



**ИЗБРАННЫЕ НАУЧНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ  
ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
В 2017–2023 ГГ.**

Дубна 2024

# СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ. . . . .	3
УСКОРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС NICA . . . . .	4
ФАБРИКА СВЕРХТЯЖЕЛЫХ ЭЛЕМЕНТОВ . . . . .	8
КОМПЛЕКС ЦИКЛОТРОНА У-400М . . . . .	11
РЕКОНСТРУКЦИЯ ЦИКЛОТРОННОГО КОМПЛЕКСА У-400(Р). . . . .	12
ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА. . . . .	14
ФИЗИКА ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ . . . . .	21
ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ . . . . .	24
ФИЗИКА ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ НИЗКИХ ЭНЕРГИЙ . . . . .	28
ФИЗИКА НЕЙТРИНО И АСТРОФИЗИКА . . . . .	29
НЕЙТРОННАЯ ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА. . . . .	35
ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД. . . . .	38
РАЗВИТИЕ КОМПЛЕКСА СПЕКТРОМЕТРОВ ИБР-2 . . . . .	41
РАДИАЦИОННЫЕ И РАДИОБИОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ . . . . .	43
ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И НАУКИ О ЖИЗНИ . . . . .	50
СЕТИ, КОМПЬЮТИНГ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ФИЗИКА. . . . .	53
ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ПРОГРАММА ОИЯИ . . . . .	61
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ . . . . .	68

# ПРЕДИСЛОВИЕ

На 134-й сессии Ученого совета ОИЯИ (21–22 сентября 2023 г.) были подведены итоги выполнения Семилетнего плана развития ОИЯИ на 2017–2023 гг. В принятой резолюции подчеркнуто, что в этот период ОИЯИ добился впечатляющих результатов как в развитии крупной исследовательской инфраструктуры, так и в научных исследованиях на ее базе. Несмотря на сложные условия работы, связанные с ковидом, и резкое ухудшение геополитической ситуации, есть много поводов для гордости. Несомненные достижения, открывающие новый этап в организации научных исследований в Дубне, — создание фабрики сверхтяжелых элементов, ввод в действие суперкомпьютера «Говорун», вывод нейтринного телескопа *Vaikal-GVD* на рекордный эффективный объем, заключительная стадия мегапроекта *NICA* и создание на его основе широких международных экспериментальных коллабораций *BM@N*, *MPD*, *SPD* и *ARIADNA* на базе крупной исследовательской инфраструктуры ОИЯИ.

Представляем вашему вниманию основные достижения Объединенного института ядерных исследований в 2017–2023 гг. Наряду с развитием собственной инфраструктуры и информационных, сетевых и вычислительных технологий ОИЯИ активно участвовал в международных коллаборациях в ЦЕРН и ряде других центров по всему миру, наращивал свой интеллектуальный потенциал, что позволило получить весомые научные результаты по широкому спектру направлений.

Институт заметно расширил свою международную партнерскую сеть. В 2021 г. сообщество полноправных государств-членов ОИЯИ пополнилось новой страной — Арабской Республикой Египет. Активно развиваются отношения с Китаем, Мексикой, Индией, Бразилией. Сделаны важные шаги по развитию и укреплению международного сотрудничества с Арменией, Вьетнамом, Египтом, Казахстаном, Кубой, Сербией и ЮАР.

Знаковым событием явилось подписание Софийской декларации — документа, который содержит обращение к заинтересованным государствам и организациям присоединиться

к многостороннему научному сотрудничеству, реализуемому в рамках ОИЯИ.

Институт принял всестороннее участие в проведении объявленного ООН международного Года фундаментальных наук, а также активно включился в Десятилетие науки и технологий в стране местоположения ОИЯИ.

Были приняты положения о флаге ОИЯИ и об ассоциированном членстве в Институте, завершена работа по созданию новой архитектуры Проблемно-тематического плана ОИЯИ, дающей прозрачное представление о структуре научных проектов Института.

Усиливаются наши образовательные программы, вводятся новые форматы сотрудничества и привлечения молодежи, активно обновляется социальная инфраструктура.

В целом эти достижения создали очень прочную основу для дальнейшего развития Института в новом семилетии. Наши ученые, инженеры и специалисты смогли добиться блестящих результатов, делая максимум для достижения стоящих перед нами целей, благодаря чему Институту удалось обеспечить себе роль одного из лидеров на мировом научном ландшафте. Институт всей своей деятельностью подтверждает принцип — «Наука сближает народы». Все это дает нам право уверенно смотреть в будущее.

На ноябрьской (2023 г.) сессии Комитета полномочных представителей ОИЯИ в Казахстане был утвержден новый амбициозный Семилетний план развития ОИЯИ на 2024–2030 гг. Он охватывает широкий спектр работ и научных направлений. Основная цель новой семилетки — реализация яркой привлекательной научной программы исследований и приумножение интеллектуального капитала, обеспеченных инфраструктурными и финансовыми ресурсами. Новый этап предусматривает проведение интенсивных научных исследований на уже созданной базе. Мы открываем эту страницу с ожиданием новых свершений и азартом первооткрывателей на переднем крае науки.

Г. В. ТРУБНИКОВ, директор  
Объединенного института  
ядерных исследований

# УСКОРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС NICA

В ходе реализации в ОИЯИ мегасайенс-проекта NICA в 2017 г. был впервые осуществлен режим ускорения поляризованных протонов в ускорителе нуклотрон, что является принципиальным шагом в осуществлении программы по спиновой физике на комплексе NICA. Главная научная задача этой программы — исследование спиновой кварк-партоновой структуры протона. Этому предшествовало создание (совместно с ИЯИ РАН) высокоинтенсивного источника поляризованных протонов и дейтронов, ввод в действие новой высокочастотной секции предускорителя, разработанного в сотрудничестве ОИЯИ–МИФИ–ИТЭФ НИЦ КИ и изго-

товленного на предприятии в Снежинске. Была решена сложная задача сохранения поляризации протонных пучков в жесткофокусирующем сверхпроводящем синхротроне и рассмотрена возможность использования нуклотрона при экстремально низкой энергии инжекции протонов — 5 МэВ. Проведенные измерения показали, что параметры источника обеспечат получение пучков поляризованных протонов и дейтронов с интенсивностью на уровне  $10^{11}$  частиц за цикл и степенью поляризации более 90%.

Выполнена работа по монтажу, поэтапной проверке и вводу в эксплуатацию сверхпроводящего кольцевого ускорителя (с периметром



Коллайдер NICA

Развитие комплекса NICA в 2017-2023 гг.



2017



Строительная площадка комплекса NICA

2018



Ввод в эксплуатацию HIrac

2019



Ввод в эксплуатацию бустера

2020



Туннель коллайдера NICA

2021



ARIADNA — прикладные исследования

2022

4-й технический запуск  
(2022-2023):  
HIrac + бустер + Нуклотрон



Ввод в эксплуатацию  
инжекторного комплекса NICA

2023



40 МВт — теперь доступно



Успешный 5-й пусконаладочный сеанс  
на NICA в 2023 г. (4 месяца)

- 490 научных публикаций
- 240 докладов на конференциях
- практика студентов

210 м) — бустера для исследовательского комплекса NICA. Все элементы магнитно-криостатной системы бустера (основы ускорителя) изготовлены в ОИЯИ по оригинальной технологии, получившей признание в Европе. Технологический пуск сверхпроводящего бустерного синхротрона произвел председатель Правительства РФ 20 ноября 2020 г. после завершения ввода в эксплуатацию всех объектов инжекционного комплекса проекта, включая источники поляризованных, легких и тяжелых ионов и линейный ускоритель тяжелых ионов. Были также изготовлены сверхпроводящие структурные магниты бустера, смонтированы и протестированы встроенные системы кольца бустера: высокочастотная ускоряющая система, система электронного охлаждения циркулирующего пучка, устройства ввода и вывода пучков. Изготовлена циклозадающая аппаратура бустера, аппаратура диагностики и термометрии, системы питания, детектирования переходов и защиты магнитно-криостатной системы.

В четком соответствии с планом-графиком 19 декабря 2020 г. однозарядные ионы гелия были инжектированы в бустер и получена устойчивая циркуляция пучка. Пучок однозарядных ионов He с энергией 3,2 МэВ/а.е.м. циркулировал в канале ускорителя с интенсивностью около  $10^9$  ионов/оборот. Высокое качество изготовления и сборки всех элементов магнитной системы бустерного синхротрона позволило начать работу без использования системы коррекции ведущего магнитного поля.

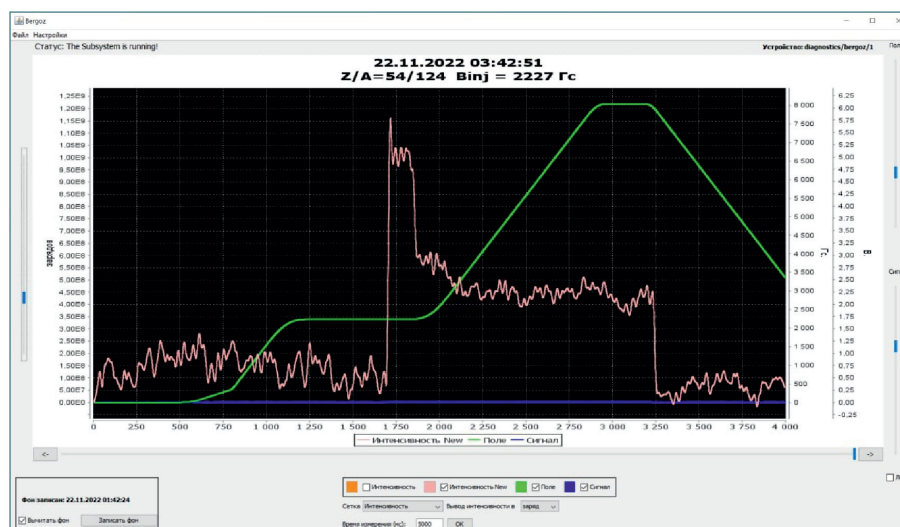
Достигнутый яркий результат подвел итог многолетней слаженной работы коллектива фи-

зиков-ускорительщиков и инженеров ОИЯИ в сотрудничестве с партнерами из ИЯФ СО РАН, ИЯИ РАН, ИТЭФ, ИФВЭ НИЦ КИ и многих других российских и зарубежных организаций.

В сентябре 2021 г. системы бустерного синхротрона были выведены на проектные параметры. В ходе сеанса в кольце бустера пучок ионов железа был впервые ускорен до проектной энергии 578 МэВ/нуклон. В сеансе был также осуществлен полноценный запуск оборудования системы электронного охлаждения бустера и впервые в России получено электронное охлаждение пучка тяжелых ионов. Эксперимент по охлаждению пучка был проведен с ионами  $^{56}\text{Fe}^{14+}$  при энергии инжекции 3,2 МэВ/нуклон.

Важным итогом сеанса явилось успешное завершение совместных работ специалистов ОИЯИ и ИЯФ СО РАН по созданию систем вывода пучка из бустера и канала транспортировки пучка в нуклотрон. Был успешно запущен уникальный ударный магнит для вывода пучка из бустера с рекордным уровнем магнитного поля 2 кГс, и получен вывод пучков двух сортов ионов — гелия и железа — при энергии 240 МэВ/нуклон с дальнейшей транспортировкой по каналу, на конечном участке которого пучки ионов были детектированы датчиками тока и положения пучка.

К осени 2022 г. был завершен важнейший этап проекта NICA — создана тяжелоионная цепочка и запущен в эксплуатацию инжекционный комплекс коллайдера, состоящий из уникальных установок, не имеющих аналогов в мире: криогенного источника и линейного ускорителя



Цикл магнитного поля нуклотрона и интенсивность пучка ядер ксенона, измеренная параметрическим трансформатором тока, в процессе настройки для эксперимента VM@N. Интенсивность ускоренного пучка примерно  $10^7$  частиц

тяжелых ионов, криогенных синхротронов бустера и нуклотрона, а также системы каналов транспортировки пучков. Получены требуемые параметры, и обеспечена стабильная работа комплекса в течение четырех месяцев. При этом введена в строй и испытана в действии установка электронного охлаждения ионных пучков, позволившая удвоить количество частиц, ускоренных в нуклотроне. Сеанс показал высокую работоспособность инжекционного комплекса и подтвердил правильность конструктивных решений, принятых для его сооружения. Получена рекордная интенсивность на выведенных пучках ускоренных ионов ксенона. Помимо инъекции в коллайдер пучков ионов вплоть до золота и висмута, инжекционный комплекс обеспечивает решение многих физических и прикладных задач.

В сеансе 2022–2023 гг. международная коллаборация VM@N провела исследования на выведенных пучках, зарегистрировав более полумиллиарда столкновений ионов ксенона с ядерной мишенью. Идет анализ накопленных данных.

Участниками коллаборации ARIADNA выполнен ряд экспериментов в рамках реализуемой в ОИЯИ программы прикладных исследований, для которой создается необходимая инфраструктура.

Для модернизации сверхпроводящего синхротрона нуклотрон была разработана, изготовлена и введена в эксплуатацию установка для производства полого кабеля из высокотемпературного сверхпроводника. Из этого кабеля был изготовлен и успешно испытан при 25 К модельный быстроциклирующий квадрупольный магнит [1–6].



Установка для намотки ВТСП-магнитов

# ФАБРИКА СВЕРХТЯЖЕЛЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Приоритетной задачей в 2017–2023 гг. являлось создание и запуск фабрики сверхтяжелых элементов на базе циклотрона ДЦ-280, а также создание комплекса современных экспериментальных установок, предназначенных для синтеза и изучения свойств сверхтяжелых элементов. В 2018 г. завершено строительство экспериментального корпуса фабрики СТЭ. Получены необходимые разрешительные документы. Комплекс введен в эксплуатацию.

Фабрика СТЭ была создана на базе нового ускорителя тяжелых ионов ДЦ-280 — лидера среди ускорителей данного типа в мире. Ускоритель спроектирован в ОИЯИ, узлы ускорителя изготовлены на предприятиях государств-членов Института. Проектная интенсивность пучков ускоренных ионов кальция-48, получаемых на ускорителе ДЦ-280, составляет 10 мкА частиц, что в 10 раз превосходит интенсивности, достигнутые на ускорителях предыдущего поколения.

Созданы и введены в эксплуатацию два газонаполненных сепаратора: ГНС-2 (DGFRS-2) и GRAND. Сепаратор ГНС-2 предназначен для решения задач, связанных с синтезом новых

сверхтяжелых элементов с номерами 119 и 120, синтезом новых изотопов СТЭ и изучением свойств их радиоактивного распада. Сепаратор GRAND нацелен на исследование структуры сверхтяжелых ядер (ядерная спектроскопия), а также изучение химических свойств СТЭ.

В течение семилетки 2017–2023 гг. начато создание двух перспективных установок фабрики СТЭ: многоотражательного времяпролетного масс-спектрометра для прецизионного измерения масс тяжелейших ядер и нового сепаратора GASSOL на основе газонаполненного сверхпроводящего соленоида для исследования химических свойств СТЭ с временами жизни вплоть до десятков миллисекунд.

Одной из главных задач фабрики СТЭ является синтез новых элементов с номерами 119 и 120. В качестве одной из перспективных реакций для синтеза 120-го элемента рассматривается реакция  $^{54}\text{Cr} + ^{248}\text{Cm}$ .

С целью подготовки экспериментов по синтезу новых СТЭ была изучена реакция слияния  $^{48}\text{Ca} + ^{232}\text{Th}$ , ведущая к образованию изотопов элемента 110. Эксперимент был нацелен на проверку рекордно низкой стабильности от-

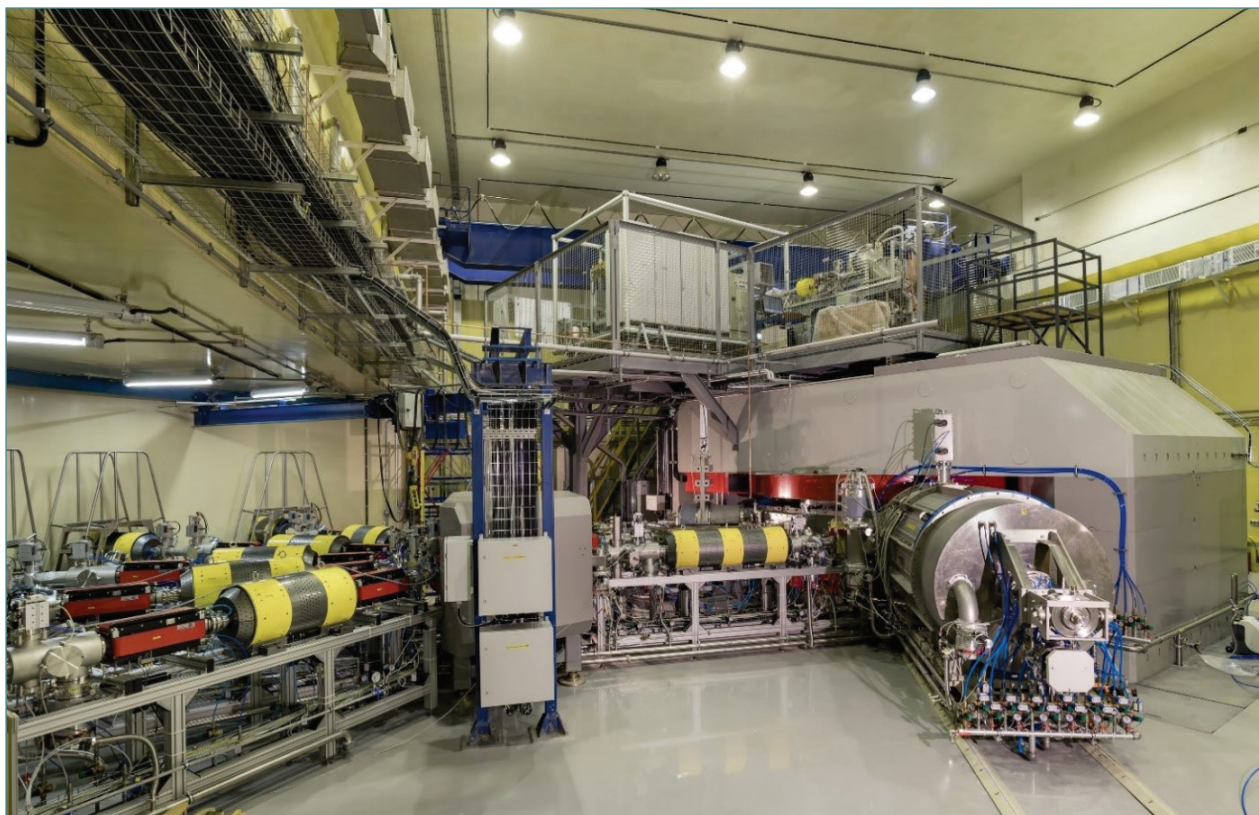


Корпус фабрики СТЭ

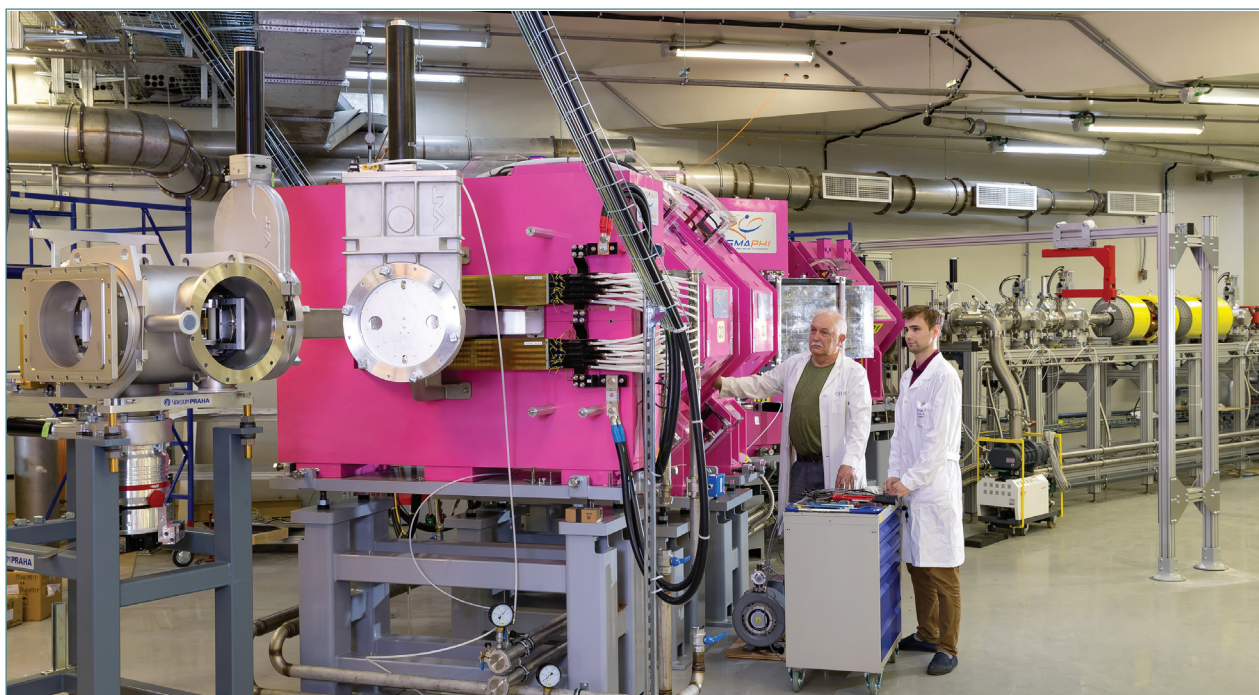


носителю деления, предсказываемой теорией для этой области ядер, что, в свою очередь, должно приводить к низкой вероятности выживания возбужденного составного ядра. Была по-

казана возможность проведения экспериментов при экстремально низком сечении — 70 фб, что имеет принципиальное значение для постановки экспериментов по синтезу новых элементов.



Циклотрон ДЦ-280, фабрика СТЭ

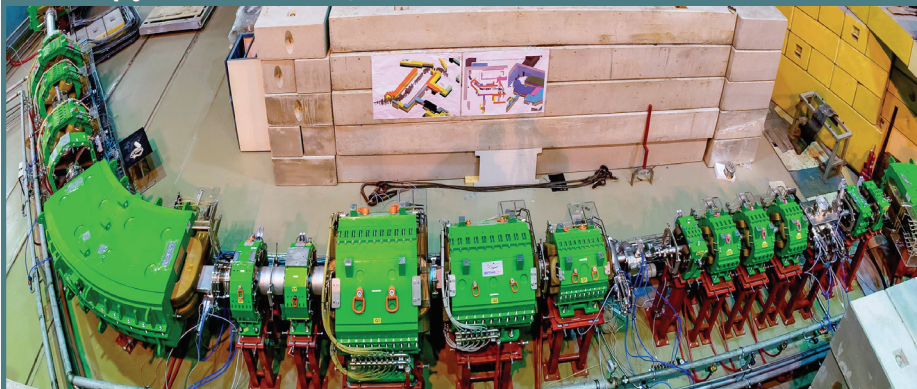


Газонаполненный сепаратор GRAND, фабрика СТЭ

## Введенные в эксплуатацию установки ЛЯР

2017

Фрагмент-сепаратор ACCULINNA-2 на циклотроне У-400М (в стадии модернизации; возобновление эксплуатации планируется в 2024 г.)



**Основные направления исследований:**  
изучение структуры экзотических ядер вблизи и за пределами нейтронной стабильности в прямых реакциях.

2020

Газонаполненный сепаратор DGFRS-2

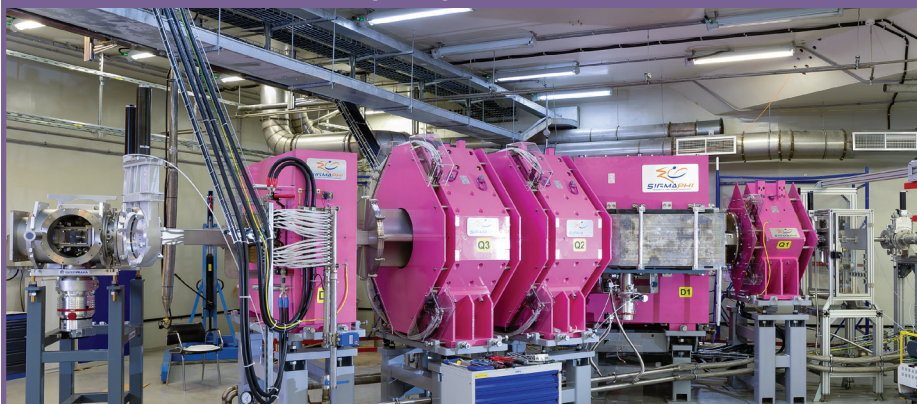


**Основные направления исследований:**

- детальное изучение уже известных СТЭ;
- синтез элементов 119 и 120.

2022

Газонаполненный сепаратор GRAND (DGFRS-3)



**Основные направления исследований:**

- эксперименты по ядерной и масс-спектрологии СТЭ;
- изучение их химических свойств.

# КОМПЛЕКС ЦИКЛОТРОНА У-400М

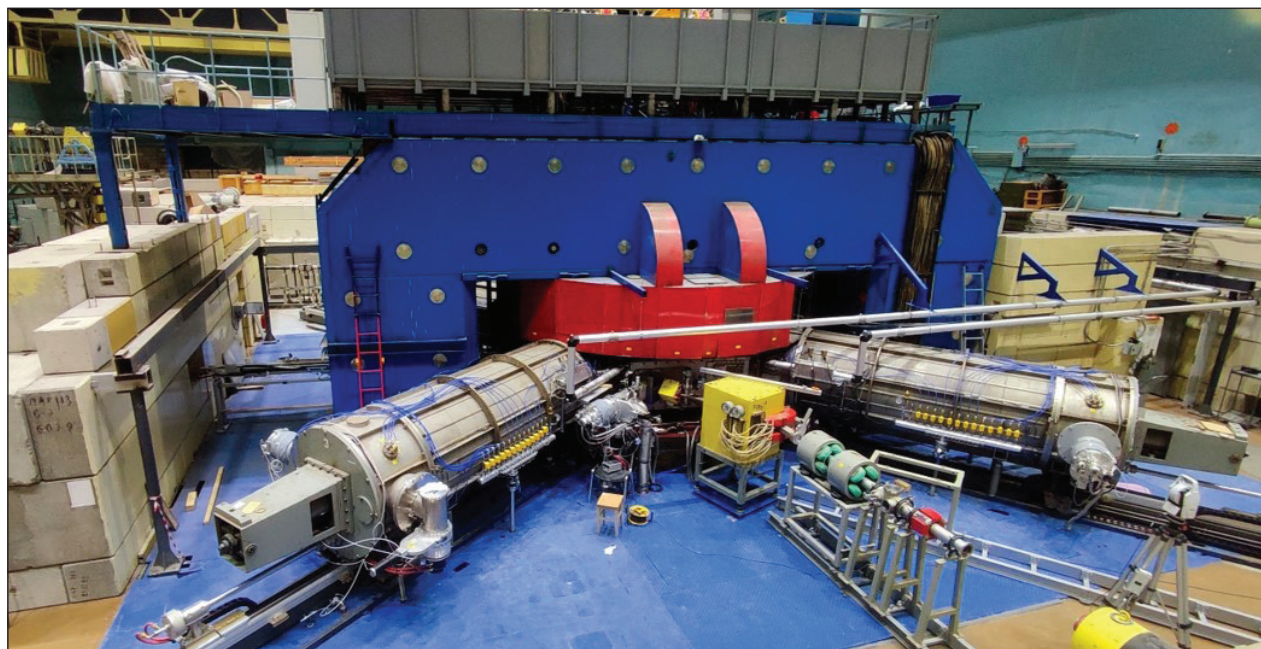
На ускорителе У-400М в 2017 г. был введен в эксплуатацию новый фрагмент-сепаратор ACCULINNA-2 для получения пучков радиоактивных ядер. Сепаратор построен совместно с французской компанией «SigmaPhi» и установлен на линии первичного пучка ускорителя У-400М. Сепаратор ACCULINNA-2 оснащен радиочастотным фильтром для дополнительной очистки вторичных пучков, магнитным спектрометром для разделения продуктов реакции, комплексом криогенных мишеней изотопов водорода и гелия, массивом нейтронных детекторов на основе кристаллов стибьена, а также системами регистрации заряженных частиц. Тестовые эксперименты подтвердили основные проектные ионно-оптические характеристики установки для некоторых радиоактивных пучков ( $^{14}\text{B}$ ,  $^{12}\text{Be}$ ,  $^9,^{11}\text{Li}$ ,  $^6,^8\text{He}$  и др.). Полученные выходы этих изотопов оказались в среднем в 25 раз выше по сравнению с данными для сепаратора ACCULINNA-1, работающего в ЛЯР с 1996 г.

В первых экспериментах на новом фрагмент-сепараторе ACCULINNA-2, которые были проведены в 2018–2020 гг., удалось разрешить

одну из давно стоящих знаковых проблем экспериментальной ядерной физики — обнаружение сверхтяжелых изотопов водорода —  $^6\text{H}$  и  $^7\text{H}$ , а также продвинуться на пути изучения новой моды спонтанного ядерного распада с одновременным испусканием четырех нейтронов.

В июле 2020 г. начата модернизация циклотрона У-400М. Целью модернизации является повышение надежности и стабильности работы ускорителя (замена катушек основного магнита, замена узлов вакуумной системы ускорителя, системы управления и системы радиационного контроля), а также повышение интенсивностей пучков тяжелых ионов.

Фрагмент-сепаратор ACCULINNA-2 с использованием модернизированного ускорительного комплекса У-400М ЛЯР ОИЯИ является базовой установкой для изучения легких экзотических ядер вблизи границ нуклонной стабильности и позволит впервые выполнить поиск и исследование экзотических ядерных систем, таких как  $^5\text{--}^7\text{H}$ ,  $^8\text{--}^{10}\text{He}$ ,  $^{24}\text{--}^{26}\text{O}$  и др., а также новых видов радиоактивного распада.



Ускоритель У-400М

# РЕКОНСТРУКЦИЯ ЦИКЛОТРОННОГО КОМПЛЕКСА У-400(Р)

Основной целью реконструкции комплекса У-400 до У-400Р является расширение спектра ускоряемых ионов от гелия до урана, снижение энергетического разброса ускоренных ионов,

обеспечение плавной перестройки энергии ионов в диапазоне 0,8–25 МэВ/нуклон, снижение энергопотребления и повышение долговременной стабильности работы ускорителя.



27 июля 2023 г. Вбита первая свая на строительном участке экспериментального корпуса циклотрона У-400Р



21 декабря 2023 г. Заливка первых кубометров бетона в фундамент экспериментального корпуса У-400Р



Монтаж циклотрона ДЦ-140

Помимо модернизации ускорителя, проект реконструкции ускорительного комплекса У-400(Р) включает в себя строительство нового экспериментального корпуса, а также создание новых экспериментальных установок. Сооружение нового корпуса начато в середине 2023 г. и приведет к увеличению площади экспериментальных залов до 1500 м<sup>2</sup> с обеспечением работы в нескольких радиационно-защищенных кабинах.

Ускорительный комплекс **ДЦ-140** создается для фундаментальных исследований и применения пучков тяжелых ионов в области физики твердого тела, модификации поверхности материалов, в производстве трековых мембран, а

также в испытаниях электронной компонентной базы на стойкость к воздействию одиночных радиационных эффектов. Проект по созданию ускорительного комплекса ДЦ-140 находится на завершающей стадии.

Циклотрон ДЦ-140 предназначен для получения пучков ускоренных ионов от О до Вi с энергиями 4,8 и 2,1 МэВ/нуклон. Пучки с энергией 4,8 МэВ/нуклон обеспечат глубину проникновения ионов в Si до 55 мкм и линейные передачи энергии в Si до 100 МэВ·см<sup>2</sup>/мг для эффективного испытания электроники. Пучки с энергией 2,1 МэВ/нуклон позволят производить трековые мембраны на основе полимерных пленок толщиной до 30 микрон [7–15].

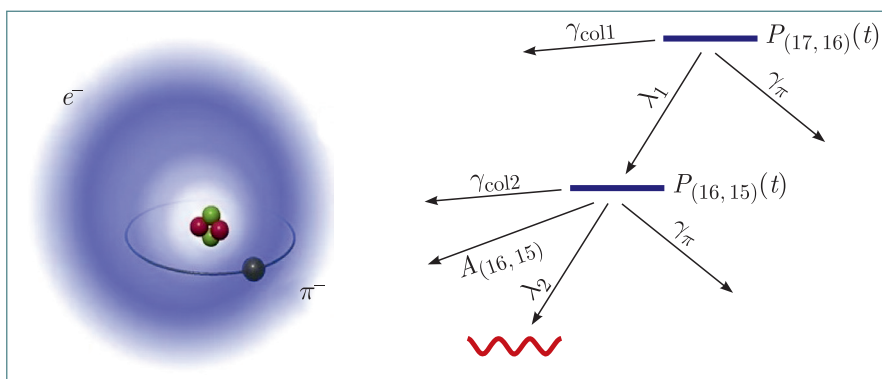
В 2017–2023 гг. исследования проводились по широкому спектру направлений современной теоретической и математической физики: «Фундаментальные взаимодействия полей и частиц», «Теория ядерных систем», «Теория сложных систем и перспективных материалов», «Современная математическая физика: гравитация, суперсимметрия и струны». Были открыты и активно развивались новые проекты: «Теория адронной материи при экстремальных условиях» и «Методы квантовой теории поля в сложных системах». Важной составляющей в деятельности ЛТФ являлась теоретическая поддержка экспериментальных исследований в ОИЯИ и других исследовательских центрах с участием ОИЯИ. За 7 лет по результатам проведенных исследований опубликовано более 3200 статей в рецензируемых журналах и трудах конференций. Было организовано 58 конференций и 17 молодежных школ в Дубне и странах-участницах ОИЯИ. Международное сотрудничество по направлениям исследований было поддержано грантами полномочных представителей правительств стран-участниц, а также дирекции ОИЯИ. Сотрудничество с теоретиками ряда стран проходило при поддержке специальных программ и в рамках международных соглашений. Многие исследовательские проекты и конференции были поддержаны грантами РФФИ, РНФ и фонда «Базис». Особое внимание уделялось привлечению к работе молодых исследователей, студентов и аспирантов в рамках научно-образовательного проекта «Дубненская международная школа по теоретической физике» (DIAS-TH). Ниже приведены некоторые яркие результаты, полученные за эти годы.

