РФФИ № 20-02-00571.



Спектры  $\alpha$ -частиц ядер  $^{233}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  и  $^{238}\text{Pu}$  (слева); спектры осколков деления  $^{252}\text{Cf}$  (справа), измеренные Si(Li)-детектором в начале и в конце периода длительного облучения  $\alpha$ -частицами и продуктами распада  $^{252}\text{Cf}$  соответственно

1. Bakhlanov S.V., Bazlov N.V., ..., Derbin A.V., Drachnev I.S., Kotina I.M., Konkov O.I., ..., Mikulich M.S., Muratova V.N., Trushin M.V., Unzhakov E.V. // Phys. Stat. Sol. A. 2021. V. 218. P. 2100212.
2. Bakhlanov S.V., Derbin A.V., Drachnev I.S., Konkov O.I., Kotina I.M., ..., Mikulich M.S., Muratova V.N., ..., Trushin M.V., Unzhakov E.V. // J. Phys. Conf. Ser. 2021. V. 2103. P. 012138.

## Исследование радиационной эрозии многопроволочных пропорциональных камер в экспериментах на Большом адронном коллайдере

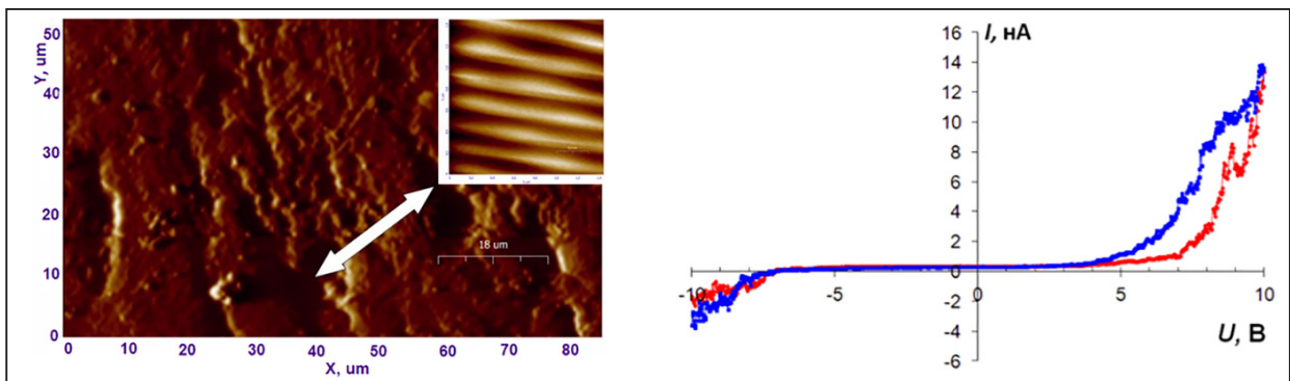
Г. Е. Гаврилов, А. А. Дзюба, О. Е. Маев

Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Выполнены комплексные ресурсные исследования многопроволочных пропорциональных камер (МПК) из экспериментов на Большом адронном коллайдере. Впервые показано, что причина возникновения в МПК спонтанных самоподдерживающихся токов – низкопороговая эмиссия электронов из наноуглеродных структур на катодах.

Для выяснения природы источников спонтанных токов исследовались образцы катодов прототипов МПК мюонной системы эксперимента CMS, прошедших длительное (порядка  $2 \cdot 10^6$  с) облучение  $\beta$ -источником  $^{90}\text{Sr}$  (флюенс –  $10^{13}$  см $^{-2}$ ) в лабораторных условиях. Методами атомно-силовой микроскопии (АСМ) обнаружены изменения морфологии поверхности медной фольги катода, вызванные радиационными дефектами (рис.), выполнена количественная оценка эволюции этих повреждений в зависимости от дозы облучения, но в лабораторных испытаниях не удалось наблюдать спонтанные токи в прототипах МПК CMS из-за малой площади прототипов и относительно небольшого времени их облучения.

Разработанные методы АСМ были успешно применены для сравнительного исследования катода полномасштабной МПК, демонтированной из экспериментальной установки LHCb, поскольку конструкционные материалы МПК в LHCb и CMS почти идентичны, а газовые смеси МПК в этих экспериментах имеют аналогичный состав:  $\text{Ar}/\text{CO}_2/\text{CF}_4$ . В образцах катодов прототипов МПК CMS и МПК из эксперимента LHCb было обнаружено сходство радиационных дефектов. Сравнение дефектов на медной фольге катода, в зоне эмиссии спонтанного тока и вне этой зоны, показало, что в первом случае высоты микропиков дефектов в три раза меньше, чем во втором, т. е. спонтанный ток в МПК не связан с микропиками на катоде. АСМ-исследование вольт-амперных характеристик поверхности катода и RBS-анализ элементного состава обнаружили в зоне эмиссии наноуглеродные структуры, вызванные плазмохимическим формированием, которые хорошо известны как низкопороговые источники автоэмиссии электронов.



АСМ-скан наноструктуры на катоде (слева), вставка размером  $1,5 \times 1,5$  мкм. Вольт-амперная зависимость в области нанографитной пленки (справа): при нарастании напряжения  $U$  от  $-10$  до  $+10$  В (красные точки); при понижении напряжения от  $+10$  до  $-10$  В (синие точки)

1. Бузоверея М. Э., Гаврилов Г. Е., Маев О. Е. // ЖТФ. 2021. Т. 91. Вып. 2. С. 375–382.
2. Buzoverya M.E., Gavrilov G.E., Maev O.E. // Techn. Phys. 2021. V. 66. No. 2. P. 356–366.
3. Dzyuba A., Gavrilov G., Maev O. et al. // Book of Abstr. LXXI Int. Conf. “Nucleus-2021”. 2021. P. 165.



## Применение модифицированного перлита для решения проблем технологической и химической безопасности Арктического региона

А. В. Башаричев<sup>1</sup>, И. С. Окунев<sup>2</sup>, В. Я. Сиротюк<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Научный центр комплексной безопасности НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

<sup>2</sup> Отделение нейтронных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

При освоении Арктической зоны с учетом негативных факторов (таяния вечной мерзлоты, низкой температуры, удаленности от развитой инфраструктуры, угроз экологической безопасности загрязнения нефтяными продуктами и т. д.) простым и доступным решением является использование вспененного перлита для решения ряда задач в вопросе технологической и пожарной безопасности Арктической зоны по направлениям производства:

- вспученного модифицированного перлита (рис. а) в качестве сорбента при ликвидации чрезвычайных ситуаций разного типа (утечки нефтепродуктов, кислот и т. д.) и огнестойких покрытий;
- легких перлитобетонов (рис. б) в комплексе с шунгезитом и пемзой с исключительно низкой теплопроводностью для строительства в условиях вечной мерзлоты и слабых грунтов;
- композиционных панелей (пеноперлита) (рис. в), превосходящих стены из бетона по свойствам теплоизоляции и легкости конструкций.

Модифицированный перлит обладает рядом преимуществ, среди которых:

- облегчение конструкции более чем на 40–70 %;

- более высокие теплоизоляционные свойства в сравнении с пенопластом на 18–27 %;
- высокая степень шумоизоляции;
- отсутствие разложения и гниения (рН нейтрален);
- отсутствие горения (температура применения от –200 до 1 000 °С), нетоксичность;
- простота регенерации использованного перлитового сорбента с возможностью применения в строительстве и сельском хозяйстве;
- уникальная экологическая безопасность материала (использование в сельском хозяйстве в виде агроперлита);
- он легче воды (использование при ликвидации загрязнений на поверхности водоемов).

Таким образом, применение перлита позволяет существенно расширить линейку эффективных, недорогих, но высокотехнологических продуктов для огнезащиты, строительства и т. д. в экстремальных природных условиях. Наличие значительных запасов пемзы, перлита на Камчатке, шунгезита в Карелии способствует удешевлению стоимости производства материалов для Арктического региона.



