ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

70 ШТРИХОВ К ПОРТРЕТУ

НАУКА
СБЛИЖАЕТ
НАРОДЫ
70
ОИЯИ

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

70 ШТРИХОВ К ПОРТРЕТУ

ДУБНА
2026

Составители:

М. В. Авдеев, Н. Н. Агапов, А. В. Андреев, Н. В. Антоненко, П. Ю. Апель, Е. А. Бадави, А. Баймуханова, А. М. Балагуров, В. А. Бедняков, О. В. Белов, И. А. Белолаптиков, Г. Д. Бокучава, А. В. Борейко, А. Н. Бородин, А. Н. Бугай, М. В. Булавин, А. В. Бутенко, А. В. Виноградов, Н. Н. Войтишин, Б. Н. Гикал, В. В. Глаголев, В. М. Головатюк, Ю. А. Горнушкин, К. Н. Гусев, А. В. Гуськов, Ю. И. Давыдов, И. И. Денисенко, О. Ю. Дереновская, И. В. Елецких, А. С. Жемчугов, И. В. Житников, Н. Н. Зимин, Д. Р. Зинатулина, И. Зиньковская, М. Г. Иткис, Д. И. Казаков, Д. В. Каманин, Г. А. Карамышева, В. Ю. Каржавин, В. Д. Кекелидзе, С. Е. Кичанов, Д. П. Козленко, Л. Д. Колупаева, Ю. Н. Копач, В. В. Кореньков, Л. Костов, И. В. Кошлань, Е. В. Кравченко, С. О. Кривонос, А. И. Куклин, О.-А. Куликов, Н. Кучерка, И. Ф. Ленский, П. Н. Лобачевский, А. В. Лубашевский, Е. В. Лычагин, М. В. Ляблин, А. И. Малахов, В. А. Матвеев, Г. В. Мицын, Б. Мухаметулы, Д. В. Наумов, С. Н. Неделько, А. Ю. Незванов, А. Г. Ольшевский, В. А. Осипов, И. Падрон, Д. В. Подгайный, А. Г. Попеко, В. А. Рачков, С. В. Розов, Н. А. Русакович, А. А. Сидорин, А. О. Сидорин, С. И. Сидорчук, И. В. Симоненко, В. Р. Ской, О. Ю. Смирнов, Т. А. Стриж, О. В. Теряев, Г. В. Трубников, М. Ю. Туманова, Ю. А. Усов, Н. В. Устинов, Д. В. Философов, В. И. Фурман, Д. Худоба, З. Цамалаидзе, А. П. Чеплаков, В. Н. Швецов, Г. А. Шелков, М. В. Ширченко, С. В. Шматов, С. Л. Яковенко, Е. А. Якушев

Объединенный институт ядерных исследований: 70 штрихов
О29 к портрету. — Дубна: ОИЯИ, 2026. — 585 с.

ISBN 978-5-9530-0664-4

© Объединенный институт
ядерных исследований, 2026

ОТ СОСТАВИТЕЛЕЙ

26 марта 2026 г. исполняется 70 лет со дня образования Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ) — международной межправительственной научно-исследовательской организации. Те, кто достаточно тесно соприкоснулся с ОИЯИ и тем более имел счастье работать в нем, именуют его, мысленно и вслух, коротко и просто — наш Институт.

Что означает семидесятилетие для нашего Института — глобальной международной организации, объединившей многотысячное сообщество профессионалов, посвятивших свою жизнь нелегкому служению науке и представляющих разные поколения ученых, инженеров, рабочих из десятков стран мира?

Наверное, оно означает и подведение итогов, и мечты о будущем, и обостренное коллективное самоосознание и самоощущение, рефлексию на специально обозначенное мгновение между прошлым и будущим в общей творческой работе, которой нет конца.

Первая четверть XXI в. охарактеризовалась бурными изменениями в общемировых тенденциях в научном познании фундаментальных свойств материи, в науке в целом, активизацией глобальных социально-экономических и геополитических процессов. Все это в целом составляет драматически изменчивый ландшафт, в котором наш Институт живет и поступательно развивается. Изменчивость этого ландшафта не удивляет, но порой порождает серьезные вызовы для нашего Института. Преодоление вызовов всякий раз было основано на неукоснительном исполнении Институтом миссии объединения ученых разных стран для проведения масштабных научных исследований.

Эта книга — целостный автопортрет Института, собранный строка за строкой из многих научных эпизодов так, как это видится самому сообществу ОИЯИ. Это — взгляд изнутри, который не претендует на изложение научной истории ОИЯИ в XXI в., а, скорее, является коллективным свидетельством для будущей работы историков науки — ведь историю нашего Института еще предстоит исследовать и написать. Речь в книге идет исключительно о науке, а социально-экономические и геополитические обстоятельства оставлены вне фокуса. Вдумчивый, осведомленный и благонамеренный читатель легко дорисует картину самостоятельно.

Объединенный институт ядерных исследований образован в 1956 г. с целью объединения материальных и интеллектуальных ресурсов 11 государств, вошедших в его состав, для исследования фундаментальных свойств материи. Создание ОИЯИ отвечало послевоенному стремлению государств перейти к мирному созиданию и интегрировать научные потенциалы многих стран для реали-

зации программ научных исследований такого масштаба и сложности, который немыслим на национальном уровне, но необходим для достижения национальных целей развития каждого из государств-членов.

Членами ОИЯИ сегодня являются 15 государств Европы, Азии, Африки и Латинской Америки. На правительственном уровне заключены соглашения о сотрудничестве с 8 государствами. Среди нескольких десятков межправительственных научных организаций ОИЯИ занимает уверенное место в тройке лидеров. В ноябре 2021 г. Арабская Республика Египет стала государством-членом ОИЯИ. В 2023–2025 гг. заключены соглашения правительственного уровня о координации научных исследований с Мексиканскими Соединенными Штатами, Китайской Народной Республикой и Федеративной Республикой Бразилией, укрепилось за эти годы сотрудничество с Южно-Африканской Республикой и Республикой Сербией. На высоком уровне находится сотрудничество с научными организациями Индии. ОИЯИ продолжает плодотворное участие в научных коллаборациях на базе ЦЕРН. В 2023 г. было обновлено генеральное соглашение ОИЯИ и МАГАТЭ. Развиваются контакты с Арабским агентством по атомной энергии. ОИЯИ активно взаимодействует с международными организациями и объединениями, среди которых особое место занимают ЮНЕСКО, IUPAP и IUPAC. В целом сотрудничество ОИЯИ охватывает сотни научных организаций и университетов в более чем 60 странах мира. В состав Ученого совета и программно-консультативных комитетов ОИЯИ, составляющих экспертную базу Института, сейчас входит более 80 ведущих ученых из 35 стран, расположенных на четырех континентах. Подготовка высококвалифицированных кадров для стран-участниц, современная образовательная деятельность всех уровней, содействие превращению результатов творческого труда ученых и специалистов в инновации, распространение в обществе информации о достижениях современной науки и их влиянии на социально-экономическое развитие человечества — важнейшие составляющие для достижения Институтом поставленных задач.

В заключение хотелось бы привести цитату из Софийской декларации о ценности международной научно-технической интеграции, принятой Комитетом полномочных представителей в 2021 г. на его ноябрьской сессии в г. София (Болгария): «Принимаем настоящую декларацию и приглашаем заинтересованные государства и научные организации, разделяющие и продвигающие ценность развития международной межправительственной научно-технической интеграции, присоединиться к многостороннему научно-техническому и образовательному сотрудничеству, реализуемому ОИЯИ ради мирного научно-технологического, социально-экономического и культурного развития стран на всех континентах планеты Земля — нашего общего дома».

ФИЗИКА ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

Программа научно-исследовательских работ ОИЯИ в области физики высоких энергий включает несколько основных направлений, главным из которых является создание и эксплуатация комплекса сверхпроводящих колец на встречных пучках тяжелых ионов — комплекса NICA (Nuclotron based Ion Collider fAcility), расположенного в Лаборатории физики высоких энергий и позволяющего проводить фундаментальные и прикладные исследования. Цель этого проекта — изучение ядерной материи, образующейся в столкновениях тяжелых ионов, ее фазовых превращений в экстремальных условиях больших температур и плотностей, а также исследование спиновой структуры протона и нейтрона. В состав комплекса NICA входят инжекционный блок, цепь ускорителей, включая модернизированный Нуклотрон, бустер и коллайдер, экспериментальные установки, инженерная инфраструктура и криогенная станция.

Фундаментальные исследования в ОИЯИ ведутся в рамках широкого международного сотрудничества, которое охватывает участие в экспериментах на ускорителях NICA и во «внешних» экспериментах, проводимых в ведущих мировых научных центрах, таких как ЦЕРН (Женева, Швейцария), FNAL (Батавия, США), BNL (Брукхейвен, США), ИФВЭ АН КНР (Пекин, Китай), и ряде других.

СОЗДАНИЕ НУКЛОТРОНА

В начале 1970-х гг. в Лаборатории высоких энергий началось проектирование нового ускорительного комплекса, призванного обеспечить физиков базой для проведения «домашних» экспериментов на передовом уровне науки. Предлагалась программа исследований, ориентированная на длительную перспективу, основными направлениями которой были исследования в области релятивистской ядерной физики. Также планировалось изучение прохождения релятивистских многозарядных частиц через вещество с целью разработки мер по обеспечению безопасности космонавтов и космических аппаратов, а при формировании системы пучков нового комплекса предполагалось предусмотреть потребность в медико-биологических пучках. Эти задачи не потеряли своей актуальности и полвека спустя, и уже на новом уровне решаются на установках BM@N, MPD и в специализированных экспериментальных зонах для исследований по программе коллаборации ARIADNA (рис. 1).

Ускорительный комплекс, включавший в себя линейный и два циклических ускорителя, получил название «Нуклотрон». Концепция основного кольца ускорителя базировалась на самых передовых в то время тенденциях проектирования и создания ускорителей. В отличие от серпуховского синхротрона предлагалось использовать магнитную систему с разделенными функциями (формирование орбиты осуществляется дипольными магнитами с однородным поворотным полем, а фокусировка пучка — специализированными квадрупольными магнитами), как это было реализовано в сооружаемых тогда гигантских синхротронах во FNAL и ЦЕРН. В качестве дипольных магнитов — сверхпроводящие магниты типа «cos θ» с максимальным значением индукции поля до 6 Тл. При этом в кабельном туннеле синхрофазотрона можно было разместить синхротрон с магнитной жесткостью 150 Тл·м, что соответствует энергии тяжелых ионов до 50 ГэВ/нуклон. Промежуточное кольцо ускорителя, размещаемое в том же туннеле, должно было обеспечить ускорение не полностью «ободранных» ионов до энергии примерно 750 МэВ/нуклон, что обеспечивало эффективность перезарядки на уровне 90 % и выше. Для обеспечения эффективной работы комплекса предполагалось систему управления создавать с широким использованием электронных вычислительных машин, в соответствии с популярной в те годы концепцией «кибернетического» ускорителя. Ожидаемая интенсивность ускоренного пучка оценивалась как $10^{12}/Z$ ядер в секунду (Z — зарядовое число ядра).

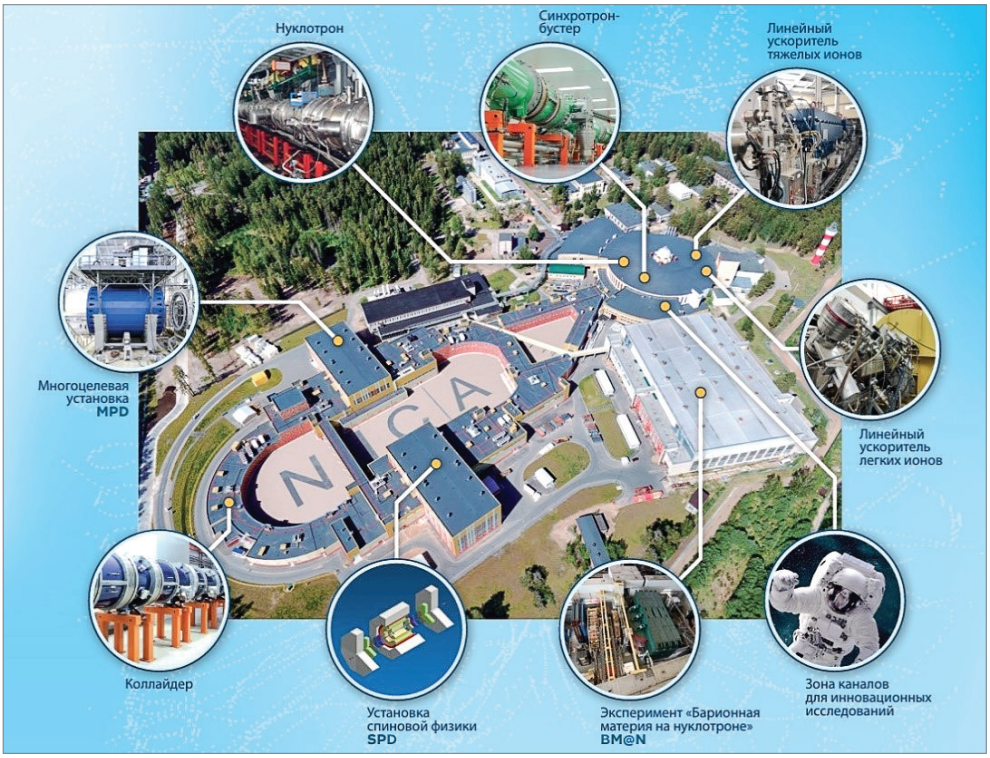


Рис. 1. Инфраструктура комплекса NICA

Этот проект (рис. 2) был опубликован как сообщение ОИЯИ[1] и доложен А. М. Балдиным на ряде конференций, в том числе и международных. Однако уже первые попытки проектирования сильнополевых магнитов показали, что стоимость их разработки и изготовления на порядки превышает финансовые возможности лаборатории, а 6-Тл магниты на тот момент были еще за пределами технических возможностей человечества.

В 1973 г. Игорь Александрович Шелаев предложил радикально упростить конструкцию и удешевить производство магнитов за счет использования для формирования поля в диполях ярма, изготавливаемого из железа и имеющего форму оконной рамы. Обмотка изготавливается из кабеля резерфордовского типа — кабеля прямоугольного сечения, скрученного из сверхпроводящих проводов и обернутого электроизоляционным материалом. Для охлаждения магнит погружается в ванну с кипящим гелием. Цена за это упрощение — снижение максимально достижимого поля, которое предполагалось получить на уровне 2,2–2,5 Тл. В 1974 г. в лаборатории был спроектирован, изготовлен и успешно испытан на созданном для этой цели криогенном стенде первый модельный магнит типа «оконная рама» со

[1] *Алексеев В. П., Балдин А. М., Безногих Ю. Д. и др.* Перспективы исследований по релятивистской ядерной физике в ЛВЭ ОИЯИ (соображения по развитию ускорительного комплекса). Сообщение ОИЯИ 9-7148. Дубна, 1973.

сверхпроводящей обмоткой и погружной системой охлаждения. «Ахиллесовой пятой» этого относительно простого в изготовлении и недорогого магнита была его система охлаждения: магнит размещался в сложном и ненадежном криостате с большим объемом жидкого гелия внутри разборного гелиевого сосуда. Насколько этот недостаток является критичным, мог показать только опыт эксплуатации реального ускорителя с магнитной системой на основе таких магнитов.

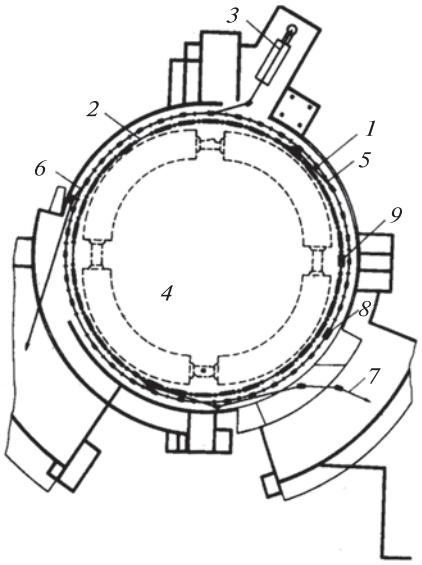


Рис. 2. Схема Нуклотрона — криогенного ускорителя релятивистских ядер: 1 — промежуточное кольцо ускорителя (ПКУ); 2 — основное кольцо ускорителя (ОКУ); 3 — инжектор; 4 — существующий синхрофазотрон; 5 — система вывода пучка из ПКУ и ввода в ОКУ; 6 — вывод пучка ядер из ПКУ в экспериментальный павильон № 1; 7 — вывод пучка из ОКУ в экспериментальный павильон № 2; 8, 9 — ускоряющие резонаторы

Потребовалось еще одно существенное изменение первоначальной концепции ускорительного комплекса, так как уже в ходе предварительной проработки конструкции стало ясно, что два ускорителя — промежуточный и основной — разместить в существующем туннеле физически невозможно. По рекомендации совещания экспертов из стран-участниц ОИЯИ, состоявшегося в 1977 г., коллективом специалистов из ОИЯИ, ИАЭ, НИИЭФА и МРТИ был разработан проект ускорительного комплекса тяжелых ионов (УКТИ)[2], предполагавший поэтапное его сооружение. На первом этапе предполагалось запустить циклический ускоритель первой ступени (ТИС — тяжелоионный синхротрон), а доускорение ионов проводить в синхрофазотроне, которому, в дальнейшем, придет на смену Нуклотрон. Так началась история разработки бустерного синхротрона, в ходе которой он неоднократно менял и тип магнитной структуры, и параметры, и место расположения.

В качестве возможного прототипа бустера и для проверки эксплуатационных свойств магнитов погружного типа в 1979 г. был разработан проект небольшого ускорителя на основе магнитов погружного типа, названного СПИН (сверхпроводящий инжектор Нуклотрона). Этот ускоритель с необходимыми инженерными системами располагался в здании № 205. В качестве инжектора планировалось использовать ускоритель прямого действия на основе импульсного трансформатора с максимальным напряжением 750 кВ. Проект не был завершен, но в ходе его реализации удалось накопить

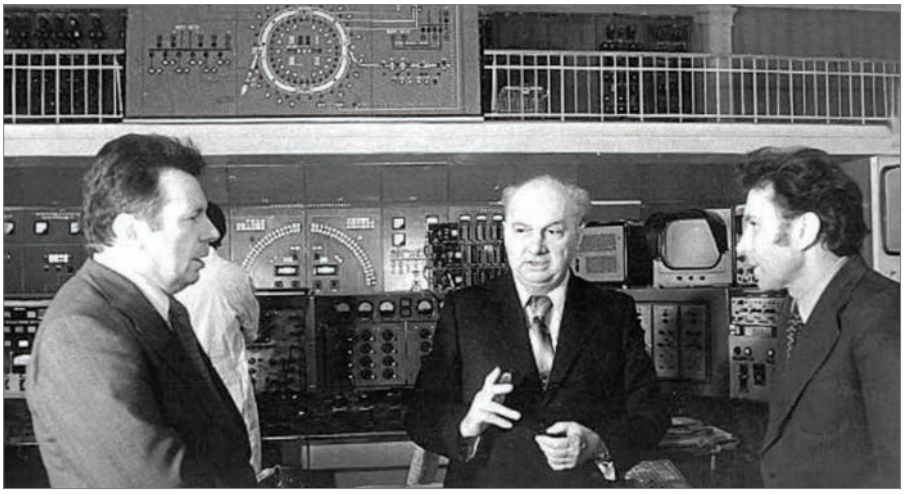
[2] *Балдин А. М. и др.* Ускорительный комплекс тяжелых ионов. Сообщение ОИЯИ 9-1796. Дубна, 1978.

Установка СПИН. На переднем плане — И. А. Шелаев и В. С. Алфеев

неоценимый опыт в проектировании, изготовлении и тестировании магнитов, а это потребовало существенного развития криогенной техники.

Одновременно с этими работами продолжались и усилия по усовершенствованию конструкции сверхпроводящих магнитов. В 1977 г. Анатолий Алексеевич Смирнов предложил выполнить обмотку возбуждения из трубчатого сверхпроводника с каналом для прокачки жидкого гелия. Под его руководством был разработан и изготовлен модельный дипольный магнит с ярмом типа «оконная рама» с габаритами и размерами рабочей апертуры, близкими к диполям СПИНа. Магнит получил название ЦСД-1 (циркуляционный сверхпроводящий диполь). В процессе его испытаний были сформулированы все необходимые требования к трубчатому кабелю и родилась его технологичная конструкция с использованием выпускаемых промышленностью компонентов. К концу 1983 г. были созданы и испытаны полномасштабные диполи ЦСД-2 и ЦСД-3. Так появились магниты, получившие в дальнейшем название магниты типа «Дубна», или магниты «нуклотронного» типа[3]. Это магниты, способные работать как в цикле с темпом роста поля до 8 Тл/с, так и с длинными «столами», обеспечивая длительную растяжку при медленном выводе и возможность проведения экспериментов на циркулирующем пучке в режимах работы с внутренней мишенью или на встречных пучках. Сравнительно малое количество гелия в магнитной системе ускорителя и высокое значение допускаемого давления в охлаждающих каналах магнитов обеспечивают системе высокую безопасность в аварийных режимах и при быстрых отеплениях.

[3] *Смирнов А. А.* Нуклотрон — новая технология сверхпроводящей магнитной системы синхротрона // ЭЧАЯ. 2001. Т. 32, вып. 1. С. 96–142.



На пульте управления синхрофазотрона. А. А. Смирнов, А. М. Балдин, И. Б. Иссинский

Следующей целью были сборка и испытания суперпериода (октанта) магнитно-криостатной системы Нуклотрона для проверки принятых технических решений и подтверждения возможности устойчивого криостатирования большого количества магнитов, параллельно подключенных к гелиевым магистралям.

В январе 1986 г. был утвержден рабочий проект «Реконструкция магнитной системы синхрофазотрона на сверхпроводящую — Нуклотрон». Его руководителями были назначены директор лаборатории А. М. Балдин и главный инженер Л. Г. Макаров.

Л. Г. Макаров.

Открытие мемориальной доски к 90-летию со дня его рождения. 2013 г.

Леонид Григорьевич Макаров стал настоящей душой проекта: благодаря его неисчерпаемой энергии, способности поддержать энтузиазм в коллективе, в кратчайшие сроки — с 1987 по 1993 г. — были запущены в серийное производство, изготовлены и прошли комплексные индивидуальные испытания на специально созданном стенде все секции дипольных и квадрупольных магнитно-криостатных модулей Нуклотрона. В феврале 1990 г. успешно проведены испытания октанта магнитной системы Нуклотрона — цепочки из 16 секций криогенно-магнитных модулей, соединенных последовательно 12 дипольных и 4 квадрупольных магнитов. Охлаждение от комнатной до гелиевой температуры длилось 17 часов и осуществлялось с помощью установки КГУ-1600/4,5, расположенной в корпусе № 205.

Создание и запуск сверхпроводящих ускорителей потребовали существенного развития технологии производства жидкого гелия. К 1991 г. ЛВЭ имела четыре действующие установки КГУ-1600/4,5. Три из них, объединенные в единую систему криогенного обеспечения Нуклотрона и способные работать на общий коллектор выдачи жидкого гелия потребителю, обеспечивали суммарную производительность 1500 л/ч. По предложению руководства Оренбургского гелиевого завода было налажено совместное производство жидкого гелия для транспортировки в автомобильных контейнерах вместимостью 40 000 л. В 1993 г. было заполнено и отправлено на экспорт 32 контейнера, т. е. получено более 1 миллиона литров жидкого гелия. Такое дополнительное использование криогенной системы Нуклотрона обеспечило приток внебюджетных финансовых средств, которые помогли завершить создание нового ускорителя в чрезвычайно трудных экономических условиях 1992–1993 гг.

Первые обороты пучка в Нуклотроне были получены в марте 1993 г., после чего последовал напряженный период настройки и оптимизации режимов работы ускорителя. Работа осложнялась тем, что из-за финансовых ограничений проект был реализован не в полном объеме: в неполной комплектации была запущена система диагностики пучков, отсутствовала специализированная система электропитания, многие системы были выполнены на уровне действующих макетов.

В первые годы существования Нуклотрона физические исследования проводились на станции внутренних мишеней. В 1999 г. была создана система медленного вывода пучков из Нуклотрона в здание № 205, начались эксперименты на фиксированных мишенях[4]. В 2002 г. в Нуклотроне был ускорен поляризованный пучок дейтронов. В настоящее время, работая совместно с бустером, он является основным ускорителем комплекса NICA, обеспечивая выполнение фундаментальных и прикладных исследований. Его магнитная система исправно служит уже более 30 лет, и, хотя существенной деградации параметров не наблюдается, приближается срок ее замены на более современную. Работы в этом направлении ведутся в рамках проекта «Новый Нуклотрон».

[4] *Смирнов А. А., Коваленко А. Д.* Нуклотрон — сверхпроводящий ускоритель ядер в ЛВЭ ОИЯИ (создание, работа, развитие) // Письма в ЭЧАЯ. 2004. Т. 1, № 6 (123). С. 11–40.

Общий вид Нуклотрона

Испытание элементов вывода пучка из Нуклотрона на криогенном испытательном стенде. А. М. Балдин, Г. Г. Ходжибагиян. 1999 г.

Несмотря на тяжелые экономические условия, в Дубне был создан современный специализированный ускоритель релятивистских ядер на энергию до 6 ГэВ/нуклон. Нуклотрон был первым в Европе ускорителем на основе сверхпроводимости для исследования релятивистских ядер. Создание такого ускорителя позволило продолжить физические исследования с релятивистскими ядрами, начатые на синхрофазотроне, как в направлении фундаментальной науки, так и в прикладной области. Был получен ряд важных

физических результатов, необходимых для понимания строения материи, для применения ядерных пучков в медицине, в энергетике, радиобиологии и исследовании радиационной стойкости элементов электроники.

РОЖДЕНИЕ РЕЛЯТИВИСТСКОЙ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ. ЭКСПЕРИМЕНТЫ НА НУКЛОТРОНЕ

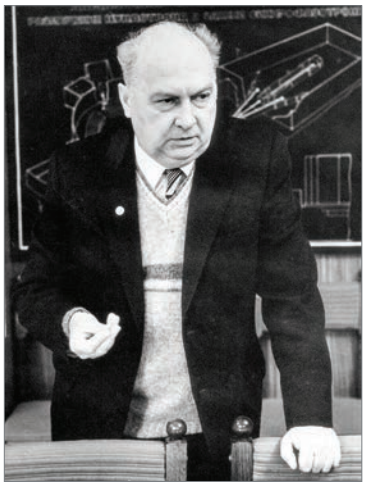
Одним из важных направлений развития современной физики частиц и ядер является релятивистская ядерная физика. Это направление зародилось в начале 1970-х гг. в связи с необходимостью решения ряда практических задач, а также благодаря некоторым теоретическим разработкам и успехам в ускорении ядер до релятивистских скоростей в Дубне (СССР) и Беркли (США). Практический интерес, в первую очередь, был вызван развитием космических исследований. Изучение влияния космического излучения, в котором преобладают релятивистские ядра, на биологические объекты и электронику особенно важно для обеспечения безопасности пилотируемых космических полетов. Знание законов взаимодействия релятивистских ядер необходимо и с точки зрения построения моделей образования и развития Вселенной, а также для изучения внутреннего строения звезд. В последнее время релятивистскими ядрами заинтересовались и энергетики в надежде реализовать идею создания безопасного ядерного реактора, управляемого пучками заряженных частиц, а также идею уничтожения ядерных отходов под действием пучков заряженных частиц и ядер.

Релятивистскую ядерную физику можно определить как область ядерной физики, в которой изучаются взаимодействия ядер при условии, что $p^2/m^2 \gg 1$, где p и m — соответственно импульс и масса взаимодействующих объектов.

Первые эксперименты, имеющие отношение к релятивистской ядерной физике в ОИЯИ, были выполнены в Лаборатории ядерных проблем в конце 1950-х гг. Измерялись импульсные спектры вторичных частиц в зависимости от величины магнитного поля отклоняющего магнита. Работа выполнялась под руководством М. Г. Мещерякова. В результате был обнаружен процесс, заключающийся в том, что протоны с энергией 675 МэВ выбивают из различных ядер (Li, Be, C, O) наиболее слабосвязанные ядра — дейтроны. Это было очень неожиданно, так как в то время господствовало утверждение, что упругие и неупругие процессы взаимодействия быстрых протонов происходят с отдельными нуклонами, входящими в состав ядер.

Обычно на вопрос о возможности передачи большой энергии составным ядром отдельному нуклону отвечали отрицательно: выдвигались соображения о «рыхлости» ядра, о малой вероятности концентрации энергии группы нуклонов на одном нуклоне. Эта проблема была впервые рассмотрена А. М. Балдиным в работе[5], в которой им были сделаны определенные предсказания на основе анализа экспериментальных данных и дан положи-

[5] *Балдин А. М.* // Краткие сообщения по физике ФИАН. М., 1971. С. 35.



Директор Лаборатории высоких энергий А. М. Балдин

Руководитель работ по открытию ядерного кумулятивного эффекта В. С. Ставинский

тельный ответ на поставленный вопрос. Требовалось экспериментальное подтверждение такого вывода.

Образование вторичных частиц при взаимодействии релятивистских ядер с участием группы нуклонов получило название ядерного кумулятивного эффекта. В 1970 г. на синхрофазотроне в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ в Дубне были ускорены простейшие ядра — дейтроны до энергии 4,5 ГэВ/нуклон[6]. Наличие дейтронного пучка в Дубне позволило провести первые эксперименты с релятивистскими ядрами. Ядерный кумулятивный эффект впервые наблюдался[7] на синхрофазотроне группой авторов под руководством В. С. Ставинского.

Кумулятивный эффект является следствием проявления кварк-глюонных степеней свободы и мультикварковых конфигураций в ядрах. Существование кумулятивного ядерного эффекта указывает на то, что нуклоны в ядрах при определенных условиях ведут себя иначе, чем в свободном состоянии. В 1980 г. А. М. Балдин ввел понятие «кварк-партонная структурная функция ядра»[8] по аналогии с понятием кварк-партонной структурной функции адрона. Результаты экспериментов по адрон-ядерным и ядро-ядерным взаимодействиям показали, что кварк-партонная структурная функция ядра $G(X)$ не сводится к совокупности структурных функций свободных нуклонов и является новым объектом, характеризующим кварк-глюонное состояние ядра. Результаты развитых им представлений о роли кварк-глюонных степеней свободы в ядрах вошли в цикл совместных работ «Новое квантовое число — цвет и установление динамических зако-

[6] *Безногих Ю. Д., Зиновьев Л. П., Иссинский И. Б., Казанский Г. С., Михайлов А. И., Мороз В. И., Павлов Н. И., Пучков Г. П.* Ускорение и вывод пучка дейтронов из синхрофазотрона ОИЯИ. Вторая премия ОИЯИ в разделе «Научно-методические работы», 1970.

[7] *Балдин А. М. и др.* // ЯФ. 1973. Т. 18, вып. 1. С. 79.

[8] *Baldin A. M.* // Proc. Conf. on Extreme States in Nuclear Systems. Dresden, 1980.

Вручение Ленинских премий 1988 года в Кремле

номерностей кварковой структуры адронов и атомных ядер», удостоенный в 1988 г. Ленинской премии (А. М. Балдин, П. Н. Боголюбов, В. А. Матвеев, Р. М. Мурадян, А. Н. Тавхелидзе).

Группа В. С. Ставинского провела подробные исследования инклюзивного рождения мезонов в заднюю полусферу при столкновении протонов с импульсом 8,9 ГэВ/c с различными ядрами от гелия до урана на синхрофазотроне в Дубне. При этих измерениях были установлены важные свойства ядерной структурной функции $G(X)$. Экспериментальные данные по кумулятивному рождению частиц на ядрах не могут быть объяснены в рамках традиционной концепции ядер, которые состоят из набора отдельных квазисвободных нуклонов. Они могут быть хорошей основой для объяснения явления в рамках концепции мультикварковых состояний, существующих в ядрах. Свойства кумулятивного эффекта доказывают, что ядерные структурные функции являются независимыми объектами адронной физики. В результате экспериментов с релятивистскими ядрами были установлены пределы протон-нейтронной модели ядра.

Процесс взаимодействия двух ядер можно записать в следующем виде:

$$\mathrm{I} + \mathrm{II} \to 1 + 2 + \ldots, \qquad (1)$$

где I и II — сталкивающиеся ядра; 1, 2... — вторичные частицы, образующиеся в результате столкновения ядер. А. М. Балдиным был предложен инвариантный метод анализа множественного рождения частиц, в котором процесс (1) рассматривается в пространстве, точками которого являются четырехмерные скорости $u_i = p_i/m_i$, где p_i — четырехмерный импульс и m_i — масса i-й частицы. Переменными, от которых зависят распределения вероятности (сечения), были выбраны безразмерные положительные релятивистски-инвариантные величины

$$b_{ik} = -(u_i - u_k)^2 = -(p_i/m_i - p_k/m_k)^2 = 2(p_i p_k/m_i m_k - 1) = 2(u_i u_k - 1),$$

где индексы i и k принимают значения I, II, 1, 2, 3... (номера всех объектов, участвующих в реакции (1)). Величины b_{ik} имеют смысл относительных расстояний между участниками взаимодействия в пространстве четырехмерных скоростей.

А. М. Балдиным было предложено классифицировать ядерные взаимодействия с помощью переменной b_{ik}. В соответствии с этой классификацией выделяются следующие три области:

1) область $b_{ik} \approx 10^{-2}$, соответствующая взаимодействию ядер как систем из слабосвязанных нуклонов (это область классической ядерной физики);

2) область $0{,}1 < b_{ik} < 1$, являющаяся промежуточной (в этой области кварковые степени свободы начинают играть существенную роль в перестройке адронных систем);

3) область $b_{ik} \gg 1$, в которой нуклоны утрачивают значение квазичастиц ядерной материи и ядра следует рассматривать как кварк-глюонные системы.

В экспериментах на синхрофазотроне величина $b_{ik} \approx 5$, при которой уже начинали проявляться кварк-глюонные степени свободы.

Благодаря наличию ядерных пучков на синхрофазотроне (p, d, He, C, Mg, S) в ОИЯИ начало развиваться новое научное направление — релятивистская ядерная физика[9]. Эти исследования потребовали более качественных пучков релятивистских ядер с более широким диапазоном ядер и более высокой энергией, чем на синхрофазотроне. В связи с этим А. М. Балдиным было сделано предложение о создании нового специализированного ускорителя релятивистских ядер — Нуклотрона. Первый сеанс охлаждения кольца Нуклотрона до температуры 4,5 К состоялся в марте 1993 г., а 26 марта была получена циркуляция пучка в кольце Нуклотрона. В июле 1993 г. были проведены первые эксперименты на внутреннем пучке дейтронов Нуклотрона с энергией 200 МэВ/нуклон, а в 1994 г. осуществлен физический сеанс Нуклотрона с пучком дейтронов с импульсами 3,8 и 6,2 ГэВ/c. Эксперименты были подготовлены коллаборациями СФЕРА (рук. А. И. Малахов) и СЯО (рук. В. А. Никитин). С помощью $\Delta E - E$ методик были измерены спектры вторичных частиц. На рис. 3 приведены спектры вторичных частиц, полученные в этом сеансе.

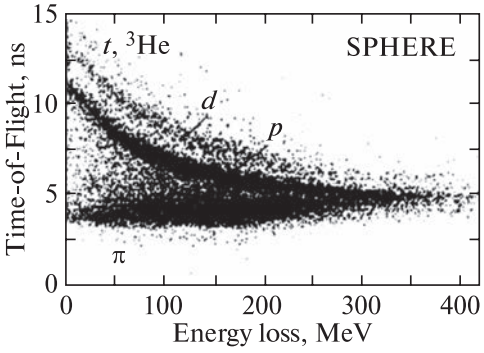
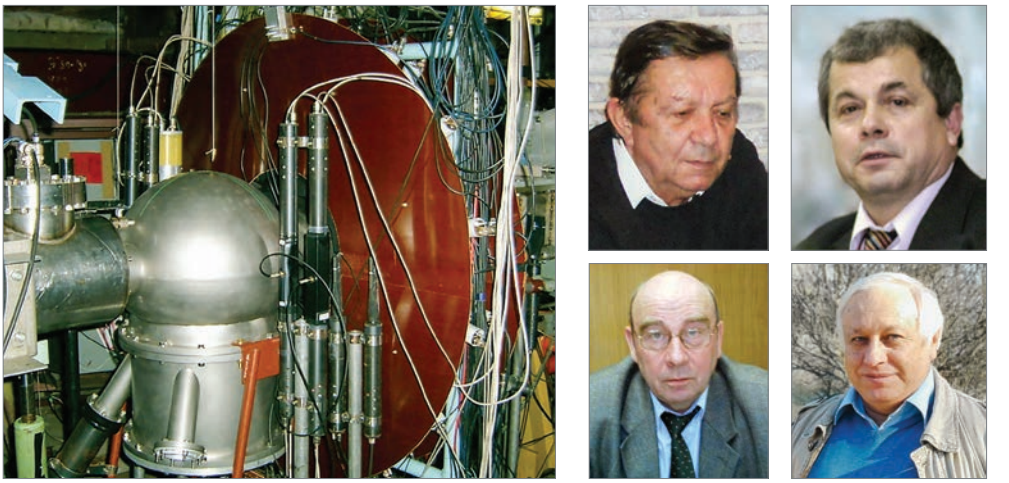


Рис. 3. Спектры вторичных частиц при взаимодействии внутреннего пучка дейтронов Нуклотрона с импульсом 6,2 ГэВ/с с тонкой золотой мишенью

Для проведения регулярных физических исследований на внутренних пучках Нуклотрона была создана специальная станция внутренних

[9] *Балдин А. М. и др.* Ускорение и вывод дейтронов из синхрофазотрона ОИЯИ. Препринт ОИЯИ Р9-5442. Дубна, 1970.



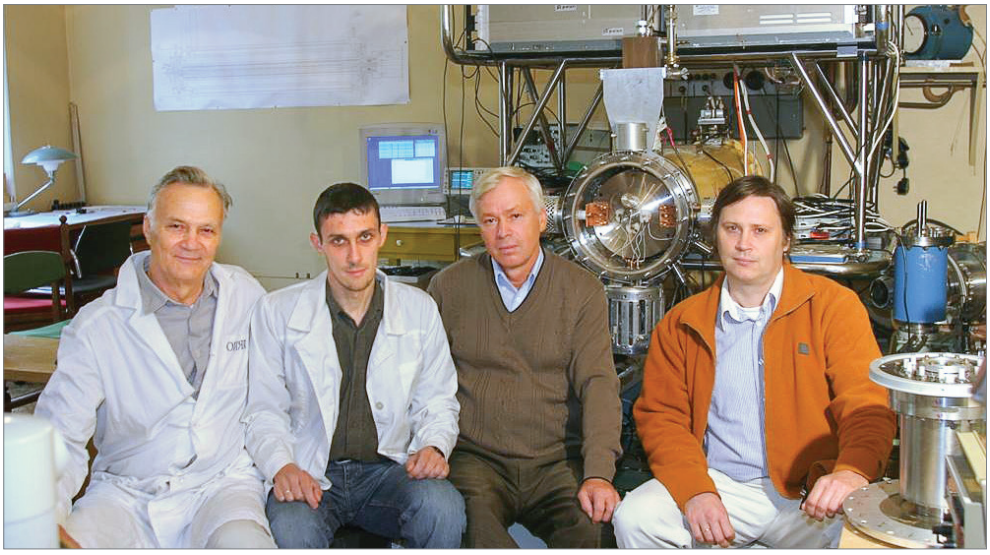
Станция внутренних мишеней Нуклотрона и руководители работ:
Я. Климан, А. И. Малахов, Ю. С. Анисимов, Ш. Гмуца

Система медленного вывода пучка из Нуклотрона и руководители работ:
Е. А. Матюшевский, А. Д. Коваленко, И. Б. Иссинский, Ю. И. Тятюшкин

мишеней[10]. Эта работа выполнялась под руководством Ю. С. Анисимова при активном участии коллег из Словакии и Чехии и получила первую премию ОИЯИ за 2000 г.

Следующим этапом было создание системы медленного вывода пучка из Нуклотрона, для того чтобы проводить физические эксперименты на внешних установках. Такая система была создана в 2002 г. под руководством А. Д. Коваленко и Е. А. Матюшевского, несмотря на финансовые трудности того периода. Эта работа также была удостоена первой премии ОИЯИ за 2002 г. Создание системы вывода пучка из Нуклотрона существенно расширило возможности проведения физических экспериментов.

К этому времени под руководством Е. Д. Донца были успешно выполнены работы по источнику тяжелых ионов «Крион». Это позволило иметь на Нуклотроне пучки тяжелых ионов вплоть до Xe. За эти работы группа Е. Д. Донца получила престижную международную премию «Brightness Award», присуждаемую раз в два года за важнейшие достижения в физике и технологии ионных источников.



Лауреаты международной премии «Brightness Award» Е. Д. Донец, Д. Е. Донец, В. В. Сальников и Е. Е. Донец

В результате перечисленных выше работ на пучках Нуклотрона начали работать около 15 физических установок (рис. 4).

Набор ускоряемых на Нуклотроне ядер и интенсивности выведенных пучков в период 1993–2010 гг. представлены в табл. 1. В дальнейшем интенсивности тяжелых ядер резко возросли, и ядра Xe выводятся уже с интенсивностью $5 \cdot 10^7$ ионов в цикл.

[10] *Malakhov A. I. et al.* Potentialities of the Internal Target Station at the Nuclotron // Nucl. Instr. Meth. A. 2000. V. 440, Iss. 2. P. 320–329.

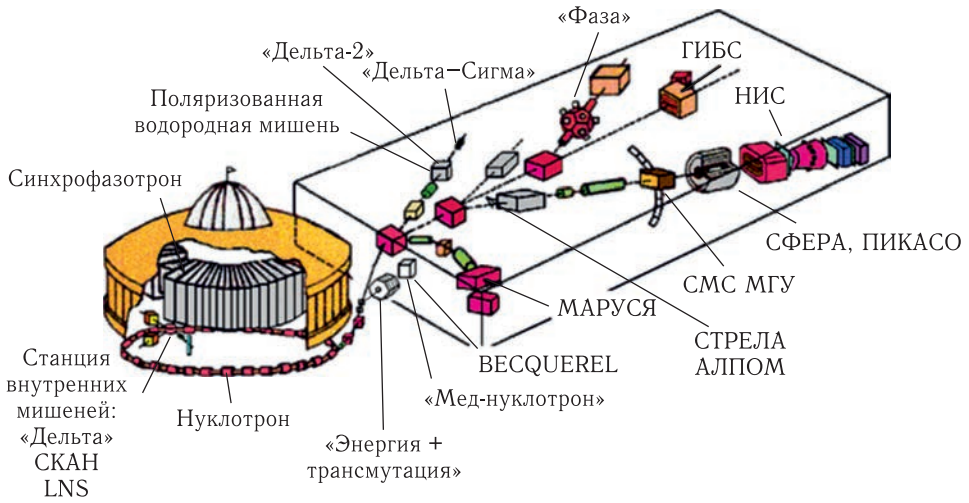


Рис. 4. Схема расположения физических установок на Нуклотроне в 1993–2010 гг.

Таблица 1. Интенсивности выведенных пучков Нуклотрона в 1993–2010 гг.

p	d	$\vec{d}$	t	^{4}He	^{7}Li	^{10}B	^{12}C	^{24}Mg	^{40}Ar	^{56}Fe	^{84}Kr	^{124}Xe
$2\cdot10^{10}$	$5\cdot10^{10}$	$3\cdot10^{8}$	$4\cdot10^{5}$	$8\cdot10^{8}$	$2\cdot10^{9}$	$2\cdot10^{10}$	$6{,}5\cdot10^{8}$	$1{,}2\cdot10^{8}$	10^{8}	10^{6}	10^{3}	10^{3}

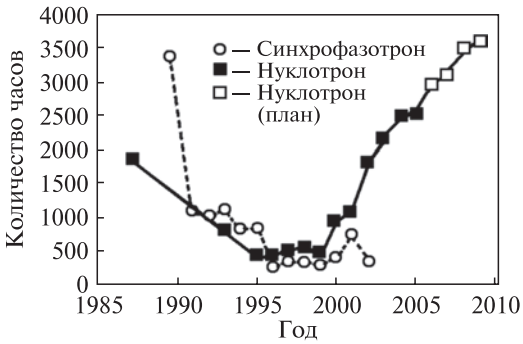


Рис. 5. Длительность работы синхрофазотрона и Нуклотрона по годам

До 2002 г. в ЛВЭ работало два ускорителя — синхрофазотрон и Нуклотрон. После получения на Нуклотроне поляризованных дейтронов работа синхрофазотрона была остановлена. На рис. 5 представлен график работы синхрофазотрона и Нуклотрона по годам. Длительность работы Нуклотрона к 2006 г. превысила 2500 часов, и далее планировалось увеличить это время до более 3500 часов. Однако эти планы были скорректированы в сторону сокращения в связи с началом работ по подготовке проекта коллайдерного комплекса NICA.

После создания на Нуклотроне станции внутренних мишеней и системы медленного вывода пучка началась активная фаза физических экспериментов на нем. В круг пользователей Нуклотрона входили десятки научных центров из России, из стран-участниц и неучастниц ОИЯИ (рис. 6).

Было получено много отзывов и благодарностей за предоставленные пучки. Так, например, профессор П. Пикоззо из Италии в марте 2001 г.

Рис. 6. Пользователи Нуклотрона

писал: «Работа была очень эффективной, с замечательными результатами. Я хочу поблагодарить сотрудников ускорительного отделения за обеспечение нас очень хорошим пучком и за их сердечность».

В январе 2002 г. профессор Р. Брандт (Германия) в своем письме отмечал: «Сеанс на Нуклотроне был отличным (мы достигли цели по интенсивности $6 \cdot 10^{13}$ протонов примерно за 6 часов, в то время как план был 18 часов). Международная группа (участвовали 7 стран, и, кроме того, были облучены мишени для Китая и Югославии) сотрудничала очень успешно».

Можно выделить следующие направления работ, начатых на синхрофазотроне и продолженных на Нуклотроне, начиная с 1993 г.:

— кумулятивный эффект (ДИСК, СФЕРА, ПИКАСО, МАРУСЯ);
— структура нуклона (СТРЕЛА, НИС);
— структура ядра («Фаза», BECQUEREL, СКАН);
— влияние ядерной среды на рождение частиц («Дельта», СКАН);
— модификация ядерной материи («Фаза»);
— экзотические ядра (ГИБС, СКАН);
— поляризационные эффекты (ТПД, ПИКАСО, LNS, АЛПОМ, СТРЕЛА, МАРУСЯ).

Кроме того, велись работы в прикладных областях:

— радиобиология (ЛРБ ОИЯИ и ИМБП, Москва);
— радиационная медицина («Мед-нуклотрон»);

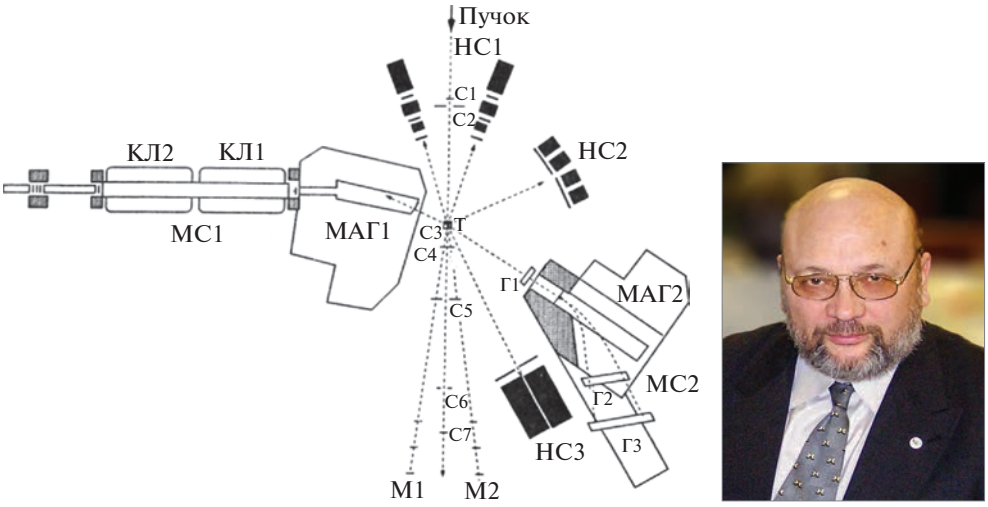


Рис. 7. Схема установки ДИСК и руководитель группы Ю. А. Панебратцев

— влияние радиации на электронику (ПАМЕЛА);
— безопасная ядерная энергетика («Энергия + трансмутация»).

Для более детального исследования кумулятивного эффекта установка ДИСК была усовершенствована (рис. 7). Эти работы возглавлял Ю. А. Панебратцев.

Дальнейший шаг в этом направлении был сделан предложением нового проекта — 4π-установки СФЕРА (рис. 8). Руководителем проекта был А. И. Малахов.

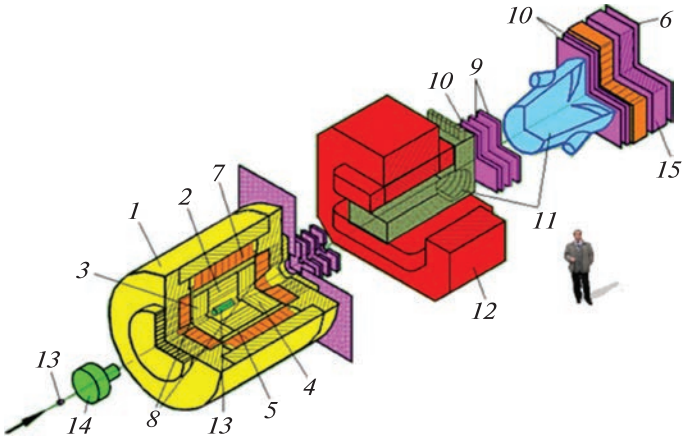


Рис. 8. Схема установки СФЕРА: 1 — сверхпроводящий соленоид с железным ярмом; 2 — центральная цилиндрическая дрейфовая камера; 3 — задние дрейфовые камеры; 4 — передняя дрейфовая камера; 5 — цилиндрический сцинтилляционный годоскоп; 6 — мюонный сцинтилляционный годоскоп; 7 — электромагнитный калориметр; 8 — передний и задний сцинтилляционные годоскопы; 9 — пропорциональные камеры; 10 — сцинтилляционные годоскопы; 11 — пороговые газовые черенковские счетчики; 12 — дипольный магнит; 13 — мишени; 14 — пучковый поглотитель; 15 — мюонный фильтр

Из-за тяжелых экономических условий в 1990-е гг. была реализована лишь первая очередь проекта СФЕРА, включавшая только передний спектрометр. На ней был выполнен цикл физических исследований взаимодействий релятивистских ядер с импульсом 4,5 ГэВ/нуклон:

— измерен показатель степени в A-зависимости сечения фрагментации релятивистских дейтронов в кумулятивные π^--мезоны на ядрах углерода, алюминия, меди и свинца;
— на пучке релятивистских дейтронов и ядер углерода выполнены исследования поведения спектров кумулятивных π^--мезонов в зависимости от множественности сопровождающих заряженных частиц, фрагментирующих из ядра мишени;
— впервые в мире наблюдено рождение кумулятивных мюонных пар при фрагментации релятивистских дейтронов в процессе $d + \mathrm{Pb} \to \mu^+\mu^- + ...$, и оценено сечение этого процесса.

Ниже представлены наиболее яркие результаты, полученные на Нуклотроне в 2000-е гг.

Прежде всего это открытие в 2005 г. параметрического рентгеновского излучения, производимого релятивистскими ядрами углерода при прохождении кремниевого кристалла[11]. Лидерами этого эксперимента были А. Д. Коваленко и А. М. Таратин. Ранее такое излучение наблюдалось на протонах. Оказалось, что амплитуда сигнала сильно зависит от типа иона, что открывает возможности для создания нового типа детекторов частиц. На рис. 9 представлены спектры рентгеновского излучения в кристалле кремния от протонов и ядер углерода.

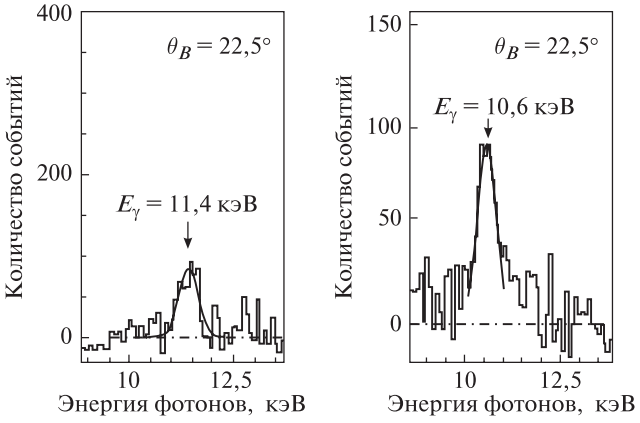


Рис. 9. Спектры параметрического рентгеновского излучения в кристалле кремния от протонов с энергией 5 ГэВ (слева) и ядер углерода с энергией 2,2 ГэВ/нуклон (справа)

Следующим важным результатом явилось открытие тензорной поляризации неполяризованных дейтронов при прохождении через вещество. Теоретически эффект был предсказан В. Г. Барышевским (Беларусь) и обнаружен на Нуклотроне группой под руководством Л. С. Золина и А. Г. Литви-

[11] *Adischev Yu. N. et al.* First Observation of Parametric X-Rays Produced by Moderate Relativistic Protons and Carbon Nuclei in Si Crystals // Nucl. Instr. Meth. B. 2006. V. 252. P. 111–117.

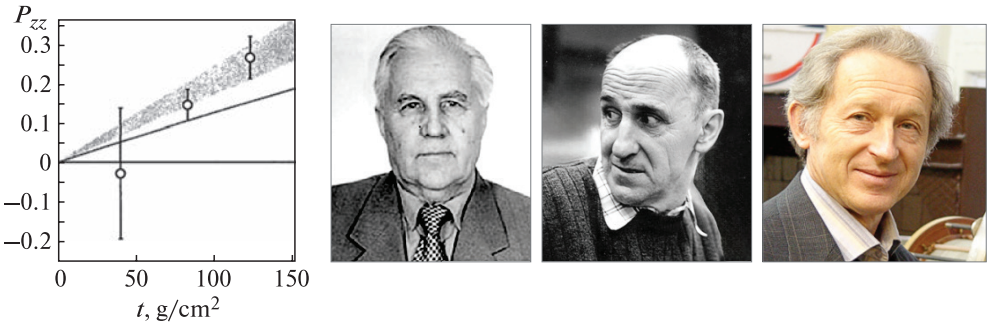


Рис. 10. Зависимость тензорной поляризации дейтронов с импульсом 5,5 ГэВ/с от толщины углеродной мишени. Справа: руководители эксперимента Л. С. Золин, А. Г. Литвиненко и В. Г. Барышевский, теоретически предсказавший изучаемый эффект

ненко[12]. На рис. 10 представлена зависимость тензорной поляризации P_{zz} от толщины углеродной мишени. Видна заметная поляризация пучка дейтронов после прохождения мишени. Результаты этого эксперимента указывают на возможность получения поляризованного пучка дешевым способом без использования сложного оборудования.

Так же интересны результаты эксперимента СКАН по поиску экзотических η-мезонных ядер под руководством С. В. Афанасьева. На внутреннем дейтронном пучке Нуклотрона на тонкой углеродной мишени получены указания на существование η-мезонных ядер, у которых один нуклон замещен η-мезоном[13]. На рис. 11 показана схема установки СКАН и приведен

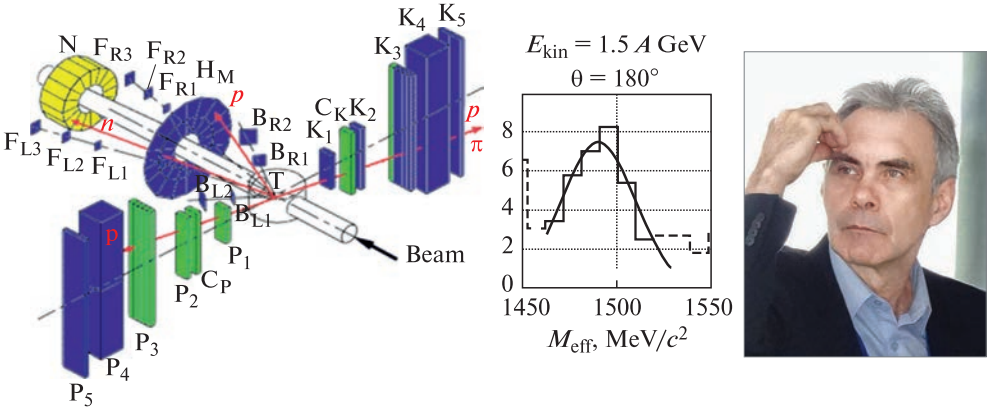


Рис. 11. Схема установки СКАН и спектр эффективных масс протонов и пионов. Справа: руководитель проекта СКАН С. В. Афанасьев

[12] *Azhgirei L. S. et al.* Measurement of Tensor Polarization of a Deuteron Beam Passing through Matter // Phys. Part. Nucl. Lett. 2010. V. 7. P. 27–32.

[13] *Afanasiev S. V. et al.* Search for η-Mesic Nuclei in the Reaction d + C at JINR // Phys. Part. Nucl. Lett. 2011. V. 8, No. 10. P. 1073–1077.

спектр эффективных масс протонов и пионов, указывающий на существование η-мезонных ядер.

Следует отметить также наличие на Нуклотроне уникальных пучков вторичных легких ядер, включая радиоактивные ядра, отсутствующие в природе. Работа по получению таких пучков была выполнена по инициативе П. И. Зарубина В. А. Мончинским и П. А. Рукояткиным. Эти пучки обеспечивают фундаментальные исследования структуры семейства легких ядер[14].

Эксперимент BECQUEREL использует старый, но надежный метод регистрации частиц с помощью ядерных фотоэмульсий. Этот метод существенно уступает электронным методам по статистике, однако до сих пор имеет рекордную координатную точность регистрации треков заряженных частиц, что делает его уникальным для поисковых экспериментов.

Одна из задач эксперимента BECQUEREL (рук. П. И. Зарубин, рис. 12) — изучение в релятивистском подходе кластеризации легких стабильных и радиоактивных ядер, особенностей изотопов ^{7,9}Be, ^{8,10,11}B, ^{10,11}C, ^{12,14}N, измерение вероятности каналов их диссоциации. Большой интерес вызывает возможность исследования существования так называемого состояния Хойла в ядре ^{12}C.

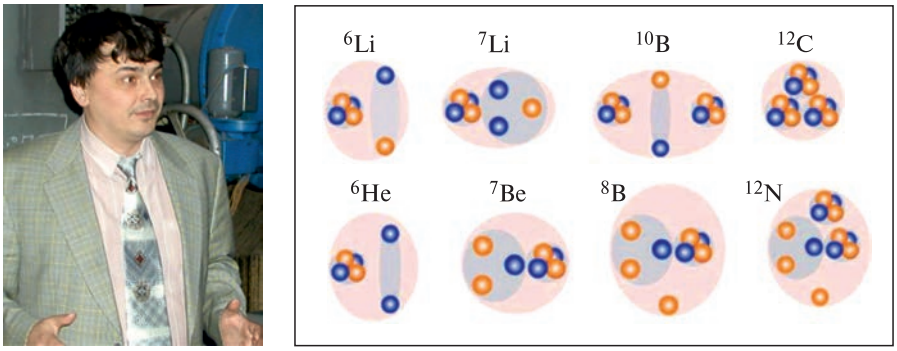


Рис. 12. Руководитель проекта BECQUEREL П. И. Зарубин. Справа — иллюстрация кластерной структуры легких ядер

Весьма интересен результат по наблюдению эффекта роста выходов пионов с ростом массы мишени на внутреннем пучке протонов и дейтронов Нуклотрона[15]. В области энергий пучковых частиц ~ 350 МэВ/нуклон наблюдался повышенный выход пионов на ядрах меди и золота (рис. 13). На более легких ядрах эффект отсутствует, что говорит о его ядерной природе. Эксперимент был выполнен под руководством В. А. Краснова и А. Б. Курепина.

[14] *Zarubin P. I.* “Tomography” of the Cluster Structure of Light Nuclei via Relativistic Dissociation // Clusters in Nuclei. Lecture Notes in Physics. Springer Intern. Publ. 2013. V. 875, No. 3. P. 51–93.

[15] *Livanov A. N. et al.* Search for Resonant Structure in the Pion Production Reaction on the Nuclotron Internal Beam // Intern. J. Mod. Phys. A. 2007. V. 22. P. 604–607.

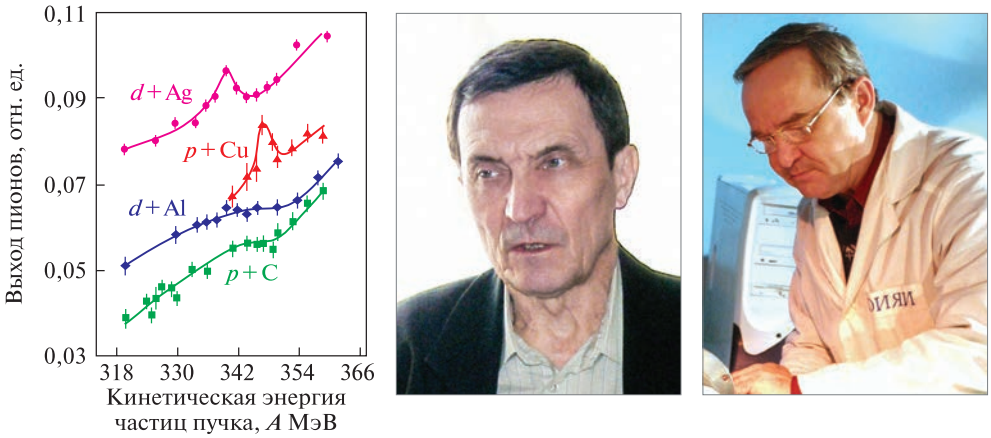


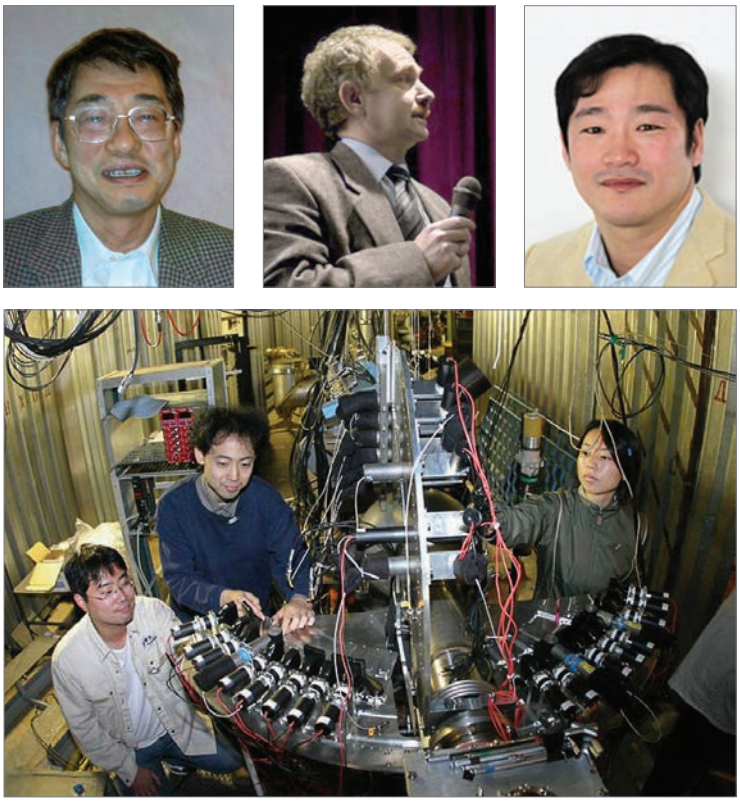
Рис. 13. Выход пионов для мишеней из C, Al, Cu и Ag для протонного и дейтронного пучка с кинетической энергией ~ 350 МэВ/нуклон. Руководители эксперимента А. Б. Курепин, В. А. Краснов

Совместная экспериментальная программа LNS/DSS по изучению спиновой структуры легких ядер началась в 1999 г. на ускорительных комплексах RARF (RIKEN, Япония) и ЛВЭ/ЛФВЭ под руководством В. П. Ладыгина, Х. Сакаи (Япония) и Т. Уэсака (Япония). Первый эксперимент в рамках этой программы был посвящен исследованию угловых зависимостей полного набора дейтронных анализирующих способностей A_y, A_{xx}, A_{yy} и A_{xz} в реакциях $d + d \to {}^3\mathrm{He} + n$ и $d + d \to {}^3\mathrm{H} + p$ при энергиях 140, 200 и 270 МэВ в RARF. Впервые в мире была измерена спиновая структура трития на малых межнуклонных расстояниях. Вторая часть экспериментальной программы, посвященная изучению сечений и анализирующих способностей реакции упругого рассеяния дейтрона на протоне, была проведена на внутренней мишени Нуклотрона. В первой серии измерений были получены экспериментальные данные по анализирующим способностям A_y, A_{yy} и A_{xx} при энергиях 880 и 2000 МэВ. Все эти результаты важны для понимания природы трехнуклонных сил в ядре.

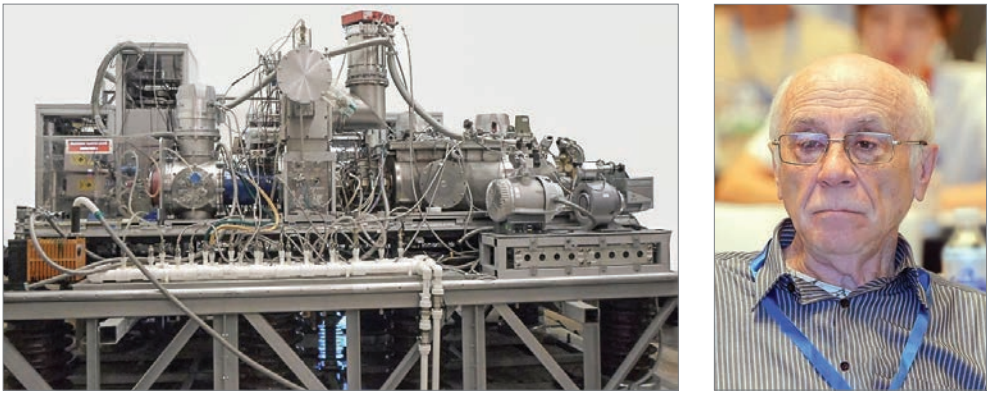
В настоящее время продолжается анализ экспериментальных данных по анализирующим способностям A_y, A_{yy} и A_{xx} в упругом рассеянии дейтрона на протоне[16], полученных во второй серии измерений при энергиях 400–1800 МэВ.

С вводом в строй в 2016 г. разработанного под руководством В. В. Фимушкина в сотрудничестве с ИЯИ РАН источника поляризованных протонов и дейтронов SPI (Source of Polarized Ions) существенно улучшились возможности физических экспериментов на поляризованных пучках Нуклотрона. Получена интенсивность поляризованных дейтронов $2 \cdot 10^9$ за цикл.

[16] *Ladygin V. P. et al.* Angular Dependences of the Deuteron Analyzing Powers in Elastic *dp* Scattering at Large Transverse Momenta // Phys. Part. Nucl. 2022. V. 53. P. 251–255.



Вверху: Х. Сакаи, В. П. Ладыгин и Т. Уэсака. Внизу: японские физики готовят к работе установку на внутренней мишенной станции Нуклотрона



Новый источник поляризованных протонов и дейтронов. Руководитель работ по источнику В. В. Фимушкин

Для исследований зарядово-обменных реакций под руководством Н. М. Пискунова, В. В. Глаголева и Г. Мартинской (Словакия) была создана установка СТРЕЛА — одноплечевой магнитный спектрометр, основными элементами которого являются блоки дрейфовых камер в качестве коорди-

Руководители эксперимента СТРЕЛА (слева направо) Н. М. Пискунов, Г. Мартинска и В. В. Глаголев

натных детекторов. На этой установке были измерены дифференциальные сечения реакции перезарядки $dp \to (pp)n$ при импульсе 1,75 ГэВ/c на нуклон для малых переданных импульсов. Получены отношения дифференциального сечения реакции перезарядки $dp \to (pp)n$ к сечению элементарного процесса $np \to pn$ с целью оценки спин-зависимой части амплитуды перезарядки $np \to pn$. Амплитуда $np \to pn$ оказалась преимущественно спин-зависимой.

В зарядово-обменной реакции $np \to pn$ (рис. 14) в 2005 г. была выявлена неожиданная энергетическая зависимость[17] отношений дифференциальных сечений нейтронов $R_{dp}(0°) = [(d\sigma/d\Omega)(nd)]/[(d\sigma/d\Omega)(np)]$ на связанном и свободном протоне при нулевом угле вылета в области энергий от 0,55 до 2 ГэВ.

Полученные ранее мировые данные свидетельствовали о резком спаде этого отношения с ростом энергии налетающего дейтрона. Эксперимент,

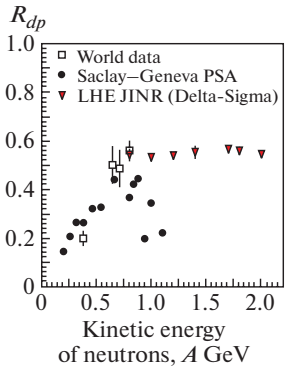


Рис. 14. Зависимость $R_{dp}(0°)$ от кинетической энергии нейтронов и лидеры эксперимента «Дельта–Сигма» (слева направо) Л. Н. Струнов, В. И. Шаров и Ф. Легар (Франция)

[17] *Sharov V. et al.* Measurements of the Ratio R_{dp} of the Quasi-Elastic $nd \to p(nn)$ to the Elastic $np \to pn$ Charge-Exchange Process Yields at Zero Proton Emission Angle over the 0.55–2.0-GeV Neutron Beam Energy Region // Eur. Phys. J. A. 2009. V. 39. P. 267–280.

выполненный на Нуклотроне, с высокой точностью показал, что величина R_{dp} практически не меняется с увеличением энергии нейтронов вплоть до 2 ГэВ. По поводу этого результата один из участников эксперимента Ф. Легар писал в газете «Дубна: наука, содружество, прогресс»: «Да, физики ЛВЭ ОИЯИ закрыли одну дверцу в физике. Как это бывает, одновременно раскрыли другие двери, более надежные, и поставили в своей области науки новые вопросы. Я уверен, что эти вопросы будут не менее важны, чем предыдущие, которые решались в течение половины века».

ПРОЕКТ УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА NICA

В 2002 г. в качестве ближайших шагов по развитию ускорительного комплекса ЛВЭ предлагалось создать бустер (начало сооружения которого планировалось в 2004 г., а ввод в эксплуатацию — в 2007 г.), а в дальнейшем перейти к сооружению сверхпроводящих колец установки для проведения экспериментов на встречных пучках (рис. 15). В то время это предложение осталось практически незамеченным. Финансовые возможности лаборатории не позволяли поддерживать в рабочем состоянии даже существующие базовые установки, тем более мечтать о создании новых ускорителей. В 2002 г. прошел последний сеанс синхрофазотрона. Могучий ветеран, создавший славу ОИЯИ, ушел без торжественных проводов: постепенно ветшая, он ждал решения своей судьбы 6 лет до появления распоряжения о его частичном демонтаже. За счет героических усилий обслуживающего персонала Нуклотрон продолжал работу по нескольким экспериментальным программам, но так и не приблизился к проектным параметрам. Соответственно, его существование было практически незаметно на мировом ландшафте физики высоких энергий.

Когда Алексей Норайрович Сисакян стал директором ОИЯИ, он поставил вопрос о дальнейшей судьбе ЛВЭ предельно жестко: либо Нуклотрон

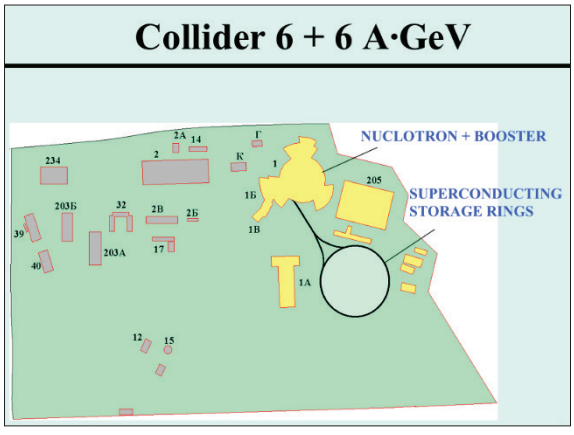


Рис. 15. Слайд из доклада директора ЛВЭ А. И. Малахова на 92-й сессии Ученого совета ОИЯИ 6 июня 2002 г.

В зале линейного инжектора Нуклотрона лауреат Нобелевской премии Дэвид Гросс обозначает на фазовой диаграмме точку, соответствующую смешанной фазе

выводится из эксплуатации и персонал лаборатории концентрируется на внешних экспериментах, либо формулируется остроактуальная научная задача, под которую страны-участницы согласятся выделить средства для завершения проекта ускорительного комплекса и его дальнейшего развития. И такая задача появилась[18]. С повышением энергии сталкивающихся тяжелых ядер в ряде экспериментов в ЦЕРН и BNL в начале 2000-х появились указания на образование особого состояния горячей и плотной ядерной материи — кварк-глюонной плазмы. Возможность экспериментального изучения «новой» физики воодушевила теоретиков: была построена фазовая диаграмма (гипотетическая) возможных состояний материи, образующейся в столкновении двух тяжелых ядер, наиболее интересная область которой — переход адронной материи в кварк-глюонное состояние через смешанную фазу. В развитии этих представлений заметную роль сыграли ученые Лаборатории теоретической физики ОИЯИ[19]. В некоторых публикациях область диаграммы, соответствующая смешанной фазе, даже называли «дубненской поляной». По расчетам она достигается при относительно невысокой энергии в системе центра масс сталкивающихся ядер — пример-

[18] *Агапов Н. Н., Кекелидзе В. Д., Коваленко А. Д., Ледницки Р., Матвеев В. А., Мешков И. Н., Никитин В. А., Потребеников Ю. К., Сорин А. С., Трубников Г. В.* Релятивистская ядерная физика в ОИЯИ: от синхрофазотрона к коллайдеру NICA // УФН. 2016. Т. 186, № 4.

[19] *Sissakian A. N., Sorin A. S., Toneev V. D.* // Proc. 33rd Intern. High Energy Physics Conf., ICHEP'06, Moscow, Russia. 2006. V. 1. P. 421; nucl-th/0608032.

но 10 ГэВ/нуклон. Эта энергия доступна как в экспериментах на фиксированной мишени, так и на встречных пучках. Было проведено несколько рабочих совещаний и круглых столов, в том числе и в Дубне. В результате обсуждений родились программы сканирования по энергии пучков на коллайдере RHIC (BNL) и в эксперименте NA61/SHINE в ЦЕРН, а в проект ускорительного комплекса FAIR в Дармштадте был включен эксперимент CBM (Compressed Baryonic Matter). Нашлось достойное место и ускорительному комплексу в Дубне. Дело в том, что светимость эксперимента на встречных пучках в этом диапазоне энергий ограничена эффектами пространственного заряда в сталкивающихся сгустках и она обратно пропорциональна квадрату периметра установки. Поэтому, при прочих равных условиях, небольшой по периметру коллайдер может превзойти RHIC по светимости более чем в сто раз.

Для разработки альтернативных концепций нового ускорительного комплекса было организовано две группы «ускорительщиков»: одна под руководством Александра Дмитриевича Коваленко, вторая — Игоря Николаевича Мешкова. Оба подготовленных проекта были оптимистичны и по срокам ввода в эксплуатацию, и по стоимости установки, которую заметно снижала возможность разместить коллайдер с периметром 200–250 м в существующем экспериментальном корпусе. Для объединения усилий разработчиков был организован центр NICA (Nuclotron-based Ion Collider fAcility — такое название получил проектируемый ускорительный комплекс), руководителем которого был назначен сотрудник Лаборатории теоретической физики Александр Савельевич Сорин. До начала развертывания полномасштабных работ необходимо было продемонстрировать на практике возможность Нуклотрона работать на своих проектных параметрах. Для решения этой задачи в 2007 г. в ЛВЭ было создано Ускорительное отделение во главе с Григорием Владимировичем Трубниковым. К этому времени он уже два года работал в должности заместителя главного инженера ОИЯИ и успел зарекомендовать себя как грамотный специалист по ускорителям заряженных частиц и талантливый организатор. Еще одним организационным решением стало объединение двух лабораторий — ЛВЭ и ЛФЧ. Директором новой лаборатории, получившей название Лаборатория физики высоких энергий, был избран Владимир Димитриевич Кекелидзе, известный в мире физик-экспериментатор.

С 2006 г. проект NICA обсуждался на семинарах и рабочих совещаниях в российских и зарубежных научных центрах. В 2008 г. он был представлен на ведущих международных ускорительных и физических конференциях[20]. В 2009 г. проект был одобрен Ученым советом ОИЯИ и решением сессии Комитета полномочных представителей стран-участниц включен в Семилетний план развития Института. Для реализации проекта необходимо было создать новый линейный ускоритель, промежуточный

[20] *Sissakian A. et al.* Design and Construction of Nuclotron-Based Ion Collider Facility (NICA), Conceptual design report. Dubna: JINR, 2008;

Trubnikov G. et al. Project of the Nuclotron-based Ion Collider Facility (NICA) at JINR // Proc. EPAC 2008, Genoa, Italy, 2008. P. 2581.

Лауреаты премии Правительства Российской Федерации А. Н. Сисакян, Г. В. Трубников, А. Д. Коваленко, Г. Г. Ходжибагиян, Б. Ю. Шарков

сверхпроводящий синхротрон, завершить модернизацию Нуклотрона, создать два кольца коллайдера с двумя точками встречи пучков и две экспериментальные установки — MPD (Multi-Purpose Detector) и SPD (Spin Physics Detector). Ни в ОИЯИ, ни в РФ установок такого масштаба не сооружалось уже несколько десятилетий.

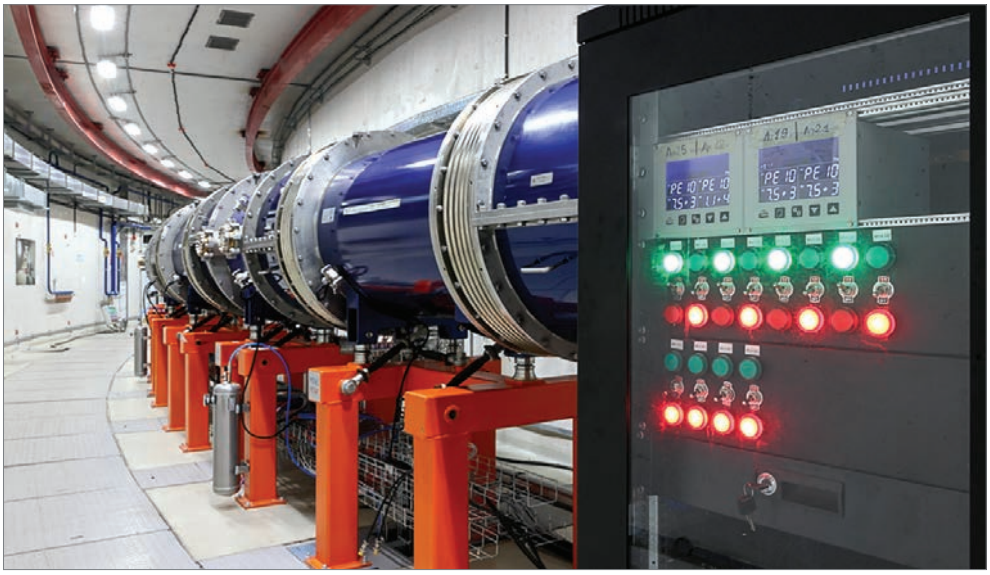
После успешного завершения модернизации Нуклотрона[21] за создание нового поколения ускорителей тяжелых ионов для релятивистской ядерной физики и инновационных ядерно-энергетических технологий группа сотрудников ОИЯИ совместно с сотрудниками ИТЭФ в 2010 г. получила премию Правительства Российской Федерации. Работы по созданию сверхпроводящих магнитов для синхротронов и результаты модернизации Нуклотрона были удостоены государственных премий РФ.

2016 год стал одним из самых плодотворных. В этом году был получен первый пучок на новом линейном ускорителе тяжелых ионов, запущена

[21] *Агапов Н. Н., Бутенко А. В., Коваленко А. Д., Волков В. И., Карпинский В. Н., Сидорин А. О., Трубников Г. В., Ходжибагиян Г. Г.* Итоги реализации проекта «Нуклотрон-М» // ЭЧАЯ. 2012. Т. 43, № 4. С. 916–948.

Сверхпроводящий синхротрон бустер

Ускорительное отделение ЛФВЭ в зале синхрофазотрона по завершении первого сеанса пусконаладочных работ на бустере NICA



Тестирование магнитно-криостатной системы коллайдера

линия по сборке, тестированию и сертификации сверхпроводящих магнитов, идеологом и вдохновителем создания которой был Гамлет Георгиевич Ходжибагиян. На этой линии впоследствии были изготовлены магниты бустера и коллайдера. Тогда же была введена в эксплуатацию новая установка КГУ-1000, после чего мощность криогенной фабрики позволила обеспечить жидким гелием все установки комплекса, были проведены первые сеансы с форинжектором ЛУ-20 на основе ПОКФ (пространственно-однородной квадрупольной фокусировки, RFQ) и источником поляризованных пучков. Таким образом, спиновая программа вернулась на комплекс после более чем десятилетнего перерыва.

Этот же год был и самым напряженным в судьбе проекта. При разработке технического проекта комплекса стало ясно, что коллайдер с его системами и площадки для сборки и тестирования детекторов физически невозможно разместить в существующем экспериментальном зале. Было принято решение о строительстве нового достаточно вместительного здания, что более чем вдвое увеличивало стоимость проекта. Соответствующих средств в бюджете ОИЯИ не было, и дирекция принимала решение на свой страх и риск. При этом на всех уровнях, включая Государственную Думу и Правительство РФ, проводилась предельно энергичная работа, направленная на включение проекта в программу создания на территории РФ установок класса мегасайенс. В результате в 2016 г. директором ОИЯИ В. А. Матвеевым и министром образования и науки РФ Д. В. Ливановым было подписано Соглашение между ОИЯИ и Правительством РФ о создании и эксплуатации комплекса сверхпроводящих колец на встречных пучках NICA, что окончательно определило будущие перспективы проекта. Началось строительство здания коллайдера.

Президент Российской академии наук Г. Я. Красников вручает Премию им. П. А. Черенкова РАН профессору А. И. Малахову

На сроки создания комплекса, конечно, повлияли и эпидемия ковид-19, и санкционная политика западных стран. Но все трудности были преодолены. В 2020 г. был получен первый ускоренный пучок в бустере[22], начата установка магнитов коллайдера. В ходе пусконаладочных работ на комплексе были выполнены и физические исследования на выведенных пучках Нуклотрона — на установках SRC (Short Range Correlations) и BM@N (Baryonic Matter at Nuclotron), и прикладные исследования по программе коллаборации ARIADNA (Applied Research Infrastructure for Advanced Developments at NICA fAcility).

В настоящее время завершается сборка и начаты испытания магнитно-криостатной системы коллайдера, оптимизируются режимы работы всех систем комплекса, завершается подготовка к работе с пучком первой экспериментальной установки на кольце коллайдера — детектора MPD.

Успехи сотрудников в создании комплекса не остались незамеченными: в 2023 г. А. И. Малахов был удостоен Премии им. П. А. Черенкова РАН за цикл исследований в релятивистской ядерной физике, проведенных в ОИЯИ и зарубежных центрах и положенных в основу физической программы ускорительного комплекса NICA, в 2024 г. за цикл работ «Многофункциональный комплекс ускорителей тяжелых ионов — инжектор

[22] *Бутенко А. В., Бровко О. И., Галимов А. Р., Горбачёв Е. В., Костромин С. А., Карпинский В. Н., Мончинский В. А., Мешков И. Н., Сидорин А. О., Сыресин Е. М., Трубников Г. В., Тузиков А. В., Филиппов А. В., Ходжибагиян Г. Г.* Бустер комплекса NICA: сверхпроводящий синхротрон нового поколения // УФН. 2023. Т. 193, № 2.

Лауреаты Премии им. В. И. Векслера Российской академии наук за 2024 г. Г. В. Трубников, А. В. Бутенко, А. О. Сидорин

коллайдера NICA» Премия им. В. И. Векслера РАН была присуждена научному коллективу из Объединенного института ядерных исследований — Г. В. Трубникову, А. В. Бутенко и А. О. Сидорину.

КРИОГЕНИКА И СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ В МЕГАПРОЕКТЕ NICA

Непрерывно развивавшаяся со дня основания ОИЯИ научная школа криогеники[23] позволила создать первый в мировой практике сверхпроводящий быстроциклирующий синхротрон для ускорения тяжелых ионов — Нуклотрон. В марте 1993 г. он впервые был охлажден до температуры 4,5 K и начата его эксплуатация, продолжающаяся до настоящего времени. Уже осуществлено более 60 сеансов работы ускорителя с охлаждением магнитов до температуры жидкого гелия с последующим отогревом до комнатной температуры и несколько десятков миллионов циклов возбуждения током до 6 кА.

Криогеника Нуклотрона отличалась большим количеством нигде ранее не применявшихся технологий и решений. Они описываются в таких основных терминах, как быстроциклирующие сверхпроводящие магниты, криостатирование двухфазным парожидкостным потоком гелия, необычно короткое время охлаждения системы до рабочих температур, параллельное соединение по потоку кипящего гелия более сотни сверхпроводящих магнитов, парожидкостные гелиевые турбодетандеры, винтовые гелиевые компрессоры со степенью сжатия более 25 всего в двух ступенях и др. Каждый из перечисленных пунктов стал новым важным шагом в развитии технологий жидкого гелия и сверхпроводящих магнитов[24].

---

[23] *Агапов Н. Н.* Научная школа криогеники в Лаборатории высоких энергий // Письма в ЭЧАЯ. 2004. Т. 1, № 6(123). С. 70–79.

[24] *Агапов Н. Н.* Криогенные технологии в сверхпроводящем ускорителе релятивистских ядер — Нуклотроне // ЭЧАЯ. 1999. Т. 30, № 3. С. 761–804.

В 2010-х гг. в ЛФВЭ активно происходит следующий этап развития ускорительной техники на базе сверхпроводящих магнитов. В рамках проекта NICA, включающего новые ускорители — синхротрон бустер и коллайдер, начались работы по совершенствованию конструкции магнитов «типа Нуклотрон» для этих задач и созданию уникального комплекса по сборке и испытанию сверхпроводящих магнитов. В настоящее время сооружение новых ускорителей находится на финальной стадии. Ниже приводится краткое описание элементов Нуклотрона, бустера, коллайдера[25], производственного комплекса по их сборке и испытаниям, а также системы обеспечения жидким гелием[26] этих объектов.

В Нуклотроне использованы простые и экономичные магниты, в которых поле формируется посредством железного ярма. Они характеризуются минимальным расходом сверхпроводника, хотя и ограничены по условиям насыщения железа величиной магнитного поля около 2 Тл. Основные элементы таких магнитов — сверхпроводящая обмотка и железное ярмо, обеспечивающее магнитное поле высокой однородности и воспринимающее магнитные силы, действующие на обмотку. Сверхпроводящий кабель (рис. 16) создан на основе мельхиоровой трубки диаметром 5×0,5 мм, внутри которой для охлаждения проходит кипящий парожидкостный поток гелия. На эту трубку спирально намотан сверхпроводник, представляющий собой медную проволочную матрицу диаметром 0,5 мм, содержащую внутри 1045 тонких ниобий-титановых волокон толщиной 10 мкм. Для обеспечения хорошего теплового контакта они прижаты к охлаждающей трубке с помощью бандажной проволоки. Кабель имеет электрическую изоляцию из двух слоев полиамида и двух слоев стеклоленты, пропитанной эпоксидным компаундом.

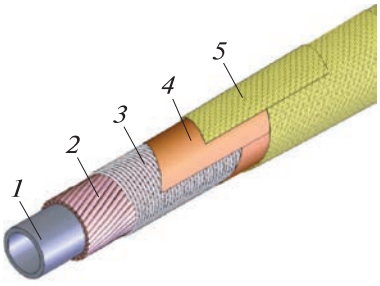


Рис. 16. Конструкция сверхпроводящего кабеля Нуклотрона: 1 — мельхиоровая трубка; 2 — сверхпроводящая проволока; 3 — бандажная проволока; 4 — полиамидная лента; 5 — стеклолента, пропитанная эпоксидным компаундом

Номинальный ток такого сверхпроводящего кабеля — 6 кА, переход магнитов в нормальное состояние наблюдается при подаче тока около 7,5 кА. Кольцевая магнитно-криостатная система состоит из 96 диполей и 64 квадруполей, созданных на основе описанного кабеля.

---

[25] *Khodzhibagiyan H. et al.* Development of Superconducting Accelerator Magnets at JINR // Natural Sci. Rev. 2024. Iss. 1. 6.

[26] *Agapov N. et al.* Cryogenics for the Future Accelerator Complex NICA at JINR // Part. Nucl., Lett. 2014. V. 11, No. 4(188). P. 760–767.

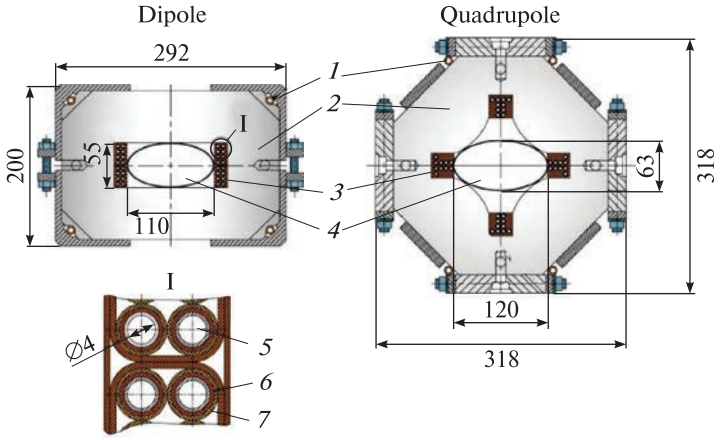


Рис. 17. Поперечные сечения диполя (слева) и квадруполя (справа) Нуклотрона: 1 — охлаждающая трубка железного ярма; 2 — ярмо магнита; 3 — обмотка; 4 — камера пучка; 5 — охлаждающая трубка; 6 — сверхпроводящий провод; 7 — электроизоляция

Поперечное сечение дипольных и квадрупольных магнитов приведено на рис. 17. Магниты имеют разборную конструкцию. Железное ярмо диполей состоит из двух соединенных посредством болтов симметричных частей, смонтированных из пластин электротехнической стали толщиной 0,5 мм. Ярмо квадруполей имеет четыре симметричные части. Элементы магнитной оптики ускорителя, а также гелиевые коллекторы прямого и обратного потоков размещены в кольцевом криостате, образуемом горизонтальными цилиндрическими участками из нержавеющей стали. Кроме того, по всему периметру внутри кольцевого криостата имеется теплозащитный экран, охлаждаемый жидким азотом. Цилиндрические участки имеют длины, соответствующие длинам магнитов, и в сборе образуют единые магнитно-криостатные блоки (рис. 18), соединяющиеся между собой посредством сильфонных развязок. Система подвеса магнитных элементов выполнена с помощью восьми тяг, расположенных в торцах этих блоков. Конструкция тяг рассчитана таким образом, что, несмотря на температурные деформации после охлаждения до рабочих температур, положение магнитной оси в пространстве не изменяется. К торцам вакуумного кожуха с помощью накидных фланцев присоединены гибкие сильфонные элементы, которые дают возможность перемещения блоков, что необходимо для юстировки. Конструкция устанавливается на имеющую юстировочное приспособление подставку. Вакуумные кожухи блоков соединяются разъемными муфтами. Они обеспечивают доступ к соединениям электрических и криогенных коммуникаций, расположенным в коротких промежутках между магнитами.

Магниты ускорительного комплекса NICA создавались на основе многолетнего опыта, полученного в ходе работы Нуклотрона. Все они произведены в ЛФВЭ и прошли широкую программу испытаний, из них основные — криогенные. Эта программа включала несколько этапов: охлажде-

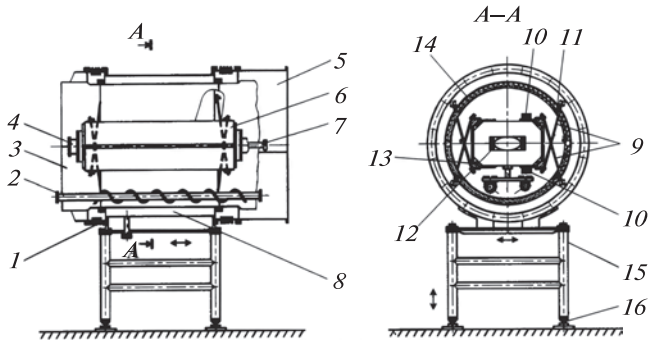


Рис. 18. Магнитно-криостатный блок Нуклотрона: 1 — сильфон; 2 — гелиевые коллекторы; 3 — теплоизолирующий экран; 4 — вакуумная камера ускоряемых частиц; 5 — муфта; 6 — железное ярмо; 7 — трубопровод жидкого азота; 8 — вакуумный кожух; 9 — тяга; 10 — сверхпроводящий кабель электрической связи магнитов; 11 — тепловой мост; 12 — обмотка; 13 — трубка для охлаждения ярма; 14 — теплоизоляция; 15 — подставка; 16 — юстировочный домкрат

ние магнита до температуры 4,5 K, тренировку сверхпроводящей обмотки, магнитные измерения при температуре жидкого гелия, измерение статического теплопритока и динамических тепловыделений, гидравлического сопротивления охлаждающего канала, поиск «холодных» течей и отепление. Для проведения этих работ в лаборатории создан специальный производственный комплекс, официальное открытие которого состоялось в ноябре 2016 г.

Комплекс включает в себя зону входного контроля, участки производства сверхпроводящего кабеля и обмоток, цех для сборки магнитов, магнит-

Производственный комплекс для сборки и испытаний магнитов ускорителей NICA

Магнитно-криостатные блоки ускорителей NICA. Слева направо: диполь и квадруполь бустера, диполь коллайдера

ных измерений при комнатной температуре, проверки на герметичность гелиевых коммуникаций магнитов и монтажа сверхпроводящих магнитов в криостат. На заключительном этапе изделия проходили испытания при рабочих температурах 4,5 K и токах до 12 кА, что было обеспечено специально разработанными гелиевыми рефрижераторами и устройствами подачи тока в обмотки магнитов. Производственный план предусматривал выпуск около 450 магнитно-криостатных блоков: 88 дипольных и квадрупольных для бустера, 186 для коллайдера и до 175 — для синхротрона SIS100 проекта FAIR. Для магнитов комплекса NICA этот план полностью выполнен.

Конструкции сверхпроводящих магнитов бустера и коллайдера показаны на рис. 19, 20, а их характеристики приводятся в табл. 2 и 3. Главные особенности: у бустера диполи имеют изогнутую форму с радиусом кривиз-

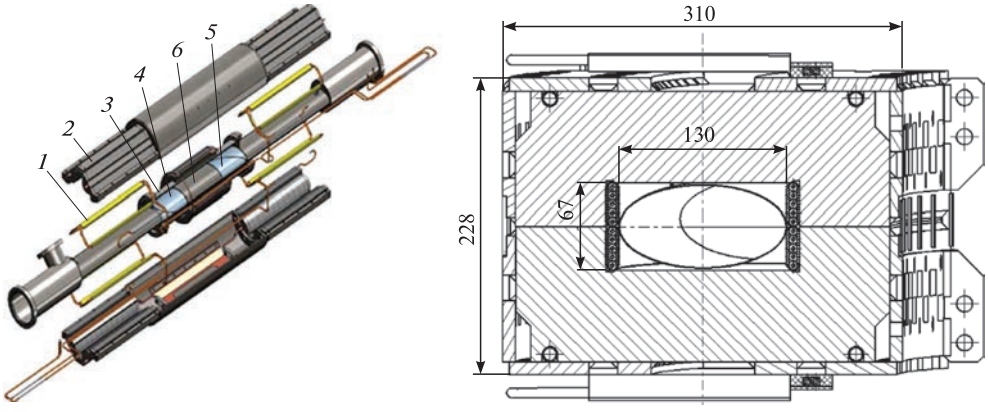


Рис. 19. Конструкция сверхпроводящих магнитов бустера. Слева — квадрупольный дублет; справа — дипольный магнит. 1 — половина обмотки; 2 — половина железного ярма; 3 — вакуумная камера ускоряемых частиц; 4, 5 — мониторы позиции пучка; 6 — корректирующий магнит

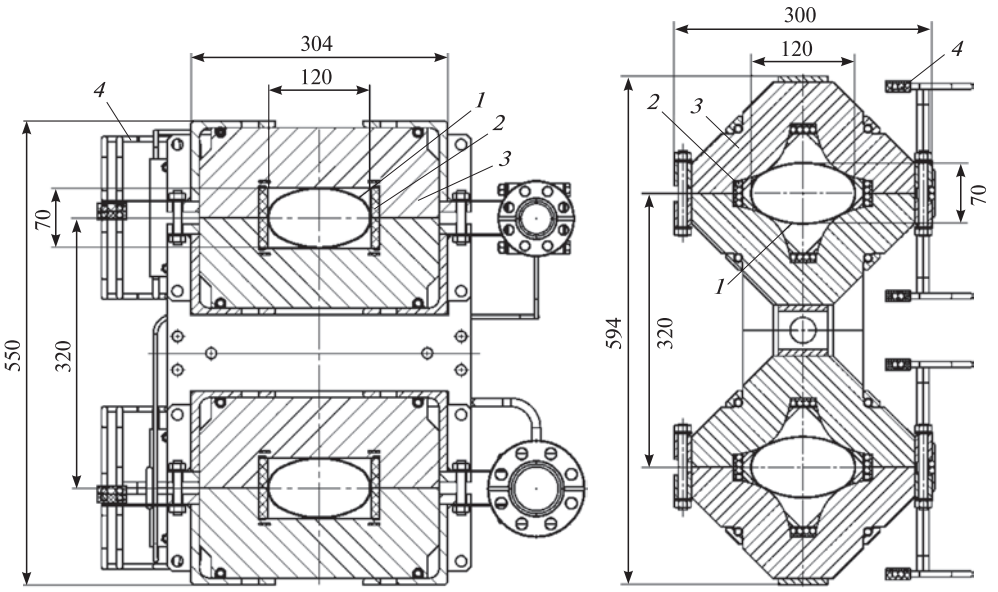


Рис. 20. Поперечное сечение диполя (слева) и квадруполя (справа) коллайдера NICA. 1 — вакуумная камера ускоряемых частиц; 2 — сверхпроводящая обмотка; 3 — железное ярмо; 4 — шинопроводы

Таблица 2. Основные характеристики магнитов бустера

Параметр	Диполь	Квадруполь
Количество магнитов	40	48
Максимальное магнитное поле, градиент	1,8 Тл	21,5 Тл/м
Эффективная длина магнита, м	2,2	0,47
Апертура камеры ускоренных частиц, мм	128/65	128/65
Радиус кривизны, м	14,09	—
Суммарная масса, кг	1030	110

Таблица 3. Основные характеристики магнитов коллайдера

Параметр	Диполь	Квадруполь
Количество магнитов	80+8[а)]	86+12[б)]
Максимальное магнитное поле, градиент	1,8 Тл	23,1 Тл/м
Эффективная длина магнита, м	1,94	0,47
Апертура камеры ускоренных частиц, мм	120/70	120/70
Расстояние между встречными пучками, мм	320	320
Суммарная масса, кг	1670	240

[а)] Специальные диполи для сведения пусков частиц в точках взаимодействия.
[б)] Квадруполи с одной апертурой вокруг точек взаимодействия.

ны около 14 м, а магниты коллайдера выполнены с двумя апертурами для встречных пучков частиц.

Криогенная система ЛФВЭ в связи с созданием новых ускорителей для проекта NICA была значительно увеличена по холодопроизводительности — с 4000 до 10 000 Вт. Крупнейший в России комплекс получения жидкого гелия, работающий для нужд Нуклотрона с 1993 г., был дополнен целым рядом новых промышленных установок, головные образцы которых были спроектированы и изготовлены по техническим заданиям ОИЯИ. Эти головные образцы, запущенные в работу и всесторонне испытанные силами сотрудников Института, стали основой для серийного производства таких изделий в рамках возникшей в текущее время необходимости импортозамещения.

Принципиальная схема криогенного комплекса NICA показана на рис. 21. Его главные элементы изготовлены АО «НПО «Гелиймаш» (Москва) и АО «НИИтурбокомпрессор им. В. Б. Шнеппа» (Казань):

— ожижитель гелия на 1000 литров в час — самый крупный по производительности на территории России;
— транспортная цистерна жидкого гелия емкостью 40 м^3;
— сателлитные гелиевые рефрижераторы холодопроизводительностью до 2000 Вт;
— двухступенчатые винтовые компрессорные агрегаты, перерабатывающие 6600 кубометров в час газообразного гелия с давлением на выходе 30 атм.

Это оборудование обеспечивает необходимый для поддержания рабочих температур рост холодопроизводительности и возможность быстрого охлаждения сверхпроводящих магнитов общей массой около 290 тонн от температуры окружающей среды до 4,5 К. Особенности криостатирования бустера и коллайдера заключаются в применении сателлитных рефрижераторов, расположенных вблизи колец ускорителей. Они используют жидкий гелий, подаваемый по трубопроводам от центрального ожижителя. Такие рефрижераторы, состоящие практически только из теплообменников, отличаются многорежимностью, высокой надежностью и простотой в управлении. Менее надежные элементы, требующие постоянного внимания персонала, сосредоточены в одном месте — на центральной криогенной станции. Для такой схемы работы нужен минимум криогенных трубопроводов, при этом сохраняется высокая энергетическая эффективность.

Расположение нового оборудования криогенного комплекса показано на рис. 22. Оно распределено по нескольким зданиям ЛФВЭ, соединенным необходимыми технологическими трубопроводами: центральная криогенная станция в корпусе 1Б, помещение сателлитных рефрижераторов в здании коллайдера и две компрессорные станции. Значительная часть оборудования смонтирована и эксплуатируется под открытым небом: газгольдеры гелия и азота объемом по 1000 м^3, цистерны жидкого гелия и азота, а также ресиверы для хранения газов под давлением.

На центральной криогенной станции сосредоточены два гелиевых рефрижератора КГУ-1600/4,5, криостатирующие полукольца Нуклотрона, ожи-

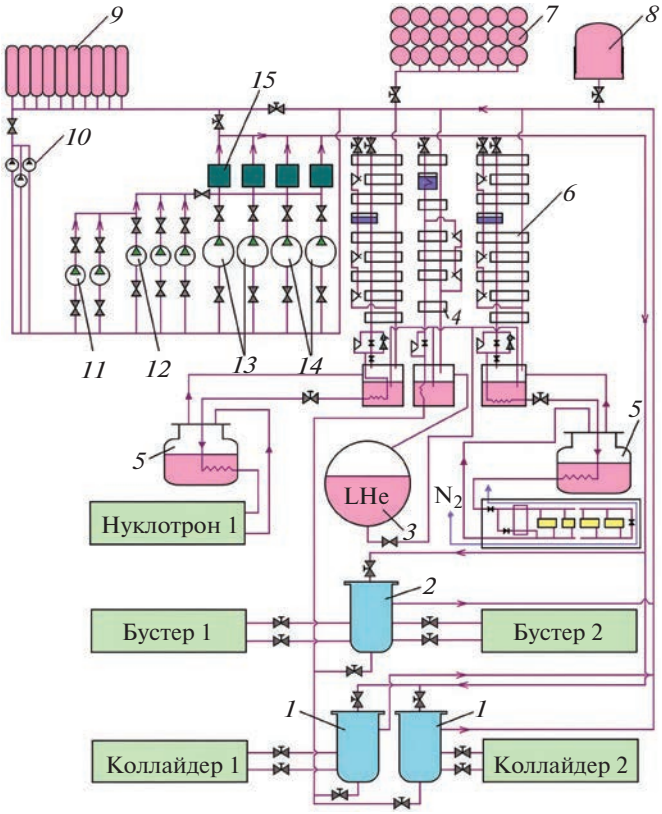


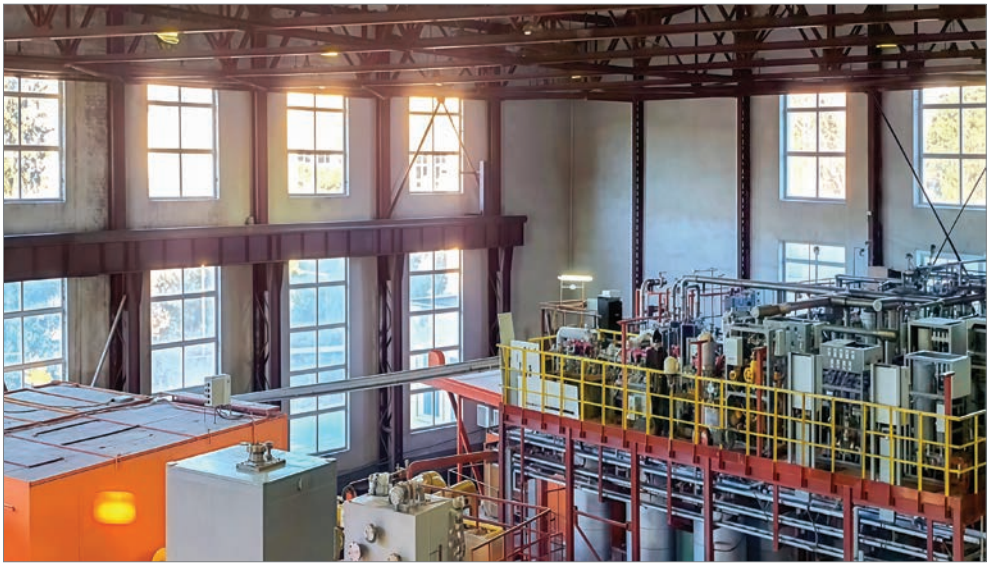
Рис. 21. Принципиальная схема криогенного гелиевого обеспечения ускорительного комплекса NICA: 1 — сателлитные рефрижераторы РСГ-2000/4,5 коллайдера (2 шт.); 2 — сателлитный рефрижератор РСГ-2000/4,5 бустера; 3 — 40-м^3 криогенная гелиевая цистерна КЦГ-40/0,5; 4 — гелиевый ожижитель ОГ-1000; 5 — сепараторы Нуклотрона (2 шт.); 6 — гелиевые рефрижераторы КГУ-1600/4,5 (2 шт.); 7 — газгольдер 1000 м^3; 8 — газгольдер 20 м^3; 9 — ресиверы 20 м^3 сжатого гелия (10 шт.); 10 — поршневые компрессоры 6ГШ-1,6-2/1,1 (3 шт.); 11 — поршневые компрессоры 2ГМ4-12/31 (2 шт.); 12 — поршневые компрессоры 305НП-20/30 (3 шт.); 13 — винтовые компрессорные агрегаты «Каскад-110/30» (2 шт.); 14 — винтовые компрессорные агрегаты «Каскад-80/25» (2 шт.); 15 — блоки маслоочистки и осушки МО-800 (4 шт.)

житель гелия ОГ-1000, сателлитный рефрижератор бустера и блоки тонкой очистки газообразного гелия, поступающего под давлением из компрессоров. Здесь же расположены установки получения жидкого азота, предназначенные для реконденсации паров, выходящих из теплозащитных экранов криостатов и токовводов магнитов ускорителей. Создание такой замкнутой азотной системы позволяет отказаться от выбросов азота в атмосферу и существенно снизить эксплуатационные затраты на комплексе NICA.

Для компрессорного оборудования было построено новое здание. В нем введены в действие два гелиевых винтовых компрессорных агрегата нового поколения, конструкция которых учитывает многолетний опыт эксплуата-

Рис. 22. Расположение оборудования криогенного комплекса NICA

ции подобных машин в сеансах работы Нуклотрона. Кроме того, в здании размещены три азотных турбокомпрессора, входящие в замкнутую систему реконденсации паров азота. Установленная мощность электродвигателей в новой компрессорной станции составляет 7,6 МВт.



Центральная криогенная станция ЛФВЭ в корпусе 1Б

Корпус новой компрессорной станции комплекса NICA

Винтовые компрессорные агрегаты «Каскад-110/30» в новой компрессорной станции

Заканчивая описание криогенных и магнитных технологий в мегапроекте NICA, надо отметить, что их развитие не останавливается. В ближайшей перспективе новый прогресс — создание магнитных элементов для ускорителей и физических приборов с применением высокотемпературной сверхпроводимости. На производственном комплексе лаборатории уже изготовлены и испытаны 4 квадруполя, планируется создание модельного и полномасштабного диполей так называемого «нового Нуклотрона», которые смогут работать при температурах до 50–80 K.

ЭКСПЕРИМЕНТЫ НА УСКОРИТЕЛЬНОМ КОМПЛЕКСЕ NICA

Опыт создания Нуклотрона и его эксплуатации позволил подготовить проект коллайдерного комплекса NICA, который реализуется в настоящее время, и Нуклотрон остается его «сердцем»: ионные пучки, ускоренные на Нуклотроне, будут наполнять встречные кольца коллайдера и затем сталкиваться в двух точках. В зонах пересечения пучков будут расположены установки MPD (Multi-Purpose Detector) и SPD (Spin Physics Detector).

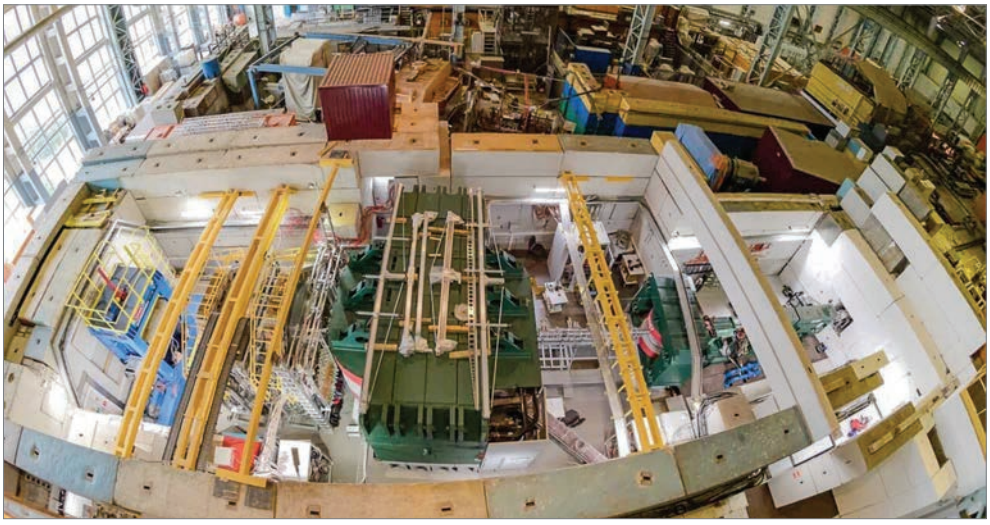
Изучение столкновений тяжелых релятивистских ядер всегда являлось важной частью научной программы ОИЯИ и обсуждалось на различных совещаниях и конференциях. Результатом этих обсуждений стало предложение в 2007 г. проектов модернизации ускорителя Нуклотрон и строительства нового релятивистского коллайдера ионов NICA с экспериментальной установкой MPD для изучения свойств горячей и плотной барионной материи. Инициатором проекта являлся А. Н. Сисакян, теоретическую поддержку осуществлял В. Д. Тонеев, а разработкой ускорительной части проекта занимался И. Н. Мешков. Параллельно шло развитие инфраструктуры для проведения экспериментов с фиксированной мишенью.

ЭКСПЕРИМЕНТ BM@N

С вводом в эксплуатацию расположенного внутри ярма синхрофазотрона сверхпроводящего синхротрона бустера в 2021 г. существенно выросли интенсивности ускоряемых ядер Нуклотрона. На выведенном пучке начала работать новая современная универсальная установка BM@N (Baryonic Matter at Nuclotron, руководитель проекта М. Н. Капишин). Физическая программа BM@N включает в себя изучение уравнения состояния ядерной материи, ее термодинамических параметров и динамики ядерных столкновений, изучение свойств адронов в плотной среде, изучение рождения каскадных гиперонов вблизи порога и рождения гиперядер в столкновениях пучков тяжелых ионов с различными фиксированными мишенями при энергиях до 4,5 ГэВ/нуклон.

Реализация экспериментальной программы BM@N началась в 2015 г., когда были зарегистрированы первые столкновения пучков дейтронов с мишенями. Тогда проверялась возможность транспортировки пучка до мишени в установке. Речь еще не шла о получении физических результатов, имелись только три пропорциональные камеры, созданные в ЛФВЭ, и две дрейфовые камеры, полученные из ЦЕРН, до этого использовавшиеся в эксперименте NA48. Но год за годом, благодаря труду большого числа людей, экспериментальная установка модифицировалась и наполнялась детекторами. Были созданы новые детекторные подсистемы для регистрации заряженных и нейтральных частиц, их идентификации и калориметрии. Параллельно с этим прорабатывалась физическая программа и обновлялось программное обеспечение как для работы с детекторами, так и для обработки и анализа экспериментальных данных.

Первый физический сеанс на тяжелых ионах был проведен зимой 2022–2023 гг. За время сеанса было набрано более 500 миллионов событий взаи-



Панорамный вид установки BM@N

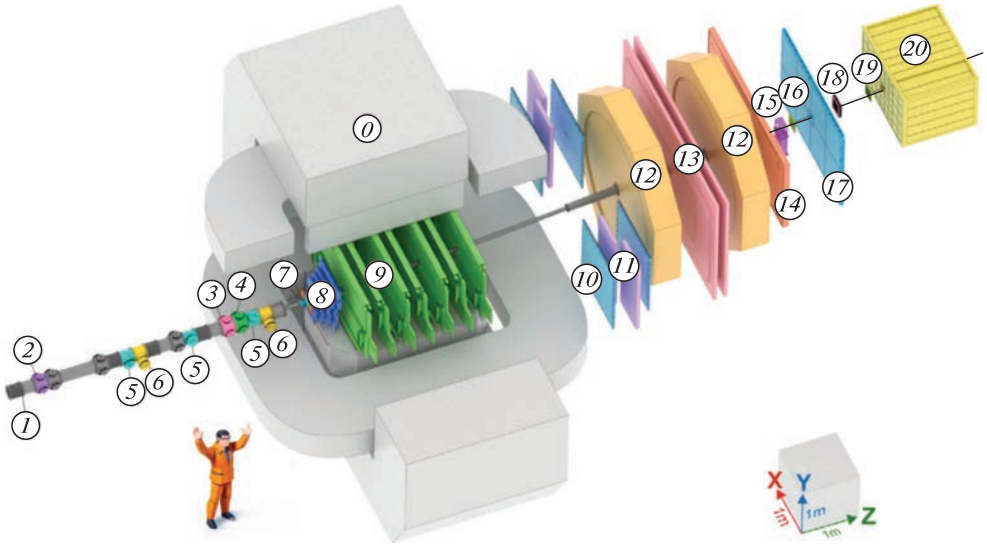


Рис. 23. Схема установки BM@N во время сеанса 2022–2023 гг. на пучке ксенона

модействия ионов ксенона с цезиево-йодовой мишенью при двух энергиях пучка — 3,0 и 3,8 ГэВ/нуклон. Уже в ходе сеанса, благодаря системе мониторирования собранных данных, коллектив мог видеть в реальном времени параметры событий вплоть до массовых распределений рожденных заряженных частиц. И еще до применения детальных калибровок в спектре инвариантных масс пар пионов и протонов был виден пик от Λ-гиперонов более качественный, чем в предыдущих тестовых сеансах.

Схема установки, используемой при наборе данных в 2022–2023 гг., представлена на рис. 23. В качестве ее главных компонентов можно выделить[27] анализирующий магнит SP-41 (*0*), внутреннюю трековую систему, состоящую из кремниевых координатных детекторов FSD (*8*) и газовых электронных умножителей GEM (*9*), внешнюю трековую систему, состоящую из дрейфовых камер DCH (*12*) и катодных стриповых камер (*10*, *17*), времяпролетные детекторы ToF-400 и ToF-700 (*11*, *13*), сцинтилляционную стенку ScWall (*14*) и передний адронный калориметр (*20*).

Каждый детектор отвечает самым современным требованиям и заслуживает отдельного разговора, но все же стоит отметить главную трековую систему, состоящую из уникальных газовых электронных умножителей (GEM) с тремя усиливающими слоями (triple GEM). Эти детекторы являются самыми большими GEM-детекторами, использующимися в физических экспериментах, в мире (площадь одной плоскости составляет около 0,75 м^2).

В настоящее время в международную коллаборацию эксперимента BM@N входят более двухсот человек из пяти стран. Руководителем колла-

[27] *The BM@N Collab.* // Nucl. Instr. Meth. A. 2024. V. 1065. P. 169532.

борации является Р. Ледницки, технический координатор — С. М. Пиядин, а М. М. Меркин — председатель совета институтов. Коллаборация занимается подготовкой и модернизацией установки для следующих сеансов и анализом набранных экспериментальных данных. Так, уже опубликованы результаты рождения π^+- и K^+-мезонов в аргон-ядерных взаимодействиях при энергии 3,2 ГэВ/нуклон[28]. Готовятся публикации по анализу рождения Λ-гиперонов и короткоживущих нейтральных каонов, легких ионов, измерению потоков протонов, дейтронов и Λ-гиперонов, выходу нейтронов и определению центральности взаимодействия. Два сотрудника защитили кандидатские диссертации, подготовленные на основе полученных экспериментальных данных, готовится еще несколько защит.

Эксперимент BM@N достаточно молодой, и большое количество молодежи среди участников коллаборации дает возможность уверенно смотреть в будущее и быть готовыми к решению новых инженерно-технических и физических задач.

ЭКСПЕРИМЕНТ MPD

Ускорительный комплекс NICA и экспериментальная установка MPD (Multi-Purpose Detector — многоцелевой детектор) находятся на завершающей стадии строительства, первые пучки тяжелых ионов ожидаются в 2026 г. Основная научная задача эксперимента MPD — изучение свойств сильновзаимодействующей материи при экстремально больших барионных плотностях, реализуемых при энергиях взаимодействия тяжелых ядер $\sqrt{s_{NN}} = 4–11$ ГэВ в режиме коллайдера и/или при $\sqrt{s_{NN}} = 2{,}4–3{,}5$ ГэВ в режиме эксперимента с фиксированной мишенью. Поиск сигналов, свидетельствующих о начале деконфайнмента, фазового перехода первого рода и критической точки сильновзаимодействующей материи является основной целью эксперимента MPD. Для достижения данной цели предполагается реализовать программу сканирования по энергии и размеру сталкивающихся ядер на коллайдере NICA с измерением большого числа сигналов для каждой измеряемой системы, включая:

— выход странных мезонов, (мульти)странных барионов и антибарионов;
— флуктуации множественного рождения частиц, поперечный импульс, относительный выход частиц;
— угловые корреляции и коллективные потоки идентифицированных адронов;
— импульсные корреляции (фемтоскопия);
— рождение лептонных пар и мягких прямых фотонов;
— поляризационные явления.

Расчеты показывают, что самая высокая плотность барионов достигается в столкновениях ядер именно в диапазоне энергий NICA, что делает установку MPD особенно хорошо подходящей для решения данных задач. Эта область энергий важна и для современной астрофизики. Модельные

[28] *The BM@N Collab.* // JHEP. 2023. V. 174.

расчеты показывают, что при слиянии нейтронных звезд ядерная материя достигает плотностей и температур, аналогичных тем, которые возникают при столкновении тяжелых ионов на NICA. Таким образом, MPD предлагает уникальную возможность дополнить изучение слияний нейтронных звезд, получив данные из наземного лабораторного эксперимента. Ожидается, что возможность изучать столкновения различных ядерных систем на комплексе NICA значительно расширит результаты программы сканирования по энергии для одной системы Au + Au на коллайдере RHIC, которая закончилась в 2021 г.

Для проведения указанных исследований детекторная установка MPD должна обеспечить эффективную идентификацию продуктов соударения ядер и измерение их параметров при высоких загрузках в широкой области фазового пространства. Для этого экспериментальная установка MPD включает в себя:

— трековую систему для измерения треков заряженных частиц и их импульсов в диапазоне 0,1–2 ГэВ/c;
— времяпролетную систему для идентификации частиц, способную разделять протоны, π-мезоны, K-мезоны и электроны в диапазоне импульсов 0,1–3 ГэВ/c;
— систему триггера и определения координат первичной вершины взаимодействия с точностью 100–200 мкм и вторичных вершин распада с точностью 10–20 мкм;
— детекторы для регистрации гамма-квантов в диапазоне энергий 50–2000 МэВ.

Максимальный размер установки вдоль пучка определяется расположением магнитных линз накопительных колец коллайдера и не может превышать 9 м, с тем чтобы иметь возможность хорошей фокусировки пучков в области их встречи. Диаметр центрального детектора является результатом компромисса между необходимостью достаточной времяпролетной базы и длиной трека для точного определения типа частиц и их импульса, с одной стороны, и высокими требованиями к однородности магнитного поля и разумной стоимости магнитной системы — с другой. Длина трека не должна быть меньше 1 м по радиусу, и число точек на треке не должно быть меньше 50 для получения требуемого импульсного разрешения 3 % в диапазоне импульсов частиц до 2 ГэВ/c. При таком импульсном разрешении и измерении времени пролета на базе 1,5 м с точностью до 100 пс удастся разделить 90 % пионов и каонов, образованных при столкновении ионов золота с энергией в системе центра масс 11 ГэВ/нуклон.

Установка должна перекрывать близкую к 4π геометрию. Для точного измерения импульсов частиц трековая система должна работать в однородном магнитном поле с индукцией 0,2–0,5 Тл. Очевидно, что для получения такого поля в указанном объеме предпочтительно было использовать сверхпроводящий магнит соленоидального типа.

Установка MPD, отвечающая данным требованиям, представлена на рис. 24. Детектор состоит из цилиндрической и двух торцевых частей, расположенных в магнитном поле. Цилиндрическая часть состоит из различ-

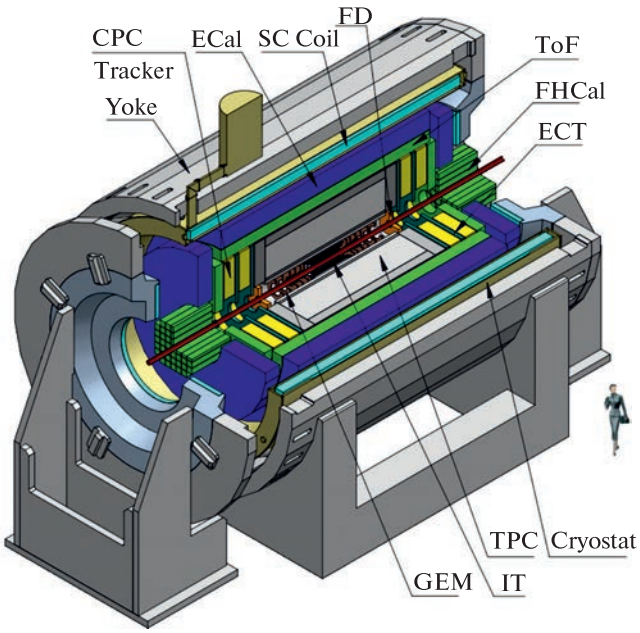


Рис. 24. Схема установки MPD, полный вариант

ных типов детекторов, окружающих область столкновения пучков, которые включают трековую систему, времяпролетную систему и электромагнитный калориметр.

В качестве основной трековой системы было предложено использовать время-проекционную дрейфовую камеру (TPC, рук. С. А. Мовчан). Ее должна дополнять внутренняя трековая система на основе кремниевых полупроводниковых детекторов (ITS, рук. Ю. А. Мурин), окружающих область соударения пучков. Оба детектора могут обеспечить точное восстановление треков заряженных частиц и их импульсов, а также определение вершин распадов короткоживущих частиц. Внутренний детектор должен иметь как минимум шесть слоев, окружающих область взаимодействия пучков, для восстановления вторичных вершин распада очарованных мезонов и барионов.

Для идентификации частиц в дополнение к TPC используется времяпролетная система (ToF, рук. В. А. Бабкин), которая обеспечивает идентификацию заряженных частиц с импульсами до 2 ГэВ/*c* в широкой области псевдобыстрот. Быстрый передний детектор (FFD, рук. В. И. Юревич) обеспечивает стартовый сигнал для времяпролетной системы и имеет временное разрешение не хуже 50 пс.

Для идентификации электронов и фотонов, а также измерения их энергии используется электромагнитный калориметр с проекционной геометрией (ECal, рук. И. А. Тяпкин). Высокая гранулярность калориметра (4×4 см), наряду с хорошим энергетическим и временным разрешением, существенно улучшит возможности идентификации частиц в детекторе

MPD. Оптимальный по конструкции и цене калориметр основывается на многослойной сборке поглотитель–детектор типа «шашлык».

Для расширения области регистрации частиц в передней области псевдобыстрот до $|\eta| \sim 2$, где трековая эффективность TPC уменьшается, необходимо добавление передних спектрометров, включающих торцевые трековые системы (ECT) на основе пропорциональных трубок типа строу, пропорциональных камер с катодным считыванием или детекторов на базе GEM-структур. ECT должны быть расположены на обоих торцах MPD непосредственно за считывающими камерами TPC. Для идентификации частиц в диапазоне углов $|\eta| > 1{,}2$ предполагается также использовать времяпролетную систему, подобную ToF в цилиндрической части MPD.

Для регистрации частиц, испущенных под очень малыми углами, $1{,}2 < |\eta| < 2$, используются быстрые передние детекторы (FFD) и адронные калориметры (FHCal, рук. А. П. Ивашкин). Перечисленные детекторы используются в триггере (рук. С. Н. Базылев) для определения центральности соударения и для восстановления точки взаимодействия пучковых ядер.

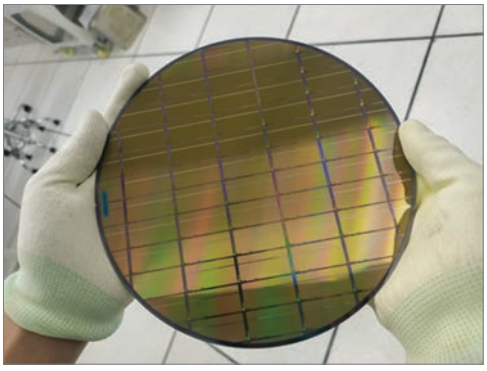
Таким образом, в рассматриваемой структуре MPD можно выделить три области с характерным методом и точностью измерения: центральная часть $|\eta| < 1{,}2$, передняя область $1{,}2 < |\eta| < 2$, в которой импульс частиц измеряется довольно грубо ($dp/p \sim 4–10\,\%$), и область $2 < |\eta| < 3$, где измеряются интегральные параметры события.

Для оптимизации времени конструирования и запуска установки целесообразно было создавать ее поэтапно. На первом этапе собирается базовая конфигурация, которая должна включать такие подсистемы, как TPC, цилиндрическая часть ToF, FFD, FHCal и цилиндрическая часть ECal. Внутренняя трековая система ITS, передняя трековая система, а также торцевые ToF могут быть отнесены к полной конфигурации и изготовляться на втором этапе. В базовой конфигурации установка может эффективно идентифицировать вторичные частицы и измерять их импульсы в диапазоне псевдобыстрот $|\eta| < 1{,}2$.

В 2020–2025 гг. были изготовлены основные элементы всех детекторных подсистем базовой конфигурации установки MPD, которая включает в себя: время-проекционную камеру (TPC), времяпролетную систему (ToF), электромагнитный калориметр (ECal), передний быстрый детектор (FFD) и передний адронный калориметр (FHCal). В настоящее время осуществляется их сборка, тестирование и калибровка. Была проведена большая работа по сборке и вводу в эксплуатацию сверхпроводящего магнита установки (рук. К. А. Мухин). В конце 2024 г. магнит впервые был охлажден до рабочей температуры жидкого гелия 4,5 K. В настоящее время осуществляется подготовка к измерению магнитного поля. Были разработаны и построены многоуровневые платформы с «чистыми» комнатами для электроники и систем управления детекторными подсистемами, оптимизирована схема прокладки огромного числа кабелей и труб различного диаметра (рук. А. А. Федюнин). На первом этапе запуска установки MPD с пучками в 2025–2026 гг. предполагается использование ядер Xe и Bi, которые обеспечивают более надежную работу ускорительного комплекса NICA во время

его ввода в эксплуатацию. В базовой конфигурации установка MPD позволит измерять импульсы частиц и идентифицировать их в диапазоне псевдобыстрот до $|\eta| < 1{,}2$.

Создание установки MPD не может не сопровождаться внедрением новейших мировых технологий для регистрации частиц, ранее недоступных в ОИЯИ. Наиболее яркой иллюстрацией этого является проект построения шестислойного вершинного трекера MPD из монолитных активных пиксельных сенсоров (MAPS) для идентификации продуктов распадов короткопробежных D^0- и D^+-мезонов. Шесть миллиардов пикселей позволяют регистрировать пролет вторичных заряженных частиц с пространственной точностью лучше 10 мкм. Именно эти очарованные частицы рассматриваются как один из наиболее перспективных пробников «новой» физики для исследований в столкновениях тяжелых ядер высоких энергий. Реализация этого проекта потребовала освоения технологий изготовления ультралегких механических конструкций из композитных материалов с встроенными в них элементами системы охлаждения и создания высокотехнологичных участков для прецизионной сборки модулей и супермодулей ITS-системы. И, главное, были начаты совместные работы с китайскими партнерами из Нормального университета Центрального Китая (НУЦК, Ухань) и Университета науки и технологии Китая (Хэфэй) по проектированию и производству специализированных интегральных схем большой степени интеграции, доселе недоступных на территории РФ, предназначенных для регистрации частиц, агрегации и передачи огромного объема генерированных данных трекером на серверы удаленной онлайн фермы MPD. На фото представлена одна из 12 кремниевых пластин с первыми прототипами MAPS MICA, изготовленных на одном из государственных предприятий Китая и прошедших успешные испытания на стендах с радиоактивными источниками.



Кремниевая пластина с чипами первого прототипа MICA (с разрешения проф. Сиангминг Суна, НУЦК (Ухань))

В последние годы была проведена комплексная программа исследований производительности установки MPD в базовой конфигурации. На основе данных Монте-Карло моделирования работы экспериментальной установки с полной реконструкцией событий была исследована эффективность измерения выходов и угловых распределений различных типов частиц, включая легкие мезоны и гипероны, резонансы, легкие ядра и гиперядра, прямые фотоны и дилептоны. Было показано, что установка MPD в базовой конфигурации будет способна измерять коллективные потоки и корреляции частиц в зависимости от центральности столкновений, поперечного импульса и быстроты частиц с высокой

эффективностью. Были исследованы возможности установки MPD и для работы с фиксированной мишенью, что позволит значительно расширить диапазон доступных для изучения энергий и решить проблему малой частоты ядерных столкновений, наиболее актуальную при запуске коллайдера. Результаты этих исследований были представлены на крупных международных конференциях, а также опубликованы в реферируемых журналах, в том числе в двух коллаборационных статьях[29].

В настоящее время также разрабатывается концепция будущего обновления MPD с установкой передних спектрометров, содержащих трековые станции и детекторы для идентификации частиц. Добавление передних спектрометров увеличит аксептанс детектора MPD по псевдобыстроте до $|\eta| < 2{,}0$. При этом появится возможность осуществить на MPD еще более детальное изучение фазовой диаграммы КХД, впервые используя трехмерное сканирование по следующим переменным: энергия столкновения, размер взаимодействующей системы и быстрота частиц. Реализация проекта увеличит чувствительность измеряемых сигналов к изменениям в фазовой диаграмме КХД.

В реализации проекта MPD принимают участие более 500 ученых и инженеров из 39 институтов и университетов 12 стран. На основе проекта MPD в ОИЯИ создана реально действующая большая международная коллаборация, которая за 6 лет существования прошла испытание временем. Руководитель коллаборации MPD — В. Г. Рябов, руководители проекта MPD — В. Д. Кекелидзе и В. М. Головатюк.

Коллектив участников проекта, несомненно, обладает высокой научной квалификацией в создании современной детекторной аппаратуры, а также огромным опытом в проведении экспериментов по изучению столкновений релятивистских тяжелых ионов на ускорителях SIS, Нуклотрон, SPS, RHIC и LHC, в обработке экспериментальных данных и моделировании процессов.

ЭКСПЕРИМЕНТ SPD

Основной целью проекта «Spin Physics Detector» («Детектор спиновой физики») на коллайдере NICA является изучение спиновой структуры нуклонов. Должен быть получен исчерпывающий ответ на вопрос, как спины кварков и глюонов, составляющих нуклон, а также их внутреннее движение формируют спин нуклона. Особое внимание в предлагаемых измерениях будет уделено именно глюонной компоненте. Этот проект объединяет как опыт «домашних» экспериментов с поляризованными пучками, так и опыт участия ОИЯИ в экспериментах по спиновой физике в ведущих мировых центрах. В проекте участвуют более 150 сотрудников четырех лабораторий

[29] *Abgaryan V. et al. (MPD Collab.)*. Status and Initial Physics Performance Studies of the MPD Experiment at NICA // Eur. Phys. J. A. 2022. V. 58, No. 7. P. 140; e-print: 2202.08970 [physics.ins-det];

Abdulin R. et al. (MPD Collab.). MPD Physics Performance Studies in Bi + Bi Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 9.2$ GeV // Rev. Mex. Fis. 2025. V. 71. 041201; e-print: 2503.21117 [nucl-ex].

Коллаборация SPD на совещании в Ереване. 2025 г.

ОИЯИ: ЛЯП, ЛФВЭ, ЛТФ и ЛИТ, а также более 200 ученых и специалистов в рамках коллаборации SPD из более чем 30 научных центров России, Европы, Азии, Африки и Америки.

В 2014 г. рабочая группа, возглавляемая И. А. Савиным, в которую также входили А. В. Гуськов, А. В. Ефремов, А. Д. Коваленко, В. В. Кухтин, А. П. Нагайцев, Д. В. Пешехонов, О. В. Теряев, Н. Д. Топилин и О. Ю. Шевченко, подготовила письмо о намерениях, где была сформулирована программа измерений и описана предполагаемая экспериментальная установка. Большую роль в становлении проекта SPD сыграли серии тематических конференций DSPIN (Дубна) и SPIN-Praha (Чехия). В 2018 г. под руководством Р. Ценова началась подготовка концептуального проекта детектора, а к 2021 г. была доработана физическая программа эксперимента. Летом 2021 г. была сформирована международная коллаборация SPD, соруководителями которой были избраны А. В. Гуськов (ОИЯИ) и В. Т. Ким (ПИЯФ). В 2024 г. Технический проект детектора SPD[30] прошел независимую международную экспертизу и был одобрен руководством ОИЯИ. Работу над этим объемным и сложным документом координировали сотрудники ОИЯИ Г. Д. Алексеев, В. А. Аносов, Л. Г. Афанасьев, А. А. Балдин, О. П. Гаврищук, А. В. Гуськов, Д. В. Дедович, И. И. Денисенко, Т. Л. Еник, А. С. Жемчугов, Н. И. Замятин, Г. Д. Кекелидзе, А. Ю. Корзенев, А. В. Куликов, В. П. Ладыгин, Д. Н. Никифоров, Д. А. Олейник, В. В. Терещенко, Г. Г. Ходжибагиян и В. Б. Чмиль.

В настоящее время проект SPD (рис. 25) находится в стадии подготовки к созданию подсистем для первого этапа эксперимента. Работы ведутся как

[30] *Abazov V. et al. (SPD Collab.).* Technical Design Report of the Spin Physics Detector at NICA // Natural Sci. Rev. 2024. Iss. 1. 1.

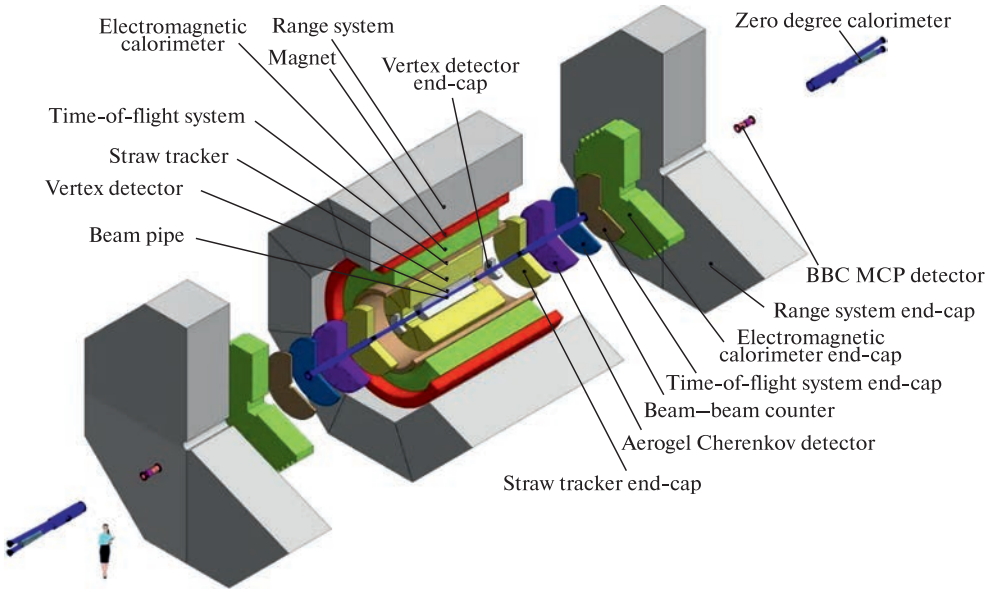


Рис. 25. Схема установки SPD

в лабораториях ОИЯИ, так и в институтах-участниках проекта. В международную коллаборацию вливаются новые научные коллективы. Созданный задел дает уверенность в успешной реализации амбициозных планов.

ЭКСПЕРИМЕНТЫ НА БОЛЬШОМ АДРОННОМ КОЛЛАЙДЕРЕ

Большой адронный коллайдер (Large Hadron Collider, LHC), работающий с 2009 г. в ЦЕРН (Женева), является самым большим и самым мощным из когда-либо созданных человечеством ускорителей. С его работой и получаемыми результатами связаны основные надежды физики элементарных частиц и фундаментальных взаимодействий в последние десятилетия. Физические программы двух крупнейших многоцелевых экспериментов на LHC — ATLAS (от англ. A Toroidal LHC ApparatuS) и CMS (Compact Muon Solenoid) — нацелены на решение таких первоочередных задач, как подтверждение механизма нарушения электрослабой симметрии, проверка Стандартной модели взаимодействий элементарных частиц и поиск путей объединения трех фундаментальных взаимодействий, решение проблемы бариогенезиса и иерархии масс элементарных частиц, поиск частиц-кандидатов на роль темной материи, и многих других. Кроме того, физическая программа экспериментов включает целый комплекс исследований, направленных на изучение закономерностей взаимодействия ядер при высоких энергиях, исследование нового состояния ядерной материи — кварк-глюонной плазмы и многое другое.

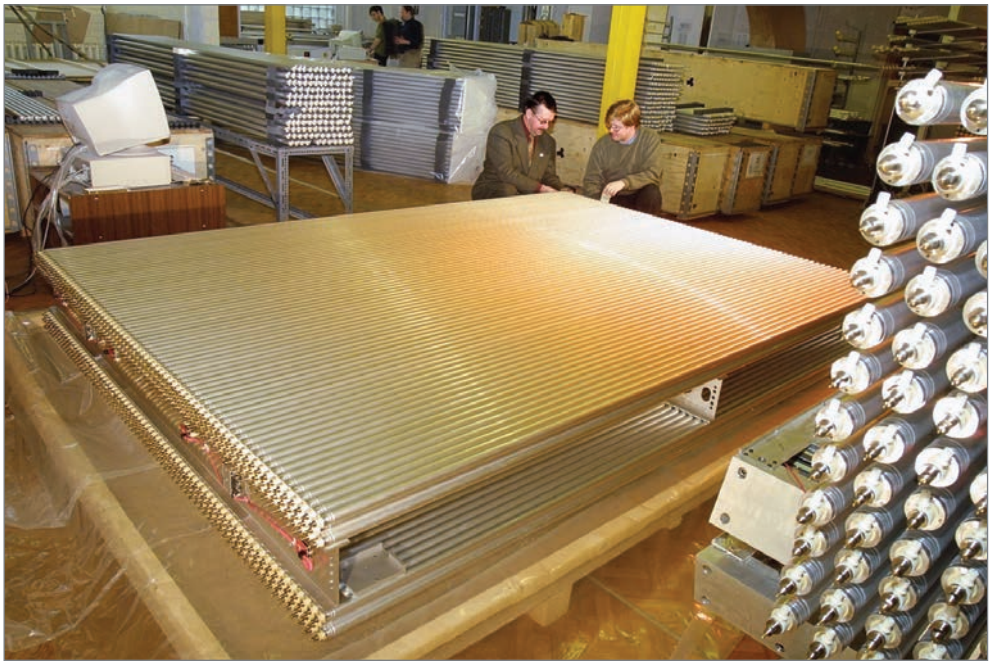
Многоцелевые детекторы ATLAS и CMS на Большом адронном коллайдере были созданы прежде всего для открытия бозона Хиггса и исследования его свойств, а также для поиска «новой» физики за пределами Стандартной модели (СМ). Первая задача была успешно выполнена: бозон Хиггса открыт в 2012 г., но для детального исследования его свойств, а также для поиска «новой» физики требуется в сотни раз больше данных.

ЭКСПЕРИМЕНТ ATLAS

В списке авторов «Letter of Intent» (CERN/LHCC/92-4) многоцелевого эксперимента ATLAS на LHC, изданного в октябре 1992 г., было уже 50 участников из ОИЯИ. Сотрудники ОИЯИ внесли вклад в создание *всех* детекторных систем установки ATLAS. Лишь несколько стран и крупных научных центров смогли себе это позволить. Из наиболее значительных вкладов стоит отметить работы ОИЯИ по созданию магнитной системы, мюонного спектрометра и триггерной системы ATLAS, адронного сцинтилляционного калориметра, жидкоаргонового адронного калориметра и трекера переходного излучения на основе строу-трубок.

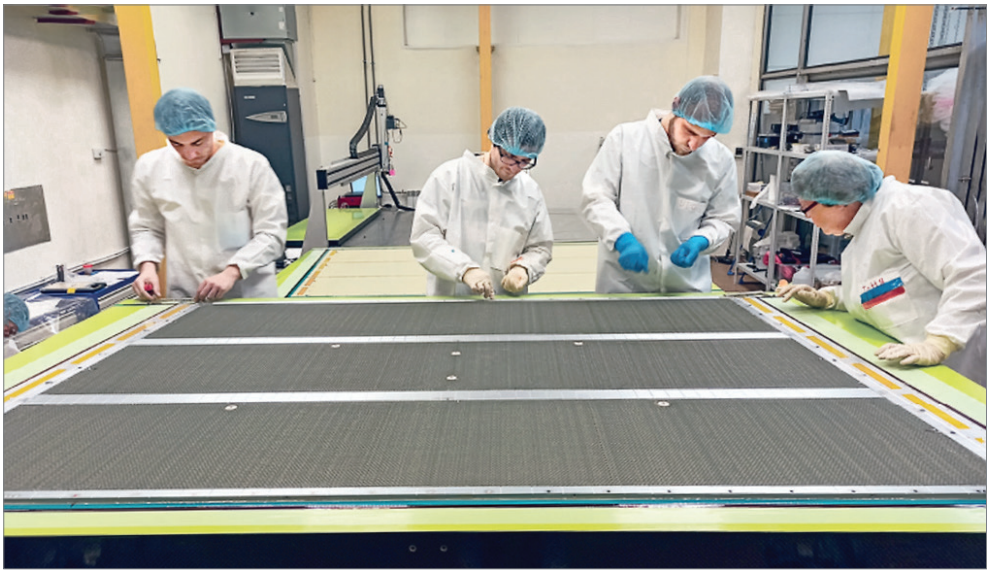
Участие в создании мюонной системы

Участие сотрудников Лаборатории ядерных проблем началось еще на стадии разработки конструкции установки ATLAS. В ходе обсуждения в ЦЕРН оптимального варианта детекторов мюонной системы ATLAS Г. Д. Алексеевым было предложено использовать в качестве координатных

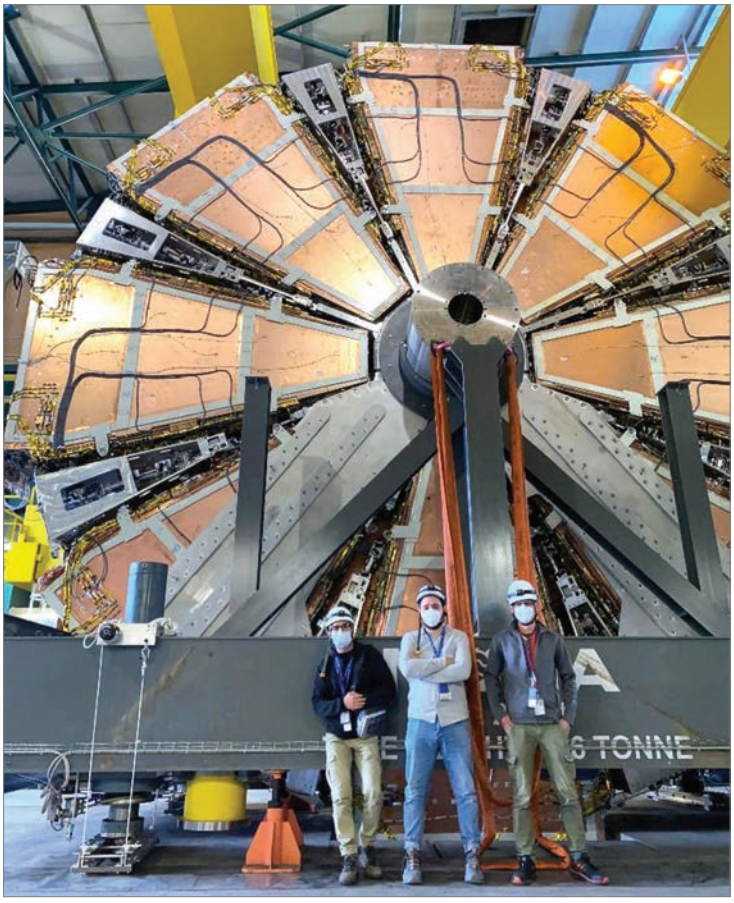


Г. А. Шелков и А. В. Гуськов готовят к отправке в ЦЕРН очередную мюонную камеру

Установка первой камеры BMS, изготовленной в ЛЯП ОИЯИ, в детектор ATLAS



Производство считывающей панели Micromegas. Слева направо: Р. В. Сотенский, Л. А. Гонгадзе, И. В. Ляшко, Т. О. Руденко



Сотрудники НЭОВП ЛЯП на фоне НМК «А» перед его спуском в шахту эксперимента ATLAS. ЦЕРН, июль 2021 г. Слева направо: Л. А. Гонгадзе, Б. Буадзе, И. Минашвили

детекторов этой системы дрейфовые трубки с повышенным давлением рабочего газа. Повышение давления рабочего газа в дрейфовом детекторе улучшает его координатное разрешение. Чтобы убедить коллег, в ЛЯП был оперативно изготовлен и испытан на пучке прототип такого детектора (З. В. Крумштейн, Г. А. Шелков). Результат тестирования был настолько убедителен, что коллаборация приняла этот вариант в качестве основного при создании координатных детекторов мюонной системы ATLAS.

Для мюонной системы ATLAS необходимо было изготовить 1200 мюонных камер различной геометрии из ~400 000 отдельных дрейфовых трубок. Обязательства группы ЛЯП ОИЯИ включали изготовление ~65 000 отдельных дрейфовых детекторов (~16 % от общего числа) для «своих» 86 мюонных камер BMS и BMF, а также камер BOS/F, собиравшихся в MPI (Мюнхен). В помещении, в котором в былые времена работала лучшая советская ЭВМ БЭСМ-6, был создан участок для изготовления и тестирования как

Группа сотрудников НЭОВП ЛЯП, участвовавших в модернизации НМК ATLAS, на участке по производству считывающих панелей Micromegas

отдельных детекторов, так и готовых камер типа BMS/F. Эти детекторы до сих пор устойчиво работают в установке.

После открытия бозона Хиггса и завершения первой стадии работы LHC активное участие в модернизации ATLAS продолжилось. Для работы в условиях возросшей радиационной загрузки и увеличения уровня подавления фоновых событий в триггере первого уровня необходимо было заменить (фаза 1 модернизации) существующие на наиболее загруженных внутренних торцевых частях мюонного спектрометра мюонные и катодные полосковые камеры (так называемые малые колеса) на более быстродействующие камеры Micromegas с резистивным покрытием.

Участки для производства и тестирования детекторов Micromegas для новых малых колес (НМК) ATLAS были созданы в результате существенного развития и оснащения новым современным оборудованием участков для мюонных камер ATLAS.

Мюонная группа научно-экспериментального отдела встречных пучков (НЭОВП) ЛЯП была ответственна за изготовление и тестирование модулей Micromegas для наружной части больших секторов НМК. В ОИЯИ должны были быть изготовлены и протестированы все 64 (плюс дополнительно 2 запасные) считывающие панели и 32 модуля/квадруплета Micromegas (плюс дополнительно один модуль) на их основе с общей активной площадью 384 м^2 из 1200 м^2 предусмотренных для всего НМК. Группа с успехом справилась с поставленной задачей, и в настоящее время произведенные модули Micromegas бесперебойно работают в шахте ATLAS.

Кроме участка для производства и тестирования детекторов Micromegas для НМК ATLAS, в ЛЯП ОИЯИ был создан первый в России участок полного производственного цикла по созданию детекторов Micromegas, где

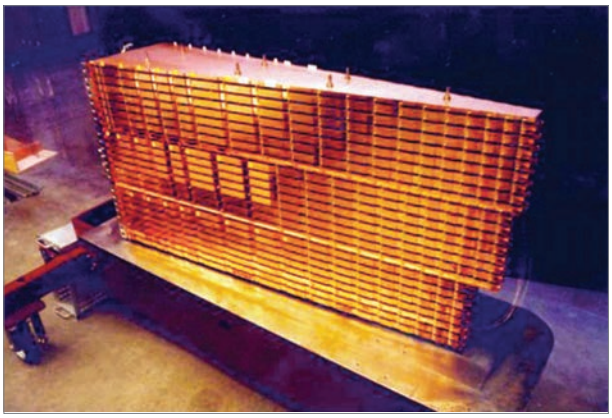
возможны разработка, создание и паспортизация детекторов различной конфигурации, определяемой требованиями конкретной задачи. Примером служит разработка цилиндрического центрального детектора на основе Micromegas для эксперимента SPD NICA. К настоящему времени отработана технология и создан первый цилиндрический прототип.

Участие в создании жидкоаргонового калориметра

Одним из важных направлений работ стали исследования и разработка новых методов калориметрии с жидким аргоном в качестве активной среды. Руководителем группы жидкоаргоновой калориметрии ОИЯИ в ATLAS был назначен В. В. Кухтин. Эта группа включала в себя сотрудников четырех лабораторий ОИЯИ (ЛСВЭ, ЛЯП, ЛНФ и ЛЯР) и вела работы по следующим направлениям: изготовление компонентов, сборка и тестирование на пучках модулей торцевого адронного калориметра (HEC); исследование радиационной стойкости различных конструкционных материалов и электроники считывания информации жидкоаргоновых калориметров; изучение изменения чистоты жидкого аргона под воздействием облучения детектора нейтронами и гамма-квантами; разработка и создание элементов HEC front-end электроники считывания; разработка и создание системы измерения температуры жидкого аргона в криостате; моделирование физических процессов.

Работами по изготовлению модулей жидкоаргонового адронного калориметра детектора ATLAS руководил М. Ю. Казаринов. Основной финансовый вклад ОИЯИ состоял в покупке 80 т медного листа для изготовления пластин-поглотителей толщиной 25 мм. В ОИЯИ была осуществлена сборка и тестирование одной трети от общего числа модулей калориметра, проведена их транспортировка в ЦЕРН, где при участии сотрудников группы ОИЯИ выполнялся входной контроль поступавших из ОИЯИ модулей и их исследование на пучках вторичных частиц ускорителя SPS. Создание HEC-колес — это результат объединенных усилий шести групп из Канады, четырех групп из Германии, трех групп из России и одной группы из Словакии. В качестве обязательного шага этот процесс включал в себя изготовление полномасштабного прототипа модуля и «модуля 0». Такой подход обеспечил идентичность производства во всех лабораториях, что подтвердилось «холодными» испытаниями в криостате на тестовых пучках в ЦЕРН. В 1998 г. было завершено создание в ОИЯИ и прототипа, и «модуля 0».

В том же году в ЛЯП ОИЯИ была создана «чистая комната» для сборки серийных модулей торцевого адронного калориметра. Выполненные из чистой меди поглотители калориметра производились в Опытном производстве ОИЯИ и на минском заводе МЗОР в Беларуси в период с 1999 по 2002 г. Сборка модулей проводилась в ОИЯИ, и первый серийный модуль был отправлен в ЦЕРН в 1999 г. Всего в ОИЯИ было собрано 25 серийных модулей калориметра — около 40 % от их общего числа. В этих работах активное участие принимали А. Лазарев, С. Шилов, А. Б. Неганов, С. И. Какурин, Е. В. Серочкин, И. Л. Писарев и А. Н. Федоров.



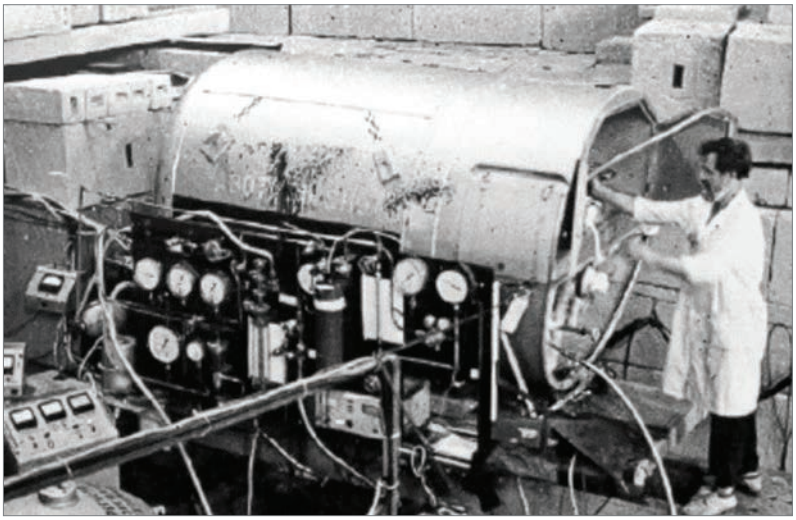
Полномасштабный модуль жидкоаргонового адронного калориметра HEC

Сотрудники ОИЯИ также участвовали в сеансах работы на вторичных пучках ускорителя SPS с целью изучения физических характеристик изготовленных модулей калориметров, которые показали идентичность изготовленных модулей и соответствие их требованиям, заложенным при конструировании.

Для создания системы измерения температуры жидкого аргона (рук. Ю. А. Усов) были выбраны платиновые температурные сенсоры PT100 фирмы «Degussa». Процедура калибровки датчиков на специальном стенде позволила на порядок (до 10 мК) улучшить точность измерения температуры. Были отобраны 700 прокалиброванных датчиков, которые были размещены в двух торцевых криостатах и в электромагнитных калориметрах и использованы в системах общей криогеники ATLAS. В работах по созданию системы измерения температуры жидкого аргона принимали участие В. И. Дацков, В. М. Дробин, В. В. Кухтин, А. Б. Неганов, Л. В. Петрова, А. Н. Федоров.

Для измерения сигнала с калориметра совместно с коллегами из Института физики Макса Планка (MPI, Мюнхен, Германия) были разработаны специальные предусилители для работы при высоком радиационном фоне в криостате без свободного доступа для их замены в случае необходимости. Вместе с предусилителями были разработаны, изготовлены и испытаны первые образцы усилителей-формирователей для электроники считывания адронного калориметра (рук. Е. А. Ладыгин). Была разработана электронная схема компенсации изменения емкости считывающих электродов жидкоаргонового калориметра и изготовлено 200 каналов электронных схем предварительных формирователей, которые были смонтированы на платах, размещенных по внешнему радиусу калориметра. В этих работах принимали участие также А. А. Карев и В. П. Обудовский.

Исследования свойств электроники начались в 1993 г. и выполнялись на высокоинтенсивных пучках импульсных реакторов на быстрых нейтронах ЛНФ ОИЯИ. Была осуществлена программа исследований радиационной стойкости элементов электроники считывания, изготовленной на основе GaAs-технологии, и проведена сертификация различных конструкционных



Часть установки для испытаний радиационной стойкости элементов жидкоаргоновой калориметрии ATLAS на реакторе ИБР-2. Сотрудник Лаборатории нейтронной физики Е. Н. Кулагин проверяет криогенные коммуникации. 1998 г.

материалов для жидкоаргоновой калориметрии детектора ATLAS при нейтронных флюенсах до $7 \cdot 10^{16}$ см$^{-2}$ и сопутствующих γ-дозах до 300 кГр.

Эти исследования показали, что изменения характеристик электроники и механических свойств электродов калориметра, вызванные суммарным потоком нейтронов и гамма-квантов за 10 лет работы установки, не превысят допустимые 20 %, которые можно учесть соответствующими калибровочными алгоритмами. Об этом свидетельствуют результаты специально выполненного моделирования ожидаемой деградации калориметрического сигнала на основе данных, полученных в проведенных радиационных испытаниях.

В ходе исследований была выполнена проверка возможного загрязнения жидкого аргона, вызванного радиационными повреждениями материалов калориметра в криостате. При участии сотрудников группы Л. Б. Голованова была создана специальная криогенная установка. Чистота жидкого аргона до и после облучения анализировалась с помощью ионизационной камеры. Было показано, что уровень загрязнения жидкого аргона электроотрицательными примесями при высоком нейтронном флюенсе не превышает 2 ppm.

После старта эксперимента ATLAS на LHC радиационные испытания различных компонентов детектора с целью последующей модернизации установки были продолжены.

Значительный вклад в успешное проведение радиационных тестов внесли сотрудники ЛНФ В. В. Голиков, Е. Н. Кулагин, В. И. Лущиков, Е. П. Шабалин, М. В. Булавин, сотрудники ЛЯП А. Н. Шалюгин и А. Лазарев, сотрудник ЛЯР А. М. Родин, сотрудники ЛФВЭ С. М. Голубых, Н. А. Джавадов, В. В. Кухтин, Е. А. Ладыгин, В. Ф. Минашкин, В. П. Обудовский, Д. Сали-

хагич и А. П. Чеплаков (координатор работ). Большую помощь в реализации облучательной программы оказали Ф. Дидак, Х. Оберлак (Германия) и К. Леруа (Канада).

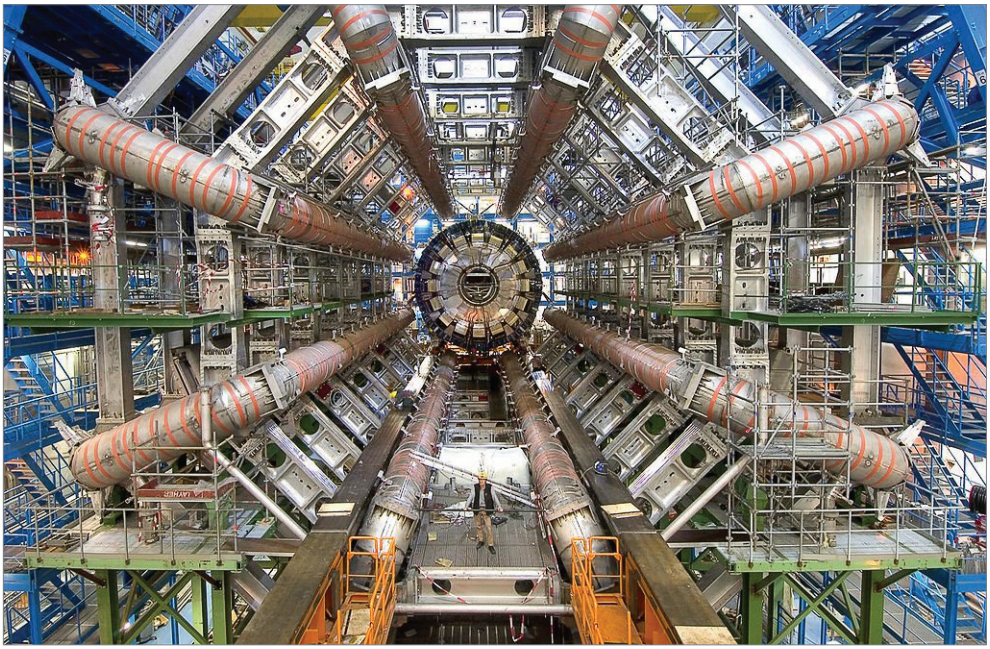
Участие в создании магнитной системы

Существенный вклад сотрудники ОИЯИ внесли в создание магнитной системы детектора ATLAS, включающей сверхпроводящий соленоид для внутренней трековой системы и большой «воздушный тороид», магнитное поле которого формируют 8 сверхпроводящих колец, симметрично расположенных за пределами калориметрической системы, плюс два торцевых тороида. Центральный соленоидальный магнит имеет относительно небольшие размеры (диаметр 2,5 м и длина 5,3 м), наиболее крупноразмерные — это кольца центрального тороида (более 25 м в длину), а самые тяжелые — торцевые тороиды (около 100 т). Все магниты системы были сверхпроводящими, они поочередно изготавливались на поверхности в большом экспериментальном зале, тестировались, опускались в шахту и окончательно собирались в подземном зале на глубине 100 м.

Практическая реализация тороидальной магнитной системы установки ATLAS стала одной из первоочередных задач, для выполнения которой была создана коллаборация с основными участниками из ЦЕРН, ОИЯИ, CEA (Сакле, Франция), Оксфордской лаборатории (Великобритания), LASA (Италия). В нее также входили другие институты и фирмы, где производились отдельные компоненты тороидов. Первоочередность определялась тем, что тороидальная система должна была быть собранной первой, и уже к ее механической «теплой структуре» крепились последовательно все другие детекторные системы ATLAS. Эта работа, в которой значительную роль играли сотрудники лабораторий и Опытного производства ОИЯИ (первоначально примерно 25 техников и инженеров), стала в 1998 г. основной задачей Института. Подготовительные работы начались в ЦЕРН с создания стенда для испытаний собранных тороидов, куда был доставлен и установлен изготовленный в Дубне магнитный сердечник, имитирующий магнитное поле внутри установки ATLAS. Это позволило проводить испытания собранных тороидов в условиях, максимально приближенных к реальным.

Основная работа по сборке тороидов началась в 2002 г. с изготовления в Опытном производстве ОИЯИ 25-метровой траверсы, которая использовалась для перемещения тороидов с минимальной допустимой деформацией. Было также изготовлено большое количество разнообразных домкратов и регулируемых подставок, на которые устанавливались крупногабаритные элементы тороидов для их последующего монтажа. В дальнейшем в Опытном производстве были изготовлены и поставлены в ЦЕРН многочисленные уникальные инструменты для сборки магнитов, включая приспособления для опускания центральных тороидов, и разнообразные крупноразмерные платформы для сборки в подземном зале.

Много сил было потрачено на разработку технологии сварки алюминиевых трубок, предназначенных для подачи жидкого гелия, охлаждающего так называемую холодную массу тороидов и обеспечивающего низкотемпера-



Сверхпроводящие магнитные тороиды в установке ATLAS

турную сверхпроводимость. Для создания расчетного магнитного поля внутри установки ATLAS электрический ток в тороидах должен достигать величины 20 кА. Повышенные требования к качеству сварных швов, каждый из которых обязательно проходил рентгеновский анализ в разных плоскостях, объяснялись необходимостью обеспечения многолетней эксплуатации тороидов без возможности доступа к линиям охлаждения внутри них.

После изготовления и тестирования центральных тороидов наступило очень напряженное время их монтажа в подземном зале. В целом работа была выполнена в 2004–2005 гг. за рекордные 13 месяцев, при этом элементы механической структуры поступали из России и Беларуси практически в режиме «онлайн» с производимой сборкой. За этот период были растаможены, приняты, разгружены и оперативно отправлены в работу материалы, доставленные в ЦЕРН более 60 большегрузными автомобилями.

Параллельно шла работа по созданию торцевых магнитов. Они также были собраны, прошли тестирование и были опущены в подземный зал без нарушения графика, вовремя обеспечив возможность для монтажа всех других детекторных подсистем согласно общему плану сборки всей установки ATLAS.

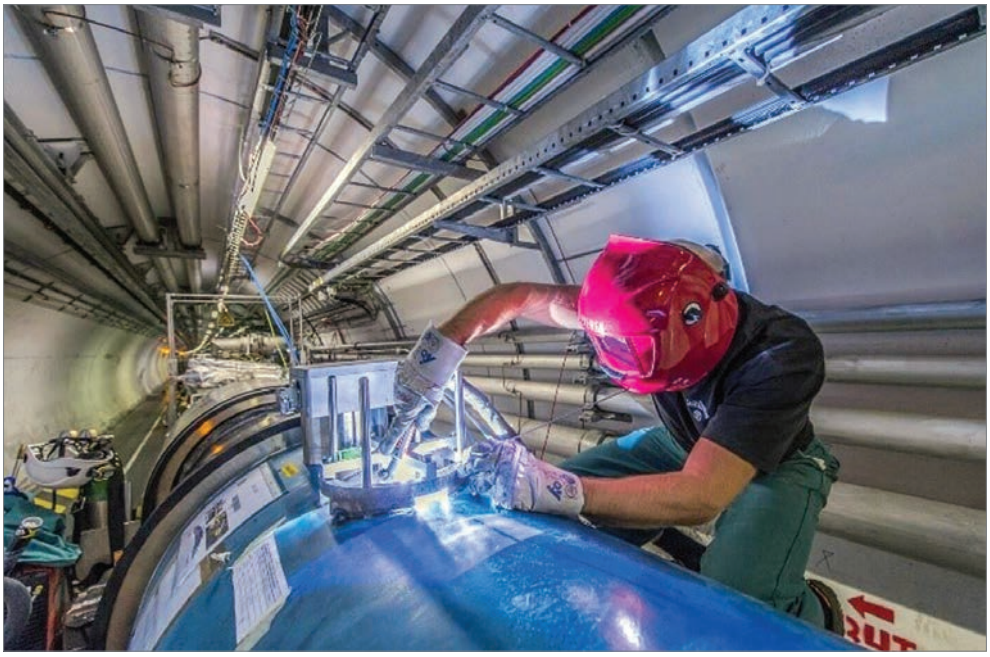
Эта работа была высоко оценена коллаборацией, и ОИЯИ, вместе с такими гигантами, как INTEL и ORACLE, был награжден специальной премией ATLAS. Как отметил П. Йенни (руководитель коллаборации в период создания установки) на конференции в Черногории (2017 г.): «ОИЯИ сыграл просто фантастическую роль в реализации тороидальной магнитной системы установки ATLAS». А руководитель магнитного проекта Г. Тен Кате

Перевозка торцевого магнита в шахту детектора ATLAS

заявил там же: «Создание, наладка, запуск, управление и модернизация магнитной системы ATLAS было исключительно удачным совместным предприятием коллаборации ATLAS и ОИЯИ». Большой вклад в эту по-настоящему успешную и важную работу внесли В. И. Данилов, Н. П. Данилов, Н. И. Зимин (руководитель работ со стороны ОИЯИ), М. В. Куликов, А. А. Любимцев и еще около 100 сотрудников Опытного производства и лабораторий ОИЯИ.

Когда при пуске LHC в 2008 г. произошла авария из-за проблем с безопасным сбросом гелия из системы охлаждения сверхпроводящих магнитов ускорителя, именно к дубненской группе, хорошо зарекомендовавшей себя при создании магнитной системы ATLAS, обратились с просьбой выполнить работы по установке предохранительных клапанов. Эти работы производились как на поверхности, так и в подземном тоннеле LHC в негласном соревновании с коллегами из Испании и Польши. В итоге команда ОИЯИ была выбрана для участия в проекте усовершенствования сверхпроводящих магнитов и сверхпроводящих соединений (SMACC) во время длительной остановки коллайдера LS1 в 2013–2014 гг. Более чем на половине дипольных магнитов LHC было установлено 612 клапанов аварийного сброса давления, которые сегодня обеспечивают надежное и безопасное функционирование коллайдера.

После завершения сборки и запуска установки ATLAS ОИЯИ продолжает принимать участие в ее эксплуатации, модернизации и других научно-исследовательских разработках. Так, были выполнены различные работы по созданию программ управления и эксплуатации вакуумной системы,



Сварочные работы по установке клапанов аварийного сброса давления в тоннеле LHC

электрических цепей, разработке сенсоров и т. п. Сотрудники ОИЯИ регулярно участвуют в работах по открытию и закрытию установки в шахте ATLAS во время зимних остановок LHC.

Внутренний детектор

Группа сотрудников ЛФВЭ под руководством В. Д. Пешехонова внесла значительный вклад в разработку и создание детектора переходного излучения (TRT), используемого во внутреннем трекере ATLAS. Сотрудники ОИЯИ выполнили исследования и разработки в области тонкостенных дрейфовых трубок, методов считывания информации с них, участвовали в создании и тестировании прототипа детектора переходного излучения — трекера на основе трубок и в полномасштабной сборке этого детектора, который также используется для идентификации электронов.

Группа отвечала за производство кольцевых субмодулей для TRT и выполняла работы по укреплению жесткости (армированию) строу-трубок, установленных в баррельной и торцевой частях полномасштабного TRT-детектора. Для выполнения этих обязательств были подготовлены и оборудованы помещения класса 10 000 по чистоте общей площадью около 250 м^2 и высотой 7–8 м. При армировании строу-трубок было наклеено примерно 608 км углеволоконных нитей, а всего было армировано 91 993 строу-трубки, что составляло более 50 % потребности в них всего TRT-детектора. В общей сложности в ОИЯИ было изготовлено 110 127 строу-трубок длиной 37 см и 45 062 трубки длиной 49,7 см.

Участие в физических исследованиях

Новые системы детектирования и реконструкции событий, новые алгоритмы сбора и обработки беспрецедентно больших объемов данных позволили достичь высочайшей чувствительности и точности экспериментальных исследований на установке ATLAS с момента запуска коллайдера. Бозон Хиггса был открыт в экспериментах ATLAS и CMS в 2012 г., таким образом, основная экспериментальная задача, возложенная на эти детекторы, была достигнута уже через 2 года активного набора данных. Дубненские физики внесли существенный вклад в самые первые работы, посвященные физике бозона Хиггса, в частности, первые наблюдения рождения бозона Хиггса в ассоциации с калибровочными бозонами (рис. 26)[31].