Развит новый подход к теории неперенормируемых взаимодействий. Получены обобщения

уравнений ренормгруппы, позволяющие суммировать ведущие асимптотики во всех порядках теории возмущений. Найдено ультрафиолетовое поведение ряда суперсимметричных калибровочных моделей квантовой теории поля [16, 17].

В рамках наиболее общей перенормируемой теории в четырех измерениях впервые выведены формулы для бета-функций калибровочных и юкавских констант взаимодействия в четырех и трех петлях соответственно. Оригинальность подхода состоит в том, что рассматривались простые «игрушечные» теории и с их помощью фиксировались модельно-независимые коэффициенты в выражениях для ренормгрупповых (РГ) функций без трудоемких и громоздких вычислений. Благодаря выполненным расчетам стало возможным провести РГ-анализ произвольной модели новой физики на новом уровне точности без необходимости явного диаграммного счета и процедуры перенормировки. В качестве приложения найденных формул выведены четырехпетлевые бета-функции всех калибровочных констант в СМ, а также в ее обобщении с несколькими хиггсовскими дублетами [18, 19].

Рассчитана частота перехода  $(n, l) = (17, 16) \rightarrow (16, 15)$  в пионном гелии-4 с точностью до 4 ppb (частей на миллиард), включая релятивистские и квантово-электродинамические поправки до  $O(R \propto \alpha^5)$ . Новые расчеты значительно улучшают предыдущие теоретические результаты (Hori M., Soter A., Korobov V.I. // Phys. Rev. A. 2014. V.89. P.042515). Оценено влияние столкновений пионного гелия с атомами мишени на сдвиг и уширение частоты перехода. Если экспериментальные измерения достигнут уровня  $\sim 1$  ppb, то точность определения массы

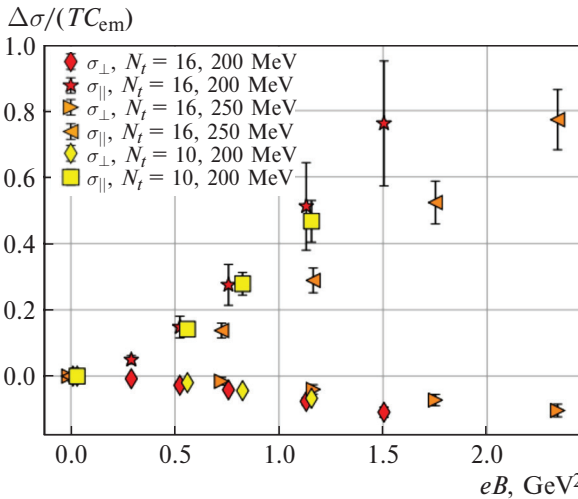


Пионный гелий и диаграмма двухфотонного эксперимента по прецизионному измерению частоты перехода  $(17, 16) \rightarrow (16, 15)$

пиона будет улучшена на 2–3 порядка. Столь точное значение  $m_\pi$  может наложить прямые экспериментальные ограничения на массу антинейтрино мюонного аромата [20].

Получено обобщенно-ренормгрупповое уравнение, суммирующее все главные логарифмы, для эффективного потенциала в скалярной теории с произвольной формой потенциала. Уравнение было применено к инфляционной космологии в аттракторной  $T$ -модели с медленным скатыванием: показано сохранение асимптотического поведения соответствующих эффективных потенциалов, вычислены космологические наблюдаемые, обнаружено спонтанное нарушение симметрии в эффективном потенциале вследствие квантовых поправок (механизм Коулмана–Вайнберга) [21].

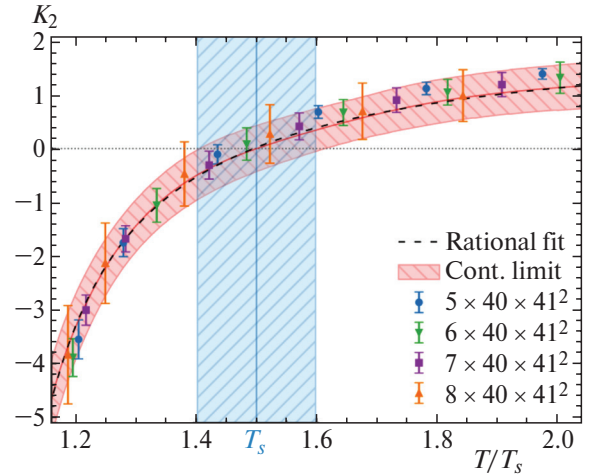
Проведено изучение транспортных свойств кварк-глюонной плазмы. Вычислены сдвиговая и объемная вязкости. Впервые изучена проводимость во внешнем магнитном поле и при ненулевой барионной плотности [22–24].



Продольная и поперечная проводимости кварк-глюонной плазмы как функция магнитного поля при температуре  $T=200$  и  $250$  МэВ

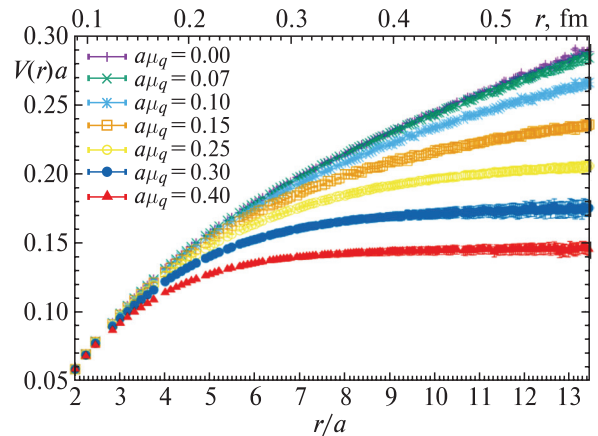
Проведено изучение свойств плотной двухцветной КХД при ненулевой барионной плотности. Были изучены потенциал взаимодействия статических кварков в плотной барионной материи, уравнения состояния, пропагатор глюона и уравнение состояния. Обнаружен деконфайнмент в плотной барионной материи [25–28].

Впервые проведено изучение влияния релятивистского вращения на свойства КХД. Изучено, как вращение влияет на фазовые переходы в КХД, вычислены уравнение состояния вращающейся глюодинамики и момент инерции глюонной плазмы. Обнаружен ряд новых явлений, которые могут происходить во вращающейся КХД. В частности, обнаружено состояние, при котором могут сосуществовать две разные разделенные в пространстве фазы конфайнмента и деконфайнмента [29–31].



Коэффициент  $K_2$  для глюодинамики, который пропорционален моменту инерции кварк-глюонной плазмы, как функция температуры

Разработана трехжидкостная гидродинамическая модель, которая применена для описания столкновений Au + Au в рамках программы энергетического сканирования на RHIC. В результате вычислений становится очевидным, что лучшее описание общих наблюдаемых величин, таких как множественность частиц, их спектры и т.д., может быть достигнуто для EoS с фазо-



Потенциал взаимодействия статических кварков для разных химических потенциалов

вым переходом деконфайнмента. Такой переход приводит к усилению барионного торможения, так что его эффективность, составляющая 100 % при энергии в центре масс 7,7 ГэВ, снижается только до  $\approx 40\%$  при энергии 62 ГэВ. Наибольшие начальные барионные плотности достигаются в центральной области сталкивающихся ядер при  $s_{NN} = 20\text{--}40$  ГэВ [32–34].

Гидродинамическая модель была впервые использована для исследования образования кластеров. Рождение легких ядер рассматривается в рамках термодинамического подхода наравне с адронами. Установлено, что позднее замораживание предпочтительнее для дейтронов, тритонов и  ${}^3\text{He}$ . Примечательно, что наблюдаемые  ${}^4\text{He}$  лучше воспроизводятся при стандартной заморозке [35].

Развита гибридная модель, связывающая партон-адрон-струнную динамическую модель (PHSD) и гидродинамическую модель, учитывающую сдвиговую вязкость в рамках подхода Израэля–Стюарта. Ее работоспособность проверена на распределениях по быстроте пионов и протонов, а также распределениях по поперечному импульсу, рассчитанных для столкновений  $\text{Au} + \text{Au}$  и  $\text{Pb} + \text{Pb}$  при энергиях AGS–SPS. Несмотря на общее хорошее согласие с данными, выяснилось, что непросто одновременно воспроизвести распределения пионов и протонов по быстроте [36].

Завихренность, генерируемая в столкновениях ионов, и ее влияние на поляризацию гиперонов изучаются в рамках гидродинамического и транспортного подходов. Анализ экспериментов показывает, что для описания импульсных распределений пионов, образующихся при столкновении тяжелых ионов при энергиях RHIC и LHC, может потребоваться большое значение химического потенциала пионов, близкое к критическому для бозе–эйнштейновской конденсации (БЭК) в идеальном пионном газе. Близость системы к критической точке БЭК проявляется в росте флуктуаций [37–40].

Рассмотрено влияние пионного взаимодействия на флуктуации числа частиц. Нормированная дисперсия полного числа частиц и относительного числа заряженных и нейтральных пионов увеличивается с понижением температуры, но остается конечной в критической точке бозе–эйнштейновской конденсации, тогда как дисперсии заряда расходятся [41, 42].

Широкий круг проблем связан с фазовыми переходами в системах, характеризующихся сильным взаимодействием частиц и образованием структур. Предложена общая феноменологическая модель среднего поля, описывающая фазовые переходы первого и второго рода в однородное и неоднородное состояния, причем переход в последнее может происходить даже в случае, когда взаимодействие трансляционно-инвариантно. Теория применима для описания смешанной фазы в нейтронных звездах и образования нуклонных кластеров [43–45].

Сечения образования самых тяжелых неизвестных изотопов  ${}^{283,284}\text{Rg}$ ,  ${}^{287\text{--}290}\text{Nh}$ ,  ${}^{291\text{--}294}\text{Mc}$ ,  ${}^{294}\text{Lv}$  и  ${}^{295\text{--}297}\text{Ts}$  были впервые вычислены в  $p\text{-}x\text{-}n$ -испарительных каналах реакций горячего слияния, а  ${}^{286,287}\text{Cn}$ ,  ${}^{290,291}\text{Fl}$ ,  ${}^{291,292}\text{Mc}$  и  ${}^{294}\text{Lv}$  — в  $\alpha\text{-}x\text{-}n$ -каналах. Показано, что использование каналов испарения заряженных частиц позволяет увеличить массовое число самых тяжелых изотопов ядер с  $Z = 111\text{--}117$  на несколько единиц. Каналы испарения протонов более эффективны для достижения  $N = 184$ , чем каналы  $\alpha$ -эмиссии. Испарительные каналы  $p\text{-}x\text{-}n$  и  $\alpha\text{-}x\text{-}n$  позволяют получить те изотопы, которые недоступны в  $x\text{-}n$ -каналах из-за отсутствия подходящих комбинаций сталкивающихся ядер. В асимметричных реакциях горячего синтеза с радиоактивными ядрами оценены сечения образования новых изотопов  ${}^{261,263,264}\text{No}$ ,  ${}^{263\text{--}265}\text{Lr}$ ,  ${}^{263,264,266,268}\text{Rf}$ ,  ${}^{264,265,269}\text{Db}$  и  ${}^{267,268,270,272}\text{Sg}$  в  $\alpha\text{-}x\text{-}n$ - и  $x\text{-}n$ -испарительных каналах. Показано, что в каналах испарения заряженных частиц можно получить неизвестные изотопы с сечениями около  $0,1\text{--}300$  нб [46, 47].

Исследовано влияние конечной температуры ( $T \approx 10^{10}$  К) ядер с близким к  $N = 50$  числом нейтронов на скорость захвата электронов в веществе кора коллапсирующей сверхновой звезды. В рамках термодинамически последовательного подхода показано, что тепловые эффекты приводят к разблокировке гамов-теллеровских (ГТ) переходов. Сравнение скоростей захвата электронов на основном состоянии ( $T = 0$ ) и на нагретых ядрах  ${}^{78}\text{Ni}$ ,  ${}^{82}\text{Ge}$ ,  ${}^{86}\text{Kr}$  и  ${}^{88}\text{Sr}$  свидетельствует о важности учета конечной температуры ядер при моделировании коллапса сверхновых. Полученные результаты способствуют разрешению вопроса о механизме взрыва коллапсирующих сверхновых [48].

Исследован процесс  $\gamma\gamma$ -распада низкоэнергетического квадрупольного состояния четно-четного ядра. В качестве примера для первого воз-



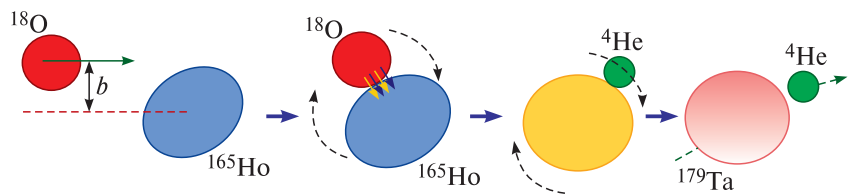
бужденного состояния  $^{48}\text{Ca}$  впервые рассчитано отношение ширин  $\gamma\gamma/\gamma$ -распадов и получено максимальное значение  $3 \cdot 10^{-8}$ , которое может быть проверено экспериментально. На основе метода функционала плотности энергии показано, что ширина  $\gamma\gamma$ -распада чувствительна к величине смешивания простых и сложных конфигураций в области гигантского дипольного резонанса. Предложен новый способ проверки понимания коллективных мод в атомных ядрах, и открыта перспективная область исследований [49].

На основе геометрической коллективной модели и квазичастично-фононной модели выведен микроскопический вариант феноменологического соотношения Гродзинса. Это соотношение применено для предсказания энергии возбуждения первых  $2^+$  состояний в ядрах с зарядом  $Z \geq 100$  с целью анализа спектров  $\alpha$ -распада. Обнаружено, что в начале цепочки изучаемых ядер при  $Z=100-110$ , где квадрупольная деформация высока, энергия возбуждения первых  $2^+$  состояний не превышает 100 кэВ, т.е. соответствует вращательным состояниям. Затем с уменьшением деформации  $E(2^+)$  резко возрастает и достигает максимального значения в  $^{284}\text{Fl}$  или в  $^{292}\text{Og}$ , т.е. в ядрах с минимальными значениями  $\beta_2$  [50].

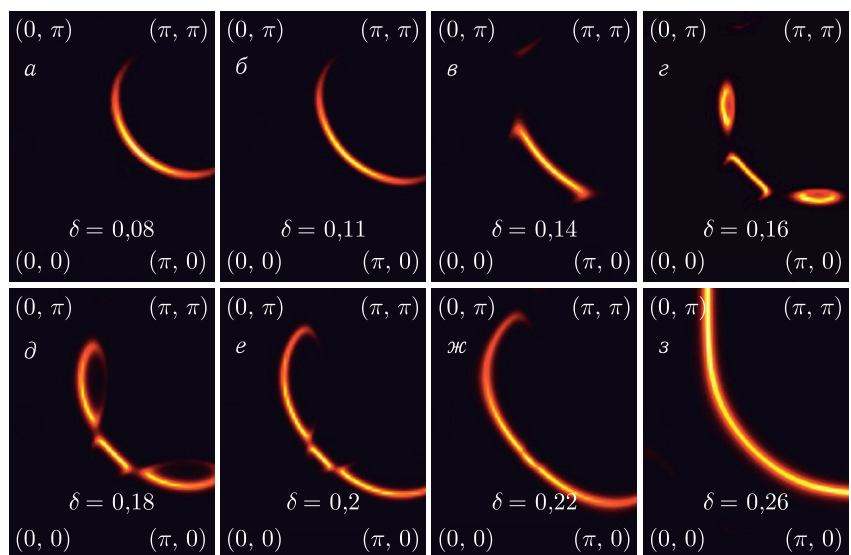
Предложен новый механизм, в котором неполное слияние рассматривается как очень асимметричное по массе квазиделение двойной ядерной системы, образующейся при захвате налетающего ядра ядром-мишенью. Показано, что неполное слияние происходит из-за сильного увеличения внутреннего барьера слияния по степеням свободы передачи массы и заряда, что препятствует полному слиянию в очень асимметричных системах, в результате возрастает вероятность образования  $\alpha$ -частиц. Центробежная сила вызывает разрушение этой асимметричной системы (например, с  $\alpha$ -частицей). Остаточное ядро, образующееся при неполном слиянии, нагрето меньше, чем составное ядро, образующееся при полном слиянии. Предложенный механизм открывает возможности для получения новых изотопов в реакциях неполного слияния [51].

Показано, что необычное поведение поверхности Ферми в высокотемпературно-сверхпроводящих купратах может быть объяснено в рамках микроскопической  $t$ - $J$ -модели. Оно вызвано сильными электронными корреляциями, приводящими к возникновению волн зарядовой плотности. Таким образом, впервые в рамках микроскопической модели получено объяснение экспериментальных данных по ре-

Схема механизма неполного слияния в виде сильно асимметричного квазиделения в случае реакции  $^{18}\text{O} + ^{93}\text{Nb}$

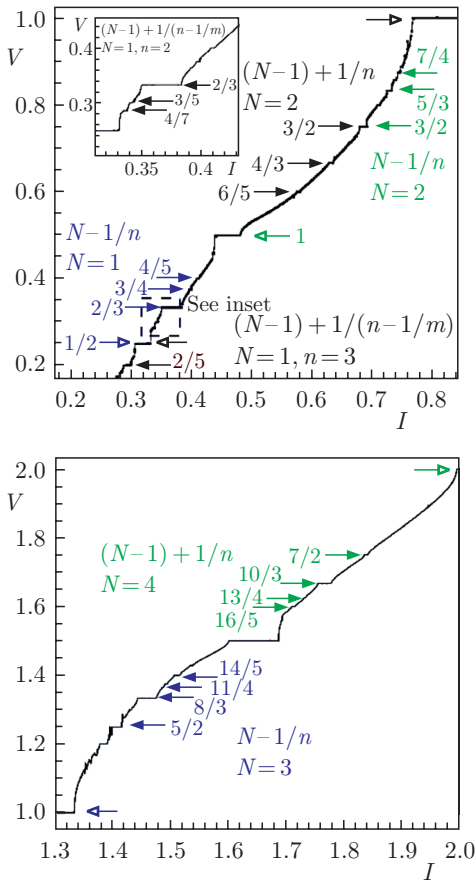


Спектральные функции на уровне Ферми в первом квадрате зоны Бриллюэна, вычисленные для различных уровней допирования  $\delta$ . Показана возникающая реконструкция поверхности Ферми, согласующаяся с экспериментом: псевдощелевая фаза ( $a$ - $b$ )  $\leftrightarrow$  волна зарядовой плотности ( $z$ - $e$ )  $\leftrightarrow$  псевдощелевая фаза ( $ж$ )  $\leftrightarrow$  ферми-жидкость ( $з$ )



конструкции поверхности Ферми в допированных купратах [52].

Исследовано влияние связи между сверхпроводящим током и намагниченностью в джозефсоновском переходе сверхпроводник–ферромагнетик–сверхпроводник в циркулярно поляризованном магнитном поле. Продемонстрирована возможность проявления ферромагнитного резонанса на частотной зависимости амплитуды намагниченности и средней критической плотности тока. На вольт-амперных характеристиках обнаружены субгармонические лестничные структуры, обусловленные влиянием динамики намагниченности на разность фаз в джозефсоновском переходе. Субгармонические лестничные структуры могут быть использованы для регистрации майорановских состояний в джозефсоновских наноструктурах [53].

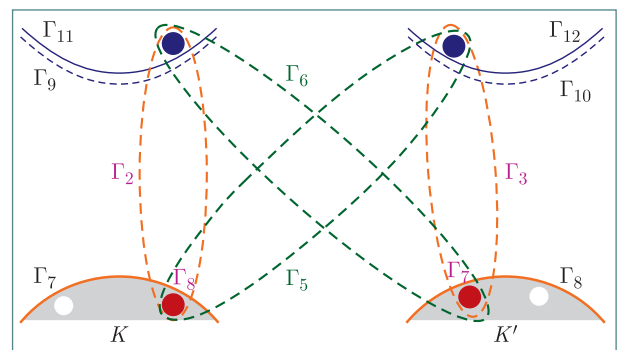


Субгармонические лестничные структуры в различных частях вольт-амперной характеристики  $S/F/S$ -перехода при ферромагнитном резонансе

Разработан метод генерации реалистичных структур фторированного графена, который базируется на результатах стохастических молекулярно-динамических расчетов. Электрон-

ные транспортные свойства таких структур рассчитаны в широком интервале значений концентрации атомов фтора, а также при различной степени их упорядочения. Обнаружено соответствие между нерегулярностью расположения атомов фтора и электронными свойствами. Предложенное рассмотрение позволило воспроизвести два экспериментальных наблюдения в данном материале: электрон-дырочную асимметрию транспортных свойств и пик в проводимости при концентрации фтора около 10% [54].

Сформулирована модель, позволившая описать взаимодействия экситонов в однослойных дихалькогенидах переходных металлов (ОДПМ) с учетом как внутримолекулярных, так и междолинных экситонов. Обнаружено, что корректный учет двупарных корреляций между фермиевскими носителями заряда, составляющими два экситона, и симметрии взаимодействующих экситонов оказывает определяющее влияние на характер экситон-экситонного взаимодействия: оно является в общем отталкивающим, за исключением случая экситонов из разных долин, которые притягиваются и образуют междолинный биэкситон. Тем самым выявлена физическая природа биэкситона в ОДПМ и впервые объяснен экспериментально наблюдаемый широкий разброс значений энергии биэкситона в различных ОДПМ, в том числе при их инкапсуляции. Полученные результаты представляют очевидный практический интерес для развития полупроводниковых нанотехнологий, прежде всего в оптоэлектронике [55].



Зонная структура однослойных дихалькогенидов вольфрама в окрестности долин  $K$  и  $K'$  и связанные с ними экситоны

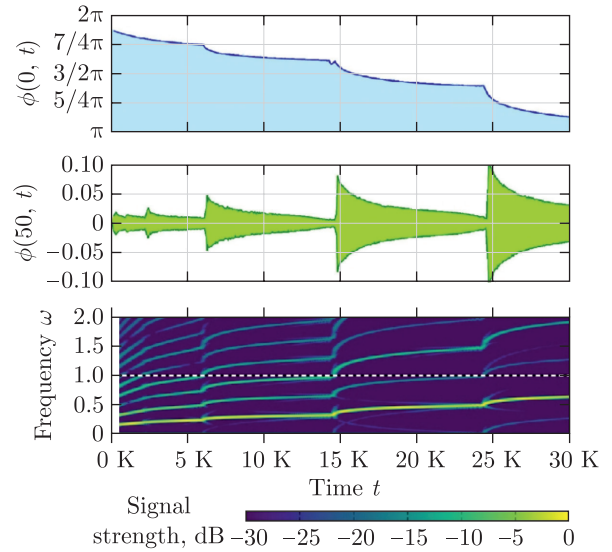
Свойства перспективных материалов в физике твердого тела изучены методами решеточного моделирования. В частности, изучены графен и дираковские полуметаллы. Для этих материалов

проведено изучение статического потенциала электрических зарядов, проводимости и влияния кирального химического потенциала на фазовые переходы [56–59].

Представлена общая теория вращающихся частиц с электрическими и магнитными дипольными моментами, движущихся в произвольных электромагнитных, инерциальных и гравитационных полях. Исследована как квантово-механическая, так и классическая динамика. Полное согласие между квантовой механикой и классической теорией доказано в общем случае. В качестве приложения полученных результатов изучена динамика вращающейся частицы в гравитационной волне и проанализированы перспективы использования установки магнитного резонанса для регистрации гравитационной волны за счет ее влияния на спиновую динамику [60].

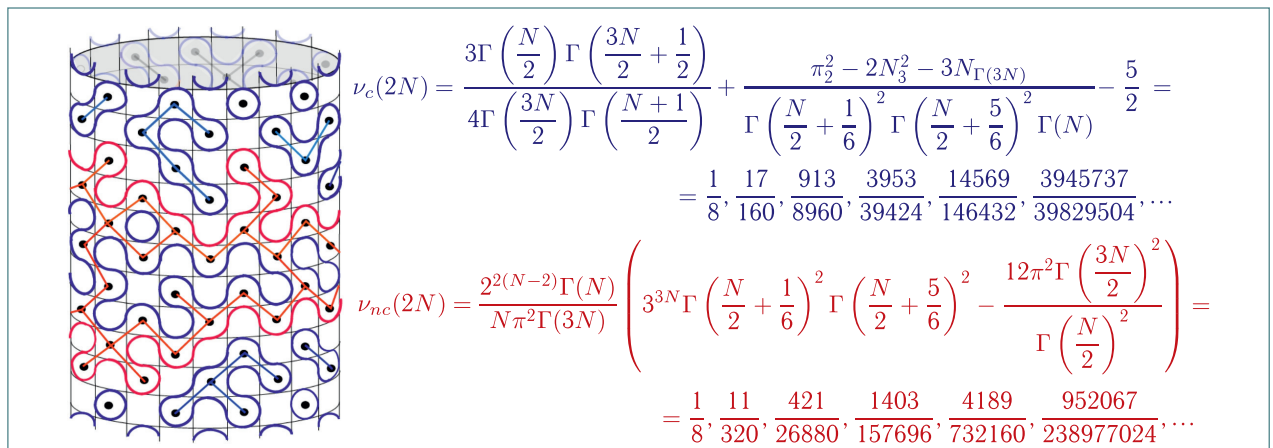
Исследована многочастичная  $SU(2|1)$  суперсимметричная квантовая механика с дополнительными полудинамическими спиновыми степенями свободы. В частности, дана  $N=4$  суперсимметризация квантовой спиновой  $U(2)$  модели Калоджеро–Мозера с внутренним массовым параметром, появляющимся из центрального расширения супералгебры  $SU(2|1)$ . Полная система допускает  $SU(2|1)$  ковариантное разделение на сектор центра масс и фактор по этому сектору. Выведены явные выражения для классических и квантовых  $SU(2|1)$  генераторов в обоих секторах, а также для полной системы. Определены соответствующие энергетические спектры, вырождения и наборы физических состояний [61].

Обнаружен новый эффект ступенчатого излучения в процессах распадов квазипериодических бризеров и осциллонов, проявляющийся в последовательности «взрывов» потока радиации, освобождаемой в ходе динамической эволюции системы [62].



Спектрограмма потока излучения квазibriзера в деформированной теории синус-Гордона

Получены точные плотности  $\nu_c$  и  $\nu_{nc}$  стягиваемых и нестягиваемых петель в модели  $O(1)$  на полосе квадратной решетки, свернутой в бесконечный цилиндр с конечным четным периметром основания  $L=2N$ . Эти плотности также равны плотностям критических перколяционных кластеров на повернутой на  $45^\circ$  квадратной решетке, свернутой в цилиндр, которые не охватывают и охватывают цилиндр соответственно.



Стягиваемые (синего цвета) и нестягиваемые (красного цвета) петли в модели петель  $O(1)$  и соответствующие кластеры модели просачивания (слева); точные выражения для их плотностей (справа)

Результаты представлены как явные рациональные функции  $N$ , принимающие рациональные значения при любом  $N$ . Их асимптотические разложения в пределе больших  $N$  имеют иррациональные коэффициенты, воспроизводящие в ведущих порядках полученные ранее результаты. Данный результат показывает уникальный пример точного вычисления наблюдаемой в ограниченной системе, которая становится критической в пределе бесконечного размера. Исследования ее универсального скейлингового поведения помогают лучше понять физику критических явлений в двумерных системах [63].

Исследован предложенный Вожелем (Vogel) способ параметризации всех простых комплексных алгебр Ли с помощью трех параметров, которые определяются с точностью до общего множителя и перестановок. Показано, как такое описание возникает при рассмотрении расщепленных (поляризованных) операторов Казимира — основных конструктивных блоков, используемых при вычислении цветовых факторов для амплитуд в неабелевых калибровочных теориях поля. Для расщепленных операторов Казимира всех простых комплексных алгебр Ли в определяющем и присоединенном представлениях были построены характеристические тождества. С помощью этих тождеств получены явные формулы для проекторов на инвариантные подпространства представления  $T \otimes T$  в двух случаях: когда  $T$  — определяющее и когда  $T$  — при-

соединенное представление. В присоединенном представлении построенные характеристические тождества и соответствующие проекторы исследованы с позиции универсального описания всех простых комплексных алгебр Ли в терминах параметров Вожеля [64].

Исследованы эффекты электродинамики в пространстве-времени с нулевой космической струной. Рассмотрены случаи, когда горизонт струны пересекает точечный источник с электрическим зарядом или источник с магнитным моментом. Показано, что нулевые струны возмущают электромагнитное поле источника и индуцируют электромагнитные всплески. Получено аналитическое приближение для асимптотики электромагнитных волн на нулевой бесконечности будущего, вычислен поток излучения для источников обоих типов. Оценки показывают, что пиковая мощность излучения может быть весьма велика для нулевых струн, движущихся вблизи пульсаров, и еще больше для магнетаров. В гравитации показано, что возмущение гравитационного поля массивных источников, вызванное нулевыми космическими струнами, излучается в виде гравитационных всплесков. Нулевая космическая струна и точечная масса вместе порождают пространство, геометрия которого вблизи нулевой бесконечности будущего позволяет отнести его к классу так называемых полиоднородных пространств [65, 66].

# ФИЗИКА ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

В 2018 г. коллаборация **BM@N** (Baryonic Matter at Nuclotron) провела первый сеанс по физической программе эксперимента. Было зарегистрировано более 2 млн событий во взаимодействии пучка ионов углерода с энергией 4 ГэВ/с на нуклон с жидководородной мише-

ню в рамках реализации программы исследований короткодействующих корреляций. Кроме того, коллаборация **BM@N** зарегистрировала почти 200 млн событий на пучках ионов аргона и криптона с кинетической энергией 3,2 и 2,3 А ГэВ соответственно.



Триггерные детекторы мишенной зоны и центральная трековая система внутри спектрометрического магнита **BM@N**



Участники совещания коллаборации **BM@N**



Участники совещания коллаборации MPD



Технологическое перемещение 800-тонного соленоида детектора MPD



Участники совещания коллаборации SPD

В ходе длительного сеанса 2022–2023 гг. на выведенных пучках нуклотрона в эксперименте были зарегистрированы 508 млн взаимодействий ионов  $^{124}\text{Xe}$  с мишенью CsI при энергии 3,8А ГэВ и 48 млн при энергии 3,0А ГэВ. По итогам обработки набранной статистики ожидается регистрация  $4 \cdot 10^6$   $\Lambda$ -гиперонов,  $1,2 \cdot 10^6$   $K_S^0$ -мезонов и 8000  $\Xi$ -гиперонов. Вместе с идентифицированными заряженными частицами они являются основным инструментом изучения свойств ядерной материи, образующейся при взаимодействиях  $\text{Xe} + \text{CsI}$ .

В реализации эксперимента участвует международная коллаборация, которая включает 240 физиков и инженеров из 21 исследовательского института из 11 стран.

Завершается интенсивная работа по созданию установки **MPD** (Multi-Purpose Detector), предназначенной для исследования свойств плотной барионной материи, образующейся в столкновениях тяжелых ионов на коллайдере NICA. Международная коллаборация MPD объединяет свыше 500 участников из 38 институтов из 12 стран.

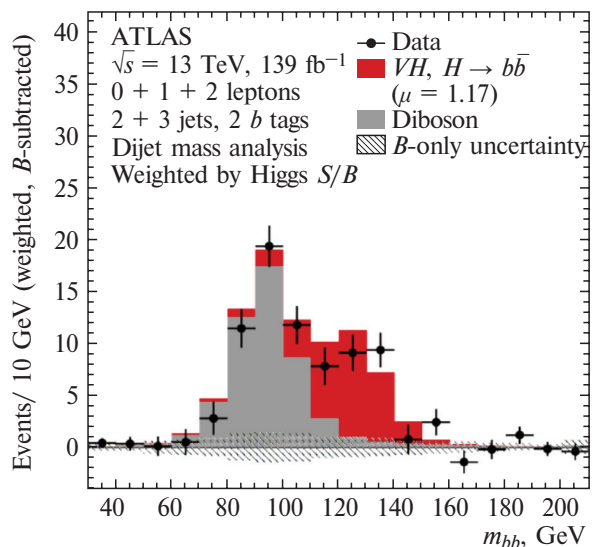
Детектор спиновой физики **SPD** (Spin Physics Detector) — вторая установка на коллайдере NICA, создаваемая 300 членами коллаборации из 35 институтов из 15 стран. В настоящее время усилия участников сосредоточены на подготовке TDR и тестировании прототипов детекторов [67–70].

В 2017 г. коллаборация **STAR** на RHIC (США) при активном участии группы из ОИЯИ сообщила о первом наблюдении эффекта коллективной поляризации  $\Lambda$ -гиперонов в столкновениях тяжелых ионов. Обнаружено, что направление поляризации  $\Lambda$ -гиперонов коррелирует с направлением углового момента системы на уровне нескольких процентов при нецентральных столкновениях с энергией  $\sqrt{s_{NN}} = 7,7-32$  ГэВ. Также установлено, что горячая система, возникающая в области средних быстрот, может рассматриваться как жидкость, и гидродинамические расчеты напрямую связывают поляризацию испущенных частиц с так называемой завихренностью (закручиванием потока) жидкости. С использованием этой связи была сделана оценка завихренности жидкости, созданной на RHIC, которая составляет порядка  $9 \cdot 10^{21} \text{ с}^{-1}$ , что на 14 порядков выше, чем у любой из ранее наблюдаемых жидкостей. Предыдущие результаты показали, что система на RHIC является самой горячей и наименее вязкой (относительно плотности энтропии) из когда-либо созданных [71].