Вспученный перлит (а); перлитобетон (б); пеноперлит (в)

## Портативный наноизмерительный голографический плоскомер

Б. Г. Турухано, Н. Турухано, С. Н. Ханов, Ю. М. Лавров, В. В. Добырн,  
 О. Г. Ермоленко, Л. А. Константинов, Е. А. Вилков, И. В. Ладатко  
 Отделение перспективных разработок НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

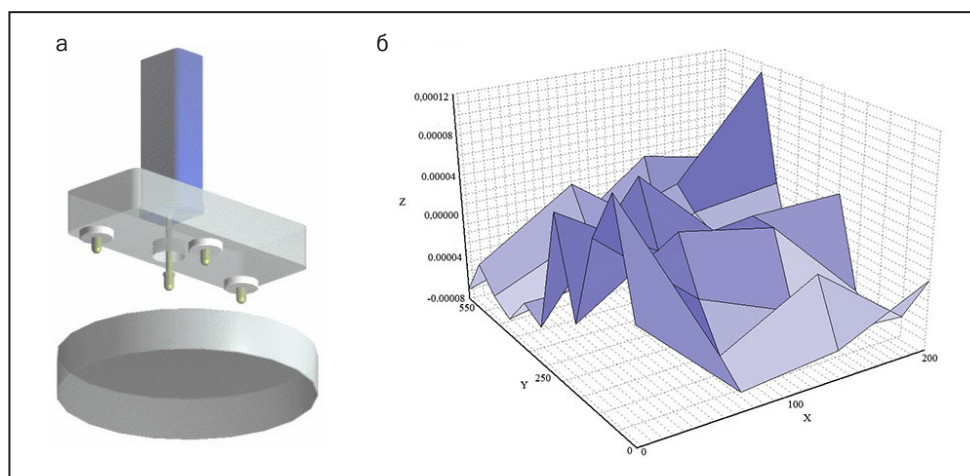
Портативный наноизмерительный голографический плоскомер – ПНГПл (рис. а) относится к измерительной технике, точнее к области измерения и контроля качества оптических поверхностей, их отклонения от заданной формы поверхности, определения шероховатости поверхности, в т. ч. сверхгладких поверхностей, например плоских зеркал, полированных подложек и т. п. ПНГПл приводит к увеличению точности измерения, снятию ограничений по величине измеряемой поверхности, ускорению процесса измерений и увеличению рабочего температурного диапазона.

Длиномеры голографические представляют собой малогабаритные преобразователи линейных перемещений с голографическим измерительным элементом и предназначены для прецизионных измерений длины и линейных перемещений в реальном масштабе времени, обработки и сохранения результатов измерения при работе как в автономном режиме, так и с авто-

матизированными системами измерения линейных перемещений. Информация о значении измеренной величины отображается в цифровом виде на экране автономного блока и (или) экране дисплея персонального компьютера в виде таблиц и графиков.

Основным измерительным элементом ПНГПл, обеспечивающим его высокие характеристики, является голографический длиномер – ДГ. На рисунке б показано отклонение поверхности от плоскостности.

Программа по измеренным величинам строит отклонение от плоскостности поверхности по трем координатам – X, Y, Z. Причем конструкция устройства такова, что нет никаких ограничений по количеству точек измерений и, следовательно, величине измеряемой поверхности. Отклонение поверхности от плоскостности необходимо определить при создании множества изделий и высокоточных оптических приборов, используемых в приборостроении.



Плоскомер (а);  
 отклонение поверхности  
 от плоскостности (б)

## Высокоразрешающий цифровой голографический микроскоп для отражающих объектов

Б. Г. Турухано, И. А. Турухано, Н. Турухано

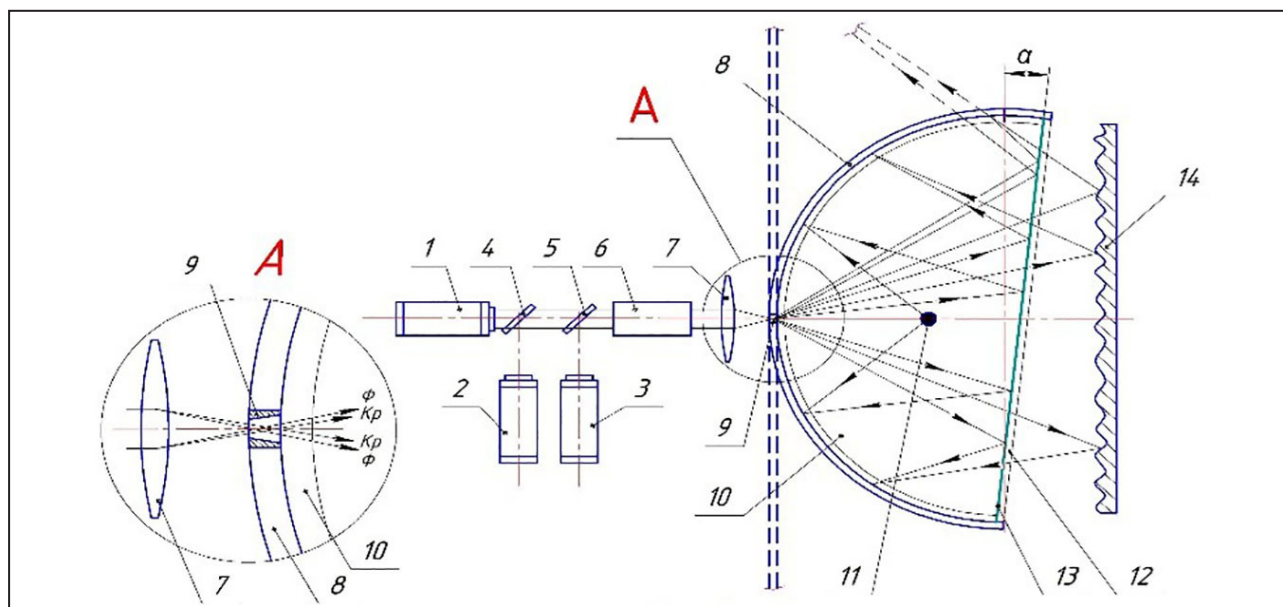
Отделение перспективных разработок НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Высокоразрешающий цифровой голографический микроскоп с полусферической матрицей (ЦГМС) предназначен для регистрации голограмм отражающих и прозрачных объектов. Он имеет ряд преимуществ перед оптическим микроскопом, а также перед классическим цифровым голографическим микроскопом (ЦГМ), содержащим плоскую матрицу.

ЦГМС позволяет регистрировать голограмму, на которой записывается высокочастотная компонента интерференционной картины, создаваемой объектной и вспомогательной волнами. Его подключение к персональному компьютеру

дает возможность сохранять полученные данные, редактировать их, а также использовать для дальнейших исследований, в т. ч. включать в различные автоматические системы обработки данных и управления. Запись высокочастотной компоненты объекта позволяет максимально повысить разрешающую способность ЦГМ.

Это попытка создания технологии визуализации микро- и наноструктур на основе оптической голографии, цифровой обработки и компьютерных технологий для создания интеллектуальных глобальных систем следующего поколения (рис.).



Сравнение регистрации голограммы с помощью цифрового голографического микроскопа с плоской матрицей и цифрового голографического микроскопа с полусферической матрицей. А – увеличенный узел; источники излучения – лазеры: 1 – синий; 2 – зеленый; 3 – красный; 4, 5 – полупрозрачные зеркала; 6 – фильтр; 7 – фокусирующий объектив; 8 – сферическая матрица; 9 – диафрагма; 10 – кювета; 11 – фазовый объект; 12 – прозрачное плоское окно кюветы; 13 – полупрозрачное покрытие окна кюветы; 14 – отражающий объект

## Компьютерная инфраструктура современной физической лаборатории

А. В. Найков, Н. Ю. Самохин, А. Е. Шевель

Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

ОФВЭ вовлечено в значительное число физических экспериментов в России и за ее пределами. Подготовка, тестирование экспериментального оборудования требуют хранения и обработки большого объема распределенных данных, как экспериментальных, так и текстовых. Организация средств обработки данных и доступа к ним вне зависимости от расположения, т. е. облачная инфраструктура, является очевидным подходом. В период 2020–2021 гг. был реализован конкретный вариант локальной облачной инфраструктуры ОФВЭ (или просто «облако»).

Аппаратной основой облачной инфраструктуры ОФВЭ является локальная сеть и централизованные серверы Отделения. Сервисы DNS, проху, виртуальный вычислительный микрокластер, мониторинговые средства (Zabbix), включая информирование менеджера по имейлу и Telegram о необычных событиях в «облаке», распределенное хранилище (Nextcloud), разработка программ (JupyterHub), средства инвентаризации (GLPI), резервное копирование (BackupPC) и другие представлены в виде программных агентов, выполняющихся в операционно-изолированных средах, в нашем варианте – в форме виртуальных машин (VM).