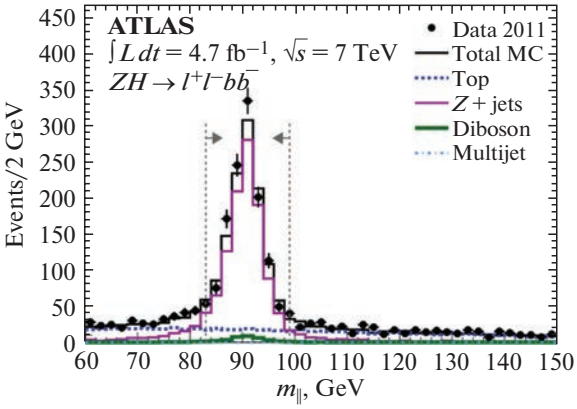


Рис. 26. Первое наблюдение рождения бозона Хиггса в ассоциации с Z-бозонами в канале распада на два прелестных кварка

Впрочем, сотрудники ОИЯИ еще до запуска Большого адронного коллайдера (1994–2007 гг.) активно занимались исследованиями физики бозона Хиггса, моделированием процессов его рождения в протон-протонных столкновениях и реконструкции потенциальных распадов в детекторе. Одними из первых таких работ стали работа И. Р. Бойко, К. В. Николаева, Г. А. Шелкова[32], посвященная изучению бозона Хиггса в распадах на 4 мюона на основе полного моделирования установки ATLAS, а также исследования потенциала обнаружения бозона Хиггса в канале распада на Z-бозон и гамма-квант. Активные работы велись в этот период над предсказаниями возможных проявлений физики за рамками Стандартной модели и их обнаружением на ATLAS. Было сделано предложение поиска киральных бозонов на LHC с помощью установки ATLAS[33], исследован ряд возможностей регистрации суперсимметричных частиц[34], проведен детальный анализ перспектив изучения на установке ATLAS топ-кварков[35].

---

[31] *ATLAS Collab.* // Phys. Lett. B. 2012. V. 718. P. 369–390.

[32] *Бойко И. Р., Николаев К. В., Шелков Г. А.* // Письма в ЭЧАЯ. 2005. Т. 2, №2(125). С. 7–20.

[33] *Чижов М. В., Бедняков В. А., Будагов Ю. А.* // ЯФ. 2008. Т. 71, № 11.

[34] *Bednyakov V. A. et al.* // Phys. Part. Nucl. Lett. 2008. V. 5, No. 6. P. 520–530.

[35] *Храмов Е. В. и др.* // ЭЧАЯ. 2008. Т. 39, вып. 1. С. 217–242.

С началом набора данных результаты множества новых экспериментальных исследований, проведенных с участием сотрудников ОИЯИ, стали активно публиковаться. Были получены экспериментальные пределы на параметры предложенных в Дубне киральных бозонов Z^* в их распадах на пары лептонов[36], опубликованы одни из первых ограничений на параметры суперсимметричных частиц на LHC (рис. 27)[37].

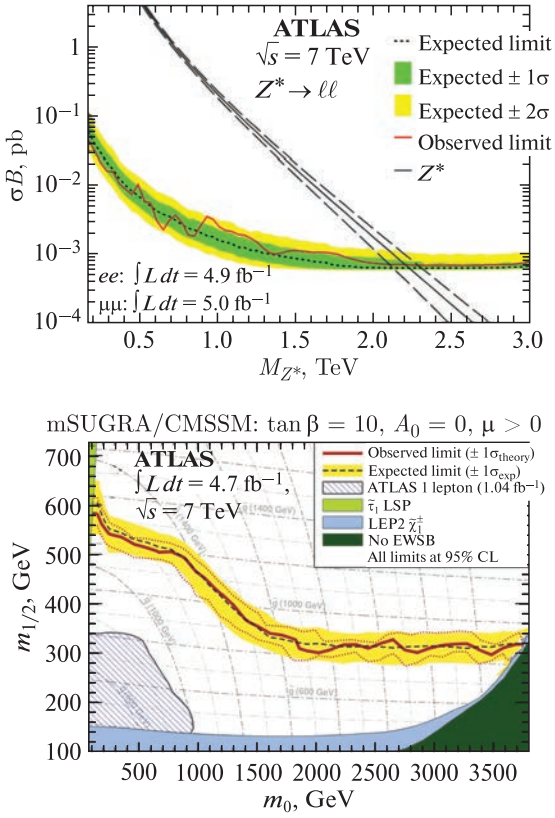


Рис. 27. Экспериментальные ограничения на допустимые сечения и массы киральных бозонов Z, модели которых были предложены в ОИЯИ (вверху); ограничения параметров суперсимметричных частиц (внизу)*

Важным направлением физических исследований стали прецизионные измерения параметров Стандартной модели, а также совершенствование алгоритмов реконструкции объектов в детекторе, повышение качества моделирования наблюдаемых экспериментально процессов. Примерами таких работ могут быть измерение параметров бозе-эйнштейновских корреляций в событиях с большой множественностью адронных треков[38], измерение

[36] *ATLAS Collab.* // JHEP. 2012. V. 1211. P. 138.
[37] *ATLAS Collab.* // Phys. Rev. D. 2012. V. 86. 092002.
[38] *ATLAS Collab.* // Eur. Phys. J. C. 2015. V. 75. P. 466.

сечений рождения очарованных и прелестных адронов и их свойств[39], измерения дифференциальных сечений калибровочных бозонов в процессах совместного рождения с тяжелыми струями[40].

В ходе нескольких этапов модернизации установки ATLAS (в 2013–2014, 2019–2021 гг.) стало возможным дальнейшее повышение точности реконструкции, эффективности отбора интересных для физического анализа событий, стабильности работы в условиях высокой интенсивности протон-протонных пучков. Это позволило существенно повысить точность измерений, в частности, показать хорошее согласие параметров бозона Хиггса со значениями, предсказываемыми в Стандартной модели. Сотрудниками ОИЯИ были получены новые результаты по измерению юкавских взаимодействий с тяжелыми кварками и сечений рождения бозона Хиггса в процессах слияния глюонов или векторных калибровочных бозонов (рис. 28)[41]. В рамках исследования юкавского взаимодействия топ-кварков путем измерения ассоциативного рождения бозонов Хиггса с топ-кварками[42] сотрудниками ОИЯИ предложен ряд новых кинематических переменных, позволяющих повысить эффективность отбора сигнальных событий в канале с распадом бозона Хиггса на две b-струи. Помимо этого, для отбора событий применены модели глубокого машинного обучения, разработан ряд новых методов оптимизации этих алгоритмов.

Несмотря на то, что ряд популярных в прошлом теоретических расширений Стандартной модели был фактически исключен экспериментами на

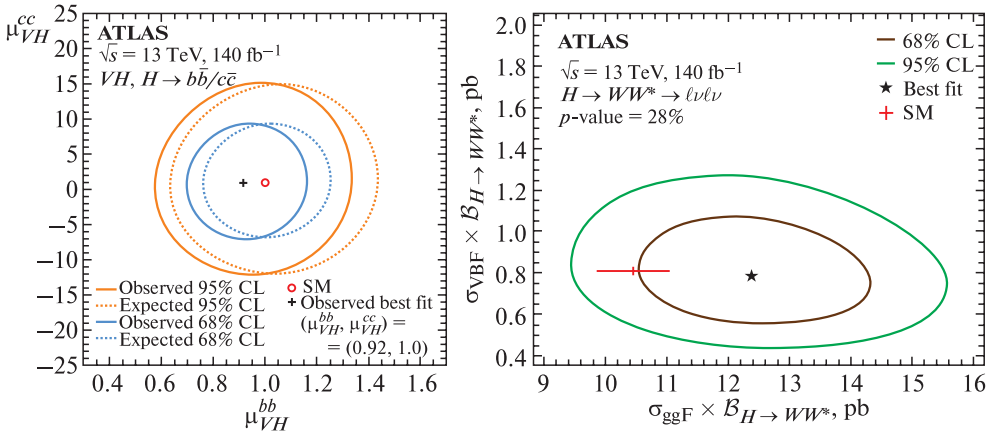


Рис. 28. Измерения наблюдаемых величин связи бозона Хиггса с прелестными и очарованными кварками (слева); измерения сечений рождения бозона Хиггса в процессах слияния глюонов или калибровочных бозонов (справа)

---

[39] *ATLAS Collab.* // Nucl. Phys. B. 2016. V. 97. P. 717–763; Phys. Lett. B. 2015. V. 751. P. 63–80.

[40] *ATLAS Collab.* //JHEP. 2020. V. 2020.07. 044.

[41] *ATLAS Collab.* // Eur. Phys. J. C. 2021. V. 81. P. 178; JHEP. 2025. V. 2025.04.075; Phys. Rev. D. 2023. V. 108. 032005.

[42] *Бойко И. Р. и др.* // Письма в ЭЧАЯ. 2024. Т. 21, № 3. С. 592–603;
Boyko I. et al. // Phys. Part. Nucl. Lett. 2024. V. 21, No. 4. P. 615–618.

LHC, поиски «новой» физики на ATLAS с участием ОИЯИ активно продолжаются. С использованием последних экспериментальных данных выполнены поиски квантовых черных дыр в протон-протонных столкновениях[43] и получены новые пределы на их массы (рис. 29). Исследована возможность существования отклонений от Стандартной модели в канале распада на $W/Z/H$-бозон и гамма-квант[44].

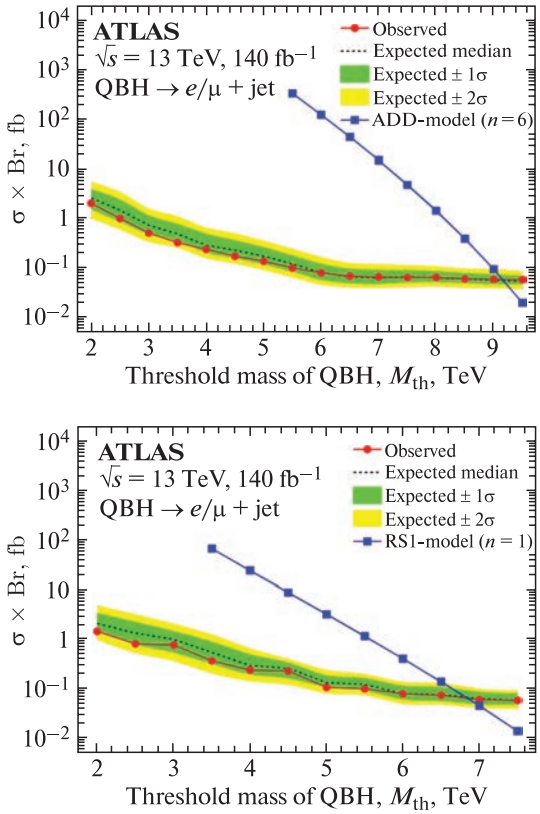


Рис. 29. Ограничения на сечения и массы квантовых черных дыр для моделей Аркани–Димополуса–Двали (вверху) и Рэндалл–Сандрума (внизу)

Командой ОИЯИ активно ведется изучение свойств и спектров прелестных адронов и легких состояний, включая поиски и измерение свойств пентакварковых и тетракварковых состояний[45]. Измерены параметры двух пентакварковых состояний ($P_c(4380)$, $P_c(4450)$) в распадах $\Lambda_b^0 \to J/\psi Kp$. Предложен ряд новых методов анализа данных, призванных увеличить чувствительность к параметрам экзотических состояний, определены на-

[43] *ATLAS Collab.* // Phys. Rev. D. 2024. V. 109. 032010.

[44] *ATLAS Collab.* // Phys. Rev. Lett. 2020. V. 125. 251802; JHEP. 2023. V. 2023.07.125.

[45] *Yeletskikh I. (ATLAS Collab.)* // Proc. 18th Intern. Conf. on B-Physics at Frontier Machines. PoS. 2020. V. 377; doi. org /10.22323/1.377.0010;
ATLAS Collab. // Phys. Rev. Lett. 2023. V. 131. 151902.

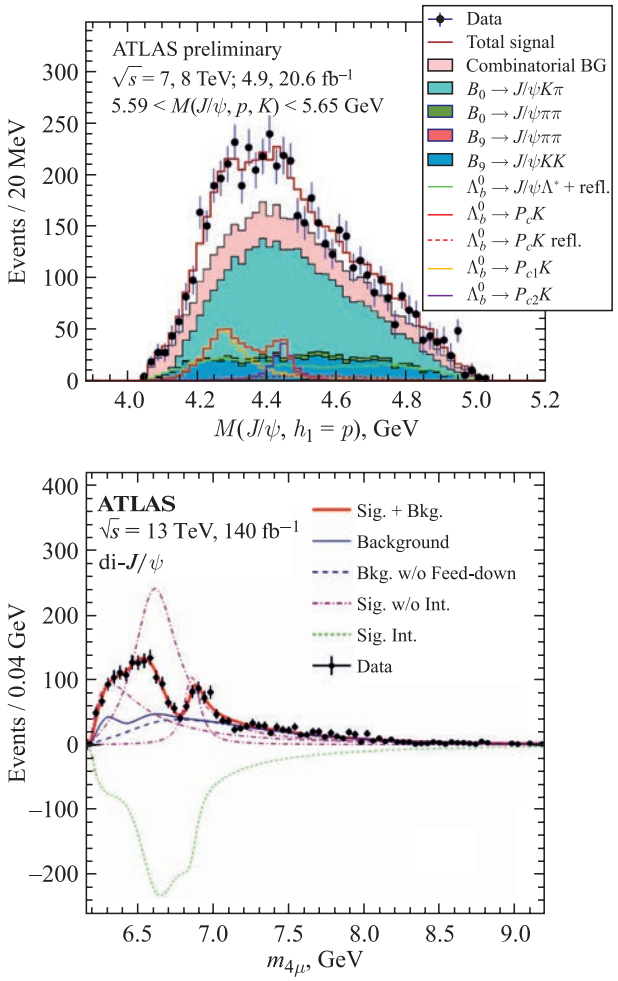


Рис. 30. Наблюдение пентакварковых состояний со скрытым очарованием (вверху) и полностью очарованных тетракварков (внизу)

правления дальнейших исследований экзотических адронов на установке ATLAS.

С участием физиков Института открыты новые резонансы в канале распада на два J/ψ-мезона либо пару J/ψ–ψ(2S). Эти резонансы согласуются с гипотезой существования полностью очарованных тетракварков (рис. 30).

Хорошей традицией на долгое время стала совместная ОИЯИ с ЦЕРН организация школ для студентов и молодых ученых, посвященных физическим исследованиям на LHC.

Нельзя не отметить определяющий вклад сотрудников ОИЯИ в программное обеспечение эксперимента ATLAS, работу по эксплуатации установки, обеспечение безопасных условий работы.

А.В. Гладышев, И. Минашвили, Т.С. Донскова, А.Б. Арбузов, Д.В. Фурсаев, М. Лаврова, Т.В. Любушкина, А.В. Бедняков на школе ESHEP-2017

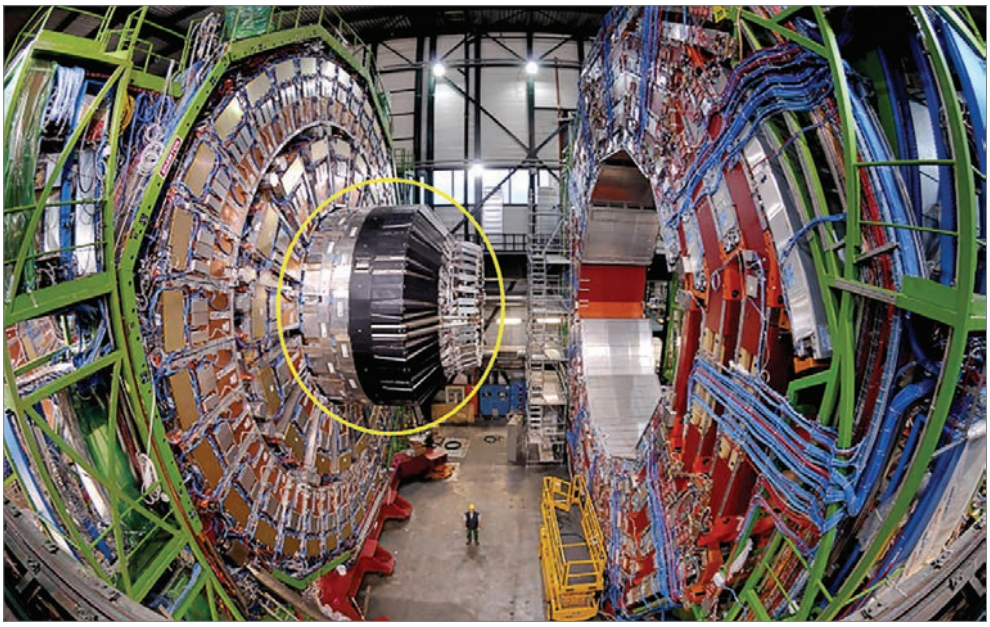
Опыт, приобретенный за более чем 30 лет участия ОИЯИ в эксперименте ATLAS — в конструировании и модернизации детектора, моделировании и анализе данных, активно используется в других проектах Института.

ЭКСПЕРИМЕНТ CMS

Многоцелевой детектор «Компактный мюонный соленоид» (CMS) на Большом адронном коллайдере предназначен для проведения комплексных исследований в области физики элементарных частиц с целью изучения фундаментальных законов природы. CMS является одной из двух крупнейших из когда-либо создаваемых экспериментальных установок в области физики высоких энергий, объединяющей ученых и инженеров из 210 научных организаций 48 стран.

Физики ЛФВЭ ОИЯИ участвуют в проекте «Компактный мюонный соленоид» (CMS) с 1992 г., когда была предложена концепция эксперимента и состоялось подписание заявления о намерениях (Letter of Intent).

В сентябре 1994 г. участвующие в проекте CMS ведущие научные центры России, ОИЯИ и ряд стран-участниц ОИЯИ объединились в единую коллаборацию, получившую название RDMS (Russia and Dubna Member States) и объединившую более 300 ученых и специалистов из 20 институтов 7 стран. Научным руководителем коллаборации RDMS стал И.А. Голутвин, а председателем совета коллаборации В.А. Матвеев. Такая форма участия в эксперименте CMS позволила объединить научные, технические и финансовые вклады отдельных институтов, привлечь промышленность участвующих стран. Институты RDMS в кооперации с научными центрами CMS внесли определяющий вклад в создание детекторов внутренних торцевых систем



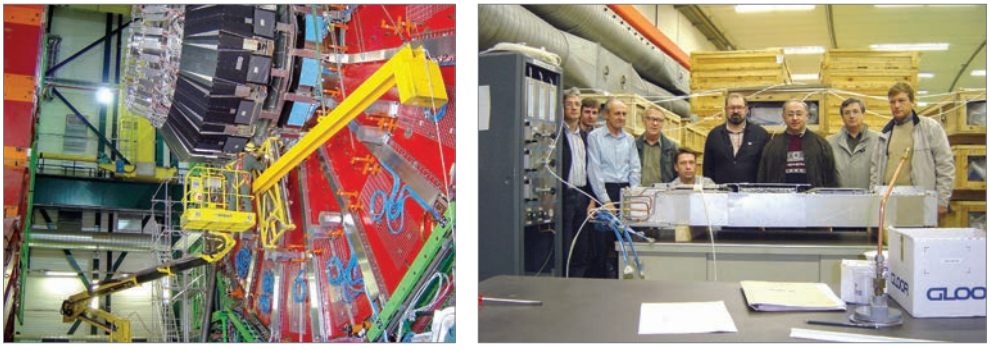
Внутренняя торцевая система экспериментальной установки CMS (выделена окружностью) — область ответственности институтов RDMS

экспериментальной установки CMS, включая передний адронный калориметр HF, переднюю поворотную защиту FS, торцевую мюонную систему ME, торцевой электромагнитный калориметр EE и предливневый детектор FS. Основные усилия RDMS были сосредоточены на создании систем адронного калориметра HE и передней мюонной станции ME1/1.

Ученые и инженеры ОИЯИ совместно с другими институтами и предприятиями RDMS внесли неоценимый вклад в проектирование, строительство, монтаж и наладку торцевого адронного калориметра, включая производство латунных пластин поглотителя и активных элементов — сцинтилляционных мегатайлов. Общая координация работ по созданию калориметра была ответственностью ОИЯИ и осуществлялась под руководством И. А. Голутвина. Сотрудники Научно-исследовательского и конструкторского института энерготехники им. Н. А. Доллежаля (НИКИЭТ, Москва) под руководством В. П. Сметанникова несли ответственность за проектирование HCal и его монтаж в установку CMS. Пластины поглотителя калориметра были изготовлены на Ижорском заводе в Санкт-Петербурге. Для этого использовалась оружейная латунь, выплавленная из артиллерийских гильз. Предварительная сборка пластин абсорбера осуществлялась сотрудниками Национального центра физики частиц и высоких энергий (НЦФЧВЭ) под руководством Н. М. Шумейко на Минском заводе им. Октябрьской Революции (МЗОР) для проверки точности их изготовления. После проверки пластины абсорбера были доставлены в ЦЕРН для монтажа калориметра в экспериментальную установку CMS. Сцинтилляторы

калориметра были изготовлены в Институте монокристаллов НАН Украины (Харьков) под руководством В. Г. Сенчишина, а их сборку в мегатайлы, включая контроль качества и калибровку, выполнили сотрудники ИФВЭ (Протвино) под руководством Н. Е. Тюрина. Физики и инженеры ОИЯИ и институтов RDMS приняли основное участие в сборке и вводе в эксплуатацию торцевого адронного калориметра.

ОИЯИ взял на себя полную ответственность за разработку, изготовление и монтаж в экспериментальную установку CMS 76 катодно-стриповых камер (CSC) передней станции ME1/1 торцевой мюонной системы CMS. Разработкой и изготовлением камер в ЛФВЭ ОИЯИ руководил Ю. Т. Кирюшин. Координацию проекта создания мюонной станции ME1/1 CMS осуществлял В. Ю. Каржавин. Работы проводились в тесном сотрудничестве с институтами RDMS: НЦФЧВЭ (Минск) под руководством Н. М. Шумейко и ИФВЭ (София) под руководством И. Д. Ванкова, сотрудники которых приняли участие в создании электроники для мюонных детекторов.



Монтаж и проверка камер передней мюонной станции ME1/1

Передняя мюонная станция ME1/1 — одна из самых сложных частей установки — располагается внутри магнитного соленоида перед железным ярмом в области воздействия сильного аксиального магнитного поля (~ 3 Тл). В зоне расположения станции достигается самый большой фон вторичных частиц — до 1,5 кГц/см^2. Координатная точность детекторов мюонной станции ME1/1 играет определяющую роль в обеспечении необходимого импульсного разрешения мюонной системы установки CMS. Камеры имеют наилучшие в мюонной системе характеристики (пространственное разрешение ~ 50 мкм, временное разрешение ~ 3 нс), что обеспечивает точность восстановления координат заряженного трека мюона и его привязку ко времени возникновения события. Наиболее близкое расположение камер ME1/1 к точке взаимодействия пучков обеспечивает сшивку частей трека, восстановленных в мюонной системе и в трекере, и экстраполяцию трека в точку взаимодействия. Камеры ME1/1 был изготовлены в ОИЯИ, доставлены в ЦЕРН и после комплексных испытаний были установлены в детектор CMS. Основной вклад в работы по созданию детекторов внесли сотрудники ЛФВЭ А. О. Голунов, Н. В. Горбунов, Ю. В. Ершов,

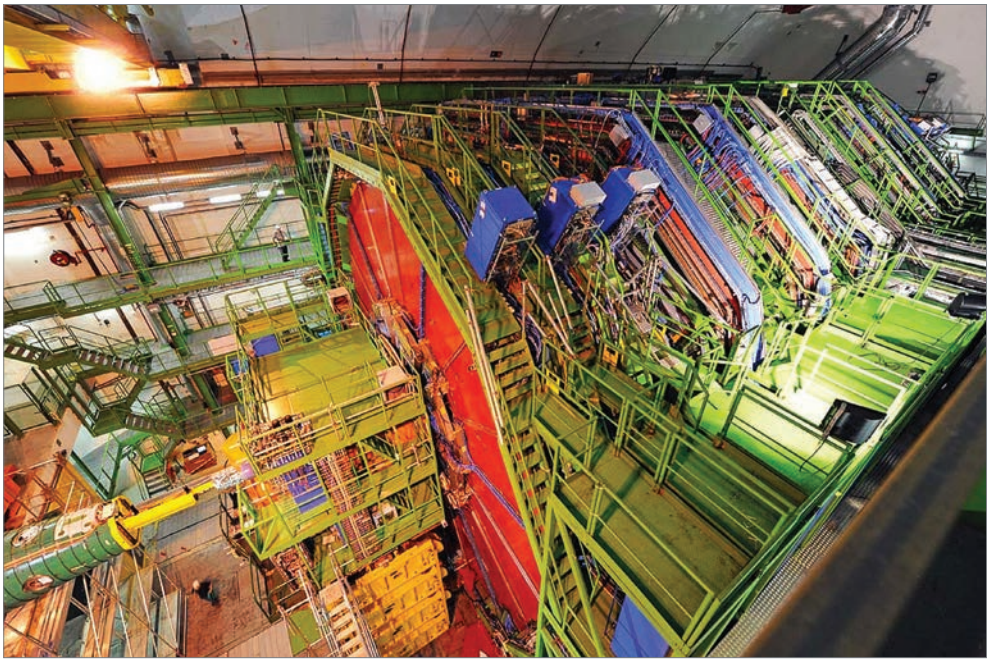
Ю. Т. Кирюшин, В. Ю. Каржавин, А. М. Куренков, С. А. Мовчан, П. В. Моисенз, В. В. Перелыгин, Д. А. Смолин, Л. В. Светов, В. С. Хабаров, С. В. Хабаров и сотрудники НЦФЧВЭ В. А. Чеховский, А. В. Солин.

Мюонная система CMS, и особенно детекторы передней мюонной станции ME1/1, сыграли ключевую роль в открытии распада бозона Хиггса на 4 мюона ($h_{125} \to ZZ \to 4\mu$), что явилось достижением эксперимента CMS фундаментальной важности.

К 2008 г. установка CMS была полностью собрана и протестирована, перемещена в подземный экспериментальный зал, смонтирована и подготовлена к приему данных.

Первый этап работы LHC (LHC Run1) проходил в период 2009–2012 гг. при энергии $\sqrt{s} = 7$ и 8 ТэВ в системе центра масс сталкивающихся протонов. В 2015 г. стартовал новый этап (LHC Run2) при $\sqrt{s} = 13$ ТэВ, продлившийся до второй длительной остановки (Long Stop 2, LS2) в конце 2018 г. За это время интегральная светимость L_{int} записанных в эксперименте CMS данных составила 190 фб$^{-1}$. Ожидается, что за период набора данных Run3, до середины 2026 г., будет достигнута статистика экспериментальных данных, соответствующая $L_{\text{int}} \sim 500$ фб$^{-1}$ при $\sqrt{s} = 13{,}6$ ТэВ.

Сотрудники ОИЯИ принимают активное участие в реализации программы физических исследований, поддержании эффективной работы установки и проведении сеансов по набору экспериментальных данных. Во время двух длительных технических перерывов в работе LHC в 2013–2015 гг. (LS1) и в 2019–2022 гг. (LS2) была проведена модернизация эксперимен-



Подсистемы детектора CMS были опущены в подземный экспериментальный зал для сборки

Стенд для проверки камер (вверху). Модернизация камер торцевой мюонной системы (внизу)

тальной установки CMS для обеспечения эффективной работы всех систем в условиях светимости LHC, возросшей до $2 \cdot 10^{34}$ см$^{-2} \cdot$ с$^{-1}$. В рамках модернизации адронной калориметрии была осуществлена замена системы регистрирующей электроники HCal, включая замену многоканального гибрид-

ного фотодетектора (HPD) на новый кремниевый фотоумножитель (SiPM). Это позволило существенно повысить эффективность работы калориметра за счет уменьшения шумов и большего усиления, а также увеличить число каналов считывания и добавить временную информацию, что расширило триггерные возможности эксперимента. Работы первой фазы модернизации детекторных систем осуществлялись под руководством А. В. Зарубина. Особый вклад в модернизацию HCal внесли сотрудники ЛФВЭ Ю. В. Ершов, П. Д. Бунин, И. А. Голутвин, В. А. Смирнов, А. И. Малахов, С. В. Афанасьев и сотрудники НЦФЧВЭ Н. М. Шумейко, И. Ф. Емельянчик, А. В. Литомин.

Проверка электроники считывания HCal

В рамках первого этапа модернизации торцевой мюонной системы CMS камеры ME1/1, находящиеся в области больших загрузок, также были оборудованы новой быстрой электроникой считывания. Для улучшения пространственного разрешения и повышения эффективности триггирования на камеры была установлена дополнительная электроника считывания. Второй этап модернизации торцевой мюонной системы, посвященный переходу CMS к работе в условиях высокой светимости LHC (фаза 2), потребовал замены электроники детекторов четырех мюонных станций: ME1/1, ME2/1, ME3/1 и ME4/1 — на быструю, работающую без мертвого времени. Совместно со специалистами НЦФЧВЭ (Минск) были разработаны и изготовлены модули распределения и контроля низкого напряжения для накамерной электроники, автоматизированный стенд для настройки плат, про-

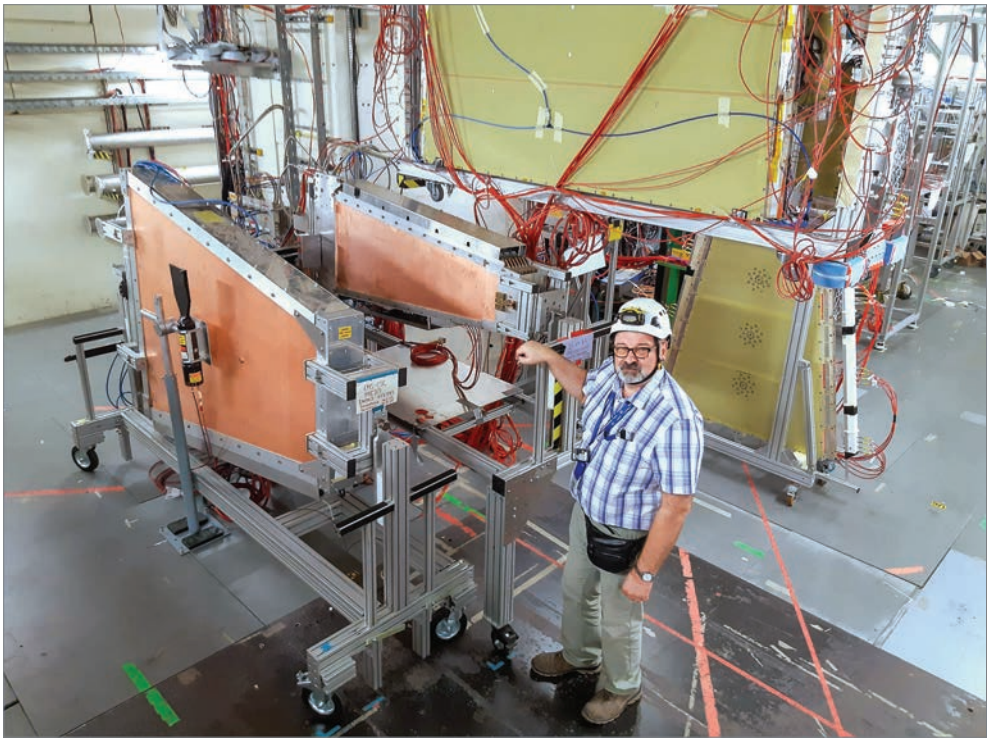
изведена замена системы охлаждения для камер ME1/1, выполнена сборка, монтаж и проверка параметров 180 камер торцевой мюонной системы.

Анализ экспериментальных данных показал стабильную и эффективную работу детекторов торцевой части установки CMS. Величины пространственного разрешения CSC, полученные в протон-протонных столкновениях в период Run3 (2024 г.), хорошо согласуются с данными Run2 (2018 г.), что свидетельствует о стабильности работы детекторов. Основной вклад в модернизацию торцевой мюонной системы внесли сотрудники ЛФВЭ ОИЯИ А. О. Голунов, Н. В. Горбунов, Н. Н. Евдокимов, Ю. В. Ершов, В. Ю. Каржавин, А. Ю. Каменев, А. М. Куренков, А. М. Маканькин, С. Васильев, В. В. Перелыгин и сотрудники НЦФЧВЭ В. А. Чеховский, А. В. Кунц, Я. Д. Галкин.

Начиная с 2030 г. LHC будет работать при высокой светимости, до $7 \cdot 10^{34}$ см$^{-2} \cdot$ с$^{-1}$ (фаза High Luminosity LHC, HL-LHC), что позволит увеличить статистику более чем на порядок, до $L_{\text{int}} \sim 3000$ фб$^{-1}$. Это существенно увеличит чувствительность установки к различным физическим процессам и каналам исследований. В период третьей длительной остановки (LS3, 2026–2029 гг.) запланирована вторая фаза модернизации установки CMS, целью которой является обеспечение эффективной работы всех систем в условиях HL-LHC. Обязательства ОИЯИ на данном этапе модернизации включают участие в создании торцевого калориметра высокой гранулярности (High Granularity Calorimeter, HGCal) и модернизацию детекторов торцевой мюонной системы CMS. Работы по второй фазе модернизации детекторов CMS ведутся под общим руководством В. Ю. Каржавина.

Важное значение на этом этапе модернизации установки имеют результаты проводимых группой ОИЯИ НИР по изучению физических характеристик мюонных камер для проверки стабильности и эффективности работы в условиях больших загрузок при повышении светимости LHC. Изучается эффект радиационного старения детекторов для оценки деградации параметров при повышении радиационной нагрузки. Исследования проводятся в ЦЕРН на установке GIF++, где камеры облучаются на канале H4 в пучке мюонов ускорителя SPS и с помощью гамма-источника ^{137}Cs активностью 12 ТБк. Результаты исследований показывают, что деградации характеристик камер не наблюдается при величине заряда, накопленного на сантиметр длины анодной проволоки, 890 мКл, что втрое превышает значение, ожидаемое при работе детектора в режиме высокой светимости HL-LHC. Основной вклад в изучение характеристик детекторов при работе в условиях больших загрузок, ожидаемых в режиме работы с высокой светимостью, внесли В. В. Перелыгин, А. О. Голунов, А. Ю. Каменев (ЛФВЭ) и В. В. Пальчик (ЛИТ).

В рамках подготовки CMS к работе при загрузках HL-LHC группа ОИЯИ участвует в создании калориметра высокой гранулярности HGCal. Группа ведет работу по созданию стенда для проверки работоспособности и контроля характеристик кассет HGCal, на которых расположены сенсорные элементы. Тестирование кассет будет осуществляться в условиях, близких к реальным, при температуре −30 °C с помощью космических лучей.



Камеры ME1/1 и ME1/2 на установке GIF++ в ЦЕРН

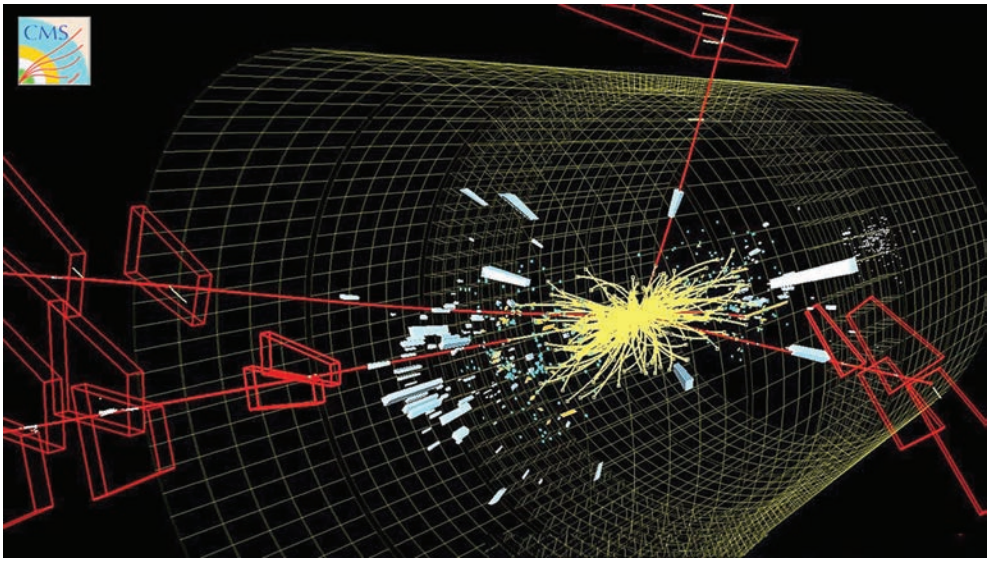
В ОИЯИ изготовлены две теплоизолированные камеры, в которые помещаются стойки с тестируемыми кассетами. Сверху и снизу теплоизолированной камеры расположены сцинтилляционные триггерные плоскости размером 2,4×3,0 м. Основной вклад в разработку и создание тестового стенда внесли сотрудники ЛФВЭ С. В. Афанасьев, А. О. Голунов, Н. В. Горбунов, Ю. В. Ершов, А. И. Малахов, В. Ю. Алексахин, П. Д. Бунин, Е. В. Сухов, В. В. Устинов в кооперации с сотрудниками ЕрФИ (Ереван) под руководством А. Тумасяна.

С самого начала подготовки эксперимента ученые ОИЯИ принимают активное участие в разработке и реализации программы физических исследований на CMS. В программу на разных этапах были вовлечены сотрудники четырех лабораторий ОИЯИ (ЛФВЭ, ЛИТ, ЛТФ, ЛЯП) и институтов семи стран-участниц ОИЯИ (Армения, Беларусь, Болгария, Грузия, Чехия, Узбекистан, Украина).

Сотрудники ОИЯИ и институтов стран-участниц (Dubna Member States, DMS) в сотрудничестве с институтами РФ внесли и продолжают вносить весомый вклад в открытие и исследования свойств бозона Хиггса в каналах распада на два нейтральных калибровочных бозона $h_{125} \to ZZ \to 4l$, поиск «новой» физики, прецизионные измерения параметров Стандартной модели (СМ), исследование процессов КХД, программу исследований взаимодействий тяжелых ионов. Большие усилия были сосредоточены на разра-

Стенд для проверки работоспособности и контроля характеристик кассет HGCal

ботке методов и соответствующего программного обеспечения для онлайн и офлайн отбора и реконструкции мюонов и пар мюонов в уникальной области энергий вплоть до нескольких тераэлектронвольт, методик изучения и учета экспериментальных и теоретических систематических эффектов при регистрации процессов рождения пар мюонов и струй КХД, расчетов и моделирования физических процессов и детекторных систем.



Пример «золотого» события распада бозона Хиггса на 4 мюона (один мюон в цилиндрической части мюонной системы и три мюона в торцевой части)

Особенно стоит отметить вклад коллективов Ереванского физического института (ЕрФИ, Армения) под руководством А. Сируняна и, впоследствии, А. Тумасяна, Института ядерных проблем Белорусского государственного университета (НИИЯП БГУ, Беларусь) под руководством Н. М. Шумейко и, впоследствии, В. В. Макаренко, Института ядерной физики АН Узбекистана под руководством Б. С. Юлдашева. Руководство и общая координация работ по подготовке, реализации и развитию программы участия ОИЯИ и стран-участниц ОИЯИ в физических исследованиях CMS осуществлялись С. В. Шматовым. Неоценимую роль в формировании физической программы ОИЯИ в CMS сыграли А. А. Бельков, И. М. Граменицкий, И. А. Голутвин, В. Ф. Конопляников, В. А. Матвеев, М. В. Савина.

Одним из ключевых направлений физического анализа, в котором более 20 лет активно участвуют ученые ОИЯИ, является изучение образования и свойств пар мюонов. Эти исследования стали приоритетными для физиков ОИЯИ и стран-участниц ОИЯИ в эксперименте CMS. Они объединили более 70 ученых DMS, среди которых признанные специалисты в области теоретической физики элементарных частиц и квантовой теории поля, эксперты по обработке и анализу данных, разработке современных алгоритмов реконструкции и отбора элементарных частиц, создатели детекторных технологий, методов современного компьютинга физики высоких энергий.

Подобные исследования имеют фундаментальное значение для проверки СМ и поиска «новой» физики. Систематическое изучение процессов с мюонами высоких энергий (мюонами с большими поперечными импульсами) в конечном состоянии было начато физиками ОИЯИ в 2002 г. по инициативе И. А. Голутвина, В. Ф. Конопляникова, С. В. Шматова. Первые обоснования исследований были представлены В. В. Пальчиком, М. В. Савиной и С. В. Шматовым. Предложенная программа является экспериментальным развитием революционных теоретических идей о кварк-глюонном строении материи и концепции асимптотической свободы кварков. Фундамент в эти исследования был заложен в работах Н. Н. Боголюбова, Б. В. Струминского, А. Н. Тавхелидзе, а также независимо Хана, Намбу и Миямото, выдвинувших революционную идею наличия у кварков цветных степеней свободы, а также в трудах В. А. Матвеева, Р. М. Мурадяна, А. Н. Тавхелидзе, Сидни Дрелла и Танг-Моу Яна, предложивших теоретическое описание процессов рождения пар лептонов при высоких энергиях.

Позднее, в период с 2003 по 2009 г., была проведена детальная разработка программы поиска сигналов «новой» физики за рамками СМ в теориях с дополнительными пространственными измерениями и с расширенным калибровочным сектором, проверки предсказаний Стандартной модели с помощью измерения характеристик процесса Дрелла–Яна. На этапе подготовки основополагающего документа коллаборации — технического проекта по программе исследований — PhTDR (CMS Physics TDR) определяющий вклад внесли И. Г. Алцыбеев, И. И. Белотелов, В. Ф. Конопляников, А. В. Ланёв, П. В. Моисенз, Г. А. Ососков, В. В. Пальчик, М. В. Савина, О. В. Теряев, С. В. Шматов. Неоценима роль группы теоретиков из НИИЯП БГУ и Гомельского государственного университета им. Франциска Скори-

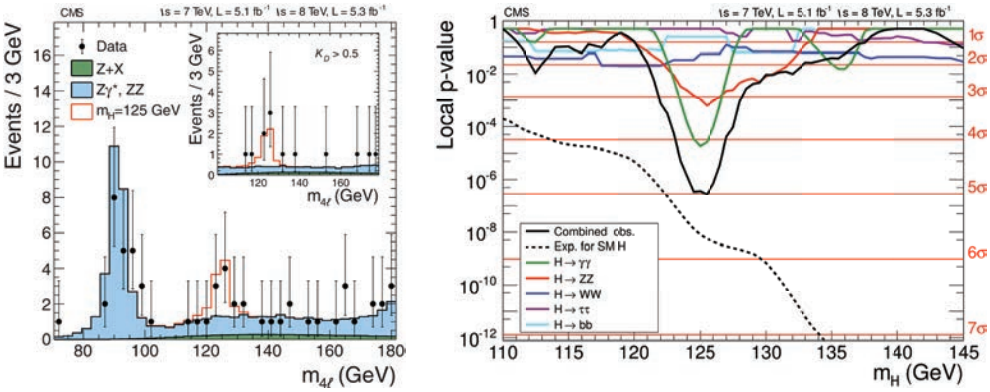


Рис. 31. Слева: первое наблюдение бозона Хиггса в распаде $h \to ZZ \to 4l$: распределение событий по инвариантной массе четырех лептонов; справа: вероятность ошибочного наблюдения сигнала из-за флуктуации фона СМ до величины наблюдаемого сигнала

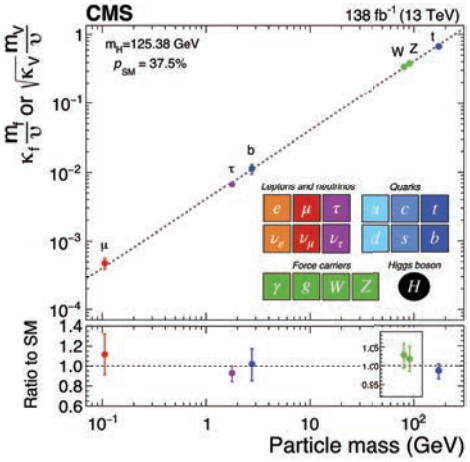


Рис. 32. Проверка универсальности взаимодействия бозона Хиггса с частицами СМ: зависимость констант связи бозона Хиггса от их масс

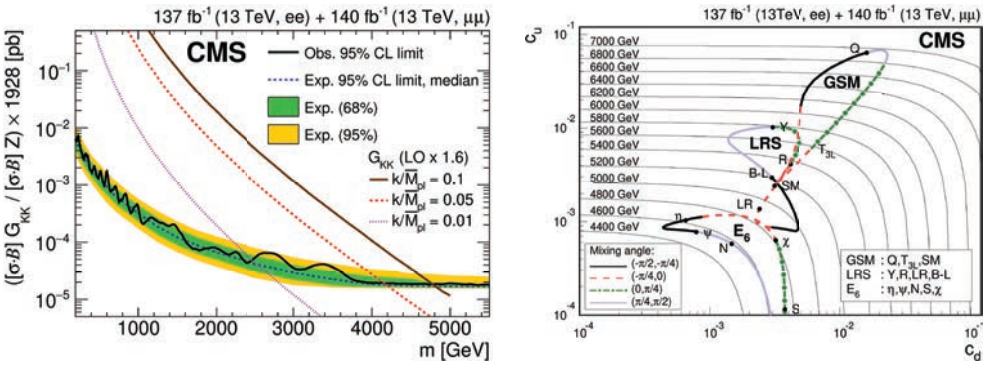


Рис. 33. Экспериментальные ограничения на допустимые сечения, константы связи и массы новых резонансов, предсказанных сценариями с дополнительными пространственными измерениями (слева) и расширенными калибровочными моделями (справа)

ны под руководством Н. М. Шумейко. Результаты их расчетов КХД и электрослабых поправок высших порядков к процессам рождения пар мюонов, всегда выполняемых на мировом уровне, стали неотъемлемой частью физического анализа и окончательных результатов эксперимента. В разное время в группу входили Е. В. Дыдышко, В. Л. Ермольчик, В. А. Зыкунов, В. В. Макаренко, В. А. Мосолов, Х. Суарес.

После запуска LHC и начала набора данных исследования интенсивно развивались. В течение пятнадцати лет в 2010–2025 гг. на основе данных первого и второго сеансов была выполнена серия пионерских исследований при энергии столкновений пучков протонов 7, 8 и 13 ТэВ, в ходе которых получены новые уникальные данные о взаимодействиях элементарных частиц, среди которых открытие и детальное изучение бозона Хиггса в канале распада на четыре мюона, измерение с рекордными точностями характеристики процессов парного рождения мюонов и изучение поляризационных явлений в этих процессах, установление уникальных модельно-независимых ограничений на сечения физических процессов за рамками СМ, принципиально новые экспериментальные ограничения на модельные параметры теорий с расширенным калибровочным и хиггсовским секторами, сильной гравитацией и дополнительными измерениями, частицами-кандидатами на роль темной материи. В эти результаты весомый вклад также внесли В. Ю. Алексахин, Д. В. Будковский, Н. Н. Войтишин, М. Г. Гавриленко, И. Н. Горбунов, И. А. Жижин, А. В. Ланёв, В. В. Пальчик, В. В. Шалаев, С. Г. Шульга.

Начиная с 2021 г. программа исследований получила новое развитие – традиционные сигналы с парой мюонов стали использоваться для поиска новых скалярных состояний, предсказываемых неминимальными хиггсовскими моделями, и частиц-кандидатов на роль темной материи. Для этого образование пар мюонов стали рассматривать в каналах ассоциированного рождения с потерянной поперечной энергией. За несколько лет были получены результаты мирового уровня, которые наряду с прочими были в числе важнейших научных результатов ОИЯИ за 2023–2025 гг. В настоящее время это направление рассматривается как наиболее перспективное и включает группу специалистов из ОИЯИ (Ю. В. Корсаков, О. Л. Кодолова, А. Н. Никитенко, М. В. Савина, К. В. Слижевский, С. В. Шматов) и команду из Национальной научной лаборатории им. А. Алиханяна (ЕрФИ) под руководством А. Тумасяна.

Стоит отметить другие направления исследований физиков DMS, которые реализовывались в последние 20 лет. Среди них — исследование множественного рождения частиц для проверки предсказаний КХД и поиска микроскопических черных дыр (работы были инициированы М. В. Савиной), изучение множественности частиц в кварковых и глюонных струях для проверки механизмов адронизации (предложение С. Г. Шульги), изучение свойств КХД в процессе ассоциированного рождения струи и фотона (А. В. Зарубин, О. Л. Кодолова, В. Ф. Конопляников, Н. Б. Скачков) и многие другие.

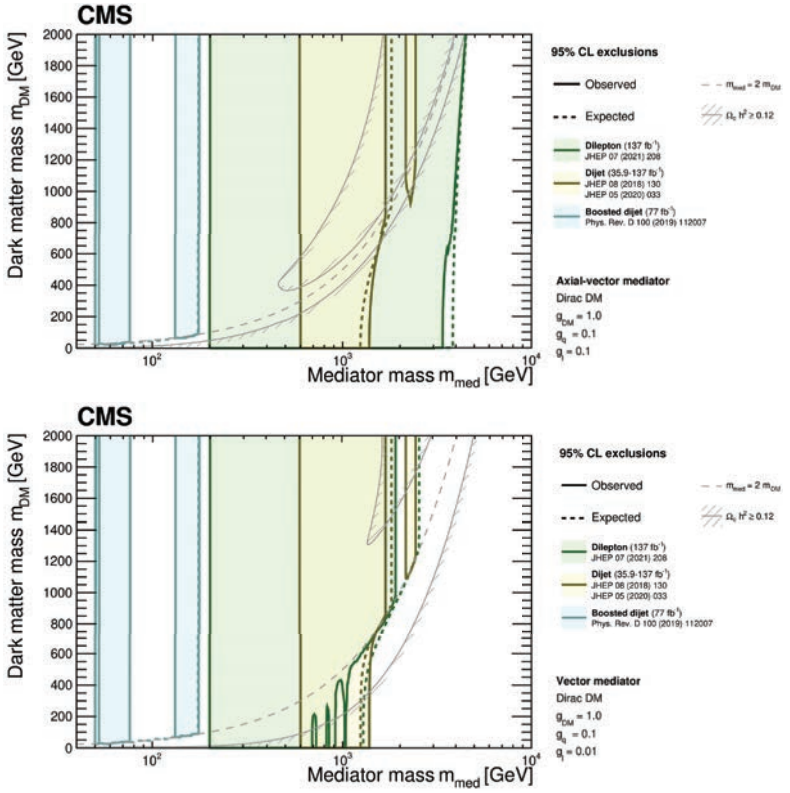


Рис. 34. Экспериментальные ограничения на массы частиц-кандидатов на роль темной материи в сценариях с аксиально-векторным (вверху) и векторным (внизу) переносчиками взаимодействия между частицами Стандартной модели и темной материи

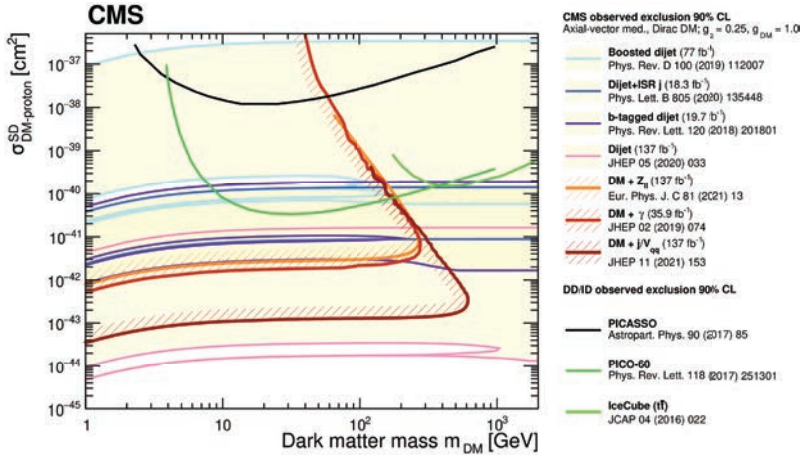


Рис. 35. Экспериментальные ограничения на сечения взаимодействия частиц темной материи с частицами Стандартной модели в случае спин-зависящих взаимодействий

Достижение результатов мирового уровня было бы невозможно без создания и обеспечения непрерывного функционирования аппаратно-программной среды для обработки и анализа данных. С самого начала реализации программы физических исследований специалистами ОИЯИ в рамках проекта WLCG (Worldwide LHC Computing Grid) велась работа по построению грид-инфраструктуры для скоординированного использования вычислительных ресурсов для обработки больших объемов данных, поступающих из эксперимента. Результатом стало создание Многофункционального информационно-вычислительного комплекса (МИВК), включающего, в том числе, центры 1-го уровня для эксперимента CMS и 2-го уровня (для целого ряда экспериментов), их интеграция в глобальную грид-инфраструктуру WLCG. Эта титаническая работа была реализована в Лаборатории информационных технологий им. М. Г. Мещерякова под руководством В. В. Коренькова. В рамках проекта CMS основной вклад внесли Н. Н. Войтишин, А. О. Голунов, А. Г. Долбилов, И. А. Кашунин, В. В. Мицын, Д. А. Олейник, А. Ш. Петросян, Р. Н. Семенов, Т. А. Стриж, В. В. Трофимов, И. А. Филозова.

Физики DMS внесли достойный вклад в результаты работы коллаборации CMS, которые были удостоены премии Европейского физического общества в области физики высоких энергий и физики частиц за 2013 г. (коллаборации ATLAS и CMS) и премии Breakthrough Prize в области фундаментальной физики за 2025 г. (коллаборации ATLAS, CMS и LHC-b). Полученные результаты также отмечены тремя премиями ОИЯИ и шестью премиями ЛФЧ и ЛФВЭ ОИЯИ. По результатам исследований на установке CMS сотрудниками ОИЯИ успешно защищены 4 докторских и 8 кандидатских диссертаций и опубликован ряд работ[46].

ЭКСПЕРИМЕНТ ALICE

Основной вклад группы ОИЯИ в создание детектора ALICE состоял в разработке технического проекта большого дипольного магнита для переднего мюонного спектрометра, разработке и изготовлении прототипа обмотки большого дипольного магнита, разработке рабочего проекта магнитопровода большого дипольного магнита и сопровождении его изготовления на заводе, а также в изготовлении дрейфовых камер для детектора переходного излучения и участии в обработке и анализе экспериментальных данных.

---

[46] *Chatrchyan S. et al.* The CMS Experiment at the CERN LHC // JINST. 2008. V. 3. S08004;

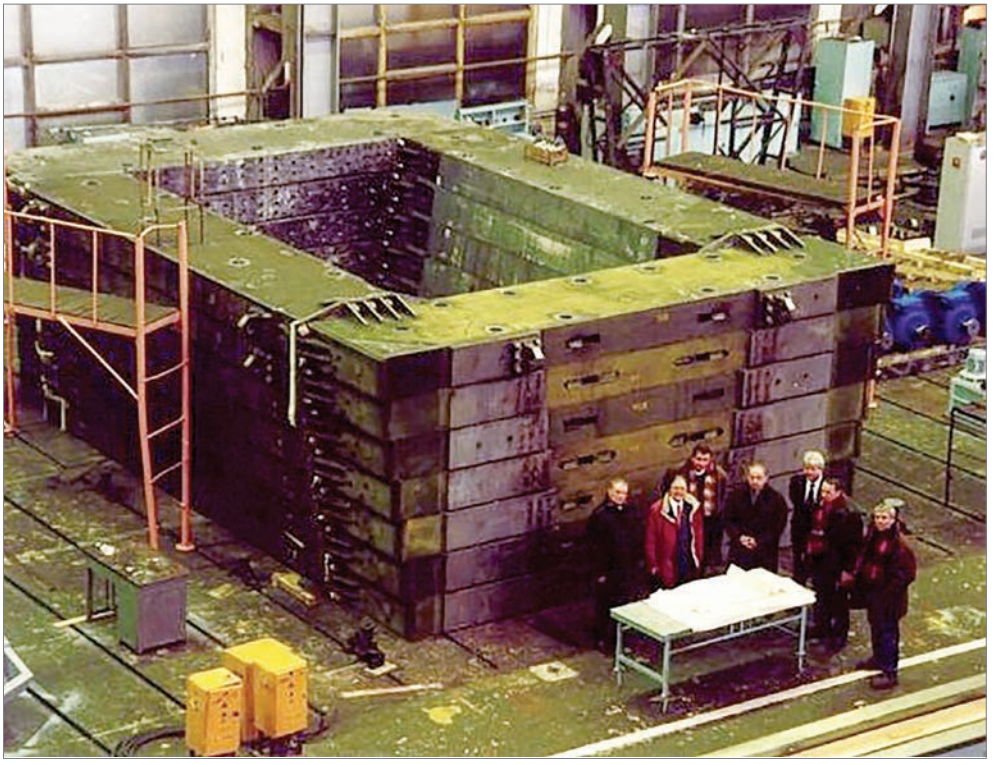
Chatrchyan S. et al. Observation of a New Boson at a Mass of 125 GeV with the CMS Experiment at the LHC // Phys. Lett. B. 2012. V. 716. P. 30–61;

Chatrchyan S. et al. A New Boson at a Mass of 125 GeV Observed with the CMS Experiment at the Large Hadron Collider // Science. 2012 . V. 338, No. 6114. P. 1569–1575;

Chatrchyan S. et al. Evidence for the Direct Decay of the 125 GeV Higgs Boson to Fermions // Nature Phys. 2014. V. 10. P. 557–560;

Tumasyan A. et al. A Portrait of the Higgs Boson by the CMS Experiment Ten Years after the Discovery // Nature. 2022. V. 607. P. 60–68;

Hayrapetyan A. et al. CMS Physics Results from the First Decade of LHC Data // Phys. Rep. 2025. V. 1115. P. 1–772.



Создание прототипа обмотки большого дипольного магнита (вверху) и изготовление магнита на заводе (внизу)

В рамках гидродинамических моделей возникающая в результате A–A-столкновения сжатая сильновзаимодействующая система подвергается продольному и поперечному расширению, определяющему пространственно-временные размеры источника излучения наблюдаемых частиц. Возможность экспериментального измерения этих размеров через фемтоскопические корреляции Бозе–Эйнштейна для пар тождественных частиц была высказана более 60 лет назад и далее детально изучена в 1970-х гг. дубненскими теоретиками Г. И. Копыловым и М. И. Подгорецким. Группа ОИЯИ приняла активное участие в этих исследованиях в эксперименте ALICE на ускорителе LHC, главным образом, для пар заряженных каонов, образующихся в столкновениях частиц и ядер. Для таких пар был сделан трехмерный анализ корреляций, позволяющий изучать три компоненты радиуса источника испускания частиц — фактически пространственную форму источника. На рис. 36 приведены зависимости трех компонент радиусов от средней поперечной массы пары частиц $m_T = (m^2 + k_T^2)^{1/2}$ (m — масса частицы, k_T — поперечный импульс пары) для центральных Pb–Pb-взаимодействий при энергии 2,76 ТэВ. Оси координат направлены: «long» — вдоль пучка, «out» — вдоль поперечного импульса пары, «side» — перпендикулярно последней в поперечной плоскости. Показана также зависимость от $\langle m_T \rangle$ отношения $R_{\text{out}}/R_{\text{side}}$.

Из рис. 36 видно, что радиусы для каонов заметно больше, чем для пионов, при одинаковых значениях m_T, а отношения $R_{\text{out}}/R_{\text{side}}$ близки к единице. Линии представляют собой результаты предсказания гидрокинетиче-

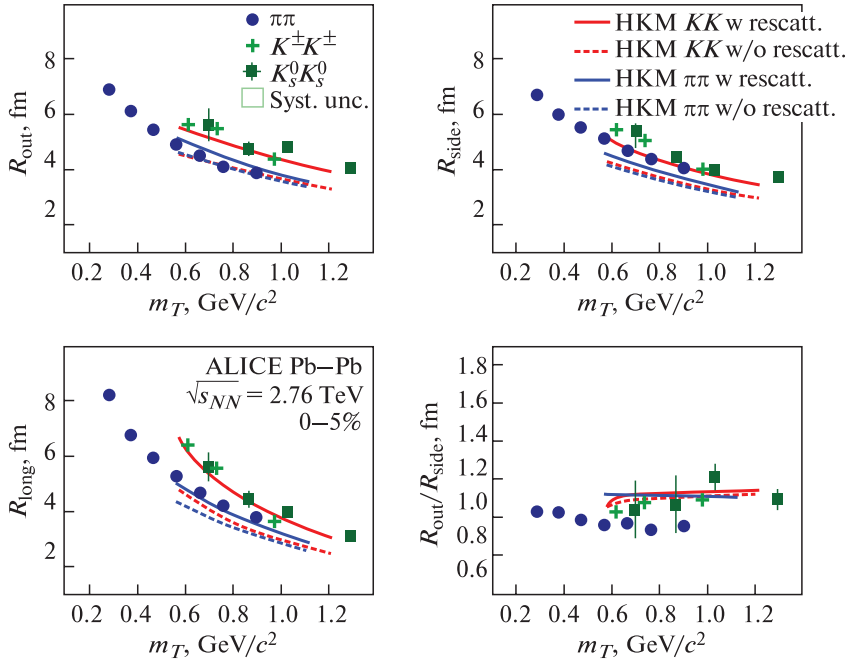


Рис. 36. Зависимости трех компонент радиусов источника частиц от средней поперечной массы пары частиц m_T

ской модели (НКМ)[47], в которой динамика взаимодействия ядер включает первоначальную стадию до наступления теплового равновесия, предтермализованную стадию с переходом к равновесной кварк-глюонной плазме и стадию перерассеяния частиц в конечном состоянии. Важность учета последней видна из рисунка, где хорошее согласие с экспериментом достигается в модели с учетом такого перерассеяния (w rescatt.) по сравнению с версией без такого учета (w/o rescatt.). Полученные результаты опубликованы[48].

Группа ОИЯИ активно участвовала также в исследовании ультрапериферических столкновений (УПС) Pb–Pb с большими (больше суммы радиусов ядер) прицельными параметрами столкновений. В таких процессах возможно фоторождение векторных мезонов, когда фотон поля одного ядра флуктуирует в связанную кварк-антикварковую пару (векторный мезон), которая упруго рассеивается на другом ядре.

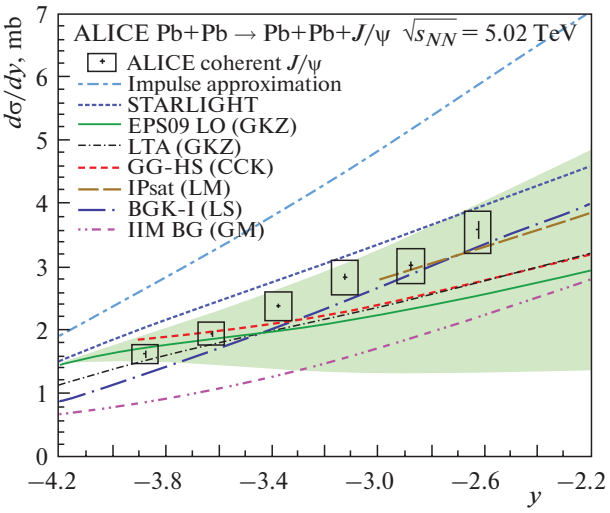


Рис. 37. Сечение когерентного фоторождения J/ψ в УПС Pb–Pb при энергии 5,02 ТэВ в зависимости от быстроты частицы

На рис. 37 приведено сечение когерентного (рассеяние на ядре как целом) фоторождения J/ψ в ультрапериферических взаимодействиях ядер свинца при энергии 5,02 ТэВ в зависимости от быстроты. Теоретически такое сечение связано с функцией распределения партонов в ядрах и пропорционально квадрату глюонной плотности, что позволяет провести исследования глюонных экранировок в УПС. Линии на рис. 37 — результаты предсказания различных моделей. Видно, что те модели, в которых глюонные экранировки учтены, относительно хорошо согласуются с экспериментальными данными. Результаты опубликованы[49].

[47] *Shapoval V. et al.* // Nucl. Phys. A. 2014. V. 929. P. 1.
[48] *Acharya S. et al. (ALICE Collab.)* // Phys. Rev. C. 2017. V. 96. 064613.
[49] *Acharya S. et al. (ALICE Collab.)* // Phys. Lett. B. 2019. V. 798. P. 134926.

LHC DAMPER

Система демпфирования поперечных когерентных колебаний пучка в Большом адронном коллайдере была создана в рамках совместного ЦЕРН и ОИЯИ проекта «LHC Damper»[50]. В. П. Саранцев, основатель Отдела новых методов ускорения ОИЯИ, и его многолетний коллега И. Н. Иванов инициировали предложение об участии ОИЯИ в этом проекте в начале 1991 г. И. А. Савин, который возглавлял в те годы Лабораторию физики частиц ОИЯИ и имел многолетние партнерские отношения с ЦЕРН, проинформировал о предложении ОИЯИ К. Руббиа (ЦЕРН). D. Boussard (ЦЕРН), возглавлявший в те годы отдел ВЧ-систем на ускорителях ЦЕРН, посетил Дубну летом 1991 г. и обсудил со специалистами ОИЯИ эту инициативу. И. Н. Иванов и В. М. Жабицкий конкретизировали предложение ОИЯИ во время своих визитов в ЦЕРН в 1991 г. с учетом применения компьютерных технологий при обработке цифровых сигналов в цепях отрицательной обратной связи демпфера и опыта ОИЯИ в аналогичных работах в ИФВЭ (Протвино) в рамках проекта Ускорительно-накопительного комплекса. Специалисты ЦЕРН предложение приняли. Проект был утвержден в 1994 г. в рамках соглашений ЦЕРН–Россия–ОИЯИ. Под руководством T. Linnecar (ЦЕРН) и И. Н. Иванова начались работы по созданию уникальных устройств демпфера, включая 20 электростатических дефлекторов, предназначенных для работы в условиях сверхвысокого вакуума, и 20 мощных широкополосных усилителей. Завершение работ по проектированию, изготовлению и наладке оборудования для демпфера было осуществлено под руководством В. Хёфля (ЦЕРН) и В. М. Жабицкого.

Система LHC Damper используется в первую очередь для демпфирования остаточных колебаний сгустков заряженных частиц после инжекции в LHC. Рис. 38 иллюстрирует качество демпфирования остаточных поперечных колебаний протонного сгустка с энергией 450 ГэВ.

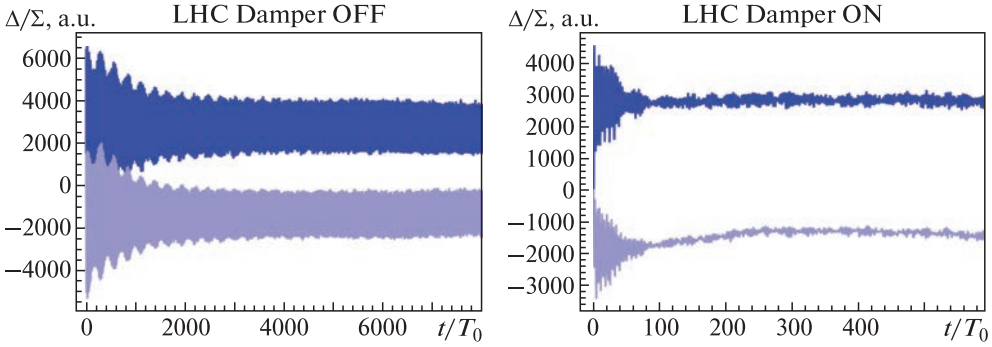


Рис. 38. Пример работы системы LHC Damper

[50] *Жабицкий В. М., Хёфль В.* Первые результаты по запуску системы подавления поперечных когерентных колебаний пучка в LHC // Новости ОИЯИ. 2009. № 2. С. 11–14;

Höfle W. Progress in Transverse Feedbacks and Related Diagnostics for Hadron Machines // Proc. 4th Intern. Part. Accel. Conf. IPAC-2013, 12–17 May 2013, Shanghai, China. JACoW Publ., 2013. P. 3990–3994.

Демпфер обеспечивает устойчивость высокоинтенсивных пучков ускоряемых частиц в коллайдере с энергиями от 450 ГэВ до 7 ТэВ. При этом число сгустков может достигать 2800. Суммарная кинетическая энергия всех частиц пучка составляет примерно 360 МДж. Поэтому даже незначительные потери пучка могут привести к катастрофическим последствиям. Во избежание потерь частиц на каждом обороте на орбите коллайдера с периметром около 27 км измеряется когерентное смещение каждого сгустка от его равновесного состояния. Через оборот вырабатывается корректирующий высоковольтный импульс на пластинах дефлектора, который синхронизован с моментом измерения смещения сгустка с числом протонов около 10^{11} и с длительностью до 2,5 нс, следующих с периодичностью не менее 25 нс. Высоковольтный импульс согласован по величине с измеренным смещением сгустка (амплитудное значение до 11 кВ). В результате при случайных отклонениях пучка возникающие поперечные когерентные колебания затухают с темпом примерно 40 оборотов, фазовая плотность сгустка практически не изменяется и для сталкивающихся сгустков достигается требуемая светимость коллайдера.

Демпфер также используется для возбуждения поперечных колебаний частиц при измерении бетатронных частот и для удаления из камеры ускорителя частиц, которые приходятся на фронт ударного магнита, осуществляющего вывод пучка из вакуумной камеры ускорителя. При проведении исследований с инициированием поперечных колебаний частиц, когда требуется гарантированное быстрое возвращение пучка в исходное состояние с минимальными колебаниями, был успешно применен демпфер в режиме со сменой положительной обратной связи на отрицательную.

В мае 2010 г. уникальная система по демпфированию колебаний, созданная совместно специалистами ЦЕРН и ОИЯИ, была отлажена на протонном пучке LHC и до сих пор эффективно выполняет свои функции на коллайдере при ускорении протонов и ядер свинца. За создание и запуск мощных устройств демпфера Е. В. Горбачев, В. М. Жабицкий, Н. И. Лебедев, А. А. Макаров, Н. В. Пиляр, С. В. Рабцун (ОИЯИ) и В. Хёфль, Р. Луерс, Э. Монтесинос, Д. Валух (ЦЕРН) в 2010 г. были отмечены первой премией ОИЯИ в области научно-методических работ.

Специалисты не многих стран были готовы пойти на огромный риск, сопряженный с реализацией уникальных технологий, требовавшихся для создания принципиально новых систем для LHC. На предприятиях России и в ОИЯИ, в том числе в организованных В. П. Саранцевым научно-производственных подразделениях, были созданы узлы демпфера не только в полном соответствии, но и с некоторым превышением проектного задания. При этом были успешно применены российские материалы.

Следует отметить важный результат научно-методических работ, полученный при наладке и запуске демпфера. Было обнаружено, что при демпфировании поперечных когерентных колебаний с заметной амплитудой возникает небольшой сдвиг частоты бетатронных колебаний. Чтобы сохранить резонансное демпфирование релятивистских частиц в коллайдере, было предложено использовать резонансный режим настройки демпфера.

В этом случае максимальный темп затухания когерентных колебаний обеспечивается в режиме, когда когерентная частота поперечных колебаний совпадает с собственной бетатронной частотой. В апреле 2012 г. этот режим был успешно опробован. В результате время наладки системы демпфирования при изменении рабочих режимов коллайдера существенно сократилось, поскольку спецификации отлаженного демпфера с высокой точностью совпадали с расчетно-теоретическими предсказаниями[51].

Система демпфирования колебаний частиц на LHC работает надежно и эффективно с мая 2010 г. Заложенный в проект потенциал позволяет использовать новые режимы ее функционирования в соответствии с запросами физиков при увеличении интенсивности пучка и светимости LHC[52].

ДРУГИЕ УСКОРИТЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

ЭКСПЕРИМЕНТ COMPASS

Эксперимент COMPASS (COmmon Muon and Proton Apparatus for Structure and Spectroscopy) стал продолжением серии экспериментов на SPS в ЦЕРН по изучению спиновой структуры нуклона, таких как EMC, NMC и SMC, с использованием уникальных поляризованных мюонных пучков. Одобренный в 1997 г., в 2002 г. он начал набор данных. Оказавшись экспериментом-долгожителем, COMPASS завершил набор данных только в 2021 г.

Вклад ОИЯИ в создание установки COMPASS сложно переоценить. Группа ОИЯИ в эксперименте COMPASS включала в себя сотрудников двух лабораторий — ЛФВЭ и ЛЯП.

Группа ЛФВЭ обеспечила создание и многолетнюю работу адронного калориметра спектрометра больших углов. Одной из ключевых фигур в создании и поддержке уникальной криогенной поляризованной мишени являлся Ю. Ф. Киселёв, а В. А. Аносов в течение 20 лет был главным инженером проекта.

Группа ЛЯП также внесла значимый вклад в создание и обеспечение работоспособности экспериментальной установки. Под руководством Г. Д. Алексеева была создана система идентификации мюонов для спектрометра больших углов. Для сеанса по измерению обобщенных партонных распределений в процессе глубоконеупругого комптоновского рассеяния под руководством З. В. Крумштейна совместно с группой ЛФВЭ был создан широкоапертурный электромагнитный калориметр типа «шашлык».

При определяющем вкладе сотрудников ЛФВЭ были получены основные результаты по измерению вкладов кварков и глюонов в спин нуклона, по поляризации лямбда-гиперонов, выходам гиперонов в реакции глубо-

[51] *Жабицкий В. М.* Динамика пучка в синхротронах с цифровыми широкополосными системами подавления когерентных поперечных колебаний заряженных частиц // ЭЧАЯ. 2014. Т. 45, №2. С. 806–874.

[52] *Höfle W.* Status and Prospects in Fast Beam-Based Feedbacks // Proc. Intern. Part. Accel. Conf. IPAC-2022, 12–17 June 2022, Bangkok, Thailand. JACoW Publ., 2022. P. 3112–3117.

Экспериментальная установка COMPASS

конеупругого рассеяния, а также измерению поляризуемости заряженного пиона. Отдельно следует отметить вклад коллектива ЛФВЭ в разработку и реализацию программы по изучению поляризованного процесса Дрелла–Яна. По результатам работ сотрудниками ЛФВЭ были защищены 4 кандидатских и одна докторская диссертация. Дважды, в 2007 и 2015 гг., результаты работы группы ОИЯИ были отмечены премиями ОИЯИ.

Прецизионное измерение поляризуемости заряженного пиона в реакции тормозного излучения заряженного пиона в кулоновском поле ядерной мишени в эксперименте COMPASS, предложенное и выполненное группой ЛЯП под руководством А. Г. Ольшевского, стало продолжением пионерских работ по измерению поляризуемости пиона, выполненных сотрудниками ЛЯП на установке SIGMA (Протвино). Эта работа была удостоена первой премии ОИЯИ за 2014 г. (А. В. Гуськов, З. В. Крумштейн, А. Г. Ольшевский, И. А. Савин (ЛФВЭ)). Сотрудниками ЛЯП был впервые осуществлен поиск фоторождения экзотических чармониев и получено указание на существование нового состояния. Молодые сотрудники также активно принимали участие в работах по изучению рождения димюонных пар в пион-ядерном взаимодействии, включая процесс Дрелла–Яна, одиночное и парное рождение J/ψ-мезонов. С 2021 по 2025 г. сотрудник ЛЯП Б. Парсамян являлся соруководителем коллаборации COMPASS. Полученные за время ра-

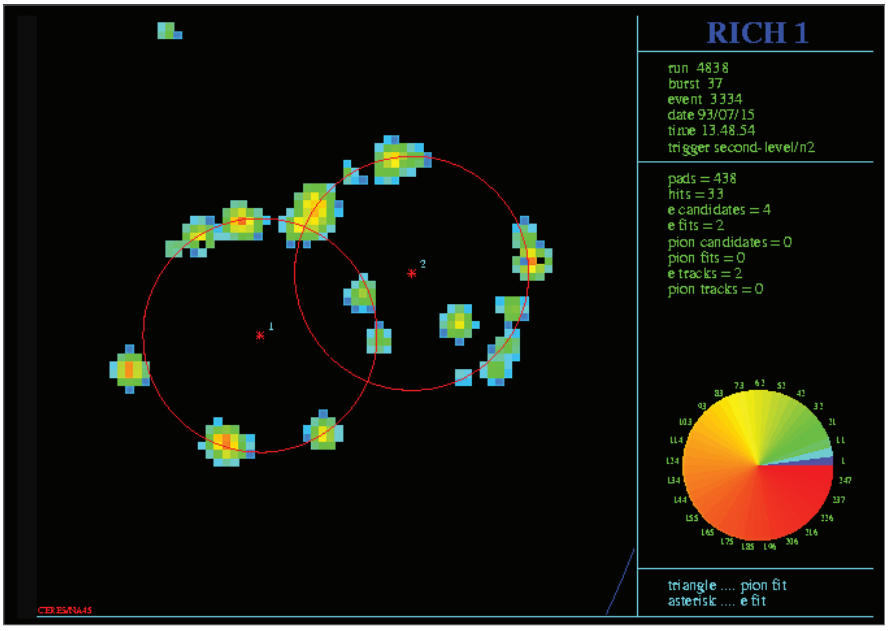
боты результаты вошли в 3 кандидатских и одну докторскую диссертацию, защищенные сотрудниками ЛЯП.

Направление исследований, проводимых на установке COMPASS, не исчерпало себя. Исследования продолжаются на обновленной экспериментальной установке в рамках нового проекта AMBER, в котором группа ЛЯП ОИЯИ под руководством А. В. Гуськова продолжает играть ведущую роль, предлагая изучение партонной структуры каона и пиона в реакции рождения прямых фотонов. Наработки и опыт, полученные в эксперименте COMPASS, активно применяются при подготовке эксперимента SPD на коллайдере NICA.

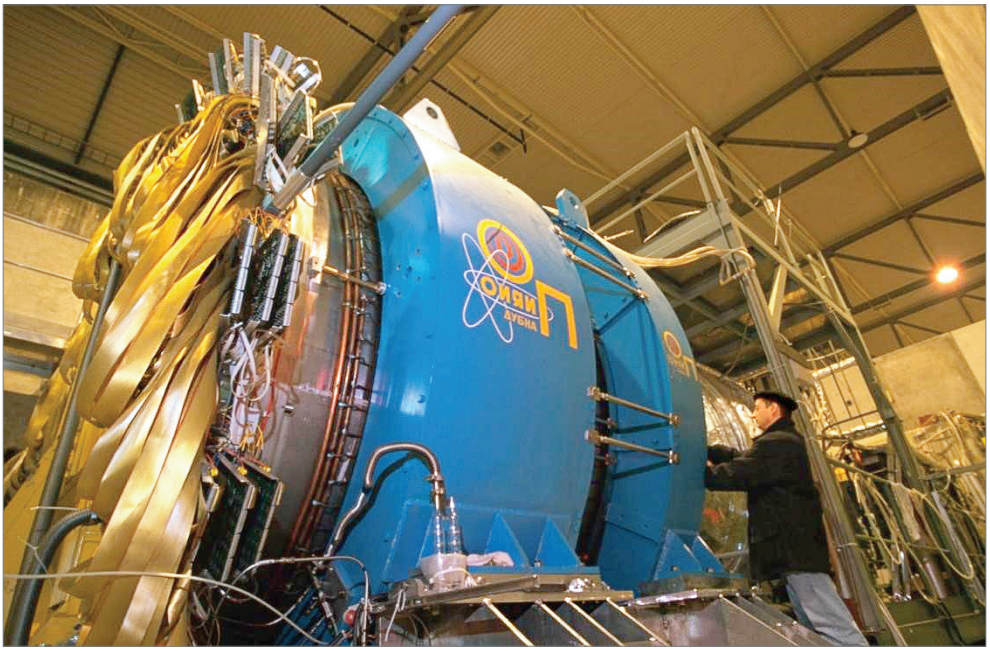
ЭКСПЕРИМЕНТ NA45/CERES

В 1990 г. группа ОИЯИ под руководством Ю. А. Панебратцева начала участие в эксперименте NA45/CERES в ЦЕРН, направленном на обнаружение прямых электрон-позитронных пар, образующихся на первой «горячей стадии» столкновений ядер. Для уменьшения вклада адронов были использованы передовые экспериментальные методы и технологии для реконструкции колец черенковского излучения и вершин взаимодействия с помощью детекторов кольцевого черенковского излучения (RICH) и кремниевых дрейфовых камер. Эти методы были разработаны при активном участии сотрудников Лаборатории информационных технологий под руководством Г. А. Ососкова.

Методы обработки данных, впервые реализованные в эксперименте NA45/CERES, позже были применены в экспериментах STAR и HADES



Кольца черенковского излучения в детекторе RICH



Магнит, созданный в Опытном производстве ОИЯИ

(Г. Агакишиев). Группа ОИЯИ разработала систему тригера первого уровня с отбором множественности событий (В. И. Юревич), а в Опытном производстве ОИЯИ был сконструирован соленоидный магнит (под руководством В. И. Данилова).

В эксперименте NA45/CERES во взаимодействиях Pb + Au при энергии 158 ГэВ/нуклон было обнаружено превышение выхода электрон-позитронных пар[53] по сравнению с эталонным распадом нейтрального мезона и составило фактор (2,31 ± 0,19 (стат.) ± 0,55 (сист.) ± 0,69) (распадов) для полуцентральных столкновений (28 % отношения σ/σ_{geo}), когда выходы интегрировались по инвариантной массе $m > 200$ МэВ/c^2.

ЭКСПЕРИМЕНТЫ NA48, NA48/1, NA48/2, NA62

С конца 1990-х гг. группа сотрудников ОИЯИ под руководством В. Д. Кекелидзе принимала активное участие в подготовке и проведении серии экспериментов (NA48, NA48/1, NA48/2) на ускорителе SPS в ЦЕРН по поиску прямого нарушения CP-четности и изучению редких распадов каонов. Группа ОИЯИ внесла определяющий вклад в создание базового детектора установки — жидкокриптонового электромагнитного калориметра[54] LKr,

[53] *CERES Collab.* e^+e^--Pair Production in Pb-Au Collisions at 158 GeV per Nucleon // Eur. Phys. C. 2005. V. 41. P. 475–513.

[54] *Fanti V. et al.* The Beam and Detector for the NA48 Neutral Kaon CP Violations Experiment at CERN // Nucl. Instr. Meth. A. 2007. V. 574. P. 433–471.

Слева: В. Д. Кекелидзе и координатор работ от INFN Р. Фабрицио (Италия) у криостата калориметра LKr, изготовленного в Государственном космическом научно-производственном центре им. М. В. Хруничева (Москва). 1994 г. Справа: рабочее совещание международной коллаборации NA48. Дубна. 1997 г.

обеспечившего достижение необходимых характеристик эксперимента, а также важный вклад в разработку системы мониторинга и моделирования экспериментальных данных. К 2004 г. было зарегистрировано рекордное количество распадов нейтральных и заряженных каонов.

Основной результат NA48 — это измеренная величина прямого CP-нарушения в распадах нейтральных каонов[55]: $\mathrm{Re}(\varepsilon'/\varepsilon) = (14{,}7 \pm 2{,}2) \cdot 10^{-4}$. Таким образом, было впервые экспериментально доказано существование прямого CP-нарушения. Наряду с результатом эксперимента KTeV (FNAL, США), опубликованным позже, это измерение является самым точным до настоящего времени. Анализ данных проводился параллельно несколькими группами, включая группу Д. Т. Мадигожина (ОИЯИ).

В последующем эксперименте NA48/2 был получен ряд ярких результатов в распадах заряженных каонов. Поиск прямого CP-нарушения в распадах $K^{\pm} \to 3\pi$ привел к самым точным измерениям относительной разности наклонов далиц-плотов. В распадах $K^{\pm} \to \pi^{\pm}\pi^{+}\pi^{-}$ эта асимметрия составила $(-1{,}5 \pm 2{,}1) \cdot 10^{-4}$, а в распадах $K^{+} \to \pi^{\pm}\pi^{0}\pi^{0}$ — $(1{,}8 \pm 1{,}8) \cdot 10^{-4}$, что не противоречит предсказаниям, сделанным на основе Стандартной модели (СМ). Лидерами этого физического анализа были Е. А. Гудзовский и С. Балев (ОИЯИ). В ходе изучения распада $K^{\pm} \to \pi^{\pm}\pi^{0}\pi^{0}$ было зарегистрировано новое физическое явление — остриё в спектре масс пары нейтральных пионов. Расчеты, оперативно выполненные известным теоретиком Н. Кабиббо, привели к объяснению наблюдаемого явления перерассеянием

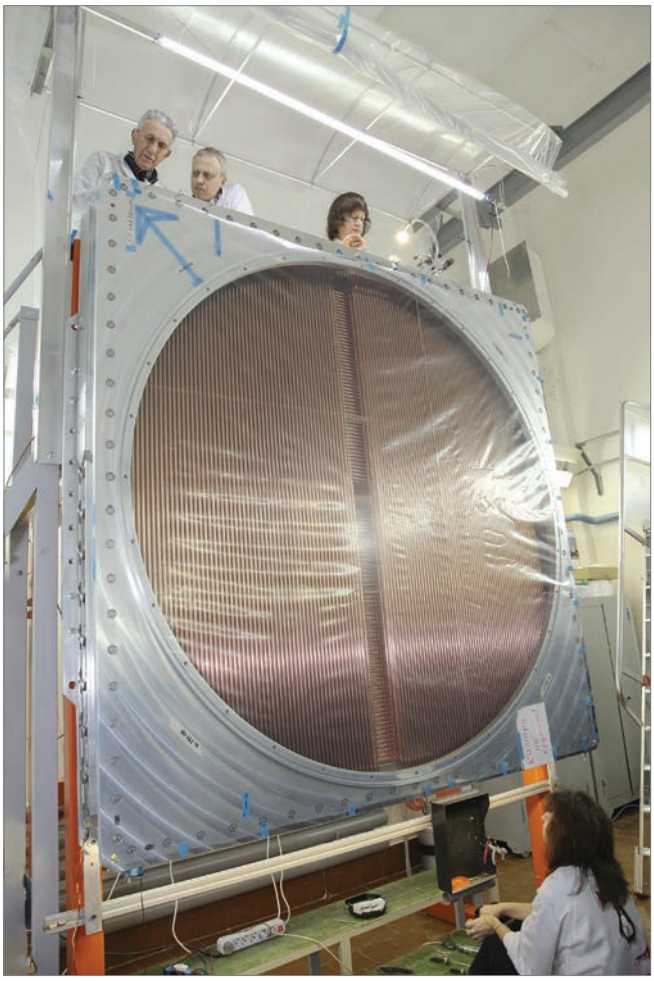
[55] *Batley J. R. et al.* A Precision Measurement of Direct CP Violation in the Decay of Neutral Kaons into Two Pions // Phys. Lett. B. 2002. V. 544. P. 97–112.

и перезарядкой в конечном состоянии пионов из распада $K^{\pm} \to \pi^{\pm}\pi^{+}\pi^{-}$. Детальный анализ этого явления, выполненный при определяющем участии группы Д. Т. Мадигожина (ОИЯИ), позволил получить наиболее точное измерение разности между длинами пион-пионного рассеяния в изоспиновых состояниях $I = 0$ и $I = 2$. Вклад электромагнитных эффектов был рассчитан С. Геворкяном, А. В. Тарасовым и О. О. Воскресенской (ОИЯИ). С учетом результатов измерения формфакторов распада K_{e4}, выполненного в этом же эксперименте, удалось впервые одновременно измерить с высокой точностью две длины пион-пионного рассеяния — ключевые параметры киральной пертурбативной теории (КПТ) Вайнберга. Эта эффективная теория описывает сильные взаимодействия при низких энергиях и интенсивно используется при моделировании всех адронных распадов. При ведущей роли Е. А. Гудзовского и Э. Мариновой (ОИЯИ) был исследован ряд редких распадов. С наилучшей точностью ими была измерена вероятность распада $K^{\pm} \to \pi^{\pm}e^{+}e^{-}(\gamma)$, равная $(3{,}11 \pm 0{,}12) \cdot 10^{-7}$, и оценен наклон его формфактора $\delta = 2{,}32 \pm 0{,}18$; для распада $K^{\pm} \to \pi^{\pm}\mu^{+}\mu^{-}$ были измерены вероятность распада $(9{,}62 \pm 0{,}25) \cdot 10^{-8}$ и наклон формфактора $\delta = 3{,}11 \pm 0{,}57$. Также была измерена вероятность распада $K^{\pm} \to \pi^{\pm}\gamma\gamma$: $(0{,}910 \pm 0{,}075) \cdot 10^{-6}$. С. Н. Шкаровским и Д. Т. Мадигожиным были наиболее точно измерены формфакторы полулептонных распадов заряженных каонов $K^{\pm} \to \pi^{0}e^{\pm}\nu_{e}$ и $K^{\pm} \to \pi^{0}\mu^{\pm}\nu_{\mu}$. При определяющем вкладе М. Мишевой (ОИЯИ) впервые наблюдался редкий распад $K^{\pm} \to \pi^{\pm}\pi^{0}e^{+}e^{-}$ и была измерена его вероятность: $(4{,}24 \pm 0{,}14) \cdot 10^{-6}$. Группа ОИЯИ (А. М. Короткова и Д. Т. Мадигожин) впервые зарегистрировала другой редкий распад — $K^{\pm} \to \pi^{0}\pi^{0}\mu^{\pm}\nu$ и измерила его вероятность[56]: $(3{,}45 \pm 0{,}16) \cdot 10^{-6}$. Результаты согласуются с расчетами КПТ.

Продолжением и развитием эксперимента NA48/2 в изучении редких распадов заряженных каонов стал эксперимент NA62. Основная его задача — это измерение вероятности сверхредкого распада $K^{+} \to \pi^{+}\nu\nu$ на статистике порядка 100 событий, что позволит с высокой надежностью проверить справедливость СМ. Участие ОИЯИ в этом эксперименте было организовано В. Д. Кекелидзе и Ю. К. Потребениковым. Для достижения поставленной цели было необходимо разработать ряд новых технологий детекторных систем, способных работать при высокой интенсивности пучка заряженных частиц, обеспечивая минимальный фон. В результате многолетней разработки уникальной технологии создания тонкостенных дрейфовых строу-трубок, работающих в вакууме, группой С. А. Мовчана (ОИЯИ) совместно с ЦЕРН к 2014 г. был создан спектрометр заряженных частиц NA62. Более десяти лет эксплуатации этого спектрометра доказали его рекордную надежность. Технология создания детекторов на строу-трубках, работающих в вакууме, получила дальнейшее развитие в группе Т. Еника для использования в ряде других экспериментов ОИЯИ, в том числе на NICA.

Команда ОИЯИ участвует в сеансах набора данных NA62, в разработке и сопровождении системы контроля всего эксперимента, а также в разра-

[56] *Batley J. R. et al.* First Observation and Study of the $K^{\pm} \to \pi^{0}\pi^{0}\mu^{\pm}\nu$ Decay // JHEP. 2024. V. 03. P. 137.



Модуль камеры спектрометра NA62, изготовленной в ОИЯИ

ботке программного обеспечения для анализа данных. Параллельно со сбором данных в рамках эксперимента NA62 ведется их физический анализ. Так, в 2023 г. опубликованы результаты наиболее точного измерения вероятности радиационных распадов $K^+ \to \pi^0 e^+ \nu\gamma$ для трех кинематических областей. Анализ был выполнен двумя группами, включая команду из ОИЯИ под руководством Д. Т. Мадигожина. По итогам анализа данных NA62, зарегистрированных в 2016–2022 гг., был опубликован промежуточный результат наблюдения 51 кандидата в распад $K^+ \to \pi^+ \nu\nu$ при фоне в 18^{+3}_{-2} событий. Это первое наблюдение самого редкого из когда-либо наблюдавшихся распадов частиц, доказанное со статистической значимостью 5σ. Его измеренная вероятность[57] составила $\mathrm{BR}(K^+ \to \pi^+ \nu\nu) = (13{,}0^{+3{,}3}_{-3{,}0}) \cdot 10^{-11}$. Полученный

[57] *Cortina Gil E. et al.* Observation of the $K^+ \to \pi^+ \nu\nu$ Decay and Measurement of Its Branching Ratio // JHEP. 2025. V. 02. P. 191.

результат уже ограничивает области параметров для ряда теорий, выходящих за пределы СМ. Коллаборация NA62 продолжает набор данных, накапливая статистику для повышения точности измерения вероятности распада $K^+ \to \pi^+\nu\nu$ и собирая богатый экспериментальный материал для анализа других редких каонных распадов с рекордной точностью измерений.

ЭКСПЕРИМЕНТ NA64

Предложение эксперимента по поиску легкой темной материи и исследованию «новой» физики «темного» сектора на ускорителе SPS ЦЕРН было подготовлено в сотрудничестве ИЯИ РАН, ИФВЭ (КИ) и ОИЯИ. В 2015 г. по рекомендации комитета SPSC был проведен тестовый двухнедельный сеанс, который показал его перспективность, и в марте 2016 г. Research Board ЦЕРН одобрил новый эксперимент — NA64 — по поиску темной материи на электронном пучке ускорителя SPS.

Концепция установки NA64 основана на использовании полностью герметичного детектора для поиска событий с недостающей энергией, связанных с рождением частиц темной материи и другой «новой» физикой, в процессе рассеяния электронов, позитронов, адронов и мюонов высокой энергии на ядрах активной мишени. Участники NA64 первыми предложили использовать мечение электронов и позитронов с помощью синхротронного излучения и успешно реализовали эту экспериментальную методику.

Экспериментальная программа NA64 сегодня включает три основных направления, которые могут быть эффективно исследованы на ускорителях ЦЕРН в области масс ниже электрослабой шкалы ($\ll 100$ ГэВ). Они связаны с поисками темной материи и «новой» физики на электрон-позитронных пучках канала H4, на мюонном пучке M2 и на адронных пучках PS и SPS[58].

Группа ОИЯИ сыграла огромную роль в разработке научной программы и создании магнитного спектрометра установки, базовым трековым детектором которой являются тонкостенные дрейфовые камеры, выполненные по технологии строу-трубок. Все камеры были разработаны и изготовлены в ОИЯИ. Совместно с ИЯИ и ИФВЭ были разработаны и изготовлены электромагнитные и адронные калориметры, а также детекторы синхротронного излучения. Группа ОИЯИ составляет около 25% коллаборации, руководитель и технический координатор NA64 также являются сотрудниками ОИЯИ. Члены группы участвуют как в теоретической поддержке эксперимента, так и во всех этапах его проведения, в моделировании и анализе данных.

В настоящее время коллаборация NA64 получила самые жесткие в мире ограничения на параметры легкой темной материи, оставив в то же время

[58] *Andreev Yu. M. et al.* Search for a Light Z' in the $L_\mu - L_\tau$ Scenario with the NA64-e Experiment at CERN // Phys. Rev. D. 2022. V. 106(3). 032015;

Andreev Yu. M. et al. Search for Light Dark Matter with NA64 at CERN // Phys. Rev. Lett. 2023. V. 131. P. 161801;

Andreev Yu. M. et al. First Results in the Search for Dark Sectors at NA64 with the CERN SPS High Energy Muon Beam // Phys. Rev. Lett. 2024. V. 132(21). P. 211803.

Основная часть установки NA64 на пучке H4 ускорителя SPS

Строу-камеры перед установкой на мюонном пучке M2 ускорителя SPS

значительную область переменных для дальнейших исследований с целью либо обнаружить существование темной материи, либо закрыть основные, наиболее мотивированные ею модели.

ЭКСПЕРИМЕНТЫ NA49 И NA61/SHINE

Эксперимент NA49 осуществлялся на SPS в течение длительного времени и был нацелен на исследование области экстремальных плотностей энергии, где может происходить переход адронной материи в новое состояние — кварк-глюонную плазму. Группа физиков ОИЯИ принимала активное участие в этом эксперименте. Основными компонентами детектора NA49 были магнитный спектрометр и 4 больших время-проекционных камеры для отслеживания и идентификации частиц, измерявшие ионизационные потери частиц dE/dx в газе TPC. Массивы сцинтилляторов ToF дополняли идентификацию частиц, 900-канальный времяпролетный детектор ToF являлся одним из ключевых детекторов (рис. 39). Сложнейшая работа по его производству была полностью выполнена в Лаборатории высоких энергий в 1998 г. на базе ее производственного и технического потенциала. Детектор был создан в кратчайшие сроки — за 1,5–2 года, собран и запущен в ЦЕРН к началу эксперимента. Вместе с измерениями dE/dx в больших TPC детектор ToF высокого разрешения (60–70 пс) обеспечивал превосходную идентификацию частиц.

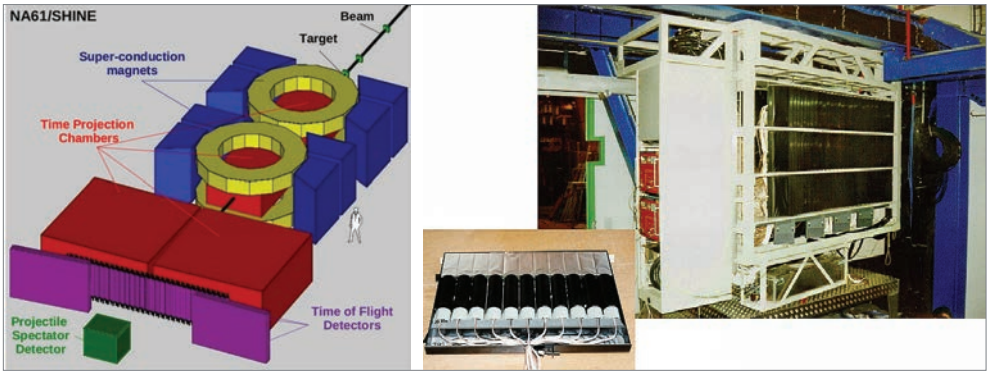


Рис. 39. Схема установки NA61/SHINE и детектор времени пролета ToF

В канун 50-летия ЦЕРН успешное участие лаборатории ОИЯИ в эксперименте NA49 было отмечено в письме К. Шварца, издателя Nuclear and High Energy Physics Elsevier, руководителю группы ОИЯИ А. И. Малахову. В подборке из 50 наиболее цитируемых статей, написанных учеными, связанными с ЦЕРН, и опубликованных в Elsevier, было 2 статьи от NA49 с авторами из ОИЯИ.

Основной целью исследований столкновений тяжелых ионов на SPS в ЦЕРН является поиск состояния деконфайнмента в сильновзаимодействующей материи на ранней стадии ядерно-ядерных столкновений при плотности энергии около 1 ГэВ/фм^3. При этих условиях КХД предсказы-

вает фазовый переход между адронной материей и кварк-глюонной плазмой. Характер энергетической зависимости инклюзивных наблюдаемых, таких как отношение выхода частиц K/π, полный выход пионов и значения параметра наклона спектров поперечных импульсов K- и π-мезонов, был предсказан в рамках термодинамического подхода SMES (Statistical Model of Early Stage) как следствие перехода ядерной сильновзаимодействующей материи в фазовое состояние деконфайнмента. Предсказанные сигнатуры начала деконфайнмента при энергиях SPS, а именно четко выраженный максимум в отношении K^+/π^+ в центральных столкновениях Pb + Pb около 30 ГэВ/нуклон ($\sqrt{s_{NN}} = 8$ ГэВ), а также характерное плато для значений параметра наклона спектров K^+-мезонов в интервале энергий SPS были надежно подтверждены результатами эксперимента NA49 (рис. 40). Анализ ToF поперечных спектров K- и π-мезонов, предоставленный группой ОИЯИ, стал существенным вкладом в эти исследования[59].

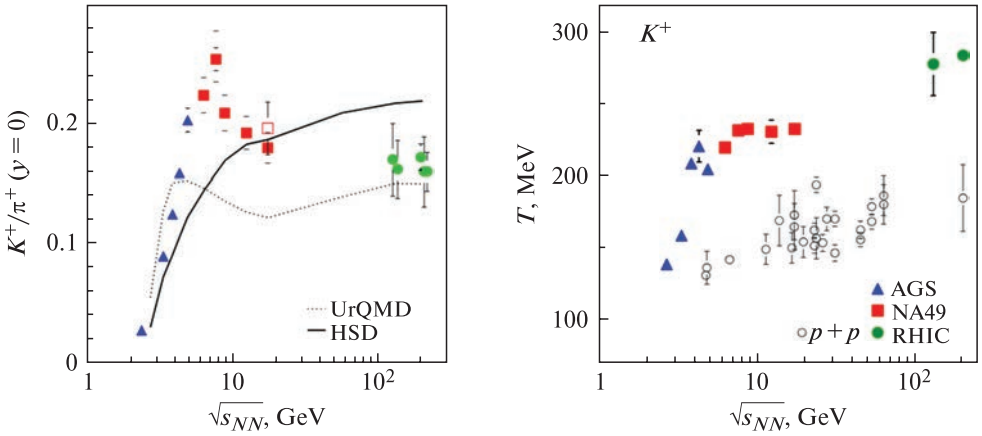


Рис. 40. Энергетическая зависимость отношения K^+/π^+ и параметра наклона спектров K^+ в столкновении ядер Pb + Pb

Другим направлением анализа данных в группе ОИЯИ было изучение зависимости образования p и $\bar{p}$ от энергии и центральности взаимодействий, отношения выходов $\bar{p}/p$ и $\bar{\Lambda}/\bar{p}$, а также образования легких ядер d, $\bar{d}$, t и ^{3}He в столкновениях Pb + Pb с энергиями пучка между 20 и 158 ГэВ/нуклон. Основные наблюдения в этих исследованиях обосновывают современную концепцию феноменологической теории столкновений релятивистских тяжелых ионов, которая включает сильное коллективное расширение источника высокой плотности энергии, созданной на ранней стадии взаимодействия.

Первые десять лет после выпуска пресс-релиза ЦЕРН об открытии кварк-глюонной плазмы в 2000 г. результаты NA49 широко цитировались, последующий этап осуществлялся уже в рамках проекта NA61/SHINE

[59] *Alt C. et al. (NA49 Collab.)* // Phys. Rev. C. 2008. V. 77. 024903.

(SPS Heavy Ion and Neutrino Experiment)[60]. Исследовательская программа NA61/SHINE, посвященная сильным взаимодействиям, основана на двухмерном сканировании пучками легких, промежуточных и тяжелых ядер ($p + p$, p + Pb, Be + Be, Ar + Sc, Xe + La, Pb + Pb) с энергиями в диапазоне 13–158 ГэВ/нуклон и включает поиск критической точки на фазовой диаграмме ядерной материи и изучение свойств системы в начале деконфайнмента. Физическая программа была также расширена измерениями образования очарованных D^0- и анти-D^0-мезонов, частиц так называемого «открытого чарма» в столкновениях $A + A$, что стало одной из главных задач после 2021 г.

Коллаборация NA61/SHINE также исследует рождение широкого спектра частиц для экспериментов по осцилляциям нейтрино в лабораториях J-PARC и FNAL для более точного определения начального потока нейтрино из мишени. Эти измерения требуют надежной идентификации частиц, что является одним из преимуществ детектора.

В 2019–2022 гг. коллаборация NA61/SHINE провела масштабную работу по модернизации установки. Инженеры и физики Лаборатории физики высоких энергий создали новую систему регистрации времени пролета с высоким временным разрешением (~ 50 пс) на базе детекторов mRPC, камер на основе многозазорных резистивных пластин, которая исключительно важна для идентификации заряженных частиц в центральной области быстрот реакций. Группа сотрудников лаборатории ответственна за разработку, создание и эксплуатацию детектора ToF, содержащего 1728 каналов регистрации времяпролетной информации, собранных в двух симметричных относительно пучка лево-правых каналах детектора. Первая половина детектора была собрана, введена в эксперимент и продемонстрировала надежную работу в сеансах ускорителя SPS в ЦЕРН в течение 2023–2024 гг. В настоящее время идет монтаж и ввод в эксплуатацию второй части детектора ToF.

На основе обработки и анализа результатов, полученных в экспериментах NA49 и NA61/SHINE, физиками ЛФВЭ успешно защищены 2 докторские и 3 кандидатские диссертации.

ПРОЕКТ CDF

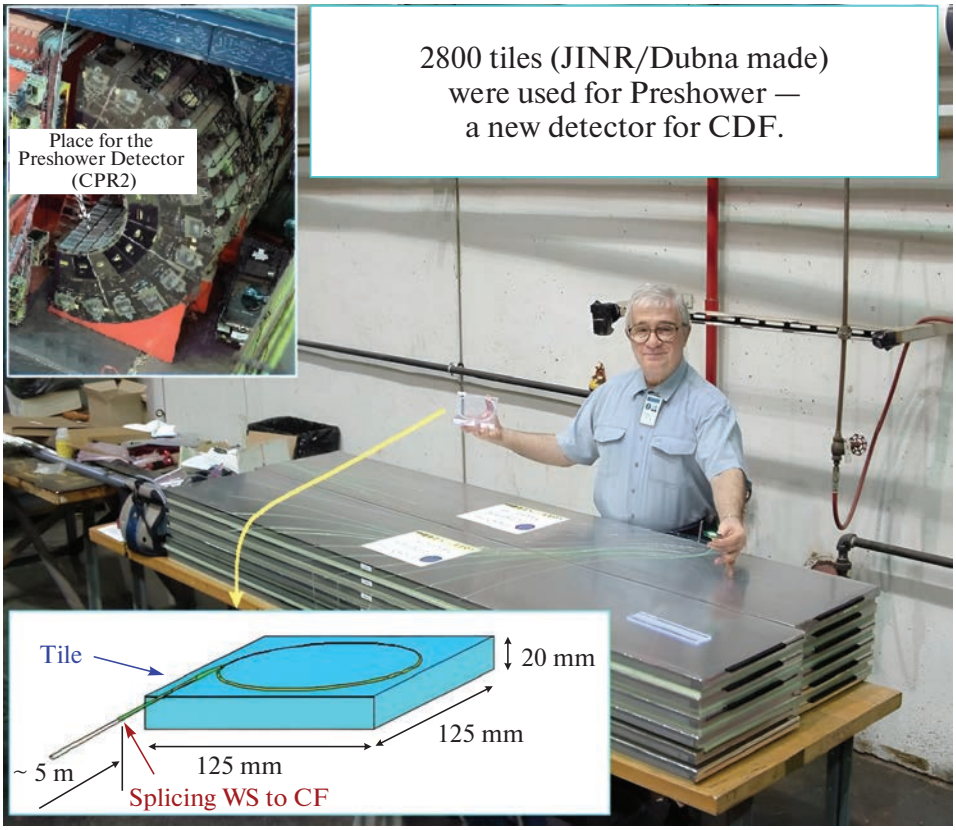
В октябре 2011 г. закончилась эра Тэватрона FNAL (Батавия, США). Выдающийся вклад в эксперимент CDF на Тэватроне внесли физики ОИЯИ. В творческом союзе с учеными из INFN (Пиза, Италия) и Института монокристаллов НАН Украины (Харьков) были созданы уникальные крупногабаритные сцинтилляционные детекторы нового поколения для мюонного триггера CDF, электроника и методика формирования триггера уровня II для сигналов кремниевого вершинного детектора. Ученые ОИЯИ с высокой точностью измерили массу t-кварка в однолептонной и двухлептонной модах распада.

[60] *Antoniou N. et al. (NA61/SHINE Collab.)*. CERN-SPSC-2006-034. 2006.

Фундамент этих достижений заложили Ю. А. Будагов, А. Н.Сисакян, Д. Беллеттини, В. Г. Кадышевский, Б. В. Гринев. Успех достигнут благодаря слаженной работе коллектива INFN–ОИЯИ: В.В. Глаголева, А. М. Артикова, А. Семенова, Г. Члачидзе, И. Суслова, Д. Чохели, Г. Велева, Д. Паулетты, Ф. В. Прокошина, О. Е. Пухова, А. В. Симоненко, И. Е. Чирикова-Зорина.

Группа ученых ОИЯИ внесла решающий вклад в разработку сцинтилляционных счетчиков мюонного триггера CDF, триггера на основе кремниевого вершинного детектора (SVT-триггера) для отбора событий со вторичными вершинами и преконвертора электромагнитного калориметра (CPR2). Группа участвовала в модернизации и эксплуатации системы сцинтилляционных счетчиков, создала систему контроля за их параметрами для обеспечения бесперебойной работы на этапе Run II.

Коллаборация ОИЯИ – НТК «Институт монокристаллов», включавшая ученых ОИЯИ, Украины, США, Италии, Греции, Узбекистана, Словакии, Грузии, России, создала в ОИЯИ уникальные новые детекторы на основе сцинтилляционного пластика серии UPS 923. Новизна разработки состояла в сборе света плоской лентой из оптоволоконного переизлучателя.

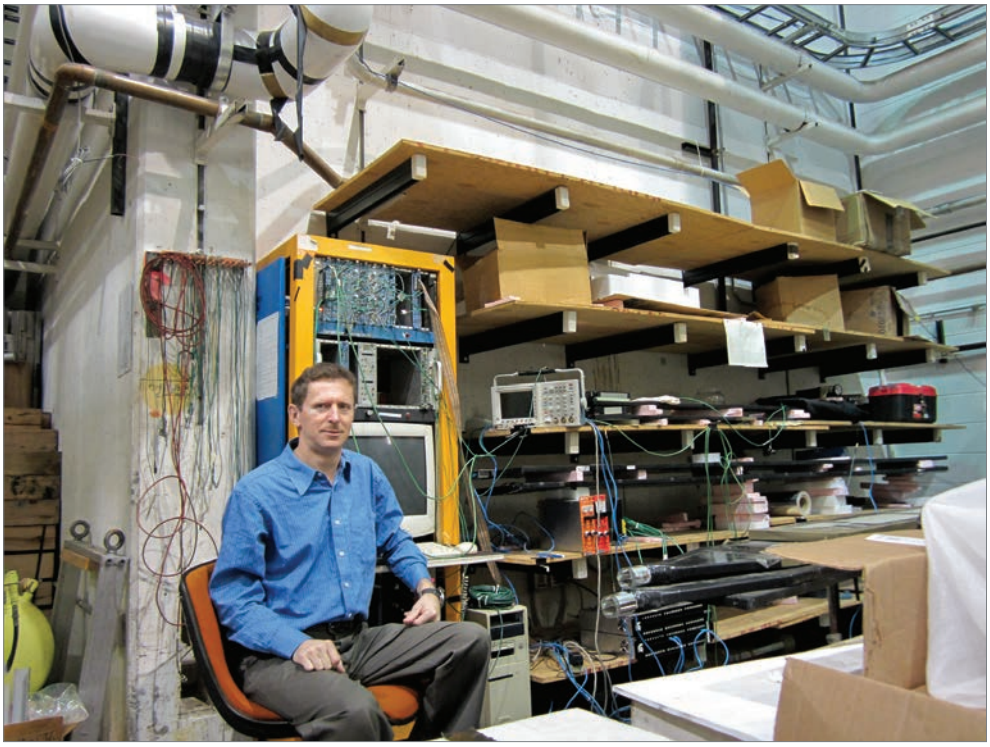


Ю. А. Будагов демонстрирует модуль детектора CDF. На вставках: вверху — схема расположения модулей на CDF; внизу — сцинтилляционная пластина (тайл)

Фундаментально важная константа современной теории, масса топ-кварка, определенная на CDF, вошла в престижные Международные таблицы свойств элементарных частиц; вклад физиков ОИЯИ неоднократно отмечался в сборнике Fermilab Today среди самых лучших достижений FNAL. В области физики t-кварка группа ОИЯИ принимала активное участие в измерении его массы в лептон-струйном и дилептонном каналах распада tt-пары. Группа успешно работала в области изучения свойств t-кварка: в коллаборации с коллегами из Братиславы был измерен заряд t-кварка, измерения позволили с 99%-м уровнем достоверности исключить гипотезу о существовании экзотического t-кварка. Также группа из ОИЯИ принимала активное участие в поисках бозона Хиггса на Тэватроне, в частности, был выполнен анализ канала распада $H \to \gamma\gamma$, который вошел в полный комбинированный анализ, позволивший сузить область поиска масс бозона Хиггса до 120–140 ГэВ/c^2.

С помощью подсистем, которые были созданы, модернизированы и обслуживались группой из ОИЯИ, были проведены замечательные исследования в области B-физики: открыты $B_S^0 - \bar{B}_S^0$-осцилляции, произведено наблюдение барионов Ω_b^-, Σ_b, Σ_b^* и Ξ_b^-.

Ю. А. Будагов, О. Е. Пухов, Г. Члачидзе, В. В. Глаголев, А. М. Артиков и Д. Чохели. Счетчик из ОИЯИ готов к монтажу в мюонный комплекс CDF. 2000 г.



В. В. Глаголев на стенде ОИЯИ во FNAL определяет параметры сцинтилляционных счетчиков, прибывших из Дубны

По итогам работ на CDF сотрудниками научно-экспериментального отдела множественных адронных процессов ЛЯП были защищены 2 докторские и 4 кандидатские диссертации. В 2006 г. группа сотрудников отдела была удостоена первой премии ОИЯИ за работу «Разработка и создание сцинтилляционного детектора мюонов установки CDF II для опытов по физике тяжелых кварков на Тэватроне FNAL». Европейское физическое общество (EPS) присудило Премию в области физики высоких энергий и физики частиц High Energy and Particle Physics Prize 2019 г. коллаборациям CDF и D0 за открытие *t*-кварка и детальное изучение его свойств. Эта премия Европейского физического общества присуждается за выдающийся вклад в физику высоких энергий.

ПРОЕКТ D0

В 1992 г. был заключен договор о присоединении ОИЯИ к совместному с Национальной ускорительной лабораторией им. Э. Ферми (FNAL, США) эксперименту D0.

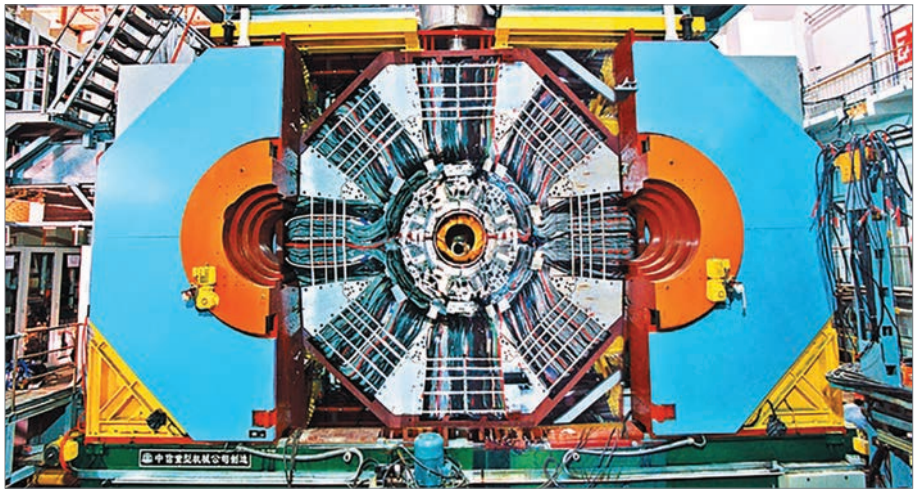
Для установки D0 сотрудниками ЛЯП ОИЯИ было разработано, изготовлено и испытано около 7 тыс. мини-дрейфовых трубок (МДТ) длиной от 1 до 6 м и собрана мюонная система FAMUS.

Совместная российско-американская группа, участвовавшая в сборке, тестировании и запуске мюонной системы детектора D0

От России в проекте участвовали представители ЛЯП ОИЯИ (Дубна), ИФВЭ (Протвино) и ПИЯФ (Гатчина).

ЭКСПЕРИМЕНТ BES III

Основной целью эксперимента BES III на электрон-позитронном коллайдере BEPC II (ИФВЭ АН КНР, Пекин) является проведение точных измерений в области рождения пар тау-лептонов и резонансов чармония. Этот эксперимент, наряду с экспериментом Daya Bay, стал первым после



Установка BES III

1965 г. совместным проектом ОИЯИ с китайскими учеными в области физики элементарных частиц.

В 2005 г. для участия в этом эксперименте была сформирована группа сотрудников ЛЯП под руководством Г. А. Шелкова, которая внесла заметный вклад в подготовку программы физических исследований BES III, вошла в число основных разработчиков программного обеспечения эксперимента, помогла спроектировать и развернуть систему распределенных вычислений BES III.

Участие в анализе данных BES III позволило расширить спектр научных задач, решаемых Лабораторией ядерных проблем, и включить в них спектроскопию легких адронов, изучение распадов очарованных мезонов и образование состояний чармония в электрон-позитронной аннигиляции.

ЭКСПЕРИМЕНТ STAR

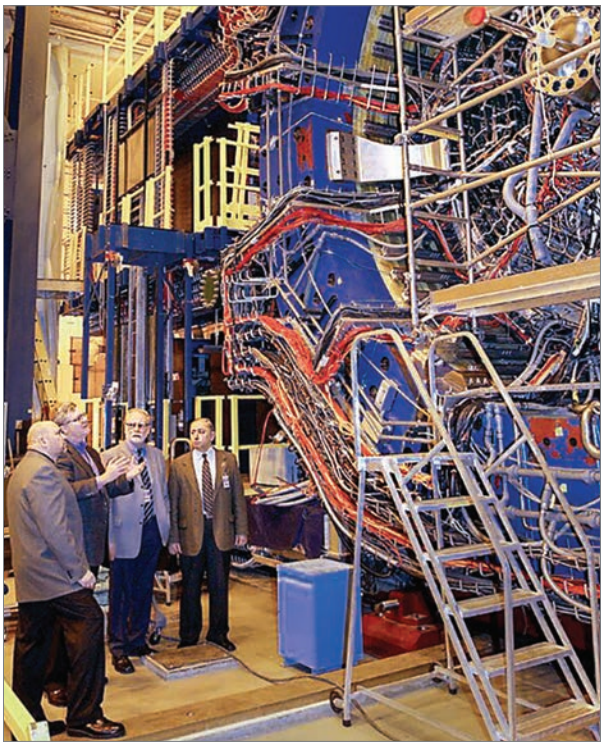
Решение об участии ОИЯИ в эксперименте STAR (Solenoidal Tracker At RHIC) на коллайдере релятивистских ядер и поляризованных протонов RHIC (Relativistic Heavy Ion Collider) в Брукхейвене (США) было принято в 1993 г., когда группы из ЛВЭ (рук. Ю. А. Панебратцев) и ЛФЧ (рук. И. А. Савин) стали участниками коллаборации STAR. Цель исследований — установить экспериментально закономерности перехода кварков и глюонов в протоны и нейтроны, природу ядерных сил, фазовую диаграмму ядерной материи. На коллайдере RHIC планировалось получение пучков поляризованных протонов с энергией до 510 ГэВ. Участие в этих экспериментах позволило расширить и программу исследований ОИЯИ по изучению спиновой структуры протона. В ОИЯИ были заложены и продолжают существовать традиции в области спиновой физики. Поэтому основной вклад ОИЯИ в проект STAR — участие в создании детекторов для исследования поляризационных явлений — центрального и торцевого электромагнитных калориметров[61].

В 2000 г. был проведен первый эксперимент на установке STAR с пучками ядер золота с энергией $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ. За прошедшие годы коллайдер RHIC и установка STAR постоянно совершенствовались. Наиболее важным итогом работы является выполнение уникальной экспериментальной программы исследований с использованием широкого набора пучков ядер (вплоть до урана), включая поляризованные пучки, энергий от нескольких ГэВ до $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ и пробников частиц с легкими (u, d, s) и тяжелыми (c, b) кварками, фотонов, лептонов, лептонных пар, струй, легких ядер, антиядер, гиперядер и антигиперядер.

В эксперименте STAR впервые получены физические результаты мирового уровня.

---

[61] *STAR Collab.* STAR Detector Overview // Nucl. Instr. Meth. 2003. V. 499. P. 624;
STAR Collab. The STAR Barrel Electromagnetic Calorimeter // Ibid. P. 725;
STAR Collab. The STAR Endcap Electromagnetic Calorimeter // Ibid. P. 740.



Директор ОИЯИ В. Г. Кадышевский и вице-директор А. Н. Сисакян знакомятся с экспериментом STAR. Обсуждение новых результатов со споуксменом эксперимента Т. Холлманом

— В столкновениях ядер золота при энергии 200 ГэВ обнаружено новое состояние сильновзаимодействующей ядерной материи — «идеальная жидкость», и изучены ее свойства в процессах с рождением легких, тяжелых кварков и струй (эллиптический поток, фактор ядерной модификации, $\Delta\eta-\Delta\varphi$-корреляции, кварковый NCQ-скейлинг).

— Выполнена программа энергетического сканирования в диапазоне энергий 3–200 ГэВ для изучения фазовой диаграммы ядерной материи в диапазоне температур $T_{ch} = 60–160$ МэВ и барионных плотностей $\mu_B = 25–720$ МэВ.

— Методом фемтоскопических корреляций изучено взаимодействие антипротонов и установлена зарядовая симметрия материи и антиматерии[62].

— В процессах с рождением гипертрития и антигипертрития проверена CPT-симметрия[63].

— В ядро-ядерных столкновениях обнаружен эффект вращения ядерной материи и измерена глобальная поляризация гиперонов[64].

---

[62] *STAR Collab.* // Nature. 2015. V. 527. P. 345.
[63] *STAR Collab.* // Nature Physics. 2020. V. 16. P. 409.
[64] *STAR Collab.* // Nature. 2017. V. 548. P. 62.

— В столкновениях ядер золота при энергии 200 ГэВ установлена симметрия рождения материи (p, d, ^{3}He, ^{4}He) и антиматерии ($\bar{p}$, $\bar{d}$, $^3\overline{\text{He}}$, $^4\overline{\text{He}}$)[65].

— В столкновениях продольно-поляризованных протонов при энергии 510 ГэВ с рождением струй установлен положительный интегральный вклад глюонов в спин протона.

— В процессах с рождением W-, Z-бозонов обнаружена асимметрия спин-зависимых морских $\bar{u}$- и $\bar{d}$-кварковых распределений в протоне.

Одним из направлений исследований группы ОИЯИ является использование экспериментальных данных с установки STAR для поиска новых симметрий и скейлинговых закономерностей во взаимодействиях адронов и ядер высоких энергий[66]. Метод корреляционной фемтоскопии получил развитие в работах Р. Ледницкого и В. Л. Любошица и был успешно применен в экспериментах STAR для изучения ΛΛ-корреляций в столкновениях ядер золота[67]. Использование этого метода превратило STAR в уникальную «фабрику» для исследования гиперон-гиперонных взаимодействий, важных для описания различных барион-барионных взаимодействий и изучения уравнения состояния материи, в том числе образующейся в нейтронных звездах.

В программе энергетического сканирования BES-II удалось провести исследование «переходной» области энергий от адронных к кварковым степеням свободы. Установлено, что обнаруженный при высоких энергиях скейлинг от числа составляющих кварков (NCQ) в столкновениях Au + Au в центральной области быстрот нарушается при низких энергиях около 3 ГэВ (рис. 41).

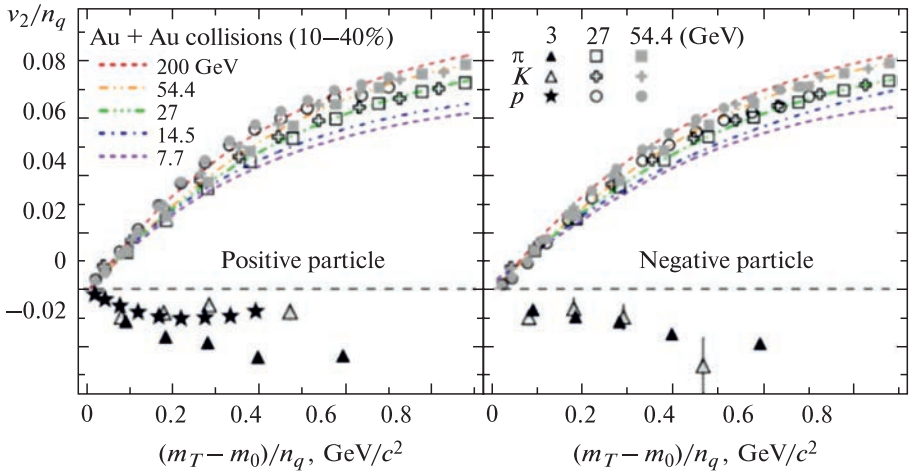


Рис. 41. Нарушение NCQ-скейлинга при энергии $\sqrt{s_{NN}}$ = 3 ГэВ в столкновениях Au + Au

[65] *STAR Collab.* // Nature. 2011. V. 473. P. 353.

[66] *Zborovsky I., Tokarev M.* New Properties of z-Scaling: Flavor Independence and Saturation at Low z // Intern. J. Mod. Phys. A. 2009. V. 24. P. 1417.

[67] *Adamczyk L. et al. (STAR Collab.).* ΛΛ Correlation Function in Au + Au Collisions at $\sqrt{s_{NN}}$ = 200 GeV // Phys. Rev. Lett. 2015. V. 114. 022301.

Величина эллиптического потока оказывается отрицательной для всех адронов (π, K, p), а быстротный наклон прямого потока для большинства частиц — положительным. Этот результат объясняется воздействием отталкивающего среднего поля нуклонов-спектаторов, возрастающим с уменьшением энергии столкновения[68].

В настоящее время идет выполнение экспериментальной программы «Hot QCD Physics»: планируется изучить микроструктуру КГП в соударениях золото–золото при энергии 200 ГэВ для детализации фазовой диаграммы КХД и определения свойств КГП на малых масштабах. В новом кинематическом диапазоне и при увеличенной светимости коллайдера RHIC будет набрана статистика по Au–Au- и p–Au-взаимодействиям при энергии коллайдера 200 ГэВ и в экспериментах с поляризованными протонами при энергии 510 ГэВ, сравнимая по объему с тем, что был набран за все предыдущие годы. Полученный набор данных, несомненно, будет использоваться при подготовке экспериментальной программы будущего электрон-ядерного коллайдера, для развития теоретических моделей и в других проектах.

ЭКСПЕРИМЕНТ CBM

Участие ОИЯИ в эксперименте CBM (Compressed Baryonic Matter) было одобрено в 2010 г. Проект CBM посвящен исследованиям релятивистских ядерных столкновений ионов золота в области энергий до 11 ГэВ/нуклон на ускорительном комплексе FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research), создаваемом в Дармштадте (Германия). Планируется детально исследовать энергетический диапазон 4–11 ГэВ/нуклон, где ожидается самая высокая барионная плотность для ядерных столкновений.

Установка CBM представляет из себя магнитный спектрометр, оборудованный самыми современными детекторами. Предполагаются две моды работы установки: «электронная + адронная» и «мюонная». В реализации проекта участвовали сотрудники ЛФВЭ, ЛЯП, ЛТФ и ЛИТ ОИЯИ, внесшие определяющий вклад в подготовку технического проекта по сверхпроводящему дипольному магниту[69]. Они активно участвовали в подготовке технических проектов по мюонной системе[70] и кольцевому черенковскому детектору[71]. Специалисты ОИЯИ участвовали в создании мюонных камер детектора CBM и кремниевой трековой системы на основе стриповых кремниевых детекторов, в разработке алгоритмов, создании баз данных, проработке физической программы и моделировании параметров установки и физических процессов. Опубликованы десятки совместных работ в Nucl. Instr. Meth. и других журналах.

---

[68] *STAR Collab.* // Phys. Lett. B. 2022. V. 827. P. 137003.

[69] *CBM Collab.* Technical Design Report for the CBM Superconducting Dipole Magnet. GSI-2015-02000. 2013.

[70] *CBM Collab.* Technical Design Report for the CBM Muon Chambers. GSI-2015-02580. 2015.

[71] *CBM Collab.* Technical Design Report for the CBM Ring Imaging Cherenkov Detector. GSI-2014-00528. 2013.

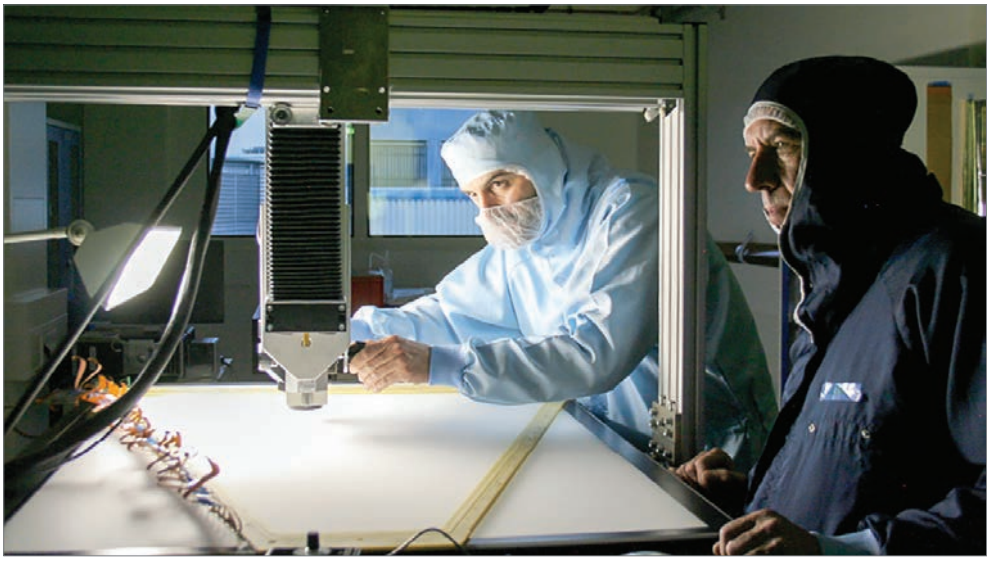
И хотя участие ОИЯИ в этом проекте официально прекращено в мае 2023 г., опыт, полученный в рамках эксперимента CBM, уже успешно используется в реализации проектов MPD, SPD и BM@N на NICA.

ЭКСПЕРИМЕНТ HADES

Эксперимент HADES (High Acceptance Di-Electron Spectrometer) официально стартовал в GSI (Дармштадт, Германия) в 1994 г. Группа ОИЯИ была в числе основателей коллаборации и внесла важнейший вклад в создание трековой системы спектрометра, развитие программного обеспечения, онлайн-контроля и алгоритмов обработки, а также в анализ полученных экспериментальных данных. Спектрометр HADES[72] относится ко второму поколению диэлектронных детекторов и предназначен для обнаружения электрон-позитронных пар в столкновениях тяжелых ионов. HADES также способен детектировать и идентифицировать адроны, что дает возможность изучать странность и множественное рождение пионов.

Основной экспериментальной задачей HADES было исследование свойств плотной ядерной материи, создаваемой в ходе столкновений тяжелых ионов, и свойств адронов в среде (масс, ширин распада). Создаваемая в таких столкновениях материя отличается от исследуемой на SPS, RHIC или LHC тем, что состоит в основном из барионов (нуклонов и их возбужденных состояний — барионных резонансов) и легких мезонов и может сжиматься до 3-кратной плотности ядерной материи примерно за 10–12 Фм/с.

Диэлектронные пары, образующиеся из распадов адронов в среде, и редкие странные адроны (каоны, гипероны) являются основными зон-



Восстановление одного из секторов МДК-2 сотрудниками ОИЯИ в GSI

[72] *Agakishiev G. et al.* // Eur. Phys. J. A. 2009. V. 41. P. 243.

дами, измеряемыми в эксперименте. Поскольку выводы о влиянии среды сильно зависят от понимания свойств адронов в вакууме и механизма их рождения в нуклон-нуклонных столкновениях, выполняется дополнительная программа, ориентированная на рождение e^+e^--пар, каонов и гиперонов (Σ, Λ) в элементарных столкновениях.

Группа ОИЯИ изготовила вторую плоскость многопроволочных дрейфовых камер[73] (МДК-2), разработала регистрирующую электронику на основе микросхемы ASD-8 и поддерживала МДК вместе с регистрирующей электроникой в рабочем состоянии до и во время набора статистики, участвуя также в модернизации трековой системы. Сотрудники ОИЯИ сыграли важнейшую роль в развитии алгоритма поиска треков заряженных частиц на основе решения проблемы Г. Шуберта для четырех прямых, в прецизионной юстировке детекторов HADES, анализе колец черенковского излучения в RICH для идентификации частиц на основе преобразования Хафа, участвовали в наборе и анализе данных, полученных в *pp*-, *np*-, πA-, *pA*- и *AA*-столкновениях при энергиях GSI.

Участие ОИЯИ в HADES было прекращено по инициативе германской стороны в марте 2022 г.

[73] *Bokemeyer H. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 2002. V. 477. P. 397;
Carabatos C. et al. // Nucl. Instr. Meth. A. 1998. V. 412. P. 38.

ФИЗИКА НЕЙТРИНО
И РЕДКИХ ПРОЦЕССОВ

В настоящее время Лаборатория ядерных проблем, а соответственно и ОИЯИ, обладает наиболее внушительной Нейтринной программой в мире. Диапазон и спектр изучаемых явлений и энергий очень широк: от совсем низких энергий, при которых нейтрино может когерентно рассеиваться на атомах и ядрах (эксперименты νGeN, Ricochet, SATURNE), до энергий, превышающих на порядки максимальные, созданные человеком на Большом адронном коллайдере (BaikaI-GVD). В каждом из изучаемых диапазонов нейтрино несет уникальную информацию, недоступную другим методам, и, как сегодня уже понятно, является ключом к «новой» физике за пределами Стандартной модели.

Необходимо подчеркнуть, что наряду с большим охватом лаборатория проводит эксперименты, в которых по сути является ведущей или соведущей организацией (эксперименты на Калининской АЭС, на озере Байкал, новые эксперименты в Баксанской нейтринной обсерватории), а также участвует в передовых международных проектах (тут особо нужно отметить реакторный эксперимент JUNO, который будет определять наши знания о свойствах нейтрино в ближайшие годы, «большие» ускорительные эксперименты, такие как T2K, NOvA, и эксперименты меньшего масштаба, которые могут изменить физику, например, COMET). В любом случае, критерием нашего участия является наука на переднем крае сегодняшних знаний и вклад, который является значимым даже для коллабораций, состоящих из сотен ученых.

Как получилось, что Лаборатория ядерных проблем стала ведущим центром изучения нейтрино, а если точнее, физики слабых взаимодействий? Вначале нужно подчеркнуть фундаментальные исторические предпосылки: они связаны с именем Бруно Понтекорво, классические работы которого, по сути, предугадали развитие нейтринной физики на десятилетия вперед.
Следующим фактором стало всестороннее развитие как в Институте, так и в ЛЯП самых разнообразных подходов в экспериментальной физике. Уникальные детекторы и знания, которыми обладали дубненские ученые, оказались широко востребованы. История Нейтринной

программы в ОИЯИ, в которой лидирующую роль играла Лаборатория ядерных проблем, в первую очередь создавалась яркими личностями. Тут необходимо отметить роль Цветана Вылова, который в 1988–1992 гг. был директором ЛЯП, а с 1992 по 2005 г. вице-директором ОИЯИ. В те годы Лаборатория ядерных проблем уже обладала большим опытом, связанным с методами, которые десятилетиями развивались и использовались для изучения ядра, свойств радиоактивных изотопов и частиц, большая часть которых была тем или иным образом связана с фазотроном ЛЯП. Важной вехой в истории ЛЯП, приведшей к изменениям, сформировавшим нынешнее научное направление, стала идея, которая возникла в середине 1980-х гг. именно у Ц. Вылова, по применению классических спектрометрических методик для исследований нейтринного сектора в неускорительных экспериментах. Переориентация лаборатории на поиск и исследование редких процессов потребовала создания новой спектрометрической школы с освоением новейших методик и заимствованием лучшего в культуре проведения экспериментов у иностранных партнеров. Позже, с учетом того, насколько важным является изучение нейтрино в современной физике, началось участие и в ускорительных экспериментах. В этом огромную роль сыграли директора ЛЯП Н. А. Русакович, А. Г. Ольшевский, В. А. Бедняков (в хронологическом порядке). Важнейшим развитием самого последнего времени является реализация амбициозного мирового проекта в нейтринной физике — создание гигатонного нейтринного телескопа на озере Байкал. Важную роль в реализации этого проекта играет организованное при поддержке В. А. Матвеева и Г. В. Трубникова тесное сотрудничество ЛЯП ОИЯИ с ИЯИ РАН. Тут необходимо вспомнить о В. Б. Бруданине: во многом именно благодаря его усилиям во взаимодействии с руководителем коллаборации Г. В. Домогацким (ИЯИ РАН), при поддержке дирекций ЛЯП и ОИЯИ, в настоящее время успешно развивается уникальный нейтринный детектор, который уже приступил к изучению тайн Вселенной. Нужно сказать, что создание Baikal-GVD потребовало принятия непростых решений, в том числе связанных с выделением существенных средств из бюджета ОИЯИ. Без принципиальной позиции директоров ОИЯИ В. А. Матвеева и Г. В. Трубникова, увидевших перспективу этого научного направления, прорывное развитие эксперимента было бы невозможно.

Ярким примером использования классических спектрометрических методов в современных экспериментах являются эксперименты по поиску безнейтринной моды двойного бета-распада. Уместно процитировать письмо от 28 июля 1988 г. директора ЛЯП Ц. Вылова

академику С. Т. Беляеву (в связи с разработкой программы исследований по ядерной физике в СССР):

«В настоящее время в физике нейтрино существует несколько проблем, решение которых возможно с применением методов прецизионной ядерной спектроскопии <…>.

ДВОЙНОЙ БЕТА-РАСПАД

Интерес к исследованию двойного безнейтринного бета-распада связан с поиском возможного несохранения лептонного заряда и существования правых токов, а также выяснением природы и массы (анти)нейтрино. Обнаружение двойного двухнейтринного бета-распада интересно, но не имеет принципиального физического значения. Правда, измерение вероятности $2\beta2\nu$-распада является лучшим тестом точности расчета матричных элементов, которые играют принципиальную роль в интерпретации данных по двойному безнейтринному бета-распаду.

Особенности двойного бета-распада таковы, что для наблюдения столь редкого процесса необходим очень тонкий источник и прибор с пространственной регистрацией, который позволяет измерять энергетический и суммарно-энергетический спектры электронов. При этом для разделения каналов 0ν и 2ν необходимо высокое энергетическое разрешение (лучше 1 %) и измерение углового распределения электронов. Отсюда ограничение на толщину источника, а значит, и требования на линейные размеры источника и детектора для наблюдения столь редкого процесса ($\lambda \approx 10^{-29}$ с$^{-1}$). Тогда уже вступает в силу роль естественного и космического фона. Следовательно, успех решения задачи будет зависеть от оптимального выбора соотношения эффект/фон.

Очевидно, что на данном этапе важнейшим является вопрос прямого наблюдения процесса двойного бета-распада (ДБР). Отказ от детального исследования элементарного процесса позволяет несколько упростить условия эксперимента, а именно:

а) необходимо высокое энергетическое разрешение при высокой эффективности;

б) необходимо грубое наблюдение пространственной картины, так как механизмы $2\beta2\nu$-распада допускают два крайних случая: вылет электронов в одну сторону ($1 - \cos\theta$) и вылет электронов в разные стороны ($1 + \cos\theta$);

в) система должна обладать возможностью для подавления различных источников фона: работа в подземных условиях, выбор особо чистых конструктивных материалов, координатная регистрация, разделение сигналов от различных излучений и т. д.

Нетрудно понять, что наиболее жесткое условие (а) требует применения полупроводниковых детекторов —

единственного на сегодняшний день прибора, который имеет высокие разрешение и эффективность. Исходя из этих условий нами предложен эксперимент по поиску ДБР с помощью телескопа из HPGe-детекторов. Аналогичные проекты (но пока на основе Si(Li)-детекторов) уже предложены и реализуются в других лабораториях мира. Можно ожидать, что развитие перспективных экспериментов по поиску $2\beta0\nu$-распада будет идти по пути совершенствования этого подхода — например, введением координатной регистрации.

В заключение я хотел бы добавить следующее. В СССР уделяется значительное внимание проблеме исследования свойств нейтрино. К сожалению, экспериментальный уровень докладываемых на международных конференциях результатов очень низок. Мне кажется, что если удастся сконцентрировать усилия различных конкурирующих между собой внутри СССР групп на основе известных преимуществ перед другими странами (наличие доступного ^{76}Ge, успехи в регистрации бета-частиц с помощью HPGe-детекторов, уровень методики низкоэнергетической электронной спектроскопии, наличие низкофоновых лабораторий с методикой отбора чистых материалов и т. д.), а также привлечения сотрудников и ресурсов стран-участниц ОИЯИ, можно было бы получить достаточно быстро и на высоком научном уровне результаты по физике нейтрино…».

Удивительно, как практически 40 лет назад была точно расписана по сути идея современных передовых экспериментов по двойному бета-распаду. Сегодня, конечно, изучение этих процессов ведется самыми современными методами: криогенными детекторами, большими детекторами на сжиженных благородных газах, трекокалориметрическими детекторами, полупроводниковыми детекторами специального дизайна и в особенной защите для снижения уровня фона до единиц отсчета на тонны вещества в год. Такие фоны 40 лет назад казались фантастическими и недостижимыми.

По сути и вся современная Нейтринная программа ОИЯИ является такой: фантастической по своим методам и по тем знаниям, которые мы хотим получить.

НЕЙТРИННАЯ АСТРОФИЗИКА

ПРОЕКТ BAIKAL-GVD

Лаборатория ядерных проблем ОИЯИ участвует в работах по созданию нейтринных телескопов на озере Байкал с 1991 г. Установки такого типа представляют собой систему фотодатчиков, распределенных в водном объеме на глубине, исключающей влияние солнечного света. Основными задачами таких детекторов являются поиск источников и исследование потоков нейтрино высоких энергий астрофизического происхождения, непрямой поиск частиц темной материи, а также поиск экзотических частиц, таких как магнитные монополи, и изучение астрофизических проявлений других расширений Стандартной модели элементарных частиц.

Центральная подвеска детектора НТ-200 с модулями управления и газовым калибровочным лазером. На кабель-тросе, к которому крепится подвеска, опускается вся установка диаметром 43 м

С них начался байкальский проект в ОИЯИ. Слева направо: К. В. Конищев, И. А. Белолаптиков, Б. А. Шайбонов, Е. Н. Плисковский

В тот период начала 1990-х, при ведущей роли Лаборатории нейтринной астрофизики высоких энергий (ЛНАВЭ) ИЯИ РАН, готовился проект глубоководного нейтринного телескопа НТ-200. Определялась его конфигурация, разрабатывались аппаратура и конструкции телескопа, программное обеспечение работы телескопа и обработки данных, в чем сотрудники ЛЯП принимали активное участие. В результате в период с 1993 по 1998 г. был развернут первый в мире глубоководный нейтринный телескоп НТ-200 из восьми гирлянд по 24 оптических модуля на каждой и зарегистрированы первые события от нейтрино.

В научно-экспериментальном отделе ядерной спектроскопии и радиохимии ЛЯП ОИЯИ под руководством начальника отдела В. Б. Бруданина была сформирована байкальская группа молодых воспитанников ЛНАВЭ, чье ядро составили И. А. Белолаптиков, К. В. Конищев, Е. Н. Плисковский, Б. А. Шайбонов, которая проводила исследования и разработку пакетов программ моделирования, управления телескопом и обработки данных, а также участвовала в проведении экспедиционных работ на озере Байкал.

Научные исследования проводились в направлениях поиска астрофизических нейтрино высоких энергий, магнитных монополей, частиц «темной материи», локальных источников и диффузных потоков нейтрино. В результате исследований были установлены верхние пределы для регистрации искомых частиц и подтверждены результаты моделирования астрофизических процессов, что привело к выводу о необходимости наращивания эффективного объема телескопа от 0,01 до 1 км^3.

К 2004 г. процесс увеличения эффективного объема телескопа до 0,02 км^3 был завершен установкой трех внешних гирлянд и телескоп стал

именоваться НТ-200+. На этот же период пришлись исследования по переходу от использования основных элементов телескопа российского производства к зарубежной элементной базе. Завершился данный этап развития выпуском в 2010 г. первого варианта Научно-технического проекта телескопа НТ-1000 с эффективным объемом до 1 км^3.

Период с 2011 по 2014 г. был посвящен поискам новой элементной базы, разработке нового типа оптического модуля, разработке технического проекта несущих конструкций телескопа, испытаниям новых элементов на лабораторных стендах и в составе телескопа НТ-200+. Также проводилась международная экспертиза и доработка Научно-технического проекта Байкальского глубоководного нейтринного телескопа с изменением наименования с НТ-1000 на Baikal-GVD, которая завершилась подписанием Протокола между ИЯИ РАН и ОИЯИ о выполнении совместной научно-исследовательской работы в целях объединения усилий и сокращения сроков достижения научно-технических результатов в создании Байкальского глубоководного нейтринного телескопа (Baikal-GVD) с эффективным объемом масштаба кубического километра. С этого момента ОИЯИ берет на себя обязательства полномасштабного участия в выполнении и финансировании проекта. Это обусловило перспективы реализации результатов исследований, разработок и опыта, накопленного за три десятилетия, тем более что и в ИЯИ РАН, и в ОИЯИ сохранялся костяк специалистов, приведших к достигнутым результатам.

Проект создания телескопа Baikal-GVD рассматривался межведомственной рабочей группой по приоритетам развития наземных астрономических инфраструктурных проектов Российской Федерации на период 2016–2025 гг. Группа из 12 ведущих специалистов и руководителей в области астрономии и астрофизики, созданная по инициативе Администрации

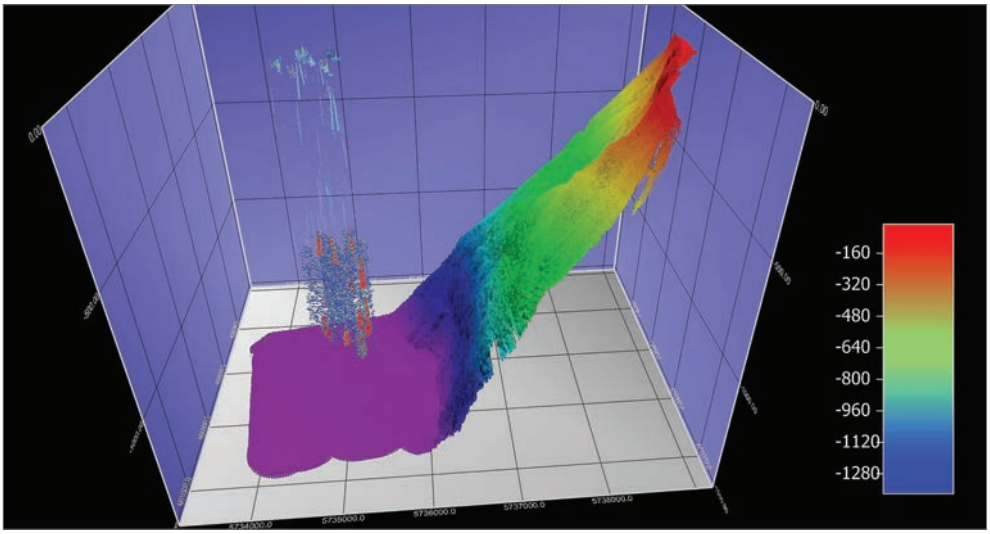
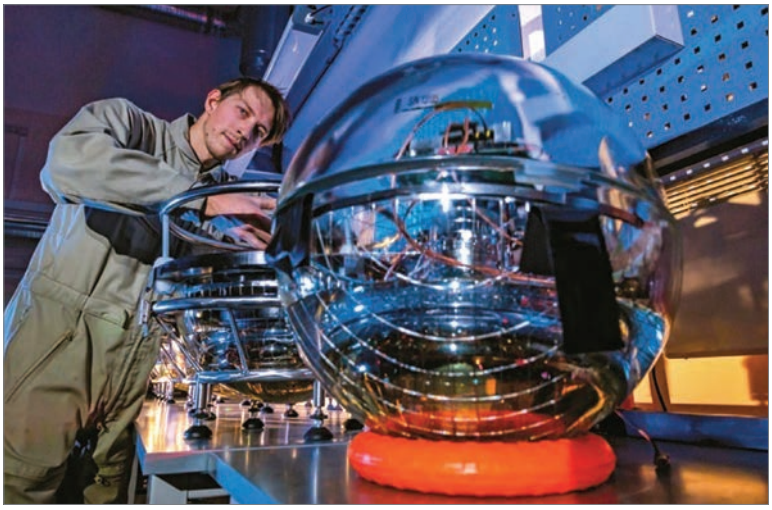


Рис. 1. Нейтринный телескоп Baikal-GVD, как его видел многолучевой эхолот ИРНИТУ в июле 2020 г.



Сборка оптического модуля Baikal-GVD. Д. А. Орлов

Президента Российской Федерации и работавшая в 2015 г., посчитала важным поддержать создание и ввод в действие нейтринного телескопа Baikal-GVD как современный проект в области нейтринной астрономии высоких энергий и присвоила проекту высший приоритет с рекомендацией начать немедленное его финансирование.

Монтаж детектора. Слева направо: Ж.-А. Джилкибаев, Д. Е. Звездов, Т. В. Елжов, В. Шатунов

Награждение В. А. Матвеева за ввод кластера «Дубна» руководством города Дубна

Уже в 2015 г. был установлен первый кластер «Дубна» телескопа Baikal-GVD с эффективным объемом при регистрации ливней (каскадов) 0,05 км^3 и 288 оптическими модулями с ФЭУ.

Это уникальное событие было отмечено в престижном европейском журнале физиков «CERN Courier», а в Дубне директору ОИЯИ В. А. Матвееву была вручена специальная памятная награда. В. А. Матвеев почти 40 лет, еще со времен директорства в ИЯИ РАН, связан с байкальским проектом.

Большой объем работ по развитию инфраструктуры и технологий как на озере Байкал, так и в основных институтах выполнен при непосредственном участии ОИЯИ. В ЛЯП организован участок по сборке, калибровке и тестированию оптических модулей. В результате были значительно улучшены условия для работы и быта специалистов, технологии производства ледовых работ, возможности комплектации, накопления и доставки грузов к месту монтажа телескопа, что обеспечило установку до двух кластеров в год уже в 2019 г.

На этом этапе была разработана и теперь успешно продвигается совместными усилиями система обработки данных BARS, которая находится на стадии завершения, начаты процедуры автоматической обработки данных. Разработаны алгоритмы отбора и восстановления траекторий мюонных и нейтринных событий, усовершенствованы процедуры восстановления каскадных событий и их систем отображения. В результате анализа данных с 2016 г. выявлены 6 событий — кандидатов на регистрацию астрофизических нейтрино в диапазоне энергий от сотен ТэВ до 1 ПэВ, что согласуется с модельными расчетами и результатами регистрации событий на IceCube[1]. Таким образом, телескоп начал поставлять данные для развития исследований в области нейтринной астрофизики и астрономии высоких энергий.

[1] *Allakhverdyan V. A. et al.* Neutrino Telescope in Lake Baikal: Present and Nearest Future // PoS ICRC2021. 2021. V. 002; doi: 10.22323/1.395.0002.

Министр В. Н. Фальков и директор ОИЯИ Г. В. Трубников подписывают Меморандум о взаимопонимании между Минобрнауки РФ и ОИЯИ

13 марта 2021 г. в ледовом лагере на озере Байкал, в том месте, где подо льдом развернут нейтринный телескоп, министр науки и высшего образования РФ В. Н. Фальков и директор ОИЯИ Г. В. Трубников подписали Меморандум о взаимопонимании между Министерством науки и высшего образования Российской Федерации и ОИЯИ по развитию Байкальского глубоководного нейтринного телескопа. Тогда же при участии директора ИЯИ РАН М. В. Либанова состоялся официальный ввод в эксплуатацию глубоководного нейтринного телескопа Baikal-GVD в составе 8 кластеров (2304 оптических модулей). Эффективный объем детектора в задаче регистрации событий от нейтрино высоких энергий (свыше 100 ТэВ) достиг значения ~ 0,4 км^3.

В 2022 г. при анализе данных, полученных при работе детектора в конфигурациях 2018–2021 гг., были выделены 11 каскадных событий с энергией свыше 15 ТэВ из-под горизонта, инициированных нейтрино астрофизической природы, что на уровне достоверности 3σ подтвердило результаты первого наблюдения потока астрофизических нейтрино высоких энергий на антарктическом детекторе IceCube[2].

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 было обнаружено статистически

[2] *Allakhverdyan V. A. et al. (Baikal-GVD Collab.).* Diffuse Neutrino Flux Measurements with the Baikal-GVD Neutrino Telescope. e-Print:2211.09447 [astro-ph.HE]; Phys. Rev. D. 2023. V. 107. 042005.

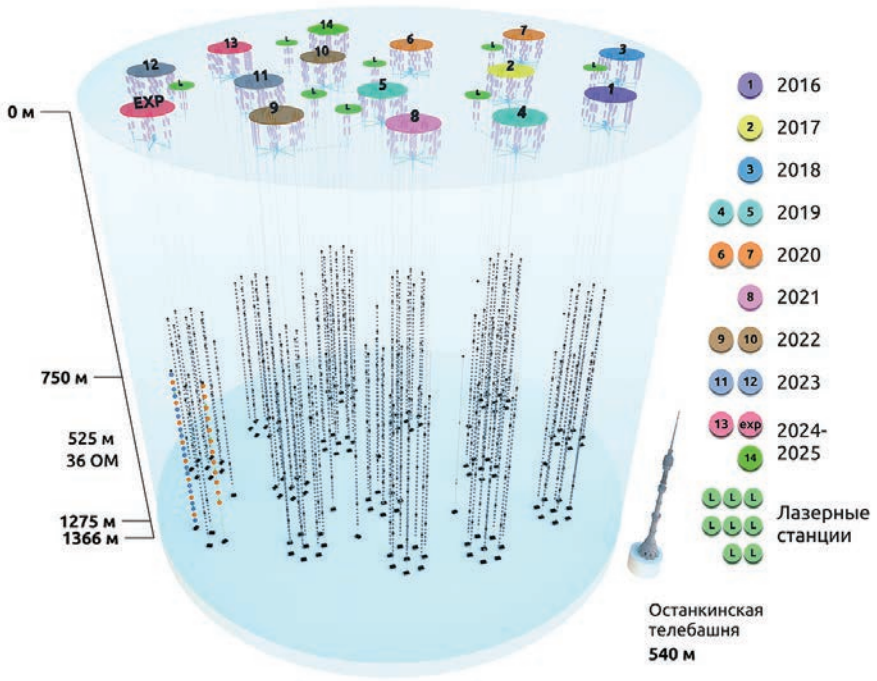
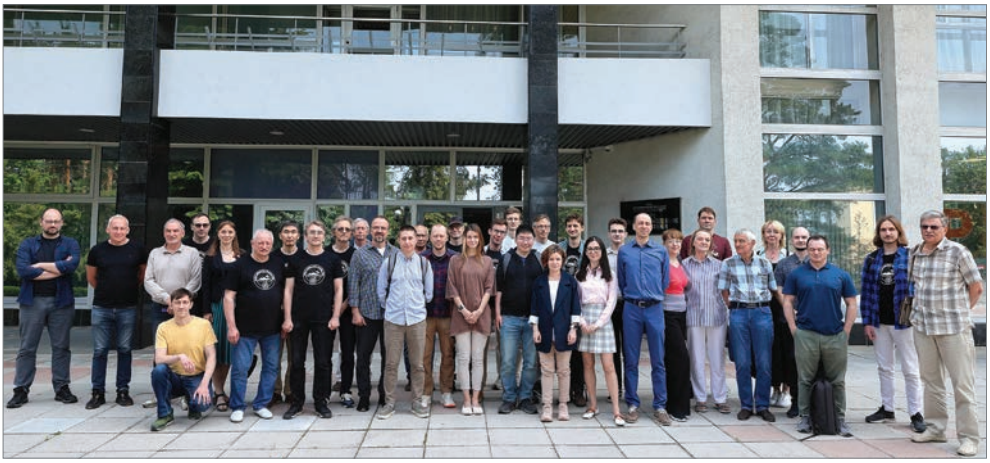


Рис. 2. Нейтринный телескоп Baikal-GVD после развертывания в 2025 г. Эффективный объем детектора составляет более 0,6 км^3 для каскадных событий от нейтрино в области энергий 100 ТэВ – 10 ПэВ

значимых эффектов, анализ указывает на ряд возможных ассоциаций как с экстрагалактическими, так и с галактическими источниками. В частности, проведен 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.

Увеличение статистики накопленных данных за 2018–2023 гг. повысило значимость наблюдения потока нейтрино астрофизической природы. Достоверность наблюдения потока теперь составила более 5σ. На основе этих данных также был сделан вывод о том, что поток галактических нейтрино с энергией выше 200 ТэВ намного выше, чем предсказывается современными моделями. Этот результат Baikal-GVD подтверждается анализом общедоступных данных нейтринного телескопа IceCube[3] с энергией $E > 200$ ТэВ. Комбинированный результат двух экспериментов указывает на актуальность развития новых представлений о происхождении и распространении космических лучей в нашей Галактике и требует более точных экспериментальных измерений.

[3] *Allakhverdyan V.A. et al. (Baikal-GVD Collab.).* Probing the Galactic Neutrino Flux at Neutrino Energies above 200 TeV with the Baikal Gigaton Volume Detector. arXiv:2411.05608 [astro-ph.HE]. 2024.



Совещание коллаборации Baikal-GVD. Дубна, июнь 2025 г.

В октябре 2013 г. был подписан меморандум о сотрудничестве между коллаборациями IceCube, Antares, KM3NeT и Baikal-GVD в создании сети нейтринных телескопов (GNN) как первого этапа по созданию Глобальной нейтринной обсерватории (GNO). Также коллаборация Baikal-GVD включена в список 11 российских проектов класса мегасайенс по программе сотрудничества с европейскими исследовательскими организациями и привлечения их к исследованиям на российских установках (KREMLIN+). Сотрудники ЛЯП ОИЯИ работают по международной научной программе оперативного обмена данными и событиями в космосе на установках, работающих на различных физических принципах.

В настоящее время проект выполняется на основе планов по его развитию до 2030 г., главным образом, Институтом ядерных исследований РАН (Москва) в рамках государственного заказа и Объединенным институтом ядерных исследований (Дубна), действующим на основании решения Комитета полномочных представителей и ПТП ОИЯИ.

В 2025 г. в режиме набора данных работают 14 кластеров телескопа Baikal-GVD, что вместе с межкластерными гирляндами и несколькими гирляндами на экспериментальном кластере на основе оптоволоконной DAQ содержит 4284 оптических модуля. Установка продолжает оставаться самым крупным нейтринным телескопом в Северном полушарии.

ЭКСПЕРИМЕНТ TAIGA

В ЛЯП с 1993 г. проводится изучение космических лучей сверхвысоких энергий путем регистрации широких атмосферных ливней. В проекте TAIGA, который реализуется на базе Тункинского астрофизического комплекса, расположенного в 50 км от озера Байкал, исследуются гамма-излучение и заряженные космические лучи в диапазоне энергий 10^{13}–10^{18} эВ методом регистрации черенковского излучения от широких атмосферных ливней.

Слева направо: директор ОИЯИ Г. В. Трубников, А. Н. Бородин, директор ИСЗФ СО РАН Г. А. Жеребцов, Д. В. Наумов с готовящимся к отправке на полигон пятым гамма-телескопом (АЧТ-5) установки TAIGA

Спектр задач широк. Это изучение высокоэнергетического края спектра ярчайших галактических и внегалактических источников гамма-излучения, поиск галактических пэватронов, а также применение нового гибридного подхода для изучения массового состава космических ливней в диапазоне 10^{14}–10^{17} эВ, изучение анизотропии космических ливней в области энергий 100–3000 ТэВ.

Планировалось использовать малые экспериментальные черенковские телескопы для исследования области энергий выше 50 ТэВ с камерами с диаметром поля зрения 15°. При работе таких телескопов процент совмест-

Юстировка 4-го черенковского телескопа при подготовке к наблюдательному сезону сбора данных

ных с установкой TAIGA-HiSCORE событий увеличится до 10 раз, и для таких событий сохранится высокая эффективность их отделения от гамма-квантов.

В 2020 г. введен в эксплуатацию прототип установки TAIGA площадью 1 км^2. Было получено распределение широких атмосферных ливней от гамма-квантов за 40 часов наблюдения гамма-источника в Крабовидной туманности. Распределение строится для событий, когда телескоп направлен как на источник (ON distribution), так и на фоновую область без источника (OFF distribution). По избытку событий при малых углах определялась значимость сигнала от источника. Полученное превышение событий для ON distribution указало на обнаружение гамма-лучей[4, 5] из Крабовидной туманности со значимостью 6,3σ.

В конце ноября 2023 г. сотрудниками НИИПФ Иркутского государственного университета, а также МГУ и ОИЯИ был установлен линзовый телескоп с матрицей кремниевых фотоумножителей.

В 2024 г. проведены подготовительные работы для модернизации и расширения детекторов на площадь около 100 км^2. В проекте планируется появление телескопов с диаметром составного зеркала около 10 м, что потребует изготовления композитных облегченных зеркал. Их производство

[4] *Budnev N. et al. (TAIGA Collab.)*. TAIGA — an Advanced Hybrid Detector Complex for Astroparticle Physics and High Energy Gamma-Ray Astronomy in the Tunka Valley // JINST. 2020. V. 15, No. 9. C09031.

[5] *Kuzmichev L. et al. (TAIGA Collab.)*. Cherenkov EAS Arrays in the Tunka Astrophysical Center: From Tunka-133 to the TAIGA Gamma and Cosmic Ray Hybrid Detector // Nucl. Instr. Meth. A. 2020. V. 952. P. 161830.

позволит перейти от традиционного процесса изготовления монолитных стеклянных зеркал к более быстрому и оптимальному производству большего количества зеркал для черенковских телескопов.

В секторе №4 астрофизических исследований научно-экспериментального отдела физики элементарных частиц ЛЯП совместно с Центром цифрового производства государственного университета «Дубна» была предложена технология и изготовлен прототип облегченного композитного зеркала для черенковских телескопов проекта TAIGA. Были проведены измерения параметров зеркала, доработка технологии и подготовка предложения коллаборации TAIGA для организации производства партии зеркал.

Всего в ОИЯИ с 2015 г. изготовлены пять черенковских телескопов с составным зеркалом и широкоугольный линзовый черенковский телескоп. Все телескопы отправлены в Бурятию и установлены на полигоне у села Торы. Три зеркальных черенковских телескопа (АЧТ-1, АЧТ-2 и АЧТ-3) и линзовый широкоугольный телескоп полностью готовы и собирают данные, два телескопа (АЧТ-4 и АЧТ-5) в процессе подготовки к работе и будут запущены в 2025–2026 гг.

ЭКСПЕРИМЕНТЫ НА КАЛИНИНСКОЙ АЭС

ЭКСПЕРИМЕНТ νGeN

Экспериментальная установка νGeN была создана учеными ЛЯП ОИЯИ для исследования фундаментальных свойств нейтрино. Поиск когерентного упругого рассеяния нейтрино, магнитного момента нейтрино и других редких процессов — проявлений «новой» физики за пределами Стандартной модели — осуществляется на Калининской АЭС в Удомле.

Детектор νGeN в процессе сборки на Калининской АЭС

Спектрометр νGeN установлен в непосредственной близости от активной зоны реактора (~ 11 м), что позволяет оперировать гигантским потоком нейтрино: более $4{,}4 \cdot 10^{13}$ см$^{-2} \cdot$ с$^{-1}$. При этом окружающие материалы реактора, сопоставимые с ~ 50 м водного эквивалента, обеспечивают хорошую защиту от фонового космического излучения.

Сигналы регистрируются специально разработанным низкопороговым германиевым детектором. Для защиты от внешнего радиоактивного излуче-

Коллаборация νGeN. Дубна, 2021 г.

ния вокруг него была создана пассивная и активная системы защиты. Анализ данных пока не выявил признаков ожидаемого сигнала от когерентного рассеяния нейтрино, но позволил поставить новое ограничение на число событий от упругого когерентного рассеяния нейтрино в зависимости от величины квенчинга[6].

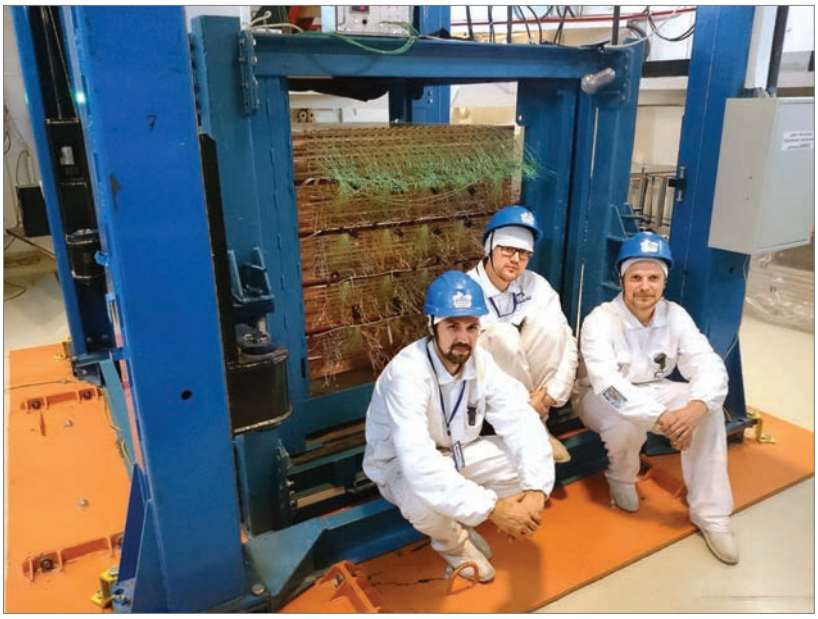
Чувствительность установки νGeN к когерентному упругому рассеянию реакторных антинейтрино — одна из лучших в мире. Достигнутый уровень фона в эксперименте является наименьшим среди подобных экспериментов с германиевыми детекторами, а поток нейтрино одним из лучших. Всё это позволяет достигать высокой чувствительности к поиску редких процессов, в частности, измерению магнитного момента нейтрино на реакторах.

ЭКСПЕРИМЕНТ DANSS

С 2009 г. Лаборатория ядерных проблем ОИЯИ реализует проект DANSS (Detector of AntiNeutrino based on Solid Scintillator) — компактного нейтринного детектора нового поколения для прецизионного измерения потока реакторных антинейтрино и поиска «новой» физики, в том числе проверки гипотезы существования стерильных нейтрино.

История проекта DANSS ведется с начала 2000-х гг., когда группа ЛЯП ОИЯИ совместно с коллегами из ИТЭФ проводила на Калининской атомной станции эксперимент Gemma, посвященный поиску магнитного момента нейтрино. Именно тогда возникла необходимость в определении изменения потока антинейтрино от энергетического ядерного реактора — этот

[6] *Belov V. et al. (νGeN Collab.)*. New Constraints on Coherent Elastic Neutrino–Nucleus Scattering by the νGeN Experiment // Chin. Phys. C. 2025. V. 49. 053004.



Сборка детектора DANSS. Слева направо: Е. А. Шевчик, И. В. Житников, А. С. Кузнецов

параметр критически важен для интерпретации результатов и снижения систематических ошибок. Инициаторами создания нового типа компактного детектора стали В. Б. Бруданин, В. Г. Егоров (ОИЯИ) и А. В. Старостин (ИТЭФ), которые предложили идею использования технологии сегментированных пластмассовых сцинтилляторов с возможностью установки непосредственно под активной зоной реактора.

Прототип DANSS (DANSSino), представлявший 1/50 будущего детектора, был собран в 2011 г. в Дубне, а первые измерения на Калининской атомной электростанции начались уже в 2012 г., что стало возможным благодаря многолетней подготовке, накопленному опыту в области спектрометрии и низкофоновых измерений, а также тесному сотрудничеству с Калининской АЭС и концерном «Росэнергоатом». Несмотря на малый объем, уже прототип детектора продемонстрировал чувствительность к изменению мощности реактора, что дало «зеленый свет» полномасштабной версии детектора.

DANSS представляет собой модульный детектор объемом около 1 м^3, состоящий из более чем 2500 сцинтилляционных счетчиков с покрытием из гадолиния для эффективного захвата нейтронов[7]. Съем оптических сигналов с каждого из детекторов длиной 1 м осуществляется с помощью спектросмещающих оптических волокон, которые затем выводятся на стандартные и кремниевые фотоумножители. Высокая степень сегментации и многоканальная система считывания обеспечивают реконструкцию топологии

[7] *Alekseev I. et al. (DANSS Collab.)* // JINST 11. 2016. No. 11. P11011; arXiv:1606.02896 [physics.ins-det].

Коллаборация DANSS. 2012 г.

событий и эффективное разделение сигналов от обратного бета-распада и фоновых взаимодействий, что делает установку одной из лучших в мире в своем классе по показателям селекции событий и соотношению сигнал/фон, достигающему 1/50. Важной особенностью DANSS является впервые примененная мобильная система, позволяющая детектору перемещаться на платформе в диапазоне расстояний от ~ 10,9 до ~ 12,9 м от активной зоны реактора без остановки его работы. Это дает возможность измерять поток антинейтрино на разных расстояниях и минимизировать систематические погрешности, часто являющиеся ключевым препятствием при поиске признаков осцилляции антинейтрино в стерильные состояния.

С момента пуска установка DANSS регистрирует самый большой поток антинейтрино среди аналогичных экспериментов: более 5000 событий обратного бета-распада в сутки при рекордно низком уровне фона. Накоплен огромный массив экспериментальных данных, полученных за 6 реакторных кампаний. Результаты эксперимента[8] оказались ключевыми для анализа так называемой «реакторной аномалии» и стали одним из значимых вкладов в поиск стерильных нейтрино с массой порядка 1 эВ. К безусловным практическим результатам осуществления проекта можно отнести измерения мощности реактора с точностью 1,5 %, также впервые достигнутой в экспериментах подобного рода.

В настоящее время группа ЛЯП ОИЯИ активно работает над масштабной модернизацией установки — проектом DANSS-2, который направлен на дальнейшее повышение точности измерений и снижение влияния фоновых эффектов. Результаты DANSS опубликованы в ведущих научных журналах, на их основе защищено 2 кандидатских диссертации, в скором времени планируется еще одна защита. В команде проекта активно рабо-

[8] *Alekseev I. G. et al.* The DANSS Experiment: Recent Results and Perspective // Bull. Lebedev Phys. Inst. 2024. V. 51. P. 8–15.

В. Г. Егоров у собранного детектора DANSS

тают В. В. Белов, И. В. Житников, С. В. Казарцев, А. Д. Быстряков, А. С. Кузнецов, Д. В. Медведев, Е. А. Шевчик, М. В. Ширченко и другие сотрудники лаборатории. Безусловно, эксперимент DANSS не смог бы состояться без помощи сотрудников из ИТЭФ и ФИАН: М. В. Данилова, И. Г. Алексеева, А. С. Кобякина, И. В. Мачихильян, Д. Н. Свириды, Н. А. Скробовой и многих других коллег, внесших значимый вклад в развитие проекта.

Эксперимент DANSS входит в число наиболее успешных нейтринных проектов, осуществляемых в ОИЯИ, и вносит весомый вклад в фундаментальные исследования природы нейтрино и поиск «новой» физики за пределами Стандартной модели.

Коллаборация DANSS. 2025 г.