Физиками ОИЯИ в эксперименте **COMPASS** (ЦЕРН) была инициирована программа поиска нового возможного механизма рождения экзотических чармониев — фоторождения на ядерной мишени. В результате поиска  $X(3872)$  со статистической значимостью  $4,1\sigma$  в спектре инвариантных масс подсистемы  $J/\psi\pi^+\pi^-$  конечного состояния был обнаружен сигнал частицы, масса и ширина которой согласуются с ожидаемыми для  $X(3872)$ . Детальный анализ кинематики распада наблюдаемой частицы показал полное несоответствие хорошо известной кинематике распада  $X(3872)$ . Это неожиданное наблюдение позволило предположить, что обнаруженный сигнал, возможно, принадлежит новой частице, которая является частицей-партнером  $X(3872)$ , имеет близкую массу, но отличается от  $X(3872)$  набором квантовых чисел. Существование такой частицы-партнера предсказывается некоторыми теоретическими моделями, описывающими  $X(3872)$  как состояние из двух кварков и двух антикварков, тесно связанное сильным взаимодействием (тетракварк). Масса нового состояния равна  $(3860,1 \pm 10,0) \text{ МэВ}/c^2$ , брейт-вигнеровская ширина с вероятностью 90% составляет менее  $51 \text{ МэВ}/c^2$  [72].

Ряд интересных результатов получен группой ОИЯИ в эксперименте **ALICE** на LHC (ЦЕРН). Новый анализ фемтоскопических корреляций для пар идентичных заряженных пионов и каонов в  $pp$ -столкновениях при 13 ТэВ был проведен отдельно для сферических ( $S_T > 0,7$ ) и струйных ( $S_T < 0,3$ ) событий, где  $S_T$  — поперечная сферичность события. Уменьшение радиусов источников с увеличением поперечного импульса пары наблюдалось не только для струйных, но и для сферических событий, которые демонстрируют нетривиальное поведение коллективно-подобных частиц, ожидаемое только в столкновениях тяжелых ионов с возможным образованием кварк-глюонной плазмы [73].

В эксперименте **ATLAS** на LHC (ЦЕРН) при активном участии сотрудников ОИЯИ были проведены исследования по поиску распадов бозона Хиггса  $SM$  на кварковую  $b\bar{b}$ -пару при совместном рождении с бозоном  $W$  или  $Z$ . Проанализированные данные, соответствующие интегральной светимости  $79,8 \text{ фб}^{-1}$ , были получены в протон-протонных соударениях при  $\sqrt{s} = 13$  ТэВ. Измеренное превышение наблюдаемых событий над ожидаемыми фоновыми событиями в канале ассоциативного рождения только с векторным бозоном соответствует значимости  $5,3\sigma$ , что сравнимо со значимостью



Распределение по инвариантной массе пары  $b$ -струй, образованной в  $WH$ - и  $ZH$ -реакциях, после вычитания вклада всех фонов, кроме дибозонных процессов  $WZ$  и  $ZZ$



4,8 $\sigma$ , предсказанной в рамках СМ. Статистическая достоверность результатов была значительно улучшена после обработки всех данных.

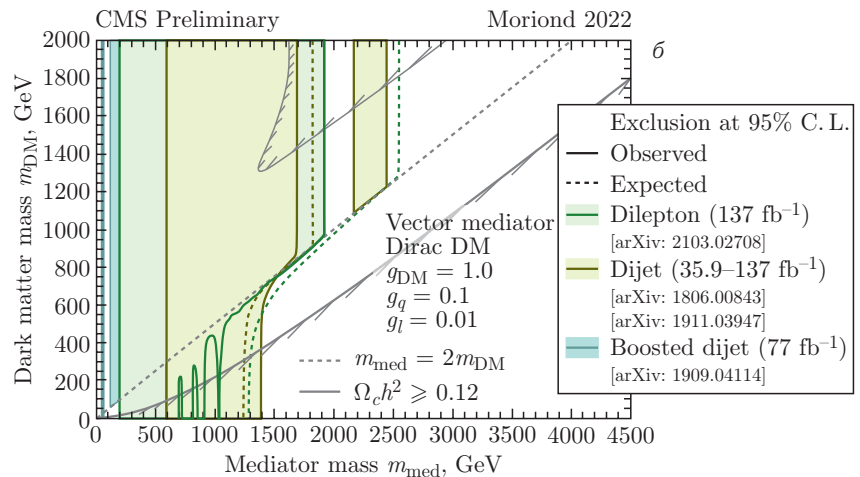
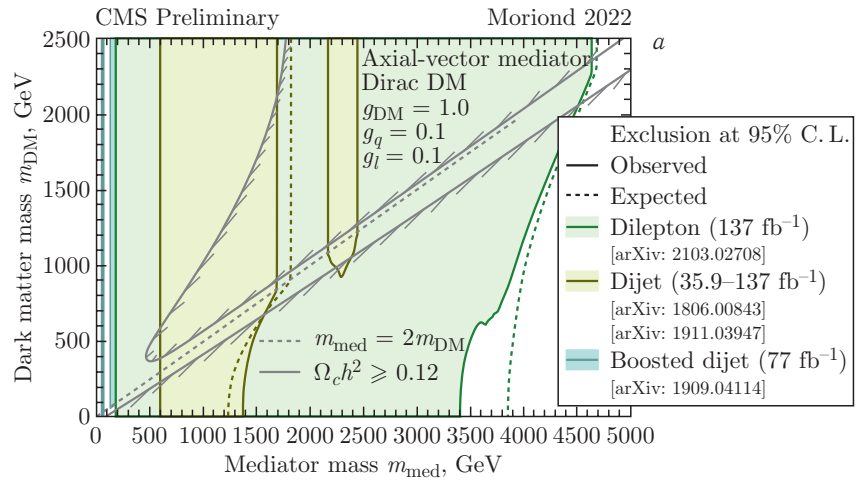
Сотрудники ОИЯИ принимали участие в поиске потенциальных *cccc*-тетракварков, распадающихся на пару чармониевых состояний в четырехмюонном конечном состоянии, с использованием данных, полученных при 13 ТэВ *pp*-столкновений, соответствующих интегральной светимости 139 фб<sup>-1</sup>. Были обнаружены статистически значимые превышения сигнала над фоном в канале с двумя *J/ψ*-мезонами, согласующимися с узким резонансом при 6,9 ГэВ и более широкой структурой при более низких массах. Кроме того, обнаружено статистически значимое превышение сигнала над фоном в канале с *J/ψ*+*J/ψ*(2*S*)-мезонами. Сделаны оценки соответствующих масс и ширин распадов [74–77].

В 2023 г. в рамках проекта ATLAS проводились поиски квантовых черных дыр (QBH) в спектре инвариантной массы в лептон-струй-

ном канале распада с использованием данных, полученных при  $\sqrt{s} = 13$  ТэВ *pp*-столкновений, соответствующих интегральной светимости 140 фб<sup>-1</sup>. Наблюдаемый спектр инвариантной массы пары лептон–струя согласуется с СМ. Поставлены пределы на сечение рождения QBH с учетом вероятности распада на пару лептон–струя для масс более 2 ТэВ на уровне достоверности 95%. Нижний предел на массу QBH составил 9,2 ТэВ для ADD модели и 6,8 ТэВ для RS модели [78].

В эксперименте CMS на LHC с участием физиков ОИЯИ проведен поиск квантовых черных дыр с характерной экспериментальной сигнатурой нарушения аромата *eμ*, *eτ*, *μτ*. Полученные ограничения на минимально допустимые значения массы квантовых черных дыр составляют от 3,6 до 5,6 ТэВ/*c*<sup>2</sup> в зависимости от модели и числа *n* дополнительных измерений.

В столкновениях протонов с энергией 13 ТэВ в с.ц.м. в канале с парой электронов и мюонов высоких энергий с использованием набора

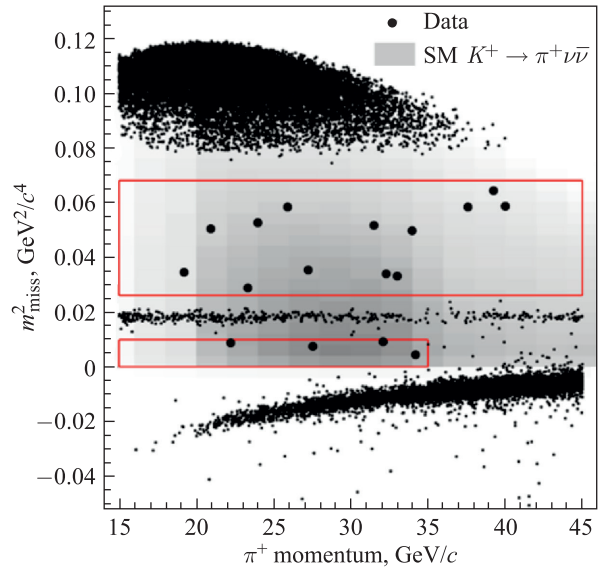


Пределы (95% C.L.) на массы частиц-кандидатов на роль частиц темной материи  $m_{DM}$  и частицы-переносчика взаимодействия с темным сектором  $m_{med}$ . Закрашенная область соответствует закрытым значениям масс для псевдовекторного (а) и векторного (б) переносчика. Результаты получены из данных рождения пары струй и пары лептонов

данных при полной интегральной светимости  $140 \text{ fb}^{-1}$  измерены верхние пределы на отношения сечений рождения новых узких резонансов со спином 1 и спином 2 и калибровочного Z-бозона. Это позволило установить наиболее сильные мировые ограничения на массы гравитонных состояний в модели Рэндалл–Сандрума, переносчиков взаимодействия между частицами СМ и сектором темной материи, новых тяжелых калибровочных бозонов моделей Великого объединения. В рамках поиска нерезонансных сигналов новой физики был установлен нижний предел на величину ультрафиолетового масштаба обрезания для модели четырехфермионного контактного взаимодействия и модели плоских дополнительных пространственных измерений Аркани-Хамеда–Димопулоса–Двали. Также впервые была проверена и подтверждена универсальность лептонных взаимодействий в области до 3 ТэВ. Выполнена серия вычислений электрослабых и КХД радиационных поправок для процессов рождения пар высокоэнергичных мюонов в процессе Дрелла–Яна.

Успешно реализуются согласованные в MoU планы по модернизации и проверке работоспособности детекторов CMS, в частности, по созданию калориметра высокой гранулярности (HGCal) и модернизации передней мюонной станции ME1/1 [79–82].

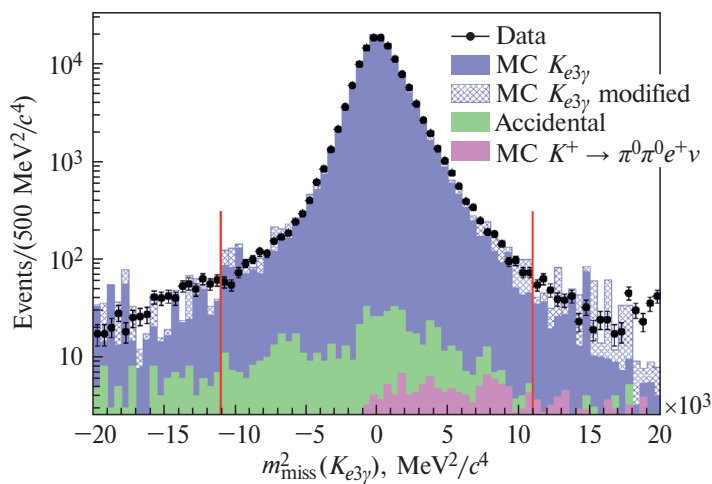
В эксперименте NA62 на SPS (ЦЕРН) с участием физиков ОИЯИ в рамках поиска новой физики в редких распадах каонов обнаружено 17 кандидатов в сверхредкий распад заряженно-



События-кандидаты в сверхредкий распад (в рамке) и фоновые события в переменных измеренного импульса заряженного пиона и квадрата недостающей массы, связанной с нейтрино

го каона  $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$  при ожидаемом фоне в 7 событий. Это позволило сделать лучшую в мире оценку относительной вероятности распада  $BR(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}) = (11,0_{-3,5}^{+0,4} \pm 0,3_{\text{сист}}) \cdot 10^{-11}$ , что согласуется с предсказанием СМ.

Физики ОИЯИ также завершили исследование радиационного распада  $K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu \gamma$  на статистике из  $1,3 \cdot 10^5$  кандидатов с фоном менее 1%, набранной в 2017–2018 гг. Измерения

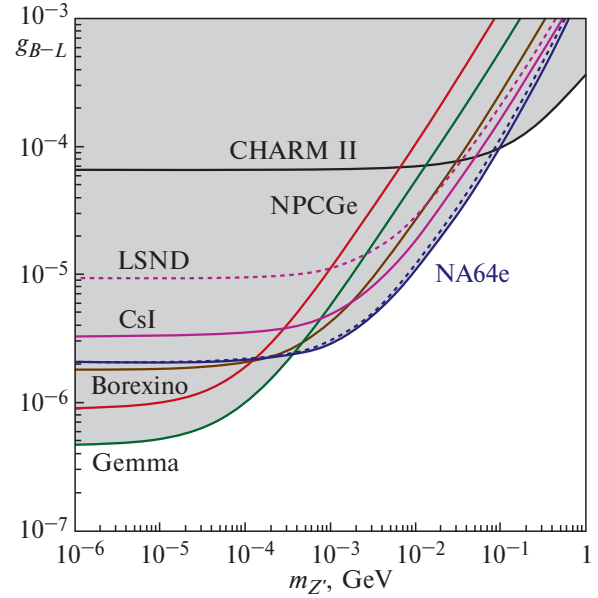


Распределение квадрата недостающей массы комбинаций зарегистрированных частиц  $\pi^0 e^+ \nu \gamma$  для отобранных экспериментальных событий (точки), а также для ожидаемого сигнала и фона (гистограммы)

относительной вероятности этого распада в трех ограниченных кинематических областях были выполнены с относительной точностью в пределах 1%, что улучшило существующие результаты более чем в два раза. Исследована асимметрия этого распада, которая может быть связана с  $T$ -нарушением, но доказательств ее существования в рамках достигнутой точности обнаружено не было [83, 84].

Группа ОИЯИ в эксперименте NA64 (ЦЕРН) активно участвует в модернизации установки и проведении сеансов набора данных на ускорителе SPS с пучком мюонов с энергией 160 ГэВ и электронов с энергией 100 ГэВ. Продолжается поиск легкой темной материи и ее медиатора — темного фотона. На статистике  $3,4 \cdot 10^{11}$  событий на мишень (eot) был впервые проведен поиск легкого  $Z'$  бозона, возникающего в моделях расширения Стандартной модели, связанных с нарушением барион-лептонной симметрии. За генерацию  $Z'$  отвечает механизм темного тормозного излучения в реакции рассеяния 100-ГэВ электронов на ядерной мишени  $eZ \rightarrow eZZ'$ . Результат проведенного анализа на 90%-м уровне достоверности исключил данный механизм образования  $Z'$ -бозона в диапазоне масс от 1 кэВ до 1 ГэВ, существенно дополнив ранее имеющиеся ограничения, полученные в серии нейтринных экспериментов.

На статистике  $9,37 \cdot 10^{11}$  eot взаимодействий электронов с энергией 100 ГэВ с активной мишенью, набранной в ходе сеансов 2016–2022 гг. в эксперименте NA64, было впервые проведено исследование наиболее интересной области параметров моделей скалярной и фермионной термальной темной материи с суб-ГэВ-ной массой (LDM), рожденной медиатором — новым векторным бозоном — темным фотоном  $A'$ . Сигналов образования темной материи не обнаружено, что позволило установить более точные пределы на взаимодействия  $A'$  с фотонами для области масс  $m_{A'} \leq 0,35$  ГэВ, а также исключить сценарии скалярной и майорановской LDM в области параметров константы взаимодействия  $\chi-A'$ , ограниченной сверху



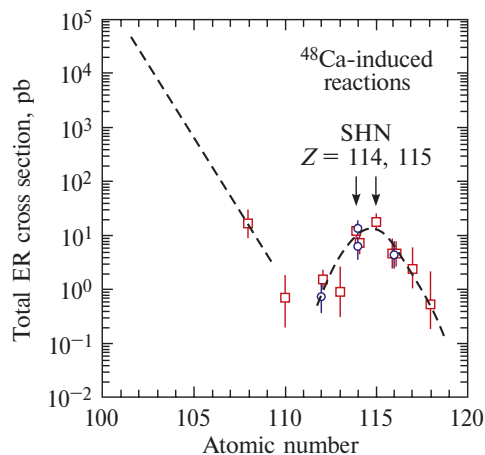
Результат NA64 по исключению на 90%-м уровне достоверности области существования  $Z'$  в модели нарушения  $B-L$  симметрии в зависимости от константы связи  $g_{B-L}$  и массы  $m_{Z'}$  в сравнении с результатами нейтринных экспериментов TEXONO, Gemma (реактор), Borexino (солнечные нейтрино), LSND и CHARM II (ускорительные эксперименты)

$\alpha_D \leq 0,1$ , и области масс частиц темной материи  $0,001 \leq m_\chi \leq 0,1$  ГэВ при условии  $3m_\chi \leq m_{A'}$  [85, 86].

В рамках проекта BESIII (ИФВЭ, Пекин) проведена проверка CP-нарушения в парах  $\Xi^0-\bar{\Xi}^0$ . Процесс  $J/\psi \rightarrow \Xi^0-\bar{\Xi}^0$  и последующие распады были исследованы на статистике  $(10087 \pm 44) \cdot 10^6$  событий  $J/\psi$ , набранной в эксперименте. Параметры распада  $\Xi^0(\alpha_\Xi, \phi_\Xi)$  и  $\bar{\Xi}^0(\alpha_{\bar{\Xi}}, \phi_{\bar{\Xi}})$  были одновременно измерены с беспрецедентной точностью. Получены наиболее точные значения наблюдаемых  $A_{CP}^{\Xi^0}$  и  $\Delta\phi_{CP}^{\Xi^0}$  для CP-нарушения в распаде  $\Xi^0$ . Впервые определены слабая и сильная разности фаз  $\zeta_P-\zeta_S$  и  $\delta_P-\delta_S$ , что является наиболее точным результатом для любого слабораспадающегося бариона [87].

Реализация экспериментальной программы фабрики СТЭ стартовала в конце 2020 г. В течение 2020–2023 гг. были выполнены следующие эксперименты на пучках  $^{48}\text{Ca}$  и  $^{40}\text{Ar}$ :  $^{232}\text{Th} + ^{48}\text{Ca} \rightarrow ^{280}\text{Ds}^*$ ,  $^{238}\text{U} + ^{40}\text{Ar} \rightarrow ^{278}\text{Ds}^*$ ,  $^{238}\text{U} + ^{48}\text{Ca} \rightarrow ^{286}\text{Cn}^*$ ,  $^{242}\text{Pu} + ^{48}\text{Ca} \rightarrow ^{290}\text{Fl}^*$ ,  $^{243}\text{Am} + ^{48}\text{Ca} \rightarrow ^{291}\text{Mc}^*$ . Было получено около 250 событий образования сверхтяжелых ядер; изучены свойства распада 40 ядер в диапазоне от лоуренсия ( $Z=103$ ) до московия ( $Z=115$ ). Шесть изотопов были получены и исследованы впервые:  $^{286}\text{Mc}$ ,  $^{264}\text{Lr}$ ,  $^{275}\text{Ds}$ ,  $^{276}\text{Ds}$ ,  $^{272}\text{Hs}$ ,  $^{268}\text{Sg}$ .

В 2023 г. на ускорительном комплексе «Фабрика сверхтяжелых элементов» впервые выполнен эксперимент по синтезу изотопов 116-го элемента в реакции  $^{54}\text{Cr} + ^{238}\text{U}$ . Целью эксперимента являлось измерение фактора падения сечения при переходе от реакций с пучком  $^{48}\text{Ca}$  к более тяжелому пучку  $^{54}\text{Cr}$ , а также получение стабильно высокого тока пучка  $^{54}\text{Cr}$ . Было зарегистрировано 2 события образования нового изотопа 116-го элемента —  $^{288}\text{Lv}$ . Эксперимент продолжен в 2024 г. [10–12].



Поведение сечения образования тяжелейших ядер в реакциях слияния  $^{48}\text{Ca}$  с актинидами

# ФИЗИКА НЕЙТРИНО И АСТРОФИЗИКА

Глубоководный нейтринный телескоп **Baikal-GVD** является одним из трех крупнейших в мире и крупнейшим в Северном полушарии по эффективной площади и объему для наблюдения природных потоков нейтрино.

С 2017 по 2023 г. были установлены 11 кластеров байкальского телескопа, его рабочий

объем превысил значение  $\approx 0,5 \text{ км}^3$  в задаче регистрации событий от нейтрино высоких энергий (свыше 100 ТэВ). Детектор содержит в своем составе 12 кластеров глубоководных гирлянд регистрирующей и управляющей аппаратуры (3456 оптических модулей).



Байкальская экспедиция



Байкал, 13 марта 2021 г. Подписание Меморандума о взаимопонимании Минобрнауки России и ОИЯИ по развитию байкальского глубоководного нейтринного телескопа в ходе торжественного запуска телескопа **Baikal-GVD**



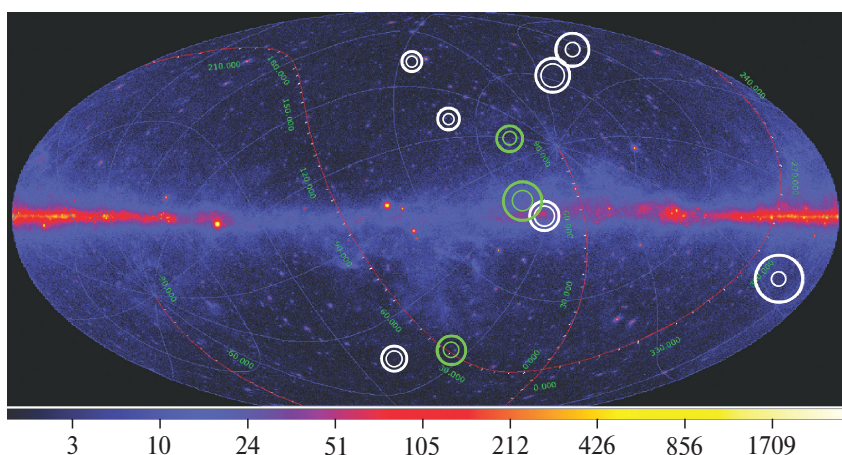
Участники рабочего совещания по проекту Baikal-GVD в ледовом лагере на месте проведения очередной экспедиции по разворачиванию глубоководного нейтринного телескопа. Фото: © Иркутский государственный университет

В начале марта 2021 г. состоялся официальный ввод в эксплуатацию глубоководного нейтринного телескопа Baikal-GVD (в составе восьми кластеров).

При анализе данных, полученных при работе детектора в конфигурациях 2018–2020 гг., были выделены первые 10 кандидатов на события, инициированные нейтрино высоких энергий астрофизической природы. Опубликованы

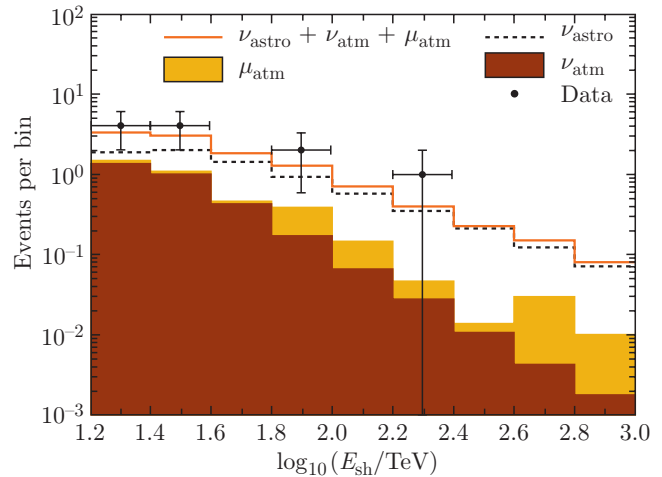
первые результаты поиска событий от нейтрино на детекторе Baikal-GVD, ассоциированных с оповещениями антарктического детектора IceCube [88, 89].

В 2022 г. при анализе данных, полученных при работе детектора в конфигурациях 2018–2021 гг., были выделены 11 каскадных событий с энергией более 15 ТэВ, инициированных ней-



Положение первых десяти кандидатов на астрофизические нейтринные события в Baikal-GVD на небесной карте с источниками FERMI-LAT в галактической системе координат. Внутренняя и внешняя окружности вокруг событий соответствуют вероятности регистрации 50 и 90%

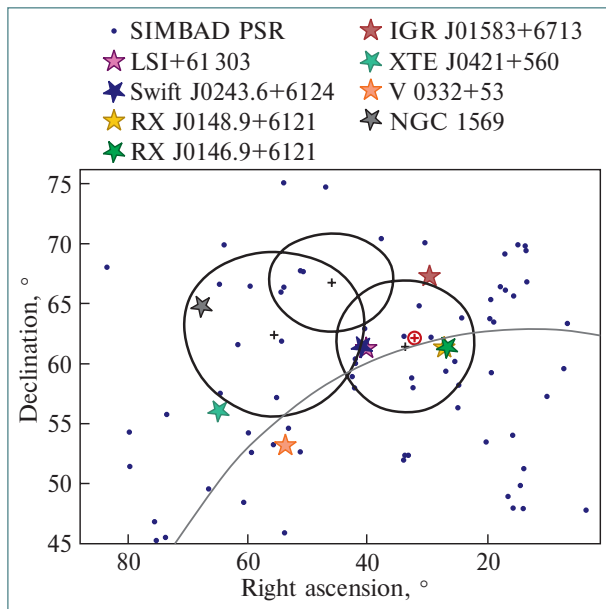
Распределения по энергии экспериментальных и теоретически ожидаемых событий в рамках анализа каскадных событий из-под горизонта: экспериментальные события — черные точки; распределение событий, ожидаемое от диффузного потока нейтрино астрофизической природы, — штриховая гистограмма; фоновые события от атмосферных мюонов и атмосферных нейтрино — желтая и коричневая области; суммарное число ожидаемых сигнальных и фоновых событий — оранжевая гистограмма



трино астрофизической природы, что на уровне достоверности  $3\sigma$  подтверждает результаты первого наблюдения потока астрофизических нейтрино высоких энергий на антарктическом детекторе IceCube [90].

В 2023 г. при анализе данных, полученных при работе детектора в конфигурациях 2018–2022 гг., исследованы корреляции с яркими радиоблазарами каскадных событий с энергиями, превышающими 100 ТэВ.

Несмотря на то, что в текущем наборе данных не обнаружено статистически значимых эффектов, анализ указывает на ряд возможных ассоциаций как с экстрагалактическими, так и с галактическими источниками. В частности, был представлен анализ наблюдаемого триплета нейтринных кандидатов в галактической плоскости, исследована его потенциальная связь с определенными галактическими источниками, рассмотрено совпадение направлений прихода каскадных событий с несколькими яркими блазарами [91].

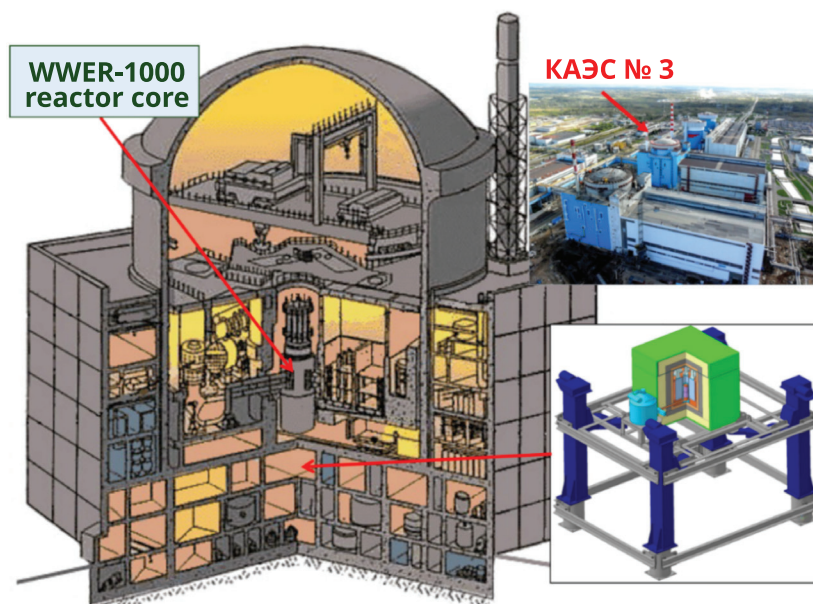


Три каскадных события Baikal-GVD с высокой энергией: GVD190216CA, GVD190604CA, GVD210716CA — вблизи галактической плоскости (серая линия) и ошибки определения их направлений (черные линии). Точка статистически наиболее значимого превышения потока IceCube над изотропным в Северном полушарии показана красным плюсом

На Калининской атомной электростанции (КАЭС) проводятся два эксперимента, направленных на исследование фундаментальных свойств нейтрино:  $\nu$ GeN и DANSS.

Экспериментальная установка  $\nu$ GeN находится под реактором №3 КАЭС на расстоянии немногим более 10 м от центра активной зоны реактора. Это позволяет оперировать гигантским потоком нейтрино — более  $5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ . Окружающие конструкционные материалы реактора представляют собой хорошую защиту от космического излучения, соответствующую 50 м водного эквивалента. В 2021 г. были завершены работы по оптимизации оборудования и начаты планируемые измерения. Энергетическое разрешение детектора в условиях КАЭС составило 101,6(5) эВ (FWHM). Достигнута эффективность регистрации сигналов более 80% для сигналов с энергиями выше 250 эВ.

Были получены первые результаты по поиску когерентного рассеяния нейтрино и других взаимодействий. Сравнение данных, набранных при работающем и остановленном реакторе (154 и 39 сут соответственно), не выявило признаков



Схематическое размещение детектора DANSS

ожидаемого сигнала от когерентного рассеяния нейтрино. Это позволило поставить ограничение на параметр ионизационных потерь в германии (квенчинг) на уровне  $k < 0,23$  (90%-й уровень достоверности) [92, 93].

Сотрудниками ЛЯП совместно с коллегами из ИТЭФ (Москва) был создан нейтринный детектор DANSS, не содержащий пожароопасных или едких жидкостей и пригодный к размещению вблизи промышленных ядерных реакторов. Запущенный в работу на 4-м энергоблоке КАЭС, детектор регистрирует около 4000 реакторных антинейтрино в сутки при фоне, не превышающем 2–3% (что является на сегодня лучшим в мире значением). Благодаря подъемному механизму детектор может, не прекращая работы, перемещаться на 2 м и, таким образом, измерять энергетический спектр нейтрино на разных расстояниях от реактора. Помимо нейтринной диагностики реактора, это позволяет изучать осцилляции нейтрино независимо от спорных предположений о теоретическом нейтринном спектре.

В 2019 г. проведен полномасштабный анализ обновленных данных 2016–2019 гг. с улучшенной оценкой всех источников фона и систематических погрешностей. Получено лучшее в мире модельно-независимое ограничение на существование стерильного нейтрино [94].

В ходе анализа данных детектора DANSS было установлено, что отношение наблюдаемой скорости абсолютного счета антинейтри-

но к предсказанной на основе модели Хубера и Мюллера составляет  $0,98 \pm 0,04$ . Были установлены пределы в пространстве параметров гипотетического стерильного нейтрино. В частности, для больших ( $\gtrsim 10$  эВ<sup>2</sup>) значений параметра  $\Delta m_{41}^2$  исключаются значения  $\sin^2 2\theta_{ee} > 0,26$  на 90%-м уровне достоверности. Использование абсолютных скоростей счета детектора DANSS позволило исключить наилучшую точку  $\Delta m_{41}^2 = 7,3$  эВ<sup>2</sup>,  $\sin^2 2\theta_{ee} = 0,36$ , полученную в эксперименте «Нейтрино-4». Кроме того, исключается практически вся область допустимых параметров, полученных в эксперименте BEST [95].

В рамках проекта TAIGA в ОИЯИ изготовлена, отправлена и смонтирована на полигоне механическая часть четырех черенковских телескопов. Разработан и изготовлен на полигоне прототип широкоугольного линзового черенковского телескопа. Объектив диаметром 600 мм изготовлен в ОИЯИ. Начал получать совместные данные в составе проекта третий черенковский телескоп. Получен сигнал от источника в Крабовидной туманности с достоверностью 12,6  $\sigma$ .

Сигнал исследован с использованием трех методов: одиночного, стерео и гибридного. Гибридный (TAIGA-hybrid) метод, разработанный коллаборацией, подразумевает использование данных при одновременной регистрации события с энергией гамма-квантов более 80 ТэВ одним телескопом и несколькими широкоугольными детекторами. Результаты измерений





Атмосферный черенковский телескоп TAIGA-IACT

хорошо согласуются друг с другом, с данными других гамма-обсерваторий и позволяют в будущем использовать гибридный метод для исследования гамма-квантов в области энергий более 100 ТэВ. Продолжаются наблюдения и набор данных от различных источников гамма-излучения [96].

В Китае продолжается сборка крупнейшего детектора реакторных антинейтрино **JUNO**. К настоящему времени установлено более половины из запланированных 18000 фотоумножителей (ФЭУ) диаметром 20 дюймов и 25000 ФЭУ диаметром 3 дюйма. Для этих фотоумножителей в ОИЯИ разработано и произведено высоковольтное питание с использованием 20000 специализированных модулей, включая их тестирование и пусконаладку.

Параллельно ведутся работы по подготовке к сборке и установке детектора топ-трекер. В ОИЯИ разработано программное обеспечение для сбора данных детектора, прошедшее отладку на прототипе топ-трекера в ИРНС (Страсбург, Франция). В рамках проекта изготовлена станция для массового тестирования 4100 матриц кремниевых фотоумножителей, включающих 130 тыс. индивидуальных ФЭУ. Проведено тестирование более половины матриц [97].

В 2020–2022 гг. в эксперименте **NOvA** (США) был проведен анализ данных с увеличенной интегральной экспозицией, которая теперь составляет  $13,6 \cdot 10^{20}$  прот (протонов на мишени) в пучке нейтрино и  $12,5 \cdot 10^{20}$  прот в пучке антинейтрино. Совместная интерпретация различ-

ных каналов осцилляций позволила уточнить параметры этого явления: лучшее значение подгонки лежит в точке с нормальной иерархией, в верхнем октанте угла  $\theta_{23}$  со значением  $\sin^2 2\theta_{23} = 0,57^{+0,03}_{-0,04}$ ,  $\Delta m_{32}^2 = (2,41 \pm 0,07) \cdot 10^{-3}$  эВ<sup>2</sup> и  $\delta_{CP} = 0,82^{+0,24}_{-1,0}$   $\pi$ . Таким образом, по данным эксперимента **NOvA**, предпочтительной является комбинация осцилляционных параметров, приводящая к симметрии между нейтрино и антинейтрино, а противоположные комбинации («обратная иерархия,  $\delta_{CP} = \pi/2$ » и «нормальная иерархия,  $\delta_{CP} = 3\pi/2$ ») отвергаются на уровнях  $> 3\sigma$  и  $> 2\sigma$  соответственно [98, 99].