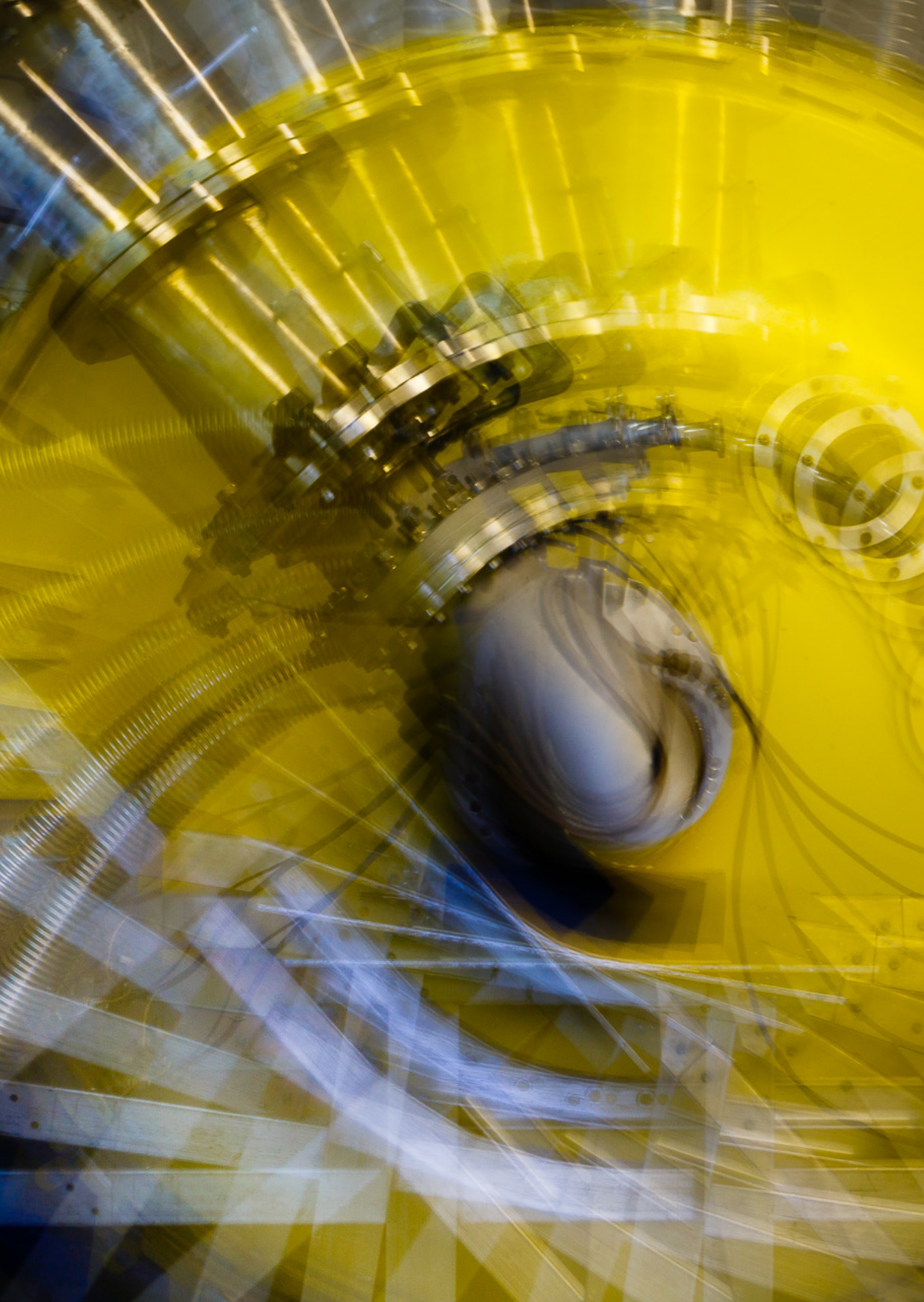
Взаимодействие VM между собой реализовано с использованием элементов виртуализации NFV. Предпринятые меры по обеспечению необходимого дублирования для повышения надежности функционирования оборудования и предотвращения несанкционированного сете-

вого доступа обеспечивают высокий уровень доступности, исключая в большинстве инцидентов необходимость неотложного ручного вмешательства.

Поскольку VM могут быть перемещены за относительно небольшое время с одного сервера на другой или на иной вычислительный кластер, то пользователи взаимодействуют только с виртуальными компонентами компьютерной инфраструктуры. В комплексе такая организация компьютерной инфраструктуры позволяет планировать развитие набора сервисов для научных исследований в значительной степени независимо от географического расположения аппаратных компонентов.

На фоне полезных свойств описанной выше локальной облачной архитектуры возникает вопрос об использовании публичных «облаков», например [opendata.cern.ch](https://opendata.cern.ch), [zenodo.org](https://zenodo.org), SberCloud, Advanced, [mail.ru](https://mail.ru), [yandex.ru](https://yandex.ru), [amazon.com/ec2](https://amazon.com/ec2), [google.com](https://google.com), [azure.microsoft.com](https://azure.microsoft.com) и многих сотен других. В современных условиях, учитывая полную стоимость владения вычислительными средствами, использование публичных облачных ресурсов следует рассматривать как серьезную альтернативу или дополнение к локальным ресурсам. Особый интерес в публичной облачной системе может представлять наличие продвинутых аппаратных возможностей, например специальных высокопроизводительных процессоров и/или сложных программных систем, таких как искусственные нейронные сети и др.





## Базовые установки

- 112** Состояние работ по программе энергетического пуска реактора ПИК в 2021 г.
- 113** Статус ускорительного отдела в 2021 г.
- 115** Модернизация мюонного спектрометра детектора ATLAS

## Состояние работ по программе энергетического пуска реактора ПИК в 2021 г.

А. С. Захаров<sup>1</sup>, А. С. Полтавский<sup>2</sup>, С. Р. Фридман<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Отдел физики и техники реакторов НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

<sup>2</sup> Управление ядерной и радиационной безопасности НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

В 2021 г. в ходе выполнения Программы испытаний в режиме освоения мощности до 10 МВт выполнен основной объем экспериментов, подтверждающих проектные характеристики реактора ПИК.

Расчетное сопровождение экспериментов обеспечивалось комплексом программ для ЭВМ: MCNP (аттестационный паспорт № 259 от 14.12.2020), MCU-5 (аттестационный паспорт № 536 от 13.11.2021), RC (аттестационный паспорт № 520 от 09.07.2021) и другими программами, используемыми НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ (эксплуатирующая организация), НИЦ «Курчатовский институт» (головная научная организация) и АО «Ордена Ленина Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники им. Н. А. Доллежалея» (головная конструкторская организация).

В 2021 г. выполнен последовательный выход на уровни мощности реактора 200, 400 и 800 кВт с проверкой работы реакторных систем и экспериментального оборудования исследовательских станций на выведенных нейтронных пучках.

С целью обоснования безопасной эксплуатации реактора в условиях возникновения гидродинамического эффекта реактивности разработана и выполнена Рабочая программа исследований режимов работы реактора «Эксперименты по измерению гидродинамического эффекта реактивности». Безопасность эксплуатации

исследовательского ядерного реактора ПИК при наличии положительного гидродинамического эффекта реактивности, связанного с отключением главных циркуляционных насосов первого контура реактора, обеспечивалась разработанными проектными решениями.

В 2021 г. выполнены работы по обоснованию безопасности эксплуатации реактора при использовании тепловыделяющих сборок (ТВС) ПИК-2. Проведено рассмотрение возможных проектных и запроектных аварий с учетом требований нормативных документов. Анализ полученных результатов показал безопасность эксплуатации реактора при использовании ТВС ПИК-2. Радиационное воздействие на население и окружающую среду при нормальной эксплуатации, нарушениях нормальной эксплуатации, включая проектные и запроектные аварии, не приводит к превышению установленных доз облучения населения, нормативов по выбросам/сбросам и содержанию радиоактивных веществ в окружающей среде.

Соответствующие изменения внесены в новую редакцию Отчета по обоснованию безопасности комплекса с исследовательским ядерным реактором ПИК.

Полученные в 2021 г. экспериментальные и расчетные результаты являются основой для обоснования безопасности и надежности работы систем реактора ПИК на следующем этапе энергетического пуска.



## Статус ускорительного отдела в 2021 г.

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

Синхроциклотрон СЦ-1000 с током выведенного пучка 1 мкА и энергией 1 000 МэВ является одной из базовых установок Института. Он успешно функционирует с 1970 г. Его основными задачами являются:

- исследования в физике элементарных частиц;
- изучение структуры атомных ядер и механизмов ядерных реакций, включая ядра, удаленные от полосы β-стабильности;
- фундаментальные разработки в различных областях физики твердого тела;
- медико-биологические исследования.

Кроме того, СЦ-1000 широко используется для целого спектра прикладных задач. Наиболее важными среди них можно назвать работы по радиационным испытаниям электронной компонентной базы, разработки по получению новых радиоизотопов, исследования по ядерной медицине. СЦ-1000 является единственной надежной, стабильно работающей установкой в России, на мишенях которой можно получать спектр переменных энергий ~ 60–1000 МэВ с шагом 50 МэВ.

С ноября 2020 г. по ноябрь 2021 г. синхроциклотрон отработал на экспериментальные задачи 1657 ч. На рисунке 1 показано распределение времени работы СЦ-1000 по месяцам, а на рис. 2 – по различным направлениям исследований в процентах.

В НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ разрабатывается концептуальный проект комплекса ядерной медицины «Око» и «Изотоп» на базе изохронного циклотрона Ц-80. В соответствии с техническим заданием силами сотрудников лаборатории физики и техники ускорителей ускорительного отдела ОПР были решены и оптимизированы основные проблемы этого проекта.

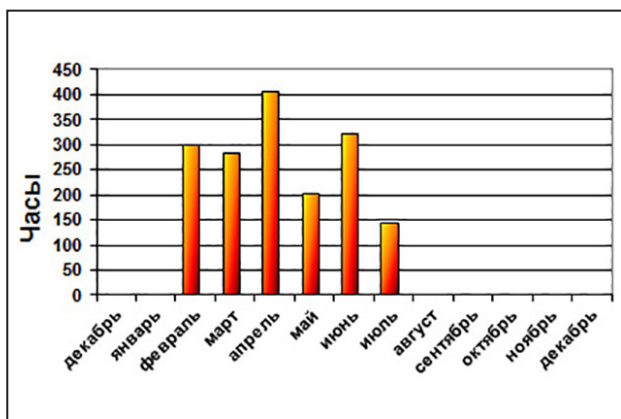


Рис. 1. Время работы СЦ-1000 в 2020–2021 гг.

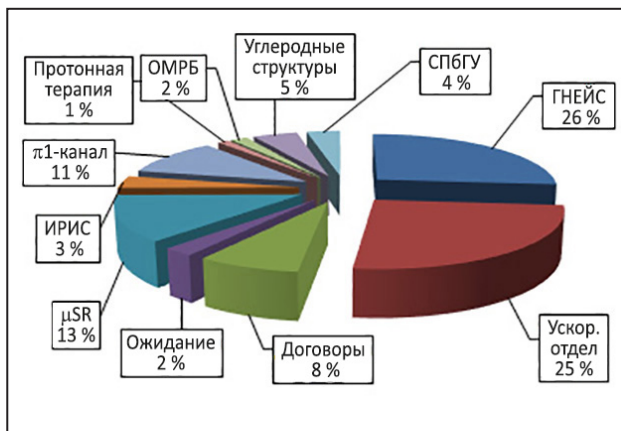
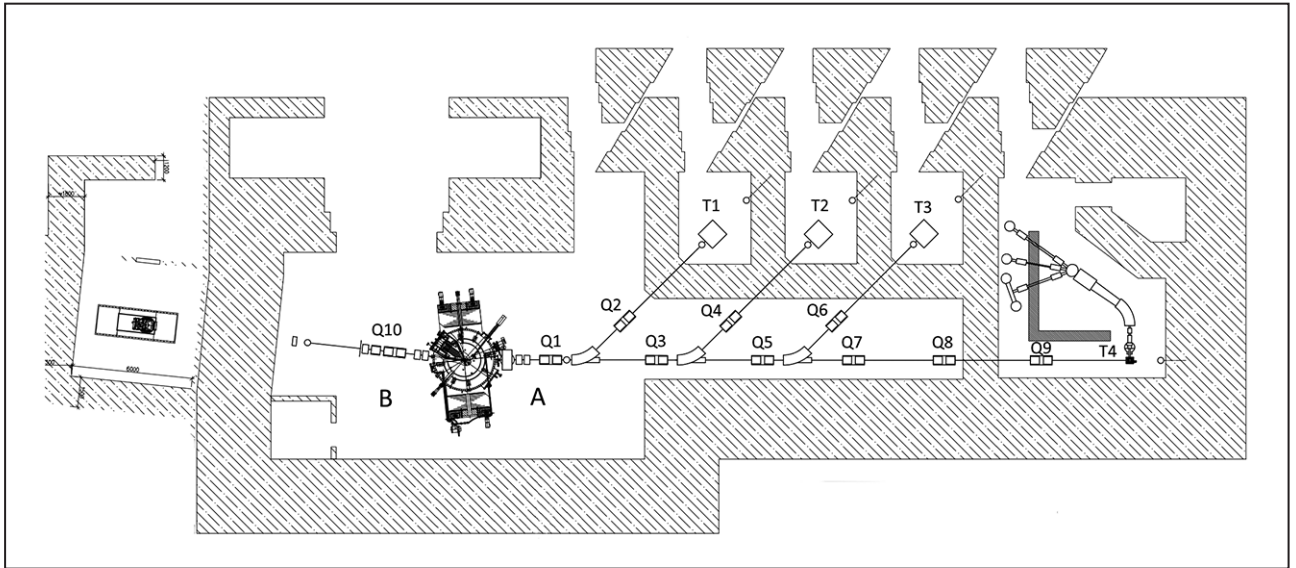


Рис. 2. Распределение времени работы СЦ-1000 по различным направлениям исследований

Это и участие в проектировании нового здания, и вопросы переноса в него Ц-80, и создание оптимальных трактов транспортировки для станций (4 шт.) по разработке новых методов получения радионуклидов и радиофармпрепаратов (этап «Изотоп», рис. 3 «А», справа от циклотрона). Также оптимизировано создание комплекса протонной терапии заболеваний органов зрения (этап «Око», рис. 3 «В», слева от циклотрона). Выявлено, что





**Рис. 3.** Проект ядерной медицины: А – линии «Изотоп»; В – линия «Око». Q1–Q9 – дублеты магнитных линз; Q10 – триплет магнитных линз; T1–T4 – мишенные станции

для этого необходима модернизация выводной системы циклотрона Ц-80. Произведены расчеты и исследования, позволяющие разработать и реализовать одновременный вывод двух пучков. Один пучок с интенсивностью  $\sim 100$  мкА

и энергией 40–80 МэВ будет использован для производства изотопов, второй – для офтальмологии с энергией  $\sim 70$  МэВ и интенсивностью до 10 мкА, где применяется оптимальный замедлитель из тантала.

## Модернизация мюонного спектрометра детектора ATLAS

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

Большой адронный коллайдер (БАК), расположенный в Европейском центре ядерных исследований (ЦЕРН), есть и останется в течение долгого времени ускорителем, который обеспечивает самую высокую энергию протон-протонных столкновений, что свидетельствует о новизне и актуальности получаемых с его помощью экспериментальных результатов. БАК сейчас находится на финальной стадии модернизации и будет запущен в 2022 г. Ожидаемая светимость ускорителя после апгрейда будет составлять  $3 \cdot 10^{34} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ . Увеличение светимости ускорителя приведет к существенному росту радиационной загрузки детектора ATLAS, в первую очередь в областях, близких к точке взаимодействия протонных пучков БАК. Этот фактор вносит серьезные ограничения на эффективность работы детектора ATLAS при заданной светимости ускорителя. Для решения этих проблем во время модернизации БАК (фаза 1) происходит замена существующих малых мюонных колес на новые малые мюонные колеса (НМК). НМК включают в себя детекторы для прецизионного измерения координат и выработки триггерного сигнала, способные работать в условиях высокого радиационного фона и имеющие отличное пространственное и временное разрешение в реальном времени.

Для прецизионного измерения координат в НМК используются микроячеистые камеры, а для выработки триггерного сигнала – стриповые тонкозачерненные камеры сТЗК. сТЗК – это многопроволочные камеры, которые работают в режиме ограниченной пропорциональности с коэффициентом газового усиления около  $10^5$ . Газовый объем между анодом и катодом

составляет 1,4 мм, а расстояние между группами проволок – 1,8 мм. Тонкозачерненные камеры сТЗК имеют два сегментированных катода с каждой стороны газового объема. Первый катод сегментирован в узкие полосы шириной 3,2 мм, а противоположный катод – в большие площадки – пады. Проволоки соединены между собой в группы по 20, что соответствует гранулированности 3,6 см.

Производство сТЗК-камер происходило на пяти сборочных участках: в России, Израиле, Китае, Канаде и Чили. Производство самых больших камер QL3 было успешно завершено в НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ в 2020 г. Все собранные камеры были отправлены в ЦЕРН, где после прохождения процедуры контроля качества они были установлены в структуры НМК, которые, как видно на рисунке, были доставлены в шахту эксперимента ATLAS для дальнейшего тестирования перед вводом НМК в эксплуатацию.