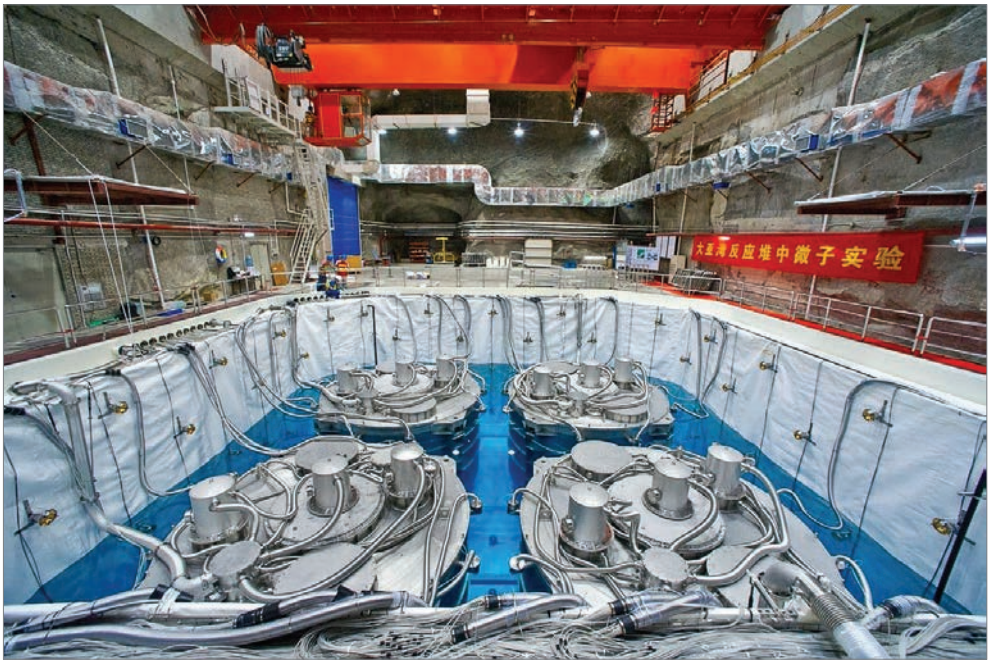
ЭКСПЕРИМЕНТЫ В ДРУГИХ НАУЧНЫХ ЦЕНТРАХ

ЭКСПЕРИМЕНТ DAYA BAY

Основная цель эксперимента Daya Bay — определение одного из последних неизвестных фундаментальных параметров Стандартной модели — лептонного угла смешивания θ_{13}. Метод измерения основан на сравнении потоков электронных антинейтрино на расстоянии порядка 2 км и в непосредственной близости от их источников — ядерных реакторов атомных электростанций (АЭС). Для проведения эксперимента использовались восемь идентичных детекторов антинейтрино на расстоянии от 400 м до 2 км от АЭС Daya Bay, Ling Ao и Ling Ao II на юго-востоке Китая.

Угол θ_{13} определяет величину вклада электронного аромата в третье массовое состояние нейтрино. За десять лет работы в эксперименте накоплено более 5 млн взаимодействий антинейтрино, что позволило с рекордной точностью измерить их поток и энергетический спектр на разных расстояниях от АЭС. Идентичный дизайн детекторов антинейтрино и регулярные калибровочные кампании значительно уменьшили систематические неопределенности при сравнении спектров на разных расстояниях.

Планирование эксперимента Daya Bay началось в 2003 г., а первое собрание коллаборации прошло в 2005 г. Подготовка экспериментальной площадки и строительные работы начались в 2009 г. Набор данных ведется



«Дальняя» экспериментальная площадка Daya Bay. Четыре антинейтринных детектора в бассейне во время заполнения водой. 2011 г.

с декабря 2011 г., когда лишь часть детекторов была введена в эксплуатацию. Уже в феврале 2012 г. была набрана достаточная статистика, позволившая совершить важнейшее открытие: в эксперименте Daya Bay достоверно была установлена ненулевая величина угла θ_{13} — уровень значимости составил пять стандартных отклонений[9]. Спустя десять лет параметр θ_{13}, изначально наименее изученный, стал известен с наилучшей точностью среди лептонных углов смешивания: погрешность $\sin^2 2\theta_{13}$ составила всего 2,6 %. Кроме того, с наилучшей среди реакторных нейтринных экспериментов точностью 2,4 % была измерена[10] другая фундаментальная величина — абсолютное значение разности квадратов масс нейтрино $|\Delta m^2_{32}|$.

Набор данных продолжался до 2022 г. Полный набор данных, а также пакет программ для статистического анализа опубликованы в 2025 г.

Помимо прецизионного измерения параметров осцилляций коллаборация Daya Bay также внесла значительный вклад в физику нейтрино: измерение потока реакторных электронных антинейтрино с наименьшей погрешностью, определение зависимости энергетического спектра реакторных антинейтрино от времени, измерение энергетического спектра антинейтрино от деления изотопов ^{235}U и ^{239}Pu, первое в мире экспериментальное получение ограничений на размер волновой функции нейтрино, получение наилучших ограничений[11] на параметры легкого стерильного нейтрино с массами до 0,5 эВ.

Группа ОИЯИ участвовала во всех этапах эксперимента, начиная с его подготовки. В частности, ОИЯИ отвечал за производство полутора тонн флюоресцирующей добавки (PPO) к жидкому сцинтиллятору, разработку проекта системы мюонного вето на основе пластикового сцинтиллятора, отбор событий взаимодействия антинейтрино, анализ экспериментальных данных, включая основной осцилляционный анализ эксперимента.

ЭКСПЕРИМЕНТ JUNO

JUNO (Jiangmen Underground Neutrino Observatory) — один из крупнейших в мире нейтринных экспериментов, который проводится на юге Китая. Основная задача проекта — развитие программы изучения лептонного сектора Стандартной модели, начатой в Daya Bay, с выходом на беспрецедентную точность, сравнимую с той, что достигнута в кварковом секторе Стандартной модели. Ключевые цели включают: определение упорядоченности масс нейтрино, прецизионное измерение параметров Δm^2_{31}, Δm^2_{21} и $\sin^2 2\theta_{12}$ с относительной погрешностью менее 0,5 %.

JUNO — единственный в мире эксперимент, способный достичь такого уровня точности. Результаты JUNO и Daya Bay станут основой для будущих

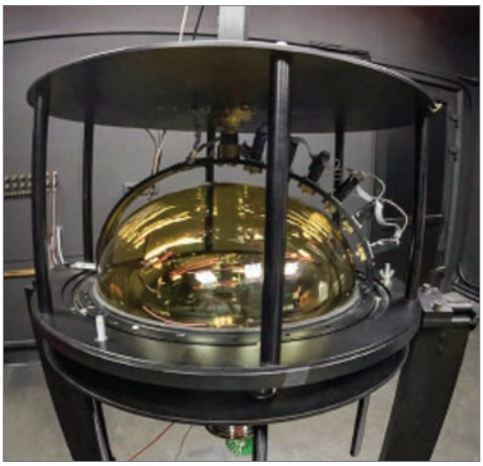
[9] *Gonchar M. (Daya Bay Collab.)*. Presice $\sin^2 2\theta_{13}$ Measurement by the Daya Bay Reactor Neutrino Experiment // DAE Symp. on Nuclear Physics, Dec. 3–7, 2012, New Delhi; Daya Bay document 8103.

[10] *An F. P. et al. (Daya Bay Collab.)*. Precision Measurement of Reactor Antineutrino Oscillation at Kilometer-Scale Baselines by Daya Bay. arXiv:2211.14988 [hep-ex]; Phys. Rev. Lett. 2023. V. 130. P. 161802.

[11] *An F. P. et al.* Evolution of the Reactor Antineutrino Flux and Spectrum at Daya Bay // Phys. Rev. Lett. 2017. V. 118. P. 251801.

исследований CP-нарушения в лептонном секторе.

Центральный детектор эксперимента представляет собой сферу радиусом 17 м, заполненную 20 тыс. тонн жидкого сцинтиллятора. Излучаемый свет регистрируется более чем 18 тыс. фотоумножителей, расположенных на поверхности сферы. Источником антинейтрино служат восемь ядерных реакторов на расстоянии порядка 53 км от детектора.



Сканирующая станция для крупногабаритных фотоумножителей центрального детектора JUNO

Для достижения чувствительности к иерархии масс требуется энергетическая нелинейность $<1\,\%$ и разрешение по выделенной энергии $\sigma = 3\,\%$ при 1 МэВ.

Ближний детектор TAO (Taishan Antineutrino Observatory) обеспечивает эталонный спектр с разрешением $\sigma = 2\,\%$ и статистической погрешностью $\sim 1\,\%$.

Первые предложения по проведению эксперимента поступили в 2008 г., а в 2014 г. состоялось первое собрание коллаборации. Строительство основного детектора происходило в 2022–2024 гг., в 2025 г. начался набор физических данных.

Сборка центрального детектора эксперимента JUNO

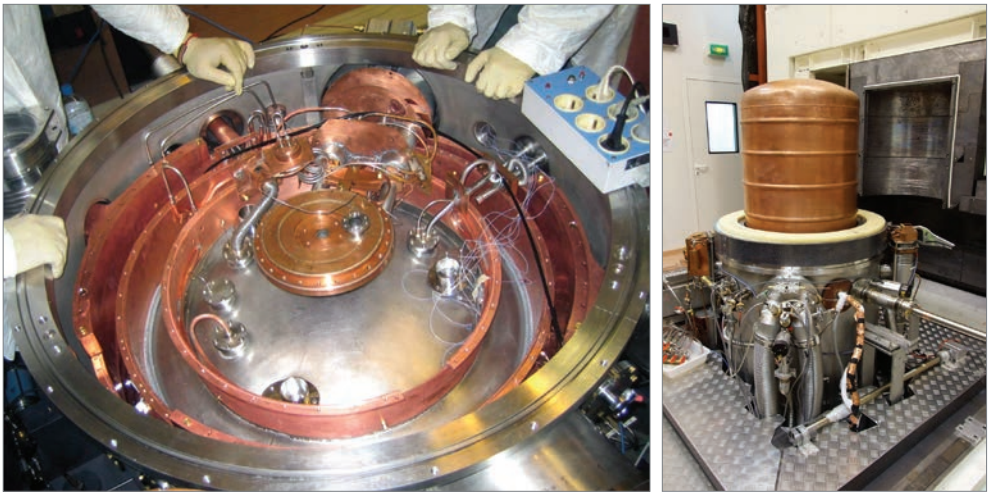
Программа эксперимента JUNO выходит далеко за рамки измерения параметров реакторных нейтрино, она включает в себя измерение параметров солнечных и геонейтрино, атмосферных нейтрино, а также поиск нейтрино от сверхновых (вспышки и диффузный фон), поиск стерильных нейтрино, распада протона, невидимых каналов распада нейтрона и частиц темной материи.

После завершения основной физической программы планируется модификация установки для проведения эксперимента по безнейтринному двойному бета-распаду.

ОИЯИ принимает участие во всех ключевых направлениях работы в эксперименте. Сотрудники ЛЯП участвуют в разработке и производстве модулей питания для ФЭУ детектора JUNO и кремниевых ФЭУ детектора TAO, создании сканирующих станций для калибровки ФЭУ, разработке механики мюонной вето-системы, в сборке установок JUNO и TAO, а также в разработке системы сбора данных, алгоритмов реконструкции, анализе энергетического отклика и отбора событий, проведении физического анализа реакторных и атмосферных нейтрино.

ЭКСПЕРИМЕНТЫ EDELWEISS, RICOCHET, CUPID-Mo

С 2005 г. Лаборатория ядерных проблем ОИЯИ начала участвовать в экспериментах по поиску и исследованию редких событий с использованием детекторов-болометров, работающих при милликельвиновых температурах. Основное достоинство использования таких детекторов — возможность достичь околонулевого энергетического порога с применением мощных методов отделения фоновых событий. Это направление исследо-



Криостат EDELWEISS. Слева — во время сборки. Справа — в собранном виде, на переднем плане — низкофоновый детектор нейтронного фона, разработанный в ЛЯП ОИЯИ

Эксперимент EDELWEISS. Д. В. Пономарев, С. В. Розов и Е. А. Якушев устанавливают детекторы. 2016 г.

ваний в ЛЯП ОИЯИ началось с участия в эксперименте EDELWEISS, хотя сама техника болометров-детекторов в области милликельвиновых температур (мК-болометры) начала разрабатываться в лаборатории Б. С. Негановым, В. Н. Трофимовым и др. намного раньше. Основной целью эксперимента EDELWEISS являлся прямой поиск частиц темной материи по их рассеянию на ядрах германия. Инициатива применить накопленный в ЛЯП ОИЯИ богатый спектрометрический опыт для прямого поиска темной материи возникла у Ц. Вылова и В. Б. Бруданина. Отвечать за проведение данных исследований было поручено Е. А. Якушеву.

В то время (начало XXI в.) сотрудники ЛЯП ОИЯИ уже принимали активное участие в низкофоновых экспериментах (NEMO-3, TGV), проводившихся в подземной лаборатории LSM (Laboratoire Souterrain de Modane) во французских Альпах, в туннеле, соединяющем Францию и Италию. Учитывая все обстоятельства, а особенно перспективность метода исследований, Е. А. Якушев со сформированной для данных исследований группой присоединился к коллегам из Франции и Германии для создания в LSM новой уникальной установки EDELWEISS.

Участие группы ЛЯП ОИЯИ в этом эксперименте привело к развитию новейших спектрометрических методов и их применению для изучения одной из самых ключевых проблем современной физики — установления природы темной материи. Имея большой опыт традиционной спектроскопии, низкофоновых измерений, работы с детекторами, группа ОИЯИ отвечала за такие важные вещи в эксперименте, как контроль нейтронного фона, устранение радона и его контроль, калибровка радиоактивными источниками, низкофоновые измерения материалов, создание новых низкопороговых детекторов. Группа участвовала во всех этапах сборки и эксплуатации установки, ее многократной модернизации, анализе данных,

Эксперимент EDELWEISS в подземной лаборатории LSM. Фотография сделана после разборки установки NEMO-3 (на переднем плане один из ее модулей) и до начала сборки SuperNEMO. Справа вверху — чистая комната, где находится криостат, окруженный системой защиты. Слева вверху — комната управления. Слева внизу — техническая часть криостата

моделировании. В результате двух десятилетий проведения исследований и трех фаз эксперимента была получена совокупность результатов, существенно ограничивших параметры гипотетических частиц темной материи. Сюда включены традиционная область поиска слабовзаимодействующих частиц (weakly interacting massive particles, WIMPs), область малых масс (менее 10 ГэВ/c^2) вплоть до поиска аксионов и аксионоподобных частиц. Общепризнано, что результаты исследований EDELWEISS в течение последних десятилетий являлись важными для развития техники прямого поиска частиц темной материи и были значимыми для мировой науки[12].

Эксперимент EDELWEISS был завершен в 2023 г. На последнем этапе были созданы детекторы, которые обладают уникальными свойствами регистрации низкоэнергетических событий с порогом в единицы электронвольт. Поэтому логическим продолжением этого эксперимента стал эксперимент Ricochet, направленный на прецизионное исследование когерентного рассеяния реакторных нейтрино с целью поиска «новой» физики[13]. Ожидается, что при таком рассеянии влияние «новой» физики за рамками Стандартной модели будет приводить к спектральным искажени-

[12] *Armengaud E. et al.* Search for Sub-GeV Dark Matter via the Migdal Effect with an EDELWEISS Germanium Detector with NbSi Transition-Edge Sensors // Phys. Rev. D. 2022. V. 106. 062004.

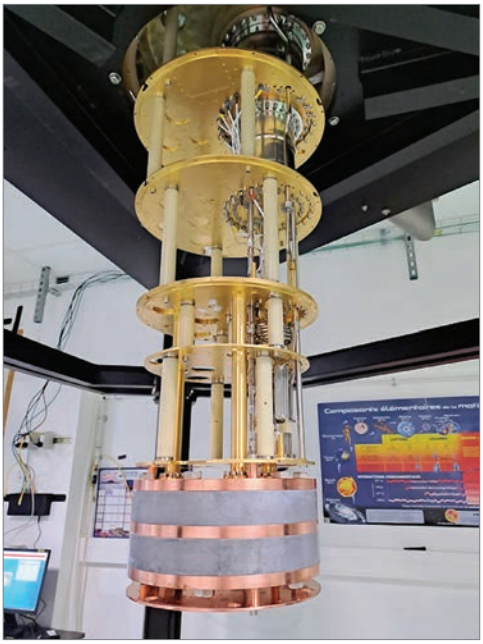
[13] *Augier C. et al. (Ricochet Collab.).* Fast Neutron Background Characterization of the Future Ricochet Experiment at the ILL Research Nuclear Reactor // Eur. Phys. J. 2023. V. 83. 20; https://arxiv.org/pdf/2208.01760.pdf.

Рабочее совещание коллаборации Ricochet. Гренобль, 2024 г.

ям в области энергий ядер отдачи ниже 100 эВ. В настоящее время только детекторы-болометры, такие как созданные в рамках EDELWEISS, имеют возможность прецизионно исследовать данную область энергий. Установка Ricochet, состоящая из криостата растворения, германиевых болометров, пассивной и активной защиты, была собрана на исследовательском реакторе Института Лауэ–Ланжевена (ILL, Гренобль, Франция), набор данных начался в 2025 г. Вклад ОИЯИ в эту установку является определяющим: от криогенной системы с низкофоновым криостатом и активной мюонной защиты до вспомогательных детекторов и новых методов по оценке фоновых условий. Ricochet направлен на исследования фундаментальных свойств нейтрино. Предполагается, что полученные результаты будут иметь большое значение для современной физики частиц, ядерной физики и астрофизики.

С 2019 г. до конца эксплуатации EDELWEISS измерения с болометрами при использовании инфраструктуры EDELWEISS (криостата, электроники, низкофоновых материалов) были расширены на эксперимент CUPID-Mo. В этом эксперименте выполнялся поиск безнейтринного двойного бета-распада изотопа ^{100}Mo, для чего использовались 20 сцинтилляционных кристаллов Li_2MoO_4, при одновременном измерении фононного сигнала. Благодаря эффективному разделению событий от альфа-, бета- и гамма-частиц в эксперименте был достигнут нулевой уровень фона для области поиска безнейтринного бета-распада. На основе данных, накопленных в криостате EDELWEISS, в эксперименте CUPID-Mo были выполнены прецизионные измерения двойного бета-распада ^{100}Mo и установлен новый лучший предел на его безнейтринный режим распада.

Пять кандидатских и одна докторская диссертации были защищены на основе исследований по данной тематике. На разных этапах от ОИЯИ в ра-



Криостат установки Ricochet: слева — во время тестирования в Лионе; справа — внутри защиты в ILL

ботах участвовали: В. Б. Бруданин, Ю. Б. Гуров, Д. В. Караиванов, С. В. Казарцев, А. В. Лубашевский, Н. А. Мирзаев, Д. В. Пономарев, А. В. Рахимов, И. Е. Розова, С. В. Розов, А. В. Саламатин, С. С. Семих, Н. Темербулатова, Д. В. Философов, Т. Хусаинов, Ж. Х. Хушвактов, К. В. Шахов, Е. А. Шевчик, Е. А. Якушев и др.

ЭКСПЕРИМЕНТЫ NEMO И SuperNEMO

Нейтринная обсерватория Этторе Майораны, где с 1989 г. начали осуществлять эксперимент NEMO, расположена в подземной лаборатории (LSM) в автодорожном туннеле Фрежюс во Франции. В эксперименте было использовано 3 детектора: NEMO-1, NEMO-2 и NEMO-3. Прототипы детекторов NEMO-1 и NEMO-2 использовались до 1997 г. Экспериментальная установка для проекта NEMO-3 разрабатывалась и строилась с 1994 г., сбор данных происходил с 2003 по 2011 г.

Детекторы NEMO-2 и NEMO-3 позволили измерить двойной нейтринный распад и установить пределы для безнейтринного двойного бета-распада для ряда элементов, таких как ^{100}Mo и ^{82}Se. Ученые ЛЯП ОИЯИ участвовали в экспериментах первого поколения[14] NEMO-2 и NEMO-3.

[14] *Gomez H. (on behalf of NEMO-3 and SuperNEMO Collab.).* Latest Results of NEMO-3 Experiment and Present Status of SuperNEMO // Nucl. Part. Phys. Proc. 2016. V. 273–275. P. 1765–1770.

Сборка калориметра NEMO-3. Слева направо: Л. Маргарон, Е. А. Якушев, О. И. Кочетов

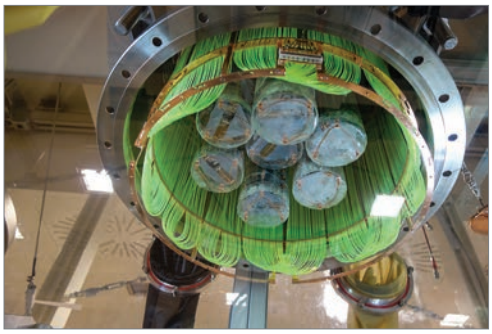
Проект NEMO продолжается, сейчас идет работа над созданием усовершенствованного детектора SuperNEMO в LSM, создается детектор нового поколения. Группа ЛЯП ОИЯИ играет важную роль в этом проекте, в частности, участвует в создании пассивной защиты, системы вето, калориметра, в разработке программного обеспечения и обработке данных, разрабатывает методы радиохимической очистки.

ЭКСПЕРИМЕНТЫ GERDA, MAJORANA, LEGEND

В начале 2000-х гг. при участии Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ сформировались международные коллаборации GERDA и Majorana, цель которых заключалась в поиске безнейтринного двойного бета-распада ($0\nu\beta\beta$) изотопа ^{76}Ge. Обнаружение данного процесса, нарушающего сохранение лептонного числа, стало бы прямым указанием на майорановскую природу нейтрино (тождественность нейтрино и антинейтрино) и однозначно свидетельствовало бы о существовании физики за пределами Стандартной модели.

Обе экспериментальные установки были размещены в подземных лабораториях, обеспечивающих минимизацию космического фона: установка Majorana Demonstrator — в Sanford Underground Research Facility (SURF, США), установка GERDA — в Laboratori Nazionali del Gran Sasso (LNGS, Италия). В обоих экспериментах использовались германиевые детекторы, обогащенные изотопом ^{76}Ge, с суммарной активной массой в десятки килограмм. Средняя масса одного детектора составляла менее 1 кг.

В проекте Majorana реализован классический подход — германиевые детекторы, смонтированные в криостаты из ультрачистой меди. В GERDA же



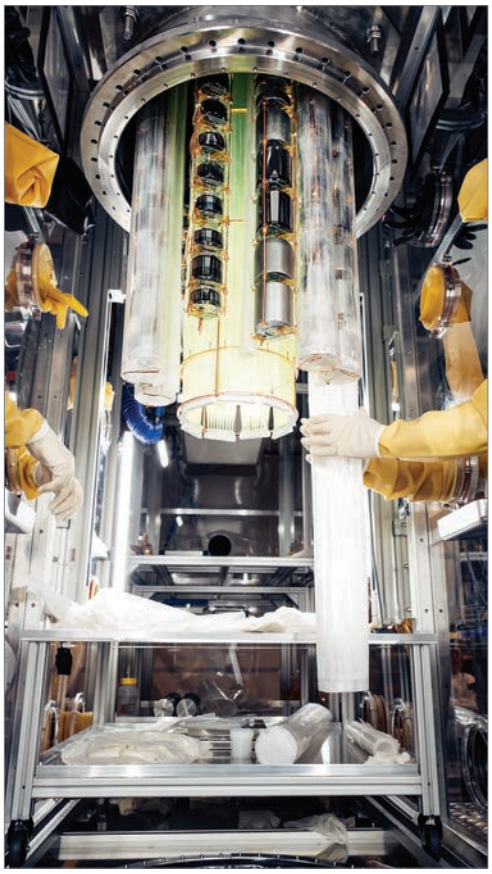
Эксперимент GERDA. Слева — финальный этап сборки массива детекторов осуществляет руководитель проекта GERDA (LEGEND) в ОИЯИ и технический координатор эксперимента К. Н. Гусев; справа — собранный массив детекторов GERDA с надетыми нейлоновыми кожухами и смонтированной системой аргонового вето перед погружением в жидкий аргон

впервые успешно применена инновационная методика — открытые детекторы, погруженные непосредственно в жидкий аргон. Такая конфигурация одновременно обеспечивала охлаждение до рабочей температуры и служила эффективной пассивной и активной защитой от внешнего излучения благодаря сцинтилляционным свойствам аргона. Благодаря этому, а также отбору полезных событий по форме импульса в эксперименте GERDA удалось достичь рекордно низкого уровня фона и установить лучший в мире предел на период полураспада: $T^{0\nu}_{1/2} > 1{,}8 \cdot 10^{26}$ лет (90 % CL) при беспрецедентной чувствительности в $1{,}8 \cdot 10^{26}$ лет[15]. Несомненным успехом Majorana является наилучшее энергетическое разрешение среди всех экспериментов по поиску $0\nu\beta\beta$-распада. В настоящее время набор данных в обоих проектах завершен.

Объединение усилий коллабораций GERDA и Majorana с привлечением новых участников дало начало следующему этапу — крупномасштабному эксперименту LEGEND, который реализуется в лаборатории LNGS. В рамках финальной стадии проекта планируется доведение массы изотопа ^{76}Ge до 1 т. Как и в GERDA, в LEGEND используется конфигурация с открытыми германиевыми детекторами, погруженными в жидкий аргон с системой регистрации сцинтилляций. Существенным усовершенствованием стало широкое применение детекторов нового типа — инвертированных коаксиальных (inverted coaxial), обладающих массой до 4 кг, при сохранении способности к высокоэффективному подавлению фона на основе анализа формы сигнала.

Сотрудники ЛЯП ОИЯИ, обладая богатым опытом в области низкофоновых исследований двойного бета-распада (эксперименты NEMO-3, TGV), принимали активное участие во всех этапах реализации германиевых проектов. Физики Института занимались как анализом эксперимен-

[15] *Agostini M. et al. (GERDA Collab.).* Final Results of GERDA on the Search for Neutrinoless Double-β Decay // Phys. Rev. Lett. 2020. V. 125. P. 252502.



Эксперимент LEGEND. Финальная сборка установки — процесс надевания нейлоновых кожухов на детекторные гирлянды

тальных данных, так и работами с открытыми германиевыми детекторами: от демонстрации их работоспособности в криогенной среде до финальной установки и демонтажа в рамках GERDA. На раннем этапе эксперимента специалистами ЛЯП была разработана и внедрена система пластикового мюонного вето. Существенный вклад внесен в разработку и тестирование принципов регистрации сцинтилляций аргона и создание первой активной системы аргонового вето, успешно внедренной в 2015 г. В 2018 г. в сотрудничестве с Мюнхенским университетом была реализована усовершенствованная версия этой системы с повышенной эффективностью светосбора. Отдельное внимание уделялось подавлению фона от изотопа ^{42}Ar. Сотрудниками ЛЯП разработаны специализированные нейлоновые кожухи со спектросмещающим покрытием, которые позволили существенно снизить вклад этой компоненты в общий фон.

Коллектив авторов: К. Н. Гусев, И. В. Житников, Д. Р. Зинатулина, А. А. Клименко, А. В. Лубашевский, Н. С. Румянцева, А. А. Смольников, М. В. Фомина, Е. А. Шевчик, М. В. Ширченко — был удостоен первой пре-

Лауреаты первой премии ОИЯИ за 2020 г.

мии ОИЯИ за 2020 г. в номинации «Научно-исследовательские экспериментальные работы» за работу «Бесфоновый поиск безнейтринного двойного бета-распада ^{76}Ge в эксперименте GERDA».

В 2022 г. в рамках эксперимента LEGEND при определяющем участии сотрудников ЛЯП была проведена сборка массива из 101 германиевого детектора и новой системы аргонового вето, разработанной и изготовленной объединенной командой ЛЯП и Мюнхенского университета. Общая масса обогащенного изотопа ^{76}Ge впервые превысила 100 кг. Ученые и инженеры ЛЯП продолжают активное участие в реализации проекта LEGEND, который в своей финальной фазе обладает наивысшим потенциалом для обнаружения безнейтринного двойного бета-распада среди всех существующих и планируемых экспериментов.

Результаты GERDA, Majorana и LEGEND были представлены на многочисленных конференциях и совещаниях, опубликовано большое количество работ в реферируемых журналах, в том числе Nature и Science. По материалам экспериментов готовятся к защите несколько кандидатских и докторских диссертаций. На разных этапах от ОИЯИ в проектах участвовали: В. Б. Бруданин, С. И. Васильев, К. Н. Гусев, В. Г. Егоров, И. В. Житников, Д. Р. Зинатулина, А. А. Клименко, А. В. Лубашевский, Н. С. Румянцева, А. А. Смольников, М. В. Фомина, Е. А. Шевчик, М. В. Ширченко, Е. А. Якушев и др.

ЭКСПЕРИМЕНТ MONUMENT

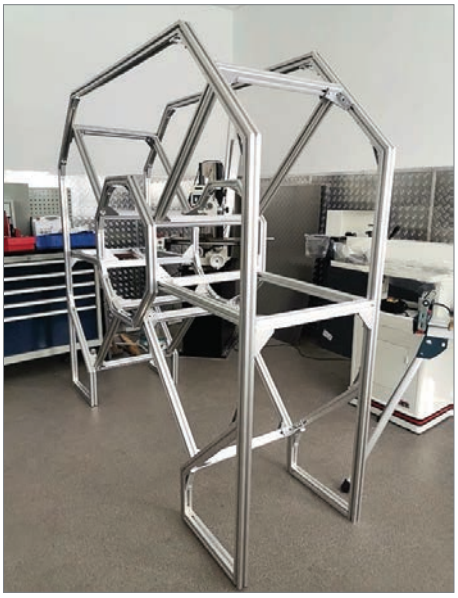
Цель проекта MONUMENT — проведение экспериментальных измерений мюонного захвата на нескольких дочерних (по отношению к кандидатам на безнейтринный 2β-распад) ядрах. Эти измерения важны для проверки точности теоретических расчетов ядерных матричных элементов.

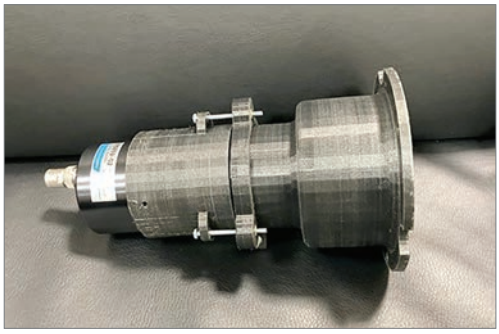
Группа ученых из ЛЯП ОИЯИ совместно с европейскими коллегами подала заявку на измерения обычного мюонного захвата на нескольких изотопах на мезонной фабрике Института Пауля Шеррера (PSI) в Швейцарии. Предложение было рассмотрено и одобрено программным комитетом PSI, пучковое время для исследований предоставлено с 2021 по 2023 г.

Проект продолжает и расширяет предшествующую программу измерений мюонного захвата, предложенную и осуществлявшуюся под руководством сотрудников ОИЯИ в 1998–2006 гг. Группа из ЛЯП ОИЯИ, в свою очередь, имеет богатый опыт в прецизионной ядерной спектроскопии и реализации экспериментов не только по изучению редких процессов, но и связанных с изучением мюонного захвата.

Сегодня коллаборация MONUMENT состоит из 27 участников из 11 институтов разных стран. ОИЯИ играет в эксперименте ведущую роль. Экспериментальная инфраструктура на ускорительном комплексе обеспечивается нашими партнерами. Участниками коллаборации со стороны ОИЯИ

Слева направо в нижнем ряду: С. В. Казарцев, В. В. Белов, Е. А. Шевчик, в верхнем ряду: М. В. Фомина, И. В. Житников, М. В. Ширченко, Н. С. Румянцева, К. Н. Гусев, Д. Р. Зинатулина





Основание для крепления детекторов (слева) и мюонный триггер с мишенью (справа), разработанные и созданные участниками проекта MONUMENT на базе ОИЯИ

являются замечательные инженеры и специалисты, мастера своего дела, а именно: В. В. Белов, К. Н. Гусев, И. В. Житников, Д. Р. Зинатулина (руководитель проекта), С. В. Казарцев, Н. С. Румянцева, Е. А. Шевчик, М. В. Ширченко, Ю. А. Шитов, М. В. Фомина.

С 2021 по 2023 г. были проведены измерения обычного мюонного захвата с изотопически обогащенными мишенями ^{136}Ba, ^{76}Se, ^{100}Mo, ^{48}Ti на мезонной фабрике PSI в Швейцарии. На базе ОИЯИ были сконструированы и созданы основание для крепления детекторов и система мюонного триггера с мишенью. В настоящее время продолжается анализ данных, полученных в 2021–2023 гг. с твердыми мишенями ^{136}Ba, ^{76}Se, ^{48}Ti. Следующий этап измерений планируется на осень 2026 г. с изотопически обогащенными мишенями ^{12}C и ^{13}C.

ЭКСПЕРИМЕНТЫ NOvA И T2K

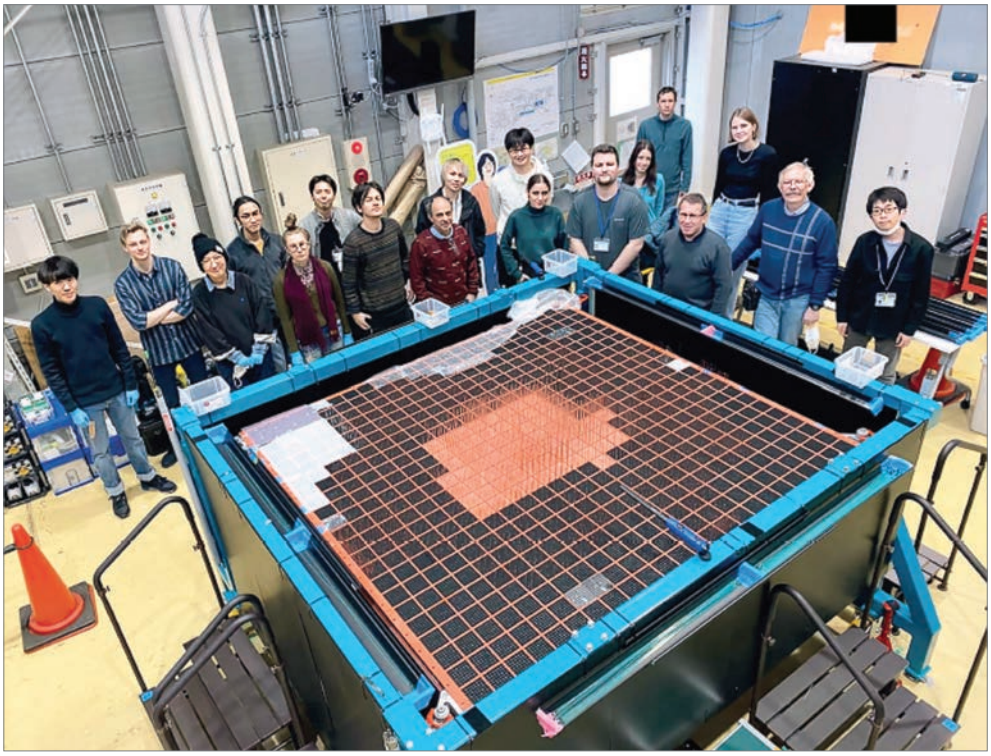
Задачами экспериментов NOvA и T2K являются измерения параметров осцилляций нейтрино и, в первую очередь, все еще остающихся неизвестными фазы нарушения CP-четности и порядка масс нейтрино. Эта информация очень востребована: в частности, порядок масс играет существенную роль в моделировании потоков нейтрино при взрыве сверхновых, он важен также для оценки перспектив целого класса экспериментов в физике нейтрино по поиску безнейтринного двойного бета-распада и является входным параметром для экспериментов по прямому измерению масс нейтрино

Б. Миллер (FNAL), А. Шешуков и О. Петрова (ЛЯП ОИЯИ) на фоне дальнего детектора NOvA

и поиску реликтовых нейтрино. Фазу же нарушения CP-инвариантности в лептонном секторе в ряде моделей связывают с важнейшим явлением — возникновением асимметрии вещества и антивещества во Вселенной.

В эксперименте NOvA ОИЯИ участвует с 2014 г. За это время сотрудники научно-экспериментального отдела физики элементарных частиц ЛЯП внесли в него существенный и разносторонний вклад. Методические исследования нашли применение в уточнении ряда систематических неопределенностей и совершенствовании моделирования детектора. Участники группы ведут разработку нескольких физических анализов, связанных с изучением потоков атмосферных мюонов, поиском магнитных монополей и нейтрино от взрывов сверхновых, регистрацией атмосферных нейтрино. В течение многих лет физики из ОИЯИ играют важную роль в основном физическом анализе эксперимента NOvA — изучении осцилляций трех флейворных нейтрино. Полученные компетенции нашли свое применение и в активном участии в проведении первого совместного анализа данных экспериментов NOvA и T2K с целью измерения параметров осцилляций нейтрино.

Эксперимент NOvA базируется в Национальной ускорительной лаборатории им. Э. Ферми (FNAL, США). Первый детектор эксперимента располагается на небольшом расстоянии от мишени (1 км) для измерения на-



Участники завершающей стадии сборки SuperFGD в J-PARC весной 2023 г.

чального состава потока частиц. Далее пучок проходит расстояние 809 км, и его флейворный состав регистрируется в дальнем детекторе. Оба детектора представляют собой трековые калориметры, собранные из плоскостей ПВХ-ячеек, заполненных жидким сцинтиллятором. Размер ближнего детектора $3{,}9 \times 3{,}9 \times 15{,}9$ м, размер дальнего — $15{,}5 \times 15{,}5 \times 59{,}6$ м. При этом сечение индивидуальных ячеек, из которых собраны плоскости в ближнем и дальнем детекторах, одинаково и составляет 6×4 см, а длина ячеек равна поперечному размеру детекторов.

Особенностью эксперимента NOvA является практически полная идентичность (за исключением размеров) ближнего и дальнего детекторов, что при экстраполяции позволяет сократить часть систематических неопределенностей, таким образом уменьшая их влияние на результаты.

В эксперименте T2K ОИЯИ участвует с 2020 г. Физики из научно-экспериментального отдела множественных адронных процессов и отдела научно-исследовательских работ и инноваций ЛЯП проводят методические исследования, занимаются моделированием потоков нейтрино с помощью измерений, сделанных в эксперименте SHINE (ЦЕРН), и уже внесли вклад в сборку новой мишени ближнего детектора эксперимента.

Эксперимент T2K проводится на территории Протонного ускорительного комплекса J-PARC (Япония). Изучаемый поток частиц регистрируется в двух детекторных комплексах, разнесенных на расстояние 295 км. Ближ-

ний детекторный комплекс T2K расположен на расстоянии 280 м от мишени и состоит из детектора на оси пучка INGRID и комплекса ND280 вне оси. Дальний детектор T2K — установка Super-Kamiokande.

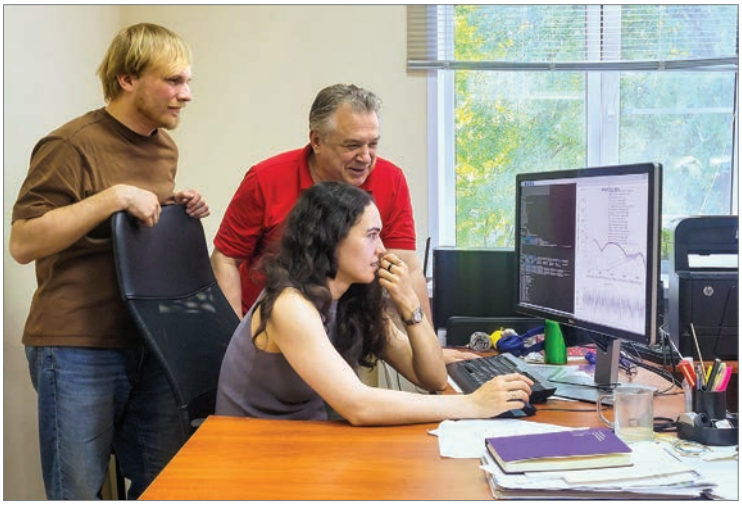
ЭКСПЕРИМЕНТ BOREXINO

Идея жидкосцинтилляционного детектора большого объема для регистрации низкоэнергетичных солнечных нейтрино в режиме реального времени была представлена интернациональной группой физиков еще в 1990 г. Дубненские ученые присоединились к проекту в 1991 г. и участвовали как в работах по созданию детектора, так и в анализе его данных.

Набор данных на детекторе Borexino начался в мае 2007 г. и шел до октября 2021 г., обработка накопленных данных продолжается. Уже после остановки детектора опубликованы результаты по наблюдению нейтрино из углеродно-азотного цикла.

Группа из ЛЯП ОИЯИ участвовала в обработке данных Borexino с целью получения основного результата по солнечным бериллиевым нейтрино. Разработанный при анализе данных прототипа детектора аналитический аппарат был успешно адаптирован для анализа данных Borexino. Прецизионное аналитическое описание спектров при малых энергиях позволило провести прямое измерение потока *pp*-нейтрино, явившееся одним из наиболее ярких результатов Borexino. Следует подчеркнуть, что идея измерения принадлежит именно ученым из Дубны.

Коллаборация Borexino в Гран-Сассо на фоне открытой структуры CTF, установленной в качестве арт-объекта. 2018 г.



Группа Borexino за обсуждением новых результатов. Слева направо: М. Б. Громов, О. Ю. Смирнов, А. В. Вишнева. 2025 г.

Помимо основного анализа группа из ЛЯП занималась поиском редких процессов. В рамках этой работы получены наиболее сильные ограничения на эффективный магнитный момент солнечных нейтрино, на нарушение закона сохранения электрического заряда, на нарушение принципа Паули в ядрах, на примесь антинейтрино в потоке солнечных нейтрино.

В числе наиболее важных результатов, полученных при участии группы, следует отметить первое достоверное наблюдение потока геонейтрино, или нейтрино, возникающих при распадах естественных радиоактивных изотопов в Земле. Измерение потоков геонейтрино подтвердило правильность общих представлений о внутреннем строении Земли[16].

На основе исследований, проведенных на Borexino, защищены 4 кандидатских и 1 докторская диссертация. Группа удостоена первой премии ЛЯП ОИЯИ за 2013 г. за работу «Измерение потоков геонейтрино на детекторе Borexino», первой премии ОИЯИ за 2014 г. за работу «Измерение потоков солнечных нейтрино из *pp*-реакции в режиме реального времени на детекторе Borexino», первой премии ОИЯИ за 2018 г. за цикл из трех работ «Исследование свойств нейтрино из реакций *pp*-цикла на Солнце с помощью детектора Borexino», первой премии ЛЯП ОИЯИ за 2019 г. за цикл работ «Нейтринная геофизика».

ЭКСПЕРИМЕНТ OPERA

В 2001 г. ОИЯИ присоединился к международной коллаборации OPERA, создававшей детектор для поиска осцилляций мюонных нейтрино в тау-нейтрино на нейтринном пучке CNGS, направленном из ЦЕРН

[16] *Smirnov O.* // Prog. Part. Nucl. Phys. 2019. V. 109. P. 103712.

в подземную лабораторию Гран-Сассо (Италия). Участие в этом проекте стало продолжением исследований, которые ученые ЛЯП ОИЯИ проводили в рамках экспериментов MINOS и NOMAD, а еще раньше — «Нейтринный детектор» в ИФВЭ (Протвино).

В проекте OPERA группа ЛЯП ОИЯИ активно участвовала в создании Target Tracker (TT) — основного электронного детектора: в изготовлении сцинтилляционных стрипов, сборке модулей и их калибровке во Франции, сборке детектора в Гран-Сассо. Общая площадь TT составляла 6200 м^2, система сбора данных включала 62488 каналов ФЭУ. После запуска детектора в ЛЯП был создан пакет программ обработки данных TT для поиска вершин событий в детекторе OPERA. Группа ЛЯП ОИЯИ была ответственной за анализ данных TT и поиск вершин нейтринных событий на протяжении почти всего эксперимента. Кроме того, с помощью созданной в ЛЯП автоматической сканирующей станции проводился анализ нейтринных событий в ядерной эмульсии.

Основные данные были набраны с 2008 по 2012 г., а их анализ продолжался еще несколько лет. Всего в детекторе было зарегистрировано около 20 тыс. нейтринных событий. С помощью специальных критериев отбора

Детектор OPERA в подземной лаборатории Гран-Сассо

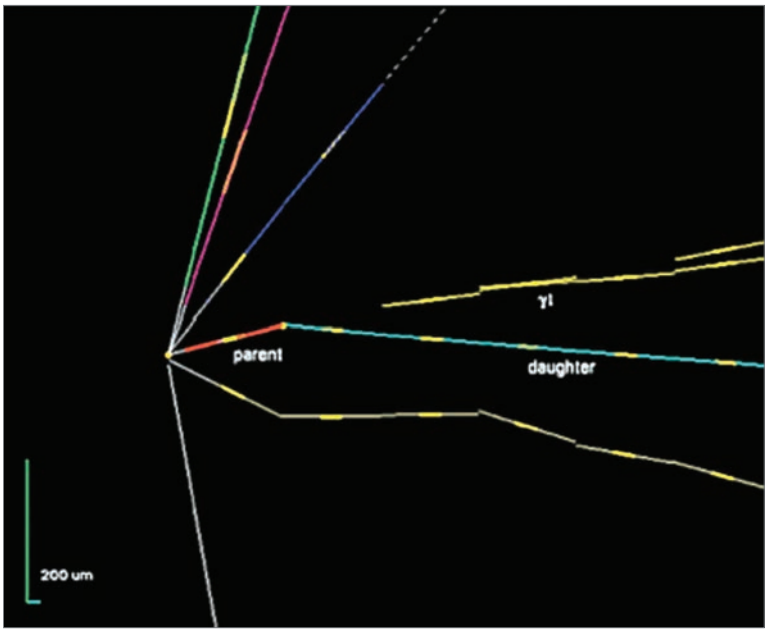


Рис. 3. Первое зарегистрированное взаимодействие тау-нейтрино в детекторе OPERA

и сложных методов анализа, в том числе с использованием нейронных сетей, среди этих событий было найдено 10 случаев взаимодействия тау-нейтрино, уровень достоверности был выше 6σ. Таким образом, осцилляции мюонных нейтрино в тау-нейтрино были открыты, и главная цель эксперимента успешно достигнута[17]. В эксперименте также были получены другие важные результаты: измерена зарядовая асимметрия космических мюонов, поставлены ограничения на существование стерильных нейтрино. В 2022 г. за цикл работ, посвященных исследованию нейтринных осцилляций, коллективу участников эксперимента была присуждена первая премия ОИЯИ.

После завершения проекта OPERA исследования тау-нейтрино, в частности процессов их образования на ускорителях, были продолжены в рамках новых проектов ЦЕРН: NA65 (с 2017 г.) и FASER (с 2021 г.). Физики ЛЯП принимают участие в проведении этих экспериментов, анализе данных эмульсионных детекторов, используемых для регистрации разных типов нейтрино. В 2023 г. в эксперименте FASER были впервые зарегистрированы нейтрино, рожденные при столкновении пучков протонов на LHC, и сделаны оценки сечения взаимодействия в диапазоне энергий 600 ГэВ – 2 ТэВ.

В дальнейшем детектор Target Tracker был разобран и перевезен в Китай для регистрации космических мюонов в эксперименте JUNO, где таким образом получил вторую жизнь.

[17] *Agafonova N. et al. (OPERA Collab.).* Discovery of τ Neutrino Appearance in the CNGS Neutrino Beam with the OPERA Experiment // Phys. Rev. Lett. 2015. V. 115, No. 12. P. 121802.

ЭКСПЕРИМЕНТ Mu2e

Процессы с нарушением лептонного заряженного числа (cLFV) строго запрещены в Стандартной модели с безмассовыми нейтрино. К таким процессам, в частности, относятся распады $\mu^+ \to e\gamma$, $\mu^+ \to 3e$, когерентная конверсия мюона в электрон в поле ядра $\mu^- + N \to e^- + N$. Открытие осцилляций нейтрино показало, что нейтрино имеют ненулевую массу, и это не запрещает происходить процессам с нарушением лептонного заряженного числа. Но такие процессы будут происходить на уровне $\sim \Delta m_\nu^4 / M_W^4 < 10^{-50}$, что неизмеримо в современных условиях. Однако некоторые теории показывают возможность процессов с нарушением лептонного заряженного числа за пределами Стандартной модели на уровнях 10^{-15}–10^{-20}.

В эксперименте Mu2e во FNAL (Батавия, Иллинойс, США) планируется поиск когерентной конверсии мюона в электрон в поле ядра алюминия $\mu^- + \mathrm{Al} \to e^- + \mathrm{Al}$, нарушающего закон сохранения лептонного заряда. Признаком такого события является вылет моноэнергетических электронов с $E = 105$ МэВ после захвата мюонов на орбиту атома алюминия. Существующий к настоящему времени экспериментальный предел на процесс когерентной конверсии мюона в электрон в поле ядра установлен экспериментом SINDRUM II и составляет $R_{\mu e} < 7 \cdot 10^{-13}$ (90 % CL).

Сотрудники научно-экспериментального отдела множественных адронных процессов (НЭОМАП) ЛЯП активно участвуют в подготовке эксперимента Mu2e с 2009 г. Одно из направлений работы группы — создание электромагнитного калориметра совместно с коллегами из Италии (Фраскати, Пиза) и США (Caltech, Пасадена). Здесь в разное время были активно

Д. Чохели и Ю. Н. Харжеев (справа) в Университете Вирджинии (США) производят сборку прототипа системы CRV

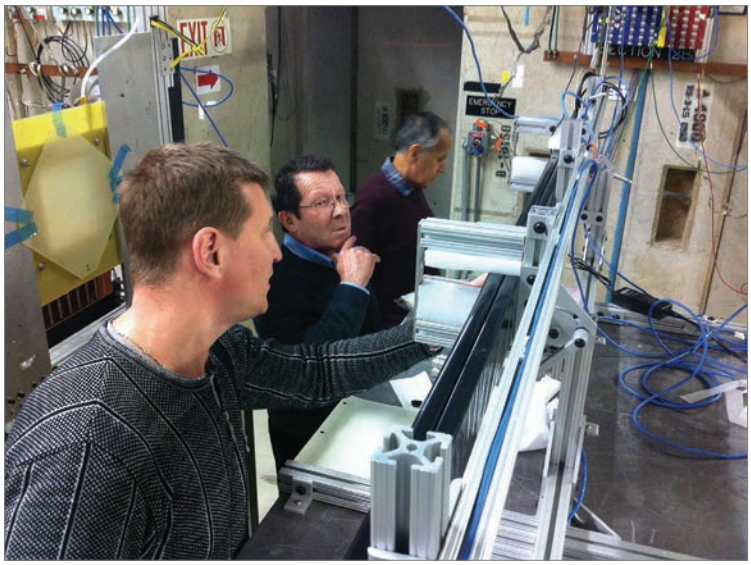
задействованы сотрудники НЭОМАП ЛЯП Н. В. Атанов, В. Ю. Баранов, Ю. А. Будагов, В. В. Глаголев, Ю. И. Давыдов и др.

Совместно с коллегами из Италии и США проведены исследования кристаллов LYSO, BaF_2, CsI, которые рассматривались в качестве кандидатов на использование в калориметре. Прототипы калориметра на основе кристаллов LYSO исследовались на пучках ускорителей в Майнце и Фраскати. В силу экономических и технических проблем, в итоге окончательный выбор был сделан в пользу кристаллов CsI. Исследования прототипов калориметров на основе кристаллов CsI проводились на пучке вторичных электронов во Фраскати, а также в прямом пучке линейного ускорителя электронов ЛУЭ-75 в Ереванском физическом институте (Армения). Следует отметить, что ереванским коллегам удалось добиться режима работы линейного ускорителя, при котором обеспечивался пучок в несколько сотен электронов в секунду, что является неординарной задачей. На всех этапах этих работ сотрудники ОИЯИ внесли заметный вклад в стендовые исследования индивидуальных кристаллов, в разработку и тестирование предусилителей, в создание прототипов калориметров и их исследование. Результаты, полученные в ходе выполнения этих работ, легли в основу двух кандидатских диссертаций сотрудников НЭОМАП.

Второе направление работ включает создание вето-системы космического фона Cosmic Ray Veto (CRV) совместно с коллегами из Университета Вирджинии и FNAL (США). Большой вклад в это направление внесли А. М. Артиков, И. И. Васильев, А. В. Симоненко, Ю. Н. Харжеев, Д. Чохели и др.

Важнейшей задачей любого эксперимента, нацеленного на поиск запрещенных или исследование редких процессов, является подавление фоновых событий. Для достижения ожидаемой в Mu2e чувствительности к одному событию необходимо подавить космический фон до уровня, когда при наборе данных в течение трех лет будет получено не более 0,25 события от космических мюонов, имитирующего искомый электрон. Такое требование достижимо при использовании вето-системы CRV с эффективностью регистрации космических лучей не хуже 99,99 %. Основным компонентом модуля CRV является стрип из экструдированного полистирольного сцинтиллятора сечением 20×50 мм. Каждый стрип имеет два так называемых «коэкструдированных» продольных отверстия внутри тела сцинтиллятора диаметром 2,6 мм. В каждое отверстие помещается спектросмещающее (WLS) волокно диаметром 1,4 мм.

Участники эксперимента Mu2e из ЛЯП внесли определяющий вклад в развитие системы CRV установки, разработку всех этапов сборки и тестирования модулей для их массового производства. Сотрудниками ЛЯП впервые предложено и экспериментально продемонстрировано увеличение светосбора со сцинтилляторов при съеме сигналов при помощи спектросмещающих волокон путем закачки в отверстия жидкого оптического наполнителя. Было показано, что заполнение отверстий жидким оптическим наполнителем увеличивает сбор света с детектора примерно на 50 %. Принципиальным отличием данного метода от использования традиционного



А. В. Симоненко, Ю. И. Давыдов, А. М. Артиков (слева направо) готовят модуль системы CRV к тестовым испытаниям на пучке во FNAL (США)

двухкомпонентного клея является отсутствие ограничения на время заполнения отверстия. Исследования по разработке метода увеличения светосбора с длинных сцинтилляторов путем закачки в отверстия жидкого оптического наполнителя удостоены второй премии ОИЯИ за 2019 г.

Увеличение светосбора за счет заполнения отверстий жидким наполнителем позволит компенсировать потерю световыхода сцинтилляторов из-за их естественного старения. Следует отметить, что достижение требуемой эффективности Mu2e-счетчиков длиной 7 м в течение всего времени проведения эксперимента практически невыполнимо без заполнения отверстий оптическим наполнителем. Предложенная методика может быть использована в любом эксперименте с аналогичной конструкцией счетчиков.

В 2025 г. во FNAL закончилась сборка всего спектрометра Mu2e в специально построенном для эксперимента здании. Набор данных будет осуществляться в два этапа. На первом этапе (Run I) планируется работа установки в течение года. Затем запланирован перерыв на два года, связанный с модернизацией ускорителя, после чего будет проведен второй набор данных (Run II) в течение двух-трех лет. Ожидается, что в случае отсутствия искомого сигнала по результатам Run I в эксперименте Mu2e будет установлен новый предел на процесс когерентной конверсии мюона в электрон в поле ядра $R_{\mu e} < 6{,}2 \cdot 10^{-16}$ (90 % CL), что улучшит существующий предел на три порядка. В результате набора данных в Run II при отсутствии сигнала конверсии мюона в электрон Mu2e понизит предел еще на один порядок.

Mu2e предусматривает дальнейшую работу в условиях усовершенствования ускорительного комплекса FNAL. План PIP-II (Proton Improvement Plan II) предполагает создать самый интенсивный в мире пучок нейтрино высокой энергии для DUNE. В рамках этого плана будет создана основа для

Участники тестирования прототипа системы CRV на пучке протонов довольны итогами исследований. FNAL, 2016 г.

будущей высокоинтенсивной программы, которая сможет обеспечить пучок мощностью до 100 кВт для эксперимента Mu2e-II. Это позволит обнаружить события «новой» физики либо, в их отсутствие, как минимум еще на порядок понизить предел на процесс когерентной конверсии мюона в электрон в поле ядра $R_{\mu e}$.

ЭКСПЕРИМЕНТЫ PEN, MEG, MEG II

Задачей проекта PEN (PSI, Швейцария) являлось прецизионное изучение распада $\pi^+ \to e^+\nu$.

Центральными координатными детекторами спектрометра PEN являются цилиндрические многопроволочные пропорциональные камеры, разработанные и изготовленные в ЛЯП.

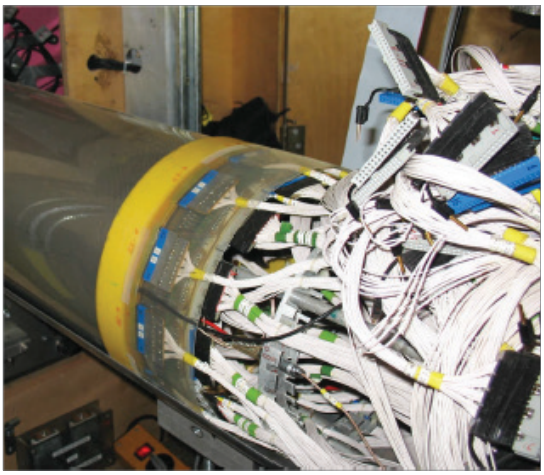
Также установка была дополнена изготовленной в ЛЯП время-проекционной мини-камерой (mTPC), предназначенной для определения места попадания заряженных частиц в мишень.

В спектрометре MEG детектор заряженных частиц состоял из 16 радиально расположенных дрейфовых камер. В изготовлении дрейфовых камер принимали участие сотрудники ЛЯП ОИЯИ.

Уникальность созданных камер — минимально возможное количество вещества в рабочем объеме при высокой эффективности и координатной

точности, что позволило получить лучшие в мире результаты по поиску $\mu^+ \to e^+\gamma$ распада.

MEG II — это модернизированная установка MEG. После замены и улучшения характеристик ряда узлов спектрометра предполагается получить ограничение на вероятность распада $\mu^+ \to e^+\gamma$ на уровне $(4–5) \cdot 10^{-14}$.



Блок цилиндрических камер в момент установки в центральную часть спектрометра PEN

В MEG II был кардинально изменен детектор заряженных частиц, 16 плоских дрейфовых камер заменены гиперболической многопроволочной камерой (CDCH). В изготовлении и обслуживании камеры участвовали сотрудники ЛЯП А. О. Колесников, Н. П. Кравчук и В. Л. Малышев. Комбинация результатов сеансов MEG до 2013 г. и сеансов MEG II 2021–2022 гг. уже позволила получить рекордный результат $B(\mu^+ \to e^+\gamma) < 1{,}5 \cdot 10^{-13}$ (90 % CL).

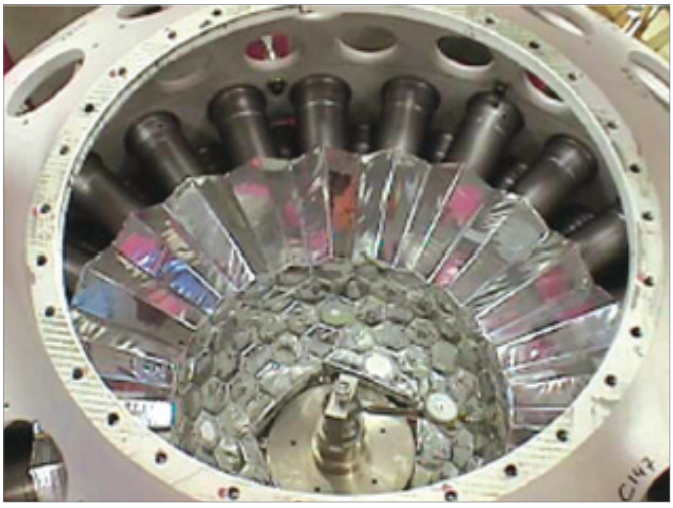
ЭКСПЕРИМЕНТ PIBETA

Детектор PIBETA, созданный международной коллаборацией при активном участии физиков научно-экспериментального отдела физики промежуточных энергий ЛЯП ОИЯИ, предназначен для прецизионного исследования редких распадов пионов и мюонов в покое. Конструкция и свойства основных узлов детектора выбраны таким образом, чтобы в максимальной мере обеспечить эффективность и надежность регистрации изучаемых редких процессов.

В детекторе PIBETA впервые в мировой практике для создания 4π-калориметра использованы 240 кристаллов сверхчистого CsI общей массой 1,6 т. Эти кристаллы обладают малыми значениями времени высвечивания и радиационной длины, что критично для создания компактного прибора, способного работать при больших потоках частиц (загрузках).

В детекторе использованы также впервые в мире разработанные и изготовленные в ЛЯП оригинальные тонкостенные цилиндрические многопроволочные пропорциональные камеры. Вместе с камерами была разработана и изготовлена оригинальная анодная и катодная электроника. Все это обеспечило возможность прецизионного исследования редких процессов с относительной вероятностью $\sim 10^{-8}$ на абсолютном уровне с точностью ~ 0,5 %.

С помощью детектора PIBETA в течение 1999–2001 гг. в непрерывных многомесячных сеансах набора статистики на пучке пионов мезонной



Сборка кристаллов для установки PIBETA

фабрики PSI (Швейцария) была получена статистика по бета-распаду пиона, по радиационным распадам пиона и мюона.

В результате было получено новое значение относительной вероятности бета-распада пиона BR = (1,038 ± 0,004 (стат.) ± 0,006 (сист.))·10^{-8} с точностью, почти на порядок большей, чем была известна ранее. Это значение полностью согласуется со Стандартной моделью, в которой, в соответствии с данными PDG, оно должно составлять BR = (1,038–1,041)·10^{-8} (90 % CL). В свою очередь, это подтверждает на новом уровне справедливость гипотезы о сохранении векторного тока в слабых взаимодействиях.

Новые данные по радиационному распаду позволили сделать однозначную оценку величины аксиально-векторного формфактора $F_A = 0{,}0115(4)$. Новое значение F_A определено с точностью в ~4 раза лучшей, чем ранее, и находится в согласии с расчетами в модели с киральным лагранжианом.

В результате предварительного анализа данных по радиационному распаду пиона получены указания на отсутствие в этом распаде деструктивной аномалии, не согласующейся со Стандартной моделью электрослабых взаимодействий.

ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

Лаборатория ядерных реакций (ЛЯР) была основана в 1957 г. выдающимся советским физиком Георгием Николаевичем Флёровым. Его научная настойчивость в поиске новых тяжелых и сверхтяжелых элементов во многом определила дальнейшее направление ядерной физики. В 2012 г. его имя было увековечено в названии элемента 114 Периодической таблицы химических элементов Д. И. Менделеева — «флеровий» (Fl), официально признанном Международным союзом теоретической и прикладной химии (IUPAC).

Академик Г. Н. Флёров

В 1958 г. в Лабораторию ядерных реакций Объединенного института ядерных исследований пришел Ю. Ц. Оганесян. Являясь ближайшим учеником академика Г. Н. Флёрова, он внес большой вклад в дальнейшее развитие физики тяжелых ионов. Благодаря ему в ЛЯР был создан ускоритель У-300 и в сентябре 1960 г. на нем получен первый пучок ионов. Ю. Ц. Оганесян является автором основополагающих работ по синтезу новых элементов на пучках тяжелых ионов. В 1960–1970-х гг. группа Оганесяна впервые провела эксперименты по синтезу элементов с $Z = 104–108$. Для исследований предельно тяжелых ядер были выбраны реакции слияния нейтронообогащенных изотопов актинидов с ускоренными на циклотроне У-400 ионами кальция-48. В 1999–2003 гг. в этих реакциях были впервые синтезированы ядра с $Z = 111–116$ и 118, свойства распада которых доказывают существование «островов стабильности» в области сверхтяжелых элементов. Академик Ю. Ц. Оганесян является научным руководителем Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флёрова. В 2016 г. 118-му элементу Периодической таблицы было официально присвоено имя «оганесон». В 2012 г. началось строительство Фабрики сверхтяжелых элементов (СТЭ), оснащенной новым сильноточным ускорителем DC-280 и несколькими современными высокоэффективными установками для физических и химических исследований. Циклотрон DC-280

Академик Ю. Ц. Оганесян

был запущен в 2018 г., а первые эксперименты на Фабрике СТЭ начались уже в 2020 г.

Благодаря Г. Н. Флёрову и Ю. Ц. Оганесяну Лаборатория ядерных реакций стала одним из ведущих центров ядерной физики в мире. Сегодня ЛЯР — это не просто лаборатория, а крупнейший в мире научный центр в области ядерно-физических исследований с тяжелыми ионами, в котором реализуются международные проекты, строятся уникальные ускорительные комплексы и ведутся прикладные исследования.

РАЗВИТИЕ УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ЛЯР

Современная ядерная физика невозможна без сложнейшей экспериментальной базы. Ускорительный комплекс ЛЯР представляет собой динамично развивающуюся базу, эволюция которой напрямую связана с фундаментальной задачей поиска границ материального мира — пределов существования атомных ядер и атомов. Особое внимание уделяется внутренней инженерной культуре. Многое из того, что применяется в лаборатории — от ускорительных систем до систем вакуумной и радиационной защиты, разрабатывается на месте, с учетом уникальных условий экспериментов. Лаборатория обладает собственным конструкторским бюро, командами по автоматике, криогенике, электронике, вакуумной и радиационной технике, специалистами по изготовлению мишеней.

Развитие ускорительной базы ЛЯР, которая включает целый ряд современных ускорителей, определялось высоким уровнем инженерных кадров и стремлением к достижению рекордных параметров пучков. Этот раздел посвящен развитию ускорительного комплекса ЛЯР в XXI в.

ПРОЕКТ DRIBS-I

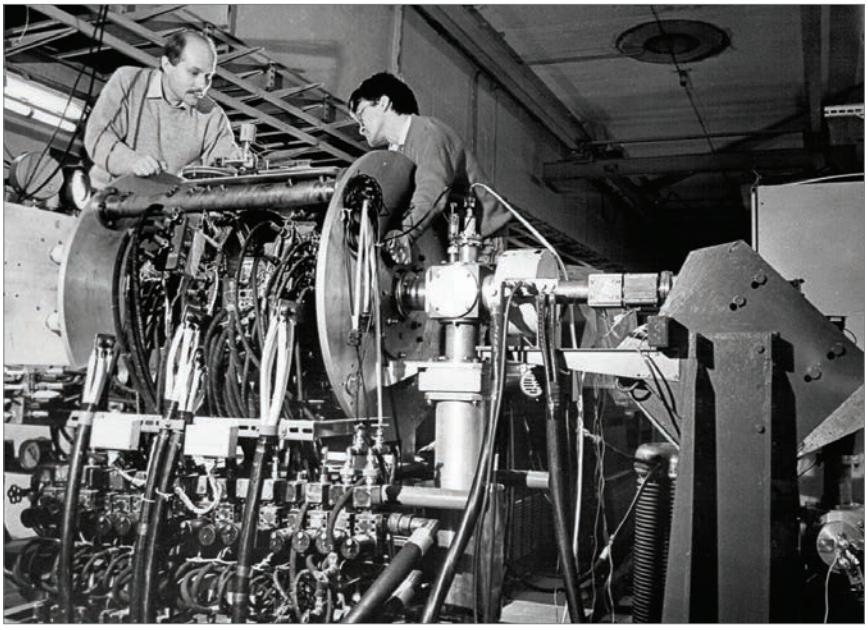
В начале столетия завершилось создание и наладка комплекса DRIBs-1, предназначенного для генерации экзотических радиоактивных ядер в реакциях фрагментации на бериллиевой мишени пучков легких ионов (^{7}Li, ^{11}Be и др.), получаемых на ускорителе У-400М, с энергиями около 40 МэВ/нуклон и интенсивностями в несколько мкА·частиц. В проекте были разработаны конструкции мишени и горячего мелкодисперсного сборника, решены сложные задачи диффузии и эффузии ядер в ионный источник. Был создан уникальный ионный источник на 2,45 ГГц, высоковакуумный ионопровод между циклотронами, счетная система диагностики пучков радиоактивных ионов. В работе комплекса было задействовано оборудование двух циклотронов — У-400М и У-400.

ИОННЫЕ ИСТОЧНИКИ

Ионные источники играют первостепенную роль в обеспечении интенсивных пучков для ядерно-физических экспериментов. На рубеже XXI в., при поиске сверхтяжелых элементов, возникла острая потребность в уве-

личении интенсивности пучков ^{48}Ca и снижении расхода этого дорогостоящего изотопа.

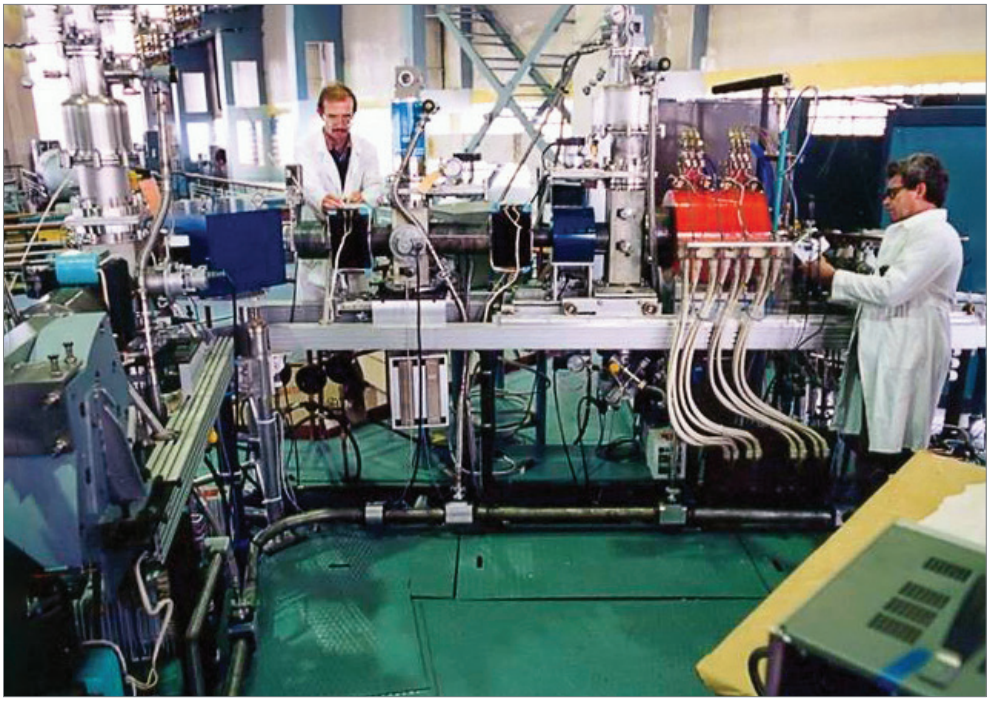
На рубеже столетий на интенсивных пучках тяжелых ионов циклотрона У-400 активно велись эксперименты по поискам возможности синтеза сверхтяжелых элементов. Интенсивности пучков аргона и марганца, например, достигали рутинно десятка мкА·частиц с использованием источника Пеннинга. Но попытки эффективно ускорить ионы ^{48}Ca из такого источника не удавались — получали интенсивности только на уровне 0,1 мкА·частиц при немыслимом расходе изотопа 10 мг/ч, что соответствовало стоимости около 1000 долларов в час. Требовалось поднять интенсивность в 10 раз и снизить расход изотопа в 10 раз. Это можно было осуществить, используя новое поколение ионных источников, основанных на ионизации плазмы в магнитной «бутылке» с резонансно ускоренными в СВЧ-поле электронами, — источник с электронно-циклотронным резонансом (ECR).



Первый исследовательский ECR-источник ЛЯР — DECRIS-I

Параллельно с созданием собственного ECR-источника в середине 1990-х циклотрон У-400 был оснащен источником ECR-4M из Франции и системой аксиальной инжекции пучка. Эффективность ускорения возросла в 4 раза. И только после простого усовершенствования — установки тепловых экранов в разрядную камеру — удалось решить задачу эффективности использования дорогого изотопа и выйти на проектную возможность крейсерского режима для синтеза новых элементов (рис. 1).

Далее уже все циклотроны и установки по схеме ISOL ЛЯР оснащаются ECR-источниками разных модификаций — с рабочими частотами от 2,45 ГГц для генерации пучков однозарядных ионов до 18 и 28 ГГц для мно-



Ионный источник ECR-4M и транспорт пучка в циклотрон У-400. В. Б. Кутнер и С. Л. Богомолов. 1997 г.

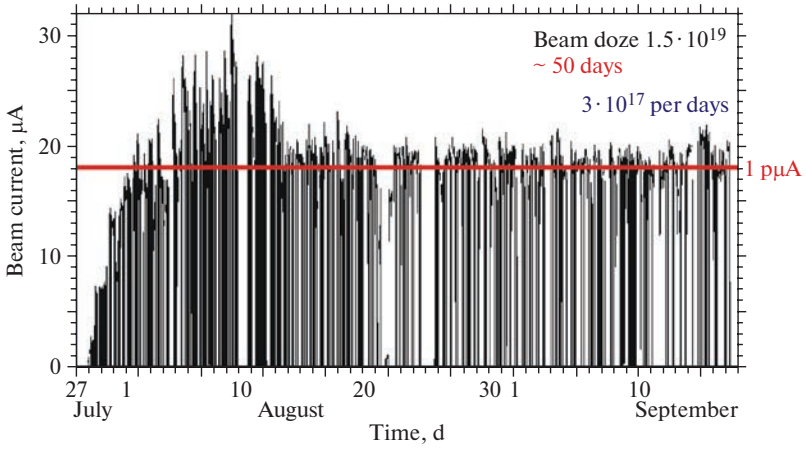
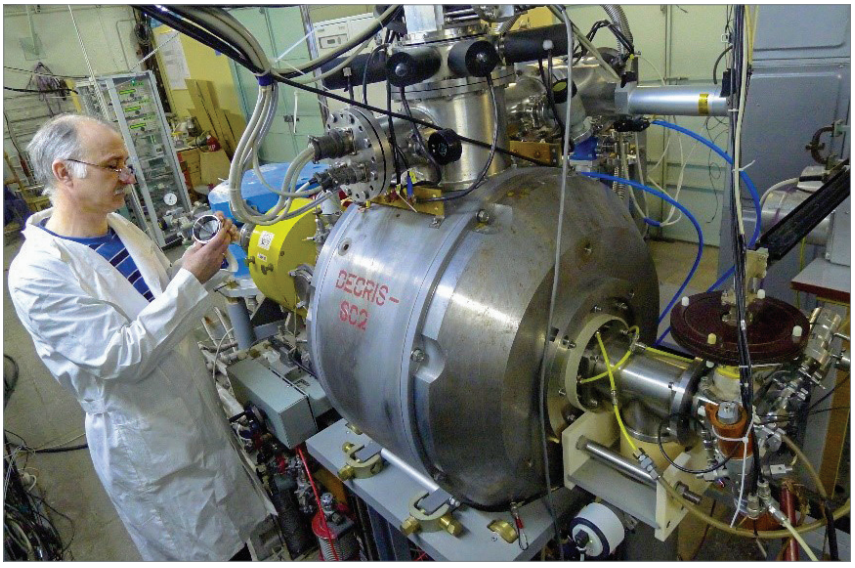


Рис. 1. Крейсерский режим ускорения $^{48}Ca^{5+}$ на У-400. Расход изотопа 0,5 мг/ч. 2010 г.

гозарядных ионов тяжелых элементов до $^{238}U^{38+}$, в том числе и со сверхпроводящими магнитными системами.

Всего в ЛЯР создано более десяти ECR ионных источников для ускорителей и физических установок, 90 % из которых интенсивно эксплуатируются в лаборатории и странах-участницах ОИЯИ.

Ионный источник DECRIS PM циклотрона DC-280 с магнитной системой на постоянных магнитах



Ведущий инженер В. Н. Логинов у ионного источника DECRIS SC2 для циклотрона У-400М со сверхпроводящей магнитной структурой

ЦИКЛОТРОНЫ ЛЯР

Ускорители ЛЯР эффективно используются для широкого спектра физических и химических экспериментов, для задач физики конденсированных сред и модификации материалов. Ежегодно длительность работы ускорителей с пучком на мишени выдерживалась на уровне 15 000 часов благодаря программе экспериментов и усилиям всех служб главного инженера лаборатории.

Циклотрон У-400М

Ускоритель У-400М был создан в начале нестабильных 1990-х на базе магнита первого циклотрона ЛЯР — У-300, и к концу второго десятилетия XXI в. потребовалась перекоммутация секций, а потом и замена основных медных обмоток весом 110 тонн. Вместе с заменой обмоток было решено кардинально модернизировать, создать заново устаревшие к тому времени системы циклотрона — полностью вакуумную, контроля и управления, радиационного контроля, блокировок и доступа, диагностики пучка и частично все другие. Была проведена коррекция магнитного поля и системы вывода пучков. В течение трех лет сложнейшая технологическая задача демонтажа-монтажа основных обмоток без разборки магнита была решена, системы созданы и модернизированы, циклотронный комплекс У-400М в 2025 г. снова в строю в новом технологическом качестве — с пучками тяжелых ионов от He до Bi с энергиями от 5 до 55 МэВ/нуклон и интенсивностями до 10 мкА·частиц.

Завершение модернизации циклотрона У-400М. Участники работ

Циклотрон У-400Р

Первый пучок на циклотроне У-400 был получен в далеком 1978 г., и, хотя за прошедшие годы подсистемы обеспечения циклотрона постоянно усовершенствовались и модернизировались, возможности вариации энергии ускоренных пучков оставались неизменными — серьезно изменить энергию ускоренного пучка можно было, только изменив его заряд. Основной целью при создании У-400 было получение пучка ^{48}Ca с энергией 240–260 МэВ и интенсивностью 1 мкА·частиц. Задача, в конце концов,

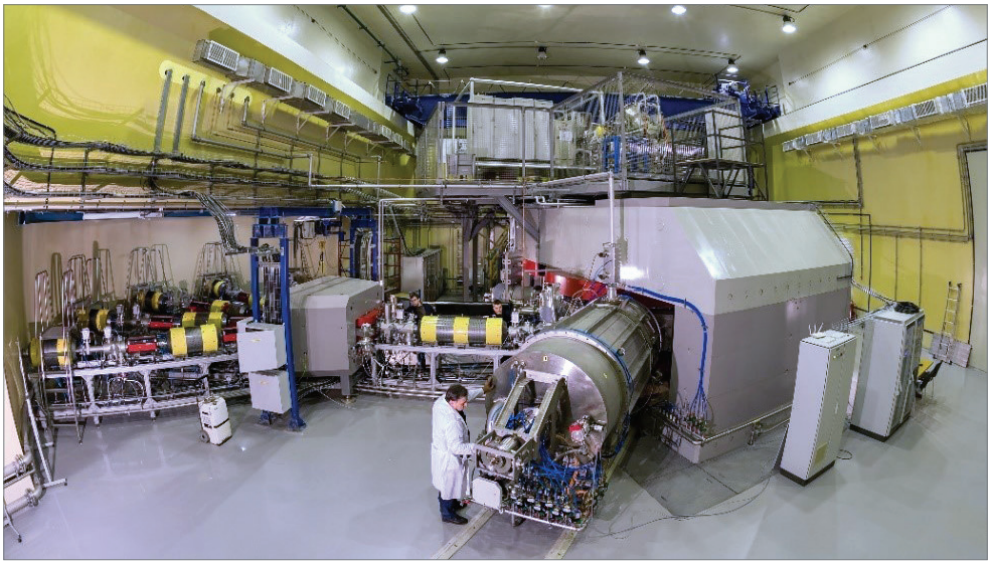
была решена, что обеспечило синтез шести новых сверхтяжелых элементов с $Z = 113–118$. В настоящее время эксперименты по синтезу и исследованию свойств сверхтяжелых элементов в основном проводятся на новом ускорительном комплексе — Фабрике сверхтяжелых элементов с интенсивными пучками циклотрона DC-280. Поэтому уже в начале 2000-х гг. был разработан проект создания на базе циклотрона У-400 нового циклотрона У-400Р. Теперь пучки циклотрона У-400Р будут предназначены для широкого спектра экспериментальных исследований в области ядерной физики, химии, конденсированных сред и модификации материалов. Для этого проект предполагает получение ускоренных пучков ионов от ^{4}He до ^{238}U с 25-кратной максимальной вариацией энергии за счет уровня магнитного поля и заряда иона от 0,8 до 27 МэВ/нуклон[1]. Для реализации проекта потребовалось строительство нового экспериментального корпуса.

Экспериментальный зал У-400Р в процессе строительства

Циклотрон DC-280

Необходимость не только синтеза сверхтяжелых элементов, но и изучения их свойств вылилась в формулировку требований к новому, после У-400, ускорителю лаборатории для этой задачи. Прежде всего это увеличение интенсивности ионов изотопов от ^{48}Ca, ^{50}Ti, ^{54}Cr до ^{64}Ni в 10 раз — до 10 мкА·частиц, но не за счет роста расхода вещества, а за счет повышения эффективности ускорителя. Диапазон энергий — от 4 до 8 МэВ/нуклон с ее разбросом в пучке не более 0,5 %. Все вместе это означало бы создание уникального циклотрона тяжелых ионов с эффективностью трансмиссии пучка от ионного источника до мишени около 50 %. Решение задачи осно-

[1] *Gulbekyan G., Gikal B., Kalagin I., Kazarinov N.* Development of FLNR JINR Heavy Ions Accelerator Complex in the Next 7 Years // Phys. Part. Nucl. Lett. 2010. V. 7, No. 7. P. 511–516.



Циклотрон DC-280 с пятью каналами выведенных пучков

Настройка режимов циклотрона DC-280. За пультом управления главный инженер ЛЯР И. В. Калагин

вывалось на всем опыте создания и эксплуатации циклотронов лаборатории. В борьбе с пространственным зарядом инжектируемого пучка было решено повысить потенциал инжекции до 100 кВ, снизить уровень магнитного поля циклотрона в диапазон около 1 Тл и повысить темп ускорения до 500 кВ/оборот для эффективного вывода пучка дефлектором. В 2018 г. циклотрон DC-280 был запущен и в течение нескольких лет эксплуатации и параллельной оптимизации стал близок к проектным параметрам.

Фабрика сверхтяжелых элементов ЛЯР

Циклотрон DC-280 является основой комплекса Фабрики сверхтяжелых элементов, включающей в себя также экспериментальные установки и инженерные системы обеспечения.

Циклотрон DC-140

Расширение объема задач физики конденсированных сред и модификации материалов, задач изучения радиационной стойкости полупроводниковых устройств и облучения полимерных материалов для трековых мембран на пучках тяжелых ионов привело логически к созданию специализированного циклотронного комплекса DC-140 для получения ускоренных

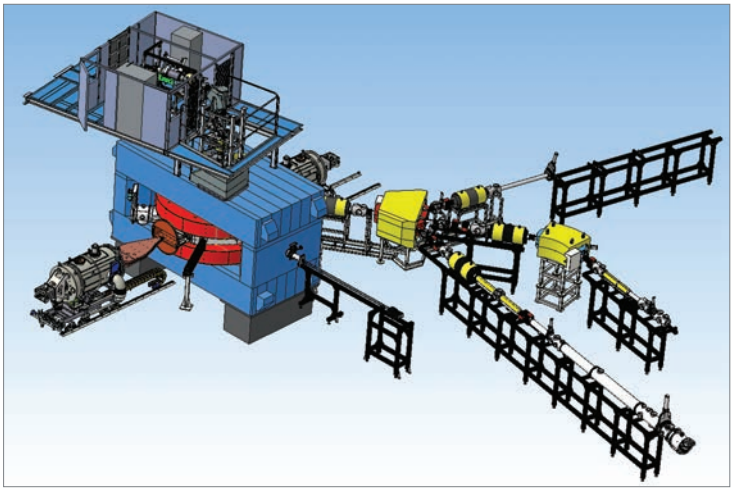


Рис. 2. Модель циклотрона DC-140 с ионным источником и каналами выведенных пучков

Циклотрон DC-140

пучков тяжелых ионов до Bi с фиксированными энергиями 2,1 и 4,8 МэВ/нуклон. Интенсивности пучков на мишенях ожидаются до 0,2 мкА·частиц. Проектная востребованность комплекса составляет 6000 часов в год пучкового времени. Реализация проекта намечена в 2026 г.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ СЕПАРАТОРЫ ЛЯР: СВЕРХТЯЖЕЛЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

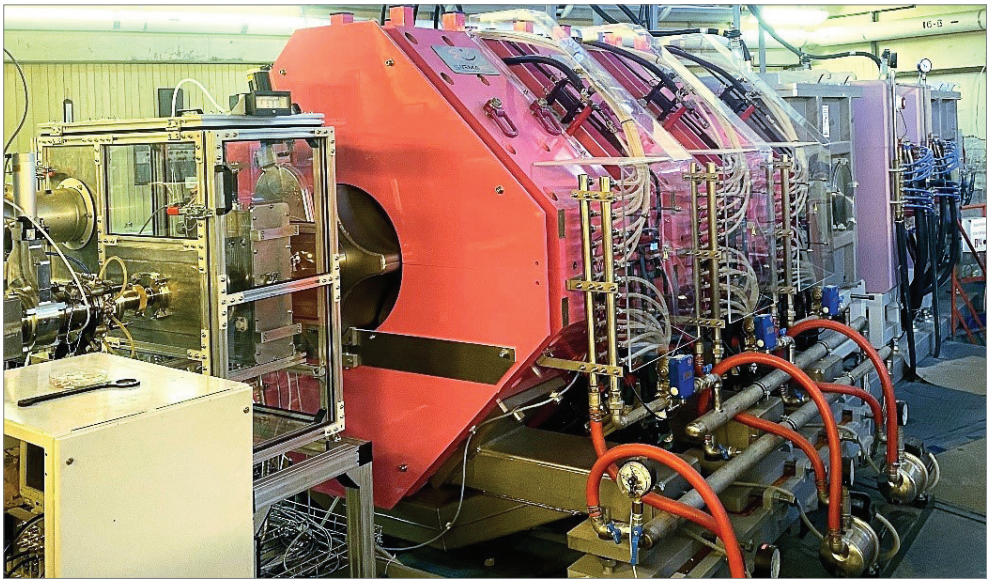
Первые электромагнитные сепараторы для изучения тяжелых и сверхтяжелых изотопов на пучках циклотрона У-400 — трехступенчатый электростатический сепаратор ВАСИЛИСА и газонаполненный сепаратор ГНС-1 — были созданы в ЛЯР в конце 1980-х гг.

РЕКОНСТРУКЦИЯ СЕПАРАТОРА ВАСИЛИСА

Сепаратор ВАСИЛИСА в течение более 20 лет успешно использовался для изучения свойств ядер, образующихся в реакциях слияния, а также механизмов этих реакций. На сепараторе был выполнен большой объем исследований закономерностей образования и выживания высоковозбужденных компаунд-ядер в области $82 \leqslant Z \leqslant 94$ в реакциях полного слияния, синтезированы и изучены свойства образования и распада более 20 нейтронодефицитных изотопов.

В процессе эксплуатации стали понятны факторы, ограничивающие возможности электростатического сепаратора. Так, при изучении нейтронообогащенных изотопов, образующихся в асимметричных реакциях, трансмиссия ядер-остатков испарения составляла $< 2\,\%$. Максимальная электрическая жесткость продуктов ядерных реакций, доступных для изучения на этом сепараторе, не превышала 2 МВ, что сильно затрудняло исследование продуктов реакций более симметричных, чем $^{208}\mathrm{Pb} + {}^{48}\mathrm{Ca}$.

В 2010-е гг. было принято решение о реконструкции электростатического сепаратора ВАСИЛИСА в селектор скоростей SHELS, обеспечивающий



Реконструированный сепаратор ВАСИЛИСА — селектор скоростей SHELS

более эффективную сепарацию продуктов реакций слияния, не зависящую от зарядовых состояний транспортируемых ионов. Диспергирующая часть нового сепаратора представляет собой двухступенчатый фильтр скоростей с разнесенными статическими электрическими и магнитными полями. В первом фокусирующем триплете использовались квадрупольные линзы с увеличенными апертурами.

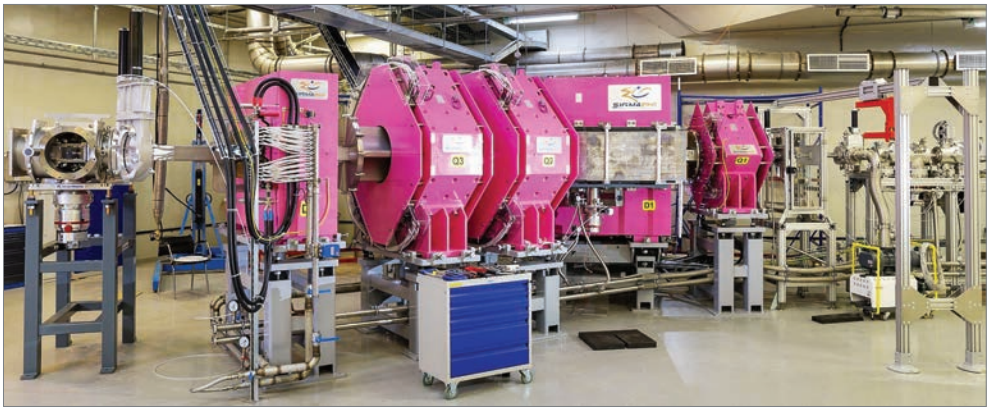
Первые испытания нового сепаратора были проведены в мае 2013 г. на пучке ускоренных ионов ^{22}Ne циклотрона У-400. Фактор подавления первичного пучка полной энергии составил $> 10^{16}$, что обеспечивает возможность работы с пучками до 10 мкА·частиц. Максимальная электрическая жесткость изучаемых продуктов составила 10 МВ. Для асимметричных реакций удалось повысить трансмиссию более чем в 2 раза.

Основным направлением исследований на новом сепараторе являются α-, β-, γ-спектроскопия ядер в фокальной плоскости сепаратора, изучение эмиссии нейтронов при спонтанном делении тяжелых изотопов, а также характеристик ядерных реакций. Для этих целей наряду с системой GABRIELA используется on-line детектор нейтронов SFiNx.

ГАЗОНАПОЛНЕННЫЕ СЕПАРАТОРЫ

Создание в Лаборатории ядерных реакций ECR-источников многозарядных ионов, а также высокоэффективных быстродействующих сепараторов продуктов ядерных реакций позволило в конце 1990-х – начале 2000-х гг. выполнить полномасштабные эксперименты по синтезу сверхтяжелых элементов с $Z = 113–118$ в реакциях с ^{48}Ca.

С 2020 г. исследования в области сверхтяжелых элементов продолжились уже на Фабрике сверхтяжелых элементов, оснащенной сильноточным циклотроном тяжелых ионов DC-280, способным генерировать пучки ионов в 10 раз более интенсивные по сравнению с существующим циклотроном У-400. В комплекс входят также новые газонаполненные сепараторы: ГНС-2 для экспериментов по синтезу и ГНС-3 (GRAND), имеющий аналогичную конструкцию, для ядерной спектроскопии и экспериментов по химии сверхтяжелых элементов.



Газонаполненный сепаратор ГНС-3 (GRAND) на канале № 2 циклотрона DC-280

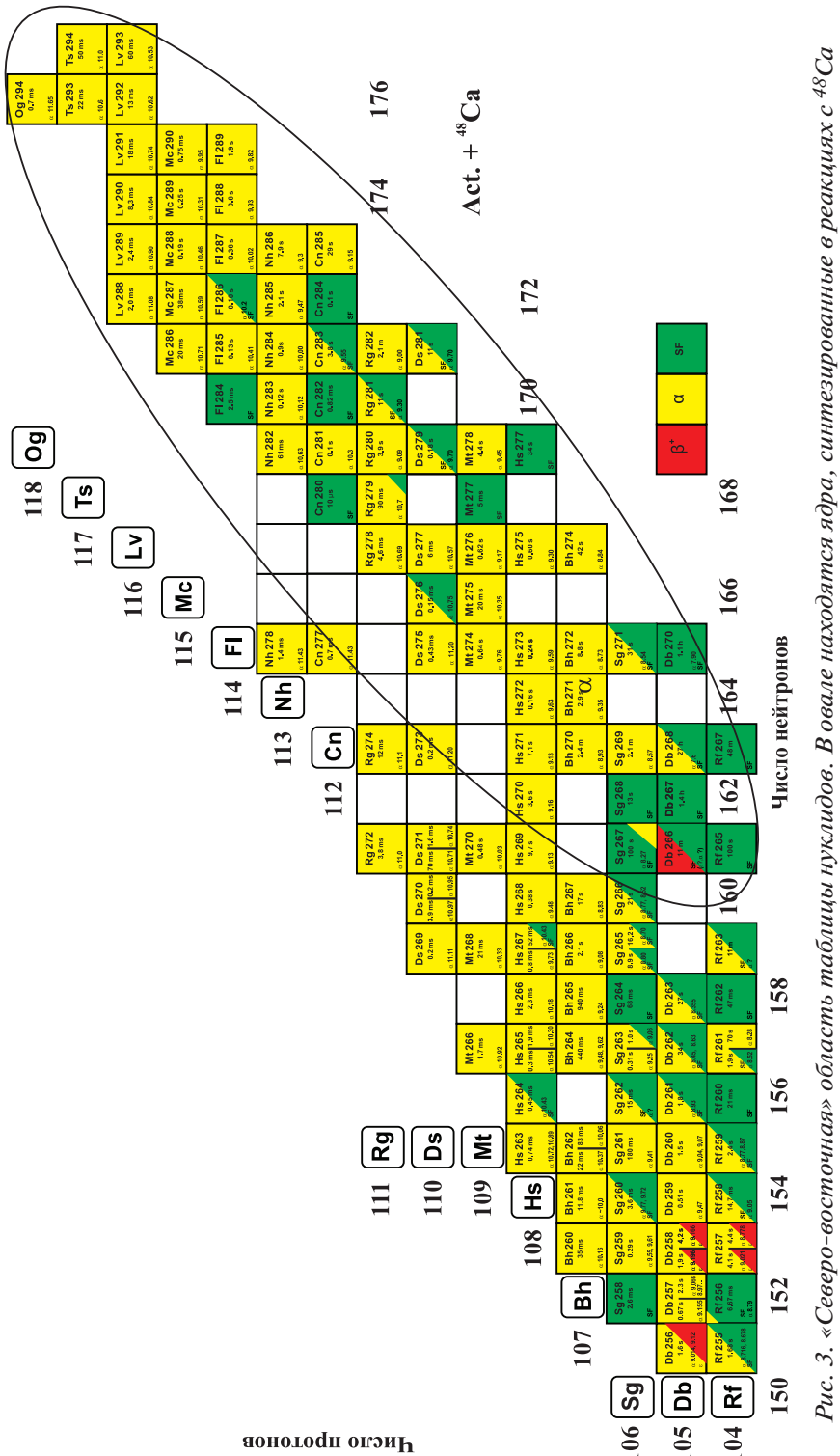


Рис. 3. «Северо-восточная» область таблицы нуклидов. В овале находятся ядра, синтезированные в реакциях с ^{48}Ca

Опыт, накопленный в ходе эксплуатации ГНС-1, позволил сформулировать требования к новому сепаратору ГНС-2 и оптимизировать его ионно-оптическую схему. Для увеличения трансмиссии были добавлены вертикально фокусирующая квадрупольная линза перед дипольным магнитом, для снижения фона от рассеянного пучка и легких частиц перед детектирующей системой был установлен второй дипольный магнит, использовались оптические элементы с увеличенными апертурами. При изучении продуктов реакций ^{243}Am(^{48}Ca, xn) было показано, что благодаря изменениям конструкции трансмиссия ГНС-2 возросла более чем в 2 раза, а фон уменьшился более чем в 200 раз по сравнению с ГНС-1.

После завершения монтажа сепаратора, создания необходимой инфраструктуры и проведения первых краткосрочных экспериментов, направленных на сравнение проектных и реальных характеристик новой установки, в течение 2020–2023 гг. были выполнены регулярные эксперименты по синтезу и изучению свойств изотопов сверхтяжелых элементов.

На новом сепараторе ГНС-2 было проведено несколько серий экспериментов, направленных на изучение функций возбуждения реакций ^{243}Am(^{48}Ca, 2–5n)$^{286-289}$Mc, а также характеристик продуктов распадов московия. Уточненное сечение канала 3n оказалось примерно в 2 раза выше, чем в предыдущих измерениях.

Изучение продуктов реакций ^{238}U(^{48}Ca, xn) и ^{242}Pu(^{48}Ca, xn) позволило уточнить характеристики радиоактивных распадов изотопов коперниция и флеровия.

На рис.3 представлена «северо-восточная» область таблицы нуклидов по состоянию на 2025 г. На карте изотопов отчетливо выделяются две области — область относительно легких изотопов с $Z = 107–113$, синтезированных в реакциях холодного слияния при облучении мишеней из свинца и висмута ускоренными ионами средних масс ^{54}Cr, ^{58}Fe, ^{64}Ni, ^{70}Zn, и область изотопов сверхтяжелых элементов с $Z = 113–118$, синтезированных в реакциях ускоренных ионов ^{48}Ca с мишенями из изотопов актинидных элементов (отмечена овальным контуром).

Значительный интерес для планирования экспериментов по синтезу изотопов элементов с $Z > 118$ представляет сравнение характеристик реакций с ускоренными ионами легче и тяжелее ^{48}Ca. С этой целью изучались реакции ^{232}Th(^{48}Ca, xn)$^{280-x}$Ds, ^{238}U(^{40}Ar, xn)$^{278-x}$Ds, ^{238}U(^{54}Cr, xn)$^{292-x}$Lv, ^{242}Pu(^{50}Ti, xn, pxn). Модельные эксперименты показали, что достижимая чувствительность экспериментов при наблюдении одного события образования сверхтяжелых ядер в год соответствует 10 фб (10^{-38} см^2).

За первые 4 года использования нового сепаратора ГНС-2 впервые наблюдены изотопы ^{264}Lr, ^{268}Sg, ^{272}Hs, ^{275,276}Ds, ^{280}Cn, ^{286}Mc, ^{288,289}Lv, уточнены свойства более 30 изотопов элементов в трансактинидной области: моды распадов — спонтанное деление ^{279}Rg, α-распад ^{268}Db, времена жизни, энергии α-распадов, измерены функции возбуждения, в реакции ^{242}Pu + ^{50}Ti впервые наблюдались продукты pxn-канала, который не наблюдался в реакциях ^{48}Ca, продемонстрирована долговременная работоспособность мишеней при токах ускоренных ионов до 6,5 мкА·частиц.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА УСКОРИТЕЛЬНОМ КОМПЛЕКСЕ ЛЯР

ОТКРЫТИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ СВЕРХТЯЖЕЛЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В настоящее время исследование сверхтяжелых ядер (СТЯ) является одним из важнейших и бурно развивающихся направлений в ядерной физике. Это не только обусловлено стремлением открыть новый элемент и дать ему наименование, но и имеет громадное научное значение. Из-за возрастающих сил кулоновского отталкивания СТЯ находятся на границе стабильности ядерной материи. Изучение свойств СТЯ позволяет глубже понять влияние оболочечных эффектов на их стабильность, их структуру, силы, удерживающие нуклоны в ядре, развивать теоретические модели ядра и т. д. Синтез СТЯ позволяет прослеживать динамику слияния двух массивных ядер и образования нового составного ядра. Эти исследования связаны с фундаментальными вопросами: где границы существования ядерной материи, где находятся области повышенной стабильности СТЯ (магические числа протонов и нейтронов $Z_{маг}/N_{маг}$), каковы радиоактивные свойства СТЯ, их структура, какими методами синтезировать СТЯ, образуются ли СТЯ в процессе нуклеосинтеза и многими другими.

На протяжении 60 лет различные теоретические модели предсказывали существование области СТЯ — группы ядер вблизи дважды магического сферического ядра $^{298}114$ ($Z_{маг} = 114$, $N_{маг} = 184$), которые должны существовать значительно дольше, чем ядра с меньшим или большим количеством протонов и нейтронов, образуя своеобразный остров повышенной стабильности на карте нуклидов. Сразу после появления первых предсказаний области СТЯ были предприняты многочисленные попытки их синтеза, однако все усилия оказались тщетными. Позже стало понятно, что для синтеза СТЯ требуется значительное повышение чувствительности эксперимента за счет увеличения интенсивности ускоряемых ионов, толщины слоя мишенного вещества, трансмиссии сепаратора и эффективности регистрации распадов СТЯ.

В 1999 г. в ЛЯР ОИЯИ были проведены первые успешные эксперименты по синтезу СТЯ, в которых использовался газонаполненный сепаратор ядер DGFRS-1 (рис. 4), позволявший собирать продукты реакций полного слияния в детектирующей системе и отделять их от пучка бомбардирующих ионов и фоновых продуктов реакций. Детектирующая система состояла из газовых пропорциональных камер для измерения времени пролета частиц и системы полупроводниковых детекторов, разделенных на стрипы, регистрирующих распады СТЯ. Эти и последующие эксперименты проводились в сотрудничестве с американскими лабораториями в Ок-Ридже (ORNL), Ливерморе (LLNL), Ноксвилле (UT), Нэшвилле (VU), а также с российскими ГНЦ НИИАР (Димитровград) и РФЯЦ-ВНИИЭФ (Саров).

Первое сверхтяжелое ядро (^{289}Fl) было синтезировано 25 июня 1999 г. в реакции ^{244}Pu(^{48}Ca, $3n$). Измерение функции возбуждения реакции при

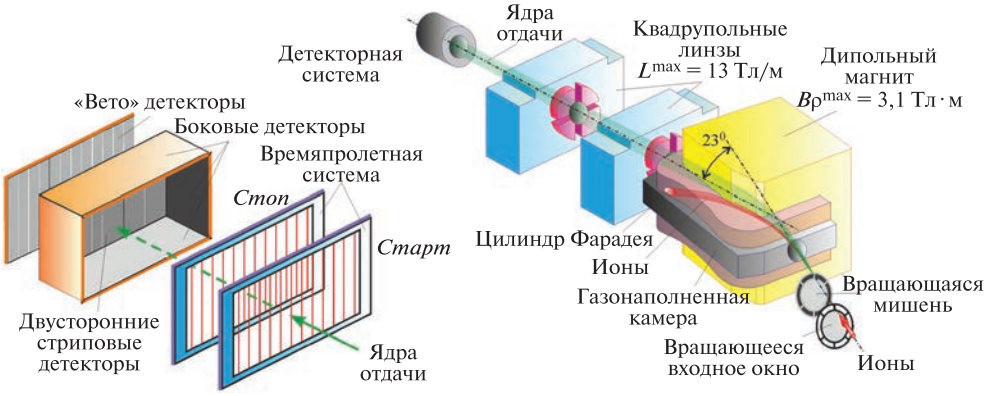


Рис. 4. Схема сепаратора DGFRS-1 и детекторов

повышенных энергиях ^{48}Ca привело к синтезу легких изотопов ^{288}Fl и ^{287}Fl. В реакциях с более легкими изотопами ^{242}Pu, ^{240}Pu и ^{239}Pu были получены как уже известный ^{287}Fl (метод перекрестных реакций), так и изотопы ^{286}Fl, ^{285}Fl и ^{284}Fl.

Через год, 19 июля 2000 г., был открыт изотоп элемента 116 ^{293}Lv в реакции ^{248}Cm(^{48}Ca, 3n). При этом свойства распада дочерних ядер ^{289}Fl, ^{285}Cn и ^{281}Ds полностью совпали с тем, что наблюдалось в прямой реакции с ^{244}Pu. Изотопы ^{292}Lv, а также ^{291}Lv и ^{290}Lv были получены в реакциях ^{248}Cm(^{48}Ca, 4n) и ^{245}Cm(^{48}Ca, 2–3n) соответственно.

Еще через два года, 19 марта 2002 г., был впервые синтезирован новый элемент 118 в реакции ^{249}Cf(^{48}Ca, 3n)^{294}Og. Снова свойства распада дочерних ядер ^{290}Lv, ^{286}Fl и ^{282}Cn были такими же, как в прямых реакциях ^{245}Cm(^{48}Ca, 3n), ^{242}Pu(^{48}Ca, 4n) и ^{238}U(^{48}Ca, 4n) соответственно.

Первый изотоп нечетного элемента 115 ^{288}Mc был зарегистрирован 24 июля 2003 г. в реакции ^{243}Am + ^{48}Ca. Его α-распад привел к наблюдению также неизвестного в то время элемента 113 с массой 284. Позже были получены соседние изотопы ^{287}Mc и ^{290}Mc. Наконец, 20 августа 2009 г. в реакции ^{249}Bk(^{48}Ca, 3n) был получен изотоп ^{294}Ts, а при увеличении энергии ^{48}Ca и изотоп ^{293}Ts.

Результаты данных экспериментов впоследствии вызвали широкий интерес к изучению СТЯ в других лабораториях: GSI (Германия), LBNL (США), RIKEN (Япония), IMP (Китай). Часть экспериментов с мишенями ^{238}U, ^{242,244}Pu, ^{243}Am и ^{249}Bk была повторена, свойства СТЯ и сечения их образования были полностью подтверждены, а 5 изотопов в цепочке распада ^{285}Fl и изотопы ^{266}Lr, ^{277}Hs и ^{280}Ds были получены впервые.

Измеренные функции возбуждения реакций приведены на рис. 5. Данные экспериментов, выполненных в GSI, LBNL и RIKEN, показаны открытыми символами.

В результате экспериментов на сепараторе DGFRS-1 впервые наблюдались 6 новых элементов от 113 до 118, изучены свойства более 50 самых тяжелых изотопов. Свойства их распада демонстрировали значительное па-

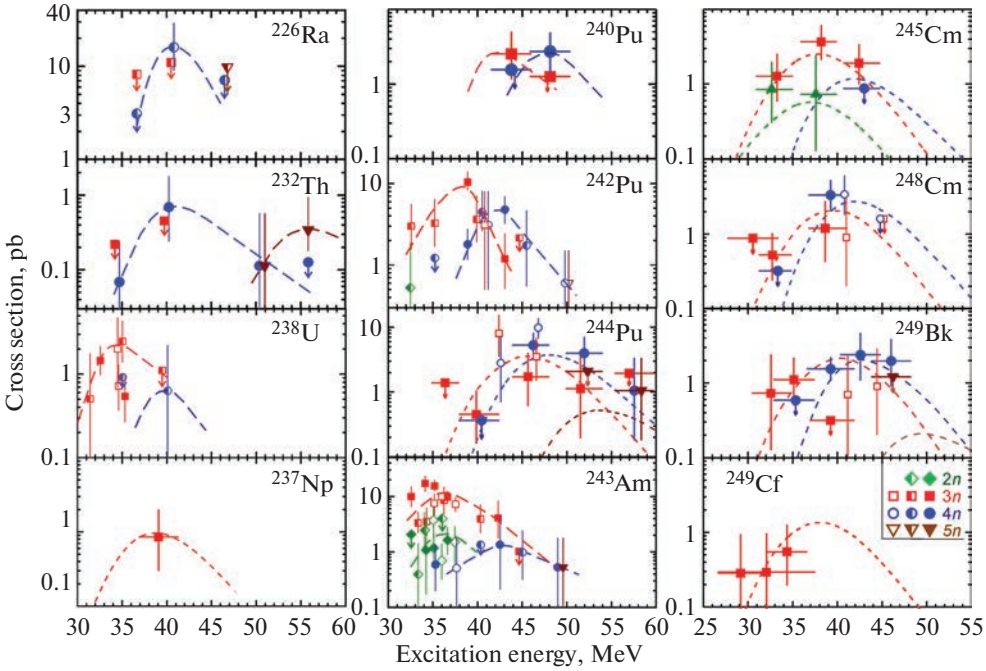


Рис. 5. Функции возбуждения 2n—5n каналов реакций ^{48}Ca с указанными изотопами

дение энергии α-распада и повышение стабильности с увеличением числа нейтронов N и приближением к предсказанному магическому числу нейтронов $N = 184$. Например, с добавлением шести нейтронов у изотопов Ds ($N = 165–171$) энергия α-распада снижается на 2,5 МэВ. При этом время жизни возрастает почти на 6 порядков. Стабильность ядра относительно спонтанного деления, которая определяется его барьером деления, повышается у изотопов Ds, Cn, Fl на 2 порядка при увеличении N на два нейтрона.

Сечение образования продуктов *xn*-каналов реакции полного слияния, а именно вероятность выживаемости возбужденного составного ядра W_{sur}, также в значительной степени зависит от барьера деления. Предсказанные теорией барьеры деления ядер показаны в нижней правой части рис. 6. Они снижаются при переходе от элемента 102 к 110, а затем растут и достигают максимума при $Z = 114$, 115. Сечения образования ядер полностью соответствуют такой зависимости. Таким образом, как свойства распада ядер, так и сечения их образования указывают на повышение их стабильности с приближением к гипотетическому дважды магическому ядру ^{298}114. Это послужило доказательством экспериментального обнаружения СТЯ и подтверждением предсказаний теории о существовании области относительно стабильных СТЯ.

Эти экспериментальные исследования получили дальнейшее развитие: результаты были подтверждены в последующих опытах в GSI (Германия),

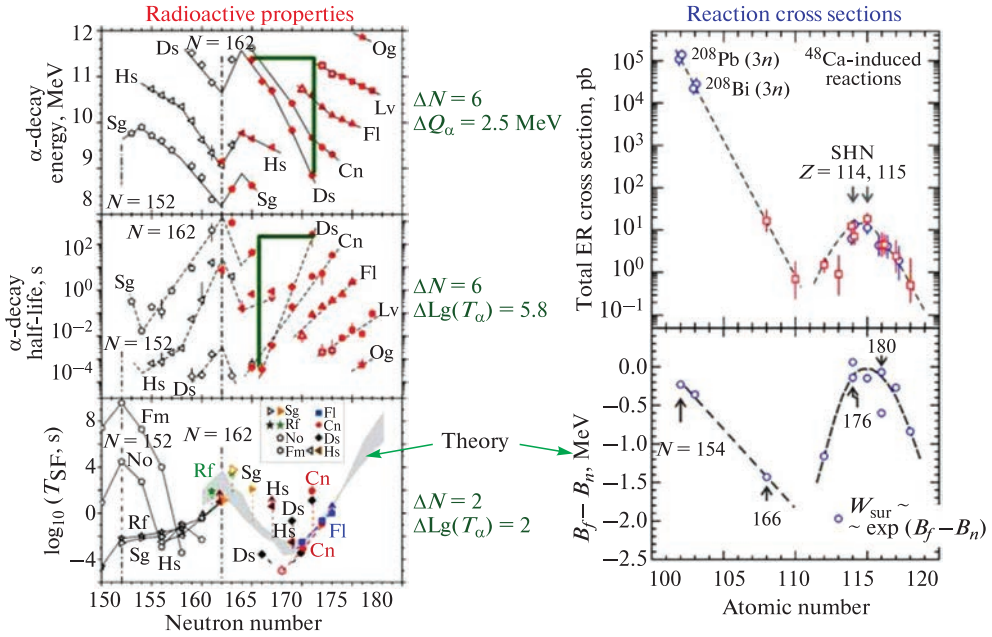


Рис. 6. Слева, сверху вниз: энергии и периоды α-распада ядер Sg—Og, периоды спонтанного деления изотопов Fm—Fl. Справа, сверху вниз: сечения xn-каналов реакций полного слияния, разность барьеров деления и энергии связи нейтронов

LBNL (США), RIKEN (Япония), IMP (Китай), проведены первые опыты по спектроскопии ядер в цепочках распада ^{288}Mc, ^{289}Fl (GSI, LBNL, ЛЯР) и изучению химических свойств элементов 112, 113, 114, 115 (ЛЯР, GSI), измерено массовое число ^{288}Mc (LBNL), готовится измерение масс ядер с точностью ≈100 кэВ (ЛЯР), проведены многочисленные измерения сечений захвата ядер, вероятностей формирования составного ядра (ЛЯР, ANU).

Однако один из фундаментальных вопросов остается открытым: где центр области стабильности сверхтяжелых ядер $Z_{маг}/N_{маг}$? Предсказания теории расходятся: в макромикроскопических моделях $Z_{маг} = 114$, $N_{маг} = 184$, в самосогласованных моделях $Z_{маг} = 120–126$, $N_{маг} = 184$. Для прояснения этого вопроса нужно синтезировать новые элементы 119, 120, важны как свойства ядер, так и сечения их образования.

Первые эксперименты уже были проведены в ЛЯР, GSI и RIKEN в реакциях ^{244}Pu + ^{58}Fe, ^{238}U + ^{64}Ni, ^{248}Cm + ^{54}Cr, ^{249}Cf + ^{50}Ti ($Z = 120$), ^{249}Bk + ^{50}Ti, ^{248}Cm + ^{51}V ($Z = 119$). Были достигнуты разные уровни чувствительности эксперимента (5–580 фб), использованы разные ускоренные ионы, однако получены только пределы сечений. Но насколько были равны шансы на успех в реакциях с ядрами от ^{50}Ti до ^{64}Ni, какая комбинация мишень–ион оптимальна? В такой ситуации реалистичные оценки сечений образования новых элементов становятся чрезвычайно важными для планирования будущих экспериментов и оценки экспериментальных возможностей. Согласно теоретическим представлениям и экспериментальным

данным, легкие ионы более предпочтительны, поскольку с ростом Z ускоряемого иона падает вероятность формирования составного ядра. Многие современные теоретические модели хорошо описывают экспериментально измеренные сечения реакций с ^{48}Ca, но результаты предсказаний для элементов 119 и 120 отличаются на несколько порядков.

Продолжение исследований сверхтяжелых ядер, синтез новых элементов и изучение изотопов на границах области СТЯ потребовало существенного повышения чувствительности эксперимента. Эта задача была решена на новом ускорительном комплексе ЛЯР ОИЯИ — Фабрике сверхтяжелых элементов как за счет возросшей на порядок интенсивности ускоряемых ионов, так и за счет повышения эффективности прохождения синтезируемых ядер от мишени к детекторам и степени подавления фоновых частиц на новом газонаполненном сепараторе DGFRS-2 (рис. 7).

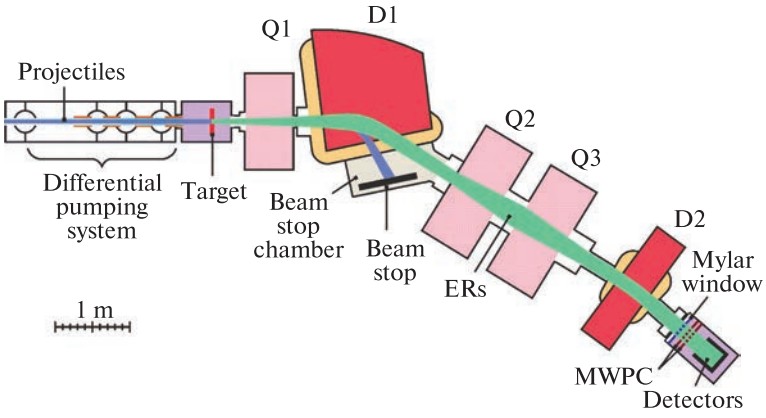


Рис. 7. Схема сепаратора DGFRS-2

Для определения параметров нового сепаратора и возможностей продолжения исследований СТЯ на более высоком уровне чувствительности, а также детального изучения свойств изотопов Mc, Fl, Cn и их дочерних ядер проведены эксперименты по изучению реакций ^{243}Am, ^{242}Pu, ^{238}U с ^{48}Ca.

Функция возбуждения реакции ^{243}Am + ^{48}Ca изучена при шести значениях энергии ^{48}Ca в широком интервале 239–259 МэВ, было синтезировано 10 новых цепочек распада ^{289}Mc, 110 — ^{288}Mc, 4 — ^{287}Mc, открыт новый изотоп ^{286}Mc, детально изучены свойства 22 ядер. Общее количество цепочек распада изотопов Mc более чем втрое превысило число ядер, синтезированных на DGFRS-1 в течение 2003–2012 гг. Впервые обнаружен α-распад ^{268}Db, измерена его ветвь и период полураспада, а также получен новый изотоп ^{264}Lr. Впервые зарегистрировано спонтанное деление ^{279}Rg. Сечение 3n-канала оказалось вдвое выше ранее измеренного.

В эксперименте с ^{242}Pu при двух значениях энергии синтезировано 25 цепочек распада ^{286}Fl и 69 — ^{287}Fl. Сечение также оказалось в три раза выше прежних значений. Получены указания на существование зависимости свойств распада ^{287}Fl, ^{283}Cn и ^{279}Ds, а именно α-распада или деления

^{279}Ds, от их низкоэнергетичных уровней, а также распадов ядра ^{286}Fl через первое ротационное состояние ядра ^{282}Cn.

При облучении ^{238}U интенсивность ^{48}Ca достигала 6,5 мкА·частиц, получено 16 цепочек распада ^{283}Cn. Во всей серии экспериментов измерены сечения реакций при разных энергиях ^{48}Ca, измерены свойства распада около 30 изотопов элементов от Lr до Mc.

Проведены эксперименты по синтезу изотопов Ds в реакции ^{232}Th + + ^{48}Ca. Их свойства важны для идентификации нового элемента 120 в реакциях ^{249}Cf(^{50}Ti, 3–4n)^{295,296}120 и ^{245}Cm(^{54}Cr, 3–4n)^{295,296}120, поскольку их α-распады ведут к изотопам ^{275,276}Ds. Кроме того, предсказанные барьеры деления продуктов реакции ^{232}Th + ^{48}Ca, которые характеризуют вероятность выживания возбужденных составных ядер, ниже барьеров указанных изотопов элемента 120. Уровень сечения реакции с ^{232}Th позволит точнее предсказать сечения образования изотопов элемента 120. Впервые было синтезировано 7 цепочек распада нового изотопа ^{276}Ds, α-распад которого привел к открытию еще двух изотопов: ^{272}Hs и ^{268}Sg. Достигнутый уровень чувствительности составил 70 фб. Также впервые был синтезирован ^{275}Ds в реакции ^{48}Ca с ядрами актинидного элемента и идентифицирован методом последовательных α-распадов, ведущих к известным ядрам ^{271}Hs, ^{267}Sg и ^{263}Rf, полученным ранее в реакции ^{248}Cm(^{26}Mg, 3n)^{271}Hs.

Впервые с 1983 г., когда были проведены первые эксперименты по синтезу изотопов Ds в прямых реакциях ^{40}Ar, ^{48}Ca с изотопами актинидных элементов (^{232}Th, ^{235,236,238}U), было измерено сечение реакции, которое оказалось на порядок меньше сечения реакции ^{226}Ra(^{48}Ca, 4n)^{270}Hs. При переходе к более тяжелым элементам ($Z > 110$) сечение растет (рис. 8), достигая максимального значения для элементов 114, 115, и затем уменьшается примерно в 30 раз для элемента 118. Такое изменение полностью согласует-

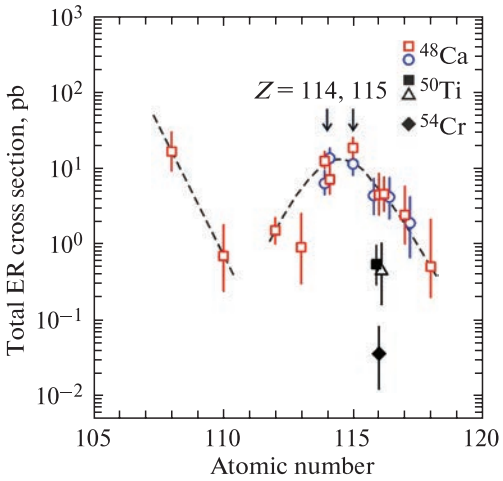


Рис. 8. Максимум сечения реакций ^{48}Ca + ^{226}Ra—^{249}Cf. Результаты, полученные в ЛЯР, показаны красными квадратами, результаты экспериментов с ^{50}Ti и ^{54}Cr — закрытыми символами, сечение реакции ^{244}Pu(^{50}Ti, 4n)^{290}Lv, измеренное в Беркли (США), — открытым треугольником

ся с теоретическими моделями, предсказывающими оболочки при $Z = 108$, $N = 162$ и $Z = 114$, $N = 184$. В реакции $^{238}U + ^{40}Ar$ зарегистрированы две цепочки распада изотопа ^{273}Ds с сечением 0,2 пб. Свойства ядер, полученных в реакциях $^{232}Th + ^{48}Ca$ и $^{238}U + ^{40}Ar$, свидетельствуют о существовании изомерных состояний у ^{267}Sg, ^{271}Hs, ^{273}Ds и его дочерних ядер.

Эти первые эксперименты продемонстрировали возросшую чувствительность экспериментов на Фабрике сверхтяжелых элементов и готовность к синтезу новых элементов 119 и 120. Для синтеза элементов с $Z > 118$ необходимо использовать ионы тяжелее ^{48}Ca, например ^{50}Ti, ^{51}V, ^{54}Cr, и выбрать оптимальные реакции синтеза новых элементов.

Процесс образования СТЯ в реакции слияния взаимодействующих ядер разделяется на три этапа: захват ядер, формирование почти сферического составного ядра и его выживание при девозбуждении путем испарения нейтронов. Целью исследований было измерение и сравнение сечений реакций полного слияния, приводящих к образованию одного и того же СТЯ при переходе от ^{48}Ca к ^{50}Ti и ^{54}Cr. Из-за близкой вероятности выживания возбужденного ядра в этом случае разница в сечениях реакции может быть в основном обусловлена разницей в вероятности формирования составного ядра — наименее изученной характеристике реакций слияния-испарения. Для этого были выбраны реакции $^{238}U + ^{54}Cr$ и $^{242}Pu + ^{50}Ti$, которые приводят к образованию составного ядра ^{292}Lv.

Сечения $3n$- и $4n$-каналов реакции $^{242}Pu + ^{50}Ti$, составившие около 320 и 220 фб, были измерены при энергии возбуждения ^{292}Lv $E^* = 41$ МэВ. Сечение $4n$ испарительного канала реакции $^{238}U + ^{54}Cr$, приводящей к образованию того же составного ядра, при $E^* = 42$ МэВ оказалось равным 36 фб, что примерно в 15 раз меньше, чем сечение реакции $^{242}Pu + ^{50}Ti$ (рис. 8). По сравнению с максимальным сечением образования ядер Lv в реакциях $^{245}Cm + ^{48}Ca$ и $^{248}Cm + ^{48}Ca$ сечения реакций $^{242}Pu + ^{50}Ti$ и $^{238}U + ^{54}Cr$ были примерно в 8 и 120 раз ниже соответственно. Однако если сравнить сечения реакций ионов ^{48}Ca, ^{50}Ti и ^{54}Cr с ^{244}Cm, ^{242}Pu и ^{238}U при близких энергиях возбуждения, уменьшение сечений составляет ~ 2–10 и ~ 30–150 раз при переходе от ^{48}Ca к ^{50}Ti и ^{54}Cr соответственно. Таким образом, впервые было убедительно доказано в эксперименте, что реакции изотопов актинидов с ^{50}Ti на порядок предпочтительнее реакций с ^{54}Cr для синтеза новых элементов 119 и 120.

В дополнение к измерению сечений реакций были открыты три новых изотопа: два α-распадающихся ядра ^{288}Lv (4 цепочки) с $E_\alpha = 11{,}08$ МэВ, $T_{1/2} = 2{,}0$ мс, ^{289}Lv (3 цепочки) с $E_\alpha = 10{,}90$ МэВ, $T_{1/2} = 2{,}4$ мс и внучка ^{289}Lv, спонтанно делящийся ^{280}Cn, с $T_{1/2} = 10$ мкс. Последний изотоп наблюдался после α-распада ^{284}Fl с $E_\alpha = 10{,}57$ МэВ; этот тип распада также наблюдался впервые для преимущественно спонтанно делящегося ^{284}Fl. Свойства распада этих новых ядер хорошо совпадают со значениями, которые можно было ожидать, исходя из систематик энергий и времен α-распада ядер, а также времен спонтанного деления (см. рис. 8).

ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ РАДИОАКТИВНОГО РАСПАДА ТЯЖЕЛЫХ И СВЕРХТЯЖЕЛЫХ ЯДЕР, ПОЛУЧАЕМЫХ В РЕАКЦИЯХ С УСКОРЕННЫМИ МНОГОЗАРЯДНЫМИ ИОНАМИ

В последние годы, с развитием экспериментальных методик физики тяжелых ионов, область ядер тяжелее фермия ($Z \geqslant 100$) стала доступна для детального изучения. Характеристики радиоактивного распада тяжелых и сверхтяжелых ядер, получаемых на высокоинтенсивных пучках многозарядных ионов циклотронов ЛЯР, дают представление о свойствах и пределах стабильности ядерной материи. С использованием сепараторов продуктов реакций полного слияния и широкого набора детектирующих сборок экспериментаторы ЛЯР значительно продвинулись в изучении свойств распада ядер из указанной области.

В 2004 г. на сепараторе ВАСИЛИСА были начаты эксперименты по детальному исследованию свойств радиоактивного распада и изучению структуры ядерных уровней изотопов трансфермиевых элементов. В сотрудничестве с группой физиков из институтов Франции (CSNSM (Орсэ) и IPHC (Страсбург)) на сепараторе ВАСИЛИСА была создана комбинированная детектирующая установка GABRIELA (Gamma Alpha Beta Recoil Investigations with the ELectromagnetic Analyzer).

С 2004 по 2009 г. на сепараторе ВАСИЛИСА и детектирующей системе GABRIELA были получены важнейшие данные по спектроскопии ^{249}Fm, ^{253,256}No, для короткоживущих изотопов ^{255}Lr, ^{253}No были впервые зарегистрированы распады из изомерных состояний (k-изомеры).

На новом сепараторе SHELS, который является результатом глубокой модернизации сепаратора ВАСИЛИСА в период с 2013 по 2024 г., эксперименты в рамках проекта GABRIELA привели к получению обширных спектрометрических данных. Впервые были идентифицированы k-изомерные состояния для ядер ^{255,256}No, ^{255}Rf. Для известных k-изомеров, в ядрах ^{256}Rf, ^{250}No, зафиксированы энергии возбуждения, спин и четность. Также для ядер ^{250,254}No скорректированы данные по запретам на деление из k-изомерных состояний. Для перечисленных и ряда других трансфермиевых ядер были построены схемы переходов, получены данные об одночастичных состояниях в ядрах, а также информация об октупольных моментах в возбужденных состояниях. Кроме того, для сильно нейтронодефицитного изотопа ^{249}No, впервые синтезированного в эксперименте на сепараторе SHELS в 2020 г., были измерены период полураспада ($T_{1/2} = (38{,}1 \pm 2{,}5)$ мс), энергия α-частиц ($E_\alpha = 9129$ кэВ), оценена вероятность спонтанного деления ($b_{SF} \leqslant 0{,}23\ \%$). Данные о распаде этого нового ядра в дальнейшем были подтверждены в эксперименте по изучению свойств распада ядра ^{253}Rf, являющегося материнским ядром для ^{249}No.

В настоящее время детектирующая система GABRIELA, включающая 5 HPGe-детекторов «клеверного» типа, применяется в экспериментах на Фабрике СТЭ — она размещена в фокальной плоскости газонаполненного сепаратора GRAND (ГНС-3).

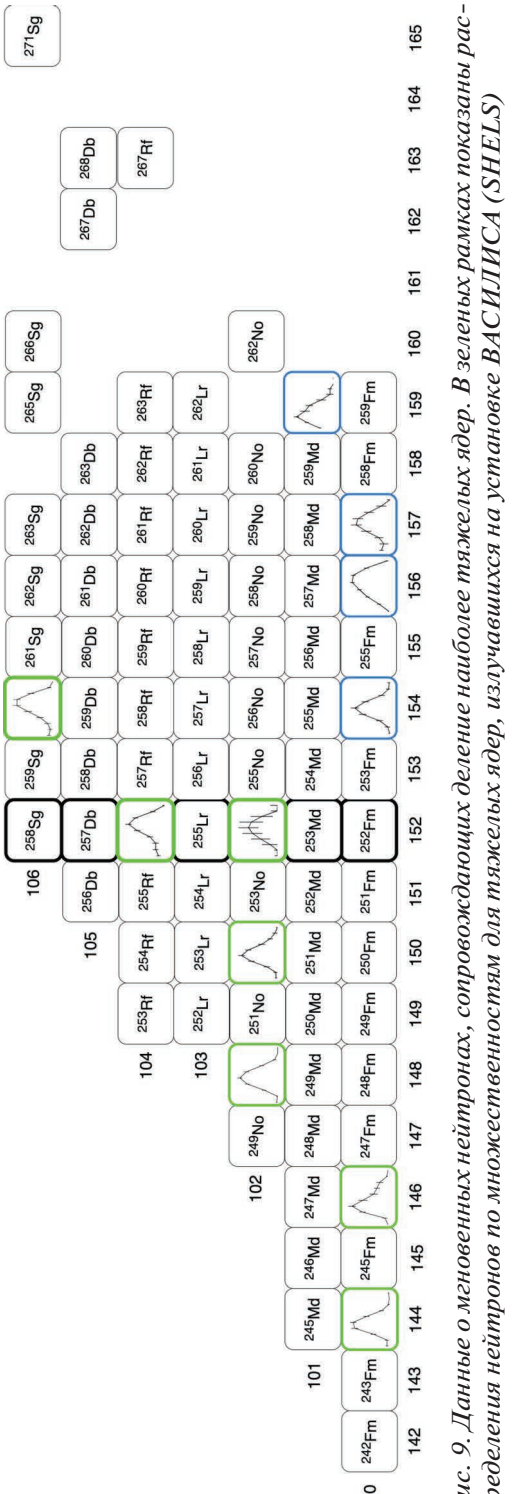


Рис. 9. Данные о мгновенных нейтронах, сопровождающих деление наиболее тяжелых ядер. В зеленых рамках показаны распределения нейтронов по множественностям для тяжелых ядер, излучавшихся на установке ВАСИЛИСА (SHELS)

Другим важнейшим направлением в рамках исследований свойств распада тяжелейших ядер является изучение свойств ядерного деления. Информация о спонтанном делении и делении слабовозбужденных тяжелых ядер содержит важнейшие данные о влиянии оболочечных эффектов на время жизни ядер, на формирование осколков деления.

При переходе в область тяжелейших ядер, и в особенности с приближением к деформированной оболочке $N = 162$, следует ожидать серьезных изменений в динамике деления, в процессе формирования осколков. Сечения образования ограничивают количество доступных для изучения ядер, а очень короткие времена жизни (до нескольких микросекунд) предъявляют серьезнейшие требования к технике эксперимента.

С 2002 г. в ЛЯР изучались характеристики спонтанного деления для короткоживущих ядер от Fm до Sg. Для них были измерены (уточнялись) парциальные периоды полураспада, оценивалась полная кинетическая энергия осколков, измерялось среднее число нейтронов на одно деление, а для некоторых ядер были построены распределения нейтронов по множественностям. В настоящее время эти эксперименты осуществляются на установке SHELS совместно с детектирующей системой SFiNX (Spontaneous Fission, Neutrons and X-rays). SFiNX включает в себя 116 нейтронных счетчиков, смонтированных вокруг вакуумной камеры фокального ППД, выполненного в форме колодца. Данные о мгновенных нейтронах, сопровождающих деление наиболее тяжелых ядер, представлены на рис. 9.

Проводимые в ЛЯР эксперименты по изучению структуры уровней изотопов от No до Db являются хорошей методической базой при подготовке исследований структуры изотопов Fl, Lv и Mc.

Помимо спектроскопической информации о структуре ядер в области СТЭ, при наборе достаточной статистики (несколько сотен событий) появляется возможность детального изучения свойств радиоактивного распада изотопов, находящихся в цепочках распада материнских ядер СТЭ. К примеру, до сих пор остается открытым вопрос о свойствах распада изотопа ^{268}Db, конечного ядра в цепочке распада изотопа ^{288}Mc. Теоретические расчеты показывают, что ^{268}Db с высокой степенью вероятности может испытывать слабый распад (электронный захват), а спонтанное деление испытывает изотоп ^{268}Rf с периодом полураспада несколько секунд (сейчас считается, что фиксируемое в цепочке деление относится к ^{268}Db). В этом случае необходима регистрация рентгеновского кванта с энергией 120–140 кэВ в корреляции со спонтанным делением, что позволит достоверно определить свойства распада изотопов Db–Rf, расположенных в этой слабоизученной области таблицы изотопов.

В то же время статистика в несколько сотен событий делает возможным изучение динамики спонтанного деления ядер Db–Rf с атомной массой $A = 268$. При формировании осколков ядерной системе будет энергетически выгодно поделиться на два близких по массе осколка с «околомагическим» числом нуклонов ($Z = 50$, $N = 82$). Это неизбежно приведет к появлению мощной симметричной компоненты в распределении осколков по массе,

что отразится на ТКЕ и эмиссии нейтронов. Изучение этих характеристик стало доступно с размещением детектирующей системы SFiNX в фокальной плоскости сепаратора GRAND на Фабрике СТЭ.

ХИМИЯ СТЭ

С началом реализации в 2000-е гг. программы по синтезу сверхтяжелых элементов на ускорителях тяжелых ионов изучение физико-химических свойств новых элементов возглавил С. Н. Дмитриев. Он организовал сотрудничество с коллегами из ведущих ядерно-химических научных центров. В результате международному коллективу удалось впервые наблюдать проявления релятивистских эффектов в химических свойствах сверхтяжелых элементов. Проведенные в Дубне эксперименты получили широкий резонанс и позволили сформулировать новое научное направление — релятивистскую химию сверхтяжелых элементов. Выполненные С. Н. Дмитриевым с сотрудниками эксперименты по выделению дубния как продукта распада элемента 115 обеспечили независимое доказательство синтеза нового элемента. Это послужило весомым обоснованием заявки на открытие в ОИЯИ новых элементов Периодической таблицы элементов Д. И. Менделеева с атомными номерами 113, 115 и 117, поданной в Международный союз теоретической и прикладной химии.

С. Н. Дмитриев

Рождение нового элемента всегда вызывает большой интерес при изучении электронной структуры тяжелого атома и его химического поведения. До недавнего времени основное внимание уделялось изучению элементов 104–108. Например, эксперименты по изучению химических свойств таких элементов, как сиборгий (106), борий (107) и хассий (108), показали, что они ведут себя в соответствии со своим положением в Периодической

таблице Д. И. Менделеева (группы 6, 7 и 8 соответственно). Однако химические свойства сверхтяжелых элементов могут сильно отличаться от того, что ожидается исходя из их положения в Периодической таблице. Согласно квантовой электродинамике, структура атома как положительно заряженного центра и отрицательно заряженных электронов, движущихся вокруг ядра на больших расстояниях, стабильна до $Z = 173, 174$. Сверхтяжелые элементы, синтезированные за последние двадцать лет, еще далеки от этого предела. Однако по мере увеличения атомного номера тяжелого атома приближение скорости внутренних электронов к скорости света приводит к «релятивистскому сжатию» их орбит. Это меняет квантовые характеристики всей электронной структуры атома, включая последние электроны, отвечающие за химические свойства элемента. Быстрый рост релятивистского эффекта с увеличением Z будет приводить к все более сильным отклонениям от классического (нерелятивистского) случая. Значительные изменения химического поведения элементов ожидаются уже при заполнении VIII ряда Периодической таблицы Д. И. Менделеева.

Сверхтяжелые элементы, как правило, обладают малыми временами жизни, что существенно затрудняет изучение их химических свойств.

Элемент коперниций, открытый в 1996 г. в GSI (Дармштадт, Германия), был синтезирован в виде изотопа с массовым числом 277 в реакции слияния ^{70}Zn с ^{208}Pb, но его чрезвычайно короткий период полураспада (около 200 мс) делал химическое исследование невозможным. В 1999 г. в ЛЯР были синтезированы новые изотопы коперниция (Cn) и флеровия (Fl) в реакциях слияния ^{48}Ca с ^{238}U и ^{242}Pu. Для изотопа ^{283}Cn период полураспада составил около 3 секунд с распадом через спонтанное деление. Более поздние эксперименты в ЛЯР в 2004 г. выявили другие свойства для ^{283}Cn: распад через испускание альфа-частиц (9,5 МэВ) и период полураспада около 4 секунд, после чего следует спонтанное деление.

Относительно большие времена жизни изотопов Cn и Fl делают их самыми тяжелыми элементами Периодической таблицы Д. И. Менделеева, доступными в настоящее время для изучения химических свойств. Уникальные возможности химических исследований практически всех элементов 7-го периода Таблицы Менделеева появились только после синтеза в Дубне 17 изотопов сверхтяжелых элементов с $Z = 112–118$.

В первом эксперименте, проведенном в ЛЯР в 2007 г., исследовалась пара гомологов 12-й группы Таблицы Д. И. Менделеева. Измерялась адсорбция Cn ($Z = 112$) и Hg ($Z = 80$) на поверхности золота (Au) при различной температуре на предмет наблюдения температурного различия в образовании соединений [Au-Hg] и [Au-Cn]. Смещение пика адсорбции в область более низких температур (ослабления молекулярной связи [Au-Cn] по отношению к [Au-Hg]) было первым прямым экспериментальным наблюдением релятивистского эффекта в трансактинидах. Тем не менее по результатам этого эксперимента тяжелый гомолог ртути в 12-й группе Таблицы Менделеева продемонстрировал свою принадлежность семейству благородных металлов, хотя не исключено, что при комнатной температуре он будет не жидким, как ртуть, а газообразным.

Первые эксперименты с элементом Fl ($Z = 114$) также были проведены в ЛЯР. Было обнаружено, что Fl в атомарном состоянии летуч и образует с поверхностью золота слабую адсорбционную связь. Более того, летучесть Fl оказалась выше, чем у Cn: он адсорбируется на поверхности золота при температуре около –80 °C подобно благородным газам. В 2010 г. аналогичное исследование было проведено в GSI (Дармштадт, Германия). К сожалению, малое количество событий в обоих экспериментах не позволяет получить количественную картину при переходе от Cn к Fl.

ИЗУЧЕНИЕ ДИНАМИКИ И МЕХАНИЗМОВ РЕАКЦИЙ С ТЯЖЕЛЫМИ ИОНАМИ ПРИ ЭНЕРГИЯХ ВБЛИЗИ КУЛОНОВСКОГО БАРЬЕРА

Исследование ядер, удаленных от линии стабильности, является одной из основных задач современной ядерной физики. Получение ядер вблизи «острова стабильности» и изучение их свойств представляют особый интерес. Согласно теоретическим предсказаниям, «остров стабильности» ожидается вблизи нейтронной оболочки при $N = 184$ и протонной оболочки при $Z = 114$ или $Z = 120–126$. Самым тяжелым искусственным элементом является оганесон (^{294}Og) с $Z = 118$, полученный в реакции полного слияния ^{48}Ca + ^{249}Cf. Для дальнейшего изучения «острова стабильности» необходимо синтезировать более тяжелые ядра с $Z > 118$. К сожалению, эти ядра не могут быть получены в реакциях с ионами ^{48}Ca, поскольку ^{249}Cf является самым тяжелым материалом-мишенью, доступным для этих целей.

На первый взгляд, использование ионов, таких как Ti, Cr, Fe или Ni, в реакциях полного слияния с ядрами-актинидами позволяет получать более тяжелые элементы. Однако увеличение кулоновского отталкивания между взаимодействующими ядрами приводит к подавлению сечения образования составного ядра (CN) процессами квазиделения и глубоконеупругих передач. Квазиделение (QF) и реакции глубоконеупругих передач — это бинарные процессы с полной передачей импульса, при которых составная система делится после захвата на два фрагмента без образования составного ядра. Квазиделение является основным механизмом, который препятствует образованию сверхтяжелых элементов при слиянии тяжелых ядер, а его вероятность сильно зависит от свойств входного канала реакции, таких как кулоновский фактор Z_1Z_2, массовая асимметрия, усредненный параметр делимости, деформация взаимодействующих ядер, энергия взаимодействия и вносимый угловой момент.

Экспериментальное изучение механизмов реакций с тяжелыми ионами проводится в Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флёрова на установке CORSET, которая представляет собой многоплечевой времяпролетный спектрометр, обладающий широким спектром возможностей с точки зрения регистрации продуктов реакций. Наиболее часто применяется двухплечевая комбинация спектрометра, позволяющая регистрировать одновременно оба фрагмента бинарного процесса. Исходя из поставленной задачи,

Детекторы, установленные в реакционной камере CORSET, для экспериментов по изучению реакций многонуклонных передач

с помощью спектрометра могут быть реализованы разные методики измерений, а именно: 2V-методика, в которой измеряются только времена пролета двух фрагментов реакции, и V–E-методика, в которой помимо времени пролета измеряется энергия каждого фрагмента. Принципиальная разница между этими двумя методиками заключается в том, что в случае 2V-метода результатом является получение масс первичных фрагментов, т. е. фрагментов до испускания ими нейтронов, тогда как в случае V–E-метода получаются массы вторичных фрагментов, т. е. после испускания нейтронов. С помощью спектрометра CORSET можно изучать как свойства осколков спонтанного деления, так и фрагментов реакций слияния-деления, квазиделения, глубоконеупругого рассеяния, называемых также реакциями многонуклонных передач (MNT).

Для исследования вероятности образования и распада составных систем с $80 \leqslant Z \leqslant 122$, образующихся в реакциях с ионами ^{36}S, ^{36,40}Ar, ^{40,48}Ca, ^{48,50}Ti, ^{52,54}Cr, ^{58}Fe и ^{64}Ni, в зависимости от свойств входного канала с помощью установки CORSET был проведен большой цикл работ по изучению характеристик массово-энергетических распределений бинарных делительноподобных фрагментов реакций. Анализ полученных массово-энергетических распределений позволил оценить вероятности слияния в широком диапазоне изменения кулоновского фактора Z_1Z_2 — от 1152 до 2700.

Изменения свойств массово-энергетических распределений делительноподобных фрагментов, обнаруженные в данных исследованиях, указывают на значительное увеличение процесса квазиделения в реакциях с иона-

ми Ti и Cr (для ядерных систем с $Z_1Z_2 > 2000$) по сравнению с ионами Ca. Это приводит к уменьшению сечения образования CN на один (для ионов Ti) и два (для ионов Cr) порядка величины по сравнению с реакциями с ионами ^{48}Ca. Также было обнаружено, что среднее время взаимодействия ионов Ni и Zn с ядрами-актинидами ($Z_1Z_2 > 2500$) уменьшается в 2–3 раза по сравнению с реакциями с ионами Ti и Cr, что приводит к резкому уменьшению сечения QF и доминированию реакций малонуклонных передач и глубоконеупругого рассеяния.

Полученные вероятности образования составного ядра в реакциях холодного и горячего слияния представлены на рис. 10. Установлено, что вероятность слияния падает примерно на три порядка при переходе от реакции ^{48}Ca + ^{238}U к реакции ^{54}Cr + ^{248}Cm и более чем в 10^5 раз при переходе к реакции ^{68}Zn + ^{232}Th. На основании полученного значения вероятности слияния для реакции ^{54}Cr + ^{248}Cm ожидается, что сечение образования сверхтяжелого элемента с $Z = 120$ составит несколько фемтобарн. В случае реакций ^{64}Ni + ^{238}U и ^{68}Zn + ^{232}Th сечения образования на один и два порядка меньше, чем в реакции ^{54}Cr + ^{248}Cm, соответственно (рис. 10).

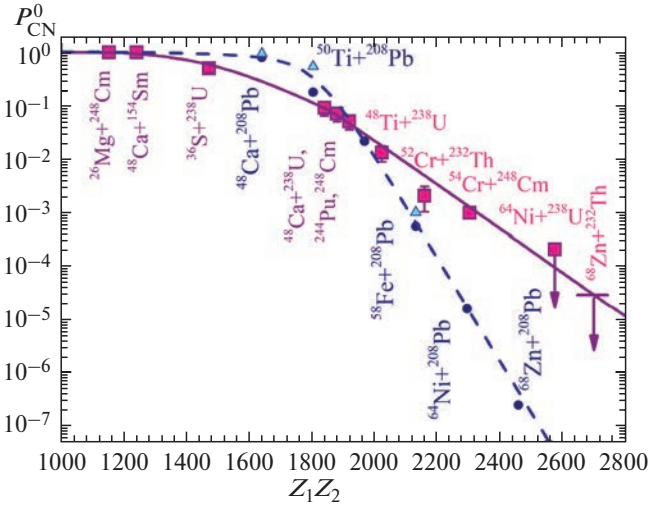


Рис. 10. Вероятность образования составного ядра в реакциях холодного и горячего синтеза при энергиях на 5 % выше кулоновского барьера в зависимости от кулоновского фактора Z_1Z_2

К сожалению, реакции полного слияния приводят к образованию изотопов трансурановых элементов с числом нейтронов меньше 184, в окрестности которого предсказывается «остров стабильности». Альтернативным методом получения этих ядер является применение реакций MNT, которые приводят к образованию снарядоподобного (PLF) и мишенеподобного (TLF) фрагментов с полной передачей импульса. Согласно теоретическим расчетам ионы ^{238}U являются наилучшими бомбардирующими частицами для получения сверхтяжелых элементов в реакциях MNT. Однако даже в случае реакций с более легкими ионами, такими как ^{48}Ca, ^{136}Xe или ^{209}Bi,

можно получить новые изотопы элементов с $Z > 100$ вблизи нейтронной оболочки $N = 162$, изучение свойств которых представляет особый интерес.

В связи с этим всестороннее изучение процесса MNT в реакциях с более легкими ионами чрезвычайно важно для более глубокого понимания его механизма и наилучшего планирования будущих экспериментов по получению новых тяжелых изотопов в таких реакциях. Поскольку последовательное деление тяжелых TLF более вероятно, чем их выживание в результате девозбуждения, необходима экспериментальная идентификация двух фрагментов (PLF + TLF) и трех фрагментов (PLF + оба фрагмента последовательного деления TLF).

Для экспериментального изучения свойств фрагментов процессов MNT, таких как сечения их образования, энергии возбуждения и вероятности выживания, в реакциях ^{136}Xe + ^{238}U при энергии пучка ^{136}Xe 1,11 ГэВ и ^{209}Bi + ^{238}U при энергии пучка ^{209}Bi 1,85 ГэВ с помощью установки CORSET были измерены первичные и вторичные массовые и энергетические распределения PLF в совпадении либо с выжившими TLF, либо с обоими фрагментами последовательного деления возбужденных TLF. Впервые были проведены измерения трехтельных событий, образующихся в реакции MNT. Это позволило восстановить первичное массовое распределение поделившихся MNT фрагментов.

Сравнение первичных массовых распределений выживших и поделившихся тяжелых фрагментов многонуклонных передач показало, что вероятность выживания уменьшается с увеличением их массы и для фрагментов с массой 255 а.е.м. составляет около $1{,}8 \cdot 10^{-3}$ для реакции ^{136}Xe + ^{238}U и $1{,}9 \cdot 10^{-2}$ для реакции ^{209}Bi + ^{238}U. Наиболее тяжелые фрагменты, наблюдаемые в массовом распределении поделившихся фрагментов процессов MNT с сечением в несколько сотен микробарн, имеют массу около 265 а.е.м. ($Z \approx 103$, изотопы Lr) в реакции ^{136}Xe + ^{238}U и 284 а.е.м. ($Z \approx 111$, изотопы Rg) в реакции ^{209}Bi + ^{238}U. Таким образом, при примерно одинаковых параметрах входного канала реакции (энергия над барьером реакции, внесенный угловой момент) передача нуклонов от ядра-снаряда к ядру-мишени при взаимодействии урана с висмутом на 19 нуклонов больше, чем при взаимодействии с ионами ксенона. К сожалению, значения энергии возбуждения для этих сверхтяжелых фрагментов ($M \approx 280$–284 а.е.м.), оцененные из измеренных кинетических энергий этих фрагментов, составляют около 150–200 МэВ, что значительно затрудняет их выживание в процессе девозбуждения.

В последнее десятилетие активно изучается деление преактинидных ядер. Хотя асимметричное деление преактинидов вблизи линии β-стабильности известно с конца 1980-х гг., недавнее наблюдение асимметричного деления нейтронодефицитного изотопа ^{180}Hg привело к переосмыслению этого процесса.

С помощью двухплечевого времяпролетного спектрометра CORSET были измерены массовые и энергетические распределения осколков деления нейтронодефицитных ядер ^{178}Pt, ^{180,182,183,190}Hg, образующихся в реакциях ^{36}Ar + ^{142}Nd, ^{144,154}Sm, ^{40}Ca + ^{142,143}Nd, ^{144,154}Sm, и ^{184,192,202}Pb, образующихся в реакциях ^{40,48}Ca + ^{144,154}Sm. Массовые распределения осколков

Группа CORSET. Слева направо: К. В. Новиков, А. А. Богачев, Н. И. Козулина, Г. Н. Княжева, И. В. Пчелинцев, Р. С. Тихомиров, И. В. Воробьев, Ю. М. Иткис, Е. О. Савельева. В центре — Э. М. Козулин. 2023 г.

деления ^{180,190}Hg, ^{184,192,202}Pb были проанализированы в рамках мультимодального подхода, успешно примененного для описания деления актинидов. Обобщенный анализ измеренных экспериментальных данных, а также имеющихся данных для ядер этой области, таких как ^{187}Ir, ^{195}Au, ^{198}Hg, ^{201}Tl, ^{205,207}Bi, ^{210}Po и ^{213}At, позволили более точно определить числа протонов и нейтронов, влияющие на свойства модального деления в области свинца. Впервые было показано, что при делении этих ядер стабилизирующую роль играют протонные числа $Z = 36$ и $Z = 45$, тогда как влияния нейтронных оболочек на формирование фрагментов деления не обнаружено.

В делении тяжелых актинидных ядер ^{248}Cf и ^{254,256}Fm, полученных в реакциях ^{16}O + ^{232}Th и ^{16,18}O + ^{238}U, также было обнаружено проявление структуры при $Z = 38$, к тому же фрагменты с $Z = 45$ являются дополнительными легкими осколками для асимметричной моды в области масс 142 а. е. м. Это позволяет сделать вывод об универсальности протонных оболочек в делении преактинидных и актинидных ядер.

Эти исследования проводились группой CORSET под руководством Э. М. Козулина.

ФИЗИКА ЭКЗОТИЧЕСКИХ ЯДЕР

Использование радиоактивных пучков (RIB) является эффективным методом для изучения экзотических ядерных систем, далеких от линии β-стабильности. Экспериментальная программа по изучению относительно легких ($Z \leqslant 20$) экзотических ядерных систем с избытком нейтронов или протонов в ЛЯР реализуется на фрагмент-сепараторах ACCULINNA-1 и ACCULINNA-2, установленных на первичном пучке тяжелых ионов циклотрона У-400М (рис. 11). Энергия вторичных пучков ~ 20–40 МэВ/нуклон позволяет заселять спектры возбуждения легких ядер в реакциях малону-

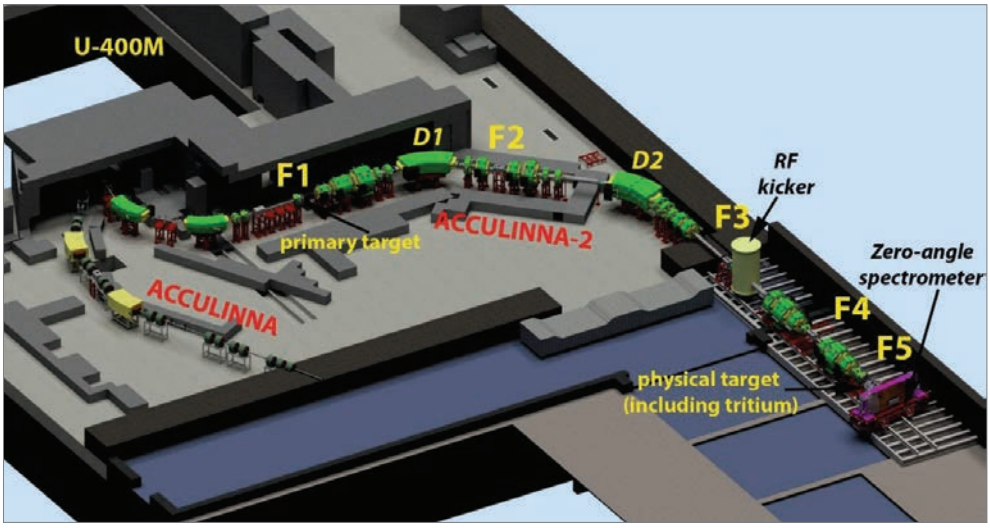


Рис. 11. Схема расположения фрагмент-сепараторов на циклотроне У-400М

клонных передач с достаточно высоким сечением от нескольких мкб/ср до 1 мб/ср. Эксперименты, выполненные на этих установках, были направлены, в частности, на изучение структуры нейтроноизбыточных ядер $^{4-7}$H, $^{6-10}$He, $^{9-13}$Li, $^{10-16}$Be или протоноизбыточных ядер ^{6}Be, ^{17}Ne, ^{26}S и других нестабильных систем[2]. Текущие и ближайшие цели научно-исследовательской работы показаны на рис. 12. Исследования охватывают область легких ядер, где реакции передач являются эффективным инструментом для исследования границ нейтронной или протонной стабильности.

Примерами успешных экспериментов, ранее посвященных изучению тематики 1*n*- и 2*n*-излучателей за пределами нейтронной границы стабильности, являются исследования нейтронных распадов некоторых состояний в ^{5}H, ^{8}He, ^{9}He и ^{10}He. Уточненные данные[3] по реакции ^{3}H(^{8}He, *p*)^{10}He, полученные на сепараторе ACCULINNA-1, подтвердили результаты, представленные ранее[4]. Новые данные указали на то, что положение резонанса основного состояния ^{10}He находится при (2,1 ± 0,2) МэВ выше порога трехчастичного распада на ^{8}He + *n* + *n*, а также на существование состояний-интрудеров и на нарушение закономерности заполнения оболочек в спектре ^{10}He (как результат измененного спин-орбитального взаимодействия). Эти закономерности, как ожидается, будут распространяться на другие похожие системы.

В первых экспериментах на установке ACCULINNA-2 недавно были получены новые сведения об основных и возбужденных состояниях изотопов 4*n*, ^{6}H и ^{7}H. В частности, была подробно изучена система из четырех нейтронов в виде низколежащего резонансного состояния при энергии около

[2] *Fomichev A. S. et al.* // Eur. Phys. J. A. 2018. V. 54. P. 97.
[3] *Sidorchuk S. I. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2012. V. 108. P. 202502.
[4] *Golovkov M. S. et al.* // Phys. Lett. B. 2009. V. 672. P. 22.

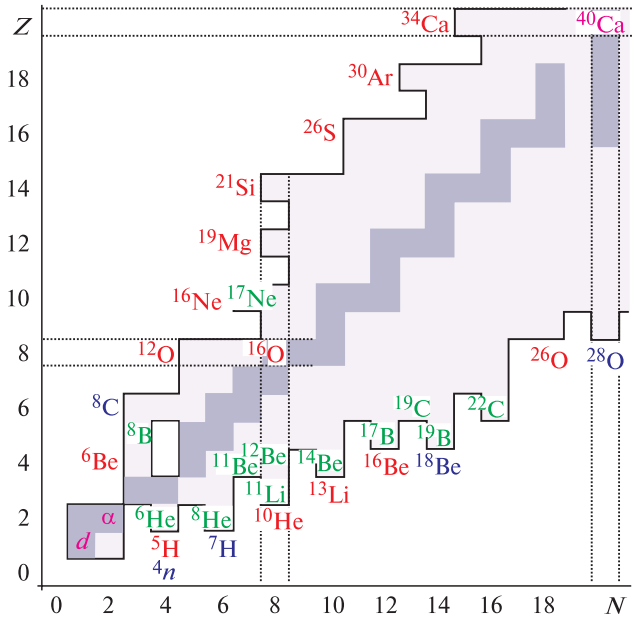


Рис. 12. Самые легкие экзотические ядра на карте нуклидов. Границы нуклонной стабильности представлены толстыми сплошными линиями. Долина стабильности выделена темным тоном

3,5 МэВ. Это является одним из ключевых результатов экспериментальной кампании 2018–2020 гг., полученных в ядерных реакциях ^{2}H(^{8}He, ^{6}Li)4n и ^{2}H(^{8}He, ^{3}He)^{7}H* $\rightarrow$ ^{3}H + 4n при энергии пучка ^{8}He 26 МэВ/нуклон. Теоретическая интерпретация наблюдаемого спектра 4n с использованием метода гиперсферических гармоник для волновой функции ^{8}He указывает на сильную периферическую природу процесса и на то, что основной вклад в появление пика вносят состояния в волновой функции ^{8}He с гипермоментом $K = 2$. Было продемонстрировано (рис. 13), что положение резонанса при $E_T(4n) \sim 3–5$ МэВ устойчиво только в случае периферического механизма реакции со специфическими корреляциями нейтронов в источнике ^{8}He и только для диапазона переданных импульсов $q_\alpha \sim 150–350$ МэВ/c.

Исследование нейтроноизбыточного ядра ^{6}H, образующегося в реакции ^{2}H(^{8}He, ^{4}He)^{6}H, проводилось на основе анализа двойных ^{4}He-t и тройных ^{4}He-t-n совпадений. В энергетическом спектре ^{6}H наблюдалась структура, соответствующая низколежащим состояниям ^{6}H при ~ 6,5 МэВ, а нижняя граница для положения основного состояния ^{6}H была установлена на уровне ~ 4,5 МэВ. Спектр ^{5}H был реконструирован как результат распада ^{6}H, т. е. ^{6}H $\rightarrow$ ^{5}H(g.s.) + n $\rightarrow$ ^{3}H + 3n, и сделан аналогичный вывод об отсутствии низколежащего состояния ^{6}H в области $E < 3,5$ МэВ.

На основании результатов работы, посвященной поиску низколежащих состояний ^{7}H в реакции ^{2}H(^{8}He, ^{3}He)^{7}H, сделаны следующие основные заключения: 1) положение основного состояния ^{7}H (предположительно $1/2^{+}$) определяется как 2,2(5) МэВ выше порога распада на ^{3}H + 4n с шириной,

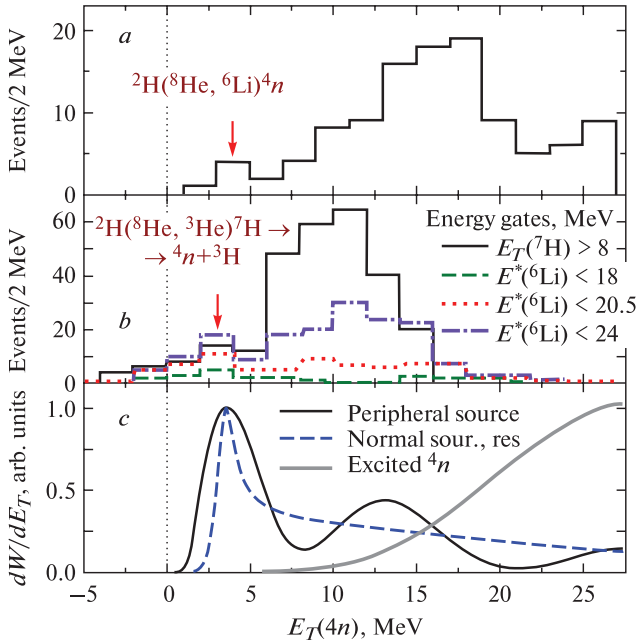


Рис. 13. Сравнение экспериментальных данных (a, b) с теоретическими результатами (c), выполненное для переданного импульса q_α = 250 МэВ/с и с учетом крайне периферического механизма реакции (черная кривая)

определяемой экспериментальным разрешением ~ 1 МэВ; 2) наблюдается дублет (предположительно $5/2^+$–$3/2^+$) относительно узких состояний при энергиях 5,5(3) и 7,5(3) МэВ; 3) достаточно низкое сечение заселения основного состояния ^{7}H (~ 25 мкб/ср) объясняется крайне периферическим характером взаимодействия в канале ^{8}He + d.

На рис. 14 показана новая систематика уровней тяжелых изотопов ^{4}H–^{7}H и их возможные схемы распада. Можно сделать вывод о том, что распад основного состояния ядра ^{7}H возможен с одновременным испусканием четырех нейтронов, т. е. это «истинный» пятичастичный распад $^7\text{H} \to {}^3\text{H} + 4n$. Это первый доказанный случай существования такой моды ядерного распада.

Следующее уникальное исследование на фрагмент-сепараторе ACCULINNA-2 было посвящено системе ^{7}He, которая изучалась в реакции ^{2}H(^{6}He, ^{1}H)^{7}He при энергии пучка ^{6}He 29 МэВ/нуклон. Анализ экспериментальных данных проводился на основе дисперсионной теории ядерных реакций[5]. Было показано, что наблюдаемая асимметрия углового распределения распада ^{7}He может быть объяснена наличием в спектре низколежащего состояния $1/2^+$. Состояние положительной четности в спектре возбуждения ^{7}He наблюдалось впервые.

[5] *Golovkov M. S. et al.* // Phys. Rev. C. 2024. V. 109. L061602.

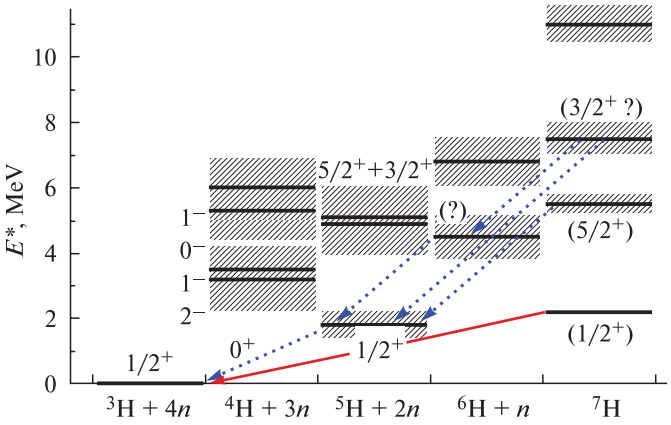


Рис. 14. Систематика уровней тяжелых изотопов ^{4}H–^{7}H и их возможные схемы распада

Будущие исследования систем 4n, $^{5-7}$H, ^{7}He, а также более тяжелых нейтроноизбыточных изотопов (^{10,12}He, $^{10-13}$Li, $^{12-16}$Be и т. д.) предусматриваются с использованием разработанной новой детекторной техники (см. рис. 15). Исследования будут включать точное определение масс этих ядер в основном и возбужденных состояниях. Реакции передачи типа (d, ^{3}He), (t, α), (t, p) и (d, p), изучаемые в обратных кинематических условиях, являются наиболее подходящими для этих целей. Высокая статистика данных и достаточно хорошее энергетическое разрешение будут доступны для полных кинематических измерений при изучении резонансных состояний этих малоизученных ядер.

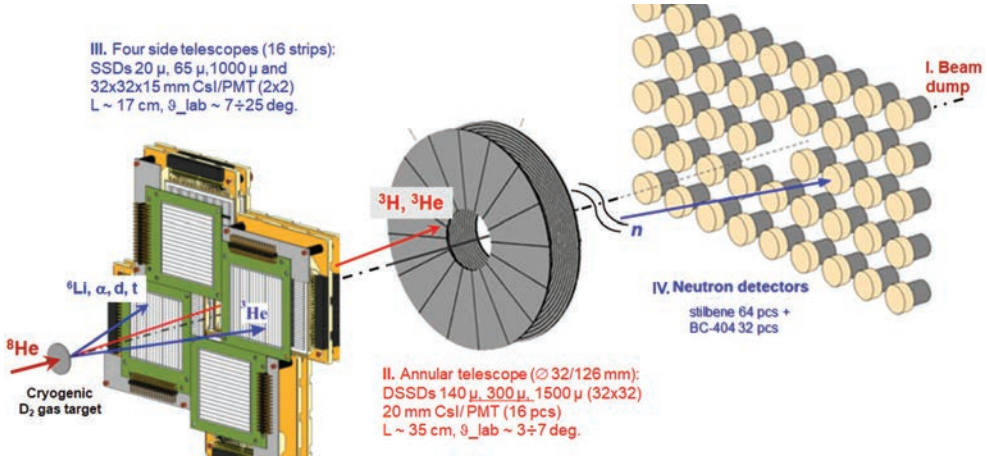


Рис. 15. Усовершенствованная установка для точного изучения спектров возбуждения и схем распада экзотических ядер. Она будет включать новый кольцевой телескоп, дополнительные слои в боковых телескопах (Si 65 мкм и массив CsI) и вдвое большее количество нейтронных модулей

Установка мишени в реакционную камеру. М. С. Головков, С. А. Крупко, А. С. Фомичев

В настоящее время (с 2024 г., после завершения модернизации циклотрона У-400М) фрагмент-сепаратор ACCULINNA-2 дооснащен рядом дополнительных инструментов с целью продолжения экспериментов с радиоактивными пучками на качественно новом уровне. Вертикально отклоняющий траектории частиц радиочастотный фильтр (ВЧ-фильтр) установлен сразу за ахроматической фокальной плоскостью F3 (см. рис. 11), обеспечивая дополнительную очистку вторичного пучка, что особенно важно для протоноизбыточных ядер. ВЧ-фильтр имеет максимальную амплитуду электрического поля 15 кВ/см и частоту в диапазоне 15–22 МГц. Использование ВЧ-фильтра позволяет очищать вторичные пучки протоноизбыточных ядер примерно в 20–50 раз. Для надежного разделения заряженных продуктов реакции за физической мишенью в фокальной плоскости F5 установлен спектрометр фрагментов, вылетающих под малыми углами. Это значительно улучшит общее энергетическое разрешение экспериментов при условии регистрации всех продуктов, включая пучковоподобные фрагменты, и обеспечит разделение заряженных частиц от нейтронов. К 2026 г. ожидается ввод в эксплуатацию уникального криогенного комплекса газовых мишеней, который обеспечит безопасную работу с тритием в газообразном или жидком состоянии. Эта методика весьма полезна для изучения ядер вблизи нейтронной границы стабильности. Было показано, что реакции передачи двух нейтронов при взаимодействии радиоактивного пучка и криогенной мишени, являются эффективным инструментом в изучении нейтроноизбыточных ядер ^{5}H, ^{8}He, ^{10}He. Дальнейшие эксперименты такого рода будут возможны с жидкой тритиевой мишенью толщиной до 1,3 мм.

Ниже приведены основные результаты, полученные на установке ACCULINNA-1 в 2005–2018 гг.

Была проведена значительная серия экспериментов с использованием корреляционных методов в реакциях передач, в которых были измерены спектры возбуждения в нескольких экзотических ядрах, например ^{5}H, ^{9}He и ^{6}Be. Интерпретация наблюдаемых корреляций может быть уникальной, как это было, например, со спектром ^{9}He, заселенного в реакции (d, p) на пучке ^{8}He. Особенностью этого подхода является некая «нестабильность», поскольку результат зависит от деталей механизма реакции и спектральных плотностей различных состояний, которые невозможно предсказать заранее.

Исследование мягкой моды возбуждения, проявляющейся в спектре ^{8}He, демонстрирует, насколько глубоко можно проникнуть в механизм этого возбуждения, создаваемого низкочастотными колебаниями нейтронного гало относительно ядерного кора. В частности, возможная природа околопороговой аномалии выше 2,14 МэВ в спектре недостающей массы ^{8}He была объяснена заселением 1^{-}-континуума (мягкое дипольное возбуждение) с пиковым значением энергии около 3 МэВ.

Корреляционные измерения и полные кинематические исследования, обсуждавшиеся выше, являются наиболее распространенными средствами для изучения кластерного аспекта ядерной динамики. Здесь следует особо подчеркнуть важность оптической время-проекционной камеры (OTPC — Optical Time Projection Chamber). Она дает возможность проводить полные кинематические измерения в экспериментах, в которых скорости счета «полезных» событий составляют всего лишь единицы или десятки. Это важно для исследований экзотических ядерных систем, образующихся в малых количествах в единицу времени. Ряд экспериментов, связанных с отладкой методики время-проекционной камеры, был проведен на сепараторе ACCULINNA-1. Полученные доказательства нейтронной эмиссии после β-распада ^{8}He в высоковозбужденное состояние ^{8}Li указывают на то, что ранее представленная схема распада ^{8}He не является полной. Применение время-проекционной камеры OTPC открыло уникальные возможности для изучения редких ветвей распада, например, возбужденного ядра ^{8}He по схемам $\alpha + t + n$, ^{7}Li + n, ^{6}He + d или бета-задержанной эмиссии одного и двух протонов изотопов ^{26}P и ^{27}S.

Другое направление для изучения кластерной структуры касается состояний в ^{6}He со структурой $t + t$ и возможной кластеризацией ^{5}H + t для ^{8}He. Реакции квазисвободного рассеяния (QFS) особенно чувствительны к кластерному аспекту ядерной структуры. В этом классе реакций выбор канала квазисвободного выбивания явно определяет кластерное разбиение изучаемого ядра. Реакции квазисвободного рассеяния могут быть эффективно применены для дальнейшего определения гало-структуры в ^{6}He, ^{8}He и других экзотических ядрах. В то время как в QFS обычно выбивается валентный нуклон, в работе[6] был исследован процесс (α, 2α), т. е. выбивание альфа-кора из ядра ^{6}He, что также важно для прояснения различных аспектов ядерной структуры.

[6] *Sidorchuk S.I. et al.* // Nucl. Phys. A. 2010. V. 840, No. 1.

Группа ACCULINNA-2 (слева направо): Г. М. Тер-Акопьян, С. И. Сидорчук, А. Сериков, А. В. Горшков, Д. А. Костылева, А. С. Фомичев, Р. С. Слепнев, В. Худоба, П. Плучински, С. А. Рымжанова, П. Г. Шаров, А. Г. Князев, С. А. Крупко. 2015 г.

Граница протонной стабильности довольно хорошо известна для ядер с $Z \leqslant 36$. Только несколько изотопов, остающихся неизвестными в этой области, могли существовать с периодами полураспада, достаточно большими для того, чтобы их обнаружили по времени пролета в финальной фокальной плоскости фрагмент-сепаратора. Группа ACCULINNA провела специальный поиск ядра на границе стабильности ^{26}S, полученного при фрагментации ядер пучка ^{32}S. В этом исследовании для ^{26}S был установлен предел периода полураспада $T_{1/2} < 79$ нс.

Двухпротонный радиационный захват по пути rp-процесса пока изучен недостаточно детально. Так называемая точка ожидания для ^{15}O важна для прохождения rp-процесса. Двухпротонный захват является возможной альтернативой реакции (α, p) как пути для rp-процесса, позволяющей искать слабую ветвь распада 2p первого возбужденного состояния $3/2^-$ в ^{17}Ne. Распад этого состояния происходит через испускание γ-квантов, однако теоретически двухпротонный распад не запрещен на уровне $\Gamma_{2p}/\Gamma_\gamma \approx 10^{-5}$–$10^{-6}$. Это предположение пока не подтверждено экспериментально, но может быть проверено в дальнейшем при использовании интенсивных радиоактивных пучков $Z = 8$–10 на установке ACCULINNA-2.

С учетом современной техники и разработанных методов научная программа с радиоактивными пучками на комплексе ACCULINNA-2@У-400М выглядит перспективной и сопоставимой с мировыми институтами на протяжении длительного времени.

О СЕТЕВОЙ БАЗЕ ЗНАНИЙ ПО ЯДЕРНОЙ ФИЗИКЕ НИЗКИХ ЭНЕРГИЙ NRV (NUCLEAR REACTIONS VIDEO)

На протяжении многих лет огромный объем экспериментальных данных в ядерной физике (например, о сечениях ядерных реакций и свойствах ядер) был доступен, как правило, в текстовом или табличном виде, хранясь в статьях или специализированных базах данных, таких как NNDC и IAEA-NDS. Более того, программы для теоретического моделирования были слишком сложны в использовании: требовалось вручную создавать входные файлы для запуска программ с множеством параметров и использовать дополнительное программное обеспечение для анализа результатов.

Для решения этой проблемы в 1999 г. профессором В. И. Загребаевым была предложена идея создать единую платформу, которая объединила бы обширные оцифрованные экспериментальные данные со сложными вычислительными кодами. Активная работа над этим проектом, получившим название «Сетевая база знаний по ядерной физике низких энергий NRV» (доступна по адресу nrv.jinr.ru), началась в 2000 г.

NRV стала уникальным инструментом благодаря своему технологическому решению. Чтобы начать работу, пользователю нужен только веб-браузер и подключение к Интернету. Взаимодействие происходит через простые HTML-формы, реализованные с помощью JavaScript, PHP и HTML.