Детектор **Borexino** (Италия) регистрировал нейтрино от Солнца в реакции рассеяния на электронах в жидком органическом сцинтилляторе общей массой 300 т. Ключевым фактором успеха проекта было отсутствие радиоактивных примесей в жидком сцинтилляторе.

В 2017 г. в рамках проекта **Borexino** были опубликованы результаты анализа временных вариаций потока «бериллиевых» нейтрино. Период вариаций соответствует астрономическому году, при этом амплитуда и фаза вариаций находятся в согласии с ожидаемыми за счет эксцентриситета орбиты Земли. Полученное подгоночное значение периода  $T = (367 \pm 10)$  сут можно рассматривать как первое измерение длительности астрономического года с помощью солнечных нейтрино. Точность определения потока солнечных «бериллиевых» нейтрино улучшена до 3%, *pp*-нейтрино — до 10% и *per*-нейтрино — до 17%. Надежность наблюдения сигнала

от *pp*-нейтрино впервые превысила уровень  $5\sigma$ . Новые данные Borexino по солнечным нейтрино имеют лучшее, но статистически слабо значимое согласие с вариантом модели Солнца с высокой металличностью. Из анализа отклонения формы спектра электронов отдачи от предсказываемого СМ получено лучшее на сегодня ограничение на эффективный магнитный момент солнечных нейтрино  $\mu_\nu^{\text{eff}} < 2,8 \cdot 10^{-11} \mu_B$  (90%-й уровень достоверности) [100, 101].

В 2018 г. коллаборацией Borexino с участием ученых ОИЯИ представлены результаты наиболее полного на тот момент анализа потоков нейтрино, сопровождающих термоядерные процессы внутри Солнца. Точность измерения потока «бериллиевых» нейтрино от Солнца составила рекордные 2,7%, что в 2 раза лучше существующих теоретических предсказаний. Сигнал от реакции «*pp*» на Солнце впервые зарегистрирован на уровне достоверности, позволяющем говорить

о надежном подтверждении протекания данной реакции внутри Солнца. Поток нейтрино из реакции на боре-8 («борные» нейтрино) измерен при низком энергетическом пороге 3,2 МэВ, недоступном другим нейтринным детекторам. Высокая точность измерений потока *pp*-нейтрино позволила впервые экспериментально уточнить детали термоядерных процессов внутри Солнца. Сравнение зарегистрированных нейтринных сигналов в детекторе с предсказаниями стандартной модели Солнца однозначно указывает на существование переходной зоны в области низких энергий между двумя режимами нейтринных осцилляций, предсказываемых механизмом Михеева–Смирнова–Вольфенштейна. Таким образом результаты Borexino независимо, без привлечения данных других экспериментов, подтверждают теоретически предсказываемый переход между «вакуумным» режимом осцилляций и осцилляциями в веществе [102].

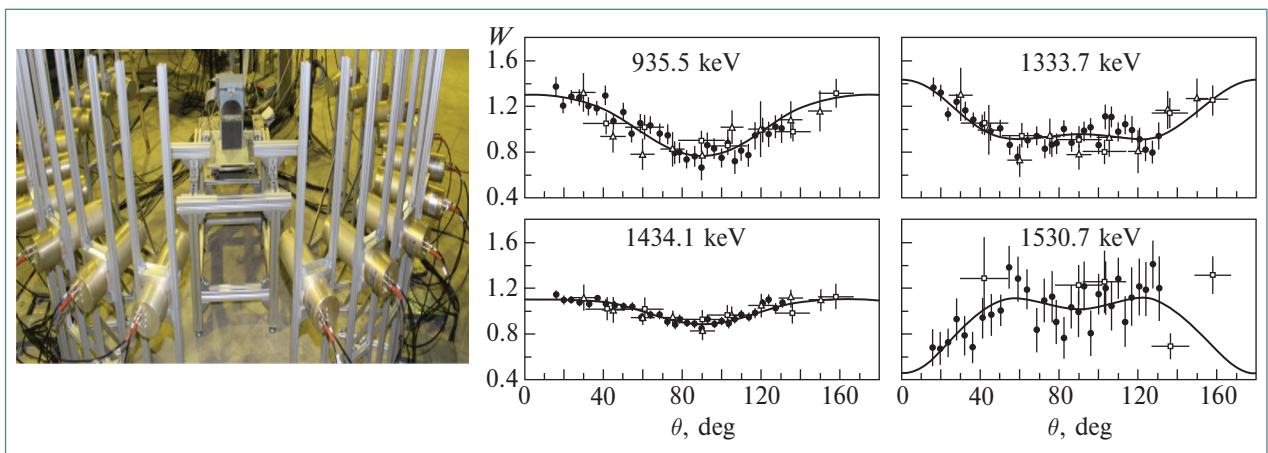
# НЕЙТРОННАЯ ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

В рамках проекта TANGRA в ЛНФ создана установка, позволяющая проводить измерения дифференциальных сечений для  $\gamma$ -квантов и нейтронов в реакциях нейтронов с энергией 14 МэВ с ядрами. На рисунке показана конфигурация установки, состоящая из генератора меченых нейтронов ИНГ-27 и 18 сцинтилляционных детекторов  $\gamma$ -квантов на основе кристаллов BGO. Проведены измерения на легких и средних ядрах, определены энергии видимых  $\gamma$ -переходов, образующихся в различных реакциях нейтронов с этими ядрами, и их парциальные сечения. Полученные данные по характеристическим  $\gamma$ -квантам критически важны для развития методов неразрушающего элементного анализа с использованием портативных генераторов меченых нейтронов [103].

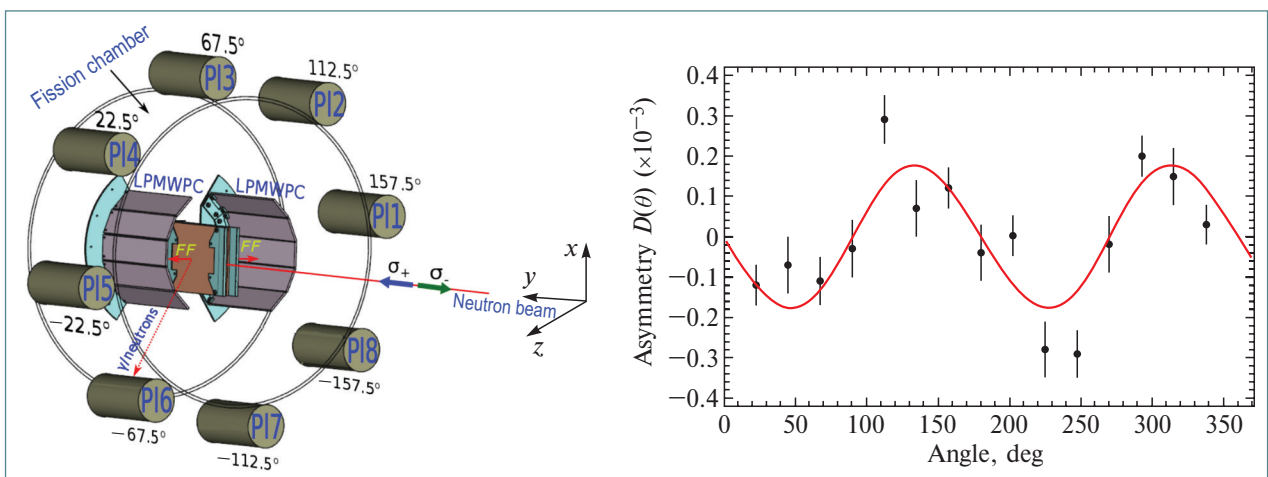
В коллаборации ОИЯИ–ИТЭФ–ПИЯФ проведен цикл экспериментов по измерению  $T$ -нечетного эффекта вращения делящегося ядра в угловых распределениях мгновенных  $\gamma$ -квантов (ROT-эффект) при делении  $^{235}\text{U}$  поляризованными нейтронами.

Наблюдаемый эффект, хоть и является формально  $T$ -нечетным, объясняется не нарушением временной инвариантности, а динамикой процесса деления вблизи точки разрыва, предоставляя уникальную возможность прямого экспериментального определения параметров теории, описывающей квантово-механические свойства процесса деления.

Был определен угол поворота ядра для трех значений энергии налетающего нейтрона: 0,025, 0,06 и 0,3 эВ. Впервые был измерен эффект



Слева: установка TANGRA с 18 детекторами BGO. Справа: угловые распределения  $\gamma$ -квантов для переходов в  $^{52}\text{Cr}$ . Сплошные кривые — аппроксимация полиномами Лежандра

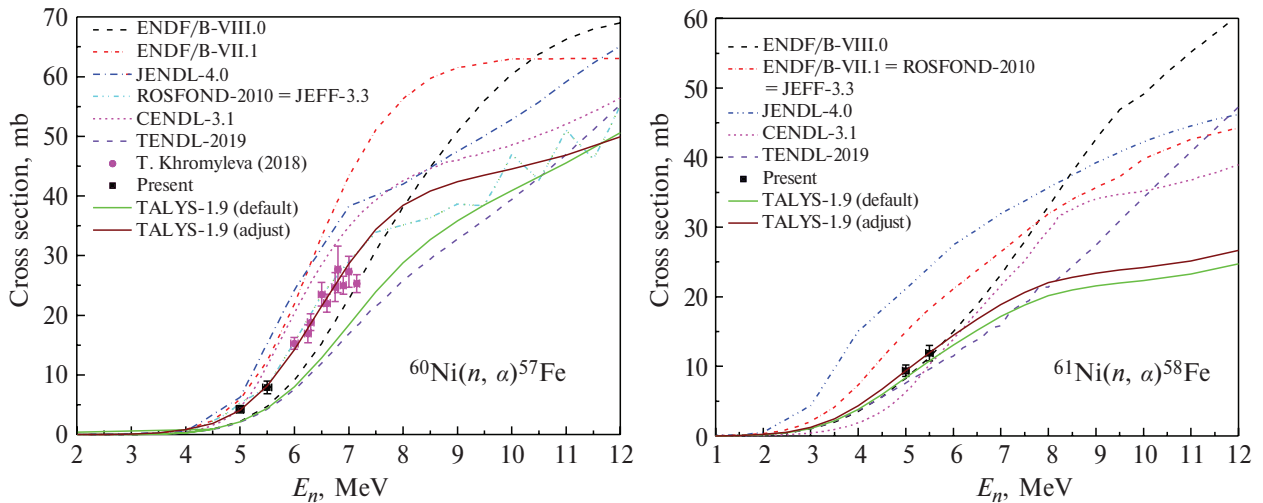


Слева: схема экспериментальной установки. Справа: угловая зависимость коэффициента асимметрии для  $\gamma$ -квантов в резонансе  $^{235}\text{U}$  0,3 эВ

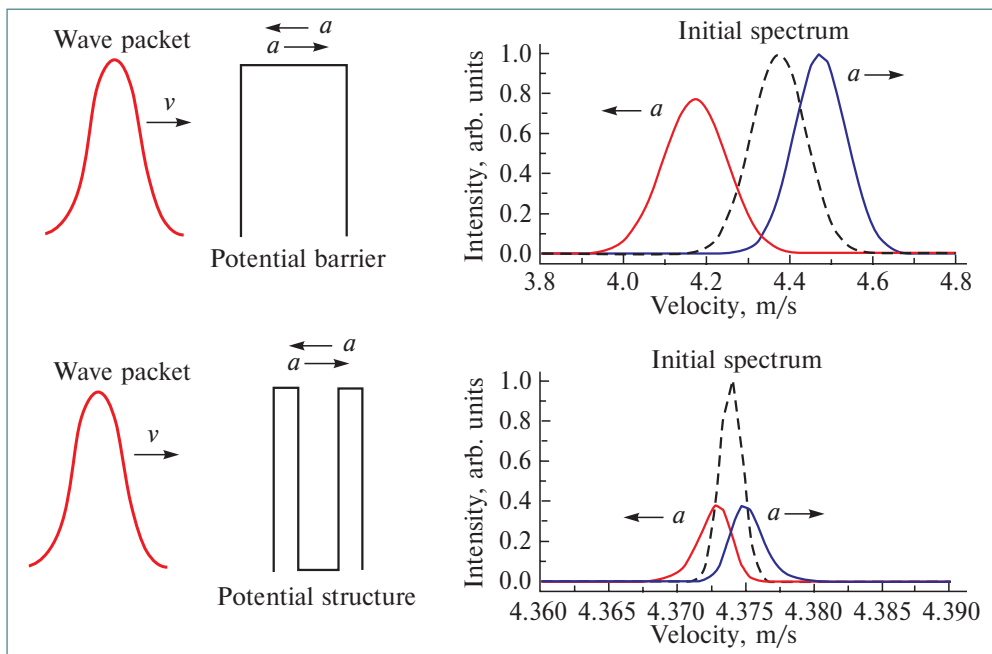
в низколежащем резонансе  $^{235}\text{U}$ . Показано, что знак наблюдаемого эффекта не меняется, но его величина для первого резонанса  $^{235}\text{U}$  (0,3 эВ) оказалась в 3 раза меньше, чем для тепловых нейтронов [104].

Выполнен цикл работ по измерению сечения реакции  $(n, \alpha)$  с быстрыми нейтронами на ядрах  $^{35}\text{Cl}$ ,  $^{91}\text{Zr}$ ,  $^{40}\text{Ca}$ ,  $^{63}\text{Cu}$ ,  $^{58,60,61}\text{Ni}$ . Измерения проводились с квазимоноэнергетическими нейтронами в диапазоне энергии нейтронов 3,0–10,5 МэВ на установках ЭГ-5 ЛНФ ОИЯИ, ЭГ-4,5 и НИ-13 (Китай). Впервые по-

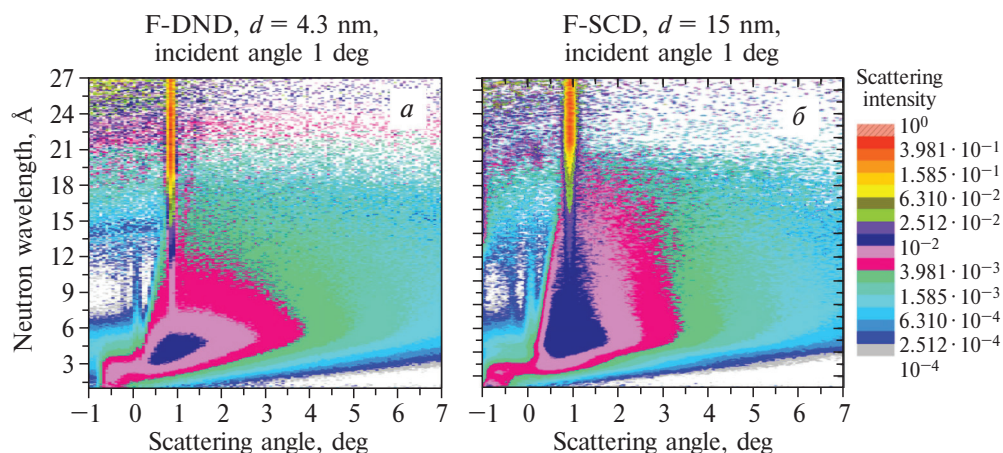
лучены данные по реакциям  $^{60}\text{Ni}(n, \alpha)^{57}\text{Fe}$  (при  $E_n$  ниже 6 МэВ) и  $^{61}\text{Ni}(n, \alpha)^{58}\text{Fe}$  для нейтронов в МэВ-области, а также сечения для реакций  $^{60}\text{Ni}(n, \alpha)^{57}\text{Fe}$  и  $^{61}\text{Ni}(n, \alpha)^{58}\text{Fe}$  для области  $E_n$  выше 8 МэВ и  $^{91}\text{Zr}(n, \alpha)^{88}\text{Sr}$  в МэВ-области. Кроме того, были рассчитаны факторы  $\alpha$ -кластеризации с использованием компаунд и «кноп-оп» механизмов, показывающие формирование  $\alpha$ -кластеров после взаимодействия нейтронов с ядрами мишени. Новые результаты позволяют уточнить теоретические модели и, следовательно, наше понимание механизма реакции [105].



Результаты по сечениям реакций  $^{60}\text{Ni}(n, \alpha)^{57}\text{Fe}$  (слева) и  $^{61}\text{Ni}(n, \alpha)^{58}\text{Fe}$  (справа) в сравнении с существующими данными, оценками и расчетами TALYS-1.9



Результаты исследования проблемы взаимодействия волнового пакета с потенциальной ступенью и интерференционным фильтром, движущимися с постоянным ускорением



Вероятность нейтронного рассеяния от поверхности порошков из нанодIAMONДОВ различных размеров в зависимости от длины волны нейтрона и угла рассеяния. Средний размер наночастиц в образцах: а) 4,3 нм; б) 15,0 нм

Проведены теоретические исследования для проверки гипотезы о существовании эффекта ускорения в следующей формулировке: результатом взаимодействия частицы с любым объектом, движущимся с ускорением, должно быть изменение ее энергии и частоты, определяемое соотношением  $\Delta\omega = ka\tau$ , где  $k$  — волновое число,  $a$  — ускорение объекта и  $\tau$  — время взаимодействия. Результаты исследования продемонстрировали ярко выраженное наличие эффекта ускорения во всех изученных задачах. В случае резонансных структур эффект ускорения пропорционален времени жизни состояния внутри объекта. Полученные результаты подтверждают гипотезу о том, что эффект ускорения является следствием существования ненулевого времени взаимодействия в квантовой механике [106].

Экспериментально продемонстрировано усиленное направленное извлечение очень холодных нейтронов (ОХН) из источника при его окружении отражателем из нанодIAMONДОВ. Фак-

тор выигрыша в узком телесном угле извлечения ОХН со скоростями 57 и 75 м/с составил 10 раз. В широком телесном угле выигрыш составил 33 раза для нейтронов со скоростью 47 м/с. Это эквивалентно многократному увеличению мощности исследовательского ядерного реактора.

Было изучено влияние размеров нанодIAMONДОВ на эффективность отражения холодных нейтронов (ХН) под малыми скользкими углами. Измерения показали, что порошок с размером наночастиц около 15 нм дает большее альbedo для нейтронов с длиной волны более 4 Å и меньшее альbedo для нейтронов с длиной волны менее 4 Å в сравнении с нанодIAMONДАМИ со средним размером 4,3 нм. Такое явление квазизеркального отражения ХН от нанопорошков можно применять для фокусировки или транспортировки ХН к исследовательским установкам в случаях, когда другие отражатели разрушаются в интенсивных полях ионизирующего излучения [107, 108].

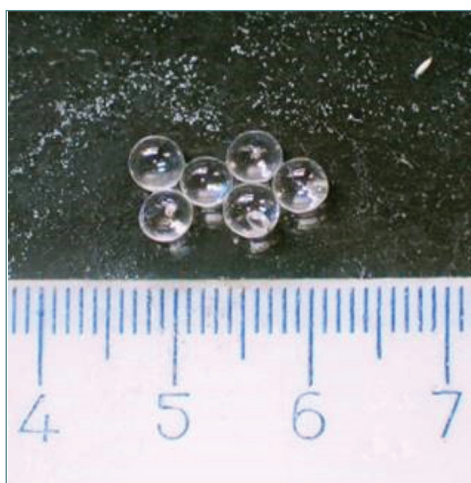
# ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД

В период 2017–2021 гг. работа реактора ИБР-2 была организована в 7–8 циклов в год. С октября 2021 г. установка ИБР-2 была переведена в режим временного останова для замены оборудования и получения новой лицензии Ростехнадзора на право эксплуатации ядерной установки. Сформирован и передан в Ростехнадзор пакет документов, необходимых для получения лицензии. Сформулированы пояснения к документам на этапе их экспертизы. После получения лицензии работа реактора для физических экспериментов будет возобновлена.

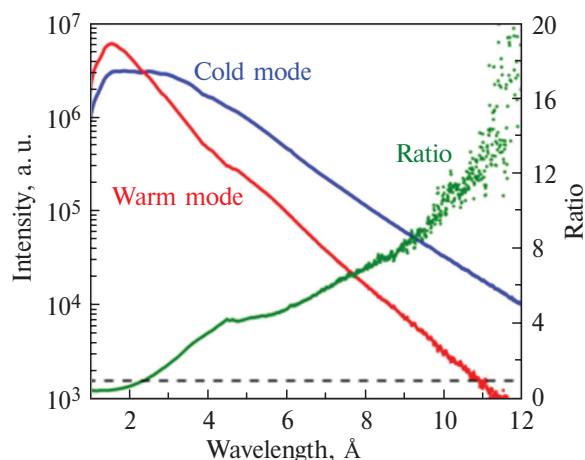
В 2020 г. введен в режим опытной эксплуатации второй источник холодных нейтронов на реакторе ИБР-2 в направлении экспериментальных пучков 1, 4, 5, 6, 9. Для охлаждения замедлителя используется рефрижератор Linde 1200 с холодильной мощностью 1200 Вт при 10 К.

Замедлитель обеспечивает непрерывный стабильный режим работы в течение 11 сут и дает выигрыш в области длинноволновых нейтронов до 9 раз (в зависимости от пучка и области спектра нейтронов) при температуре замедляющего вещества  $\sim 25$  К [109].

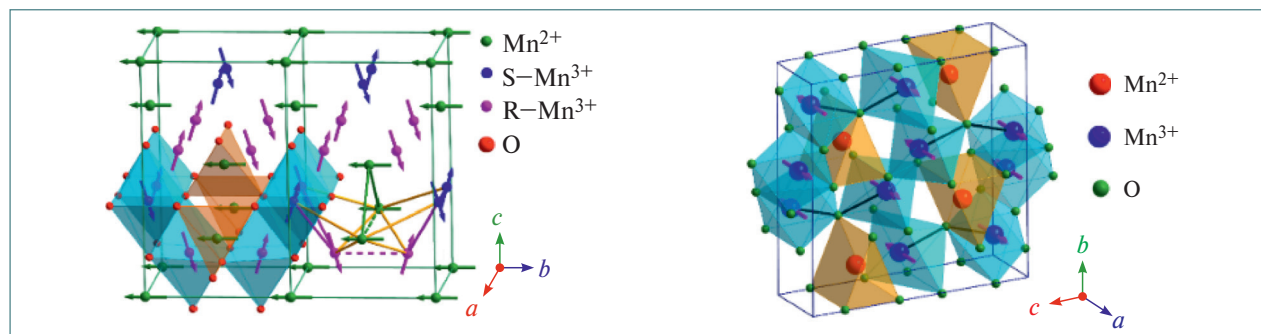
Магнитный оксид представляет собой необычный геометрически фрустрированный функциональный материал с тетрагонально искаженной структурой типа шпинели, демонстрирующий выраженные магнитокалорические, магнитоупругие и магнитодieleктрические эффекты. Методом нейтронной дифракции проведено исследование кристаллической и магнитной структур  $\text{Mn}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Mn}_3\text{O}_4$  в диапазоне значений давления до 20 ГПа и температуры 15–300 К. При давлении выше 2 ГПа наблюда-



Мезитиленовые шарики — рабочее вещество холодного замедлителя



Спектр нейтронов и фактор выигрыша на 5-м пучке при работе замедлителя в холодном и тепловом режимах



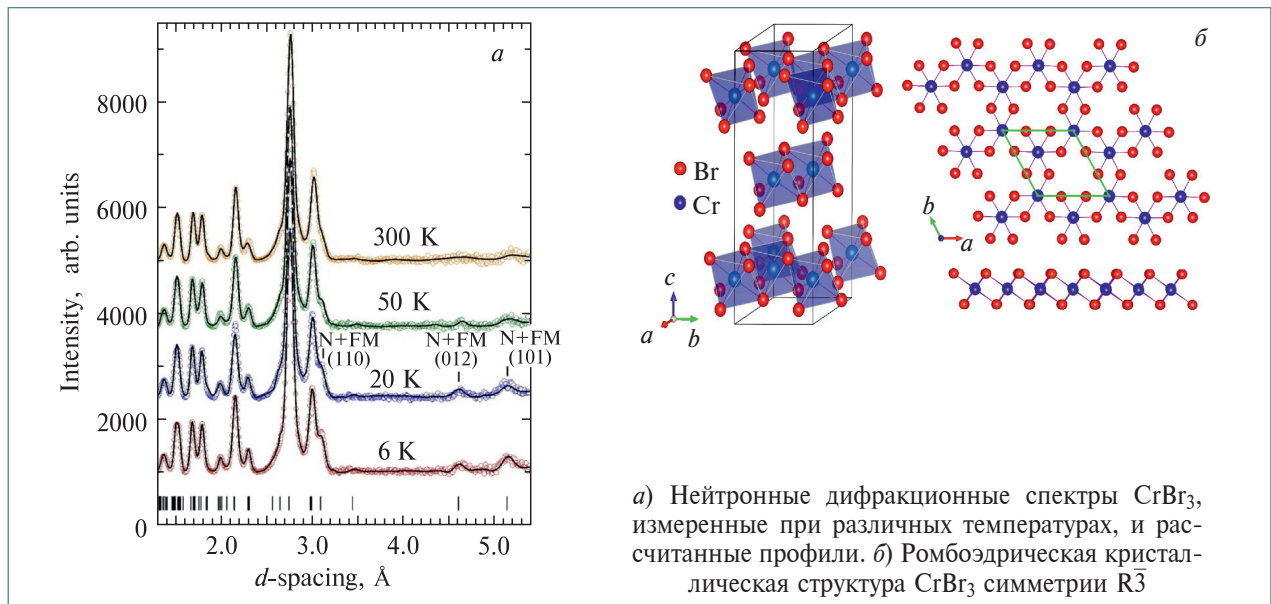
Схематическое представление модулированной магнитной структуры, возникающей ниже  $T_{N3} \sim 33$  К при атмосферном давлении, и геометрии конкурирующих магнитных взаимодействий (слева), а также магнитной структуры орторомбической фазы высокого давления (справа)

лись подавление низкотемпературных модулированных АФМ-фаз и стабилизация ферритмагнитной фазы. Определена магнитная структура орторомбической фазы высокого давления при  $P=20$  ГПа. В этой фазе при  $T_N=275$  К формируется дальний АФМ-порядок с вектором распространения  $k=(1/2, 0, 0)$  на  $Mn^{3+}$ -подрешетке, а  $Mn^{2+}$ -подрешетка остается магнитно-неупорядоченной. Таким образом, температура магнитного упорядочения под давлением увеличивается более чем в 6 раз, что является уникальным случаем среди известных магнитных материалов [110, 111].

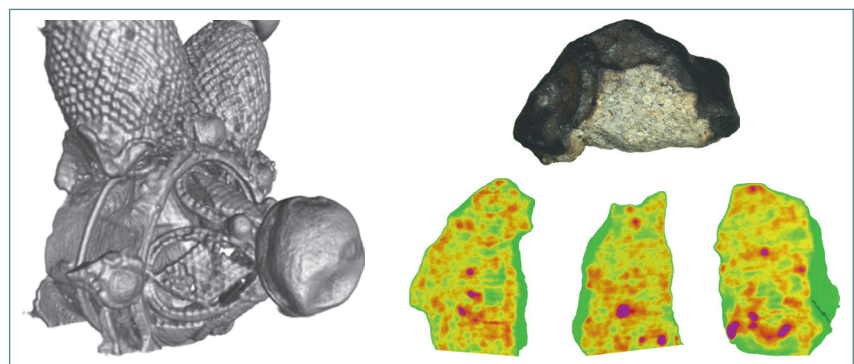
Ван-дер-ваальсовские слоистые магнитные материалы с симметрией магнитной решетки, подобной графену, демонстрируют существование магнитного упорядочения при достаточно высоких температурах в пределах до единичного атомного слоя. Такие материалы имеют широкие перспективы в создании гетероструктур для нового поколения устройств спинтроники, нанoeлектроники, записи и хранения информации.

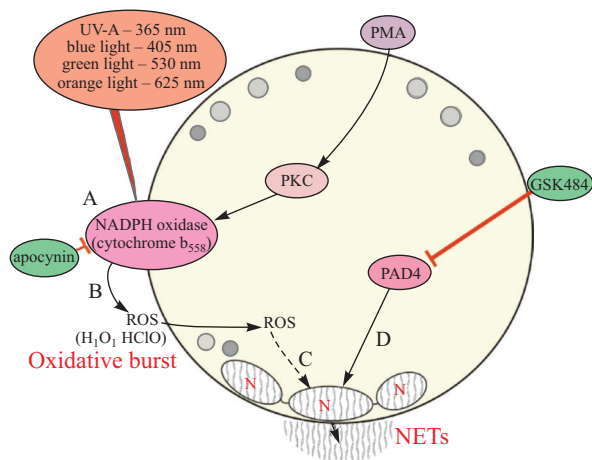
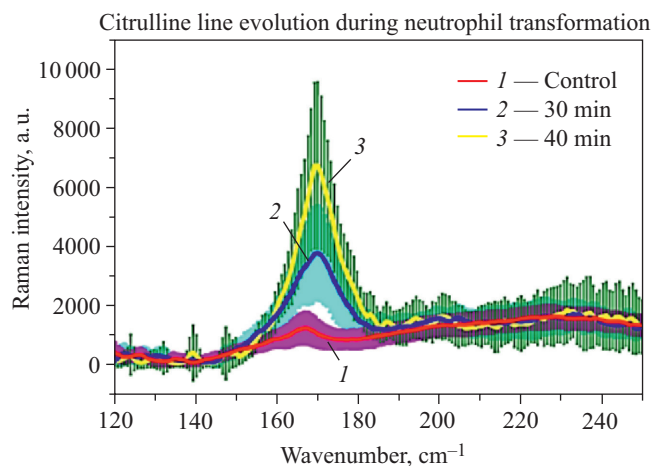
С помощью нейтронной дифракции и рамановской спектроскопии проведены исследования структурных, магнитных и колебательных свойств модельного представителя семейства ван-дер-ваальсовских магнетиков  $CrX_3-CrBr_3$ . Магнитные моменты ионов Cr, формирующие графеноподобную магнитную решетку в слоях Br-Cr-Br, упорядочиваются ферромагнитно при температуре Кюри  $T_C=37$  К. В области  $T_C$  обнаружено anomальное поведение структурных параметров. Ниже этой температуры характер теплового расширения изменялся с положительного на отрицательный [112].

В сотрудничестве с Институтом археологии РАН проведены работы по одному из новых направлений — неразрушающему исследованию внутреннего строения объектов исторического наследия с помощью методов нейтронной радиографии и томографии. Построены 3D-модели фрагментов браслета и лучевого колта из Тверского клада (датирован XIII–XIV вв., найден в 2014 г. в Твери). Их анализ позволяет сделать выводы об особенностях технологий,



Слева: восстановленная из данных нейтронной томографии трехмерная модель фрагмента колта. Справа: исследуемый фрагмент Челябинского метеорита и фрагменты 3D-модели внутренней организации исследуемого образца. Розовые области соответствуют металлическим включениям





Слева: низкочастотная область спектра комбинационного рассеяния нейтрофилов: эволюция (рост) интенсивности линии цитруллина, указывающая на преактивацию нетоза. Справа: сигнальные пути фотоактивированного нетоза

использовавшихся для изготовления подобных изделий данного периода времени. Также проведено комплексное исследование внутренней структурной организации и фазового состава фрагмента Челябинского метеорита. Определен объемный минеральный состав и пространственное распределение различных компонентов [113, 114].

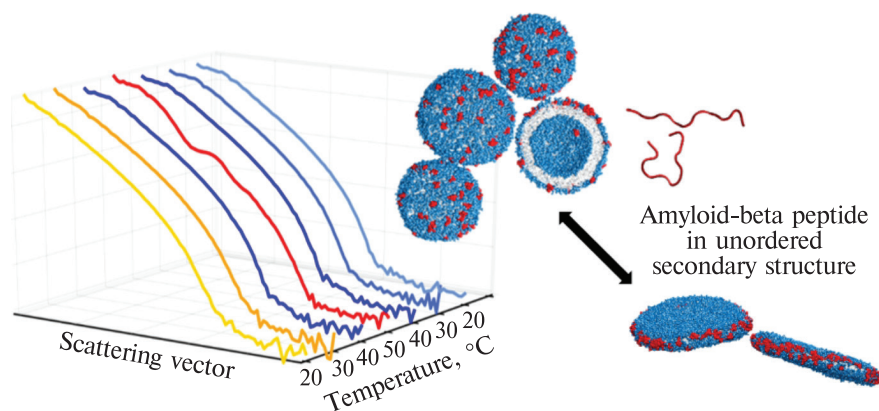
Рамановская спектроскопия применена для анализа нейтрофилов, трансформированных при нетозе — одной из форм программируемой клеточной гибели.

Нейтрофилы — это разновидность лейкоцитов, участвующих в фагоцитозе патогенных микроорганизмов (бактерий, грибов, простейших). Активация нейтрофилов приводит к появлению нетоза, который сопровождается выбрасыванием внеклеточных патогенов, вследствие чего минимизируется вред для других клеток. На начальной стадии под действием специальных ферментов происходит специфическая ре-

акция цитруллинирования, по которой можно судить о начале процесса активации нетоза. Высокочувствительная рамановская спектроскопия позволила выявить в низкочастотном диапазоне спектра эволюцию (рост) пика цитруллина в течение 30–40 мин после начала активации клеток, что можно классифицировать как раннюю диагностику нетоза [115–117].

Методом малоуглового рассеяния нейтронов (МУРН) исследовано взаимодействие модельных биологических мембран с бета-амилоидным пептидом.

Результаты впервые показали перестройку общей формы мембраны от сферических везикул до плоских нанодисков в присутствии бета-амилоидных пептидов. Этот процесс однозначно указывает на разрушительное действие пептида. Интересно, что наблюдаемый механизм может быть напрямую связан с разрушением нейронных клеток в процессе болезни Альцгеймера [118, 119].