Новое малое мюонное колесо типа А в шахте эксперимента ATLAS





## Научно-организационная деятельность

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



## Кадровый состав

### Численность сотрудников

| Профессиональные квалификационные группы должностей | 2019  | 2020  | 2021  |
|---|-------|-------|-------|
| Всего без учета совместителей                       | 1 962 | 1 987 | 1 970 |
| Всего научных сотрудников                           | 473   | 473   | 462   |
| <i>Из них с должностью</i>                          |       |       |       |
| руководителя  | 68    | 66    | 60    |
| главного научного сотрудника                        | 9     | 9     | 9     |
| ведущего научного сотрудника                        | 42    | 44    | 44    |
| старшего научного сотрудника                        | 151   | 146   | 140   |
| научного сотрудника                                 | 86    | 83    | 83    |
| младшего научного сотрудника                        | 58    | 59    | 53    |
| прочие научные сотрудники                           | 59    | 66    | 73    |
| <i>С ученой степенью</i>                            |       |       |       |
| доктора наук  | 66    | 62    | 59    |
| кандидата наук                                      | 218   | 215   | 203   |
| <i>С ученым званием</i>                             |       |       |       |
| академика   | -     | -     | -     |
| члена-корреспондента                                | 2     | 2     | 1     |
| профессора  | 9     | 8     | 6     |
| доцента (с. н. с.)                                  | 87    | 80    | 74    |

### 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 | 46          | 2                     | 3           | 41           |
| Главные научные сотрудники    | 9           | -                     | -           | 9            |
| Ведущие научные сотрудники    | 44          | 2                     | -           | 42           |
| Старшие научные сотрудники    | 140         | 8                     | 12          | 120          |
| Научные сотрудники            | 83          | 9                     | 24          | 50           |
| Младшие научные сотрудники    | 53          | 20                    | 24          | 9            |

**Численность научных сотрудников по возрастным группам**

| Профессиональные квалификационные группы должностей | Возраст, лет |       |       |       |             |                 |
|---|--------------|-------|-------|-------|-------------|-----------------|
|   | 20–29        | 30–39 | 40–49 | 50–59 | 60 и старше | средний возраст |
| Всего научных сотрудников                           | 78           | 88    | 51    | 62    | 183         | 52              |
| <i>С ученой степенью</i>                            |              |       |       |       |             |                 |
| доктора наук  | -            | -     | 6     | 10    | 43          | 69              |
| кандидата наук                                      | 1            | 34    | 29    | 38    | 101         | 58              |
| <i>Не имеют ученой степени</i>                      | 77           | 54    | 16    | 14    | 39          | 41              |
| <i>С ученым званием</i>                             |              |       |       |       |             |                 |
| академика   | -            | -     | -     | -     | -           | -               |
| члена-корреспондента                                | -            | -     | -     | -     | 1           | 76              |
| профессора  | -            | -     | -     | -     | 6           | 83              |
| доцента (с. н. с.)                                  | -            | -     | -     | 3     | 71          | 73              |

**Численность и средний возраст научных сотрудников по должностям**

| Должность                 | 2019        |                 | 2020        |                 | 2021        |                 |
|---------------------------|-------------|-----------------|-------------|-----------------|-------------|-----------------|
|                           | Численность | Средний возраст | Численность | Средний возраст | Численность | Средний возраст |
| Главный научный сотрудник | 9           | 82              | 9           | 83              | 9           | 80              |
| Ведущий научный сотрудник | 42          | 69              | 44          | 68              | 44          | 66              |
| Старший научный сотрудник | 151         | 62              | 146         | 62              | 140         | 61              |
| Научный сотрудник         | 86          | 51              | 83          | 50              | 83          | 51              |
| Младший научный сотрудник | 58          | 32              | 59          | 32              | 53          | 32              |
| Руководитель              | 68          | 63              | 66          | 62              | 60          | 63              |
| Прочие научные сотрудники | 59          | 27              | 66          | 27              | 73          | 30              |

**Структура и штатная численность за 5 лет**

| Категория персонала                    | 2017    | 2018    | 2019    | 2020     | 2021    |
|--|---------|---------|---------|----------|---------|
| Научный персонал                       | 503,9   | 489,2   | 435,5   | 450,2    | 430,4   |
| Научно-технический персонал            | 241,8   | 251,8   | 290,7   | 296,05   | 299,4   |
| Административно-хозяйственный персонал | 1 121,9 | 1 181,4 | 1 253,1 | 1 290,15 | 1 318,2 |
| Младший обслуживающий персонал         | 32,5    | 32,5    | 32,5    | 31,5     | 31,5    |
| Всего по штатному расписанию           | 1 900,1 | 1 954,9 | 2 011,8 | 2 067,9  | 2 079,5 |

## Количественные показатели научной и образовательной деятельности

В НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ выполнены все мероприятия, а также достигнуты все целевые индикаторы и показатели, запланированные на 2021 г., в т. ч. за счет субсидии на финансовое обеспечение выполнения государственного задания на 2021 г. (плановый период 2022 и 2023 гг.).

Сотрудники Института в 2021 г. были авторами и соавторами 650 статей, из них 446 публикаций, проиндексированных в базе данных Web of Science («Сеть науки») и ассоциированных с НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, что составляет 68,6 % 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 |
|------|---|
| 2017 | 592/426   |
| 2018 | 689/507   |
| 2019 | 714/465   |
| 2020 | 674/473   |
| 2021 | 650/446   |

### Динамика участия в научных мероприятиях за 5 лет

| Год  | Количество фактов участия в выставочной деятельности, конференциях, на форумах и т. д. |
|------|--|
| 2017 | 466  |
| 2018 | 420  |
| 2019 | 422  |
| 2020 | 387  |
| 2021 | 417  |

### Число полученных в 2021 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 |
| 7  | 1                         | 19                                 | 27    |

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

| Вид правоохранительного документа  | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 |
|------------------------------------|------|------|------|------|------|
| Патенты на изобретения             | 4    | 7    | 10   | 5    | 7    |
| Патенты на полезные модели         | 5    | 4    | 2    | 8    | 1    |
| Свидетельства на программы для ЭВМ | 6    | 25   | 12   | 13   | 19   |
| Свидетельства на базы данных       | 1    | 1    | -    | -    | -    |
| Зарегистрированные ноу-хау         | -    | 3    | -    | -    | -    |
| Всего                              | 16   | 40   | 24   | 26   | 27   |

В 2021 г. научные исследования сотрудников Института были поддержаны грантами РФФИ (24) и РНФ (13), также имелась поддержка Минобрнауки России в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 гг.».

В 2021 г. в рамках выполнения Программы деятельности НИЦ «Курчатовский институт» на 2018–2022 гг. сотрудники Института защитили 10 кандидатских и 2 докторские диссертации.

### Подготовка кадров высшей квалификации за 5 лет

| Год  | Общее число диссертаций / диссертации на соискание ученой степени доктора наук |
|------|--|
| 2017 | 11/1   |
| 2018 | 8/2  |
| 2019 | 7/-  |
| 2020 | 9/3  |
| 2021 | 12/2   |

НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ на основании лицензии от 02.06.2017 № 2599 и свидетельства о государственной аккредитации от 06.07.2020 № 3414 осуществляет образовательную деятельность по программам высшего образования – программам подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре в соответствии с требованиями ФГОС ВО по 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 2021 г. состоялся первый выпуск из аспирантуры Института после получения новой лицензии на образовательную деятельность. Всего было выдано 7 дипломов об окончании аспирантуры, подтверждающих успешное завершение третьей ступени высшего образования по 4 направленностям подготовки: «Генетика», «Физика атомного ядра и элементарных частиц», «Физика конденсированного состояния» и «Биофизика».



В 2021 г. на обучение по очной форме в аспирантуру было зачислено 10 человек: 3 человека по направлению подготовки 06.06.01 «Биологические науки» (направленность 03.02.07 «Генетика») и 7 человек по направлению подготовки 03.06.01 «Физика и астрономия» (направленности: 01.04.02 «Теоретическая физика», 01.04.07 «Физика конденсированного состояния», 01.04.16 «Физика атомного ядра и элементарных частиц», 03.01.02 «Биофизика»).

Общая численность аспирантов на конец 2021 г. составляла 48 человек.

В 2021 г. НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ участвовал в открытом конкурсе Минобрнауки России по распределению контрольных цифр приема (КЦП) граждан на обучение по программам аспирантуры за счет бюджетных ассигнований федерального бюджета на 2021/22 учебный год. Были получены КЦП по направлениям подготовки: 03.06.01 «Физика и астрономия» – 8 мест, 06.06.01 «Биологические науки» – 5 мест.

В 2021 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 29 %.

В лабораториях Института в 2021 г. выполняли учебно-исследовательские и научные работы, проходили практику, готовили выпускные квалификационные работы бакалавров и специалистов, а также магистерские диссертации более 170 студентов вузов страны.