Главная особенность NRV заключается в том, что все сложные вычислительные программы (написанные на языках C++ и Fortran) находятся и выполняются на мощном удаленном сервере. Это значит, что пользователю не нужно скачивать громоздкое ПО. Такой инновационный подход позволяет запускать даже самые длительные и ресурсоемкие расчеты (которые могут занимать от нескольких минут до нескольких суток) без необходимости установки какого-либо программного обеспечения на локальный компьютер пользователя. Благодаря этому техническому решению NRV стала уникальной системой, не зависящей от ограничений операционной системы и предлагающей интуитивно понятный графический интерфейс для подготовки входных данных и визуализации результатов. Кроме того, все разделы NRV снабжены подробными описаниями и ссылками на соответствующие публикации.

Сегодня сетевая база знаний NRV по ядерной физике низких энергий — это не просто хранилище данных, а комплекс, объединяющий оцифрованные экспериментальные данные о свойствах ядер и сечениях ядерных реакций с широким набором взаимосвязанных вычислительных программ для моделирования процессов ядерной динамики. База знаний охватывает практически все ключевые области ядерной физики и широкий спектр моделей для анализа ядерных реакций, включая упругое и неупругое рассеяние, реакции передачи, слияния, радиационного захвата, фрагментации. Система предоставляет мощный комплекс для моделирования процессов слияния, сопровождающихся последующим делением или «выживанием»

в каналах испускания частиц (нейтронов, протонов, альфа-частиц и гамма-квантов). Это достигается путем объединения кодов для расчета сечений слияния со статистической моделью распада возбужденного вращающегося ядра.

Расчет сечений слияния и функции распределения по барьерам осуществляется с помощью квантовых и эмпирических методов связи каналов. Оба метода учитывают связь относительного движения сталкивающихся ядер с их коллективными степенями свободы (вращениями или поверхностными колебаниями). В рамках эмпирической модели предусмотрена возможность учета влияния каналов перераспределения нейтронов на сечение слияния. Для реакций, ведущих к образованию сверхтяжелых ядер, критически важен учет вероятности формирования составного ядра из конфигурации двух касающихся ядер. В NRV эта возможность реализована на основе эмпирической формулы, предложенной В. И. Загребаевым для реакций «холодного» синтеза.

NRV также позволяет изучать свойства ядерных распадов (альфа-распада, бета-распада и деления), кинематику ядерных реакций и структуру атомных ядер. База знаний NRV содержит программы для расчета одночастичных уровней (энергий и волновых функций) для деформированных и сферических ядер с помощью оболочечной модели. Также реализована двухцентровая оболочечная модель, позволяющая рассчитывать одночастичные уровни, начиная от конфигураций двух разделенных ядер и заканчивая компактными формами составного ядра.

Сетевая база знаний NRV сегодня признана уникальным инструментом. Она широко используется как в образовательном процессе, так и в ведущих мировых научных центрах для планирования экспериментов и анализа полученных данных. Популярность системы остается на стабильно высоком уровне, что подтверждается частым цитированием базы знаний в статьях в наиболее авторитетных журналах.

РАДИАЦИОННОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Пучки заряженных частиц, как уникальный инструмент модификации свойств материалов, используются в радиационной физике твердых тел и радиационном материаловедении во всех научных центрах, располагающих соответствующими установками. Наиболее широкое применение нашли легкие и тяжелые ионы с энергиями до 5 МэВ. Это связано с решением практических задач полупроводниковых технологий, развитием методик ядерно-физического анализа (спектроскопии обратного резерфордовского рассеяния и др.), а также ускоренным моделированием радиационных повреждений, генерируемых высокодозным нейтронным облучением в реакторных материалах. Значительно реже использовались тяжелые ионы высоких энергий ($E \geqslant 1$ МэВ/нуклон), что обусловлено ограниченным числом ускорителей на соответствующие энергии. Первым таким ускорителем для прикладных работ, в том числе и по радиационному материаловедению,

был созданный в Лаборатории ядерных реакций циклотрон ИЦ-100, введенный в эксплуатацию в 1984 г. и модернизированный в 2007 г. Это открыло новые возможности для систематических исследований структурных эффектов ионизации высокой плотности, характерных только для высокоэнергетического ионного облучения, основные направления которых и примеры наиболее значимых результатов будут представлены ниже. Говоря об экспериментальной базе работ по материаловедению, необходимо отметить, что они получили значительный импульс благодаря тесному сотрудничеству с Центром высокоразрешающей просвечивающей электронной микроскопии Университета Нельсона Манделы (Порт-Элизабет, ЮАР).

Отличительной особенностью взаимодействия ионов с веществом при таких энергиях является высокий уровень удельных ионизационных потерь энергии, достигающий для некоторых комбинаций ион плюс мишень нескольких десятков кэВ/нм. Начиная с некоторого порогового уровня, в целом ряде материалов образуются специфические структурные нарушения, не воспроизводимые при любых других видах радиационного воздействия, — латентные треки. Определение пороговых значений плотности ионизации, начиная с которых формируются треки, морфологии и размера треков является необходимым условием для прогноза радиационной стойкости материалов, облученных высокоэнергетическими ионами. Кроме того, значения порога и размера трека служат единственными исходными экспериментальными данными для верификации различных моделей трекообразования.

Помимо развития общих фундаментальных представлений о дефектообразовании в условиях облучения тяжелыми высокоэнергетическими ионами, эти данные представляют значительный интерес и для решения ряда практических задач радиационного материаловедения. К таким задачам можно отнести моделирование эффектов, вызываемых осколками деления, т. е. атомами с массой от 80 до 155 и энергией около 100 МэВ, в керамических и оксидных материалах — инертных разбавителях (матрицах) композитного ядерного топлива, предлагаемых для эффективной и экономичной технологии трансмутации минорных актинидов. Необходимо отметить, что процессы, происходящие в треках осколков деления, не могут моделироваться с использованием достаточно широкодоступных пучков тяжелых ионов с энергиями в несколько МэВ, поскольку при отборе кандидатных материалов-матриц для инертного топлива в реакторах деления необходимо обязательно учитывать эффекты высокой плотности ионизации. Это возможно только при использовании высокоэнергетического ионного облучения в широком интервале масс и энергий, позволяющего варьировать различные уровни ионизационных и ядерных потерь энергии для моделирования воздействия продуктов деления. Особый интерес представляет изучение эффектов ионизации в материалах с предварительно созданной дефектной структурой, что наиболее точно воспроизводит изменения в инертных матрицах, облучаемых в ядерных реакторах.

В совместных работах с ORNL методами просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) был определен порог образования латентных треков

в алюмомагниевой шпинели, $MgAl_2O_4$, — керамике, демонстрирующей исключительную радиационную стойкость по отношению к воздействию нейтронов и низкоэнергетических ионов. Относительно низкий порог, порядка 8 кэВ/нм, и аморфизация при перекрытии треков, сопровождаемая распуханием облученного слоя, свидетельствуют о низкой радиационной стойкости шпинели к воздействию осколков деления, что исключает возможность ее использования в качестве инертных матриц. Были также получены данные о перестройке существующей дефектной структуры в $MgAl_2O_4$ под действием ионизации высокой плотности, которая проявляется в диссоциации и уменьшении размера межузельных петель диаметром около 5 нм, сопоставимого с размером трека. Диссоциация дислокационных петель больших размеров, около 30 нм, не наблюдалась.

Пороги образования треков впервые были определены также для Si_3N_4 и Al_2O_3. На нитриде кремния стоит остановиться подробнее, поскольку это единственная нитридная керамика, в которой регистрируются треки. В наших экспериментах треки впервые детектировались как в нанокристаллическом и поликристаллическом, так и в аморфном и радиационно-аморфизованном Si_3N_4. На рис. 16 показаны снимки структуры поликристаллов Si_3N_4, облученных ионами ксенона с энергией 220 МэВ в широком интервале флюенсов.

Как видно, при $1 \cdot 10^{10}$ см$^{-2}$ наблюдаются изолированные аморфные треки в кристаллической матрице. При флюенсе $1 \cdot 10^{12}$ см$^{-2}$ наряду с остатками кристаллической структуры регистрируются аморфные треки (светлые пятна) в уже аморфизованном материале. Увеличение флюенса до $1{,}2 \cdot 10^{13}$ см$^{-2}$ приводит к полной аморфизации и регистрации аморфных треков только в аморфизованной мишени. Сравнение параметров треков позволило впервые установить их зависимость от структурного состояния материала в одном эксперименте.

Цикл работ по исследованию воздействия ионов высоких энергий на микроструктуру Si_3N_4, проведенных совместно с коллегами из Университета Нельсона Манделы (Порт-Элизабет, ЮАР), филиала ИЯФ и Евразийского национального университета им. Л. Н. Гумилева (Астана, Казахстан), включал также анализ морфологии ионных треков в зависимости от концентрации металлической примеси (алюминия) в нитриде кремния.

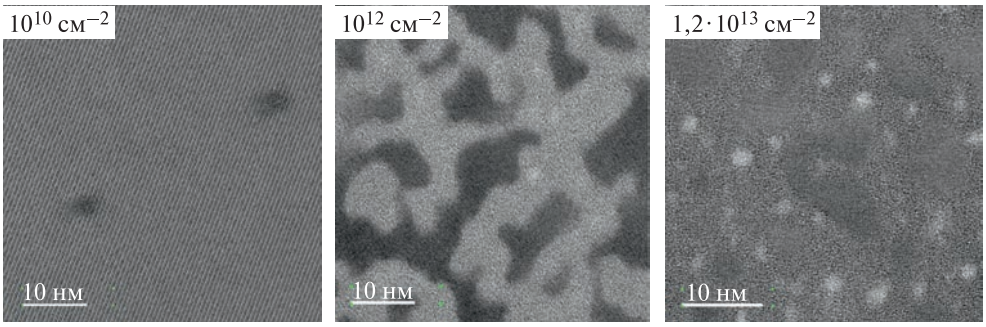


Рис. 16. Треки ионов висмута в поликристаллах нитрида кремния

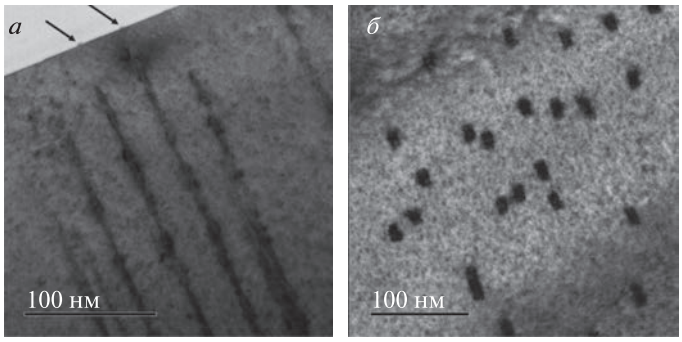


Рис. 17. Светлопольные ПЭМ-снимки треков ионов ксенона в ZrO_2 в поперечном сечении (а) и планарной геометрии (б)

К одному из наиболее ярких результатов изучения структурного отклика радиационно стойких диэлектриков на воздействие ионизации высокой плотности можно отнести наблюдение прерывистых треков необычной прямоугольной формы в природном оксиде циркония (рис. 17).

Так, треки ионов ксенона с энергией 167 МэВ представляют собой сегменты длиной около 30 нм, сформированные в области ионной траектории под углом 9° относительно направления падения пучка. Установлено, что такая морфология треков является следствием перехода кристалла из одной кристаллической (моноклинной) в другую кристаллическую (тетрагональную) фазу, в то время как для большинства материалов типичен переход из кристаллического в аморфное состояние.

Ниже представлены наиболее значимые результаты микроструктурного анализа и мультимасштабного моделирования процессов формирования латентных треков. Облучение образцов в широком интервале флюенсов, температур, масс и энергий ионов проводилось на ускорителях ИЦ-100 и У-400 Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ и DC-60 (Нур-Султан, Казахстан). Микроструктура образцов исследовалась методами высокоразрешающей просвечивающей электронной микроскопии (Университет Нельсона Манделы, Порт-Элизабет, ЮАР). Компьютерное моделирование проводилось в рамках подхода, состоящего из оригинальной Монте-Карло модели TREKIS, описывающей возбуждение электронной подсистемы и передачи энергии в решетку, а также моделирования релаксации решетки методами классической молекулярной динамики (МД).

ОБРАЗОВАНИЕ ТРЕКОВ И РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИЯ

Установлено, что причиной насыщения количества треков в оксиде алюминия на единицу площади при отсутствии перекрытия видимых трековых областей являются процессы рекристаллизации существующей дефектной области пролетающим ионом. На рис. 18 показано сравнение данных ПЭМ и результатов моделирования структурных изменений вдоль траектории иона Xe с энергией 167 МэВ в оксиде алюминия. Прохождение иона через материал вызывает формирование прерывистой цилиндриче-

ской поврежденной области, которая не является полностью аморфизованной. Исследование изменения плотности Al_2O_3 (рис. 18, *б*) показало, что центральная и наиболее поврежденная область с пониженной плотностью окружена оболочкой с повышенной плотностью. Также был определен порог формирования треков по ионизационным потерям налетающего иона в различных керамических материалах.

Сравнительный экспериментальный и количественный анализ структурного отклика различных диэлектриков (MgO, Al_2O_3 и $Y_3Al_5O_{12}$) показал (рис. 19), что облучение ионами приводит к формированию в исследуемых материалах поврежденных областей, значительно различающихся как по структуре, так и по размеру. Моделирование методами МД выявило, что размер и структура треков ионов сильно зависят от возможности рекристаллизации изначально разупорядоченной области. Было показано, что

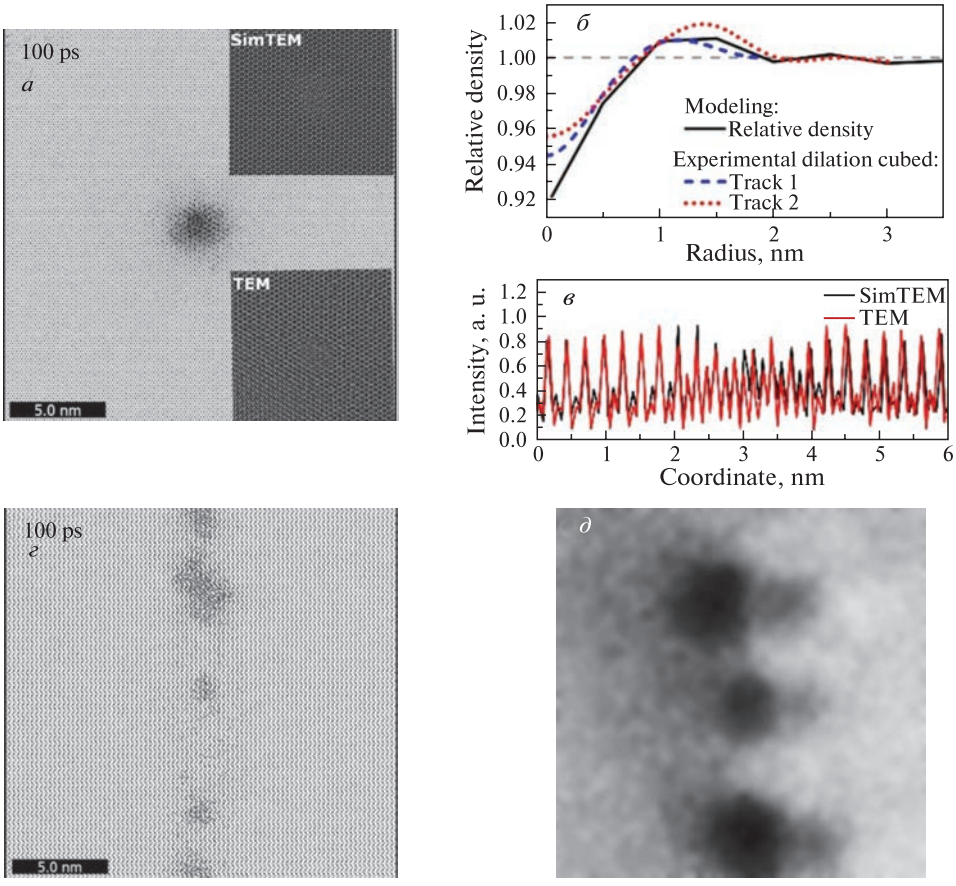


Рис. 18. а) Изображение МД ячейки после прохождения иона Xe с энергией 167 МэВ в Al_2O_3 — проекция вдоль оси трека со вставками изображений ПЭМ в том же масштабе, что и изображение МД; б) изменение плотности, определенное с помощью ПЭМ и МД; в) линейный профиль трека; г) поперечное сечение МД ячейки; д) увеличенное изображение поперечного сечения ПЭМ в том же масштабе

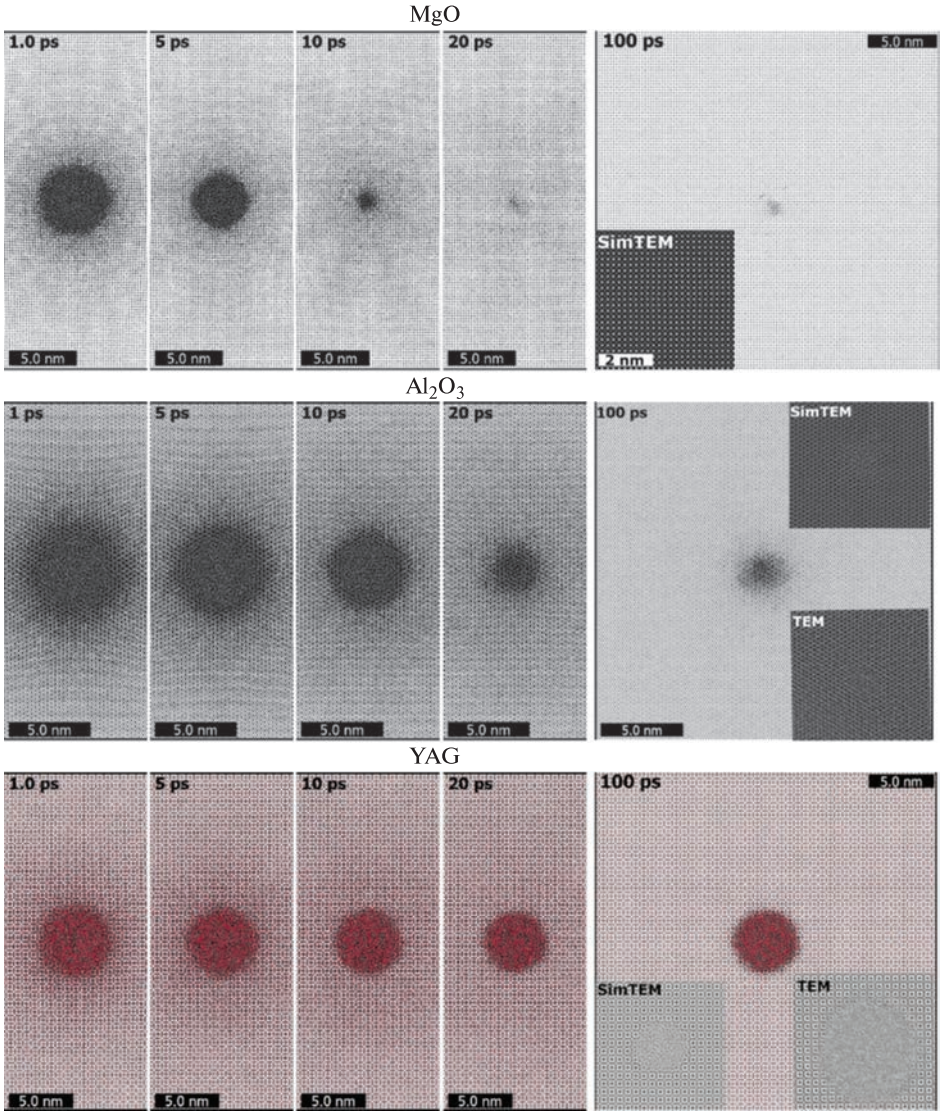


Рис. 19. Кинетика образования треков ионов Xe с энергией 167 МэВ. Вставки — экспериментальные и смоделированные изображения ПЭМ из данных МД

способность материалов к рекристаллизации в значительной степени определяется сложностью структуры решетки, а также мобильностью атомов расплавленного материала.

ПЕРЕКРЫТИЕ ТРЕКОВ

Показана важность учета процессов рекристаллизации поврежденных областей при облучении в режиме перекрывающихся треков. Так, в оксиде алюминия, демонстрирующем высокую степень восстановления исходной

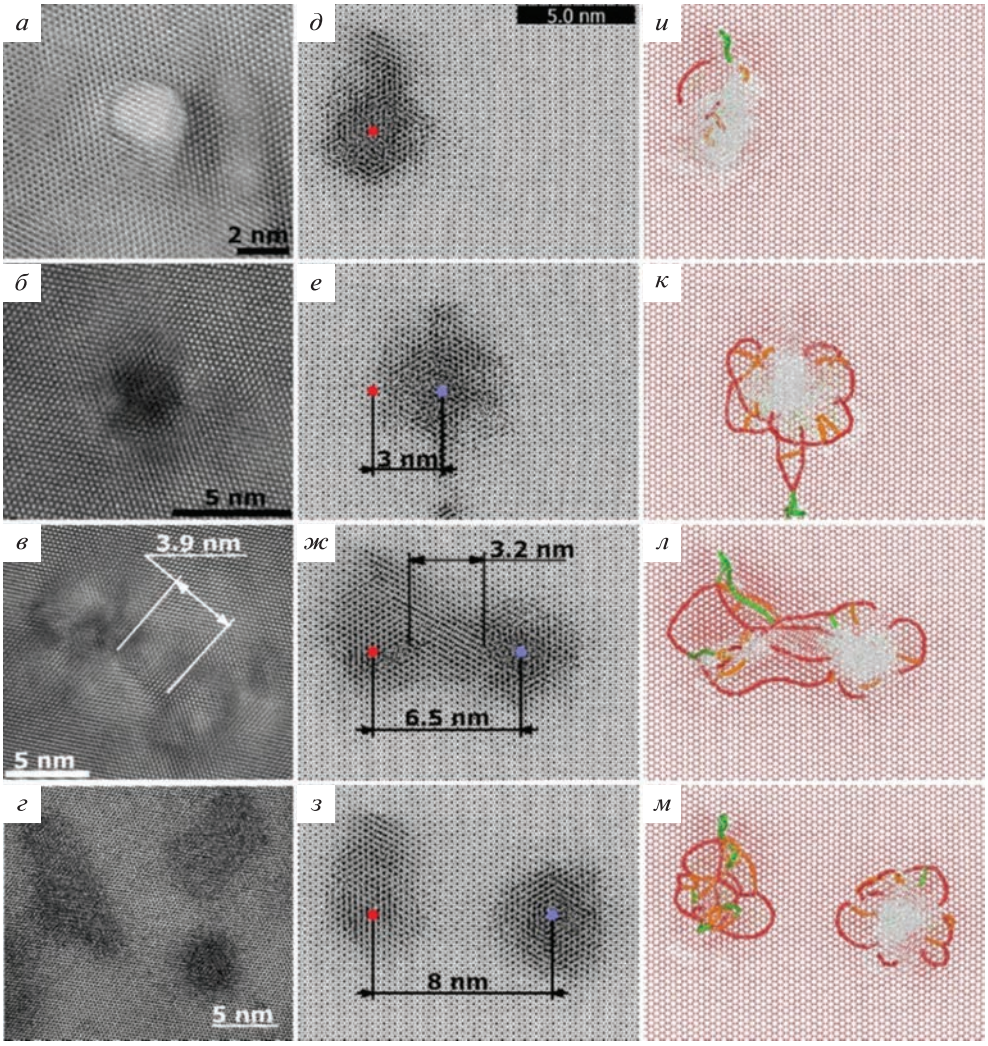


Рис. 20. Треки ионов Bi с энергией 700 МэВ в Al_2O_3: а, б) ПЭМ-изображения трека одиночного иона и перекрывающихся треков при флюенсе $5 \cdot 10^{11}$ см$^{-2}$ (в); $6{,}5 \cdot 10^{12}$ см$^{-2}$ (г); д–з) результаты МД-моделирования двух последовательных столкновений ионов Bi на различных расстояниях друг от друга; и–м) дислокационные структуры, рассчитанные для подрешетки кислорода из соответствующих ячеек МД с использованием алгоритма DXA

структуры, наблюдается эффект практически полного восстановления существующих трековых областей (рис. 20, *е*, *к*). При этом, при увеличении расстояния между треками, образуется соединяющая их дефектная структура. В YAG ($Y_3Al_5O_{12}$) (рис. 21), где рекристаллизация не наблюдается, формирование дефектных структур между треками происходит на гораздо более коротких расстояниях по сравнению с Al_2O_3.

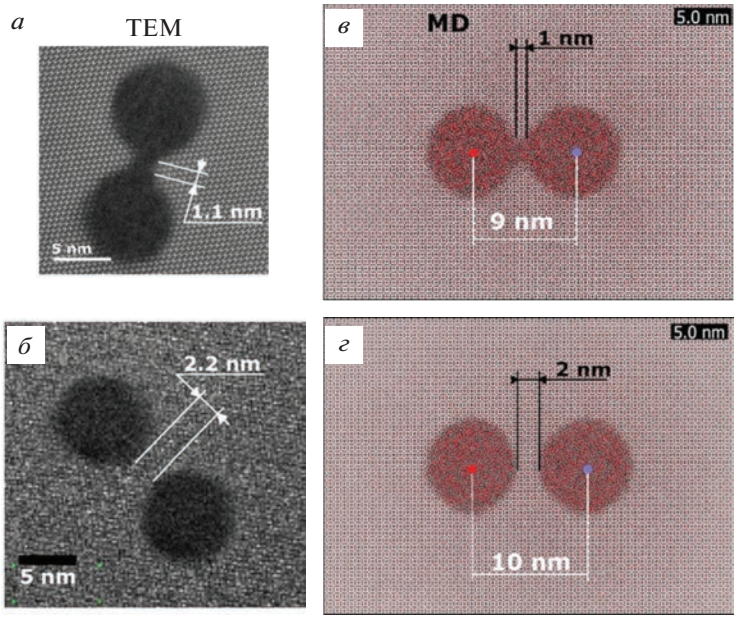


Рис. 21. ПЭМ-изображения иона Bi с энергией 1 ГэВ (а) и 700 МэВ (б) в YAG на разных расстояниях. в, г) Результаты моделирования двух последовательных пролетов иона Bi в YAG на различных расстояниях друг от друга

ВЗАИМОСВЯЗЬ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ НА ПОВЕРХНОСТИ И ОБЪЕМЕ МАТЕРИАЛА

Известно, что наиболее чувствительной к облучению высокоэнергетическими тяжелыми ионами зоной является приповерхностная область твердых тел, а также интерфейсная область материал–топливо в многокомпонентных и многослойных структурах. Избыточная потенциальная энергия поверхности, возможный обмен энергией и частицами с окружающей средой могут существенно изменить отклик материала на облучение быстрыми тяжелыми ионами по сравнению с объемным кристаллом. Поэтому экспериментальное, аналитическое и численное исследование влияния облучения быстрыми тяжелыми ионами на возможную модификацию массивных образцов, а также областей на границе раздела сред в композитных материалах энергетики и электроники является необходимой и актуальной задачей радиационного материаловедения.

На рис. 22 показаны ПЭМ-изображения высокого разрешения поверхностных областей образцов TiO_2, облученных при разных температурах, полученные в геометрии поперечного сечения. Результаты ПЭМ-измерений свидетельствуют об увеличении размера трека в приповерхностной области с увеличением температуры облучения. Такое поведение качественно согласуется с предсказанием обеих моделей термического пика. Установлено, что хиллоки являются кристаллическими и эпитаксиальными с исходной

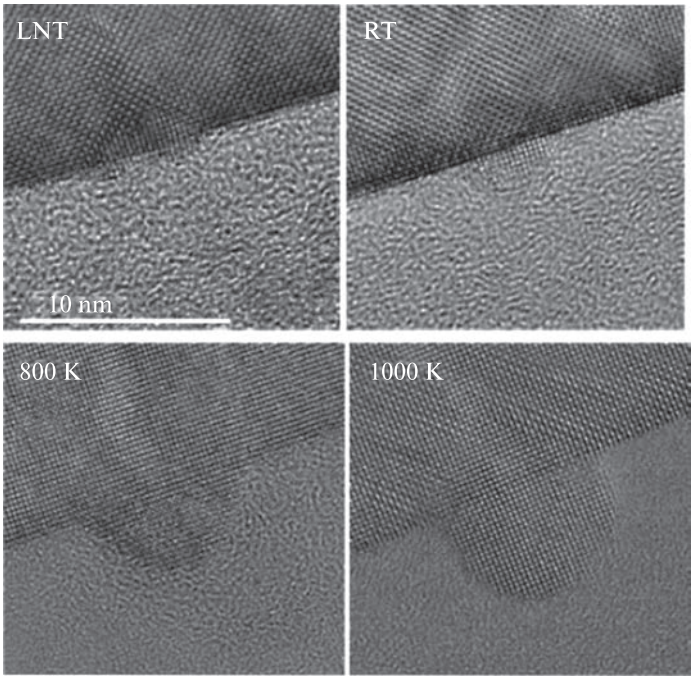


Рис. 22. ПЭМ-снимки одиночных хиллоков на поверхности образцов TiO_2, облученных ионами Xe (220 МэВ) при разных температурах

кристаллической поверхностью, что предполагает процесс рекристаллизации, инициированный на поверхности.

Исследования процессов формирования дефектных структур на поверхности различных диэлектриков показали различия в кинетике формирования хиллоков на поверхности аморфизуемых и неаморфизуемых материалов. Сравнительный анализ данных ПЭМ и МД (рис. 23) выявил

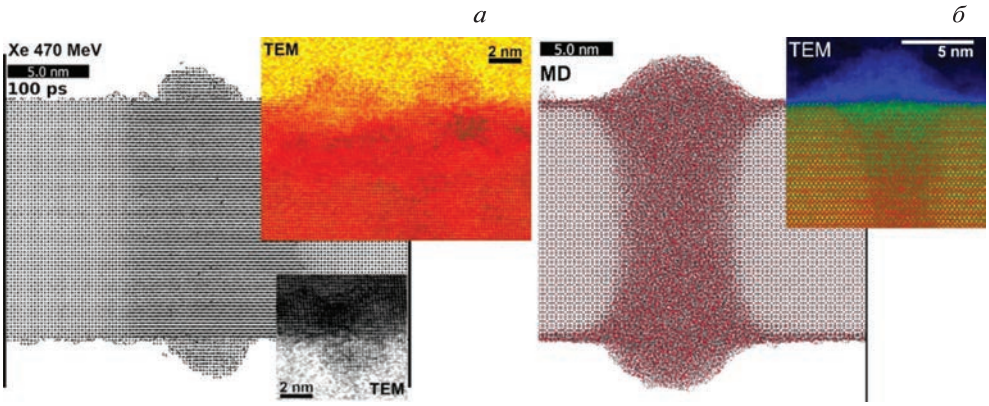


Рис. 23. Хиллоки на поверхности MgO (а) и YAG (б), облученных быстрыми тяжелыми ионами

зависимость этой кинетики от базовых свойств материалов: вязкости и поверхностного натяжения расплава, мобильности атомов, способности материала к рекристаллизации.

Полученные результаты значительно расширили базу данных по параметрам латентных треков в целом ряде радиационно стойких диэлектриков, перспективных для применения в ядерной энергетике. Прежде всего это относится к определению пороговых значений удельных ионизационных потерь энергии, необходимых для формирования треков в $MgAl_2O_4$, Al_2O_3, Si_3N_4, а также наночастицах $Y_2Ti_2O_7$, $Y_4Al_2O_{12}$, входящих в состав дисперсно упрочненных оксидами сталей. На основе модели, позволившей впервые в едином подходе описать стадии формирования треков быстрых тяжелых ионов, установлена критическая роль процессов рекристаллизации, определяющих конечное структурное состояние трека, и показана важность учета интерференции трековых областей при высоких ионных флюенсах.

ТРЕКОВЫЕ МЕМБРАНЫ, МИКРО- И НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ПОЛУЧАЕМЫЕ НА ПУЧКАХ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ

Начало XXI столетия ознаменовалось резким ростом востребованности новых научных направлений, из которых следует прежде всего назвать науки о жизни (Life sciences) и нанотехнологии. Эти направления, подразумевающие постоянно углубляющиеся фундаментальные знания о природе, имеют и отчетливо выраженную прикладную направленность. Они ветвятся на многие научные, научно-технические и инженерные задачи, связанные со здравоохранением, защитой окружающей среды, биотехнологиями, новыми источниками энергии, биоинформатикой и иными актуальными аспектами жизни общества.

Особую роль в становлении и развитии прикладных исследований в ЛЯР сыграл Сергей Николаевич Дмитриев. Приняв эстафету от своего выдающегося учителя — академика Г. Н. Флёрова, он успешно развивал его идеи одновременно в нескольких направлениях. Его вклад стал решающим в сложные 1990-е гг., когда был образован Центр прикладной физики (ЦПФ) ЛЯР и заложены основы его функционирования. Широкий диапазон интересов и глубокие профессиональные компетенции позволяли С. Н. Дмитриеву успешно совмещать проведение фундаментальных физических экспериментов с организацией прикладных исследований. Благодаря высокому международному авторитету и организаторскому таланту С. Н. Дмитриева были налажены стратегические партнерские связи с ведущими компаниями США, Европы и Китая, а также с российскими научными и коммерческими организациями, заинтересованными в результатах

Начальник Центра прикладной физики ЛЯР С. Н. Дмитриев рассказывает гостям о проводимых в ЛЯР прикладных исследованиях. 1994 г.

Визит в ОИЯИ руководителя Федерального медико-биологического агентства В. И. Скворцовой. С. Н. Дмитриев проводит экскурсию по наноцентру. 2022 г.

прикладных исследований ЛЯР. Он глубоко вникал в суть решаемых научно-технических проблем, вследствие чего ряд предложенных им технических решений был запатентован. Технология трековых мембран, получение особо чистых радиоизотопов, развитие ускорителей для технологических применений, создание наноцентра — это проекты, которым С. Н. Дмитриев уделял первостепенное внимание, занимая последовательно должности начальника ЦПФ, заместителя директора и директора лаборатории, и всегда добивался их осуществления.

Развитие тематики трековых мембран в Лаборатории ядерных реакций не могло остаться в стороне от современных тенденций. Под натиском новых вызовов и идей в эволюции научных исследований, проводимых Центром прикладной физики ЛЯР в 2000–2025 гг., произошли существенные изменения. В предыдущие десятилетия трековые мембраны рассматривались прежде всего как инструмент для реализации процессов сепарации, в первую очередь в микрофильтрационных и ультрафильтрационных технологических процессах. Аналитические применения трековых мембран также оставались актуальными. В XXI в. возникают новые направления исследований и разработок. «Трековые» нанопоры оказались весьма интересным и востребованным объектом в нанофлюидике. Возможности метода травления тяжелых ионов в полимерах были реализованы при создании ряда функциональных микроструктурированных материалов, в том числе композиционных. Объединение в одну структуру традиционной трековой мембраны и наночастиц и нановолокон открыло широкие возможности для создания гибридных материалов, способных выполнять те или иные полезные функции. Иммобилизация на трековых мембранах биологически активных компонентов привела к созданию материалов со специфическими свойствами для биомедицинских применений.

МОДЕРНИЗИРОВАННЫЙ ЦИКЛОТРОН ИЦ-100

Циклотрон ИЦ-100 был существенно модернизирован и адаптирован для проведения прикладных работ. Он обеспечивал облучение полимерных материалов тяжелыми ионами (Ne, Ar, Kr и Xe) с энергией 1,2 МэВ/нуклон. Существенной модернизации подвергся и специализированный канал с вакуумной камерой для обработки полимерных пленок в виде рулонного материала. Были усовершенствованы средства диагностики, улучшена степень однородности облучения по площади мишени. Вакуумная система была дополнена крионасосом, что существенно повысило эффективность откачки объема при облучении больших объемов полимерных пленок. Были разработаны сменные модули, обеспечивавшие различные угловые распределения треков тяжелых ионов в облученных пленках. Большой вклад в проведенные работы внесли Б. Н. Гикал, В. И. Миронов и О. М. Иванов.

Специализированный циклотрон ИЦ-100 для прикладных исследований

Канал для облучения полимерных пленок на циклотроне ИЦ-100

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МИКРОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Оригинальные технические решения для создания микроструктурированных материалов с полезными функциями были предложены в рамках сотрудничества с немецкими инновационными предприятиями. Было установлено, что металлические реплики трековых мембран толщиной 60–100 мкм и порами диаметром 5–10 мкм представляют собой поверхность, обеспечивающую очень высокий коэффициент теплопередачи. Были проведены исследования, направленные на поиск оптимальных параметров теплопередающей поверхности, и изготовлены макетные образцы устройств для применения в специальных системах охлаждения. Другая инновационная идея заключалась в применении пучков тяжелых ионов и техники травления треков для повышения адгезии между полимерным и металлическим (медным) слоями в гибких печатных платах. Полученный по данному способу композиционный материал характеризовался высокой прочностью, теплостойкостью и износостойкостью в условиях вибрации и механических нагрузок. Большой вклад в разработки внесли А. Шульц, М. Данцигер, Г. Н. Акапьев, В. В. Ширкова.

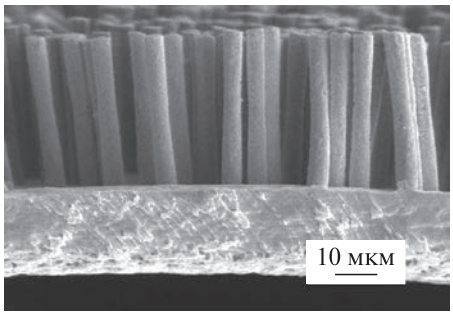


Рис. 24. Структура поверхности меди, обладающей высоким коэффициентом теплопередачи. Реплика поликарбонатной трековой мембраны, полученная электрохимическим способом

ТРЕКОВЫЕ МЕМБРАНЫ КАК МОДЕЛЬНЫЕ КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫЕ ТЕЛА В НАНОФЛЮИДИКЕ И ФИЗИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ

Первые попытки моделирования процессов, происходящих в биологических ионных каналах, с использованием нанопор, полученных травлением треков тяжелых ионов, были осуществлены в 1990-е гг. Продолжение этих работ в рамках международной коллаборации, включающей Дубну, Дармштадт и Лондон, дало принципиально новые результаты. К этому времени было установлено, что электрический заряд стенок пор определяет многие особенности поведения нанопор в растворах электролитов (подобных биологическим жидкостям). Имманентным свойством трековых мембран является наличие заряженных функциональных групп на стенках пор, что делает их удобным объектом при исследовании электрокинетических явлений в нанокапиллярах. Метод химического травления треков дает возможность не только задавать размеры пор в нанометровом масштабе, но и варьировать геометрию пор. Реализуя эту возможность, установили,

что асимметричные нанопоры имеют диодоподобную вольт-амперную характеристику. Были разработаны приемы, позволяющие управлять размером и формой каналов пор в широких пределах. Предложены и внедрены в практику два способа, обеспечивающих разные конфигурации асимметричных наноканалов в полиэтилентерефталатных пленках. Помимо моделирования процессов транспорта ионов и молекул в ограниченных объемах с заряженными стенками асимметричные трековые нанопоры могут иметь непосредственные практические приложения в качестве рабочих элементов различных устройств. В первую очередь следует назвать молекулярные сенсоры, работающие на резистивно-импульсном принципе либо на принципе молекулярного узнавания. Обнаружение особых свойств асимметричных трековых нанопор дало импульс к исследованиям в ряде лабораторий мира, направленным на разработку практических приложений, и появлению сотен публикаций, посвященных результатам этих работ. Кроме сенсорной техники трековые нанопоры с диодным эффектом рассматриваются в качестве иных функциональных элементов в нанофлюидике и ионотронике (логические элементы, клапаны, ионные насосы и др.). Помимо упомянутых результатов следует отметить обнаружение и количественную оценку осмотических эффектов в симметричных и асимметричных нанопорах, заполненных растворами низкомолекулярных электролитов. Исследования различных нанообъектов были подкреплены данными растровой электронной микроскопии, для чего были развиты специальные подходы и приемы. Полученная информация является важным вкладом в современные представления о процессах и явлениях, имеющих место в ограниченных объемах с характерными размерами 1–50 нм. Основными авторами данных работ являются П. Ю. Апель, И. В. Блонская, О. Л. Орелович, К. Олейничак, Ю. Ямаути. Со стороны зарубежных партнеров важный вклад внесли К. Траутманн и М. Е. Тоймиль-Моларес (GSI, Дармштадт, Германия), Б. Сартовска (ИЯХТ, Варшава, Польша).

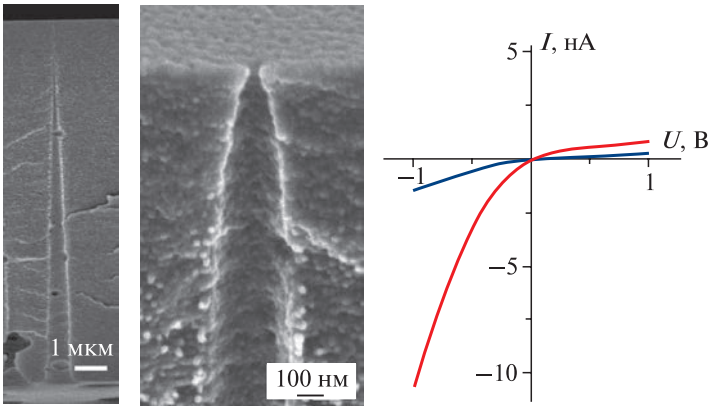


Рис. 25. Электронные микрофотографии асимметричных нанопор с различной конфигурацией канала. Типичные вольт-амперные характеристики асимметричной нанопоры, измеренные в растворах хлорида калия

Трековые мембраны как объекты с прецизионно заданной микро- или наноструктурой не утрачивают актуальности в различных научных исследованиях. Многие тонкие эксперименты, в которых требуются модельные пористые среды, не могут обойтись без трековых мембран. При этом, как правило, мембрана с определенными характеристиками изготавливается индивидуально, «под задачу». Одним из типичных примеров является цикл работ по изучению прохождения ультразвуковых волн сквозь пористые тела с разными радиусами и разными угловыми распределениями каналов пор, выполненный в кооперации с Институтом акустики (Мадрид, Испания). В этих работах показано, что измерение одновременно интенсивности и фазы ультразвуковых волн, прошедших сквозь мембрану, позволяет определить радиус пор. В совместных работах с сотрудниками сектора рентгеновской астрономии Физического института им. П. Н. Лебедева РАН исследовали закономерности прохождения рентгеновского и вакуумного ультрафиолетового излучения сквозь трековые мембраны с порами микрометрового и субмикрометрового диапазона. Важным практическим результатом работ явился вывод о том, что металлизированные трековые мембраны могут служить дифракционными фильтрами в телескопах, применяемых в исследованиях солнечного излучения. Трековые мембраны с порами специальной геометрии были изготовлены для экспериментов по квазифокусировке атомных пучков, проводившихся в Институте спектроскопии РАН (Троицк). Было показано, что конические поры с диаметром устья 50 нм могут быть использованы для получения наноизображений макрообъектов с коэффициентом уменьшения $\sim 10^4$. Каждая пора в мембране играет роль камеры-обскуры. При плотности пор в мембране 10^6 см$^{-2}$ одновременно формируется миллион параллельных изображений на площади 1 см^2. Предложенный метод параллельной фабрикации наноструктур весьма оригинален.

Прохождение пучков высокоэнергетических заряженных частиц, например альфа-частиц, сквозь модельное пористое тело может быть использовано для получения информации о структуре тела. Такие эксперименты были проведены в Институте ядерной физики (Ржеж, Чехия) с мембранами, изготовленными в ЛЯР. Трековая мембрана с порами диаметром 35 нм и плотностью пор $5 \cdot 10^9$ см$^{-2}$ выполнила роль ключевого элемента в электробаромембранном процессе разделения ионов одинакового заряда. Использование одновременно двух движущих сил — перепада давления и перепада электрического потенциала — позволило создать условия, при которых однозарядные ионы, например Li^+ и Na^+, движутся в наноканалах мембраны в противоположные стороны. Этот результат имеет большое практическое значение в связи с проблемой выделения лития, критически важного для современной промышленности элемента.

Система цилиндрических пор — перпендикулярных к поверхности или наклоненных под определенным углом к поверхности мембраны — представляет собой простую и легко описываемую модель при рассмотрении процесса разрушения тела под механической нагрузкой. Применение трековых мембран с заданными структурными параметрами позволило выявить ряд важных закономерностей поведения пористого объекта при приложе-

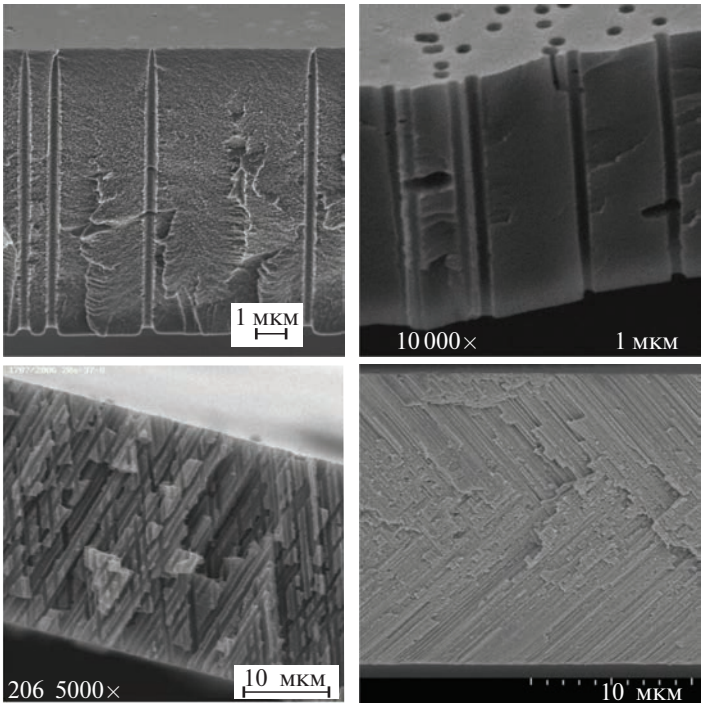


Рис. 26. Пористые микроструктуры с заданными ориентацией, геометрической формой и числом пор, применяемые в различных физических экспериментах

нии механической нагрузки: определить поля концентрации напряжений, выявить роль взаимодействия соседних пор, сделать выводы относительно возможных механизмов разрушения композитов.

Важный вклад в эти работы внесли партнеры — представители сотрудничающих научных центров и университетов: Т. Э. Гомес Альварес-Аренас (Институт акустики, Мадрид, Испания), А. В. Митрофанов (ФИАН им. П. Н. Лебедева, Москва), В. И. Балыкин (Институт спектроскопии РАН, Троицк), И. Вацик (Институт ядерной физики, Ржеж, Чехия), В. В. Никоненко (Кубанский университет, Краснодар), И. В. Разумовская (МПГУ, Москва).

КОМПОЗИЦИОННЫЕ И ГИБРИДНЫЕ ТРЕКОВЫЕ МЕМБРАНЫ

Композиционный, или композитный, материал — материал, изготовленный из двух или более компонентов с существенно различными физическими и/или химическими свойствами, которые в сочетании приводят к появлению нового качества. Трековая мембрана, являющаяся высокооднородной и прочной пористой пленкой, может служить матрицей для нанесения различных компонентов — в виде слоев, наночастиц, нановолокон и др. — с целью достижения практически полезных эффектов.

В случае химического взаимодействия между компонентами композиционного материала по отношению к нему также применяется термин «гибридный».

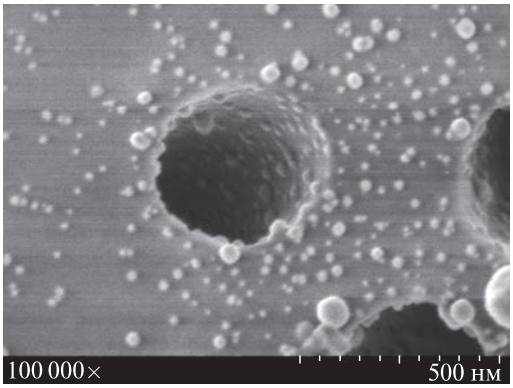


Рис. 27. Поверхность композиционной трековой мембраны с наночастицами серебра

На протяжении последних двух десятилетий было предложено несколько видов композиционных материалов, основой которых служит полиэтилентерефталатная трековая мембрана (ПЭТФ ТМ). Разработано несколько методов нанесения на мембрану гидрофобных полимеров — полимеризацией из активной газовой фазы, электронно-лучевым распылением и некоторые другие. Образование тонкого слоя гидрофобного полимера (которым служит, например, сверхвысокомолекулярный полиэтилен или политетрафторэтилен) сопровождается развитием микро- и нанорельефа, что является ключевым моментом в формировании свойств получаемой композиционной мембраны. Химический состав поверхности и морфология поверхностного слоя обеспечивают супергидрофобность мембраны. Разработан и другой метод получения высокогидрофобной мембраны, включающий нанесение на ПЭТФ ТМ связывающего слоя титана и последующее формирование слоя нановолокон из поливинилиденфторида. Продемонстрировано, что такие композиционные мембраны могут быть успешно применены в энергосберегающем процессе мембранной дистилляции.

Большую роль в развитии техники электроформования нановолокон применительно к разработкам композиционных мембран сыграло сотрудничество с организациями-партнерами из Южно-Африканской Республики. Нановолокна, получаемые из различных полимеров, в том числе биосовместимых, придают композиционным мембранам новые функции в дополнение к основной функции трековой мембраны — ситовому механизму разделения. Прививая на нановолокна функциональные группы, получили материал, способный избирательно поглощать ионы цезия из раствора, при этом цезий, находящийся в дисперсной фазе, также задерживается данной композиционной мембраной. На этом принципе могут быть созданы мембраны для очистки сред от тех или иных радиоактивных загрязнений.

Большой объем работ был выполнен по тематике композиционных мембран с сенсорными функциями. Трековая мембрана с иммобилизованными на поверхности наночастицами металлов, проявляющими эффект плазмонного резонанса, способна выполнять несколько функций: аккумуляцию искомого вещества, предочистку его от загрязняющих примесей и детектирование вещества по его рамановскому спектру комбинационного рассеяния. Благодаря эффекту гигантского комбинационного рассеяния,

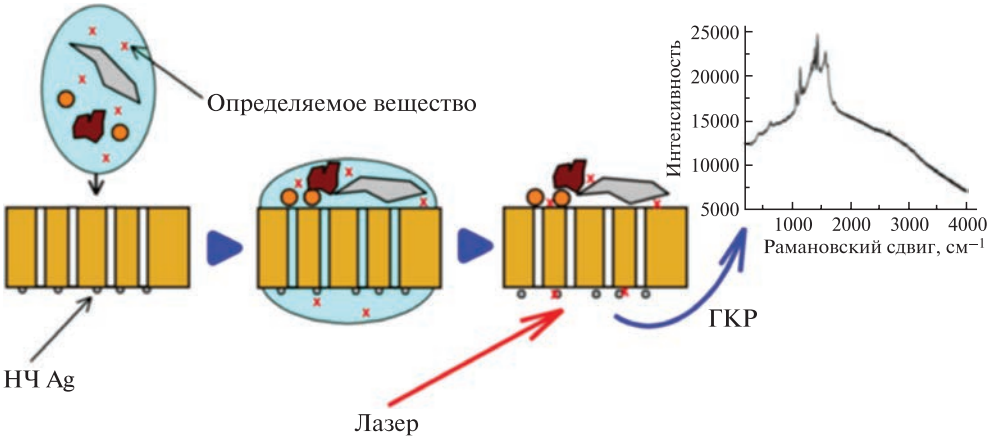


Рис. 28. Принцип действия сенсора на трековой мембране с эффектом гигантского комбинационного рассеяния (ГКР)

обеспечиваемому наночастицами, чувствительность получаемого сенсора очень высока. При использовании серебряных наночастиц достигнуты коэффициенты усиления рамановского сигнала до 10^8. Подобные сенсоры могут использоваться для обнаружения малых концентраций токсических веществ в окружающей среде или биологических жидкостях.

Большой вклад в работы по композиционным мембранам внесли А. Н. Нечаев, Л. И. Кравец, А. Россоу, О. В. Криставчук, И. И. Виноградов, Е. В. Андреев. Необходимо также отметить ключевую роль Л. Петрик (Western Cape University, ЮАР) в развитии данного направления.

Особый интерес представляют композиционные трековые мембраны для биомедицинских применений. Так, двухслойный композит с пористой подложкой и нановолоконным покрытием, выполненным из биополимеров (хитозан + коллаген), представляет собой перспективный материал для заживления ран. Мембраны-сенсоры, работающие на принципе ГКР, приобретают наибольшую актуальность в случае их способности регистрировать биологические объекты, в первую очередь вирусы. Для повышения избирательности и чувствительности по отношению к вирусам, на поверхности трековых мембран с наночастицами серебра были иммобилизованы олигонуклеотидные аптамеры. Благодаря избирательному сродству аптамера к белкам оболочки вируса такой аптасенсор обладает чувствительностью не хуже 10 частиц вируса гриппа А в 1 мл, что превышает чувствительность стандартного метода ПЦР. Эти работы продолжаются широким фронтом, при этом новые технические решения включают как модификации трековой мембраны-матрицы, так и архитектуру конечного композита.

Были проведены исследования вирулицидного действия трековых мембран, модифицированных различными агентами. Диаметр пор мембран превышал размер испытуемых вирусов, и, таким образом, традиционный ситовый механизм не мог отделять вирусные частицы от жидкой фазы. Тем не менее в случае иммобилизации на поверхности и в порах мембраны на-

ночастиц серебра и куркумина существенная доля вирусов герпеса и стоматита инактивировалась. При этом знак заряда поверхности мембраны был изменен на противоположный адсорбцией полиэтиленимина, чтобы усилить взаимодействие проходящих сквозь поры вирусов с их стенками. Другим интересным техническим решением явилось создание трековой мембраны, избирательно сорбирующей ДНК. С этой целью на мембране был иммобилизован белок особой структуры, характерный для экстремофильных микроорганизмов. При помощи этой мембраны может осуществляться выделение и аккумулирование внеклеточной ДНК из биологических растворов для всевозможных дальнейших манипуляций. От организаций-партнеров важный вклад в эти исследования внесли В. И. Кукушкин (Институт физики твердого тела РАН, Черноголовка), Е. Г. Завьялова (МГУ, Москва), Р. М. Арутюнян (Ереванский университет, Армения), Е. В. Кравченко (ЛЯП ОИЯИ).

Биомедицинским применениям трековых мембран уделяется особое внимание. Можно ожидать, что с этим направлением связан основной инновационный потенциал. Активизация инновационной деятельности, включающей широкий спектр междисциплинарных исследований и разработок, — задача группы сотрудников, возглавляемой Н. С. Дмитриевым.

РАЗВИТИЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ПАРКА И СОЗДАНИЕ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЙ ЛАБОРАТОРИИ (НАНОЦЕНТРА)

В ЛЯР всегда уделялось первостепенное внимание оснащенности прикладных исследований необходимым оборудованием. Развитие нанотехнологий и науки о материалах сопровождается быстрым совершенство-

Здание лабораторного корпуса ЛЯР

В лабораториях наноцентра

Семинар в Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флёрова, посвященный 50-летию работ по трековым мембранам

ванием научного приборостроения и появлением принципиально новых инструментов для изучения структуры и состава вещества в нанометровых масштабах. К 2010 г. назрела необходимость существенного обновления и расширения инструментального парка Центра прикладной физики ЛЯР. В рамках проекта Международного инновационного нанотехнологического центра (МИНЦ) было принято решение о строительстве специализированного лабораторного корпуса. Под руководством директора ЛЯР С. Н. Дмитриева строительство было завершено в 2014 г. Средства для приобретения самого современного научного оборудования были выделены госкорпорацией «Роснано».

Введенное в эксплуатацию оборудование обеспечивало широкий спектр задач, связанных с исследованием морфологии и состава микро- и наноструктурированных материалов. Это методы растровой электронной микроскопии, рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия, рентгеновский энергодисперсионный элементный анализ, инфракрасная и УФ-Вид спектроскопия, разнообразный инструментарий для химической лаборатории и многое другое. Ведущую роль в проектировании и инженерном обеспечении лабораторного корпуса сыграл Д. В. Щеголев.

В последующие годы парк пополнился просвечивающим электронным микроскопом, приборами для термического анализа полимеров, рамановскими спектрометрами, анализатором наночастиц, установками для электроформования нановолокон, атомно-силовым микроскопом, атомно-эмиссионным спектрометром, установкой для механических испытаний материалов. Реализация возможностей нового оборудования обеспечила принципиально более высокий уровень проводимых исследований и разработок.

Созданное академиком Г. Н. Флёровым направление сохранило актуальность до настоящего времени. Тематика трековых мембран, а более широко — нано- и микроструктур, создаваемых при помощи пучков тяжелых ионов, — за полвека развилась в имеющую большой вес область прикладной науки. Поколение ученых и инженеров, принявшее эстафету в XXI в., привносит в проводимые исследования новые подходы и методы. Интеграция достижений ЛЯР в современный мир мембранных технологий, науки о материалах, нанотехнологий, биомедицинской инженерии, микро- и нанофлюидики является весомым вкладом в технический прогресс.

НЕЙТРОННАЯ ФИЗИКА

Объединенный институт ядерных исследований является одним из мировых лидеров в области нейтронной физики и нейтронных исследований. Лаборатория нейтронной физики им. И. М. Франка (ЛНФ) играет ключевую роль в этой области, обеспечивая научное сообщество уникальными экспериментальными возможностями и внося существенный вклад в развитие как фундаментальной науки, так и прикладных направлений исследований.

История нейтронной физики в ОИЯИ начинается с создания первого в мире импульсного быстрого реактора периодического действия (ИБР), физический пуск которого состоялся в июне 1960 г. Этот исторический момент открыл эру пульсирующих реакторов в качестве источников нейтронов для широкого спектра фундаментальных и прикладных исследований в ядерной физике и физике конденсированных сред. Развитие реактора ИБР привело к созданию более мощного и совершенного реактора ИБР-2, введенного в эксплуатацию в 1984 г. В настоящее время модернизированный реактор ИБР-2М с созданным комплексом замедлителей и инструментов для нейтронного рассеяния на выведенных пучках является одним из лучших в мире, на котором реализуется международная пользовательская программа.

Лаборатория нейтронной физики ОИЯИ известна революционными открытиями, которые повлияли на облик современной нейтронной физики. Так, при участии Ф. Л. Шапиро, В. И. Лущикова, Ю. Н. Покотиловского и А. В. Стрелкова здесь были открыты ультрахолодные нейтроны. Это открытие положило начало целому направлению фундаментальных исследований, включая эксперименты по прецизионному измерению времени жизни нейтрона, поиску электрического дипольного момента нейтрона, изучению гравитационного квантования нейтронов, проверке слабого принципа эквивалентности. Квантование уровней нейтронов в гравитационном поле Земли, теоретически предсказанное В. И. Лущиковым, было подтверждено экспериментально в 1999 г. в Институте Лауэ–Ланжевена (Франция). Сегодня изучение этих уровней — это уникальный инструмент для поиска так называемой новой физики, явлений, выходящих за рамки Стандартной модели.

Другим примером влияния работ ЛНФ на вектор исследований в мире является экспериментальное изучение нарушения фундаментальных симметрий в нейтрон-ядерных взаимодействиях. Созданная для этих целей установка ПОЛЯНА и другие экспериментальные комплексы ЛНФ позволили провести пионерские измерения нарушения пространственной четности в *p*-волновых резонансах различных ядер, а также исследования, посвященные проверке инвариантности относительно обращения времени. Эти работы способствовали глубокому пониманию фундаментальных взаимодействий в ядерной физике.

Развиваемая сегодня в сотрудничестве с другими лабораториями ОИЯИ методика меченых нейтронов открывает новые возможности для исследований как в фундаментальных, так и в прикладных направлениях. На основе этой методики создаются портативные нейтронные анализаторы для определения элементного состава почв и других материалов в режиме реального времени, востребованные в различных отраслях промышленности и науки. За последние два десятилетия «центр масс» нейтронных исследований лаборатории сместился в область физики конденсированного состояния вещества. ЛНФ достигла значительного прогресса в развитии новых методов и установок для этих исследований. Создание и совершенствование фурье-дифрактометров (ФДВР, ФСД и FSS) на реакторе ИБР-2 открыло новые возможности для структурных исследований материалов с беспрецедентной разрешающей способностью на относительно коротких пролетных базах. Эти установки, развитые в сотрудничестве со специалистами из Петербургского института ядерной физики им. Б. П. Константинова, Техническим исследовательским центром Финляндии и многих зарубежных институтов, заняли лидирующие позиции в мире в области нейтронной дифрактометрии высокого разрешения.

Развитие методов малоуглового рассеяния нейтронов и нейтронной рефлектометрии позволило проводить исследования наносистем с пространственным разрешением в диапазоне от 1 до 1000 нм. Работы в области изучения дендримеров, полимерных структур, магнитных жидкостей, биологически значимых объектов и других наносистем получили признание в международном научном сообществе и регулярно представляются в передовых научных изданиях и на крупнейших международных конференциях.

Значительный вклад в развитие прикладных направлений нейтронной физики внесли исследования по нейтронно-активационному анализу. Установка «Регата» на реакторе ИБР-2 стала мощным инструментом

для решения задач в широком спектре научных направлений, включая экологию, материаловедение, биологию и археологию. ЛНФ координировала программу Организации Объединенных Наций по оценке состояния воздушных загрязнений в Европе на основе анализа мхов-биомониторов в период 2014–2022 гг., что подчеркивает международное признание этих исследований в Дубне.

Создание установки для нейтронной радиографии и томографии на реакторе ИБР-2 и последующее создание аналогичных установок в Казахстане и Узбекистане является примером вклада лаборатории в развитие научной инфраструктуры стран-участниц ОИЯИ и подготовку кадров для них. Методы нейтронной радиографии и томографии открыли новые возможности для неразрушающего анализа объектов культурного наследия, современных материалов и изделий.

Международная программа пользовательских экспериментов на научной инфраструктуре ЛНФ обеспечивает широкий доступ к уникальному экспериментальному оборудованию ученым из стран-участниц ОИЯИ и других государств, способствуя реализации совместных исследовательских проектов и укреплению международного научного сотрудничества. Особое внимание уделяется поддержке молодых ученых и развитию кадрового потенциала через программы школ, организуемых в Институте, и возможности проведения исследований под руководством опытных специалистов из ОИЯИ.

Настоящий раздел посвящен истории, достижениям и текущему состоянию нейтронной физики в ОИЯИ за последние два десятилетия. Лаборатория нейтронной физики им. И. М. Франка остается флагманом нейтронной науки в ОИЯИ и продолжает вносить значительный вклад в развитие этой области на мировом уровне.

ФИЗИКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НЕЙТРОНОВ С ЯДРАМИ

ИМПУЛЬСНЫЕ ИСТОЧНИКИ НЕЙТРОНОВ ИБР, ИБР-30, ИБР-2, ИРЕН

В июне 2025 г. исполнилось 65 лет со времени физического пуска первого в мире импульсного быстрого реактора (ИБР) в ОИЯИ, с которого началась эра использования пульсирующих реакторов в качестве источников нейтронов для широкого спектра фундаментальных и прикладных исследований в ядерной физике и физике конденсированных сред. Его более мощный преемник реактор ИБР-2 начал свою долгую и плодотворную службу для исследований с помощью нейтронов в 1984 г., которая после его существенной модернизации продолжается и поныне. Подробная история создания и использования импульсных источников нейтронов ОИЯИ для исследований в области ядерной физики и физики конденсированных сред, а также ряда прикладных направлений изложена в сборнике[1].

Импульсный режим работы источников нейтронов предназначен для исследования реакций, вызванных нейтронами, методом времени пролета, когда нейтроны разных энергий запускаются в вакуумированный нейтроновод и по их времени прилета к мишени можно непосредственно для каждого импульса определять зависимость от их энергии сечений соответствующих реакций. Кроме того, импульсный режим работы источников нейтронов позволяет получать большой выигрыш в мгновенной плотности потока падающих на мишень нейтронов. Это позволяет, например в случае реактора ИБР-2, иметь одну из самых высоких в мире плотностей потока тепловых и холодных нейтронов.

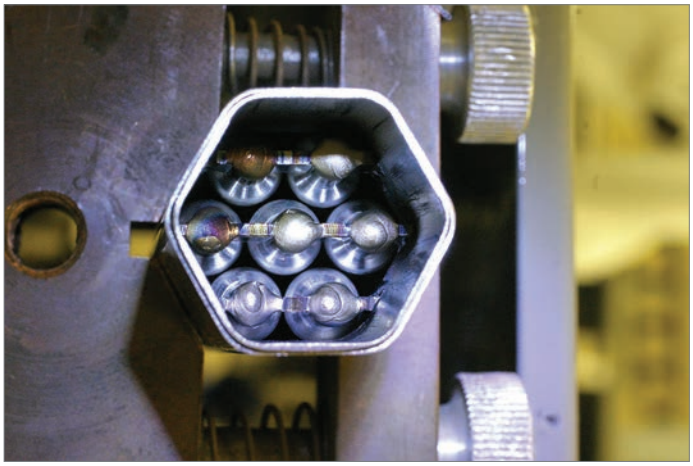
Для первого реактора ИБР пульсирующий режим достигался благодаря вращению малой части активной зоны (модулятора реактивности) по отношению к ее двум стационарным составляющим. Но такой реакторный режим из-за проблемы теплосъема с модулятора реактивности накладывал серьезные ограничения на допустимую делительную мощность активной зоны и продолжительность нейтронного импульса и, соответственно,

[1] Дубна — остров стабильности: Очерки по истории Объединенного института ядерных исследований (1956–2006 гг.) / Ред. В. Г. Кадышевский, А. Н. Сисакян, Ц. Вылов. М.: Академкнига, 2006.

на достижимую плотность импульсного и среднего потоков нейтронов. Для более мощного реактора ИБР-2 был применен другой принцип вариации его мощности, а именно использование вращающегося, не содержащего делящихся материалов, массивного металлического отражателя, расположенного вплотную к подкритической активной зоне. Такой, конечно, весьма сложный подвижный отражатель (ПО) мог охлаждаться потоком газообразного гелия, тогда как компактная активная зона охлаждалась жидким натрием. Средняя мощность такого реактора могла достигать нескольких мегаватт при импульсной мощности более гигаватта и продолжительности импульса порядка 200 мкс, обеспечивая мгновенную плотность потока нейтронов на поверхности замедлителя до 10^{16} см$^{-2}\cdot$с$^{-1}$.

К середине 1990-х гг., когда реактор ИБР-2 успешно отработал на эксперимент более 15 лет, с учетом опыта его интенсивной эксплуатации возникло понимание необходимости его существенной заблаговременной модернизации. По инициативе главного инженера ЛНФ В. Д. Ананьева и директора лаборатории В. Л. Аксёнова, а также с активным участием НИКИЭТ и других организаций Росатома была начата разработка программы модернизации реактора ИБР-2 с тем, чтобы заменить большую часть его узлов, ресурс которых истекал к 2007 г.

Программа модернизации[2] исследовательской ядерной установки ИБР-2 была успешно реализована при существенной финансовой поддержке «Росатома» в период с 2007 по 2010 г. При этом, наряду с заменой части оборудования, было осуществлено одновременное усовершенствование его важнейших элементов, таких как корпус реактора, стационарный отражатель, исполнительные блоки системы управления и защиты, внешние замедлители нейтронов, с целью повышения надежности и долговечности. Стоит отметить, что работы по модернизации ИБР-2 начались ранее



Сборка ТВС ИБР-2М

[2] *Ананьев В. Д., Виноградов А. В., Долгих А. В. и др.* Энергетический пуск модернизированного реактора ИБР-2 (ИБР-2М). Сообщ. ОИЯИ Р13-2012-42. Дубна, 2012.

Установка корпуса нового реактора ИБР-2М

с замены в 2004 г. модулятора реактивности — подвижного отражателя ПО-3, устройства для модуляции периодических импульсов мощности, и изготовления в 2006 г. партии тепловыделяющих сборок (ТВС) для активной зоны нового реактора ИБР-2М из комплектующих и твэлов, поставленных в ОИЯИ предприятиями «Росатома». Сборка ТВС является уникальной для научной организации операцией, тем не менее работа была успешно выполнена сотрудниками ЛНФ ОИЯИ на специально созданном сборочном участке с оформлением лицензии Ростехнадзора на данный вид деятельности.

С 2012 г. после завершения физического и энергетического пусков модернизированный реактор ИБР-2М снова заработал в штатном режиме для проведения физических экспериментов на выведенных пучках.

Физический пуск реактора ИБР-2М

При разработке проекта модернизации ИБР-2 была использована новая концепция композиции и размещения замедлителей нейтронов вокруг реактора ИБР-2М с целью создания наилучших условий для эффективного использования модернизированных и новых спектрометров, а также расширения возможности использования холодных нейтронов в соответствии с возрастающим интересом к исследованиям нано- и мезоскопических структур в физике твердого тела и биологии. Реализация проекта как комплекса криогенных замедлителей в составе криогенных замедлителей КЗ-201, КЗ-202 и КЗ-203, в которых в качестве замедляющего вещества используются дистиллированная вода в камере предзамедлителя и замороженная смесь ароматических углеводородов (мезитилена и m-ксилола) в виде шариков диаметром 3,5–3,8 мм при температуре 30–40 K, засыпанных в криогенную камеру замедлителя, была начата после пуска модернизированного реактора и продолжается в настоящее время (рис. 1).

Модернизация ИБР-2, проведенная в 2007–2010 гг., затронула в основном сам реактор, а также систему контроля и систему управления и защиты. Учитывая то, что реактор ИБР-2, введенный в эксплуатацию в 1984 г., планируется использовать как источник нейтронов для научных исследований еще длительное время, до 2042 г., особую важность приобретает поддержание в работоспособном состоянии оборудования технологических систем установки, системы электроснабжения, строительных конструкций комплекса ИБР-2М, т. е. тех элементов, без которых дальнейшая длительная эксплуатация ядерной установки невозможна. С этой целью техническими специалистами ЛНФ с привлечением (при необходимости) специализированных организаций проводится регулярная работа по продлению ресурса оборудования установки ИБР-2М, важного для безопасности, по результатам которой продлевается срок ее эксплуатации. Таким образом, срок экс-

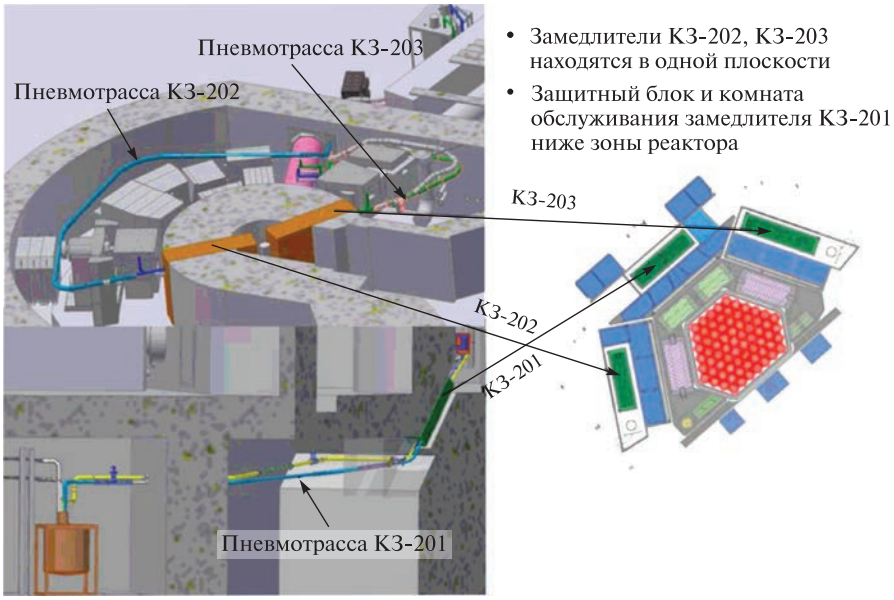


Рис. 1. Комплекс криогенных замедлителей ИБР-2

плуатации установки ИБР-2М был продлен в 2014 г. на 8 лет и в 2022 г. еще на 10 лет.

Кроме продления ресурса систем реактора производится замена морально и физически устаревшего оборудования. К настоящему времени выполнен большой объем работ по реконструкции системы электроснабжения реактора ИБР-2М.

Несмотря на то, что ресурс оборудования системы натриевого охлаждения реактора был продлен до 2032 г., руководством ЛНФ было принято решение о заблаговременной замене воздушных теплообменников (ВТО) 2-го контура системы натриевого охлаждения, находящихся в тяжелых условиях эксплуатации более 40 лет, которые в 1995 и 2018 гг. уже подвергались ремонту в связи с течами трубных пучков. Две течи трубных пучков в каждом теплообменнике, возникшие дополнительно до 2023 г., указали на высокую вероятность возникновения дальнейших подобных инцидентов и необходимость проведения замены ВТО на новые. Это привело к решению об остановке работы реактора для обновления системы натриевого охлаждения активной зоны.

Реально замена оборудования заняла около трех лет до момента пуска в эксплуатацию реактора ИБР-2М из-за того, что проведение этих работ должно было проводиться под контролем Ростехнадзора и при наличии соответствующей лицензии у ОИЯИ, срок действия которой к тому времени истек. Оформление новой лицензии заняло более года, и только в мае 2024 г. после получения новой лицензии сотрудники ЛНФ совместно со специализированной организацией получили возможность приступить к работе. Меньше чем за год был выполнен большой объем работ по замене двух ВТО, осложненный тем, что менять оборудование в силу его

габаритов и массы пришлось с разборкой (и восстановлением) бетонных перекрытий крыши помещения, в котором размещаются теплообменники. Специалисты службы натриевой технологии ИБР-2М совместно с персоналом специализированной организации успешно справились с поставленной задачей, подтвердив высокий уровень своей квалификации.

12 февраля 2025 г. проведен пробный пуск реактора ИБР-2М после длительной остановки для подтверждения готовности его систем к штатной работе. 17 февраля 2025 г. состоялся первый цикл работы реактора ИБР-2М с возможностью работы на экспериментальных каналах.

За время вынужденного простоя реактора ИБР-2М был выполнен значительный объем работ по обновлению его оборудования. Тем не менее запланирована и уже активно проводится работа по дальнейшей замене оборудования, позволяющей продлить до 2040-х гг. срок эксплуатации реактора ИБР-2М. Этой цели позволяет достичь наличие резервного подвижного отражателя, изготовленного АО «Воткинский завод» и поставленного в ОИЯИ в 2019 г., а также запланированное производство дополнительной партии топлива для активной зоны реактора. Таким образом, базовая установка ЛНФ ОИЯИ реактор ИБР-2М будет еще долгое время оставаться в пятерке лучших мировых источников нейтронов для исследований по времени пролета на выведенных пучках медленных нейтронов.

После пуска первого реактора ИБР в 1960 г., когда его средняя делительная мощность составляла около 1 кВт и достигала в импульсе 5 МВт при ширине вспышки до 80 мкс, быстро возникло понимание необходимости повышения его средней мощности и существенного сокращения продолжительности нейтронного импульса для обеспечения более широких возможностей экспериментов по нейтронной ядерной физике. Это положило начало истории по почти непрерывной модернизации реактора ИБР, так что к 1970 г. обновленный реактор ИБР-30 имел уже мощность до 25 кВт (при проектных 30 кВт) и продолжительность нейтронного импульса в режиме бустера 4,5 мкс, когда реактор служил размножителем фотонейтронов, производимых пучком электронов линейного ускорителя ЛУЭ-40 на мишени, расположенной внутри подкритической активной зоны. Импульс пучка электронов ускорителя с энергией 35 МэВ (при проектных 40 МэВ) был сфазирован с механической модуляцией реактивности плутониевой активной зоны ИБР-30 за счет вращения ее части (стальной диск с двумя вкладышами из обогащенного урана). Это обеспечивало коэффициент размножения около 200 при частоте повторения импульсов до 100 Гц и давало интегральный выход нейтронов до $5 \cdot 10^{14}$ $с^{-1}$. Вместе с передовой экспериментальной инфраструктурой, включавшей уникальный поляризатор резонансных и быстрых нейтронов, с возможностью поляризовать ядра-мишени, бустер ИБР-30 + ЛУЭ-40 стал самым светосильным нейтронным источником в Европе с умеренным энергетическим разрешением.

Наличие такого источника в ОИЯИ позволило провести серию пионерских измерений эффектов несохранения пространственной Р-четности в нейтрон-ядерном взаимодействии, а также впервые получить уникальные данные об энергетической зависимости Р-четных и Р-нечетных угловых

корреляций фрагментов деления в нейтронных резонансах компаунд-ядер ^{236}U и ^{240}Pu. Теоретический анализ этих данных позволил получить принципиально новые сведения о квантовой природе ядерного деления.

В начале 1990-х гг., еще до исчерпания ресурсов механического оборудования реактора ИБР-30 и его топливной загрузки, в руководстве ЛНФ началось обсуждение проекта нового нейтронного источника высокого разрешения (НИВР) для работ по ядерной физике. Тем более что в те же годы обновленная дирекция ОИЯИ выдвинула предложение о закрытии базовой установки ИБР-30 + ЛУЭ-40 как устаревшей. В результате было сформулировано предварительное техническое задание для нового бустерного источника резонансных нейтронов[3] (ИРЕН), состоявшего из компактной быстрой (с коротким временем жизни нейтронов) подкритической плутониевой активной зоны в качестве размножителя фотонейтронов, генерируемых в охлаждаемой потоком гелия мишени-конвертере пучком электронов из линейного ускорителя с энергией 200 МэВ. Коэффициент размножения K_p был выбран сравнительно небольшим ($K_p \approx 30$), чтобы существенно сократить продолжительность импульса быстрых нейтронов (до 0,43 мкс) и обеспечить высокое разрешение экспериментов по времени пролета нейтронов. Для получения высокого среднего выхода нейтронов мощность ускорителя ЛУЭ-200 должна была достигать 10–12 кВт с цикличностью до 200 Гц. В совокупности установка ИРЕН должна была обеспечивать средний выход нейтронов до 10^{15} с$^{-1}$, а ускоритель ЛУЭ-200 должен был иметь темп ускорения не ниже 25 МэВ на метр, чтобы вписаться в габариты существующего здания комплекса ИБР-30 + ЛУЭ-40. Достижение таких проектных параметров могло поставить ИРЕН в ряд лучших в мире источников резонансных нейтронов.

Предварительные обсуждения в рамках объявленного конкурса на проект ускорителя ЛУЭ-200 позволили остановиться на варианте[4], предложенном Институтом ядерной физики (ИЯФ) СО РАН. Работу по проектированию размножающей мишени и инженерный проект установки ИРЕН согласились вести институты Росатома НИКИЭТ и ГСПИ.

Проект ИРЕН был официально утвержден Ученым советом ОИЯИ летом 1994 г., однако фактически первый значимый шаг по реализации проекта был сделан за полгода до этого, когда по решению вице-директора ОИЯИ А. Н. Сисакяна в Стэнфордском университете (США) был закуплен клистрон 5045 SLAC мощностью 60 МВт, который был необходим для создания ускорителя ЛУЭ-200.

Ввиду тяжелого финансового положения в Институте проект ИРЕН практически с самого начала был лишен необходимых средств для выполнения плана-графика, утвержденного Ученым советом ОИЯИ, со сроком исполнения три года. С большой задержкой, к концу 2000 г., в ИЯФ СО РАН

---

[3] *Aksenov V. L. et al.* Proposal for the Construction of the New Resonanse Neutron Source (IREN). JINR Preprint E3-92-110. Dubna, 1992.

[4] *Novokhatski A. V., Alexandrov A. V., Avilov M. S. et al.* Linear Accelerator for Intense Resonance Neutron Source (IREN) // Proc. 2nd Workshop on JINR Tau-Charm Factory, Dubna, 27–29 April 1993. Dubna, 1994. P. 197–211.

были созданы и поставлены две ускорительные секции ЛУЭ-200 и начаты их испытания на стенде. К этому же времени в ПО «Маяк» было завершено изготовление твэлов для размножающей мишени. В 2001 г. в порядке выполнения проекта ИРЕН был остановлен прослуживший более 30 лет и исчерпавший свой ресурс безопасной эксплуатации источник нейтронов ИБР-30 + ЛУЭ-40 и совместно с ГСПИ была начата работа по подготовке к демонтажу его активированного оборудования. К концу 2004 г. твэлы для размножающей мишени были доставлены из ПО «Маяк» в ОИЯИ. Практически одновременно НИКИЭТ и ГСПИ завершили технический и инженерный проекты установки ИРЕН. Их результаты позволили понять, что средства, необходимые для выполнения проекта в полном объеме, существенно превышают предварительные оценки, утвержденные в исходном решении Ученого совета ОИЯИ 1994 г.

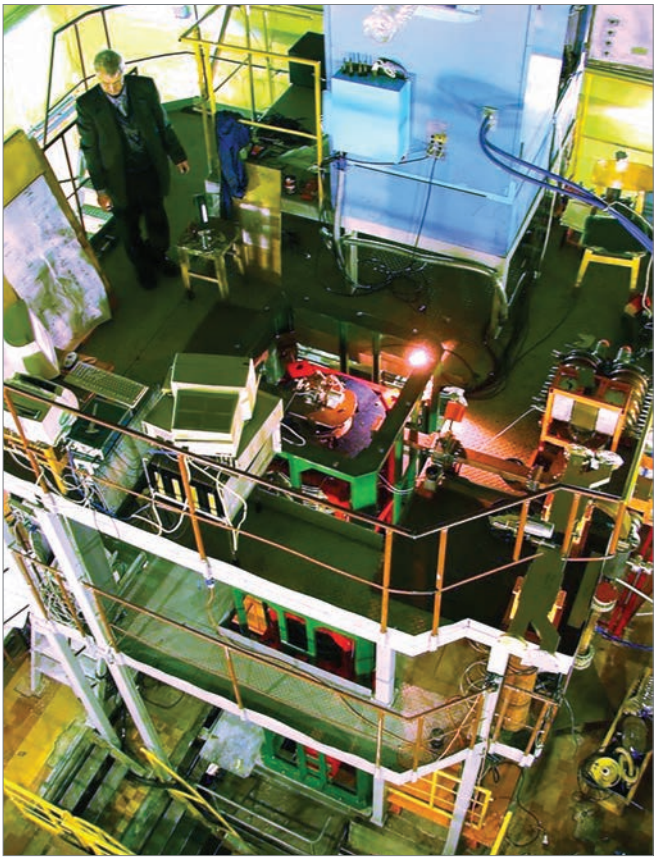
После продолжительных обсуждений в Программно-консультативном комитете по ядерной физике и в дирекции ОИЯИ было принято тяжелое, но реалистичное решение исключить из проекта ИРЕН подкритическую размножающую сборку, ограничившись охлаждаемой водой вольфрамовой нейтронопроизводящей мишенью для электронного пучка ускорителя ЛУЭ-200.

Демонтаж ускорителя ЛУЭ-40 и реактора ИБР-30 был завершен в 2006 г., и после дезактивации и ремонта помещений был начат монтаж оборудования ускорителя ЛУЭ-200. К сожалению, в процессе монтажа оборудования в 2007 г. был поврежден клистрон 5045 SLAC, и для пуска первой очереди установки ИРЕН в составе одной ускоряющей секции пришлось использовать имевшийся в ОИЯИ клистрон TH2129 французской фирмы Thomson с в три раза меньшей мощностью. В январе 2009 г. состоялся физический пуск первой очереди новой базовой установки ЛНФ, а конце года был получен интегральный выход нейтронов на уровне $3 \cdot 10^{11}$ $с^{-1}$ при частоте повторения импульсов 50 Гц с длительностью ≈ 100 нс.

Коллектив установки ИРЕН после ее физического запуска

С такими параметрами установка отработала на эксперимент несколько тысяч часов, после чего началась работа по включению в установку второй ускорительной секции и поиску резервов увеличения мощности ускорителя ЛУЭ-40. В процессе этой работы были выявлены существенные недостатки в исходном проекте ЛУЭ-200, которые не позволяли достигнуть первона-

И. Н. Мешков, В. В. Кобец, В. Н. Швецов и А. П. Сумбаев за обсуждением параметров ИРЕН



Ускоритель ЛУЭ-200

чально сформулированных параметров ускорителя. Сейчас ведется расчетно-теоретическая работа совместно с ИЯФ СО РАН по устранению этих недостатков.

История и итоги этой продолжительной работы подробно описаны в публикации[5]. Реально выход нейтронов удалось увеличить до $1{,}2 \cdot 10^{12}$ $с^{-1}$. В таком режиме установка ИРЕН регулярно работает на эксперимент уже около 10 лет.

ОТКРЫТИЕ УЛЬТРАХОЛОДНЫХ НЕЙТРОНОВ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ С НИМИ

Лаборатория нейтронной физики ОИЯИ является местом, в котором были открыты ультрахолодные нейтроны (УХН). На реакторе ИБР со средней мощностью около 6 кВт команда под руководством Ф. Л. Шапиро в составе В. И. Лущикова, Ю. Н. Покотиловского и А. В. Стрелкова выполнила эксперимент, в котором продемонстрировала возможность длительного хранения УХН в материальных ловушках. На протяжении тридцати лет после этого сотрудники ЛНФ работали с УХН на источниках внутри страны и за рубежом, участвуя в экспериментах по измерению времени жизни свободного нейтрона, поиску причин аномалии во времени хранения УХН и др.

К началу XXI в. исследования с УХН сосредоточились в Институте Лауэ–Ланжевена (ILL, Гренобль, Франция), где с 1980-х гг. успешно работает один из самых интенсивных источников УХН в мире. Группы под руководством А. В. Стрелкова и А. И. Франка выполнили ряд экспериментов в области исследования так называемого слабого нагрева УХН при хранении в материальных ловушках, квантовых эффектов при взаимодействии УХН с нестационарными объектами и в других направлениях. Продолжилось сотрудничество с ПИЯФ в эксперименте по измерению времени жизни нейтрона на установке КОВШ, созданной совместно ЛНФ и ПИЯФ в середине 1980-х гг. Исследования свойств низкотемпературных безводородных масел фомблинов, выполненные Ю. Н. Покотиловским, позволили выбрать наиболее подходящее покрытие для стенок ловушки установки КОВШ и провести эксперимент с лучшей в мире точностью определения времени жизни нейтрона.

Открытие в 1999 г. в ILL явления квантования уровней нейтронов сверхнизких энергий ($\sim 10^{-12}$ эВ) в гравитационном поле Земли, предсказанного в 1977 г. В. И. Лущиковым и А. И. Франком, позволило выполнить целый ряд экспериментов в образованной с участием физиков ЛНФ коллаборации GRANIT (Gravitational Neutron Induced Transitions). Созданные в этой коллаборации гравитационные спектрометры позволили обнаружить резонансные переходы между различными уровнями нейтронов в гравитационном поле Земли и точно измерить энергии самих уровней.

---

[5] *Сумбаев А. П., Голубков Е. А., Жиронкин И. С. и др.* Ускоритель ЛУЭ-200. Состояние, возможности и проблемы развития. Сообщ. ОИЯИ Р9-2025-16. Дубна, 2025.

Работы группы А. В. Стрелкова, начатые в конце прошлого века, посвященные поиску причин так называемой аномалии во времени хранения УХН в материальных ловушках, привели к обнаружению эффекта «малого» нагрева УХН при помощи созданного в ЛНФ большого гравитационного спектрометра. Было доказано, что это явление вызвано рассеянием УХН на связанных с поверхностью ловушки наночастицах. Впоследствии эти исследования привели к изучению взаимодействия холодных и очень холодных нейтронов с порошками наночастиц и созданию таких покрытий из порошков наноалмазов, которые существенно увеличивают вероятность отражения нейтрона от поверхности нанопорошка, позволяя создавать отражатели и ловушки для хранения холодных и очень холодных нейтронов.

Целый ряд экспериментов по исследованию нестационарных квантовых эффектов при взаимодействии УХН с различными объектами был выполнен группой А. И. Франка с использованием реализованной в ЛНФ методики монохроматизации УХН при помощи интерферометра Фабри–Перо. Так, в 2004 г. был обнаружен эффект расщепления моноэнергетической линии УХН, сформированной интерферометром, при взаимодействии с вращающейся дифракционной решеткой. Впоследствии эта методика была использована в экспериментах по исследованию влияния ускоренного движения вещества на изменения спектра проходящих через него УХН и в ряде экспериментов по проверке слабого принципа эквивалентности для нейтрона, которые установили равенство инертной и гравитационной масс нейтрона с точностью на уровне 0,1 %.

ПОИСК И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТОВ НАРУШЕНИЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ СИММЕТРИЙ В НЕЙТРОННО-ЯДЕРНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ

После открытия группой Ц. Ву нарушения пространственной четности (Р-четности) слабым взаимодействием в бета-распаде кобальта естественно возник интерес к проверке Р-четности в ядерных взаимодействиях и особенно в нейтрон-ядерных, поскольку для нейтрона отсутствует кулоновский барьер. Уже ранние теоретические оценки показали, что вероятность обнаружения нарушения Р-четности наиболее велика в тяжелых ядрах из-за коллективного характера взаимодействия медленного нейтрона с нуклонами. Однако первые эксперименты не дали результата из-за недостаточной точности.

Наконец в 1964 г. пришел успех — Ю. Г. Абов и П. А. Крупчицкий из ИТЭФ обнаружили нарушение Р-четности в радиационном захвате поляризованных медленных нейтронов ядрами ^{113}Cd. Далее новосибирские физики О. П. Сушков и В. В. Фламбаум разработали модель, которая помимо коллективного характера нейтрон-ядерного взаимодействия, получившего название динамического усиления, предсказывала также усиление нарушения Р-четности в ядерных резонансах. Последнее связано с тем, что при взаимодействии нейтрона через стадию составного ядра он проводит в нем

намного больше времени, чем просто при пролете через ядро. Значит, у любого искомого взаимодействия есть больше времени, чтобы проявиться.

Первые эксперименты по проверке Р-четности в резонансных реакциях нейтронов с ядрами были выполнены в ЛНФ группой В. П. Алфименкова и Л. Б. Пикельнера на установке ПОЛЯНА. Установка включала поляризатор нейтронов на основе поляризованной протонной мишени и позволяла проводить измерения полных сечений нейтрон-ядерного взаимодействия. Нарушение Р-четности наблюдалось в *p*-волновых резонансах лантана и некоторых изотопов олова, кадмия и брома. Особенно велик был эффект нарушения в резонансе лантана с энергией 0,73 эВ. Эти результаты вызвали огромный интерес — подобные установки были созданы в Японии и США, где проводились систематические исследования нарушения Р-четности в *p*-резонансах многих ядер. Однако измеренные Р-нечетные эффекты в тяжелых ядрах не позволили получить величину нуклон-нуклонного матричного элемента, связанного с нарушением четности.

Поэтому группой Ю. М. Гледенова в ЛНФ была выполнена серия экспериментов по проверке Р-четности в реакциях медленных нейтронов с легкими ядрами ^{6}Li и ^{10}B. На легких ядрах динамическое и резонансное усиление отсутствует, тем не менее группе удалось измерить эффект нарушения на литии с беспрецедентной точностью на уровне 10^{-8}.

Параллельно с изучением нарушения Р-четности в полных нейтронных сечениях и реакциях с легкими ядрами проводились эксперименты по ее проверке в делении. Первые эксперименты были выполнены группой Г. В. Даниляна в ИТЭФ на пучке тепловых нейтронов с ядрами урана и плутония. Позднее подобные эксперименты проводились в Гатчине и ЛНФ ОИЯИ как с тепловыми, так и с резонансными нейтронами вплоть до окончания работы ИБР-30.

Открытие несохранения четности в ядерных реакциях пробудило интерес к проверке временно́й инвариантности (Т-инвариантности) — симметрии ядерных взаимодействий при обращении времени. Такие эксперименты намного сложнее, и в ряде случаев для них нужен не только пучок поляризованных нейтронов, но и поляризованные или выстроенные ядерные мишени. Кроме того, возможен целый ряд факторов, приводящих к ложным эффектам. Такие эксперименты в полном масштабе до сих пор не поставлены. Однако в 1990-х гг. А. Л. Барабанов из ИАЭ им. И. В. Курчатова предложил оригинальную модель, которая позволяла получить некоторую информацию о таких взаимодействиях из угловых корреляций при радиационном захвате неполяризованных нейтронов. Эти эксперименты провели в ЛНФ Э. И. Шарапов и В. Р. Ской на ядрах изотопов кадмия и олова. Полученные результаты позволили установить верхний предел на величину взаимодействия, нарушающего Т-инвариантность.

В настоящее время готовится эксперимент по более детальному изучению подобных эффектов на нейтронном источнике ИРЕН. Ведется работа по созданию поляризатора нейтронов на основе ^{3}He с оптической накачкой для продолжения изучения нарушений Р-четности и, возможно, Т-инвариантности.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА МЕЧЕНЫХ НЕЙТРОНОВ ДЛЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Изучать методы меченых нейтронов (ММН) на пучках электростатического ускорителя Ван де Граафа ЭГ-5 в ЛНФ предложил В. М. Быстрицкий (ЛЯП). Первые эксперименты были начаты в 1999 г. В них участвовали А. П. Кобзев, И. А. Чепурченко (ЛНФ), В. М. Быстрицкий (ЛЯП) и большая группа сотрудников ЛФВЭ: Н. И. Замятин, В. А. Никитин, В. Л. Рапацкий, Ю. Н. Рогов, М. Г. Сапожников, В. М. Слепнев.

Основная идея метода меченых нейтронов заключается в детектировании альфа-частиц в реакции синтеза дейтерия и трития:

$$d + t \rightarrow {}^4\mathrm{He}\ (3{,}5\ \text{МэВ}) + n\ (14{,}1\ \text{МэВ}),\quad Q = 17{,}6\ \text{МэВ}.$$

Согласно кинематике реакции альфа-частицы (^{4}He) должны излучаться в направлении, противоположном направлению распространения нейтронов. В результате неупругого взаимодействия быстрых нейтронов с ядрами исследуемого вещества возбужденные ядра высвобождают часть полученной энергии путем испускания гамма-квантов со спектром, характерным для каждого элемента. Это дает возможность на расстоянии, без какого-либо отбора пробы, определить элементный состав исследуемого вещества.

Первая установка на пучке дейтронов ЭГ-5 имела тритиевую мишень в 1,7 Ки, одноканальный альфа-детектор на основе ZnS и гамма-детектор из кристалла NaI(Tl) диаметром 200 мм. Боевое крещение установки состоялось, когда были измерены спектры только самых основных элементов — графита, воды и спирта. Еще не было никакого математического аппарата для определения массовых концентраций веществ, но уже были интересующиеся практическими применениями этого метода — представители Таможенного комитета РФ, которых привлек Ю. К. Недачин (НПЦ «Аспект»). Таможенники осмотрели установку, услышали, что можно по виду спектра разделять спектры графита, воды и спирта, и устроили проверку: бросили графитовый куб в емкость со спиртом. Когда физики, волнуясь, признались, что никогда такого спектра не получали, что он содержит линии как углерода, так и кислорода, но не в характерном для спирта соотношении, — судьба развития метода меченых нейтронов решилась положительно.

В 2001–2002 гг. в ОИЯИ под руководством И. П. Иванова (ЛВЭ) был сделан первый портативный нейтронный генератор, работающий в так называемом откачном режиме. Ресурс работы генератора составлял 50 ч, после чего тритиевую мишень надо было менять.

В 2002 г. установка на ЭГ-5 разрослась, были испытаны различные альфа-детекторы — пластиковые, кремниевые, проверены гамма-детекторы на основе LySO и BGO. Появились первые публикации, и была открыта тема в ПТП ОИЯИ для исследований ММН. Большую поддержку развитию ММН оказывал директор ОИЯИ академик В. Г. Кадышевский.

В 2013 г. возникла идея оформить деятельность, связанную с методом меченых нейтронов, в виде проекта, объединив усилия нескольких лабораторий ОИЯИ, а также других заинтересованных институтов из России

и стран-участниц ОИЯИ. В это время в ЛНФ была создана многодетекторная спектрометрическая система на основе сцинтилляционных детекторов NaI(Tl), изготовленных в Институте сцинтилляционных материалов (Харьков, Украина). Такая система хорошо подходила для исследований угловых распределений гамма-квантов, образующихся в неупругом рассеянии нейтронов с энергией 14,1 МэВ, что позволяло начать эксперименты с мечеными нейтронами сразу же после одобрения проекта на ПКК ОИЯИ.

Основными участниками проекта стали ЛНФ, ЛЯП, ЛФВЭ, ЛРБ, ВНИИА им. Н. Л. Духова (Москва), МГУ им. М. В. Ломоносова (Москва), Институт им. Р. Бошковича (Загреб, Хорватия) и ИЯИЯЭ БАН (София, Болгария). Нейтронный генератор ИНГ-27 со встроенным 64-пиксельным позиционно-чувствительным детектором альфа-частиц был предоставлен ВНИИА им. Н. Л. Духова в качестве добровольного взноса в проект. Руководителем проекта был избран Ю. Н. Копач (ЛНФ), заместителем руководителя — В. М. Быстрицкий (ЛЯП), координатором — И. Н. Русков (ИЯИЯЭ БАН, Болгария). Проект получил название TANGRA, от английского TAgged Neutrons & Gamma RAys.

В течение первого этапа реализации проекта были проведены оптимизация и изготовление защиты детекторов гамма-квантов от прямого нейтронного излучения и создана установка «Ромашка» (рис. 2) на основе 22 детекторов NaI(Tl).

На этой установке были измерены угловые распределения γ-квантов, испускаемых в реакции неупругого рассеяния нейтронов с энергией 14,1 МэВ на ряде образцов. В частности, были получены наиболее точные данные по угловым распределениям на углероде. Также в процессе реализации первого этапа проекта была отработана методика определения элементного состава сыпучих руд и создан стенд для испытания приборов ядерной планетологии.

Впоследствии экспериментальная установка была дополнена двумя другими конфигурациями: на основе 18 детекторов BGO и на основе детектора из особо чистого германия (ОЧГ). На установке с детекторами BGO были

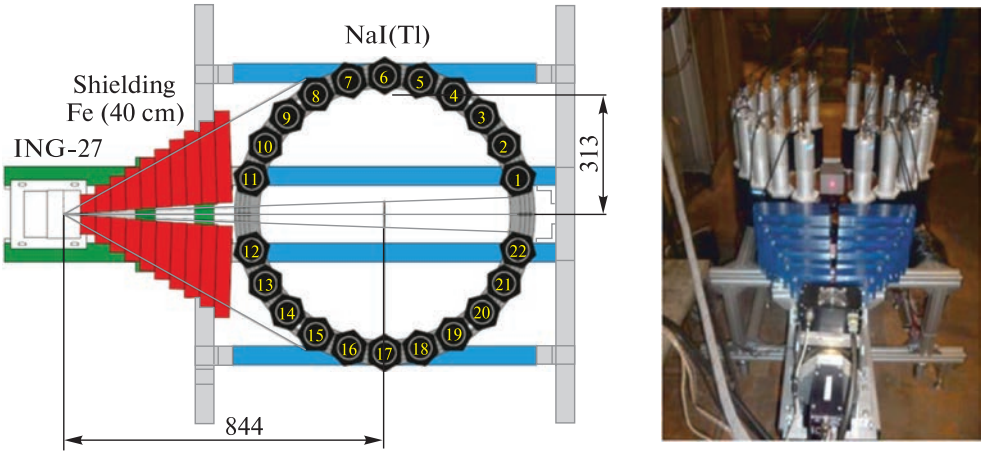
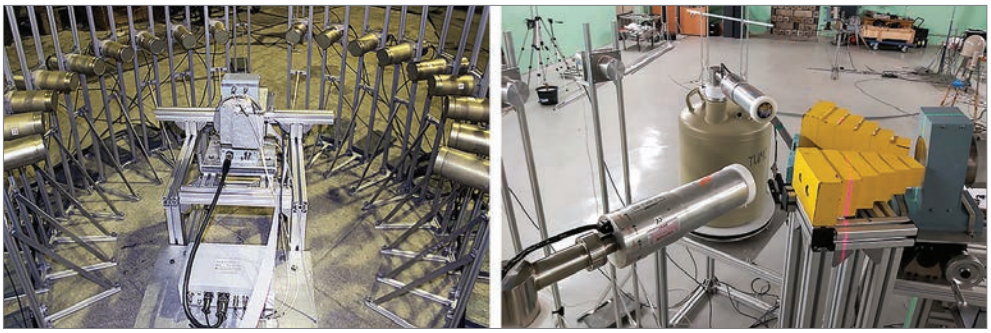


Рис. 2. Схема и фотография установки «Ромашка»

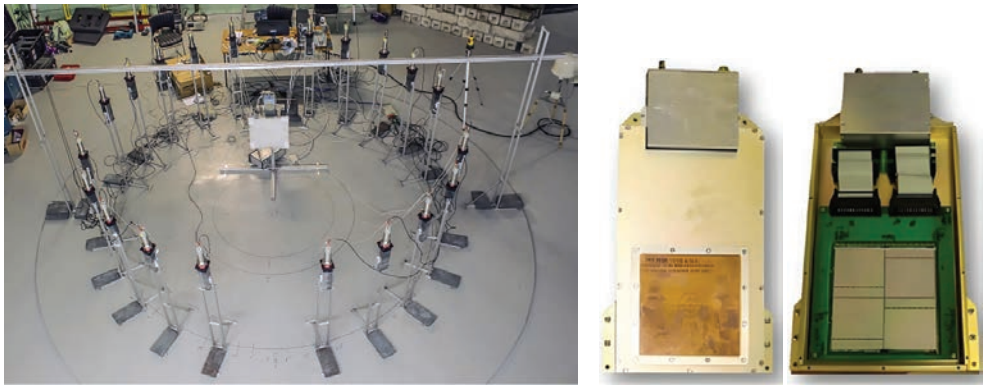


Установка с 18 детекторами BGO (слева) и ОЧГ (справа)

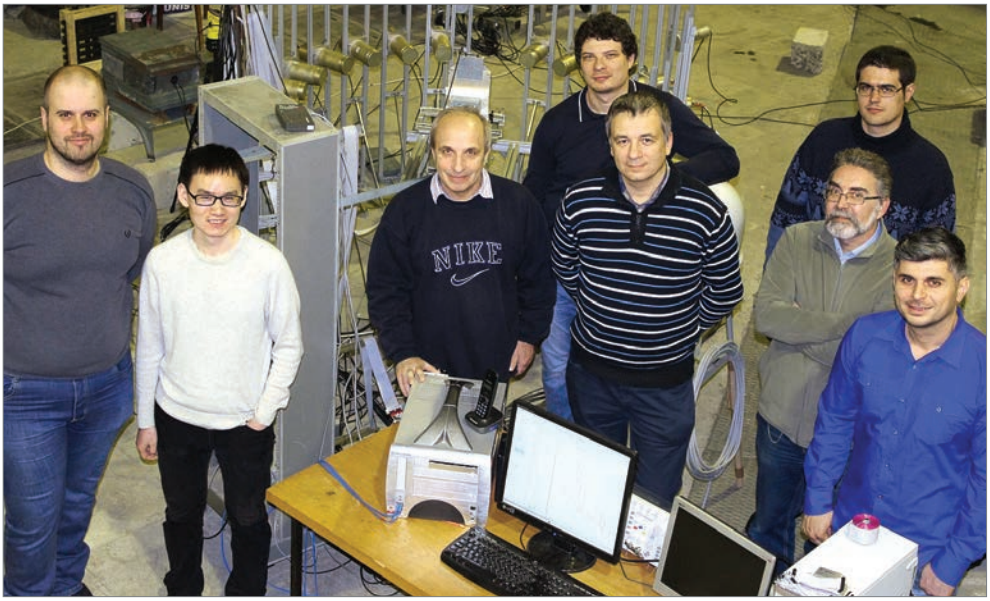
продолжены измерения угловых распределений гамма-квантов в неупругом рассеянии нейтронов на разных образцах в наиболее сильных гамма-переходах, а на установке с детектором ОЧГ были измерены выходы гамма-квантов в этих же реакциях.

Помимо выходов и угловых распределений гамма-квантов в проекте TANGRA изучались также дифференциальные сечения упругого и неупругого рассеяния нейтронов. В качестве мишени был выбран углерод, у которого уровни возбуждения могут быть достаточно хорошо идентифицированы за счет измерения энергии рассеянного нейтрона методом времени пролета. Для этого использовалась установка из 20 пластиковых сцинтилляторов, расположенных на расстоянии 2 м вокруг исследуемой углеродной мишени, облучаемой пучками меченых нейтронов.

В сотрудничестве с группой под руководством Н. И. Замятина (ЛФВЭ) был создан уникальный двухкоординатный позиционно-чувствительный детектор быстрых нейтронов (ДБН) на основе кремниевых стриповых детекторов с разрешением 1,8 мм. В сотрудничестве с Ван Дунмином из Сианьского университета Цзяотун (Сиань, Китай) была разработана и протестирована методика гамма-радиографии с модулированной по времени случайно кодированной апертурой.



Установка из 20 пластиковых детекторов нейтронов (слева) и детекторы быстрых нейтронов (справа)



Участники проекта TANGRA. Слева направо: Д. Н. Грозданов (Болгария), Ван Дунмин (Китай), И. Н. Русков (Болгария), К. Храмко (Молдова), Ю. Н. Копач (Россия), В. Р. Ской (Россия), Н. А. Федоров (Россия), Ф. Алиев (Азербайджан). 2017 г.

Активное участие в развитии и применении метода меченых нейтронов в ЛНФ принимали В. Р. Ской, К. Храмко, Ф. Алиев, Т. Ю. Третьякова, П. С. Прусаченко, П. Харламов. Д. Н. Грозданов, Н. А. Федоров и С. Дабылова защитили кандидатские диссертации по этой тематике. Более 20 студентов подготовили и защитили бакалаврские и магистерские дипломные работы. В рамках проекта завязалось сотрудничество с Александрийским университетом, Египет (М. Бадави, М. Хамада), Бенаресским индуистским университетом, Варанаси, Индия (А. Кумар, А. Ганди), Университетом Нови-Сада, Сербия (Н. Йованчевич, Д. Кнежевич), Университетом науки и технологий Пабны, Бангладеш (П. Дас).

СПЕКТРОМЕТРЫ И ИССЛЕДОВАНИЯ НА ИБР-2

МЕЖДУНАРОДНАЯ ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКАЯ ПРОГРАММА ЛНФ

Объединенный институт ядерных исследований, отмечающий в 2026 г. свое 70-летие, является одним из ведущих международных центров фундаментальных и прикладных исследований в области ядерной физики, материаловедения, нейтронной физики и смежных дисциплин. Лаборатория нейтронной физики, входящая в состав ОИЯИ, играет ключевую роль

в обеспечении научного сообщества уникальными экспериментальными возможностями, предоставляя доступ к современным нейтронным источникам и установкам.

Одним из важнейших механизмов, способствующих развитию науки и международного сотрудничества в ЛНФ, является пользовательская программа. Она направлена на предоставление широкого доступа к экспериментальному оборудованию лаборатории ученым из разных стран и организаций, что помогает реализовывать разнообразные исследовательские проекты — от фундаментальных экспериментов по изучению структуры вещества до прикладных исследований в области материаловедения, биологии и медицины.

Пользовательская программа ЛНФ отличается прозрачностью и объективностью процесса отбора проектов. Каждая заявка проходит тщательную экспертную оценку, учитывающую научную значимость, инновационность и техническую реализуемость эксперимента. Такой подход обеспечивает высокое качество исследований и эффективное использование ресурсов лаборатории.

Особое внимание в рамках программы уделяется поддержке молодых ученых и аспирантов. Возможность проведения экспериментов на современном оборудовании под руководством опытных специалистов ЛНФ способствует развитию кадрового потенциала и формированию нового поколения исследователей, готовых к решению сложных научных задач.

Международный характер ОИЯИ и ЛНФ способствует активному обмену знаниями и опытом между учеными из разных стран, что укрепляет научные связи и создает платформу для совместных проектов. Пользовательская программа является одним из ключевых инструментов реализации этой стратегии. Она обеспечивает интеграцию усилий исследовательских коллективов и расширяет горизонты научных исследований.

За семь десятилетий своего существования ОИЯИ и ЛНФ внесли значительный вклад в развитие нейтронной физики и смежных областей. Пользовательская программа стала важным фактором этого успеха, обеспечивая стабильный приток новых идей и реализацию передовых научных проектов. В будущем программа продолжит развиваться, внедрять инновационные технологии и расширять спектр доступных экспериментов, что позволит ОИЯИ сохранять лидирующие позиции в мировой науке.

Таким образом, пользовательская программа ЛНФ — это не просто механизм доступа к оборудованию, а важный элемент научной экосистемы ОИЯИ, способствующий развитию международного сотрудничества, поддержке молодых ученых и достижению новых вершин в исследовании природы.

ФУРЬЕ-ДИФРАКТОМЕТРЫ И РОЛЬ ЛНФ В СОЗДАНИИ МЕТОДИКИ

В нейтронных дифракционных исследованиях атомной и магнитной структур кристаллических материалов, а также организации их микро-

структуры зачастую требуется высокая разрешающая способность экспериментальной установки — дифрактометра, под которой принято понимать относительную ширину дифракционных пиков: $R = \Delta d/d$, где d — межплоскостное расстояние. Уровень разрешающей способности во многом определяет тип и сложность задач, решение которых возможно на конкретном дифрактометре. Например, анализ структуры поликристалла, имеющего объем элементарной ячейки ~1000 Å^3 и больше, с включением уточнения тепловых факторов атомов в анизотропном варианте возможен только на дифрактометрах высокого разрешения, а именно если $R \leqslant 0{,}001$.

Для импульсных источников нейтронов, каким является реактор ИБР-2, величина Δd во многом определяется шириной импульса источника Δt и расстоянием L, которое преодолевают нейтроны от источника до образца и затем до детектора. Из простых расчетов следует, что величины $R \leqslant 0{,}001$ можно достичь, если $\Delta t \leqslant 20$ мкс и $L \geqslant 80$ м. Такие характеристики достижимы на нейтронных источниках на основе ускорителей (SNS-источники), но для ИБР-2, имеющего импульс шириной около 350 мкс, пролетное расстояние было бы слишком большим, и поэтому требуется сокращение импульса с помощью какого-либо типа быстрого прерывателя.

В конце 1980-х гг. в результате совместных обсуждений с участием специалистов из ЛНФ, ПИЯФ РАН (Гатчина) и Центра технических исследований (VTT, Эспо, Финляндия) было принято решение о создании на ИБР-2 дифрактометра высокого разрешения на основе быстрого многощелевого прерывателя. Это устройство, получившее название *фурье-прерывателя*, включает вращающийся диск (ротор) с регулярным расположением и одинаковой шириной прозрачных и непрозрачных для тепловых нейтронов промежутков и неподвижный статор с такой же, как на роторе, конфигурацией щелей. Периодическая, пилообразная функция пропускания такого прерывателя по форме близка к синусоиде, и, как следует из математического анализа, при фиксированной частоте модуляции первичного пучка нейтронов интенсивность рассеянных нейтронов представляет собой функцию, близкую к соответствующей фурье-гармонике сечения рассеяния. Варьируя частоту вращения ротора от нулевой до некоторой максимальной и выполняя обратное фурье-преобразование, можно восстановить вид сечения рассеяния. Большое количество (~1000) и малая ширина (~1 мм) щелей фурье-прерывателя позволяют увеличить его пропускание до 25% (вместо стандартного 0,5%) и сократить эффективную ширину импульса до 10 мкс. Однако сильное перекрытие спектров от соседних импульсов требует использования корреляционных способов восстановления спектра рассеянных нейтронов.

У специалистов из Гатчины и Эспо уже был опыт использования этого метода (его впоследствии стали называть *фурье-дифрактометрия*). В середине 1980-х гг. на реакторе в ПИЯФ был создан дифрактометр мини-СФИНКС, на котором удалось продемонстрировать основное достоинство метода — возможность получения высокого разрешения на очень коротком пролетном расстоянии (около 6 м вместо 80 м). Однако проблемой использования фурье-дифрактометрии на стационарном источнике

нейтронов оказался высокий уровень специфического корреляционного фона, пропорционального полной зарегистрированной интенсивности. Тогда же стало ясно, что в случае импульсного источника эта компонента фона может быть значительно уменьшена путем учета корреляции сигналов с детектора и импульса мощности источника, и тем самым эффективность дифрактометра увеличивается во много раз.

Необходимые модельные вычисления новой установки на ИБР-2, получившей название ФДВР — *фурье-дифрактометр высокого разрешения*, были завершены в 1989 г., на основе чего был оформлен совместный проект ОИЯИ (Дубна) — ПИЯФ (Гатчина) — VTT (Эспо), основное финансирование которого взяла на себя государственная научно-техническая программа «Высокотемпературная сверхпроводимость». Часть необходимых средств была выделена ОИЯИ при поддержке фонда BMBF (ФРГ). Корреляционная электроника для ФДВР и фурье-прерыватель с системой управления изготавливались в Эспо, зеркальный нейтроновод и детектор — в ПИЯФ, ЛНФ взяла на себя проводку нейтронного пучка и создание программного обеспечения. Опыт наладки дифрактометра мини-СФИНКС помогал преодолевать возникавшие проблемы, и уже летом 1992 г. на макетном варианте ФДВР были зарегистрированы первые дифракционные спектры, характеристики которых полностью подтвердили модельные расчеты. Было показано, что при пролетном расстоянии от прерывателя до места образца, составлявшем всего 20 м, разрешение дифрактометра может достигать (оно зависит от скорости вращения ротора прерывателя) $R = 0{,}0009$. Примерно такое же разрешение получено на дифрактометре HRPD, действующем на SNS-источнике ISIS (Великобритания), но при использовании в 5 раз большего пролетного расстояния (около 100 м).

В работах по моделированию, проектированию, изготовлению отдельных узлов, монтажу и наладке ФДВР принимали участие многие сотрудники отделов физики конденсированных сред (ФКС) (начальник Ю. М. Останевич) и радиоэлектроники и вычислительной техники (РЭВТ) (начальник Г. П. Жуков) ЛНФ, лаборатории В. А. Трунова (ПИЯФ) и группы проф. П. Хиисмяки (VTT, Эспо). Переговоры о заключении соглашения ОИЯИ–ПИЯФ–VTT по созданию ФДВР были проведены Ю. М. Останевичем и А. М. Балагуровым, они же определили место в экспериментальном зале ИБР-2 для размещения ФДВР. Ключевая роль в выделении необходимого финансирования и заключении контрактов на изготовление основных узлов ФДВР принадлежала директору ЛНФ В. Л. Аксёнову. Наиболее активное участие в последующих работах принимали сотрудники отделов ФКС и РЭВТ ЛНФ А. А. Богдзель, В. В. Журавлев, В. Е. Новожилов, Е. В. Серочкин, А. П. Сиротин, Ю. В. Таран, В. Г. Тишин, В. Г. Симкин. В монтаже оборудования и выполнении первых экспериментов активно участвовали А. П. Булкин, В. А. Кудряшев, В. Г. Муратов, В. А. Трунов, В. А. Ульянов (все ПИЯФ) и О. Антсон, Х. Пеюри, А. Тиита, П. Хиисмяки (все VTT). В подготовку программного обеспечения накопления, визуализации и анализа данных основной вклад внесли А. И. Островной (ЛНФ), Д. А. Балагуров и В. Б. Зло-

казов (ЛИТ ОИЯИ). Координация всех работ осуществлялась В. Л. Аксёновым и А. М. Балагуровым.

Комплектация ФДВР была завершена к 1994 г., после чего началась его стационарная эксплуатация и выполнение научной программы. За прошедшие годы на ФДВР проведено большое количество научных дифракционных экспериментов. Уточнялись структуры высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП), водородосодержащих соединений, разнообразных оксидов (перовскитов, шпинелей, браунмиллеритов и др.), металлических сплавов и т. д. Как правило, это были не единичные работы, а серии экспериментов, для выполнения которых организовывались коллаборации, включающие специалистов по синтезу кристаллов, их макроскопической аттестации, измерению нейтронных дифракционных спектров и анализу полученных данных. Наиболее заметными стали циклы работ по структуре ртутных ВТСП (совместно с лабораторией Е. В. Антипова, МГУ), по явлению фазового расслоения в манганитах с эффектом колоссального магнетосопротивления (А. Р. Кауль, МГУ), по природе гигантского изотопического эффекта в манганитах (Н. А. Бабушкина, НИЦ КИ), по фазовым переходам в кобальтитах (И. О. Троянчук, Минск), по микроструктурным эффектам в простых оксидах (Н. Миронова-Ульмане, Рига), по структурным состояниям железогаллиевых сплавов с эффектом гигантской магнитострикции (И. С. Головин, НИТУ МИСиС).

Важной особенностью ФДВР является возможность простого переключения между модами высокого разрешения ($\Delta d/d \approx 0{,}001$) и высокой светосилы со средним разрешением ($\Delta d/d \approx 0{,}010$). Нейтронограммы, измеренные с высоким разрешением (для этого, как правило, требуется 1–3 ч времени), используются для прецизионного уточнения структуры и анализа профилей дифракционных пиков. Во второй моде полный дифракционный спектр может быть измерен с необходимой статистикой за время 1–5 мин, и она применяется для анализа фазовых трансформаций в материале, например, в ходе его непрерывного нагрева до 1200 K и последующего охлаждения при скорости изменения температуры от одного до нескольких градусов в минуту. Эта же мода используется при изучении процессов в электрохимических источниках тока в ходе их непрерывного заряда–разряда.

Спустя некоторое время после запуска и проведения первых успешных экспериментов на ФДВР возникла идея применить метод нейтронной фурье-дифрактометрии для исследования остаточных механических напряжений в различных материалах и изделиях. Одним из инициаторов этого прикладного направления исследований был проф. Ю. Шрайбер (Институт неразрушающих методов контроля, Дрезден, Германия), который оказывал весомую помощь коллегам из ЛНФ на протяжении многих лет. Первые эксперименты по исследованию напряжений на ФДВР начались в 1993 г. и были вполне успешны благодаря высокой разрешающей способности дифрактометра. Однако вскоре стала очевидна необходимость создания на реакторе ИБР-2 второго фурье-дифрактометра — ФСД (*фурье-стресс-дифрактометр*), оптимизированного для исследования остаточных напряжений в объемных изделиях и новых перспективных материалах и оснащенного

специальным оборудованием. Проект по созданию ФСД начался в 1998 г., и уже в 2000 г. были выполнены первые эксперименты. В создании ФСД активно участвовали коллеги из ПИЯФ (А. П. Булкин, В. А. Кудряшев, В. А. Трунов), а также большой коллектив сотрудников ЛНФ ОИЯИ (В. Л. Аксёнов, А. М. Балагуров, Г. Д. Бокучава, И. В. Папушкин, А. В. Тамонов, Е. С. Кузьмин, А. А. Богдзель, В. В. Журавлев, В. А. Бутенко, В. А. Дроздов, А. П. Сиротин, А. И. Кирилов, Т. Б. Петухова, С. М. Мурашкевич).

За время работы на ФСД проведено множество экспериментов, характеризующих основные направления в этой области исследований: изучение механических свойств материалов при различных режимах нагрузки (С. Гук, TU Bergakademie Freiberg, Германия), различных сварных соединений (П. Петров, ИЭ БАН, София, Болгария), структурных компонентов различных промышленных изделий, новых перспективных материалов (Р. Фернандес, CENIM, Мадрид, Испания), градиентных структур и композитов. Результаты выполненных экспериментов показали высокую эффективность ФСД для решения самых разнообразных задач в области физического материаловедения.

Опыт использования фурье-дифрактометров для анализа структурных характеристик различных материалов показал, что одним из важнейших параметров дифрактометра является светосила прибора, обусловленная наличием развитой детекторной системы. Это особенно актуально при проведении экспериментов, требующих высокой светосилы, например, при анализе малых примесных фаз, изучении слаборассеивающих материалов, измерении остаточных напряжений в малом рассеивающем объеме в глубине промышленного образца и т. д. В связи с этим на ФСД недавно была создана уникальная детекторная система при углах рассеяния $2\theta = 90^\circ$, состоящая из двух широкоапертурных детекторов ASTRA на основе сцинтиллятора ZnS(Ag)/^{6}LiF с угловым раствором 40° в горизонтальной плоскости рассеяния и суммарным телесным углом $\Omega = 0{,}55$ ср.

В 2025 г. на ФДВР установлен кольцевой детектор обратного рассеяния ($2\theta = 133-175^\circ$) на основе сцинтиллятора ZnS(Ag)/^{6}LiF с рекордным телесным углом $\Omega = 2$ ср. Это позволило увеличить светосилу дифрактометра примерно в 6 раз и, соответственно, количество проводимых экспериментов примерно в два-три раза. При этом новая детекторная система обеспечила высокую точность получаемой структурной информации, а также существенно расширила возможности дифрактометра при проведении экспериментов при задании различных внешних воздействий на образец, изучении быстрых процессов и т. д.

Еще одним важным этапом в развитии метода фурье-дифрактометрии было внедрение нового метода регистрации всех событий эксперимента (старты реактора, сигналы детекторов, сигналы пикапа прерывателя) в списочном режиме list-mode. Оригинальная идея для накопления RToF данных в режиме list-mode была предложена коллегами из ПИЯФ В. А. Кудряшевым, В. А. Труновым, В. Г. Муратовым, А. М. Пироговым еще в 1996 г. на 1-й Европейской конференции по рассеянию нейтронов ECNS'96 (Интерлакен, Швейцария). Однако доступные в то время блоки электроники

не обеспечивали требуемых характеристик для применения этого подхода при разумных затратах. Эту идею удалось реализовать на фурье-дифрактометрах только в 2014 г., когда в ЛНФ ОИЯИ был разработан новый унифицированный блок MPD на микросхемах ПЛИС ALTERA, предназначенный для регистрации и сбора «сырых» данных в режиме list-mode с индивидуальных счетчиков нейтронов или модулей детекторов. Такой способ накопления данных позволил использовать новые возможности, которые не были доступны на RToF-анализаторах первых версий, и существенно улучшить качество дифракционных спектров высокого разрешения.

В 2014 г. на реакторе ИБР-2 был установлен еще один фурье-дифрактометр — FSS (Fourier Strain Scanner), который успешно эксплуатировался в 1990–2010 гг. на стационарном реакторе FRG-1 в научно-исследовательском центре GKSS (Германия) для исследования остаточных напряжений в материалах и изделиях. В 2010 г. реактор FRG-1 был окончательно выведен из эксплуатации. В связи с этим дифрактометр FSS был перевезен в ЛНФ ОИЯИ и размещен на реакторе ИБР-2. За последние несколько лет на FSS проведена модернизация основных узлов и устройств. В частности, были установлены новый зеркальный нейтроновод и новый, более быстрый фурье-прерыватель, внедрена новая система накопления данных в режиме list-mode, начаты работы по созданию новой детекторной системы и т. д. Это позволило существенно улучшить разрешающую способность и светосилу прибора и начать выполнение регулярных нейтронографических экспериментов по различным актуальным задачам физического материаловедения. Таким образом, в настоящее время все три существующие в мире фурье-дифрактометра (ФДВР, ФСД и FSS) успешно функционируют на импульсном реакторе ИБР-2.

В целом практический опыт эксплуатации фурье-дифрактометров продемонстрировал, что нейтронная корреляционная фурье-дифрактометрия, основанная на сочетании метода обратного времени пролета для сбора данных и использовании быстрого фурье-прерывателя для модуляции интенсивности падающего нейтронного пучка, позволяет достичь высокого уровня разрешения дифрактометра в широком диапазоне межплоскостных расстояний d_{hkl} при относительно коротких пролетных базах как на стационарных реакторах, так и на импульсных источниках нейтронов. Также корреляционная фурье-дифрактометрия является весьма достойной альтернативой ToF-дифрактометрам с длинными пролетными базами и с системами из множества прерывателей, обеспечивая оптимальный баланс между интенсивностью и разрешением в нейтронографическом эксперименте и позволяя с высокой точностью определять различные структурные параметры современных материалов, извлекать микроструктурные характеристики материала с помощью прецизионного анализа профиля дифракционного пика, измерять остаточные деформации и напряжения в различных промышленных образцах и изделиях и т. д. Особенно эффективно использование метода корреляционной фурье-дифрактометрии на источнике нейтронов с длинным импульсом, таком как реактор ИБР-2, что позволило

проводить на нем совершенно уникальные прецизионные эксперименты и вывести его в число лучших источников нейтронов в мире.

НЕЙТРОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАНОСИСТЕМ НА ИБР-2

С начала 2000-х гг. ИБР-2 стал знаковым инструментом для проведения обширных нейтронных исследований наносистем — объектов, свойства которых определяются структурными особенностями на наношкале 1–100 нм. Методы изучения наносистем — малоугловое рассеяние и рефлектометрия — получили мощный импульс развития на ИБР-2, что отразилось в проведении многочисленных экспериментов фундаментального и прикладного характера с самым широким кругом объектов в рамках пользовательской политики.

Малоугловое рассеяние нейтронов

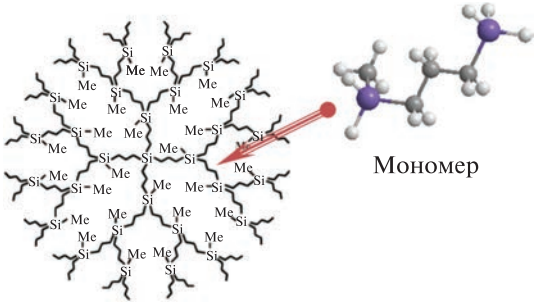
В период после смены тысячелетия в ЛНФ появилась новая концепция конфигурации малоуглового рассеяния нейтронов (МУРН) — известного эффективного метода для изучения фундаментальных проблем и решения важнейших технологических задач. Этот метод широко применяется при исследованиях надатомной структуры вещества в диапазоне 20–1000 Å.

Предложенная и реализованная на четвертом канале ИБР-2 идея многодетекторной установки была впоследствии с разными вариациями реализована и на многих малоугловых инструментах: 1) на European Spallation Source, где был предложен детектор конической формы, фактически собирающий все нейтроны; 2) в ILL на стационарном реакторе с использованием четырех прерывателей с разными их комбинациями, ближним и дальним детекторами; 3) на реакторе аналогичной конструкции OPAL в Австралии.

Создание многодетекторной системы на спектрометре МУРН было затруднено особой системой нормализации данных. Однако удалось сохранить абсолютную шкалу интенсивности рассеяния, а также возможности нормализации данных на ванадиевый стандарт. Активно помогали В. И. Горделию, А. Х. Исламову и А. И. Куклину на разных этапах реализации проектов Ю. С. Ковалев, А. В. Рогачев, Т. Н. Муругова и многие другие сотрудники лаборатории. Именно создание многодетекторной системы на установке позволило реализовать эксперименты и получить результаты в области нового направления в науке о полимерах — дендримерах.

Дендримеры. Задачи, которые были решены на спектрометре с новой конфигурацией, появились благодаря В. И. Горделию с привлечением выдающихся ученых, таких как А. М. Музафаров и А. Н. Озерин (рис. 3). Работу начали с простых моделей, но с помощью группы малоуглового рассеяния — А. И. Куклина, А. Х. Исламова, Р. Мухамедзянова, а затем А. В. Рогачева и А. Ю. Черного удалось получить уникальные и неожиданные результаты.

Синтезированный в середине 1980-х гг. новый класс полимеров — дендримеры — изучался с помощью многих методов. Однако вопросы структуры дендримера до сих пор являются открытыми. В частности, к таким



✓ Синтез таких дендримеров хорошо контролируется
✓ Присутствие нефункциональных концевых групп обусловливает долгосрочную стабильность химической структуры

Рис. 3. А. Н. Озерин, А. Н. Музафаров (Институт синтетических полимерных материалов РАН) и схематическое изображение полиалилкарбосилановых дендримеров

вопросам относятся возможное наличие внутренних полостей и проникновение растворителя внутрь дендримера. Появление этого нового класса веществ с ярко выраженным монодисперсным характером распределения по размерам и формам требует создания адекватной модели для описания экспериментальных кривых рассеяния. В подходе, разработанном А. Ю. Черным, А. В. Рогачевым и А. И. Куклиным, была предложена модель дендримера, представляющего собой объект, состоящий из шаровых секторов, имеющих общую вершину. Количество секторов выбирается исходя из функциональности дендримера. Такая модель может представлять интерес не только для дендримерных образцов, но и для многих других макромолекулярных систем. Более того, результаты такого моделирования могут показать необходимость постановки экспериментов с выделенной ориентацией образцов. И напротив, модель с усреднением может предоставить возможность определения с помощью малоуглового рассеяния нейтронов наличия (отсутствия) растворителя внутри дендримера. Показанная анизометричность формы макромолекул дендримеров, противоречащая данным атомно-силовой микроскопии, нашла свое подтверждение в результатах, полученных методом молекулярной динамики.

Диапазон по переданному импульсу, в котором проводилось моделирование, был выбран исходя из экспериментальных данных, полученных на спектрометре ЮМО в двухдетекторном варианте.

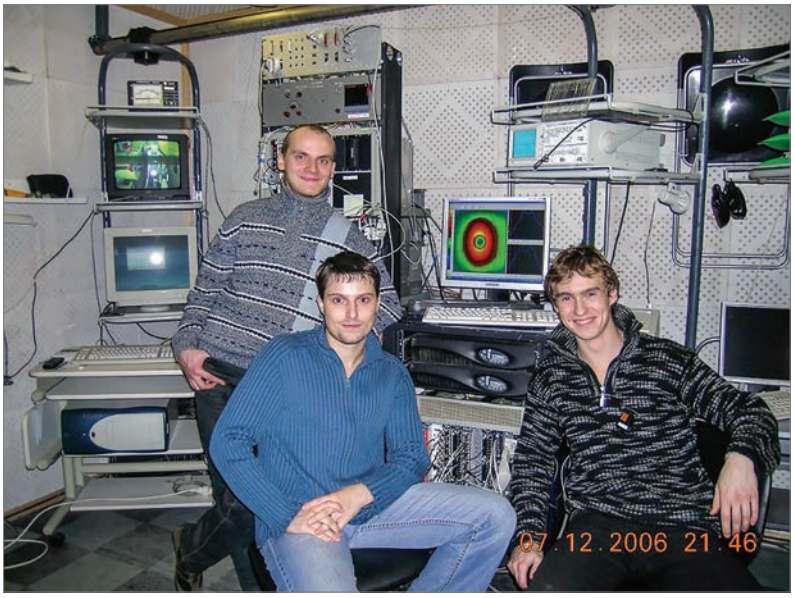
Последние измерения с дендримерами перед остановкой реактора в 2006 г. проводились в конфигурации не просто с тремя детекторами (включая детектор прямого пучка), но также и с позиционно-чувствительным детектором (ПЧД).

Позиционно-чувствительный детектор с центральным отверстием для малоуглового рассеяния появился в проекте в 2002 г., тесты проводились с 2003 г., а в штатном положении детектор использовался в 2006 г.,

в том числе с растворами дендримеров. Новый уникальный детектор с центральным отверстием создавался международным коллективом с участием А. И. Куклина, А. С. Кутузова, А. Габриэля, П. К. Утробина, А. А. Смирнова, А. А. Богдзеля, А. Х. Исламова, В. Компара, Ж. Коскаса, Г. Экольда, В. И. Горделия. Уникальность детектора в основном была в том, что он представлял собой многопроволочную камеру с центральным отверстием. Результаты испытаний и работы уникального ПЧД с центральным отверстием и чувствительной областью 580 × 580 мм показали высокое разрешение, хорошую дифференциальную и интегральную однородность. Особенностями этого детектора являются: однокамерный вариант, высокое пространственное разрешение (нити расположены через 2,5 мм) и центральное отверстие, которое позволяет использовать детектор не только в прямой, но и в обратной геометрии. Система накопления данных для метода времени пролета имеет скорость не ниже 1,7 мегасобытий/с. Были проведены испытания детектора с рентгеновским излучением (Гренобль, Франция), а также с нейтронами на стационарном реакторе (LLB, Сакле, Франция). Эксперименты продемонстрировали высокую разрешающую способность и однородность чувствительности детектора.

Испытания детектора на 4-м канале ИБР-2 были проведены с моно- и поликристаллами в обратной геометрии. Полученные картины рассеяния демонстрируют работоспособность детектора во времяпролетном режиме, высокую разрешающую способность и возможность работы детектора в интенсивном потоке быстрых и тепловых нейтронов. Детектор был опробован и в штатном положении в двухдетекторном варианте. Получены картины рассеяния как от слаборассеивающих, так и от сильнорассеивающих образцов, изотропных и анизотропных. Показано, что кривые рассеяния в абсолютной шкале интенсивности для ПЧД и кольцевого детектора совпадают. Проведенные испытания продемонстрировали не только высокую разрешающую способность детектора, но и расширение диапазона по переданному импульсу, а также возможность использования детектора в многодетекторной системе установки ЮМО. Подобные детекторы могут быть также эффективными и на спектрометрах с обратной геометрией. В настоящее время проходит замена электроники детектора и разработка программ для управления в рамках программы SONIX+.

Разработка и инсталляция на спектрометре малоуглового рассеяния камеры по созданию на образце высокого гидростатического давления (PVT-установки до 4 кбар) позволили изучить фазовые переходы в мицеллярных растворах в широком диапазоне температуры, давления и концентрации сурфактанта. Была изучена кинетика фазового перехода мицеллы – твердая фаза, определена фазовая диаграмма растворов, и показана зависимость скорости перехода от температуры, давления и концентрации сурфактанта. Обнаружено двухфазное сосуществование мицелл и преципитатов (твердая фаза) при определенных условиях концентрации, давления и температуры. Эксперименты, реализованные на модернизированном реакторе ИБР-2М на PVT-установке для смесей липидных мембран, впервые показали, что происходит одновременный скачок изотермической сжимаемости и периода повторяемости в липидных смесях в избытке воды.



Молодые сотрудники группы по малоугловому рассеянию, занятые в проекте создания позиционно-чувствительного детектора и модернизации спектрометра ЮМО. Слева направо: Ю. С. Ковалев, А. В. Рогачев, А. И. Иваньков. На компьютере представлена полученная на ПЧД картина малоуглового рассеяния от ориентированного образца

Было показано, как разделить ядерный и магнитный вклады в интенсивность рассеяния на установке без магнитного поля и поляризованных нейтронов. Продемонстрировано, что методом вариации контраста в эксперименте с МУР неполяризованных нейтронов можно разделять вклады ядерной и магнитной составляющих. Это, как отмечалось, был тогда совершенно новый результат.

За рамками данной работы остались результаты исследований в области магнитных жидкостей, липидных мембран, белков и белковых комплексов, супрамолекулярная организация родопсина в фоторецепторной мембране, полимеры и растворы полимеров, металлические нанообъекты и другие наносистемы, исследованные А. И. Иваньковым, А. Х. Исламовым, Т. Н. Муруговой, А. В. Рогачевым, М. Балашою, Д. И. Соловьевым и, конечно же, В. И. Горделием, Н. Кучеркой; в последнее время — А. В. Власовым, Ю. Л. Рижиковым, А. Набиевым. Отметим лишь, что малоугловые эксперименты показали, что при включении системы объемной регуляции в митохондриях печени и сердца крысы происходят ультраструктурные перестройки.

Возможностями коллектива и установки объясняется и интерес ученых, участвовавших в трех международных конференциях по малоугловому рассеянию, которые проводятся раз в 5 лет. Пленарные заседания конференций всегда проходили в духе открытой дискуссии. В разное время приезжали и делали доклады ведущие ученые: Х. Штурман, Ж. Тейксейра, Д. Заккаи,

Участники 3-й Международной конференции по малоугловому рассеянию нейтронов к 80-летию со дня рождения Ю. М. Останевича. В первом ряду слева направо: Т. Куркин, А. Исламов, Д. Угрикова, А. И. Куклин, Ж. Пепи, Т. Н. Муругова, А. В. Белушкин, В. Л. Аксёнов, Т.-С. Штурман, Х. Штурман (создатель метода вариации контраста), А. Балашою, Р. Эрхан. 2016 г.

А. Видеман, А. Н. Озерин, А. Хохлов, Ж. Пепи, П. Балгави, В. И. Горделий, Д. Катзарас, Д. Угрикова, Я. Педерсон, Р. Хинан, В. Исаев-Иванов, Д. Лебедев, В. Лебедев, Н. Кучерка, Г. Экольд, Й. Плештил, Г. Поспишил, Л. Алмаши. Группа малоуглового рассеяния нейтронов всегда была интернациональной, в частности, в ней работали немецкие коллеги Ф. Хойслер, Н. Горский, М. Хемпель, чешские и словацкие ученые Й. Плештил, Г. Поспишил, Н. Кучерка, М. Беличка, польские: А. Раевска, румынские: М. Балашою, Р. Эрхан, Ю. Анитас. Часто бывали в Дубне и проводили эксперименты П. Балгави, Д. Угрикова, Л. Ягужинский, Л. Барсуков, Й. Плештил, Г. Поспишил, Ю. Калус, Н. Мелик-Нубаров, Л. Алмаши. Через школы ОИЯИ для выполнения магистерских, бакалаврских и студенческих работ на установке малоуглового рассеяния под руководством сотрудников группы ЮМО прошли свыше 50 студентов. Многие коллеги приезжали не только из стран-участниц Института, но и из дружественных государств.

Нейтронная рефлектометрия

С помощью рефлектометрии тепловых нейтронов анализируется отражение плоскоколлимированного пучка, направляемого под малыми углами скольжения на планарную границу раздела, которая может иметь сложную гетерогенную структуру. Цель эксперимента — нахождение распределения оптического потенциала взаимодействия среды с нейтроном (рассеивающей плотности) в приграничной области толщиной до 500 нм. Метод

используется прежде всего для исследований низкоразмерных слоистых наноструктур на твердых поверхностях. Наряду с внешними поверхностями проникающий характер нейтронного излучения позволяет с высокой эффективностью изучать скрытые границы раздела, в том числе содержащие жидкие фазы. Отдельное направление связано с чувствительностью нейтронов к магнитным упорядочениям на границах раздела, которое обусловливает развитие техники рефлектометрии поляризованных нейтронов для изучения магнитных гетероструктур на поверхности. Магнетизм нанослоев сегодня представляет не только фундаментальный, но и прикладной интерес, который определяется развитием спинтроники, объединяющей в себе методы хранения и обработки информации на основе спиновых состояний электронов в среде.

Рефлектометрические исследования ведутся в ЛНФ с 1980-х гг., когда на ИБР-2 был запущен первый в мире спектрометр поляризованных нейтронов на импульсном источнике (Д. А. Корнеев, А. Байорек). Это послужило основой для создания впоследствии рефлектометров мирового класса, на которых сегодня реализуется отдельное научное направление — нейтронная оптика. Так, в 1994 г. введен в эксплуатацию специализированный рефлектометр с поляризованными нейтронами РЕФЛЕКС (Д. А. Корнеев, Л. П. Черненко, В. И. Боднарчук), на котором в начале 2000-х гг. были экспериментально подтверждены предсказанные В. К. Игнатовичем эффекты зеемановского расщепления при отражении нейтронов от магнитнонеколлинеарных сред (Д. А. Корнеев, В. И. Боднарчук, С. В. Кожевников, Ю. В. Никитенко, В. Л. Аксёнов), а также апробированы различные подходы в зеркальной рефлектометрии по времени пролета к исследованию тонких пленок (Д. А. Корнеев, В. К. Игнатович, С. П. Ярадайкин, В. И. Боднарчук). В последние годы на РЕФЛЕКС развивалось методическое направление. Установка активно использовалась в сотрудничестве с FZ Juelich (Германия) как база для развития принципиально новых методик с использованием поляризованных нейтронов, например спин-эхо малоуглового рассеяния нейтронов, в исследованиях уже объемных наносистем (А. И. Иоффе, В. И. Боднарчук, В. В. Садилов).

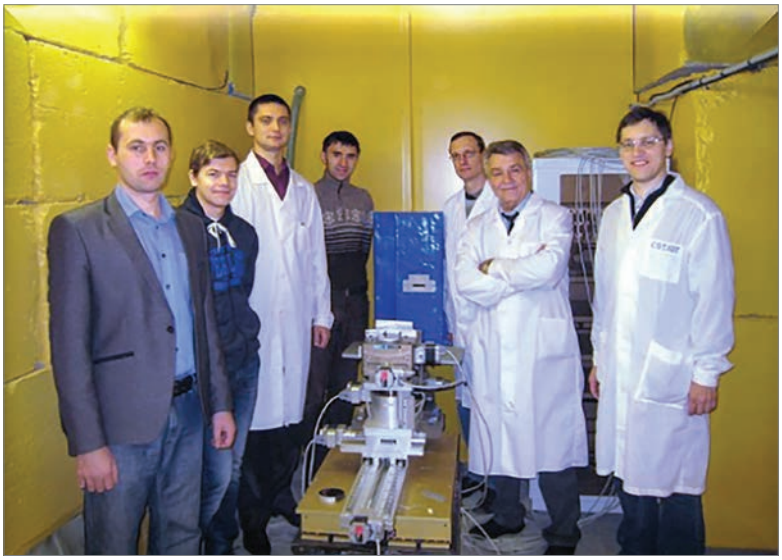
В 2004 г. на основе первоначального рефлектометра СПН (Д. А. Корнеев, В. В. Пасюк, А. В. Петренко, Е. Б. Докукин) создается спектрометр рассеяния поляризованных нейтронов при скользящем падении РЕМУР (В. Л. Аксёнов, Ю. В. Никитенко, Х. Лаутер, В. Лаутер-Пасюк, А. В. Петренко, К. Н. Жерненков, С. В. Кожевников) при поддержке программы сотрудничества ОИЯИ–BMBF (Германия). При участии ПИЯФ РАН для РЕМУР был разработан и успешно испытан веерный анализатор поляризации нейтронного пучка (В. М. Пусенков, Н. К. Плешанов, Б. Г. Песков, В. Г. Сыромятников, В. А. Ульянов, А. Ф. Щебетов). На РЕМУР была реализована полная трехмерная рефлектометрия, позволяющая регистрировать различные каналы отражения: зеркальное отражение, диффузное рассеяние и малоугловое рассеяние под скользящими углами — с полным поляризационным анализом. Тогда же на нем в сотрудничестве с KFKI SzFKI (Венгрия) и TU Muenchen (Германия) были получены знаковые результаты по изучению

магнитных доменов в многослойных гетероструктурах (Д. Л. Надь, Л. Ботьян, Х. Лаутер, В. Лаутер-Пасюк, А. В. Петренко). В 1998–2001 гг. В. Л. Аксёновым и Ю. В. Никитенко предложен метод регистрации изменения спинового состояния нейтрона в резонансно усиленном нейтронном волновом поле при полном отражении поляризованных нейтронов от многослойной квазидвумерной наноструктуры, который в 2004–2020 гг. лег в основу цикла исследований на РЕМУР эффектов близости в плоских нанослоистых гетероструктурах сверхпроводник/ферромагнетик (В. Л. Аксёнов, Ю. В. Никитенко, К. Н. Жерненков, Ю. Н. Хайдуков, В. Д. Жакетов). В эти же годы предложен метод усиления вторичного излучения внутриядерных процессов после захвата нейтронов примесными атомами в резонансных многослойных структурах (В. Л. Аксёнов, Ю. В. Никитенко, Ю. М. Гледенов, Н. А. Гундорин, А. В. Петренко, П. В. Седышев). Метод положен в основу изотопно-чувствительной нейтронной рефлектометрии, впервые развитой в ЛНФ. В 2015–2019 гг. на нейтронном рефлектометре РЕМУР реализованы каналы регистрации вторичного излучения: заряженных частиц и гамма-квантов (Ю. В. Никитенко, В. Д. Жакетов). Таким образом, была создана единственная в мире экспериментальная база для нового направления

Участники запуска рефлектометра РЕМУР в экспериментальном зале ИБР-2. Слева направо: Ю. В. Никитенко, А. В. Петренко, Х. Лаутер, В. Л. Аксёнов, С. В. Кожевников, В. А. Ульянов. 2003 г.

в нейтронографии — резонансной нейтронной рефлектометрии. На РЕМУР исследовались нейтронно-оптические явления в слоистых волноводах, которые на основе эффекта продольного каналирования позволяют получить нейтронные микропучки с рекордно малой (до нескольких микрометров) шириной (С. В. Кожевников). Такие пучки могут быть использованы для исследования локально-неоднородных микроструктур, включая распределение намагниченности, с высоким пространственным разрешением. Из многочисленных экспериментов по рефлектометрии поляризованных нейтронов, выполненных в последние годы на РЕМУР в рамках политики пользователей, можно выделить изучение совместно с ИФМ УрО РАН слоистых сверхрешеток Fe/Cr/Gd, в которых обменное взаимодействие между слоями 3*d* (Fe) и 4*f* (Gd) ферромагнитных металлов происходит через слой антиферромагнитного Cr. Как результат показано, что в слое Gd формируется неоднородный пространственный профиль намагниченности (М. В. Рябухина, В. В. Проглядо, Е. А. Кравцов).

В 2013 г. в рамках развития пользовательской политики в странах-участницах ОИЯИ запущен нейтронный рефлектометр ГРЭИНС (М. В. Авдеев, В. И. Боднарчук, Л. А. Булавин, В. И. Петренко, И. В. Гапон, А. В. Нагорный, А. В. Томчук) для исследований границ раздела с жидкими средами. Установка создавалась в сотрудничестве с НИЦ КИ ПИЯФ (В. А. Ульянов, С. И. Калинин, А. П. Булкин) и при поддержке программы сотрудничества ОИЯИ–BMBF (Германия). Наличие жидкой среды в исследуемой системе позволяет проводить вариацию контраста посредством изотопного замещения H/D без изменения химической структуры границы раздела, что расширяет информационные возможности рефлектометрического эксперимента. Основной акцент в рефлектометрических экспериментах по времени пролета делается на *in situ* исследования, позволяющие прослеживать эволюцию границ раздела во времени при изменении внешних условий. Для этого развивается система окружения образца, создаются специализированные экспериментальные ячейки, позволяющие помещать исследуемые системы в контролируемые внешние условия, включая температуру, влажность, электромагнитное поле. Научная программа ГРЭИНС формировалась при тесном сотрудничестве ЛНФ ОИЯИ с физическим факультетом КНУ (Украина) под руководством М. В. Авдеева (ЛНФ) и Л. А. Булавина (КНУ). В рамках политики пользователей на ГРЭИНС развивались традиционные для жидкостных рефлектометров направления, включая адсорбцию биологических макромолекул на липидных слоях (Н. Кучерка, П. Грубовчак), адсорбцию мицеллярных агрегатов поверхностно-активных веществ на полимерных покрытиях (Л. А. Булавин, В. И. Петренко, А. П. Артикульный, М. М. Авдеев), стеклование тонких полимерных и композитных слоев (Т. В. Тропин, Н. Жаргалан). Проведен ряд важных прикладных исследований, связанных с поведением жидких коллоидов на границе раздела с твердой подложкой в различных условиях. Так, в сотрудничестве с CFATR (Румыния), IEP (Словакия) и UP (ЮАР) исследована адсорбция наночастиц из магнитных жидкостей на твердую поверхность. Изучено влияние на нее агрегационной устойчивости магнитных жидкостей, а также эф-



Участники запуска рефлектометра ГРЭИНС для пользователей. Слева направо: А. В. Нагорный, И. В. Гапон, А. В. Томчук, В. И. Петренко, В. И. Боднарчук, Л. А. Булавин, М. В. Авдеев. 2013 г.

фекты внешних магнитных и электрических полей (М. В. Авдеев, В. И. Петренко, И. В. Гапон, А. В. Нагорный, Л. А. Булавин, М. Балашою, Л. Векаш, М. Райнак, М. Карпец, В. Зависова, М. Тимко, П. Копчански, П. Селищев). В сотрудничестве с химическим факультетом МГУ в 2017–2021 гг. проведен цикл работ по исследованию структуры планарных границ раздела для перспективных высокоемкостных литиевых накопителей энергии с металлическими электродами. Нейтронная рефлектометрия оказалась уникальным инструментом, позволяющим проследить эволюцию структуры скрытого слоя, осаждаемого на металлический электрод при зарядке электрохимической ячейки, на начальной стадии литиевого осаждения. Данный слой определяет качество и устойчивость электрода при цикличной работе литиевого накопителя. Исследовано влияние на микроструктуру этого слоя неэлектроактивных добавок, тестируемых на практике в качестве антидендритного агента в литиевых накопителях данного вида (Д. М. Иткис, Л. В. Яшина, И. В. Гапон, В. И. Петренко, В. И. Боднарчук, А. В. Томчук, Е. Н. Косячкин, М. В. Авдеев).

НЕЙТРОННАЯ РАДИОГРАФИЯ И ТОМОГРАФИЯ НА ИБР-2 И ДРУГИХ ИСТОЧНИКАХ НЕЙТРОНОВ ГОСУДАРСТВ-ЧЛЕНОВ ОИЯИ

С помощью метода нейтронной радиографии за счет разной степени ослабления интенсивности нейтронного пучка при прохождении через материалы различного химического состава, плотности и толщины компонентов изучаемого объекта можно получить информацию о внутреннем

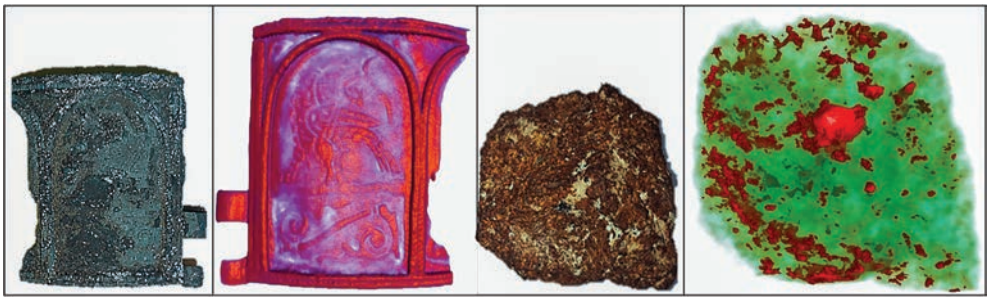


Рис. 4. Несколько примеров исследований, проведенных на станции нейтронной радиографии и томографии на реакторе ИБР-2: фотография и нейтронное изображение фрагмента древнерусского браслета из Тверского клада и метеорита Куня-Ургенч

строении исследуемых материалов с пространственным разрешением на микрометровом уровне. Этот нейтронный метод неразрушающего анализа позволяет получать изображения и объемные трехмерные реконструкции внутреннего строения объектов исследования с пространственным разрешением порядка сотни микрометров. Значительная глубина проникновения нейтронов позволяет получать методами нейтронной радиографии и томографии принципиально новую информацию по сравнению с рентгеновскими методами. Поэтому не удивительно, что тенденцией последних лет является создание экспериментальных установок для нейтронной радиографии и томографии на большинстве современных нейтронных источников в мире.

Еще в 1985 г. в Лаборатории нейтронной физики В. М. Назаровым с коллегами на импульсном высокопоточном реакторе ИБР-2 были выполнены первые работы по нейтронной радиографии. Однако уровень развития технологий регистрации изображений того времени ограничивал возможности количественного анализа получаемой информации, поэтому эти работы тогда не получили продолжения. Значительный прогресс в развитии цифровых технологий регистрации и обработки изображений, произошедший в последующие десятилетия, открыл новые перспективы для этих методов. В период с 2012 по 2016 г. по инициативе Д. П. Козленко в ЛНФ ОИЯИ на 14-м канале реактора была создана специализированная установка для исследований с помощью нейтронной радиографии и томографии (С. Е. Кичанов, Е. В. Лукин, Г. Д. Бокучава, А. В. Белушкин). С 2014 г. на созданной специализированной установке успешно реализуется мультидисциплинарная научная программа по анализу внутреннего строения широкого круга объектов: технологических (С. Е. Кичанов, Д. П. Козленко), инженерных (В. В. Сумин, Г. Д. Бокучава, И. Ю. Зель), палеонтологических (А. В. Пахневич), геофизических (С. Е. Кичанов, И. Ю. Зель) и др.

С 2017 г. по инициативе научного сотрудника Института археологии РАН И. А. Сапрыкиной проводятся успешные исследования по неразрушающему нейтронному анализу объектов культурного наследия (С. Е. Кичанов, К. Назаров, Б. А. Бакиров, В. С. Смирнова). В ходе этих совместных работ

накоплен богатый материал по особенностям внутреннего строения и фазового состава монет Древней Греции и Булгарии, объектов древнерусского культурного наследия, предметов личного благочестия, фрагментов оружия и утвари, золотых и серебряных украшений скифских и сарматских племен, керамических фрагментов древних гончарных мастерских.

С учетом актуальности и широких прикладных возможностей методов нейтронной радиографии и томографии, а также накопленного сотрудниками ЛНФ ОИЯИ опыта была сформирована совместная рабочая группа (Д. П. Козленко, С. Е. Кичанов, Е. В. Лукин, В. Н. Швецов, Б. Мухаметулы, Е. А. Кенжин, К. Кадыржанов) по созданию установки для исследований с помощью метода нейтронной радиографии и томографии на базе реактора ВВР-К. Стационарный исследовательский атомный реактор ВВР-К является одной из базовых установок Республиканского государственного предприятия «Институт ядерной физики» (Алматы, Республика Казахстан). В период 2017–2019 гг. были выполнены работы по проектированию новой установки, заказу и приобретению специального оборудования и материалов, размещению основных компонентов установки и элементов биологической защиты в экспериментальном зале реактора ВВР-К. Уже в ноябре 2019 г. был осуществлен ввод установки в эксплуатацию. В настоящее время на созданной установке проводятся совместные исследования по анализу внутреннего строения конструкционных, геофизических и археологических материалов (К. Назаров, М. Кенесарин, Б. Мухаметулы, С. Е. Кичанов).

В 2020 г. на исследовательском реакторе ВВР-СМ Института ядерной физики Академии наук Республики Узбекистан был создан новый объект научной инфраструктуры для реализации научных исследований методами нейтронной радиографии и томографии.

Совместная группа ЛНФ ОИЯИ и РГП ИЯФ (Республика Казахстан) по созданию экспериментальной станции нейтронной радиографии и томографии на реакторе ВВР-К

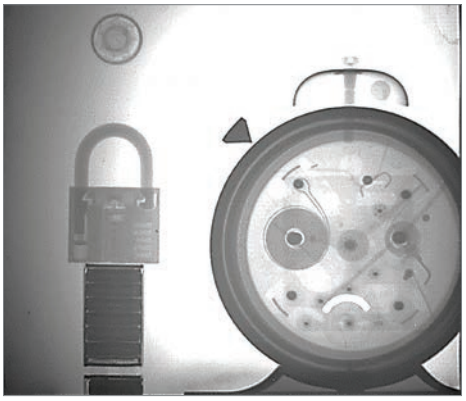


Рис. 5. Первые нейтронные изображения, полученные на созданной станции нейтронной радиографии и томографии

По инициативе узбекских коллег (М. Ю. Ташметов, Б. С. Юлдашев) усилиями совместной рабочей группы ЛНФ ОИЯИ – ИЯФ АН РУз (С. Е. Кичанов, Е. В. Лукин, Б. А. Абдурахимов, А. Р. Саидов, Н. Б. Исматов) создана экспериментальная станция нейтронной томографии, которая в настоящее время является уникальной установкой такого рода в Республике Узбекистан. Ее технические параметры позволяют успешно проводить научные эксперименты по анализу внутреннего строения технологических, инженерных, археологических и геофизических объектов. Получены фазовый состав и пространственное распределение различных фаз внутри медно-серебряного дирхама Караханидов X–XII в. н. э. Кроме того, совместно с Институтом геологии и геофизики им. Х. М. Абдуллаева (Ташкент, Узбекистан) с помощью нейтронного неразрушающего анализа получены распределения по размерам и ориентациям внутренних включений в объемах лампрофировых магматических даек, что указывает на возможное направление движения потока магмы в этих природных каналах (И. Ю. Зель,

Детекторная система и поворотный столик для томографической моды станции нейтронной радиографии на реакторе ВВР-СМ в ИЯФ АН РУз

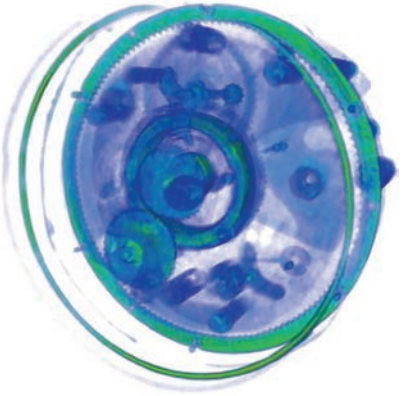


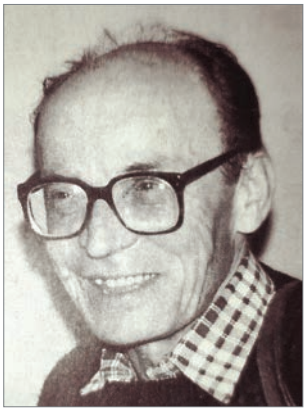
Рис. 6. Первая восстановленная из нейтронных радиографических проекций трехмерная модель будильника

С. Е. Кичанов, Б. А. Абдурахимов). Методические возможности станции открыли потенциал для большого направления исследований древних материалов из крепости Узундара (Сурхандарьинская обл., Узбекистан). Уже получены первые результаты (М. Ю. Ташметов, С. Е. Кичанов, С. М. Адизов, Н. Д. Двуреченская) по неразрушающему структурному исследованию медной монеты Гелиокла и двух серебряных монет Деметрия, датируемых II в. до н. э., из археологических раскопок крепости Узундара древнего Греко-Бактрийского царства. Результаты проведенных исследований позволили выявить особенности внутреннего строения объектов исследования, проанализировать их технологию изготовления, уточнить их происхождение.

РАЗВИТИЕ НЕУПРУГОГО РАССЕЯНИЯ В ЛНФ И ЕГО МЕСТО В ЛАНДШАФТЕ МИРОВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

История неупругого рассеяния нейтронов в Лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка началась в 1960-х гг. под руководством А. Шкатулы из Института ядерной физики Польской академии наук (IFJ PAN) в Кракове (Польша). На первом спектрометре холодных нейтронов «простой геометрии» с помощью методов квазиупругого рассеяния нейтронов (КРН) и неупругого рассеяния нейтронов (НРН) изучалась динамика тепловых колебаний воды и других органических веществ, таких как бензол или нафталин.

В 1962 г. А. Байорек из IFJ PAN в Кракове совместно с Т. А. Матчехиной по предложению Ф. Л. Шапиро разработали метод измерения НРН в «обратной геометрии». Уже на прототипе спектрометра была проведена серия исследований молекулярных групп в кристаллах (например, NH_4 в NH_4ClO). Во второй половине 1960-х гг. группа под руководством профессора Я. Яника (в состав которой входили И. Натканец, К. Парлиньский, А. Байорек, М. Судник-Хрынкевич) провела исследования сплавов Be–Cu, Li–Mg и Na–Pb. Для проведения структурного анализа исследуемых образцов И. Натканец модифицировал спектрометр, опираясь на идею Б. Бураса,



А. Байорек

Я. Яник

И. Натканец

Д. Худоба на обновленной установке НЕРА

и добавил блок для измерения дифракции. Таким образом, появилась возможность одновременно изучать структуру и динамику.

В 1970 г. на канале 1А реактора ИБР-30 начал работу краковско-дубненский спектрометр обратной геометрии (КДСОГ). Его преемник — спектрометр НЕРА[6] — был введен в эксплуатацию на реакторе ИБР-2 уже в 1990-х гг. Группой, которую многие годы возглавлял И. Натканец, проводились исследования фазовых переходов и динамики различных веществ. Установленный на 100-метровой пролетной базе ИБР-2 спектрометр обеспечивал неплохое разрешение и широкий диапазон передачи энергии.

Нужно также отметить группу физиков из Физико-энергетического института им. А. И. Лейпунского (Обнинск, Калужская обл.) под руководством В. П. Парфенова, которые создали спектрометр прямой геометрии ДИН-2ПИ[7] с многодетекторной системой регистрации. До завершения своей работы в 2021 г. он использовался в основном для исследования динамики сплавов металлов и изучения сверхтекучего гелия.

---

[6] *Natkaniec I., Chudoba D., Hetmańczyk Ł., Kazimirov V. Yu., Krawczyk J., Sashin I. L., Zalewski S.* Parameters of the NERA Spectrometer for Cold and Thermal Moderators of the IBR-2 Pulsed Reactor // J. Phys.: Conf. Ser. 2014. V. 554. 012002.

[7] *Калинин И. В., Морозов В. М., Новиков А. Г., Пучков А. В., Савостин В. В., Сударев В. В., Булкин А. П., Калинин С. И., Пусенков В. М., Ульянов В. А.* Характеристики спектрометра ДИН-2ПИ с нейтронным концентратором // Журн. техн. физ. 2014. Т. 84, вып. 2.

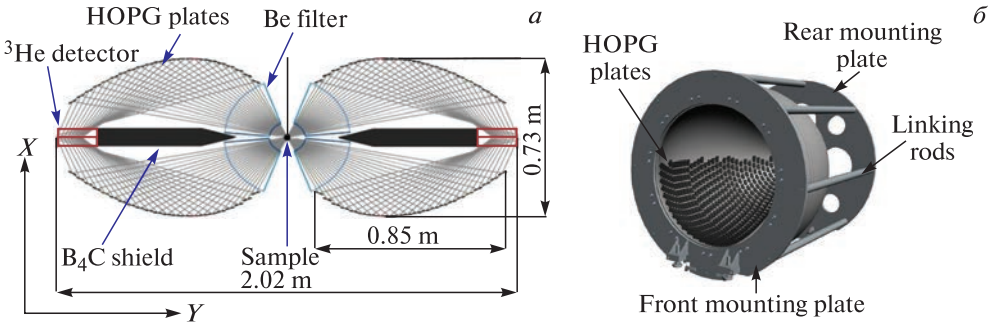


Рис. 7. а) Основная концепция вторичного спектрометра: размещение набора анализирующих пластин из ВОПГ (высокоориентированного пиролитического графита), которые вместе напоминают форму колокола, по обе стороны образца. б) Визуализация одной части нового спектрометра BJN

Спектрометр HEPA, который работает на импульсном реакторе ИБР-2 в ЛНФ ОИЯИ более трех десятилетий, зарекомендовал себя как весьма успешная машина для нейтронной спектроскопии. Для поддержания и расширения исследовательской традиции с использованием передовых технологий в 2020 г. был инициирован проект по разработке нового времяпролетного (ToF) спектрометра неупругого рассеяния нейтронов в обратной геометрии. Основным назначением этого прибора является обеспечение широкого диапазона передачи энергии до 400–500 мэВ в сочетании с исключительными интенсивностью нейтронов и разрешением.

Под руководством Д. Худобы активный и решительный вклад в создание новой установки BJN (Байорека–Яника–Натканца) внесли А. В. Белушкин, Е. А. Горемычкин и М. Клепацка[8].

ХОЛОДНЫЕ ЗАМЕДЛИТЕЛИ НЕЙТРОНОВ

История создания холодных замедлителей в ЛНФ

Начиная с 1960-х гг. на реакторах ЛНФ ИБР-1 и ИБР-30 разрабатывался и эксплуатировался в течение нескольких лет холодный замедлитель нейтронов на основе полиэтилена в виде стопки тонких пленок (для обеспечения свободного выхода радиолитического водорода) с бериллиевым отражателем. Из-за плохой радиационной стойкости полиэтилена при проектировании реактора ИБР-2 предполагалась установка жидководородного замедлителя. Чернобыльская катастрофа 1986 г. серьезно ужесточила вопросы ядерной безопасности, поэтому работы, связанные с созданием жидководородного замедлителя, были прекращены. Е. П. Шабалиным было предложено вместо жидководородного замедлителя на реакторе ИБР-2 использовать твердометановый замедлитель. Для решения проблем, связан-

[8] *Klepacka M., Belushkin A., Goremychkin E., Chudoba D.* High Luminosity Inverse Geometry Inelastic Neutron Scattering Spectrometer at Pulsed Fast Reactor // Rev. Sci. Instrum. 2025. V. 96. 033902.

ных с плохой радиационной стойкостью метана, рассматривался вариант проточного замедлителя или замедлителя с быстрой сменой рабочего вещества в камере. В этом случае замороженные шарики из твердого метана, заполняющие объем камеры замедлителя и охлаждаемые холодным гелием, должны были непрерывно сменяться новой порцией. В 1990 г. было решено создать метановый замедлитель на реакторе ИБР-2, однако проект замедлителя проточного типа был отвергнут из-за длительных и дорогих инженерно-физических исследований. В 1994 г. был создан первый замедлитель гребенчатого типа[9] СМ1, однако в процессе пуска и испытаний его камера лопнула при выпуске водорода. Позднее был спроектирован новый холодный замедлитель[10] СМ2. Он имел плоскую камеру, в которой была предусмотрена щель вблизи одной из стенок камеры для более свободного выхода водорода (рис. 8, из работы[11]). Наличие бериллиевого отражателя повысило выход холодных нейтронов в 2 раза. Добавка нескольких процентов этилена к метану позволила уменьшить выход водорода в 2 раза. В 1999 и 2000 гг. проводились испытания, в ходе которых были изучены следующие характеристики: влияние температуры и времени работы на деградацию метана, количество метана в камере замедлителя, концентрация поглотителей водорода и процедуры отжига. Максимальное время работы замедлителя оказалось равным 4 сут. Несмотря на то, что 30 % метана под облучением за это время превращалось в водород, этан и высокомолекулярные углеводороды, потери в интенсивности холодных нейтронов в результате деградации установлено не было.

Холодный замедлитель из твердого метана устанавливался на место одного из трех водяных замедлителей реактора ИБР-2. Плотность потока холодных нейтронов с его поверхности не уступала самым интенсивным действовавшим в то время импульсным источникам нейтронов.

При всех своих плюсах метановый холодный замедлитель требовал улучшений из-за нестабильности температуры, вызываемой радиационны-

---

[9] *Гундорин Н. А.* Гребенчатый замедлитель. Сообщ. ОИЯИ Р3-80-721. Дубна, 1980. 10 с.;

Shabalin E. P. et al. Solid Methane Cold Moderator at the IBR-2 Reactor: Test Operation at 2 MW // Proc. of the 2nd Intern. Meeting on Pulsed Advanced Neutron Sources. Dubna, 1994. P. 217–234;

Beljakov A. A. et al. First Experience of Cold Moderator Operation and Solid Methane Irradiation at the IBR-2 Pulsed Reactor // Proc. of the 16th Meeting of the Intern. Collab. on Advanced Neutron Sources (ICANS-XII). Abingdon, 1993. RAL Report 94-025. V. 2. P. 144–155.

[10] *Belyakov A. A. et al.* Solid Methane Cold Moderator at the IBR-2 Reactor // J. Neutron Res. 1996. V. 3. P. 209–221;

Beliakov A. A. et al. Solid Methane Cold Moderator for the IBR-2 Reactor // Proc. of the Intern. Workshop on Cold Moderators for Pulsed Neutron Sources. Argonne, 1997. P. 73–78;

Belyakov A. A., Tretiakov I. T., Shabalin E. P. First Experience with the New Solid Methane Moderator at the IBR-2 Reactor // Proc. of the 15th Meeting of the International Collaboration on Advanced Neutron Sources / Ed. by Itoh S. et al. Tsukuba, 2000. V. 1. P. 1026–1036;

Shabalin E. P., Beliakov A. A. Solid Methane Cold Moderator for the IBR-2 Reactor: Present Status // Proc. of German–Russian User Meeting «Condensed Matter Physics with Neutrons at IBR-2». Dubna, 1998. P. 25–32.

[11] *Шабалин Е. П.* Холодный замедлитель нейтронов // ЭЧАЯ. 2005. Т. 36, № 6. С. 1425–1442.

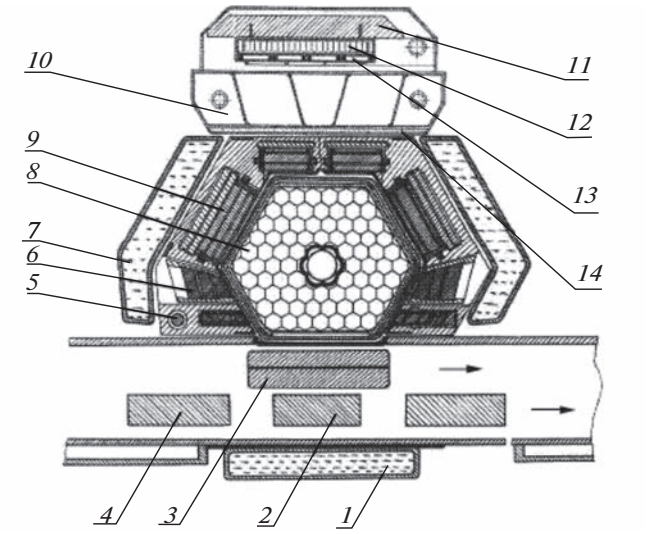


Рис. 8. Реактор ИБР-2 с твердометановым замедлителем, горизонтальное сечение (масштаб 1:8): 1, 7 — водяные замедлители; 2, 4 — средняя и крайняя лопасти дополнительного подвижного отражателя; 3 — лопасть основного подвижного отражателя (показана конструкция до 2004 г.); 5, 6, 9 — блоки управления в стационарном отражателе; 8 — топливная кассета; 10 — водяной предзамедлитель холодного замедлителя; 11 — бериллиевый отражатель; 12 — метановая полость холодного замедлителя; 13 — полости охлаждающего гелия; 14 — борный фильтр

ми эффектами в метане (отжигами водорода) и длительными перерывами (около суток) для смены метана. Это негативно отражалось на работе спектрометров и качественно ухудшало результаты нейтронно-физических экспериментов.

Ресурс работы метанового замедлителя из-за накопления радикалов, смол и сажи был ограничен. Всего за 1000 ч работы камера замедлителя заполнялась продуктами радиолиза на 40–50 %. Для продления ресурса работы камера замедлителя была защищена от быстрых нейтронов слоем воды, равным 9 см (при необходимой для предварительного замедления толщине слоя в 3 см), что снижало поток холодных нейтронов в 3 раза. В связи с этим вместе с началом модернизации реактора ИБР-2 в 2006 г. в лаборатории была поставлена задача по созданию холодного замедлителя, который бы стабильно работал на физический эксперимент не менее 7 сут без изменения температуры при более сильных дозах радиации (порядка 0,5 кГр/с) и ресурс работы которого был бы не менее 10–15 тыс. ч.

На основе результатов работ, проведенных в рамках проектов УРАМ-1, УРАМ-2, а также в тесном сотрудничестве с коллаборацией ACoM (Advanced Cold Moderators) и профессорами И. Натканцем (Польша) и Р. Гранадой (Аргентина) было предложено использовать в качестве замедляющего вещества для модернизированного реактора ИБР-2 мезитилен, который имеет радиационную стойкость на порядок лучше, чем метан.

Мезитилен и особенно его смесь с м-ксилолом, или псевдокумолом[12], является весьма подходящим веществом для холодного замедлителя на современных источниках нейтронов средней интенсивности (исследовательских реакторах мощностью 1–5 МВт или сильноточных протонных ускорителях с мощностью пучка 0,2–1 МВт) в качестве альтернативы метановому и водородному замедлителям.