Кривые МУРН, демонстрирующие деструктивное влияние бета-амилоидного пептида на модельную мембрану изменением ее формы от сферических везикул до плоских нанодисков. Результаты молекулярно-динамического моделирования иллюстрируют морфологические изменения

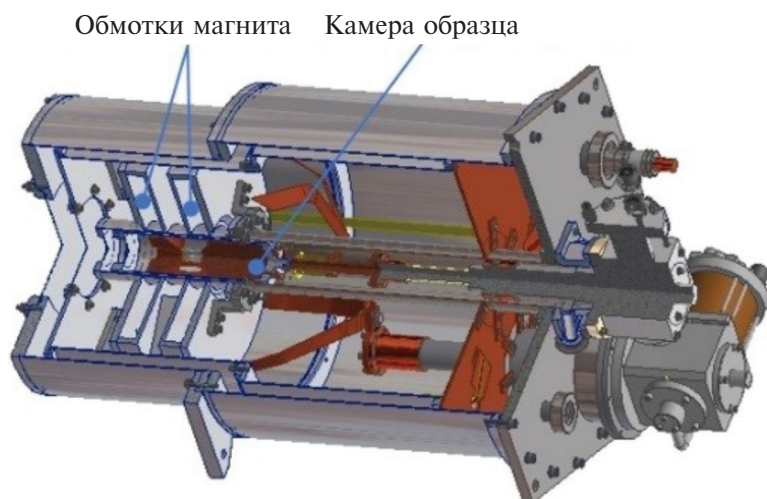
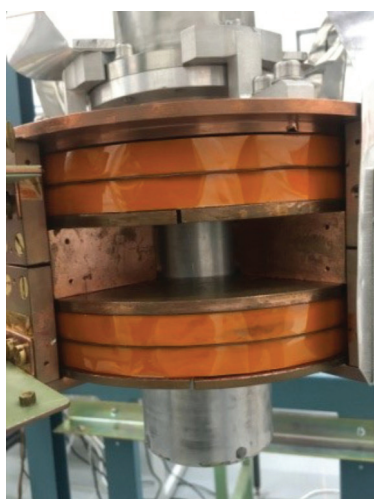


## РАЗВИТИЕ КОМПЛЕКСА СПЕКТРОМЕТРОВ ИБР-2

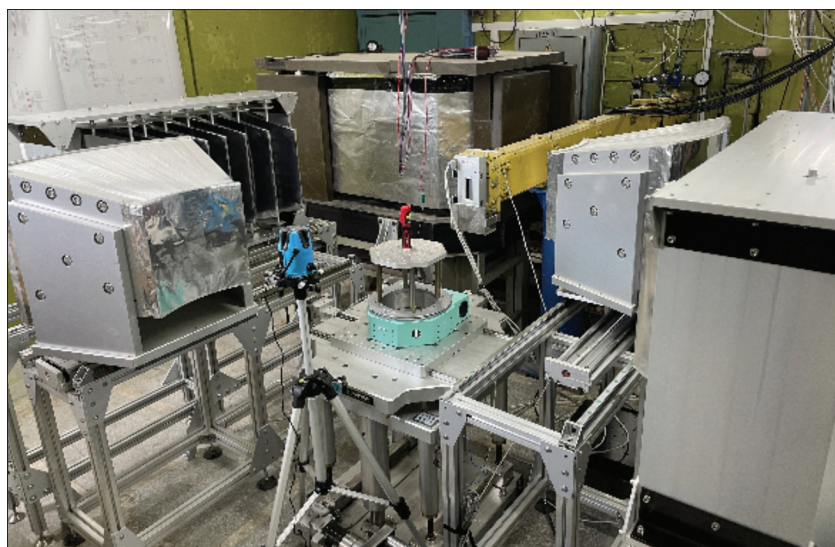
Совместно с Национальным институтом исследований и электротехники (ИСРЕ-СА, Бухарест, Румыния) разработана и создана криомагнитная система окружения образца для дифрактометра ДН-12 ИЯУ ИБР-2. Система состоит из магнита на основе высокотемпературного сверхпроводника в криостате и криостата-вставки с камерой высокого давления с образцом. Магнит выполнен в конфигурации

гельмгольцевой пары с максимальной величиной магнитного поля 5 Тл.

Новое устройство позволит в значительной мере расширить возможности по исследованию конденсированных сред на спектрометрической базе реактора ИБР-2. Оно дает возможность независимой вариации параметров на исследуемом образце во время эксперимента по рассеянию нейтронов: величины магнитного поля, температуры, давления [120].



Слева: внешний вид криомагнита, реализованного в виде пары Гельмгольца, где в качестве проводника использована лента с высокотемпературной сверхпроводимостью. Справа: 3D-модель криомагнитной системы на основе криокулера SRDK408S



Слева: детектор АСТРА-М на спектрометре ФСД. Справа: внешний вид отдельных элементов детектора АСТРА-М. Элемент представляет собой пластину сцинтиллятора  $(Ag)/^6LiF$ , которой придана форма поверхности временной фокусировки с наклеенными спектросмещающими волокнами, передающими поток света от места захвата нейтрона к ФЭУ

Закончены работы по созданию сцинтиляционного детектора АСТРА-М для фурье-стресс-дифрактометра (ФСД).

Основным предназначением спектрометра ФСД с новым детектором АСТРА-М является измерение остаточных напряжений в образцах. В детекторе АСТРА-М реализован метод комбинированной фокусировки, когда весь диапазон наблюдения по углу рассеяния разбивается на

секторы, в каждом из которых строится независимый детектор, соответствующий индивидуальной поверхности временной фокусировки. Суммарный покрываемый телесный угол составляет  $\Omega = 0,55$  ср. Высокое пространственное разрешение достигнуто благодаря уменьшению размера рассеивающего объема путем соответствующей коллимации [121].

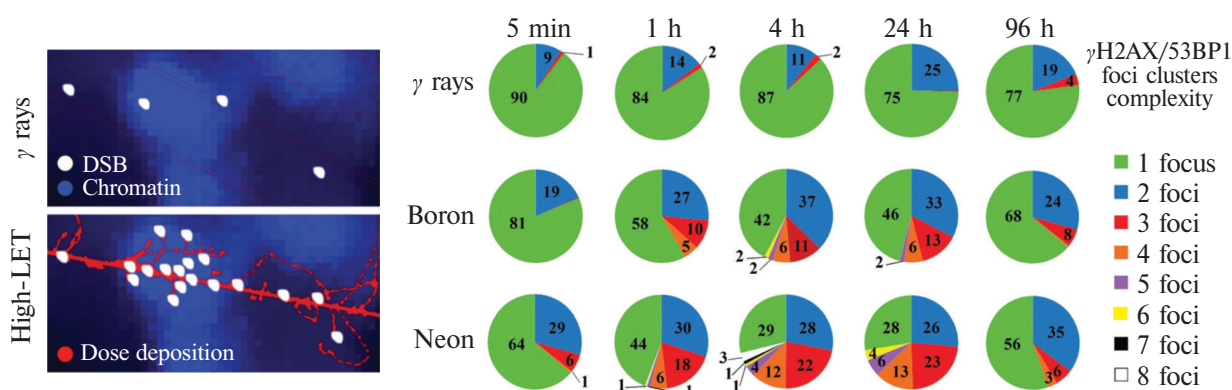
# РАДИАЦИОННЫЕ И РАДИОБИОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

С использованием пучков заряженных частиц ускорителей ОИЯИ были выяснены механизмы, определяющие различия в эффективности летального и мутагенного действия излучений с разными физическими характеристиками на клетки. Установлено, что при действии излучений электромагнитной природы и тяжелых заряженных частиц формируются разные по качеству повреждения ДНК. В отличие от фотонов, индуцирующих одиночные повреждения, при действии заряженных частиц образуются кластерные повреждения ДНК. Такие повреждения трудно репарируются клетками и определяют специфику различных радиационно-индуцированных эффектов. На изучение детальной структуры таких повреждений и закономерностей их восстановления в различных системах и были направлены исследования в отчетный семилетний период.

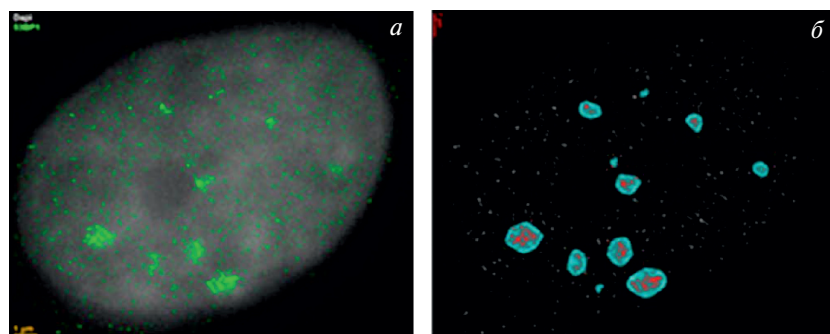
Исследования механизмов формирования молекулярных нарушений структуры ДНК и их репарации при действии тяжелых заряженных частиц различных энергий

Исследованы закономерности индукции и репарации двунитевых разрывов ДНК (ДР ДНК) в клетках млекопитающих и человека при действии ионизирующих излучений с разными физическими характеристиками. Проанализирована кинетика формирования и элиминации радиационно-индуцированных фокусов (РИФ)  $\gamma$ H2AX/53BP1 в ядрах облученных фибробластов человека и в зрелых нейронах первичной культуры гиппокампа крыс.

Изучены формирование и репарация комплексных ДР ДНК с участием модифицированных оснований. Показано, что с ростом ЛПЭ излучений происходит смещение пика форми-



Формирование  $\gamma$ H2AX/53BP1 кластеров фокусов различного состава в ядрах нормальных фибробластов кожи человека при действии  $\gamma$ -квантов  $^{60}\text{Co}$ , ионов  $^{11}\text{B}$  и  $^{20}\text{Ne}$



Визуализация структуры кластеров репарационных белков 53BP1 в ядрах клеток глиобластомы человека U87 через 24 ч после облучения ускоренными ионами  $^{15}\text{N}$  (энергия 13 МэВ/нуклон, доза 1,3 Гр): а) изображения в микроскопе, б) программная постобработка

рования РИФ на более поздние сроки после облучения, а также увеличивается сложность кластеров РИФ [122].

В сотрудничестве с чешскими и немецкими коллегами разработан новый метод анализа тонкой структуры кластерных повреждений ДНК со сверхвысоким разрешением. Он основан на микроскопии локализации одиночных молекул. С применением данного метода изучена структура кластерных ДР ДНК, а также проведено сравнительное исследование кинетики их репарации в нормальных и опухолевых клетках человека при действии ускоренных ионов азота  $^{15}\text{N}$ . Предложенный подход позволяет получить новые сведения о природе радиорезистентности ряда опухолей [123].

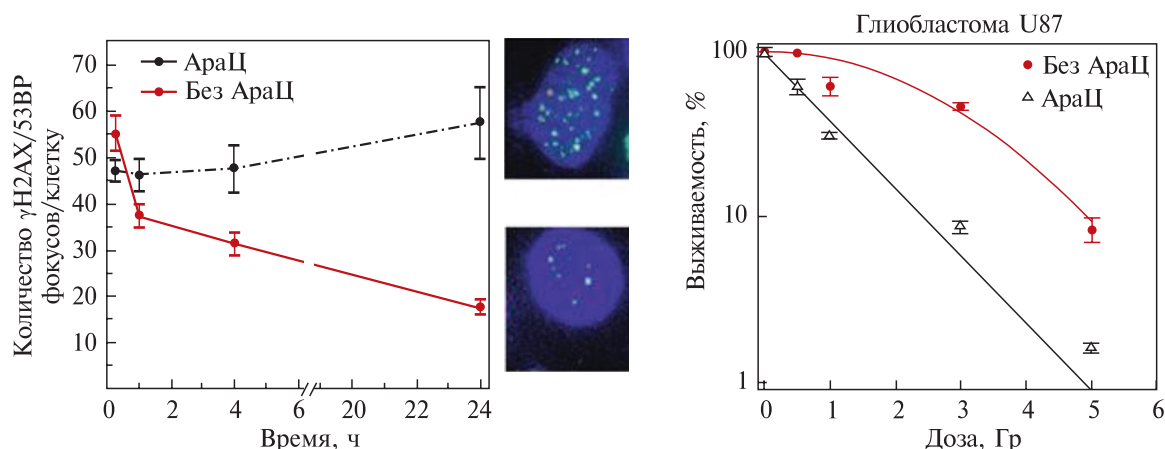
#### Фундаментальные аспекты повышения радиочувствительности опухолевых клеток при действии пучков протонов

Разработан и запатентован принципиально новый метод повышения биологической эффективности пучков протонов медицинского назначения и гамма-терапевтических установок. Метод позволяет приблизить биологическую эффективность протонного облучения к эффективности облучения ионами углерода. Подход основан на применении официального препарата — 1- $\beta$ -D-арабинофуранозилцитозина (АраЦ), используемого в онкологической практике при лечении раковых заболеваний кроветворной системы. Установлено, что при введении препарата перед облучением клеток человека ионизирующими излучениями происходит трансформация одонитевых разрывов ДНК в летальные двунитевые разрывы [124, 125].

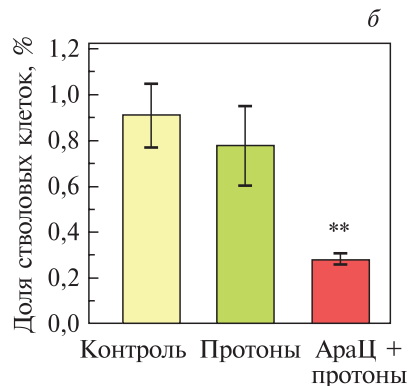
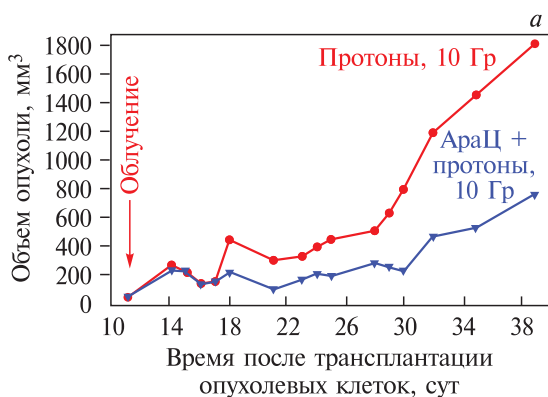
Специалистами ЛРБ ОИЯИ и МРНЦ им. А.Ф.Цыба исследованы закономерности и молекулярно-клеточные механизмы комбинированного действия АраЦ и протонного излучения на мышиную меланому линии В16 *in vivo*. Контрольные, необлученные животные погибли на 30-е сутки в результате развития опухолевого процесса. Средний объем опухолей при комбинированном воздействии по сравнению с облучением протонами без модификатора снижался в 1,7–3,4 раза в разные сроки наблюдения ( $p < 0,05$ ).

На молекулярном уровне показано, что количество ДР ДНК через 2 сут после завершения сеансов облучения в опухолевых клетках достоверно превышает уровень ДР ДНК при радиационном воздействии без модификатора. Показано, что введение АраЦ усиливает противоопухолевое действие протонного излучения путем реализации нескольких механизмов, среди которых уменьшение количества опухолевых стволовых клеток, угнетение пролиферации клеток и ангиогенеза в опухоли на фоне изменения иммунного ответа в первичном очаге и его инфильтрации лимфоцитами [126–129].

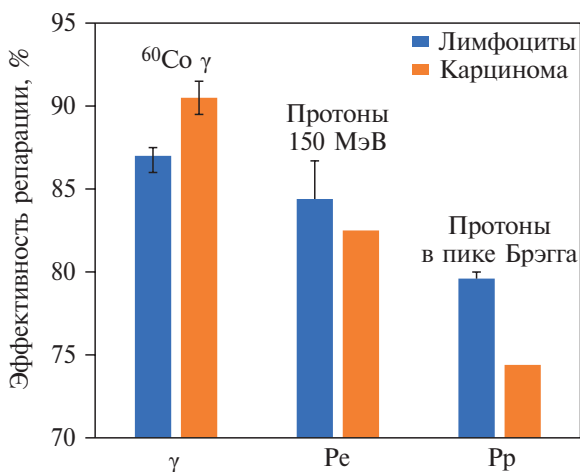
Выполнен анализ формирования хромосомных аберраций в клетках карциномы человека линии Cal51 и нормальных лимфоцитах периферической крови человека при облучении фотонами и протонами (150 МэВ и в пике Брэгга) с использованием метафазного метода. Методом преждевременной конденсации хроматина оценена доля успешно восстановленных разрывов хроматина через 12 ч после облучения. При действии гамма-квантов в опухолевых клетках выявлена более эффективная репарация раз-



Кинетика формирования и элиминации  $\gamma\text{H2AX}/53\text{BP1}$  фокусов в ядрах клеток глиобластомы человека U87 (слева) и кривые выживаемости (справа) при комбинированном действии АраЦ и протонов в дозе 1,25 Гр в расширенном пике Брэгга



а) Торможение роста опухоли меланомы В16 у мышей после облучения протонами и комбинированного воздействия АраЦ и протонов в дозе 10 Гр. б) Доля опухолевых стволовых клеток в первичном очаге меланомы В16 через 9 сут после облучения протонами и комбинированного воздействия АраЦ и протонов



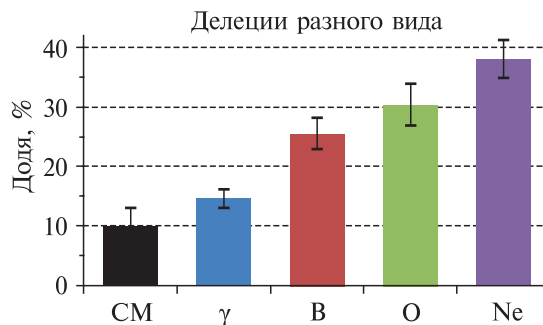
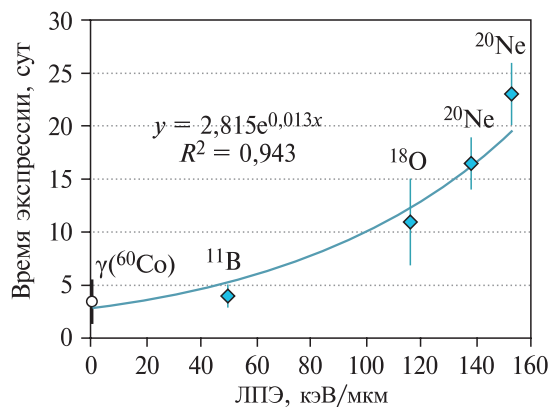
Эффективность репарации разрывов хроматина в нормальных лимфоцитах человека и клетках карциномы линии Ca51

рывов хроматина по сравнению с нормальными клетками, чем при облучении протонами. Результаты указывают на предпочтительность применения пучков протонов в лучевой терапии карциномы молочной железы [130].

**Исследования закономерностей и механизмов образования генных и структурных мутаций в клетках млекопитающих при действии тяжелых заряженных частиц**

Исследован радиационно-индуцированный мутагенез в клетках китайского хомячка линии V79 при действии ускоренных ионов ( $^{11}\text{B}$ ,  $^{20}\text{Ne}$  и  $^{18}\text{O}$ ) с различной ЛПЭ и  $\gamma$ -квантов  $^{60}\text{Co}$ . Максимальный выход мутантных клонов наблюдался в разное время в зависимости от характеристик

ионизирующего излучения, причем положение максимума с увеличением ЛПЭ излучений смещалось в сторону более поздних временных интервалов. Зависимость положения максимума выхода мутантной фракции от ЛПЭ может быть хорошо описана экспоненциальной функцией. У радиационно-индуцированных ионами мутантов наблюдалось увеличение уровня делеций



Максимальный уровень радиационно-индуцированного мутагенеза в клетках китайского хомячка и структурные изменения в *hprt*-гене в зависимости от «времени экспрессии» и ЛПЭ ускоренных ионов

с ростом ЛПЭ облучения (до ~40%). У спонтанных мутантов клоны с делециями составляли не более 10% [131, 132].

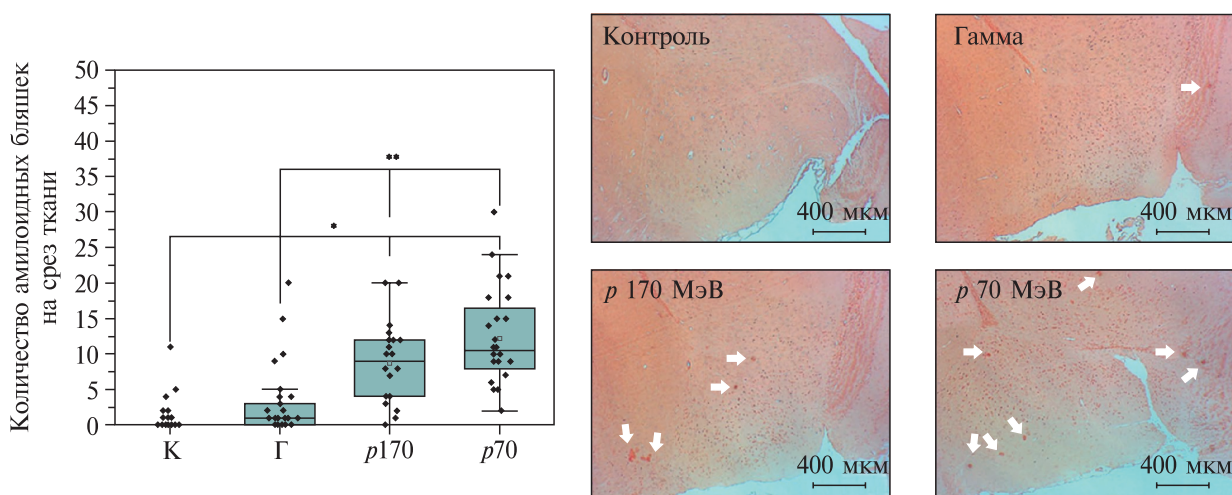
### Исследование радиационно-индуцированных нарушений в различных структурах головного мозга грызунов

Проведено сравнительное исследование нарушений поведенческих реакций и морфологических изменений в головном мозге взрослых самок крыс после облучения  $\gamma$ -квантами  $^{60}\text{Co}$  и протонами различных энергий в дозе 1 Гр. Наблюдались ухудшения работы кратковременной памяти, двигательной и исследовательской активности животных. Сравнительный пато-

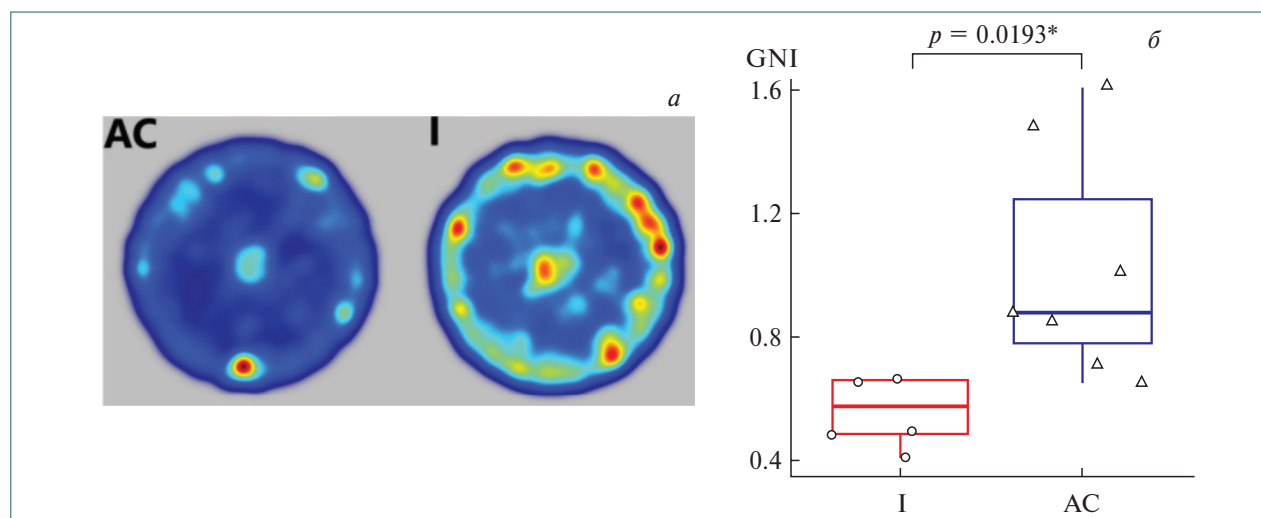
морфологический анализ возможных причин нарушения поведения выявил ранний амилоидоз, аутолиз эпендимального слоя, нейродегенеративные изменения в различных структурах головного мозга и развитие гипертрофии нейронов. Показано, что наблюдавшиеся деструктивные изменения возрастают с ростом ЛПЭ частиц [133].

Исследовано влияние гамма-квантов  $^{60}\text{Co}$  в дозе 2 Гр на поведенческие реакции, иммуногематологический статус и морфофункциональные изменения нейронов в центральной нервной системе семимесячных мышей линии ICR.

Выявлены различия в поведении облученных животных с использованием тест-системы



Амилоидные бляшки в переднем мозге крыс через 30 сут после облучения (отмечены белыми стрелками на срезах). К — контрольная группа, Г —  $\gamma$ -кванты  $^{60}\text{Co}$ , p170 — протоны с энергией 170 МэВ, p70 — протоны с энергией 70 МэВ



а) Тепловая карта движения в «Открытом поле». б) Глиально-нейрональный индекс облученных мышей по сравнению с возрастными контрольными мышами. Количество животных: I — облученные ( $n=10$ ); AC — контроль ( $n=10$ ). Noldus EthoVision software

«Открытое поле», выраженные в увеличении числа стоек и изменении стратегии двигательной активности. После облучения наблюдалось развитие лейкопении и уменьшение глионейронального индекса в паренхиме головного мозга мышей [134].

### Математическое моделирование молекулярных механизмов нарушений структуры и функций центральной нервной системы при действии тяжелых заряженных частиц

Предложен оригинальный метод моделирования радиационных повреждений в нейронах и их субклеточных структурах при действии ускоренных заряженных частиц. На основе разработанной модели с использованием пакета Geant4-DNA проанализированы закономерности формирования радиационно-индуцированных повреждений ДНК в клетках гиппокампа мозга грызунов.

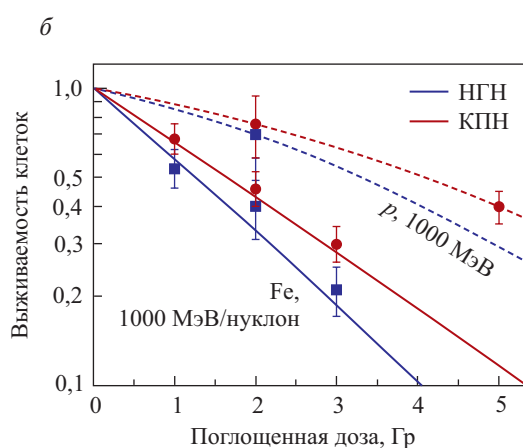
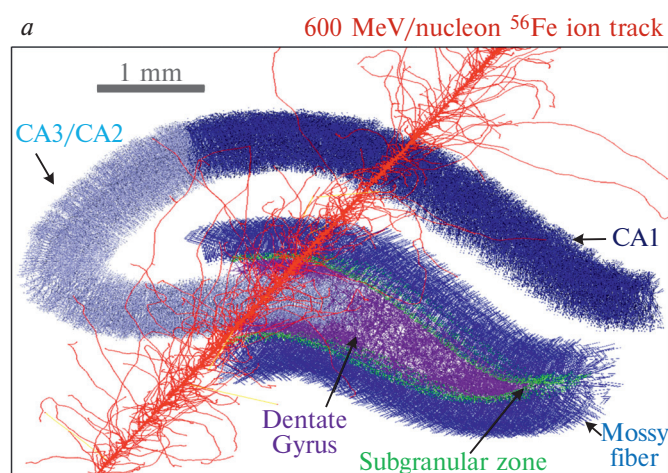
На основе данных о повреждениях ДНК в ядрах нервных клеток рассчитаны выживаемости радиочувствительной популяции клеток субгранулярной зоны гиппокампа при действии тяжелых заряженных частиц [135, 136].

Построена математическая модель области СА3 гиппокампа с использованием программной среды NEURON. На основе данной модели произведен расчет возникновения синхронных нейронных осцилляций, вносящих вклад в формирование  $\gamma$ - и  $\theta$ -ритмов, играющих важную

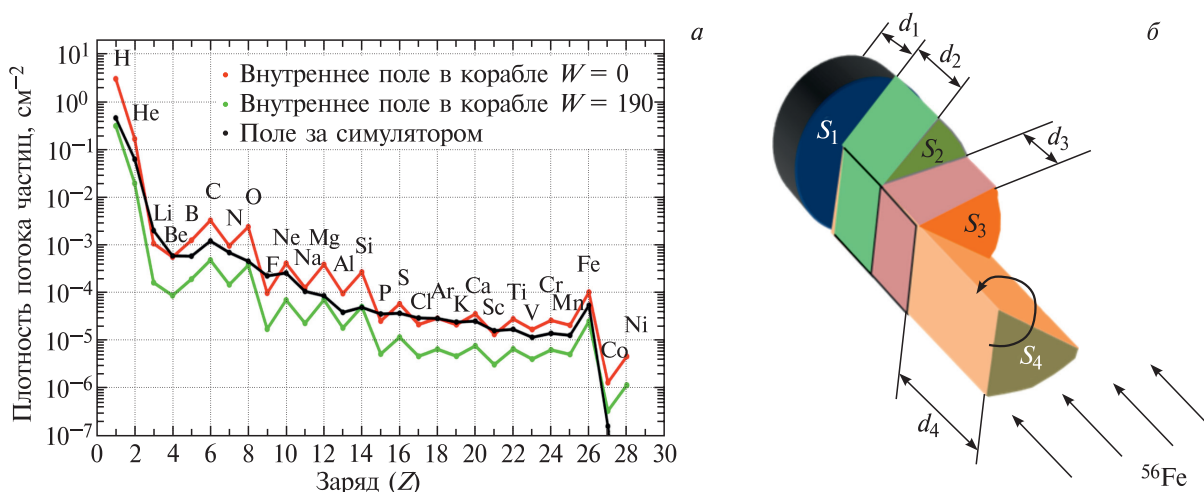
роль в механизмах памяти и обучения. На примере ионотропного рецептора глутамата NMDA, который играет ключевую роль в регуляции синаптической пластичности, обучении и формировании различных видов памяти, проведено молекулярно-динамическое моделирование процесса активации полноатомной структуры рецептора NMDA на базе пакета NAMD. Рассмотрено влияние одиночных и двойных точковых мутаций, а также структурной мутации (делеции) на структуру ионного канала и на функционирование нейронной сети в целом. Предложенный модельный подход позволяет оценить влияние мутаций в генах нейронов гиппокампа на состояние синаптических рецепторов. Данный подход опробован на известных из эксперимента эффектах от мутаций в трансмембранном домене, приводящих к эпилептическим расстройствам. По характеру активности нейронной сети и соответствующей электроэнцефалограмме можно судить о макроскопическом эффекте конкретного типа мутаций [137].

### Радиационные исследования

С целью развития экспериментальных методов моделирования радиационного риска космических полетов в земных условиях предложен и запатентован уникальный симулятор радиационного поля в условиях дальнего космоса. Разработанный вариант симулятора воспроизводит в правильном соотношении все компоненты галактического излучения внутри космического корабля, усредненные по солнечной активности [138–140].



а) Моделирование методом Монте-Карло структуры трека иона  $^{56}\text{Fe}$  энергией 600 МэВ/нуклон в трехмерной модели гиппокампа крысы. б) Расчет выживаемости клеток — предшественников нейронов (КПН, красные линии, • — эксперимент) и незрелых гранулярных нейронов (НГН, синие линии, ■ — эксперимент) при облучении протонами (штриховые линии) и ионами железа (сплошные) с энергией 1 ГэВ/нуклон



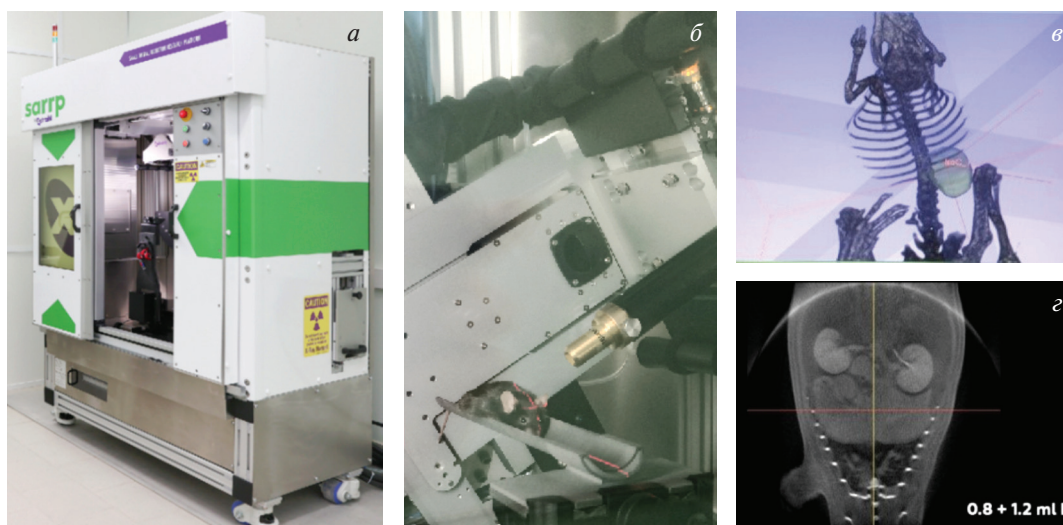
а) Сравнение расчетных зарядовых распределений частиц во внутреннем радиационном поле космического корабля в минимуме и максимуме солнечной активности и расчетного зарядового распределения частиц в поле за симулятором. б) Схематический вид конвертора симулятора

Выполнен ряд исследований, направленных на оценку радиационного риска космонавтов при длительных межпланетных полетах. Проведены детальные расчеты спектров всех компонентов радиационного поля внутри обитаемого модуля космического аппарата от галактических космических излучений в условиях минимума и максимума солнечной активности. Верификация проведенных расчетов сделана на основе единственно доступных экспериментальных данных приборов RAD и Liulin-MO и показала хорошее согласие с экспериментом. Рассчитаны скорректированные коэффициенты конвер-

сии флюенс – эффективная доза для всех компонентов радиационного поля внутри корабля [141, 142].