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

| Год  | Количество студентов |
|------|----------------------|
| 2017 | 101                  |
| 2018 | 122                  |
| 2019 | 127                  |
| 2020 | 154                  |
| 2021 | 175                  |

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

В соответствии с договором о сотрудничестве и совместной деятельности между администрацией Гатчинского муниципального района Ленинградской области и НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ и в рамках действующих соглашений о сотрудничестве с образовательными учреждениями (МБОУ «Гатчинский лицей № 3 им. Героя Советского Союза А. И. Перегудова», МБОУ «Гатчинская СОШ № 9 с углубленным изучением отдельных предметов», АНОО «Гатчинская гимназия «Апекс», МБОУ ДО «ГЦНО «Центр информационных технологий», МБОУ «Гатчинская СОШ № 2», МБОУ «Гатчинская СОШ № 7», МБУ «Централизованная библиотечная система города Гатчины») сотрудниками Института ведется работа со старшеклассниками, включающая чтение научно-популярных лекций, отбор перспективных учащихся и проведение с ними практических занятий по углубленному изучению физики, биологии, химии и математики.

В научно-образовательном центре НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ читаются лекции и проводятся факультативные занятия по углубленному изучению отдельных тем по физике и биологии

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

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

В НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ ведется уникальный проект по программе «Школьная экологическая инициатива», направленный на экологическое воспитание детей и подростков. В 2021 г. состоялись творческие конкурсы, олимпиады, экологические акции, в которых приняли участие около 5 000 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 сотрудников Института.

Активное участие сотрудников Института в конкурсе на соискание **премии имени И. В. Курчатова** уже стало доброй традицией. Особенно приятно, что его организаторы привлекают к участию не только ведущих и молодых ученых и инженеров, но также и студентов. В 2021 г. среди победителей традиционно есть работы и авторские коллективы НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ.

**Среди работ молодых научных сотрудников и инженеров-исследователей** в список победителей вошли работы *Е. А. Иевлева* «Неабелевы струны в  $N = 1$  и  $N = 2$  суперсимметричной КХД», *Д. С. Виноградовой* в соавторстве с *Е. М. Максимовой* (Институт белка РАН) «Новый механизм регуляции инициации трансляции малыми молекулами в *Escherichia coli*», а также работа *А. Э. Копытовой*, *М. А. Николаева* и *А. А. Чеблокова* «Амброксол повышает ферментативную активность глюкоцереброзидазы (GCase) и восстанавливает количество и транслокацию GCase в первичных макрофагах пациентов с болезнью Гоше и паркинсонизмом».

**Среди студенческих работ** в числе лучших признана работа *К. С. Башаровой* «Транскриптомный профиль первичной культуры макрофагов пациентов с болезнью Паркинсона, ассоциированной с мутациями в гене *GBA*».

### Динамика получения премии имени И. В. Курчатова сотрудниками НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ за 2012–2021 гг.

| Номинация конкурса   | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 |
|--|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| В области научных исследований                                     | 1    | 1    | 1    | 1    | 3    | –    | 2    | 1    | 1    | –    |
| В области инженерных и технологических разработок                  | 1    | –    | 2    | 1    | –    | 1    | 1    | –    | –    | –    |
| Среди работ молодых научных сотрудников и инженеров-исследователей | –    | 1    | 2    | 2    | 3    | 1    | 3    | 1    | 2    | 3    |
| Среди студенческих работ   | –    | –    | 3    | 4    | 5    | 2    | 1    | 3    | 1    | 1    |
| Всего  | 2    | 2    | 8    | 8    | 11   | 4    | 7    | 5    | 4    | 4    |

В ежегодном конкурсе научных работ на соискание **премии имени академика А. П. Александрова** в НИЦ «Курчатовский институт» в 2021 г. сотрудники Института не участвовали.

### Динамика получения премии имени академика А. П. Александрова сотрудниками НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ за 2015–2021 гг.

| Номинация конкурса            | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 |
|-------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| Основное отделение конкурса   | 1    | –    | 1    | 1    | –    | 1    | –    |
| Молодежное отделение конкурса | –    | 2    | –    | –    | –    | –    | –    |
| Всего                         | 1    | 2    | 1    | 1    | –    | 1    | –    |

В 2021 г. Правительством Ленинградской области продолжалась поддержка 8 работ сотрудников НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, удостоенных **именных научных стипендий Губернатора Ленинградской области**: 4 сотрудника получили именную научную стипендию Губернатора Ленинградской области в категории «ведущие ученые» и 4 сотрудника – в категории «молодые ученые».

**Именные стипендиаты Губернатора Ленинградской области в категории «ведущие ученые»:**

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

**Именные стипендиаты Губернатора Ленинградской области в категории «молодые ученые»:**

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

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

Лауреатом премии Губернатора Ленинградской области II степени за лучшую научно-исследовательскую работу для молодых ученых стал младший научный сотрудник ОТФ кандидат физико-математических наук **Е. А. Иевлев** за работу «Неабелевы струны в  $N = 1$  и  $N = 2$  суперсимметричной КХД».

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

Для молодых ученых и специалистов НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, демонстрирующих существенные успехи в научных исследованиях,

были учреждены **именные стипендии** в знак признания заслуг и в память о выдающихся ученых С. Е. Бреслере, В. Н. Грибове, Г. М. Драбкине и В. М. Лобашеве, научная деятельность которых была неразрывно связана с Институтом. Стипендии присуждаются ежегодно по следующим номинациям:

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

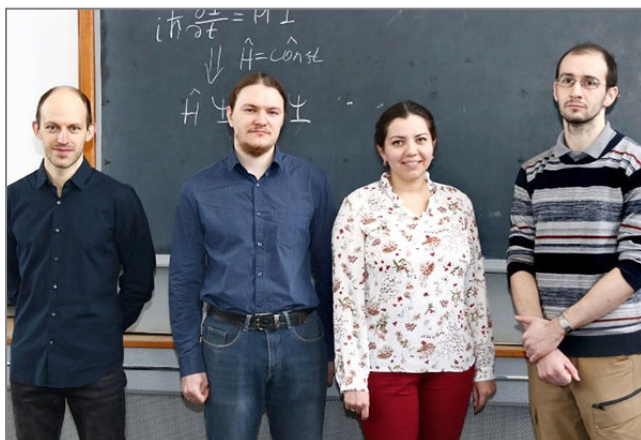
В 2021 г. 5 молодым сотрудникам Института присудили данные именные стипендии.

**Стипендию имени В. Н. Грибова** за работы в области теоретической физики получил младший научный сотрудник сектора теоретической физики высоких энергий ОТФ **Е. А. Иевлев** («Неабелевы струны в  $N = 1$  и  $N = 2$  суперсимметричной КХД»). **Стипендия имени С. Е. Бреслера** за работы в области биологии присуждена младшему научному сотруднику лаборатории экспериментальной и прикладной генетики ОМРБ **И. М. Голомидову** («Роль  $\alpha$ -синуклеина в развитии нейропатологии при болезни Пар-



Е. А. Иевлев





ных моментов ядер методами спектроскопии трехатомных молекул»). **Стипендия имени Г. М. Драбкина** за работы в области физики конденсированного состояния присуждена лаборанту-исследователю группы спектроскопии отдела эксплуатации нейтронных станций ОНИ М. Х. Юзвюк («*In situ* синхротронное исследование анионного обмена в слоистых двойных гидроксидах и их структуры»).

**Премия Президента Российской Федерации в области науки и инноваций для молодых ученых за 2021 г.** получил старший научный сотрудник лаборатории квантовой химии ОПР Л. В. Скрипников за цикл работ по развитию теории электронной структуры соединений тяжелых элементов для поиска новой физики и исследования структуры ядра.



Д. В. Чубуков



П. А. Мелентьев

**Стипендии Президента Российской Федерации для молодых ученых и аспирантов**, осуществляющих перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики на 2021–2023 гг., был удостоен 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 получил стипендию **Правительства Российской Федерации для студентов и аспирантов очной формы обучения на 2021/22 учебный год.**

О. И. Утесов был удостоен права получения **гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых** – кандидатов наук, докторов наук и ведущих научных школ Российской Федерации на научное исследование МК-1366.2021.1.2 «Изучение свойств спиральных магнетиков с интерфейсным взаимодействием Дзялошинского – Мория».

кинсона на модели *Drosophila melanogaster* и поиск соединений, способных корректировать данную патологию»). **Стипендия имени В. М. Лобашева** за работы в области ядерной физики присуждена двум молодым сотрудникам: старшему лаборанту лаборатории физики элементарных частиц ОФВЭ Д. Е. Соснову («Первое измерение процессов протон-ядерной дифракции на Большом адронном коллайдере») и младшему научному сотруднику лаборатории квантовой химии ОПР Д. Е. Майсону («Поиск *CP*-нечетных магнитных квадрупольных моментов ядер методами спектроскопии трехатомных молекул»).



Л. В. Скрипников

На конкурсе научных работ НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ 2021 г. комиссия рассмотрела 26 работ по 8 научным направлениям деятельности Института.