Основные преимущества мезитилена по сравнению с другими материалами холодных замедлителей (метан, водород, пропан, вода и т. д.) — высокая радиационная стойкость, широкий интервал температур использования, более высокая безопасность (в отношении взрывоопасности и воспламеняемости). Мезитиленовый замедлитель представляет собой хороший компромисс между физическими (выход холодных нейтронов) и технологическими (радиационная стойкость, удобство в работе, безопасность) свойствами. Эти соображения стали основанием для выбора мезитилена в качестве рабочего вещества холодного замедлителя нейтронов на модернизированном импульсном быстром реакторе ИБР-2.

Важным требованием, предъявляемым к такому холодному замедлителю нейтронов, являлось то, что он должен работать в циклическом режиме, включающем этапы загрузки «свежего» вещества перед началом цикла работы реактора и выгрузки отработанного после его завершения. Поэтому для проекта мезитиленового замедлителя предпочтение было отдано варианту с твердыми замороженными шариками[13].

Устройство и принцип работы шариковых холодных замедлителей нейтронов на основе мезитилена

Холодный замедлитель нейтронов на основе мезитилена в комплексе с водяными замедлителями комнатной температуры представляют собой биспектральные замедлители реактора ИБР-2 (рис. 9). На замедлители под разными углами «смотрят» спектрометры практически всех пучков реактора.

Холодный замедлитель может работать в двух режимах. 1. Режим замедлителя на основе воды комнатной температуры (эксперименты с тепловыми нейтронами). В данном режиме камера холодного замедлителя должна быть пуста, а ее температура равна температуре окружающей среды. 2. Режим холодного замедлителя (эксперименты с холодными нейтронами). В данном режиме происходит загрузка камеры холодного замедлителя рабочим веществом — мезитиленом в смеси с метаксилолом (м-ксилолом) общим объемом около 1 л. Рабочая температура не выше 20–30 K.

---

[12] *Cher L.* Organic Compounds for Cold Moderators // Proc. of the 14th Intern. Conf. on Advanced Neutron Sources. Starved Rock, Illinois, 1998. V. 2. P. 241–244.

[13] *Shabalin E. P., Kulikov S. A.* Complex of Neutron Moderators for the IBR-2M Reactor // Proc. of 17th Meeting of the Intern. Collab. on Advanced Neutron Sources (ICANS-XVII). New Mexico, 2005;

Шариковый холодный замедлитель нейтронов / Булавин М. В. и др. Патент RU №2492538. Опубл. 10.09.2013. Бюл. №25.

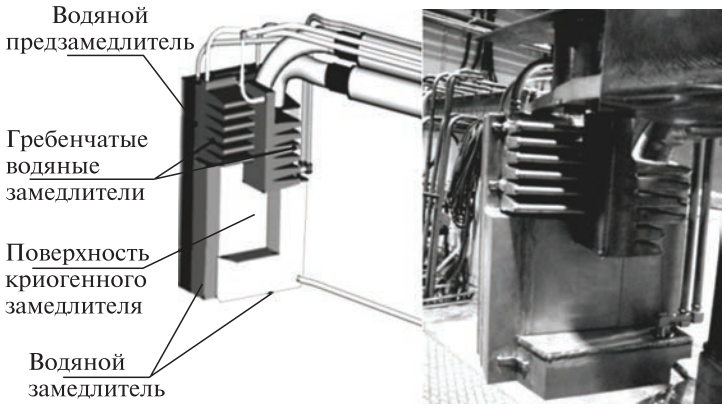


Рис. 9. Биспектральный замедлитель нейтронов КЗ202 реактора ИБР-2

Циклический режим работы замедлителя обеспечивается тем, что его камера загружается предварительно откалиброванными твердыми замороженными шариками из смеси мезителена и м-ксилола диаметром 3,5–3,9 мм в количестве 30 000 шт. (рис. 10).

Шариковый способ загрузки камеры замедлителя позволяет легко снимать энерговыделение от замедления быстрых нейтронов, а также оперативно производить загрузку и выгрузку вещества замедлителя, что делает ресурс работы замедлителя практически неограниченным. Важно и то, что шариковая структура в отличие от цельного замороженного куска материала позволяет образующемуся в результате облучения радиолитическому водороду беспрепятственно покидать камеру замедлителя, не создавая в ней избыточного давления.

Загрузка шариков мезитилена и метаксилола в камеру замедлителя осуществляется путем пневмотранспорта потоком холодного гелия с температурой около 80 K по трубопроводу сложной конфигурации (рис. 11). Этот

Рис. 10. Твердые шарики из смеси мезитилена и м-ксилола, замороженные в жидком азоте

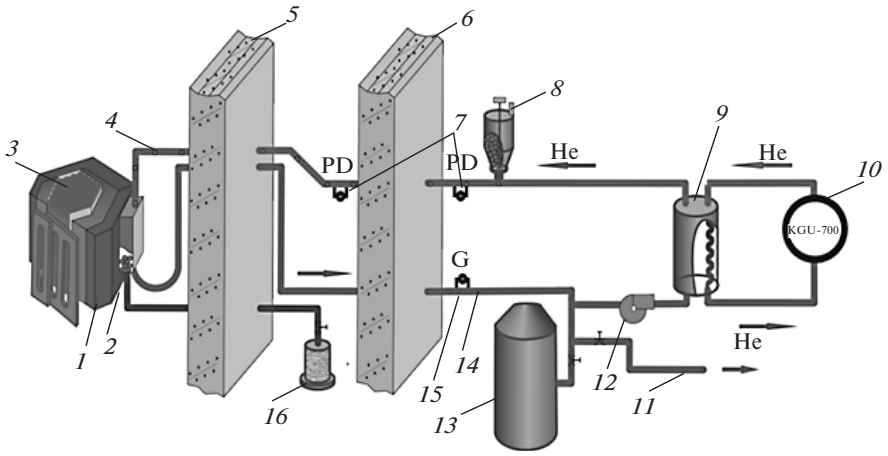


Рис. 11. Шариковый холодный замедлитель нейтронов реактора ИБР-2: 1 — водяной замедлитель; 2 — камера холодного замедлителя; 3 — активная зона ИБР-2; 4 — пневмотранспортный трубопровод (первый контур охлаждения); 5, 6 — биологическая защита; 7 — датчики движения замороженных шариков в трубе; 8 — дозирующее устройство; 9 — теплообменник; 10 — криогенная гелиевая машина КГУ-700 и второй контур охлаждения; 11 — трубопровод для аварийного отвода водорода; 12 — газодувка; 13 — газгольдер; 14 — трубопровод отвода гелия от камеры замедлителя; 15 — датчики расхода гелия (трубка Пито); 16 — емкость для слива отработанного мезитилена и м-ксилола

принцип работы замедлителя отчасти подобен известным предложениям проектов шарикового твердометанового замедлителя[14].

Шариковый холодный замедлитель нейтронов имеет первый и второй контуры охлаждения. Первый контур включает в себя камеру холодного замедлителя, пневмотранспортный трубопровод, датчики движения замороженных шариков в трубе и датчик расхода гелия, соединенный с трубкой Пито, дозирующее устройство, газодувку и трубопровод отвода гелия от камеры замедлителя. Второй контур охлаждения состоит из криогенной гелиевой установки и трубопроводов подвода и отвода гелия к/от КГУ. Теплообменник предназначен для передачи низкой температуры от гелия во втором контуре охлаждения к гелию, циркулирующему в первом контуре охлаждения.

Минимальная температура эксплуатации замедлителя составляет 20 K. При этой температуре замедлитель может работать в течение всего цикла работы реактора ИБР-2 на мощности 2 МВт (12 сут).

После остановки реактора расплавленный рабочий материал удаляется в специальную емкость для слива и утилизации, после чего замедлитель готовят к новому циклу.

[14] *Bauer G. S., Lucas A. T., Sulfredge C. D.* A Pelletized Solid Methane Moderator for a Medium-to-High Power Neutron Source // Proc. of the 13th Meeting of the Intern. Collab. on Advanced Neutron Sources / Ed. by G. S. Bauer et al. Villigen, 1995. V. 2. P. 644–652.

Штатная эксплуатация комплекса шарикового криогенного замедлителя на реакторе ИБР-2 и планы на будущее

В 2012–2025 гг. комплекс шариковых криогенных замедлителей с криогенной системой и системой управления и контроля общепромышленного уровня успешно и безаварийно отработал на физический эксперимент на мощности ИБР-2 более 5000 ч. Этот уникальный результат был представлен в работах[15] и отражен в других многочисленных научных публикациях и докладах на международных конференциях.

В целом анализ полученных результатов показывает, что по сравнению с тепловым замедлителем на основе воды комнатной температуры холодный замедлитель при температуре 20 K дает до 14 раз больше холодных нейтронов, что сильно снижает время экспозиции исследуемых объектов, а также существенно улучшает качество получаемых результатов. Ввод в эксплуатацию новой криогенной системы, которая работает на базе двух криогенных гелиевых установок Linde общей мощностью 3000 Вт, позволил снизить температуру мезитилена в камерах замедлителей с 32 до 20 K, увеличив плотность потока холодных нейтронов еще на 15–20 %.

На рис. 12 приведены некоторые качественные улучшения, которые дает использование холодных замедлителей при проведении нейтронно-физических исследований на спектрометрах ИБР-2[16].

В настоящее время в лаборатории ведутся перспективные разработки новых устройств и технологий для криогенных замедлителей, в том числе и для нового высокопоточного источника нейтронов, разрабатываемого в ЛНФ.

В процессе эксплуатации комплекса криогенных замедлителей было разработано и внедрено новое дозирующее устройство с увеличенным внутренним объемом. В ходе испытаний было установлено, что использование дозирующего устройства нового типа позволяет существенно, в 4 раза, сократить время загрузки шариков в камеру криогенного замедлителя. Ввод дозирующего устройства нового типа в опытную эксплуатацию позволил проводить загрузку камеры криогенного замедлителя всего за 2 ч (вместо 6–7 ч с дозирующим устройством предыдущей модификации), что положи-

---

[15] *Bulavin M. et al.* The World's First Pelletized Cold Neutron Moderator Began Its Operation // Neutron News. 2013. V. 24, No. 3. P. 27;

Bulavin M. et al. Pelletized Cold Moderator of the IBR-2 Reactor: Current Status and Future Development // J. Phys.: Conf. Ser. 2016. V. 746. 012031.

[16] *Булавин М. В., Кожевников С. В., Жакетов В. Д., Петренко А. В., Верхоглядов А. Е., Куликов С. А., Шабалин Е. П.* Использование криогенного замедлителя на нейтронном рефлектометре РЕМУР // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2016. №1. С. 5–14.

Булавин М. В., Васин Р. Н., Куликов С. А., Локаичек Т., Левин Д. М. Использование комбинированного замедлителя на реакторе ИБР-2: преимущества для нейтронографического текстурного анализа горных пород // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2016. № 5. С. 1–10.

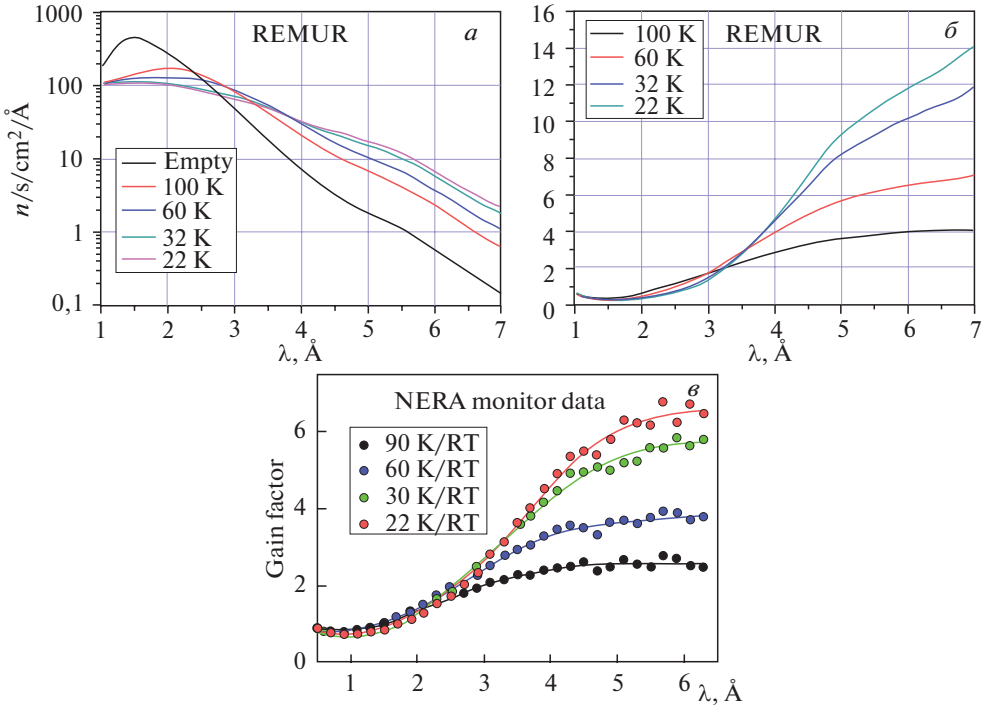


Рис. 12. Спектр нейтронов (а) и фактор выигрыша (б, в) в плотности потока холодных нейтронов с поверхности холодного замедлителя при различной температуре по отношению к плотности потока холодных нейтронов с поверхности теплового замедлителя на основе воды комнатной температуры

тельно сказалось на эксплуатации всего комплекса криогенных замедлителей при работе реактора ИБР-2 на физический эксперимент[17].

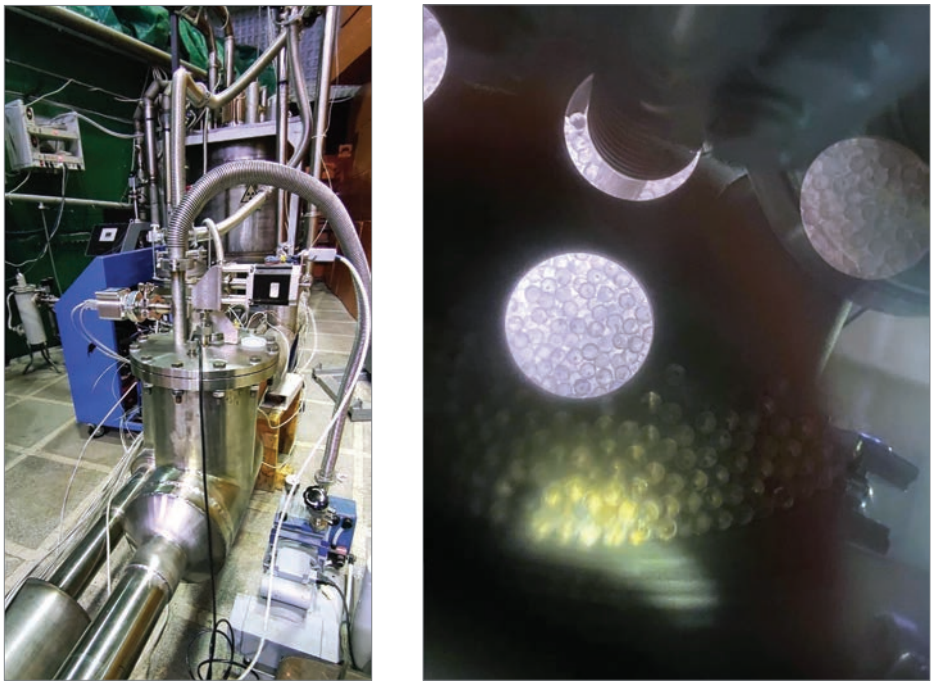
Ниже представлен экспериментальный образец высокопроизводительной капельницы для изготовления твердых замороженных шариков по типу капель Руперта из мезитилена[18]. На базе данного опытного образца разрабатывается промышленный образец установки производительностью 1,3 л/ч со встроенной электроникой управления и контроля, а также системой подсчета и отбраковки готовых шариков на основе системы технического машинного зрения.

Промышленный образец установки позволит обеспечить бесперебойную загрузку шариками комплекса криогенных замедлителей реактора

[17] *Bulavin M. V., Litvak I. L.* Using Frozen Beads from a Mixture of Mesitylene and Meta-Xylene with Rupert's Drop Properties in Cryogenic Neutron Moderators // J. Nucl. Eng. 2025. V. 6(2). P. 9; https://doi.org/10.3390/jne6020009;

Булавин М. В. и др. Использование замороженных шариков из смеси мезитилена и метаксилола со свойствами капель Руперта в криогенных замедлителях нейтронов // Письма в ЭЧАЯ. 2025. Т. 22, № 2(259). С. 305–314.

[18] *Литвак И. Л., Булавин М. В., Чепурченко Р. В., Галушко А. В.* Принципы работы устройства для изготовления дисперсного замедляющего вещества в форме шариков для криогенных замедлителей нейтронов. Сообщ. ОИЯИ Р-18-2024-60. Дубна, 2024. 20 с.



Дозирующее устройство нового типа с увеличенным внутренним объемом. Слева: общий вид устройства на испытательном стенде К3201. Справа: замороженные мезитиленовые шарики внутри дозирующего устройства (вид через специальное смотровое окно)

ИБР-2 при эксплуатации на физический эксперимент, а сам принцип работы установки ляжет в основу разработки перспективного направления по производству твердых метановых шариков для использования в криогенных замедлителях на любых нейтронных источниках по всему миру.

В данном направлении в ЛНФ также существуют определенные наработки. Создан опытный образец так называемой метановой капельницы — установки по производству твердых шариков из метана. В настоящее время проведены первые эксперименты по получению замороженных капель метана в жидком азоте (аргоне) на экспериментальной установке.

В дальнейшем экспериментальная установка будет модифицирована и оснащена двухступенчатым криокулером для изготовления большого количества твердых метановых шариков в различных типах хладагентов, таких как жидкий гелий, водород или неон. Разрабатывается эскизный проект такой установки.

В настоящее время в ЛНФ с использованием большого опыта и задела по созданию замедлителей нейтронов создан и успешно эксплуатируется уникальный и единственный в мире комплекс шариковых криогенных замедлителей на основе ароматических углеводородов. Благодаря этому нейтронно-физические исследования на реакторе ИБР-2 вышли на качественно новый мировой уровень.

Опытный образец высокопроизводительной капельницы для изготовления твердых замороженных шариков из мезитилена

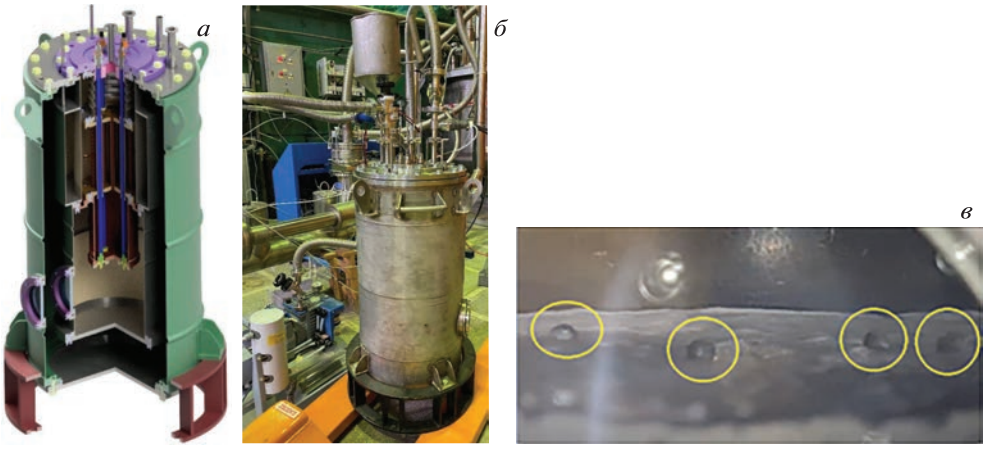


Рис. 13. Установка для изготовления твердых замороженных шариков правильной формы из метана в жидком азоте/аргоне (капельница метановых шариков, а, б); полученные переохлажденные капли твердого метана в ходе проведения эксперимента (в)

Дальнейшее развитие криогенных замедлителей в ЛНФ, в том числе и с целью их использования на новом перспективном источнике нейтронов в ЛНФ ОИЯИ, идет в сторону создания универсального шарикового криогенного замедлителя на основе перспективных водородосодержащих материалов (мезитилена, метана) с системой быстрой смены рабочего материала в камере замедлителя для использования на нейтронных источниках любой мощности и интенсивности.

НЕЙТРОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЙ

В двух последних десятилетиях XX в. в ведущих мировых нейтронных центрах особое внимание уделялось активному развитию экспериментальных методов исследования конденсированных сред при высоких давлениях и созданию экспериментальной инфраструктуры для их реализации. Большой научный и практический интерес подобных исследований обусловлен тем, что воздействие высокого давления приводит к возникновению новых, зачастую уникальных, физических явлений в исследуемых материалах, позволяет получать новые структурные модификации веществ с уникальными физическими свойствами. Например, алмаз является модификацией углерода, кристаллизующейся при высоком давлении.

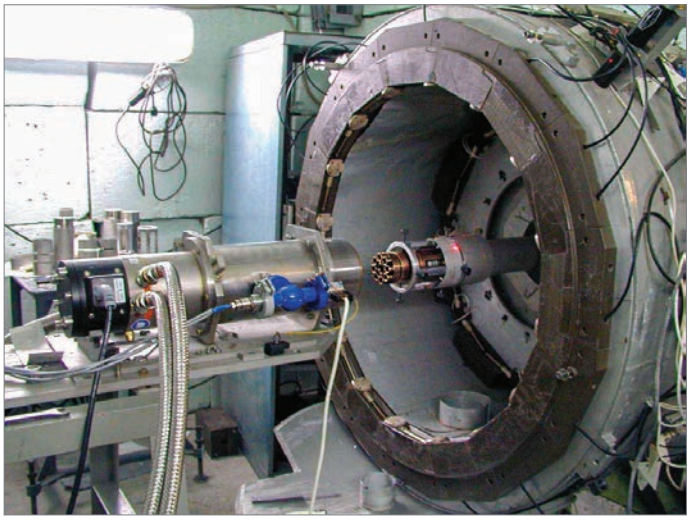
Следует отметить, что особенности характера взаимодействия нейтронов с веществом определяют ряд преимуществ нейтронной дифракции по сравнению с рентгеновскими и другими методами в структурных исследованиях. Среди них — высокая проникающая способность, высокая чувствительность к положениям легких атомов в структуре (водорода, кислорода и др.), что особенно важно в условиях присутствия тяжелых атомов или структурного беспорядка, возможность одновременного исследования атомной и магнитной структур материалов.

Низкие потоки нейтронных источников, на много порядков уступающие источникам синхротронного излучения, естественным образом вносили существенные ограничения в развитие исследований при воздействии высокого давления, которые не удавалось преодолеть в течение долгого времени. Для проведения подобных нейтронных экспериментов требовался сравнительно большой объем исследуемого материала, и достижимое давление, как правило, ограничивалось узким диапазоном до 1–2 ГПа (10 000–20 000 бар). Несмотря на это, создание многодетекторных систем, современных зеркальных нейтроноводов, в том числе фокусирующих, специализированных камер высокого давления в сочетании с обеспечением низкофоновых экспериментальных условий позволило достичь значительного прогресса в данной области.

На высокопоточном реакторе ИБР-2, одном из наиболее интенсивных импульсных нейтронных источников в мире, в период 1993–1997 гг. совместно с сотрудниками НИЦ «Курчатовский институт» была создана сначала базовая, а затем (при участии сотрудников ПИЯФ) и окончательная конфигурация спектрометра ДН-12 для исследования атомной, магнитной

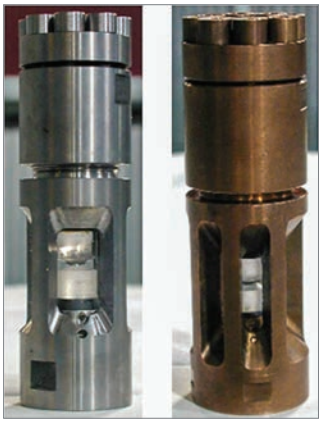
структур и динамики микрообразцов при воздействии высокого давления с помощью методов нейтронной дифракции и неупругого некогерентного рассеяния нейтронов (В. Л. Аксёнов, А. М. Балагуров, Б. Н. Савенко, Д. П. Козленко, С. Л. Платонов (ЛНФ ОИЯИ), В. А. Соменков, В. П. Глазков, И. В. Наумов, Г. Ф. Сырых (НИЦ «Курчатовский институт»), В. А. Трунов, А. П. Булкин, В. А. Кудряшев (ПИЯФ)). Основными элементами спектрометра являлись изогнутый нейтроновод на суперзеркалах ($m = 2$), детекторная система в защитном кожухе, состоящая из двух колец, содержащих по 16 независимых точечных нейтронных ^{3}He газовых счетчиков, электронная система управления, регистрации и обработки нейтронных данных. В экспериментах использовались специализированные камеры высокого давления с сапфировыми наковальнями, разработанные сотрудниками НИЦ «Курчатовский институт» и ИФВД РАН и ранее уже успешно применявшиеся в экспериментах на нейтронном дифрактометре ДИСК на стационарном реакторе ИР-8 НИЦ «Курчатовский институт». Также спектрометр был оснащен рефрижератором замкнутого цикла для создания низкой температуры в диапазоне 10–300 K в камере высокого давления. При использовании очень малого объема образца вплоть до 0,5 – 1 мм^3 на ДН-12 были проведены успешные эксперименты по нейтронной дифракции в диапазоне значений высокого давления до 10 ГПа (100 000 бар). Для сравнения: стандартный объем образца в экспериментах по рассеянию нейтронов составляет около 1 см^3.

Создание спектрометра ДН-12 положило начало формированию нового оригинального направления, ставшего важной частью научной программы ЛНФ ОИЯИ, которое заключается в систематическом исследовании взаимосвязи между изменениями кристаллической, магнитной структур и свойств целых классов функциональных материалов. Такой экспериментальный подход позволяет выявить микроскопические механизмы разно-



Нейтронный спектрометр ДН-12

Камеры высокого давления с алмазными наковальнями



Камеры высокого давления с сапфировыми наковальнями

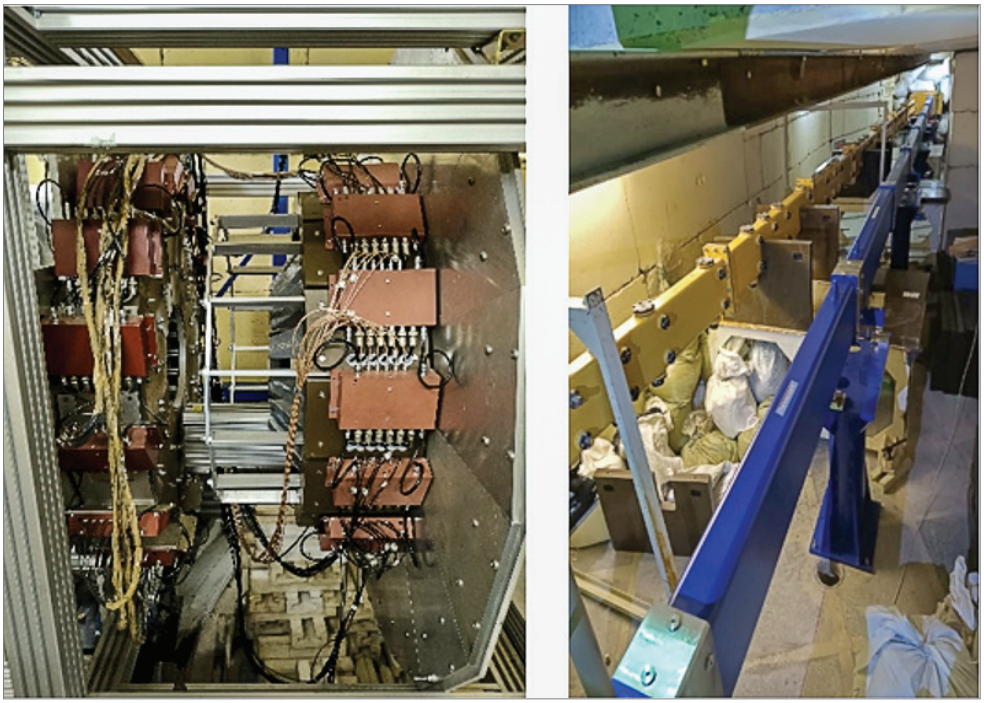
образных физических явлений в исследуемых материалах, возникающих в результате изменения структурных параметров при сжатии кристаллической решетки. Среди наиболее важных результатов, полученных в исследованиях на спектрометре ДН-12 с применением метода нейтронной дифракции при высоких давлениях за последнюю четверть века, можно выделить:

- обнаружение целого ряда индуцированных давлением магнитных фазовых переходов в манганитах $R_{1-x}A_xMnO_3$ (R = La, Pr, A = Ca, Sr) с эффектом колоссального магнитосопротивления и определение структурных и магнитных P–T фазовых диаграмм данных соединений (Д. П. Козленко, С. Е. Кичанов, Е. В. Лукин, Б. Н. Савенко (ЛНФ ОИЯИ), В. И. Воронин (ИФМ УрО РАН), З. Джирак (Institute of Physics CAS, Чешская Республика), Н. Т. Данг (Duy Tan University, Вьетнам));
- анализ влияния эффектов спинового кроссовера на магнитные и структурные свойства сложных оксидов кобальта $R_{1-x}A_xCoO_3$ (R = La, A = Ca, Sr), $LaSrCoO_4$ (Н. О. Голосова, Д. П. Козленко, С. Е. Кичанов, Е. В. Лукин, Б. Н. Савенко, О. В. Лис (ЛНФ ОИЯИ), В. И. Воронин (ИФМ УрО РАН), З. Джирак (Institute of Physics CAS, Чешская Республика));
- установление микроскопических механизмов индуцированного давлением магнитного коллапса подрешетки Co в интерметаллидах RCo_2 (R = Tb, Dy, Ho) и нарушения концепции зонного электронного метамагнетизма в $ErCo_2$ (Д. П. Козленко, А. В. Руткаускас, С. Е. Кичанов, Б. Н. Савенко (ЛНФ ОИЯИ), Е. Бурзо, П. Влайк (Babes-Bolyai University, Румыния));
- обнаружение индуцированного давлением состояния спиновой жидкости в квазидвумерном мультиферроике $YMnO_3$ (Д. П. Козленко, С. Е. Кичанов, Б. Н. Савенко (ЛНФ ОИЯИ), Ч.-Г. Пак (Seoul National University, Республика Корея));
- обнаружение индуцированных давлением новых структурных и магнитных состояний в квазидвумерных ван-дер-ваальсовых магнитных материалах MPS_3 (M = Mn, Fe) (Д. П. Козленко, С. Е. Кичанов, Б. Н. Савенко

(ЛНФ ОИЯИ), Ч.-Г. Пак (Seoul National University, Республика Корея), С. С. Саксена (University of Cambridge, Великобритания), М. Дж. Коук (University of Birmingham, Великобритания), Н. Т. Данг (Duy Tan University, Вьетнам)).

На спектрометре ДН-12 также впервые в мире была продемонстрирована возможность проведения экспериментов по исследованию динамики водородосодержащих материалов в диапазоне значений давления до 10 ГПа с применением неупругого некогерентного рассеяния нейтронов. На основе анализа экспериментально измеренной обобщенной плотности фононных состояний определены барические зависимости поперечной оптической и либрационной мод в галогенидах аммония. В иодиде аммония обнаружена гибридизация этих мод под давлением вблизи ориентационного фазового перехода типа порядок–беспорядок (Д. П. Козленко, Б. Н. Савенко (ЛНФ ОИЯИ), В. А. Соменков, В. П. Глазков, Г. Ф. Сырых (НИЦ «Курчатовский институт»), А. С. Телепнев (ИФВД РАН)).

Многолетний опыт успешных исследований на спектрометре ДН-12 лег в основу создания нового высокоинтенсивного дифрактометра ДН-6, начавшего работать в базовой конфигурации в 2013 г. (Д. П. Козленко, С. Е. Кичанов, Е. В. Лукин, Б. Н. Савенко, Ц. Пантелеев, В. Милков (ЛНФ ОИЯИ)). ДН-6 располагается на экспериментальном канале со значительно большим нейтронным потоком, его основными элементами являются суперзеркальный нейтроновод с параболической секцией вертикальной



Основные элементы дифрактометра ДН-6, детекторная система и изогнутый суперзеркальный нейтроновод

фокусировки и многодетекторная система с площадью сбора рассеянных нейтронов в 6 раз большей по сравнению с ДН-12. Значительное увеличение светосилы дифрактометра позволило использовать камеры высокого давления с алмазными наковальнями и многократно расширить доступный диапазон значений давления до 40 ГПа (400 000 бар). При этом в экспериментах используются крайне малые объемы образца вплоть до 0,01–0,02 мм^3. ДН-6 также оснащен криостатом для проведения экспериментов с камерами высокого давления в диапазоне температур 5–300 К (А. Н. Черников (ЛНФ ОИЯИ)).

С 2000-х гг. на ДН-6 был получен ряд уникальных результатов, среди которых:

- определение магнитной структуры фазы высокого давления минерала магнетит Fe_3O_4, широко распространенного в земной коре;
- обнаружение индуцированного давлением перехода антиферромагнетик–парамагнетик в классической ян-теллеровской системе $LaMnO_3$;
- эффект значительного (шестикратного) увеличения температуры магнитного упорядочения, подавление промежуточных антиферромагнитных фаз и стабилизация ферримагнитной фазы Яфета–Киттеля в геометрически фрустрированном материале Mn_3O_4 при воздействии высокого давления.

В последние годы была проведена дополнительная модернизация дифрактометра ДН-6, связанная с заменой ранее установленной центральной части нейтроновода (индекс суперзеркал $m = 2$) на новую с более эффективно отражающими нейтроны суперзеркалами ($m = 3$). В результате падающий поток нейтронов увеличился в среднем примерно в 2 раза, что в перспективе предоставляет возможность дополнительного расширения доступного диапазона значений давления до 50 ГПа (500 000 бар).

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

В XXI в. Лаборатория теоретической физики им. Н. Н. Боголюбова продолжила развивать традиционные для себя направления и осваивать новые области исследований, отвечая на актуальные вызовы современной физики и оставаясь в тесной взаимосвязи с экспериментальной программой ОИЯИ. Достижения ЛТФ за эти годы охватывают широкий спектр изысканий в области фундаментальной физики и интенсивную образовательную деятельность. Исследования были направлены на разработку теоретических основ и математических методов, которые формируют наше понимание природы во всех масштабах — от структуры нуклонов до астрофизики и динамики ранней Вселенной. Сотрудники лаборатории разрабатывают и уточняют модели в области квантовой хромодинамики, электрослабых взаимодействий, физики нейтрино, структуры атомного ядра и конденсированных сред. Значительные усилия направлены на исследование квантовой гравитации, суперсимметрии и космологических сценариев. Эти концептуальные исследования углубляют наши теоретические знания и способствуют интерпретации сложных экспериментальных данных. Значительная часть исследований выходит за рамки тематик и имеет междисциплинарный характер.

Лаборатория теоретической физики объединяет более 200 исследователей, работающих на долгосрочной основе, из которых более четверти — это не российские сотрудники. Дополнительно к этому количеству действует динамичная программа краткосрочных визитов ученых из государств-членов ОИЯИ и международных организаций-партнеров. ЛТФ поддерживает исключительный уровень научной продуктивности — в XXI в. сотрудниками лаборатории было опубликовано больше 10 000 научных работ в ведущих рецензируемых изданиях и значительное количество монографий и глав в научных сборниках. Исследователи лаборатории также входят в состав редколлегий и международных консультативных комитетов, что еще больше укрепляет ее глобальный научный авторитет.

Лаборатория активно сотрудничает с исследовательскими организациями многих стран и играет

ключевую роль в международных научных инициативах. Благодаря своей приверженности открытому научному обмену ЛТФ содействует глобальной интеграции в области теоретической физики и поддерживает развитие совместных исследований ученых разных стран. С 2000 г. сотрудниками ЛТФ было организовано более 250 международных конференций и рабочих совещаний, а также 80 научных школ для студентов и молодых ученых разных стран по всем тематикам, представленным в ЛТФ, которые собрали более 20 000 участников. Это были как тематические конференции с самым широким спектром участников, так и совещания, направленные на углубление сотрудничества между ЛТФ и научными организациями конкретных стран. Среди последних можно выделить циклы совместных совещаний, регулярно проводящихся на протяжении многих лет. В 2025 г. состоялось уже 13-е совещание по физике сильно взаимодействующих систем, организованное совместно с институтами Китая. С 2007 г. ежегодно проводились совещания с Азиатско-Тихоокеанским центром теоретической физики. Также, начиная с 2007 г., раз в два года проходили совещания с теоретиками ЮАР. Несколько раз организовывались совещания и круглые столы с теоретиками Италии, Германии, Франции и других стран.

Среди циклов тематических мероприятий можно выделить конференции по спиновой физике высоких энергий, регулярно проводящиеся с 1981 г., Балдинский семинар по проблемам физики высоких энергий, организуемый совместно с Лабораторией физики высоких энергий, семинары по физике высоких энергий («Кварки»), совещания по физике конечной и бесконечной ядерной материи, совещания по структуре ядра и связанным вопросам, а также школы по теории ядра и астрофизическим приложениям, школы-совещания по малочастичным системам, конференции по методам симметрии в физике, цикл конференций «Дубна-нано», совещания по теории нуклеации и ее применениям, совещания и конференции по классическим и квантовым интегрируемым системам, интегрируемым системам и квантовым симметриям, суперсимметриям и квантовым симметриям, школы по интегрируемым и стохастическим системам и др. Также были организованы множество конференций и совещаний по другим злободневным научным вопросам, входящим в круг интересов сотрудников ЛТФ. Были проведены представительные конференции, посвященные юбилеям основателей и заслуженных сотрудников ЛТФ, в частности, конференции, посвященные 100-летию со дня рождения Д. И. Блохинцева, 100- и 110-летию со дня рождения Н. Н. Боголюбова. Дважды ЛТФ принимала научные сессии секции ядерной физики Отделения физических наук РАН, а в 2024 г. в стенах лаборатории прошла Всероссийская

Коллектив ЛТФ во время юбилейного семинара, посвященного 60-летию лаборатории. 2016 г.

Директора ЛТФ разных лет В. Г. Кадышевский, А. Н. Сисакян, А. Т. Филиппов и Д. В. Ширков на фоне изображений первых директоров Н. Н. Боголюбова и Д. И. Блохинцева

Директор ЛТФ В. В. Воронов и группа сотрудников из Словакии. 2015 г.

Дирекция ЛТФ: А. В. Андреев, Д. И. Казаков, О. В. Теряев, Е.-М. Аницаш, Н. В. Антоненко. 2026 г.

конференция по ядерной физике «Ядро-2024». Регулярные семинары, международные конференции и практикумы создают активную среду для научного обмена и плодотворного сотрудничества.

Синтез теории, эксперимента и технологий в ОИЯИ обеспечивается активным межлабораторным взаимодействием. ЛТФ играет важнейшую роль в формировании теоретических основ и исследовательских программ крупных экспериментов ОИЯИ, таких как комплекс NICA, Фабрика сверхтяжелых элементов, Baikal-GVD, реактор ИБР-2 и др. Неотъемлемой составляющей передовой исследовательской деятельности является использование современных вычислительных ресурсов. Лаборатория активно развивает вычислительные методы для теоретических исследований, широко используя Многофункциональный информационно-вычислительный комплекс (МИВК) ОИЯИ, включающий высокопроизводительный суперкомпьютер «Говорун», в появлении которого решающую роль сыграла потребность ЛТФ в платформе для сложнейших вычислений. Сегодня эти ресурсы используются для крупномасштабного численного моделирования и теоретических исследований с большим объемом данных, особенно в области решеточных калибровочных теорий, квантовой хромодинамики, статистической физики и моделей конденсированного состояния.

Помимо научных исследований ЛТФ играет определяющую роль в подготовке нового поколения физиков-теоретиков. Сотрудники ЛТФ активно участвуют в преподавании на базе филиалов и кафедр вузов, расположенных преимущественно в Дубне и Москве, таких как государственный университет «Дубна», МФТИ, МГУ, МИФИ, ВШЭ, а также в других университетах и городах России, способствуя укреплению связей между наукой и образованием. Эти образовательные программы реализуются в сотрудничестве с Учебно-научным центром ОИЯИ. Дубненская международная школа современной теоретической физики (DIAS-TH) — проект, запущенный в ЛТФ в 2003 г., — обеспечивает систематическую и углубленную подготовку студентов, аспирантов и молодых ученых из стран-участниц ОИЯИ. В рамках проекта проводятся семинары и читаются лекции ведущими учеными ОИЯИ. Ежегодно при поддержке DIAS-TH организуются 3–4 интенсивные тематические школы для молодых ученых по современным направлениям теоретической физики с участием лучших специалистов из стран-участниц ОИЯИ и других мировых научных центров. Благодаря наставничеству, совместным исследованиям и организованным академическим мероприятиям лаборатория способствует становлению

высококвалифицированных кадров в области теоретической и математической физики.

Необходимо отметить финансовую поддержку международного сотрудничества по тематикам проводимых в лаборатории исследований со стороны государств-членов ОИЯИ и других стран. На протяжении XXI в. работали и открывались программы финансирования международного сотрудничества ЛТФ и ученых Германии (программа «Гейзенберг–Ландау»), Польши (программа «Боголюбов–Инфельд»), Чехии (программа «Блохинцев–Вотруба»), Румынии (программа «Цицейка–Марков»), Болгарии (программа «Соловьёв–Христов»), Армении (программа «Смородинский–Тер-Антонян»), Китая, Вьетнама, Индии, а также Международного центра теоретической физики (ICTP, Италия), Национального института ядерной физики (INFN, Италия) и ЦЕРН. Большое количество международных студенческих школ в ЛТФ было организовано под эгидой и при поддержке Объединения немецких научно-исследовательских центров имени Гельмгольца.

ЛТФ демонстрирует динамичное развитие, адаптируя свои темы к новейшим достижениям в физике и технологии. Лаборатория постоянно расширяет сферы своих исследований, а результаты ее научной деятельности служат основой для развития не только экспериментальных программ ОИЯИ, но и прикладных технологий. Сохранение сильных позиций в образовательной сфере гарантирует приток молодых и талантливых специалистов, обеспечивая будущее лаборатории.

Ниже перечислена лишь часть наиболее важных достижений Лаборатории теоретической физики им. Н. Н. Боголюбова последних 20–25 лет по теории фундаментальных взаимодействий и физике элементарных частиц, теоретической ядерной физике, теории конденсированных сред и современной математической физике. Приведенные результаты показывают высокий научный потенциал сотрудников ЛТФ, включенность лаборатории в мировую научную повестку и актуальность проводимых исследований. Невозможно процитировать то огромное количество научных работ, которое было опубликовано сотрудниками лаборатории за эти годы. Приведенные в книге ссылки на статьи представляют лишь небольшую часть вклада коллектива ЛТФ в современную мировую науку.

ТЕОРИЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ

Исследования фундаментальных взаимодействий полей и частиц в XXI в. включали развитие общих основ и математических методов квантовой теории поля (КТП) и их применение к важнейшим конкретным задачам, включая описание различных экспериментов с особым вниманием к комплексу NICA.

РЕНОРМАЛИЗАЦИОННАЯ ГРУППА И ЕЕ РАЗНООБРАЗНЫЕ ПРИЛОЖЕНИЯ

В основе всех областей КТП лежит применение метода ренормализационной группы, предложенного в ЛТФ в классических работах Н. Н. Боголюбова и Д. В. Ширкова. В 1980–1990-х гг. вернулся утраченный на какое-то время интерес к теории перенормировок и R-операции. Это было связано с бурным развитием многопетлевых вычислений в различных моделях квантовой теории поля, в особенности в неабелевых калибровочных теориях, таких как квантовая хромодинамика (КХД). Эта деятельность не прекращается до сих пор, и Лаборатория теоретической физики ОИЯИ внесла существенный вклад в это направление. Здесь было получено много рекордных результатов.

Были предложены методы и созданы алгоритмы вычисления фейнмановских диаграмм. Так, в 2010-х гг. А. В. Бедняковым и А. Ф. Пикельнером были получены трехпетлевые ренормгрупповые функции для всех параметров Стандартной модели (СМ) с учетом смешивания в кварковом секторе[1], а также лидирующие четырехпетлевые вклады в бета-функцию сильной константы связи[2]. Открытие бозона Хиггса на LHC позволило использовать полученные выражения для исследования проблемы стабильности вакуума СМ на новом уровне точности[3].

В начале 2020-х гг. встал вопрос о возможности обобщения двухпетлевых выражений для бета-функций наиболее общей перенормируемой тео-

---

[1] *Bednyakov A. V., Pikelner A. F., Velizhanin V. N.* // JHEP. 2013. V. 01. P. 017; Nucl. Phys. B. 2014. V. 879. P. 256; Phys. Lett. B. 2014. V. 737. P. 129.

[2] *Bednyakov A. V., Pikelner A. F.* // Phys. Lett. B. 2016. V. 762. P. 151.

[3] *Bednyakov A. V., Kniehl B. A., Pikelner A. F., Veretin O. L.* // Phys. Rev. Lett. 2015. V. 115. 201802.

рии, полученных еще в середине 1980-х гг., на случай трех и более петель. С помощью комбинации известных в литературе результатов и прямых расчетов в «игрушечных» моделях удалось получить наиболее общие формулы для калибровочных и юкавских констант взаимодействия в четырех и трех петлях соответственно[4]. Благодаря им стало возможно проводить ренормгрупповой (РГ) анализ произвольной модели «новой» физики без необходимости явного диаграммного счета и процедуры перенормировки.

С. В. Михайловым было введено β-разложение, которое представляет каждый порядок обычной теории возмущений КХД для ренормгрупп-инвариантных величин в виде разложения по допустимым коэффициентам разложения β-функции (и их произведениям)[5]. Такое двойное разложение дает максимально полную информацию о внутренних перенормировках заряда, в частности, позволяет детально управлять величинами соответствующих приближений при сдвиге масштаба перенормировки. Д. Котлож и С. В. Михайловым было предложено приложение для оптимизации ряда теории возмущений[6], приводящее к уменьшению оценки наблюдаемых ренормгрупп-инвариантных величин до 10 %.

Учет взаимодействий Стандартной модели модифицирует зависимость эффективного заряда КХД от шкалы. В рамках Стандартной модели А. В. Бедняковым и А. Ф. Пикельнером рассмотрены 3-петлевые и лидирующие 4-петлевые вклады в β-функцию[1, 2]. Показано, что на шкале от сотен гигаэлектронвольт и выше последние значительно превышают 5-петлевые вклады в чистой КХД. В модифицированной схеме минимальных вычитаний учтены двухпетлевые электрослабые поправки в выражениях, определяющих параметры эффективной КХД с пятью кварковыми ароматами как функции эффективных зарядов Стандартной модели[7]. В аналитической форме А. В. Котиковым и А. И. Онищенко найдены[8] условия соответствия для эффективного заряда КХД на порогах рождения тяжелых кварков на 4-петлевом уровне в модифицированной схеме минимальных вычитаний.

В работах А. В. Беднякова и А. Ф. Пикельнера[9] найдены 3-петлевые соотношения, связывающие непертурбативные расчеты на решетке с ключевыми параметрами КХД (эффективным зарядом и массами кварков), используемыми при вычислении наблюдаемых в коллайдерных экспериментах. Проведено трудоемкое аналитическое вычисление 3-петлевых вершинных функций[10] в симметричной кинематике. Актуальность расчета подтверждается тем, что полученный результат был немедленно использован коллабо-

---

[4] *Bednyakov A., Pikelner A.* // Phys. Rev. Lett. 2021. V. 127. 041801.

[5] *Mikhailov S. V.* // JHEP. 2007. V. 06. P. 009.

[6] *Kotlorz D., Mikhailov S. V.* // Phys. Rev. D. 2019. V. 100. 056007.

[7] *Bednyakov A. V.* // Phys. Lett. B. 2015. V. 741. P. 262; *Bednyakov A. V., Kniehl B. A., Pikelner A. F., Veretin O. L.* // Nucl. Phys. B. 2017. V. 916. P. 463.

[8] *Kniehl B. A., Kotikov A. V., Onishchenko A. I., Veretin O. L.* // Phys. Rev. Lett. 2006. V. 97. 042001.

[9] *Bednyakov A., Pikelner A.* // Phys. Rev. D. 2020. V. 101. 071502; Phys. Rev. D. 2020. V. 101. 091501.

[10] *Pikelner A.* // JHEP. 2021. V. 06. P. 083.

рацией HPQCD для улучшения точности решеточного вычисления массы *c*-кварка.

В области, относящейся к применению РГ для описания конденсированных сред, впервые были получены шестипетлевые выражения для РГ функций[11] как безразмерных, так и размерных параметров наиболее общего варианта теории φ^4. Одним из возможных применений этого результата является изучение классов универсальности в теории критического поведения, соответствующих различным симметриям и различным параметрам порядка.

Выделяются работы, связанные с пертурбативной проверкой результатов, полученных в рамках разложения по большому заряду. Расчет шестипетлевого выражения[12] для аномальных размерностей операторов с фиксированным зарядом в рамках $O(N)$-симметричной φ^4, а также трехпетлевые вычисления в скалярной электродинамике[13] и Стандарной модели[14] подтвердили адекватность применения разложения по большому заряду в калибровочных теориях.

Новым направлением, возникшим уже в последнее десятилетие, явилось развитие Д. И. Казаковым теории перенормировок и ренормализационной группы в применении к так называемым неперенормируемым взаимодействиям. К таким теориям относятся калибровочные и суперсимметричные теории в высших пространственных измерениях, скалярные теории с сильно нелинейным и неполиномиальным взаимодействием, четырехфермионное взаимодействие и т. д. Как следует из общей теории R-операции, после вычитания всех расходящихся подграфов в низших порядках теории возмущений возникающие ультрафиолетовые расходимости всегда имеют локальных характер. Это утверждение, известное как теорема Боголюбова–Парасюка, справедливо в любой локальной квантовой теории поля. Отсюда следуют рекуррентные соотношения для контрчленов в последующих порядках теории возмущений, которые приводят к уравнениям ренормгруппы. Примечательно, что такие обобщенные уравнения ренормгруппы справедливы для неперенормируемых взаимодействий и выполняют ту же роль, что и в перенормируемых, т. е. суммируют бесконечные ряды радиационных поправок для ведущих и следующих за ними асимптотик. Этот формализм применим к амплитудам рассеяния, функциям Грина, эффективному действию в любой локальной теории. В работах Д. И. Казакова, А. Т. Борлакова, Д. Толкачёва, Р. М. Яхиббаева рассмотрены конкретные примеры применения указанного формализма для амплитуд рассеяния в максимально симметричных суперсимметричных теориях в высших измерениях, которые являются упрощенной моделью квантовой гравитации, а также для вычисления эффективного потенциала в неполиномиальных

[11] *Bednyakov A., Pikelner A.* // JHEP. 2021. V. 04. P. 233.

[12] *Bednyakov A., Pikelner A.* // Phys. Rev. D. 2022. V. 106. P. 7.

[13] *Antipin O., Bednyakov A., Bersini J., Panopoulos P., Pikelner A.* // Phys. Rev. Lett. 2023. V. 130. 021602.

[14] *Bednyakov A. V.* // Phys. Lett. B. 2024. V. 852. P. 138615.

скалярных теориях, используемых в инфляционной космологии[15]. Отдельным уникальным примером является четырехфермионное $V-A$-взаимодействие в четырех измерениях, где показано, что правильный учет радиационных поправок восстанавливает унитарность и приводит к асимптотически свободной теории.

КВАНТОВАЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

В квантовой электродинамике (КЭД) главным направлением работы теоретиков является поддержка экспериментальных исследований, проводимых на современных и будущих установках. С этой целью необходимо построение теоретических предсказаний, которые можно проверять экспериментально как с целью извлечения детальной информации об известных физических явлениях, так и для поиска так называемой новой физики за рамками Стандартной модели физики элементарных частиц и общей теории относительности. Постоянное развитие техники и методики экспериментальных исследований приводит к необходимости соответствующего повышения точности теоретических предсказаний, что, в свою очередь, требует учета различных эффектов в пертурбативных и непертурбативных вычислениях. Получаемые теоретические предсказания должны быть сделаны с учетом экспериментальных условий и реализованы в виде компьютерных программ, которые могут быть непосредственно использованы при моделировании и анализе опытных данных.

С начала 2000-х гг. сотрудники ЛТФ совместно с коллегами из других лабораторий и научных центров внесли большой вклад в развитие методов вычислений электромагнитных и электрослабых радиационных поправок. Они применили эти методы для получения высокоточных теоретических предсказаний наблюдаемых в процессах взаимодействия элементарных частиц, изучаемых в современных экспериментах. В частности, Э. А. Кураевым с учениками (А. Б. Арбузовым, Ю. М. Быстрицким, В. В. Бытьевым) и коллегами развивался и применялся метод структурных функций в квантовой электродинамике. Этот метод позволяет эффективно учитывать радиационные поправки высших порядков теории возмущения, усиленные большими логарифмами отношения характерного масштаба энергии процесса к массе электрона. Было показано, что применение данного метода помогает в решении проблемы интерпретации данных разных экспериментов по измерению отношения электрического и магнитного формфакторов протона[16]. Также были рассчитаны радиационные поправки к радиационному распаду заряженного пиона, который в то время вызвал большой интерес в связи с возможным обнаружением тензорного вклада в амплитуду распада[17].

---

[15] *Kazakov D., Borlakov A., Tolkachev D., Yahibbaev R. et al.* // JHEP. 2015. V. 11. P. 059; JHEP. 2016. V. 12. P. 154; JHEP. 2023. V. 04. P. 128; JCAP. 2023. V. 09. P. 049; Eur. Phys. J. 2025. V. 85. P. 1000.

[16] *Bystritskiy Yu. M., Kuraev E. A., Tomasi-Gustafsson E.* // Phys. Rev. C. 2007. V. 75. 015207.

[17] *Kuraev E. A., Bystritsky Yu. M., Velicheva E. P.* // Phys. Rev. D. 2004. V. 69. 114004.

Метод структурных функций послужил основой для созданного совместно с коллегами из ИЯФ СО РАН генератора событий по методу Монте-Карло MCGPJ[18]. Использование этого генератора на электрон-позитронных коллайдерах ВЭПП-2М и ВЭПП-2000 было важно для повышения точности анализа экспериментальных данных. Э. А. Кураев и А. Б. Арбузов внесли заметный вклад в успех усилий международной группы теоретиков «Radio Monte Carlo» по повышению точности теоретических предсказаний для процессов, изучаемых на электрон-позитронных коллайдерах[19].

Примером другого успешного приложения метода структурных функций КЭД является вычисление наиболее важных радиационных поправок высших порядков к спектру распада поляризованного мюона[20]. Использование данного метода также оказалось важным для разрешения загадки зарядового радиуса протона при его измерении в процессе упругого электрон-протонного рассеяния[21]. Комбинирование методов учета сильных и КЭД взаимодействий позволило А. Е. Дорохову и М. А. Иванову заметно продвинуться в точности теоретического описания распада нейтральных пионов и η-мезонов на электрон-позитронную пару[22].

А. Б. Арбузов и С. Г. Бондаренко активно участвовали в работе группы под руководством Д. Ю. Бардина и Л. В. Калиновской из ЛЯП ОИЯИ по вычислениям электрослабых радиационных поправок к процессам, изучаемым на современных и будущих коллайдерах высоких энергий, включая LEP, HERA, LHC, FCC-ee, CEPC и др. Этой группой была создана компьютерная система SANC[23], с помощью которой реализовывались интеграторы Монте-Карло и генераторы событий[24], востребованные для приложений в экспериментальной физике высоких энергий[25].

Ю. М. Быстрицким и В. А. Зыкуновым проводилась расширенная работа по учету электромагнитных и электрослабых поправок высших порядков для базовых процессов меллеровского[26] и баба-рассеяния[27], которые были

---

[18] *Arbuzov A. B., Fedotovich G. V., Ignatov F. V., Kuraev E. A., Sibidanov A. L.* // Eur. Phys. J. C. 2006. V. 46. P. 689.

[19] *Actis S. et al.* // Eur. Phys. J. C. 2010. V. 66. P. 585.

[20] *Arbuzov A. B.* // JHEP. 2003. V. 03. P. 063.

[21] *Arbuzov A. B., Kopylova T. V.* // Eur. Phys. J. C. 2015. V. 75. P. 603.

[22] *Dorokhov A. E., Kuraev E. A., Bystritskiy Yu. M., Secansky M.* // Eur. Phys. J. C. 2008. V. 55. P. 193.

[23] *Andonov A., Arbuzov A., Bardin D., Bondarenko S., Christova P., Kalinovskaya L., Nanava G., von Schlippe W.* // Comput. Phys. Commun. 2006. V. 174. P. 481.

[24] *Arbuzov A., Bardin D., Bondarenko S., Christova P., Kalinovskaya L., Klein U., Kolesnikov V., Rumyantsev L., Sadykov R., Sapronov A.* // JETP Lett. 2016. V. 103. P. 131; *Arbuzov A., Bondarenko S., Dydyshka Ya., Kalinovskaya L., Sadykov R., Yermolchyk V., Yermolchyk Yu.* // Phys. Part. Nucl. 2023. V. 54. P. 552.

[25] *Bardin D. Yu. et. al.* // Phys. Part. Nucl. 2019. V. 50. P. 395.

[26] *Aleksejevs A. G., Barkanova S. G., Bystritskiy Yu. M., Ilyichev A. N., Kuraev E. A., Zykunov V. A.* // Eur. Phys. J. C. 2012. V. 72. P. 2249; *Aleksejevs A. G., Barkanova S. G., Bystritskiy Yu. M., Kuraev E. A., Zykunov V. A.* // Phys. Part. Nucl. Lett. 2015. V. 12. P. 645; Phys. Part. Nucl. Lett. 2016. V. 13. P. 310.

[27] *Aleksejevs A. G., Barkanova S. G., Bystritskiy Yu. M., Zykunov V. A.* // Phys. Part. Nucl. 2020. V. 51. P. 645.

выполнены совместно с группой теоретиков из Канады и служат важным инструментом для прецизионного измерения параметров Стандартной модели, а также для калибровки и тестирования ускорительных комплексов по всему миру.

Другой активно развивающейся в ЛТФ областью применения КЭД является прецизионная спектроскопия легких атомов и молекул. Современные методы симпатического охлаждения атомов, молекул и ионов в ловушках, методы квантовой логики и квантовой информации создают уникальные возможности для сверхточных измерений их спектров (с относительной точностью 10^{-12} и выше). С теоретической точки зрения наиболее подходящей платформой для столь прецизионных вычислений спектров является нерелятивистская квантовая электродинамика (NRQED). Сотрудниками ЛТФ В. И. Коробовым, Д. Азнабаевым, А. Бекбаевым были выполнены наиболее точные расчеты[28] колебательных переходов для молекулярных ионов водорода H_2^+ и HD^+. Сравнение с экспериментом позволило уточнить значения фундаментальных физических констант, таких как константа Ридберга, отношение массы протона к массе электрона, зарядовый радиус протона и др. Полученные результаты[29] по прецизионной спектроскопии иона HD^+ были учтены в корректировках фундаментальных констант группой CODATA, что позволило в несколько раз улучшить точность определения отношения масс протона и электрона. Прецизионная спектроскопия позволяет измерять массы отрицательно заряженных пионов, каонов, антипротонов с высокой точностью[30], получать ограничения на возможные проявления новых взаимодействий, на гипотетическую «пятую силу»[31].

НЕЙТРИННАЯ ФИЗИКА

В течение первой четверти XXI в. в ЛТФ проводились разноплановые исследования в области нейтринной физики и ее астрофизических и космологических приложений. Основные направления включали развитие квантово-механической и квантово-полевой теорий нейтринных осцилляций в вакууме, веществе и внешних полях[32, 33, 34, 35] и феноменологию взаимодействий нейтрино с нуклонами и ядрами (включая поляризационные эф-

---

[28] *Korobov V. I., Hilico L., Karr J.-Ph.* // Phys. Rev. Lett. 2017. V. 118. P. 233001.

[29] *Alighanbari S., Giri G. S., Constantin F. L., Korobov V. I., Schiller S.* // Nature. 2020. V. 581. P. 152; *Patra S., Germann M., Karr J.-Ph., Haidar M., Hilico L., Korobov V. I., Cozijn F. M. J., Eikema K. S. E., Ubachs W., Koelemeij J. C. J.* // Science. 2020. V. 369. P. 1238.

[30] *Zhi-Da Bai, Korobov V. I., Zong-Chao Yan, Ting-Yun Shi, Zhen-Xiang Zhong* // Phys. Rev. Lett. 2022. V. 128. P. 183001.

[31] *Germann M., Patra S., Karr J.-Ph., Hilico L., Korobov V. I., Salumbides E. J., Eikema K. S. E., Ubachs W., Koelemeij J. C. J.* // Phys. Rev. Res. 2021. V. 3. L022028.

[32] *Naumov D. V., Naumov V. A.* // J. Phys. G. 2010. V. 37. P. 105014.

[33] *Naumov V. A., Shkirmanov D. S.* // Eur. Phys. J. C. 2013. V. 73. P. 2627;
Naumov V. A., Shkirmanov D. S. // Universe. 2021. V. 7. P. 246.

[34] *Kovalenko S., Šimkovic F.* // J. Phys. G. 2024. V. 51. 035202; Erratum: Ibid. 2024. 059601.

[35] *Dvornikov M.* // Phys. Rev. D. 2025. V. 111. 056009.

фекты) при энергиях от промежуточных до сверхвысоких[36, 37]. Многочисленные работы были связаны с разработкой механизмов генерации масс нейтрино, с изучением эффектов возможного присутствия нестандартных частиц и взаимодействий, а также с глубокими теоретическими исследованиями низкоэнергетических ядерно-физических процессов, так или иначе связанных с физикой нейтрино и теорией электрослабых взаимодействий, таких как ядерный β-распад, двойной двухнейтринный ($2\nu\beta\beta$) и безнейтринный ($0\nu\beta\beta$) β-распады, электронный захват[38].

В ковариантной квантово-полевой теории нейтринных осцилляций[32], развиваемой В. А. Наумовым совместно с Д. В. Наумовым (ЛЯП) и Д. С. Шкирмановым, используется техника так называемых макроскопических фейнмановских диаграмм, внешние линии которых представляют собой волновые пакеты — локализованные ковариантные суперпозиции фоковских состояний с определенными импульсами, а вершины соединены нейтринным пропагатором. Явление флейворных осцилляций в данной концепции есть результат интерференции макродиаграмм с нейтрино разных масс в промежуточных состояниях. Доказана так называемая теорема факторизации, позволяющая отделить расчеты амплитуд процессов в макроскопически удаленных вершинах диаграммы («источнике» и «детекторе») от расчета процесса «флейворной эволюции». Изучена дуальность в поведении «одетого» (т. е. модифицированного внешними волновыми пакетами) нейтринного пропагатора и эффективным волновым пакетом нейтрино.

Теория снимает все известные парадоксы стандартной квантово-механической теории нейтринных осцилляций и предсказывает многочисленные эффекты, отсутствующие в квантово-механическом подходе. В основном это эффекты декогеренции и дисперсии, связанные с расплыванием и пространственным расхождением эффективных волновых пакетов нейтрино. Показано, в частности, что флейворные осцилляции исчезают на больших расстояниях между «источником» и «детектором». Одно из наиболее впечатляющих предсказаний теории — нарушение классического закона обратных квадратов на малых (но макроскопических) расстояниях между источником и детектором[33]. Это предсказание было проверено с помощью детального статистического анализа данных реакторных экспериментов с короткими и длинными базами, а также данных Ga–Ge-детекторов солнечных нейтрино (GALLEX и SAGE) с искусственными радиоактивными источниками. Показано, что измеренные скорости счета событий в реакторных экспериментах не противоречат предсказанию теории, хотя данных пока недостаточно для надежной проверки эффекта. Предложены эксперименты с остановившимися каонами, которые могут

[36] *Kuzmin K. S., Lyubushkin V. V., Naumov V. A.* // Mod. Phys. Lett. A. 2004. V. 19. P. 2815–2829.

[37] *Alvarez-Ruso L. et al. (GENIE Collab.).* // Eur. Phys. J. 2021. V. 230. P. 4449.

[38] *Niţescu O., Dvornický R., Stoica S., Šimkovic F.* // Universe. 2021. V. 7. P. 147; *Šimkovic F., Krivoruchenko M. I., Kovalenko S.* // Phys. Part. Nucl. 2017. V. 48. P. 1023.

позволить изучить возможное нарушение закона обратных квадратов на сверхмалых расстояниях.

В качестве примера развития теории и феноменологии взаимодействий нейтрино с веществом можно упомянуть исследования, связанные с внедрением и оптимизацией современных моделей взаимодействия нейтрино с веществом в монте-карловский нейтринный генератор GENIE — наиболее востребованный сегодня программный продукт, объединяющий теорию и эксперимент в нейтринной физике и лежащий в основе обработки и интерпретации данных фактически всех современных экспериментов с ускорительными, атмосферными и астрофизическими нейтрино[36, 37]. В частности, в ЛТФ была разработана модель Харжеева–Левина–Нарди (KLN), являющаяся обобщением известной модели Рейна–Сегала, основанной на релятивистской кварковой $SU(6)$ модели Фейнмана–Кисинджера–Равндала. KLN модель имплементирована в GENIE и предназначена для расчета процессов резонансного рождения одиночных пионов при взаимодействиях нейтрино с нуклонами. Модель оперирует с 18 семействами нуклонных и барионных резонансов и интерферирующими с ними нерезонансными вкладами. KLN обобщение состоит в учете массы конечного лептона и его поляризации, что позволяет использовать модель для изучения реакций с рождением τ-лептона и рассчитывать вектор поляризации последнего. В рамках проекта GENIE детально изучались и недавние усовершенствования KLN модели, которые позволяют вычислять угловые и импульсные распределения вторичных пионов, т. е. рассчитывать 5-мерные дифференциальные сечения. Все это необходимо для моделирования и обработки данных текущих и будущих нейтринных экспериментов (Hyper-Kamiokande, DUNE, JUNO, IceCube/DeepCore/PINGU, KM3NeT/ORCA/P2O) с ускорительными, атмосферными и астрофизическими нейтрино. Проводится работа по тонкой настройке параметров моделей нейтринорождения мезонов, модификации и модернизации переходных формфакторов нуклона и т. п. Решается проблема корректного объединения моделирования однопионного нейтринорождения и других процессов (квазиупругого, дифракционного, глубоконеупругого рассеяния и т. д.) с учетом внутриядерных каскадов, поляризационных эффектов и взаимодействия адронов в конечном состоянии.

В работах В. А. Матвеева с соавторами рассматривались различные редкие процессы, выходящие за рамки Стандартной модели. Так, в работе С. Н. Гниненко, Н. В. Красникова и В. А. Матвеева[39] изучен невидимый распад мюония на два нейтрино, который в СМ имеет бренчинг $\mathrm{Br}\,(M \to \nu_e \bar{\nu}_\mu) = 6{,}6 \cdot 10^{-12}$. С использованием опубликованных экспериментальных результатов по прецизионным измерениям времени жизни мюонов, проведенным коллаборацией MuLan, установлено, что верхний предел на бренчинг $\mathrm{Br}\,(M \to \text{invisible}) < 5{,}7 \cdot 10^{-6}$, что оставляет большой разрыв примерно шесть порядков между этим пределом и предсказаниями. Чтобы существенно улучшить этот предел, предложено провести эксперимент

[39] *Gninenko S. N., Krasnikov N. V., Matveev V. A.* // Phys. Rev. D. 2013. V. 87. 015016.

по чувствительному поиску этого невидимого распада. Технико-экономическое обоснование экспериментальной установки показывает, что чувствительность поиска этой моды распада к бренчингу Br ($M \to$ invisible) может быть достигнута на уровне 10^{-12}. Изучены[40] распады $K_{S,L} \to$ invisible, которые никогда не исследовались экспериментально. В Стандартной модели предсказывается, что бренчинги этих распадов на два нейтрино будут чрезвычайно малы, Br ($K_{S,L} \to \nu\bar{\nu}$) $\approx 10^{-16}$. Рассмотрены несколько естественных расширений СМ, таких как модели двух дублетов Хиггса (2HDM), 2HDM и светлого скалярного и темного зеркального секторов, которые позволяют увеличить Br ($K_{S,L}$) до измеримого уровня. Обсуждена возможность поиска $K_{S,L}$-распадов и $K_{S,L}$-осцилляций в темном секторе в эксперименте NA64 в ЦЕРН с чувствительностью к Br ($K_{S,L} \to$ invisible) $\lesssim 10^{-7}$–10^{-5}.

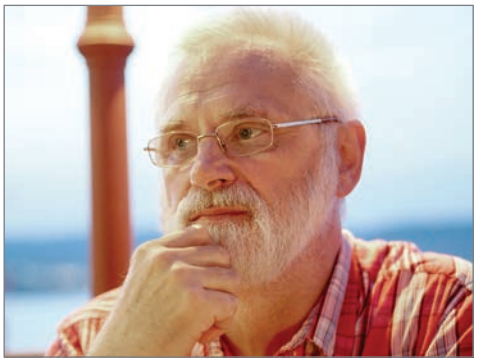
Большой пласт исследований основан на использовании атомных ядер в качестве лаборатории для изучения электрослабого взаимодействия и фундаментальных свойств нейтрино. Эта деятельность объединяет области атомной и ядерной физики, физики элементарных частиц (включая физику за пределами Стандартной модели, связанную с проблемой Великого объединения), астрофизики и космологии. Одним из важнейших процессов, связывающих все эти направления, является двойной безнейтринный β-распад ядер ($0\nu\beta\beta$), который до сих пор не наблюдался, но представляет огромный интерес для научного сообщества[41] как своеобразная лакмусова бумажка — индикатор возможной майорановской природы нейтрино. При всестороннем изучении этого процесса Ф. Шимковиц с коллегами получили

В. А. Матвеев, Н. В. Красников, Д. И. Казаков, К. Г. Четыркин (ИЯИ РАН), А. Ф. Владимиров

[40] *Gninenko S. N., Krasnikov N. V., Matveev V. A.* // Natural Sci. Rev. 2024. 1. 5.
[41] *Vergados J. D., Ejiri H., Simkovic F.* // Rept. Prog. Phys. 2012. V. 75. P. 106301.

Р. М. Яхиббаев, Д. Толкачев, А. И. Мухаева, А. Т. Борлаков, А. В. Бедняков

Участники II Международного совещания «Теория адронной материи при экстремальных условиях». ЛТФ ОИЯИ, 16–19 сентября 2019 г.



В. И. Коробов

С. Г. Бондаренко, А. В. Гладышев

В. Д. Тонеев, О. В. Теряев, А. Н. Сисакян

А. И. Титов, А. Е. Дорохов, Н. И. Кочелев

С. В. Михайлов, Г. П. Корчемский, А. П. Бакулев, А. В. Ефремов, А. В. Радюшкин

М. А. Иванов, Г. В. Ефимов, Г. Ганболд, С. Н. Неделько

Ф. Шимковиц, И. Д. Какорин, В. А. Наумов, Д. В. Наумов, С. М. Биленький, А. Г. Ольшевский

Участники семинара памяти Э. А. Кураева

Сотрудники ЛТФ О. В. Теряев, Н. И. Волчанский, А. В. Котиков, И. В. Аникин, Н. С. Цегельник, Г. Ю. Прохоров на 2-м Международном рабочем совещании по КХД и структуре адронов

множество важных результатов. В частности, были выполнены детальные самосогласованные расчеты ядерных матричных элементов $0\nu\beta\beta$-распадов ^{76}Ge, ^{82}Se, ^{96}Zr, ^{100}Mo, ^{116}Cd, ^{128}Te, ^{130}Te и ^{130}Xe в рамках как стандартного квазичастичного приближения случайных фаз (QRPA), так и перенормированного QRPA (RQRPA). Парные и остаточные взаимодействия нуклонов, а также двухнуклонные короткодействующие корреляции впервые были выведены из реалистичных нуклон-нуклонных потенциалов, а именно из зарядово-зависимого боннского потенциала и аргоннского потенциала. Была изучена чувствительность матричных элементов к динамике короткодействующих и высокоимпульсных частиц в ядре[42, 43].

Помимо чисто теоретических исследований сотрудники ЛТФ принимали участие в передовых нейтринных экспериментах, таких как NEMO3/SuperNEMO, Baikal-GVD, JUNO и NOvA. Был внесен заметный вклад в формирование физических программ и создание программного обеспечения для обработки и интерпретации экспериментальных данных.

КВАНТОВАЯ ХРОМОДИНАМИКА

Активно развивалась в ЛТФ в XXI в. квантовая хромодинамика — традиционная для лаборатории область. КХД присутствовала в лабораторной тематике с момента своего появления, и само ее возникновение было неразрывно связано с работами А. В. Ефремова, А. В. Радюшкина и их учеников и сотрудников. Исследования шли как в области изучения и применения теории возмущений КХД, так и за ее пределами.

Большое развитие получила фрактальная аналитическая теория возмущений (ФАТВ) КХД. Аналитическая теория возмущений, предложенная Д. В. Ширковым и И. Л. Соловцовым[44], основана на синтезе аналитичности и ренормгруппы для бегущего заряда. Подход приводит к нестепенной теории возмущений с новыми зарядами для областей импульсов, которые не имеют сингулярностей Ландау, малы и определены до $q^2 \sim 0$. В развитие аналитической теории возмущений А. П. Бакулевым и С. В. Михайловым была предложена ФАТВ[45], где результаты АТВ были распространены на любые, в том числе комплексные, степени эффективного заряда. Фрактальная аналитическая теория возмущений расширяет условие аналитичности на результаты ренормгруппового суммирования, приводящие к фрактальным степеням заряда, что очень важно для расчетов жестких процессов в рамках КХД-факторизации.

В рамках АТВ КХД Д. В. Ширковым, О. В. Теряевым, Р. С. Пасечником и О. П. Соловцовой проводился анализ экспериментальных данных по спи-

---

[42] *Šimkovic F., Faessler A., Muther H., Rodin V., Stauf M.* // Phys. Rev. C. 2009. V. 79. 055501.

[43] *Šimkovic F., Rodin V., Faessler A., Vogel P.* // Phys. Rev. C. 2013. V. 87. 045501.

[44] *Shirkov D. V., Solovtsov I. L.* // Phys. Rev. Lett. 1997. V. 79. P. 1209; Theor. Math. Phys. 2007. V. 150. P. 132.

[45] *Bakulev A. P., Mikhailov S. V., Stefanis N. G.* // Phys. Rev. D. 2005. V. 72. 074014; Phys. Rev. D. 2007. V. 75. 056005; JHEP. 2010. V. 06. P. 085.

новым нуклонным правилам сумм[46], правило сумм Бьёркена[47] исследовалось в области малых передач импульса до 4-петлевого вклада обычной ТВ и АТВ КХД. Показано, что АТВ смещает границу применимости КХД до очень низких передач импульса порядка 300 МэВ (и даже до $q^2 = 0$ после некоторой модификации операторного разложения[48]), позволяя получить более точную информацию о непертурбативных вкладах высоких твистов.

Анализ экспериментальных данных в рамках АТВ КХД был выполнен А. В. Котиковым, О. П. Соловцовой и А. С. Сидоровым для несинглетных структурных функций[49, 50]: извлечены значения масштаба КХД, найдена зависимость вкладов высшего твиста и соответствующих партонных распределений от доли импульса партонов. Подобный анализ в рамках стандартной КХД был выполнен А. В. Котиковым[51]. Построены параметризации партонных распределений на основе их асимптотик при больших и малых значениях долей импульса партонов[52].

ПРАВИЛА СУММ КВАНТОВОЙ ХРОМОДИНАМИКИ

В области приложений КХД можно отметить исследование эксклюзивных процессов при больших/средних передачах импульса. Среди них переходные (электромагнитные) формфакторы легких мезонов — пионов и η-мезонов — выделены высокой точностью измерений и интересом сообщества. Их вычисления (согласно КХД-факторизации и правилам сумм на световом конусе), включают коэффициентную функцию теории возмущений и непертурбативно описываемые амплитуды распределения адронов. В работах А. П. Бакулева, С. В. Михайлова и А. В. Пимикова[53] получены обе эти компоненты, объяснены результаты ранних экспериментов CLEO (1998) и разрешено противоречие между данными коллабораций BaBar (2008) и Belle (2012). К этой задаче примыкают технические дости-

---

[46] *Pasechnik R. S., Shirkov D. V., Teryaev O. V.* // Phys. Rev. D. 2008. V. 78. 071902; *Pasechnik R. S., Shirkov D. V., Teryaev O. V., Solovtsova O. P., Khandramai V. L.* // Phys. Rev. D. 2010. V. 81. 016010.

[47] *Khandramai V. L., Pasechnik R. S., Shirkov D. V., Solovtsova O. P., Teryaev O. V.* // Phys. Lett. B. 2012. V. 706. P. 340; *Ayala C., Cvetic G., Kotikov A. V., Shaikhatdenov B. G.* // Int. J. Mod. Phys. A. 2018. V. 33. P. 1850112; Eur. Phys. J. C. 2018. V. 78. P. 1002.

48 *Gabdrakhmanov I. R., Gramotkov N. A., Kotikov A. V., Teryaev O. V., Volkova D. A., Zemlyakov I. A.* // Int. J. Mod. Phys. A. 2025. V. 40. P. 2450175.

[49] *Sidorov A. V., Solovtsova O. P.* // Mod. Phys. Lett. A. 2014. V. 29. P. 1450194.

[50] *Kotikov A. V., Krivokhizhin V. G., Shaikhatdenov B. G.* // Phys. Atom. Nucl. 2012. V. 75. P. 507.

[51] *Shaikhatdenov B. G., Kotikov A. V., Krivokhizhin V. G., Parente G.* // Phys. Rev. D. 2010. V. 81. 034008; *Kotikov A. V., Krivokhizhin V. G., Shaikhatdenov B. G.* // J. Phys. G. 2015. V. 42. 095004.

[52] *Illarionov A. Yu., Kotikov A. V., Parzycki S. S., Peshekhonov D. V.* // Phys. Rev. D. 2011. V. 83. 034014; *Kotikov A. V., Lipatov A. V.* // Phys. Rev. D. 2025. V. 111. 094009.

[53] *Bakulev A. P., Mikhailov S. V., Stefanis N. G.* // Phys. Lett. B. 2004. V. 578. P. 91; *Mikhailov S. V., Stefanis N. G.* // Nucl. Phys. B. 2009. V. 821. P. 291; *Mikhailov S. V., Pimikov A. V., Stefanis N. G.* // Phys. Rev. D. 2016. V. 93. 114018.

жения в исследованиях КХД-поправок к двухточечному коррелятору двух составных операторов[54]. Обоснованное применение ФАТВ к вычислению пертурбативной части формфакторов пионов[55] продвинуло КХД-предсказания формфакторов пиона до низких передач ($q^2 \sim 0{,}5$ ГэВ) при хорошем согласии с экспериментальными данными. С использованием аналогичных правил сумм на световом конусе И. В. Аникиным вычислены также электромагнитные формфакторы нуклонов и изобар[56] с учетом твистов 3 и 4.

АНОМАЛИИ В ФИЗИКЕ АДРОНОВ И ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ

Другой подход к переходным формфакторам, сочетающий теорию возмущений и выход за ее пределы, связан с фундаментальным свойством квантовой теории поля — аксиальной аномалией. Обобщение этого понятия на случай виртуальных фотонов позволило А. Г. Оганесяну, Я. Н. Клопоту и О. В. Теряеву получить точные правила сумм, что наряду с использованием кварк-адронной дуальности привело к описанию формфакторов псевдоскалярных мезонов в различных кинематических областях[57]. Было показано, что основанный на аномалии подход является дополнительным (дуальным) к использованию правил сумм на световом конусе[58].

Аномалии играют существенную роль для широкого круга вопросов физики адронов. Глюонная $U(1)_A$ аномалия приводит к несохранению $U(1)_A$ заряда, в результате чего теория не содержит ни сохраняющегося $U(1)_A$ квантового числа, ни дополнительного голдстоуновского бозона. Кроме того, она отвечает за подавление эффектов нарушения изоспина в спектре псевдоголдстоуновских состояний. Эффективный лагранжиан Весса–Зумино суммирует эффекты киральной $SU(3)_L \times SU(3)_R$ аномалии в алгебре токов и в конечном счете связывает амплитуду распада $\pi^0 \to \gamma\gamma$ с другими амплитудами, такими как $\gamma \to 3\pi$, $\gamma\gamma \to 3\pi$, а также приводит к появлению вершин, описывающих сильные взаимодействия с нечетным числом псевдоскаляров, которые отсутствуют в кирально-симметричной теории. Таким образом, аномалии накладывают жесткие ограничения на амплитуды связанных с ними процессов, и поэтому результаты таких расчетов отличаются большой степенью точности. Последнее является следствием теоремы Адлера–Бардина, в которой утверждается, что киральная аномалия не из-

---

[54] *Mikhailov S. V., Volchanskiy N.* // JHEP. 2019. V. 01. P. 202; JHEP. 2020. V. 21. P. 197; Phys. Rev. D. 2023. V. 108. 096015.

[55] *Ayala C., Mikhailov S. V., Stefanis N. G.* // Phys. Rev. D. 2018. V. 98. P. 096017; *Ayala C., Mikhailov S. V., Pimikov A. V., Stefanis N. G.* // EPJ Web Conf. 2019. V. 222. 03017; *Mikhailov S. V., Pimikov A. V., Stefanis N. G.* // Phys. Rev. D. 2021. V. 103. 096003.

[56] *Anikin I. V., Braun V. M., Offen N.* // Phys. Rev. D. 2013. V. 88. 114021; 2015. V. 92. 014018; 2016. V. 94. 034011.

[57] *Klopot Y. N., Oganesian A. G., Teryaev O. V.* // Phys. Lett. B. 2011. V. 695. P. 130; Phys. Rev. D. 2011. V. 84. 051901; *Khlebtsov S., Klopot Y. N., Oganesian A. G., Teryaev O. V.* // Phys. Rev. D. 2019. V. 99. 016008; 2021. V. 104. 016011.

[58] *Oganesian A. G., Pimikov A. V., Stefanis N. G., Teryaev O. V.* // Phys. Rev. D. 2016. V. 93. 054040.

меняется при учете поправок высшего порядка. Несмотря на достигнутую ясность в вопросах фундаментального характера, остаются открытыми не менее важные вопросы, касающиеся всевозможных проявлений аномалий в процессах, где они являются только частью более сложной динамики, связанной с учетом сильных взаимодействий. Так, требуют детального изучения вопросы о величине вклада аномальных вершин в амплитудах, содержащих адронные резонансные состояния спина 1. Включение резонансов в эффективный лагранжиан возможно, но в этом случае оно не ведет к ограничениям на константы сильных взаимодействий, что существенно снижает предсказательную силу таких вычислений.

М. К. Волковым, А. А. Осиповым и А. А. Пивоваровым[59] было показано, что амплитуда радиационного распада аксиально-векторного резонансного состояния $f_1(1285) \to \rho^0\gamma$ нетривиальным образом связана с неабелевой аксиальной аномалией. Нетривиальность заключается в том, что поверхностные члены кварковой треугольной диаграммы, описывающей данный процесс, в силу векторного тождества Уорда и статистики Бозе приводят к полному сокращению линейной зависимости по внешним импульсам. В результате разложение амплитуды начинается с кубического по импульсам члена, а соответствующая константа связи в рамках модели Намбу–Иона-Лазинио выражается через константу распада $\rho \to 2\pi$ и массы кварков. Рассматриваемая часть амплитуды согласуется с КХД-расчетами треугольной кварковой диаграммы, проведенными в пертурбативной области. Это согласие (в силу теоремы Адлера–Бардина) указывает на глубокую связь полученного результата с фундаментальными представлениями о природе аномалии и проливает свет на детали ее проявления на уровне непертурбативной динамики адронных состояний.

Изучалось более сложное проявление аномалии Адлера–Бардина[60]. Было показано, что теоретическое описание распада $f_1(1285) \to \pi^+\pi^-\gamma$ включает три типа аномальных вершин: треугольные *AVV*, *AAA* и четырехугольную *AAAV*. Основной вывод — доминирование ρ-резонанса в амплитуде процесса, тогда как четырехугольная аномалия важна благодаря ее положительной интерференции с каналом ρ-обмена. Это, по сути, первое теоретическое изучение данного процесса, в анализе которого используется аномалия *AVV*. Поскольку экспериментальные данные по данному распаду отсутствуют, была вычислена[61] ширина распада $f_1(1285) \to \rho^0\pi^-\gamma$, амплитуда которого через гипотезу векторной доминантности связана с амплитудой $f_1(1285) \to \pi^+\pi^-\gamma$. Полученное согласие с экспериментальными данными является существенным и нетривиальным аргументом в пользу кварк-антикварковой природы $f_1(1285)$ мезона, благодаря которой аномалия начинает играть основную роль в киральной динамике этого состояния.

Проблема учета π-a_1 смешивания, важная для описания физики аксиально-векторных мезонов (в присутствии неабелевой аномалии), иссле-

[59] *Osipov A. A., Pivovarov A. A., Volkov M. K.* // Phys. Rev. D. 2017. V. 96. 054012.
[60] *Osipov A. A., Volkov M. K.* // Phys. Rev. D. 2018. V. 97. 074020.
[61] *Osipov A. A., Pivovarov A. A., Volkov M. K.* // Phys. Rev. D. 2018. V. 98. 014037.

довалась А. А. Осиповым с коллегами[62,63,64,65,66]. Хорошо известно, что наивный учет эффектов π-a_1 смешивания в присутствии электромагнитных взаимодействий ведет к нарушению низкоэнергетических теорем, вытекающих из аномальных тождеств Уорда. Развитая авторами процедура ковариантной диагонализации устраняет проблему, но ведет к отклонению от гипотезы векторной доминантности. Еще один важный результат связан с изучением механизма восстановления изоспиновой симметрии глюонной аномалией в спектре псевдоскалярных состояний. Был рассмотрен механизм[67], посредством которого аномалия $U(1)$ на втором шаге $1/N_c$ разложения индуцирует эффективные вершины, нарушающие правила Цвейга. Они появляются только при явном нарушении изоспиновой и $SU(3)$ симметрий массами легких кварков и подавляют эффект, вызванный нарушением этих симметрий в лидирующем порядке.

Аксиальная аномалия проявилась также и в эффективной гидродинамической теории кварк-глюонной плазмы (КГП)[68], что позволило, в частности, предсказать убывание глобальной поляризации гиперонов с энергией[69] и оценить ее величину при энергиях комплекса NICA за несколько лет до экспериментального подтверждения этих результатов в эксперименте STAR[70]. Использованный метод стал естественным обобщением впервые обнаруженного в ЛТФ А. В. Ефремовым и О. В. Теряевым так называемого аномального глюонного вклада[71], при котором роль глюонного поля играет четырехмерная скорость плотной кварк-глюонной среды. Впоследствии В. И. Захаровым, Г. Ю. Прохоровым и О. В. Теряевым были обнаружены проявления в КГП гравитационной аномалии[72] и аналога эффекта Унру[73], который может приводить к дополнительным механизмам адронизации. С гравитационной аномалией связаны и новые объекты изучения в КХД — гравитационные формфакторы тензора энергии-импульса. Один из них, связанный с обобщением понятия давления для элементарных частиц, может быть извлечен из данных по глубоконеупругому комптоновскому рассеянию в JLab с помощью полученных в ЛТФ О. В. Теряевым голографических правил сумм для обобщенных партонных распределений[74]. Эти формфакторы связывают КХД с гравитационными взаимодействиями ча-

---

[62] *Morais J., Hiller B., Osipov A. A.* // Phys. Lett. B. 2017. V. 773. P. 277.

[63] *Osipov A. A., Khalifa M. M.* // Phys. Rev. D. 2018. V. 98. 036023.

[64] *Osipov A. A., Hiller B., Zhang P. M.* // Phys. Rev. D. 2018. V. 98. 113007.

[65] *Osipov A. A., Khalifa M. M., Hiller B.* // Phys. Rev. D. 2020. V. 101. 034012.

[66] *Osipov A. A., Pivovarov A. A., Volkov M. K., Khalifa M. M.* // Phys. Rev. D. 2020. V. 101. 094031.

[67] *Osipov A. A.* // JETP Lett. 2023. V. 117, No. 12. P. 898–904.

[68] *Sadofyev A. V., Shevchenko V. I., Zakharov V. I.* // Phys. Rev. D. 2011. V. 83. 105025.

[69] *Rogachevsky O., Sorin A., Teryaev O.* // Phys. Rev. C. 2010. V. 82. 054910.

[70] *Baznat M., Gudima K., Teryaev O.* // Phys. Rev. C. 2013. V. 88. 061901.

[71] *Efremov A. V., Teryaev O. V.* JINR Preprint E2-88-287. Dubna, 1988.

[72] *Prokhorov G. Yu., Teryaev O. V., Zakharov V. I.* // Phys. Rev. Lett. 2022. V. 129. P. 151601.

[73] *Prokhorov G. Yu., Teryaev O. V., Zakharov V. I.* // JHEP. 2020. V. 03. P. 137.

[74] *Teryaev O. V.* Analytic Properties of Hard Exclusive Amplitudes // Proc. of the 11th Intern. Conf. on Elastic and Diffractive Scattering: Towards High Energy Frontiers, Chateau de Blois, France, May 15–20, 2005; *Anikin I. V., Teryaev O. V.* // Phys. Rev. D. 2007. V. 76. 056007.

стиц и обобщениями принципа эквивалентности[75], они могут извлекаться из экспериментальных данных и моделей обобщенных партонных распределений. И. В. Аникиным были выполнены подобные вычисления в рамках правил сумм на световом конусе[76].

ЭФФЕКТИВНЫЕ ТЕОРИИ ДЛЯ ТЯЖЕЛЫХ И ЛЕГКИХ КВАРКОВ

В лаборатории получили развитие неперенормируемые теории поля на основе нелокального характера взаимодействия. Различные модели нелокальной теории поля, развитые в группах Г. В. Ефимова и М. К. Волкова, по настоящее время пользуются большой популярностью среди теоретиков, поскольку позволяют проводить численные расчеты в режиме сильной связи, проблема которой неразрешима до сих пор. Данные расчеты востребованы различными международными экспериментальными коллаборациями. В частности, исследования физики тяжелых кварков выполнялись с использованием непертурбативных подходов, а также предложенной и развивавшейся в Лаборатории теоретической физики нелокальной кварковой модели. Интерес к физике тяжелых кварков, т. е. к физике b- (боттом) и c- (чарм) кварков, возник еще в 1990-х гг. и получил свое бурное развитие во многих мировых научных центрах, включая ЛТФ. Основным толчком явилось наблюдение того, что в пределе больших масс кварков появляется новая спин-флэйворная симметрия, благодаря которой возникают соотношения, позволяющие значительно уменьшить число независимых физических наблюдаемых. Так, например, в полулептонных слабых распадах тяжелых мезонов, идущих за счет b–c-перехода, все формфакторы выражаются через одну функцию, называемую функцией Изгура–Вайса. Предел больших масс кварков, выполненный в лагранжиане КХД, приводит к теории, называемой эффективной теорией тяжелых кварков, в лагранжиане которой отсутствует зависимость от масс кварков, а имеется лишь зависимость от их 4-скоростей.

В лаборатории было выполнено значительное число исследований эксклюзивных распадов тяжелых адронов (как мезонов, так и барионов) в рамках различных кварковых моделей, удовлетворяющих всем требованиям эффективной теории тяжелых кварков. Особо следует отметить работы по слабым распадам B_c-мезона, состоящего из двух тяжелых b- и c-кварков с различным флэйвором. Они нашли достаточно хороший отклик и цитируемость. Кроме того, проведены расчеты дипольной поляризуемости легких псевдоскалярных мезонов в рамках подхода среднего поля к модели КХД-вакуума и КХД-бозонизации. Данные вычисления выполнены на основе статистического ансамбля почти всюду однородных абелевых (анти) самодуальных глюонов в доменной модели. В этом подходе выведено нелокальное эффективное действие мезонных полей, описывающее все воз-

[75] *Teryaev O. V.* // Front. Phys. Beijing. 2016. V. 11. P. 111207.
[76] *Anikin I. V.* // Phys. Rev. D. 2019. V. 99. 094026.

можные сильные, слабые и электромагнитные взаимодействия мезонных полей, включая их возбужденные состояния[77].

Заслуженным вниманием экспериментаторов пользуются расчеты отношений бренчингов аксиально-векторных распадов мезонов $f_1 \to a_0\pi$, $\pi\pi\eta$, $f_1 \to \rho\pi$, π и $f_1 \to KK\pi$ в стандартной кварковой модели $U(3) \times U(3)$ Намбу–Иона-Лазинио. При этом промежуточные каналы с состояниями $a_0(980)\pi$ и $f_0(500)\eta$ учитываются в распаде $f_1 \to \pi\pi\eta$. Показано, что распады $f_1 \to \rho\pi$ и $f_1 \to 3\pi$ возникают из-за разницы масс u- и d-кварков. Все результаты получены без использования любых дополнительных произвольных параметров и находятся в удовлетворительном согласии с известными экспериментальными данными[78].

По физике тяжелых кварков были организованы регулярные международные конференции, проводившиеся в Дубне (1993, 1996, 2000, 2003), Бад-Хоннефе (Германия, 1994), Ростоке (Германия, 1997), затем эти конференции были преобразованы в международные школы по физике тяжелых кварков (Дубна, 2008, 2013, 2016 и 2019).

Эффективные теории позволяют исследовать и массы легких кварков, которые являются фундаментальными параметрами квантовой хромодинамики, отражают закономерности нарушения слабой и электромагнитной калибровочной симметрии и, кроме того, содержат информацию о структуре ароматов в физике за пределами Стандартной модели. Поэтому знание этих параметров важно как для феноменологических, так и для теоретических приложений. Кварки находятся в связанном состоянии внутри адронов, что исключает прямое измерение массы изолированного кварка. Особую роль природа отвела легким u-, d- и s-кваркам, массы которых определяют степень явного нарушения $SU(3)_L \to SU(3)_R$ киральной симметрии в квантовой хромодинамике. Поскольку массы легких кварков малы по сравнению с характерными адронными масштабами, их влияние на адронные наблюдаемые незначительно. Независимость сильных взаимодействий от ароматов еще более усложняет задачу экспериментального изучения проблемы масс кварков. Определение масс легких кварков на фундаментальном уровне — задача, стоящая перед квантовой теорией поля. Сложность заключается в том, что ее применение для расчетов адронных наблюдаемых требует непертурбативных методов. Одним из таких инструментов являются вычисления на решетке. В настоящее время наиболее надежные результаты о массах легких кварков получены именно таким путем.

Проблема масс кварков изучалась А. А. Осиповым в рамках $1/N_c$ киральной теории возмущений[79]. Отправной точкой исследования были формулы для квадратов масс псевдоскалярных мезонов, полученные в приближении NLO. Известно, что в этом приближении отношения m_u/m_d и m_s/m_d взаимосвязаны и принадлежат эллипсу. Был предложен альтернативный подход, который также ведет к функциональной зависимости между m_u/m_d

---

[77] *Nedelko S., Voronin V.* // Phys. Rev. D. 2023. V. 107. 094027

[78] *Volkov M. K., Pivovarov A. A., Nurlan K.* // Natural Sci. Rev. 2025. V. 2. P. 100403.

[79] *Osipov A. A.* // JETP Lett. 2024. V. 119. P. 897.

и m_s/m_d, но результатом является не эллипс, а алгебраическая кривая третьего порядка. Было показано, что в отличие от эллипса эта кривая обладает рядом замечательных свойств. Она универсальна, т. е. ее форма однозначно определяется требованием соответствия массовых формул (после учета электромагнитных поправок) феноменологическим значениям мезонных масс в каждой точке кривой. Она стабильна, т. е. учет высших поправок не влияет на ее вид. Кроме того, положение на кривой контролируется ренормгрупповым инвариантом: произведением массы кварка и кваркового конденсата, что дает возможность (при известном значении величины конденсата) определить абсолютные значения масс кварков. Эти свойства позволяют использовать кубику для совместного анализа с данными решеточных вычислений[80]. В результате полученные оценки как для отношений кварковых масс, так и для их абсолютных величин имеют точность, не уступающую точности расчетов на решетке, и в целом согласуются с данными, представленными PDG (2024) и FLAG (2022).

ПАРТОННЫЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ В ЭКСКЛЮЗИВНЫХ И ИНКЛЮЗИВНЫХ ПРОЦЕССАХ

В XXI в. применение КХД-факторизации было отмечено существенным расширением типов ее непертурбативных ингредиентов — партонных распределений, среди которых следует особо отметить упоминавшиеся выше обобщенные партонные распределения, а также зависящие от поперечного импульса (РПИ, TMD). В области исследования обобщенных партонных распределений О. В. Теряевым было обосновано применение стандартного метода преобразования Радона[81], явившееся обоснованием голографических правил сумм, проверенных, в частности, для фотонных обобщенных партонных распределений. С. В. Голоскоковым предложено и развито теоретическое описание эксклюзивного жесткого электророждения мезонов с помощью обобщенных партонных распределений, позволившее описать широкий круг экспериментальных данных[82].

В лаборатории проводились исследования инклюзивных процессов при больших/средних передачах импульса. Д. Котлож и С. В. Михайловым развит и применен к анализу данных подход к GLAPD эволюции, явно учитывающий неизбежные экспериментальные ограничения на доли переменной Бьёркена. Из свойства сверток для партонных распределений А. В. Котиковым были получены сечения нейтрино-нуклонного рассеяния при сверхвысоких энергиях[83], а также модификация партонных распре-

[80] *Osipov A. A.* // Phys. Rev. D. 2024. V. 110. 014044.

[81] *Teryaev O. V.* // Phys. Lett. B. 2001. V. 510. P. 125.

[82] *Goloskokov S. V., Kroll P.* // Eur. Phys. J. C. 2008. V. 53. P. 367.

[83] *Fiore R., Jenkovszky Laszlo L., Kotikov A. V., Paccanoni F., Papa A., Predazzi E.* // Phys. Rev. D. 2005. V. 71. 033002; *Fiore R., Jenkovszky Laszlo L., Kotikov A. V., Paccanoni F., Papa A.* // Phys. Rev. D. 2006. V. 73. 053012; *Illarionov A. Yu., Kniehl B. A., Kotikov A. V.* // Phys. Rev. Lett. 2011. V. 106. P. 231802.

делений в ядрах[84], как и непертурбативные ингредиенты полуинклюзивных процессов — функции фрагментации в области малых долей импульса адронов и связанные с ними средние партонные множественности в струях[85].

Детальное исследование различных k_t-зависимых партонных функций и приближений для них осуществлялось под руководством А. В. Ефремова[86]. Анализ таких распределений основан на выполненных в ЛТФ работах по вкладам высшего твиста[87], заложивших признанные впоследствии основы применения КХД к спиновым эффектам. Аналогичным способом И. В. Аникиным и О. В. Теряевым был выполнен анализ вкладов высшего твиста в эксклюзивных процессах[88]. Эти вопросы (наряду с другими проблемами спиновой физики в КХД) обсуждались на регулярных международных дубненских семинарах по высокоэнергетической спиновой физике, проводимых в нечетные годы.

АДРОННАЯ МАТЕРИЯ ПРИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ

Исследование критических явлений в адронной материи в условиях экстремальных значений барионной плотности, температуры, напряженности электромагнитного поля, релятивистского вращения и ускорения было одним из магистральных направлений экспериментальных и теоретических исследований в области релятивистской ядерной физики и физики элементарных частиц. В силу особой сложности предмета исследования теория адронной материи требует комплексного привлечения широкого спектра методов теоретической физики от численных расчетов в рамках КХД на решетке до феноменологических статистических и термодинамических моделей. В Лаборатории теоретической физики такого рода методы развивались на протяжении нескольких десятилетий. В последние несколько лет в связи с активным формированием физической программы флагманского экспериментального проекта ОИЯИ ускорительного комплекса NICA экспертиза ЛТФ в этой области была консолидирована в единый проект «Теория адронной материи при экстремальных условиях», что создало хорошие предпосылки для получения ряда важных физических результатов, а также для организации периодических международных совещаний и школ для молодых ученых.

---

[84] *Kotikov A. V., Shaikhatdenov B. G., Pengming Zh.* // Phys. Rev. D. 2017. V. 96. 114002.

[85] *Bolzoni P., Kniehl B. A., Kotikov A. V.* // Phys. Rev. Lett. 2012. V. 109. P. 242002; Nucl. Phys. B. 2013. V. 875. P. 18; *Kotikov A. V., Teryaev O. V.* // Phys. Rev. D. 2021. V. 103. 034002.

[86] *Avakian H., Efremov A. V., Schweitzer P., Yuan F.* // Phys. Rev. 2010. D. V. 81. 074035; *Efremov A. V., Schweitzer P., Teryaev O. V., Zavada P.* // Phys. Rev. D. 2009. V. 80. 014021; *Avakian H., Efremov A. V., Schweitzer P., Yuan F.* // Phys. Rev. D. 2008. V. 78. 114024.

[87] *Efremov A. V., Teryaev O. V.* // Sov. J. Nucl. Phys. 1984. V. 39. 962; Phys. Lett. B. 1985. V. 150. P. 383.

[88] *Anikin I. V., Pire B., Teryaev O. V.* // Phys. Rev. D. 2000. V. 62. 071501; *Anikin I. V., Ivanov D. Yu., Pire B., Szymanowski L., Wallon S.* // Nucl. Phys. B. 2010. V. 828. P. 1; Phys. Lett. B. 2010. V. 682. P. 413.

Решеточные расчеты в КХД и физика кварк-глюонной плазмы

Особый интерес представляют непертурбативные аспекты КХД, делающие ее одной из самых интересных и сложных теорий в современной теоретической физике. Такая сложность КХД связана с сильным взаимодействием между элементарными возбуждениями (кварками и глюонами), которое невозможно исследовать аналитически, основываясь на первопринципах. Поэтому на первый план в исследовании непертурбативных свойств теории сильных взаимодействий выходит метод численных расчетов в решеточной КХД, который является общепризнанным в мировой науке и одним из самых успешных в изучении свойств КХД. Успех решеточной КХД основан на нескольких фактах. Во-первых, метод отталкивается от первопринципов квантовой теории поля. Во-вторых, погрешности метода хорошо изучены, контролируются и могут систематически улучшаться. В-третьих, благодаря развитию вычислительной техники и повышению эффективности алгоритмов в настоящее время возможно изучение решеточной КХД с параметрами, максимально приближенными к реальности (с динамическими кварками, физическими массами π-мезонов, большими физическими размерами решетки и большим обрезанием по импульсу (малым шагом решетки)). В ОИЯИ исследования с помощью метода решеточного моделирования КХД проводятся с 1980-х гг. Первые работы в этой области были проделаны В. П. Гердтом, В. К. Митрюшкиным, И. К. Соболевым, А. М. Задорожным. Среди важных результатов, полученных в ОИЯИ в рамках метода решеточного моделирования КХД, стоит упомянуть следующие.

В. К. Митрюшкиным и Е. М. Ильгенфритцем проведено изучение пропагаторов глюонов и духов в инфракрасной области[89,90,91,92]. В. В. Брагутой, Е. М. Ильгенфритцем, А. Ю. Котовым, А. А. Роенко проведено изучение влияния магнитного поля на свойства КХД. В частности, изучено влияние магнитного поля на фазовые переходы[93,94], проводимость электрического тока в кварк-глюонной плазме[95,96], уравнение состояния КХД при ненулевых магнитном поле и барионной плотности[97].

---

[89] *Bogolubsky I. L., Ilgenfritz E. M., Muller-Preussker M., Sternbeck A.* // Phys. Lett. B. 2009. V. 676. P. 69.

[90] *Aouane R., Bornyakov V. G., Ilgenfritz E. M., Mitrjushkin V. K., Muller-Preussker M.* // Phys. Rev. D. 2012. V. 85. 034501.

[91] *Bornyakov V. G., Mitrjushkin V. K., Muller-Preussker M.* // Phys. Rev. D. 2010. V. 81. 054503.

[92] *Bogolubsky I. L., Burgio G., Muller-Preussker M., Mitrjushkin V. K.* // Phys. Rev. D. 2006. V. 74. 034503.

[93] *Ilgenfritz E.-M., Kalinowski M., Muller-Preussker M., Petersson B., Schreiber A.* // Phys. Rev. D. 2012. V. 85. 114504.

[94] *Ilgenfritz E.-M., Muller-Preussker M., Petersson B., Schreiber A.* // Phys. Rev. D. 2014. V. 89. 054512.

[95] *Astrakhantsev N., Braguta V., D'Elia M., Kotov A. Yu., Nikolaev A. A.* // Phys. Rev. D. 2020. V. 102. 054516.

[96] *Almirante G., Astrakhantsev N., Braguta V. V., D'Elia M., Maio L.* // Phys. Rev. D. 2025. V. 111. 034505.

[97] *Astrakhantsev N., Braguta V. V., Kotov A. Yu., Roenko A. A.* // Phys. Rev. D. 2024. V. 109. 094511.

Детальные расчеты сверхсильных магнитных полей, генерируемых спектаторами в столкновениях релятивистских тяжелых ионов, были выполнены впервые в ЛТФ в работе В. А. Тонеева, В. В. Скокова и А. Ю. Илларионова[98]. Явление кирального магнитного катализа предсказывает, что магнитное поле должно увеличивать киральный конденсат и, следовательно, критическую температуру кирального перехода. Подавляющее большинство теоретических работ подтверждало существование кирального катализа в КХД. Однако решеточные вычисления, проведенные на физической массе кварка решеточной группой Регенсбурга, показали, что в КХД действительно имеет место обратный киральный магнитный катализ: критическая температура кирального фазового перехода уменьшается с ростом напряженности магнитного поля. При ненулевой барионной плотности обратный киральный катализ в КХД одновременно с магнитным катализом перехода деконфайнмента был впервые изучен в ЛТФ В. В. Брагутой, А. Ю. Котовым[99]. Указание на возможность каталитического влияния магнитного поля на деконфайнмент впервые было получено в рамках развиваемого в ЛТФ среднеполевого подхода к вакууму КХД[100]. Сейчас эти результаты являются общепризнанными.

Решеточная группа ОИЯИ является одним из лидеров в изучении свойств двухцветной КХД при высокой барионной плотности. В этой области проведены следующие важные исследования: изучение фазовых переходов при ненулевой барионной плотности[101], вычисление потенциала взаимодействия тяжелых кварков в плотной барионной материи[102], изучение пропагатора глюона[103] и вычисление уравнения состояния в плотной двухцветной КХД[104].

Исследования влияния вращения на свойства адронной материи методами КХД на решетке — еще одна область, в которой лидирует решеточная группа ЛТФ. В. В. Брагутой, А. Ю. Котовым и А. А. Роенко проведено изучение влияния релятивистского вращения на критическую температуру в КХД[105, 106]. Вопреки большинству теоретических работ было показано, что критические температуры переходов конфайнменет/деконфайнмент и кирального перехода растут с увеличением угловой скорости. Другим важным

---

[98] *Skokov V. , Illarionov A. Y. , Toneev V.* // Int. J. Mod. Phys. A. 2009. V. 24. P. 5925.

[99] *Braguta V. V., Chernodub M. N., Kotov A. Yu., Molochkov A. V., Nikolaev A. A.* // Phys. Rev. D. 2019. V. 100. 114503.

[100] *Galilo B. V., Nedelko S. N.* // Phys. Rev. D. 2011. V. 84. 094017.

[101] *Braguta V. V., Ilgenfritz E.-M., Kotov A. Yu., Molochkov A. V., Nikolaev A. A.* // Phys. Rev. D. 2016. V. 94. 114510.

[102] *Astrakhantsev N. Yu., Bornyakov V. G., Braguta V. V., Ilgenfritz E.-M., Kotov A. Yu.* // JHEP. 2019. V. 05. P. 171.

[103] *Bornyakov V. G., Braguta V. V., Nikolaev A. A., Rogalyov R. N.* // Phys. Rev. D. 2020. V. 102. 114511.

[104] *Astrakhantsev N., Braguta V. V., Ilgenfritz E. M., Kotov A. Yu., Nikolaev A. A.* // Phys. Rev. D. 2020. V. 102. 074507.

[105] *Braguta V. V., Kotov A. Yu., Kuznedelev D. D., Roenko A. A.* // Phys.Rev. D. 2021. V. 103. 094515.

[106] *Braguta V. V., Kotov A., Roenko A., Sychev D.* // Proc. Sci. 2022. V. 430. P. 190.

результатом является вычисление момента инерции кварк-глюонной плазмы[107, 108]. Результаты показывают, что в определенном диапазоне значений температуры момент инерции отрицателен. Еще одним ярким результатом является обнаружение пространственно-неоднородного фазового перехода конфайнмент/деконфайнмент[109]. Вычисления показывают, что при ненулевой угловой скорости в определенном диапазоне значений температуры возможно появление смешанной фазы, при которой фаза конфайнмента и деконфайнмента пространственно разделены: около оси вращения система находится в фазе деконфайнмента, а на периферии — в фазе конфайнмента. Интересно, что действие ускорения, как установлено В. И. Захаровым, Г. Ю. Прохоровым, О. В. Теряевым, Н. С. Цегельником, Д. А. Шохоновым, возможно, противоположно и способствует адронизации[73].

Методы среднего поля и эффективное квантовое действие КХД

В продолжение более ранних исследований (Г. В. Ефимов и С. Н. Неделько) В. Э. Ворониным и С. Н. Неделько с соавторами сформулирован среднеполевой подход к описанию вакуума КХД и построению квантового эффективного мезонного действия, основанный на статистическом ансамбле почти всюду однородных абелевых (анти)самодуальных глюонных полей[100, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 116].

Расчеты эффективного квантового действия КХД в 1-петлевом приближении (*Leutwyler H.* // Phys. Lett. B. 1980. V. 96; Nucl. Phys. B. 1981. V. 179) и в рамках метода функциональной ренормгруппы (*Eichhorn A., Gies H., Pawlowski J. M.* // Phys. Rev. D. 2011. V. 83), а также моделирование эффективного действия в духе лагранжиана Гинзбурга–Ландау[111, 112] показывают, что почти всюду однородное (анти)самодуальное абелево глюонное поле соответствует глобальному минимуму эффективного квантового действия КХД. Свойства статистического ансамбля средних полей, соответствующих доминирующим флуктуациям глюонных полей в вакууме, и аналитическая структура пропагаторов кварков и глюонов в этом среднем поле обеспечивают закон площадей для петли Вильсона и одновременно конфайнмент

---

[107] *Braguta V. V., Chernodub M. N., Roenko A. A., Sychev D. A.* // Phys. Lett. B. 2024. V. 852. P. 138604.

[108] *Braguta V. V., Chernodub M. N., Kudrov I. E., Roenko A. A., Sychev D. A.* // Phys. Rev. D. 2024. V. 110. 014511.

[109] *Braguta V. V., Chernodub M. N., Roenko A. A.* // Phys. Lett. B. 2024. V. 855. P. 138783.

[110] *Kalloniatis A. C., Nedelko S. N.* // Phys. Rev. D. 2001. 64; Phys. Rev. D. 2004. 69; Phys. Rev. D. 2005. 71; Phys. Rev. D. 2006. 73.

[111] *Galilo B. V., Nedelko S. N.* // Phys. Part. Nucl. Lett. 2011. V. 8. P. 67.

[112] *Nedelko S. N., Voronin V. E.* // Eur. Phys. J. A. 2015. V. 51. P. 4; Phys. Rev. D. 2021. V. 103. 114021.

[113] *Nedelko S. N., Voronin V. E.* // Phys. Rev. D. 2016. V. 93. 094010; Phys. Rev. D. 2017. V. 95. 074038; Phys. Rev. D. 2023. V. 107. 094027.

[114] *Voronin V.* // Phys. Rev. D. 2024. V. 110. 014040.

[115] *Nedelko S. N., Nikolskii A., Voronin V. E.* // J. Phys. G. 2022. V. 49. 035003.

[116] *Nedelko S. N., Nikolskii A.* // Eur. Phys. J. A. 2023. V. 59. P. 4.

динамических кварков и глюонов, а также предопределяют механизм динамического нарушения киральных симметрий $SU_L(N_f)XSU_R(N_f)$ и $U_A(1)$, не порождая сильного CP-нарушения. В этом подходе вакуум действует как среда, в которой инфракрасный режим КХД кардинально модифицирован, волновые моды цветных полей подавлены так, что возбуждения заряженных по цвету полей соответствуют не элементарным частицам, а локализованным во времени и пространстве флуктуациям поля. При этом в режиме больших импульсов в евклидовой кинематике сохраняется стандартная партонная картина: ультрафиолетовый режим КХД средним полем не модифицируется.

Переход от конфайнмированных кварковых и глюонных полей к нейтральным по цвету составным полям, описывающим коллективные возбуждения вакуума, позволил вывести эффективное нелокальное действие для всевозможных мезонных полей, включая радиально и орбитально возбужденные мезоны. Сильное, электромагнитное и слабое взаимодействия мезонов представлены в эффективном действии в терминах явно вычисляемых нелокальных n-точечных вершин взаимодействия.

В рамках этого подхода проведен систематический расчет масс легких, тяжело-легких мезонов и тяжелых кваркониев, включая спектр возбужденных состояний, электромагнитных формфакторов, исследованы сильные и полулептонные распады всевозможных мезонов, поляризуемость псевдоскалярных мезонов и многое другое. В условиях минимального набора параметров (сильная константа связи и массы кварков в инфракрасном пределе, скалярный глюонный конденсат и топологическая восприимчивость вакуума глюодинамики) этот среднеполевой подход с очень хорошей точностью описывает в едином формализме большой круг разнообразных явлений физики адронов от пиона до боттомония без какого-либо изменения формализма, а также и значений параметров, фиксированных по значениям масс базовых мезонов и далее используемых во всех расчетах.

В этом подходе было получено указание на катализирующее влияние электромагнитного поля на деконфайнмент[100, 112]. Показано, что экстремально сильное электромагнитное поле, генерируемое в релятивистских столкновениях тяжелых ионов[98,117], может поляризовать вакуум КХД, локально изменяя характер среднего поля с (анти)самодуального в чисто хромомагнитное, тем самым являясь катализатором деконфайнмента. Явление каталитического влияния магнитного поля на фазовый переход деконфайнмента позже было подтверждено в вычислениях КХД на решетке (*D'Elia M. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2013. V. 110; *Bali G. S. et al.* // JHEP. 2013. V. 1304) и детально изучено при ненулевой барионной плотности[99]. В среднеполевом подходе такой каталитический эффект ведет к присутствию сильных фоновых хромомагнитных полей в кварк-глюонной фазе, что обеспечивает дополнительный механизм рождения прямых фотонов в столкновениях релятивистских тяжелых ионов[116].

[117] *Ivanov Yu. B., Russkikh V. N., Toneev V. D.* // Phys. Rev. C. 2006. V. 73. 044904.

Статистические и транспортные модели адронной материи

Наряду с вычислением уравнения состояния «из первых принципов» в лаборатории разрабатывались феноменологические уравнения состояния плотного и горячего адронного вещества, применяемые при описании столкновений тяжелых ионов и свойств нейтронных звезд. Так, Ю. Б. Ивановым, В. В. Скоковым и В. Д. Тонеевым предложена простая квазичастичная модель, основанная на пертурбативной КХД низшего порядка[118]. В отличие от существующих квазичастичных моделей данная модель сформулирована в динамических, а не термодинамических терминах и легко применима к системе с конечной плотностью барионов. Модель позволяет хорошо воспроизвести данные решеточных вычислений при нулевых и конечных значениях барионного химического потенциала. Полученное кварк-глюонное уравнение состояния, согласованное с реалистичными адронными уравнениями состояния, предсказывает фазовый переход в кварковую фазу при более высоких плотностях, чем те, которые достижимы во внутренних областях нейтронных звезд[119]. В частности, это ставит под сомнение возможность существования гибридных (адрон-кварковых) звезд.

В развитие более ранних работ Д. Н. Воскресенского и Е. Э. Коломейцева предложена релятивистская модель среднего поля, в которой массы адронов и константы связи зависят от скалярного поля. Все массы адронов подвергаются универсальному масштабированию, тогда как константы связи масштабируются по-разному. А. С. Хворостухиным, В. Д. Тонеевым и Д. Н. Воскресенским[120, 121] эта модель была обобщена на конечные температуры, также учтены высоколежащие барионные резонансы и мезонные возбуждения. Для приложений к нейтронным звездам учитывается появление гиперонов и $\Delta(1232)$ барионов во внутренних областях плотных нейтронных звезд[122, 123]. Показано, что эффект уменьшения адронных масс в среде позволяет сконструировать уравнение состояния так, что оно удовлетворяет большинству известных эмпирических ограничений, включая ограничения на давление ядерного вещества, ограничение на максимальную массу нейтронных звезд и ограничения, следующие из динамики охлаждения нейтронных звезд.

В развитие предположения, высказанного Д. Н. Воскресенским[124], что в столкновениях тяжелых ионов возможно образование сверхсильных магнитных полей, в ЛТФ В. Д. Тонеевым, В. В. Скоковым и А. Ю. Илларионовым были выполнены первые детальные расчеты магнитных полей,

---

[118] *Ivanov Yu. B., Skokov V. V., Toneev V. D.* // Phys. Rev. D. 2005. V. 71. 014005.

[119] *Ivanov Yu. B., Khvorostukhin A. S., Kolomeitsev E. E., Skokov V. V., Toneev V. D., Voskresensky D. N.* // Phys. Rev. C. 2005. V. 72. 025804.

[120] *Khvorostukhin A. S., Toneev V. D., Voskresensky D. N.* // Nucl. Phys. A. 2007. V. 791. P. 180–221.

[121] *Khvorostukhin A. S., Toneev V. D., Voskresensky D. N.* // Nucl. Phys. A. 2008. V. 813. P. 313–346.

[122] *Maslov K. A., Kolomeitsev E. E., Voskresensky D. N.* // Phys. Lett. B. 2015. V. 748. P. 369–375.

[123] *Kolomeitsev E. E., Maslov K. A., Voskresensky D. N.* // Nucl. Phys. A. 2017. V. 961. P. 106–141.

[124] *Voskresensky D. N., Anisimov N. Yu.* // Sov. Phys. JETP. V. 51. P. 13–22.

возникающих в ультрарелятивистских столкновениях[98]. Магнитные поля, создаваемые при нецентральных столкновениях тяжелых ионов, вычисленные в рамках микроскопической транспортной модели, оказались по величине равными (0,1–1) $m_{\pi}^2 \sim (0{,}4–4) \cdot 10^{24}$ Гс в диапазоне энергий от SPS до самых высоких, доступных для RHIC. Электрические поля, а также коллективное влияние магнитных и электрических полей на распространение квазичастиц подробно анализировалось в последующих работах В. Д. Тонеева и соавторов[125].

Наряду с микроскопическими транспортными моделями в ЛТФ Ю. Б. Иванов и В. Д. Тонеев разработали трехжидкостную гидродинамическую модель для моделирования релятивистских столкновений тяжелых ионов[117]. Помимо двух богатых барионами жидкостей, эта модель рассматривает также эволюцию третьей, безбарионной (т. е. с нулевым суммарным барионным зарядом) жидкости из вновь образованных частиц. В рамках этой модели был проведен систематический анализ различных наблюдаемых величин при энергии столкновений от 1 до примерно 160 *A* ГэВ для различных уравнений состояния. В частности, доказывается, что начало деконфайнмента, происходящего на стадии сжатия при ядерном столкновении, проявляется как нерегулярность в характеристике остановки барионов в столкновении[126]. Это эффект смягчения (softest point), присущий уравнению состояния с переходом деконфайнмента. Утверждается, что эта нерегулярность является очень устойчивым сигналом фазового перехода первого порядка, который сохраняется и для условий эксперимента NICA MPD. Недавно гидродинамическая модель была дополнена функцией вычисления выхода легких ядер, а также взаимодействием частиц в конечном состоянии, описываемым в рамках модели ультрарелятивистской квантовой молекулярной динамики (UrQMD)[127]. Обновленная модель позволяет получить вполне адекватное воспроизведение данных по основным наблюдаемым величинам легких ядер, особенно их функциональной зависимости от энергии столкновения и массы легкого ядра.

Одним из важнейших открытий эксперимента RHIC является обнаружение существенной поляризации гиперонов, которое может быть связано с завихренностью ядерного вещества, образовавшегося в результате нецентрального столкновения. Оказалось, что это вращение происходит с такой угловой скоростью, что частички плазмы на расстояниях 10–20 фм движутся с существенно релятивистскими скоростями. Очевидно, что такое быстрое вращение может повлиять на свойства КХД. Существует множество теоретических работ, где проведено изучение влияния релятивистского вращения на свойства КХД.

Эффекты вращения изучались К. К. Гудимой, М. И. Базнатом, А. С. Сориным и О. В. Теряевым с использованием кинетических моделей[69, 70],

---

[125] *Voronyuk V., Toneev V. D., Cassing W., Bratkovskaya E. L., Konchakovski V. P., Voloshin S. A.* // Phys. Rev. C. 2011. V. 83. 054911.

[126] *Ivanov Yu. B., Blaschke D.* // Eur. Phys. J. A. 2016. V. 52. P. 237.

[127] *Kozhevnikova M., Ivanov Yu. B.* // Phys. Rev. C. 2023. V. 107. 024903.

в результате чего были обнаружены вихревые слои, открыто и исследовано разделение областей с различной гидродинамической спиральностью, предсказаны и объяснены качественные особенности и количественные характеристики поляризации гиперонов. Вихревые кольца были обнаружены Ю. Б. Ивановым в рамках трехжидкостной гидродинамической модели, в которой были выполнены и расчеты поляризации[128]. Поляризацию, фазовые переходы, транспортные явления во вращающейся адронной и кварк-глюонной материи рассматривали Г. Ю. Прохоров, В. И. Захаров и О. В. Теряев[72,73].

ТЕОРИЯ АТОМНОГО ЯДРА

Ядерная физика фокусируется на изучении структуры и динамики сложных систем частиц, образующих адроны и ядра. Исследования, проводимые сообществом ядерной физики ЛТФ, охватывают большинство современных тем. Цели исследований по теории ядра — разработка новых эффективных методов описания конечных ферми-систем, предсказание интересных эффектов для экспериментального наблюдения и теоретическое обоснование планируемых экспериментов. Многие работы посвящены теории структуры ядра от долины стабильности до границ стабильности и далее. Были предложены новые теоретические методы и модели для описания структуры экзотических и сверхтяжелых ядер, характеристик низколежащих возбуждений и изомерных состояний.

Наиболее перспективными направлениями будущих исследований в области теории ядра являются структура ядра вдали от долины стабильности и явления кластеризации, реакции с тяжелыми ионами и структура сверхтяжелых элементов, динамика резонансных явлений в системах с малым числом тел, релятивистская ядерная динамика и экзотические свойства ядерной материи.

ЯДЕРНАЯ СТРУКТУРА

Работа по изучению структуры ядра в течение последних двух десятилетий велась по нескольким направлениям. Прежде всего происходило дальнейшее развитие квазичастично-фононной модели ядра (КФМЯ), созданной в Лаборатории теоретической физики ОИЯИ проф. В. Г. Соловьевым и его учениками (Л. А. Маловым, В. В. Вороновым, А. И. Вдовиным, Ч. Стояновым) и хорошо зарекомендовавшей себя в исследованиях как низкоэнергетических состояний ядер, так и свойств гигантских резонансов. Природа неожиданно большого числа низколежащих 0^+ уровней в деформированном ^{158}Gd была установлена в рамках КФМЯ[129]. Показано, что значительная доля 0^+ состояний имеет большие двухфононные компонен-

[128] *Ivanov Yu. B., Soldatov A. A.* // Phys. Rev. C. 2018. V. 97. 044915.
[129] *Lo Iudice N., Sushkov A. V., Shirikova N. Yu.* // Phys. Rev. C. 2004. V. 70. P. 064316

ты, в основном построенные из коллективных октупольных фононов, что согласуется с предыдущими предсказаниями модели взаимодействующих бозонов, развиваемой профессором Р. В. Джолосом с коллегами. Полученные результаты указывают на то, что в изотопах Gd можно наблюдать отклонения от правил Алаги для $M1$-переходов из 1^+ состояний на состояния основной полосы[130]. В рамках Q-фононного подхода[131] исследованы свойства низколежащих дипольных состояний в цепочках различных изотопов.

Обобщение КФМЯ было достигнуто за счет использования реалистичных эффективных нуклон-нуклонных взаимодействий в подходе функционала плотности энергии (ФПЭ). Это усилило предсказательную способность модели и обеспечило ее полную самосогласованность. Одновременно на основе анализа тонкой структуры низкоэнергетических спектров возбуждения и гигантских резонансов различные формы и параметризации ФПЭ проверялись на их способность описывать широкий круг экспериментальных данных. Для объяснения и предсказания различных спектральных и β-распадных характеристик сферических нейтронно-избыточных ядер В. В. Воронов и А. П. Северюхин, используя метод сепарабельной аппроксимации, обобщили уравнения КМФЯ, описывающие связь одно- и двухфононных компонент волновой функции на случай эффективного нуклон-нуклонного взаимодействия Скирма[132, 133]. В дальнейшем важный вклад в исследования внесли Н. Н. Арсеньев и И. Н. Борзов. Было показано, что изменение величины эффективной массы нуклона на поверхности ядра и учет тензорной компоненты остаточного нуклон-нуклонного взаимодействия существенным образом улучшают описание скоростей β-распада[134, 135]. Установлено сильное влияние связи с двухфононными компонентами на распределение силы $E1$-переходов в низкоэнергетической области и увеличение ширины пигми-дипольного резонанса в нейтронно-избыточных ядрах[136]. С использованием КФМЯ впервые были рассчитаны характеристики двойного гамма-распада нижайшего квадрупольного состояния в ^{48}Ca, и обнаружено, что ширина гамма-распада чувствительна к силе смешивания простых и сложных конфигураций в области гигантского дипольного резонанса (ГДР)[137].

Увеличение конфигурационного пространства в КФМЯ требует вычисления огромного числа матричных элементов взаимодействия простых и сложных конфигураций. Чтобы обойти эту трудность, предложен общий

---

[130] *Shirikova N. Yu., Sushkov A. V., Jolos R. V.* // Eur. Phys. J. A. 2022. V. 58. P. 98.

[131] *Jolos R. V., Shirikova N. Yu., Voronov V. V.* // Phys. Rev. C. 2004. V. 70. 054303.

[132] *Severyukhin A. P., Stoyanov Ch., Voronov V. V., Van Giai N.* // Phys. Rev. C. 2002. V. 66. 034304.

[133] *Severyukhin A. P., Voronov V. V., Van Giai N.* // Eur. Phys. J. A. 2004. V. 22. P. 397.

[134] *Severyukhin A. P., Margueron J., Borzov I. N., Van Giai N.* // Phys. Rev. C. 2015. V. 91. 034322.

[135] *Severyukhin A. P., Voronov V. V., Borzov I. N., Arsenyev N. N., Van Giai N.* // Phys. Rev. C. 2014. V. 90. 044320.

[136] *Arsenyev N. N., Severyukhin A. P., Voronov V. V., Van Giai N.* // Phys. Rev. C. 2017. V. 95. 054312.

[137] *Severyukhin A. P., Arsenyev N. N., Pietralla N.* // Phys. Rev. C. 2021. V. 104. 024310.

подход к описанию гросс-структуры гигантских резонансов в тяжелых и сверхтяжелых сферических ядрах, основанный на применении для описания связи одно- и двухфононных конфигураций метода случайных матриц. Расчеты на его основе показали, что ангармонические эффекты слабо влияют на ширину ГДР, в то время как при описании ширин изоскалярного гигантского монопольного и квадрупольного резонансов эти эффекты являются определяющими[138]. Кроме того, продемонстрировано, что описание ширины ГДР возможно через эффективный механизм, когда однофононные состояния получены в рамках микроскопического подхода, а двухфононные состояния сгенерированы с помощью гауссовых ортогональных ансамблей[139].

В работах В. О. Нестеренко и его коллег были разработаны полностью самосогласованные методы для описания структуры и динамики сферических и деформированных ядер в рамках квазичастичного приближения хаотических фаз (КПХФ) с силами Скирма. С помощью КПХФ расчетов были выявлены механизмы возникновения тонкой структуры различных резонансов: деформационное расщепление в $E1$-резонансах[140], индуцированная деформацией связь $E2/E0$ в $E0$-резонансах[141], спин-орбитальное расщепление и фрагментация Ландау в $M1$-возбуждениях[142]. Кроме того, были выявлены важные особенности одночастичных спектров в $^{250-262}$No, а также предсказаны новые возбужденные уровни[143]. Важно, что изотопы нобелия предшествуют сверхтяжелым ядрам, и описание их свойств является необходимым проверочным тестом для моделей, претендующих на предсказания в области сверхтяжелых ядер.

Тороидальный дипольный резонанс (ТДР) представляет собой уникальный пример внутреннего вихревого движения электрического типа в атомных ядрах. Фактически данный резонанс является реализацией в ядрах вихря Хилла, хорошо известного в гидродинамике жидкостей и газов. Было показано[144], что ТДР должен существовать во всех ядрах, независимо от их формы и массового числа. ТДР уникален тем, что, будучи вихревым возбуждением, он не дает вклада в уравнение непрерывности, т. е. является представителем крайне малоисследованного вида ядерной динамики. Кроме того, ТДР может быть первопричиной $E1$ пигми-резонанса, важного для астрофизических приложений и построения уравнения состояния. В легких

---

[138] *Severyukhin A. P., Åberg S., Arsenyev N. N., Nazmitdinov R. G.* // Phys. Rev. C. 2017. V. 95. 061305(R).

[139] *Severyukhin A. P., Åberg S., Arsenyev N. N., Nazmitdinov R. G.* // Phys. Rev. C. 2018. V. 98. 044319.

[140] *Kleinig W., Nesterenko V. O., Kvasil J., Reinhard P.-G., Vesely P.* // Phys. Rev. C. 2008. V. 78. 044313.

[141] *Kvasil J., Nesterenko V. O., Repko A., Kleinig W., Reinhard P.-G.* // Phys. Rev. C. 2016. V. 94. 064302.

[142] *Nesterenko V. O., Vishnevskiy P. I., Kvasil J., Repko A., Kleinig W.* // Phys. Rev. C. 2021. V. 103. 064313.

[143] *Nesterenko V. O., Mardyban M. A., Repko A., Jolos R. V., Reinhard P.-G., Dzhioev A. A.* // Phys. Rev. C. 2025. V. 111. 064322.

[144] *Repko A., Reinhard P.-G., Nesterenko V. O., Kvasil J.* // Phys. Rev. C. 2013. V. 87. 024305.

сильно деформированных ядрах типа ^{24}Mg были предсказаны отдельные тороидальные состояния[145]. Уже давно обсуждается проблема однозначной экспериментальной идентификации ТДР. В связи с этим была разработана схема по выявлению ТДР в реакции неупругого рассеяния электронов на большие углы[146].

Успеха в применении метода моментов функции Вигнера (МФВ) к описанию дипольных магнитных возбужденных состояний коллективной природы удалось добиться благодаря учету спиновых степеней свободы нуклонов, что привело к открытию новых типов состояний ножничной моды в деформированных ядрах. В рамках метода МФВ Е. Б. Бальбуцевым и И. В. Молодцовой был разработан способ решения зависящих от времени уравнений Хартри–Фока с учетом спиновых степеней свободы и предсказан новый тип ядерного коллективного движения – «спиновой» ножничной моды[147]. Было сделано обобщение метода МФВ, учитывающее одновременно спиновые и изоспиновые степени свободы ядра и сверхтекучие парные корреляции[148]. Также исследованы «антиферромагнитные» свойства ядер, которые проявляются как отклик динамического среднего поля на внешнее возмущение. Обнаружено, что антиферромагнитные свойства ядер приводят к расщеплению уровней энергии при нулевой деформации (эффект Зеемана)[149].

При изучении коллективных эффектов в редкоземельных ядрах Р. Г. Назмитдиновым с соавторами было обнаружено, что явление бакбендинга проявляется, когда положительная сигнатура γ-колебательных возбуждений исчезает во вращающейся системе отсчета[150]. В результате среднее ядерное поле самопроизвольно нарушает аксиальную симметрию и приводит к возникновению неаксиальности во вращающейся внутренней системе отсчета, что усиливает ножницеобразные $M1$-возбуждения[151].

В последнее десятилетие Х. Г. Ганевым активно развивается новый микроскопико-алгебраический подход, основанный на использовании симплектических динамических групп и спектропорождающих алгебр. В рамках этого подхода были созданы и развиты новые алгебраические модели структуры ядра[152, 153, 154]. С их помощью удалось успешно описать низколе-

---

[145] *Nesterenko V. O., Repko A., Kvasil J., Reinhard P.-G.* // Phys. Rev. Lett. 2018. V. 120. P. 182501.

[146] *Von Neumann-Cosel P., Nesterenko V. O., Brandherm I., Vishnevskiy P. I., Reinhard P.-G., Kvasil J., Matsubara H., Repko A., Richter A., Scheck M., Tamii A.* // Phys. Rev. Lett. 2024. V. 133. P. 232502

[147] *Balbutsev E. B., Molodtsova I. V., Schuck P.* // Nucl. Phys. A. 2011. V. 872. P. 42.

[148] *Balbutsev E. B., Molodtsova I. V., Sushkov A. V., Shirikova N. Yu., Schuck P.* // Phys. Rev. C. 2022. V. 105. 044323.

[149] *Balbutsev E. B., Molodtsova I. V.* // Eur. Phys. J. A. 2023. V. 59. P. 207.

[150] *Kvasil J., Nazmitdinov R. G.* // Phys. Rev. C. 2004. V. 69. 031304(R).

[151] *Kvasil J., Lo Iudice N., Nazmitdinov R. G., Porrino A., Knapp F.* // Phys. Rev. C. 2004. V. 69. 064308.

[152] *Ganev H. G.* // Eur. Phys. J. A. 2014. V. 50. P. 183.

[153] *Ganev H. G.* // Eur. Phys. J. A. 2021. V. 57. P. 181; Chin. Phys. C. 2023. V. 47. P. 104101.

[154] *Ganev H. G.* // Commun. Theor. Phys. 2025. V. 77. 055301; Nucl. Phys. A. 2025. V. 1062. P. 123162.

жащие коллективные состояния основной, β- и γ-полос. Была продемонстрирована возможность описания низколежащих вращательных полос в мультикластерных ядерных системах. В отличие от других феноменологических подходов и стандартной оболочечной модели в развитых алгебраических моделях вероятности $E2$-переходов хорошо описываются без использования эффективных зарядов.

В связи с интенсивными экспериментальными исследованиями сверхтяжелых ядер Р. В. Джолос и Е. А. Колганова с коллегами выполнили ряд пионерских работ по микроскопическому описанию и предсказанию свойств этих ядер. Найдено соотношение между энергией возбуждения и вероятностью $E2$-перехода в первое 2^+-состояние[155]. Были предсказаны энергии нижайших 2^+-состояний в четно-четных сверхтяжелых ядрах. Эти энергии максимальны в изотопах Fl и Og, что указывает на их почти сферическую форму[156].

Была исследована структура оператора кинетической энергии в ядерном коллективном гамильтониане. Члены высшего порядка по коллективному импульсу оказывают значительное влияние на энергии возбуждения и матричные элементы $E2$-переходов[157]. Основываясь на функционале плотности энергии, Л. А. Малов с коллегами предсказали ядро ^{288}Fl как следующее дважды магическое ядро после ^{208}Pb, а ядро ^{304}120 было определено как наиболее вероятный кандидат на следующее дважды магическое ядро[158]. Были проведены систематические расчеты спектров возбуждения, структуры волновых функций и вероятностей γ-перехода в ядрах с нечетным числом протонов с $Z = 97-109$. Показано, что структура низколежащих ядерных состояний в этих ядрах в основном определяется одночастичными компонентами[159]. Спектры возбуждения ядер, принадлежащих к цепочке α-распада ^{288}Mc, были рассчитаны с использованием двух различных одночастичных потенциалов: модифицированного двухцентрового и потенциала на основе функционала Скирма. Помимо $E1$-переходов в ^{276}Mt предсказаны сильные $M1$- и $M2$-переходы[160].

Отклонения моментов инерции от их твердотельных значений были подробно исследованы и получили качественную интерпретацию в рамках квазиклассической теории периодических орбит, которая связывает структуру оболочки с классическими периодическими орбитами в ядерном потенциале[161].

---

[155] *Jolos R. V., Kolganova E. A.* // Phys. Lett. B. 2021. V. 820. P. 136581.

[156] *Shirikova N. Yu., Sushkov A. V., Malov L. A., Kolganova E. A., Jolos R. V.* // Phys. Rev. C. 2022. V. 105. 024309.

[157] *Jolos R. V., Kolganova E. A.* // Phys. Lett. B. 2017. V. 769. P. 368.

[158] *Malov L. A., Adamian G. G., Antonenko N. V., Lenske H.* // Phys. Rev. C. 2021. V. 104. L011304; Phys. Rev. C. 2021. V. 104. 064303.

[159] *Malov L. A., Bezbakh A. N., Adamian G. G., Antonenko N. V., Jolos R. V.* // Phys. Rev. C. 2023. V. 108. 044302.

[160] *Bezbakh A. N., Kartavenko V. G., Adamian G. G., Antonenko N. V., Jolos R. V., Nesterenko V. O.* // Phys. Rev. C. 2015. V. 92. 014329.

[161] *Deleplanque M. A., Frauendorf S., Pashkevich V. V., Chu S. Y., Unzhakova A.* // Phys. Rev. C. 2004. V. 69. 044309.

Расчет времен жизни изомерных состояний до сих пор остается сложной задачей, требующей решения из-за их интенсивного экспериментального изучения. Для тяжелых ядер с числом нейтронов $N = 153$ Т. М. Шнейдманом с коллегами исследовано влияние кориолисова перемешивания на γ-распад одноквазичастичных изомерных состояний. Было показано, что смешивание состояний резко возрастает, если изомерное состояние вплотную приближается к вращательному состоянию с тем же угловым моментом, но построенному на другом квазичастичном состоянии. Объяснено увеличение скорости распада изомерного состояния $K^{\pi} = 7/2^{+}$ в ^{251}Cf на три порядка (по сравнению с распадом аналогичного состояния в ^{249}Cm)[162].

ЯДЕРНАЯ АСТРОФИЗИКА

Работы по исследованию свойств нагретых ядер были в основном сконцентрированы на разработке термодинамически последовательного метода расчета характеристик лептон-ядерных слабых реакций (захват электронов, рассеяние и поглощение нейтрино ядрами и т. п.) в экстремальных астрофизических условиях. А. И. Вдовиным и А. А. Джиоевым был развит статистический метод расчета спектральных плотностей мультипольных операторов слабого нуклонного тока в нагретых ядрах, основанный на формализме супероператоров[163]. Ими было модифицировано стандартное определение фермионных супероператоров, что гарантировало выполнение принципа детального баланса для спектральных плотностей и позволило применить метод уравнений движения для описания возбуждений в нагретых ядрах.

С использованием статистического метода на примере ядер группы железа и нейтронно-избыточных ядер с числом нейтронов $N \approx 50$ было показано, что отказ от использования гипотезы Бринка–Акселя и выполнение принципа детального баланса значительно увеличивают вклад термически возбужденных ядерных состояний в скорости и сечения лептон-ядерных процессов по отношению к предсказаниям оболочечной модели. Это приводит к более быстрому росту сечений с повышением температуры при низких энергиях лептонов, что, в свою очередь, увеличивает скорость нейтронизации звездного вещества и повышает его непрозрачность для нейтрино. Кроме того, вызванное ростом температуры ослабление нуклонных парных корреляций усиливает температурную зависимость энергии и силы гамов-теллеровских переходов $p \to n$ в нейтронно-избыточных ядрах. Показано, что основным механизмом разблокировки низкоэнергетических переходов являются именно тепловые эффекты, а не конфигурационное смешивание, как считалось ранее. Благодаря этому процесс захвата электронов ядрами и нейтронизация вещества звезды не останавливается на нейтронно-избыточных ядрах с $N \approx 50$.

---

[162] *Shneidman T. M., Minkov N., Adamian G. G., Antonenko N. V.* // Phys. Rev. C. 2022. V. 106. 014310.

[163] *Джиоев А. А., Вдовин А. И.* // ЭЧАЯ. 2022. Т. 53. С. 1007; ЭЧАЯ. 2022. Т. 53. С. 1111; ЭЧАЯ. 2022. Т. 53. С. 1281.

Исследование влияния температуры на зарядово-нейтральные нейтрино-ядерные процессы показало, что нагревание ядер приводит к существенному уширению энергетического спектра нейтрино, распространяющихся в звездном веществе. Кроме того, было установлено, что совместный учет ядерного девозбуждения и нейтринных осцилляций значительно усиливает вклад ядерных процессов в формирование потока электронных антинейтрино, возникающего на предсверхновой стадии эволюции звезды. Это, в свою очередь, увеличивает вероятность регистрации таких антинейтрино наземными детекторами[164].

ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ

Г. Г. Адамяном, Н. В. Антоненко и коллегами были предложены новые подходы к описанию ядерных реакций при низких энергиях и ядерных возбуждений[165, 166]. Рассмотрено проявление двойной ядерной системы в структуре ядра и ядерных реакциях[167]. Показано, что гипердеформированные состояния можно рассматривать как резонансные состояния, связанные с образованием двойных ядерных систем в реакциях с тяжелыми ионами[168]. Структура коллективных полос переменной четности в актинидах и ядрах редкоземельных элементов была описана в модели двойной ядерной системы[169]. Модель основана на предположении, что состояния кластерного типа присутствуют с определенной вероятностью в каждом состоянии ядра за счет движения ядерной системы по координате массовой асимметрии. Рассчитанные расщепления по четности и электрические мультипольные переходы хорошо согласуются с экспериментальными данными[170]. Кластерная модель была применена для описания явления распада супердеформированных состояний[171].

Модель двойной ядерной системы была применена для анализа изотопической зависимости сечений образования сверхтяжелых ядер в реакциях холодного и горячего слияния. Для экспериментальных исследований были предложены оптимальные энергии возбуждения и комбинации сталкивающихся ядер. Обнаружено, что использование налетающих ядер с большим

---

[164] *Dzhioev A. A., Yudin A. V., Dunina-Barkovskaya N. V., Vdovin A. I.* // MNRAS. 2024. V. 527. P. 7701.

[165] *Diaz-Torres A., Adamian G. G., Antonenko N. V., Scheid W.* // Phys. Rev. C. 2001. V. 64. 024604.

[166] *Zubov A. S., Adamian G. G., Antonenko N. V., Ivanova S. P., Scheid W.* // Phys. Rev. C. 2002. V. 65. 024308.

[167] *Shneidman T. M., Adamian G. G., Antonenko N. V., Ivanova S. P., Jolos R. V., Scheid W.* // Phys. Rev. C. 2002. V. 65. 064302.

[168] *Adamian G. G., Antonenko N. V., Nenoff N., Scheid W.* // Phys. Rev. C. 2001. V. 64. 014306.

[169] *Shneidman T. M., Adamian G. G., Antonenko N. V., Jolos R. V., Scheid W.* // Phys. Lett. B. 2002. V. 526. P. 322.

[170] *Shneidman T. M., Adamian G. G., Antonenko N. V., Jolos R. V., Scheid W.* // Phys. Rev. C. 2003. V. 67. 014313; Phys. Rev. C. 2004. V. 70. 064318.

[171] *Adamian G. G., Antonenko N. V., Jolos R. V., Palchikov Yu. V., Scheid W.* // Phys. Rev. C. 2004. V. 69. 054310.

числом нейтронов не всегда приводит к увеличению сечения образования ядер с $Z = 110$, 112 и 114 в холодном слиянии[172, 173]. Вероятности выживания возбужденного составного ядра и сечения слияния, рассчитанные в рамках модели двойной ядерной системы, были применены для описания функций возбуждения изотопов No в реакциях ^{48}Ca + ^{204,206,208}Pb и сечений образования сверхтяжелых ядер с $Z > 102$ в реакциях холодного и горячего слияния[174, 175].

Впервые были предсказаны[176, 177] функции возбуждения образования новых наиболее тяжелых изотопов сверхтяжелых ядер в каналах испарения заряженных частиц и нейтронов реакций горячего слияния с ^{48}Ca. Показана возможность прямого получения неизвестных изотопов сверхтяжелых ядер в различных каналах испарения[178]. Сечения образования сверхтяжелых ядер с зарядовыми числами 114–117 были предсказаны[179, 180] в каналах испарения (5–9)*n* реакций полного слияния с ^{48}Ca. Рассчитанные сечения образования ясно указывают на то, что Ds является пограничным ядром между островом стабильности сверхтяжелых ядер и материком ядер с относительно большим количеством нейтронов.

Для исследования различия вероятностей слияния в реакциях холодного и горячего слияния сечение образования ^{277}Cn было рассчитано в реакциях ^{48}Ca + ^{233}U и ^{70}Zn + ^{208}Pb. Найдена сильная корреляция между вероятностью слияния и асимметрией во входном канале реакции. Указано на возможность заполнения промежутка между изотопами сверхтяжелых ядер с $Z = 112$, образующихся в реакциях холодного и горячего слияния[181]. Была получена аналитическая формула для оценки средней кинетической энергии испускаемых частиц в многошаговых процессах испарения[182], которая значительно упрощает расчет сечений образования испарительных остатков.

А. К. Насировым с коллегами исследовалось влияние входного канала на девозбуждение составного ядра в реакциях с различной асимметрией по

---

[172] *Adamian G. G., Antonenko N. V., Scheid W.* // Phys. Rev. C. 2004. V. 69. 011601(R); Phys. Rev. C. 2004. V. 69. 014607; Phys. Rev. C. 2004. V. 69. 044601.

[173] *Adamian G. G., Antonenko N. V.* // Phys. Rev. C. 2005. V. 72. 064617.

[174] *Adamian G. G., Antonenko N. V., Zubov A. S.* // Phys. Rev. C. 2005. V. 71. 034603.

[175] *Zubov A. S., Adamian G. G., Antonenko N. V., Ivanova S. P., Scheid W.* // Eur. Phys. J. A. 2005. V. 23. P. 249.

[176] *Hong J., Adamian G. G., Antonenko N. V.* // Phys. Lett. B. 2017. V. 764. P. 42.

[177] *Hong J., Adamian G. G., Antonenko N. V.* // Phys. Lett. B. 2020. V. 805. P. 135438; *Hong J., Adamian G. G., Antonenko N. V., Jachimowicz P., Kowal M.* // Phys. Lett. B. 2020. V. 809. P. 135760.

[178] *Hong J., Adamian G. G., Antonenko N. V., Jachimowicz P., Kowal M.* // Phys. Rev. C. 2021. V. 103. L041601.

[179] *Adamian G. G., Antonenko N. V.* // Eur. Phys. J. A. 2022. V. 58. P. 111.

[180] *Hong J., Adamian G. G., Antonenko N. V., Jachimowicz P., Kowal M.* // Phys. Rev. C. 2022. V. 108. 014614.

[181] *Hong J., Adamian G. G., Antonenko N. V., Jachimowicz P., Kowal M.* // Eur. Phys. J. A. 2022. V. 58. P. 180.

[182] *Rahmatinejad A., Shneidman T. M., Adamian G. G., Antonenko N. V., Jachimowicz P., Kowal M.* // Phys. Lett. B. 2023. V. 844. P. 138099.

массе и заряду, но приводящих к образованию одного и того же составного ядра ^{220}Th с одинаковой энергией возбуждения. Сильное различие в наблюдаемых сечениях связано с их зависимостью от характеристик входного канала и участвующих парциальных волн[183]. Показано, что резкое уменьшение сечения в реакции ^{54}Cr+^{243}Am по сравнению с реакцией ^{48}Ca+^{243}Am вызвано сильной конкуренцией слияния и квазиделения[184].

Помимо задач, связанных со слиянием тяжелых ядер, интересны реакции, в которых можно получить неизвестные ранее изотопы. Распад двойных ядерных систем из конфигураций, более асимметричных, чем первоначальная, может приводить к образованию неизвестных изотопов тяжелых ядер.

В реакциях ^{48}Ca + ^{238}U, ^{243}Am и $^{244;246;248}$Cm можно получать новые изотопы сверхтяжелых ядер с $Z = 104–108$, которые невозможно получить в реакциях полного слияния. Методы, разработанные в ЛТФ для описания реакций квазиделения из асимметричных конфигураций, пригодны для анализа образования различных экзотических ядер, например, легких ядер с большим числом нейтронов[185, 186]. Предсказаны сечения образования различных нейтроноизбыточных изотопов в реакциях многонуклонных передач со стабильными и радиоактивными пучками[187, 188].

Было показано, что появление некоторых ядер в реакциях слияния невозможно объяснить без учета испускания легких ядер из первичных продуктов. В рамках модели двойной ядерной системы рассчитаны сечения образования испарительных остатков в каналах испускания легких частиц[189]. Массовые и угловые распределения фрагментов квазиделения изучены в реакции ^{78}Kr(10 A МэВ) + ^{40}Ca. Анализ показывает возможность вращения на 180° образовавшейся двойной ядерной системы[190].

Для исследования взаимодействия ядер во входном канале реакций В. В. Саргсяном с коллегами предложен новый метод извлечения вероятностей передачи определенного числа нейтронов из экспериментальных данных о передаче и захвате (слиянии). Для системы ^{40}Ca + ^{96}Zr показана почти экспоненциальная зависимость вероятностей передачи одного и двух нейтронов под обратным углом от минимального расстояния сближения ядер. При энергии, немного меньшей кулоновского барьера, отношение

---

[183] *Mandaglio G., Anastasi A., Curciarello F., Fazio G., Giardina G., Nasirov A. K.* // Phys. Rev. C. 2018. V. 98. 044616.

[184] *Kaumov B. M., Ganiev O. K., Nasirov A. K., Yuldasheva G. A.* // Phys. Rev. C. 2022. V. 105. 014618.

[185] *Penionzhkevich Yu. E., Adamian G. G., Antonenko N. V.* // Phys. Lett. B. 2005. V. 621. P. 119.

[186] *Adamian G. G., Antonenko N. V., Zubov A. S.* // Phys. Rev. C. 2005. V. 71. 034603.

[187] *Myeong-Hwan Mun, Adamian G. G., Antonenko N. V., Yongseok Oh, Youngman Kim* // Phys. Rev. C. 2014. V. 89. 034622.

[188] *Adamian G. G., Antonenko N. V., Diaz-Torres A., Heinz S.* // Eur. Phys. J. A. 2020. V. 56. P. 47.

[189] *Kalandarov Sh. A., Adamian G. G., Antonenko N. V.* // Phys. Rev. C. 2023. V. 108. 054612.

[190] *Nasirov A. K., Kayumov B. M., Ganiev O. K., Yuldasheva G. A.* // Phys. Lett. B. 2023. V. 842. 137976.

вероятностей передачи одного и двух нейтронов становится близким к единице[191].

Для описания ядерных реакций при энергиях ниже кулоновского барьера предложен квантово-диффузионный подход, в котором относительное движение ядер связано с внутренними степенями свободы и рассматривается как открытая квантовая система. Астрофизический S-фактор был проанализирован в рамках этого подхода для реакций, представляющих интерес для астрофизики. S-фактор демонстрирует явный максимум при энергиях столкновения на 20–40 % ниже кулоновского барьера. Предложено аналитическое выражение для предсказания зависимости максимума S-фактора от выбора сталкивающихся ядер. Показано, что при низких энергиях столкновений сильная зависимость S-фактора от $E_{\text{c.m.}}$ приводит к значительному снижению скорости горения звезд[192].

Было обнаружено, что учет недиагональных матричных элементов матрицы связи, которыми обычно пренебрегают в подходах на основе метода связанных каналов, позволяет объяснить трудности, возникающие в различных моделях при интерпретации экспериментальных данных для S-фактора реакции слияния двух ядер[193].

Кластерный подход был использован А. В. Андреевым и Х. Пашкой с коллегами для успешного описания различных характеристик деления. В этом подходе делящееся ядро в момент разрыва рассматривается как двойная ядерная система. Показано, что бимодальность или мультимодальность деления может быть связана с вариациями распределения заряда и массы в небольшом интервале зарядовых и массовых чисел[194]. На основе расчетов потенциальной энергии тройных систем в момент разрыва и статистического анализа была предложена модель тройного деления[195]. Формирование тройной системы рассматривалось как второй этап после образования двойной системы путем выделения одной или нескольких α-частиц и нейтронов из одного или обоих фрагментов в области их взаимодействия. Были рассчитаны массовые распределения для вынужденного деления четных изотопов ртути с массовыми числами от $A = 174$ до 196. С увеличением A распределение продуктов по массе меняется от симметричного для ^{174}Hg к асимметричному для изотопов, близких к ^{180}Hg, и обратно к более симметричному для ^{192,194,196}Hg. В ^{180,184}Hg распределение осколков деления по массе остается асимметричным даже при высоких энергиях возбуждения[196].

---

[191] *Scamps G., Sargsyan V. V., Adamian G. G., Antonenko N. V., Lacroix D.* // Phys. Rev. C. 2016. V. 94. 064606.

[192] *Sargsyan V. V., Adamian G. G., Antonenko N. V., Lenske H.* // Phys. Lett. B. 2022. V. 824. P. 136792.

[193] *Wen P. W., Lin C. L., Nazmitdinov R. G., Vinitsky S. I., Chuluunbaatar O., Gusev A. A., Nasirov A. K., Jia H. M., Gózdz A.* // Phys. Rev. C. 2021. V. 103. 054601.

[194] *Andreev A. V., Adamian G. G., Antonenko N. V., Ivanova S. P.* // Eur. Phys. J. A. 2005. V. 26. P. 327.

[195] *Andreev A. V., Adamian G. G., Antonenko N. V., Kuklin S. N., Ivanova S. P., Scheid W.* // Eur. Phys. J. A. 2006. V. 30. P. 579.

[196] *Andreev A. V., Adamian G. G., Antonenko N. V., Andreyev A. N.* // Phys. Rev. C. 2013. V. 88. 047604.

Было предсказано изменение формы массового/зарядового распределения с увеличением энергии возбуждения[197]. Исследовано сосуществование симметричного массового распределения и асимметричного зарядового распределения осколков деления[198], и показано, что среднее число нейтронов на протон в осколках деления неодинаково и не равно таковому в делящемся ядре[199].

Для расчетов сечений образований сверхтяжелых ядер необходимо знать вероятность выживания возбужденного составного ядра по отношению к делению. Конкуренция каналов, связанных с испарением частиц и делением, определяется соответствующими энергетическими порогами и плотностями уровней. А. Рахматинеджад с коллегами рассчитали плотности ядерных уровней в изотопных цепочках сверхтяжелых ядер с $Z = 112–120$, а также в их остатках после испускания нейтронов, протонов и α-частиц. Изучено влияние оболочечных эффектов на энергетическую зависимость отношений параметров плотности уровней в различных каналах[200].

Кластерный подход оказался полезным при описании спонтанного деления, которое, как предполагается, происходит через кластерные состояния. Расчеты И. С. Рогова с коллегами продемонстрировали прекрасное описание периодов полураспада кластерного распада и спонтанного деления[201]. Некоторые предсказания для сверхтяжелых ядер были подтверждены экспериментально. Определена зависимость коэффициента запрета от спина родительского ядра, и предложена аналитическая формула для приближенной оценки коэффициента запрета для спонтанного деления нечетного ядра[202].

ГАЛО-ЯДРА

Изучение гало-ядер привлекает большое внимание, поскольку считается, что гало-ядра имеют компактное ядро и несколько валентных нуклонов, его окружающих. Характерные особенности, демонстрируемые этими ядрами, включают слабую энергию связи валентных нуклонов, узкие распределения импульсов продуктов реакции из-за фрагментации и аномально большое сечение взаимодействия. Смешение связанных или связанных и несвязанных уровней становится особенно важным при исследовании ядер с гало[203].

---

[197] *Pasca H., Andreev A. V., Adamian G. G., Antonenko N. V.* // Phys. Rev. C. 2019. V. 99. 064611.

[198] *Pasca H., Andreev A. V., Adamian G. G., Antonenko N. V.* // Phys. Rev. C. 2020. V. 101. 064604.

[199] *Pasca H., Andreev A. V., Adamian G. G., Antonenko N. V.* // Phys. Rev. C. 2023. V. 107. 024603.

[200] *Rahmatinejad A., Shneidman T. M., Adamian G. G., Antonenko N. V., Jachimowicz P., Kowal M.* // Phys. Rev. C. 2022. V. 105. 044328.

[201] *Rogov I. S., Adamian G. G., Antonenko N. V.* // Phys. Rev. C. 2019. V. 100. 024606.

[202] *Rogov I. S., Adamian G. G., Antonenko N. V.* // Phys. Rev. C. 2022. V. 105. 034619.

[203] *von Brentano P., Jolos R. V., Weidenmüller H. A.* // Phys. Lett. B. 2002. V. 534. P. 63.

С. Н. Ершовым с соавторами была разработана микроскопическая четырехчастичная теория для реакций распада двухнейтронного гало. Продемонстрирована важность учета как упругой, так и неупругой фрагментации, приводящей к низколежащим возбуждениям гало. Расчеты неупругого рассеяния[204, 205] показали накопление дипольных и монопольных возбуждений ^{11}Li вблизи порога трех тел и хорошо описали наблюдаемый пик в экспериментальном энергетическом спектре ^{11}Li. Была предложена теория рассеяния электронов на ядрах борромеевского двухнейтронного гало с полным учетом взаимодействий в конечных состояниях[206]. Изучены свойства, геометрия и структура[207] континуума основного состояния, и предсказана мягкая дипольная мода в ^{22}C.

Д. Валиолдой с соавторами предложен квантово-классический метод исследования распада гало-ядер. Впервые в таком подходе были рассчитаны сечения распада ^{11}Be на Pb при энергиях до 5 МэВ/нуклон, включая низколежащие резонансы[208].

С. А. Ракитянским и С. Н. Ершовым было обнаружено, что дальнодействующие ($\sim 1/r^2$) хвосты потенциала и кулоновский потенциал ($1/r$) вызывают необычное поведение полюсов S-матрицы. Кулоновский хвост не только меняет топологию римановой поверхности энергии, но и разрушает так называемую зеркальную симметрию полюсов как в одноканальной, так и в двухканальной задачах[209]. В. К. Лукьяновым с соавторами проведен теоретический анализ упругого рассеяния и импульсных распределений кластеров в реакциях распада экзотических гало-ядер. Установлена решающая роль периферии этих ядер для их рассеяния и распада на кластеры[210].

ТЕОРИЯ МАЛОЧАСТИЧНЫХ СИСТЕМ

Теория малочастичных систем занимается квантовыми системами, которые можно рассматривать как состоящие из нескольких (скажем, двух, трех или четырех) частиц. В зависимости от конкретной ситуации и рассматриваемого диапазона значений энергий роль таких частиц могут играть кварки, мезоны, отдельные нуклоны, ядра или даже атомы и молекулы. Малость числа элементарных составляющих в системе позволяет создавать и развивать математически строгие и точные методы ее исследования, не тре-

---

[204] *Ershov S. N., Danilin B. V., Vaagen J. S.* // Phys. Rev. C. 2001. V. 64. 064609.

[205] *Ershov S. N., Danilin B. V., Vaagen J. S., Korsheninnikov A. A., Thompson I. J.* // Phys. Rev. C. 2004. V. 70. 054608.

[206] *Ershov S. N., Danilin B. V., Vaagen J. S.* // Phys. Rev. C. 2005. V. 72. 044606; 2006. V. 74. 014603.

[207] *Shulgina N. B., Ershov S. N., Vaagen J. S., Zhukov M. V.* // Phys. Rev. C. 2018. V. 97. 064307.

[208] *Valiolda D., Janseitov D., Melezhik V. S.* // Eur. Phys. J. A. 2022. V. 58. P. 34.

[209] *Ershov S. N., Rakityansky S. A.* // Phys. Rev. C. 2021. V. 103. 024612.

[210] *Lukyanov V. K., Kadrev D. N., Zemlyanaya E. V., Lukyanov K. V., Antonov A. N., Gaidarov M. K.* // Phys. Rev. C. 2019. V. 100. 034602.

бующие дальнейших физических приближений. Благодаря своей универсальности подходы, основанные на теории малочастичных систем, носят междисциплинарный характер, открывая путь к решению различных задач в ядерной физике, физике атомов и молекул, квантовой химии и т. д.

Список результатов ЛТФ по малочастичной тематике в XXI в. открывает решение В. В. Пупышевым дифференциальных уравнений Фаддеева, отвечающее коллапсу системы трех тождественных бозонов, потенциалы взимодействия между которыми пропорциональны обратному квадрату межчастичного расстояния[211]. Была предложена процедура экстраполяции триплетных фаз протон-протонного рассеяния в область очень низких энергий[212]. Изучалось двумерное рассеяние квантовой частицы в поле центрального дальнодействующего потенциала, убывающего при больших расстояниях r как степенная функция $r^{-\beta}$ с показателем $\beta > 2$. При этом были установлены явные низкоэнергетические формы для всех парциальных фаз рассеяния[213].

При численном исследовании фоторождения h-мезонов на дейтроне на основании формализма Альта–Грассбергера–Зандхаса при различных параметрах hN-взаимодействия были выявлены пики в зависимости полного сечения фоторождения h-мезонов от энергии[214].

На основе кинематического описания системы трех невзаимодействующих частиц в гиперсферических координатах были получены две новые бесконечные серии матричных тождеств, связывающих углы треугольника, образуемого частицами, массы частиц и внутренние гиперсферические углы[215].

Разработаны новые алгоритмы явного построения многоканальных квантово-механических гамильтонианов с заданными спектральными свойствами[216]. При изучении трехбозонных систем с $r_0/a_0 \ll 1$ была применена модель двухполюсной парной Т-матрицы[217]. Положение второго полюса на нефизическом листе рассматривалось как параметр интегрального уравнения Фаддеева. Были предсказаны значения ранее не вычислявшихся параметров взаимодействий в системе трех бозонов.

Были выполнены квантово-механические расчеты парциальных сечений, приводящих к различным конечным состояниям атома антипротонного гелия[218]. Для четырехчастичной волновой функции рассеяния, отвечающей начальному состоянию, а также для волновой функции антипротонного гелия, возникающей в конечном состоянии, использовались адиабатические приближения.

---

[211] *Pupyshev V. V.* // J. Phys. A. 2003. V. 36. P. L13.

[212] *Pupyshev V. V.* // JETP. 2003. V. 97. P. 1093.

[213] *Pupyshev V. V.* // Theor. Math. Phys. 2021. V. 207. P. 459.

[214] *Shevchenko N. V., Belyaev V. B., Rakityansky S. A., Sofianos S. A., Sandhas W.* // Nucl. Phys. A. 2001. V. 689. P. 383.

[215] *Matveenko. V., Czerwonko J.* // J. Phys. A. 2001. V. 34. P. 9057.

[216] *Chabanov V. M., Zakhariev B. N., Amirkhanov I. V.* // Ann. Phys. 2000. V. 285. P. 1.

[217] *Pen'kov F. M.* // JETP. 2003. V. 97. P. 485.

[218] *Revai J., Shevchenko N.* // Eur. Phys. J. D. 2006. V. 37. P. 83.

Е. А. Колгановой и А. К. Мотовиловым с соавторами[219, 220] были рассчитаны связанные состояния системы $^4He_3$ и ультрахолодное рассеяние атома ^4He на димере $^4He_2$. В качестве основы для этих расчетов послужила версия дифференциальных уравнений Фаддеева, отвечающая модели твердого кора. Использованный метод, в отличие от некоторых других конкурирующих подходов, является точным и идеально подходит для расчетов в трехатомных системах, где двухчастичные взаимодействия имеют сильную отталкивательную составляющую на малых расстояниях между атомами. Были также рассчитаны[221] фазовые сдвиги и длина рассеяния $^3He–^4He_2$. Показано, что возбужденное состояние тримера $^4He_3$ имеет ефимовскую природу. Для того чтобы получить в системе $^4He_3$ полномасштабный эффект Ефимова[222], достаточно ослабить межатомный потенциал He–He примерно на 3 %. Впервые рассчитаны энергии связи систем $^6Li–He_2$ и $^7Li–He_2$, а также длина рассеяния атома ^4He на димере $^4He^7Li$. Было показано, что возбужденные состояния в обеих системах имеют ефимовскую природу[223].

Изучена трехчастичная динамика в ультрахолодных бинарных смесях ферми- и ферми-бозе-частиц. В этой динамике установлено существование универсальных свойств. Открыт новый класс универсальных связанных состояний (ныне называемых состояниями Картавцева–Малых или тримерами Картавцева–Малых)[224]. Установлено условие на отношение масс частиц разных типов, гарантирующее несвязывание трехчастичной системы[225].

Исследован эффект возмущения спектральной полосы решеточной квантовой системы близколежащим резонансом. Рассматривалась довольно общая модель гамильтониана, состоящего из «ядерной» части, «молекулярной» части с собственными значениями, вложенными в непрерывный спектр ядерной части, и оператора слабой связи между каналами, превращающего эти невозбужденные собственные значения в молекулярные резонансы. Если и сам ядерный канал имеет узкий резонанс с положением, близким к молекулярной энергии, то ширина результирующего молекулярного резонанса оказывается обратно пропорциональной ядерной ширине[226]. Исследована эволюция (возможно, бесконечномерного) подпространства состояний квантовой системы, эволюционирующих согласно нестационарному уравнению Шрёдингера. На основе концепции максимального угла между подпространствами получено несколько оптимальных оценок скоростей этой эволюции. Одна из этих оценок может рассматриваться как естественное обобщение оценки Мандельштама–Тамма на

---

[219] *Motovilov A. K., Sandhas W., Sofianos S. A., Kolganova E. A.* // Eur. Phys. J. D. 2001. V. 13. P. 33.

[220] *Motovilov A. K., Sandhas W., Sofianos S. A., Kolganova E. A.* // Nucl. Phys. A. 2001. V. 684. P. 646.

[221] *Kolganova E. A., Motovilov A. K., Sandhas W.* // Phys. Rev. A. 2004. V. 70. 052711.

[222] *Kolganova E. A., Motovilov A. K., Sandhas W.* // Few-Body Syst. 2006. V. 38. P. 205.

[223] *Kolganova E. A.* // Few-Body Syst. 2017. V. 57. P. 58.

[224] *Kartavtsev O. I., Malykh A. V.* // J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 2007. V. 40. P. 1429.

[225] *Kartavtsev O. I., Malykh A. V.* // Eur. Phys. J. Plus. 2023. V. 138. P. 147.

[226] *Motovilov A. K., Sandhas W., Belyaev V. B.* // J. Math. Phys. 2001. V. 42. P. 2490.

случай квантовых подпространств[227]. Совершенно новая точная оценка вариации спектрального подпространства эрмитового оператора (априорная tg Θ теорема) под действием внедиагональных возмущений была найдена и доказана[228, 229]. Исследовано распределение связанных состояний системы двух тождественных бесспиновых фермионов на двумерной решетке в предположении, что эти фермионы взаимодействуют друг с другом, находясь лишь в соседних и следующих непосредственно за соседними узлах решетки[230].

Е. А. Соловьевым с соавторами разработана концепция динамических адиабатических состояний для описания столкновений одноэлектронных атомов и ионов. Соответствующие динамические адиабатические потенциальные кривые исследованы для всего диапазона межъядерных расстояний[231]. Впервые развит динамический подход для расчета перезарядки при столкновении $H^+ + He^+(1s)$ в широком диапазоне значений энергии вплоть до максимума сечения[232].

Новый подход к исследованию системы трех заряженных частиц в континууме был использован для изучения ряда трехчастичных реакций, представляющих астрофизический интерес[233]. Предложенная схема применима к тем трехчастичным системам, в которых две частицы имеют массу, существенно превышающую массу третьей частицы. Разработан зависящий от времени сеточный метод для численного исследования динамики малочастичных систем без использования обычных парциальных разложений[234]. Подход имеет особое преимущество для процессов развала: для времязависимой малочастичной волновой функции не требуется постановка асимптотических краевых условий, включающих канал распада[235, 236, 237]. Обнаружено, что атом-атомное взаимодействие или рассеяние электрона на фиксированной примеси может быть фактически выключено с помощью геометрического конфайнмента. Этот эффект полезен для повышения чувствительности управляемых атомных интерферометров, для управления свойствами квазиодномерных квантовых газов и улучшения охлаждения микроэлектронных устройств[238].

В. С. Мележиком с соавторами разработан непертурбативный подход к расчету столкновений частиц в случае анизотропных взаимодействий в квазиодномерных геометриях, для того чтобы обойти ограничения псевдопотенциальной теории и точно учесть дальнодействующие анизотропные

---

[227] *Albeverio S., Motovilov A. K.* // J. Phys. A. 2022. V. 55. P. 235203.
[228] *Motovilov A. K., Selin A. V.* // Int. Equ. Oper. Theory. 2006. V. 56. P. 511.
[229] *Albeverio S., Motovilov A. K.* // Int. Equ. Oper. Theory. 2012. V. 73. P. 413.
[230] *Lakaev S. N., Motovilov A. K., Abdukhakimov S. Kh.* // J. Phys. A. 2023. V. 56. P. 315202.
[231] *Grozdanov T. P., Solov'ev E. A.* // Phys. Rev. A. 2013. V. 88. 022707.
[232] *Grozdanov T. P., Solov'ev E. A.* // Eur. Phys. J. D. 2018. V. 72. P. 64.
[233] *Belyaev V. B., Levin S. B., Yakovlev S. L.* // J. Phys. B. 2004. V. 37. P. 1369.
[234] *Melezhik V. S., Schmelcher P.* // Phys. Rev. Lett. 2000. V. 84. P. 1870.
[235] *Capel P., Baye D., Melezhik V. S.* // Phys. Rev. C. 2003. V. 68. 014612.
[236] *Capel P., Baye D., Melezhik V. S.* // Phys. Lett. B. 2003. V. 552. P. 145.
[237] *Melezhik V. S., Cohen J. S., Chi-Yu Hu* // Phys. Rev. A. 2004. V. 69. 032709.
[238] *Kim J. I., Melezhik V. S., Schmelcher P.* // Phys. Rev. Lett. 2006. V. 97. P. 193203.

взаимодействия[239]. Вычислены скорости туннелирования двух взаимодействующих ультрахолодных атомов, помещенных в ангармоническую ловушку. Установлено, что единственный возможный сценарий туннелирования — поочередное туннелирование атомов[240]. Предложен новый эффективный метод симпатического охлаждения ионов: для этой цели следует использовать холодные буферные атомы при энергиях вблизи атомно-ионного резонанса, порождаемого конфайнментом[241]. Установлено, что микродвижение иона не препятствует возникновению резонанса, положение которого может управляться радиочастотными полями. Это обстоятельство предоставляет дополнительные возможности для тонкой настройки атомно-ионных взаимодействий в малых пространственных размерностях[242].

Проведен расчет нижайших состояний 0^+ в ядре ^{12}C с целью установления роли трехчастичных сил в α-кластерной модели. Ядро ^{12}C рассматривалось как система, составленная из трех α-частиц[243].

В мезонно-обменной динамической модели для большинства существующих данных по электромагнитному рождению пиона вплоть до области второго резонанса С. С. Камаловым с соавторами хорошо описаны данные по фото- и электророждению π^0 вблизи порога[244, 245]. Мезонно-обменная модель системы πN в канале $S11$ расширена до 2 ГэВ путем явного включения в нее набора $S11$-резонансов. Расчеты на ее основе указывают на наличие третьего и четвертого $S11$-резонанса с массами (1846 $\pm$ 47) и (2113 $\pm$ 70) МэВ соответственно[246].

В. Н. Кондратьевым исследовано влияние сильного магнитного поля на синтез химических элементов в условиях ядерного статистического равновесия. Показано, что для нуклидов группы железа магнитная модификация ядерной структуры сдвигает максимум массы продуктов нуклеосинтеза в сторону меньших массовых чисел, приближающихся к массе титана[247].