Издана монография, в которой рассмотрены основные вопросы, касающиеся специфики формирования полей ионизирующих излучений на высокоэнергетичных ускорителях протонов и тяжелых ионов, активации оборудования, хладагентов, воздуха и защиты, разработки средств радиационного контроля [143].

Введены в эксплуатацию две рентгеновские установки: компактный облучатель CellRad,



Установка SARRP. Общий вид (а), облучение мыши в ходе эксперимента (б), система планирования облучения (в), компьютерная томография внутренних органов мыши с контрастным агентом (г)



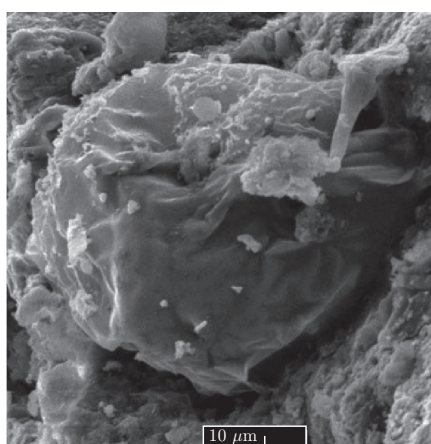
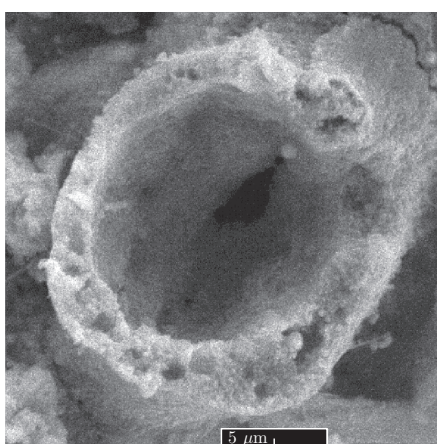
предназначенный для работы с клеточными культурами и многофункциональный исследовательский комплекс SARRP (Small Animal Radiation Research Platform), предназначенный для радиобиологических исследований на мелких лабораторных животных с возможностью рентгеновской томографии и высококонформного облучения.

#### Астробиологические исследования

Совместно с коллегами из Италии и Чехии исследовано формирование сложных пребиотических соединений при облучении протонами

простых органических соединений в присутствии вещества метеоритов как катализатора. Предложен новый механизм, способствующий образованию и переработке нерастворимого органического вещества в метеоритах и в ходе пребиотических процессов [144–146].

Методами сканирующей электронной микроскопии и рентгеновского энергодисперсионного микроанализа выполнен цикл исследований окаменелых микроорганизмов (микрофоссилий) в метеоритах. Выпущен первый иллюстрированный атлас микрофоссилий в метеорите Оргей [147].



Изображения окаменелых микроорганизмов из метеорита Оргей

# ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И НАУКИ О ЖИЗНИ

Для новой установки **Linac-200** создается пользовательская программа, включающая в себя:

- проведение пучковых испытаний и калибровку детекторов для экспериментов MPD, SPD (электромагнитные калориметры, струодетекторы, вершинные детекторы), элементов системы диагностики пучка коллайдера NICA и тестирование детекторов для других экспериментов;
- создание ускорительного источника терагерцевого излучения с перестраиваемым спектром для радиобиологических исследований (ЛРБ);
- облучение биоматериала и детекторов для космических экспериментов (ЛЯП, ИМБП);
- изучение фотоядерных реакций (ЛЯР, ЛЯП, ЛТФ, МГУ, Университет г. Нови-Сад (Сербия));
- радиационное материаловедение (Саров, Томский университет).

В ускорительном зале смонтированы 5-я и 6-я станции установки, рассчитанные на энер-

гию пучка до 400 МэВ. Ведутся работы по созданию автоматизированной системы управления Linac-200.

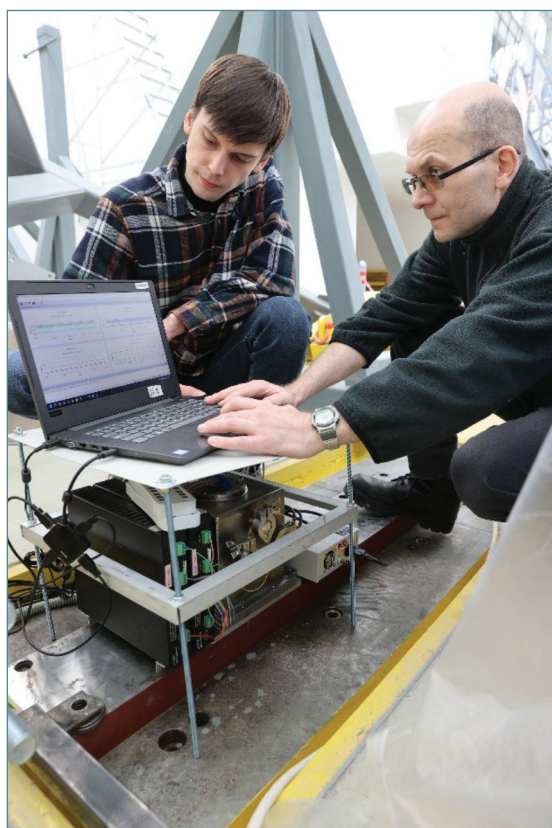
Малогабаритный прецизионный лазерный инклинометр (МПЛИ), разработанный сотрудниками ЛЯП ОИЯИ, зарекомендовал себя как высокоточный надежный прибор для регистрации угловых колебаний поверхности Земли. Достигнутая инструментальная точность составляет  $10^{-9}$  рад.

В течение 2022 г. собрано 6 МПЛИ. Началось их размещение в научных центрах России и за рубежом.

Два инклинометра установлены в зале детектора MPD коллайдера NICA. В течение нескольких месяцев проводилось мониторингирование угловых микросейсм от промышленных шумов и природных явлений. Наибольшие микросейсм достигают амплитуд 4 мкрад. Разрабатываются способы подавления промышленных помех для стабилизации фокусов пучков коллайдера — введение обратных связей в си-



Linac-200



Установка малогабаритного лазерного инклинометра в зале MPD NICA

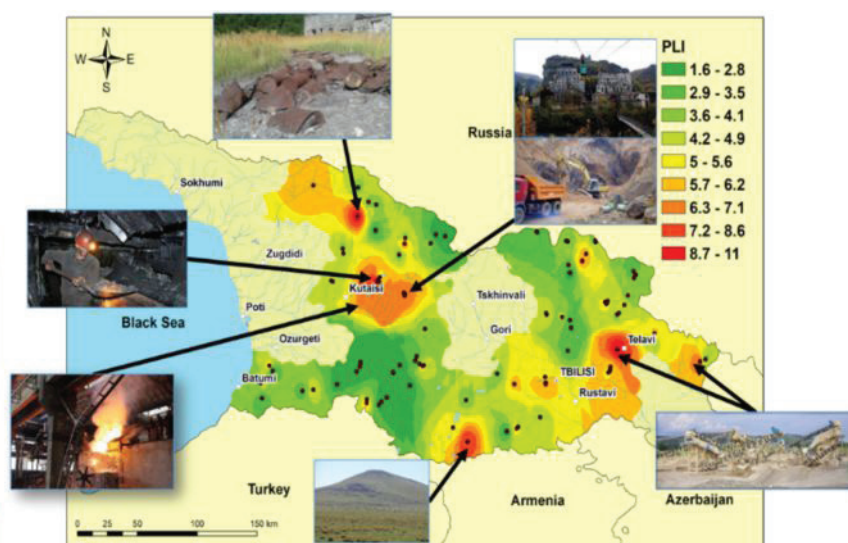
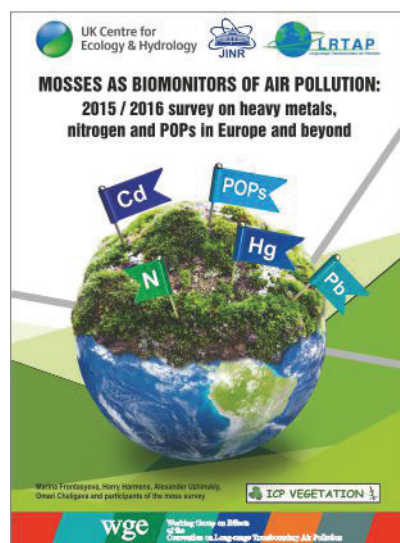
стему управления магнитооптикой коллайдера и/или использование пьезостакеров [148].

**TARDISS (генетика клетки).** В 2021 г. группой сотрудников ОИЯИ проведен 2-й этап эксперимента в Баксанской нейтринной обсервато-

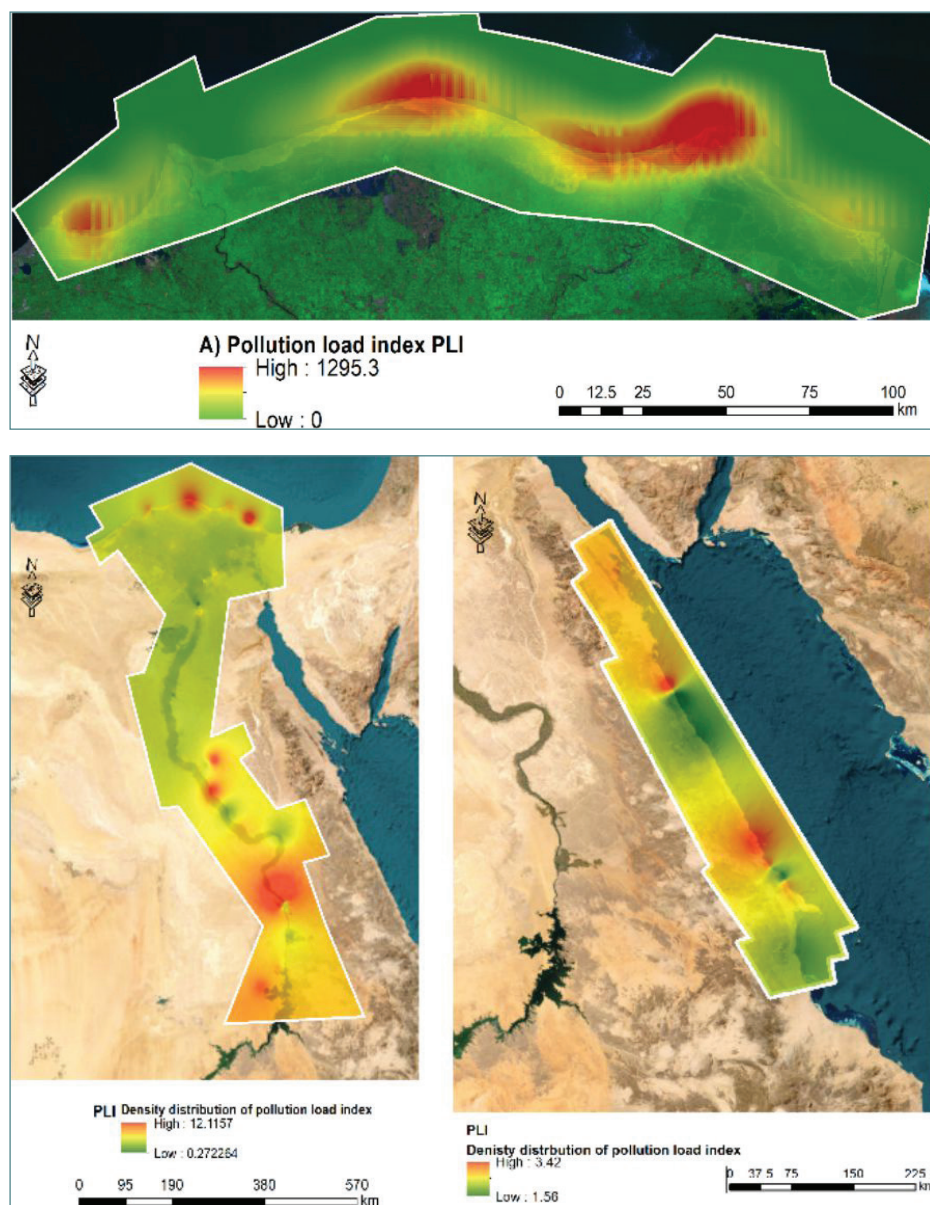
рии ИЯИ РАН по исследованию сверхглубоких микробных сообществ, обитающих в экстремальных условиях неподалеку от эльбрусского вулканического очага. На расстоянии 4200 м от входа во вспомогательную штольню в подземном горячем источнике производился отбор образцов воды, грунта и неорганических отложений.

Были проведены исследования по изучению влияния пониженного радиационного фона на модельные биологические объекты. С помощью РНК секвенирования впервые были идентифицированы все гены *D. melanogaster*, изменившие свою активность в условиях низкофонового лаборатории. Анализ полученных данных свидетельствует об отсутствии влияния снижения радиационного фона на сложный модельный организм [149].

В рамках международной программы ООН «Атмосферные выпадения тяжелых металлов в Европе — оценки на основе анализа мхов-биоиндикаторов» были проведены работы по оценке загрязнения воздуха в 12 странах-участницах ОИЯИ: Азербайджане, Армении, Белоруссии, Болгарии, Вьетнаме, Грузии, Казахстане, Молдове, Монголии, России, Румынии и Словакии. Данные по одномоментному сбору мхов-биоиндикаторов на больших территориях представлены в Атласе. Они позволяют оценивать как пространственные, так и временные тренды изменения концентраций тяжелых металлов, а также идентифицировать области с высоким уровнем загрязнения в результате локального и трансграничного переноса металлов [150].



Слева: Атлас атмосферных выпадений тяжелых металлов. Справа: пространственное распределение индекса нагрузки загрязнения воздуха в Грузии



Пространственное распределение индекса нагрузки загрязнения по прибрежным районам Средиземного и Красного морей, реки Нил и ее дельты

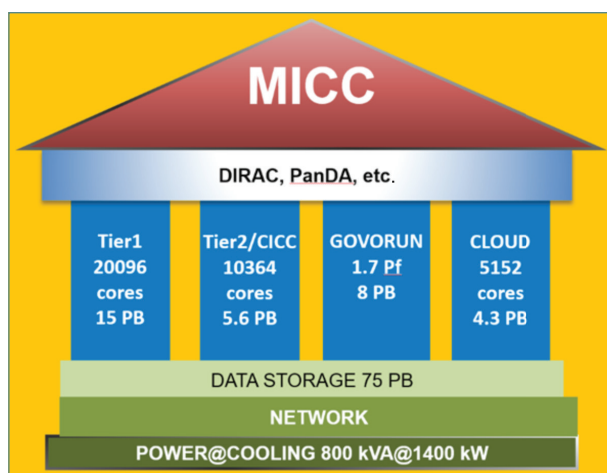
В рамках текущего сотрудничества между Академией научных исследований и технологий (ASRT, Египет) и ОИЯИ была проведена работа с целью получения всесторонней картины по оценке экологической ситуации в Египте с использованием образцов почвы и донных отложений из реки Нил и ее дельты, прибрежных районов Средиземного и Красного морей. Характеристика образцов была дана с помощью нейтронно-активационного анализа

и масс-спектрометра с индуктивно связанной плазмой.

Характеристика проб с точки зрения загрязнения показала, что оно неравномерно, некоторые участки относительно более загрязнены, чем другие, но в целом не представляют существенного риска для здоровья человека и окружающей среды. Тем не менее настоятельно рекомендуется постоянный мониторинг ввиду возможных изменений в будущем [151, 152].

# СЕТИ, КОМПЬЮТИНГ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ФИЗИКА

Одним из основных направлений Семилетнего плана в 2017–2023 гг. являлось плановое развитие в ЛИТ многофункционального информационно-вычислительного комплекса (МИВК) мирового уровня, включающее в себя: развитие и совершенствование телекоммуникационной и сетевой инфраструктуры ОИЯИ, модернизацию инженерной инфраструктуры МИВК, модернизацию, развитие и создание новых компонентов МИВК для хранения, обработки и анализа данных, развитие IT-инфраструктуры проекта NICA, наращивание производительности и объема систем хранения данных грид-компонентов — Tier1 и Tier2, наращивание ресурсов облачной инфраструктуры и создание интегрированной облачной среды для стран-участниц ОИЯИ, расширение гетерогенного вычислительного комплекса HybridLIT. Все задачи были выполнены [153, 154].



Многофункциональный информационно-вычислительный комплекс ОИЯИ

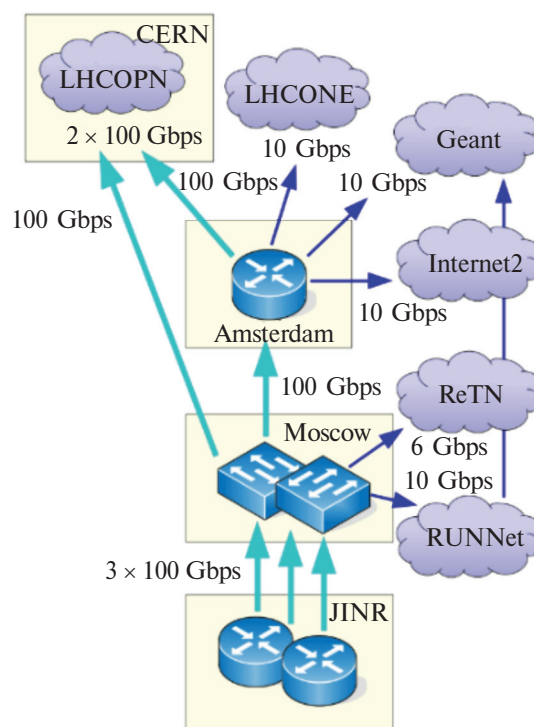
**Сетевая инфраструктура ОИЯИ.** На новый технологический уровень вышла сетевая инфраструктура ОИЯИ. Пропускная способность телекоммуникационного канала Москва–ОИЯИ увеличена со 100 до  $3 \times 100$  Гбит/с, магистральной вычислительной сети Института — с 10 до  $2 \times 100$  Гбит/с, а также создана распределенная вычислительная кластерная сеть между площадками ЛЯП и ЛФВЭ пропускной способностью до 400 Гбит/с, что отвечает требованиям мегапроекта NICA.

**Инженерная инфраструктура МИВК.** Согласно проекту МИВК выполнялись работы по модернизации инженерной инфраструктуры ЛИТ.

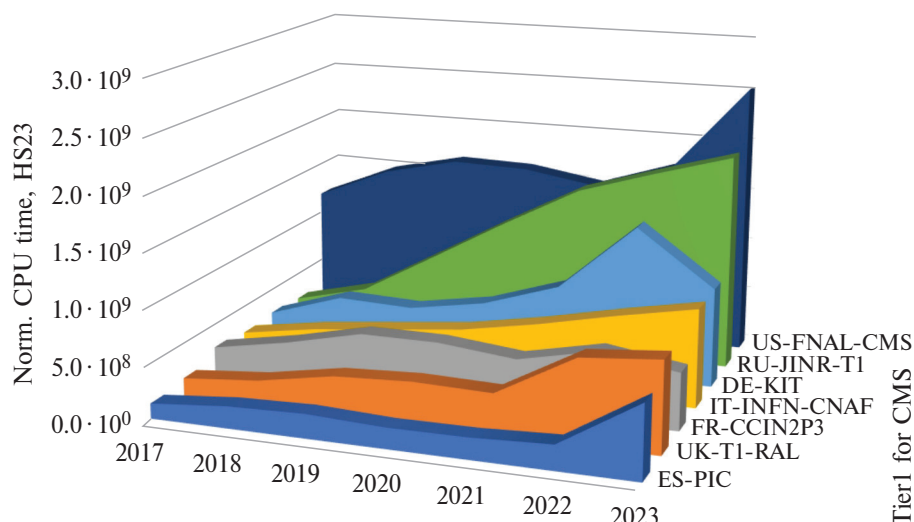
Создан комплекс инженерных систем, состоящий из источников бесперебойного питания и двух дизель-генераторных установок, представляющий собой систему электропитания, которая обеспечивает полную энергетическую независимость информационно-вычислительной системы и сетевой инфраструктуры от внешней сети электропитания. Модернизированная система климатического контроля МИВК представляет собой комплекс взаимосвязанного оборудования различных схем воздушного и жидкостного охлаждения, с помощью которых создается необходимый температурный режим, обеспечивающий работу МИВК в режиме  $24 \times 365$  [155].

**Грид-среда ОИЯИ (сайты Tier1 и Tier2).** Грид-инфраструктура ОИЯИ представлена центром уровня Tier1 для эксперимента CMS на LHC и центром уровня Tier2 для обработки данных экспериментов NICA, LHC, BES, BIOMED, NOvA, ILC и др. Оба грид-сайта ОИЯИ обеспечивали 100%-ю доступность и надежность сервисов.

Система обработки данных Tier1 для CMS была увеличена согласно планам с 3600 до 20 096 ядер, обеспечивая в настоящее время произво-



Сетевая инфраструктура ОИЯИ



Вклад мировых центров Tier1 в обработку экспериментальных данных CMS за 2017–2023 гг.: распределение по нормированному времени CPU в HS23 часах

дительность 32 382,54 HS06. Расширена система хранения. Общая полезная емкость дисковых серверов увеличена с 4 до 15 ПБ, ленточных библиотек IBM TS3500 и IBM TS4500 с 5,4 до 51 ПБ. По своей производительности Tier1 занимает одно из лидирующих мест среди других центров Tier1 для эксперимента CMS. С 2021 г. ресурсы центра Tier1 используются также для моделирования и обработки данных экспериментов NICA.

Вычислительные ресурсы центра Tier2 были по плану увеличены с 2470 до 10364 ядер, что обеспечивает производительность 66 788,4 HS06. Общая полезная емкость дисковых серверов составляет 5,6 ПБ. Сайт ОИЯИ Tier2 является лучшим в Российском консорциуме RDIG (Russian Data Intensive Grid — российский грид для интенсивных операций с данными). С 2017 по 2023 г. вклад Tier2 ОИЯИ в производительность RDIG увеличился с 42 до 90%.

Распределенная система хранения EOS (так называемое «озеро данных») успешно интегрирована в структуру МИВК и используется для хранения и доступа к большим массивам информации. Для пользователей EOS доступно 23,3 ПБ дискового пространства. Участники экспериментов на NICA, Нейтринной программы и другие пользователи хранят данные на EOS согласно квотам [156].

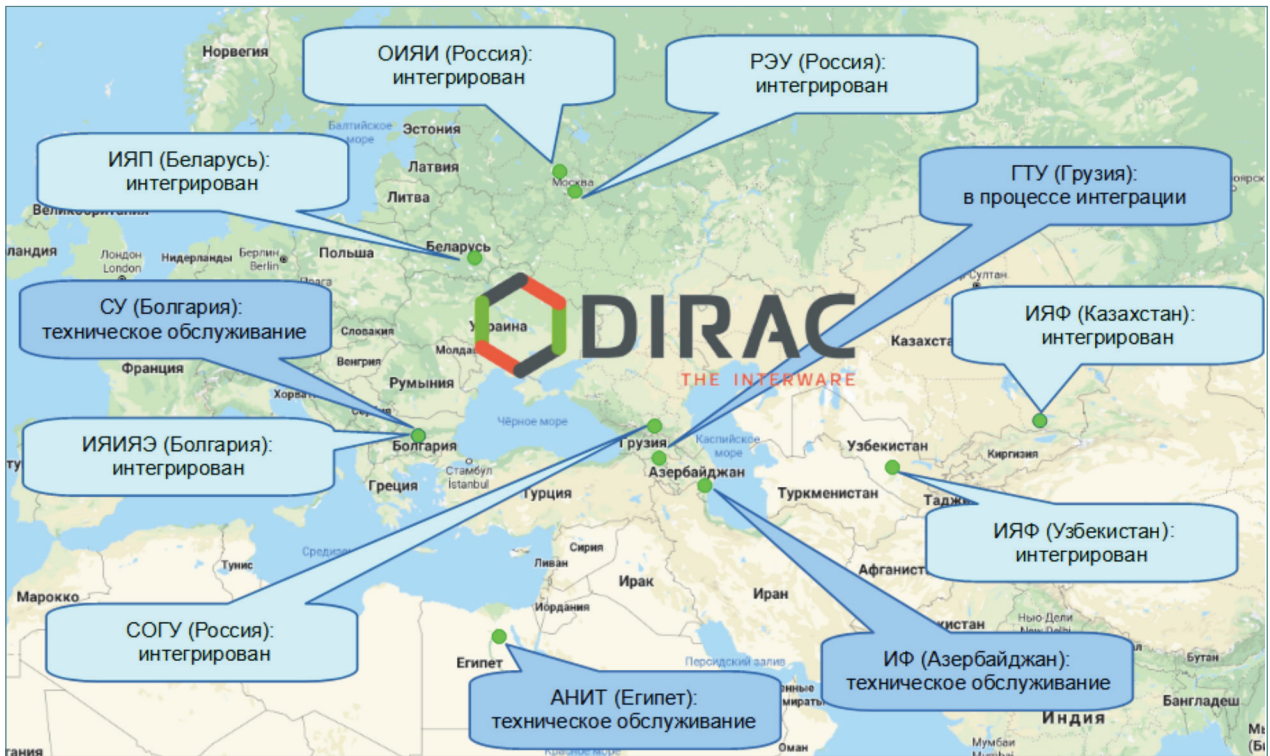
**Облачная инфраструктура.** Ресурсы облачной инфраструктуры были увеличены с 330 до 5152 ядер ЦПУ и с 840 ГБ до 61,5 ТБ общего объема ОЗУ. Общий объем дискового пространства в программно-определяемом хранилище на базе

серв увеличен до 4,3 ПБ. Расширение ресурсов облачной инфраструктуры было профинансировано в рамках экспериментов NOvA/DUNE, JUNO, Baikal-GVD (ЛЯП), научные группы которых являются основными пользователями облачной инфраструктуры.

За отчетный период активно велись работы по интеграции облачных структур стран-участниц ОИЯИ в распределенную платформу на основе DIRAC.

Выполнена интеграция облачных инфраструктур Института ядерной физики Казахстана, Научно-исследовательского института ядерных проблем Белорусского государственного университета, Российского экономического университета им. Г.В.Плеханова, Северо-Осетинского государственного университета им. К.Л.Хетагурова, Института ядерных исследований и ядерной энергетики Болгарской академии наук, Института ядерной физики Узбекистана, Института физики Национальной академии наук Азербайджана, Египетской академии научных исследований и технологий, Софийского университета им. святого Климента Охридского. Прорабатывается техническое решение для создания облачной инфраструктуры Грузинского технического университета. Во время пандемии коронавируса в 2020–2022 гг. свободные от основной деятельности ресурсы РИВС были задействованы для проведения исследований по изучению вируса SARS-CoV-2 в рамках платформы Folding@Home [157, 158].

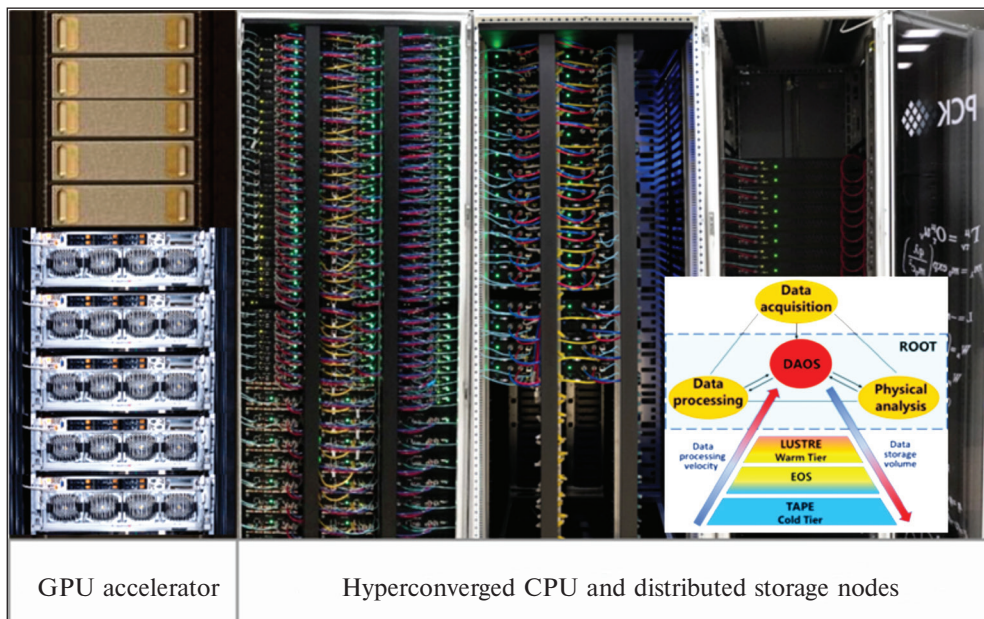
**Гетерогенная инфраструктура.** Суперкомпьютер «Говорун» был создан в 2018 г. на основе



Облака организаций, интегрированные в распределенную информационно-вычислительную среду (РИВС)

опыта, накопленного при эксплуатации гетерогенного кластера HybriLIT, входящего в состав МИВК ОИЯИ. HybriLIT показал свою востребованность при решении задач КХД на решетках, радиационной биологии, в прикладных исследованиях и др. Постоянный рост числа пользователей и расширение круга решаемых

задач потребовали не просто существенно нарастить вычислительные возможности кластера, а разработать и внедрить новые технологии, что привело к созданию новой вычислительной системы — суперкомпьютера (СК) «Говорун». СК «Говорун» создавался как высокопроизводительная масштабируемая система с жидкостным



Суперкомпьютер «Говорун»

охлаждением, обладающая гиперконвергентной и программно-определяемой архитектурой.

СК «Говорун» обладает уникальными свойствами по гибкости настройки под задачу пользователя, обеспечивая максимально эффективное использование вычислительных ресурсов суперкомпьютера. В состав СК «Говорун» входят GPU- и CPU-компоненты, а также иерархическая система обработки и хранения данных со скоростью чтения/записи 300 Гбит/с, что является крайне удобным инструментом для обработки больших массивов данных, в том числе для мегапроекта NICA. По скорости доступа к данным система хранения разделена на уровни: очень горячие данные — наиболее востребованные данные, к которым в настоящий момент требуется обеспечить самый быстрый доступ, горячие данные и теплые данные. Каждый уровень разработанной системы может использоваться как самостоятельно, так и в составе рабочих процессов обработки данных. За высокоскоростную систему обработки и хранения данных СК «Говорун» получил престижную премию Russian DC Awards 2020 в номинации «Лучшее IT-решение для центров обработки данных».

Общая производительность СК «Говорун» с момента его презентации выросла с 0,5 до 1,7 Пфлопс для операций с двойной точностью,

а общая емкость иерархического хранилища — с 288 ТБ до 8,6 ПБ.

В 2020 г. были завершены разработка и внедрение в платформу HybriLIT экосистемы для машинного/глубокого обучения и высокопроизводительных вычислений (Экосистема ML/DL/HPC), которая активно используется для создания алгоритмов на базе нейросетевых подходов для решения прикладных задач.

С 2021 г. на платформе HybriLIT интенсивно развивается информационно-вычислительная система (ИВС) для решения задач, связанных с расчетами электронных оболочек сверхтяжелых элементов. ИВС включает в себя вычислительные ресурсы СК «Говорун» и набор IT-решений и ПО, необходимых для моделирования электронных оболочек. На основе этой системы проводились интенсивные расчеты с использованием ПО AMS и DIRAC для изучения электронных свойств сверхтяжелых элементов. Также с целью разработки квантовых алгоритмов в ИВС был развернут полигон для квантовых вычислений с установленными симуляторами квантовых вычислений Cirq, Qiskit, PennyLane, способными работать на различных вычислительных архитектурах.

В конце 2021 г. на основе объединения суперкомпьютеров ОИЯИ, МСЦ РАН и СПбПУ была создана масштабируемая исследователь-

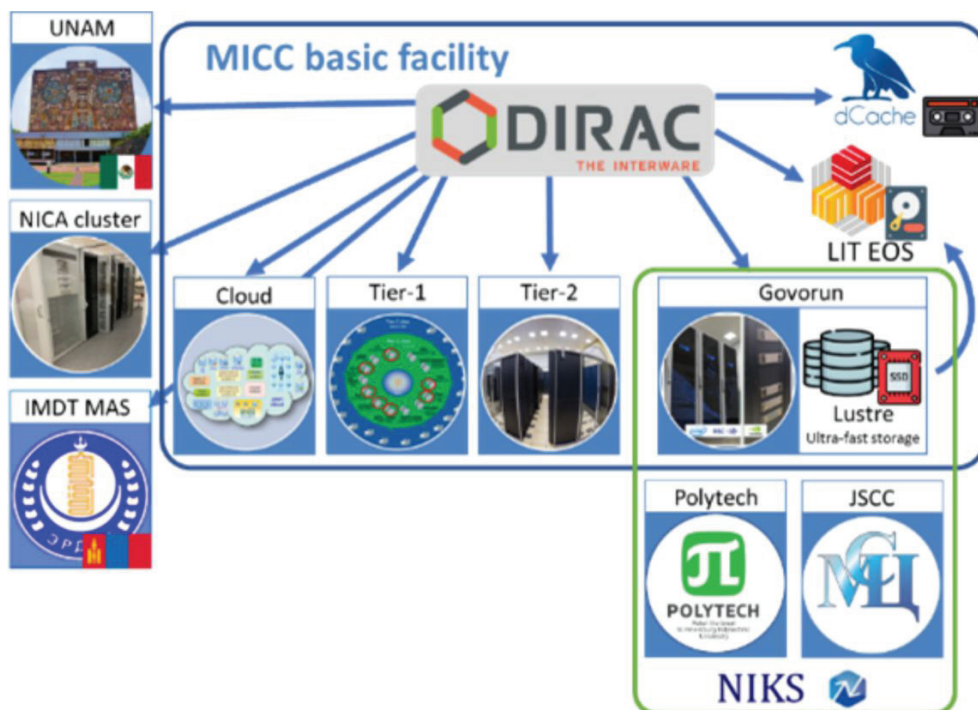


Схема интеграции географически распределенных гетерогенных ресурсов на основе DIRAC Interware



ская инфраструктура нового уровня. Она позволяет участникам расширять свои локальные вычислительные мощности, обеспечивать доступ к средствам хранения и обработки больших объемов данных, к распределенным хранилищам данных (датахабам), а также использовать мощности друг друга в случаях пиковых нагрузок. Такая инфраструктура востребована в том числе для задач мегасайенс-проекта NICA.