На основании экспертных оценок после всестороннего обсуждения по решению комиссии:

- **в области ядерной физики высоких энергий** первую премию получила работа «Первое наблюдение рождения трех электрослабых бозонов на  $\sqrt{s} = 13$  TeV в CMS-эксперименте» (А. А. Воробьев, Г. Е. Гаврилов, В. Л. Головцов, Ю. М. Иванов, В. Т. Ким, Е. В. Кузнецова, П. М. Левченко, В. А. Мурзин, В. А. Орешкин, И. Б. Смирнов, Д. Е. Соснов, В. В. Сулимов, Л. Н. Уваров и др. (коллаборация CMS));

- **в области физики конденсированного состояния** победила работа «Магнетизм фрустрированных квазидвумерных оксидов с тригональной сверхструктурой магнитных ионов» (А. Н. Коршунов, А. И. Курбаков, М. Д. Кучугура, А. Е. Суслопарова, К. Ю. Бухтеев, А. Н. Васильев, М. А. Евстигнеева, К. Захаров, Е. А. Зверева, Е. Комлева, В. Б. Налбандян, Ю. Овченков, Г. В. Раганян, С. Стрельцов, Th. Mueller, V. Pomjakushin, I.A. Safiulina, A. Senyshyn);

- **в области ядерной физики низких энергий** первая премия присуждена работе «Обнаружение явления высокоэнергетичной долгоживущей атомной изомерии» (С. А. Елисеев, Ю. Н. Новиков, П. Е. Филянин и др.).

По итогам конкурса были премированы 22 работы.



О. И. Утесов



## Научные мероприятия

### Общеинститутские семинары

**19 января. Ядерный семинар ОФВЭ.** *Е. Л. Крышень.* «Проект нового многофункционального детектора ALICE 3 на LHC: физическая программа и дизайн экспериментальной установки».

**26 января. Ядерный семинар ОФВЭ.** *А. Д. Чубыкин.* «Изучение  $\chi_c$ -барионов в эксперименте LHCb».

**2 февраля. Ядерный семинар ОФВЭ.** *Г. В. Федотов.* «Статус разработки системы измерения времени пролета для передней части детектора ПАНДА».

**9 февраля. Ядерный семинар ОФВЭ.** *В. Н. Пантелеев.* «Радиоизотопный комплекс РИЦ-80 и новые методы получения радионуклидов для медицины».

**16 февраля. Ядерный семинар ОФВЭ.** *О. В. Миклухо.* «Наблюдение структуры в поляризации рассеянных протонов в инклюзивной реакции ( $p, p'$ ) с ядрами  $^9\text{Be}$  и  $^{12}\text{C}$  при энергии 1 ГэВ».

**18 февраля. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ.** *Л. В. Скрипников.* «Использование молекулярных систем для изучения свойств ядер».

**2 марта. Ядерный семинар ОФВЭ.** *И. Н. Соловьев.* «Эксперимент Polfusion по исследованию термоядерной реакции синтеза поляризованных дейтронов».

**4 марта. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ.** *М. Г. Рыскин.* «КХД-инстантон. Как он может проявиться в процессах взаимодействия на Большом адронном коллайдере».

**9 марта. Ядерный семинар ОФВЭ.** *Н. Ю. Самохин.* «Интерактивная платформа для удаленной разработки и обмена исследовательскими данными».

**11 марта. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ.** *Е. Левин* (Тель-Авивский университет, Израиль). «Глубокоупругое рассеяние как пробник запутанности».

**16 марта. Ядерный семинар ОФВЭ.** *Р. Н. Чистов* (Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН). «В-физика на CMS».

**23 марта. Ядерный семинар ОФВЭ.** *М. П. Левченко.* «Поиски магнитных монополей».

**25 марта. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ.** *М. В. Поляков.* «Механические свойства адронов».

**1 апреля. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ.** *М. Г. Рыскин.* «Экспериментальное „открытие“ оддерона?»

**6 апреля. Ядерный семинар ОФВЭ.** *В. А. Гузей.* «Фоторождение векторных мезонов в ультрапериферических столкновениях ядер на БАК и эффект ядерных экранировок».

**8 апреля. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ.** *В. Ю. Петров.* «Непертурбативные явления в КХД (часть 1)».

**13 апреля. Ядерный семинар ОФВЭ.** *П. И. Зарубин* (Лаборатория физики высоких энергий им. В. И. Векслера и А. М. Балдина Объединенного института ядерных исследований). «Корреляции в образовании ядер  $^8\text{Be}$  и  $\alpha$ -частиц во фрагментации релятивистских ядер».

**15 апреля. Теоретический семинар по ФКС.** *Д. А. Паршин* (Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет им. Ж. И. Алферова РАН). «Загадки изгибных мод графена».



- 15 апреля. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ.** В. Ю. Петров. «Непертурбативные явления в КХД (часть 2)».
- 19 апреля. Семинар ОИКС.** А. И. Курбаков. «Особенности магнитного упорядочения в новом хиральном магнетике  $MnSnTeO_6$ ».
- 20 апреля. Ядерный семинар ОФВЭ.** В. Н. Коваленко (Санкт-Петербургский государственный университет). «Слияние кварк-глюонных струн и коллективные явления в релятивистских столкновениях протонов и ядер».
- 22 апреля. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ.** В. С. Воробьев (Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН). «Статус и физическая программа проекта супер-чарм-тау-фабрики в РФ».
- 26 апреля. Семинар ОИКС.** Е. К. Нигматулина. «„Фантомные“ атомы и тепловое движение в фуллерене  $C_{60}$ ».
- 27 апреля. Ядерный семинар ОФВЭ.** К. В. Ершов. «Радиационные аварии, Чернобыльская катастрофа».
- 29 апреля. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ.** Л. В. Григоренко (Объединенный институт ядерных исследований). «Сверхтяжелые изотопы водорода  $^6H$  и  $^7H$  в экспериментах на установке ACCULINNA-2».
- 11 мая. Ядерный семинар ОФВЭ.** Т. А. Овсянникова (НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ). «Недавние результаты спектроскопии в эксперименте LHCb».
- 13 мая. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ.** В. Ю. Петров. «Непертурбативные явления в КХД (часть 3)».
- 18 мая. Ядерный семинар ОФВЭ.** А. Е. Барзах. «Сверхтонкая аномалия. Статус, проблемы и перспективы».
- 20 мая. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ.** А. В. Юнг. «Неабелевы вихревые струны: от классических решений до критической суперструны».
- 25 мая. Ядерный семинар ОФВЭ.** А. В. Попов. « $^{229}Th$  – в поисках моста».
- 27 мая. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ.** Е. Эпельбаум (Рурский университет, Германия). «Эффективная хиральная теория поля в ядерной физике низких энергий (часть 1)».
- 3 июня. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ.** Е. Эпельбаум (Рурский университет, Германия). «Эффективная хиральная теория поля в ядерной физике низких энергий (часть 2)».
- 8 июня. Ядерный семинар ОФВЭ.** П. В. Неустроев. «Электроника эксперимента „Протон“».
- 10 июня. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ.** Ю. Н. Новиков. «Ионная ловушка в фундаментальных исследованиях».
- 17 июня. Теоретический семинар по ФКС.** К. В. Кавокин (Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН). «Оптическое охлаждение и отопев ядерных спинов в полупроводниковых структурах».
- 17 июня. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ.** В. Ю. Петров. «Непертурбативные явления в КХД. Часть 4. Инстантоны при высоких энергиях; невылетание кварков».
- 24 июня. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ.** Ю. Н. Новиков. «Ионные ловушки. Часть 2. Наблюдение высокоэнергетичной высокоспиновой атомной изомерии».
- 29 июня. Ядерный семинар ОФВЭ.** А. А. Дзюба. «Смешивание электрически нейтральных мезонов. Новые результаты LHCb».
- 6 июля. Ядерный семинар ОФВЭ.** С. А. Булат. «Coronavirus SARS-CoV-2 Science Update June 2021».



**21 июля. Семинар ОМРБ.** *Е. М. Максимова.* «Ингибирование транслокации антибиотиком амикумацином А и механизм устойчивости к нему за счет изменений в IV домене EF-G».

**2 сентября. Теоретический семинар по ФКС.** *Д. Н. Аристов.* «Спектр спиновых волн в скирмионных кристаллах и метод стереографической проекции».

**14 сентября. Ядерный семинар ОФВЭ.** *В. В. Лукашевич.* «Линейные пучки заряженных частиц и оптимизация масс-сепараторов».

**16 сентября. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ.** *А. П. Серебров.* «Возможность экспериментального обоснования нейтринной модели  $3 + 1$  с одним стерильным нейтрино».