РЕЛЯТИВИСТСКАЯ ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

Изучение распадов нуклонных резонансов на нуклон и ω-мезон тесно связано с проблемой оценки изменения свойств векторного мезона в среде для экспериментов в Национальной ускорительной лаборатории им. Т. Джефферсона (Ньюпорт-Ньюс, США), ELSA-SAPHIR в Бонне (Германия), GRAAL в Гренобле (Франция) и LEPS в SPring-8 (Хёго, Япония).

---

[239] *Giannakeas P., Melezhik V. S., Schmelcher P.* // Phys. Rev. Lett. 2013. V. 111. P. 183201.

[240] *Ishmukhamedov I. S., Melezhik V. S.* // Phys. Rev. A. 2017. V. 95. 062701.

[241] *Melezhik V. S.* // Phys. Rev. A. 2021. V. 103. 053109.

[242] *Melezhik V. S., Idziaszek Z., Negretti A.* // Phys. Rev. A. 2019. V. 100. 063406.

[243] *Fedotov S. I., Kartavtsev O. I., Malykh A. V.* // Eur. Phys. J. A. 2005. V. 26. P. 201.

[244] *Kamalov S. S., Chen G. Y., Yang S. N., Drechsel D., Tiator L.* // Phys. Lett. B. 2001. V. 522. P. 27.

[245] *Kamalov S. S., Tiator L., Drechsel D., Arndt R. A., Bennhold C., Strakovsky I. I., Workman R. L.* // Phys. Rev. C. 2002. V. 66. 065206.

[246] *Chen G.-Y., Kamalov S. S., Yang S. N., Drechsel D., Tiator L.* // Nucl. Phys. A. 2003. V. 721. P. 401.

[247] *Kondratyev V. N.* // Eur. Phys. J. A. 2014. V. 50. P. 7.

А. И. Титовым с соавторами рассмотрено электромагнитное рождение векторных мезонов в рамках эффективного лагранжева подхода и модели векторной доминантности с учетом резонансов $F15(1680)$ и $D13(1520)$. Были получены одно- и двукратные поляризационные характеристики, асимметрии несохранения четности[248, 249], которые рассматривались для определения константы связи обмена π-мезонов при высоких энергиях. Указано на возможное образование Θ^+, проявляющееся отчетливым пиком в распределении недостающей массы[250, 251]. Впервые был проведен сравнительный анализ длины рассеяния векторных мезонных (ω, φ, J/ψ)-протонных взаимодействий. Обнаружена нетривиальная экспоненциально сильная зависимость длины рассеяния от кваркового состава взаимодействующих адронов[252].

Важная задача в современных и будущих экспериментах по столкновению тяжелых ионов (RHIC, NICA) – понять природу фазовых переходов в горячей и плотной ядерной материи. Эти переходы рассмотрены в рамках эффективной модели Намбу–Иона-Лазинио с петлей Полякова, одной из немногих, в которой описываются свойства кирального фазового перехода и перехода конфайнмент–деконфайнмент. Также эта модель дает схематическое описание кирального фазового перехода и свойств мезонов при конечных температуре и плотности. В. Д. Тонеевым, Ю. Л. Калиновским и А. В. Фризен исследовано влияние мезонных корреляций на термодинамические свойства системы кварк–мезон[253]. Было показано, что расщепление мультиплетной массы положительных и отрицательных мезонов в плотной материи отвечает за различное поведение отношений K^+/π^+ и K^-/π^-, а структура «пика» была интерпретирована как последовательность эффекта восстановления киральной симметрии и последующего эффекта деконфайнмента[254].

Распределение степенного закона Цаллиса очень хорошо описывает экспериментальные данные как в физике высоких энергий (LHC и RHIC), так и в астрофизике. А. С. Парваном показано, что статистика Цаллиса в большом каноническом ансамбле удовлетворяет требованиям равновесной термодинамики в термодинамическом пределе, если термодинамический потенциал является однородной функцией первого порядка по экстенсивным переменным состояния системы, а энтропийная переменная — это экстенсивная переменная состояния[255]. Исследована корректность формализмов Планка и Отта релятивистской термодинамики движущегося тела. В случае, когда импульс является независимой переменной в гамильтониане, преобразования Лоренца термодинамических величин принад-

---

[248] *Titov A. I., Lee T.-S. H.* // Phys. Rev. C. 2002. V. 66. 015204.
[249] *Fujiwara M., Titov A. I.* // Phys. Rev. C. 2004. V. 69. 065503.
[250] *Titov A. I., Kämpfer B., Daté S., Ohashi Y.* // Phys. Rev. C. 2005. V. 72. 035206.
[251] *Titov A. I., Kämpfer B., Daté S., Ohashi Y.* // Phys. Rev. C. 2006. V. 74. 055206.
[252] *Strakovsky I., Pentchev L., Titov A. I.* // Phys. Rev. C. 2020. V. 101. 045201.
[253] *Kalinovsky Yu. L., Toneev V. D., Friesen A. V.* // Phys. Usp. 2016. V. 59. P. 367.
[254] *Friesen A. V., Kalinovsky Yu. L., Toneev V. D.* // Phys. Rev. C. 2019. V. 99. 045201.
[255] *Parvan A. S.* // Eur. Phys. J. A. 2015. V. 51. P. 108.

лежат формализму Планка. Более того, в описании Планка первый закон термодинамики ковариантен и при преобразовании Лежандра лагранжиан сохраняется. Однако в описании Отта первый закон термодинамики не ковариантен. Таким образом, только формулировка Планка релятивистской термодинамики движущегося тела является правильно определенной, а формализм Отта следует отбросить[256].

Поиск проявления эффекта прозрачности цвета начался около четырех десятилетий назад. А. Б. Ларионовым изучены возможные проявления этого эффекта в реакции жесткого выбивания протона протоном из дейтрона $d(p,pp)n$ при релятивистских энергиях, где падающий протон и оба исходящих протона быстры и могут испытывать мягкое упругое перерассеяние медленным нейтроном. Расчеты выполняются в рамках обобщенного эйконального приближения, дополненного квантовой диффузионной моделью. Ядерная прозрачность и тензорная анализирующая способность дейтрона рассчитаны в диапазоне импульса падающего протона 6–75 ГэВ/c. Дана оценка частоты событий для NICA[257].

Текущие и будущие эксперименты по упругому рассеянию электронов на малонуклонных системах (D, ^{3}He, T) проводятся при больших квадратах переданных импульсов, что требует применения релятивистских методов исследования. С. Г. Бондаренко, В. В. Буровым и С. А. Юрьевым уравнение Бете–Солпитера–Фаддеева было решено для мультирангового сепарабельного ядра нуклон-нуклонного взаимодействия. Полученные ковариантные амплитуды $3N$ систем использовались для расчета электромагнитных формфакторов трехнуклонных систем. Впервые были исследованы релятивистские поправки, вклад которых оказался значительным при больших переданных импульсах[258, 259].

Релятивистское рассмотрение дейтрона в формализме Бете–Солпитера для мезон-нуклонного ядра взаимодействия было выполнено Л. П. Каптарем с соавторами. Оно позволяет проанализировать релятивистские эффекты в реакциях с дейтроном. Проведены расчеты для реакций $pd \to d\varphi p$ (эксперимент на COSY)[260], $pD \to (pp)n$ с быстрой[261] прямой парой pp, эксклюзивной реакции зарядового обмена[262] $pD \to n(pp)$.

Описание мезонов как связанных состояний кварк–антикварк в рамках уравнения Бете–Солпитера с зависящими от импульса массовыми функциями кварков, определяемыми уравнением Дайсона–Швингера, способно успешно объяснить многие спектроскопические данные, такие как массы мезонов, электромагнитные свойства псевдоскалярных мезонов и их радиальные возбуждения и другие наблюдаемые величины. Предложено использовать строгие математические методы нахождения точного

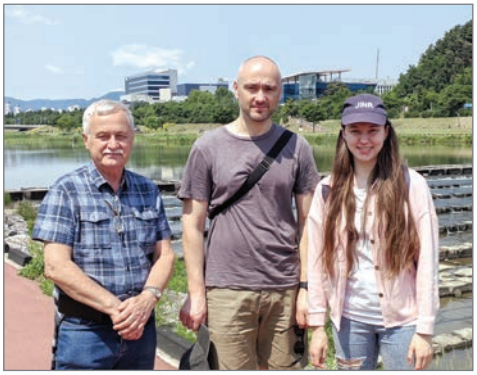
---

[256] *Parvan A. S.* // Ann. Phys. 2019. V. 401. P. 130.
[257] *Larionov A. B.* // Phys. Rev. C. 2023. V. 107. 014605.
[258] *Bondarenko S. G., Burov V. V., Yurev S. A.* // Nucl. Phys. A. 2020. V. 1004. P. 122065.
[259] *Bondarenko S., Burov V., Yurev S.* // Nucl. Phys. A. 2021. V. 1014. P. 122251.
[260] *Kaptari L. P., Kampfer B., Semikh S. S.* // J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 2004. V. 30. P. 1115.
[261] *Kaptari L. P., Kampfer B., Semikh S. S., Dorkin S. M.* // Eur. Phys. J. A. 2004. V. 19. P. 301.
[262] *Kaptari L. P., Kampfer B., Semikh S. S., Dorkin S. M.* // Eur. Phys. J. A. 2003. V. 17. P. 119.

Сектор №1 научного отдела теории атомного ядра ЛТФ

Гельмгольцевская международная летняя школа «Теория ядра и астрофизические приложения». Дубна, 2005 г.

Т. М. Шнейдман, А. И. Вдовин



В. О. Нестеренко, Н. Н. Арсеньев, М. А. Мардыбан

Х.-К. Жанг (КНР), А. К. Насиров

А. И. Вдовин, А. П. Северюхин

С. А. Ракитянский, А. К. Мотовилов

А. Рахматинеджад, А. В. Андреев

А. А. Коробицин, Е. А. Колганова, С. И. Виницкий, В. В. Пупышев

13-е рабочее совещание ЛТФ ОИЯИ — ИТФ КАН по физике сильно взаимодействующих систем. Алматы (Казахстан), 2025 г.

Р. В. Джолос, Н. В. Антоненко, В. В. Воронов

В. К. Лукьянов, В. А. Матвеев

Е. А. Соловьев, А. А. Коробицин, П. М. Красовицкий, Е. А. Коваль, Е. А. Колганова, Д. Джансейтов, Е. В. Мардыбан, В. С. Мележик

В. В. Буров

В. М. С. Хаммуда, Г. Г. Адамян

Н. К. Скобелев, С. Н. Ершов, Л. А. Малов

положения полюсов и соответствующих вычетов при решении уравнения Бете–Солпитера для мезонов при наличии особенностей[263]. С набором параметров, который обеспечивает хорошее описание данных решетки в рамках подхода Дайсона–Швингера, решения уравнения Бете–Солпитера для псевдоскалярных глюболов демонстрируют богатый спектр масс, который включает основные и возбужденные состояния, предсказанные расчетами на решетке. Полученный спектр масс содержит также несколько промежуточных возбуждений[264].

В. Д. Тонеевым с соавторами проведены исследования глобальных эффектов рождения странных частиц в горячей и плотной ядерной материи в рамках коллективного термодинамического подхода. Обсуждались последствия разделения странности (эффект дистилляции странности) и смягчения[265]. Предложена гибридная модель для описания столкновений релятивистских тяжелых ионов[266]. Ранняя стадия взаимодействия, ответственная за создание энтропии, рассчитывается в рамках транспортной модели кварк-глюонной струны, приводящей к начальному состоянию. Переход к последующему изоэнтропическому расширению происходит с точным учетом всех законов сохранения. К этой стадии расширения применяется релятивистская трехмерная гидродинамика состояния. Модель воспроизводит глобальные характеристики ядерных взаимодействий в широком диапазоне значений энергии столкновения.

Магнитные поля, созданные при нецентральном столкновении тяжелых ионов, изучались в рамках модели ультрарелятивистской квантовой молекулярной динамики. Моделирование проводилось для различных параметров удара в диапазоне значений энергии SPS ($E_{\text{lab}} = 10–158\ A$ ГэВ) и для самых высоких энергий, доступных на RHIC[267]. Показано, что созданное магнитное поле сильно неоднородно, но в центральной области перекрывающихся ядер оно относительно слабо меняется в поперечном направлении. Электромагнитные поля, созданные при столкновениях тяжелых ионов, слабо влияют на разделение электрического заряда относительно плоскости реакции[268].

ИССЛЕДОВАНИЯ В СМЕЖНЫХ ОБЛАСТЯХ

Планируемые эксперименты LUXE в DESY (Германия) и E-320 в FACET-II (США) направлены на изучение фундаментальных процессов КЭД в сильных лазерных полях. А. И. Титовым с коллегами разработана теория нелинейных квантовых процессов в сильных электромагнитных

---

[263] *Dorkin S. M., Kaptari L. P., Hilger T., Kämpfer B.* // Phys. Rev. C. 2014. V. 89. 034005.

[264] *Kaptari L. P., Kampfer B.* // Few-Body Syst. 2020. V. 61. P. 28.

[265] *Toneev V. D., Nikonov E. G., Friman B., Nörenberg W., Redlich K.* // Eur. Phys. J. C. 2004. V. 32. P. 399.

[266] *Skokov V. V., Toneev V. D.* // Phys. Rev. C. 2006. V. 73. 021902.

[267] *Skokov V. V., Illarionov A. Yu., Toneev V. D.* // Int. J. Mod. Phys. A. 2009. V. 24. P. 5925.

[268] *Voronyuk V., Toneev V. D., Cassing W., Bratkovskaya E. L., Konchakovski V. P., Voloshin S. A.* // Phys. Rev. C. 2011. V. 83. 054911.

полях. Впервые она была использована для предсказания вероятностей рождения жестких комптоновских фотонов и электрон-позитронных пар при взаимодействии ультрарелятивистских электронов с интенсивными лазерными импульсами в широком диапазоне значений энергии электронов и интенсивности лазерного пучка[269]. Предсказано существенное усиление сечений многофотонных (подпороговых) процессов при взаимодействии фотонов и электронов с короткими электромагнитными (лазерными) импульсами[270].

Методы ядерной теории были применены при изучении металлических кластеров. В. О. Нестеренко с коллегами предложил метод описания мультипольных колебаний валентных электронов в деформированных кластерах щелочных металлов. Как деформированное среднее поле, так и остаточное взаимодействие были получены самосогласованно из функционала Кона–Шэма. В рамках зависящего от времени приближения локальной плотности были описаны происхождение и основные характеристики электронных инфракрасных квадрупольных мод в натриевых кластерах[271, 272].

Электромагнитные поля простейших нестационарных источников используются для анализа лемм Лоренца и Фельда–Тая, имеющих широкое применение в электродинамике, оптике, радиофизике, электронике. Эти леммы справедливы для более общих зависимостей источников электромагнитного поля от времени, чем предполагалось первоначально[273]. Тщательный анализ кинематических соотношений для двухфотонного черенковского процесса указывает на существование углов, при которых интенсивность излучения максимальна. Это помогает в экспериментах по обнаружению двухфотонного эффекта Черенкова[274].

Для описания статистических процессов использовались методы ядерной теории. Для фермионного или бозонного осциллятора, полностью связанного с несколькими тепловыми резервуарами со смешанной статистикой, получены аналитические выражения для чисел заполнения в рамках немарковского квантового подхода Ланжевена. Полная связь квантовой системы с тепловым резервуаром обычно приводит к ее эволюции в направлении асимптотического равновесия. Было показано, что такое равновесие может быть не достигнуто, если система одновременно подключена к бозонным и фермионным тепловым резервуарам и эти резервуары не связаны друг с другом[275].

---

[269] *Kämpfer B., Titov A. I.* // Phys. Rev. A. 2021. V. 103. 033101.

[270] *Titov A. I., Takabe H., Kämpfer B.* // Phys. Rev. D. 2018. V. 98. 036022.

[271] *Kleinig W., Nesterenko V. O., Reinhard P.-G.* // Ann. Phys. 2002. V. 297. 1.

[272] *Nesterenko V. O., Reinhard P.-G., Kleinig W., Dolci D. S.* // Phys. Rev. A. 2004. V. 70. 023205.

[273] *Afanasiev G. N.* // J. Phys. D. 2001. V. 34. P. 539.

[274] *Afanasiev G. N.* Vavilov–Cherenkov and Synchrotron Radiation. Kluwer Publishers, 2004. P. 124; *Afanasiev G. N., Kartavenko V. G., Zrelov V. P.* // Phys. Rev. E. 2003. V. 68. 066501.

[275] *Hovhannisyan A. A., Sargsyan V. V., Adamian G. G., Antonenko N. V., Lacroix D.* // Physica A. 2020. V. 545. P. 123653; Phys. Rev. E. 2020. V. 101. 062115; Phys. Rev. A. 2020. V. 102. 022209.

ТЕОРИЯ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД

В самом конце прошлого века в теоретических исследованиях конденсированных сред в ЛТФ произошли существенные изменения. Вместо традиционных направлений, таких как теория твердого тела, нелинейные проблемы теории многих тел, модели конденсированных сред и квантовая статистика излучения и вещества, были сформулированы новые современные тематики: сильно коррелированные системы (рук. Н. М. Плакида, Г. Рёпке), динамические системы: хаос, интегрируемость, самоорганизация (рук. В. Б. Приезжев), неупорядоченные структуры: стекла, топологические дефекты, наноструктуры и джозефсоновские контакты (рук. В. А. Осипов) и мезоскопические и когерентные явления в квантовых системах (рук. М. А. Смондырев, В. С. Ярунин). Такая реструктуризация не была случайной. С одной стороны, выделенные направления соответствовали новым мировым тенденциям в физике конденсированных сред. С другой стороны, у лидеров направлений и ведущих сотрудников темы уже имелись значимые результаты в данных областях. Как показали прошедшие годы, такая реорганизация оказалась весьма своевременной и плодотворной, поскольку привела к получению конкурентоспособных результатов, получивших мировое признание. Остановимся на них более детально.

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ СВЕРХПРОВОДНИКИ И КУПРАТЫ

Высокотемпературные сверхпроводники остаются одной из самых интересных и активно изучаемых тем в физике конденсированных сред. Такие материалы, в первую очередь оксидно-медные (купратные) сверхпроводники, проявляют сверхпроводящие свойства при температурах значительно более высоких, чем предсказывает традиционная теория Бардина–Купера–Шриффера. Открытие высокотемпературных сверхпроводников произвело революцию, показав, что сверхпроводимость может возникать при температурах выше точки кипения жидкого азота, что открывает практические и технологические преимущества.

Фундаментальный механизм высокотемпературной сверхпроводимости сложен и до сих пор не полностью понят. Он связан с сильными электронными корреляциями, спиновыми флуктуациями и нетрадиционными механизмами спаривания. В отличие от обычных сверхпроводников, где спаривание электронов осуществляется за счет колебаний решетки (фононов), в купратах наблюдается более сложное взаимодействие между зарядовыми, спиновыми и решеточными степенями свободы. Уникальная слоистая структура купратов, в которой CuO_2-плоскости выступают в роли сверхпроводящих слоев, дополнительно усложняет их теоретическое описание.

Понимание микроскопического происхождения высокотемпературной сверхпроводимости требует сочетания теоретического моделирования и экспериментального подтверждения. Теоретические подходы часто вклю-

чают системы сильно коррелированных электронов, такие как модель t–J и расширенная модель Хаббарда, в которых учитываются электрон-электронные взаимодействия и магнитные корреляции. Экспериментальные методы, включая нейтронное рассеяние и измерения оптической проводимости, играют ключевую роль в верификации теоретических предсказаний и выяснении основных механизмов.

Высокотемпературные купратные сверхпроводники были предметом многочисленных теоретических исследований из-за своей сложной физической природы. Важный вклад в эти исследования внес Н. М. Плакида[276]. Он провел детальный анализ данной проблемы, сделав акцент на изучении роли электрон-фононного взаимодействия и спиновых флуктуаций в сверхпроводимости с использованием расширенной модели Хаббарда. Исследование подчеркнуло решающую роль сильных электронных корреляций в стабилизации сверхпроводящей фазы. В продолжение данного исследования Н. М. Плакида и его ученик В. С. Удовенко[277] представили микроскопическую теорию сверхпроводимости, которая учитывает межузельное кулоновское отталкивание и электрон-фононное взаимодействие. В работе показано, что спаривание за счет спиновых флуктуаций значительно повышает температуру перехода в сверхпроводящее состояние (T_c), и это дает важные сведения о механизмах спаривания в материалах с высокой T_c.

Другое направление исследований было предложено Е. А. Кочетовым и коллегами. На основе модели Кондо–Гейзенберга сильно коррелированных электронов ими были исследованы свойства нормального состояния высокотемпературных сверхпроводников в слабо допированной фазе. В общем случае сверхпроводимость проявляется как нестабильность нормального состояния, и понимание природы нормального состояния, из которого сверхпроводимость возникает, является исключительно важным моментом. Существует огромное количество экспериментальных свидетельств, указывающих на богатую и необычную физику слабо допированных купратов. Е. А. Кочетов и др. показали, что в основе необычной физики слабо допированных купратов лежат эффекты, порождаемые сильными электронными корреляциями, такими как разрушение дальнего антиферромагнитного порядка при критическом допировании порядка 6 %, что находится в очень хорошем согласии с экспериментом[278], и резкая реконструкция большой дырочной ферми-поверхности в маленькие электронные карманы в псевдощелевой фазе. Это означает, что стандартная теория ферми-жидкости в псевдощелевой фазе не работает. Наблюдаемая реконструкция ферми-поверхности может быть объяснена непосредственно в рамках микроскопической модели Кондо–Гейзенберга при условии, что сильные электронные корреляции учтены в полном объеме[279]. Показано, что реконструкция ферми-поверхности приводит к возникновению нодального электронного

[276] *Plakida N. M.* High-Temperature Cuprate Superconductors (Experiment, Theory, and Applications) // Springer Series in Solid-State Sciences. 2010. V. 166. P. 570.

[277] *Plakida N. M., Oudovenko V. S.* // Eur. Phys. J. B. 2013. V. 86. P. 115.

[278] *Ivantsov I., Ferraz A., Kochetov E.* // Phys. Rev. B. 2016. V. 94. 005100.

[279] *Ivantsov I., Ferraz A., Kochetov E.* // Phys. Rev. B. 2017. V. 96. 195161.

кармана и двух сопутствующих дырочных карманов, как было недавно подтверждено экспериментально. Все эти свойства указывают на то, что нормальное состояние слабо допированных купратов проявляет существенно неферми-жидкостное поведение, порождаемое сильными электронными корреляциями.

С использованием компьютерного моделирования А. А. Владимиров и др.[280] разработали теорию релаксационных функций для динамической спиновой восприимчивости в рамках модели t–J. В работе использовалось обобщенное приближение среднего поля для расчета функций спиновой корреляции, что позволило достичь хорошего согласия с экспериментами по нейтронному рассеянию на $LaSrCuO_4$. Продолжая исследования спиновой динамики, А. А. Владимиров и др.[281] представили микроскопическую теорию магнитной резонансной моды в сверхпроводящем состоянии. Резонансная мода, наблюдаемая как резкий магнитный пик при антиферромагнитном волновом векторе, является важной характеристикой высокотемпературной сверхпроводимости, и теоретические предсказания хорошо согласуются с экспериментальными данными для соединений $YBa_2Cu_3O_y$.

КОНДЕНСАЦИЯ БОЗЕ–ЭЙНШТЕЙНА И КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ

Конденсация Бозе–Эйнштейна (БЭК) — это макроскопическое квантовое явление, при котором большая часть бозонов занимает одно и то же квантовое состояние, что приводит к когерентному коллективному поведению. Это явление играет центральную роль в понимании фундаментальных квантово-статистических эффектов и фазовых переходов в различных физических системах. Теоретическое описание БЭК основано на теории квантовых полей, где спонтанное нарушение симметрии и дальнодействующая когерентность естественным образом возникают в процессе конденсации.

В. И. Юкалов[282] рассмотрел особенности БЭК в системах с сохраняющимся и несохраняющимся числом частиц, сделав акцент на роли нарушения калибровочной симметрии в возможности реализации БЭК. Исследование охватывало разные системы, включая холодные атомные газы и магноны, с учетом различий между равновесными и неравновесными конденсатами. Были изучены (Дж. Л. Бирман и др.[283]) особенности нарушения симметрии в конечных квантовых системах, в частности, в случае БЭК. Анализ затрагивал ключевые вопросы устойчивости и отсутствия энергетической щели в состояниях с конденсацией Бозе. Был опубликован подробный обзор (В. И. Юкалов[284]) по физике холодных атомов, где были представлены актуальные математические методы, позволяющие повысить точность теоретического описания.

---

[280] *Vladimirov A. A., Ihle D., Plakida N. M.* // Phys. Rev. B. 2009. V. 80. 104425.
[281] *Vladimirov A. A., Ihle D., Plakida N. M.* // Phys. Rev. B. 2011. V. 83. 024411.
[282] *Yukalov V. I.* // Laser Phys. 2012. V. 22. P. 1145.
[283] *Birman J. L., Nazmitdinov R. G., Yukalov V. I.* // Phys. Rep. 2013. V. 526. P. 1.
[284] *Yukalov V. I.* // Laser Phys. 2013. V. 23. 062001.

ФРАКТАЛЫ И МАЛОУГЛОВОЕ РАССЕЯНИЕ

Фрактальные структуры широко распространены в природе и физике конденсированных сред. Они характеризуются самоподобием и масштабной инвариантностью. Эти структуры часто возникают в результате сложных динамических процессов, приводящих к иерархическим узорам, повторяющимся на разных пространственных масштабах. Понимание структурных свойств фракталов необходимо для анализа материалов с нестандартными (неевклидовыми) геометриями, таких как пористые среды, полимерные сети и агрегированные частицы. Методы малоуглового рассеяния нейтронов, рентгеновских лучей и света представляют собой мощный инструмент для исследования внутренней структуры фрактальных систем на наноуровне. Малоугловое рассеяние дает информацию о размере, форме и пространственном расположении рассеивающих центров, что делает его незаменимым для характеристики фракталов как массовых, так и поверхностных типов.

Е.-М. Аницаш[285] провел всесторонний анализ малоуглового рассеяния от сложных фрактальных структур, различая массовые и поверхностные фракталы. Исследование подчеркнуло важность точного моделирования интенсивности рассеяния для достоверного определения структурных характеристик. Во фрактальных системах интенсивность рассеяния следует характерному степенному закону, отражающему самоподобную природу основной структуры. А. Ю. Черный и др.[286, 287] представили теоретические модели обобщенных канторовых фракталов, исследуя, как изменения фрактальной размерности влияют на профили рассеяния. Эти модели помогают отличить детерминированные фрактальные узоры от случайных, что дает более глубокое понимание геометрической сложности реальных систем.

А. Ю. Черный и др.[288] разработали перспективные аналитические методы для изучения данных малоуглового рассеяния от детерминированных массовых и поверхностных фракталов. Исследование показало, что детерминированные структуры демонстрируют важные особенности рассеяния по сравнению со случайными фракталами. Было отмечено, что периодичность кривых рассеяния на логарифмической шкале указывает на самоподобную структуру детерминированных фракталов. Кроме того, А. Ю. Черный и др.[289] сосредоточились на извлечении детальной структурной информации из кривых интенсивности рассеяния детерминированных массовых фракталов. Они идентифицировали логарифмическую периодичность в импульсном пространстве как характерную особенность, связав ее

---

[285] *Anitas E.-M.* Small-Angle Scattering (Neutrons, X-Rays, Light) from Complex Systems // Springer Briefs in Physics. Cham, Switzerland: Springer Intern. Publ., 2019. 116 p.

[286] *Cherny A. Yu., Anitas E.-M., Kuklin A.I., Balasoiu M., Osipov V.A.* // J. Appl. Cryst. 2010. V. 43. P. 790.

[287] *Cherny A. Yu., Anitas E.-M., Osipov V.A., Kuklin A. I.* // Phys. Chem. Chem. Phys. 2017. V. 19. P. 2261.

[288] *Cherny A. Yu., Anitas E.-M., Osipov V.A., Kuklin A. I.* // Phys. Chem. Chem. Phys. 2019. V. 21. P. 12748.

[289] *Cherny A. Yu., Anitas E.-M., Osipov V.A., Kuklin A. I.* // Phys. Rev. E. 2011. V. 84. 036203.

с парными корреляционными функциями в реальном пространстве. Предложенный подход нашел широкий отклик среди специалистов, поскольку позволяет более точно моделировать системы, где фрактальная геометрия определяет поведение рассеяния.

ТЕОРИЯ САМООРГАНИЗОВАННОЙ КРИТИЧНОСТИ И ТОЧНО РЕШАЕМЫЕ МОДЕЛИ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

К началу 1990-х гг. теория фазовых переходов и критических явлений в равновесных системах была сформировавшейся, хорошо разработанной областью. Прогресс в исследованиях подобных явлений вдали от состояния термодинамического равновесия был несравненно скромнее ввиду отсутствия общего подхода, который явился бы аналогом применимой к равновесным системам теории Больцмана–Гиббса. Важным шагом в этом направлении стала предложенная П. Баком, Ч. Тангом и К. Вейзенфельдом теория самоорганизованной критичности. Она дала единое понимание механизмов, ответственных за формирование крупномасштабных самоподобных структур и развитие гигантских лавинообразных флуктуаций в системах с большим числом степеней свободы и нелинейной пороговой динамикой. Диапазон явлений, описываемых самоподобными статистическими законами, чрезвычайно широк: от землетрясений и лесных пожаров до шумов в электронных устройствах и рынков акций.

Ввиду сложности приближенного описания таких систем наиболее эффективным средством их исследования оказались точно решаемые модели с лавинной динамикой, такие как модель песчаной горки и смежные модели. В 1990-х – 2000-х гг. группа под руководством В. Б. Приезжева стала мировым лидером в области точных решений моделей самоорганизованной критичности. Отправной точкой этой деятельности можно считать пионерское вычисление В. Б. Приезжевым вероятностей высот в абелевой модели песчаной горки на плоской квадратной решетке[290], окончательно завершенное пятнадцать лет спустя в работе[291], за которой последовало несколько работ конкурирующих групп, воспроизводящих полученный результат с использованием альтернативных подходов. Это исследование потребовало развития существенно новых комбинаторных методов, впоследствии ставших важной частью математической и статистической физики. С их помощью группой В. Б. Приезжева было также получено множество ярких результатов о структуре лавин и корреляционных функциях в модели песчаной горки[292, 293, 294, 295], которые, в частности, дают один из немногих примеров точного вычисления корреляционных функций, предсказанных недавно

---

[290] *Priezzhev V. B.* // J. Stat. Phys. 1994. V. 74. P. 955.

[291] *Poghosyan V. S., Priezzhev V. B., Ruelle P.* // J. Stat. Mech. 2011. P. 10004.

[292] *Ivashkevich E. V., Ktitarev D. V., Priezzhev V. B.* // Physica A. 1994. V. 209. P. 347.

[293] *Ivashkevich E. V.* // J. Phys. A. 1994. V. 27. P. 3643.

[294] *Priezzhev V. B.* // J. Stat. Phys. 2000. V. 98. P. 667.

[295] *Poghosyan V. S., Grigorev S. Yu., Priezzhev V. B., Ruelle P.* // Phys. Lett. B. 2008. V. 659. P. 768.

построенной логарифмической конформной теорией поля. Также в рамках поиска моделей, демонстрирующих самоорганизованную критичность, В. Б. Приезжевым совместно с индийской группой была предложена новая модель эйлеровых блужданий[296], являющаяся упрощением модели песчаной горки, которая впоследствии нашла множество применений и широко исследовалась как группой В. Б. Приезжева, так и другими группами.

Интерес научного сообщества к данной тематике и международная значимость полученных результатов явились мотивом к проведению в ЛТФ ОИЯИ таких международных совещаний, как «Самоподобные системы» (1998 г.) и «Логарифмические конформные теории поля и статистическая механика» (2007 г.), объединивших ведущих специалистов в данных областях.

МОДЕЛИ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ ЧАСТИЦ И УНИВЕРСАЛЬНОСТЬ КАРДАРА–ПАРИЗИ–ЧЖАНА

В последние годы интегрируемые модели взаимодействующих частиц широко используются как исследовательская лаборатория для изучения универсальных статистических законов, описывающих случайную эволюцию неравновесных систем под действием случайных сил. Примерами таких систем являются случайные фронты и поверхности разделов, такие как фронты горения, смачивания, осаждения и роста бактериальных колоний, транспортные потоки со случайной динамикой и полимеры в случайных средах. На больших пространственно-временных масштабах, заданных степенными законами с универсальными показателями, большие классы таких систем характеризуются одинаковым статистическим поведением. Примером такого класса универсальности является впервые открытый при исследовании случайного роста поверхностей и оказавшийся применимым в необычайно широкой области класс Кардара–Паризи–Чжана (КПЧ).

Проводимые исследования систем взаимодействующих частиц были направлены на получение новых результатов для известных моделей, а также на построение новых моделей, которые, с одной стороны, сохраняли бы свойство интегрируемости, обеспечивающее возможность точного решения, а с другой — включали бы новые взаимодействия, позволяющие как протестировать универсальность класса КПЧ, так и описать механизмы ее нарушения и найти примеры смены типа крупномасштабного поведения. На этом пути было предложено и исследовано несколько новых интегрируемых моделей с различными типами межчастичных взаимодействий, таких как асимметричный лавинный процесс[297], процесс с нулевым радиусом взаимодействия[298] и обобщенный полностью асимметричный процесс с простыми запретами[299]. В числе важных результатов необходимо отметить

---

[296] *Priezzhev V. B., Dhar D., Dhar A., Krishnamurthy S.* // Phys. Rev. Lett. 1996. V. 77. P. 5079.

[297] *Priezzhev V. B., Ivashkevich E. V., Povolotsky A. M., Hu C. K.* // Phys. Rev. Lett. 2001. V. 87. 084301.

[298] *Povolotsky A. M.* // Phys. Rev. E. 2004. V. 69. 061109.

[299] *Derbyshev A. E., Povolotsky A. M., Priezzhev V. B.* // Phys. Rev. E. 2015. V. 91. 022125.

получение В. Б. Приезжевым первого явного решения уравнения на вероятности переходов между конфигурациями частиц в асимметричном процессе с простыми запретами на периодической решетке[300] и построение А. М. Поволоцким наиболее общего трехпараметрического семейства точно решаемых моделей частиц с многочастичными перескоками и факторизованным стационарным состоянием, включающего как частные случаи множество известных моделей[301]. Эти результаты получили широкое международное признание и легли в основу дальнейших исследований класса универсальности КПЧ, стохастических вершинных моделей, полимеров в случайных средах и т. д.

КВАНТОВЫЕ ИНТЕГРИРУЕМЫЕ СИСТЕМЫ И СУПЕРКОНФОРМНЫЕ ИНДЕКСЫ

В цикле работ, написанном В. П. Спиридоновым в 2000–2025 гг., открыт принципиально новый класс специальных функций математической физики — эллиптические гипергеометрические функции. Полученные результаты обобщают многие классические достижения теории специальных функций с новыми приложениями в квантовой теории поля, статистической механике и квантовых интегрируемых системах[302].

В пионерской статье 2000 г. построены дискретные эллиптические биортогональные рациональные функции классического типа, а позднее найдены наиболее общие функции такого типа, обладающие двухиндексной биортогональностью — новым типом соотношения ортогональности. Ключевым результатом явилось вычисление эллиптического бета-интеграла, наиболее сложного известного точно вычисляемого интеграла, определяющего общее универсальное сотношение математической физики. Сформулирована теория трансцендентных эллиптических гипергеометрических функций, и предложено много точных соотношений для многомерных интегралов на корневых системах. Построен эллиптический аналог гипергеометрической функции Эйлера–Гаусса, и сконструировано эллиптическое гипергеометрическое уравнение, определяющее самое общее уравнение Шрёдингера, решения которого известны в замкнутом виде. Эти результаты являются конечными достижениями программы по построению наиболее общих точно решаемых физических моделей, разрабатывавшейся В. П. Спиридоновым в течение 15 лет с конца 1980-х гг.

В области квантовых интегрируемых систем сконструировано два варианта эллиптического обобщения модулярного дубля Фаддеева — самые общие квадратичные квантовые алгебры. Построена интегральная цепочка Бейли, определяющая эллиптический аналог преобразования Фурье и задающая наиболее общее соотношение звезда–треугольник в операторной

---

[300] *Priezzhev V. B.* // Phys. Rev. Lett. 2003. V. 91. 050601.

[301] *Povolotsky A. M.* // J. Phys. A. 2013. V. 46. P. 465205.

[302] *Спиридонов В. П.* // УМН. 2008. Т. 63, № 3. С. 3; Дополнительная глава к русскому переводу книги *Аски Р.*, *Рой Р.*, *Эндрюс Дж.* Специальные функции. М.: МЦНМО, 2013. С. 577–606.

форме. Показано, что оператор эллиптического преобразования Фурье сплетает эквивалентные представления эллиптического модулярного дубля и определяет самое общее решение уравнения Янга–Бакстера. Построено обобщение ряда перечисленных результатов на случай разреженных функций гипергеометрического типа, связанных с парафермионной конформной теорией поля[303].

В 2008 г. Ф. Э. Долан и Х. Осборн обнаружили, что суперконформные индексы четырехмерных суперсимметричных теорий поля описываются эллиптическими гипергеометрическими интегралами, а их преобразования симметрии доказывают гипотезу Зайберга об электромагнитной дуальности разных теорий в секторе BPS-состояний. Так, эллиптический бета-интеграл[302] обосновывает конфайнмент в простейшей суперсимметричной квантовой хромодинамике. В работах В. П. Спиридонова и Г. С. Вартанова предложено много новых дуальностей типа Зайберга, открыта связь условий 't Хофта по согласованию аномалий с модулярными свойствами суперконформных индексов и связь конфайнмента с нарушением киральной симметрии с сингулярностями этих индексов. Более того, В. П. Спиридоновым обнаружена связь статистических сумм двумерных интегрируемых систем типа Изинга с суперконформными индексами колчанных моделей, показывающая, что дуальность Зайберга лежит в основе всех квантовых интегрируемых моделей. Открыты новые многочастичные интегрируемые системы, связанные с представлениями группы Лоренца[304].

Значительный прогресс, достигнутый в ЛТФ по таким тематикам, как теория интегрируемых систем и теория спецфункций, обусловливает тот факт, то они составляли значительную часть программы популярных среди специалистов ежегодных тематических конференций «Квантовые и классические интегрируемые системы», которые, в частности, организовывались ЛТФ ОИЯИ в 2012 и 2017 гг.

ТОПОЛОГИЧЕСКИЕ ДЕФЕКТЫ, НАНОСТРУКТУРЫ И ТРАНСПОРТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

Для описания современных материалов широко используются методы топологии и геометрии. Это связано как с присутствием объектов с нетривиальной топологией в реальных материалах, что вызывает необходимость анализа их влияния на весь спектр физических характеристик, так и с обнаружением целого класса топологических материалов, среди которых наиболее известными на сегодня являются топологические диэлектрики и топологические полуметаллы. Носителями нетривиальной топологии в упругих средах являются линейные дефекты, известные как дислокации и дисклинации. Практически до конца прошлого века активно исследовалась роль дислокаций, трансляционных дефектов, тогда как изучение дисклинаций,

---

[303] *Spiridonov V. P.* // Adv. Math. 2018. V. 331. P. 830; J. Phys. A. 2019. V. 52. P. 355201; *Саркисян Г. А., Спиридонов В. П.* // Тр. МИАН. 2020. Т. 309. С. 269.

[304] *Sarkissian G. A., Spiridonov V. P.* // SIGMA. 2020. V. 16. P. 074; J. Phys. A. 2022. V. 55. P. 385203.

ротационных дефектов или вихрей в упругой среде представляло, скорее, академический интерес. Ситуация кардинально изменилась после синтеза углеродных наноструктур, когда оказалось, что такие дефекты неизбежно возникают в закрытых нанотрубках, конусах и фуллеренах. Еще большую актуальность тематика приобрела после обнаружения поликристаллического графена, где границы кристаллитов формируются из диполей дисклинаций.

Инициатором и лидером данной тематики в ЛТФ стал В. А. Осипов. Работа велась по двум направлениям: построение континуальной теоретико-полевой модели для описания топологических дефектов и их влияния на электронную структуру в материалах с различной геометрией и анализ транспортных характеристик (тепло- и электропроводности) материалов с поликристаллической структурой.

Первая основополагающая работа[305], которая дала начало исследованию электронных свойств углеродных наноструктур в ЛТФ ОИЯИ, была опубликована в 1999 г. В ней сформулирована калибровочная теория дисклинаций на произвольных римановых поверхностях, которые в процессе деформации могут изменять как гауссову, так и среднюю кривизну. В модели для описания углеродной пленки учитывалась специфика электронных состояний (модель дираковского типа), и она была расширена путем самосогласованного включения фермионных полей. Важными преимуществами данной модели явились возможность аналитического описания электронных характеристик и возможность учета эффектов дальнодействующих полей. В рамках сформулированной модели удалось провести анализ влияния дисклинаций на электронную структуру графитовых конусов, фуллеренов, сфероидальных фуллеренов, закрытых нанотрубок, в том числе исследована роль внешнего магнитного поля[306, 307, 308, 309]. Одним из наиболее значимых результатов, который получил широкий отклик среди специалистов, является точное решение задачи об электронных свойствах сферических (Ih) фуллеренов[310], где впервые были найдены в явном виде электронные волновые функции и спектр фуллеренов, а также получены ограничения на число нулевых мод и энергии первых уровней.

Поликристаллические материалы характеризуются наличием границ зерен, которые являются источником дополнительных упругих напряжений, что, в свою очередь, определяет специфику транспортных характеристик таких материалов. Оказалось, что поля напряжений от границ зерен можно моделировать диполем дисклинаций. Пионерской работой, обеспечившей приоритет в исследовании транспортных задач в поликристаллических материалах и положившей начало многолетнему циклу статей по дан-

---

[305] *Kochetov E. A., Osipov V. A.* // J. Phys. A. 1999. V. 32. P. 1961.
[306] *Osipov V. A., Kochetov E. A.* // JETP Lett. 2001. V. 73. P. 631.
[307] *Osipov V. A., Kochetov E. A., Pudlak M.* // JETP. 2003. V. 123. P. 161.
[308] *Kolesnikov D. V., Osipov V. A.* // JETP Lett. 2004. V. 79. P. 660.
[309] *Pudlak M., Pincak R., Osipov V. A.* // Phys. Rev. A. 2007. V. 75. 025201.
[310] *Kolesnikov D. V., Osipov V. A.* // Eur. Phys. J. B. 2006. V. 49. P. 465.

ной тематике, явилась статья[311], в которой впервые удалось решить задачу о рассеянии фононов на границе зерна конечной длины. Основополагающий вклад в развитие данного направления исследований внес С. Е. Красавин. В частности, в рамках развитого подхода удалось объяснить поведение теплопроводности в аморфных диэлектриках и других разупорядоченных материалах[312]. Особый интерес представляет тот факт, что предложенная модель позволяет объяснить низкотемпературное поведение теплопроводности стекол в области так называемого плато. Также интересны результаты по описанию теплопроводности[313] и, особенно, поведения удельного сопротивления в однослойном поликристаллическом графене[314]. Оригинальная модель позволила описать взаимодействие носителей (фононов, электронов) с деформациями графеновой решетки, обусловленными границами зерен. При этом строго учитывалась реальная структура границы зерна в виде последовательности диполей дисклинаций. Это позволило впервые получить хорошее согласие с экспериментальными данными по измерению удельного сопротивления в широком классе поликристаллических образцов графена с различными размерами кристаллитов.

Отдельное направление исследований, лидером которого стал В. Л. Катков, затронуло анализ квантового и туннельного транспорта в различных углеродных наноструктурах[315]. Наиболее ярким результатом в этой области стала разработка принципиально нового варианта туннельного полевого транзистора на основе графена, работающего на новых, оригинальных принципах[316]. Ключевым фактором для его работы является использование локализованных электронных состояний, которые присутствуют в графене на краю типа «зигзаг». Предложенный механизм переключения принципиально расширил номенклатуру известных переключающих электронных устройств (транзисторов). Он эффективно вовлекает уникальные свойства графена, такие как краевые состояния и двумерность, одновременно позволяя избежать влияния негативного фактора в виде парадокса Кляйна за счет использования зазора между электродами («нанощели»). Уникальность проведенного исследования состоит и в том, что на данный туннельный полевой транзистор был оформлен патент на изобретение[317].

Еще один важный результат связан с исследованием механизма расшифровки молекулы ДНК с помощью графеновых электродов, разделенных нанощелью[318]. Основной идеей здесь является использование значения туннельного тока в системе графен–нуклеотид–графен как фактора, позволяющего определить тип нуклеотида. Были учтены такие явления, как

---

[311] *Osipov V. A., Krasavin S. E.* // J. Phys. Cond. Mat. 1998. V. 10. P. L639.

[312] *Krasavin S. E., Osipov V. A.* // J. Phys. Cond. Mat. 2002. V. 14. P. 12923.

[313] *Krasavin S. E., Osipov V. A.* // J. Appl. Phys. 2019. V. 125. 084301.

[314] *Krasavin S. E., Osipov V. A.* // Sci. Rep. (Nature). 2022. V. 12. P. 14553.

[315] *Katkov V. L., Osipov V. A.* // J. Vacuum Sci. & Techn. B. 2017. V. 35. 050801.

[316] *Katkov V. L., Osipov V. A.* // App. Phys. Lett. 2014. V. 104. 053102.

[317] Туннельный полевой транзистор на основе графена / Катков В. Л., Осипов В. А. Патент RU № 2554694. Опубл. 27.06.2015. Бюл. № 18.

[318] *Isaeva O. G., Katkov V. L., Osipov V. A.* // Eur. Phys. J. B. 2014. V. 87. P. 272.

возможность случайной ориентации и локализации нуклеотида в процессе его протаскивания через нанощель и влияние эффекта кулоновской блокады на туннельный ток в данной системе. В результате исследования был получен важный для практической реализации вывод: при проведении статистического анализа в качестве фактора идентификации нуклеотида необходимо использовать не только среднее значение туннельного тока, но и его среднеквадратичное отклонение.

Свидетельством успехов, достигнутых сотрудниками ЛТФ в области нанофизики, явились организация и проведение серии международных конференций «Дубна-нано»[319], участие в которых приняли ведущие специалисты из более чем 40 стран мира. В состав программного комитета входили известные ученые, включая лауреата Нобелевской премии К. С. Новоселова. Было также проведено несколько школ для молодых ученых, где были прочитаны лекции по физике наноструктур и наномасштабных явлений.

МЕТОДЫ КВАНТОВОЙ ТЕОРИИ ПОЛЯ В ФИЗИКЕ КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

Методы квантовой теории поля являются важной и неотъемлемой частью математического арсенала современной теоретической физики. Изначально созданные для описания релятивистской физики элементарных частиц, они впоследствии (в сочетании с методами неравновесной статистической физики) нашли широкое применение при решении задач классической физики, в которых ключевую роль играют флуктуации. Значительный вклад в развитие этих методов внес выдающийся ученый и классик мировой науки Н. Н. Боголюбов — первый директор Лаборатории теоретической физики, ныне носящей его имя. Его работа в ЛТФ оказала существенное влияние на формирование и развитие многих научных направлений лаборатории.

В 2022 г. по инициативе М. Гнатича и В. А. Осипова, а также при поддержке директора ЛТФ Д. И. Казакова в отделе теории конденсированных сред был создан новый сектор «Методы квантовой теории поля в сложных системах», объединивший усилия ученых, работающих в данной области. Сектор возглавил представитель Словакии, страны-участницы ОИЯИ, М. Гнатич. Его большой опыт работы в ЛТФ и широкие международные связи с ведущими учеными по данной тематике позволили в кратчайшие сроки наполнить сектор как высококвалифицированными специалистами, так и молодыми исследователями.

В основе исследований здесь лежит тот факт, что развитие методов статистической теории поля, объединяющей подходы квантовой теории поля и неравновесной статистической физики, позволяет формулировать широкий класс задач стохастической динамики в виде эффективных полевых моделей и исследовать их универсальное скейлинговое поведение в крупно-

[319] *Osipov V. A. et. al.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2008. V. 129. 011001; J. Phys.: Conf. Ser. 2010. V. 248. 011001; J. Phys.: Conf. Ser. 2012. V. 393. 011001.

З. Алисултанов (МФТИ), Н. М. Плакида

А. Ю. Черный, Е.-М. Аницаш, Р. Г. Назмитдинов

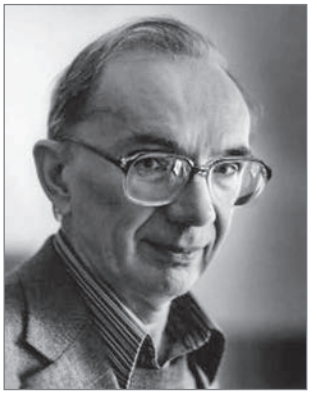
В. А. Осипов

А. А. Донков, К. К. Кешарпу

П. Н. Пятов, Г. Ю. Шитов, В. П. Спиридонов, Н. Ж. Бынзарова, А. М. Поволоцкий

С. Е. Красавин

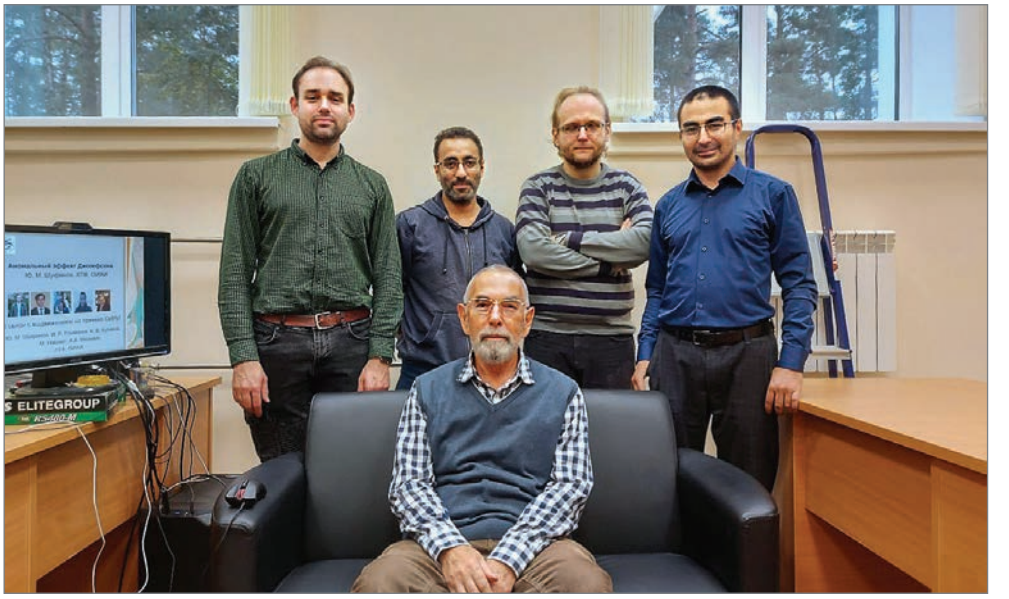
В. Л. Катков



В. Б. Приезжев

П. А. Максимов

Хоанг Нгок Кам



К. В. Куликов, М. Абдельгани, Ю. М. Шукринов, А. А. Мазаник, И. Р. Рахмонов

М. Гнатич

Н. М. Лебедев (в центре)

М. Кецер, Л. Мижишин

Г. А. Калагов (справа)

Участники международной конференции «Современные проблемы теории конденсированных сред». Дубна, 2022 г.

масштабной области пространственно-временных координат. Данные подходы активно развиваются и применяются к новым областям (в том числе к задачам классической физики) для описания как замкнутых систем и фазовых переходов в них, так и открытых диссипативных систем. К последним относятся задачи стохастической динамики: развитая турбулентность, стохастическая магнитная гидродинамика, перколяционные процессы, кинетика химических реакций, самоорганизующиеся системы и др. Применение современных вычислительных методов и высокопроизводительных вычислительных систем обеспечивает высокую точность расчета критических показателей и управляющих параметров. В настоящее время группа М. Гнатича проводит исследования по широкому спектру вышеупомянутых задач, и уже получен ряд признанных на международном уровне результатов.

Теоретическое описание турбулентности — важнейшая нерешенная проблема классической физики. Турбулентные потоки, возникающие в различных жидкостях или газах при очень высоких числах Рейнольдса, обнаруживают ряд общих свойств и явлений (каскад энергии или других сохраняющихся величин, скейлинговое поведение с явно универсальными степенными аномальными показателями и т. д.), указывающих на то, что последние могут быть описаны в рамках внутренне непротиворечивой теории. Наиболее примечательной чертой развитой турбулентности, которая не укладывается в рамки классической феноменологической теории Колмогорова–Обухова, является перемежаемость, возникающая вследствие сильных флуктуаций скорости диссипации энергии и проявляющаяся в сингулярной зависимости, предположительно степенной, одновременных корреляционных и структурных функций от расстояния, характеризуемой бесконечным количеством независимых аномальных показателей (мультискейлинг). Как эксперименты, так и численное моделирование показывают, что аномальный скейлинг более ярко выражен для пассивного переноса скалярных/векторных полей температуры, плотности примеси, магнитного поля, чем для самого поля скорости, поэтому проблема пассивного переноса является неотъемлемой частью изучения скейлинга в турбулентной среде.

Методы статистической теории поля позволили аналитически доказать существование мультискейлинга для пассивных скалярных и векторных примесей в развитых турбулентных течениях. С двух- и трехпетлевой точностью вычислены критические индексы для составных операторов, дающих основной сингулярный вклад в операторное вильсоновское разложение структурных функций. Определяющий вклад в развитие данного направления, как и в конкретные вычисления, внесли Л. Ц. Аджемян, Н. В. Антонов вместе с другими коллегами из школы А. Н. Васильева[320, 321, 322]. Важными

[320] *Adzhemyan L. Ts., Antonov N. V., Barinov V. A., Kabrits Yu. S., Vasiliev A. N.* // Phys. Rev. E. 2001. V. 63. 025303(R).

[321] *Adzhemyan L. Ts., Antonov N. V., Hnatich M., Novikov S. V.* // Phys. Rev. E. 2001. V. 63. 016309.

[322] *Antonov N. V., Hnatich M., Honkonen J., Jurčišin M.* // Phys. Rev. E. 2003. V. 68. 046306.

экспериментально измеряемыми величинами в развитой турбулентности являются управляющие параметры, такие как константа Колмогорова, число Прандтля, универсальные амплитуды и т. д. С двухпетлевой точностью они были вычислены и опубликованы в работах Л. Ц. Аджемяна, Н. Антонова, М. Гнатича и др.[323, 324, 325, 326]. Полученные значения хорошо согласуются с экспериментально измеренными.

Возникновение и удержание наблюдаемых магнитных полей планет, Солнца, звезд и целых галактик является интригующей теоретической задачей, которая десятилетиями привлекает внимание ученых. Однако мы и сейчас далеки от полного понимания этого интересного явления. Формулировка стохастической магнитной динамики, которая является основой для описания магнитных полей в проводящих турбулентных средах, в виде полевой модели позволяет взглянуть на генерацию магнитных полей как на явление, тесно связанное с сохранением или нарушением некоторых симметрий турбулентной среды. Оказывается, что в среде с нарушенной четностью образование крупномасштабного магнитного поля, известное как турбулентное динамо, происходит спонтанно с нарушением сферической симметрии. Оно является тем механизмом, который позволяет устранить экспоненциальный рост мелкомасштабных магнитных флуктуаций. Изучение данного механизма, начатое 40 лет назад, на данном этапе вылилось в вычисление магнитного поля с двухпетлевой точностью. Важным результатом исследований М. Гнатича и др. является предсказание (наряду с генерацией однородного магнитного поля) появления устойчивых пертурбаций альфвеновских волн, напоминающих голдстоуновские моды при фазовых переходах[327, 328].

Ярким примером многообразных явлений неравновесной статистической физики служит перколяция, которая описывает широкий спектр таких явлений, как распространение эпидемий, лесных пожаров, зарождение турбулентности и др. В настоящее время наиболее изучаемыми являются модели направленной и изотропной перколяции, которые описывают два разных класса универсальности.

Степенное поведение статистических характеристик, таких как эффективный размер облака агентов, их масса, размер активных зон, на больших временных масштабах может быть изучено в рамках полевых моделей. С использованием техники пертурбативной ренормализационной группы сотрудниками сектора были вычислены соответствующие критические ин-

---

[323] *Adzhemyan L. Ts., Hnatich M., Horvath D., Stehlik M.* // Phys. Rev. E. 1998. V. 58. P. 4511.

[324] *Adzhemyan L. Ts., Antonov N. V., Kompaniets M. V., Vasil'ev A. N.* // Int. J. Mod. Phys. B. 2003. V. 17. P. 2137.

[325] *Adzhemyan L. Ts., Hnatich M., Honkonen J.* // Eur. Phys. J. B. 2010. V. 73. P. 275.

[326] *Hnatič M., Honkonen J., Lučivjanský T.* // Acta Phys. Slovaca. 2016. V. 66. P. 69.

[327] *Hnatič M., Lučivjanský T., Mižišin L., Molotkov Yu., Ovsiannikov A.* // Universe. 2024. V. 10. P. 240.

[328] *Hnatič M., Lučivjanský T., Mižišin L., Molotkov Yu., Ovsiannikov A.* // Phys. Rev. E. 2025. V. 112. 015211.

дексы с рекордной трехпетлевой точностью для направленной и изотропной перколяции[329, 330].

Наряду с пертурбативными методами ренормализационной группы в последние годы в работе сектора все большее значение приобретает функциональная ренормализационная группа. Этот современный метод особенно актуален при изучении сильно взаимодействующих систем, а также в ситуациях, где существенны неуниверсальные особенности поведения. В частности, с его помощью проведено исследование сверхтекучего фазового перехода в многокомпонентных ферми-системах с симметрией $SU(N)$ при произвольных значениях длины рассеяния, что позволяет охватывать как пертурбативный, так и непертурбативный режимы. Подход функциональной ренормализационной группы позволил корректно учесть флуктуационные поправки, принципиально не описываемые в теории среднего поля. Было установлено, что при $N > 2$ система претерпевает фазовый переход первого рода, что представляет собой качественно новое поведение. Впервые удалось количественно определить важнейшие характеристики этого перехода — критическую температуру, скачок сверхтекучей щели в точке перехода и скачок энтропии, связанный с высвобождением латентного тепла. Кроме того, показано, что выраженность перехода первого рода усиливается с ростом числа компонент N, что подчеркивает ключевую роль многокомпонентности в формировании флуктуационно-индуцированных эффектов в сильно взаимодействующих ферми-системах[331, 332] .

Следует отметить многолетние и плодотворные научные связи по этой тематике между ЛТФ и Санкт-Петербургским государственным университетом, Университетом им. П. Й. Шафарика в Кошице (Словакия) и Хельсинкским университетом (Финляндия). Некоторые итоги научных достижений в данной области, полученных за последние десятилетия, подведены и опубликованы в главе книги[333] и в обзорной статье[334].

СОВРЕМЕННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

В самом начале 2000-х гг. в связи с возникшей востребованностью новых математических методов в теоретической физике в ЛТФ в отдельное направление была выделена современная математическая физика. Стоявший у его истоков профессор А. Т. Филиппов, в то время являвшийся ди-

---

[329] *Adzhemyan L. Ts., Hnatic M., Ivanova E. V., Kompaniets M. V., Lucivjansky T., Mizisin L.* // Phys. Rev. E. 2023. V. 107. 064138.

[330] *Hnatič M., Kecer M., Kompaniets M. V., Lučivjanský T., Mižišin L., Molotkov Yu.* // Phys. Rev. 2025. V. 112. 014113.

[331] *Hnatič M., Kalagov G.* // Nucl. Phys. B. 2023. V. 991. P. 116192.

[332] *Kalagov G.* // Phys. Rev. B. 2025. V. 111. 214523.

[333] 50 Years of the Renormalization Group Dedicated to the Memory of Michael E. Fisher. World Sci., 2024.

[334] *Antonov N. V., Hnatič M., Honkonen J., Kakin P. I., Lučivjanský T., Mižišin L.* // La Rivista del Nuovo Cim. 2024. V. 47. P. 653.

ректором ЛТФ, стремился привлечь как можно больше молодых людей с хорошей математической подготовкой. Требовались теоретики, хорошо владеющие методами теории групп и алгебр Ли, римановой геометрии, топологии, дискретной математики, комплексным анализом многих переменных и другими областями чистой математики. При формировании новой темы А. Т. Филиппов провел широкое обсуждение, выходившее далеко за рамки как Института, так и страны: в поддержку высказывались академик Д. В. Аносов из Математического института им. В. А. Стеклова РАН, содиректор Математического института Макса Планка в Бонне Ю. И. Манин, директор теоротдела ЦЕРН Л. Альварец-Гауме, лауреат премии Хайнемана профессор Мюнхенского университета Ю. Весс и многие другие.

Внутри Института идея создания новой темы также была поддержана, поскольку и В. Г. Кадышевский, и А. Н. Сисакян, входившие в центральную дирекцию, понимали необходимость укрепления математической составляющей жизни лаборатории. Костяк нового направления составили ученые, много лет проработавшие в лаборатории, хорошо известные своими результатами в теории гравитации, космологии, теории классических и квантовых интегрируемых систем. А. Т. Филиппов, Б. М. Барбашов, В. В. Нестеренко, Е. А. Иванов, А. П. Исаев, С. О. Кривонос, А. С. Сорин, П. Физиев заложили ту основу, на которой выстроилось новое направление. Привлеченные к работе молодые сотрудники всегда находили у старшего поколения совет и поддержку, что позволило создать замечательную атмосферу содружества творческих личностей.

Ниже дан краткий обзор основных тематик исследований, которые проводились в рамках направления «современная математическая физика» в течение последних лет.

ГЕОМЕТРИЯ ЛАГРАНЖЕВЫХ ПОДМНОГООБРАЗИЙ

Одним из приоритетных направлений является геометрия лагранжевых подмногообразий компактных фазовых пространств. Лагранжевы подмногообразия теснейшим образом связаны с явлением интегрируемости: в случае, когда система вполне интегрируема, движение осуществляется по подмногообразиям половинной размерности, каждое из которых является лагранжевым. Сам термин «лагранжево подмногообразие» введен В. П. Масловым в связи с исследованиями коротковолновых асимптотик уравнений в частных производных. Также лагранжевы подмногообразия играют существенную роль в геометрическом квантовании и зеркальной симметрии.

В рамках задач геометрического квантования Н. А. Тюриным была представлена программа «Геометрическое квантование в рамках алгебраической лагранжевой геометрии», реализовавшая нелинейное обобщение конструкции геометрического квантования системы с компактным фазовым пространством в терминах лагранжевой геометрии этого фазового пространства. Конструкция вызвала живой интерес школы В. П. Маслова, так как неявно использовала геометрическую основу теории квазикласси-

ческих приближений. Результаты были представлены в диссертации[335] и в обзоре[336].

В задаче построения нестандартных торов в торических многообразиях был достигнут заметный прогресс, ставший возможным с введением понятия псевдоторической структуры. В терминах таких структур была объяснена конструкция экзотического твистованного тора; было установлено, что многие фазовые пространства не полностью интегрируемых систем обладают подобными структурами, что позволяет строить аналоги классических координат действие–угол в более общих случаях (а значит, и находить решения). Основные результаты этой деятельности изложены в обзоре[337].

В задаче построения конечномерных пространств модулей лагранжевых подмногообразий была предложена программа, получившая название специальной геометрии Бора–Зоммерфельда. Большое число технических трудностей, встретившихся на пути, позволило связать эти построения с чисто математическими гипотезами, известными в исследованиях по геометрии симплектических многообразий. Основные результаты, полученные в этом направлении, собраны в обзоре[338].

С физической точки зрения замечательным примером алгебраического многообразия является грассманиан $\mathrm{Gr}(r, n)$. Это многообразие допускает решения уравнения Эйнштейна. Кроме того, современные подходы к суперсимметрии невозможны без грассмановых переменных. До недавнего времени было только два примера лагранжевых подмногообразий в этом алгебраическом многообразии. В цикле работ, последней и наиболее общей из которых является[339], был построен большой ряд примеров лагранжевых подмногообразий в $\mathrm{Gr}(r, n)$, а также исследованы их топологические свойства.

РАСЩЕПЛЕННЫЙ ОПЕРАТОР КАЗИМИРА, СТЕПЕНИ ПРИСОЕДИНЕННОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ И ПАРАМЕТРЫ ВОЖЕЛЯ

Известно, что специальный инвариантный оператор — расщепленный (или поляризованный) оператор Казимира C — играет важную роль как в описании алгебр Ли g, так и в изучении теории их представлений[340] (теория алгебр Ли и их представлений лежит в основе всех современных моделей ядерной физики и физики элементарных частиц). Расщепленный оператор Казимира C является строительным блоком для построения g-инвариантных решений r и R квазиклассических и квантовых уравнений Янга–Бакстера, которые являются ключевыми при исследовании квантовых инте-

[335] *Тюрин Н. А.* Геометрическое квантование в рамках алгебраической лагранжевой геометрии. Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. М., 2002.

[336] *Tyurin N. A.* // LMS Lecture Notes. 2007. V. 338. P. 279.

[337] *Тюрин Н. А.* // УМН. 2017. Т. 72, № 3. С. 131.

[338] *Тюрин Н. А.* // УМН. 2025. Т. 80, № 2. С. 123.

[339] *Тюрин Н. А.* // Изв. РАН. Сер. матем. 2025. Т. 89, № 2. С. 146.

[340] *Isaev A. P., Rubakov V. A.* Theory of Groups and Symmetries I. Finite Groups, Lie Groups and Lie Algebras. World Sci., 2018.

грируемых систем. Более того, g-инвариантные рациональные решения уравнений Янга–Бакстера позволяют определить янгианы $Y(g)$ – новейшие объекты в теории симметрий. Наконец, расщепленные операторы Казимира оказались полезными[341] при вычислении цветовых коэффициентов для диаграмм Фейнмана в неабелевых калибровочных теориях.

В серии работ А. П. Исаева, С. О. Кривоноса и коллег[342, 343, 344, 345] g-инвариантный расщепленный оператор Казимира (и его обобщение — k-расщепленный оператор Казимира $C_{(k)}$) применялся для исследования разложения тензорных произведений $ad^{\otimes k}$ присоединенных представлений алгебр Ли. А именно, для всех простых алгебр Ли g были найдены явные формулы для инвариантных проекторов на подпредставления, которые появляются при разложении тензорного произведения $ad \otimes ad \otimes ad = ad^{\otimes 3}$ трех присоединенных представлений ad. Идея использовать g-инвариантные операторы для построения таких инвариантных проекторов не нова. Например, инвариантные проекторы, действующие в тензорных представлениях алгебр $su(n)$ ($sl(n)$), называются симметризаторами Юнга и играют ключевую роль в исследовании симметрии многокварковых систем в физике элементарных частиц. Однако использование расщепленных операторов Казимира $C_{(k)}$ позволяет разложить тензорные произведения представлений на инвариантные подпредставления, которые называются казимировскими подпредставлениями, единым образом для всех простых алгебр Ли.

Интерес к изучению расщепленного оператора Казимира был в значительной степени мотивирован возможностью построения универсальной алгебры Ли, понятие которой было введено П. Вожелем[346]. Предполагается, что универсальная алгебра Ли будет моделью всех комплексных простых алгебр Ли g. Например, множество величин, которые характеризуют алгебру g в различных представлениях (возможно, приводимых), входящих в разложение $ad^{\otimes k}$, может быть выражено аналитически как функции всего лишь трех вещественных параметров Вожеля. Эти параметры принимают определенные значения для каждой из комплексных простых (супер)алгебр Ли g.

В оригинальной работе П. Вожеля понятие универсальной алгебры Ли было получено с помощью весьма нетривиальных соображений, вытекающих из теории узлов. В работах[347] было высказано предположение, а затем и доказано, что представления $ad^{\otimes 3}$ и $ad^{\otimes 4}$ для исключительных алгебр Ли g_2, f_4, e_6, e_7, e_8 допускают универсальное описание. В работах А. П. Исаева, С. О. Кривоноса и их коллег многие результаты П. Вожеля были выведены с применением достаточно простого подхода, заключающегося в исполь-

---

[341] *Isaev A. P., Provorov A.* // Phys. Part. Nucl. Lett. 2025. V. 22. P. 556.

[342] *Isaev A. P., Krivonos S. O.* // J. Math. Phys. 2021. V. 62. 083503.

[343] *Isaev A. P., Krivonos S. O., Provorov A. A.* // Int. J. Mod. Phys. A. 2023. V. 38. P. 2350037.

[344] *Isaev A. P., Krivonos S. O.* // Symmetry. 2001. V. 13. P. 1046.

[345] *Avetisyan M., Isaev A. P., Krivonos S. O., Mkrtchyan R.* // Russ. J. Math. Phys. 2024. V. 31. P. 379.

[346] *Vogel P.* The Universal Lie Algebra. Preprint, 1999; https://webusers.imjprg.fr/~pierre.vogel/grenoble-99b.pdf.

[347] *Deligne P.* // C. R. Acad. Sci. 1996. V. 322. P. 321326; *Landsberg J. M., Manivel L.* // Adv. Math. 2006. V. 201.

зовании расщепленных операторов Казимира $C_{(3)}$ и $C_{(4)}$ для разложения $ad^{\otimes 3}$ и $ad^{\otimes 4}$ на подпредставления для всех простых алгебр Ли. Кроме того, в работе[348] впервые было получено универсальное разложение антисимметричной части $ad^{\otimes 5}$ для исключительных алгебр Ли. Это показывает, что использование расщепленных операторов Казимира обеспечивает общий простой и универсальный алгоритм для разложения различных представлений алгебры Ли в виде прямой суммы инвариантных подпредставлений. В работе[345] впервые получены универсальные (в смысле Вожеля) формулы для размерностей и собственных значений оператора Казимира $C_{(4)}$ для всех казимировских подпредставлений, возникающих в разложении $ad^{\otimes 4}$. В дальнейшем планируется применить метод расщепленного оператора Казимира для нахождения универсального разложения представления $ad^{\otimes 5}$ для всех простых алгебр Ли.

ГОЛОГРАФИЧЕСКИЙ ПОДХОД

Голографический подход изучает динамику сильносвязанных квантовых теорий поля через дуальные гравитационные решения. В этой дуальности полевые ультрафиолетовые расходимости соответствуют инфракрасным расходимостям в гравитации, а РГ поток сопоставляется гравитационному решению между пространствами анти-де Ситтера. Особый интерес представляют термальные РГ потоки, описываемые черными дырами, которые кодируют процесс термализации в дуальной теории поля.

А. А. Голубцовой в контексте голографического подхода исследовалась 5-мерная супергравитационная модель, включающая дилатон с потенциалом. Была построена редукция к эффективной интегрируемой механической модели типа цепочек Тоды. Найдены аналитические решения для метрики и скалярного поля, в том числе и с AdS асимптотикой, которые описывают голографические РГ потоки при нулевой и ненулевой температуре. Также А. А. Голубцовой предложен метод исследования термальных голографических РГ потоков с использованием редукции супергравитационных уравнений к автономной динамической системе с конфигурационным пространством в виде цилиндра. Данный метод позволяет понять поведение потоков, основываясь на анализе устойчивости фиксированных точек, а также найти аналитическое представление пригоризонтной области потоков. Кроме того, обнаружен класс потоков, соответствующих деформации дуальной теории «легкими» операторами, которые не изменяют фоновую геометрию[349, 350].

СТРУНЫ, ДУАЛЬНОСТЬ И ИНТЕГРИРУЕМОСТЬ

Х. Димовым проводились исследования в области струнных реализаций квантовой теории поля. Эта работа основана на гипотезе Малдасены о ду-

---

[348] *Исаев А. П. Кривонос С. О.* // Изв. РАН. Сер. матем. 2025. Т. 89. С. 15.

[349] *Aref'eva I. Y., Golubtsova A. A., Policastro G.* // JHEP. 2019. V. 05. P. 117.

[350] *Golubtsova A., Nikolaev A., Podoinitsyn M.* // Phys. Rev. D. 2024. V. 110. 066011.

альности между теорией струн в супергравитационных фоновых геометриях и калибровочными теориями, определенными на голографической границе этих геометрий. Это называется концепцией голографического соответствия (AdS/CFT). В самом общем смысле общие задачи связаны с проверкой этого соответствия в супергравитационном приближении и за его пределами. Конкретные задачи, которые решались, и достижения связаны с изучением интегрируемых моделей на фоновых струнных геометриях, диктуемых их симметриями и струнной динамикой. Путем сведения к интегрируемой модели Неймана–Розохатиуса были получены различные классы струнных решений, такие как гигантские магноны, шипы, вращающиеся струны и т. д.[351]. Выполнено квазиклассическое квантование, и получены дисперсионные соотношения между сохраняющимися зарядами. С использованием метода квантования пульсирующих струнных конфигураций получены аномальные размерности классов операторов из голографических дуальных калибровочных теорий различных классов фоновых геометрий, в том числе с нарушенной суперсимметрией, а также с конечной температурой[352]. Изучено информационное содержание голографических фоновых геометрий (например, голографических черных дыр), и получены критерии их устойчивости[353].

СУПЕРСИММЕТРИЧНЫЕ ШВАРЦИАНЫ

Производная Шварца, или шварциан, — нелинейный дифференциальный оператор 3-го порядка, инвариантный относительно дробно-линейных преобразований аргумента. С точки зрения математической физики интерес к этому объекту обусловлен его появлением в операторных разложениях в двумерной конформной теории поля, а также в низкоразмерных моделях AdS/CFT соответствия. Известны суперсимметричные обобщения шварциана, появляющиеся в суперконформных теориях, а также шварцианы с производными высших порядков. Свойства шварцианов позволяют предполагать, что они полностью определяются симметрией и могут быть построены с помощью метода нелинейных реализаций. Действительно, в работах Н. Ю. Козырева и С. О. Кривоноса[354] было показано, что известные супершварцианы можно построить, применяя метод нелинейных реализаций к супергруппам $osp(1|2)$, $su(1,1|1)$, $osp(3|2)$, $su(1,1|2)$, $D(1,2,\alpha)$. Параметризация групп оказывается аналогичной таковой при построении суперконформных механик, но все параметры рассматриваются как функции на дополнительном инертном («граничном») суперпространстве. Необходимые условия неприводимости во всех случаях возникают как условия на

[351] *Dimov H., Rashkov R. C.* // Nucl. Phys. B. 2008. V. 799. P. 255.

[352] *Geytota O. V., Golubtsova A. A., Dimov H., Nguyen Vu H., Rashkov R. C.* // General Relativity and Gravitation. 2023. V. 55. P. 29.

[353] *Avramov V., Dimov H., Radomirov M., Rashkov R. C., Vetsov T.* // Eur. Phys. J. C. 2024. V. 84. P. 281; Eur. Phys. J. Plus. 2024. V. 139. P. 939.

[354] *Kozyrev N., Krivonos S.* // Phys. Rev. D. 2022. V. 105. 085010; JHEP. 2022. V. 03. P. 120; Phys. Rev. D. 2023. V. 107. 026018; *Krivonos S.* // Phys. Rev. D. 2024. V. 109. 065029.

формы Картана генераторов сдвигов, суперсдвигов и дилатаций, после чего все другие формы Картана могут быть выражены только через супершварциан и его производные. С использованием этих форм также были построены суперсимметричные шварцевы механики. Интересно, что теоретико-групповой подход позволил построить супершварцианы, инвариантные относительно супергрупп $OSp(N|2)$ для всех N, неизвестные в конформной теории поля.

СУПЕРСИММЕТРИЯ

Исследования калибровочных полей, суперсимметрии и связанных с ними вопросов были начаты известными физиками-теоретиками М. А. Марковым, В. И. Огиевецким и И. В. Полубариновым. Сотрудники ЛТФ, работающие по этой тематике, в своих исследованиях поддерживают преемственность по отношению к своим знаменитым учителям. Среди наиболее приоритетных направлений – создание и изучение новых перспективных суперсимметричных теорий. Проводимые в последние годы исследования посвящены развитию предложенных ранее подходов и методов в супертеориях. Среди них особое место занимает гармонический подход к суперполевым теориям с расширенной суперсимметрией, первооткрывателями которого являются ученые ЛТФ. Еще одно «горячее» направление — исследования по суперсимметричной квантовой механике. Другие области теоретической физики, например, развитие методов и подходов к построению моделей фундаментальных взаимодействий за пределами Стандартной модели и изучение их математической структуры, включая феноменологию элементарных частиц, концептуальные и математические основы квантовой механики, исследования калибровочных теорий и гравитации на классическом и квантовом уровнях, также являлись объектами интенсивных исследований. Все полученные на этих направлениях результаты находятся в полном соответствии с мировыми научными тенденциями и представляют собой значительные научные достижения, во многих случаях превышающие мировой уровень. Они вызывают большой интерес коллег из различных научных центров в России и мире. Далее приведен ряд важных и приоритетных результатов, полученных в этом направлении за последние годы. Авторами основной части работ здесь являются И. Л. Бухбиндер, Е. А. Иванов и С. А. Федорук, а также А. П. Исаев, С. О. Кривонос, А. П. Нерсесян, А. О. Сутулин, С. С. Сидоров, Н. М. Заиграев, Г. А. Саркисян, М. А. Подойницын, Н. Ю. Козырев и др.

МОДЕЛИ ЧАСТИЦ И ПОЛЕЙ С ВЫСШИМИ И НЕПРЕРЫВНЫМИ (БЕСКОНЕЧНЫМИ) СПИНАМИ

$N = 2$, $D = 4$ гармоническое суперпространство, открытое в ЛТФ в 1984 г.[355], нашло многочисленные применения в теоретической физике и

[355] *Galperin A., Ivanov E., Kalitzin S., Ogievetsky V., Sokatchev E.* // Class. Quant. Grav. 1984. V. 1. P. 469.

продолжает использоваться в широком спектре задач. Одним из ярких открытий, сделанных в последние годы, стало применение $N = 2$, $D = 4$ гармонического суперпространства в теории высших спинов.

В работе[356] была впервые построена полная суперполевая формулировка свободных $N = 2$ теорий целочисленных высших спинов вне массовой оболочки, ключевую роль в формулировке которой играет гармоническое суперпространство и свойство грассмановой аналитичности. Как показано в работе[357], структура полуцелых $N = 2$ высших спинов значительно отличается от теорий целочисленных спинов.

В дальнейшем были построены суперполевые кубические взаимодействия высших спинов с фундаментальным $N = 2$ мультиплетом материи — гипермультиплетом[358].

Работы по кубическим взаимодействиям получили естественное развитие на случай $N = 2$ суперконформных теорий. В работе[359] были построены $N = 2$ суперконформные мультиплеты высших спинов вне массовой оболочки и впервые предложена согласованная теория взаимодействия бесконечной башни конформных высших спинов с гипермультиплетом. Использование такой модели важно для построения эффективного квантового действия согласованной теории высших спинов.

Структура суперполевых $N = 2$ взаимодействий исследована в работе[360], где было построено семейство калибровочно-инвариантных $N = 2$ супертоков. Эти результаты стали естественным продолжением работ по изучению инвариантов линеаризованной супергравитации[361].

Другим важным направлением в описании состояний с высшими спинами является построение и исследование моделей релятивистских частиц с непрерывным спином. В рамках твисторной формулировки предложена лагранжева модель 4D безмассовой релятивистской частицы, а также построено твисторное поле непрерывного спина[362]. Построена БРСТ лагранжева формулировка полей с полуцелыми непрерывными спинами[363]. 4D поля непрерывного целого и полуцелого спинов формируют $N = 1$ супермультиплет[364], для построения суперполевого лагранжевого описания которого необходимо использовать шесть киральных и антикиральных суперполей[365]. Также исследованы неприводимые представления группы

---

[356] *Buchbinder I., Ivanov E., Zaigraev N.* // JHEP. 2021. V. 12. P. 016.

[357] *Ivanov E., Zaigraev N.* // Phys. Lett. B. 2025. V. 862. P. 139333.

[358] *Buchbinder I., Ivanov E., Zaigraev N.* // JHEP. 2022. V. 05. P. 104; JHEP. 2023. V. 03. P. 036.

[359] *Buchbinder I., Ivanov E., Zaigraev N.* // JHEP. 2024. V. 08. P. 120.

[360] *Ivanov E., Zaigraev N.* // Phys. Lett. B. 2024. V. 858. P. 139056.

[361] *Ivanov E., Zaigraev N.* // Phys. Rev. D. 2024. V. 110. 066020.

[362] *Buchbinder I. L., Fedoruk S. A., Isaev A. P., Rusnak A.* // JHEP. 2018. V. 07. P. 031; *Buchbinder I. L., Fedoruk S., Isaev A. P.* // Nucl. Phys. B. 2019. V. 945. P. 114660.

[363] *Buchbinder I. L., Fedoruk S. A., Isaev A. P., Krykhtin V. A.* // Nucl. Phys. B. 2020. V. 958. P. 115114.

[364] *Buchbinder I. L., Fedoruk S. A., Isaev A. P.* // Nucl. Phys. B. 2019. V. 945. P. 114660.

[365] *Buchbinder I. L., Fedoruk S. A., Isaev A. P., Krykhtin V. A.* // Phys. Lett. B. 2022. V. 829. P. 137139.

Пуанкаре с непрерывным спином в шестимерном пространстве[366]. Представлена твисторная формулировка и формулировка на световом конусе 6D полей бесконечного спина[367]. Кроме того, в рамках БРСТ подхода получена лагранжева формулировка 6D полей непрерывного спина[368].

В работах[369] проведено обобщение предложенных моделей 4D частиц непрерывного спина с дополнительными спинорными переменными на случай фонового гравитационного поля. С использованием БРСТ подхода в четырехмерном пространстве анти-де Ситтера построена лагранжева формулировка поля непрерывного спина, на котором в данном случае реализовано неприводимое представление четырехмерной группы анти-де Ситтера SO(3,2)[370].

Твисторная формулировка массивных полей высших спинов в трехмерном и четырехмерном пространстве-времени детально изучалась в работе[371].

ЭФФЕКТИВНОЕ ДЕЙСТВИЕ В СУПЕРСИММЕТРИЧНЫХ КВАНТОВЫХ КАЛИБРОВОЧНЫХ ТЕОРИЯХ

В рамках данной проблематики проведено исследование структуры квантового эффективного действия в шестимерных суперкалибровочных теориях[372]. Такие теории могут быть получены путем размерной редукции в теории суперструн и позволяют изучать низкоэнергетические аспекты теории струн методами квантовой теории поля. Сформулирован класс шестимерных $N = (1,0)$ и $N = (1,1)$ суперсимметричных калибровочных теорий, описывающих взаимодействие калибровочного мультиплета и гипермультиплета в произвольном представлении калибровочной группы. Теории описываются в терминах $N = (1,0)$ гармонических суперполей, что обеспечивает явную $N = (1,0)$ суперсимметрию на всех этапах вычисления эффективного действия. В случае, когда гипермультиплет выбран в присоединенном представлении, теория обладает скрытой $N = (0,1)$ суперсимметрией на массовой поверхности, что соответствует максимально расширенной глобальной суперсимметричной теории в шести измерениях. Разработан суперполевой метод фонового поля, сохраняющий явную калибровочную

---

[366] *Buchbinder I. L., Fedoruk S. A., Isaev A. P., Podoinitsy M. A.* // Phys. Lett. B. 2021. V. 813. P. 136064.

[367] *Buchbinder I. L., Fedoruk S. A., Isaev A. P.* // Nucl. Phys. B. 2021. V. 973. 115576; Eur. Phys. J. C. 2022. V. 82. P. 733.

[368] *Buchbinder I. L., Fedoruk S. A., Isaev A. P., Krykhtin V. A.* // Nucl. Phys. B. 2023. V. 996. P. 116365.

[369] *Buchbinder I. L., Fedoruk S. A., Isaev A. P., Krykhtin V. A.* // Phys. Lett. B. 2024. V. 853. P. 138689; Eur. Phys. J. Plus. 2024. V. 139. P. 621.

[370] *Buchbinder I. L., Fedoruk S. A., Isaev A. P., Podoinitsy M. A.* // Phys. Lett. B. 2025. V. 861. P. 139226.

[371] *de Azcarraga J. A., Fedoruk S., Izquierdo J. M., Lukierski J.* // JHEP. 2015. V. 04. P. 010.

[372] *Buchbinder I. L., Ivanov E. A., Merzlikin B. S., Stepanyantz K. V.* // Phys. Lett. B. 2016. V. 763. P. 375; JHEP. 2017. V. 01. P. 128; Nucl. Phys. B. 2017. V. 921. P. 127; Nucl. Phys. B. 2018. V. 936. P. 638; Phys. Lett. B. 2019. V. 798. P. 134957.

инвариантность эффективного действия. Проведено вычисление однопетлевых расходимостей, рассмотрены расходимости в $N = (1,1)$ суперкалибровочной теории, и показано, что соответствующее квантовое эффективное действие конечно вне массовой оболочки. Установлена структура двухпетлевых расходимостей. Найдены ведущие низкоэнергетические конечные вклады в эффективное действие. Построены шестимерные суперкалибровочные теории с высшими производными, и установлена их перенормируемость.

В четырехмерных $N = 1$ суперсимметричных моделях проведено вычисление многопетлевых вкладов в киральный эффективный потенциал, включая суммирование всех петлевых поправок. Показано, что перенормированный киральный эффективный потенциал с точностью до одной функции констант связи всегда пропорционален классическому киральному потенциалу.

Результаты этих исследований опубликованы в работах[373,374,375,376,377].

НОВЫЕ МОДЕЛИ СУПЕРСИММЕТРИЧНОЙ МЕХАНИКИ

Предложенный в работе[378] метод суперполевого калибрования с использованием $N = 4$, $d = 1$ гармонического подхода и полудинамических супермультиплетов был применен для построения новых моделей суперсимметричной механики с деформированной суперсимметрией[379], а также новых $N = 2$ и $N = 4$ суперрасширений модели Калоджеро–Сазерленда[380]. При описании многочастичных систем метод суперполевого калибрования оперирует с матричными системами, содержащими увеличенное число физических фермионов. Это свойство использовалось также при построении новой N-расширенной суперсимметричной $su(n)$-спиновой модели Калоджеро[381] и новой реализации $N = 4$ суперконформной $D(2,1;\alpha)$ механики[382].

---

[373] *Buchbinder I. L., Ivanov E. A., Merzlikin B. S.* // JHEP. 2018. V. 09. P. 039; Nucl. Phys. B. 2020. V. 954. P. 114995.

[374] *Buchbinder I. L., Ivanov E. A., Merzlikin B. S., Stepanyantz K. V.* // Phys. Lett. B. 2018. P. 778252; Phys. Lett. B. 2021. V. 820. P. 136516; JHEP. 2023. V. 05. P. 089.

[375] *Buchbinder I. L., Ivanov E. A., Merzlikin B. S., Stepanyantz K. V.* // JHEP. 2020. V. 08. P. 169; Nucl. Phys. B. 2020. V. 961. P. 115249.

[376] *Buchbinder I. L., Iakhibaev R. M., Kazakov D. I., Tolkachev D. M.* // Phys. Lett. B. 2025. V. 866. P. 139954.

[377] *Buchbinder I. L., Rwany P., Do Vale B. R., Oyadomari G. Y., Shapiro I. L.* // Phys. Rev. D. 2024. V. 110. 12505.

[378] *Fedoruk S., Ivanov E., Lechtenfeld O.* // Phys. Rev. D. 2009. V. 79. P. 105015.

[379] *Fedoruk S., Ivanov E.* // JHEP. 2016. V. 11. P. 103; *Fedoruk S., Ivanov E., Sidorov S.* // JHEP. 2018. V. 01. P. 132; *Fedoruk S., Ivanov E., Lechtenfeld O., Sidorov S.* // JHEP. 2018. V. 04. P. 043.

[380] *Fedoruk S., Ivanov E., Lechtenfeld O.* // Nucl. Phys. B. 2019. V. 944. P. 114633; *Fedoruk S.* // Nucl. Phys. B. 2020. V. 953. P. 114977; Nucl. Phys. B. 2020. V. 961. P. 115234.

[381] *Krivonos S., Lechtenfeld O., Sutulin A.* // Phys. Lett. B. 2018. V. 784. P. 137; Lett. B. 2022. V. 831. P. 137184; *Krivonos S., Lechtenfeld O., Provorov A., Sutulin A.* // Phys. Lett. B. 2019. V. 791. P. 385.

[382] *Fedoruk S., Ivanov E.* // JHEP. 2015. V. 10. P. 087.

Построены модели $N = 4$ суперсимметричной механики на n-мерных римановых многообразиях[383], описываемые обобщенными уравнениями Виттена–Дайкграфа–Верлинде–Верлинде. Показано, что решения предложенных уравнений подчиняются модифицированным уравнениям ковариантного постоянства. На таких многообразиях построены $N = 8$ суперсимметричные механики[384], бозонные части которых являются суперинтегрируемыми деформациями систем типа осциллятора и Кулона.

Различные модели деформированной $N = 8$ механики также рассматривались в работе[385], где были изучены деформации с супералгебрами $su(2|2)$ и $su(4|1)$. Рассматривая взаимодействие динамических и полудинамических $N = 4$ супермультиплетов, авторы работы[386] впервые построили $N = 8$ суперсимметричную механику с полудинамическими переменными. Как было показано[387], эта модель обладает динамической $N = 8$ суперконформной симметрией $osp(8|2)$. Дальнейшее обобщение[388] предложенной системы позволило построить суперконформные механики с супералгебрами $F(4)$, $osp(4^*|4)$ и $su(1,1|4)$. Многочастичные системы $N = 8$ суперконформной $F(4)$ механики построены также в работе[389].

В рамках расширенной суперсимметричной механики дано описание гиперкэлеровой и бигиперкэлеровой геометрий с кручением[390]. Кроме того, в работах[391] предложены новые суперинтегрируемые системы, которые являются CP^N-аналогом плоского сингулярного осциллятора и его сферической версии, известной как «система Росохатиуса». Построены и изучены деформированные $N = 4$ и $N = 8$ суперсимметричные механики на кэлеровых многообразиях общего положения, включающие системы C^N–Смородинского–Винтерница и CP^N–Росохатиуса. Квантование деформированной $N = 4$ суперсистемы C^N–Смородинского–Винтерница иллюстрирует «четно-нечетное» расщепление, в котором бозонные и фермионные состояния принадлежат отдельным уровням энергии[392].

Кроме того, рассматривались общие суперинтегрируемые деформации осцилляторных и кулоновских систем в терминах многомерной модели Клейна[393], и найдены системы[394] с динамической супералгеброй $su(1,N|M)$.

---

[383] *Kozyrev N., Krivonos S., Lechtenfeld O., Nersessian A., Sutulin A.* // Phys. Rev. D. 2017. V. 96. 101702; Phys. Rev. D. 2018. V. 97. 085015.

[384] *Krivonos S., Nersessian A., Shmavonyan H.* // Phys. Rev. D. 2020. V. 101. 045002.

[385] *Ivanov E., Lechtenfeld O., Sidorov S.* // JHEP. 2018. V. 08. P. 193; Symmetry. 2019. V. 11. P. 135.

[386] *Fedoruk S., Ivanov E.* // Phys. Rev. D. 2024. V. 109. 085007.

[387] *Khastyan E., Krivonos S., Nersessian A.* // Int. J. Mod. Phys. A. 2025. V. 40. P. 2450165.

[388] *Krivonos S., Nersessian A.* // Phys. Lett. B. 2025. V. 863. P. 139373.

[389] *Fedoruk S., Ivanov E.* // Nucl. Phys. B. 2019. V. 938. P. 714.

[390] *Fedoruk S. A., Smilga A. V.* // J. Math. Phys. 2016. V. 57. 042103; *Fedoruk S., Ivanov E., Smilga A.* // J. Math. Phys. 2018. V. 59. 083501; *Delduc F., Ivanov E.* // Nucl. Phys. B. 2019. V. 949. 114806.

[391] *Ivanov E., Nersessian A., Shmavonyan H.* // Phys. Rev. D. 2019. V. 99. 085007; *Ivanov E., Nersessian A., Sidorov S., Shmavonyan H.* // Phys. Rev. D. 2020. V. 101. 025003.

[392] *Ivanov E., Nersessian A., Sidorov S.* // JHEP. 2021. V. 01. P. 015.

[393] *Khastyan E., Nersessian A., Shmavonyan H.* // Int. J. Mod. Phys. A. 2021. V. 36. P. 2150055.

[394] *Khastyan E., Krivonos S., Nersessian A.* // Phys. Rev. D. 2022. V. 105. 025007.

Также в работе[395] предложена схема получения интегрируемого семейства $N = 2k$ суперсимметричных гамильтонианов, параметризованных $N/2$ произвольными действительными функциями.

Получено[396] приведение эллиптического гипергеометрического уравнения к уровню комплексных гипергеометрических функций, что важно при изучении гамильтоновой задачи в новых многочастичных рациональных интегрируемых системах, возникающих в результате специальных вырождений эллиптических моделей Руджинаарса и ван Дижена.

БОЗОННЫЕ ЗВЕЗДЫ, ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ И ПРОБЛЕМЫ В ДВУХ- И ТРЕХМЕРНЫХ ТЕОРИЯХ ПОЛЯ

Одним из актуальных направлений исследований в современной теоретической физике является исследование решений общей теории относительности, описывающих черные дыры. Интерес к этому направлению связан с недавним возникновением и быстрым развитием экспериментальной гравитационной астрофизики, в частности, непосредственной регистрацией гравитационного излучения в процессе столкновения черных дыр, а также наблюдения их тени. Физические процессы, связанные с присутствием горизонта событий, позволяют с высокой точностью определить пределы применимости и возможных расширений классической теории гравитации. Кроме того, решения, описывающие черные дыры с полями материи, играют фундаментальную роль в моделях голографической дуальности неабелевой теории Янга–Миллса и классической гравитации в пространстве анти-де Ситтера.

В работах, выполненных в 2013–2025 гг., впервые получен ряд важных, приоритетных результатов, представляющих большой научный интерес. В частности, в работах Я. М. Шнира и соавторов[397] обнаружен новый класс стационарных решений теории Эйнштейна с полями материи, описывающий фермионные моды, локализованные сильным гравитационным полем, и исследовано их поведение при наличии горизонта событий. При анализе гравитирующего скалярного поля показано существование мультикомпонентных конфигураций бозонных звезд, стабильность которых обеспечена наличием сохраняющихся нетопологических зарядов[398]. Другим приоритетным результатом является нахождение нового семейства стационарных решений теории Эйнштейна–Скирма в асимптотически плоском пространстве с геометрией Керра[399], а также в пространстве с геометрией анти-де Ситтера[400].

---

[395] *Khastyan E., Krivonos S., Nersessian A.* // Phys. Lett. A. 2022. V. 452. P. 128442.

[396] *Sarkissian G. A., Spiridonov V. P.* // J. Phys. A. 2022. V. 55. P. 385203.

[397] *Herdeiro C., Perapechka I., Radu E., Shnir Y.* // Phys. Lett. B. 2019. V. 797. P. 134845; Phys. Lett. B. 2022. V. 824. P. 136811; *Dzhunushaliev V., Folomeev V., Shnir Y.* // Phys. Rev. D. 2023. V. 108. 065005.

[398] *Herdeiro C., Kunz J., Perapechka I., Radu E., Shnir Y.* // Phys. Lett. B. 2021. V. 812. P. 136027; Phys. Rev. D. 2021. V. 103. 065009.

[399] *Perapechka I., Radu E., Shnir Y.* // JHEP. 2018. V. 10. P. 119.

[400] *Perapechka I., Shnir Y.* // Phys. Rev. D. 2017. V. 95. 025024.

Доказано существование новых аксиально-симметричных стационарных решений массивной теории Эйнштейна–Клейна–Гордона с геометрией Керра в синхронном вращении с горизонтом событий[401]. С точки зрения голографической дуальности важным является выполненное исследование термодинамических характеристик черных дыр с неабелевыми полями материи в $SU(2)$-теории Эйнштейна–Янга–Миллса с геометрией анти-де Ситтера[402].

В ходе работ в этом направлении была развита и успешно применена новая техника численного решения уравнений общей теории относительности, основанная на формализме Эйнштейна–де Турка.

Исследовано поведение мультикомпонентных электрически заряженных гравитирующих систем полей материи, и показано, что дальнодействующие поля с кулоновской асимптотикой существенно влияют на наблюдаемые характеристики решений Райсснера–Нордстрема. При анализе локализованных гравитацией скалярных полей в двухкомпонентной модели Фридберга–Ли–Сирлина обнаружена бифуркация этих конфигураций с электровакуумным решением Райсснера–Нордстрема[403]. Вычислена однопетлевая поправка к эффективному потенциалу квантовой теории Фридберга–Ли–Сирлина, и показано, что масштаб, индуцированный механизмом Коулмена–Вайнберга, меняет асимптотическое поведение полей нетопологического солитона этой модели[404]. Нужно отметить, что результаты исследований локализованных полевых конфигураций в скалярных теориях поля суммированы в монографии[405].

Свойства черных дыр проявляются также в изучении некоторых одномерных механических систем. Исследована динамика пробных частиц, движущихся вблизи горизонта экстремальных черных дыр Майерса–Перри произвольной размерности[406]. Доказана интегрируемость этой системы, и проанализированы особые случаи фоновой геометрии, когда система обладает большим количеством констант движения и, следовательно, является суперинтегрируемой.

Заслуживает особого внимания новый подход к описанию дуально-симметричных моделей нелинейной электродинамики, развитый в работах[407]. Впоследствии он был расширен на взаимодействия с полями дилатона и аксиона[408].

---

[401] *Kunz J., Perapechka I., Shnir Y.* // Phys. Rev. D. 2019. V. 100. 064032.

[402] *Kichakova O., Kunz J., Radu E., Shnir Y.* // Phys. Rev. D. 2016. V. 93. 044037.

[403] *Kunz J., Loiko V., Shnir Y.* // Phys. Rev. D. 2022. V. 105. 085013; Phys. Rev. D. 2024. V. 110. 125020.

[404] *Kim E., Nugaev E., Shnir Y.* // Phys. Lett. B. 2024. V. 856. P. 138881.

[405] *Shnir Y.* Topological and Non-Topological Solitons in Scalar Field Theories. Cambridge Univ. Press, 2018.

[406] *Demirchian H., Nersessian A., Sadeghian S., Sheikh-Jabbari M. M.* // Phys. Rev. D. 2018. V. 97. 104004.

[407] *Ivanov E. A., Zupnik B. M.* // Yad. Fiz. 2004. V. 67. P. 2212; Phys. Rev. D. 2013. V. 87. 065023; Phys. Rev. D. 2013. V. 88. 045002; *Ivanov E. A., Nurmagambetov A. J., Zupnik B. M.* // Phys. Lett. B. 2014. V. 731. P. 298.

[408] *Ivanov E. A., Lechtenfeld O., Zupnik B. M.* // JHEP. 2015. V. 03. P. 123.

Отдельной интересной проблемой в исследованиях были решения важных математических задач в двух- и трехмерных полевых теориях. Были изучены интегралы произведений разреженных гиперболических гамма-функций[409], возникающих как статистические суммы трехмерных суперсимметричных теорий поля на общем сплющенном линзовом пространстве $L(r,p)$. В частности, получено интегральное тождество для парафермионных гиперболических гамма-функций, которое описывает соотношение типа звезда–треугольник для парафермионной двумерной теории поля Лиувилля, и вычислена матрица модулярных преобразований одноточечных конформных блоков в $N = 1$ суперсимметричной двумерной теории поля Лиувилля.

Рассмотрен предел[410], в котором отношение квазипериодов модулярного квантового дилогарифма Фаддеева (или гиперболической гамма-функции) стремится к значению, равному -1. Этот предел порождает множество интегральных соотношений для комплексной гамма-функции с многочисленными приложениями.

Изучена гипергеометрическая функция, описывающая 6j-символы для $SL(2,C)$ группы[411]. Показано, что она является специальным вырождением эллиптического обобщения гипергеометрической функции Эйлера–Гаусса. Кроме того, получено новое выражение для 6j-символов группы $SL(2,C)$, которое позволяет найти для них аналог дискретной симметрии Редже.

ТЕОРИИ МОДИФИЦИРОВАННОЙ ГРАВИТАЦИИ И КОСМОЛОГИЯ

К концу XX в. появились существенно новые данные наблюдений в области гравитации и космологии. Измеренная крайне низкая анизотропия реликтового излучения и открытие в 1998 г. ускоренного расширения Вселенной на основе наблюдений сверхновых утвердили представления о космологической инфляции и темной энергии, а также стимулировали попытки включения ускорения на раннем этапе эволюции Вселенной и современного ускорения в единую космологическою модель. Усилился интерес к построению (феноменологических) непротиворечивых моделей модифицированной гравитации. В то же время благодаря открытию гравитационных волн и созданию все более точных гравитационно-волновых детекторов появилась принципиальная возможность отсеивать модели, не соответствующие наблюдениям.

Сотрудниками ЛТФ под руководством А. А. Старобинского и А. Т. Филиппова исследовались модели модифицированной гравитации и их космологические следствия, был получен ряд важных результатов.

---

[409] *Apresyan E., Sarkissian G. A.* // JHEP. 2024. V. 07. P. 127; *Apresyan E., Sarkissian G. A., Spiridonov V. P.* // Nucl. Phys. B. 2023. V. 990. P. 116170; *Sarkissian G. A., Spiridonov V. P.* // JHEP. 2018. V. 10. P. 097.

[410] *Sarkissian G. A., Spiridonov V. P.* // J. Phys. A. V. 55. 2022. P. 385203; Functional Anal. and Its Applications. 2021. V. 55. P. 260; SIGMA. 2020. V. 16. P. 074; J. Geom. Phys. 2024. V. 203. P. 105274.

[411] *Деркачов С. Е., Саркисян Г. А., Спиридонов В. П.* // ТМФ. 2022. Т. 213. С. 108.

Наряду с феноменологическими моделями, построенными путем добавления новых скалярных полей, таких как инфлатон и фантомные поля, в ЛТФ исследовались теории, в которых новые степени свободы возникают естественным образом. К таким теориям относится аффинная гравитация Эйнштейна–Вейля–Эддингтона, которая рассматривалась в работах А. Т. Филиппова и Е. А. Давыдова[412]. На уровне эффективного действия помимо члена Эйнштейна–Гильберта в такой теории возникает космологическая постоянная, а также новое массивное векторное поле геометрического происхождения. Существенным новым результатом стало открытие дуальности этой модели при сферической и космологической редукциях и модели дилатонной гравитации со скалярными полями, а также условий интегрируемости, что демонстрирует совместимость этой модификации гравитации с доминирующей в настоящее время феноменологической космологической моделью ΛCDM.

П. В. Третьяковым с соавторами была рассмотрена Вселенная Фридмана с осциллирующим взаимодействием между темной энергией и темной материей и предложен сценарий последовательного объединения ускоренного расширения на ранних и поздних этапах эволюции в рамках одного подхода[413]. К проблеме темной материи также обращался в своих работах А. Б. Пестов.

В цикле работ[414] исследовалась космология в моделях $f(R)$-гравитации, которая является простейшим обобщением ОТО, и $f(T)$-гравитации[415], которая совпадает с ОТО только в линейном приближении. Для $f(R)$-гравитации были построены модели инфляции в режиме медленного скатывания с одним или двумя динамическими скалярными полями, и предложено обобщение на случай трех скалярных полей. В $f(T)$-гравитации со скаляром кручения T, известной также как телепараллельная гравитация, в рамках ковариантного подхода были вычислены скалярные космологические возмущения. В $f(T)$-гравитации с веществом в виде классической идеальной жидкости были найдены решения с отскоком, что может решить проблему первоначальной сингулярности[416].

Была исследована динамика скалярного поля в моделях гравитации Эйнштейна–Гаусса–Бонне с динамической компактификацией[417], когда дополнительные измерения в ходе эволюции Вселенной стали малыми, но тем не менее могут косвенно влиять на общую структуру пространства. Показано, что если поле неминимально связано с кривизной, его асимптотическое значение может не совпадать с минимумом потенциала при

---

[412] *Filippov A. T.* // Theor. Math. Phys. 2010. V. 163. P. 753; Theor. Math. Phys. 2013. V. 177. P. 1555; *Davydov E. A., Filippov A. T.* // Grav. Cosmol. 2013. V. 19. P. 209.

[413] *Odintsov S. D., Oikonomou V. K., Tretyakov P. V.* // Phys. Rev. D. 2017. V. 96. 044022.

[414] *Bahamonde S. et al.* // Phys. Lett. B. 2017. V. 766. P. 225;
Tretyakov P. // Eur. Phys. J. C. 2018. V. 78. P. 896.

[415] *Toporensky A., Tretyakov P.* // Phys. Rev. D. 2020. V. 102. 044049; Int. J. Geom. Meth. Mod. Phys. 2022. V. 19. P. 2250147.

[416] *Tretyakov P. V.* // Mod. Phys. Lett. A. 2022. V. 37. P. 2250046.

[417] *Chirkov D., Giacomini A., Toporensky A., Tretyakov P.* // Gen. Rel. Grav. 2024. V. 56. P. 110.

определенных параметрах. Благодаря влиянию дополнительных измерений скалярное поле с простым потенциалом четвертого порядка может стабилизироваться вдали от нулевого значения поля, что означает эффективное нарушение симметрии в такой системе.

Актуальным направлением исследований стали теории Хорндески, объединяющие широкий класс неминимальных моделей гравитации, свободных от неустойчивости Остроградского.

В космологическом контексте векторно-тензорная теория Хорндески с $SU(2)$ полем Янга–Миллса, обеспечивающим изотропность решения, впервые подробно изучалась в работах Д. В. Гальцова (МГУ) и Е. А. Давыдова[418]. Было показано естественное возникновение решения инфляционного типа, способного решить проблему начальных данных для наблюдаемой инфляции. Оказалось, что на текущем уровне экспериментальных возможностей в космологических наблюдениях для векторно-тензорной теории Хорндески метрический подход и подход Палатини неразличимы, но демонстрируют существенно различное поведение вблизи начальной сингулярности.

Квантовые эффекты могут изменять структуру скалярно-тензорной теории, порождая новые неминимальные связи между скалярным полем и гравитацией, которые принадлежат к расширенной теории Хорндески. Возможность генерации таких взаимодействий рассматривалась в серии статей Б. Латоша[419].

Доступные данные скорости гравитационных волн в современной Вселенной накладывают ограничение на значение соответствующей константы связи и изменение скалярного поля во времени. Было показано, что новые взаимодействия испытывают сильное подавление, поэтому теория остается согласованной с наблюдениями.

ГРАВИТАЦИОННЫЕ УДАРНЫЕ ВОЛНЫ В ОБЩЕЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Гравитационная ударная волна представляет собой геометрию, в которой компоненты поперечной кривизны изменяются скачком на нулевой гиперповерхности — фронте волны. Эти классические решения уравнений Эйнштейна стали объектом пристального внимания теоретиков после знаменитого наблюдения Г. ’т Хофта о так называемом доминировании гравитонов в рассеянии сверхвысоких энергий. Оказалось, что амплитуда классического рассеяния на гравитационных ударных волнах воспроизводит вклад всех лестничных диаграмм обмена гравитонами в квантовых амплитудах. Кроме того, сталкивающиеся ударные волны — это модель образования микроскопических черных дыр при столкновениях частиц на планковских энергиях.

---

[418] *Davydov E., Gal’tsov D.* // Phys. Lett. B. 2016. V. 753. P. 622; *Davydov E.* // Int. J. Mod. Phys. D. 2017. V. 27. P. 1850038.

[419] *Latosh B.* // Eur. Phys. J. C. 2020. V. 80. P. 845; Mod. Phys. Lett. A. 2021. V. 36. P. 2150258.

В цикле работ группы Д. В. Фурсаева, Е. А. Давыдова, И. Г. Пироженко и В. А. Тайнова[420] исследовались физические эффекты, обусловленные воздействием плоской ударной гравитационной волны на поля разных спинов. Гравитационные ударные волны порождаются объектами, движущимися со скоростью света, такими, как безмассовые частицы, нулевые космические струны и нуль-браны.

В ЛТФ разработан метод, позволяющий описывать полевые возмущения от ударных гравитационных волн как на самом фронте волны, так и за ним. Для этих возмущений сформулирована характеристическая задача Коши с начальными данными на фронте гравитационной волны. Показано, что эффект гравитационной памяти для скалярного и электромагнитного полей определяется только этими начальными данными, т. е. профилем ударной волны, и не зависит от формы сигнала.

Предсказаны новые физические эффекты: возникновение электромагнитных и гравитационных волн при взаимодействии точечных зарядов или масс с ударной гравитационной волной, возникновение вторичных ударных волн в самих полевых системах и ряд других эффектов. Предложен новый механизм возникновения быстрых гамма-всплесков (FRB).

КВАНТОВАЯ ГРАВИТАЦИЯ, АНОМАЛИИ, СВЯЗЬ МЕЖДУ ГРАВИТАЦИЕЙ, ТЕРМОДИНАМИКОЙ И КВАНТОВЫМ ПЕРЕПУТЫВАНИЕМ

Хотя пертурбативный подход к квантовой гравитации имеет ограниченную область применения, его использование выявило ряд концептуальных проблем, которые должны быть разрешены в полноценной теории квантовой гравитации. Наиболее важные проблемы включают понимание испарения квантовых черных дыр и объяснение информационного парадокса, а также выявление микроскопических степеней свободы, ответственных за энтропию черных дыр[421]. После прямого обнаружения гравитационных волн от слияний двойных черных дыр и наблюдений теней сверхмассивных черных дыр теоретические исследования в этой области получили новый импульс.

В области квантовой гравитации в ЛТФ активно развивался аппарат квантовой теории поля во внешнем классическом гравитационном поле и новые методы для приближенной оценки эффективного гравитационного действия в различных режимах. Для задач КТП с границами, конечно-температурной КТП на стационарных многообразиях общего вида, термодинамики черных дыр, а также для расчета эффектов кварк-глюонной материи с учетом вращения и ускорения в ЛТФ применялись и совершенствовались методы спектральной геометрии (спектральные дзета-функции,

[420] *Fursaev D. V., Davydov E. A., Pirozhenko I. G., Tainov V. A.* // Phys. Rev. D. 2024. V. 109. 125009; JHEP. 2024. V. 11. P. 039; Phys. Rev. D. 2024. V. 109. 025012; Phys. Rev. D. 2023. V. 107. 025018; Phys. Rev. D. 2022. V. 105. 083510.

[421] *Fursaev D. V.* Black Hole Thermodynamics and Perturbative Quantum Gravity. // Handbook of Quantum Gravity / Eds. C. Bambi, L. Modesto, I. Shapiro. Singapore: Springer, 2024.

Д. И. Казаков, А. П. Исаев

Н. А. Тюрин

С. А. Федорук, А. П. Нерсесян

И. Л. Бухбиндер, А. О. Сутулин

А. С. Сорин, Б. М. Зупник, С. О. Кривонос, С. А. Федорук, Е. А. Иванов

С. С. Сидоров

Г. Саркисян

С. О. Кривонос

В. А. Рубаков (ИЯИ РАН), В. А. Матвеев

М. А. Подойницын, Л. Н. Астраханцев

Е. А. Иванов

Д. В. Фурсаев

П. В. Третьяков

И. Г. Пироженко

Е. А. Давыдов

Х. Димов

17-я Зимняя школа DIAS-TH «Суперсимметрия и интегрируемость». Дубна, 2022 г.

метод разложения теплового ядра), что нашло отражение в монографии Д. В. Фурсаева и Д. В. Василевича[422], работах В. В. Нестеренко, И. Г. Пироженко.

В последние годы в ЛТФ активно изучалась связь между гравитацией, термодинамикой и квантовым перепутыванием, голографические свойства гравитации и AdS/CFT соответствие[423]. Исследованы интегральные конформные аномалии в конформной теории поля с границами[424]. Изучалась классическая гравитация на многообразиях с коническими сингулярностями с нарушенными изометриями[425].

КВАНТОВО-ПОЛЕВЫЕ ВАКУУМНЫЕ ЭФФЕКТЫ

Традиционным направлением исследований являются эффекты, которые обусловлены границами квантово-полевой системы. Первоначально влияние границ на вакуумную энергию системы исследовалось в группе Б. М. Барбашова и В. В. Нестеренко применительно к струнным моделям[426], где вакуумная энергия определяет критическую размерность пространства-времени (фундаментальные струны) или межкварковый потенциал (теория адронных струн).

Исследование энергии вакуума в (3+1)-мерном пространстве-времени, где физические границы приводят к наблюдаемым квантовым эффектам, таким как силы Казимира, может быть сложной проблемой, в которой должны учитываться свойства реальных материалов, их геометрия, фоновые поля и т. д. В ряде задач, имеющих прикладное значение, рассматривалось влияние физических характеристик материальных тел на вакуумные силы между ними[427], в частности, вопрос о корректном учете диссипации при расчете силы Казимира между материальными телами (В. В. Нестеренко[428]). Также в связи с потребностями прецизионных экспериментов исследовалось совместное влияние на силу Казимира геометрии системы и температуры (М. Бордаг, И. Г. Пироженко[429]).

В скалярной теории поля А. С. Сориным в соавторстве с В. Ф. Мухановым (Мюнхенский университет им. Людвига и Максимилиана, Германия) и Э. Рабиновичем (Институт физики им. Рака Еврейского университета в Иерусалиме, Израиль) пересмотрен и обобщен подход к распаду ложно-

---

[422] *Fursaev D., Vassilevich D.* Operators, Geometry and Quanta: Methods of spectral geometry in quantum field theory. Springer, 2011.

[423] *Fursaev D. V.* Boundary and Defect CFT: Open Problems and Applications // J. Phys. A. 2020. V. 53. P. 453002.

[424] *Fursaev D.V., Solodukhin S. N.* // Phys. Rev. D. 2016. V. 93. 084021.

[425] *Fursaev D.V., Patrushev A., Solodukhin S. N.* // Phys. Rev. D. 2013. V. 88. 044054.

[426] *Barbashov B. M., Nesterenko V. V.* Introduction to the relativistic string theory. World Sci., 1990.

[427] *Bordag M., Pirozhenko I. G.* // Phys. Rev. D. 2017.V. 95. 056017; Phys. Rev. D. 2015. V. 91. 085038; Symmetry. 2018. V. 10. P. 74.

[428] *Nesterenko V. V.* // Eur. Phys. J. C. 2022. V. 82. P. 874.

[429] *Bordag M., Pirozhenko I. G.* // Phys. Rev. D. 2010. V. 81. 085023; Phys. Rev. D. 2010. V. 82. 125016.

го вакуума и построен широкий класс неограниченных потенциалов, для которых не существует инстантонов Коулмена[430]. Предложены новые инстантоны, которые обеспечивают распад ложного вакуума для таких потенциалов. Для пространств любого числа измерений найдены интегрируемые потенциалы, для которых инстантонные уравнения вполне интегрируемы. Разработан новый метод оценки вероятности распада ложного вакуума с помощью регуляризованных инстантонов.

[430] *Mukhanov V.F., Rabinovici E., Sorin A.S.* // Fortsch. Phys. 2021. V. 69. P. 2000100; Fortsch. Phys. 2021. V. 69. P. 2000101; *Mukhanov V., Sorin A.* // JCAP. 2021. V. 10. P. 066.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Лаборатория вычислительной техники и автоматизации (ЛВТА) была образована приказом по ОИЯИ № 149 от 19 августа 1966 г. по инициативе директора ОИЯИ академика Н. Н. Боголюбова. Организация ЛВТА была поручена члену-корреспонденту АН СССР Михаилу Григорьевичу Мещерякову — известному физику-экспериментатору, уже имевшему с конца 1940-х гг. опыт руководства по созданию синхроциклотрона и первой научной лаборатории (ныне Лаборатории ядерных проблем) Института. Первыми в состав ЛВТА влились группы математиков Е. П. Жидкова и Н. Н. Говоруна из Лаборатории теоретической физики и Вычислительного центра ОИЯИ, а также несколько групп из экспериментальных лабораторий ОИЯИ под руководством Ю. А. Каржавина, Г. И. Забиякина и В. И. Мороза.

Основные направления научной деятельности ЛВТА остаются актуальными и по сей день: обеспечение теоретических и экспериментальных исследований вычислительными и информационными ресурсами, а также разработка методов, алгоритмов и программного обеспечения для широкого круга исследований, проводимых в ОИЯИ.

Сразу после образования лаборатории появилась потребность в многообразии вычислительных средств, что в конечном итоге предопределило последующее создание высокопроизводительного многомашинного комплекса с развитой иерархической структурой. Появившаяся в начале 1980-х гг. технология сетевой среды передачи данных дала толчок для построения в ЛВТА первой в России локальной терминальной сети JINET, создания высокоскоростного телекоммуникационного канала связи Дубна–Москва и дальнейшего вхождения Института в международные глобальные компьютерные сети для науки и образования.

В 2000 г. ЛВТА была переименована в Лабораторию информационных технологий (ЛИТ). Первым директором ЛИТ Ученым советом ОИЯИ был избран профессор И. В. Пузынин, математик, известный своими научными работами, в том числе по мю-катализу, а его заместителями стали В. В. Кореньков, В. В. Иванов и А. Я. Полянский (Республика Польша).

С 2003 по 2013 г. лабораторию возглавлял В. В. Иванов — признанный специалист в области разработки и применения новых математических методов в решении физических задач. Его заместителями стали П. В. Зрелов, В. В. Кореньков, Г. Адам (Румыния) — с 2003 по 2009 г. и С. А. Адам (Румыния) — с 2009 по 2013 г.

В 2013 г. директором ЛИТ был избран В. В. Кореньков, который с 1993 г. возглавлял направление развития вычислительной техники и информационных технологий. Его заместителями были Т. А. Стриж — с 2013 по 2023 г., Г. Адам (Румыния) — с 2013 по 2018 г., Я. Буша (Словакия) — с 2019 по 2023 г. и О. Чулуунбаатар (Монголия) — с 2019 г.

В марте 2021 г. Комитет полномочных представителей постановил присвоить Лаборатории информационных технологий имя Михаила Григорьевича Мещерякова за его выдающийся вклад в создание, становление и развитие сетевой инфраструктуры и информационно-вычислительного комплекса лаборатории, Института и стран-участниц.

С 2023 г. лабораторией руководит С. В. Шматов, область интересов которого — поиск физики за пределами Стандартной модели, физика тяжелых ионов, компьютинг физики высоких энергий. Его заместителями были избраны академик АН Монголии О. Чулуунбаатар, Н. Н. Войтишин и Д. В. Подгайный.

За 60 лет со дня образования лаборатория прошла большой путь, по которому можно проследить ход развития вычислительных и информационных технологий: от первой вычислительной машины «Урал-1», через БЭСМ-4, БЭСМ-6 и машины серий ЕС, СДС, Sun, Vax, Convex и др., к Многофункциональному информационно-вычислительному комплексу (МИВК), сегодня являющемуся базовой установкой ОИЯИ и ключевым звеном сетевой и информационно-вычислительной инфраструктуры ОИЯИ.

МИВК рассматривается как уникальная базовая установка ОИЯИ и играет определяющую роль в научных исследованиях, для проведения которых требуются современные вычислительные мощности и системы хранения. Уникальность МИВК обеспечивается сочетанием всех современных информационных технологий: сетевой инфраструктуры с пропускной способностью от 2×100 до 4×100 Гбит/с, распределенной системой обработки и хранения данных, основанной на грид-технологиях и облачных вычислениях, гиперконвергентной вычислительной инфраструктурой на жидкостном охлаждении для суперкомпьютерных приложений. Многофункциональность, высокая надежность и доступность в режиме $24 \times 7 \times 365$, масштабируемость и высокая производительность, надежная система хранения данных, информационная безопасность и развитая программная среда являются основными

требованиями, которым удовлетворяет МИВК. Надежность и доступность МИВК обеспечивается развитой системой высокоскоростных телекоммуникаций и современной локальной сетевой инфраструктурой, а также инженерной инфраструктурой, обеспечивающей гарантированное энергообеспечение и холодоснабжение серверного оборудования. Компьютерная инфраструктура ОИЯИ включает в себя IT-экосистему для проекта NICA (BM@N, MPD, SPD), в которую благодаря грид-технологиям включены все вычислительные компоненты и системы хранения МИВК, грид-сайт Tier-1 для эксперимента CMS на LHC и экспериментов на NICA, Tier-2/ЦИВК, обеспечивающий поддержку всех экспериментов на LHC, NICA и других масштабных экспериментов, а также поддержку пользователей лабораторий ОИЯИ и стран-участниц, интегрированную облачную среду стран-участниц для поддержки пользователей и экспериментов (NICA, NOvA, Baikal-GVD, JUNO и т. д.), платформу HybriLIT с суперкомпьютером «Говорун» как основным ресурсом для суперкомпьютерных вычислений и обеспечения возможностей как разработки математических моделей и алгоритмов, так и проведения ресурсоемких расчетов, в том числе на графических ускорителях, позволяющих развивать экосистему для задач ML/DL, анализа больших данных и квантовых вычислений на симуляторах.

Другое направление деятельности лаборатории связано с организацией и обеспечением вычислительной, алгоритмической и программной поддержки подготовки и реализации экспериментальных и теоретических исследований, проводимых с участием ОИЯИ, разработкой, развитием и использованием вычислительных методов для моделирования сложных физических систем. Сотрудниками ЛИТ осуществляется разработка математических методов и программного обеспечения, в том числе на основе алгоритмов машинного и глубокого обучения с использованием рекуррентных и сверточных нейронных сетей, для моделирования физических процессов и экспериментальных установок, обработки и анализа данных экспериментов в области физики элементарных частиц, ядерной физики, физики нейтрино, радиобиологии и др. Особое внимание уделяется созданию систем распределенной обработки и анализа данных экспериментов и информационно-вычислительных платформ поддержки исследований, проводимых в ОИЯИ и других исследовательских центрах.

ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ КАНАЛЫ СВЯЗИ

Вычислительная сеть ОИЯИ имеет долгую историю, уходящую корнями в далекое прошлое, когда были успешно реализованы первые подключения экспериментальных установок к ЭВМ, связь нескольких ЭВМ между собой, сети терминалов БЭСМ-6 и CDC и др. В 1985 г. была создана первая общеинститутская терминальная сеть JINET (Joint Institute Network), программное обеспечение которой было полностью разработано в ЛВТА и было уникальным. Эти работы велись под руководством Н. Н. Говоруна большой командой программистов и инженеров, в числе которых были В. П. Шириков, Е. Ю. Мазепа, И. А. Емелин, Н. С. Заикин, В. Я. Фарисеев, В. Е. Аниховский, В. В. Галактионов, А. Т. Дорохин, С. Г. Каданцев, А. П. Кретов, Д. Н. Лопырев, В. И. Первушов, С. А. Щелев. Надо отметить, что в ЛВТА всегда четко отслеживали мировые тенденции в области информационных технологий и внедряли у себя все передовые достижения.

Стремительное развитие сетевых, компьютерных и информационных технологий создало объективные предпосылки для построения единой информационно-вычислительной среды ОИЯИ и институтов стран-участниц на качественно новом уровне. На сегодня она объединяет в себе тысячи персональных компьютеров и сотни серверов различного назначения, установленных во всех подразделениях Института и территориально разнесенных на несколько километров. Скелетом этого огромного комплекса является сетевая инфраструктура, включающая в себя оптоволоконную кабельную структуру и программно-аппаратные средства, обеспечивающие прием, передачу и коммутацию информационных потоков комплекса. Эта сетевая инфраструктура находится в процессе непрерывной модернизации, так как она должна соответствовать современным требованиям по уровню оснащенности информационно-вычислительных структур научно-исследовательских организаций надежными отказоустойчивыми сетевыми сервисами с необходимой пропускной способностью. Такая сеть должна хорошо масштабироваться и обладать всеми необходимыми качествами для удовлетворения постоянно возрастающих потребностей как в улучшенных характеристиках сети, так и в количестве сетевых и компьютерных сервисов; она должна легко адаптироваться под появляющиеся на рынке новые сетевые и серверные устройства, программные продукты.

В реализации задачи развития сетевой инфраструктуры ОИЯИ можно выделить следующие основные направления:

1) развитие внешних каналов связи;
2) развитие локальной сети ОИЯИ;
3) развитие сетевой инфраструктуры МИВК и мегапроекта NICA.

ВНЕШНИЕ КАНАЛЫ СВЯЗИ

В 2000 г. емкость и пропускная способность телекоммуникационной системы ОИЯИ составляла всего 2 Мбит/с. Основным Интернет-провайдером для ОИЯИ являлся Российский научно-исследовательский институт развития общественных сетей (РосНИИРОС), который к концу 2000 г. обеспечивал для ОИЯИ платный доступ в международные сети на уровне 1 Мбит/с в общем потоке (как пользователя сети RBNet) и доступ к российским сетям в рамках межведомственной программы развития сетей и телекоммуникаций для науки и высшей школы. Однако такая пропускная способность не соответствовала потребностям ОИЯИ.

В 2001 г. был подписан трехсторонний договор между ОИЯИ, РосНИИРОС и ГПКС (государственное предприятие «Космическая связь») о создании АТМ-канала емкостью 155 Мбит/с между Москвой и Дубной. Основной партнер для решения этой проблемы — ГПКС, которому принадлежат оптоволоконные кабели между Москвой (Шаболовка) и Дубной (ЦКС «Дубна»). Общая длина одного кабеля составляет около 200 км, канал имеет три промежуточных пункта (Старбеево, Радищево, Конаково). Таким образом, ОИЯИ получил порт и арендовал полосу пропускания в этом канале в 30 Мбит/с.

Основной сервис — провайдер ОИЯИ для доступа в Интернет — RBNet (Russian Backbone Network) имел хорошо развитую инфраструктуру в России: магистральные каналы, опорные точки во многих крупных городах. Головной организацией по поддержке сети RBNet был РосНИИРОС, который также являлся оператором международного канала для науки и образования и отвечал за функционирование Internet Exchange (IX) в Москве. В 2002 г. в указанном международном канале для ОИЯИ была выделена гарантированная полоса пропускания в 10 Мбит/с.

Дальнейшее развитие внешних коммуникаций ОИЯИ было связано с реализацией межведомственной программы «Создание национальной научной компьютерной сети нового поколения» на 2002–2006 гг. и российского grid-сегмента. Следует отметить, что в 2003 г. был реализован первый проект в рамках создания корпоративной компьютерной сети ОИЯИ — совместно с ЦКС «Дубна» проведен монтаж и наладка сети пансионата «Дубна» в Алуште. Во время трех международных совещаний была обеспечена компьютерная связь для участников и созданы условия для проведения телеконференций.

Задача обеспечения ОИЯИ быстродействующими каналами связи имела своей главной целью создание в 2005 г. канала передачи данных ОИЯИ–Москва с пропускной способностью 1 Гбит/с. Она была успешно решена.

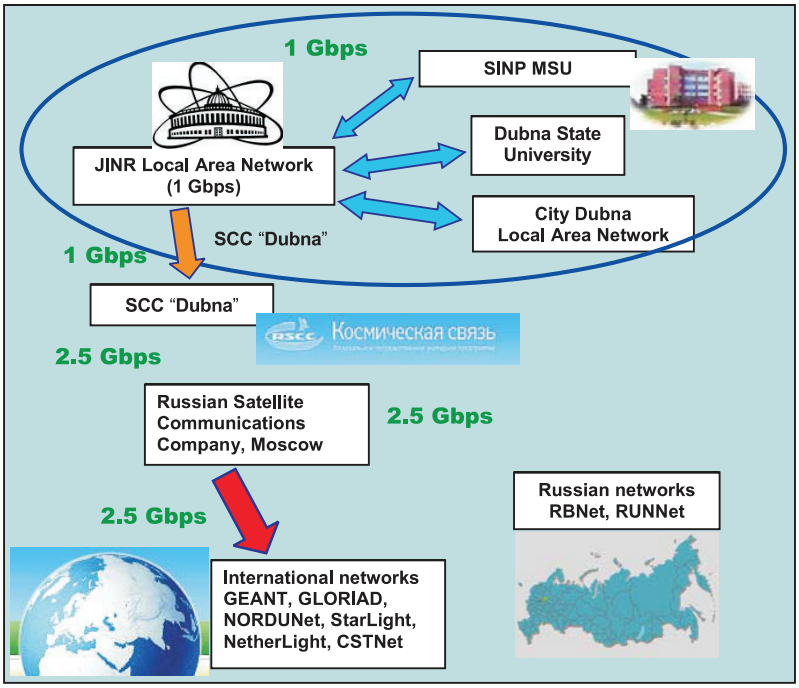


Рис. 1. Схема телекоммуникационных каналов ОИЯИ в 2005 г.

С 2007 г. специалисты ЛИТ занимались всем комплексом вопросов по созданию 10-гигабитного внешнего канала.

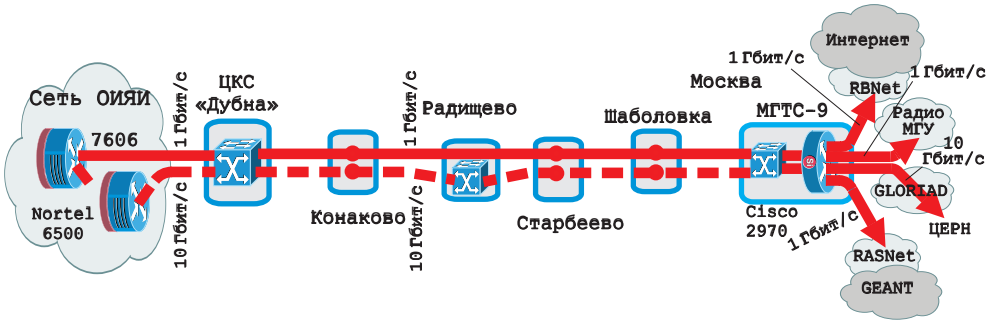
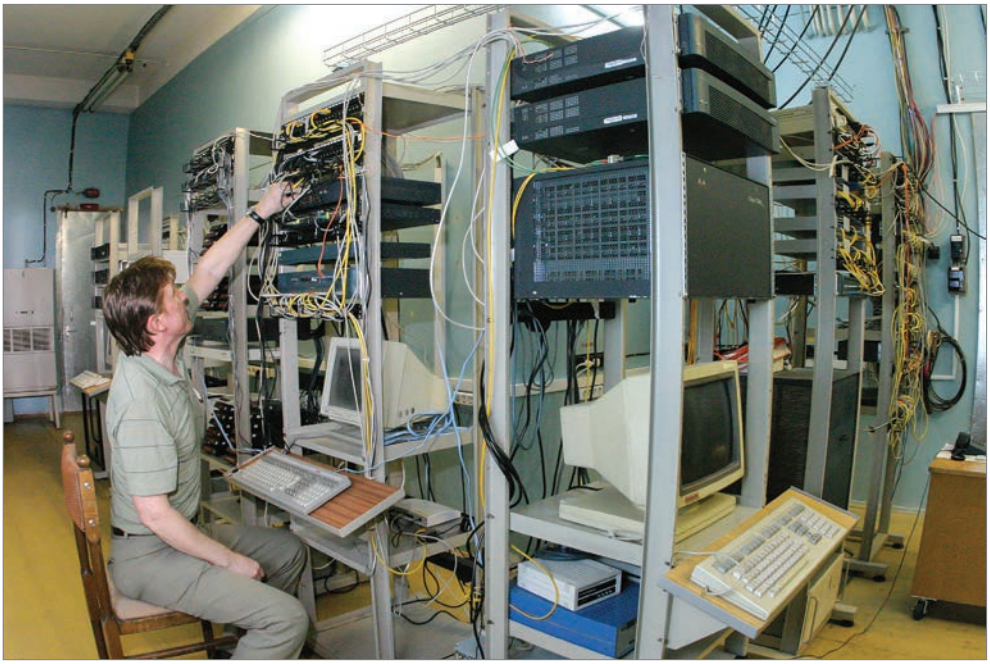


Рис. 2. Схема телекоммуникационных каналов ОИЯИ: сплошная линия — действующий канал 1 Гбит/с, штриховая — планируемый канал 10 Гбит/с. 2007 г.

В 2008 г. был подписан новый договор между ОИЯИ и ГПКС об аренде волоконно-оптического кабеля для организации каналов связи между Москвой и Дубной. В рамках этого проекта с использованием современных технологий DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) и 10Gb Ethernet был построен высокоскоростной канал связи Дубна–Москва. Реализованная технология подразумевает спектральное разделение полосы пропуска-



А. Г. Долбилов за настройкой сетевого оборудования. 2005 г.

ния волокна на несколько оптических потоков, что позволяет использовать много потоков в одном оптическом волокне, разделяя их по длине волны. Используемые технологии позволили осуществлять поэтапное расширение каналов связи (от 10 до сотен Гбит/с) и перейти на новый уровень сервиса.

Развитие международного сегмента каналов связи для науки и образования России с Европой осуществляется в рамках проекта GEANT. В странах-участницах ОИЯИ строились региональные и национальные исследовательские и образовательные сети, многие из которых связаны с европейской сетью GEANT. В результате было реализовано объединение грид-инфраструктур ОИЯИ и стран-участниц через высокоскоростную европейскую сеть GEANT. Такой подход является общепринятым в Европе при объединении региональных сетей для науки и образования.

В 2009 г. пропускная способность канала увеличилась до 20 Гбит/с, а для связи с научными сетями и Интернетом использовался прямой канал связи с ЦЕРН емкостью 1 Гбит/с, канал RBNet — 10 Гбит/с, канал GEANT — 10 Гбит/с, канал через московские научные сети — 10 Гбит/с, Интернет — 10 Гбит/с.

К концу 2016 г. была проведена плавная модернизации внешнего канала до скорости 100 Гбит/с. Таким образом, образовалась внешняя распределенная сеть ОИЯИ, состоящая из внешней наложенной сети LHCOPN (ОИЯИ–ЦЕРН), проходящей через МГТС-9 в Москве, Будапешт и Амстердам, для связи центров Tier-0 (ЦЕРН) и Tier-1 (ОИЯИ) и внешней наложенной сети LHCONE, проходящей таким же маршрутом и предназна-

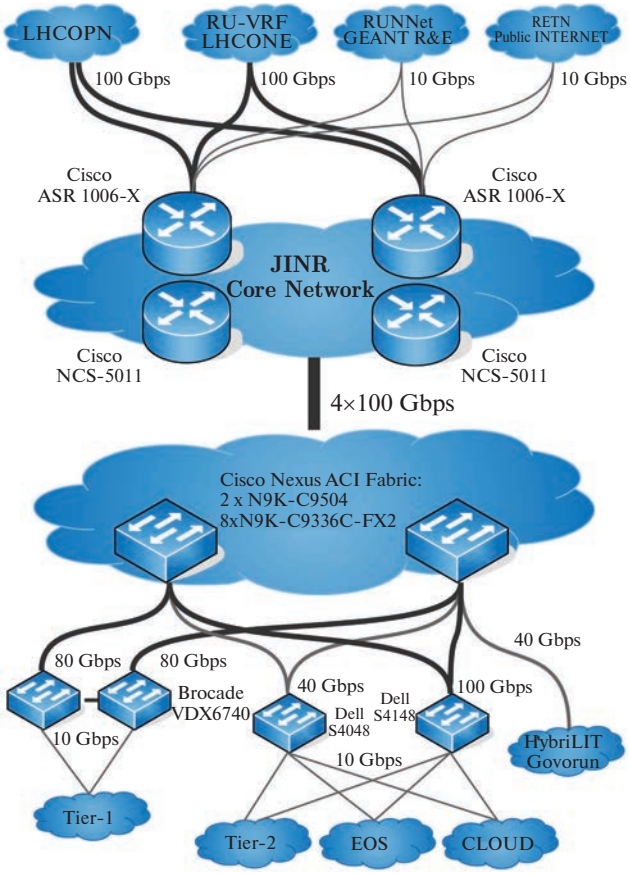


Рис. 3. Схема внешней распределенной сети ОИЯИ

ченной для центра Tier-2 ОИЯИ; прямых каналов для связи по технологии RU-VRF с коллаборацией научных центров RUHEP (Гатчина, НИЦ «Курчатовский институт», Протвино) и с сетями RUNNet, RASNet. Для сайтов Tier-1 и Tier-2 была поднята IPv6 маршрутизация.

К 2019 г. был реализован проект увеличения пропускной способности телекоммуникационного канала Москва–ОИЯИ со 100 до 3 × 100 Гбит/с.

Сегодня все телекоммуникационные каналы связи ОИЯИ надежно функционируют. В первую очередь это резервированный канал до Москвы с пропускной способностью 4 × 100 Гбит/с. Для работы грид-сайта уровня Tier-1 необходимо быть полноценным участником сети LHCOPN для связи с Tier-0 (ЦЕРН) и другими сайтами Tier-1. Эту связь обеспечивают прямой канал связи ОИЯИ–ЦЕРН 100 Гбит/с и резервный канал 100 Гбит/с, проходящий через Москву и Амстердам. Связность Tier-2 ОИЯИ обеспечена внешней наложенной сетью LHCONE, предназначенной для грид-сайтов второго уровня. Для связи с российскими институтами, участвующими в обработке данных с LHC, используется технология RU-VRF. Нацио-

нальная исследовательская компьютерная сеть (НИКС) России, созданная в результате интеграции федеральной университетской компьютерной сети RUNNet и сети организаций Российской академии наук RASNet, обеспечивает связь с научными и образовательными организациями Российской Федерации[1].

ЛОКАЛЬНАЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ СЕТЬ ОИЯИ

В 2001–2003 гг. локальная вычислительная сеть (ЛВС) ОИЯИ работала по технологии Fast Ethernet, скорость передачи данных 100 Мбит/с. Задача построения магистральной сети ОИЯИ по технологии Gigabit Ethernet (скорость передачи данных 1000 Мбит/с) ставилась многими руководителями научных экспериментов на программных комитетах по физике частиц и по ядерной физике. Высокоскоростная сеть была необходима для организации распределенных вычислений, эффективного использования больших компьютерных комплексов в лабораториях ОИЯИ, что особенно важно для обработки данных экспериментов на LHC в ЦЕРН, где ОИЯИ принимал и принимает активное участие. Поэтапная реализация этой задачи осуществлялась параллельно с бесперебойной работой сети по старой технологии. Была создана скоростная транспортная магистраль для передачи цифровой информации, соответствующая современным требованиям к уровню оснащенности сетевыми сервисами информационно-вычислительной инфраструктуры крупных научно-исследовательских организаций. По существу была реализована система массового обслуживания для нескольких тысяч сотрудников ОИЯИ. Применение маршрутизирующих коммутаторов в центральном ядре сети и сегментах подразделений ОИЯИ позволило масштабировать сеть в соответствии с постоянно возрастающими потребностями и создало предпосылки для ее дальнейшего развития. Пользователям был предоставлен внушительный список доступных сетевых сервисов, позволяющих осуществить объединение в единое информационное пространство всех компьютерных ресурсов ОИЯИ и организацию сетевого доступа к ним для различных групп пользователей, обеспечение доступа к информационно-вычислительным ресурсам российских и зарубежных научных центров, обеспечение удаленного доступа к ресурсам ОИЯИ с домашних компьютеров сотрудников Института, работу с web-серверами, почтовый сервис и др. Была решена на хорошем уровне проблема организации сетевой безопасности, т. е. защищенности сетевой и компьютерной инфраструктуры от различного рода атак, несанкционированных доступов, неквалифицированных действий персонала и пользователей и т. п. Кроме программных продуктов и сетевых устройств (в основном от фирмы Cisco, являющейся мировым лидером) для реализации проекта необходимо было проложить одномодовую волоконно-оптическую кабельную структуру, соединяющую

[1] *Velikhov V. E., Korenkov V. V., Ryabinkin E. A., Dolbilov A. G., Gugel Y. V., Strizh T. A.* The Russian Segment (RU-VRF) in WLCG Infrastructure: High Performance Computing Network // Intern. Conf. on Modern Network Technol. (MoNeTec), Moscow, Russian Federation, 2022. P. 1–4; doi: 10.1109/MoNeTec55448.2022.9960772.

все подразделения ОИЯИ. Такая структура была построена в 2003 г. При прокладке кабеля было организовано тринадцать точек коммутации в различных помещениях подразделений института, для чего выполнено более 400 оптических сварок. Создание гигабитной сетевой магистрали можно отнести к категории создания уникальной установки ОИЯИ.

Локальная сеть ОИЯИ на базе Gigabit Ethernet стала доступна пользователям в марте 2004 г. 3550 коммутаторов было установлено в восьми основных подразделениях ОИЯИ. Все сегменты, связанные между собой оптическим волокном, восходили к центральному коммутатору со свойствами маршрутизатора Cisco Catalyst 6509 в ЛИТ, формируя звездообразную топологию опорной сети ОИЯИ на основе технологии Gigabit Ethernet. В 2005 г. авторы работы по созданию гигабитной опорной сети были удостоены первой премии ОИЯИ (К. Н. Ангелов, Б. А. Безруков, А. Э. Гущин, И. Н. Емелин, В. В. Иванов, Л. А. Попов, А. Г. Долбилов, С. В. Медведь).

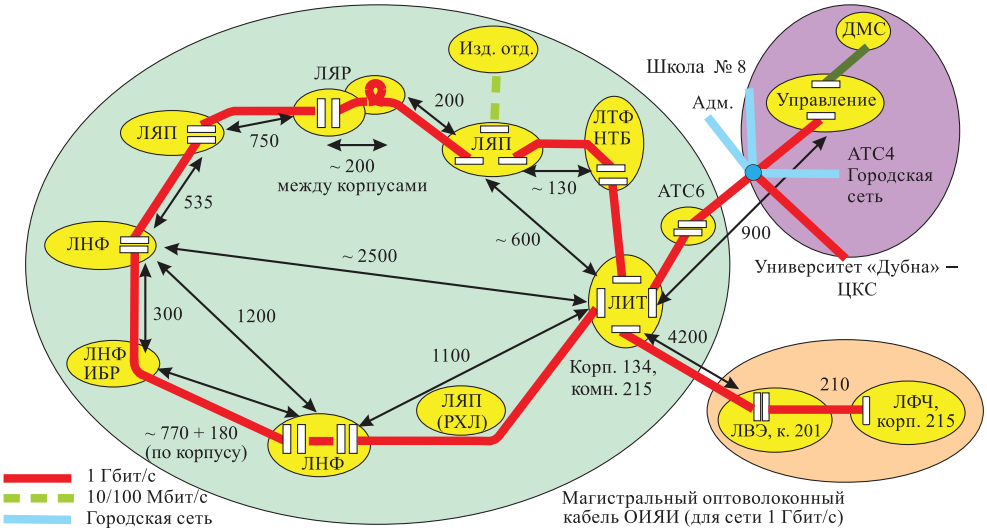


Рис. 4. Гигабитная опорная сеть ОИЯИ. 2004 г.

Работы по модернизации сети продолжались из года в год, и к 2007 г. была закончена модернизация центрального телекоммуникационного узла связи ОИЯИ.

В 2010 г. наряду с усовершенствованием и оптимизацией внешнего канала передачи данных и опорной сети ЛВС ОИЯИ были проведены работы по предоставлению в тестовом варианте централизованного беспроводного доступа в ОИЯИ, централизованных услуг VoIP и Video Conferencing.

В 2011 г. завершились работы по переходу в опорной сети ОИЯИ на 10 Гбит/с. На рис. 6 приведена схема подключения подразделений ОИЯИ к опорной сети.

В 2012 г. значительно расширились возможности для проведения видеоконференций. Был установлен сервер конференц-связи Cisco/Tandberg

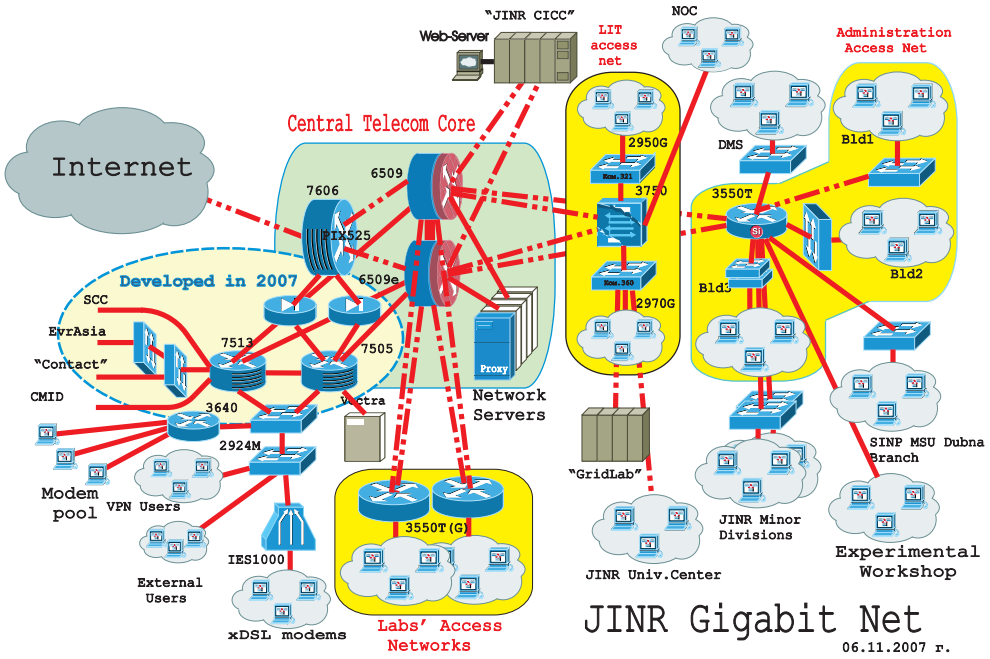


Рис. 5. Структура компьютерной сети ОИЯИ. 2007 г.

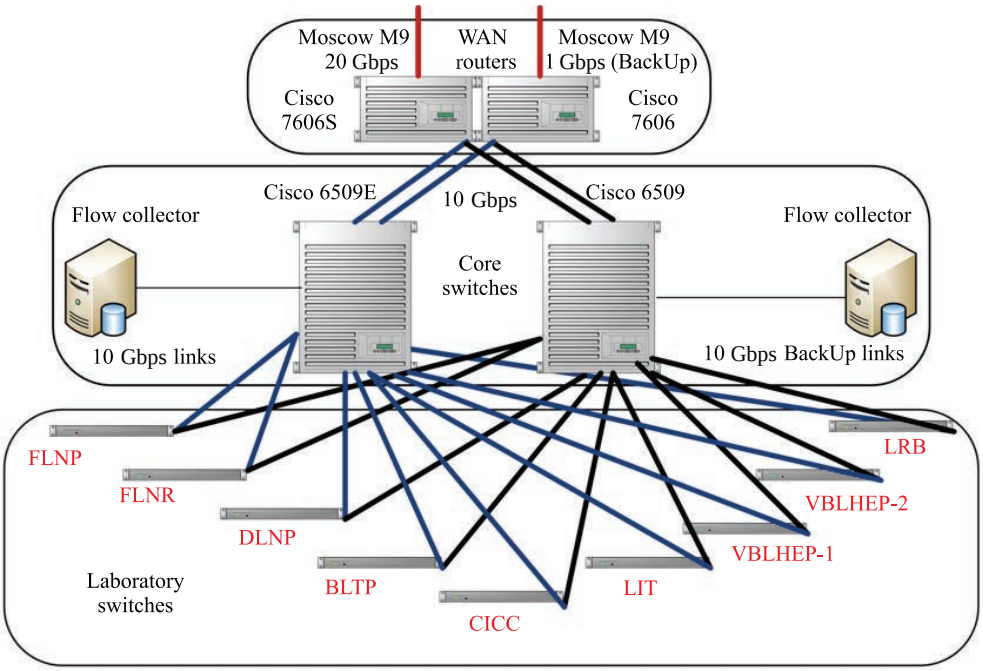


Рис. 6. Схема подключения подразделений ОИЯИ к опорной сети

MCU Codian 4505, способный обеспечивать настоящую мультимедийную среду высокой четкости и позволяющий организовать многоточечные видеоконференции. Одними из важнейших элементов обеспечения надежного и безопасного функционирования всей информационно-вычислительной среды ОИЯИ стали система мониторинга инфраструктуры NMIS (Network Management Information System) и IPDB база данных узлов сети ОИЯИ. Последняя используется и сегодня для регистрации и авторизации элементов и пользователей сети, визуализации статистики использования сети, поддержки базы данных удаленных пользователей, базы данных пользователей электронных библиотек и т. п.

В 2013–2016 гг. введена в эксплуатацию VoIP-телефония с возможностью голосовой связи с ОИЯИ из любой точки мира. Запущен в работу JINR Content Server, что позволило завершить создание системы видеоконференций с возможностью записи и воспроизведения потокового видео в режиме реального времени. Произведено подключение единой системы международной академической вычислительной сети с прозрачным роумингом eduroam, что позволило пользователям ОИЯИ подключаться к этой сети. Осуществлен переход подразделений ОИЯИ на единую общеинститутскую почтовую службу user@jinr.ru, на площадках ОИЯИ начал функционировать авторизованный Wi-Fi.

В 2017 г. были продолжены работы по развитию и совершенствованию сетевых компонентов IT-структуры ОИЯИ, призванные повысить ее эффективность. Локальная вычислительная сеть была переведена на протокол DHCP (Dynamic Host Configuration Protocol).

В 2019 г. пропускная способность опорной магистрали локальной вычислительной сети Института увеличена до 2×100 Гбит/с и построена распределенная вычислительная кластерная сеть между площадками ЛЯП и ЛФВЭ емкостью 400 Гбит/с с двойным резервированием для повышения надежности оптической транспортной магистрали. Введена в эксплуатацию фабрика Cisco ACI на базе оборудования Cisco Nexus 9504 и Cisco Nexus C9336C-FX2, позволяющая подключать компоненты МИВК на скоростях 100 Гбит/с и более. Для обеспечения необходимой пропускной способности и возможности резервирования подключение фабрики к опорной сети ОИЯИ осуществлялось четырьмя каналами по 100 Гбит/с. Сеть Tier-1 переведена на ACI-фабрику и имеет суммарное подключение 160 Гбит/с (4 канала по 40 Гбит/с). К ACI-фабрике подключены распределенная файловая система EOS, гетерогенная платформа HybriLIT, суперкомпьютер «Говорун», WEB-сервисы, Tier-2 и сети облачных вычислений.

В 2021 г. проведена модернизация центрального сетевого виртуального кластера сетевой службы ОИЯИ, который построен на базе открытого программного обеспечения (ПО) Proxmox VE (Virtual Environmnet) на базе лицензии GNU. Такой подход позволил использовать центральный кластер сетевой службы в непрерывном режиме работы 24×7. Особо следует отметить, что виртуальные машины, работающие в центральном кластере, обслуживают все важнейшие элементы сети ОИЯИ. На кластере электронной почты @jinr.ru внедрено новое программное обеспечение (Proxmox mail

gateway), значительно сократившее количество нежелательных сообщений (спама) за счет обучения системы механизмам спам-фильтрации.

В систему единой авторизации SSO добавлен постоянный мониторинг доступности и журналирование входов в сетевые сеансы.

Следует отметить, что за последние 20–25 лет число сетевых элементов увеличилось с 3105 в 2000 г. до 13 905 на начало 2025 г.

ГРИД-СРЕДА

Начиная с 2000 г. в мире интенсивно развивалась концепция грид (grid, название по аналогии с электрическими сетями — electric power grid)[2]. Ее появление было обусловлено необходимостью создания компьютерной инфраструктуры нового типа, обеспечивающей глобальную интеграцию информационных и вычислительных ресурсов на основе создания и развития управляющего и оптимизирующего промежуточного программного обеспечения (middleware) нового поколения. Суть концепции грид состоит в создании набора стандартизированных служб для обеспечения надежного, коллективного, доступного, всепроникающего и безопасного доступа к географически распределенным высокотехнологичным информационным и вычислительным ресурсам — хранилищам данных, компьютерам, кластерам, суперкомпьютерным центрам, специализированному программному обеспечению и инструментам и т. д. Так же как появление электрических сетей привело к кардинальному изменению в парадигме использования электрической энергии, Интернет глобализовал обмен информацией, а всемирная паутина WWW стандартизировала поиск и доставку документов, грид, в свою очередь, стал следующим этапом в этой цепочке революционных преобразований в высоких технологиях — стандартизации и глобализации использования всех видов компьютерных ресурсов.

Концепция грид возникла благодаря ряду факторов, таких как:

- резкое повышение производительности микропроцессоров массового производства — современный персональный компьютер сравним по производительности с суперкомпьютерами прошлого века;
- появление высокоскоростных линий связи;
- феномен WWW/Internet — глобализации обмена информацией;
- развитие методов метакомпьютинга — организация массовых и сложноструктурированных вычислительных процессов.

Подобная концепция оказалась весьма привлекательной при создании модели обработки данных (компьютинга) экспериментов на LHC в ЦЕРН. Это было связано не только с огромным объемом экспериментальных данных, которые планировалось получать в результате экспериментов, но и с необходимостью обеспечения доступа к этим данным для нескольких тысяч ученых во многих научно-исследовательских институтах и университе-

[2] *Кореньков В. В., Тихоненко Е. А.* Концепция grid и компьютерные технологии в эру LHC // ЭЧАЯ. 2001. Т. 32, вып. 6. С. 1458–1493.

тах, разбросанных по всему миру, участвующих в экспериментах на LHC. Кроме того, все данные должны были быть доступны на всем протяжении работы LHC. Для этого требовались беспрецедентные вычислительные мощности и системы хранения. Традиционный подход состоял бы в централизации всего этого в одном месте в непосредственной близости от проводимых экспериментов. Концепция грид как совершенно новая глобально распределенная модель хранения и анализа данных LHC была выбрана потому, что позволила:

- распределять затраты на поддержание и обновление необходимых ресурсов по отдельным институтам и участвующим национальным организациям, которые могли финансировать локальные вычислительные ресурсы и нести ответственность за них, внося свой вклад в достижение глобальной цели;
- иметь в распределенной системе меньше отдельных точек отказа и при этом иметь множественные копии данных и автоматическое распределение вычислительных задач по доступным ресурсам, что гарантирует балансирование загрузки ресурсов и облегчает доступ к данным для всех участников, независимо от их географического местоположения, а охват всех часовых поясов также облегчает круглосуточный контроль и поддержку.

Для моделирования распределенной вычислительной инфраструктуры центров для Большого адронного коллайдера в 1998 г. был создан специальный международный проект MONARC (Models of Networked Analysis at Regional Centers for LHC Experiments). Задача организации компьютинга была очень сложной, поскольку требовалось:

- обеспечить быстрый доступ к массивам данных колоссального объема;
- обеспечить прозрачный доступ к географически распределенным ресурсам;
- создать протяженную надежную сетевую инфраструктуру в гетерогенной среде.

В рамках проекта MONARC была разработана базовая модель компьютинга для экспериментов LHC как иерархическая централизованная структура региональных центров, включающая в себя центры нескольких уровней.

Методом имитационного моделирования была продемонстрирована эффективность иерархического принципа организации информационно-вычислительной системы LHC, предполагающей создание центров разных уровней или ярусов (Tier): Tier-0 (ЦЕРН) → Tier-1 → Tier-2 → Tier-3 → компьютеры пользователей.

Уровни различаются по масштабу ресурсов (сетевые, вычислительные, дисковые, архивные) и по выполняемым функциям:

- Tier-0 (ЦЕРН) — первичная реконструкция событий, калибровка, хранение копий полных баз данных;
- Tier-1 — полная реконструкция событий, хранение актуальных баз данных по событиям, создание и хранение наборов анализируемых событий, моделирование, анализ;

- Tier-2 — репликация и хранение наборов анализируемых событий, моделирование, анализ;
- Tier-3 — кластеры отдельных исследовательских групп.

В рамках этого проекта были проработаны требования к ресурсам и функциям региональных центров уровней Tier-0, Tier-1, Tier-2. Разработанная модель была реализована и успешно функционировала с момента запуска Большого адронного коллайдера. Однако опыт ее использования показал необходимость внесения изменений в иерархическую модель обработки. Для оптимизации загрузки систем хранения данных различных центров, повышения эффективности использования данных и скорости их обработки были введены дополнительные каналы передачи данных между центрами одного уровня (Tier-1 → Tier-1, Tier-2 → Tier-2). Также были введены дополнительные каналы, связывающие один центр уровня Tier-2 с несколькими центрами Tier-1 (а не с одним, как в жесткой иерархической модели). В настоящее время практически все центры уровней Tier-1 и Tier-2 связаны друг с другом каналами передачи данных.

ОИЯИ активно участвовал в экспериментах ALICE, ATLAS и CMS на LHC, начиная с этапа проектирования и создания детекторов, и в настоящее время продолжает принимать активное участие в работе действующего ускорителя и физических установок на нем. На этапе получения и обработки реальных данных LHC необходимо было обеспечить возможность полноценного участия ОИЯИ и стран-участниц в этих работах, что требовало (согласно принятой в ЦЕРН модели компьютинга на основе использования грид-технологий для LHC) создания в ОИЯИ и в России сегмента грид и последующего его включения в глобальную грид-инфраструктуру.

Для этих целей в конце 1999 г. был сформирован совместный проект «Российский информационно-вычислительный комплекс для обработки и анализа данных экспериментов на Большом адронном коллайдере» с девятью ведущими российскими физическими институтами-участниками LHC и ОИЯИ. Цель проекта — создание в России регионального вычислительного комплекса для обработки данных экспериментов на LHC[3]. За период менее года в ИТЭФ, ИФВЭ, НИИЯФ МГУ и ОИЯИ были созданы фермы персональных компьютеров, ориентированные на LHC. Программное окружение этих ферм было полностью унифицировано и соответствовало текущему состоянию специализированного программного обеспечения, используемого в ЦЕРН. Таким образом, было положено начало для разработки прототипа российского регионального центра. Вклад команды ЛИТ под руководством В. В. Коренькова состоял в установке промежуточного программного обеспечения GLOBUS, организации общего информационного сервера GRIS (Grid Resource Information Service) и GIIS (Grid Index Information Service), создании сертификационного центра, тестировании метадиспетчера, которому пользователи направляют свои задания для их распределения по свободным исполнительным узлам, развитии средств мониторинга ресурсов

[3] *Кореньков В., Ильин В., Солдатов А.* Российский сегмент глобальной инфраструктуры LCG // Открытые системы. 2003. Т. 1. С. 56–60.

Ферма персональных компьютеров в ЛИТ ОИЯИ. Слева направо: А. Петросян, Т. А. Стриж, Д. Чхаберидзе, Н. А. Кутовский, В. В. Кореньков, Р. Н. Семенов, А. В. Приходько, Е. А. Тихоненко, В. Позе, Н. Хубуа. 2004 г.

и сервисов в ОИЯИ, организации управления данными, массовом моделировании физических событий для экспериментов по физике частиц и создании распределенной базы данных на серверах центра.

В сентябре–октябре 2000 г. сотрудники ЛИТ ОИЯИ (В. В. Мицын, Е. А. Тихоненко, В. В. Галактионов, В. В. Трофимов и др.) на РС-ферме (16 процессорных единиц по 500 МГц) участвовали в сеансе массовой генерации событий для триггера высокого уровня CMS. Полученные данные были переданы в ЦЕРН для включения в объектно-ориентированную базу данных (Objectivity/DB), которая использовалась для выбора базовых единиц информации, оптимизации алгоритмов триггера и реконструкции событий. Возможности системы массовой памяти вычислительного центра ОИЯИ позволили проводить как тестирование различных моделей работы с большими объемами данных, так и работы по совершенствованию технологий совместного использования системы массовой памяти с институтами Москвы.

В 2001 г. при участии ОИЯИ проходило начальное тестирование грид-среды и отдельных грид-сервисов, а также была начата разработка систем глобального и локального мониторинга ресурсов виртуальных организаций в рамках европейского проекта EU DataGrid.

В 2003 г. для полноценного участия в проекте EGEE (Enabling Grid for E-Science) был образован консорциум RDIG (Российский грид для интенсивных операций с данными, Russian Data Intensive Grid)[4]. Меморандум

[4] *Ilyin V., Korenkov V., Soldatov A.* RDIG (Russian Data Intensive Grid) e-Infrastructure // Proc. XXI Intern. Symp. on Nucl. Electronics & Computing (NEC'2007, Varna, Bulgaria). Dubna, 2008. P. 233–238.

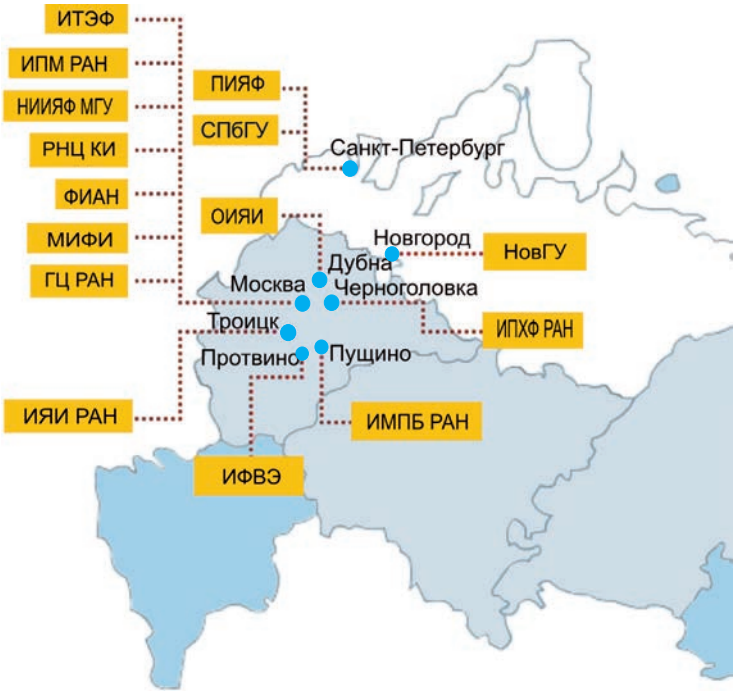


Рис. 7. Участники консорциума RDIG (2007 г.)

о создании консорциума был подписан руководителями восьми крупных институтов: Института физики высоких энергий (Протвино), Института математических проблем биологии (Пущино), Института теоретической и экспериментальной физики (Москва), Объединенного института ядерных исследований (Дубна), Института прикладной математики им. М. В. Келдыша (Москва), НИИ ядерной физики МГУ (Москва), Петербургского института ядерной физики (Санкт-Петербург) и РНЦ «Курчатовский институт» (Москва). В проекте EGEE ОИЯИ участвовал на всем протяжении его существования (с 2003 по 2010 г.) под руководством В. В. Коренькова. Два направления этого проекта в России — «Распространение знаний о гриде» и «Отбор и поддержка приложений» курировали Т. А. Стриж и Е. А. Тихоненко.

В течение 2003 г. ОИЯИ участвовал в сеансах массового моделирования событий для эксперимента CMS. Для моделирования событий использовался новый инструмент — грид-ресурс-брокер (Storage Resource Broker (SRB). Программа SRB, установленная в ОИЯИ, обеспечивала прямой доступ к общим базам данных эксперимента CMS на сервере в Великобритании (Бристоль) и открывала новые возможности для хранения и обмена данными в рамках коллаборации CMS.

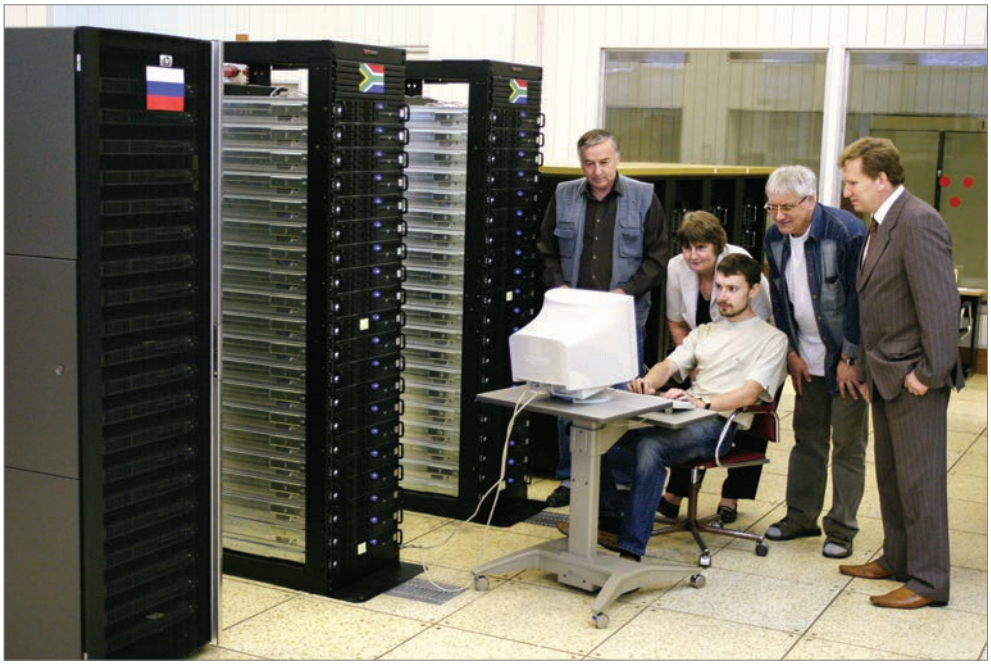
Были проведены опытные сеансы по передаче данных из Протвино на автоматизированную ленточную библиотеку ATL-2640 в Дубне для оценки пропускной способности и стабильности системы передачи данных, включая каналы связи и массовую память.

В 2004 г. в Дубне проходила международная конференция «Распределенные вычисления и грид-технологии в науке и образовании (GRID2004)». Конференция была первой в России, посвященной обсуждению вопросов, связанных с использованием грид и распределенных вычислений во всех областях. Эта конференция стала регулярной, и 11-я была проведена в 2025 г.

В 2004 г. созданный в ОИЯИ грид-сегмент стал одним из системообразующих компонентов пространства национальной сети грид. Грид-сайт ОИЯИ (JINR-LCG2) был успешно интегрирован в мировую грид-инфраструктуру проекта EGEE и проекта Worldwide LHC Computing Grid (WLCG) и до сих пор является ресурсным центром 2-го уровня согласно иерархии информационно-вычислительных центров для экспериментов на Большом адронном коллайдере. Ресурсы грид-сайта ОИЯИ успешно используются в глобальной инфраструктуре, а по показателям надежности работы сайт JINR-LCG2 является одним из лучших в инфраструктуре WLCG.

ЛИТ участвовал не только в международных, но и в российских проектах, связанных с распределенными вычислениями. Так, с 2007 г. ЛИТ участвует в проекте «СКИФ-грид», выполняемом по программе научно-технического сотрудничества Союзного государства Россия–Беларусь «Разработка и использование программно-аппаратных средств грид-технологий перспективных высокопроизводительных (суперкомпьютерных) вычислительных систем семейства СКИФ».

В сотрудничестве с Научно-исследовательским институтом ядерной физики МГУ, Курчатовским институтом и Петербургским институтом



За настройкой первых грид-кластеров. За терминалом И. М. Ткачев. Стоят Н. С. Астахов, Т. А. Стриж, В. В. Мицын, В. В. Кореньков. 2007 г.

ядерной физики ЛИТ участвовал в проекте «Грид-инфраструктура национальной нанотехнологической сети (ГридННС)», который реализовывался в рамках федеральной целевой программы развития инфраструктуры наноиндустрии в Российской Федерации в 2008–2010 гг.

Большой вклад сотрудники ОИЯИ вносят в тестирование и развитие промежуточного программного обеспечения грид, в разработку систем грид-мониторинга и организацию поддержки различных виртуальных организаций.

Создание, эксплуатация, поддержка и управление грид-инфраструктурой промышленного уровня требует сбора и анализа оперативной информации о функционировании как базовых грид-сервисов, так и различных сервисов каждого ресурсного центра (грид-сайта). Поэтому мониторинг ресурсов является одной из основных задач для каждой грид-инфраструктуры, в частности EGEE, WLCG и RDIG. К моменту завершения проекта EGEE (май 2010 г.) в консорциум RDIG входили 15 ресурсных центров (так называемых грид-сайтов) из России, а также по одному белорусскому и украинскому центру. Наряду с существенной географической распределенностью RDIG располагал значительными ресурсами: более 4000 вычислительных слотов и около 2 Пбайт хранилищ данных.

С 2005 г. для отслеживания состояния инфраструктуры RDIG в ОИЯИ С. Д. Беловым и И. М. Ткачевым разрабатывались средства мониторинга и учета использования ресурсов. Был подготовлен специализированный пакет для грид-мониторинга, который впоследствии был установлен во всех ресурсных центрах. Наряду с мониторингом создана система аккаунтинга (детальный учет потребленных вычислительных ресурсов), которая работала параллельно с общей системой учета проекта EGEE и по показателям стабильности и полноте данных иногда превосходила ее.

Основные задачи, реализованные в системе мониторинга:

- регулярное наблюдение за состоянием сервисов в грид-среде (как общих для всей инфраструктуры, так и сервисов в каждом ресурсном центре);
- получение информации о количестве ресурсов (число и производительность процессоров, дисковое пространство) и их загруженности (свободные/используемые ресурсы);
- мониторинг выполнения, например, передачи данных, запуски задач;
- отслеживание состояния каналов связи между ресурсными центрами;
- мониторинг использования ресурсов хранения различными группами пользователей внутри виртуальной организации.

Созданные средства и подходы к мониторингу позволили создать модульную масштабируемую архитектуру, имеющую достаточно универсальный характер. В дальнейшем разработки были использованы в таких проектах, как суперкомпьютерная инициатива Союзного государства России и Беларуси СКИФ-грид, ГридННС, российская грид-сеть для высокопроизводительных вычислений.

Одним из важных этапов развития систем мониторинга является контроль за сервисами передачи данных. В 2006 г. для передачи данных в WLCG использовались два сервиса: FTS (File Transfer Service), применяемый в ПО

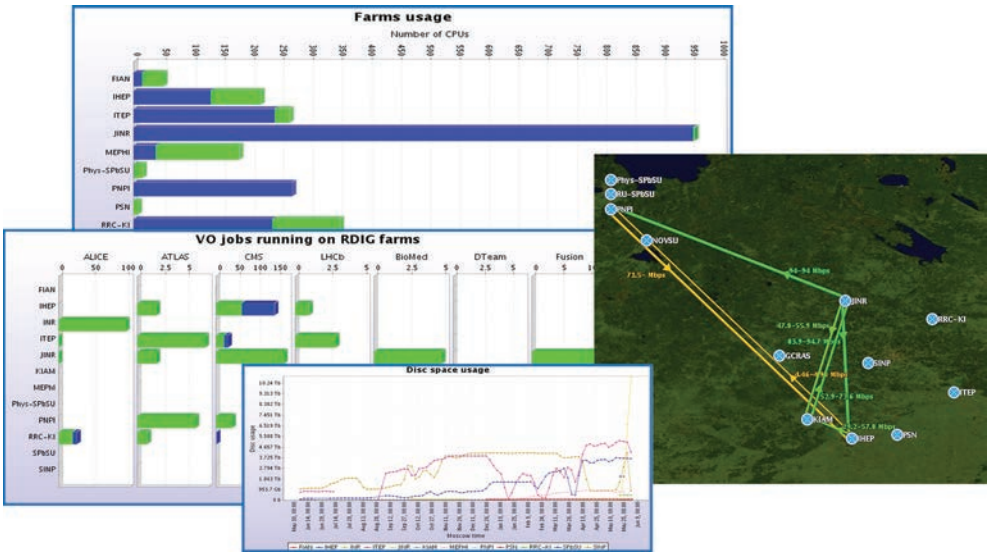


Рис. 8. Мониторинг RDIG: пример отображения текущего состояния различных параметров инфраструктуры

gLite, и его аналог в ПО Globus — RFT (Reliable File Transfer Service). Объемы передач постоянно росли, однако набор средств мониторинга FTS и RFT был весьма скромен и ни одна из систем не предоставляла полной информации о состоянии сервисов, истории их функционирования, возникающих ошибках, потенциальных источниках сбоев и прочих важных параметрах. Надежность и корректность работы сервисов передачи файлов была критически важна, и разработка новых и совершенствование существующих методов, средств анализа и обработки информации об их функционировании являлись весьма актуальными задачами. В 2007 г. А. В. Ужинским и А. В. Нечаевским была разработана первая версия системы мониторинга, основанная на обработке log-файлов. В дальнейшем появилась полнофункциональная система мониторинга, получающая информацию об ошибках непосредственно из базы данных FTS. Система предоставляла удобный инструмент для получения подробной информации о работе сервиса, поддержания его работоспособности и оперативного реагирования на изменения параметров при огромных потоках передаваемых данных (до 100 ТБ в день и более)[5]. Система использовалась в течение нескольких лет, пока не была заменена системой, интегрированной в WLCG Dashboard.