Ресурсы СК «Говорун» используются научными группами из всех лабораторий Института. Общее число пользователей СК «Говорун» к настоящему времени составляет 312 человек, из них 255 являются сотрудниками ОИЯИ, 57 — из стран-участниц. Доступ к ресурсам СК «Говорун» предоставляется только тем пользователям, которые принимают непосредственное участие в реализации ПТП ОИЯИ. Результаты, полученные с использованием ресурсов платформы HugiLIT, включая СК «Говорун», учебно-тестовый полигон и ML/DL/HPC экосистему [159–162], отражены более чем в 300 публикациях пользователей, при этом две из них — в журнале Nature Physics.

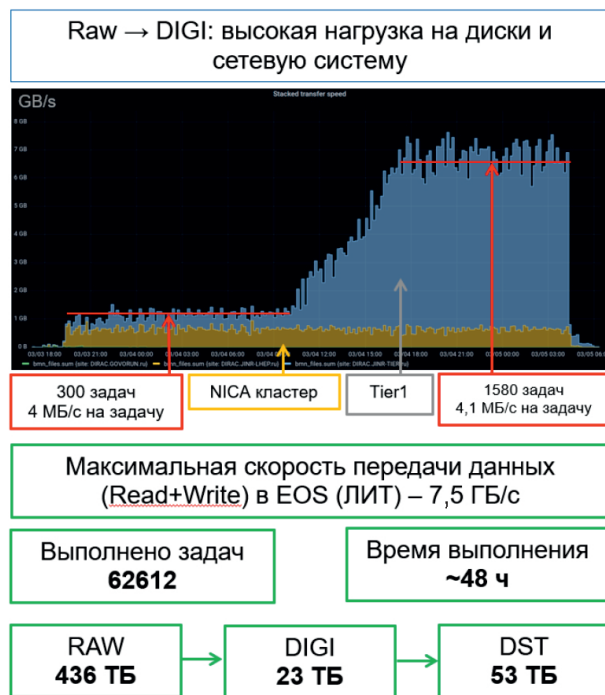
**Интеграция вычислительных ресурсов.** В рамках выполнения семилетнего плана с помощью промежуточного программного обеспечения Interware DIRAC (Distributed Infrastructure with Remote Agent Control) были объединены

вычислительные ресурсы Tier1/Tier2, суперкомпьютера «Говорун», облачных сред ОИЯИ и организаций его стран-участниц, кластера NICA, кластера Национального автономного университета Мексики (UNAM), кластера Института математики и цифровой технологии Монгольской академии наук (IMDT MAS), Национальной исследовательской компьютерной сети России и ресурсы хранения: dCache, EOS и сверхбыстрая система хранения данных Lustre.

Основными пользователями распределенной платформы являются научные группы экспериментов MPD, SPD, VM@N, Baikal-GVD. 8-й физический сеанс VM@N стал первым случаем в ОИЯИ, когда вся вычислительная инфраструктура, объединенная DIRAC, использовалась для полной реконструкции необработанных экспериментальных данных [163, 164].

**Система мониторинга и аккаунтинга.** Для обеспечения надежной работоспособности МИВК создана и расширяется многоуровневая система мониторинга и аккаунтинга, которая работает в режиме 24×365.

Система осуществляет более 16 000 проверок для более чем 1800 элементов, включенных в мониторинг. Разработанная комплексная система мониторинга МИВК позволяет получать информацию от различных компонентов вычислительного комплекса: инженерной инфраструктуры, сети, вычислительных узлов, систем запуска задач, элементов хранения данных, грид-сервисов, что гарантирует высокий уровень надежности МИВК [165].



Интенсивность обработки данных 8-го сеанса эксперимента VM@N с помощью DIRAC



Система мониторинга МИВК



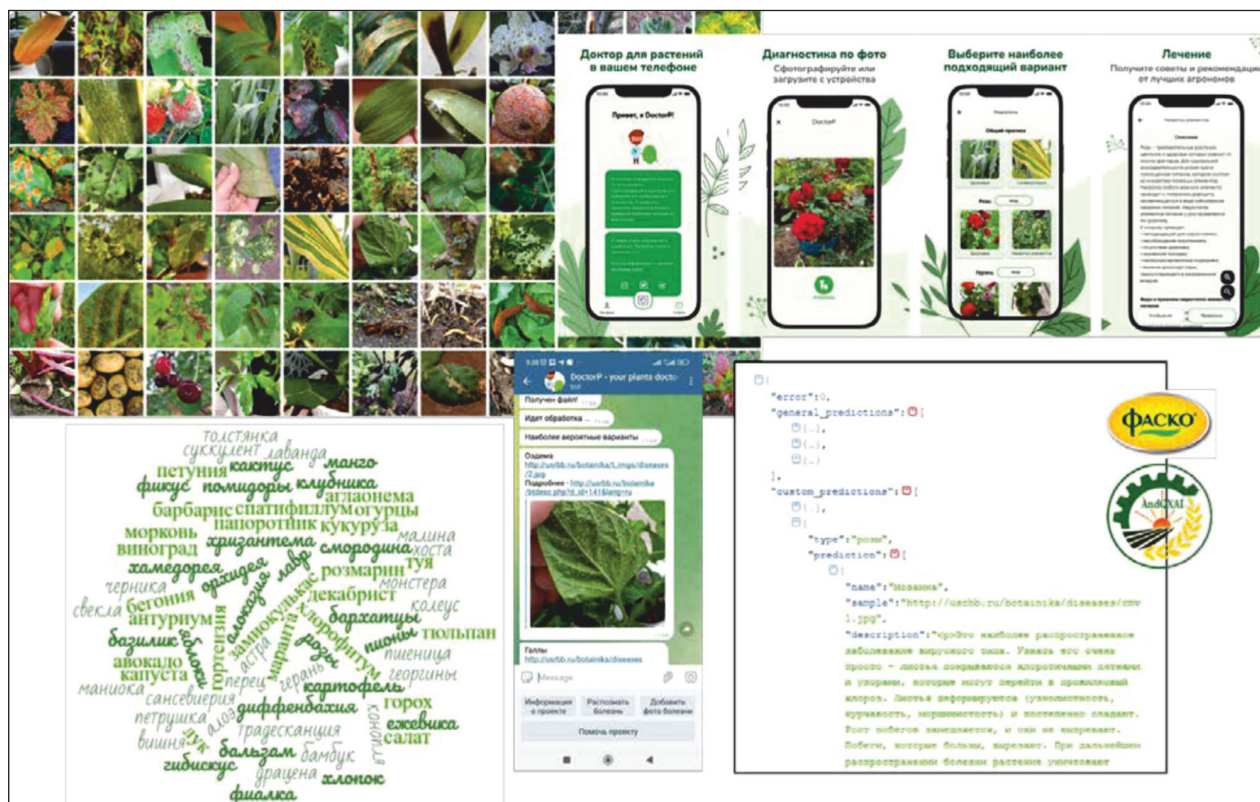
Интерфейс единой точки доступа Digital EcoSystem

**Цифровая экосистема ОИЯИ.** С 2022 г. ведутся работы по созданию платформы Digital EcoSystem JNR — «Цифровая экосистема ОИЯИ», основной целью которой является предоставление единой среды для создания и развития цифровых сервисов, их интеграции друг с другом, анализа информации о всех аспектах деятельности ОИЯИ. В цифровую экосистему входит широкий спектр сервисов — от ресурсов для пользователей базовых установок до оформления командировок, путевок, заказа справок и т.д. Основные группы сервисов — административные (зона ответственности Департамента развития цифровых сервисов ОИЯИ) и научные. Доступ к системе реализован на базе службы аутентификации JNR Single Sign-On (SSO) через единую точку доступа Digital EcoSystem [166].

**Методы, алгоритмы и программное обеспечение для моделирования физических систем, математической обработки и анализа экспериментальных данных.** Одним из важных направлений деятельности ЛИТ в рамках выполнения Семи-летнего плана также являлось обеспечение математической, алгоритмической и программной поддержки экспериментальных и теоретических исследований, проводимых в ОИЯИ, во многих из которых важным средством для получения значимых научных результатов выступают вычислительные ресурсы. Ниже приведены некоторые из важных результатов.

Впервые удалось алгоритмизировать классическую проблему, поставленную выдающимся норвежским математиком Софусом Ли в 1883 г. и состоящую в проверке линеаризуемости точечными преобразованиями нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений, разрешенных относительно старшей производной. Разработанный алгоритм позволяет не только установить, линеаризуемо ли заданное уравнение, но и получить систему дифференциальных уравнений для линеаризующего преобразования, решение которой дает явную форму такого преобразования. На мировом симпозиуме по символьным и алгебраическим преобразованиям (ISSAC-2017, Кайзерслаутерн, Германия, 25–28 июля 2017 г.) работа была признана лучшей из представленных на симпозиуме и удостоена приза Американской компьютерной ассоциации.

В апреле 2020 г. в Nature Physics была опубликована работа международной исследовательской группы, в которой, в рамках международного сотрудничества ОИЯИ, участвовали сотрудники ЛИТ (О. Чулуунбаатар) и ЛТФ (Ю. В. Попов). Было проведено кинематически полное экспериментальное измерение характеристик комптоновского рассеяния на свободных атомах с помощью высокоэффективного метода ионной импульсной спектроскопии с холодной мишенью (COLd Target Recoil Ion Momentum Spectroscopy, COLTRIMS). Теоретическое опи-



Примеры интерфейсов платформы DoctorP

сание данного явления базируется на расчетах, проведенных на СК «Говорун».

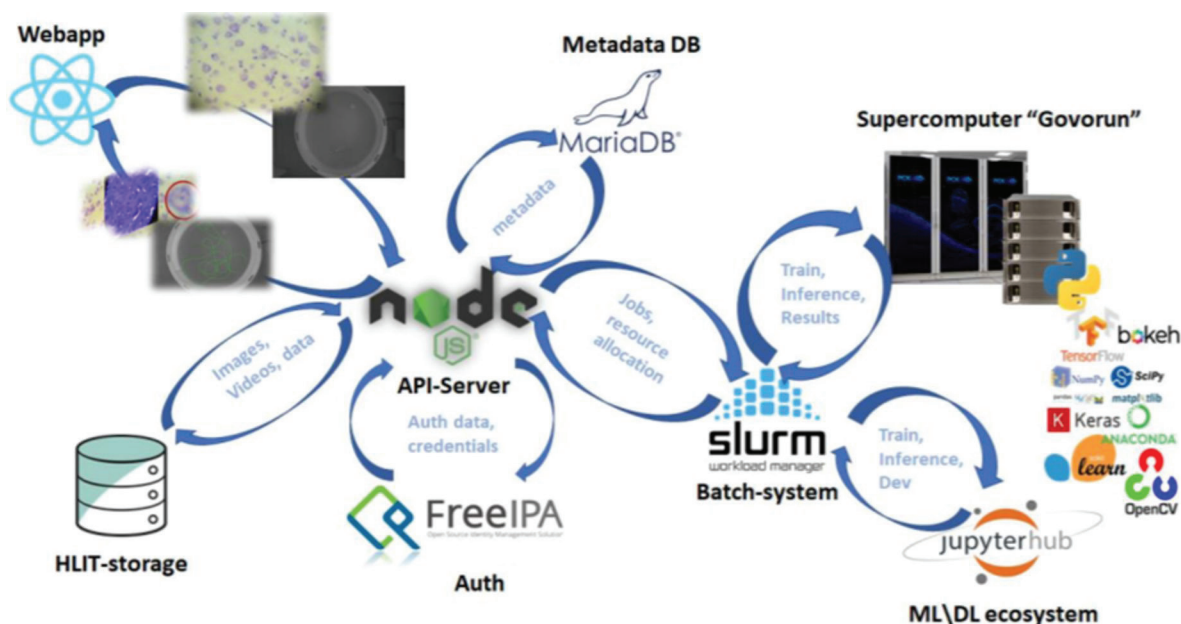
Разработана и опубликована в Библиотеке программ журнала СРС программа KANTBP 3.1 для расчета значений энергии, матриц отражения и прохождения и соответствующих волновых функций в подходе адиабатических связанных каналов. Преимуществом этой программы по сравнению с широко используемой программой CCFULL для расчета сечения реакций слияния и деления тяжелых ионов является тщательная обработка граничных условий для решения системы связанных уравнений Шредингера, что позволяет сохранить высокую точность расчетов, учитывающих большое количество связанных каналов. Теоретически полученные с помощью программы KANTBP 3.1 сечения хорошо описывают экспериментальные данные для различных реакций слияния и деления тяжелых ионов.

В ходе исследований, проводимых совместно с ЛНФ в рамках международной программы UNECE International Cooperative Program (ICP) Vegetation по мониторингу и прогнозированию процессов загрязнения воздуха в странах Европы и Азии, в ОИЯИ была разработана облачная платформа для управления данными мониторинга. Для обеспечения надежного хранения,

анализа, обработки и коллективного использования данных мониторинга были применены современные методы программного управления, статистики и машинного обучения, что позволило также использовать данные спутниковых изображений для прогнозирования атмосферного загрязнения некоторыми тяжелыми металлами в ряде европейских регионов.

Развиты платформа и мобильное приложение (DoctorP) для распознавания болезней растений и вредителей. Доступна как общая модель, способная распознавать 68 классов болезней, так и специализированные модели для 30 декоративных и сельскохозяйственных культур. В базе собрано свыше 6000 изображений. Чтобы получить прогноз и рекомендации по лечению от опытных агрономов, нужно просто отправить фотографию, на которой будет видна проблема. Доступ к платформе могут получить сторонние приложения и сервисы. Этой возможностью уже воспользовались компании «Гарден ритейл Сервис» (ранее «Фаско») и Андижанский институт сельского хозяйства и агротехники (Узбекистан).

Разработана программно-аппаратная платформа на основе встраиваемых в контур управления квантовых нечетких регуляторов для решения задачи управления давлением и расхо-



Архитектура информационной системы для задач радиационной биологии

дом жидкого азота сверхпроводящих магнитов криогенной системы ускорительного комплекса NICA. Многоуровневая система управления включает существующий нижний исполнительный уровень, основанный на системе Tango Controls, и новый уровень, на котором управляющие воздействия формируются с помощью квантового нечеткого регулятора. При этом обеспечиваются оптимальные параметры качества управления, такие как температура, расход азота, быстродействие, требуемый уровень давления и минимальная сложность реализации управления. Экспериментально продемонстрированы работоспособность и эффективность разработанной интеллектуальной системы дистанционного управления технологическим процессом охлаждения сверхпроводящего магнита с гарантированным достижением устойчивой зоны сверхпроводимости. Проектирование квантовых нечетких регуляторов основано на квантовых информационных технологиях и осуществляется с помощью разработанного сотрудниками ЛИТ ОИЯИ программного инструментария QSCIT (Quantum Soft Computational Intelligence Toolkit).

С 2020 г. на базе экосистемы ML/DL/HPC развивается совместный проект ЛИТ и ЛРБ по созданию информационной системы (ИС) для анализа поведенческих и патоморфологических изменений в центральной нервной системе при исследовании воздействия ионизирующего излучения и других факторов на биологические

объекты. В разработанную систему внедрены алгоритмы обработки экспериментальных данных на основе методов машинного и глубокого обучения и компьютерного зрения. В ИС входят надежные современные средства аутентификации и иерархического разграничения доступа к данным, система хранения данных, а также компоненты удобной работы и визуализации результатов анализа данных.

В рамках экосистемы ML/DL/HPC на примере решения конкретной задачи по изучению динамики намагниченности в джозефсоновском  $\phi^0$ -переходе представлена методика разработки программных модулей на базе JupyterHub, позволяющих не только проводить расчеты, но и визуализировать результаты исследования и сопровождать их необходимыми формулами и пояснениями. Разработаны параллельная реализация алгоритма для проведения расчетов при различных значениях параметров модели на основе Python-библиотеки Joblib, а также модули с интеграцией Matlab-кода в Jupyter Notebook, позволяющие эффективно проводить прикладные расчеты для анализа изображений.

В 2017–2023 гг. в рамках исследований, проводимых сотрудниками ЛИТ, опубликовано свыше 1300 научных работ, более 700 публикаций в рамках международных коллабораций, представлено около 800 докладов на международных и российских конференциях. Все проводимые исследования соответствуют заявленным в плане результатам [167–174].

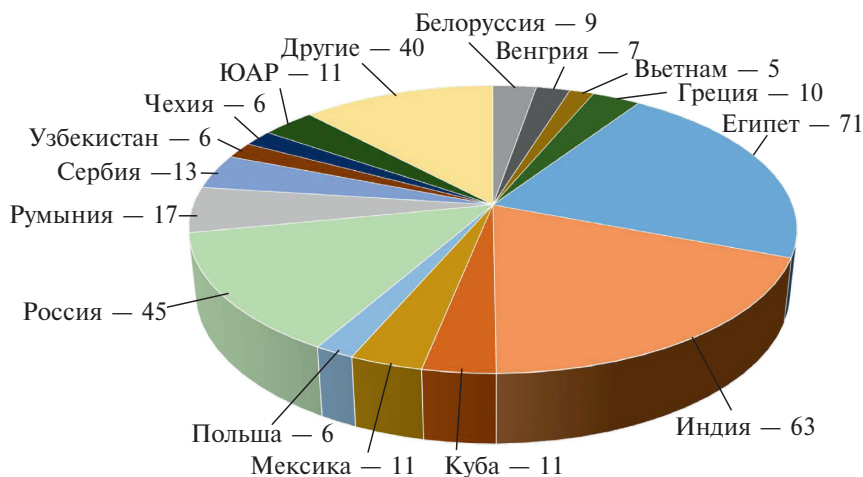
# ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ПРОГРАММА ОИЯИ

Учебно-научный центр (УНЦ) ОИЯИ организует учебный процесс для студентов базовых кафедр МГУ, МИФИ, МФТИ, государственного университета «Дубна», СПбГУ и Казанского (Приволжского) федерального университета. Стажировки и практики в ОИЯИ ежегодно проходят около 500 студентов и аспирантов из университетов государств-членов ОИЯИ.

Базовая кафедра ОИЯИ в К(П)ФУ образовалась в 2017 г. Четверо выпускников магистерской программы кафедры работают сейчас в должности стажеров-исследователей в ЛНФ, ЛФВЭ и ЛЯР. Два выпускника кафедры, закончившие аспирантуру в 2023 г., приняты на работу в ЛНФ в должности младших научных сотрудников.

УНЦ организует процесс сдачи кандидатских экзаменов по специальности для сотрудников ОИЯИ, прикрепленных к базовой кафедре МФТИ «Фундаментальные и прикладные проблемы физики микромира». С 2018 г. кандидатские экзамены на кафедре сдали 44 человека. Для подготовки диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук без освоения программ подготовки в аспирантуре к ОИЯИ за 2017–2023 г. были прикреплены 52 человека.

**Программа INTEREST.** Круглогодичная онлайн-программа INTEREST (INTErnational REmote Student Training), запущенная в сентябре 2020 г., позволяет студентам познако-



Число участников программы INTEREST



Инженерный практикум по вакуумной технике и автоматизации для студентов УНЦ

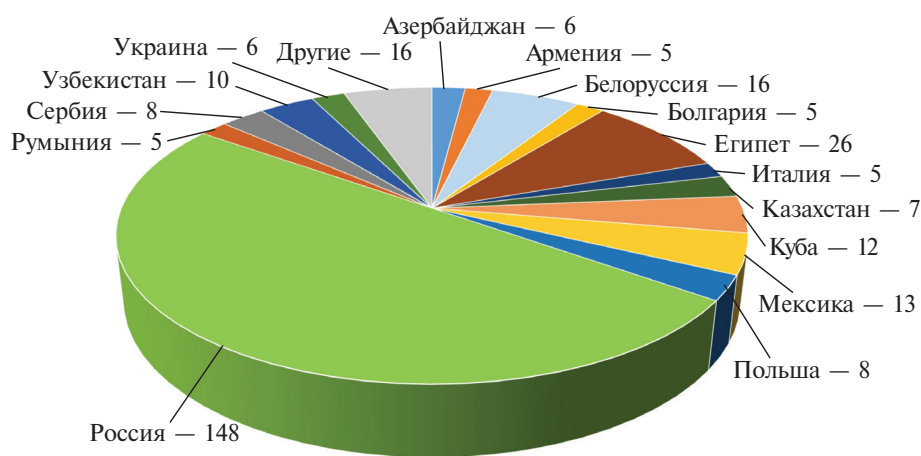
миться с основными направлениями исследований ОИЯИ, способствует поиску научного руководителя для квалификационной работы, а также участию в очных стажировках. Число участников программы из 37 стран мира достигло 331.

Каждая волна программы длится 4–6 недель для дистанционного выполнения проектов, предложенных сотрудниками Института. К основному времени, которое отводится на выполнение выбранных проектов, добавлены лекции, а также опциональные онлайн-экскурсии, что позволяет студентам ближе познакомиться с лабораториями Института.

**Программа START.** В 2022 г. Летняя студенческая программа ОИЯИ начала работу под новым

названием START — Student Advanced Research Training at JINR. Программа очной стажировки проходит круглогодично. К участию в ней допускаются студенты со всего мира, специализирующиеся в естественных науках, инженерии и IT, заканчивающие 3-й курс бакалавриата, обучающиеся в магистратуре, а также аспиранты 1-го года. Участниками студенческой программы START с 2017 по 2023 г. стали 296 человек из 25 стран. Программа предоставляет сотрудникам ОИЯИ возможность поиска молодых специалистов, которые приглашаются для прохождения очной стажировки в Институте на срок 6–8 недель.

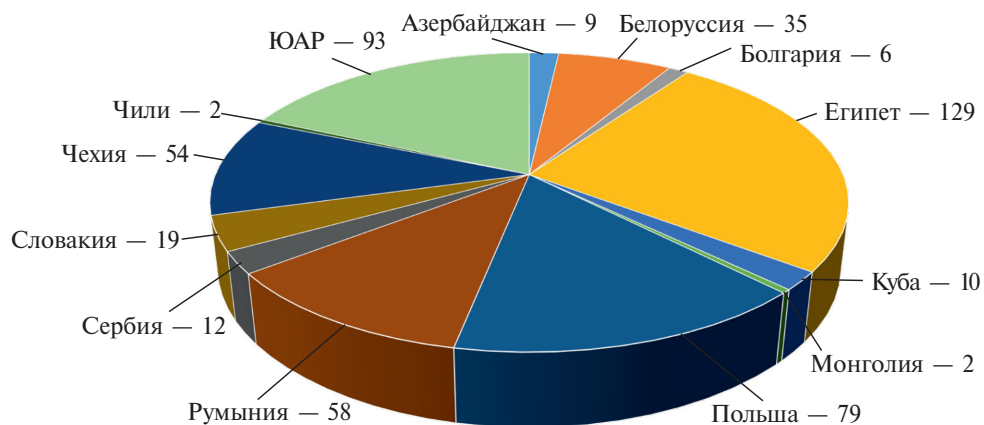
**Международная студенческая практика.** Международные студенческие практики по направлениям исследований ОИЯИ — трехнедель-



Число участников программы START за 2017–2023 г.



Участники студенческой программы START на экскурсии в ЛФВЭ ОИЯИ



Число участников Международной студенческой практики с 2017 по 2023 г.



Очередной этап Международной студенческой практики УНЦ для молодых специалистов из ЮАР

ные очные программы, организуемые с 2004 г. С 2007 г. практики проводятся в несколько этапов. С 2017 по 2023 г. участниками стали 508 человек. Студентам предлагается насыщенная образовательная и культурная программа, основное же время отводится на выполнение научных проектов под руководством сотрудников ОИЯИ.

**Профориентационные мероприятия.** Для знакомства абитуриентов и студентов, как потенциальных соискателей работы в ОИЯИ, с ос-

новными направлениями деятельности ОИЯИ, сотрудники УНЦ совместно с представителями лабораторий Института ежегодно участвуют очно и в онлайн-формате в крупных российских фестивалях науки, организации выставок, лекций, экскурсий, мастер-классов и физических демонстраций на различных мероприятиях, а также в деятельности информационных центров ОИЯИ. Среди них:

- Всероссийский фестиваль науки «Наука 0+» в Москве на площадках ЦВК «Экспоцентр»



Стенд ОИЯИ и группа сотрудников УНЦ на фестивале «Наука 0+» в Москве

и МГУ. В программу ОИЯИ входили лекции, мастер-классы, демонстрация макетов базовых установок Института и стендов с информацией об исследовательских проектах;

- Фестиваль науки, технологий и искусства «Geek Picnic» в парке искусств «Музеон»;
- фестиваль «Техносреда», 25–26 сентября 2021 г.;
- XIX Всемирный фестиваль молодежи и студентов в Сочи, 2017 г.;
- 2-й Конгресс молодых ученых в Сочи, 2022 г.;
- Всемирный день темной материи, 2019 г.;
- форум «Наноград», программы «Школьная лига» в Санкт-Петербурге, 2022 г.;
- Мастерская физики «105-й элемент», летняя школа;
- день базовых кафедр ОИЯИ в университете «Дубна»;
- дни карьеры в МГУ, МФТИ, МИФИ, СПбГУ, университете «Дубна».

**Выставка «Базовые установки ОИЯИ».** Интерактивная выставка «Базовые установки ОИЯИ» в ДК «Мир», подготовленная сотрудниками УНЦ, была приурочена к празднованию 65-летия ОИЯИ.

Представленные на выставке стенды и макеты установок ОИЯИ, среди которых циклотрон, коллайдер с детектором частиц, импульсный реактор ИБР-2, байкальский глубоководный нейтринный телескоп и др., — лучший способ познакомиться с работой основных установок Института на интерактивных моделях.

**Интенсивы для студентов.** УНЦ и базовая кафедра ОИЯИ «Фундаментальные и прикладные проблемы физики микромира» МФТИ выступили соорганизаторами школ по физике кварк-глюонной материи весной и осенью 2023 г. В школах принимали участие 65 студентов 1–4-х курсов, изучающих физику элементарных частиц.

Летняя научная школа-интенсив «Физика и техника ускорителей», организованная совместно ОИЯИ и Томским политехническим университетом, проходила с 4 по 7 июля 2023 г. Она была ориентирована на студентов 3–4-х курсов инженерно-физических специальностей технических университетов стран-участниц ОИЯИ.

**Школы для учителей в ОИЯИ.** С 2017 по 2023 г. в международных школах для учителей физики в ОИЯИ и ЦЕРН приняли участие 200 преподавателей из 37 регионов РФ и семи государств-членов ОИЯИ.

С 2017 г. УНЦ провел 3 международных школы для учителей физики в ЦЕРН и 7 школ в ОИЯИ (в том числе 2 для регионов РФ, а именно Приморья и Камчатки). Школы, проводимые с 2009 г., становятся все более востребованным форматом.

В программы школ в ОИЯИ входят ознакомительные лекции и экскурсии в лаборатории Института, мастер-классы, визиты в университет «Дубна», библиотеку им. Д.И.Блохинцева, лицей им. В.Г.Кадышевского, а также круглые





Школа-интенсив по физике для студентов МФТИ, организованная УНЦ ОИЯИ

столы по проблемам школьного образования и обмену опытом преподавания.

**Работа со школьниками.** УНЦ проводит мероприятия для школьников, учителей и широкой общественности, направленные на популяризацию научных знаний, развитие интереса к естественным и точным наукам, к физике и математике. Ежегодно проводятся фестиваль «Дни физики», турнир по робототехнике «CyberDubna», соревнования по конструированию и программированию роботов — технический хакатон, Международная компьютерная школа.

С 2021 г. проводятся научные школы для студентов Школьного университета при Академии научных исследований и технологий Египта. Последняя, 3-я школа прошла в сентябре 2023 г., в ней приняли участие 13 студентов, отобранных примерно из 500 претендентов. Всего в 2021–2023 гг. в школе приняли участие 39 человек.

В 2022 г. в совместном проекте Образовательного центра «Сириус» и ОИЯИ «Уроки настоящей ядерной физики» январского цикла проекта «Уроки настоящего» принимали участие более 600 школьников 7–11-х классов, объединенных в 90 научно-технологических студий, из образовательных организаций 41 региона России.

**Инженерные практикумы.** С 2016 г. в составе УНЦ работает научно-инженерная группа для

подготовки студентов и инженерно-технических специалистов из государств-членов ОИЯИ на действующих и создаваемых современных физических установках Института.

Ключевой особенностью практикума является работа с реальным оборудованием. Подготовлены практикумы по автоматизации, вакуумной технике, электронике, СВЧ, в 2019 г. добавлен



Студенты — участники инженерного практикума УНЦ на экскурсии в ЛЯР ОИЯИ



Международное рабочее совещание «Открытая информационная и образовательная среда для поддержки фундаментальных и прикладных междисциплинарных исследований в ОИЯИ»

новый практикум по Medipix. В разработке находится практикум по дозиметрии.

**Разработка и создание образовательных программ.** В 2023 г. в ОИЯИ завершен первый этап проекта по созданию открытой информационной и образовательной среды, в рамках которого сотрудниками отдела разработки и создания образовательных программ УНЦ были разрабо-

таны учебные курсы для студентов по тематике ОИЯИ, созданы информационные системы для поддержки фундаментальных исследований в лабораториях, проводятся мультимедийные выставки, в том числе передвижные, что дает возможность поделиться наработками с вузами стран-участниц и стран-партнеров Института. Успешно развивается масштабный проект Института «Виртуальная лаборатория», которая



Египетские школьники в Физико-математическом лицее им. академика В.Г.Кадышевского

знакомит студентов и молодых ученых с реальным экспериментальным оборудованием и с обработкой экспериментальных данных.

**Визиты.** УНЦ организует ознакомительные программы для школьников, студентов и учителей. При планировании программ визитов в лаборатории Института учитываются уровень подготовки и профиль обучения гостей.

**Взаимодействие с образовательными учреждениями Дубны.** В Дубне при поддержке ОИЯИ работают межшкольный физико-математический факультатив на базе школы №9, физический практикум УНЦ и Яндекс-лицей на базе лицея №6. В межшкольном физико-математическом факультативе ежегодно организуются занятия по физике и математике для учащихся 6–8-х классов, а для учащихся 10-го класса — занятия по экспериментальной физике. Проводятся открытые олимпиады по физике и математике.

**Учебные пособия для школьников.** Сотрудники УНЦ подготовили комплект школьных учебников для углубленного изучения физики в 7–9-х классах, в который входят учебник, задачник, тетрадь-практикум, а также виртуальные практикумы и методическая поддержка. Учебные пособия были выпущены издательством

«Просвещение» в 2023 г. и одобрены комиссией Министерства просвещения РФ. В стадии разработки — учебники для старшеклассников.

**Подготовка специалистов и повышение квалификации.** Для совершенствования процедур аттестации работников поднадзорных Ростехнадзору организаций Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору создан Единый портал тестирования в области промышленной безопасности, безопасности гидротехнических сооружений, безопасности в сфере электроэнергетики. С 2021 г. в УНЦ действует компьютерный класс, в котором по новым требованиям организовано тестирование лиц, ответственных за исправное состояние и безопасную эксплуатацию техники.