**21 сентября. Ядерный семинар ОФВЭ.** *И. М. Беляев* (НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ). «Обнаружение узкого экзотического тетракварка с двойным очарованием».

**30 сентября. Теоретический семинар по ФКС.** *Ф. Д. Тимковский.* «Критическая температура и низкоэнергетические возбуждения в примесных спиновых системах со щелевым спектром».

**5 октября. Ядерный семинар ОФВЭ.** *В. В. Абаев.* «Длина пион-нуклонного рассеяния в состоянии  $S_{31}$ ».

**7 октября. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ.** *Е. Эпельбаум* (Рурский университет, Германия). «Поляризуемости нуклонов в хиральной эффективной теории поля».

**12 октября. Ядерный семинар ОФВЭ.** *О. Л. Федин.* «Физика частиц и астрофизика в КНР».

**13 октября. Семинар ОПР.** *Ю. В. Барсуков* (Лаборатория физики плазмы Принстонского университета (Princeton Plasma Physics Lab)). «Образование прекурсоров роста нанотрубок нитрида бора при высокотемпературном синтезе».

**14 октября. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ.** *Ю. Л. Докшицер.* «Эффект „мертвого конуса“ в излучении глюонов тяжелыми кварками».

**19 октября. Ядерный семинар ОФВЭ.** *М. В. Малаев.* «Текущий статус эксперимента MPD на коллайдере NICA».

**21 октября. Теоретический семинар по ФКС.** *А. Г. Яшенкин.* «Теория рамановского рассеяния света в слабо неупорядоченных неполярных нанокристаллах».

**21 октября. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ.** *А. В. Саранцев.* «Скаляр-изоскалярные мезоны и скалярный глюбол из радиационных распадов чармония».

**26 октября. Ядерный семинар ОФВЭ.** *С. А. Федотов* (Институт ядерных исследований РАН). «Разработка и создание детекторов заряженных частиц для каонных и нейтринных экспериментов».

**28 октября. Теоретический семинар по ФКС.** *А. Г. Яшенкин.* «Теория рамановского рассеяния света в слабо неупорядоченных неполярных нанокристаллах. II. Уширение фононных линий».

**9 ноября. Ядерный семинар ОФВЭ.** *В. А. Зайцев* (Санкт-Петербургский государственный университет). «Моделирование атомов и молекул с помощью квантовых компьютеров».

**10 ноября. Семинар ОПР.** *В. В. Панчук* (Институт химии Санкт-Петербургского государственного университета; Институт аналитического приборостроения РАН). «Развитие ядерной  $\gamma$ -резонансной и рентгеновской спектроскопии на основе хемометрических подходов».

**11 ноября. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ.** *Н. Н. Николаев* (Институт теоретической физики им. Л. Д. Ландау РАН). «Квантовая механика когерентных бетатронных колебаний пучка в накопительных кольцах».

**16 ноября. Ядерный семинар ОФВЭ.** *В. М. Соловьев.* «Исследование свойств антивещества в эксперименте BASE (ЦЕРН)».

**18 ноября. Теоретический семинар по ФКС.** Ф. Д. Тимковский. «Критическая температура и низкоэнергетические возбуждения в примесных спиновых системах со щелевым спектром».

**18 ноября. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ.** Д. Э. Харзеев (Университет штата Нью-Йорк в Стони-Бруке, США). «Хирально-магнитный эффект: от кварков к квантовым компьютерам».

**23 ноября. Ядерный семинар ОФВЭ.** О. Л. Федин. «Физика частиц и астрофизика в КНР».

**25 ноября. Теоретический семинар по ФКС.** О. И. Утесов. «Приближение среднего поля для описания скирмионных решеток в центросимметричных фрустрированных антиферромагнетиках».

**30 ноября. Ядерный семинар ОФВЭ.** А. В. Добровольский. «Исследование структуры экзотических ядер на установке с активной мишенью ИКАР методом упругого рассеяния протонов в инверсной кинематике».

**1 декабря. Семинар ОМРБ.** О. Г. Щербакова. «Оптогенетические репортеры для изучения дифференцированного высвобождения нейротрансмиттеров симпатическими нейронами, иннервирующими кардиомиоциты».

**2 декабря. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ.** В. В. Бару (НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ; Рурский университет, Германия). «Адронные молекулы. Анализ данных по  $T_{cc}$ ».

**7 декабря. Ядерный семинар ОФВЭ.** Т. А. Штам. «Экзосомы – маленькие игроки большой игры. Потенциал использования экзосом для диагностики и терапии некоторых заболеваний».

**9 декабря. Теоретический семинар по ФКС.** Р. А. Ниязов. «Интерферометры Ааронова – Бома на основе геликоидальных краевых состояний».

**14 декабря. Ядерный семинар ОФВЭ.** П. Л. Молканов. «Исследование нейтронодефицитных изотопов висмута методом спектроскопии в лазерном ионном источнике (ИРИС, ISOLDE)».

**16 декабря. Теоретический семинар по ФКС.** Р. А. Ниязов. «Интерферометры Ааронова – Бома на основе геликоидальных краевых состояний (продолжение)».

**23 декабря. Теоретический семинар по ФКС.** А. В. Сыромятников. «Кластерное представление спиновых операторов  $1/2$  для изучения экзотических фаз и спиновой динамики в магнетиках. Часть 1. Нематические фазы во фрустрированных системах в сильном поле».

**30 декабря. Теоретический семинар по ФКС.** А. В. Сыромятников. «Кластерное представление спиновых операторов  $1/2$  для изучения экзотических фаз и спиновой динамики в магнетиках. Часть 2. Кластерное представление спинов для квантовых сильно коррелированных систем».

## Конференции

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 2021 г. при участии Института было организовано 14 мероприятий (совещания, конференции и школы).

## Проведенные мероприятия

1. Курс лекций (ликбез) доктора физико-математических наук И. А. Митропольского «Структура атомного ядра» для молодых ученых, специалистов и студентов, проходящих практику в НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ. **15 февраля – 30 апреля** (Гатчина).

2. Экологический праздник «Экошоу-2021». **14 мая** (Гатчина).

3. Рабочее совещание «Дифракция нейтронов – 2021». **8–10 июня** (Гатчина).

4. 7-я Международная конференция и 14-я Международная школа молодых ученых и специалистов им. А. А. Курдюмова «Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами». **22–28 августа** (Гатчина).

5. I Летняя школа Совета молодых ученых и специалистов НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ. **27–29 августа** (д. Скамья Сланцевского р-на Ленинградской обл.).

6. VI Международное совещание «Взаимодействие Дзялошинского – Мория и экзотические спиновые структуры» (DMI-2021). **6–10 сентября** (Выборг).

7. V Всероссийская конференция «Фундаментальная гликобиология». **21–24 сентября** (Гатчина).

8. Открытый научно-популярный лекторий «Наука – наша жизнь». **22 октября** (Гатчина).

9. IV Школа «Нейтронные исследования конденсированного состояния» (НИКОНС-2021). **8–12 ноября** (Гатчина, Старый Петергоф).

10. VIII Всероссийский с международным участием молодежный научный форум Open Science 2021. **17–19 ноября** (Гатчина).

11. VI Молодежная школа реактора ПИК «Профессионализм. Интеллект. Карьера. ПИК-2021». **15–26 ноября** (Гатчина).

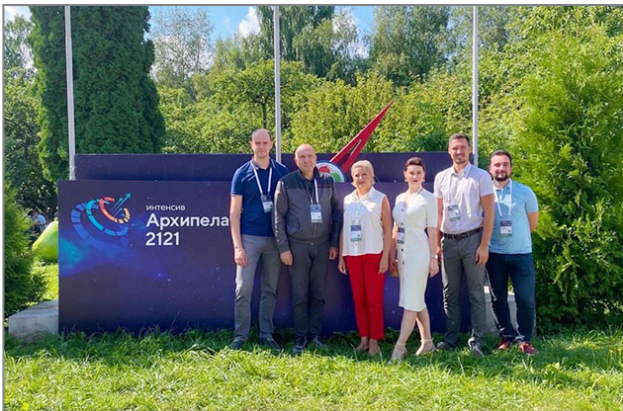
12. III Молодежная конференция «Проект DARIA: компактные источники нейтронов в России». **1–3 декабря** (Санкт-Петербург).

13. Итоговая конференция «Молодые таланты – 2021» программы «Школьная экологическая инициатива». **8 декабря** (Гатчина).

14. X Школа по физике поляризованных нейтронов «ФПН-2021». **16–17 декабря** (Гатчина).

Также в течение 2021 г. сотрудники Института участвовали в работе более 150 международных и российских конференций, было сделано около 420 докладов.









# Основные результаты научной деятельности 2021

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. 350, тир. 100, уч.-изд. л. 12,7; 21.06.2022.