В 2010 г. по приглашению коллаборации ATLAS сотрудники ЛИТ А. Петросян и Д. А. Олейник выполняли работу по модернизации сервиса удаления данных (Deletion Service) системы управления распределенными данными DQ2. Проблемы с использованием предыдущей реализации данного

[5] *Кореньков В. В., Ужинский А. В.* Архитектура сервиса передачи данных в grid // Открытые системы. 2008. № 2. С. 52–56.

сервиса к концу 2009 г. достигли таких масштабов, что удаление данных было полностью остановлено. В максимально сжатые сроки в течение нескольких недель весны 2010 г. были произведены необходимые изменения, позволившие снова запустить удаление данных. Параллельно рефакторингу самого сервиса разрабатывалась мощная система мониторинга работы сервиса, которая позволила отслеживать процесс удаления на всех этапах, делая его понятным, прозрачным и предсказуемым. В конце 2010 г. обновленная версия Deletion Service была запущена в эксплуатацию для всех центров уровня Tier-0–Tier-2, обеспечивающих хранение и обработку данных эксперимента ATLAS. При помощи новой реализации сервиса удаления данных освобождалось до двух петабайт дискового пространства и до 20 млн файлов в неделю[6].

В 2011–2015 гг. группа сотрудников ЛИТ участвовала в разработке информационной системы AGIS (ATLAS Grid Information System), вводе системы в эксплуатацию и в дальнейшем ее развитии и поддержке[7]. Следующее поколение данной системы под названием Computing Resource Information Catalog (CRIC) использовалось А. Петросяном в проекте по организации обработки данных в распределенной вычислительной среде для эксперимента COMPASS. Позже система CRIC стала основной информационной системой проекта WLCG эксперимента CMS и других экспериментов, в которых используется распределенная обработка данных. В настоящее же время система CRIC управляет топологией компонентов распределенной вычислительной среды эксперимента SPD.

Наиболее впечатляющие результаты по организации глобальной инфраструктуры распределенных вычислений были получены в проекте WLCG при обработке данных экспериментов на LHC. На семинаре 4 июля 2012 г., посвященном наблюдению новой частицы, похожей на бозон Хиггса, на экспериментальных установках CMS и ATLAS, директор ЦЕРН Р. Хойер дал высокую оценку грид-технологиям и их значимости для мировой науки. Он выделил три составляющие, обеспечившие получение этого результата, — ускорительный комплекс ЦЕРН, экспериментальные установки ATLAS и CMS и грид-инфраструктуру LHC. Грид-инфраструктура LHC позволила обрабатывать и хранить колоссальный объем данных, поступающих от экспериментов на коллайдере, и, следовательно, совершать научные открытия. Свой вклад в этот результат внесен грид-сайтом ОИЯИ, который на протяжении всех этих лет был лидирующим грид-сайтом в консорциуме RDIG и входил в первую десятку грид-сайтов уровня Tier-2 в мире.

В 2013 г. первая премия ОИЯИ за работу «Грид-среда ОИЯИ — элемент российской и глобальной грид-инфраструктуры» была присуждена Н. С. Астахову, С. Д. Белову, Н. И. Громовой, А. Г. Долбилову, В. В. Ко-

---

[6] *Oleynik D., Petrosyan A., Garonne V., Campana S. (on behalf of the ATLAS Collab.).* DDM DQ Deletion Service, Implementation of Central Deletion Service for ATLAS Experiment // Proc. 5th Intern. Conf. "Distributed Computing and Grid-Technologies in Science and Education, GRID-2012". Dubna, 2012. P. 189–194.

[7] *Anisenkov A., Belov S., Di Girolamo A., Gayazov S., Klimentov A., Oleynik D., Senchenko A.* AGIS: The ATLAS Grid Information System // J. Phys.: Conf. Ser. 2012. V. 396. P. 2.

ренькову, Н. А. Кутовскому, В. В. Мицыну, Т. А. Стриж, Е. А. Тихоненко и В. В. Трофимову.

Следует отметить и ряд работ в рамках компьютинга эксперимента ATLAS. В 2013–2014 гг. была продолжена работа по усовершенствованию системы обработки задач PanDA (Production Distributed Analysis System) коллаборации ATLAS. В частности, с активным участием С. Д. Белова, Д. А. Олейника и А. Петросяна были созданы несколько сервисных программ, которые занимались сохранением, переносом и фильтрацией различного рода данных в среде PanDA. Здесь следует отметить особую значимость этой среды. PanDA — это система управления заданиями обработки данных, реализующая единую очередь заданий как для пользовательского анализа, так и для моделирования данных и их массовой обработки. Она создавалась как система управления загрузкой ресурсов коллаборации ATLAS и позволяла скрыть всю сложность процессов и инфраструктуры, которая стоит за отправкой задания в обработку, и сделать работу распределенной среды обработки простой и понятной для пользователя.

С 2012 г. некоторые исследовательские группы в коллаборации ATLAS начали получать доступ к наиболее крупным суперкомпьютерам (HPC — High Performance Computing). Однако ориентированная на высокопропускную (HTC — High Throughput Computing) обработку инфраструктура грид не поддерживала эффективное использование такого рода ресурсов. Таким образом возникла задача полнофункциональной интеграции суперкомпьютеров в распределенную систему обработки данных эксперимента.

В 2013 г. стартовал проект под названием BigPanDA, основной целью которого было развитие системы управления нагрузкой PanDA путем расширения спектра поддерживаемых вычислительных инфраструктур за пределы грид. Для проведения исследований в рамках проекта BigPanDA суперкомпьютерный центр при Ок-Риджской национальной лаборатории (OLCF) предоставил доступ к суперкомпьютеру Titan и сопутствующей ему дополнительной инфраструктуре. В 2013 г. это был второй по производительности суперкомпьютер в мире по рейтингу Top 500.

Накопленный в процессе разработки и эксплуатации данного проекта опыт привел к пониманию необходимости модернизации архитектуры PanDA и пересмотра программной инфраструктуры[8]. Стало очевидно, что для эффективного взаимодействия с вычислительными инфраструктурами необходим специализированный сервис. Такой сервис, названный Harvester, был разработан с участием сотрудников ЛИТ А. Петросяна и Д. А. Олейника и полностью интегрирован в систему PanDA как стандартный инструмент.

Опыт, полученный А. Петросяном при работе в рамках проектов BigPanDA и PanDA, позволил в течение 2015–2022 гг. осуществить разработку и сопровождение системы управления распределенной обработкой

[8] *De K., Klimentov A., Oleynik D., Panitkin S., Petrosyan A., Schovancova J., Vaniachine A., Wenaus T. (on behalf of the ATLAS Collab.).* Integration of PanDA Workload Management System with Titan Supercomputer at OLCF // J. Phys.: Conf. Ser. 2015. V. 664.

данных эксперимента COMPASS на ускорителе SPS в ЦЕРН[9]. Обработка данных эксперимента была переведена из локальной среды ЦЕРН в глобальную, построена среда распределенной обработки данных эксперимента, что позволило использовать грид-ресурсы не только ЦЕРН, но и ОИЯИ, INFN в Триесте, CNAF в Болонье, а также суперкомпьютеры Blue Waters в университете Иллинойса в Урбана-Шампейн и Frontera суперкомпьютерного центра TACC в Техасе. В системе были реализованы все процессы обработки данных: реконструкция физических событий, фильтрация событий, Монте-Карло генерация и реконструкция. После успешного завершения всех шагов обработки производится миграция результатов на ленты, архивирование журналов обработки и удаление временных файлов — так называемая постобработка.

С марта 2011 г. началась совместная с коллаборацией ATLAS работа над мониторингом Tier-3 сайтов. С. Д. Беловым, А. Петросяном, Д. А. Олейником и др. были выполнены работы по проекту T3MON, направленному на разработку программного комплекса для мониторинга Tier-3 сайтов[10]. Таким образом обеспечивался глобальный учет вкладов сайтов, не входящих в грид-инфраструктуру ATLAS, в вычислительный процесс эксперимента.

Большой вклад сотрудники ОИЯИ внесли в развитие системы мониторинга для виртуальных организаций LHC (Dashboard), разрабатываемой и поддерживаемой в отделении информационных технологий в ЦЕРН. Данные работы включали в себя как развитие таблиц базы данных и пользовательских интерфейсов, так и совершенствование подходов и средств для сбора и представления мониторируемых данных. Развитием проекта Dashboard под руководством Ю. Андреевой (ЦЕРН) занимались сотрудники ЛИТ И. А. Сидорова, И. С. Кадочников, С. Д. Белов[11]. В процессе создания системы визуализации мониторинга грид-инфраструктуры EGEE как географически распределенной системы была разработана и внедрена в Dashboard новая функциональная возможность с использованием приложения Google Earth для визуализации динамического мониторинга передачи данных в реальном времени благодаря участию в этой работе сотрудника ЛИТ С. В. Мицына.

В проекте Dashboard были реализованы как общие механизмы и средства мониторинга, так и характерные для конкретных виртуальных организаций и обусловленные, например, различием в использовании подходов и программных пакетов для запуска вычислительных задач или передачи данных. Чтобы справиться с увеличением объема и разнообразия ресурсов при развитии подходов к организации компьютинга в WLCG, мониторинг начал эволюционировать в сторону программных решений из стека технологий

---

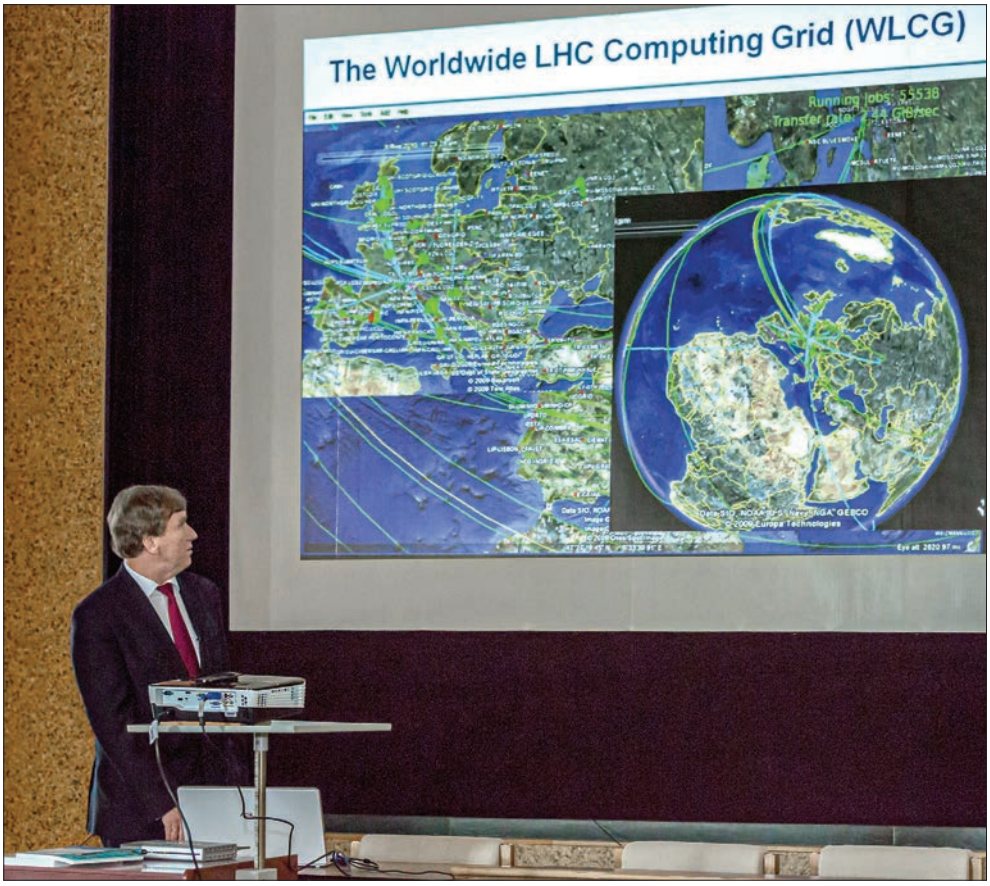
[9] *Petrosyan A.* COMPASS Production System: Frontera Experience // CEUR Workshop Proc. 2021. V. 3041. P. 80–85.

[10] *Andreeva J., Benjamin D., Campana S., Klimentov A., Korenkov V., Oleynik D., Panitkin S., Petrosyan A.* Tier-3 Monitoring Software Suite (T3MON) Proposal // CERN Note. ATL-SOFT-PUB-2011-001. 2011. P. 7.

[11] *Andreeva J., Beche A., Belov S., Kadochnikov I., Saiz P., Tuckett D.* WLCG Transfers Dashboard: A Unified Monitoring Tool for Heterogeneous Data Transfers // J. Phys.: Conf. Ser. 2014. V. 513. P. 3.

анализа больших данных. Результатом выполнения проекта с 2016 г. стало определение, разработка и развертывание унифицированной архитектуры мониторинга (UMA), направленной на удовлетворение требований по сбору, транспортировке, хранению, поиску, обработке и визуализации как данных мониторинга IT, так и данных мониторинга WLCG. На основе архитектуры UMA был создан проект мониторинга MONIT, который успешно функционирует в ЦЕРН и в настоящее время. Исходные характеристики входных данных MONIT: более ста источников данных, порядка 100 тыс. сообщений в секунду, около 3 ТБ данных мониторинга в сутки.

В 2014–2016 гг. сотрудником ЛИТ С.Д.Беловым в рамках проекта MONIT был разработан мониторинг передачи данных для глобального компьютинга ATLAS. Созданы алгоритмы и программные компоненты для обработки и агрегации информации о передачах файлов, поступающей из разных источников. Данные обрабатываются и предоставляются в режиме, приближенном к реальному времени. Также реализовано получение различных статистических срезов для параметров передачи данных (скорость,



В. В. Кореньков демонстрирует визуализацию динамического мониторинга передачи данных в реальном времени

объем, используемые технологии, источники данных и т. д.). Созданный сервис полностью соответствует архитектуре UMA и является неотъемлемой частью проекта MONIT.

Модель распределенных вычислений эксперимента ATLAS предполагает хранение нескольких копий данных (реплик) в зависимости от их класса в различных вычислительных центрах и на различных типах хранилищ для их последующей обработки. По мере интенсивного накопления данных хранилища заполняются и возникает вопрос о выборе стратегии репликации и управления данными в зависимости от характеристик обращения к ним на различных ресурсах хранения. Таким образом, появляется потребность в инструменте для анализа востребованности данных различного типа. Под «востребованностью данных» (в английской литературе используется устоявшийся термин data popularity) понимается мера, вычисляемая с помощью специальных алгоритмов в зависимости от цели ее использования и учитывающая такие характеристики взаимодействия с данными, как число и характер обращений, частота доступа к данным, время последнего обращения и т. п.

В 2016 г. С. Д. Беловым был создан комплекс программ, реализующий регулярную автоматическую подготовку сведений о востребованности наборов данных эксперимента ATLAS в зависимости от типа и места их хранения. Анализ востребованности основывается на сведениях о доступе к данным, получаемых от систем управления DQ2 и Rucio, а также на описании топологии распределенной вычислительной инфраструктуры эксперимента. Созданный инструмент для анализа востребованности наборов данных позволил исследовать влияние политики управления данными на динамику доступа к ним, а также (после подбора стратегии) более корректно оценить и спланировать обеспечение необходимых объемов хранилища данных для эксперимента ATLAS после модернизации детектора и ускорителя LHC. На рис. 9 показан[12] результат оптимизации политик репликации и хранения данных на основе переработанной концепции конечного времени существования копий набора данных. Изменение указанных политик позволило освободить порядка 25 % дискового пространства, занимаемого редко используемыми данными моделирования и анализа, что составило на момент исследования около 30 Пбайт.

В 2012 г. в России при участии ОИЯИ начались работы по созданию распределенного центра уровня Tier-1. Организация центра предполагала поддержку экспериментов ALICE, ATLAS и LHCb на базе вычислительного комплекса НИЦ «Курчатовский институт», а поддержку эксперимента CMS — на базе вычислительного центра ОИЯИ в ЛИТ. В 2013 г. был создан прототип центра уровня Tier-1 ОИЯИ для эксперимента CMS[13]. 26 марта

[12] *Filipčič A. et al.* ATLAS Distributed Computing Experience and Performance during the LHC Run-2 // J. Phys.: Conf. Ser. IOP Publ., 2017. V. 898, No. 5. 052015.

[13] *Астахов Н. С., Белов С. Д., Горбунов И. Н., Дмитриенко П. В., Долбилов А. Г., Жильцов В. Е., Кореньков В. В., Мицын В. В., Стриж Т. А., Тихоненко Е. А., Трофимов В. В., Шматов С. В.* Автоматизированная система уровня Tier-1 обработки данных эксперимента CMS // Информационные технологии и вычислительные системы. 2013. № 4. С. 27–36.

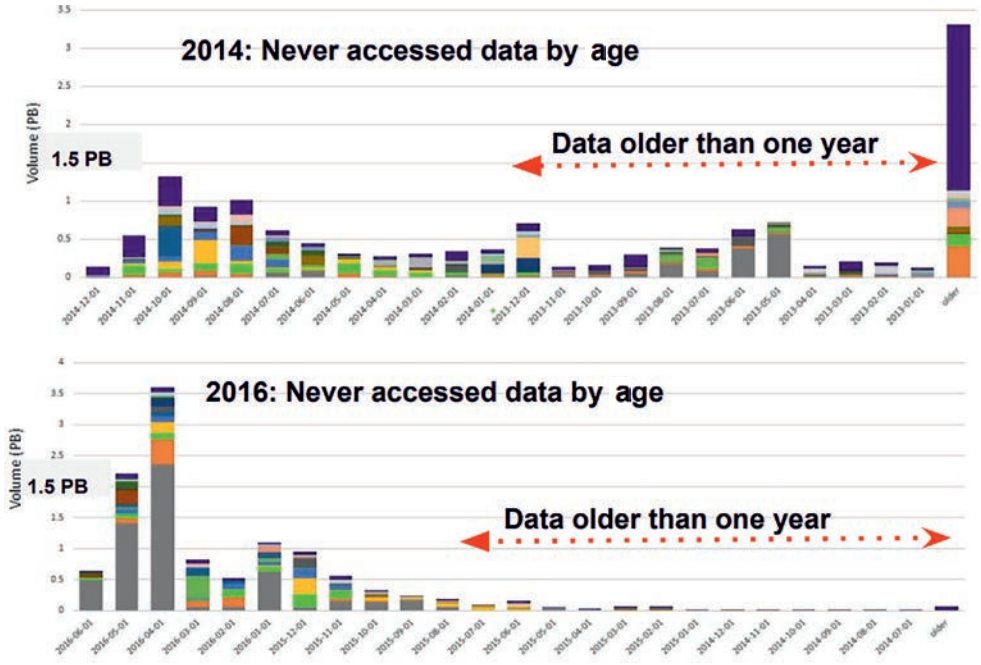


Рис. 9. Объемы наборов данных в зависимости от частоты доступа к ним: до и после оптимизации политик управления

2015 г. в ЛИТ состоялась его презентация. Данный центр, построенный большим коллективом инженеров-программистов и научных сотрудников ЛИТ под руководством В. В. Коренькова, создал условия физикам Института, стран-участниц и коллаборации RDMS CMS для полномасштабного участия в обработке и анализе данных эксперимента CMS. В мире существует всего 8 CMS центров подобного уровня. При создании центра была разработана инженерная инфраструктура (система бесперебойного электропитания, климат-контроля и др.), высокоскоростная надежная сетевая инфраструктура с выделенным резервируемым каналом в ЦЕРН (LHCOPN); вычислительная система и система хранения на базе дисковых массивов, а также роботизированной ленточной библиотеки большой емкости. Введенные в эксплуатацию системы обеспечивают 100%-ю надежность и доступность центра.

Сайт Tier-1 ОИЯИ по производительности уступает только центру Tier-1 Национальной ускорительной лаборатории им. Э. Ферми (США) в рейтинге мировых Tier-1, обрабатывающих данные эксперимента CMS на LHC.

Параллельно в эти годы начались работы по моделированию системы хранения и обработки данных ускорительного комплекса NICA. В качестве платформы для имитационной модели была выбрана система GridSim. В процессе моделирования можно подобрать минимально необходимое оборудование, обеспечивающее потребности передачи, обработки и хранения данных, оценить необходимый запас производительности оборудо-

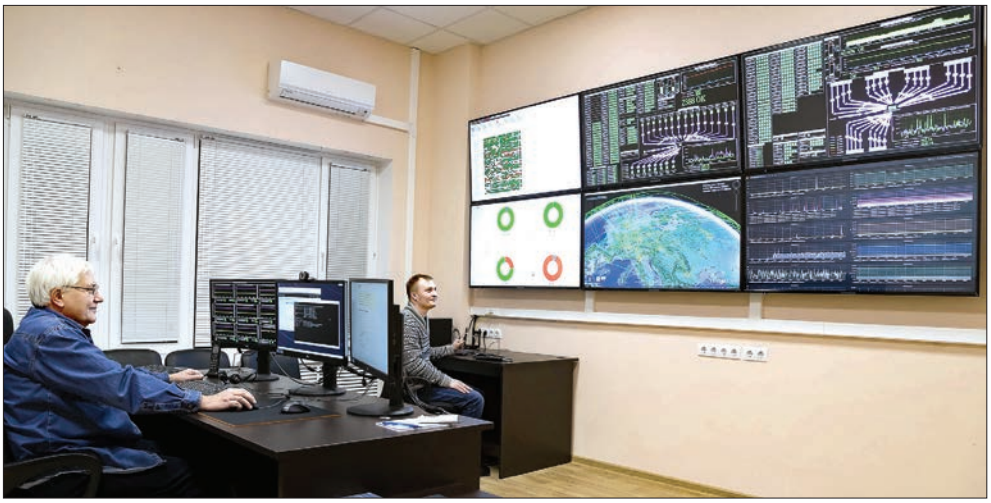
В. В. Мицын в модуле с вычислительными серверами Tier-1 ОИЯИ. 2015 г.

вания, обеспечивающего возможное увеличение производственных мощностей, выбрать несколько вариантов оборудования с учетом текущих потребностей и перспективы развития в будущем, провести проверку работы системы, выявить ее «узкие» места и т. д.

Для надежного функционирования всего вычислительного комплекса необходимо было в режиме реального времени отслеживать состояние всех узлов — от системы энергообеспечения до роботизированной ленточной библиотеки. Под руководством В. В. Мицына И. А. Кашуниным и А. О. Голуновым была разработана и введена в эксплуатацию новая система мониторинга вычислительного комплекса ОИЯИ и создан центр контроля и управления работой комплекса[14].

Одним из важнейших элементов грид-инфраструктуры ОИЯИ, как и всего МИВК, является система хранения данных. Эта система построена по иерархическому принципу, и уровень хранения зависит от сроков

[14] *Кашунин И. А., Долбилов А. Г., Голунов А. О., Кореньков В. В., Мицын В. В., Стриж Т. А.* Система мониторинга многофункционального информационно-вычислительного комплекса // CEUR Workshop Proc. 2016. V. 1787; http://ceur-ws.org/Vol-1787/256-263-paper-43.pdf



В. В. Мицын, А. О. Голунов в центре мониторинга МИВК. 2016 г.

хранения данных и их объема. Машины вычислительных кластеров имеют ограниченное дисковое пространство, предназначенное для хранения собственно операционной системы, некоторых дополнительных утилит, временных файлов пользователей ограниченного объема. Распределенная глобальная система AFS используется для хранения данных и доступа к домашним директориям пользователей и к ПО небольшого объема. Глобально доступная система ведения и доступа к большим программным комплексам коллабораций и групп пользователей работает на основе разработанного в ЦЕРН ПО CVMFS. В качестве основных систем хранения данных используются dCache и EOS. Это системы для среднесрочного хранения данных. EOS как система хранения очень больших объемов данных является оптимальной с точки зрения стоимости/объема хранилища, поддерживает множество протоколов доступа (POSIX при установке на компьютере пользователя, xroot и http для быстрого удаленного доступа), призвана обеспечивать высокую скорость доступа к данным благодаря параллельному копированию со многих серверов и т. д. Для хранения больших объемов данных на длительный период используется ленточная роботизированная система.

С началом сеансов на комплексе NICA потребуется интенсивное наращивание долговременных систем хранения данных на роботизированных ленточных библиотеках. Кроме ленточного робота для эксперимента CMS в Tier-1 требуется создание долговременного хранилища данных для экспериментов на комплексе NICA, нейтринной программы и для экспериментов других групп пользователей. Эта система создается на основе разработанного в ЦЕРН ПО CTA (CERN Tape Archive). Основной компонент CTA — EOS с добавлением инфраструктуры работы с ленточными роботами и манипуляций с метаинформацией хранимых файлов. В 2023 г. EOSCTA запущена в опытную эксплуатацию.

В настоящее время в состав Tier-1 входят 482 вычислительных узла (23 360 ядер) производительностью 427920,04 HEP-SPEC06. Запуск задач на обработку данных эксперимента CMS осуществляется 16-ядерными пилотами, и для них доступны все вычислительные ресурсы. Хранение данных обеспечивается системой dCache емкостью 15 ПБ, роботизированным ленточным хранилищем общей емкостью 100 ПБ. Робот TS4500 работает с ПО Enstore и dCache. Робот TS3500 использует систему EOSCTA. Для работы с лентами применяется дисковый массив для кэширования данных емкостью 2,2 ПБ. В состав Tier-2 входят 485 вычислительных узлов (10 356 ядер) производительностью 166788,4 HEP-SPEC06. Хранение данных обеспечивается системой dCache[15] емкостью 4,88 ПБ.

ОБЛАЧНЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ

Наиболее универсальным сервисом МИВК является облако ОИЯИ, которое построено по базовой модели предоставления облачных ресурсов — инфраструктура как услуга (Infrastructure-as-a-Service, IaaS). Этот тип сервиса предоставляет конечным пользователям вычислительные ресурсы в виде виртуальных машин (ВМ), которые могут как являться конечным используемым продуктом облачной инфраструктуры, так и служить базой для построения сложных многокомпонентных систем, состоящих из множества взаимосвязанных ВМ. Возможность выделения виртуальным машинам лишь необходимого пользователю объема ресурсов (процессорных ядер, памяти и дискового пространства), а также возможность создания и удаления ВМ по требованию позволяет гибко перераспределять ресурсы между различными пользователями и системами в облаке в соответствии с их текущими потребностями.

Для повышения эффективности использования ресурсов, задействованных для решения большого круга задач по этим направлениям, Н. А. Кутовским под руководством В. В. Коренькова в начале 2000-х гг. был рассмотрен синтез облачных и грид-технологий и изучены возможные варианты их совместного использования[16]. На основе проведенных исследований в ЛИТ ОИЯИ были выработаны требования к облачным грид-системам для учебно-исследовательских задач. С учетом данных требований были разработаны методы создания подобных облачных грид-систем. Для удовлетворения растущих потребностей в решении учебно-исследовательских задач в области облачных и грид-технологий в ЛИТ ОИЯИ в 2013 г. была создана облачная грид-система с помощью упомянутых выше методов. Ядром этой инфраструктуры стала созданная в 2004 г. на основе ресурсов УНЦ ОИЯИ

[15] *Baginyan A., Balandin A., Dolbilov A., Golunov A., Gromova N., Kashunin I., Korenkov V., Mitsyn V., Pelevanyuk I., Shmatov S., Strizh T., Trofimov V., Vorontsov A., Voytishin N.* JINR Grid Infrastructure: Status and Plans // Phys. Part. Nucl. 2024. V. 55, Iss. 3. P. 355–359.

[16] *Korenkov V. V., Kutovskiy N. A.* Distributed Training and Testing GRID Infrastructure // Proc. 4th Intern. Conf. “Distributed Computing and Grid-Technologies in Science and Education, GRID-2010”. Dubna, 2010. P. 148–152.

(6 серверов в исполнении «desktop») учебно-исследовательская грид-инфраструктура, функционирующая с использованием виртуального разделения ресурсов на уровне операционной системы на базе контейнеров OpenVZ. С начала 2014 г. облачная инфраструктура ОИЯИ (http://cloud.jinr.ru) была введена в эксплуатацию. Облачные ресурсы ОИЯИ стали использоваться по трем основным направлениям[17]:

- для учебных, исследовательских и тестовых задач в различных проектах;
- для размещения сервисов с высокой доступностью и надежностью;
- в качестве счетных ресурсов, в том числе как расширение вычислительных возможностей грид-инфраструктур.

В облачной инфраструктуре были развернуты следующие сервисы и полигоны:

- полигон на базе промежуточного программного обеспечения (ППО) грид EMI для обучения, тестирования, разработки и решения исследовательских задач в рамках участия ОИЯИ в различных проектах, связанных с применением этого ППО, включая проект WLCG;
- полигон PanDA для развития продукта PanDA и его использования для решения задач экспериментов ATLAS и COMPASS;
- полигон на базе ППО DIRAC для разработки средств мониторинга распределенной вычислительной инфраструктуры эксперимента BES-III, а также как один из ее вычислительных ресурсов;
- набор контейнеров для пользователей-участников эксперимента NOvA (моделирование и анализ);
- полигон для изучения и оценки ППО для построения вычислительной инфраструктуры экспериментов на ускорителе NICA;
- полигон на базе системы хранения данных EOS для выполнения обязательств в рамках участия в проекте по исследованию гетерогенных киберинфраструктур, разработки и создания прототипа компьютерной федерации на основе высокоскоростных вычислений, облачных вычислений и суперкомпьютеров для хранения, обработки и анализа больших данных;
- сервисы вычислительного комплекса HybriLIT (Indico — сервис для организации научных мероприятий, FreeIPA — централизованная система для управления идентификацией пользователей, задания политик доступа и аудита, Git — локальный Git-репозиторий на базе популярной системы контроля версий);
- Helpdesk — система поддержки пользователей IT-сервисов, предоставляемых ЛИТ;
- полигон на базе ПО BOINC для оценки возможности использования добровольных вычислений в решении задач ученых ОИЯИ;
- веб-сервис HepWeb, предоставляющий возможность использовать различные инструменты для Монте-Карло моделирования в области физики высоких энергий;

[17] *Kutovskiy N., Korenkov V., Balashov N., Baranov A., Semenov R.* JINR Cloud Infrastructure // Procedia Comp. Sci. 2015. V. 66. P. 574–583.

- тестовые экземпляры сервера документов ОИЯИ и сервиса управления проектами для отладки перехода на новые версии и тестирования нового функционала;
- контейнер для разработки веб-сайтов, включая новый веб-портал ОИЯИ;
- GitLab — локальная инсталляция сервиса GitLab для всех пользователей ОИЯИ;
- полигон на базе ПО Hadoop;
- набор виртуальных машин и контейнеров пользователей для их собственных нужд;
- контейнеры для оценки существующих систем мониторинга и разработки на их базе новых систем мониторинга сервисов.

В последующие годы Н. А. Кутовский, Н. А. Балашов, Е. Мажитова, Р. Н. Семенов, А. Н. Махалкин и др. продолжали активную работу по оптимизации облачной инфраструктуры и ее сервисов[18]. Сегодня облако ОИЯИ используется для решения широкого круга задач, которые включают в себя хостинг различных веб-сервисов, тестирование новых версий различных систем, отладку разрабатываемых программных средств под разные версии операционных систем, в нем также развернуто множество информационно-вычислительных сервисов, например: батч-кластер на базе системы HTCondor для проведения распределенных вычислений, сервис интерактивного программирования JupyterHub, сервис GitLab для управления проектами по разработке ПО и др.

В настоящее время облако ОИЯИ построено на платформе OpenNebula и включает 180 серверов, предоставляющих порядка 5700 процессорных ядер и 69 ТБ памяти для более чем 800 развернутых в нем виртуальных машин. Также в состав облака входят три облачных хранилища данных на основе системы Ceph:

- Хранилище объемом ~ 615 ТБ на основе SSD-накопителей используется для предоставления виртуальных блочных устройств, подключаемых по сети в качестве дисков облачных ВМ.
- Хранилище объемом ~ 2,2 ПБ на основе HDD-накопителей, которое предоставляет диски менее требовательным к операциям дискового ввода/вывода ВМ. Оно также используется в качестве объектного хранилища, обеспечивающего доступ к данным по протоколу S3 для интеграции со сторонними системами. Например, сервис GitLab в ОИЯИ использует его для организации реестра образов Docker-контейнеров.
- Дополнительное хранилище объемом ~ 3,2 ПБ на основе HDD-накопителей используется для хранения экспериментальных данных и предоставляется пользователям в виде сетевой файловой системы.

Во всех трех системах хранения применяется тройное резервирование всех данных, которое обеспечивает высокий уровень сохранности данных и отказоустойчивости системы.

---

[18] *Balashov N. A., Kuprikov I. S., Kutovskiy N. A., Makhalkin A. N., Mazhitova Ye., Pelevanyuk I. S., Semenov R. N.* JINR Distributed Information and Computing Environment: Participants, Features and Challenges // CEUR Workshop Proc. 2021. V. 3041. P. 280–284.

Важной отличительной особенностью облачной инфраструктуры является возможность управления виртуальными ресурсами с помощью программного интерфейса.

Несмотря на то, что ресурсы облака МИВК используются в большом количестве проектов, на сегодня крупнейшими потребителями облачных ресурсов в ОИЯИ являются нейтринные эксперименты Baikal-GVD, JUNO, NOvA, Borexino и DayaBay.

ГЕТЕРОГЕННЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ

КЛАСТЕР HYBRILIT

История гетерогенной вычислительной платформы, названной HybriLIT, началась в 2013 г. с решения расширить МИВК ОИЯИ посредством добавления в его структуру гетерогенного вычислительного кластера. Такое решение следовало современным тенденциям развития мировых вычислительных технологий того времени, и надо сказать, что к настоящему времени эта тенденция лишь усилилась в связи с активным развитием и внедрением методов искусственного интеллекта. В 2014 г. был введен в эксплуатацию вычислительный кластер HybriLIT, содержащий четыре узла: два узла с тремя графическими ускорителями NVIDIA Tesla K40 (Atlas) в каждом, узел с двумя сопроцессорами Intel Xeon Phi 7120P, а также узел, содержащий NVIDIA Tesla K20X и сопроцессор Intel Xeon Phi 5110P. Все вычислительные узлы содержали по два процессора Intel Xeon E5-2695v2. Кластер HybriLIT был дополнен управляющим узлом и узлом хранения данных. На рис. 10 представлены структура и основные характеристики кластера HybriLIT 2014 г.

Следует отметить, что в состав кластера вошли передовые вычислительные архитектуры того времени, а именно многоядерные с-процессоры

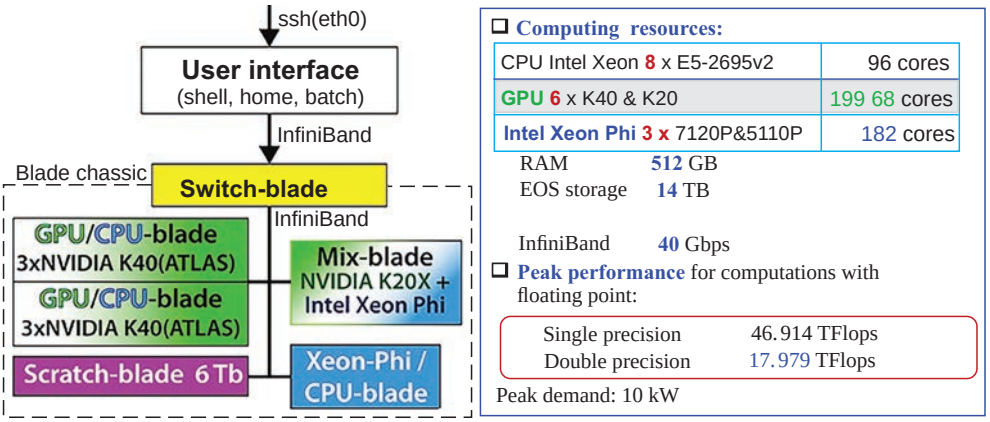


Рис. 10. Структура гетерогенного вычислительного кластера HybriLIT в 2014 г. (слева). Основные параметры вычислительных элементов кластера и его производительность (справа)

MIC-архитектуры от Intel — Intel Xeon Phi первого поколения и графические ускорители вычислений от NVDIA K20X и K40. Это позволило учесть два основных направления развития ускорителей вычислений того времени, что, в свою очередь, дало возможность пользователям кластера применять основные доступные на рынке HPC вычислительные средства.

Несмотря на то, что кластер был небольшим и имел производительность порядка 18 Тфлопс для операций с двойной точностью, он обеспечил пользователям Института и стран-участниц возможность внедрения гетерогенных вычислений в научные исследования, что позволило:

- создавать собственное программное обеспечение для проведения исследований, требующих ресурсоемких расчетов;
- использовать уже адаптированные для гибридных архитектур пакеты прикладных программ и математических библиотек;
- разрабатывать параллельные алгоритмы решения различных задач с использованием парадигмы гетерогенных вычислений.

Одновременно с созданием кластера была организована группа специалистов по его обслуживанию и работе с пользователями, получившая название HybriLIT[19]. В нее вошли сотрудники разных отделов и секторов ЛИТ. Системными администраторами на кластере были Д. В. Беляков, М. Валя (в то время сотрудник Института экспериментальной физики САН и Технического университета в Кошице, Словакия), М. А. Матвеев и Ю. А. Бутенко. За программное обеспечение, в том числе прикладное и лицензионное, отвечали М. И. Зуев, Е. И. Александров, А. В. Казымов, Д. С. Голубь и Т. Ф. Сапожникова. Регистрацию пользователей и их поддержку по разным вопросам обеспечивали М. К. Киракосян, Ш. Г. Торосян, Л. Валева (в то время сотрудник Института экспериментальной физики САН в Кошице, Словакия) и Т. Н. Заикина, а разработку алгоритмов и помощь пользователям по вопросам применения технологий параллельного программирования — О. И. Стрельцова, А. И. Стрельцов (в то время сотрудник Гейдельбергского университета, Германия), Е. В. Земляная, А. С. Айриян, М. В. Башашин. Первым руководителем группы HybriLIT был П. В. Зрелов, его заместителем — Д. В. Подгайный, а научным руководителем — Г. Адам. С момента своего создания группа начала активно развивать программно-информационную среду кластера HybriLIT. Внедрение такой среды было обусловлено повышением эффективности разработки приложений и проведения расчетов с использованием ресурсов кластера.

Первый вариант программно-информационной среды, созданной в 2014 г., содержал два уровня. Первый уровень — системный. Он включал в себя базовое программное обеспечение: операционную систему (тогда Scientific Linux 6, что было обусловлено совместимостью с ОС всех компонентов МИВК), файловые системы NFS4 и EOS. В качестве планировщика задач был выбран SLURM, отвечающий за распределение потока задач

[19] *Adam G., Korenkov V., Podgainy D., Streltsova O., Strizh T., Zrelov P.* HybriLIT — The Main Component of the MICC for Heterogeneous Computations at JINR // CEUR Workshop Proc. 2017. V. 2023. P. 351–356.

между узлами гетерогенного кластера в зависимости от степени нагрузки. На выбор именно этого планировщика повлияло его широкое применение в различных системах из списка Top 500 самых мощных суперкомпьютеров мира и на грид-компонентах МИВК, что стало весомым аргументом для его использования. Для эффективного применения различных типов ускорителей в SLURM было организовано распределение задач по очередям различного типа. Для повышения эффективности системного администрирования кластера была разработана своя система nanoramfs, включающая команды настройки сети, пригодные для каждого класса серверов, входящих в состав кластера. Nanoramfs позволила решить три задачи администрирования кластера:

1) реализовать динамическое расширение кластера в будущем посредством добавления новых вычислительных узлов;

2) предоставить возможность по синхронному обновлению или изменению ПО на всех текущих и будущих вычислительных узлах;

3) быстро устанавливать узлы после сбоев и перезагрузки.

Также в рамках первого уровня программно-информационной среды была реализована идея подсоединения удаленных открытых программных пакетов к кластеру. Это необходимо для использования кластера открытого программного обеспечения, подстроенного под параллельные приложения в репозитории ЦЕРН. Реализация этой идеи базировалась на внедрении в программно-информационную среду CVMFS (CERN Virtual Machine File System), что дало пользователям возможность импортировать необходимые удаленные модули через специальное расширение пакета MODULES. Для разработки, отладки и профилирования параллельных приложений и проведения ресурсоемких расчетов на кластере были установлены соответствующие пакеты программ: OpenMPI, CUDA, Intel Parallel Studio и др.

Второй уровень программно-информационной среды — пользовательский. Он был предназначен для эффективной организации работы пользователей, а также для обеспечения доступа пользователей к необходимой и полезной информации. С этой целью на кластере установлен и поддерживается набор сервисов. Среди последних можно выделить те, которые предназначены преимущественно для предоставления пользователям необходимой информации для работы на кластере и которые способствовали бы активному и тесному взаимодействию с пользователями, а также информированию о различных мероприятиях, проводимых группой HybriLIT:

- веб-сайт HybriLIT, содержащий подробную информацию о ресурсах, предоставляемых пользователям кластера;
- система Indico HybriLIT для организации конференций, семинаров и встреч, посвященных технологиям параллельного программирования;
- HybriLIT User Support, реализованный в системе Project Management Service (http://pm.jinr.ru) и позволяющий оперативно отвечать на вопросы пользователей кластера, размещать полезные материалы, новости и др.;
- GitLab — сервис для совместной параллельной разработки приложений.

Схематически структура программно-информационной среды кластера представлена на рис. 11.

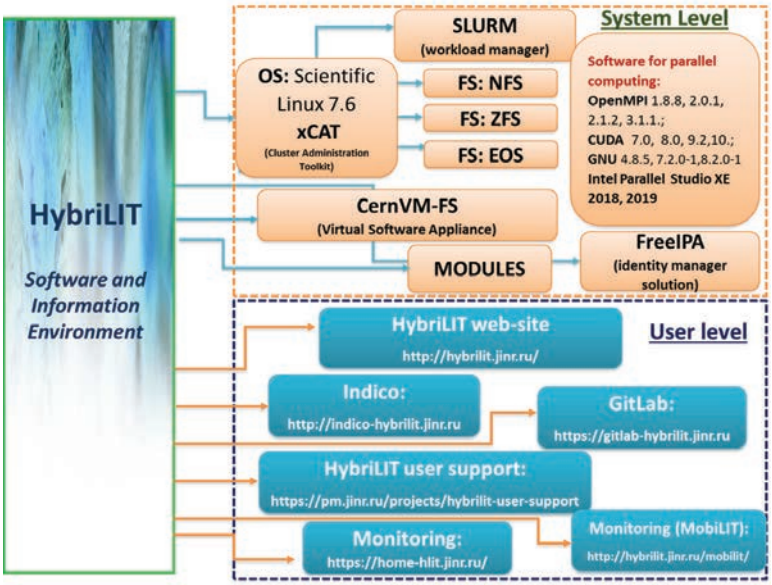


Рис. 11. Программно-информационная среда кластера HybriLIT в 2014 г.

Дальнейшее развитие кластера HybriLIT осуществлялось по двум основным направлениям. Первое касалось наращивания вычислительных мощностей как многоядерного компонента кластера HybriLIT, содержащего многоядерные процессоры и сопроцессоры Intel Xeon Phi, так и GPU — компонента, содержащего ускорители вычислений от NVIDIA. Наращивание вычислительной мощности было обусловлено как возрастающим количеством пользователей, так и увеличением числа специализированных библиотек и прикладного программного обеспечения, требующих использования ускорителей вычислений. Так, в 2015 г. производительность кластера выросла в 1,5 раза за счет включения в его состав двух вычислительных узлов с графическими ускорителями последнего поколения NVIDIA K80 и составила 40 Тфлопс для операций с двойной точностью.

При этом кластер использовался для решения задач, требующих массивно-параллельных расчетов в различных областях физики, биофизики и прикладных областях, в частности, кварковых пропагаторов для конструкций разных наблюдаемых кварковых конденсатов внутренней энергии в рамках теории квантовой хромодинамики на решетках, расчета джозефсоновских переходов, проектирования и оптимизации криогенной ячейки, исследования динамики многочастичных бозонных систем в магнитооптических ловушках, моделирования структуры и пропускного механизма глутаматного рецептора NMDA, математического моделирования взаимодействий антипротонов с протонами и ядрами в вычислительной среде будущего эксперимента PANDA на ускорителе FAIR — PandaRoot, с использованием генераторов DPM, FTF и UrQMD+SMM, развиваемых в ОИЯИ и представляющих интерес для эксперимента MPD на NICA, разработки

параллельных алгоритмов компьютерной томографии для рентгеновского микротомографа MARS (Medipix All Resolution System), расчета поправок для матричного элемента в первом борновском приближении в случае реакции прямой ионизации атома гелия быстрым протоном с учетом различных моделей конечного состояния и др.

Второе направление было связано с систематическим исследованием возможностей новых вычислительных архитектур, появляющихся в сфере высокопроизводительных вычислений с целью последующего их включения в состав кластера. Данное направление в конечном итоге позволило определить архитектуру суперкомпьютера «Говорун» и предоставило пользователям ОИЯИ современные вычислительные средства для повышения эффективности решения научных задач, а также помогло реализовывать более сложные математические модели исследуемых физических процессов.

СУПЕРКОМПЬЮТЕР «ГОВОРУН»

Как уже было отмечено выше, развитие кластера HybriLIT привело к созданию в 2018 г. суперкомпьютера (СК) «Говорун», названного в честь Николая Николаевича Говоруна, с именем которого с 1966 г. связано развитие информационных технологий в ОИЯИ. Необходимость в создании суперкомпьютера была связана, с одной стороны, с увеличивающейся востребованностью и результативностью использования новейших вычислительных архитектур при решении задач Института, а с другой — с ростом числа пользователей, в том числе благодаря многочисленным учебным курсам по технологиям параллельного программирования, проведенным для сотрудников Института и стран-участниц ОИЯИ. Постоянный рост числа пользователей и расширение круга решаемых задач потребовали не просто существенно нарастить вычислительные возможности кластера, но и разработать и внедрить новые технологии, что привело к созданию новой вычислительной системы — суперкомпьютера «Говорун». СК «Говорун» создавался как высокопроизводительная масштабируемая система с жидкостным охлаждением, обладающая гиперконвергентной и программно-определяемой архитектурой.

Создание суперкомпьютера «Говорун» в ОИЯИ явилось важным технологическим достижением и имеет большое значение для реализации научной программы и международного сотрудничества ОИЯИ[20]. Важное содействие в решении этой судьбоносной задачи развития многофункционального информационного вычислительного комплекса ОИЯИ на базе ультрасовременных технологий было оказано дирекцией Института при личной поддержке В. А. Матвеева.

Презентация первой очереди суперкомпьютера «Говорун» состоялась 27 марта 2018 г. в рамках сессии Комитета полномочных представителей

[20] *Belyakov D., Nechaevskiy A., Pelevanuk I., Podgainy D., Stadnik A., Streltsova O., Vorontsov A., Zuev M.* Govorun Supercomputer for JINR Tasks // CEUR Workshop Proc. 2020. V. 2772. P. 1–12.

Торжественное открытие суперкомпьютера «Говорун». 2018 г.

правительств государств-членов ОИЯИ. Суперкомпьютер «Говорун» разрабатывался как совместный проект Лаборатории теоретической физики им. Н. Н. Боголюбова, Лаборатории информационных технологий ОИЯИ, компаний «РСК Технологии», Intel, NVIDIA и IBS Platformix и был поддержан дирекцией ОИЯИ.

В первую очередь в СК «Говорун» вошли вычислительные модули, содержащие компоненты GPU и CPU. Суммарная пиковая производительность суперкомпьютера «Говорун» составила 0,5 Пфлопс для расчетов с двойной точностью (1 Пфлопс для расчетов с одинарной точностью).

Для CPU-компонента суперкомпьютера была выбрана технология прямого жидкостного охлаждения компании ЗАО «РСК Технологии», являющейся ведущим в России разработчиком и интегратором «полного цикла» суперкомпьютерных решений и обладающей целым рядом собственных инновационных разработок. Благодаря внедрению этих технологий для СК «Говорун» удалось достичь рекордной плотности размещения вычислительных узлов на шкаф (153 узла против 25 узлов для воздушного охлаждения), а работа в режиме охлаждения «горячей водой» позволила использовать круглогодичный режим free cooling ($24 \times 7 \times 365$). Помимо высокой энергоэффективности, такой подход позволил существенно упростить инфраструктуру суперкомпьютерного центра — система охлаждения СК «Говорун» создана с использованием только сухих градирен, охлаждающих жидкость при помощи окружающего воздуха. За счет применения жидкостного охлаждения среднегодовой показатель PUE системы, отражающий уровень эффективности использования электроэнергии, составляет менее чем 1,06. То есть на охлаждение расходуется менее 6% всего потребляемого СК «Говорун» электричества, что является выдающимся результатом для

HPC-индустрии. Построенная система является первой в мире системой со 100%-м жидкостным охлаждением, т. е. жидкостным образом охлаждаются все компоненты — вычислительные узлы, сетевые коммутаторы и система хранения данных.

Другой технологией, положенной в основу СК «Говорун», является гиперконвергентный подход к построению вычислительного комплекса, позволяющий создавать вычислительные среды, программно-аппаратная конфигурация которых оптимизирована для конкретных задач пользователей, без изменения аппаратуры самих вычислительных узлов. Гиперконвергентность позволяет «оркестрировать» вычислительными ресурсами и элементами хранения данных и создавать, используя программное обеспечение РСК БазИС, вычислительные системы с конфигурациями, которые необходимы для пользовательских приложений. Это свойство позволяет эффективно решать пользовательские задачи разных типов, повысить уровень конфиденциальности работы с данными, избежать системных ошибок, возникающих при пересечении ресурсов для различных пользовательских задач. Реализованная на гиперконвергентных узлах первой очереди система хранения данных по требованию (storage-on-demand) под управлением файловой системы Lustre позволила суперкомпьютеру «Говорун» занять 9-е место в мировом рейтинге IO 500 (июнь 2018 г.) для систем хранения данных HPC-класса.

Установлены серверы от NVIDIA DGX-1 с графическими процессорами. Т. А. Стриж, В. А. Журкин, Д. В. Подгайный, Е. А. Кузин, М. А. Матвеев, О. И. Стрельцова, М. С. Пляшкевич, А. С. Каменский, С. В. Марченко, А. С. Воронцов. 2018 г.

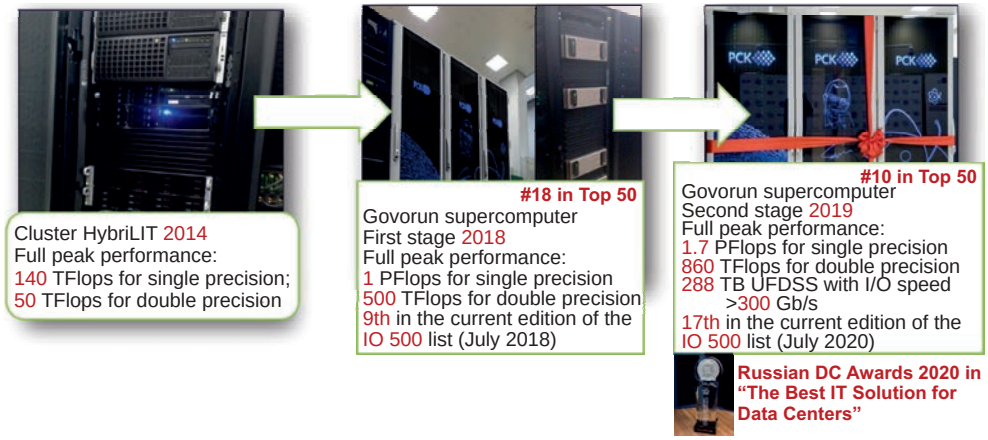


Рис. 12. Эволюция кластера HybriLIT

Опыт эксплуатации первой очереди СК «Говорун» выявил необходимость не только в наращивании вычислительных ресурсов, что определилось его востребованностью для решения задач ОИЯИ и ростом числа пользователей, но и в создании инструментов для работы с большими данными, прежде всего для мегапроекта NICA. В связи с этим на СК «Говорун» была разработана и внедрена иерархическая система обработки и хранения данных с программно-определяемой архитектурой. По скорости доступа к данным система разделена на уровни: очень горячие данные — наиболее востребованные данные, к которым в настоящий момент требуется обеспечить самый быстрый доступ, горячие данные и теплые данные. Внедрение иерархической системы обработки и хранения данных позволяет существенно повысить эффективность работы с большими массивами данных, в том числе для проекта NICA. В результате в 2019 г. была введена в эксплуатацию вторая очередь СК «Говорун».

В итоге этой модернизации производительность суперкомпьютера выросла до 860 Тфлопс для расчетов с двойной точностью (1,7 Пфлопс для расчетов с одинарной точностью), а 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».

В задачах массовой генерации и реконструкции данных эксперимента MPD NICA активно используется иерархическая система обработки и хранения данных СК «Говорун». При этом на разных этапах рабочих процессов возникает потребность в разной скорости доступа к данным, например, для задач долговременного хранения скорость доступа не является важным фактором, а для задач реконструкции играет существенную роль. Также для ряда задач MPD возникла потребность в большом объеме оперативной памяти, что привело к необходимости включения в архитектуру суперкомпьютера гиперконвергентных узлов с большим объемом памяти. Таким образом, методологически для обеспечения всех рабочих процессов для задач

мегапроекта NICA на СК «Говорун» создана система, сочетающая в себе как вычислительные архитектуры различных типов, так и развитую иерархическую систему обработки и хранения данных. Вычислительные ресурсы и иерархическая система обработки и хранения данных СК «Говорун» были интегрированы на базе платформы DIRAC в распределенную гетерогенную среду, включающую в себя ресурсы ОИЯИ и стран-участниц.

Реализация перечисленных технологий на СК «Говорун» позволила выполнить ряд сложных ресурсоемких расчетов в области решеточной квантовой хромодинамики для исследования свойств адронной материи при высоких плотностях энергии и барионном заряде и в присутствии сверхмаксимальных электромагнитных полей, качественно повысить эффективность моделирования динамики столкновений релятивистских тяжелых ионов, ускорить процесс генерации и реконструкции событий для проведения экспериментов в рамках реализации мегапроекта NICA, провести расчеты радиационной безопасности экспериментальных установок ОИЯИ и повысить эффективность решения прикладных задач. Следует отметить, что гибкая архитектура СК «Говорун» дает возможность не только проводить расчеты, но и использовать суперкомпьютер как научно-исследовательский полигон для выработки программно-аппаратных и IT-решений для задач, решаемых в ОИЯИ. Это свойство позволило развернуть полигоны для квантовых вычислений и для обработки экспериментальных данных ЛРБ, включить ресурсы СК «Говорун» в единую гетерогенную среду на основе платформы DIRAC для проекта NICA. Следует отметить, что некоторые задачи, например для моделирования данных эксперимента MPD, возможно выполнить только на ресурсах СК «Говорун».

Еще одним направлением исследований, в котором были задействованы ресурсы СК «Говорун», явилось создание объединенной масштабируемой научно-исследовательской суперкомпьютерной инфраструктуры на базе Национальной исследовательской компьютерной сети России (НИКС). В эту инфраструктуру, помимо СК «Говорун», вошли суперкомпьютеры межведомственного суперкомпьютерного центра Российской академии наук и Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. Созданная инфраструктура позволила участникам расширить свои локальные вычислительные мощности, обеспечить доступ к средствам хранения и обработки больших объемов данных, к распределенным хранилищам данных (датахабам), а также использовать мощности друг друга в случаях пиковых нагрузок.

Результаты, полученные с использованием ресурсов СК «Говорун» со времени ввода его в эксплуатацию в июле 2018 г. по настоящее время, отражены в 488 публикациях пользователей, при этом две из них в журнале Nature Physics.

Таким образом, опыт эксплуатации СК «Говорун» показал востребованность и результативность использования как новейших гиперконвергентных вычислительных архитектур, так и входящей в его состав иерархической системы обработки и хранения данных. В настоящее время ресурсы СК «Говорун» используются научными группами из всех лабораторий Ин-

ститута. Число пользователей СК «Говорун» составляет 323 человека, из них 262 являются сотрудниками ОИЯИ, а 61 — из стран-участниц. Доступ к ресурсам СК «Говорун» предоставляется только тем пользователям, которые принимают непосредственное участие в реализации ПТП ОИЯИ.

В 2022 г. цикл работ «Гиперконвергентный суперкомпьютер „Говорун“ для реализации научной программы ОИЯИ» (авторы Д. В. Беляков, А. С. Воронцов, М. И. Зуев, В. В. Кореньков, Д. В. Подгайный, Т. А. Стриж, О. И. Стрельцова (ЛИТ), А. А. Мошкин (ЛФВЭ), Е. А. Дружинин, Ю. М. Мигаль (ЗАО «РСК Технологии»)) на конкурсе работ ОИЯИ в разделе научно-методических и научно-технических исследований занял первое место.

В дальнейшем продолжилось планомерное развитие СК «Говорун», и к настоящему времени в его состав входят 163 гиперконвергентных вычислительных ЦПУ-узла, содержащих 8552 вычислительных ядра, что соответствует производительности 800 Тфлопс для расчетов с двойной точностью, и имеет в своем составе 96 ГПУ ускорителей (40 NVIDIA V100, 40 NVIDIA A100 и 16 NVIDIA H100) с суммарной производительностью 1,4 Пфлопс для расчетов с двойной точностью и 58 Пфлопс с половинной точностью. В итоге суммарная производительность СК «Говорун» достигла 2,2 Пфлопс для расчетов с двойной точностью, а суммарная емкость иерархической системы хранения данных составляет к настоящему времени 10,6 ПБ.

ПЛАТФОРМА HybriLIT

С введением в эксплуатацию СК «Говорун» кластер HybriLIT продолжил успешно функционировать, но роль его изменилась. Благодаря разработанной и внедренной ранее программно-информационной среде ресурсы кластера и суперкомпьютера были объединены в гетерогенную платформу, унаследовавшую имя HybriLIT[21]. Создание и дальнейшее развитие платформы потребовало расширения группы, в которую вошли системный администратор А. А. Кокорев, для поддержки инженерной инфраструктуры А. С. Воронцов, в группу поддержки пользователей А. И. Аникина, в группу разработки алгоритмов и сервисов для решения прикладных задач А. В. Стадник, Т. Ж. Бежанян, С. Шадмехри, К. А. Чижов, И. С. Пелеванюк и А. А. Мошкин, в группу прикладного программного обеспечения — Я. Буша (мл.) и М. А. Любимова. Группу с 2018 г. возглавляет Д. В. Подгайный, а его заместителем стала О. И. Стрельцова.

Основным вычислительным ядром платформы является СК «Говорун», а на ресурсах кластера, который получил название учебно-тестовый полигон, пользователи платформы получили возможность применять доступные пакеты прикладных программ и разрабатывать собственные приложения, проводить расчеты с использованием различных типов вычислительных

[21] *Anikina A., Belyakov D., Bezhanyan T., Kirakosyan M., Kokorev A., Lyubimova M., Matveev M., Podgainy D., Rakhmonova A., Shadmehri S., Streltsova O., Torosyan Sh., Valya M., Zuev M.* Structure and Features of the Software and Information Environment of the HybriLIT Heterogeneous Platform // Distributed Computer and Communication Networks. DCCN 2024. Lect. Notes Comput. Sci. 2025. V. 15460. P. 444–457.

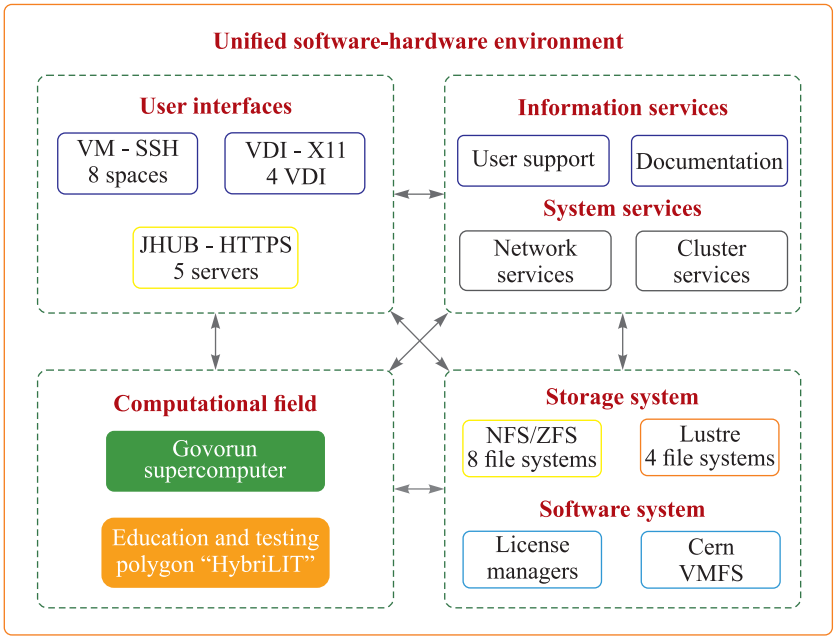


Рис. 13. Схема платформы HybriLIT

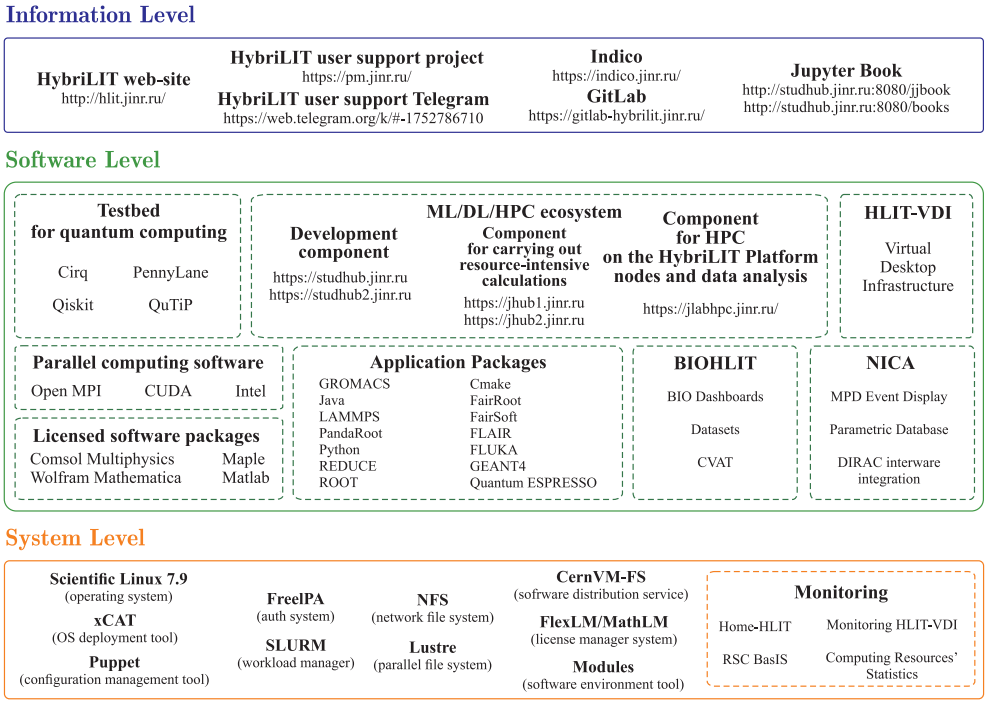


Рис. 14. Программно-информационная среда платформы HybriLIT

Участники молодежного семинара после презентации модернизированного суперкомпьютера «Говорун». 2019 г.

архитектур (центральные процессоры и графические ускорители) без необходимости переноса данных или перекомпиляции программ. Например, пользователи могут разрабатывать и отлаживать параллельные приложения на учебно-тестовом полигоне, ресурсоемкие расчеты проводить на СК «Говорун», а результаты анализировать и визуализировать в рамках экосистемы ML/DL/HPC. Помимо этого ресурсы кластера использовались и используются для проведения учебных курсов.

Дальнейшее развитие получила и программно-информационная среда платформы. Она обогатилась новыми IT-решениями, включая экосистему ML/DL/HPC, информационно-вычислительную систему BIOHLIT, полигоном для квантовых вычислений, набором сервисов для экспериментов на ускорительном комплексе NICA и рядом специализированных сервисов для прикладных исследований.

Для работы с пакетами прикладных программ с развитым графическим интерфейсом на платформе была организована система удаленных рабочих столов HLIT-VDI. В этом режиме пользователи имеют возможность работать с такими пакетами, как Matlab, Mathematica, Maple, COMSOL и др.

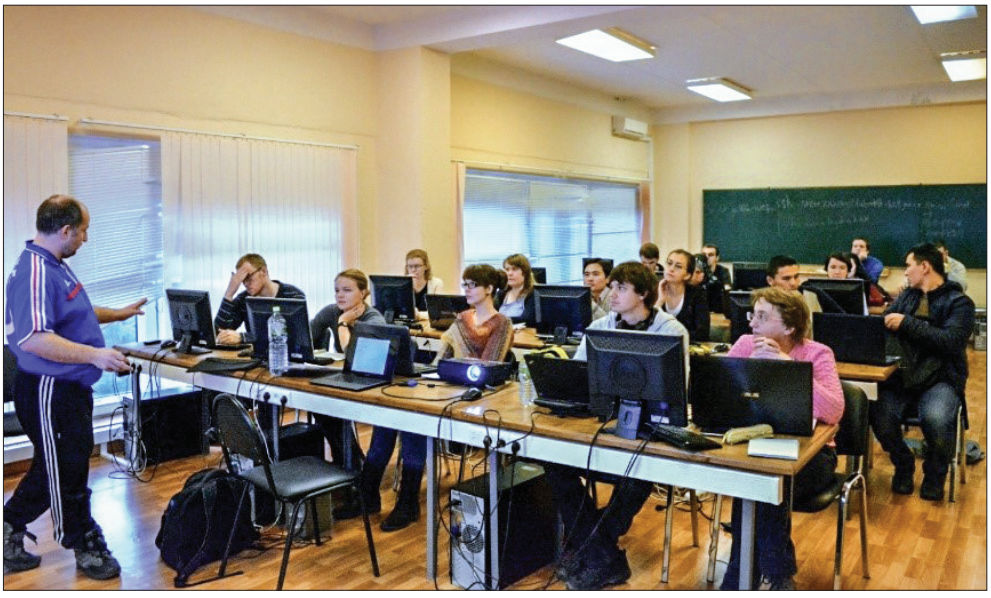
Для разработки алгоритмов машинного и глубокого обучения, упрощения работы с большими данными, анализа данных и визуализации, а также для проведения лекций, туториалов и мастер-классов для студентов, аспирантов и научных сотрудников ОИЯИ была создана и внедрена экосистема ML/DL/HPC. Она содержит основные библиотеки и фреймворки для задач машинного и глубокого обучения TensorFlow, PyTorch, Keras и др., позволяющие обучать нейросетевые модели на графических ускорителях

в рамках среды JupyterLab. Экосистема ML/DL/HPC предоставляет возможности не только для решения задач в области машинного и глубокого обучения, но и для удобной организации проведения расчетов и анализа результатов. Примерами таких решений служат разработанная информационно-вычислительная система для совместного проекта с ЛТФ по изучению теоретических моделей джозефсоновских переходов и информационная система BIOHLIT для совместного проекта с ЛРБ для обработки, анализа и визуализации данных радиобиологических исследований.

В рамках развития платформы на ресурсах экосистемы ML/DL/HPC для решения задач, связанных с разработкой квантовых алгоритмов и применением симуляторов квантовых вычислений, появился полигон для квантовых вычислений. На нем был имплементирован набор квантовых симуляторов, таких как Cirq, Qiskit, PennyLane, QuTiP, способных работать на различных вычислительных архитектурах.

В качестве сервисов для экспериментов на ускорительном комплексе NICA можно отметить разрабатываемое на выделенных ресурсах платформы специализированное программное обеспечение для коллаборации эксперимента MPD — веб-сервис MPD EventDisplay для визуализации структуры детектора MPD, визуализации экспериментальных данных и представления информации о зарегистрированных событиях, Parametric Database — ряд баз данных для хранения настроек и параметров подсистем детектора MPD, текущих настроек подсистем и параметров пучка, а также визуализации событий в режиме реального времени в ходе сеанса.

Практически сразу после введения в эксплуатацию в 2014 г. ресурсы кластера стали использоваться в учебных целях. Образовательная деятельность



Учебный курс по ROOT проводит М. Валя

Участники весеннего этапа школы по информационным технологиям ОИЯИ. 2025 г.

направлена на обучение пользователей работе на платформе, новым IT-технологиям и подготовку IT-специалистов для нужд лабораторий Института. Образовательная деятельность включает в себя проведение обучающих курсов и практикумов, которые посещают сотрудники ОИЯИ и участники научных школ.

С 2022 г. в ЛИТ ежегодно проводится школа по информационным технологиям ОИЯИ (IT-школа) для студентов разных вузов РФ и стран-участниц ОИЯИ, направленная на привлечение молодых специалистов к решению задач Института с применением высокопроизводительных и распределенных вычислений, методов и алгоритмов анализа данных, современных информационных технологий. IT-школа состоит из двух этапов. Целью первого (осеннего) этапа является знакомство участников с программой ОИЯИ, научными проектами и задачами. Студентам предлагается включиться в работу научных групп и предоставляется возможность выбора темы выпускной квалификационной работы любой ступени образования. На втором (весеннем) этапе IT-школы участники выступают с докладами, где представляют результаты проделанной работы в проектах ОИЯИ. В среднем каждый год на школу приезжают порядка 60 студентов, многие из них продолжают затем работу в ОИЯИ. В рамках IT-школы группа HybriLIT проводит лекции и практические занятия.

На ресурсах платформы на регулярной основе проводятся учебные курсы в университете «Дубна» по следующим дисциплинам: «Архитектура и технологии высокопроизводительных систем», «Параллельные распределенные вычисления», «Языки и технологии анализа данных», «Технологии высокопроизводительных вычислений», а в Тверском государственном университете проводится курс «Программные средства математических вычислений».

Наряду с регулярно проводимыми занятиями студенты имеют возможность проходить учебно-производственные практики в ЛИТ, решая конкретные научно-исследовательские задачи на базе платформы HybriLIT. Такая адаптивная образовательная программа позволяет обучать студентов и готовить специалистов с учетом быстро развивающегося HPC-сектора в области научного компьютинга для ОИЯИ и других организаций и IT-компаний, деятельность которых связана с использованием HPC-платформ.

В конце 2024 г. была разработана и пролицензирована образовательная магистерская программа «Методы и технологии обработки данных в гетерогенных вычислительных средах», подготовлены учебный план и рабочие программы дисциплин по направлению 01.04.02 «Прикладная математика и информатика» для филиала МГУ в Дубне. Программа включает изучение дисциплин по таким образовательным модулям, как компьютинг для проектов класса мегасайенс, математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, глубокое машинное обучение и аналитика больших данных. Занятия проходят с использованием возможностей платформы HybriLIT. В сентябре 2025 г. первые студенты начали обучение по данной магистерской программе.

ИНТЕГРАЦИЯ РЕСУРСОВ МИВК

Дальнейшее развитие МИВК потребовало интеграции всех ресурсов ОИЯИ и предоставления возможности их оптимального использования. Перед ЛИТ встала задача выбора программного обеспечения для этой цели. Долгое время использование больших географически распределенных грид-инфраструктур оставалось уделом лишь больших экспериментов, для которых выделялись целые группы специалистов на поддержку программных компонентов, инфраструктуры и развитие рабочих процессов в поддержку этой инфраструктуры.

Несмотря на то, что в середине 2000-х гг. был разработан набор промежуточного программного обеспечения под названием gLite, который должен был стать универсальным инструментом для организации обработки данных экспериментов на LHC, оказалось, что он не полностью удовлетворяет специфическим требованиям отдельных экспериментов. В итоге каждая из коллабораций стала разрабатывать свои инструменты и подходы к организации распределенных вычислений, используя пакет gLite как базу. Для эксперимента ATLAS таким промежуточным программным обеспечением стали упомянутые выше PanDA и BigPanDA. Другим инструментом стала платформа DIRAC (Distributed Infrastructure with Remote Agent Control), которая с 2002 г. разрабатывалась для эксперимента LHCb. Постепенно она превратилась во всеобъемлющий инструмент для организации распределенных вычислений с управлением пользовательскими задачами, данными, передачей данных и автоматизацией рабочих процессов. После

LHCb следующим экспериментом, в котором использовался DIRAC, стал Belle, затем последовали и другие эксперименты, среди которых оказался и BES-III — международный эксперимент в Институте физики высоких энергий (ИФВЭ) Китайской академии наук в Пекине, где ОИЯИ является активным участником. В 2013 г. в ОИЯИ начались работы по развитию вычислительной инфраструктуры эксперимента BES-III, и одной из задач было создание системы мониторинга сервисов и вычислительных ресурсов[22]. Эти работы были выполнены И. С. Пелеванюком, и полученный им опыт показал возможность использования платформы DIRAC для интеграции вычислительных ресурсов для других экспериментов, в том числе на ускорительном комплексе NICA.

Платформа DIRAC обладала следующими ключевыми особенностями, которые делали ее подходящей для организации обработки данных экспериментов на ускорительном комплексе NICA:

— достаточная производительность;
— открытое сообщество пользователей, администраторов и разработчиков с ежегодными рабочими совещаниями DIRAC Users' Workshop;
— полный набор сервисов для организации распределенных вычислений в рамках единой системы: управление задачами, данными, рабочими процессами, передачей данных;
— возможность использования одной инсталляции платформы DIRAC для нескольких независимых виртуальных организаций (в нашем случае это могли быть виртуальные организации, связанные с экспериментами на ускорительном комплексе NICA: BM@N, MPD и SPD).

Кроме того, у И. С. Пелеванюка был опыт в разработке компонентов DIRAC, полученный в ходе выполнения проекта создания системы мониторинга сервисов для распределенной инфраструктуры эксперимента BES-III.

К 2018 г. И. С. Пелеванюком (после установки и тестирования платформы DIRAC в ОИЯИ) выполнены две ключевые задачи. Во-первых, был предложен способ генерации данных методом Монте-Карло для эксперимента BM@N, проведены тестовые сеансы генерации с использованием DIRAC. Во-вторых, в том году при участии Н. А. Кутовского и его группы в систему DIRAC в ОИЯИ были интегрированы облачные ресурсы ОИЯИ и стран-участниц[23]. Для интеграции облаков потребовалось разработать совершенно новый модуль, который позволял бы DIRAC напрямую работать с облаками, построенными с помощью инструмента OpenNebula, на базе которого были созданы облака ОИЯИ и стран-участниц[24]. Впоследствии

---

[22] *Belov S., Suo B., Deng Z., Korenkov V., Li W. D., Lin T., Ma Z., Nicholson C., Pelavanyuk I., Trofimov V. , Uzhinskiy A., Yan T., Yan X. F., Zhang X. M., Zhemchugov A.* Design and Operation of the BES-III Distributed Computing System // Procedia Comput. Sci. 2015. V. 66. P. 619–624.

[23] *Balashov N. A., Kutovskiy N. A., Makhalkin A. N., Mazhitova Y., Pelevanyuk I. S., Semenov R. N.* Distributed Information and Computing Infrastructure of JINR Member States' Organizations // AIP Conf. Proc. 2021. V. 2377. 040001.

[24] *Balashov N., Kuchumov R., Kutovskiy N., Pelevanyuk I., Petrunin V., Tsaregorodtsev A.* Cloud Integration within the DIRAC Interware // CEUR Workshop Proc. 2019. V. 2507. P. 256–260.

разработанный модуль OpenNebula был использован и в ИВФЭ в Пекине для интеграции облачных ресурсов проектируемого в то время эксперимента JUNO.

2019 г. стал ключевым для развития географически распределенной гетерогенной вычислительной среды, построенной в ОИЯИ на базе платформы DIRAC. Кроме Tier-2 и облаков в DIRAC были интегрированы ресурсы кластера Tier-1, суперкомпьютера «Говорун» и системы хранения EOS[25]. Эта вычислительная среда использовалась для задач массовой генерации данных методом Монте-Карло для эксперимента MPD.

В 2020 г., когда мир захватила пандемия COVID-19, в системе добровольных вычислений Folding@Home была сделана отдельная очередь из задач, связанных с изучением молекулярной динамики коронавируса SARS-CoV-2. ОИЯИ и страны-участницы не остались в стороне. После консультаций с представителями организаций, чьи облака были интегрированы в систему DIRAC в ОИЯИ, было получено одобрение на выполнение задач Folding@Home из очереди COVID-19 на облачных ресурсах. Особенностью этих задач было то, что они передавали мало данных, но требовали много вычислений. С их помощью удалось продемонстрировать стабильность работы при полной загрузке облачных ресурсов, объединенных DIRAC. В выполнении этих задач, помимо ОИЯИ, приняли участие Российский экономический университет им. Г. В. Плеханова в Москве, Северо-Осетинский государственный университет во Владикавказе, Институт физики Национальной академии наук Азербайджана, Институт ядерных проблем БГУ (Беларусь), Институт ядерной физики (Казахстан), Академия научных исследований и технологий — египетская национальная сеть научно-технической информации, болгарский Институт ядерных исследований и ядерной энергетики.

После успешного запуска задач Folding@Home облачная инфраструктура ОИЯИ и стран-участниц стала использоваться для задач Монте-Карло моделирования эксперимента Baikal-GVD.

В 2021 г. в еще двух экспериментах стали использовать инфраструктуру DIRAC в ОИЯИ для генерации данных методом Монте-Карло: SPD и BM@N. Таким образом, построенная инфраструктура с 2021 г. используется для всех трех экспериментов на ускорительном комплексе NICA. Также в 2021 г. в рамках DIRAC была выполнена миллионная задача.

В 2021 г. премия ОИЯИ за работу «Разработка и внедрение единого доступа к гетерогенным распределенным ресурсам ОИЯИ и стран-участниц на платформе DIRAC» была присуждена В. В. Кореньковy, Н. А. Кутовскому, В. В. Мицыну, А. А. Мошкину, И. С. Пелеванюку, Д. В. Подгайному, О. В. Рогачевскому, В. В. Трофимову и А. Ю. Царегородцеву.

В 2023 г. для эксперимента BM@N была разработана методика полной обработки экспериментальных данных в рамках географически рас-

[25] *Korenkov V., Pelevanyuk I., Tsaregorodtsev A.* Integration of the JINR Hybrid Computing Resources with the DIRAC Interware for Data Intensive Applications // Commun. Comput. Inf. Sci. 2020. V. 1223. P. 31–46.

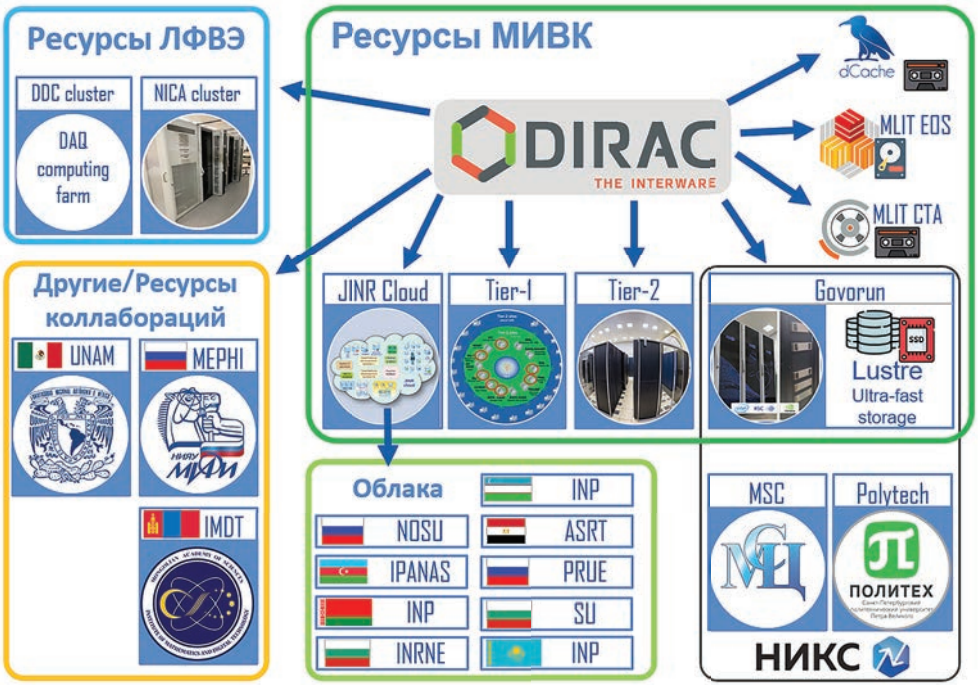


Рис. 15. Общая схема ресурсов, интегрированных в систему DIRAC в ОИЯИ в 2025 г.

пределенной гетерогенной вычислительной сети, построенной на основе DIRAC[26]. Эксперимент BM@N стал первым, в котором использовалась построенная инфраструктура для обработки экспериментальных данных. К 2024 г. с ростом количества данных появилась потребность в создании резервных копий для особо важных данных. Для этого в систему DIRAC была интегрирована ленточная библиотека. С ее помощью были сделаны резервные копии данных, собранных во время всех восьми сеансов эксперимента BM@N, а также часть данных коллаборации MPD.

К апрелю 2025 г. с помощью построенной географически распределенной гетерогенной вычислительной среды было выполнено более 3,5 млн вычислительных задач.

В настоящее время DIRAC Interware — единственная система, которая интегрирует все компоненты МИВК, выполняя функцию промежуточного звена между пользователями и различными вычислительными ресурсами, обеспечивая их эффективное, прозрачное и надежное использование, предоставляя общий интерфейс к разнородным ресурсам.

[26] *Gertsenberger K. V., Pelevanyuk I. S.* BM@N Run 8 Data Processing on a Distributed Infrastructure with DIRAC // Phys. Part. Nucl. Lett. 2024. V. 21. P. 778–781.

МОДЕЛИ И ПАКЕТЫ ПРОГРАММ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Современные исследования в области физики высоких энергий и ядерной физики требуют применения сложных методов моделирования, алгоритмов обработки данных и специализированного программного обеспечения. В Лаборатории информационных технологий разработан и успешно внедрен целый ряд инструментов и подходов, позволяющих решать задачи моделирования физических систем, обработки и анализа экспериментальных данных. Эти методы и алгоритмы играют ключевую роль в таких крупных экспериментах, как CBM (FAIR/GSI), BM@N, MPD и SPD (NICA), CMS, ATLAS (LHC), а также в исследованиях, связанных с изучением адронных взаимодействий, свойств кварк-глюонной плазмы и экзотических состояний материи.

В данном разделе рассматриваются основные методы, алгоритмы и программное обеспечение, разработанные в ЛИТ ОИЯИ в период с 2000 по 2025 г. Особое внимание уделяется следующим направлениям:

1. Генераторы событий:
- разработка и модификация моделей (FRITIOF, UrQMD, AMPT) для описания ядерных и адронных взаимодействий;
- интеграция генераторов в программные комплексы, такие как Geant4 и HEPWEB, для расчета сечений взаимодействий и характеристик вторичных частиц.

2. Моделирование физических процессов:
- применение методов Монте-Карло для предсказания характеристик детекторов и оптимизации их геометрии;
- развитие моделей, учитывающих особенности взаимодействий частиц.

3. Реконструкция событий:
- использование фильтра Калмана, клеточных автоматов и нейронных сетей для трекинга заряженных частиц;
- разработка быстрых алгоритмов, адаптированных для работы в режиме реального времени (например, в эксперименте CBM).

4. Идентификация частиц:
- применение машинного обучения (градиентный бустинг, глубокие нейронные сети) для разделения электронов и пионов в детекторах переходного излучения (TRD — Transition Radiation Detector) и черенковского излучения (RICH — Ring Image CHerenkov);
- сравнение традиционных статистических методов с современными подходами на основе искусственного интеллекта.

Разработанные методы и алгоритмы не только обеспечивают высокую точность обработки данных, но и позволяют эффективно использовать вычислительные ресурсы, включая гибридные архитектуры и системы параллельных вычислений. Результаты их применения находят отражение в публикациях и используются в международных коллаборациях, подтверждая значимость вклада ЛИТ ОИЯИ в развитие современных технологий обработки физических данных.

ГЕНЕРАТОРЫ СОБЫТИЙ

Генераторы событий в физике высоких энергий нужны для моделирования столкновений частиц, предсказания их результатов и сравнения с реальными экспериментальными данными. Они помогают проверять теоретические предсказания (например, Стандартной модели), оптимизировать детекторы, изучать редкие процессы, тренировать алгоритмы анализа данных и отделять полезные сигналы от фоновых шумов, что критически важно для поиска новой физики, такой как темная материя или дополнительные измерения.

В ЛИТ успешно выполнен ряд работ по разработке и применению генераторов событий. Так, модель FRITIOF была усовершенствована и включена в различные версии Geant4 силами А. С. Галоян (ЛФВЭ) и В. В. Ужинского. Она использовалась для моделирования адронных взаимодействий, включая процессы рождения странных частиц (K-мезонов, Λ-гиперонов).

Модель UrQMD и ее модификации применялись сотрудниками ЛИТ для моделирования ядерных столкновений. Эта модель была дополнена мультифрагментационной статистической моделью (SMM) для анализа азимутальных корреляций. Наряду с предыдущей моделью AMPT (A Multi-Phase Transport Model) она была включена в HEPWEB для расчетов характеристик вторичных частиц и протестирована на энергиях ускорителя RHIC.

Усилиями Ж. Мусульманбекова и коллег из ЛТФ ОИЯИ, Института ядерных исследований РАН и Института теоретической физики (Франкфурт, Германия) был разработан и развит генератор DCM-SMM для моделирования столкновений тяжелых ионов, используемый в настоящее время в экспериментах BM@N и MPD. DCM-SMM показывает хорошее согласие с экспериментальными данными, например, для упругого рассеяния протонов и антипротонов.

В рамках рассматриваемого направления В. В. Ужинским также разработаны новые алгоритмы для учета дифракционной диссоциации в FTF для улучшения описания данных эксперимента NA61/SHINE.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Моделирование в современных экспериментах физики высоких энергий необходимо для предсказания и интерпретации результатов столкновений частиц, поскольку реальные эксперименты на ускорителях (например, NICA и LHC) порождают огромное количество сложных данных, включая как интересующие ученых сигналы, так и фоновые процессы. С помощью компьютерных моделей, таких как PYTHIA, MadGraph и GEANT, физики сравнивают теоретические предсказания с наблюдениями, оптимизируют настройки детекторов, отличают редкие события от шумов и ищут отклонения от Стандартной модели, которые могут указывать на «новую» физику. Без моделирования анализ экспериментальных данных был бы крайне затруднен, а многие открытия невозможны.

Ряд работ А. С. Галоян и В. В. Ужинский посвятили применению Geant4 для моделирования детекторов и физических процессов, включая подавление (uu)-дикварков в протонах, что позволило улучшить описание данных NA49 по реакциям $p+p \to p+X$. Также авторами была разработана система HEPWEB, которая обеспечивала расчеты сечений адрон-адронных, адрон-ядерных и ядро-ядерных взаимодействий с использованием генераторов событий CASCADE, FRITIOF, UrQMD, HIJING и AMPT.

Моделирование методом Монте-Карло применялось для различных задач, таких как предсказания потоков вторичных частиц (например, нейтронов и протонов в подкритических сборках), оптимизация геометрии детекторов (например, GEM в эксперименте BM@N) и анализ фоновых процессов в экспериментах на LHC и NICA, оценка влияния параметров моделей на согласование с экспериментальными данными.

РЕКОНСТРУКЦИЯ ТРАЕКТОРИЙ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Алгоритмы реконструкции треков (трекинг) эволюционировали вместе с развитием экспериментальных установок и технологий регистрации частиц в трековых детекторах, переходя на новый уровень с появлением новых методов ускорения частиц и более сложных типов детекторов. С ростом потока данных появились разнообразные сканирующие устройства с передачей в компьютер координат всех зарегистрированных точек. Трекинг на основе этой информации потребовал применения преобразований координат для «спрямления» треков и использования модификации преобразования Хафа для их обнаружения. Этой задачей активно занимался Г. А. Ососков[27]. С началом электронных экспериментов появились трековые детекторы, регистрирующие треки частиц в виде сигналов, передаваемых в компьютер в оцифрованном виде. После многоэтапной фильтрации и процедур юстировки данных наступает время трекинга, состоящего из нескольких этапов. Сначала из сигналов, поступивших с датчиков детекторов, восстанавливаются хиты, т. е. пространственные точки, где была зарегистрирована какая-либо частица. Потом происходит построение треков из хитов путем поиска в событии всех хитов, оставленных одной и той же частицей. По форме траектории частицы в магнитном поле далее можно восстановить физические параметры частицы, а зная параметры частиц в событии, — извлечь из эксперимента физические выводы.

При дальнейшем развитии коллайдеров и компьютерных технологий наиболее эффективным оказался ставший классическим метод трекинга, в котором используется фильтр Калмана (ФК), поскольку он позволяет учитывать неоднородность магнитного поля, многократное рассеяние и потери энергии при прохождении частицы через среду детектора.

Под руководством В. В. Иванова был предложен алгоритм реконструкции треков заряженных частиц на основе ФК. Данный алгоритм применя-

[27] *Никитин В. А., Ососков Г. А.* Автоматизация измерений и обработки данных физического эксперимента. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1986. 185 с.

Обсуждение процесса обработки данных. Сидят: П. В. Зрелов, Г. А. Ососков, В. В. Иванов, А. А. Лебедев, П. Г. Акишин. Стоят: А. П. Сапожников, С. А. Багинян, Б. Ф. Костенко. 2006 г.

ется для решения одной из ключевых задач эксперимента CBM (Compressed Baryonic Matter) в FAIR — распознавания траекторий заряженных частиц и определения их параметров. Так как в эксперименте CBM планируется полная реконструкция сигнальных событий в реальном времени, то разработанный алгоритм был адаптирован с целью распараллеливания.

Модификация ФК, в том числе с использованием клеточных автоматов, была разработана и применена Д. А. Барановым и Г. А. Ососковым совместно с коллегами из ЛФВЭ для эксперимента BM@N и И. Киселем для вершинного детектора эксперимента HERA-B.

Ряд алгоритмов был разработан В. В. Пальчиком и Н. Н. Войтишиным для реконструкции траекторий заряженных частиц в катодно-стриповых камерах (КСК) эксперимента CMS. Все алгоритмы и методы были внедрены в официальный пакет программ эксперимента и используются в настоящее время как основные при реконструкции в КСК. Алгоритмы направлены на повышение эффективности восстановления траекторий высокоэнергетичных мюонов с поперечным импульсом выше 1 ТэВ. Стоит отметить, что некоторые из этих алгоритмов были адаптированы и для других детекторов: дрейфовых камер эксперимента BM@N на NICA и газовых электроумножителей эксперимента CMS.

Кроме классических подходов целый ряд алгоритмов с использованием машинного и глубокого обучения был разработан под руководством Г. А. Ососкова. Существенным толчком для этого направления послужило

соревнование TrackML[28], организованное ЦЕРН. Развитие нейросетевых методов реконструкции событий в трековых детекторах под руководством группы Г. А. Ососкова шло по двум направлениям. Первое — это локальный подход, при котором, как и в фильтре Калмана, треки распознаются последовательно друг за другом. Сюда можно отнести полученные еще вне рамок TrackML работы[29], где благодаря применению глубоких рекуррентных нейронных сетей удалось реализовать нейросеть TrackNet как нейросетевой аналог фильтра Калмана и получить хорошие результаты для модельных событий таких экспериментов, как BM@N, BES-III и SPD. Второй подход — более общий, глобальный, когда распознавание треков среди всех хитов события, реальных, фейковых и шумовых, осуществляется сразу по всей картине события, как это делается в графовой нейронной сети[30]. Такими же общими свойствами обладает сквозная обучаемая сверточная YOLO-подобная нейросеть, названная LOOT (Look Once On Tracks[31]), которая может обрабатывать все событие, представляя его в виде изображения.

Попытки непосредственного использования алгоритмов, разработанных в TrackML-концепции, не были удачными из-за существенной разницы в экспериментальных данных, обусловленной спецификой применяемых детекторов, как это было, когда программу графовой нейросети[32] применили к данным GEM эксперимента BM@N.

Нейросетевая программа TrackNet была применена к данным эксперимента SPD, и был получен впечатляющий результат при прогоне 25 000 модельных событий SPD, представляющих 625 тайм-слайсов с 40 событиями в каждом, на суперкомпьютере «Говорун» (Xeon(R) Gold 6148 CPU @ 2.40GHz, Single Nvidia V100 32Gb GPU), была достигнута скорость обработки свыше 2500 событий/с (снижается до 1400 событий/с при учете неэффективности детекторов).

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЧАСТИЦ

Этап идентификации частиц в современных экспериментах физики высоких энергий играет одну из ключевых ролей, так как позволяет определить тип, заряд, массу и другие характеристики частиц, рождающихся в столкновениях, что необходимо для проверки предсказаний Стандартной модели и поиска «новой» физики (например, темной материи или суперсимметрии), а также для реконструкции сложных процессов распада. Без точной идентификации частиц невозможно корректно интерпретировать данные детекторов, отделить сигналы от фона или обнаружить редкие события, такие как рождение бозона Хиггса. В своих работах, посвященных идентификации частиц, сотрудники ЛИТ с успехом использовали как ней-

[28] https://arxiv.org/pdf/1904.06778.pdf
[29] https://doi.org/10.1063/1.5130102; https://doi.org/10.1063/5.0063993
[30] https://arxiv.org/pdf/2007.00149.pdf
[31] https://ceur-ws.org/Vol-2507/130-134-paper-22.pdf
[32] https://arxiv.org/pdf/2007.00149.pdf

росетевые, так и статистические методы для улучшения разделения частиц в эксперименте.

Для эксперимента CBM (FAIR) в сотрудничестве с коллегами из GSI Г. А. Ососков и С. А. и А. А. Лебедевы разработали параллельные алгоритмы идентификации частиц с помощью черенковского детектора (RICH), детектора переходного излучения (TRD) и мюонной системы (MUCH). Реализованное программное обеспечение, в котором используются такие возможности современных процессоров, как векторная обработка данных (SIMD) и многопоточность, позволило значительно увеличить скорость процесса распознавания. Быстрый алгоритм распознавания колец в детекторе RICH основан на преобразовании Хафа. Для реконструкции треков в детекторе TRD реализован алгоритм, использующий метод фильтра Кальмана. Для идентификации электронов в обоих детекторах разработан эффективный алгоритм на основе искусственной нейронной сети. Разработанные алгоритмы позволили достичь высокой эффективности идентификации частиц. Также группой под руководством В. В. Иванова была развита методика проведения надежной и быстрой идентификации и реконструкции распадов $J/\psi \to e^+ e^-$ и $J/\psi \to \mu^+ \mu^-$, регистрируемых детекторами установки CBM, включающая цепочку математических методов, предназначенных для реконструкции траекторий и импульсов заряженных частиц, их идентификации с помощью детекторов RICH, TRD, ToF (Time-of-Flight detector), MUCH (MUon CHamber).

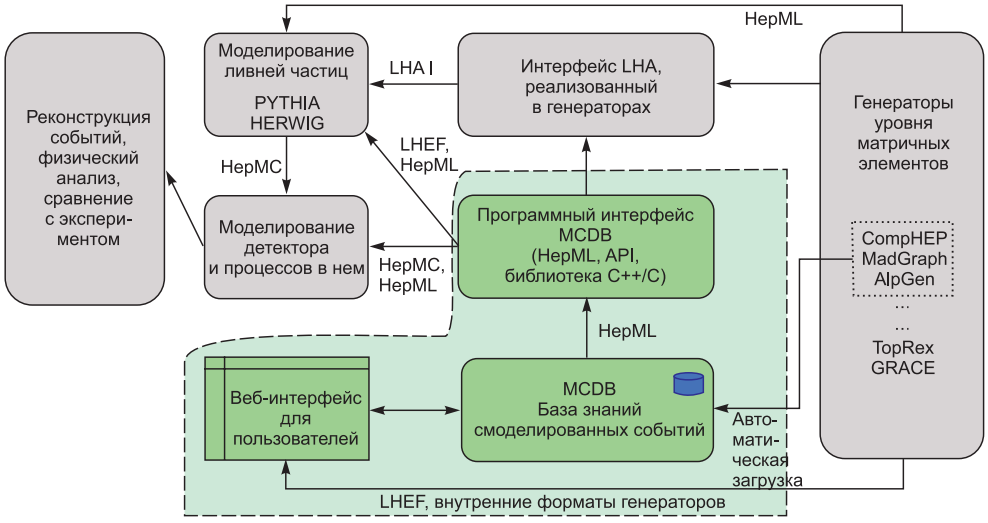
В рамках приоритетных направлений разработки и внедрения методов машинного обучения в задачи анализа данных эксперимента MPD мегапроекта NICA развиваются методики идентификации заряженных частиц по их откликам в детекторных системах. Под руководством А. С. Айрияна были разработаны методы, основанные на применении градиентного бустинга на деревьях решений. Обучение моделей производится на сгенерированных методом Монте-Карло наборах данных, где истинная идентичность частиц известна. В качестве признаков используются реконструированные параметры треков, энергия, время пролета и геометрическая информация. Разработанные модели демонстрируют высокую точность классификации и существенно превосходят по эффективности стандартные пороговые методы. Проводимые исследования стали возможны благодаря вычислительным ресурсам гетерогенной платформы HybriLIT.

БАЗА ЗНАНИЙ СМОДЕЛИРОВАННЫХ СОБЫТИЙ MONTE CARLO DATA BASE

В экспериментах физики высоких энергий большое значение имеет моделирование физических процессов и событий. В качестве одного из основных методов моделирования событий применяется метод Монте-Карло, или метод статистических испытаний. Точное и достоверное моделирование требует значительных компьютерных ресурсов, например, порядка 20 % времени в компьютинге эксперимента ATLAS, и детального сравнения

результатов, получаемых с помощью различных пакетов моделирования. Важной задачей является обеспечение корректности итоговых результатов моделирования и возможности их быстрого получения. Возникает необходимость не только в создании и хранении корректно подготовленных и детально описанных образцов смоделированных физических событий для дальнейшего использования, но и в возможности получения доступа к этим данным из глобально распределенной вычислительной инфраструктуры.

В эксперименте CMS потребность в системе хранения и доступа к смоделированным экспертами событиям исторически решалась в нескольких проектах. Первой подобной системой была созданная в ЦЕРН система PEVLIB — база данных для хранения событий партонного уровня, смоделированных с помощью генератора CompHEP. Все данные были доступны в файловой системе AFS в ЦЕРН, связанная с файлами метаинформация хранилась в той же директории в виде текстового документа. Следующая версия подобной базы была в Национальной ускорительной лаборатории им. Э. Ферми (США). База данных содержала события, смоделированные при помощи Монте-Карло генераторов, хранящиеся на системе лент ENSTORE во FNAL; документация к этим файлам с событиями была доступна через веб. Следующая база событий — CMS Monte Carlo Data Base (MCDB) — была разработана в коллаборации CMS. Все эти проекты имели ряд существенных недостатков, поэтому в рамках проекта LHC Computing Grid была разработана база знаний смоделированных событий MCDB. Основными ее отличиями от предшественников были возможность описания широкого класса событий (не только с партонами в конечном состоянии), автомати-



HepMC — объектно-ориентированный формат записи событий
LHA I — стандарт для передачи описания событий через COMMON-блок FORTRAN
LHEF — стандарт файлов событий, совместимый с LHA и основанный на XML

Рис. 16. MCDB и HepML в цепочке моделирования событий эксперимента CMS

ческая загрузка и выгрузка событий и детальной информации о них, а также возможность полноценной работы с системой из грид-среды. MCDB разрабатывалась с 2004 по 2013 г. в ЦЕРН специалистами НИИЯФ МГУ (Л. В. Дудко, А. В. Шерстнев) и ЛИТ ОИЯИ (С. Д. Белов, Д. В. Кекелидзе)[33].

В MCDB согласно ее предназначению хранятся файлы сгенерированных событий и соответствующая метаинформация. Описания событий (метаинформация) полностью соответствуют схемам созданного С. Д. Беловым языка HepML (High energy physics markup language)[34]. Поэтому для автоматизированного, программного способа взаимодействия с MCDB естественным образом используются документы HepML. Поддержка работы с MCDB и языком HepML была реализована и интегрирована в CMSSW (программное обеспечение коллаборации CMS). Доступ к файлам в MCDB по различным протоколам (rfio, xroot, gsiftp и т. д.) осуществляется внутренними средствами CMSSW. Предусмотрен функционал удаленной загрузки в MCDB новых файлов с событиями. Он реализован в специальном программном сценарии, который использует стандартные для грид-среды средства аутентификации пользователя (прокси-сертификат без или с информацией от сервиса управления виртуальной организацией). Программный сценарий поддерживает файлы в формате LHEF, которые могут иметь заголовки HepML или производимые генератором MadGraph. В качестве систем хранения могут использоваться CASTOR, CERN Tape Archive, dCache, EOS и др. Требуется только поддержка стандартных методов авторизации (цифровой сертификат, токен Kerberos), а для загрузки в них данных — протоколов RFIO, HTTP, XRootD, SRM, GridFTP. В сервисе MCDB в ЦЕРН в качестве основной системы хранения использовался CASTOR, а впоследствии и EOS. Доступ к файлам событий (загрузка и выгрузка) реализован с использованием указанных выше протоколов, в том числе применяемых в среде грид. Это позволило использовать базу знаний MCDB для повышения степени автоматизации официальной цепочки моделирования событий в эксперименте CMS в 2010–2013 гг.

УЧАСТИЕ В ПРОЕКТАХ ATLAS TDAQ, EventIndex И CREST

Следует отметить важные работы, которые выполнялись сектором распределенных систем реального времени под руководством В. М. Котова, а затем И. Н. Александрова в рамках эксперимента ATLAS при разработке и запуске системы Trigger and Data Acquisition (TDAQ) — онлайн системы принятия триггерных решений и сбора данных в этом эксперименте.

---

[33] *Belov S., Dudko L., Galkin E., Gusev A., Pokorski W., Sherstnev A.* LCG MCDB — A Knowledgebase of Monte-Carlo Simulated Events // Comp. Phys. Commun. 2008. V. 178, No. 3. P. 222–229.

[34] *Belov S., Dudko L., Kekelidze D., Sherstnev A.* HepML, an XML-based Format for Describing Simulated Data in High Energy Physics // Comp. Phys. Commun. 2010. V. 181, No. 10. P. 1758–1768.

Эти работы начались во второй половине 1990-х гг. совместно с отделом встречных пучков ЛЯП с разработки триггерных алгоритмов отбора полезных событий в MDT трубках мюонного детектора ATLAS в рамках триггера второго уровня. Однако Л. Мапелли, руководивший в те годы созданием TDAQ, порекомендовал В. М. Котову заняться работами в системе DAQ (back-end software), не связанными с обработкой физических событий. Коротко говоря, это весь софт, который отвечает за загрузку, старт и управление работой триггерной системы и системы сбора и обработки данных. Эти работы велись в рамках проекта «ATLAS DAQ/Event Filter прототип-1». Группе В. М. Котова было поручено создать прототип компонента Resource Manager. Все разработки в группе ЦЕРН back-end велись в строгом соответствии со стандартом PSS-05 Европейского космического агентства, т. е. до начала программирования необходимо было создать документ User Requirements, архитектурный дизайн, детальный дизайн, объектную и еще много других моделей. Объяснялось это тем, что система ATLAS TDAQ back-end — это система с долгим сроком эксплуатации (long life cycle), и ошибки, допущенные на начальном этапе, тяжело исправлять. Несколько лет дизайн компонентов и их взаимодействие обсуждались в рамках back-end группы ATLAS ЦЕРН, а затем после принятия решения о начале следующего этапа все было запрограммировано и заработало в течение полугода. Вместе с В. М. Котовым в этих работах принимали участие В. С. Ямбуренко и И. Н. Александров, позже подключился Е. И. Александров. На основе прототипа было создано программное обеспечение компонента, и оно вошло в ядро back-end software TDAQ ATLAS. В 2005 г. комплект программных средств для менеджера ресурсов Resource Manager системы TDAQ ATLAS был включен в состав ядра окончательной версии всего программного обеспечения TDAQ. Это был единственный компонент ядра, за который отвечали не сотрудники ЦЕРН.

В 2002–2003 гг. была разработана программа Event Dump. Она обеспечивала мониторинг правильности формирования сырых физических данных и была в 2008 г. включена в штатное программное обеспечение системы триггирования и сбора данных ATLAS.

Полученный опыт и успехи грид-технологий позволили рассмотреть задачу удаленного контроля и мониторинга установки ATLAS практически из любой точки мира.

Работы по созданию в ОИЯИ системы удаленного доступа для сбора и обработки данных эксперимента ATLAS были начаты в 2007 г. специалистами дубненской группы TDAQ (рук. В. М. Котов) и ЛЯП (рук. А. С. Жемчугов). В 2011 г. в ОИЯИ создана полноценная система удаленного доступа в реальном времени и осуществлена ее интеграция в глобальную грид-систему сбора и обработки данных экспериментов на LHC. Разработка такой системы для удаленного мониторинга процессов сбора и обработки данных эксперимента ATLAS — результат многолетнего сотрудничества ОИЯИ и ЦЕРН по проекту TDAQ ATLAS.

В 2013 г. был запущен новый плагин-сервис WMI (WEB Monitoring Interface), который посредством введенного в ЦЕРН информационного

сервиса WebIS давал возможность пользователям, находящимся не в ЦЕРН и вне среды TDAQ, получать данные из компонента Information Service.

Группой TDAQ ATLAS в ЛИТ ОИЯИ были созданы и сопровождались такие пакеты программ, как Event Dump, Resource Manager, Web Monitoring Interface, а также осуществлялось обеспечение удаленного доступа к данным ATLAS из ОИЯИ. Работами этой группы, в которую входили Е. И. Александров, И. Н. Александров, А. А. Казаков, А. И. Казымов, М. А. Минеев, А. В. Яковлев и др., до конца 2014 г. руководил В. М. Котов.

В дальнейшем под руководством И. Н. Александрова группа расширила сферу своей активности в ATLAS работами в проектах офлайн софта, приняв участие в развитии проекта EventIndex (индекс событий)[35]. Цель проекта — создание полного каталога всех реальных и смоделированных событий ATLAS, содержащего ссылки на все постоянные файлы. Каждый год в рамках эксперимента ATLAS создается несколько миллиардов записей о событиях в формате сырых данных и других форматах. Данные распределяются по сотням компьютерных сетей по всему миру. Система EventIndex каталогизирует все события ATLAS и предоставляет набор инструментов для поиска и извлечения информации об отдельных событиях или группах событий в соответствии с выбором пользователя. Основная цель EventIndex — дать возможность участникам ATLAS искать и извлекать одно или несколько отдельных событий из десятков миллионов файлов данных для проведения подробных проверок или более тщательного анализа. Первый прототип EventIndex был развернут в 2015 г.

Сотрудники ЛИТ подключились к работам в 2018 г. Ими была разработана новая система мониторинга, увеличившая скорость обработки запросов в несколько раз. Ядро EventIndex было переработано в 2021 г., и обновленная система введена в эксплуатацию в 2022 г.

Иногда для физического анализа требуется массированный отбор событий, чтобы выбрать набор интересных событий из огромного количества данных ATLAS и обработать их с помощью усовершенствованных алгоритмов или сохранить дополнительные переменные, которые могут помочь на последующих этапах анализа. В этом может помочь EventIndex, но в ручном режиме его использование требует много времени. Сотрудники ЛИТ ОИЯИ приняли основное участие в разработке сервиса отбора событий (Event Picking), цель которого — выполнять все эти действия автоматически.

Часть разработчиков EventIndex из ЦЕРН принимала участие также в проекте CREST, целью которого является создание новой базы данных условий. Система CREST должна заменить в Run 4 используемые в настоящее время системы COOL/COREL. Ввиду успешности подключения группы ЛИТ к работам по EventIndex поступило предложение подключиться также к работам в проекте CREST. В настоящее время группа ЛИТ активно участвует в реализации и этого проекта, в лаборатории созданы программы конвертации данных из COOL в CREST, что являлось приоритетной зада-

[35] *Barberis D., Alexandrov I., Alexandrov E. et al.* The ATLAS EventIndex // Comput. Soft. Big. Sci. 2023. V. 7. P. 2.

чей на момент подключения к работам в проекте, а также реализован на C++ программный интерфейс для запросов к CREST серверу.

РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ФИЗИКИ

Цель вычислений — понимание, а не числа.
Ричард Хэмминг

Физические исследования, как теоретические, так и экспериментальные, нуждаются в количественных оценках характерных параметров изучаемых наблюдаемых. Такого рода фундаментальные задачи решаются с помощью методов вычислительной физики.

Обзор развития ОИЯИ в первой четверти XXI в. дает возможность поразмышлять об эволюции методов вычислительной физики и обсудить краеугольные достижения на этом пути в ЛИТ.

Появление вычислительной физики к середине XX в. было тесно связано с созданием и бурным развитием ЭВМ.

Развитие вычислительной физики в ЛИТ всегда было и остается сложным процессом, в котором движущую роль играет человеческий фактор.

Главное в этой области — наличие сильных личностей, обладающих исключительно высокой математической компетенцией, деятельность которых приводит к определению необходимых долгосрочных направлений исследований. К сожалению, последние два десятилетия ознаменовались потерей значительного числа этих людей.

Нельзя не вспомнить о профессоре Е. П. Жидкове (руководителе исследований по вычислительной математике, моделированию магнитных полей в экспериментальных установках), профессоре В. П. Гердте (основоположнике исследований по компьютерной алгебре и пионере квантовых вычислений), профессоре И. В. Пузынине (инициаторе численных схем на основе непрерывного аналога метода Ньютона, а также использования методов молекулярной динамики в численном моделировании физических и биологических систем).

Также ушли из жизни ученые, достигшие исключительных научных результатов: В. С. Барашенков, И. М. Иванченко, И. Л. Боголюбский, С. И. Сердюкова, И. В. Амирханов.

В течение 2001–2024 гг. ученые ЛИТ, работающие над развитием методов вычислительной физики, удостоены 18 премий ОИЯИ в рамках сотрудничеств, в которых они участвовали.

Особо следует отметить премию за выдающийся доклад от Ассоциации вычислительной техники (ACM) на Международном симпозиуме по символьным и алгебраическим вычислениям (ISSAC) 2017 г. (Distinguished Paper Award by Association of Computing Machinery (ACM) at the International

Стоят: Е. В. Земляная, П. Атанасова, Ю. Л. Калиновский, И. В. Амирханов, И. Сархадов. Сидят: Т. П. Пузынина, И. Н. Кухтина, И. В. Пузынин. 2005 г.

Symposium on Symbolic and Algebraic Computation (ISSAC) 2017), присужденную В. П. Гердту (http://www.issac-conference.org/2017/awards.php)[36].

За прошедшие 25 лет сотрудниками лаборатории и коллегами из стран-участниц, работавшими в ЛИТ ОИЯИ, были защищены 13 докторских и 34 кандидатских диссертации по физико-математическим наукам. Из них 11 докторов и 23 кандидата наук работают в ЛИТ по сей день.

Ниже приведена краткая информация о некоторых избранных достижениях в развитии методов вычислительной физики.

Вычислительные схемы на основе непрерывного аналога метода Ньютона (НАМН) представляют собой мощный инструмент численного решения нелинейных задач различных типов, гибко подстраивающийся под особенности конкретных задач, обеспечивая быструю сходимость и высокую точность получаемых численных решений.

Важным итогом десятилетнего развития НАМН в ЛВТА–ЛИТ под руководством профессора И. В. Пузынина стал обзор[37].

Существуют несколько направлений исследований на основе НАМН. К ним относятся исследования ряда новых локализованных состояний в системах, описываемых различными вариантами нелинейного уравнения Шредингера с диссипацией и накачкой, включая стационарные многосоли-

[36] *Gerdt V. P., Lyakhov D. A., Michels D. L.* // Proc. ISSAC 2017. ACM Press, 2017. P. 285–292.

[37] *Пузынин И. В., Бояджиев Т. Л., Виницкий С. И., Земляная Е. В., Пузынина Т. П., Чулуунбаатар О.* О методах вычислительной физики для исследования моделей сложных физических процессов // ЭЧАЯ. 2007. Т. 38, вып. 1. С. 144–232.

Участники конференции QPC'2007: О. Чулуунбаатар, А. А. Гусев, проф. Нгуен Ван Хьеу, В. П. Гердт. 2007 г.

тонные комплексы, периодические и квазипериодические локализованные структуры, осциллоны с параметрической накачкой и др. Соответствующие численные подходы адаптированы и используются для численного исследования 3D осциллонов в теории φ^4 на основе их аппроксимации стоячими волнами в шаре конечного радиуса. Эти исследования проводились в сотрудничестве с Университетом Кейптауна (Е. В. Земляная, И. В. Барашенков, Н. В. Алексеева, А. А. Боголюбская и др.) и проливают свет на некоторые малоизученные свойства осциллонов. Отметим, что модель осциллона (или «пульсона»), открытая в пионерских вычислительных экспериментах по нелинейным полям Боголюбским и Маханьковым (1976–1977) на ЭВМ БЭСМ-6 в ЛВТА (ЛИТ) в ранние дни вычислительной физики, остается стандартным инструментом в квантовой теории поля и космологии.

Следующее направление применения НАМН — численное исследование многофлюксонных состояний в системах длинных джозефсоновских переходов различных конфигураций. Здесь использовался развитый Т. Л. Бояджиевым и его коллегами оригинальный подход на основе совместного решения с помощью НАМН соответствующих систем уравнений синус-Гордона и линеаризованной задачи на собственные значения для анализа устойчивости получаемых флюксонных решений к малым возмущениям. Это позволило установить взаимосвязь между различными ветвями сосуществующих стационарных многофлюксонных состояний для моделей джозефсоновских структур, описываемых уравнением двойного синус-Гордона. Эти исследования проводились в сотрудничестве с болгарскими кол-

легами и коллегами из ЛТФ, в них участвовали Т. Л. Бояджиев, П. Х. Атанасова, Е. В. Земляная, С. Н. Димова, Ю. М. Шукринов и др.

В работах Во Чонг Тхака, И. В. Пузынина и Т. П. Пузыниной были предложены новые алгоритмы вычисления ньютоновского итерационного параметра и продемонстрирована их эффективность при решении ряда задач. А в исследованиях И. В. Пузынина, И. Г. Христова и др. описаны модифицированные итерационные схемы на основе НАМН, позволившие получить с высокой точностью новые семейства решений специального вида в задаче трех тел на плоскости.

Реализация высокоэффективных численных алгоритмов для решения граничных или начальных задач квантовой физики была неисполненной мечтой второй половины XX в. К началу XXI в. группа, сосредоточенная в ЛИТ, включающая О. Чулуунбаатара, А. А. Гусева, С. И. Виницкого (ЛТФ ОИЯИ), А. Г. Абрашкевича (Канада, ранее ЛВТА), предложила формулировку исходных квантово-механических задач в подходящих либо краевых формах, либо формах Коши и решение полученных задач с помощью *методов конечных элементов* (FEM) высокого порядка точности. Это позволило получить численные решения начально-краевых и краевых задач, описывающих волновые и гидродинамические процессы, фотоионизации атома в магнитном поле, туннелирование кластеров из нескольких тождественных частиц через потенциальные барьеры и ямы, подбарьерные реакции захвата тяжелых ионов, спектры и вероятности переходов между состояниями атомных ядер, атомов и молекул, с согласием результатов с теоретическими оценками, эталонными расчетами или с экспериментальными данными. Идея профессора В. П. Гердта объединить средства компьютерной алгебры и цифрового программирования позволила существенно повысить эффективность решения задач, связанных с системами с дальнодействующими потенциалами. Созданные выдающиеся комплексы программ KANTBP, ODPEVP, POTHEA и др., разработанные на языке Фортран и в системе Maple, опубликованы *в библиотеке программ* журнала Computer Physics Communications[38] и в библиотеке программ ОИЯИ (JINRLIB).

На основе использования этих комплексов программ опубликованы более 50 работ в рецензируемых журналах, две монографии[39,40] и обзор[41]. Были получены верхние и нижние оценки энергий 252 связанных состоя-

---

[38] *Chuluunbaatar O., Gusev A. A., Vinitsky S. I., Abrashkevich A. G., Wen P. W., Lin C. J.* 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. 108397–1–14.

[39] *Vandandoo U., Zhanlav T., Chuluunbaatar O., Gusev A., Vinitsky S., Chuluunbaatar G.* High-Order Finite Difference and Finite Element Methods for Solving Some Partial Differential Equations. Switzerland: Springer Nature, 2024. 114 p.

[40] *Zhanlav T., Chuluunbaatar O.* New Developments of Newton-Type Iterations for Solving Nonlinear Problem. Switzerland: Springer Nature, 2024. 281 p.

[41] *Mitin A. V., Gusev A. A., Chuluunbaatar G., Chuluunbaatar O., Vinitsky S. I., Derbov V. L., Luong H. L.* Dual Nature of Chemical Bond and Vibration-Rotation Spectrum of the Be_2 Molecule in the Ground $X^1\Sigma_g^+$ State // Chemical and Materials Sciences: Research Findings. V. 2. Ch. 6. BP Intern. Publ., 2025. P. 100–133.

ний и вещественных частей комплексных энергий, 58 метастабильных состояний димера бериллия и подтверждено существование новых метастабильных состояний, вычислены сечения подбарьерного слияния тяжелых ионов. Работа[42] по вычислению сечения квазиупругого рассеяния под обратным углом сверхтяжелых ионов ^{48}Ti + ^{208}Pb и ^{51}V + ^{248}Cm может продвинуть изучение *синтеза сверхтяжелых элементов*, предоставляя надежную информацию о функции распределения барьеров и сечения захвата на основе ограничений из квазиупругих реакций. Соавторами вышеуказанных работ также были М. С. Касчиев (Болгария), В. А. Ростовцев, Я. Буша (мл.), Г. Чулуунбаатар, А. В. Митин (МФТИ), В. Л. Дербов (СГУ), А. А. Саркисян (Армения), П. М. Красовицкий (Казахстан), A. Góźdź (Польша), C. J. Lin (Китай), P. W. Wen (Китай), L. L. Hai (Вьетнам). Выполненные исследования отмечены двумя премиями ОИЯИ (в 2015 и 2024 гг.).

Разработанное символьно-числовое программное обеспечение позволило точно описать экспериментальные результаты, полученные международными исследовательскими группами. Выполнены численные исследования моделей однократных и двукратных реакций ионизации атома гелия, ионов и молекул водорода, азота, диоксида углерода электронным ударом, и достигнуто хорошее согласие теоретических и современных экспериментальных значений сечений ионизации.

Впервые получено *правильное количественное описание* интерференционных эффектов когерентного рассеяния электрона на двух кулоновских центрах молекулы, проявляющихся в установленном функциональном отношении дифференциальных сечений ионизации атома гелия и молекулы водорода, в эксперименте Лаборатории атомных и молекулярных столкновений (Орсе, Франция).

Впервые удалось *вычислить сечение комптоновской ионизации* в диапазоне энергий фотона порядка нескольких кэВ, которое примерно на шесть порядков меньше типичных значений сечений фотопоглощения. Это дало возможность точно описать эксперимент по кинематически полному измерению характеристик комптоновского рассеяния на свободных атомах с помощью высокоэффективного метода COLTRIMS (COLd Target Recoil Ion Momentum Spectroscopy), проведенный в Университете Гете (Франкфурт-на-Майне, Германия)[43].

Соавторами вышеуказанных работ также были Ю. В. Попов (ЛТФ ОИЯИ, МГУ), К. А. Кузаков (МГУ), B. Joulakian (Франция), R. Dörner (Германия), M. S. Schöffler (Германия), M. Kircher (Германия), S. Houamer (Алжир), M. Takahashi (Япония).

---

[42] *Wen P. W., Chuluunbaatar O., Descouvemont P., Gusev A. A., Lin C. J., Vinitsky S. I.* Role of Multi-Phonon and High-Spin States on the Quasi-Elastic Barrier Distributions of Massive Systems // Phys. Lett. B. 2025. V. 863. 139383–1–5.

[43] *Kircher M., Trinter F., Grundmann S., Vela-Perez I., Brennecke S., Eicke N., Rist J., Eckart S., Houamer S., Chuluunbaatar O., Popov Yu. V., Volobuev I. P., Bagschik K., Piancastelli M. N., Lein M., Jahnke T., Schöffler M. S., Dörner R.* Kinematically Complete Experimental Study of Compton Scattering at Helium Atoms near the Threshold // Nat. Phys. 2020. V. 16. P. 756–760.

Метод базисных элементов[44] (МБЭ), предложенный Н. Д. Дикусаром, является принципиально новым подходом к решению задач прикладной математики. На основе МБЭ создан новый класс иерархических МБЭ-многочленов, устойчивых к ошибкам и снижающих вычислительную сложность, разработаны и внедрены в практику: метод кусочно-кубической аппроксимации (совместно с Ч. Тороком, Словакия), метод кусочно-полиномиальной аппроксимации высокого порядка, метод аппроксимации контуров сложной топологии, явный метод численного решения жестких задач Коши пятого порядка точности и др. МБЭ-многочлены высоких степеней применяются для нормализации спектров плотности энергии импульсов реактора ИБР-2М, в рамках сотрудничества с ЛНФ (Ю. Н. Пепелышев и Ц. Цогтсайхан), МБЭ-многочлены пятой степени использованы для анализа нейтронного шума этого реактора.

Новые научные проекты, в которых участвовал ОИЯИ, требовали интенсивного *трехмерного компьютерного моделирования магнитных полей в заданных геометриях экспериментальных установок и совершенствования средств проектирования новых циклотронов медицинского назначения*.

Самыми ранними решенными задачами были расчеты сил, действующих в магнитной системе установки ЭКСЧАРМ (Протвино). Коллектив авторов (Е. П. Жидков, О. И. и М. В. Юлдашевы) предложил новый метод вычисления потенциала от обмотки при расчете трехмерных нелинейных магнитных полей, который не накапливает ошибку.

П. Г. Акишин на протяжении многих десятилетий вел исследования методов вычисления магнитных полей[45], а также занимался адаптацией и использованием существующих подходов к моделированию магнитных систем в экспериментах, проводимых ОИЯИ. В рамках этих работ моделировались дипольный магнит и сверхпроводящий экран эксперимента ALICE (ЦЕРН). Полученный опыт использовался для моделирования и оптимизации дипольного магнита эксперимента CBM (GSI). Применение сверхпроводящего кабеля типа NUCLOTRON для источников тока качественно облегчило создание оптимальных токовых обмоток. В свою очередь, это потребовало разработки методов и алгоритмов для их адекватного описания. Первоначально созданное математическое и программное обеспечение использовалось для расчета полей в сверхпроводящих магнитах ускорительного комплекса GSI SIS100. В дальнейшем в сотрудничестве с коллегами из ЛФВЭ ОИЯИ разработанные методы интенсивно использовались для моделирования и оптимизации магнитных систем проекта NICA. На основе двумерного и трехмерного моделирования магнитных систем путем варьирования расположения токовых обмоток и геометрии элементов магнита проводилась оптимизация характеристик сверхпроводящих ди-

[44] *Дикусар Н. Д.* Метод базисных элементов // Математическое моделирование. 2010. Т. 22, № 12. С. 115–136.

[45] *Акишин П. Г.* Применение метода объемных и граничных интегральных уравнений для моделирования магнитных систем, содержащих сверхпроводящие экраны // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2001. Т. 41, № 7.

польных и квадрупольных магнитов коллайдера и бустера NICA, а также мультипольного корректора, линзы финального фокуса и других магнитов проекта NICA[46].

А. М. Червяков применил метод конечных элементов для исследования распределения токов и магнитных полей в сверхпроводнике с переменным током, что позволило определить потери энергии в сверхпроводнике и таким образом оптимизировать его конструкцию. В пакете COMSOL Multiphysics® им построен алгоритм моделирования и оптимизации многовитковой катушки индуктивности по заданному распределению магнитного поля для формирования пучка заряженных частиц сверхпроводящим магнитом.

А. И. Амирханов совместно с И. Н. Кияном (ЛЯП) и Я. Суликовским (Польша) провели исследования, которые дали численное определение рабочего режима высокого разрешения для многоцелевого изохронного циклотрона AIC-144 (ИЯФ ПАН, Краков, Польша) с параметрами точности, превышающими лучшую известную мировую точность. В библиотеку программ JINRLIB включена программа расчета замкнутых равновесных орбит в магнитных полях изохронного циклотрона — EORP.

Концептуальный дизайн предлагаемого изохронного циклотрона МСЦ-230 как компактного сверхпроводящего изохронного циклотрона для протонной терапии требует решения комбинированных задач динамического анализа, включающих как магнитное, так и электрическое поля. При участии Т. В. Карамышевой сотрудниками ЛЯП была создана платформа на базе программы Matlab, в которой используются недавно созданные программы CORD (Closed ORbit Dynamics) и динамики пучка.

И. Л. Боголюбский с конца XX в. принимал участие в крупных международных коллаборациях по исследованию функций Грина КХД с помощью непертурбативного решеточного моделирования. В совместном проекте участвовали исследователи из ОИЯИ (ЛТФ и ЛИТ), ИТЭФ (Москва), ИФВЭ (Протвино) и нескольких немецких институтов.

Благодаря использованию суперкомпьютеров были получены качественно новые результаты, приведшие к пересмотру ранее устоявшихся представлений относительно поведения как пропагаторов, так и бегущей константы связи в инфракрасном пределе КХД. Анализ поведения пропагаторов в импульсном пространстве привел к выводу о появлении ненулевой эффективной массы глюона; детальные исследования показали, что этот, по сути, непертурбативный эффект не является артефактом решеточных вычислений[47]. Исследование, включающее эти работы, было удостоено премии ОИЯИ в 2015 г.

---

[46] *Khodzhibagiyan H., Akishin P., Bychkov A., Kovalenko A., Kozlov O., Kuznetsov G., Meshkov I., Mikhailov V., Muravieva E., Shabunov A., Starikov A., Trubnikov G.* Superconducting Magnets for the NICA Accelerator Complex in Dubna // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2011. V. 21, No. 3.

[47] *Bogolubsky I. L., Ilgenfritz E.-M., Muller-Preussker M., Sternbeck A.* Lattice Gluodynamics Computation of Landau Gauge Green's Functions in the Deep Infrared // Phys. Lett. B. 2009. V. 676. P. 69.

В середине 2000-х гг. на основе сформированной в ЛТФ (В. К. Лукьянов) теоретической базы для исследования механизмов ядерных реакций в диапазоне средних энергий созданы комплексы программ, реализующие гибридную модель микроскопического оптического потенциала (ОП), в структуре которого учитывается распределение нуклонов в сталкивающихся ядрах. Вещественная часть ОП строится в рамках модели двойной свертки, мнимый потенциал рассчитывается как оптический предел теории Глаубера. На этой основе соавторами из ЛИТ (И. Н. Кухтина, К. В. Лукьянов, Е. В. Земляная), ЛТФ и ЛЯР была выполнена серия исследований по анализу реакций с участием легких экзотических ядер.

Работы по экзотическим ядрам проводились в сотрудничестве с ЛТФ и ИЯИЯЭ БАН. Совместно с коллегами из ЮАР проведен анализ экспериментальных данных, полученных в iTemba LABS для реакций ^{93}Nb(p, ^{3}He), ^{59}Co(p, ^{4}He) и др.

К. В. Лукьянов, Е. В. Земляная, Е. И. Жабицкая в сотрудничестве с ЛТФ и Каирским университетом проводили исследования с использованием микроскопического ОП влияния ядерной среды на амплитуду пион-нуклонного и протон-нуклонного рассеяния в зависимости от энергии столкновения.

С 2019 г. при участии М. В. Башашина, М. Какенова (Казахстан) и А. Ермековой (Казахстан) разрабатывались параллельные версии программы расчета ядро-ядерного ОП двойной свертки на основе технологий MPI и OpenMP, позволившие сократить время расчета более чем в 20 раз. Все созданные программы для изучения ядро-ядерного рассеяния на основе высокоэнергетического приближения были переданы в библиотеку программ JINRLIB.

С 2020 г. Ю. Л. Калиновским и Д. Годеридзе при участии А. В. Фризен (ЛТФ) разрабатывались методы вычисления многомерных сингулярных интегралов для расчета электромагнитных распадов частиц в плотной и горячей ядерной материи[48].

Вычисление наблюдаемых квазичастично-фононных моделей деформированных ядер является ярким примером длительного успешного сотрудничества ЛИТ–ЛТФ. Квазичастично-фононная модель деформированных ядер (КФМДЯ) — четко сформулированная модель ядерной физики, совершенствовавшаяся в ЛТФ в течение нескольких десятилетий под руководством В. Г. Соловьева. Она нуждается в сложных вычислениях различных наблюдаемых, представляющих первостепенный интерес. В течение полувека Н. Ю. Ширикова была основным разработчиком модулей программного обеспечения для этой задачи и соавтором десятков работ, из которых несколько поощрялись премиями ОИЯИ.

Моделирование реальных физических, химических и биологических систем на основе молекулярной динамики (МД) — перспективное направление вычислительной физики, которое развивалось в ЛИТ под руководством И. В. Пузынина.

---

[48] *Friesen A. V., Goderidze D., Kalinovsky Yu. L.* Calculation of a Multidimensional Integral with a Singularity by Dividing the Integration Domain into Subsegments // Phys. Part. Nucl. Lett. 2024. V. 21, No. 4. P. 782–784.

Работы с использованием МД начались в рамках сотрудничества с вычислительным центром Института физико-химических исследований (RIKEN) с изучения процессов соударения кластер–поверхность для металлических фаз. Исследования процессов соударения различных конфигураций металлических нанокластеров с металлической поверхностью продолжили сначала Б. Батгэрэл, Э. Г. Никонов и И. В. Пузынин, позже присоединились А. Ю. Дидык, С. Н. Димова (Болгария), Т. П. Пузынина, З. К. Тухлиев, З. А. Шарипов, а еще позже И. Г. Христов и Р. Д. Христова (Болгария).

Э. Г. Никонов совместно со словацкими коллегами М. Павлушом, М. Поповичовой и др. применили метод МД для исследования разных аспектов взаимодействия водяного пара и пористой структуры.

Д. Р. Бадреева применила метод МД в рамках решения проекта ЛНФ под руководством Н. Кучерки, направленного на выяснение роли бета-амилоидного пептида Aβ(25–35) как ключевого фактора болезни Альцгеймера. Моделируются как упорядоченные липидные мембраны в гидратированной среде, так и системы с включенными белковыми или ионными компонентами. Особое внимание уделяется исследованию влияния температуры, давления, ионов и встроенных молекул на стабильность и механические свойства мембран. Проводится анализ таких характеристик, как толщина бислоя, профиль плотности, распределение потенциала и диффузионные коэффициенты. Для выполнения длительных расчетов и статистически надежной выборки ансамблей молекулярных конфигураций используются вычислительные ресурсы платформы HybriLIT и суперкомпьютера «Говорун»[49]. Это позволяет проводить моделирование систем, содержащих десятки и сотни тысяч атомов, на временных масштабах от наносекунд до микросекунд.

Н. М. Плакида (ЛТФ) был инициатором теоретического описания высокотемпературной сверхпроводимости в купратах на основе теории функций Грина в подходе Зубарева, что привело к двухзонной модели Хаббарда. Под его руководством численные эксперименты проводили Л. Антон (Румыния), С. А. Адам и Г. Адам. Результаты показали, что среди двух источников сверхпроводящего спаривания вклад кинематического взаимодействия электронов со спиновыми флуктуациями во втором порядке по константе связи существенно превышает вклад антиферромагнитного взаимодействия в приближении среднего поля. Численные расчеты строгой модели приближения среднего поля в теории сверхпроводимости для модели Хаббарда показали наличие ряда специфических квантовых эффектов. Данное исследование было удостоено первой премии ОИЯИ в 2013 г.

Поскольку численные эксперименты, посвященные упомянутому выше изучению модели Хаббарда, провести непросто, внимание было направлено на численное решение интегралов Римана. К настоящему времени получены три основных результата. Во-первых, алгебраическая степень точности интерполяционной квадратурной суммы с плавающей запятой *теряет*

[49] *Kurakin S. A., Ivankov O. I., Murugova T. N., Badreeva D. R., Dushanov E. B., Ermakova E. V., Kuklin A. I., Kučerka N.* Lipid Membrane Destabilization Induced by Amyloid-Beta Peptide in the Systems Mimicking Preclinical Alzheimer's Disease // Natural Sci. Rev. 2025. 2. 100202.

свойство инвариантности, которое справедливо для поля действительных чисел. Во-вторых, *байесовские выводы* существенно повышают надежность автоматических решений. В-третьих, *робастная реализация деревьев решений* возможна только при использовании инструментов искусственного интеллекта.

А. С. Айриян, О. Григорян и В. Абгарян в сотрудничестве с коллегами из ЛТФ решают задачи вычислительной астрофизики, связанные с численным моделированием термической эволюции нейтронных звезд и анализом уравнений состояния плотного вещества, лежащего в их основе. Эти работы направлены на изучение микрофизики сверхплотного вещества при экстремальных температуре и давлении. Особое внимание уделяется гибридным уравнениям состояния с возможным переходом в фазу кваркового вещества. Расчеты, проведенные с использованием разработанных параллельных алгоритмов на суперкомпьютере «Говорун» и платформе HybriLIT, позволили моделировать эволюцию температуры сотен тысяч возможных конфигураций нейтронных звезд на масштабах до миллионов лет и сравнивать результаты с наблюдениями.

В рамках сотрудничества Э. А. Айряна с проф. Ч.-К. Ху и Ш. Айряном (Институт физики Академии Синика, Тайвань) при участии словацких сотрудников (Я. Буша, Я. Буша (мл.), Й. Джурина, Я. Плавка, И. Покорны и Я. Скрживанек) предложены новые методы изучения геометрических свойств сложных белков. Разработанные программы применены для решения нелинейной задачи Пуассона–Больцмана для определения электростатического потенциала белков в сложной 3-мерной области.

Очень плодотворными все эти годы были разработка и применение методов полиномиальной компьютерной алгебры, инициированные В. П. Гердтом в начале 1990-х гг. Они включали широкий класс применений инволютивных методов в прикладных, инженерных и физических задачах, описываемых системами недоопределенных и переопределенных дифференциальных уравнений. В большом цикле работ, выполненных сотрудниками сектора В. П. Гердта совместно с коллегами из Болгарии, Грузии и России, был разработан и применен алгоритм нахождения полного набора связей (первого и второго рода) для полиномиальных механических систем с вырожденной лагранжевой функцией, в основе которого лежат идеи теории базисов Гребнера и инволютивного деления полиномов. Программная реализация методов компьютерной алгебры, активно разрабатываемая под руководством В. П. Гердта, получила высокую оценку и признание лучших в мире профессиональных поставщиков компьютерной алгебры (Mathematica, MATLAB), которые в обмен на разработки ЛИТ в порядке исключения открывали бесплатный доступ специалистам ЛИТ к своему программному обеспечению. Среди них особое место заняли исследования механических систем, конфигурационное и фазовое пространство которых стеснено ограничениями и связями, а эволюционные задачи неизбежно требуют инволютивного анализа (Ю. Палий, А. Хведелидзе).

Другое важное применение теории базисов Гребнера и инволютивного деления полиномов связано с работами О. В. Тарасова в области эффектив-

ного расчета интегралов Фейнмана в различных моделях квантовой теории поля. Здесь также надо отметить большой круг задач из области чистой математики, теории непрерывных групп Ли и конечных групп, решенных с применением аналитических методов компьютерной алгебры (В. В. Корняк).

Значительную роль в правильной и точной реализации программного обеспечения компьютерной алгебры, включая безошибочную миграцию развитых продуктов (REDUCE, AXIOM, MAXIMA и др.) с 32-разрядных машин на 64-разрядные, сыграл А. М. Рапортиренко. Его внезапная смерть стала тяжелой утратой для всей ЛИТ.

Еще одной областью применения базисов Гребнера в исследованиях стали вычислительные задачи, связанные с описанием квантовых систем. Среди трудоемких вычислительных задач важное место занимает проблема классификации квантовых систем с точки зрения их квантового ресурса, в частности, в зависимости от полного набора характеристик, ответственных за явление запутанности квантовых состояний. Именно этому кругу задач и были посвящены совместные исследования В. П. Гердта, Ю. Палия и А. Хведелидзе, выполненные в Дубне в период с 2006 по 2016 г. В этих работах была изучена алгебраическая структура кольца полиномиальных инвариантов базовых составных бинарных квантовых систем, таких как пары кубит–кубит и кубит–кутрит. Дальнейшие работы в этом направлении (В. Абгарян, М. Буреш, И. А. Рогожин, А. Торосян) по расчетам показателей квантового ресурса показали, что методы компьютерной алгебры позволяют проводить трудоемкие вычислительные расчеты, интересные с точки зрения различных приложений, включая теорию квантовой информации.

Среди современных вычислительных методов компьютерной математики особое место занимают задачи разработки и реализации квантовых алгоритмов и применения квантового машинного обучения как для задач моделирования сложных квантовых систем, так и для эффективной обработки больших массивов информации. А. А. Боголюбская, М. Буреш и Ю. Палий вовлечены в исследования по моделированию квантовых вычислений и реализации схем машинного обучения на базе компьютерных мощностей ЛИТ ОИЯИ.

Л. А. Сюракшина и В. Ю. Юшанхай (ЛТФ) исследовали с помощью программных средств Qiskit и LindbladMPO на классическом компьютере динамику в режиме квантового «закаливания» одномерной спиновой *XXZ*-модели.

ЦИФРОВАЯ ЭКОСИСТЕМА

Наряду с научными задачами в Лаборатории информационных технологий решаются и задачи по созданию и поддержке научно-информационных, информационных и административных систем. Из года в год систематически велись работы по сопровождению разработанных ранее баз данных и информационных систем, созданию новых по запросам пользователей.

Во второй половине 1990-х гг. в ЦЕРН началось активное использование Интернета не только для обмена файлами или для веб-сайтов, но и как интерфейса корпоративных веб-приложений. Веб-приложение отличается от веб-сайтов (даже динамических) наличием достаточно сложной обработки данных, как правило, осуществляемой на стороне сервера (back-end). Для разработки back-end применялись разнообразные технологии типа CGI Script, PHP, Perl, ASP и ASP.NET, C#, Java в трех разновидностях: Servlet, Applet и JSP. С тех пор к этому списку добавился целый ряд более высокоуровневых технологий, однако Java Servlet и (отчасти) JSP сохраняют свою популярность при создании сложных веб-приложений благодаря мощности и развитию языка и средств Java. Недостатком Java остается относительно высокий «порог входа» — разработчику необходимо достаточно серьезно изучить язык и хотя бы часть из многочисленных доступных средств на его основе.

В конце 1990-х — начале 2000-х гг. в ОИЯИ группа под руководством С. В. Куняева начала разработку платформы, названной WALT (Web Application Lego Toolkit)[50]. Целью являлось создание на языке Java инструментария, позволяющего решать типовые подзадачи, возникающие при разработке веб-приложений, даже вовсе не зная Java. WALT представляет собой язык шаблонов плюс интерпретатор этого языка. С тех пор WALT используется и постоянно развивается в ОИЯИ. Стандартные сервисы WALT позволяют решать типовые задачи без программирования на Java путем подготовки компактных текстовых шаблонов с информацией о запросах к базам данных, алгоритмах обработки данных и о выходном HTML-коде. Для решения какой-то возникшей специфической задачи, которая не решается типовыми сервисами WALT, можно разработать специализированный сервис (Java-класс) на основе стандартных сервисов.

Для достижения малой командой из одного-двух (иногда трех) программистов максимального результата в минимальные сроки при разработке всех этих приложений, кроме использования WALT, применялись основные принципы гибкой методологии разработки программного обеспечения (Agile software development):

- регулярное, тесное общение разработчиков с конечными пользователями (основной метод передачи информации — личный разговор);
- стремление к максимально возможной простоте продукта с целью избежать лишней или чрезмерно трудоемкой работы (особое внимание уделялось удобному и понятному пользователям интерфейсу);
- раннее, поэтапное внедрение работоспособного программного обеспечения, частое обновление ПО с учетом опыта эксплуатации и полученной обратной связи от конечных пользователей.

Платформа WALT является эффективным средством создания веб-приложений для небольшой команды разработчиков, что является типичным для ОИЯИ. Эффективность использования WALT подтверждается боль-

[50] *Korenkov V. V., Kuniaev S. V., Semashko S. V., Sokolov I. A.* WALT Platform for Web Application Development // CEUR Workshop Proc. 2021. V. 3041. P. 387–392.

шим количеством и разнообразием приложений, разработанных за последние 25 лет. В создании приложений принимали участие С. В. Куняев, С. В. Семашко, П. В. Устенко, О. В. Белякова, А. В. Приходько, И. А. Соколов, Н. Е. Белякова. Наиболее значимые из разработанных приложений:

- ADB2 — система управленческого учета и подготовки бюджета ОИЯИ;
- ПИН, ПИН-2.0 — система ПИН (персональная информация) для сбора и анализа информации о результатах научной деятельности сотрудников;
- «База документов» — электронная база документов основного делопроизводства ОИЯИ с элементами электронного документооборота;
- NICA EVM — система управления проектом NICA: структура проекта, планирование работ и финансирования, ход выполнения по методике EVM, финансовые отчеты и др.;
- СЭД «Дубна» — система электронного документооборота ОИЯИ;
- HR JINR — административная информационно-справочная система для подразделений ОИЯИ;
- ГИС ОИЯИ — геоинформационная система, включающая многослойные интерактивные карты;
- Gateway — универсальный шлюз обмена данными между различными информационными системами;
- ИСНА — информационная система научной аттестации для диссертационных советов ОИЯИ;
- CERN DB — учет поездок сотрудников ОИЯИ в ЦЕРН (визиты, проживание, финансы, отчеты);
- «Аванс» — подготовка данных для бухгалтерской отчетности по командировкам, электронная очередь в бухгалтерию;
- оболочка системы мониторинга для Центра космической связи «Дубна»;
- информационная система подачи заявок на гранты (IFA);
- оболочка цифровой экосистемы ОИЯИ.

В рамках подготовки к юбилею ОИЯИ и Лаборатории информационных технологий важно отметить роль цифрового репозитория, созданного для сохранения и распространения научных достижений Института. Репозиторий стал неотъемлемой частью научной коммуникации, отражая эволюцию технологий и потребностей исследовательского сообщества. Истоки проекта уходят в начало 2000-х гг., когда мировое научное сообщество активно внедряло принципы открытого доступа к знаниям. В ОИЯИ было решено создать репозиторий публикаций сотрудников. В 2004 г. в Институте внедрена платформа Invenio, разработанная в ЦЕРН, которая обеспечивала управление цифровыми ресурсами. Эта система стала основой для накопления данных: статей, диссертаций, отчетов и архивных материалов, которые стали доступны как для внутреннего сообщества, так и для международной научной общественности. Позже в рамках совместного проекта с немецкими институтами была апробирована система JOIN^2, являющаяся продолжением Invenio.

В 2020-х гг. репозиторий ОИЯИ перенесен на новую платформу DSpace — одно из самых мощных популярных решений для репозитори-

ев публикаций, имеющее открытый исходный код. Система, внедренная в опытную эксплуатацию в ОИЯИ в 2024 г., позволила повысить масштабируемость и интеграцию с глобальными базами данных. Автоматический сбор информации о публикациях производится из трех основных источников: ELibrary, Inspire HEP и Scopus. Публикации привязываются к профилям пользователей — сотрудников ОИЯИ. Информация о них доступна как через веб-интерфейс репозитория, так и в новом ПИН-2. Публикации, не вошедшие в основные источники, могут быть добавлены пользователем самостоятельно (при наличии DOI возможно автоматическое заполнение всех полей). Ключевым достижением стала разработка и внедрение автоматизированного сбора метаданных о публикациях из различных источников, сократившая необходимость ручного ввода информации. Это сделало процесс добавления публикаций более эффективным и снизило риск дублирования данных. Над созданием и развитием репозиториев публикаций работает команда, возглавляемая И. А. Филозовой, в составе: Г. В. Шестакова, Т. Н. Заикина, А. С. Бондяков, А. О. Кондратьев, И. К. Некрасова, Я. И. Попова.

Репозиторий стал важным инструментом, обеспечивающим прозрачность и доступность результатов исследований. Он позволяет анализировать тематику публикаций, отслеживать цитируемость и оценивать вклад ОИЯИ в различные области науки. Кроме того, репозиторий способствует обмену идеями, делая работы Института доступными для студентов, исследователей и аналитиков по всему миру. Создание и развитие репозитория — это не только техническое достижение, но и символ открытости и инноваций ОИЯИ. Сегодня он представляет собой современную экосистему, отражающую миссию Института: продвижение фундаментальных исследований и передачу знаний следующим поколениям. В юбилейном году его история служит ярким примером того, как технологии помогают сохранять наследие науки и укреплять международное сотрудничество.

Для организации совместной работы над документами разработана программная платформа SciDocsCloud (И. А. Соколов, Н. А. Балашов), предназначенная для замены устаревшей системы DocDB. Цель создания платформы — предоставить централизованный сервис для хранения, управления, структурирования документов и совместной работы над ними. В 2024 г. запущен в эксплуатацию облачный сервис на основе этой платформы. Вход осуществляется с использованием учетных записей системы единого входа ОИЯИ (JINR SSO).

Важным направлением, возглавляемым С. В. Семашко, является разработка геоинформационной системы Института. Система позволяет решать широкий спектр задач — от визуализации расположения зданий и объектов Института до детального документирования сложной инженерной инфраструктуры. Поддерживается разработка планов зданий, учета размещения персонала в помещениях по комнатам, поиск персонала и комнат, анализ использования подразделениями помещений (заполненность, средняя плотность и т. д.). Планы зданий и территорий могут импортироваться из внешних источников (топографических планшетов, геодезических съемок

в цифровом виде, космических снимков высокого разрешения), а данные об инженерных сетях — из технических планов и чертежей местности смежных подразделений (УТС, ОКС, техпланов лабораторий и т. д.). Система используется для планирования и проведения сервисных и ремонтных работ на территории и в зданиях Института.

В 2022 г. были начаты работы по созданию платформы цифровой экосистемы (JINR Digital Ecosystem), предназначенной в соответствии со Стратегическим планом развития Института для цифровизации основных видов деятельности Института. Основная задача платформы — предоставление единой среды для создания и развития цифровых сервисов, их интеграции между собой, анализа информации обо всех аспектах деятельности ОИЯИ.

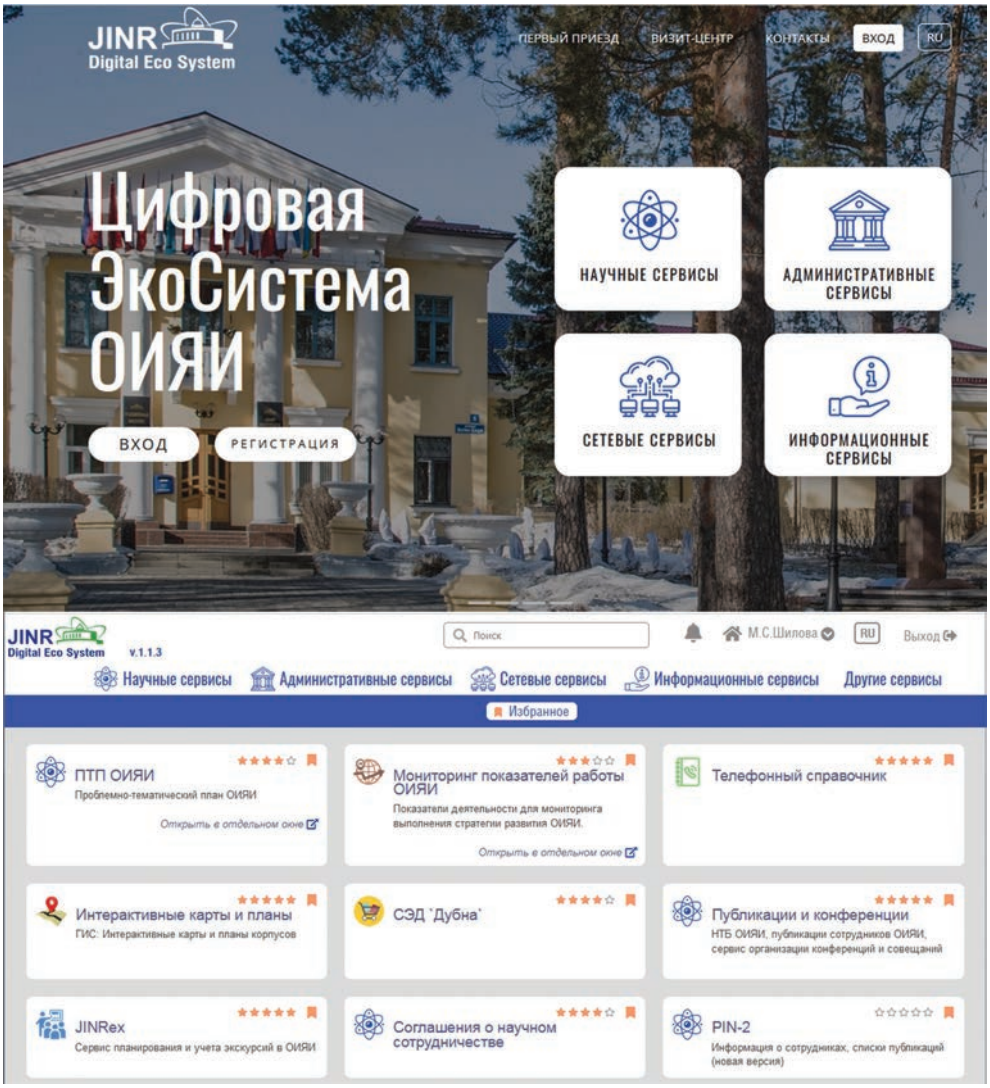


Рис. 17. Интерфейс цифровой экосистемы ОИЯИ

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.

Сегодня цифровая экосистема ОИЯИ — комплексная цифровая среда, основанная на принципах взаимовыгодности отношений и объединяющая существующие и большое количество дополнительно разработанных информационных сервисов и бизнес-процессов. Доступ к системе реализован на базе службы аутентификации JINR Single Sign On (SSO) — единого входа и доступа ко всем сервисам через единый аккаунт. Система снабжена оперативным и удобным поиском информации и обеспечивает бесшовное переключение пользователя между различными сервисами, входящими в цифровую экосистему. Основными разработчиками портала Digital JINR являются С. В. Куняев, О. В. Белякова, А. В. Приходько, Н. Е. Белякова.

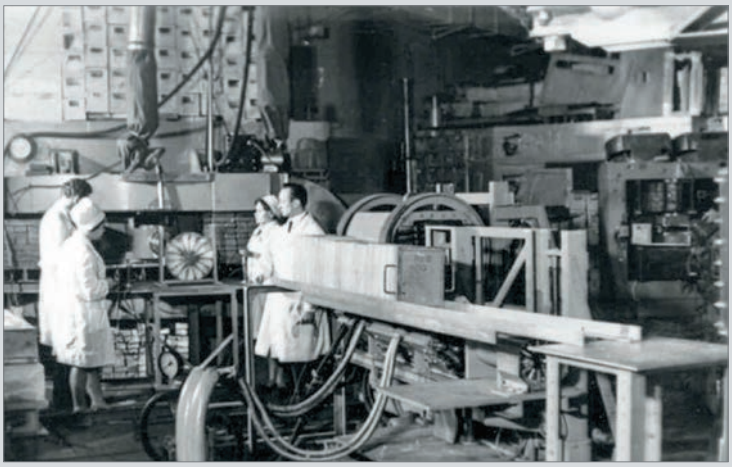
В 2024 г. были введены в эксплуатацию несколько общеинститутских цифровых сервисов: глубоко переработанная версия ПИН-2 для управления информацией о сотрудниках ОИЯИ (С. В. Куняев, О. В. Белякова, Н. Е. Белякова, А. В. Приходько), репозиторий научных публикаций сотрудников Института (группа И. А. Филозовой), календарь для совместной работы. Создан прототип корпоративной шины данных для объединения цифровых сервисов и управления потоками информации (Д. В. Неаполитанский). На базе сервиса управления заявками реализована электронная система поддержки пользователей (Е. В. Шейко). Ранее созданные цифровые сервисы активно развиваются, производится их интеграция между собой и с базовыми сервисами ЦЭС. Введенные в эксплуатацию сервисы доступны через интерфейс ЦЭС https://digital.jinr.ru, на 2025 г. их более 50.

РАДИАЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В НАУКАХ О ЖИЗНИ

На необходимость и плодотворность использования ионизирующих излучений с разными физическими характеристиками в изучении механизмов генетического действия радиации указывали еще классики радиационной биологии. Решением фундаментальных и прикладных вопросов биологического действия ионизирующей радиации в Институте занимается Лаборатория радиационной биологии, отметившая в 2025 г. 20-летие со дня своего образования.

Радиобиология как междисциплинарная наука нуждается в поддержке физиков, и ОИЯИ, в этом смысле, предоставляет уникальные возможности, поскольку обладает высококвалифицированными кадрами, необходимой аппаратурой и широчайшим спектром самых разнообразных источников излучений. Фактически в странах-участницах Института нет более удобного и физически оснащенного для проведения радиобиологических исследований научного центра, чем ОИЯИ. Поэтому в области изучения эффектов ионизирующих излучений с разными физическими характеристиками Лаборатория радиационной биологии с полным правом может претендовать на лидерство среди научных организаций России и стран-участниц ОИЯИ.

Первые радиобиологические эксперименты в Дубне были начаты в далеком 1959 г. на 6-метровом протонном синхроциклотроне Лаборатории ядерных проблем, где впоследствии специалистами из различных институтов Минздрава СССР были успешно выполнены исследования влияния протонов разных энергий на организм человека и поиск способов защиты космонавтов от их негативного влияния во время полетов. В 1967 г. по инициативе директора Лаборатории ядерных проблем члена-корреспондента АН СССР В. П. Джелепова в ОИЯИ на базе того же ускорителя был создан первый в СССР протонный медицинский пучок. В радиобиологических экспериментах, проведенных на клеточных культурах и лабораторных животных, были определены основные радиобиологические параметры ускоренных протонов, что дало возможность уже через год начать лучевое лечение пациентов с онкологическими заболеваниями.



Первые радиобиологические эксперименты на синхроциклотроне ЛЯП

Радиобиологические исследования на базовых установках Института позднее стали успешно развиваться радиобиологами, работавшими непосредственно в ОИЯИ, в созданном в 1978 г. секторе биологических исследований Лаборатории ядерных проблем (приказ по ОИЯИ № 3388 от 29 ноября 1977 г.). Инициатором создания сектора биологических исследований стал руководитель отдела синхроциклотрона доктор физико-математических наук В. И. Данилов. Для руководства сектором был приглашен профессор В. И. Корогодин, а в 1986 г. сектор возглавил профессор Е. А. Красавин. В дальнейшем расширение спектра исследований в области радиобиологии на базовых установках ОИЯИ потребовало структурной реорганизации подразделений, осуществлявших эти исследования. И уже в 1988 г. сектор биологических исследований был преобразован в отдел биофизики (приказ по ОИЯИ № 248 от 25 марта 1988 г.).

После организации отдела биофизики были проведены интенсивные радиобиологические исследования с использованием пучков тяжелых заряженных частиц ускорителей У-300 и У-200 Лаборатории ядерных реакций. Проведение таких работ требовало специальных спектрометрических и дозиметрических исследований пучков ускоренных тяжелых ионов. Большим опытом в данной области обладали сотрудники Отдела радиационных исследований и радиационной безопасности ОИЯИ. Дирекция ОИЯИ — член-корр. РАН В. Г. Кадышевский и профессор А. Н. Сисакян — поддержала инициативу объединения отдела биофизики Лаборатории ядерных проблем и Отдела радиационных исследований и радиационной безопасности ОИЯИ в новое структурное

подразделение Института — Отделение радиационных и радиобиологических исследований (приказ по ОИЯИ № 270 от 27 апреля 1995 г.). После успешного проведения работ по ускорению тяжелых ядер до релятивистских энергий на Нуклотроне в Лаборатории высоких энергий и начала физических экспериментов на новом ускорителе коллективом ОРРИ были спланированы радиобиологические эксперименты на пучках высокоэнергетичных тяжелых ионов. В отделении были продолжены ранее начатые исследования мутагенного действия излучений в широком диапазоне линейных передач энергии на микроорганизмах, клетках млекопитающих и человека. Сотрудниками ОРРИ совместно с радиохимиками ЛЯП, ЛЯР ОИЯИ и Института биофизики ФМБА России проводились исследования биологического действия изотопа астат-211. Был разработан инновационный метод его применения в мишенной терапии меланомы.

В 2005 г. по инициативе профессора Е. А. Красавина и при поддержке дирекции ОИЯИ на базе Отделения радиационных и радиобиологических исследований была создана новая, седьмая лаборатория Объединенного института — Лаборатория радиационной биологии (приказ по ОИЯИ № 403 от 20 июня 2005 г.). Директором-организатором лаборатории стал доктор биологических наук, профессор Е. А. Красавин. В 2009 г. на 106-й сессии Ученого совета ОИЯИ он был избран первым директором лаборатории. Это событие стало закономерным этапом развития междисциплинарных исследований в ОИЯИ и признанием высокой актуальности наук о жизни в современной картине мира.

Исследования, выполненные коллективом лаборатории на базовых установках Института, позволили решить одну из центральных задач радиобиологии — проблему относительной биологической эффективности (ОБЭ) излучений разного качества, которая, как было показано, определяется не только физическими характеристиками излучения, но и биологическим фактором — способностью клетки репарировать повреждения ДНК. На основе развитых представлений были детально изучены механизмы радиационно-индуцированного мутагенеза у клеток прокариот и низших эукариот при действии тяжелых заряженных частиц[1], [2].

Совместно со специалистами РАН впервые в мире была предложена и обоснована новая концепция радиационного риска для пилотируемых межпланетных полетов, в рамках которой радиационный риск для космонавтов определяется

---

[1] *Красавин Е. А.* Проблема ОБЭ и репарация ДНК. М.: Энергоатомиздат, 1989; 2-е изд. Дубна: ОИЯИ, 2025.

[2] *Красавин Е. А., Козубек С.* Мутагенное действие излучений с разной ЛПЭ. М.: Энергоатомиздат, 1991; 2-е изд. Дубна: ОИЯИ, 2025.

Основатель ЛРБ — член-корреспондент РАН Е. А. Красавин

действием тяжелых ядер галактических космических лучей, прежде всего, на структуры центральной нервной системы и потенциальным нарушением операторской деятельности экипажей.

В пионерских экспериментах, проведенных ЛРБ ОИЯИ совместно с коллегами из Университета Тушии (Витербо, Италия), по облучению водных растворов формамида ускоренными протонами и многозарядными ионами в присутствии вещества метеоритов в качестве катализатора впервые наблюдался синтез большого числа пребиотических соединений: аминокислот, карбоновых кислот, сахаров, нуклеиновых оснований и даже нуклеозидов. Эти соединения ранее не были обнаружены в экспериментах с воздействиями другого типа.

В 2019 г. в лаборатории впервые был предложен и запатентован принципиально новый подход к повышению биологической эффективности ионизирующих излучений с низкой линейной передачей энергии путем преобразования нелетальных повреждений ДНК в летальные в присутствии определенных препаратов — ингибиторов синтеза ДНК. Метод продемонстрировал высокую эффективность в экспериментах на различных культурах опухолевых клеток и лабораторных животных с перевитыми опухолями, что делает его очень перспективным для радиационной терапии с использованием пучков протонов и гамма-квантов.

В 2022 г. введена в эксплуатацию первая базовая установка лаборатории — система для прецизионного рентгеновского облучения лабораторных животных SARRP (Small Animal Radiation Research Platform). Очевидно, что список установок не ограничивается только инфраструктурой самой лаборатории, исследования ведутся на всех крупных ускорителях Института — на прикладных каналах ARIADNA комплекса NICA в Лаборатории физики высоких энергий, на циклотроне У-400М Лаборатории ядерных

реакций, на линейном ускорителе ЛИНАК-200 Лаборатории ядерных проблем. Активно используются ресурсы Многофункционального информационно-вычислительного комплекса Лаборатории информационных технологий.
В ближайшем будущем начнутся исследования на новом медицинском ускорителе протонов MSC-230 в Лаборатории ядерных проблем и на пучках нейтронов в Лаборатории нейтронной физики. Планируется организация радиобиологических исследований в радиохимических лабораториях для приложений в ядерной медицине.

РАДИАЦИОННАЯ БИОЛОГИЯ

НАПРАВЛЕНИЯ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Научная программа ЛРБ включает в себя изучение молекулярных, генетических и организменных эффектов действия ионизирующих излучений с разными физическими характеристиками, радиационно-биофизические и астробиологические исследования[3]. Осуществляют данную программу два научных отдела.

Отдел радиационной биологии и физиологии ЛРБ включает четыре сектора — молекулярной радиобиологии, радиационной цитологии, радиационной физиологии и медицинской радиобиологии и группу радиационной генетики низших эукариот. В отделе проводятся исследования по широкому кругу радиобиологических проблем фундаментального и прикладного характера, включая разработку новых подходов к повышению биологической эффективности излучений для радиационной терапии опухолей и исследования механизмов функциональных нарушений в работе мозга при действии радиации. Отдел располагает развитой исследовательской инфраструктурой и квалифицированными специалистами, способными проводить научные эксперименты с использованием современных методов на молекулярном, клеточном, тканевом и организменном уровнях биологической организации.

Отдел радиационных исследований ЛРБ включает два сектора — математического моделирования и радиационных исследований на базовых установках. Основные направления научной деятельности отдела радиационных исследований: разработка иерархии математических моделей для описания радиационно-индуцированных эффектов на разных уровнях биологической организации и временных масштабах (моделирование формирования и репарации радиационно-индуцированных повреждений ДНК, индукции генных и структурных мутаций, тканевых эффектов, вызванных действием ионизирующих излучений с разными физическими характеристиками); совершенствование методик облучения и прецизионной дозиметрии в радиобиологических исследованиях на ядерно-физических установках Института; развитие методов автоматизированной обработки экспериментальных данных.

---

[3] *Красавин Е. А.* // УФН. 2016. Т. 186. С. 435–443.

МОЛЕКУЛЯРНАЯ РАДИОБИОЛОГИЯ

Исследования в области молекулярной радиобиологии нацелены:

— на изучение закономерностей и механизмов индукции и репарации различных типов повреждений ДНК и особенно кластерных повреждений при действии ионизирующих излучений с разными физическими характеристиками в нормальных и опухолевых клетках *in vitro* и *in vivo*;

— на молекулярно-радиобиологические аспекты радиационной терапии, связанные с применением комплексов радиомодификаторов, повышающих выход летальных радиационно-индуцированных повреждений ДНК в опухолевых клетках при действии ионизирующих излучений с разными физическими характеристиками *in vivo* и *in vitro*.

Для этих целей используются различные молекулярно-биологические методы, в том числе методы иммуноцитохимии и иммуногистохимии. Использование этих подходов позволяет не только проводить количественный анализ формирования генетических нарушений, но и визуализировать пространственное распределение повреждений в генетических структурах клеток. Наиболее тяжелыми повреждениями являются двунитевые разрывы ДНК. Индукция двунитевых разрывов ДНК в определенных участках генома приводит к специфическому фосфорилированию гистона H2AX в окружающем повреждение хроматине, что проявляется в образовании так называемых γH2AX-фокусов. Внутренняя структура этих радиационно-индуцированных фокусов (РИФ) является отражением взаимосвязи биохимических процессов, запускаемых в ответ на возникновение повреждения и направленных на восстановление целостности ДНК.

В исследованиях используются не только клеточные культуры нормальных и опухолевых клеток млекопитающих и человека, но и первичные культуры нейрональных клеток, а также гистологические срезы тканей различных отделов центральной нервной системы облученных животных.

Сотрудниками сектора молекулярной радиобиологии изучены дозовые зависимости частоты образования РИФ в клетках человека при действии

Сотрудники сектора молекулярной радиобиологии за работой. Слева: Т. С. Храмко, М. Лал, М. Е. Крупнова; справа: Е. А. Кузьмина, Р. А. Кожина

излучений с разной величиной ЛПЭ. Выявлена большая эффективность их формирования при действии ускоренных тяжелых ионов по сравнению с γ-облучением. Обнаружено, что при действии на клетки тяжелых ионов по сравнению с γ-квантами наблюдается более высокая скорость достижения максимального количества ДНК-фокусов и замедленная кинетика их элиминации. На основе дифференцированного анализа отдельных ДНК-фокусов в трехмерных изображениях, реконструирующих весь объем клеточного ядра, проведен детальный анализ структуры сложно организованных кластеров повреждений в треках ускоренных ионов[4,5,6].

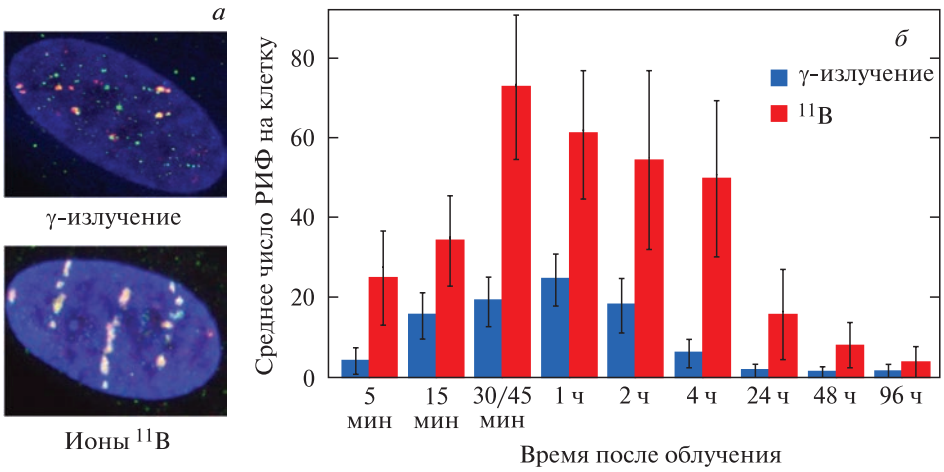


Рис. 1. Визуализация РИФ (а) и кинетика их репарации (б) при γ-облучении и действии ускоренных ионов ^{11}B с энергией 50 МэВ/нуклон

Установлено, что при действии ускоренных тяжелых ионов низких и промежуточных энергий, в отличие от γ-облучения, формируются сложно организованные кластеры, включающие до шести и более индивидуальных фокусов[5]. Выявлено изменение структуры, размера и формы кластерных повреждений в зависимости от величины ЛПЭ частиц. Показано замедление кинетики элиминации радиационно-индуцированных фокусов в клетках при действии тяжелых ионов по сравнению с γ-облучением. По итогам данного цикла работ коллективу сектора в 2019 г. была присуждена первая премия ОИЯИ за научно-технические прикладные работы.

В сотрудничестве с чешскими и немецкими коллегами разработан новый метод для анализа тонкой структуры кластерных повреждений ДНК со сверхвысоким разрешением[6]. 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

[4] *Falk M. et al.* // J. Radiat. Res. 2014. V. 55. P. i79–i80.
[5] *Jezkova L. et al.* // Nanoscale. 2018. V. 10. P. 1162.
[6] *Hausmann M. et al.* // Front. Phys. 2020. V. 8. P. 578662.

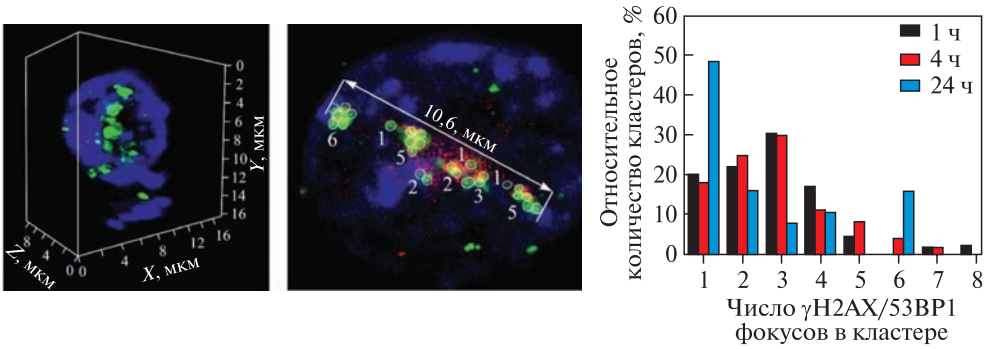


Рис. 2. Визуализация и количественный состав РИФ в нейронах головного мозга крыс, облученных ускоренными ионами ^{78}Kr с энергией 2,58 ГэВ/нуклон

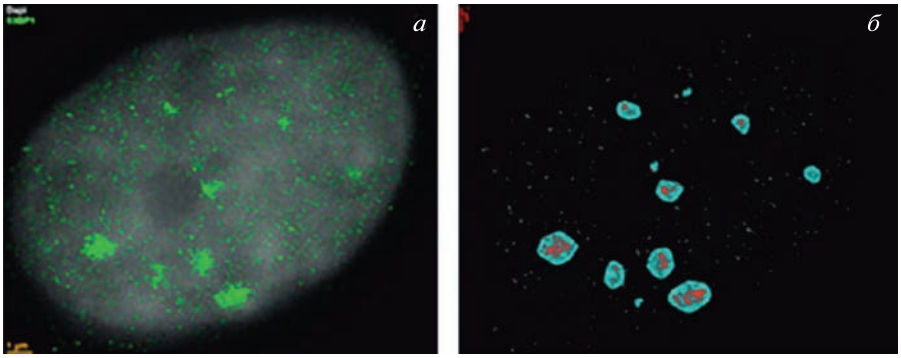


Рис. 3. Визуализация структуры кластеров репарационных белков 53BP1 в ядрах клеток глиобластомы человека U87 через 24 ч после облучения ускоренными ионами ^{15}N (энергия 13 МэВ/нуклон, доза 1,3 Гр): а) изображения в микроскопе; б) программная постобработка

ускоренных ионов азота ^{15}N. Предложенный подход позволяет получить новые сведения о природе радиорезистентности ряда опухолей.

ДР ДНК либо образуются в результате прямого разрыва двух комплементарных участков — прямые ДР (ПДР), вследствие передачи энергии локальному участку ДНК, что приводит к нарушению ее целостности, либо формируются из других повреждений как «издержки репарации» в процессе работы репарационных ферментов — этот тип повреждений относится к разряду энзиматических ДР (ЭДР). Выход ЭДР при облучении зависит от многих факторов биологической природы, и на частоту их формирования можно влиять путем модификации процессов репарации ДНК. Было показано, что при введении официнального препарата — 1-β-D-арабинофуранозилцитозина (АраЦ), являющегося ингибитором синтеза ДНК, перед облучением клеток человека ионизирующими излучениями происходит трансформация однонитевых разрывов ДНК в летальные ЭДР[7]. Количе-

[7] *Chausov V. N. et al.* // Phys. Part. Nucl. Lett. 2018. V. 15, No. 6. P. 700–710.