В УНЦ успешно работают курсы по обучению английскому языку, а также курсы по русскому языку для иностранных специалистов. С 2017 по 2020 г. осуществлялась подготовка по французскому и немецкому языкам. В 2020 г. по запросу ЛЯП был разработан курс английского языка для сотрудников конструкторского отдела, работающих в международных коллаборациях ОИЯИ и ЦЕРН. В 2021 г. было организовано обучение английскому языку сотрудников различных подразделений ОИЯИ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Butenko A. et al.* NICA Accelerator Complex at JINR // Proc. of the 10th Intern. Part. Accel. Conf. (IPAC2019), Melbourne, Australia, 2019.
2. *Bazanov M. et al.* Light-Ion Linear Accelerator for the NICA Project // Phys. Part. Nucl. Lett. 2020. V.17, No.4. P.481–487.
3. *Butenko A., Khodzhibagiyan H., Kostromin S., Meshkov I., Sidorin A., Syresin E., Trubnikov G., Tuzikov A.* The NICA Complex Injection Facility // Proc. of the 27th Russ. Part. Accel. Conf. (RuPAC2021), Alushta, 2021. JACoW Publ.
4. *Butenko A. et al.* First Experiments with Accelerated Ion Beams in the Booster of the NICA Accelerator Complex // Proc. of the 12th Intern. Part. Accel. Conf. (IPAC2021), Campinas, Brazil, May 24–28, 2021.
5. *Syresin E. et al.* NICA Ion Collider and Plans of Its First Operations // Proc. of the 13th Intern. Part. Accel. Conf. (IPAC2022), Bangkok, Thailand, June 12–17, 2022.
6. *Брызгунов М.И., Бублей А.В., Лебедев В.А., Мешков И.Н., Осипов К.Г., Пархомчук В.В., Прокофьевичев Ю.В., Рева В.Б., Сергеев А.С., Семёнов С.В., Тимонин Р.В., Шпаков В.С.* Первые эксперименты по электронному охлаждению ионов в бустере NICA // Тр. XXVIII Рос. конф. по ускорителям заряженных частиц (RuPAC-2023), Новосибирск, 11–15 сент. 2023 г.
7. *Гульбекян Г.Г., Дмитриев С.Н., Иткис М.Г., Оганесян Ю.Ц., Гикал Б.Н., Калагин И.В., Семин В.А., Богомолов С.Л., Бузмаков В.А., Иваненко И.А., Казаринов Н.Ю., Осипов Н.Ф., Пащенко С.В., Соколов В.А., Пчелкин Н.Н., Прохоров С.В., Хабаров М.В., Гикал К.Б.* Запуск циклотрона ДЦ-280 — базовой установки фабрики сверхтяжелых элементов ЛЯР ОИЯИ // Письма в ЭЧАЯ. 2019. Т.50, №6. С.653.
8. *Oganessian Yu. Ts. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 2022. V.1033. P. 166640.
9. *Yavor M.I., Gall N.R., Muradymov M.Z. et al.* // J. Instrum. 2022. V.17. P.11033.
10. *Oganessian Yu. Ts., Utyonkov V.K., Ibadullayev D. et al.* // Phys. Rev. C. 2022. V.106. P.024612.
11. *Oganessian Yu. Ts., Utyonkov V.K., Kovrizhnykh N.D. et al.* // Phys. Rev. C. 2022. V.106. P.L031301.
12. *Oganessian Yu. Ts., Utyonkov V.K., Shumeiko M.V. et al.* // Phys. Rev. C. 2023. V.108. P.024611.
13. *Fomichev A.S. et al.* // Eur. Phys. J. A. 2018. V.54. P.97.
14. *Kaminski G. et al.* // Nucl. Instr. Meth. B. 2020. V.463. P.504.
15. *Bezbakh A.A. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2020. V.124. P.022502.
16. *Kazakov D.I., Borlakov A.T., Tolkachev D.M., Vlasenko D.E.* // Phys. Rev. D. 2018. V.97. P.125008.
17. *Kazakov D.I.* // Phys. Lett. B. 2018. V.786. P.327.
18. *Bednyakov A., Pikelner A.* Four-Loop Gauge and Three-Loop Yukawa Beta Functions in a General Renormalizable Theory // Phys. Rev. Lett. 2021. V.127, No.4. P.041801.
19. *Bednyakov A., Pikelner A.* Six-Loop Beta Functions in General Scalar Theory // J. High Energy Phys. 2021. V.04. P.233.
20. *Zhi-Da Bai, Korobov V.I., Zong-Chao Yan, Ting-Yun Shi, Zhen-Xiang Zhong* // Phys. Rev. Lett. 2022. V.128. P.183001.
21. *Kazakov D.I., Tolkachev D.M., Iakhibbaev R.M.* // J. High Energy Phys. 2023. V.4. P.128; J. Cosmol. Astropart. Phys. 2023. V.9. P.49.
22. *Astrakhantsev N., Braguta V., Kotov A.* Temperature Dependence of Shear Viscosity of  $SU(3)$ -Gluodynamics within Lattice Simulation // J. High Energy Phys. 2017. V.04. P.101.
23. *Astrakhantsev N. Yu., Braguta V.V., Kotov A. Yu.* Temperature Dependence of the Bulk Viscosity within Lattice Simulation of  $SU(3)$ -Gluodynamics // Phys. Rev. D. 2018. V.98, No.5. P.054515.
24. *Astrakhantsev N., Braguta V.V., D'Elia M., Kotov A. Yu., Nikolaev A.A., Sanfilippo F.* Lattice Study of the Electromagnetic Conductivity of the Quark-Gluon Plasma in an External Magnetic Field // Phys. Rev. D. 2020. V.102, No.5. P.054516.
25. *Borniyakov V.G., Braguta V.V., Ilgenfritz E.-M., Kotov A. Yu., Molochkov A.V.* Observation of Deconfinement in a Cold Dense Quark Medium // J. High Energy Phys. 2018. V.03. P.161.
26. *Astrakhantsev N. Yu., Borniyakov V.G., Braguta V.V., Ilgenfritz E.-M., Kotov A. Yu.* Lattice Study of Static Quark–Antiquark Interactions in Dense Quark Matter // J. High Energy Phys. 2019. V.05. P.171.
27. *Borniyakov V.G., Braguta V.V., Nikolaev A.A., Rogalyov R.N.* Effects of Dense Quark Matter on

- Gluon Propagators in Lattice  $QC_2D$  // Phys. Rev. D. 2020. V. 102. P. 114511.
28. *Astrakhantsev N., Braguta V.V., Ilgenfritz E.-M., Kotov A. Yu., Nikolaev A.A.* Lattice Study of Thermodynamic Properties of Dense  $QC_2D$  // Phys. Rev. D. 2020. V. 102, No. 7. P. 074507.
  29. *Braguta V.V., Kudrov I.E., Roenko A.A., Sychev D.A., Chernodub M.N.* Lattice Study of the Equation of State of a Rotating Gluon Plasma // JETP Lett. 2023. V. 117, No. 9. P. 639–644.
  30. *Braguta V.V., Kotov A. Yu., Kuznedev D.D., Roenko A.A.* Influence of Relativistic Rotation on the Confinement–Deconfinement Transition in Gluodynamics // Phys. Rev. D. 2021. V. 103, No. 9. P. 094515.
  31. *Braguta V.V., Kotov A. Yu., Kuznedev D.D., Roenko A.A.* Study of the Confinement/Deconfinement Phase Transition in Rotating Lattice  $SU(3)$ -Gluodynamics // Pisma Zh. Eksp. Teor. Fiz. 2020. V. 112, No. 1. P. 9–16; JETP Lett. 2020. V. 112, No. 1. P. 6–12.
  32. *Ivanov Yu.B., Russkikh V.N., Toneev V.D.* // Phys. Rev. C. 2006. V. 73. P. 044904.
  33. *Ivanov Yu.B., Soldatov A.A.* // Phys. Rev. C. 2018. V. 97. P. 024908.
  34. *Ivanov Yu.B., Soldatov A.A.* // Phys. Rev. C. 2018. V. 98. P. 014906.
  35. *Kozhevnikova M., Ivanov Yu.B.* // Phys. Rev. C. 2023. V. 107. P. 024903.
  36. *Khvorostukhin A.S., Kolomeitsev E.E., Toneev V.D.* // Eur. Phys. J. A. 2021. V. 57. P. 294.
  37. *Ivanov Yu.B., Soldatov A.A.* // Phys. Rev. C. 2018. V. 97. P. 044915.
  38. *Ivanov Yu.B.* // Phys. Rev. C. 2021. V. 103. L031903.
  39. *Tsegelnik N., Kolomeitsev E.E., Voronyuk V.* // Phys. Rev. C. 2023. V. 107. P. 034906.
  40. *Tsegelnik N., Kolomeitsev E.E., Voronyuk V.* // Particles. 2023. V. 6. P. 373.
  41. *Kolomeitsev E.E., Voskresensky D.N.* // Nucl. Phys. A. 2018. V. 973. P. 89–103.
  42. *Kolomeitsev E.E., Voskresensky D.N., Borisov M.E.* // Eur. Phys. J. A. 2021. V. 57. P. 145.
  43. *Voskresensky D.N.* // Prog. Part. Nucl. Phys. 2023. V. 130. P. 104030.
  44. *Maslov K., Yasutake N., Ayriyan A., Blaschke D., Grigorian H., Maruyama T., Tatsumi T., Voskresensky D.N.* // Phys. Rev. C. 2019. V. 100. P. 025802.
  45. *Röpke G., Voskresensky D.N., Kryukov I.A., Blaschke D.* // Nucl. Phys. A. 2018. V. 970. P. 224.
  46. *Hong J., Adamian G.G., Antonenko N.V.* Ways to Produce New Superheavy Isotopes with  $Z=111$ –117 in Charged Particle Evaporation Channels // Phys. Lett. B. 2017. V. 764. P. 42–48.
  47. *Hong J., Adamian G.G., Antonenko N.V.* Possibilities of Production of Transfermium Nuclei in Complete Fusion Reactions with Radioactive Beams // Phys. Rev. C. 2017. V. 96. P. 014609.
  48. *Dzhioev A.A., Langanke K., Martinez-Pinedo G., Vdovin A.I., Stoyanov Ch.* // Phys. Rev. C. 2020. V. 101. P. 025805.
  49. *Severyukhin A.P., Arsenyev N.N., Pietralla N.* First Calculation of the  $\gamma\gamma$ -Decay Width of a Nuclear  $2+1$  State: The Case of  $^{48}\text{Ca}$  // Phys. Rev. C. 2021. V. 104. P. 024310.
  50. *Shirikova N. Yu., Sushkov A.V., Malov L.A., Kologanova E.A., Jolos R.V.* // Phys. Rev. C. 2022. V. 105. P. 024309.
  51. *Nasirov A.K., Kayumov B.M., Ganiev O.K., Yuldasheva G.A.* // Phys. Lett. B. 2023. V. 842. P. 137976.
  52. *Ivantsov I., Ferraz A., Kochetov E.* Itinerant-Localized Model of Strongly Correlated Electrons: Fermi-Surface Reconstruction // Phys. Rev. B. 2017. V. 96. P. 195161.
  53. *Nashaat M., Botha A.E., Shukrinov Yu.M.* // Phys. Rev. B. 2018. V. 97. P. 224514.
  54. *Yamaletdinov R.D., Katkov V.L., Nikiforov Y.A., Okotrub A.V., Osipov V.A.* // Adv. Theory Simul. 2020. V. 3. P. 1900199.
  55. *Hoang Ngoc Cam, Nguyen Thanh Phuc, Osipov V.A.* // npj 2D Mater. Appl. 2022. V. 6. P. 22.
  56. *Astrakhantsev N. Yu., Braguta V.V., Katsnelson M.I., Nikolaev A.A., Ulybyshev M.V.* Quantum Monte Carlo Study of Electrostatic Potential in Graphene // Phys. Rev. B. 2018. V. 97, No. 3. P. 035102.
  57. *Braguta V.V., Katsnelson M.I., Kotov A. Yu., Trunin A.M.* Catalysis of Dynamical Chiral Symmetry Breaking by Chiral Chemical Potential in Dirac Semimetals // Phys. Rev. B. 2019. V. 100, No. 8. P. 085117.
  58. *Braguta V.V., Katsnelson M.I., Kotov A. Yu.* Lattice Field Theory Simulations of Dirac Semimetals // Ann. Phys. 2018. V. 391. P. 278–292.
  59. *Boyda D.L., Braguta V.V., Katsnelson M.I., Kotov A. Yu.* Lattice Quantum Monte Carlo Study of Chiral Magnetic Effect in Dirac Semimetals // Ann. Phys. 2018. V. 396. P. 78–86.
  60. *Obukhov Yu.N., Silenko A.J., Teryaev O.V.* General Treatment of Quantum and Classical Spinning Particles in External Fields // Phys. Rev. D. 2017. V. 96. P. 105005.
  61. *Fedoruk S., Ivanov E., Lechtenfeld O., Sidorov S.* // J. High Energy Phys. 2018. V. 1804. P. 043; arXiv:1801.00206 [hep-th].

62. Dorey P., Romanczukiewicz T., Shnir Ya. // Phys. Lett. B. 2020. V. 806. P. 135497.
63. Povolotsky A. M. Exact Densities of Loops in  $O(1)$  Dense Loop Model and of Clusters in Critical Percolation on a Cylinder // J. Phys. A: Math. Theor. 2021. V. 5422. P. LT01.
64. Isaev A. P., Krivonos S. O. Split Casimir Operator for Simple Lie Algebras, Solutions of Yang–Baxter Equations and Vogel Parameters // J. Math. Phys. 2021. V. 62, No. 8. P. 083503.
65. Fursaev D. V., Pirozhenko I. G. // Phys. Rev. D. 2023. V. 107. P. 025018; arXiv:2309.01272 [gr-qc]. 2023.
66. Fursaev D. V., Davydov E. A., Pirozhenko I. G., Tainov V. A. arXiv:2311.01863 [gr-qc]. 2023.
67. Kapishin M. (for the BM@N Collab.). Studies of Baryonic Matter at BM@N (JINR) // 27th Intern. Conf. on Ultrarelativistic Nucleus–Nucleus Collisions (Quark Matter 2018), Venezia, Italy, May 14–19, 2018.
68. Pokatashkin G. et al. Hyperons at the BM@N Experiment: First Results // 24th Intern. Baldin Seminar, Dubna, Sept. 17–22, 2018.
69. Kapishin M. (for the BM@N Collab.). First BM@N Results // Proc. of the 18th Intern. Conf. “Strangeness in Quark Matter” (SQM-2019), Bari, Italy, 2019.
70. Patsyuk M. et al. Unperturbed Inverse Kinematics Nucleon Knockout Measurements with a 48 GeV/c Carbon Beam // Nat. Phys. 2021. V. 17. P. 693.
71. STAR Collab. // Nature. 2017. V. 548. P. 62.
72. Aghasyan M. et al. Search for Muoproduction of X(3872) at COMPASS and Indication of a New State // Phys. Lett. B. 2018. V. 783. P. 334.
73. Malinina L. (for the ALICE Collab.). Femtosopic Correlations of Identical Charged Particles in  $pp$ -Collisions at LHC Energies with Event-Shape Selection // 5th Intern. Conf. on Part. Phys. and Astrophys. (ICPPA-2020), Moscow, Oct. 7, 2020.
74. Aaboud M. et al. (ATLAS Collab.). Measurement of  $VH$ ,  $H \rightarrow b\bar{b}$  Production as a Function of the Vector-Boson Transverse Momentum in 13 TeV  $pp$  Collisions with the ATLAS Detector // J. High Energy Phys. 2019. V. 05. P. 141.
75. Aaboud M. et al. (ATLAS Collab.). Measurements of the Production Cross-Section for a  $Z$  Boson in Association with  $b$ -Jets in Proton–Proton Collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS Detector // J. High Energy Phys. 2020. V. 07. P. 44.
76. Aaboud M. et al. (ATLAS Collab.). Measurements of  $WH$  and  $ZH$  Production in the  $H \rightarrow b\bar{b}$  and Decay Channel in  $pp$  Collisions at 13 TeV with the ATLAS Detector // J. Instrum. 2021. V. 16. P. 07029.
77. Eletsikh I. et al. ATLAS Results on Exotic Hadronic Resonances // Proc. of the 11th Intern. Conf. on New Frontiers in Physics (ICNFP2022), OAC, Kolymbari, Crete, Greece, 30 Aug. – 11 Sept. 2022. ATLAS-CONF-2022-040.
78. Karpov S., Karpova Z. et al. Search for Quantum Black Hole Production in Lepton+Jet Final States Using Proton–Proton Collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS Detector. arXiv:2307.14967 (submitted to Phys. Rev. D).
79. Sirunyan A. M. et al. (CMS Collab.). Search for Resonant and Nonresonant New Phenomena in High-Mass Dilepton Final States at 13 TeV // J. High Energy Phys. 2021. V. 7. P. 208.
80. Zhizhin I. A., Lanyov A. V., Shmatov S. V. Searches for New Physics in the Dilepton Channel with the CMS Detector at the Large Hadron Collider // Phys. At. Nucl. 2021. V. 84, No. 2. P. 184–189; Yad. Fiz. 2021. V. 84, No. 2. P. 143–148.
81. Savina M. V., Seitova D. Program of Searches with the CMS Detector for Signals from Multi-dimensional Low-Energy Gravity at the Large Hadron Collider // Phys. At. Nucl. 2021. V. 84, No. 2. P. 190–196; Yad. Fiz. 2021. V. 84, No. 2. P. 149–155.
82. Tumasyan A. et al. (CMS Collab.). Search for Heavy Resonances and Quantum Black Holes in  $e\mu$ ,  $e\tau$ , and  $\mu\tau$ . Final States in Proton–Proton Collisions at 13 TeV // J. High Energy Phys. 2023. V. 5. P. 227.
83. Marchevski R. (for the NA62 Collab.). New Result on the Search for the  $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu\bar{\nu}$  Decay at the NA62 Experiment at CERN // 40th Intern. Conf. on High Energy Physics (ICHEP-2020), Prague, 28 July – 7 Aug. 2020.
84. Gil E. C. et al. (NA62 Collab.). A Study of the  $K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu\gamma$  Decay // J. High Energy Phys. 2023. V. 9. P. 40.
85. Andreev Yu. M. et al. (NA64 Collab.). Search for a New B–L  $Z'$  Gauge Boson with the NA64 Experiment at CERN // Phys. Rev. Lett. 2022. V. 129, No. 16. P. 161801.
86. Andreev Yu. M. et al. (NA64 Collab.). Search for Light Dark Matter with NA64 at CERN // Phys. Rev. Lett. 2023. V. 131. P. 161801.
87. Ablikim M. et al. (BESIII Collab.). Tests of CP Symmetry in Entangled  $\Xi^0$ – $\Xi^0$  Pairs // Phys. Rev. D. 2023. V. 108. P. L031106.
88. Allakhverdyan V. A. et al. Neutrino Telescope in Lake Baikal: Present and Nearest Future // PoS ICRC2021. 2021. 002; doi: 10.22323/1.395.0002.
89. Аврорин А. В. и др. Глубоководный черенковский детектор в озере Байкал // ЖЭТФ. 2022. Т. 161, вып. 4. С. 476–496.

90. *Allakhverdyan V.A. et al. (Baikal-GVD Collab.)*. Diffuse Neutrino Flux Measurements with the Baikal-GVD Neutrino Telescope. // *Phys. Rev. D*. 2023. V. 107, No. 4. P. 042005; e-Print:2211.09447 [astro-ph.HE].
91. *Allakhverdyan V.A. et al. (Baikal-GVD Collab.)*. Search for Directional Associations between Baikal Gigaton Volume Detector Neutrino-Induced Cascades and High-Energy Astrophysical Sources // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 2023. V. 526, No. 1. P. 942–951; e-Print:2307.07327.
92. *Lubashevskiy A.* Search for the Coherent Elastic Neutrino-Nucleus Scattering and Other Rare Processes in  $\nu$ GeN Experiment at Kalinin Nuclear Power Plant // 29th Intern. Workshops on Weak Interactions and Neutrinos (WIN 2023), Zhuhai, China, June 3–8, 2023.
93. *Лубашевский А.В.* Результаты эксперимента  $\nu$ GeN по поиску когерентного рассеяния реакторных антинейтрино и других редких процессов // «Ядро-2023», 9–13 окт. 2023 г., Саров, Россия.
94. *DANSS Collab.* Search for Sterile Neutrinos at the DANSS Experiment // *Phys. Lett. B*. 2018. V. 787. P. 56–63.
95. *Skrobova N.* Measurements of the Absolute Reactor Antineutrino Energy Spectrum Dependence on the Fuel Composition // *Phys. At. Nucl.* 2023. V. 86. P. 544–550.
96. *Sveshnikova L.G. et al.* Status of the TAIGA Experiment: Gamma Astronomy // *Phys. At. Nucl.* 2023. V. 86, No. 9. P. 1–7; doi: 10.1134/S1063778823090247.
97. *Abusleme A. et al. (JUNO Collab.)*. The JUNO Experiment Top Tracker // *Nucl. Instr. Meth. A*. 2023. V. 1057. P. 168680.
98. *Acero M.A. et al. (NOvA Collab.)*. Adjusting Neutrino Interaction Models and Evaluating Uncertainties Using NOvA Near Detector Data // *Phys. Rev. Lett.* 2019. V. 123, No. 15. P. 151803.
99. *Acero M.A. et al. (NOvA Collab.)*. Improved Measurement of Neutrino Oscillation Parameters by the NOvA Experiment // *Phys. Rev. D*. 2022. V. 106, No. 3. P. 032004.
100. *Agostini M. et al. (Borexino Collab.)*. Seasonal Modulation of the  $^7\text{Be}$  Solar Neutrino Rate in Borexino // *Astropart. Phys.* 2017. V. 92. P. 21.
101. *Agostini M. et al. (Borexino Collab.)*. Limiting Neutrino Magnetic Moments with Borexino Phase-II Solar Neutrino Data // *Phys. Rev. D*. 2017. V. 96. P. 091103(R).
102. *Borexino Collab.* Comprehensive Measurement of  $pp$ -Chain Solar Neutrinos // *Nature*. 2018. V. 562. P. 505–510.
103. *Grozdanov D.N. et al.* // *Phys. At. Nucl.* 2020. V. 83, No. 3. P. 384–390.
104. *Berikov D. et al.* // *Phys. Rev. C*. 2021. V. 104, No. 2. P. 024607; doi: 10.1103/PhysRevC.104.024607.
105. *Jiang Haoyu et al.* // *Chin. Phys. C*. 2020. V. 44, No. 11.
106. *Zakharov M.A., Kulin G.V., Frank A.I.* // *Eur. Phys. J. D*. 2021. V. 75. P. 47.
107. *Chernyavsky S. et al.* // *Rev. Sci. Instrum.* 2022. V. 93. P. 123302; doi: 10.1063/5.0124833.
108. *Bosak A. et al.* // *Materials*. 2023. V. 16. P. 703; doi: 10.3390/ma16020703.
109. *Bulavin M.V. et al.* // *J. Surf. Invest.: X-ray, Synchrotron Neutron Techn.* 2022. V. 16, No. 1. P. 1–6; doi: 10.1134/S1027451022010037.
110. *Cong J. et al.* // *Nat. Commun.* 2018. V. 9. P. 2996.
111. *Kozlenko D.P. et al.* // *Phys. Rev. B*. 2022. V. 105. P. 094430.
112. *Kozlenko D.P. et al.* // *npj Quantum Mater.* 2021. V. 6. P. 19.
113. *Kichanov S.E. et al.* // *JINR News*. 2017. No. 1. P. 20–23.
114. *Kichanov S.E. et al.* // *Springer Nat. Appl. Sci.* 2019. V. 1. P. 1563.
115. *Bandarenka H. et al.* // *ChemNanoMat*. 2020. V. 7, No. 2. P. 141–149; doi: 10.1002/cnma.202000521.
116. *Arzumanyan G. et al.* // *J. Raman Spectrosc.* 2020. V. 1. P. 10; doi.org/10.1002/jrs.5844.
117. *Arzumanyan G. et al.* // *Int. J. Mol. Sci.* 2023. V. 24; doi.org/10.3390/ijms24065770.
118. *Ivankov O.I. et al.* // *Sci. Rep.* 2021. V. 11. P. 21990:1–9.
119. *Kurakin S.A. et al.* // *BBA — Biomembranes*. 2024. V. 1866. P. 184237:1–11.
120. *Dobrin I. et al.* // *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 2016. V. 26, No. 3. P. 1–4; doi: 10.1109/tasc.2016.2520086.
121. *Belushkin A.V. et al.* // *Instrum. Exp. Tech.* 2022. V. 65, No. 4. P. 539–550; doi: 10.1134/S0020441222050025.
122. *Ježkova L. et al.* // *Nanoscale*. 2018. V. 10. P. 1162.
123. *Hausmann M. et al.* // *Front. Phys.* 2020. V. 8. P. 578662.
124. Способ повышения частоты образования двунитевых разрывов ДНК в клетках человека при действии ионизирующих излучений в условиях влияния радиомодификаторов / Красавин Е.А., Борейко А.В., Куликова Е.А., Буланова Т.С., Тимошенко Г.Н., Чаусов В.Н. Патент 2699670 РФ. Оpubл. 09.09.2019. Бюл. № 25.
125. *Chausov V.N. et al.* // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2018. V. 15, No. 6. P. 700–710.

126. Способ повышения эффективности действия ионизирующих излучений на меланому / Замулаева И.А., Борейко А.В., Бугай А.Н., Каприн А.Д., Корякин С.Н., Красавин Е.А., Матчук О.Н., Мосина В.А., Селиванова Е.И., Чаусов В.Н. Патент 2774032 РФ. Оpubл. 14.06.2022. Бюл. №17.
127. Способ повышения эффективности действия протонной терапии на стволовые клетки меланомы / Матчук О.Н., Борейко А.В., Бугай А.Н., Замулаева И.А., Каприн А.Д., Корякин С.Н., Красавин Е.А., Мосина В.А., Селиванова Е.И., Соловьев А.Н., Чаусов В.Н., Якимова А.О. Патент 2798733 РФ. Оpubл. 23.06.2023. Бюл. №18.
128. *Борейко А.В. и др.* // Письма в ЭЧАЯ. 2023. Т. 20, №4. С. 698–708.
129. *Zamulaeva I.A. et al.* Radiobiological Effects of the Combined Action of 1- $\beta$ -D-Arabinofuranosylcytosine and Proton Radiation on B16 Melanoma *in vivo* // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2023. V.20, No.1. P.63–75.
130. *Kowalska A., Nasonova E., Kutsalo P., Czernski K.* Chromosomal Radiosensitivity of Human Breast Carcinoma Cells and Blood Lymphocytes Following Photon and Proton Exposures // *Radiat. Environ. Biophys.* 2023. V.62. P.151–160.
131. *Bláha P. et al.* // *Mutat. Res.* 2017. V.803–805. P.35–41.
132. *Bláha P. et al.* // *Front. Phys.* 2021. V.8. P.584326.
133. *Severyukhin Yu.S. et al.* Comparative Analysis of Behavioral Reactions and Morphological Changes in the Rat Brain after Exposure to Ionizing Radiation with Different Physical Characteristics // *Cell. Mol. Neurobiol.* 2022. V.43. P.339–353.
134. *Kolesnikova I.A. et al.* The Effects of Whole Body Gamma Irradiation on Mice, Age-Related Behavioral, and Pathophysiological Changes // *Cell. Mol. Neurobiol.* 2023. V.43, No. 7. P.3723–3741.
135. *Batmunkh M. et al.* Optimized Neuron Models for Estimation of Charged Particle Energy Deposition in Hippocampus // *Phys. Med.* 2019. V.57. P.88–94.
136. *Bayarchimeg L. et al.* Evaluation of Radiation-Induced Effects in Membrane Ion Channels and Receptors // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2019. V.16. P.54–62.
137. *Batova A.S. et al.* Effect of Mutant NMDA Receptors on the Oscillations in a Model of Hippocampus // *J. Bioinform. Comput. Biol.* 2019. V.17, No.1. P.1940003.
138. *Gordeev I.S., Timoshenko G.N.* A New Type of Ground-Based Simulator of Radiation Field Inside a Spacecraft in Deep Space // *Life Sci. Space Res.* 2021. V.30. P.66–71.
139. Устройство моделирования на пучках тяжелых ионов высокой энергии полей смешанного излучения для целей экспериментальной радиобиологии / Тимошенко Г.Н., Гордеев И.С. Патент 2761376 РФ. Оpubл. 07.12.2021. Бюл. №34.
140. *Гордеев И.С.* Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ. (ОИЯИ). №2023667527; заявл. 07.08.2023; опубл. 15.08.2023, 2023666479 (РФ).
141. *Timoshenko G.N., Belvedersky M.I.* Fluence-to-Effective Dose Conversion Coefficients for Male Astronauts // *J. Radiol. Prot.* 2019. V.39, No.2. P.511–521.
142. *Timoshenko G.N., Gordeev I.S.* Simulation of Radiation Field inside Interplanetary Spacecraft // *J. Astrophys. Astron.* 2020. V.41. P. 5.
143. *Тимошенко Г.Н.* Радиационная защита высокоэнергетических ускорителей. Дубна: ОИЯИ, 2022. 111 с.
144. *Saladino R. et al.* Meteorite Assisted Phosphorylation of Adenosine under Proton Irradiation Conditions // *Chem. Eur. J.* 2019. V.25. P.3181–3189; doi/full/10.1002/syst.201900039.
145. *Bizzarri B.M. et al.* High-Energy Proton-Beam-Induced Polymerization/Oxygenation of Hydroxynaphthalenes on Meteorites and Nitrogen Transfer from Urea: Modeling Insoluble Organic Matter? // *Chem. Eur. J.* 2020. V.26. P.14919–14928.
146. *Bizzarri B.M. et al.* Meteorite-Catalyzed Intermolecular Trans-Glycosylation Produces Nucleosides under Proton Beam Irradiation // *RSC Adv.* 2021. V.11, No.31. P.19258–19264.
147. *Розанов А.Ю., Хувер Р.Б., Красавин Е.А., Самылина О.С., Рюмин А.К., Капралов М.И., Сапрыкин Е.А., Афанасьева А.Н.* Метеорит Оргей (атлас микрофоссилий) / Отв. ред. А.Ю.Розанов. М.: ПИН РАН, 2020. 130 с., 5 ил., 40 фототаблиц. На рус. и англ. яз.
148. *Будагов Ю.А., Глаголев В.В., Ляблин М.В. и др.* Позиционно-чувствительная регистрация пятен одномодового лазерного луча с использованием метода делительных пластинок // Письма в ЭЧАЯ. 2022. Т.19, №6. С.585–615.
149. *Zarubin M. et al.* First Transcriptome Profiling of *D. Melanogaster* after Development in a Deep Underground Low Radiation Background Laboratory. <https://journals.plos.org/plosone/article/authors?id=10.1371/journal.pone.0255066>.
150. *Frontasyeva M. et al.* Mosses as Biomonitors of Air Pollution: 2015/2016 Survey on Heavy Metals, Nitrogen and POPs in Europe and Beyond. Dubna: JINR, 2020. 136 p.



151. *Badawy W.M., Dmitriev A.Y., El Samman H., El-Taher A., Blokhin M.G., Rammah Y.S., Madkour H.A., Salama S., Budnitskiy S.Y.* Elemental Composition and Metal Pollution in Egyptian Red Sea Mangrove Sediments: Characterization and Origin // *Mar. Pollut. Bull.* 2024. V.198. P.115830; <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115830>.
152. *Badawy W., Elsenbawy A., Dmitriev A., El Samman H., Sheheglov A., El-Gamal A., Kamel N.H.M., Mekewi M.* Characterization of Major and Trace Elements in Coastal Sediments along the Egyptian Mediterranean Sea // *Mar. Pollut. Bull.* 2022. V.177. P.113526; <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.113526>.
153. <https://micc.jinr.ru/> — Многофункциональный информационно-вычислительный комплекс.
154. *Baginyan A. et al.* Current Status of the MICC: An Overview // *CEUR Workshop Proc.* 2021. V.3041. P.1–6.
155. *Baginyan A. et al.* JINR Network Infrastructure for Megascience Projects // 2020 Intern. Sci. and Techn. Conf. Modern Computer Network Technologies (MoNeTeC), Moscow, Russia, 2020. P.1–5; doi: 10.1109/MoNeTeC49726.2020.9258004.
156. *Baginyan A. et al.* JINR Grid Infrastructure: Status and Plans // *Proc. of the 10th Intern. Conf. “Distributed Computing and Grid Technologies in Science and Education” (GRID’2023)*, Dubna, Russia, July 3–7, 2023. *Phys. Part. Nucl.* (submitted).
157. *Balashov N. et al.* Changes and Challenges at the JINR and Its Member States Cloud Infrastructures // *Proc. of the 10th Intern. Conf. “Distributed Computing and Grid Technologies in Science and Education” (GRID’2023)*, Dubna, Russia, July 3–7, 2023. *Phys. Part. Nucl.* (submitted).
158. <https://dice.jinr.ru/> — РИВС: распределенная информационно-вычислительная среда.
159. <http://hlit.jinr.ru/> — Гетерогенная платформа «HybriLIT».
160. *Belyakov D. et al.* “Govorun” Supercomputer for JINR Tasks // *CEUR Workshop Proc.* 2020. V.2772. P.1–12.
161. *Podgainy D.V. et al.* IT Solutions for JINR Tasks on the “Govorun” Supercomputer // *CEUR Workshop Proc.* 2021. V.3041. P.612–618.
162. *Butenko Yu. et al.* ML/DL/HPC Ecosystem of the HybriLIT Heterogeneous Platform (MLIT JINR): New Opportunities for Applied Research // *PoS DLCP2022.* 2022. P.027.
163. *Korenkov V., Pelevanyuk I., Tsaregorodtsev A.* Integration of the JINR Hybrid Computing Resources with the DIRAC Interware for Data Intensive Applications // *Commun. Comp. Inform. Sci.* 2020. V.1223. P.31–46; doi:10.1007/978-3-030-51913-1\_3.
164. *Gertsenberger K., Pelevanyuk I.* VM@N Run 8 Data Production on a Distributed Infrastructure with DIRAC // *Proc. of the XXVII Intern. Sci. Conf. of Young Scientists and Specialists (AYSS-2023)*, Dubna, Russia, 30 Oct.–3 Nov., 2023. *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2024. V.21, No. 4.
165. *Кашунин И.А., Мицын В.В., Стриж Т.А.* Принципы работы системы аккаунтинга грид-сайтов в ОИЯИ // *Письма в ЭЧАЯ.* 2022. Т.19, № 6(245). С. 660–668.
166. <https://digital.jinr.ru/> — Цифровая экосистема ОИЯИ.
167. *Lyakhov D.A., Gerdt V.P., Michels D.L.* Algorithmic Verification of Linearizability for Ordinary Differential Equations // *Proc. of Intern. Symp. on Symbolic and Algebraic Computation (ISSAC 2017)*. ACM Press. 2017. P.285–292.
168. *Kircher M. et al.* Kinematically Complete Experimental Study of Compton Scattering at Helium Atoms near the Threshold // *Nat. Phys.* 2020. V.16. P.756–760.
169. *Chuluunbaatar O. et al.* KANTBP 3.1: A Program for Computing Energy Levels, Reflection and Transmission Matrices, and Corresponding Wave Functions in the Coupled-Channel and Adiabatic Approaches // *Comput. Phys. Commun.* 2022. V.278. P.108397:1–14.
170. *Ужвинский А.В.* Интеллектуальная платформа экологического мониторинга // *Открытые системы. СУБД.* 2021. №02. С.21–23.
171. *Uzhinskiy A.* Advanced Technologies and Artificial Intelligence in Agriculture // *Appl. Math.* 2023. V.3, No.4. P.799–813.
172. *Бутенко А.В. и др.* Интеллектуальная система дистанционного управления давлением и расходом жидкого азота в криогенной системе сверхпроводящих магнитов: Программно-аппаратная платформа // *Письма в ЭЧАЯ.* 2023. Т.20, № 2(247). С.183–199.
173. *Kolesnikova I.A. et al.* Information System for Radiobiological Studies // *CEUR Workshop Proc.* 2020. V.2743. P.1–6.
174. *Рахмонов И.Р., Рахмонова А.Р., Стрельцова О.И., Зуев М.И.* Python-инструментарий для моделирования динамики джозефсоновского перехода под воздействием внешнего излучения. <http://studhub.jinr.ru:8080/jjbook>.

**Избранные** научные результаты Объединенного института ядерных исследований  
ИЗД в 2017–2023 гг. [Электронное издание]. — Дубна: ОИЯИ, 2024. — 73 с.

ISBN 978-5-9530-0621-7

**Ответственные за подготовку:**

*С. Н. Неделько*  
*Б. М. Старченко*  
*Ю. Г. Шиманская*

**Отчет подготовили:**

*А. В. Андреев*  
*О. Ю. Дереновская*  
*А. В. Карпов*  
*И. В. Кошлань*  
*И. В. Симоненко*  
*Е. А. Федорова*  
*Д. Худоба*  
*А. П. Чеплаков*

**Фото:**

*И. А. Лапенко*  
*Е. В. Пузыниной*

Редактор *Е. В. Калининкова*  
Компьютерная верстка *И. Г. Андреевой, В. А. Жбанковой*

Издательский отдел  
Объединенного института ядерных исследований  
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.