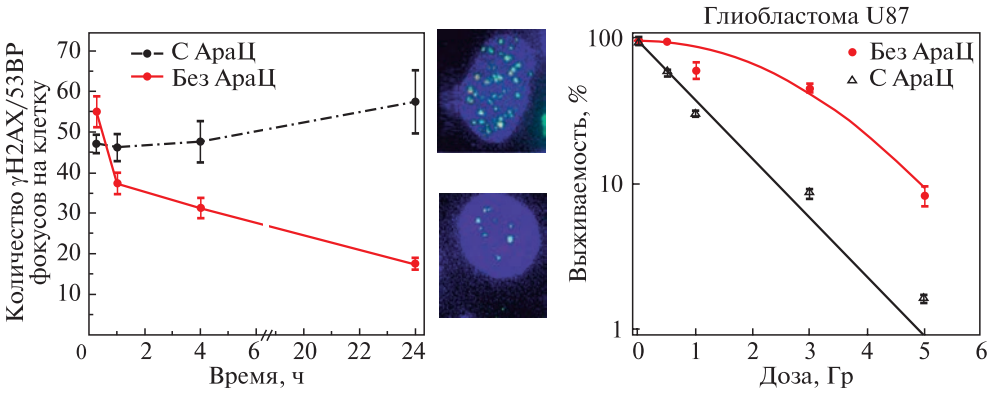


Рис. 4. Кинетика формирования и элиминации γH2AX/53BP1 фокусов в ядрах клеток глиобластомы человека U87 (слева) и кривые выживаемости (справа) при комбинированном действии АраЦ и протонов в дозе 1,25 Гр в расширенном пике Брэгга

ство ДР ДНК в клетках при действии протонов в пике Брэгга в присутствии модификаторов возрастает более чем в 15 раз к 24-му часу наблюдения за счет увеличения количества ЭДР, тогда как в отсутствие модификаторов оно снижается к этому времени до минимума.

На этой основе в ЛРБ ОИЯИ был разработан и запатентован принципиально новый метод повышения биологической эффективности пучков протонов медицинского назначения и гамма-терапевтических установок[8], который в перспективе позволяет приблизить биологическую эффективность протонного облучения к эффективности облучения ионами углерода.

РАДИАЦИОННАЯ ГЕНЕТИКА И ЦИТОГЕНЕТИКА

Молекулярно-генетические исследования нацелены на изучение спектра мутационных событий при воздействии ионизирующих излучений с различными физическими характеристиками. Для анализа мутаций используются специально разработанные генетические системы, а также секвенирование селективных участков ДНК. Изучаются генетическая гетерогенность популяции клеток и радиочувствительность различных фракций, механизмы старения и гибели клеток, механизмы радиорезистентности. Изучается генетический контроль стабильности митохондриальной ДНК, а также роль митохондрий и митохондриальной ДНК в реакции на воздействие радиации.

Исследование отдаленных последствий и мутагенного действия ионизирующих излучений разного качества, в особенности ускоренных тяжелых ионов, на клетки млекопитающих и человека представляют актуаль-

[8] Способ повышения частоты образования двунитевых разрывов ДНК в клетках человека при действии ионизирующих излучений в условиях влияния радиомодификаторов / Красавин Е. А., Борейко А. В., Буланова Т. С., Куликова Е. А., Тимошенко Г. Н., Чаусов В. Н. Патент 2699670 РФ. Опубл. 09.09.2019. Бюл. № 25.

ную задачу современной радиобиологии. Хромосомные аберрации изучают более полувека, тем не менее в этой области остается много нерешенных вопросов. В ЛРБ проводятся исследования хромосомных повреждений, различных типов генных и структурных мутаций в зависимости от дозы и величины ЛПЭ излучения, а также механизмов генетической стабильности. С помощью современного и актуального метода multicolor Fluorescent in situ Hybridization (mFISH) исследуются комплексные радиационно-индуцированные перестройки хромосом. Основным преимуществом метода является возможность исследовать комплексные аберрации хромосом (3 и более разрывов в двух и более хромосомах), которые являются маркером плотноионизирующих излучений, отражающим кластерное распределение повреждений ДНК вдоль трека частицы.

Проведен анализ спектров генных мутаций, индуцированных гамма-квантами и ускоренными тяжелыми ионами. В спектрах мутаций преобладали замены пар оснований, выпадение одного нуклеотида и комплексные мутации, представляющие из себя комбинацию замены и делеции в пределах одного витка ДНК. Показано, что тяжелые ионы индуцируют комплексные мутации более эффективно. Для анализа структурных перестроек использовалась плазмидная система. С помощью генетического, электрофоретического и рестрикционного анализа определялись размер и локализация индуцированных повреждений. Секвенирование плазмидной ДНК у 9 мутантов, которые утратили участки ДНК, затрагивающие два

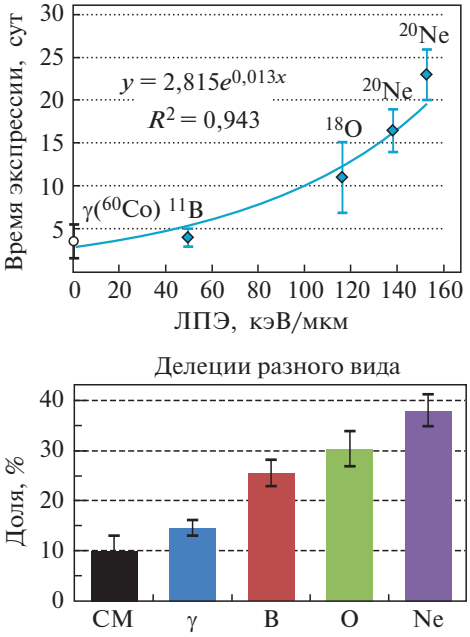


Рис. 5. Максимальный уровень радиационно-индуцированного мутагенеза в клетках китайского хомячка и структурные изменения в hprt-гене в зависимости от «времени экспрессии» и ЛПЭ ускоренных ионов. На фото: Н. А. Кошлань, М. Д. Исакова

(8 мутантов) и три (1 мутант) гена, показало точную локализацию и размер делеций.

Исследованы закономерности мутационного процесса в клетках млекопитающих при действии ускоренных ионов (^{11}B, ^{20}Ne и ^{18}O) с различной ЛПЭ и γ-квантов ^{60}Co в различные сроки после радиационного воздействия. Выявлено, что максимальный выход мутантных субклонов зависит от ЛПЭ ускоренных ионов. При более высоких ЛПЭ наблюдается смещение максимума выхода мутантов с увеличением времени экспрессии облученных клеток. Зависимость имеет экспоненциальный характер, что может указывать на качественные различия повреждений генетических структур при разных значениях ЛПЭ, обусловливающих данное смещение. В ходе продолжительного культивирования мутантных субклонов выявлены необычные типы роста некоторых мутантов. Такие признаки могут свидетельствовать об инициации процессов трансформации клеток, в том числе злокачественной[9,10].

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-

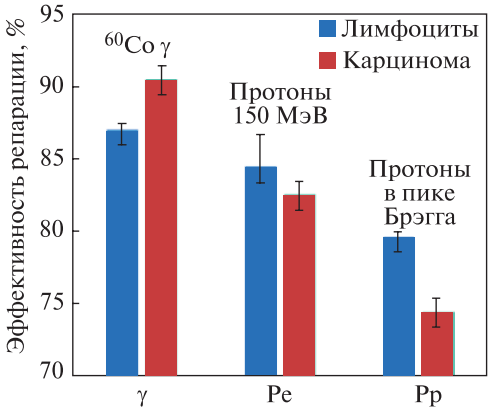


Рис. 6. Эффективность репарации разрывов хроматина в нормальных лимфоцитах человека и клетках карциномы линии Cal51

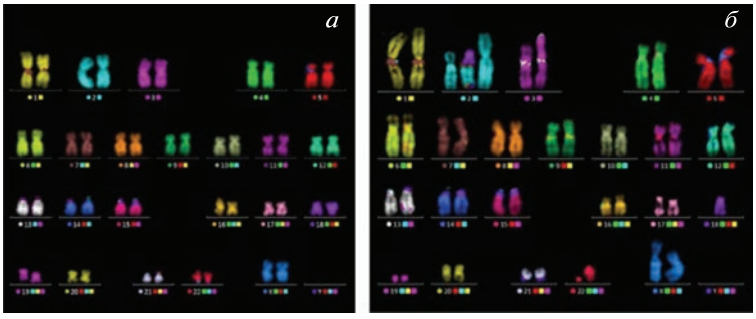


Рис. 7. а) Нормальная кариограмма лимфоцитов крови человека, полученная методом mFISH; б) кариограмма с комплексными хромосомными аберрациями в отдаленный период после действия радиофармпрепаратов йода ^{131}I

[9] *Bláha P. et al.* // Mutation Research. 2017. V. 803–805. P. 35–41.
[10] *Bláha P. et al.* // Front. Phys. 2021. V. 8. P. 584326.

квантов в опухолевых клетках выявлена более эффективная репарация разрывов хроматина по сравнению с нормальными клетками, чем при облучении протонами. Результаты указывают на предпочтительность применения пучков протонов в лучевой терапии карциномы молочной железы[11].

В сотрудничестве с МРНЦ им. А. Ф. Цыба (Обнинск) проведено цитогенетическое исследование побочного действия радиойодтерапии опухолей щитовидной железы. Методом mFISH впервые показано, что действие радиофармпрепаратов йода индуцирует в клетках крови преимущественно нестабильные хромосомные аберрации, тогда как уровень стабильных хромосомных аберраций, являющихся возможным триггером вторичного канцерогенеза, растет незначительно[12].

РАДИАЦИОННАЯ ФИЗИОЛОГИЯ

Радиационно-физиологические исследования нацелены на изучение нарушений поведенческих реакций, электрической активности мозга, патоморфологических изменений в критических органах и системах лабораторных животных при воздействии ионизирующих излучений с различными физическими характеристиками. Для анализа поведения применяют программно-информационные системы видеотрекинга и машинного обучения. Регистрацию электрической активности различных отделов ЦНС грызунов проводят после имплантации микроэлектродов с применением беспроводных датчиков. Анализ морфологических изменений в тканях выполняют с использованием современных гистологических и иммуногистохимических методов на световом и флуоресцентном микроскопическом оборудовании.

Одна из ключевых задач радиационной физиологии связана с оценкой радиационных рисков в ходе освоения дальнего космоса. Спектр галактических космических лучей (ГКЛ) состоит из высокоэнергетических протонов и ионов с высоким зарядом и энергией. Последние, несмотря на низкие флюенсы, вносят большой вклад в радиационный риск для космонавтов из-за их высокой биологической эффективности. Бóльшая часть знаний о действии ГКЛ основана на наземных экспериментах на ускорителях заряженных частиц. С этой точки зрения базовые установки ОИЯИ предоставляют широкие возможности для моделирования биологического действия космического излучения на высокоорганизованные живые организмы.

Специалистами ЛРБ впервые была предложена и обоснована новая концепция радиационного риска для пилотируемых межпланетных полетов, в рамках которой радиационный риск для космонавтов связывается с действием тяжелых ядер галактических космических лучей на структуры центральной нервной системы[13]. Такое влияние в ходе полета может привести к изменениям высших интегративных функций мозга и вызывать нару-

---

[11] *Kowalska A. et al.* // Radiat. Environ. Biophys. 2023. V. 62. P. 151–160.

[12] *Khvostunov I. et al.* // Intern. J. Mol. Sci. 2023. V. 24, No. 6. P. 5128.

[13] *Григорьев А. И., Красавин Е. А., Островский М. А.* // Вестник РАН. 2017. Т. 87, № 1. С. 65–69.

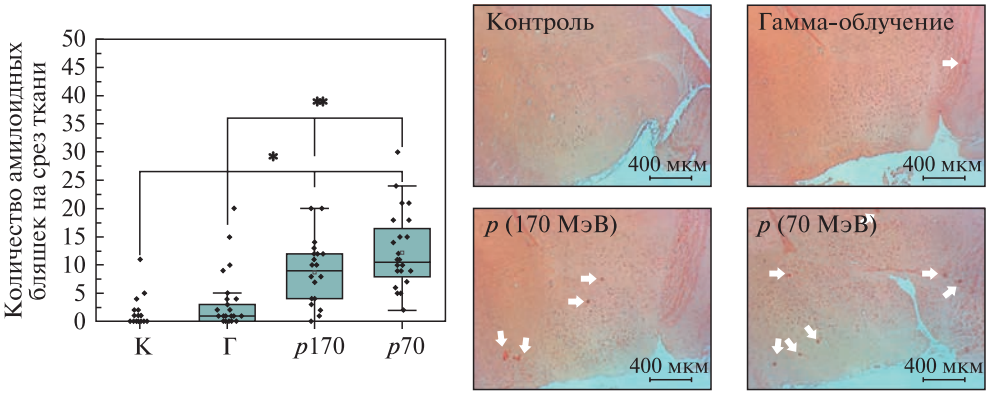


Рис. 8. Амилоидные бляшки в переднем мозге крыс через 30 сут после облучения (отмечены белыми стрелками на срезах). К — контрольная группа; Г — γ-кванты ^{60}Co; p170, p70 — протоны с энергией 170 и 70 МэВ

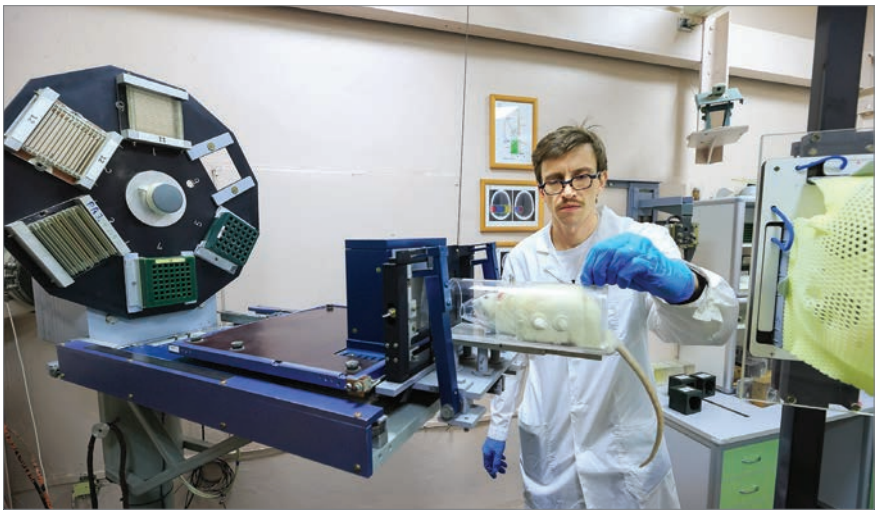
шения операторской деятельности экипажей. Новая парадигма обусловливает новые направления научных исследований в области космической радиобиологии, указывает на необходимость разработки новых нормативных документов обеспечения радиационной безопасности при пилотируемых полетах в дальний космос.

В связи с разработанной концепцией в ходе радиационно-физиологических исследований были выполнены работы по определению зависимости морфологических и функциональных изменений сетчатки глаза и различных отделов головного мозга грызунов. Выявлена высокая радиорезистентность сетчатки по критериям морфологических и функциональных нарушений в пострадиационный период.

С применением различных тест-систем исследованы поведенческие нарушения у облученных животных в пострадиационный период. Исследованы количественные закономерности развития морфофункциональных нарушений в различных отделах головного мозга при действии протонов и ускоренных ионов углерода. Впервые проведен корреляционный анализ поведенческих реакций и морфологических изменений в различных отделах головного мозга крыс после облучения гамма-излучением и ускоренными заряженными частицами различных энергий[14,15]. Исследованы изменения показателей стереотипии, исследовательской активности и мотивации животных при тотальном облучении организма и локальном воздействии на голову животного. Установлено развитие амилоидоза в переднем мозге крыс, дистрофических изменений в коре, гиппокампе и мозжечке облученных животных в период от 1 до 3 месяцев. Проведен компьютерный морфометрический анализ нейронов головного мозга. Показано наличие областей мозга с большей радиочувствительностью. Впервые выявлены патоморфо-

[14] *Severyukhin Yu. S. et al.* // Cellular and Molecular Neurobiology. 2023. V. 43, No. 1. P. 339–353.

[15] *Kolesnikova I. A. et al.* // Ibid. No. 7. P. 3723–3741.



Проведение эксперимента с животными на медицинском протонном пучке ЛЯП. Ю. С. Северюхин

логические изменения и редукция клеточной популяции слоя эпендимоцитов головного мозга после воздействия протонами в пике Брэгга.

Совместно со специалистами Института высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, Института медико-биологических проблем РАН изучено влияние высокоэнергетичных ионов углерода (500 МэВ/нуклон) на метаболизм ключевых нейромедиаторов головного мозга грызунов. Определены наиболее чувствительные к облучению области мозга, в которых метаболизм менялся в ранние и поздние сроки после радиационного воздействия[16].

Совместно с Институтом медико-биологических проблем РАН, Институтом приматологии РАН, Институтом высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН выполнены пионерские эксперименты и получены данные о воздействии высокоэнергетичных протонов и ускоренных ионов углерода на когнитивные функции обезьян и содержание моноаминов и их метаболитов в периферической крови. Показано, что облучение головы обезьян протонами в дозе 3 Гр не вызывает существенных изменений их когнитивных функций. В то же время после воздействия ионов углерода в дозе 1 Гр наблюдается достоверное снижение когнитивных функций и концентрации метаболитов серотонина в крови у обезьян[17].

Последующие исследования выявили отдаленные неврологические, биохимические, цитогенетические и гематологические нарушения у обезьян *Macaca mulatta* в течение более пяти лет после локального облучения головы ионами криптона ^{78}Kr с энергией 2,58 ГэВ/нуклон. У облученных животных, характеризующихся выраженными отклонениями от стандарт-

[16] *Belov O. et al.* // Eur. J. Med. Phys. 2016. V. 32, No. 9. P. 1088–1094.
[17] *Беляева А. Г. и др.* // Нейрохимия. 2017. Т. 34, № 1. С. 1–9.

ного поведения, обнаружены более низкие соотношения между лимфоцитами, тромбоцитами, нейтрофилами и моноцитами, выявлены изменения показателей печеночных тестов и более высокий уровень хромосомных аберраций[18].

МЕДИЦИНСКАЯ РАДИОБИОЛОГИЯ

Основным научным направлением в данной области является изучение свойств радиомодифицирующих агентов с целью идентификации новых соединений, способных повысить радиочувствительность опухолей (радиосенсибилизаторов), а также соединений, которые могут защищать нормальные ткани в ходе радиотерапии (радиопротекторов). В секторе медицинской радиобиологии ЛРБ используются методики скрининга различных препаратов на предмет их токсичности и радиомодифицирующего действия в культуре клеток, *in vivo* модели перевиваемых опухолей для изучения фармакологических и радиобиологических свойств потенциальных радиосенсибилизаторов, аналитические методы с использованием жидкостной хроматографии для изучения фармакокинетики и фармакодинамики исследуемых соединений.

Развитие нового подхода к повышению биологической эффективности медицинских пучков протонов, разработанного в ЛРБ, было продолжено в ходе предклинических исследований на моделях мелких лабораторных животных[19,20]. Специалистами ЛРБ и МРНЦ им. А. Ф. Цыба исследованы закономерности и молекулярно-клеточные механизмы комбинированного действия АраЦ и протонного излучения в очаговой дозе 10 Гр на рост меланомы линии B16 и ряд процессов, связанных с радиационным ответом опухоли *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. Определена доля опухолевых стволовых клеток (ОСК) в рассматриваемых группах животных. Выявлено, что через 9 сут после облучения протонами доля ОСК по-прежнему сохраняется на контрольном уровне, но при комбинированном воздействии уменьшается в 3,1 раза по сравнению с одиночным действием протонного излучения.

Моделирование фракционированной терапии в режиме пять еженедельных облучений протонами общей фокальной дозой 50 Гр в присутствии АраЦ привело к более выраженному торможению роста меланомы B16, чем облучение в том же режиме без АраЦ. В группе комбинированного воздей-

[18] *Кошлань Н. А. и др.* // Авиакосмическая и экологическая медицина. 2024. № 2. С. 105–112.
[19] *Борейко А. В. и др.* // Письма в ЭЧАЯ. 2023. Т. 20, № 4. С. 698–708.
[20] *Zamulaeva I. A. et al.* // Phys. Part. Nucl. Lett. 2023. V. 20, No. 1. P. 63–75.

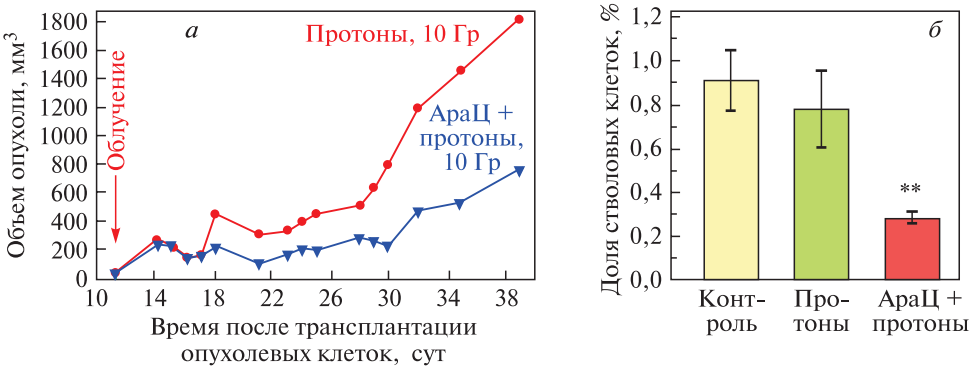


Рис. 9. а) Торможение роста опухоли меланомы В16 у мышей после облучения протонами и комбинированного воздействия АраЦ и протонов в дозе 10 Гр; б) доля опухолевых стволовых клеток в первичном очаге меланомы В16 через 9 сут после облучения протонами и комбинированного воздействия АраЦ и протонов

ствия у 13 % животных зарегистрирована регрессия первичного очага меланомы и отмечена длительная выживаемость вплоть до окончания наблюдения.

В ходе серии экспериментов было показано, что введение АраЦ усиливает противоопухолевое действие протонного излучения путем реализации нескольких механизмов, среди которых уменьшение количества ОСК, угнетение пролиферации клеток и ангиогенеза в опухоли на фоне изменения иммунного ответа в первичном очаге и его инфильтрации лимфоцитами. По результатам исследований получено несколько патентов[21, 22].

Для исследования модификации нарушений высших интегративных функций центральной нервной системы средствами фармакохимической защиты после тотального облучения протонами с энергией 170 МэВ был исследован ряд ноотропных препаратов. В ходе проведения поведенческих тестов выявлено, что препарат «Церебролизин» статистически значимо восстанавливает значение показателей двигательной активности и оказывает позитивное действие на рабочую память облученных животных. Установлено, что препарат «Семакс» нормализует индекс эмоционального воздействия на 7-е сутки после воздействия ускоренными протонами. Проведено определение уровня восстановления показателей силы скелетных мышц животных, подвергшихся воздействию, перед контрольными измерениями. Морфологическая картина в сенсомоторной коре головного мозга облученных животных, которым вводился препарат «Семакс», близка к норме.

---

[21] 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. Опубл. 14.06.2022. Бюл. № 17.

[22] 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. Опубл. 23.06.2023. Бюл. № 18.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Задачей сектора математического моделирования ЛРБ является создание иерархии моделей, позволяющих систематизировать экспериментальные данные и изучать пути, которыми радиационно-индуцированные патологии развиваются на разных уровнях организации (от молекул до популяций клеток) и во временных рамках (острые и отдаленные последствия). В исследованиях используется широкий спектр расчетных методов из разных областей знаний (моделирования транспорта заряженных частиц через вещество, молекулярной динамики, биофизики полимеров, генетических регуляторных сетей, моделей динамики клеточных популяций, обработки и передачи информации в нейронных сетях), а также вычислительные ресурсы, в том числе суперкомпьютер ОИЯИ.

Сотрудниками сектора предложен оригинальный метод моделирования для микродозиметрических расчетов радиационных повреждений в нейронах и их субклеточных структурах при действии ускоренных заряженных частиц с разными физическими характеристиками[23, 24]. Впервые реализована модель переноса излучения с использованием детальных геометрических моделей нервных клеток для изучения особенностей повреждающего действия ускоренных заряженных частиц на структуры центральной нервной системы. Показано, что разработанные модели нейронов можно использовать не только для дозиметрического анализа, но и для изучения электрической активности нейронных сетей. Разработанные алгоритмы реализованы в виде приложения NEURON, которое включено в программный пакет GEANT4-DNA. Выявлено, что большая часть поглощенной дозы и продуктов радиолиза в нервной клетке приходится на дендриты и существенно зависит от геометрии клеток и типа частиц. Разработана оригинальная биофизическая модель, позволяющая рассчитывать вероятности попаданий и индукции возможных радиационных повреждений в нервных клетках. Получены новые расчетные данные о закономерностях индукции повреждений ДНК в ядрах нервных клеток с учетом прямого и косвенного действия излучений после облучения ускоренными заряженными частицами в широком диапазоне ЛПЭ. Установлено, что при воздействии ускоренных тяжелых ионов большая часть разрывов цепи ДНК возникает за счет прямого взаимодействия с частицей и более 80 % двунитевых разрывов ДНК находится в составе кластеров, включающих повреждения оснований. В ходе расчетов показано, что при облучении гиппокампа ускоренными заряженными частицами наибольшее количество поврежденных нейронов образуется в гранулярной зоне. Выполнен расчет выживаемости радиочувствительных клеток в субгранулярной зоне гиппокампа после облучения протонами и тяжелыми ионами углерода и железа с физическими характеристиками, близкими к спектру галактических космических лучей. Выявлено согласие между экспериментальными данными и результатами

[23] *Batmunkh M. et al.* // J. Radiat. Res. Appl. Sci. 2015. V. 8. P. 498–507.
[24] *Batmunkh M. et al.* // Phys. Med. 2019. V. 57. P. 88–94.

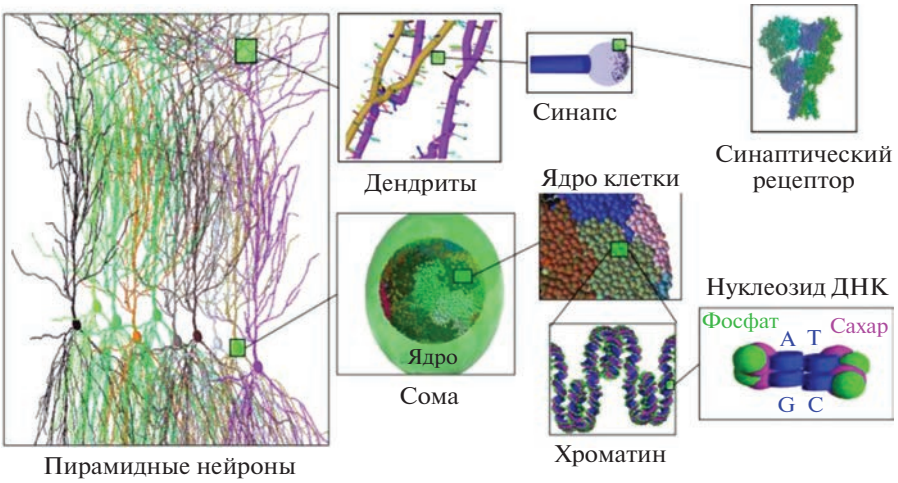


Рис. 10. Пример иерархии моделей при исследовании повреждений в мозге крыс. Приведены элементы слоя пирамидных нейронов и основные мишени на клеточном уровне

моделирования радиационных повреждений ДНК и выживаемости нервных стволовых клеток.

Выполнены серии работ по разработке теоретических моделей по обобщению и формализации большого числа экспериментальных данных по радиобиологическим экспериментам с культурами клеток бактерий, млекопитающих и человека[25,26]. Построена детальная математическая модель радиационно-индуцированного мутационного процесса в бактериальных клетках *E. coli*. Проведен анализ закономерностей влияния дефектов в различных генах, контролирующих репарацию повреждений и уровень мутагенеза. Разработана математическая модель, описывающая основные механизмы репарации двунитевых разрывов ДНК при действии ионизирующих излучений разного качества. Предложенный расчетный подход позволяет воспроизводить кинетику формирования и элиминации γH2AX-фокусов, уровень которых коррелирует с количеством ДР ДНК в клетке. Построенная модель отражает основные временные характеристики восстановления ДР при действии излучений в широком диапазоне значений ЛПЭ: от γ-квантов ^{137}Cs до тяжелых ионов ^{56}Fe. Показано, что модель может быть применена для описания кинетики репарации ДР ДНК в клетках, содержащих дефекты в системе репарации. Разработанные модели согласуются с большим числом экспериментальных данных.

С применением методов молекулярной динамики был разработан оригинальный подход для предсказания нарушений структуры и функций мутантных белковых структур. С использованием полученных данных моделировалась активность нейронных сетей мозга и было проанализировано,

[25] *Bugay A. N. et al.* // J. Theor. Biol. 2015. V. 364. P. 7–20.
[26] *Belov O. V. et al.* // J. Theor. Biol. 2015. V. 366. P. 115–130.

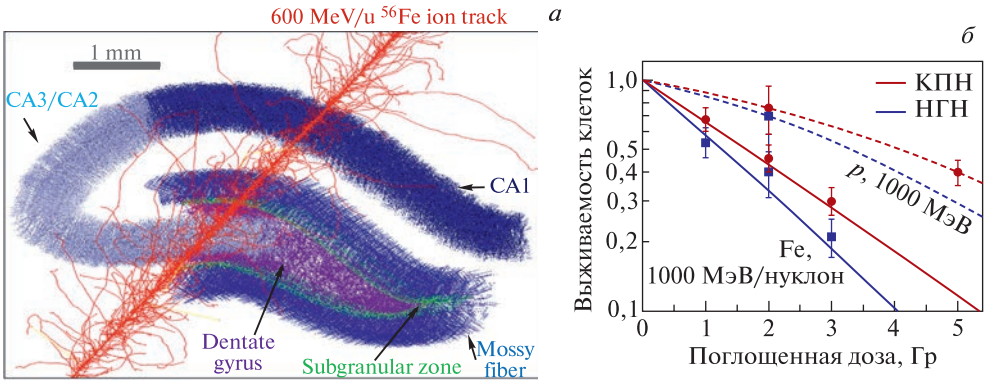


Рис. 11. а) Моделирование методом Монте-Карло структуры трека иона ^{56}Fe энергией 600 МэВ/нуклон в трехмерной модели гиппокампа крыс; б) расчет выживаемости клеток-предшественников нейронов (КПН, красные линии, • — эксперимент) и незрелых гранулярных нейронов (НГН, синие линии, ■ — эксперимент) при облучении протонами (штриховые линии) и ионами железа (сплошные линии) с энергией 1 ГэВ/нуклон

как радиационное воздействие может отразиться на их функционировании. Построена математическая модель области CA3 гиппокампа с использованием программной среды NEURON. На основе данной модели произведен расчет возникновения синхронных осцилляций, вносящих вклад в формирование γ- и θ-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. По характеру активности нейронной сети и соответствующей электроэнцефалограмме можно судить о макроскопическом эффекте конкретного типа мутаций. В итоге был разработан подход к установлению связи определенных видов генных мутаций с нейродегенеративными заболеваниями, такими как различные виды эпилепсии и аутизма, и предсказаны методы их диагностики с помощью анализа сигналов ЭЭГ[27].

РАДИАЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА БАЗОВЫХ УСТАНОВКАХ

Радиационные исследования охватывают широкий спектр задач — от радиационной биологии и космической медицины до радиационной защиты ускорительных комплексов. Уникальные эксперименты проводятся на базовых установках ОИЯИ: Нуклотроне, У-400М — по изучению действия

[27] *Batova A. S. et al.* // J. Bioinform. Comput. Biol. 2019. V. 17, No. 1. P. 1940003.

Базовая установка ЛРБ SARRP. Н. В. Ломакин, Е. Е. Павлик, И. С. Гордеев, Д. В. Давыдов

ионизирующих излучений на биологические объекты в условиях, моделирующих глубокий космос. Создаются специализированные установки, такие как симулятор смешанных излучений для космической радиобиологии на комплексе NICA. Активно применяются программы расчета радиационных полей методом Монте-Карло, создаются новые приборы для нейтронной дозиметрии. Сотрудники ЛРБ организуют работу многофункционального комплекса SARRP (Small Animal Radiation Research Platform) для исследований в области медицинской радиобиологии, а также компактного рентгеновского облучателя CellRad для облучения клеточных культур.

Совместно с сотрудниками ЛЯР выполнен ряд глубоких модернизаций установки «Геном» для автоматизированного облучения биологических образцов на циклотроне У-400М[28]. В версии «Геном-М» (2013) улучшена система диагностики пучка и заменено программно-аппаратное обеспечение для автоматизации процесса. В актуальной версии «Геном-3» (2025) произведена полная замена вакуумного оборудования на выходе пучка, устройства для смены биологических образцов, окна для вывода пучка в атмосферу, устройств для измерения поперечного распределения плотности пучка, дозы облучения и контроля положения пучка, калибровки измерителя дозы.

Сотрудники ЛРБ совместно с коллективом ЛФВЭ принимали активное участие в разработке методики облучения мозга грызунов и приматов

[28] *Безбах А. А. и др.* // Письма в ЭЧАЯ. 2013. Т. 10, № 2(179). С. 274–280.

Смена диска с образцами на установке «Геном-М», ускоритель У-400М ЛЯР. Ю. Г. Тетерев, Г. Н. Тимошенко

на выведенных пучках Нуклотрона[29]. Это не только позволило реализовать пионерские эксперименты ЛРБ с облучением обезьян, но и впоследствии заложило основы проектирования каналов для прикладных исследований ARIADNA на комплексе NICA, в первую очередь станции SIMBO. Коллектив ЛРБ также принял активное участие в расчете радиационной обстановки и безопасности персонала на различных объектах комплекса NICA, включая коллайдер и каналы для прикладных исследований[30]. Совместно с Отделом радиационной безопасности ведется разработка систем для дозиметрии и спектрометрии нейтронов.

Издана монография Г. Н. Тимошенко, 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[31].

Выполнен цикл исследований, направленных на оценку радиационного риска космонавтов при длительных межпланетных полетах[32]. Проведены детальные расчеты спектров всех компонентов радиационного поля внутри обитаемого модуля космического аппарата от галактических космических

[29] *Балдин А. А. и др.* // Письма в ЭЧАЯ. 2019. Т. 16, № 4(223). С. 302–309.

[30] *Butenko A. V. et al.* // Phys. Part. Nucl. Lett. 2022. V. 19, No. 2. P. 123–128.

[31] *Тимошенко Г. Н.* Радиационная защита высокоэнергетичных ускорителей. Дубна: ОИЯИ, 2022. 111 с.

[32] *Timoshenko G. N., Gordeev I. S.* // J. Astrophys. Astron. 2020. V. 41. P. 5.

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 конверсии флюенс — эффективная доза для всех компонентов радиационного поля внутри корабля.

Совместно с ЛНФ и Институтом космических исследований РАН создан экспериментальный стенд для испытания приборов ядерной планетологии на моделях планетарного грунта. Приборы предназначены для анализа элементного состава грунта небесных тел. Особую роль в этих исследованиях играет поиск воды в свободном или связанном состоянии в приповерхностных слоях реголита Марса и Луны. Сотрудники ЛРБ участвовали в создании ряда приборов, с помощью которых было подтверждено наличие водяного льда на Марсе и Луне, прибора ДАН, смонтированного на борту ровера «Curiosity», а также ряда других приборов в составе будущих миссий Роскосмоса, NASA и ESA. На стенде выполнен большой объем работ по испытаниям приборов ДАН, МГНС, АДРОН-ЛР, АДРОН-РМ и ФРЕНД.

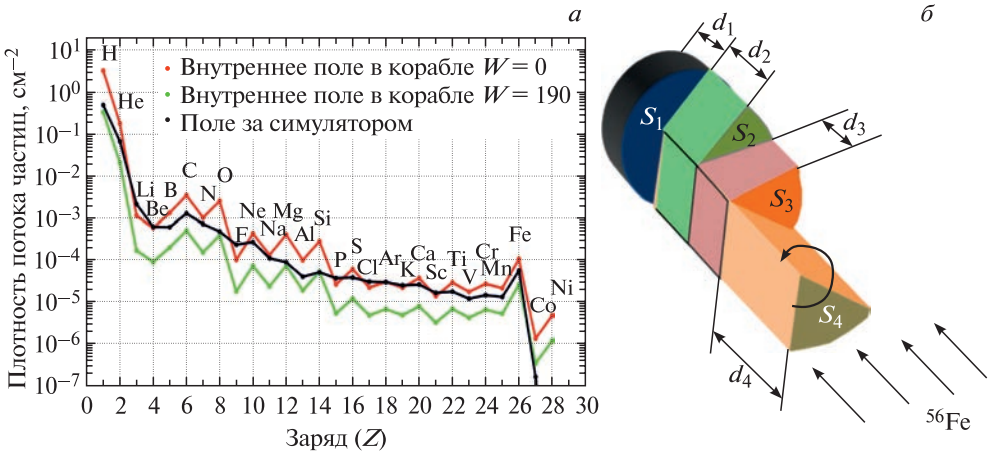


Рис. 12. а) Сравнение расчетных зарядовых распределений частиц во внутреннем радиационном поле космического корабля в минимуме и максимуме солнечной активности и расчетного зарядового распределения частиц в поле за симулятором; б) схематический вид конвертера симулятора

С целью развития экспериментальных методов оценки радиационного риска космических полетов в наземных условиях предложен уникальный вариант симулятора радиационного поля внутри жилого модуля космического аппарата в условиях глубокого космоса[33]. Разработанный вариант симулятора воспроизводит в правильном соотношении все компоненты радиационного поля корабля, усредненные по солнечной активности. Симулятор космического излучения возможно будет установить на пучке ядер ^{56}Fe с энергией 1 ГэВ/нуклон на радиобиологическом канале Нуклотрона,

[33] *Gordeev I. S., Timoshenko G. N.* // Life Sciences in Space Research. 2021. V. 30. P. 66–71.

создаваемом в рамках программы прикладных инновационных исследований на комплексе NICA. Получен патент на изобретение[34]. По итогам данного цикла работ коллективу в 2021 г. была присуждена первая премия ОИЯИ за научно-технические прикладные работы.

АСТРОБИОЛОГИЯ

Астробиологические исследования направлены на получение новых знаний, или уточнение существующих, о проблеме происхождения жизни, о распространенности жизни во Вселенной, о пределах выживаемости организмов, о вероятных условиях их переноса через космическое пространство.

Сектор астробиологии ЛРБ занимается поиском и анализом микрофоссильных остатков в метеоритном материале. Также проводятся исследования по моделированию возможных путей и условий абиогенного пребиотического синтеза, изучается взаимодействие прекурсоров биотических соединений с разными видами геологических пород. Данные исследования расширяют наши представления о биосфере ранней Земли и позволяют предполагать возможность зарождения жизни за пределами нашей планеты.

В пионерских экспериментах, проведенных ЛРБ ОИЯИ совместно с коллегами из Италии, по облучению водных растворов формамида про-

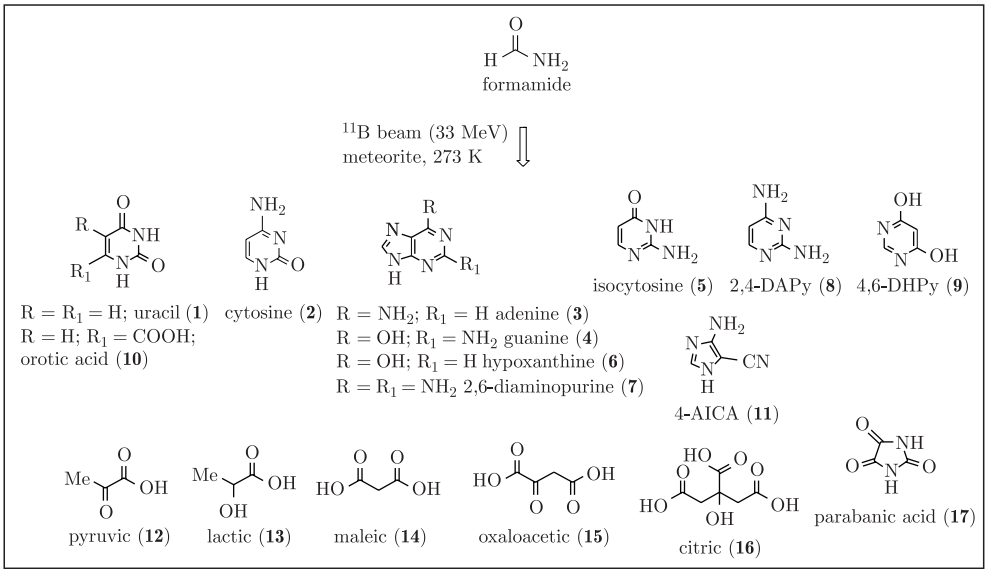


Рис. 13. Соединения, формирующиеся из формамида при облучении ионами ^{11}B в присутствии вещества метеоритов

[34] Устройство моделирования на пучках тяжелых ионов высоких энергий полей смешанного излучения для целей экспериментальной радиобиологии / Тимошенко Г. Н. (РФ), Гордеев И. С. (РФ). Патент 2761376 РФ. Опубл. 07.12.2021. Бюл. № 34.

тонами и ускоренными ионами в присутствии метеоритов в качестве катализаторов впервые в мире наблюдали абиогенный синтез большого числа пребиотических соединений: аминокислот, карбоновых кислот, сахаров, нуклеиновых оснований и даже нуклеозидов[35]. Эти соединения ранее не были обнаружены в экспериментах с воздействиями другого типа. В последующих экспериментах был предложен новый механизм, способствующий образованию и переработке нерастворимого органического вещества в метеоритах и в ходе пребиотических процессов[36].

Методами сканирующей электронной микроскопии и рентгеновского энергодисперсионного микроанализа выполнен цикл исследований окаменелых микроорганизмов (микрофоссилий) в более 30 метеоритах. Обнаружены формы, интерпретированные как остатки бактерий и одноклеточных эукариот. Выпущен первый в мире иллюстрированный атлас микрофоссилий в метеорите Оргей[37].

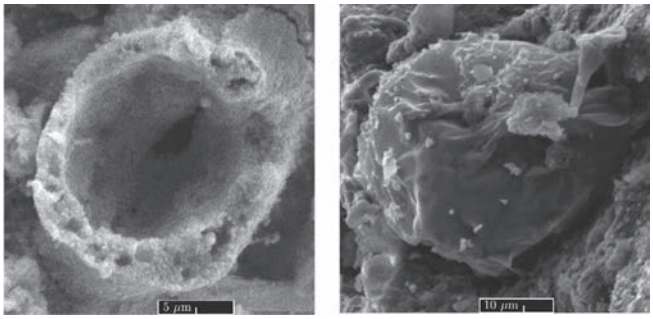


Рис. 14. Изображения окаменелых микроорганизмов из метеорита Оргей

Издана монография «Астробиология»[38], которая является первой попыткой обобщения накопленных знаний по астробиологии. В ее создании приняли участие специалисты из разных научных организаций и областей науки. В книге изложена история развития взглядов на вопрос происхождения жизни, этапы становления астробиологии как науки, описаны фактология и модели, на которых эти мировоззрения основаны, и очерчен круг нерешенных вопросов и перспективных направлений исследований.

ПОДГОТОВКА КАДРОВ, СОТРУДНИЧЕСТВО, КОНФЕРЕНЦИИ

Сотрудники лаборатории более 30 лет ведут активную работу по подготовке кадров в области радиобиологии, физики защиты и дозиметрии. С первых шагов по организации Учебно-научного центра ОИЯИ была

[35] *Saladino R. et al.* // PNAS. 2015. V. 112, No. 21. P. E2746–E2755.
[36] *Bizzarri B. M. et al.* // RSC Advances. 2021. V. 11, No. 31. P. 19258–19264.
[37] Метеорит Оргей (атлас микрофоссилий) / Отв. ред. А. Ю. Розанов. М.: ПИН РАН, 2020. 130 с.
[38] Астробиология / Под ред. А. Ю. Розанова, Е. А. Сапрыкина. Дубна: ОИЯИ, 2024. 199 с.

Выпускники кафедры биофизики университета «Дубна». В центре — руководитель кафедры Е. А. Красавин. 2010 г.

Практические занятия по радиобиологии под руководством Е. А. Насоновой на Летней студенческой школе SAINTS в iThemba LABS. ЮАР, 2025 г.

Съезд Международной биофизической коллаборации. GSI/FAIR, Дармштадт, 2019 г.

сформирована кафедра радиобиологии как филиал кафедры МИФИ и открыта аспирантура по специальности «радиобиология». В 1998 г. в университете «Дубна» была открыта первая базовая кафедра ОИЯИ — кафедра биофизики, которую возглавил профессор Е. А. Красавин. С тех пор подготовлено более 200 специалистов в области радиобиологии, многие из которых работают в ОИЯИ. Планируется открытие кафедры в филиале МГУ в Дубне, которая будет готовить кадры по направлениям радиохимии и радиобиологии.

Лаборатория радиационной биологии по состоянию на 2025 г. активно сотрудничает с более чем 50 научными центрами и университетами из 16 стран. Осуществляются проекты по программам сотрудничества с Беларусью, Болгарией, Вьетнамом, Египтом, Сербией и Южно-Африканской Республикой. В лаборатории работают сотрудники из России, Беларуси, Вьетнама, Египта, Индии, Казахстана, Кубы, Монголии, Узбекистана.

В 2019 г. ЛРБ вступила в Международную биофизическую коллаборацию, объединяющую сообщество ученых, ведущих радиобиологические, биофизические и медицинские исследования на установках мирового уровня NICA, FAIR, RAON, ELIMED, FRIB и др.

В 2021 г. ЛРБ в составе ОИЯИ вошла в коллаборацию ARIADNA, объединяющую исследователей на прикладных каналах комплекса NICA. Радиобиологи ЛРБ также участвуют в коллаборации FLAP, ведущей исследования на установке ЛИНАК-200 в ЛЯП. Разработчики из ЛРБ являются активными членами коллаборации GEANT4-DNA, развивающей средства радиобиологического моделирования методом Монте-Карло. Ученые ЛРБ в разное время представляли Институт в МАГАТЭ и IUPAP.

Многие годы в Дубне проходят заседания Научного совета по радиобиологии РАН, председателем которого являлся Е. А. Красавин. Под эгидой совета ежегодно проводится международная конференция «Актуальные проблемы радиобиологии», объединяющая ведущих специалистов-радиобиологов из разных стран мира.

Международная конференция «Современные направления в радиобиологии и астробиологии. Молекулярные, генетические, клеточные и тканевые эффекты, их модификация и отдаленные последствия». 2015 г.

Международная школа «NUMAR-2025». Куба, 2025 г.

По инициативе директора лаборатории А. Н. Бугая в странах-участницах Института — Кубе, Монголии и ЮАР организуются международные молодежные научные школы по ядерным методам и прикладным исследованиям в науках о жизни, окружающей среде и новым материалам (NUMAR).

Сегодня Лаборатория радиационной биологии уверенно смотрит в будущее. Она стала центром притяжения для молодежи и зрелых ученых из раз-

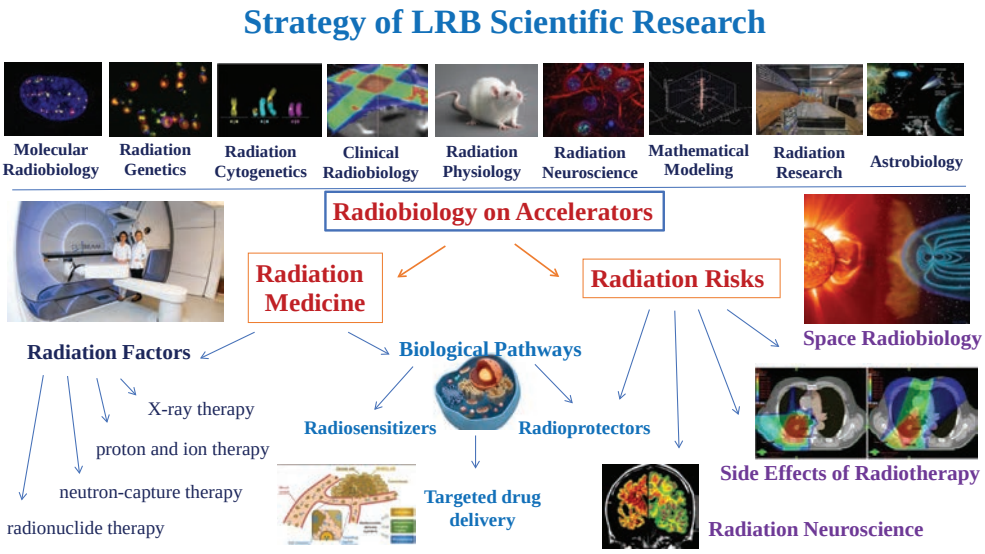


Рис. 15. Стратегия научных исследований ЛРБ

ных стран, представляющих международные коллаборации. Впереди новые горизонты — ученым-радиобиологам предстоит поиск решений фундаментальных проблем, таких как установление интегративных взаимосвязей радиационно-индуцированных эффектов на разных уровнях биологической организации: молекулярном, клеточном, тканевом и организменном при действии излучений с разными характеристиками, а также выявление механизмов действия радиации на высшие интегративные функции центральной нервной системы и развитие нейродегенеративных заболеваний. Особое внимание будет уделено и практическим приложениям — разработке новых методов повышения эффективности лучевой и радионуклидной терапии злокачественных новообразований, оценкам радиационных рисков для различных сценариев пилотируемых космических полетов и при работе в смешанных радиационных полях.

ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ

Одной из приоритетных задач ОИЯИ за рамками основной научной повестки является максимальное раскрытие потенциала использования получаемых в Институте результатов в экономике и социальной сфере стран-участниц. Говоря о технологиях ОИЯИ, о перспективных прикладных результатах, о рождающихся в Институте инновациях, стоит отметить несколько отличающихся, хотя и тесно переплетенных треков, на которых они появляются и достигают зрелости.

Прежде всего, рождение инноваций в ОИЯИ связано с технологическим уровнем научной инфраструктуры, крупных уникальных установок, создаваемых и развиваемых как в самом Институте, так и с участием его специалистов в других мировых центрах. Ускорительные комплексы, детекторные системы, информационная инфраструктура ОИЯИ, исследовательский реактор и оснащение его выведенных пучков, другие крупные исследовательские инфраструктуры — всё это примеры разработки и внедрения передовых инновационных технологий специалистами Института и их партнерами из научных центров и ведущих мировых технологических компаний. Установки ОИЯИ — это всегда одновременно и вызовы для их создателей, которым приходится разрабатывать и изготавливать часто не имеющие аналогов системы, и витрина самых ярких инноваций, явившихся ответом на такие вызовы. Реализованные в них решения становятся объектами результативного трансфера технологий и знаний в интересах других научных центров, индустриальных партнеров, медицины и т. д., в том числе в таких областях, как криогенная техника, магнитные системы, различные типы ускорителей, источники ионов, системы диагностики пучков, детекторы, системы окружения образца, современные нейтроноводы и другое оборудование выведенных пучков, различные типы спектрометров нейтронного рассеяния, вакуумные, высоковольтные системы, информационно-вычислительный комплекс.

Ярким примером инновационных технологий ОИЯИ стали результаты работы коллектива специалистов ЛФВЭ и созданная ими «Фабрика магнитов» под руководством Г. В. Трубникова и Г. Г. Ходжибагияна. Даже в одной такой

установке, как NICA, используются 493 различных типа магнитов. Магниты коллайдера NICA охлаждаются потоком кипящего гелия при температуре 4,6 K. Рабочая температура накопителя энергии из высокотемпературного купратного сверхпроводящего материала — около 30 K (это температура кипения неона), а температура магнитов нового Нуклотрона составит 50–70 K. Впервые в мире в ОИЯИ были созданы конструкция и технология изготовления уникального кабеля, позволяющая делать обмотки с радиусом изгиба от 40 мм с током в десятки тысяч ампер. Получен эффект увеличения до трех раз критического тока ВТСП-лент в магнитных полях при температуре 50–80 K путем создания центров пиннинга за счет облучения лент протонами и ионами. Разработана конструкция соединения концов ВТСП-кабелей с переходным сопротивлением всего в несколько наноом при токе 10–15 кА и температуре 30–65 K. Подобран состав эпоксидного компаунда, обеспечивающий долговременную стабильность и оптимальные условия охлаждения обмотки и др.

ВТСП-магниты для ускорителей планируется использовать при модернизации магнитной системы Нуклотрона и в будущих циклотронах для терапии онкологических заболеваний. Мощный накопитель энергии на основе ВТСП-магнита найдет применение не только в физике высоких энергий, но и в современных и будущих транспортных средствах, в объектах с источниками возобновляемой энергии и в других областях.

Вклад научного коллектива ОИЯИ в осуществление прорывных технологий, открывших возможность создания высокотемпературных сверхпроводящих магнитов для ускорителей заряженных частиц и мегаваттных накопителей энергии, высоко оценен Научным комитетом Национальной премии в области будущих технологий «Вызов», лауреатом которой в номинации «Инженерное решение» стал Г. Г. Ходжибагиян (соавторы работы — Г. В. Трубников, М. С. Новиков).

Второй трек включает примеры целенаправленного решения Институтом крупных научно-технических, технологических задач, актуальных для экономики и социальной сферы стран-участниц, таких как развитие технологии трековых мембран для микроэлектроники и биомедицинских приложений, протонная терапия на фазотроне ЛЯП, новейшая история протонной терапии в ОИЯИ на базе специализированного сверхпроводящего циклотрона, создание инфраструктуры и методическое обеспечение тестирования устойчивости электронных компонентов к воздействию тяжелоионного компонента космического излучения… В истории Института не раз бывало так, что запрос на решение той или иной задачи,

актуальной для общества, готовность специалистов ОИЯИ ее решить и появление научного лидера, принявшего решение сконцентрировать на ней усилия, рождали результативное прикладное направление, несмотря на то, что оно выходило за рамки фундаментальной повестки. Так, с момента получения в 1967 г. на синхроциклотроне первого в СССР протонного пучка с параметрами для радиационной терапии использование протонов для лечения онкологических заболеваний прошло в ОИЯИ славный путь. Сотни пациентов получили сеансы терапии, была развита методика трехмерной конформной протонной радиационной терапии, в партнерстве с ведущими мировыми производителями совершенствовалась ускорительная техника для центров адронной терапии.

И сегодня Институт продолжает эту работу на новом уровне. В партнерстве с ГК «Росатом» создается специализированный медицинский сверхпроводящий циклотрон для протонной терапии МСЦ-230. Установка предназначена для проведения протонной лучевой терапии и медико-биологических исследований, включая развитие метода флэш-терапии, который предполагает подведение терапевтической дозы облучения к опухолевому объему при сверхвысокой мощности дозы в пучке, на несколько порядков превышающей обычно используемую при стандартной радиотерапии. В таком режиме облучения уменьшается степень повреждения нормальных тканей, окружающих опухоль и попадающих под действие излучения, но в то же время воздействие на раковые клетки сохраняется практически на прежнем уровне, что улучшает перспективу локального контроля опухоли при меньшей частоте возникновения побочных эффектов.

МСЦ-230 станет ключевым компонентом инфраструктуры для реализации совместного с ФМБА России проекта создания Научно-клинического центра протонной терапии и, в перспективе, готовой к запуску в серию специализированной машиной.

ОИЯИ как центр инновационного развития — это, прежде всего, специализированная инфраструктура прикладных исследований и центр компетенций в ее использовании. Формирование сегмента пользовательской инфраструктуры прикладных исследований и разработок на установках ОИЯИ стало еще одним направлением, развитие которого стимулирует генерацию инноваций. Флагманской инициативой на данном треке является создание Инновационного центра ядерно-физических исследований в сфере наук о жизни, биомедицинских технологий, радиационной биологии и радиационного материаловедения, а также экологии и информационных систем, в рамках которого исследователи и разработчики получают доступ к новым установкам и пользовательской

инфраструктуре, имеющим значительный потенциал с точки зрения получения прикладных результатов и разработки новых технологий, таким как:

- ARIADNA – пользовательская инфраструктура на базе выведенных пучков NICA (пучки с энергиями от МэВ/нуклон до ГэВ/нуклон): науки о жизни, биомедицинские приложения, исследования радиационной стойкости полупроводниковой электроники, ядерно-физические данные для новой энергетики;
- инфраструктура для разработок в области омикс-технологий и нейрорадиобиологии: разработки, направленные на повышение радиочувствительности, создание трансгенных систем, новых решений в области адресной доставки (молекулярные векторы) и использования радионуклидов;
- комплекс на базе сверхпроводящего протонного циклотрона МСЦ-230 для R&D (Research and Development — исследования и разработки) в области пучковой терапии: применение радиомодификаторов, флэш-терапия, планирование облучения; пилотная установка для медицинских центров;
- комплекс на базе циклотрона DC-140 для тестирования электронных компонентов, для радиационного материаловедения, для развития технологий трековых мембран и их производства;
- радиохимическая лаборатория 1-го класса и специализированный ускоритель (40 МэВ) для R&D в сфере технологий наработки радиоизотопов (^{225}Ac, ^{99m}Tc) для ядерной медицины.

Данная инициатива успешно развивается. Начаты прикладные работы на пользовательских станциях ARIADNA (подробная информация по статусу данного проекта приведена ниже).

В завершающей фазе находится создание комплекса на базе циклотрона DC-140 для работ в области технологий трековых мембран, радиационного материаловедения и тестирования электроники на радиационную стойкость.

Этот проект включает два больших инфраструктурных блока — лабораторию прототипирования и характеризации («NanoLab»), которая полностью оснащена и интенсивно используется, а также сооружаемый специализированный ускоритель DC-140, запуск которого существенно расширит возможности использования циклотронного комплекса ЛЯР в прикладных исследованиях и инновационных разработках.

Наряду с упомянутыми выше блоками экосистема Инновационного центра ядерно-физических исследований включает и являющийся яркой и динамично развивающейся историей успеха прикладной сегмент пользовательской программы на базе ИБР-2, и новые возможности, формируемые на базе ЛИНАК-200, других установок ОИЯИ.

Инновации, разработка и внедрение новых технологий — это всегда истории работы в условиях высоких рисков. Успех на этом пути в существенной степени зависит от эффективного использования системных мер поддержки инноваций со стороны государства. ОИЯИ не только уделял и уделяет значительное внимание анализу актуальной информации о таких инструментах, но и активно участвовал в их выработке и пилотировании, в создании архитектуры инновационной экономики и инструментов финансирования инноваций. ОИЯИ выступил организатором управляющей компании паевых инвестиционных фондов, получившей лицензию № 1 в России, и первого интервального паевого фонда, ориентированного на высокие технологии, а также одним из инициаторов и участников согласования в Правительстве РФ решения о создании ОЭЗ ТВТ «Дубна», обеспечившего в дальнейшем подготовку ее первых резидентов, входящих в так называемый «инновационный пояс» Института. Другие подобные примеры — победа в первом конкурсе на создание нанотехнологических центров и создание в партнерстве с высокотехнологичным бизнесом Международного инновационного нанотехнологического центра, а также учреждение Институтом совместно с научными и образовательными организациями СНГ и при поддержке МФГС в 2009 г. Международного инновационного центра нанотехнологий (МИЦНТ) СНГ, который стал базовой научно-технической организацией Содружества.

Бизнес-ориентированные проекты в ряде случаев предполагают форматы участия научной организации, которые не в полной мере согласуются с ее приоритетами в сфере фундаментальной науки. Тем не менее участие в них приносит Институту значимые результаты. Например, ОЭЗ «Дубна» и ее компании-резиденты сегодня являются эффективными партнерами Института в сфере инноваций, развитие особой экономической зоны дало мощный импульс развитию Дубны, повышению качества жизни в ней, а участие в проекте нанотехнологического центра позволило сделать новый шаг в развитии R&D программы Центра прикладной физики ЛЯР и сформированной в нем инфраструктуры прикладных исследований и разработок.

Еще один трек, на котором рождаются инновации в ОИЯИ, — целенаправленная совместная работа с индустриальными партнерами, с «отраслевой наукой» по освоению инфраструктуры R&D ОИЯИ как открытого пространства для творчества и передовых исследований (Open Research Space @ DUBNA), взаимодействия большой науки и бизнеса. Результатом такой работы является широкая палитра инициированных бизнесом проектов из самых разных, подчас очень далеких

от фундаментальной ядерной физики и физики частиц, областей, где компетенции, инфраструктура исследований и разработок и конкретные результаты Института оказались востребованы со стороны реального сектора. Соответствующие направления включают применение искусственного интеллекта в задачах агроиндустрии, создание и применение детекторных систем для новейших медицинских томографов, создание материалов для имплантации в офтальмологии, технологии водоочистки, материалы для водородной энергетики, оборудование для экологического мониторинга и климатических проектов, другие направления.

Важным компонентом политики ОИЯИ в области инновационного развития является поиск и реализация собственных системных мер и инструментов, стимулирующих генерацию инновационных проектов. Истории возникновения инновационных проектов в Институте многообразны. Часто они зарождаются в рамках пользовательских программ на установках ОИЯИ, когда участвующие в них команды из прикладной, «отраслевой» науки инициируют эксперименты, в которых заинтересованы представители соответствующей индустрии. В некоторых случаях они индуцированы партнерами Института, участвующими в сооружении его новых установок или проявляющими интерес к сформированным в нем компетенциям и инфраструктуре R&D.

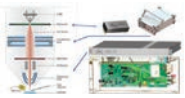
Тем не менее ОИЯИ считает необходимым не ограничиваться этими возможностями, искать системные инструменты проактивной генерации результатов, значимых для экономики и социальной сферы стран-участниц. Прикладная инновационная деятельность

Проекты – победители конкурса инновационных разработок 2025 г.

«Разработка систем измерения оксигенации глубоких тканей методом диффузионной оптики во временном домене (TD-DO)»

Руководитель – **Александр Селюнин** (ЛЯП)

«Создание линейки высоковольтных источников питания и коммутаторов напряжения для экспериментальных установок»

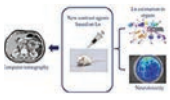


Руководитель – **Дмитрий Понкин** (ЛФВЭ)

«Разработка микро-ОФЭКТ систем для прецизионной визуализации в условиях модельных биологических экспериментов»

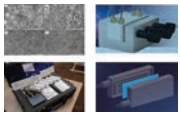
Руководитель – **Владислав Рожков** (ЛЯП)

«Тестирование нейротоксичности и оценка накопления контрастирующих агентов, наночастиц и иных соединений на животных моделях в формате TaaS (Testing as a Service)»



Руководитель – **Инга Зиньковская** (ЛНФ)

«Многофункциональная препаративная система тангенциальной фильтрации»



Руководитель – **Илья Виноградов** (ЦПФ ЛЯР)

включена в качестве самостоятельного направления в Проблемно-тематический план Института. Создан Экспертный совет ОИЯИ по инновациям. Реализован механизм отбора предложений на проведение разработок в области прикладной и инновационной деятельности с высоким потенциалом внедрения в индустрии, в научном приборостроении и социальной сфере. В 2025 г. в таком отборе, который планируется сделать регулярным и проводить не реже, чем раз в два года, участвовало более 30 заявок молодежных команд разработчиков, пять из которых получили финансовую поддержку на период до трех лет.

Ниже приведена более подробная информация по некоторым из реализуемых лабораториями Института направлений разработок, а также по новым инфраструктурным возможностям для развития инноваций.

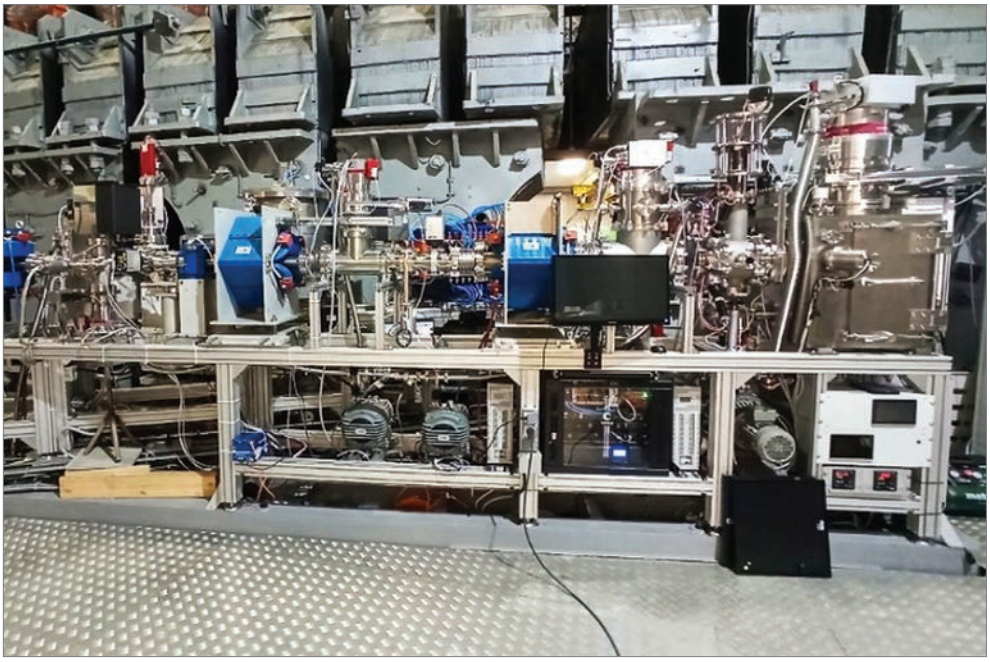
ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА КОМПЛЕКСЕ NICA

Новой вехой в развитии научного потенциала ОИЯИ стало создание инфраструктуры для прикладных исследований на комплексе NICA. Инфраструктура, получившая название ARIADNA (Applied Research Infrastructure for Advanced Developments at NICA fAcility), включает каналы транспортировки пучков заряженных частиц, магнитную оптику, источники питания, системы диагностики пучка, экспериментальные зоны с облучательными станциями, вспомогательную инфраструктуру, представленную участками для развертывания собственного оборудования пользователей, подготовки проб и проведения экспресс-анализа образцов после облучения. Возможности комплекса NICA позволяют проводить прикладные исследования в области наук о жизни, радиационного материаловедения, радиационной стойкости электроники и развития передовых технологий для систем субкритических реакторов, управляемых ускорителем.

Зоны для прикладных исследований являются неотъемлемой частью проекта NICA, изначально заложенной в его концепцию. За время работы над элементами инфраструктуры ARIADNA создано пять установок, предназначенных для решения широкого круга задач: станция облучения чипов (СОЧИ), испытательная станция компонентов радиоэлектронной аппаратуры (ИСКРА), станция исследований медико-биологических объектов (СИМБО), станция для исследований в области ядерных энергетических технологий (СИЯЭТ), станция длительного облучения (СДО).

Первой установкой, введенной в эксплуатацию в рамках инфраструктуры ARIADNA, стала станция облучения чипов (СОЧИ), предназначенная для исследований и облучений перспективных изделий полупроводниковой микро- и наноэлектроники пучками тяжелых ионов низких энергий на выходе с линейного ускорителя тяжелых ионов (ЛУТИ).

Оборудование для станции СОЧИ разрабатывалось в рамках сотрудничества между ОИЯИ и ИТЭФ с участием СПЭЛС/МИФИ, «Гиро-Пром», ВСТ. В процессе работы над станцией были разработаны детекторы системы диагностики и контроля характеристик пучков низкоэнергетических ионов в вакууме и составные части станции, используемые при проведении исследований изделий полупроводниковой микро- и наноэлектроники на стойкость к воздействию тяжелых заряженных частиц низких энергий в ва-



Станция СОЧИ и канал транспортировки пучка ионов от ЛУТИ

кууме. Создана система контроля параметров объектов испытаний, оснастка для подключения контрольно-измерительного оборудования к объекту испытаний, вакуумная камера, система позиционирования, система задания температуры, а также рабочие места операторов пультовой. Проведены расчеты радиационной защиты для оборудования и места размещения станции.

Таблица 1. Параметры ионного пучка на станции СОЧИ

Параметр	Значение
Типы ионов	$^{12}C^{4+}$, $^{40}Ar^{8+}$, $^{131}Xe^{22+}$, $^{84}Kr^{14+}$, $^{169}Tm^{21+}$, $^{197}Au^{31+}$, $^{209}Bi^{35+}$
Энергия ионов на выходе из ЛУТИ, МэВ/нуклон	3,2
Плотность потока ионов, $см^{-2} \cdot с^{-1}$	10^3–10^5
Максимальная область облучения, мм	∅29
Диаметр пучка на мишени, мм	∅73

В табл. 1 представлены основные параметры ионного пучка, выводимого на станцию СОЧИ. Система диагностики представлена следующими детекторами: ионизационным детектором на основе микроканальных пластин, системой для диагностики и контроля плотности потока ионов и флюенса гало-пучка в режиме реального времени (4 сцинтилляционных детектора),

детектором на базе быстрого сцинтилляционного детектора с оптическим съемом информации, детектором на базе цилиндра Фарадея, детектором на базе быстрого люминофорного детектора с оптическим съемом информации. Сигналы с детекторов диагностики пучка интегрированы в общую систему сбора данных[1,2]. Монтаж прикладной станции СОЧИ был завершен в октябре–ноябре 2021 г. В декабре 2021 г. на станции состоялся первый эксперимент с пучками ионов $^{12}C^{4+}$. Пучки ионов проведены через новый канал транспортировки пучка до прикладной станции, где они были зарегистрированы детекторами станции СОЧИ. В дальнейшем на станции СОЧИ были продолжены пусконаладочные работы.

Станция ИСКРА предназначена для исследований и испытаний изделий полупроводниковой микро- и наноэлектроники на стойкость к воздействию длиннопробежных тяжелых заряженных частиц. Оборудование для станции ИСКРА также разрабатывалось в рамках сотрудничества ОИЯИ с ИТЭФ при участии АО «ЭНПО СПЭЛС», НИЯУ МИФИ и ООО «ГироПром». Были тщательно проработаны предложения к характеристикам пучка ионов на входе в станцию с учетом особенностей проведения исследований и испытаний изделий полупроводниковой микро- и наноэлектроники на стойкость к воздействию тяжелых заряженных частиц высоких энергий. Характеристики пучка, выводимого на станцию ИСКРА, позволяют проводить исследования и испытания изделий полупроводниковой микро- и наноэлектроники в диапазоне изменений линейных потерь энергии (ЛПЭ) от 0,1 до 60 МэВ·см^2/мг. Длиннопробежные высокоэнергетичные ионные пучки позволят облучать микросхемы в режиме пика Брэгга, а также избежать процедуры декапсуляции микросхем перед облучением. Были разработаны детекторы системы диагностики и контроля характеристик пучка ионов при настройке параметров пучка и проведении аттестации, испытаний и экспериментальных исследований изделий полупроводниковой микро- и наноэлектроники на стойкость к воздействию длиннопробежных тяжелых заряженных частиц. При разработке и создании составных частей станции принимались во внимание действующие требования по стойкости к воздействию тяжелых заряженных частиц, особенности конструктивного исполнения современных изделий полупроводниковой микро- и наноэлектроники, их функциональное многообразие, возможности локального облучения отдельных изделий и ряд других.

Система диагностики станции ИСКРА представлена следующими детекторами: ионизационной камерой, ионизационной пропорциональной проволочной камерой, миниатюрной газонаполненной ионизационной камерой, сцинтилляционно-файберным детектором, полупроводниковым детектором, измерителем плотности потока частиц в режиме реального времени на основе 4 сцинтилляторов (или 4 полупроводниковых детекторов).

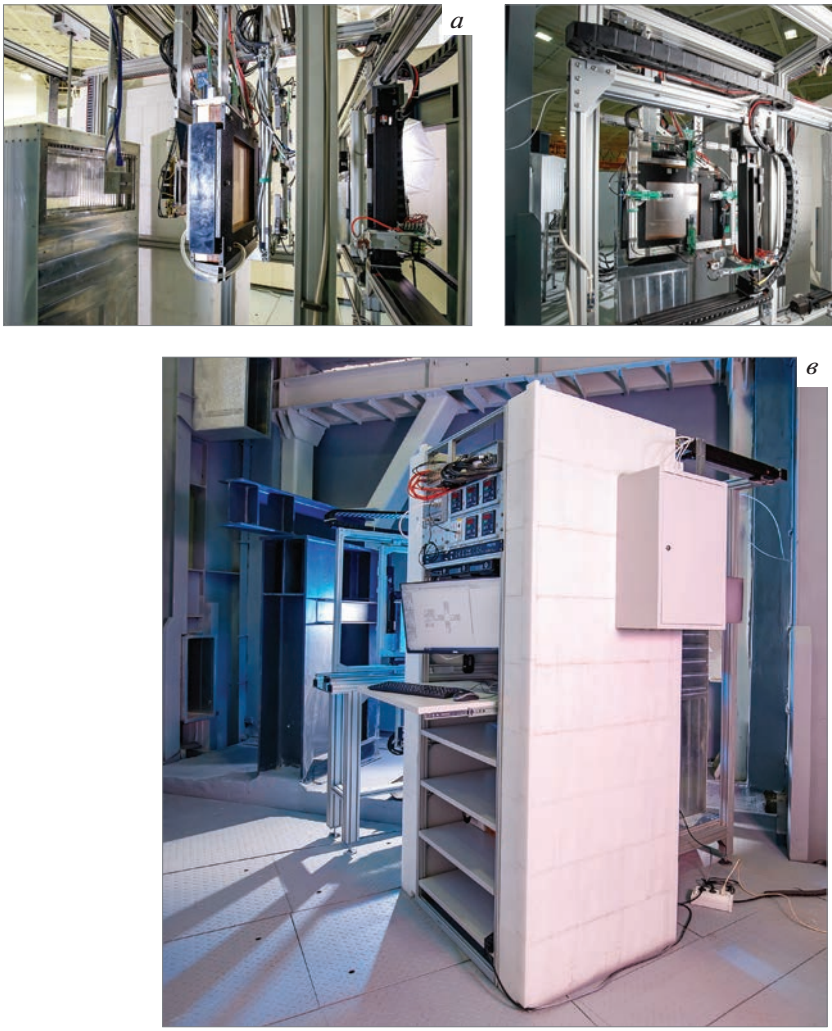
---

[1] *Сливин А. и др.* Сооружение станций для прикладных исследований на ускорительном комплексе NICA // Письма в ЭЧАЯ. 2022. Т. 19, № 5(244). С. 421–425.

[2] *Slivin A. et al.* Description of the Beam Diagnostics Systems for the SOCIT, SODIT and SODIB Applied Research Stations Based on the NICA Accelerator Complex // Proc. of the 12th Intern. Part. Accel. Conf. (IPAC'21). 2021. P. 946–948.

Таблица 2. Параметры ионного пучка на станции ИСКРА

Параметр	Значение
Типы ионов, энергия, МэВ/нуклон	$^{197}Au^{79+}$, 150–350 $^{131}Xe^{54+}$, 150–367 $^{12}C^{6+}$, 150–392
Энергия ионов на выходе из ЛУТИ, МэВ/нуклон	3,2
Плотность потока ионов, $см^{-2} \cdot с^{-1}$	10^3–10^5
Максимальная область облучения, мм	∅29
Диаметр пучка на мишени, мм	∅73



Система позиционирования (а) и ослабитель энергии (б) станции ИСКРА; общий вид станции (в)

Абсолютные измерения плотности потока ионов могут быть выполнены с использованием полимерных пленок толщиной 0,1 мм, установленных в заданных точках.

Станция СИМБО предназначена для проведения исследований в области наук о жизни с целью изучения биологического действия ионов в широком диапазоне ЛПЭ. В частности, одной из главных задач, предполагаемых к решению с применением созданной облучательной станции, является моделирование в наземных условиях воздействия тяжелых заряженных частиц галактических и солнечных космических лучей на организмы лабораторных

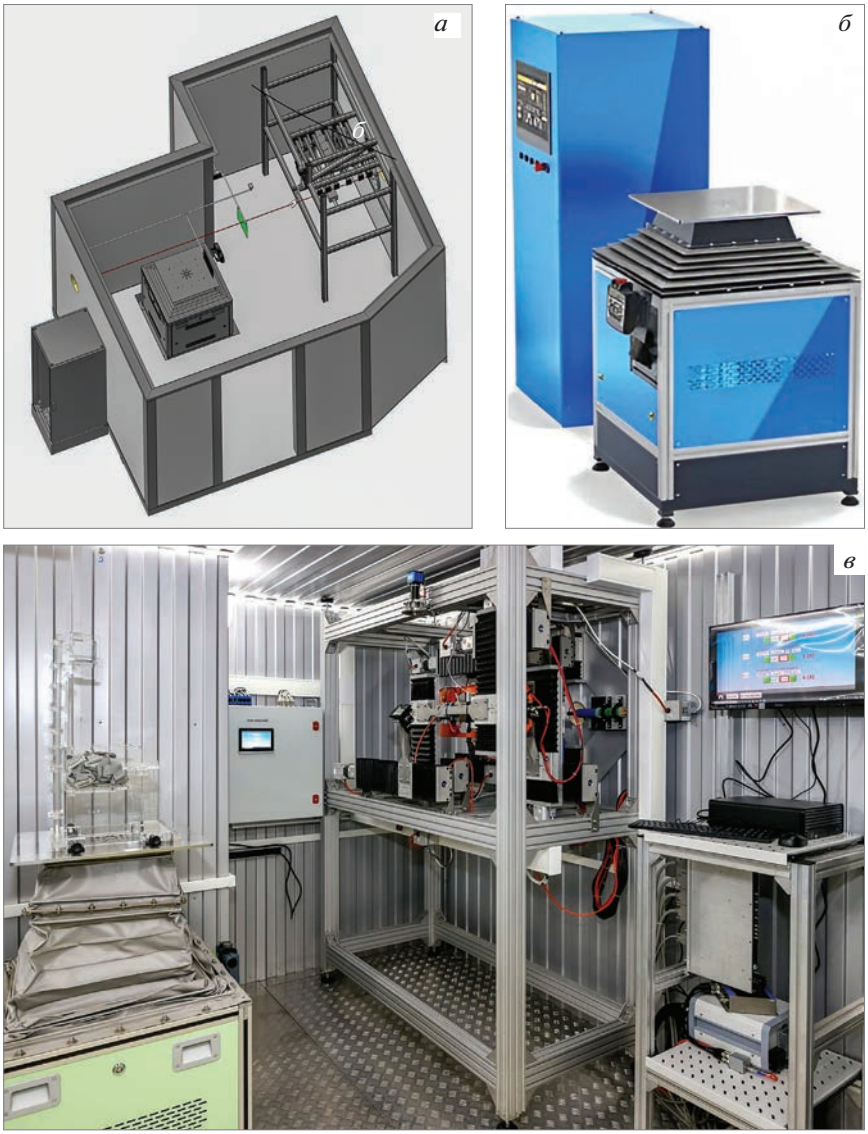


Рис. 1. 3D-модель станции СИМБО (а); устройство для позиционирования объектов, облучаемых на пучке ионов комплекса NICA (б); общий вид станции (в)

животных. Оснащение станции позволяет проводить работы по облучению различных биологических объектов, от клеточных культур до мелких лабораторных животных и приматов. Оборудование для станции СИМБО разрабатывалось в рамках сотрудничества ОИЯИ с ООО «ВСТ» при участии ООО «Предприятие Остек». Система диагностики представлена следующими детекторами: 4 ионизационными камерами, тонким сцинтилляционным детектором, алмазным детектором, системой на основе 4 сцинтилляционных детекторов для диагностики плотности потока частиц гало-пучка в режиме реального времени.

Таблица 3. Параметры ионного пучка на станции СИМБО

Параметр	Значение
Типы ионов	$^{12}C^{6+}$, $^{40}Ar^{18+}$, $^{56}Fe^{26+}$, $^{84}Kr^{36+}$
Энергия ионов на выходе из Нуклотрона, МэВ/нуклон	500–1000
Плотность потока ионов, $см^{-2} \cdot с^{-1}$	10^3–10^6
Доза облучения, Гр	1–3
Область облучения в режиме сканирования/ без сканирования, мм	$100 \times 100 / \varnothing 10$

Исследования воздействия тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ) на биологические объекты ведутся в последнее время с большой интенсивностью в связи с амбициозными программами длительных межпланетных полетов. Основными источниками радиационного воздействия на человека в космосе являются галактические космические лучи, радиационные пояса Земли и излучение Солнца. В период высокой активности Солнца поток протонов составляет 10^8–10^9 $см^{-2}$. Мощность дозы от галактических космических лучей достигает 1 мкГр/мин. Такие лучи состоят из протонов (85 %) с энергией до 10^{11} МэВ, альфа-частиц (12 %), тяжелых частиц (1 %) и электронов (2 %). Среди тяжелых частиц это атомы углерода, азота и кислорода (0,83 %), атомы лития, бериллия и брома (0,23 %), атомы железа (0,05 %). Тяжелая компонента галактических космических лучей состоит, в основном, из ядер с Z до 26. Околоземной радиационный пояс представлен протонами с энергией до 100 МэВ и электронами до 10 МэВ.

Дозы радиации на космической станции примерно на два порядка больше, чем нормы облучения человека в обычных условиях на Земле. За один год полета на МКС космонавт может получить дозу, превышающую пределы доз работника атомной промышленности (эффективная доза < 20 мЗв/год). За средний «выход» длительностью около 5 ч при невозмущенных условиях космонавт дополнительно получает 0,3–0,5 мЗв, что близко к среднесуточной дозе внутри станции. Также следует учесть высадки космонавтов на поверхность космических тел. Например, космическая радиация на поверхности Луны более жесткая, чем на Марсе. Радиационная нагрузка на

поверхности Марса составляет в среднем 0,7 мЗв/сут. Это сопоставимо со среднесуточной дозой на МКС 0,3–0,8 мЗв/сут. Обеспечить защиту организма от повреждающего действия космических лучей в космосе методами физической защиты в ближайшей перспективе не представляется возможным.

Для оценки последствий действия космических лучей на организм человека в земных условиях проводятся исследования воздействия различных видов радиации на живые организмы. В 1960–1970-е гг. специалистами разных институтов страны, и прежде всего Института медико-биологических проблем РАН, были проведены обширные эксперименты по облучению лабораторных животных, растительных объектов, клеток млекопитающих и человека протонами с энергиями от 25 до 645 МэВ, генерируемыми синхроциклотроном ОИЯИ (Дубна). В ОИЯИ на бактериальных клетках были изучены закономерности и механизмы индукции генных и структурных мутаций при действии излучений широкого диапазона линейной передачи энергии, обнаружена высокая мутагенная эффективность ускоренных заряженных частиц. Облучение клеток млекопитающих тяжелыми ионами также выявило их высокое мутагенное действие. Сравнительно недавно проводились исследования морфологических и функциональных повреждений в сетчатке глаза экспериментальных животных, нарушений уровня нейротрансмиттеров в различных отделах мозга при облучении тяжелыми заряженными частицами, нарушений поведенческих реакций.

Для прогнозирования влияния космического излучения на зрительную систему проводились эксперименты на мышах. В экспериментах производилось облучение ускоренными ионами ^{15}N с величинами линейной передачи энергии 71 и 160 кэВ/мкм *in vitro* и гамма-квантами ^{60}Co в течение нескольких часов. Также производилось облучение гамма-квантами особей разного возраста *in vivo* в течение нескольких недель. На основании проведенных экспериментов делались выводы о характере и степени повреждения ДНК.

Интересный результат воздействия ионизирующего излучения на ЦНС был получен в 2019 г. группой российских ученых. Грызунов подвергли комбинированному воздействию тяжелых заряженных частиц и гамма-лучей, эквивалентному по составу и дозам 860-дневной межпланетной миссии. Оказалось, что ионизирующее излучение вызывает глубокое ремоделирование нервной ткани, однако функционально это сказывается положительно на ЦНС. А в опытах американцев, которые облучали крыс ионами железа-56 в течение нескольких секунд, выяснилось, что при самых ничтожных дозах у крыс полностью нарушается пространственная ориентация. С целью исследования действия ионизирующего излучения на ЦНС человека проводились эксперименты на более близких к нему организмах — приматах. В ОИЯИ обезьян облучали протонами высоких энергий и ионами углерода. Наблюдались как положительные, так и отрицательные эффекты. Однако при облучении тяжелыми ионами у обезьян выявлено достоверное снижение когнитивных функций. Это очень серьезный результат, который может ставить под сомнение возможность далеких миссий. Проводились работы

по облучению мозга приматов и крыс на выведенном из Нуклотрона пучке ядер ^{78}Kr с энергией 2,58 ГэВ/нуклон. Эксперименты проводились с целью моделирования воздействия тяжелых ядер галактического космического излучения на когнитивные функции мозга космонавтов.

В настоящее время исследования в данной области проводятся или планируются к проведению в таких крупных российских научных центрах, как ОИЯИ (Дубна), ГНЦ РФ – Институт медико-биологических проблем РАН (Москва), НИЦ «Курчатовский институт» (Москва) и др.

Станция СИМБО совместима с инфраструктурой прикладных каналов в измерительном павильоне корпуса 1 ЛФВЭ и включает в себя следующие основные компоненты: зону расположения экспериментаторов во время сеансов облучения и климатическую камеру для облучаемых биологических образцов. Непосредственными частями установки СИМБО являются канал транспортировки и формирования пучка ионов в станцию и кресло-позиционер для размещения облучаемых объектов.

Проектирование и создание каналов транспортировки ионных пучков для прикладных исследований и облучательных станций СОЧИ, ИСКРА, СИМБО осуществлялось коллективом под руководством Е. М. Сыресина при активном участии А. А. Сливина, А. В. Агапова, А. А. Балдина, Г. А. Филатова, К. Шипулина, А. В. Тузикова, Т. В. Кулевого, Ю. Титаренко, Д. Бобровского, А. Чумакова, С. Соловьева, Г. Н. Тимошенко, А. Кубанкина, И. Глебова, П. Черных, В. Лузанова.

15 февраля 2024 г. состоялось торжественное открытие двух станций для прикладных исследований на NICA: СИМБО и ИСКРА. В нем участвовали члены Ученого совета ОИЯИ, совершившие визит в ЛФВЭ и осмотревшие строящийся ускорительный комплекс NICA.

К концу 2025 г. в активную фазу вошли работы по созданию станции СИЯЭТ, представляющей собой установку по облучению релятивистскими пучками протонов и легких ионов с энергией 0,3–4,5 ГэВ/нуклон тяжелых мишеней на канале медленного вывода пучков Нуклотрона. Командой под руководством А. А. Балдина достигнут существенный прогресс в части монтажных работ по помещению зоны СИЯЭТ, разработке проектной документации и оборудования для работы с пучком. Планируемые на станции исследования являются логическим продолжением работ, проводимых в ЛФВЭ на протяжении 30–40 лет.

В 2024–2025 гг. коллективом Отделения научно-методических исследований и инноваций ЛФВЭ под руководством О. В. Белова была создана и введена в действие станция длительного облучения (СДО) в зоне установки BM@N. В этих работах активное участие приняли А. В. Агапов, В. А. Артюх, И. А. Крячко, Г. В. Мицын, В. Н. Шаляпин.

СДО позволяет использовать остаточный пучок ионов на участке между передним адронным калориметром FHCal и ловушкой для выполнения прикладных исследований[3] и значимо повысить эффективность использования пучков комплекса NICA, существенно увеличивая количество пуч-

[3] *Белов О. В.* Стенд длительного облучения // Новости ОИЯИ. 2024. № 2. С. 21–23.

Торжественное открытие станций СИМБО и ИСКРА для прикладных исследований на комплексе NICA, состоявшееся в рамках 135-й сессии Ученого совета ОИЯИ 15 февраля 2024 г.

кового времени для научной программы ARIADNA. Станция позволяет реализовать уникальный режим длительного облучения образцов пучками ионов высоких энергий в диапазоне 1–4 ГэВ/нуклон продолжительностью

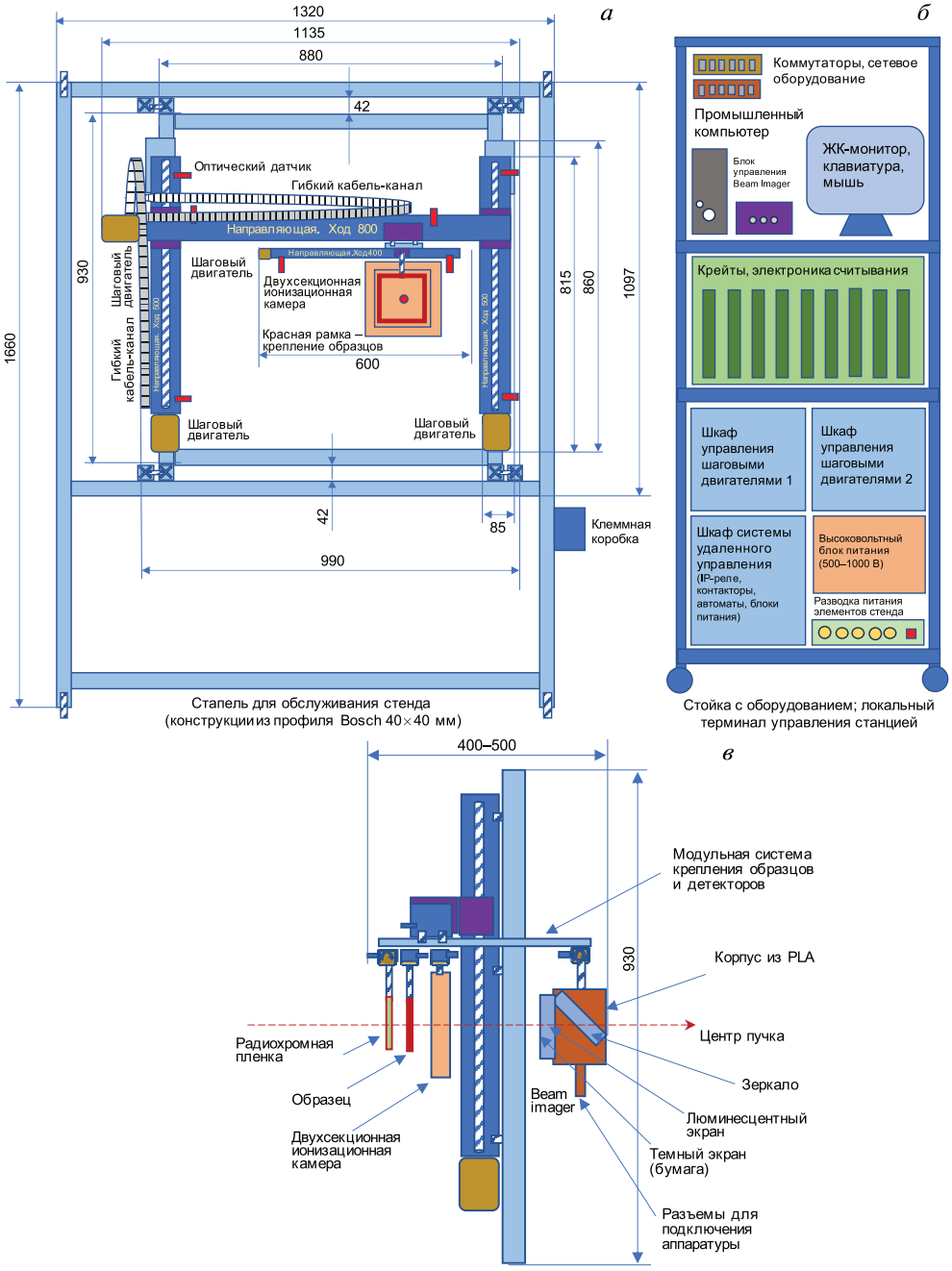


Рис. 2. Конфигурация станции длительного облучения ARIADNA (рабочее название — Station for Long-Term Exposure — SLTE)

до нескольких месяцев, который был ранее апробирован на прототипе облучательного стенда в рамках настроечного сеанса в декабре 2022 г. – январе 2023 г.

В имеющейся конфигурации станция длительного облучения ARIADNA включает следующие элементы (рис. 2–4): *1*) электромеханическую часть, представленную системами линейного перемещения образцов и детекторов, двумя шкафами управления с контроллерами шаговых двигателей, сетевым интерфейсом и блоками питания; *2*) систему держателей для детекторов и образцов, построенную по модульному принципу и обеспечивающую возможность дополнения детекторной системы станции новыми элементами; *3*) локальный терминал управления на основе промышленного компьютера; *4*) блок удаленного управления элементами станции на основе многоконтактного IP-реле; *5*) систему видеоконтроля положения образцов и детекторов, состоящую из 4 видеокамер, двух лазерных модулей и системы локального освещения; *6*) систему оптического контроля положения пучка (Beam Imager) на основе люминесцентного экрана с координатным полем и выводом оптического сигнала по оптоволоконному тракту фиброскопа на высокочувствительную видеокамеру; *7*) двухсекционную ионизационную камеру; *8*) высоковольтный блок питания, электронику считывания и преобразования сигнала с двухсекционной ионизационной камеры; *9*) сетевое оборудование для коммутации элементов станции в единую подсеть; *10*) рабочее место оператора станции в комнате управления, созданное на основе двух компьютеров, пяти мониторов и периферийного компьютерного оборудования; *11*) оснастку для установки и крепления стенда на место эксплуатации в составе подъемного устройства (лебедки),

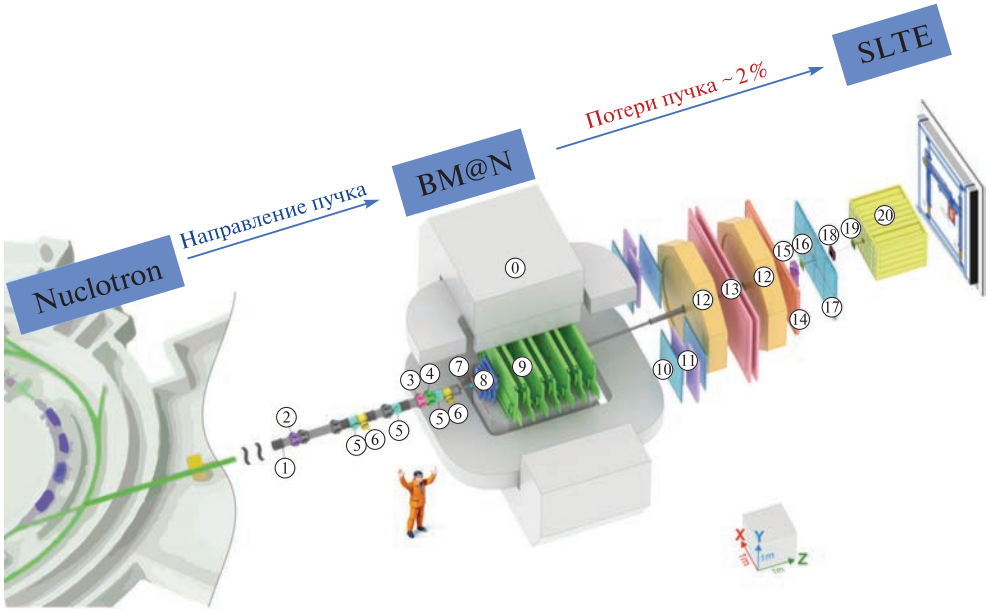


Рис. 3. Расположение станции SLTE в зоне установки BM@N

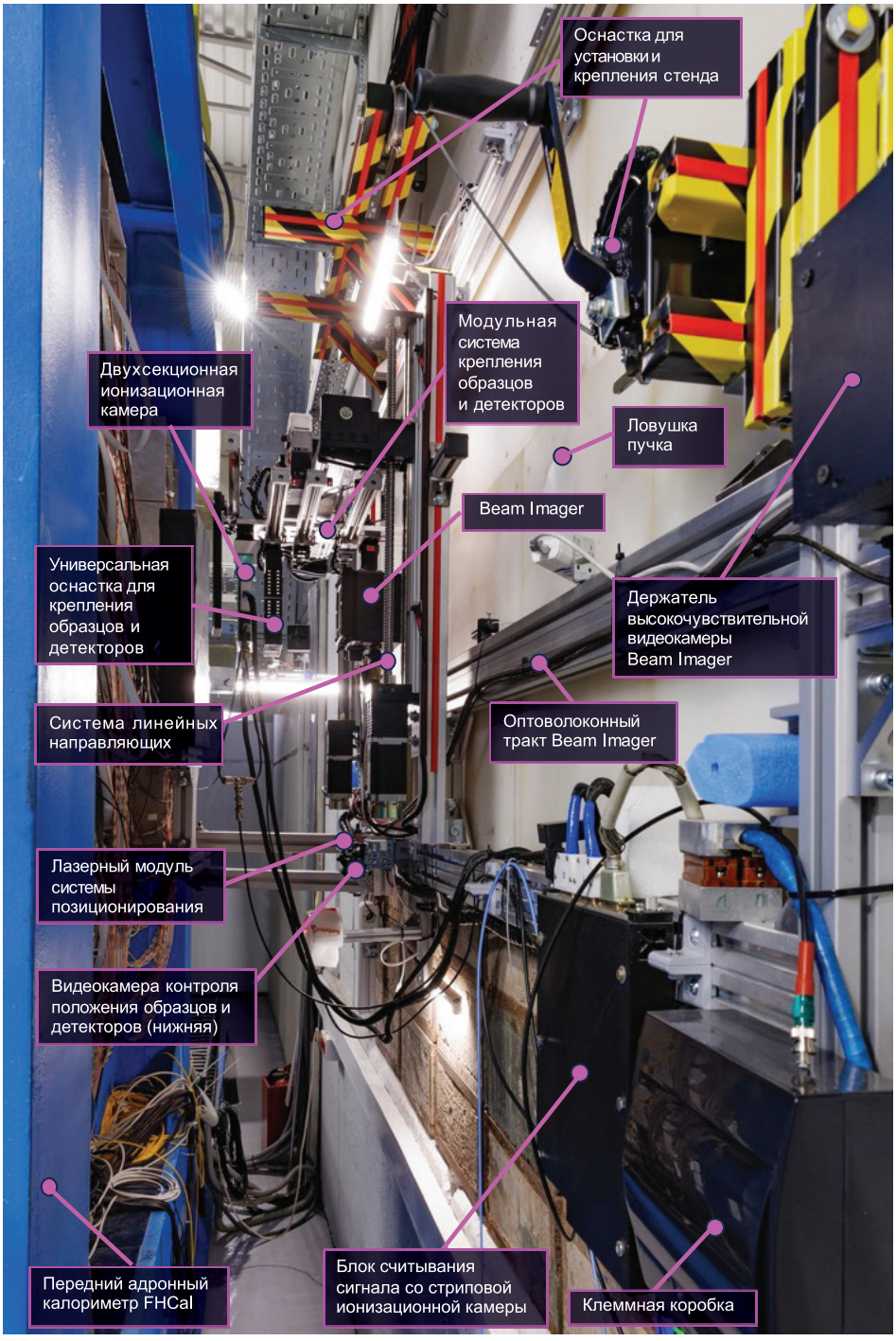


Рис. 4. Конфигурация подвесной системы станции длительного облучения ARIADNA в зоне установки BM@N на участке прохождения пучка между передним адронным калориметром FHCal и ловушкой

кронштейна с блоковыми механизмами и фиксаторов положения стенда; *12*) стапель для обслуживания и перемещения элементов станции.

Конструкция СДО выполнена с учетом требований к компактности размещения установки в отведенном для нее пространстве между передним адронным калориметром FHCal и ловушкой. Для снижения массы подвесных конструкций при создании элементов станции широко применялись аддитивные технологии (3D-печать) с использованием филамента из полилактида (PLA) и полиэтилентерефталата (PETG).

В период с сентября по ноябрь 2025 г. было проведено 38 испытательных циклов всей аппаратуры и устройств станции, определены штатные и граничные режимы работы основных подсистем установки. 17 января 2026 г. в рамках сеанса на комплексе NICA состоялся физический пуск станции СДО и проведены первые измерения параметров выведенного на станцию пучка ионов ксенона с энергией 1,7 ГэВ/нуклон.

Принципиальная возможность использования остаточного пучка в режиме параллельной работы с установкой BM@N была продемонстрирована ранее в 4-м настроечном сеансе работы комплекса NICA с ускорением ионов ксенона и выводом пучка с энергией до 3,8 ГэВ/нуклон. Пучок в зоне расположения мишени имел форму эллипса с осями 3,42 и 2,93 см; площадь облучения составляла 7,87 см^2 с наиболее равномерным полем в центральной части на площади 1,08 см^2, также имевшим форму эллипса с осями 1,2 и 0,9 см (рис. 5). Параметры остаточного пучка регистрировались с использованием детектора OCTAVIUS 1500XDR PTW, применяемого в клиниках для точного планирования облучения в ходе сеансов радиотерапии, а также калибровочной ионизационной камеры TM30010-1 и планшета с радиохромной пленкой EBT-3.

В части соответствия выполненной работы передовому уровню знаний в данном направлении следует отметить, что в масштабах крупных научных центров, таких как ЦЕРН, GSI-FAIR, BNL, GANIL и др., доступность длительных режимов облучения ионами высоких энергий для выполнения прикладных исследований невысока по сравнению с другими источниками

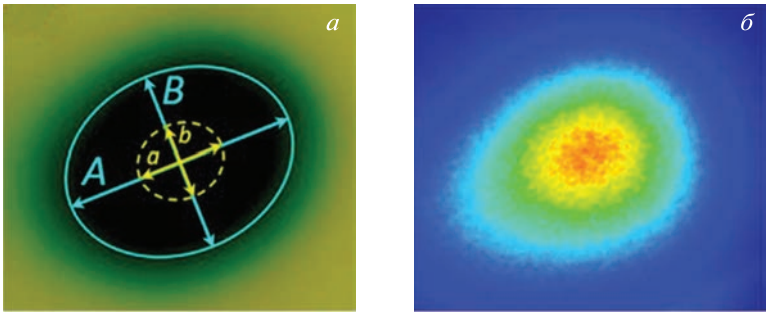


Рис. 5. а) След пучка $^{124}Xe^{54+}$ с энергией 3,8 ГэВ/нуклон на радиохромной пленке; б) профиль пучка на детекторе OCTAVIUS 1500XDR. Геометрические параметры области облучения: A = 3,42 см, B = 2,93 см; наиболее равномерная область: a = 1,2 см, b = 0,9 см

ионизирующих излучений, прежде всего ввиду высокой стоимости времени работы ускорительных комплексов. В связи с этим особую значимость приобретают разнообразные способы обеспечения работы станций для прикладных исследований в параллельном режиме с физическими установками, предназначенными для решения фундаментальных задач. Таким образом, создание на комплексе NICA станции длительного облучения пучками ионов высоких энергий, функционирующей в режиме параллельной работы с установкой BM@N, следует отнести к результатам, сравнимым с достижениями ведущих ускорительных центров, предоставляющих возможности для работы на пучках ионов высоких энергий.

Создание станции длительного облучения ARIADNA стало одним из ключевых элементов программы намеченных исследований в рамках темы ОИЯИ «Прикладные исследования на комплексе NICA для задач радиационного материаловедения, наук о жизни и новых методов генерации энергии». Режимы длительного облучения имеют особое значение для решаемых в рамках темы задач радиационной обработки материалов, позволяя набирать существенные дозовые нагрузки и исследовать их радиационную стойкость, а также осуществлять целенаправленную модификацию ионизирующим излучением для получения материала с заданными свойствами.

В части изучения воздействия ионизирующих излучений на живые системы длительное облучение представляет большой интерес в связи с изучением радиобиологических эффектов на основе суперпозиции процессов индукции и восстановления биологически значимых повреждений. Такие режимы облучения, в особенности при использовании ионных пучков относительно низкой интенсивности или пучков, доставляемых во фракционированном режиме, позволяют приблизиться к реальным радиационным условиям дальних космических полетов, подразумевающим продолжительное воздействие ионов в составе галактических космических лучей на биологические объекты.

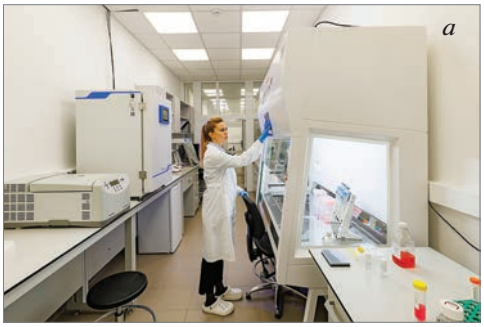
Практическую значимость для задач космической отрасли длительное облучение ионами высоких энергий также имеет при исследовании надежности микроэлектроники, применяемой на космических аппаратах. Режимы продолжительного облучения позволяют решать задачи радиационной стойкости глубокосубмикронных сверхбольших интегральных схем (СБИС) как по критерию накопленной дозы ионизирующего излучения, так и по критерию одиночных сбоев, обусловленных попаданием отдельных частиц, присутствующих в составе галактических космических лучей. При этом значительная проникающая способность ускоренных ионов высоких энергий позволяет решить проблему повышающейся год от года интеграции современных микросхем, часто препятствующей корректному декапсулированию чипа и тестированию радиационной стойкости с использованием ионных пучков низких энергий. Технологии длительного облучения ионами высоких энергий позволяют не только выборочно исследовать ограниченное количество микросхем из произведенной партии, утрачивая их при тестировании, но и осуществлять потоковый неразрушающий контроль на-

дежности изделий, получающих впоследствии сертификат радиационной стойкости.

Работы по созданию станции длительного облучения ARIADNA существенно расширили возможности инфраструктуры комплекса NICA для выполнения прикладных исследований на пучках тяжелых ионов высоких энергий, предоставив пользователям уникальные возможности по продолжительному экспонированию образцов на пучках тяжелых ионов высоких энергий (до 4 ГэВ/нуклон), а также увеличив общее количество пучкового времени, доступного для решения прикладных задач за счет режима параллельной работы с установкой BM@N. Возможности созданной станции вызвали большой интерес у представителей многих научных центров государств-членов ОИЯИ и партнерских организаций других стран, проводящих прикладные исследования с использованием источников ионизирующих излучений. Данная облучательная станция будет являться одним из базовых инфраструктурных элементов, обеспечивающих выполнение научной программы ARIADNA в последующие годы.

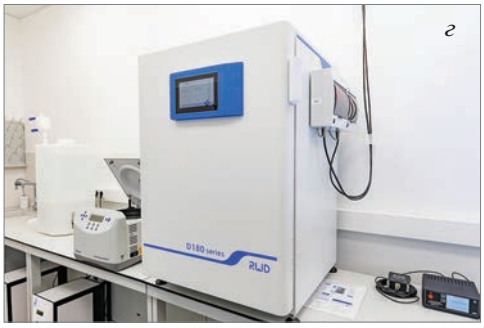
В 2025 г. под руководством О. В. Белова при активном участии К. П. Афанасьевой, В. Джавадовой, С. Ю. Анисимова и М. Ю. Мешенкова было завершено создание и оснащение первой очереди вспомогательной пользовательской инфраструктуры ARIADNA, представляющей собой участок пробоподготовки в помещении № 203 корпуса № 205 ЛФВЭ. Участок представляет собой лабораторное помещение площадью 37,7 м^2, разделенное на зоны для проведения работ с образцами материалов и биологическими объектами, а также размещения собственного оборудования пользователей. Зоны оснащены преимущественно общелабораторным оборудованием для подготовки и экспресс-анализа проб, устройствами для хранения образцов, инфраструктурой для 3D-печати. Помещение было оборудовано приточно-вытяжной вентиляцией, электропитанием для подключения нагрузки общей мощностью до 10 кВт, слаботочными сетями, зонированным освещением, устройствами для работы с газами (CO_2 с возможностью расширения для инертных газов), системой подготовки воды аналитического качества, бактерицидными лампами и системами удаленного контроля технологических процессов.

В текущей конфигурации участок пробоподготовки обеспечивает наиболее востребованные возможности для приготовления образцов в непосредственной близости от мест расположения облучательных станций для прикладных исследований, исключая необходимость транспортировки образцов между зданиями. Так, имеющееся на участке оборудование позволяет проводить работы с твердыми и порошкообразными образцами материалов, нетоксичными негорючими химическими реагентами, жидкими средами, биологическими объектами в виде культур клеток и тканей. На участке имеется возможность проведения работ в стерильных условиях. Для пользователей из организаций-участниц коллаборации ARIADNA организована структурированная система хранения образцов, выделено место на введенном в действие сетевом хранилище. Оборудовано два рабочих места

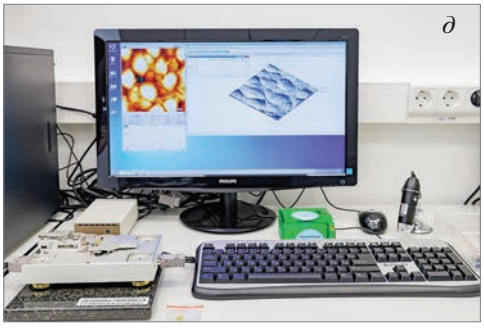

а

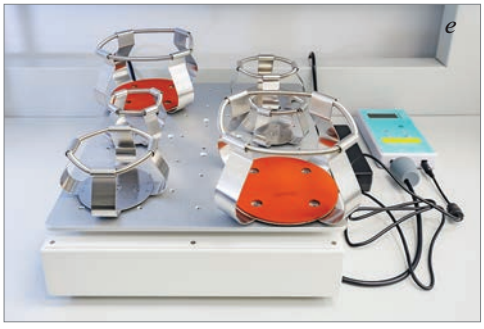
б

в



г


д


е

ж

з

Оборудование участка пробоподготовки ARIADNA: а), б) общий вид секций помещения; в) система низкотемпературного хранения образцов; г) CO_2-термостат; д) сканирующий зондовый микроскоп СММ-2000; е) шейкер; ж) паровой стерилизатор; з) ультрацентрифуга с охлаждением; и) 3D-принтер широкой апертуры; к) вытяжной шкаф; л) муфельная печь; м) система хранения и подачи газа CO_2 с резервированием, датчиками контроля давления и содержания CO_2 в воздухе

общего назначения с компьютерами и принтером (места для временного пребывания).

Участок пробоподготовки ARIADNA будет использоваться при реализации работ практически по всем направлениям проведения прикладных исследований на комплексе NICA. Так, к концу 2025 г. были успешно протестированы возможности подготовки биологических образцов в виде культур клеток, зарядки кассет с образцами в фиксирующие устройства облучательных станций, а также методы подготовки порошкообразных образцов к облучению. В 2025 г. на участке пробоподготовки осуществлялось низкотемпературное (–40 и –86 °C) хранение ряда образцов эксперимента БИОН-2М, в котором активно участвуют несколько научных групп коллаборации ARIADNA.

В 2025 г. на участке пробоподготовки ARIADNA введен в эксплуатацию сканирующий зондовый микроскоп СММ-2000, предназначенный для измерений геометрических и физических параметров топографии поверхности образцов материалов. Проведена апробация базовых методик измерений на примере поверхностей ВТСП-лент и ряда других объектов. Микроскоп позволяет проводить измерения в следующих диапазонах: нижняя и верхняя границы латеральных измерений — от 0,0003 до 20 мкм, нижняя и верхняя границы измерения высоких размеров — от 0,0002 до 2 мкм. Поле кадров: $15 \times 15 \times 2{,}5$ и $2{,}5 \times 2{,}5 \times 0{,}5$ мкм. Мультирежимный микроскоп СММ-2000 имеет три базовых режима: STM (сканирующая туннельная микроскопия), AFM (атомно-силовая микроскопия) и VAFM (вибрационная атомно-силовая микроскопия).

Оборудование для 3D-печати, имеющееся на участке пробоподготовки, активно использовалось для создания конструкционных элементов станции длительного облучения ARIADNA в зоне установки BM@N, а также изготовления держателей и фиксаторов образцов различной конфигурации, совместимых с имеющимися на комплексе NICA облучательными станциями для прикладных исследований.

Мировой опыт организации участков пробоподготовки и аналитических исследований в непосредственной близости от облучательных установок свидетельствует о высокой эффективности такого подхода как в части соблюдения лабораторных стандартов работы с образцами разных видов, так и в части выполнения уникальных исследований, связанных с быстрым анализом проб после облучения (до нескольких минут после воздействия). Аналогичный опыт организации подобного участка имеется в BNL (комплекс лабораторий NSRL на выводе пучка из бустера AGS), а также в GSI-FAIR, где аналитические лаборатории располагаются на незначительном удалении от мест облучения и предусмотрены пути транспортировки образцов без выхода из помещений на улицу. Таким образом, организацию подобного участка при комплексе NICA следует отнести к значимым мерам повышения стандартов выполнения прикладных радиационных исследований, соответствующим мировому опыту в этой области.

Востребованность такого участка в непосредственной близости от облучательных станций для прикладных исследований определялась большим

количеством запросов участников коллаборации ARIADNA, планирующих посещать ОИЯИ для выполнения экспериментов на комплексе NICA. Созданный участок в своих масштабах покрывает первостепенные потребности участников первых сеансов при сохраняющейся необходимости его дальнейшего развития с увеличением числа участников экспериментов.

К инфраструктуре для прикладных исследований комплекса NICA организован доступ широкого круга ученых и специалистов. Для этих целей меморандумом международного круглого стола «Прикладные исследования и инновации на комплексе NICA», состоявшегося в Дубне 15–16 сентября 2021 г., была закреплена инициатива о создании международной коллаборации ARIADNA по направлениям работ, соответствующим назначению созданных экспериментальных зон. Одной из главных задач коллаборации является выработка научной программы исследований с использованием пучков ускоренных заряженных частиц комплекса NICA. В число направлений работ, планируемых к реализации на каналах ARIADNA, войдут задачи обеспечения радиационной безопасности длительных пилотируемых космических полетов, исследования, относящиеся к вопросам лучевой терапии онкологических заболеваний, задачи радиационной биофизики, общей радиобиологии, изучения механизмов радиационных повреждений в микроэлектронике, вопросы радиационного материаловедения и создания фундаментальных основ для развития новых технологий утилизации радиоактивных отходов.

В целях реализации предложенной инициативы руководством проекта NICA был организован процесс согласования уставных документов коллаборации ARIADNA с партнерскими организациями, желающими войти в ее состав. Процесс создания коллаборации включал последовательное подписание каждой заинтересованной организацией письма о намерениях (Letter of Intent) и меморандума о взаимопонимании (Memorandum of Understanding — MoU), подразумевающего согласие каждой стороны с уставом коллаборации (Bylaws of the Collaboration). При формировании уставных документов новой коллаборации активно использовался опыт успешного создания коллабораций BM@N, MPD и SPD по экспериментам на NICA в области фундаментальной физики.

В 2022 г. были сформированы руководящие органы коллаборации и главные направления работ. Общее руководство коллаборацией было возложено на О. В. Белова. Существенный вклад в налаживание и укрепление связей с организациями, вошедшими в состав коллаборации, внес С. И. Тютюнников, а также ответственные за ключевые направления сотрудничества М. С. Новиков и М. Параипан.

К концу 2025 г. членами коллаборации ARIADNA стали 30 организаций, включая академические институты, университеты и научно-производственные компании семи стран-участниц ОИЯИ. В преддверии регулярных экспериментов прорабатывается соответствующая политика пользователей комплекса NICA, включающая правила использования оборудования, вопросы биоэтики, доступа к каналам транспортировки пучков и сопутствующей пользовательской инфраструктуре. Запущены программы финан-

Совещание коллаборации ARIADNA. Дубна, 31 мая 2024 г.

Рабочее совещание «Прикладные исследования на комплексе NICA: перспективы сотрудничества РСО – Алания – ОИЯИ». Владикавказ, 17–19 июня 2023 г.

совой поддержки работ для участвующих в коллаборации ARIADNA организаций. Проводятся совещания коллаборации ARIADNA, семинары и встречи по актуальным направлениям совместных работ сотрудничающих организаций. Важным аспектом выстраивания сотрудничества по прикладным исследованиям на комплексе NICA стало совмещение аналитической

инфраструктуры крупных профильных институтов с возможностями для облучения образцов в Дубне.

Статус создания инфраструктуры для прикладных исследований и информация о коллаборации ARIADNA регулярно докладывались на различных крупных международных конференциях, семинарах и иных научных мероприятиях. Среди них конференция IUPAP «Heaviest nuclei and atoms» (Ереван, 25–30 апреля 2023 г.), заседание Президиума НАН Республики Беларусь (Минск, 13 ноября 2024 г.), Дни ОИЯИ в Узбекистане (Ташкент, 21–25 апреля 2025 г.), конференция «Ядро-2025. Ядерная физика, физика элементарных частиц и ядерные технологии» (Санкт-Петербург, 1–6 июля 2025 г.), Совет РАН по физике тяжелых ионов (Санкт-Петербург, 27 июня – 2 июля 2025 г.).

НАПРАВЛЕНИЯ ПРИКЛАДНЫХ РАБОТ В ЛЯП

ЛИНАК: НОВЫЙ УСКОРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ И ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

13 февраля 2025 г. в Объединенном институте ядерных исследований (ОИЯИ) состоялось торжественное открытие и успешный тестовый запуск первой очереди линейного ускорителя ЛИНАК — установки для проведения НИОКР в области детекторов элементарных частиц, научно-методиче-

Торжественное открытие установки ЛИНАК дирекцией и членами Ученого совета ОИЯИ 13 февраля 2025 г.

В пультовой ЛИНАК. Слева направо: В. В. Глаголев, В. В. Кобец, С. Д. Надгериева, М. Э. Акоста, А. Е. Бруква, Д. С. Шокин, А. А. Уланкин, Д. Л. Демин

ских работ по поиску новых методов и созданию аппаратуры для диагностики электронного пучка, прикладных работ в области радиационного материаловедения, радиобиологии и радиохимии, проведения экспериментов в области ядерной физики, а также для образовательных проектов.

В финальной конфигурации установка ЛИНАК будет иметь шесть специализированных экспериментальных каналов, позволяющих проводить широкий спектр исследований. Ключевой особенностью ЛИНАК является возможность тонкой настройки параметров пучка, обеспечивающая получение потоков электронов в диапазоне от 10^{13} электронов до единичных частиц, что важно для тестирования и калибровки различных типов детекторов частиц.

Конструкция и параметры первой очереди

Первый этап ввода в эксплуатацию ускорителя обеспечит работу на энергии электронов до 200 МэВ. Структура установки включает инжектор и четыре ускорительные станции, оборудованные поворотными магнитами и экспериментальными каналами для работы с энергиями 24, 60, 133 и 200 МэВ. В дальнейшем планируется расширение ускорительного комплекса: запуск второй очереди с энергией 400 МэВ и третьей — 800 МэВ.

История ускорителя: от NIKHEF до ОИЯИ

Первоначально ускоритель использовался в качестве инжектора накопительного кольца для экспериментов с синхротронным излучением в Национальном институте субатомной физики NIKHEF (Нидерланды). Однако в конце 1990-х гг. в Нидерландах было принято решение о переводе ускорительных исследований в ЦЕРН, вследствие чего установка была выведена из эксплуатации. По договоренности между NIKHEF и ОИЯИ в 2000 г. ускоритель был демонтирован и перевезен в Дубну. После транспортировки началась его сборка и масштабная модернизация, включавшая замену электронных и инженерных систем, обновление компонентов управления модуляторами клистронов, а также капитальный ремонт здания и его инженерной инфраструктуры.

Начало сборки ЛИНАК в 118-м корпусе ЛЯП ОИЯИ. Слева направо: Г. В. Трубников, И. Н. Мешков, В. Ф. Минашкин

Научный потенциал и сотрудничество

ЛИНАК представляет собой платформу для исследований в области ядерной спектроскопии, радиобиологических процессов, материаловедения и радиохимии. Проект осуществляется в ЛЯП в сотрудничестве с лабораториями ОИЯИ и странами-участницами. В экспериментах на ЛИНАК планируют принять участие исследовательские коллективы из ЛФВЭ, ЛРБ, ЛЯР, ЛНФ. Создан организационно-программный комитет, который будет рассматривать заявки пользователей.

Уже сейчас разрабатывается пользовательская программа исследований на ускорителе, которая будет в первую очередь ориентирована на запросы лабораторий Объединенного института и исследовательских коллективов

из стран-участниц ОИЯИ. Выведенные пучки ЛИНАК-200 будут использоваться для тестирования прототипов электромагнитных калориметров и координатных детекторов для экспериментов MPD и SPD на коллайдере NICA, прикладных работ в области радиационного материаловедения, радиобиологии и радиохимии, проведения экспериментов в области ядерной физики, а также для организации практик студентов и специалистов из стран-участниц по линии Учебно-научного центра ОИЯИ. Специалисты из Вьетнама планируют реализовать научную программу по изучению фотоядерных реакций на каналах вывода пучка 133 и 207 МэВ.

Вокруг ЛИНАК уже сформирована международная коллаборация FLAP (Fundamental & Applied Linear Accelerator Physics collaboration), включающая 19 научных центров из 7 стран, ориентированная на изучение взаимодействий ускоренных электронов с веществом и внешними полями, а также на разработку новых экспериментальных методик.

Пусконаладочные работы на первой очереди ускорителя должны завершиться в 2026 г., а также планируется получение разрешения ФМБА России на его эксплуатацию.

Развитие ускорительного комплекса ЛИНАК обеспечит новые возможности для проведения фундаментальных исследований и тестирования экспериментальных методик в области ядерной физики, материаловедения и биомедицинских технологий.

ЛАЗЕРНАЯ МЕТРОЛОГИЯ: ОТ ФИЗИКИ ЧАСТИЦ ДО МОНИТОРИНГА СЕЙСМИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

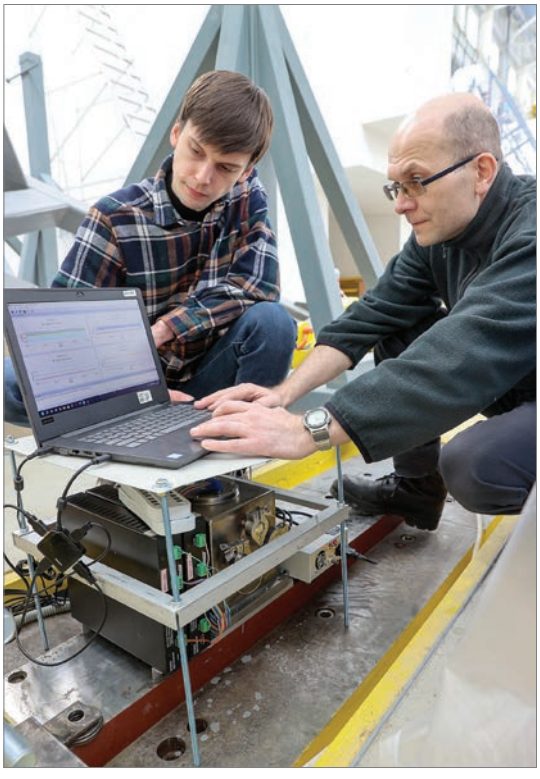
Современные лазерные технологии позволяют проводить прецизионные измерения, необходимые в самых разных областях науки. Именно так в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ зародилось направление лазерной метрологии, разработанное для юстировки модулей барреля адронного калориметра установки ATLAS в ЦЕРН.

При создании адронного калориметра ATLAS ученые ЛЯП разработали методики, позволившие контролировать положения 64 «клиньев» барреля центральной части адронного калориметра с точностью 300 мкм, что в дальнейшем обеспечило их успешную сборку в баррель адронного калориметра. Позже эти лазерные технологии нашли совершенно новое применение — мониторинг микросейсмических колебаний в районе Большого адронного коллайдера (LHC). В частности, созданные в ЛЯП инклинометры установлены в шахтах физических установок CMS и ALICE[4].

Светимость коллайдера — ключевой параметр, определяющий его эффективность, — зависит от точности сведения пучков частиц в месте соударения. Даже минимальные смещения элементов ускорителя, вызванные

[4] *Azaryan N. et al.* The Seismic Angular Noise of an Industrial Origin Measured by the Precision Laser Inclinometer in the LHC Location Area // Phys. Part. Nucl., Lett. 2019. V. 16, No. 4. P. 332.

Создатели лазерного инклинометра М. В. Ляблин и Ю. А. Будагов на измерениях в транспортном тоннеле №1 LHC (ЦЕРН)



Сотрудники сектора лазерной метрологии ОНИРИ ЛЯП К. Д. Поляков и А. М. Кузькин настраивают лазерный инклинометр в зале MPD NICA

А. В. Красноперов и Р. В. Ни устанавливают инклинометр в Камчатском филиале ФИЦ ЕГС РАН

сейсмическими или индустриальными воздействиями, могут снизить светимость и повлиять на результаты экспериментов.

Были обнаружены корреляции между светимостью LHC и сейсмическими шумами, зарегистрированными лазерным инклинометром ЛЯП, расположенным в транспортном тоннеле LHC.

Лазерные инклинометры применяются и на «домашнем» коллайдере ОИЯИ — NICA. Проводится мониторирование основания зала MPD и оснований под элементами коллайдера перед выводом пучков в зону столкновения эксперимента MPD.

Технология высокоточных угловых измерений (инструментальная точность — единицы нанорадиан) с помощью инклинометра ЛЯП привлекла внимание ученых, работающих над проектом гравитационной антенны VIRGO. Два лазерных инклинометра установлены в районе подвесов зеркал антенны, и данные с них используются для подавления высокочастотных шумов.

Совершенствование технологии конструкции лазерного инклинометра привело к созданию малогабаритного прецизионного лазерного инклинометра (МПЛИ), который был защищен рядом патентов РФ[5].

[5] Устройство для измерения углов наклона поверхности / Будагов Ю. А., Ляблин М. В. Патент на изобретение RU 2 734 451. Опубл. 16.10.2020. Бюл. № 29.

Ученые ЛЯП совместно с коллегами-геофизиками из стран-участниц ОИЯИ предложили применить МПЛИ в геофизических наблюдениях, в которых важна точность измерений и способность инклинометра измерять весьма низкочастотные сигналы с периодами в часы и сутки, а в перспективе месяцы.

Сегодня установки МПЛИ работают в геофизических обсерваториях Армении, Беларуси и на Камчатке, передавая данные в Дубну для анализа и мониторинга.

Развитие лазерной метрологии, начавшееся с физики частиц, теперь открывает новые перспективы для геофизики, инженерных исследований и изучения динамических процессов земной коры. Современные лазерные технологии продолжают находить новое применение, расширяя возможности фундаментальных и прикладных наук.

Коллеги из Центра геофизического мониторинга НАН Беларуси предложили ОИЯИ открыть новую испытательно-измерительную геофизическую станцию для тестирования лазерных инклинометров, в частности, в области низких частот и проведения сравнительных измерений и анализа со «стандартными» геофизическими приборами.

ПРОТОННАЯ ТЕРАПИЯ

В 1986 г. завершилось сооружение многокабинного Медико-технического комплекса (МТК) на фазотроне ЛЯП ОИЯИ. В МТК были продолжены исследования по адронной терапии злокачественных образований. В 1987–1989 гг. были выполнены радиобиологические эксперименты на пучках протонов и нейтронов высоких энергий и начаты клинические исследования по облучению больных (совместно со Всесоюзным онкологическим научным центром АМН СССР) на протонных пучках с использованием разработанных методик формирования дозных полей, ротационно-сканирующего облучения глубоко залегающих опухолей. В тот же период было создано уникальное оборудование: полномасштабный позитронно-эмиссионный томограф, совмещенный с терапевтическим креслом рентгеновский компьютерный томограф для проведения топометрии пациента в положении сидя и протонный томограф, позволяющий получить топометрическую информацию в единицах пробега протонного пучка в тканях.

В период с 1986 по 1996 г. Медико-технический комплекс включал в себя:

— пять протонных каналов медицинского назначения для облучения опухолей различной локализации широкими и узкими протонными пучками в диапазоне энергии от 70 до 660 МэВ;

— медицинский пи-мезонный канал для лучевой терапии пучками отрицательных пи-мезонов с энергиями от 30 до 80 МэВ;

— канал нейтронов медицинского назначения (средняя энергия нейтронов в пучке около 350 МэВ) для облучения больших радиорезистентных опухолей;

— терапевтический гамма-аппарат РОКУС-М для использования в качестве резервного источника излучения, а также для проведения дистанционной гамма-терапии при сочетании методов облучения.

К началу 1987 г. была проведена наладка всех каналов транспортировки пучков и получены все необходимые физико-дозиметрические характеристики медицинских пучков.

Важный новый этап развития протонной терапии в ОИЯИ наступил в 1999 г., когда благодаря настойчивости и усилиям В. П. Джелепова было открыто специализированное радиологическое отделение на 25 коек в медико-санитарной части № 9 в Дубне, что позволило проводить сеансы протонной терапии на регулярной основе. Одновременно было принято решение сконцентрировать основные усилия на работах в первой процедурной кабине МТК.

В результате сотрудничества с первым в мире госпитальным центром протонной терапии в г. Лома-Линде (США) разработанная в этом центре трехмерная компьютерная система планирования протонного облучения TPN была адаптирована к оборудованию и протонным пучкам фазотрона. После проведения дозиметрических исследований эта система с успехом использовалась в Медико-техническом комплексе в регулярных сеансах протонной терапии. Методика трехмерной конформной терапии пучками протонов на фазотроне ЛЯП ОИЯИ была реализована впервые на территории постсоветского пространства.

Однако американская программа не поддавалась какой-либо модернизации, что не позволяло использовать ее с другими развиваемыми методиками облучения. В связи с необходимостью развития альтернативных методик облучения в Медико-техническом комплексе ЛЯП была разработана собственная компьютерная система планирования.

Терапевтическое кресло для облучения

Первая процедурная кабина МТК была переоборудована в соответствии с требованиями реализации в ней техники трехмерного конформного протонного облучения глубоко залегающих опухолей. Пациент во время сеанса размещался в процедурной в специальном позиционере, выполненном в виде кресла, которое имеет четыре степени механического перемещения: два ортогональных горизонтальных, одно вертикальное и вращательное.

В период с 1999 по 2019 г. сотрудниками МТК было проведено лечение почти 1300 пациентов с различными новообразованиями.

Сотрудники Медико-технического комплекса отдела фазотрона ЛЯП ОИЯИ, проводившие на протяжении многих лет регулярные сеансы протонной лучевой терапии онкологических пациентов на терапевтическом пучке фазотрона ЛЯП. Первый слева — начальник отдела фазотрона Г. В. Мицын

Дальнейшее использование фазотрона для проведения сеансов протонной терапии представлялось малоэффективным в связи с его избыточностью по энергии частиц, что приводит к увеличенному потреблению электроэнергии. Кроме того, при замедлении протонного пучка с 660 до 150 МэВ (типичная энергия терапевтического пучка для облучения опухолей головы и шеи) терялась огромная часть частиц, что не позволяло сформировать в процедурной кабине протонный пучок с наилучшими для лучевой терапии параметрами.

Сейчас фазотрон остановлен. Сотрудниками отдела новых ускорителей ЛЯП ОИЯИ разработан проект нового сверхпроводящего циклотрона MSC230 для медицинских целей. Предполагается, что этот ускоритель станет базой для создания нового центра протонной терапии в Дубне, который будет включать две процедурные кабины. В одной из них будет реализована методика облучения с использованием широкого горизонтального пучка протонов и терапевтического кресла, а вторую кабину планируется оснастить «гантри» с системой сканирования узким пучком по объему мишени и позиционером для фиксации пациента в положении лежа. Также в новом центре планируется разместить стандартный линейный ускоритель электронов для проведения сочетанной лучевой терапии и диагностическое оборудование (КТ и МРТ).

РАДИОХИМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Последние годы исследований в секторе радиохимии научно-экспериментального отдела ядерной спектроскопии и радиохимии (НЭОЯСиРХ) ЛЯП ОИЯИ продолжают держать в фокусе развитие радиохимии для ядерной медицины и низкофоновых экспериментов. Его деятельность охватывает разработку и совершенствование методов получения радионуклидов и низкофоновых материалов, радиохимического выделения и разделения элементов, а также анализ радиофармацевтических препаратов и их прекурсоров[6].

Сотрудники отдела принимали участие в разработке передовых методик по получению медицинских радионуклидов посредством радионуклидных генераторов, таких как $^{44}Ti \rightarrow {}^{44}Sc$, $^{68}Ge \rightarrow {}^{68}Ga$, $^{90}Sr \rightarrow {}^{90}Y$, $^{238}U \rightarrow {}^{234}Th$, $^{237}Np \rightarrow {}^{233}Pa$, $^{229}Th \rightarrow {}^{225}Ra \rightarrow {}^{225}Ac$, $^{227}Ac \rightarrow {}^{227}Th \rightarrow {}^{223}Ra$, $^{202}Pb \rightarrow {}^{202}Tl$, $^{194}Hg \rightarrow {}^{194}Au$, $^{32}Si \rightarrow {}^{32}P$ и др., а также ^{225}Ac, ^{223}Ra, ^{44}Sc, ^{119}Sb и др. из облученных мишеней[7,8,9,10,11,12,13,14,15]. Также сотрудники отдела активно вовлечены в исследовательскую деятельность, направленную на изучение новых кандидатов для мишенной диагностики (^{44}Sc и ^{90}Nb) или мишенной терапии (^{119}Sb) и других перспективных радионуклидов. Помимо многолетнего опыта разработки методов радиохимического выделения медицинских радиоизотопов, активно ведутся фундаментальные исследования процессов распада радионуклидов в составе радиофармпрепаратов с использованием методов сверхтонких взаимодействий, в частности, разработка методик определения термодинамических и кинетических констант радиофармпрепаратов и их прекурсоров с использованием метода возмущенных угловых корреляций (ВУК). Это позволяет углубить понимание механизмов распа-

---

[6] *Filosofov D. V. et al.* Radiochemical Investigations for Radiopharmaceutical Nuclear Medicine at JINR Laboratory of Nuclear Problems // Phys. Part. Nucl. 2023. V. 54, No. 2. P. 321–363.

[7] *Filosofov D. V., Loktionova N. S., Rösch F.* A $^{44}Ti/^{44}Sc$ Radionuclide Generator for Potential Application of ^{44}Sc-based PET-Radiopharmaceuticals // Radiochim. Acta. 2010. V. 98, No. 3. P. 149–156.

[8] *Pruszyński M. et al.* Post-Elution Processing of $^{44}Ti/^{44}Sc$ Generator-Derived ^{44}Sc for Clinical Application // Appl. Rad. Isotopes. 2010. V. 68, No. 9. P. 1636–1641.

[9] *Baimukhanova A. et al.* Production of the Positron-Emitting Radionuclide ^{68}Ga: the Radiochemical Scheme of Radionuclide Generator $^{68}Ge \rightarrow {}^{68}Ga$ // Chem. Bull. of Kazakh Nat. Univ. 2018. V. 89, No. 2. P. 20–26.

[10] *Grimm W. et al.* Ein $^{90}Sr/^{90}Y$-Generator auf basis eines 3-säulensystems des kationenaustauschers Aminex-A6. Mainz, 1999. 42 p.

[11] *Tsoupko-Sitnikov V., Norseev Y., Khalkin V.* Generator of Actinium-225 // J. Radioanal. Nucl. Chem. 1996. V. 205, No. 1. P. 75–83.

[12] *Халкин В. А., Цупко-Ситников В. В., Зайцева Н. Г.* Радионуклиды для радиотерапии. Актиний-225: свойства, получение, применение // Радиохимия. 1997. Т. 39, № 6. С. 481–490.

[13] *Baimukhanova A. et al.* An Alternative Radiochemical Separation Strategy for Isolation of Ac and Ra Isotopes from High Energy Proton Irradiated Thorium Targets for Further Application in Targeted Alpha Therapy (TAT) // Nucl. Med. Biol. Elsevier BV, 2022. Vol. 112–113. P. 35–43.

[14] *Kurakina E. S. et al.* Improved Separation Scheme for ^{44}Sc Produced by Irradiation of ^{nat}Ca Targets with 12.8 MeV Protons // Nucl. Med. Biol. 2022. V. 104–105. P. 22–27.

[15] *Kurakina E. S. et al.* Production of ^{111}In and Radioisotopes of Te and Sn from an Antimony Target Irradiated with High-Energy Protons // Radiochemistry. 2020. V. 62, No. 3. P. 393–399.

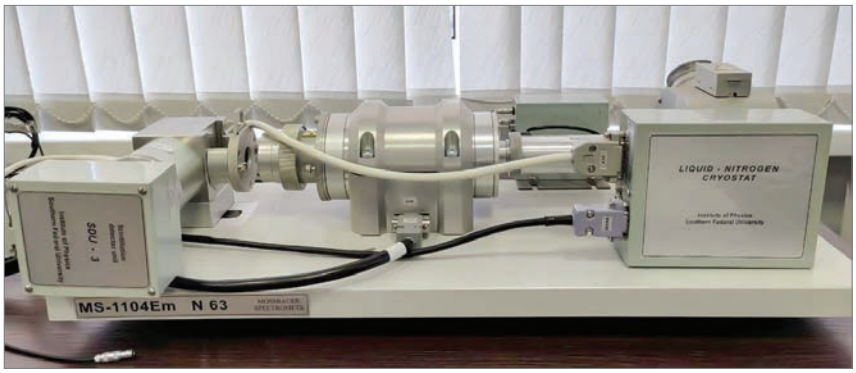
да и повысить эффективность разработок новых радиофармацевтических средств.

Источники для спектрометрии электронов низких энергий и α-частиц

Во многом эти достижения обусловлены великолепным доступом к широкому спектру радионуклидов, используемых в ядерной медицине и получаемых на установках ОИЯИ, таких как фазотрон (ЛЯП), реактор ИБР (ЛНФ), У-200 (ЛЯР) и др. Важным фактором успеха внедрения новых методов в ядерной медицине также является международный статус ОИЯИ, а коллектив НЭОЯСиРХ благодаря своей интернациональности занимает лидирующие позиции, что обусловлено высоким интересом многих стран к исследованиям с радионуклидами и ядерной медицине в целом.

Первоначально основная задача коллектива заключалась в изучении свойств атомных ядер с помощью методов ядерной спектроскопии и радиохимии. Уникальная возможность облучения мишеней на фазотроне (синхроциклотроне) ЛЯП и получения практически любых радионуклидов позволила провести огромное количество исследований этих радионуклидов благодаря их высокой чистоте и удельной активности. Спектрометрические источники и радиоактивные препараты поставлялись из отдела во многие страны мира. Важнейшую роль сектор видит в использовании этого опыта для развития методик и методов получения различных радионуклидных препаратов и источников на новой базовой установке ЛЯП — ускорителе электронов ЛИНАК-800.

В последние годы отдел сосредоточен на применении методов ядерной спектроскопии и радиохимии для изучения редких событий, таких как двойной β-распад, поиск частиц темной материи, и проведения других экспериментов по выявлению редких событий, требующих использо-



Двухканальный мессбауэровский спектрометр, работающий по схеме совпадения с гамма-детектором

Работа в «чистой» комнате по разделению элементов. А. В. Рахимов, Д. Караиванов

Спектрометр возмущенных угловых корреляций. А. Величков, Г. Маринов и Д. Караиванов

Сотрудники НЭОЯСиРХ ЛЯП ОИЯИ, участвующие в радиохимических исследованиях (слева направо): Г. Ю. Магомедов, Д. А. Саламатин, Д. В. Караиванов, К. В. Антохина, А. В. Саламатин, А. В. Рахимов, А. Х. Иноятов, Н. Темербулатова, Д. В. Философов, М. Ю. Воробьёва, Х. С. Дадаханова, Ж. А. Дадаханов, Ю. К. Хусенова, А. Баймуханова, Х. М. Алшубаки, Е. С. Куракина, Наоми Дикеледи Мохине, М. В. Мухина, Б. Е. Калинова. Дубна, 2025 г.

вания уникальных материалов — образцов с минимальным уровнем радионуклидных примесей. Для этого разрабатываются эффективные методики получения и очистки низкофоновых материалов, а также прогрессивные методы анализа для работы с подобными образцами. Например, очистка и анализ обогащенных ^{82}Se и ^{96}Zr для поиска безнейтринной моды двойного бета-распада[16,17,18,19], приготовление сверхчистых флюсов и припоев для использования в низкофоновой электронике, разработка и реализация методик и методов анализа низкофоновых материалов, в том числе нового метода определения низких активностей — метода окситермографии.

[16] *Kurakina E. S. et al.* Perturbed Angular Correlation as a Tool to Study Precursors for Radiopharmaceuticals // Inorg. Chem. 2020. V. 59, No. 17. P. 12209–12217.

[17] *Rakhimov A. V. et al.* Development of Methods for the Preparation of Radiopure ^{82}Se Sources for the SuperNEMO Neutrinoless Double-Beta Decay Experiment // Radiochim. Acta. 2020. V. 108, No. 2. P. 87–97.

[18] *Rakhimov A. V. et al.* Purification of Selenium from Thorium, Uranium, Radium, Actinium and Potassium Impurities for Low Background Measurements // Radiochim. Acta. 2013. V. 101, No. 10. P. 653–659.

[19] *Temerbulatova N. T. et al.* Production of Tin-Lead Solder Based on Archaeological Lead for Low-Background Experiments // J. Instrum. 2025. V. 20, No. 07. P. P07021.

На основе исследований по данной тематике были защищены ряд докторских и кандидатских диссертаций. На разных этапах в радиохимических работах участвовали: В. А. Халкин, Н. Г. Зайцева, И. А. Ютландов, А. Ф. Новгородов, А. Реш, Ф. Реш, Г. Байер, Ю. В. Норсеев, Н. А. Лебедев, В. Н. Рыбаков, Н. А. Королев, З. З. Аксельрод, Д. В. Философов, В. В. Цупко-Ситников, Г. А. Божиков, П. Иванов, Г. Бончев, М. В. Миланов, Д. В. Караиванов, А. И. Величков, Й. Величкова, М. Цветков, Г. Варот, В. Радченко, А. Белозуб, Р. Северьянова, Л. В. Ангел, В. Карауш, А. Фуёр, Е. С. Куракина, Г. Маринов, А. Маринова, Н. А. Мирзаев, И. В. Островский, К. А. Беликов, Р. Мысиак, Син Су Бок, Чон Сун Чин, Чан Ким Хунг, А. В. Рахимов, Н. Темербулатова, А. Баймуханова, Ж. А. Дадаханов, М. В. Мухина, М. Ю. Воробьёва, Ю. К. Хусенова, Х. М. Алшубаки, К. В. Антохина, Д. А. Саламатин, Г. Ю. Магомедов, Наоми Дикеледи Мохине, Е. А. Денисова, В. И. Соболев, Р. В. Столупина, Е. В. Куликов, О. Бочко и др.

ПОЗИТРОННО-АННИГИЛЯЦИОННАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ

Установка для позитронно-аннигиляционной спектроскопии (ПАС) состоит из трех основных частей: инжектора медленных монохроматических позитронов, транспортного канала и специализированной экспериментальной станции. Основой инжектора позитронов служит криогенный источник медленных монохроматических позитронов. Транспортный канал состоит из набора катушек, создающих продольное магнитное поле. Основным элементом специализированной экспериментальной станции выступает автоматизированный изолированный ввод. Внутри станции предусмотрены места для размещения детекторов.

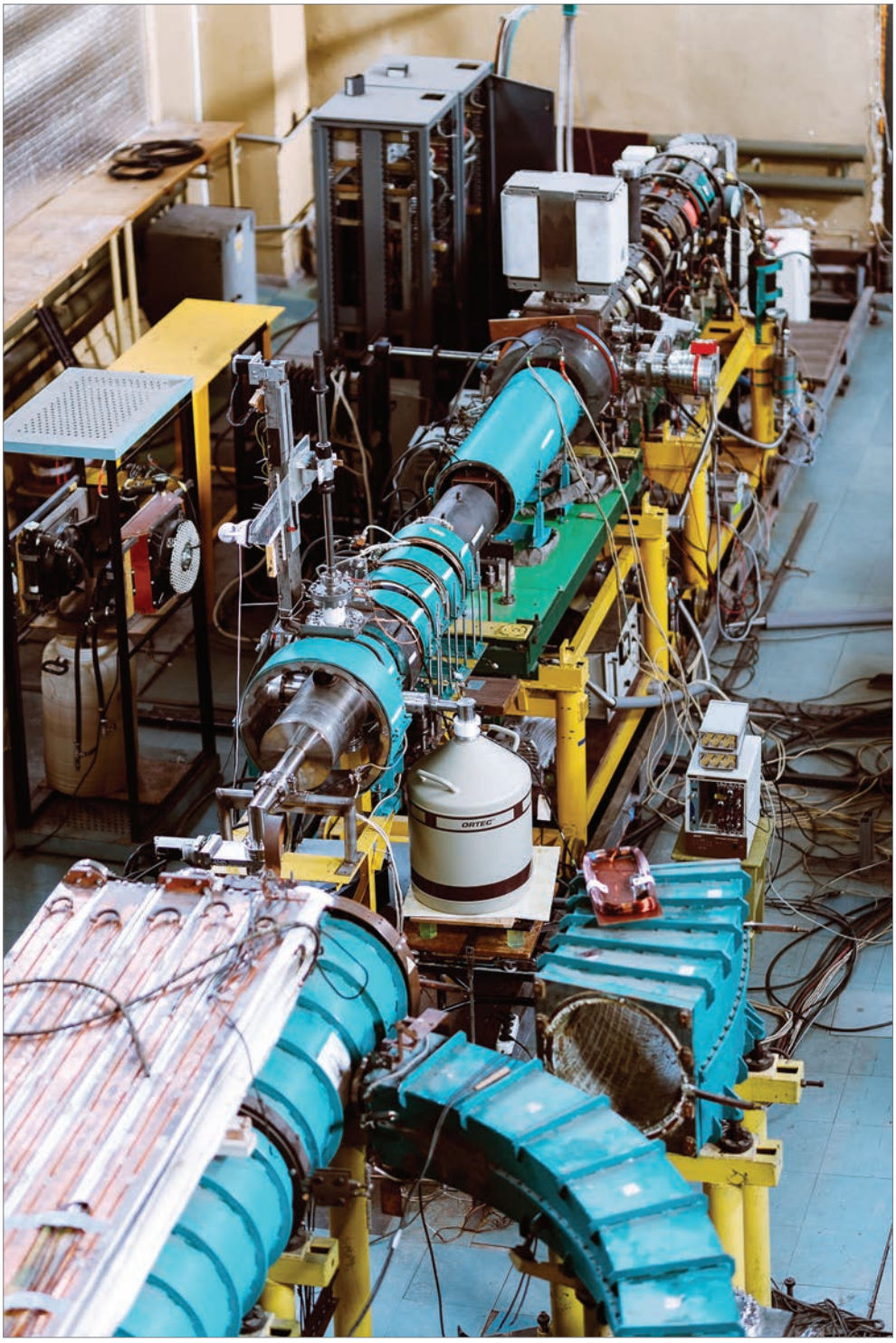
На автоматизированном изолированном вводе расположен держатель образцов, что позволяет вдвигать исследуемые образцы в поток позитронов. Управление осуществляется дистанционно с пульта установки. При проведении измерений на него подается необходимый потенциал (до 30 кВ).

На установке проводятся дефектоскопические исследования различных материалов из научных институтов и лабораторий как России, так и стран-участниц ОИЯИ. Уникальные возможности неразрушающего контроля, чрезвычайная чувствительность к обнаружению дефектов, возможность сканировать образцы на наличие дефектов по глубине с чрезвычайно высокой точностью делают сегодня позитронно-аннигиляционную спектроскопию одним из самых актуальных и быстро набирающих популярность в России и мире методов изучения материалов[20,21].

---

[20] *Samadov S. F., Abiyev A. S., Asadov A. G., Trung N. V. M., Sidorin A. A., Samedov O. A., Popov E. P., Demir E., Vershinina T., Aliyev Y. I., Hasanov K. M., Mirzayev M. N.* Investigating the Crystal Structure of ZrB_2 under Varied Conditions of Temperature, Pressure, and Swift Heavy Ion Irradiation // Ceramics International. 11 Nov. 2023. (Impact factor 5.2). DOI: 10.1016/j.ceramint.2023.11.125.

[21] *Eseev M., Kuziv I., Kostin A., Meshkov I., Sidorin A., Orlov O.* Investigation of Nitrogen and Vacancy Defects in Synthetic Diamond Plates by Positron Annihilation Spectroscopy // Materials. 2023. V. 16. P. 203; https://doi.org/10.3390/ma16010203.



Установка ПАС, вид сверху

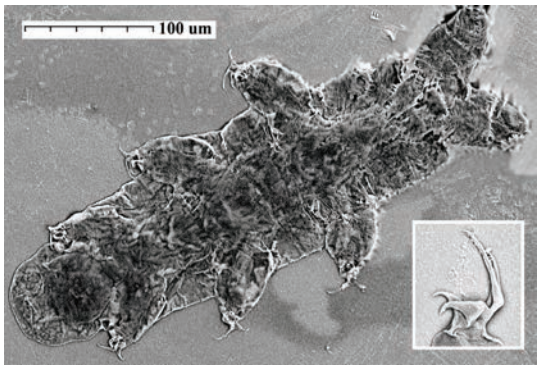
Сотрудники сектора № 4 отдела научно-исследовательских работ и инноваций (слева направо): А. А. Сидорин, О. С. Орлов, Е. П. Попов, Нгуен Ву Мин Чунг и Ф. Самедов на фоне установки ПАС

Первым реализованным методом на установке ПАС, использующим монохроматический поток медленных позитронов, является метод спектроскопии по измерению доплеровского уширения аннигиляционной линии гамма-кванта. Этот метод используется для обнаружения вакансий, вакансионных кластеров, а также определения их концентрации.

Также применяется метод PALS (Positron Annihilation Lifetime Spectroscopy, или спектроскопия времени жизни позитронов) — физический метод исследования материалов, основанный на измерении времени жизни позитронов в веществе. Этот метод позволяет исследовать микроструктуру материалов, в частности дефекты кристаллической решетки, поры и пустоты, на нанометровом уровне.

ПРОЕКТ TARDISS

Проект TARDISS сектора молекулярной генетики клетки ЛЯП ОИЯИ выполняется с 2021 г. и посвящен фундаментальным и прикладным исследованиям молекулярных механизмов экстремальной устойчивости живых организмов (экстремофилов) к различным физико-химическим стрессам. В фокусе проекта — тихоходки, подземные микробные сообщества термальных источников Баксанской нейтринной обсерватории (БНО) ИЯИ РАН, глубоководные организмы с якорей Байкальского нейтринного телескопа, обитатели зоны реактора ИБР-2.



Сканирующая электронная микроскопия тихоходки Bertolanius markevichi

Одними из самых устойчивых к физико-химическим стрессам животных на Земле являются тихоходки. В рамках проекта TARDISS изучается белок тихоходок Dsup (Damage suppressor), который эффективно защищает ДНК от воздействия радиации и активных форм кислорода. Впервые удалось показать, используя модельный объект *Drosophila melanogaster* и культуру клеток человека, что белок Dsup может использоваться как радиопротектор в сложных организмах, в том числе и для защиты здоровых тканей от радиации при проведении реальных протоколов протонной радиотерапии; проведена оценка влияния присутствия этого белка с помощью секвенирования транскриптома. Методами малоуглового рентгеновского

Участники экспедиций в Баксанскую нейтринную обсерваторию в тоннеле БНО в 4000 м от входа. Слева направо: А. М. Гангапшев (БНО ИЯИ РАН), М. П. Зарубин, К. А. Тарасов, Е. В. Кравченко (ЛЯП ОИЯИ)

рассеяния (SAXS) и спектроскопии кругового дихроизма были определены структурные характеристики белка Dsup и важные параметры его комплекса с ДНК[22].

Первые биологические работы в БНО ИЯИ РАН (Кабардино-Балкария, пос. Нейтрино) были проведены в рамках проекта TARDISS в 2021 г., они позволили охарактеризовать геномы одного из самых глубоких микробных сообществ в России и на Кавказе, обнаружить новые роды и виды экстремофильных бактерий[23]. Эти работы послужили началом серии полногеномных исследований экстремальных организмов и экосистем, в том числе микробного сообщества активной зоны ядерного реактора ИБР-2, глубоководных планарий с якорей Байкальского нейтринного телескопа (Baikal-GVD), а также экстремофильных организмов из ряда локаций стран-участниц ОИЯИ. Полученные результаты будут иметь большое значение для фундаментальной молекулярной биологии, радиационной генетики, астробиологии, медицины и биотехнологии.

МЕТОДЫ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧАХ

Вопросы контроля загрязнения окружающей среды и экологической безопасности всегда актуальны. По данным Global Burden of Disease Study (GBD-2021), загрязнение воздуха ежегодно вызывает около 8 млн смертей и входит в десятку главных факторов преждевременной смертности. Неудивительно, что существует множество программ, направленных на анализ чистоты воздуха. Значимое место среди них занимает программа Комиссии ООН по дальнему трансграничному переносу воздушных загрязнений ICP Vegetation. Программа объединяет сотни ученых, которые проводят исследования в более чем сорока странах Европы и Азии. За координацию проекта с 2014 г. отвечает Лаборатория нейтронной физики им. И. М. Франка ОИЯИ. С целью увеличения уровня автоматизации был инициирован совместный проект ЛНФ и ЛИТ ОИЯИ, руководителями которого являлись М. В. Фронтасьева и Г. А. Ососков.

Разработку системы управления данными (СУД) проекта начал А. В. Ужинский в ЛИТ в 2016 г. Изначально планировалось, что система упростит и частично автоматизирует типовые операции с данными, а также позволит оперативно создавать карты загрязнения. Со временем система эволюционировала, вбирая в себя все новые и новые технологии и подходы,

---

[22] *Zarubin M., Azorskaya T., Kuldoshina O., Alekseev S., Mitrofanov S., Kravchenko E.* The Tardigrade Dsup Protein Enhances Radioresistance in Drosophila Melanogaster and Acts as an Unspecific Repressor of Transcription // iScience. 2023. V. 26, No. 7.

[23] *Tarasov K. et al.* Cytobacillus Pseudoceanisediminis sp. nov., A Novel Facultative Methylotrophic Bacterium with High Heavy Metal Resistance Isolated from the Deep Underground Saline Spring // Curr. Microbiol. 2023. V. 80. P. 31; https://doi.org/10.1007/s00284-022-03141-8.

Рабочее совещание ЛНФ, ЛИТ и представителей Остравского технического университета (Чехия). 2018 г.

и на сегодня может быть причислена к интеллектуальным платформам экологического мониторинга[24].

В рамках проекта ICP Vegetation участники собирают образцы мха, фиксируя метаинформацию о местах сбора, и используют различные техники, например нейтронно-активационный анализ, чтобы получить данные по содержанию тяжелых металлов, азота, стойких органических соединений и радионуклидов. Естественно, что в процессе сбора метаинформации возможны ошибки, которые негативно сказываются на полученных результатах. Для их минимизации было разработано мобильное приложение, которое позволило заполнять большинство обязательных полей из выпадающих списков, причем часть данных, например широту, долготу и высоту над уровнем моря, — автоматически. Кроме того, в приложении была реализована возможность фотографировать места сбора и образцы мха и отправлять их в платформу для распознавания. Это позволило значительно упростить процесс определения типа мха, что является важной частью сбора метаинформации и в некоторых случаях вызывает трудности даже у экспертов. На базе системы были апробированы несколько моделей глубокого обучения для решения задач распознавания на ограниченной выборке.

Одной из основных задач при реализации системы управления данными было сведение к минимуму необходимости использования сторонних систем. Участники могут управлять данными, строить карты загрязнений, запускать прогнозы и получать аналитические отчеты. Доступны инструменты для кластерного анализа, метода главных компонентов PCA, анализа временны́х трендов и сравнений между регионами. Координаторы обладают расширенными правами, включая построение глобальных карт.

[24] *Ужинский А.* Интеллектуальная платформа экологического мониторинга // Открытые системы. СУБД. 2021. № 2. С. 21–23.

Прогнозирование — важный этап экологического мониторинга, позволяющий заполнить пробелы в данных. А. В. Ужинским в рамках СУД был предложен и реализован механизм прогнозирования, основанный на применении машинного обучения совместно с данными дистанционного зондирования земли[25]. С рядом химических элементов подход показал весьма обнадеживающие результаты. Снимки различных спутниковых программ используются для получения так называемых индексов, которые выступают дополнительными данными при обучении модели и основными данными при построении прогноза. Для получения индексов используется платформа Google Earth Engine, содержащая данные десятков различных спутниковых программ и продуктов. В текущей реализации в зависимости от количества исходных данных используются статистические модели машинного обучения либо нейронные сети. При построении глобальных и региональных карт некоторых элементов точность моделей достигает 90–95 %.

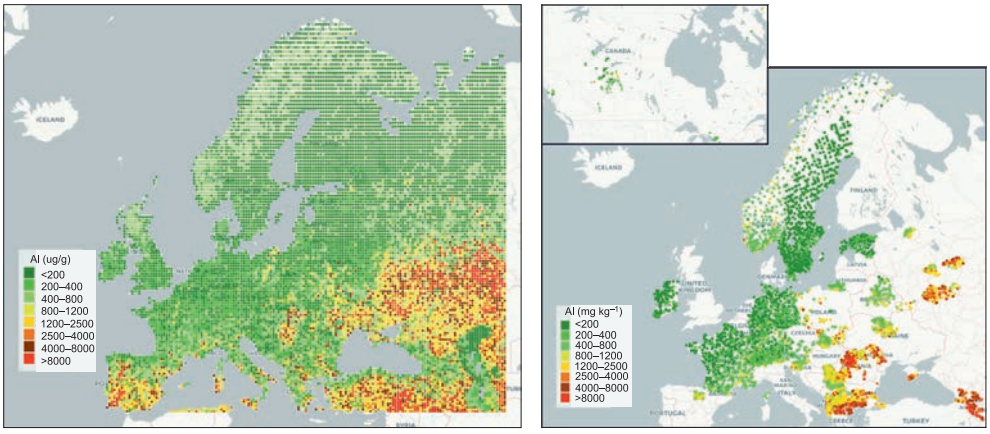


Рис. 6. Слева: прогноз модели по загрязнению алюминием. Справа: карта, построенная с использованием платформы на реальных данных

Таким образом, разработанная платформа позволила автоматизировать различные процессы управления данными и предоставила новые возможности для анализа и прогнозирования.

Другое интересное направление, развиваемое в ЛИТ ОИЯИ, — использование ИИ в растениеводстве. В 2017 г. группа научных сотрудников ЛИТ в составе Г. А. Ососкова, А. В. Ужинского, А. В. Нечаевского и студента Гомельского государственного технического университета П. Гончарова выиграла грант Российского фонда фундаментальных исследований на разработку комплексной системы диагностирования болезней растений по изображениям и текстовому описанию.

[25] *Uzhinskiy A., Vergel K.* Central Russia Heavy Metal Contamination Model Based on Satellite Imagery and Machine Learning // Comput. Opt. 2023. V. 47(1). P. 137–151; DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1149.

Дроны с гиперспектральными камерами над полями, роботы с обычными камерами в теплицах, камеры высокого разрешения, установленные в вертикальных фермах, приложения в смартфоне, позволяющие по фотографии определить болезнь растений, — все это сегодня стало реальностью. Использование различных устройств вместе с технологиями искусственного интеллекта позволяет увеличить урожайность и минимизировать потери в сельском хозяйстве. Наличие опытных специалистов в области нейронных сетей и машинного обучения, а также современные вычислительные ресурсы делают ЛИТ привлекательной для реализации совместных проектов в сельском хозяйстве.

Были разработаны платформа (pdd.jinr.ru) и мобильное приложение DoctorP, направленные на решение задач диагностирования и определения болезней домашних и сельскохозяйственных растений путем использования современных методов обработки графической и текстовой информации на высокопроизводительных вычислительных инфраструктурах[26]. В настоящее время в платформе есть модели для 30 сельскохозяйственных и декоративных культур: барбариса, винограда, вишни, голубики, клубники, кукурузы, огурцов, перца, пшеницы, смородины, томатов, хлопка, яблок, орхидей, роз и т. д. Общая модель для всех видов растений распознает 68 классов болезней и вредителей. В базе собрано свыше 6000 изображений. Для определения оптимальных подходов к обучению моделей команда разработчиков постоянно тестирует различные современные архитектуры

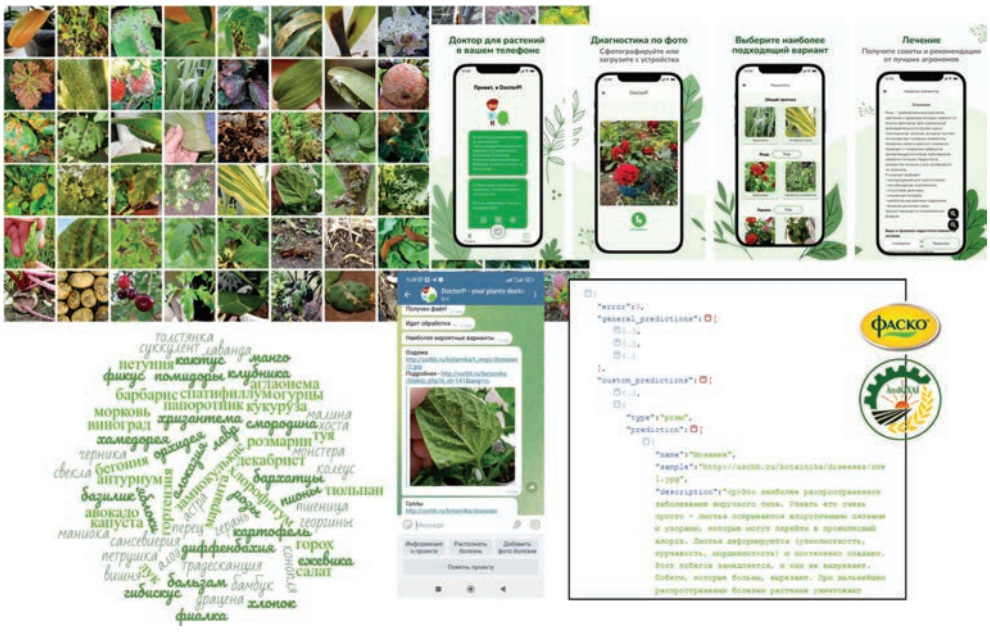


Рис. 7. Примеры интерфейсов платформы DoctorP

[26] *Ужинский А. В.* Искусственный интеллект против болезней растений // Открытые системы. 2022. № 3. С. 29–31.

нейронных сетей, политики аугментации данных и функции минимизации потерь. Все это позволяет добиться статистической точности моделей[27,28] в 97 %. Использовать интерфейс платформы могут все, начиная от специалистов агрохолдингов и заканчивая начинающими садоводами, для которых немаловажной особенностью программы являются рекомендации по лечению растений, верифицированные профессиональными агрономами.

Полученные результаты вызвали интерес у коллективов различных организаций. Так, схожие алгоритмы классификации были использованы в совместном проекте с научным центром «Агротехнологии будущего» на базе Тимирязевской академии. В нем проводилось исследование влияния света различных спектров на рост культур на определенных стадиях развития. Нейросетевые модели, разработанные сотрудниками ЛИТ, использовались для оценки степени развития и весовых групп растений.

Кроме задачи классификации для сельского хозяйства большой интерес представляют задачи детекции. Если в первой требуется определить, что за болезнь на изображении, то во второй — определить координаты положения объектов на изображении и их классы. Первые эксперименты в данном направлении были связаны с применением RCNN (конволюционных нейронных сетей на основе регионов), в дальнейшем использовались сети на базе известных архитектур, предназначенных для обнаружения объектов, — YOLO (You Only Look Once). Архитектуры сетей модифицировались для оптимизации точности при работе с определенными видами объектов и производительности.

В совместном проекте ЛИТ с компанией «Дока — Генные Технологии» разрабатываются механизмы определения различных заболеваний картофеля. Для определения проблем на полях использовались программно-аппаратные комплексы с камерами высокого разрешения, устанавливаемые на сельхозтехнику. Наибольший интерес вызывают задачи детекции и сегментации. Первая состоит в определении областей изображения, внутри которых находится интересующий объект — растение с признаками болезни. Вторая — выделение областей объектов и определение всех принадлежащих им пикселей.

В результате исследований были не только определены наиболее перспективные подходы к обучению моделей, но и апробированы варианты визуализации данных о случаях обнаружения на полях растений с признаками болезней, а также подготовлены рекомендации по программно-аппаратному составу комплекса.

Другое направление исследований — анализ гиперспектральных изображений для поиска закономерностей, позволяющих выявлять больные растения еще до появления видимых симптомов. В ходе реализации проекта были отработаны подходы к разметке данных, позволяющие обучать

---

[27] *Uzhinskiy A., Ososkov G., Goncharov P., Nechaevskiy A., Smetanin A.* Oneshot Learning with Triplet Loss for Vegetation Classification Tasks // Comput. Opt. 2021. V. 45(4). P. 608–614; DOI: 10.18287/2412-6179-CO-856.

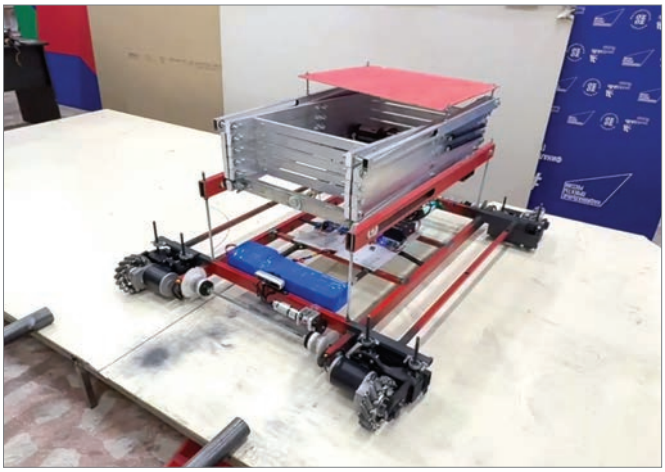
[28] *Uzhinskiy A.* Evaluation of Different Few-Shot Learning Methods in the Plant Disease Classification Domain // Biology. 2025. V. 14. P. 99; https://doi.org/10.3390/biology14010099.

различные модели и производить их валидацию, разработаны и апробированы различные варианты предобработки данных и определены наиболее перспективные из них, определены комбинации спектральных каналов, позволяющие получить вегетационный индекс, наиболее ярко показывающий признаки болезни. В контролируемых условиях удалось добиться надежного разделения классов.

Еще одно активно развивающееся направление исследований — автоматизация контроля и учета в тепличных комплексах. Основной задачей проекта является автоматизация рутинных операций агрономов и предоставление им удобных инструментов учета и мониторинга. В ходе реализации проекта разрабатывается автономная роботизированная платформа, способная передвигаться по различным типам поверхностей, фиксировать интересующие показатели и выполнять съемку на большой высоте. Результатом работы должен стать цифровой двойник тепличного комплекса, в котором будет показана актуальная информация по количеству растений в ряду и их характеристикам, обнаруженные проблемы, данные по различным показателям (температура, влажность, освещенность) и пр. Проект сочетает в себе решение различных технических задач по проектированию и разработке элементной базы платформы, робототехнических задач (картирование, локализация, автономное передвижение, выполнение маршрутных заданий), организационных задач (обработка изображений, отображение результата на карте) и нейросетевых задач (отслеживание и подсчет, классификация, локализация и идентификация болезней и вредителей).

В настоящее время разработаны полнофункциональный прототип роботизированной платформы, прототип комплекса контроля и учета и ряд моделей для подсчета растений, оценки их состояния, обнаружения вредителей и признаков некоторых болезней.

К работе над проектами активно привлекаются студенты различных институтов и университетов, в том числе государственного университета



Полнофункциональный прототип роботизированной платформы для тепличных комплексов

«Дубна». Так, свой вклад в исследования в разное время внесли студенты П. Гончаров, А. Сметанин, М. Герасимчук, Е. Резвая и А. Дорохин.

В 2019 г. стартовал совместный междисциплинарный проект BIO-HLIT, реализуемый сотрудниками ЛИТ и ЛРБ ОИЯИ и направленный на создание информационной системы для радиобиологических исследований. Основной целью создания информационной системы (ИС) является автоматизация анализа экспериментальных данных, получаемых в ЛРБ, что, в свою очередь, позволяет ускорить и упростить работу с этими данными различным группам исследователей, упростить и ускорить диагностику патологий центральной нервной системы (ЦНС) и, в частном случае, выработку эффективных методов профилактики и защиты от ионизирующего излучения. Информационная система содержит алгоритмические модули, обеспечивающие на основе единых алгоритмических подходов и IT-решений исследования по изучению влияния различных факторов на биологические объекты на организменном, тканевом, клеточном и молекулярном уровнях. Одна часть модулей ИС направлена на изучение морфофункциональных изменений в ЦНС при физически индуцированных нейродегенеративных изменениях, исследуемых в ЛРБ, а именно эффектов воздействия разных видов ионизирующего излучения на организм мелких лабораторных животных. С точки зрения анализа данных эти исследования связаны со сбором и анализом видеоданных, отражающих поведенческие реакции лабораторных животных во время прохождения экспериментальных испытаний с использованием специализированных стендов. При этом следует отметить, что поведенческие тесты являются проверенным и общепризнан-

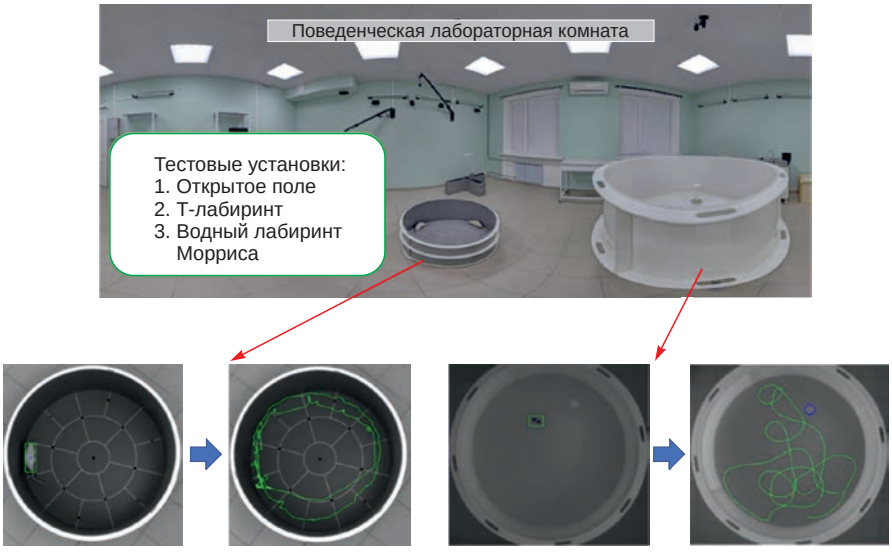


Рис. 8. Специализированная лабораторная поведенческая комната ЛРБ ОИЯИ (вверху) и примеры работы созданных алгоритмов трекинга мелких лабораторных животных в тест-системах «Открытое поле» и «Водный лабиринт Морриса» (внизу)

ным способом оценки когнитивных функций у лабораторных животных, позволяющим выявлять такие аспекты нервной деятельности, как наличие нарушений функций памяти и обучения. Это делает их незаменимым инструментом при исследовании нейродегенеративных заболеваний и тестировании терапевтических препаратов, направленных на улучшение когнитивных функций и купирование нарушений работы мозга. Однако, несмотря на большой диапазон возможных применений, использование данных тестов осложняется трудоемким анализом полученных видеоданных.

Для анализа экспериментальных данных, получаемых с использованием тест-систем «Открытое поле» и «Водный лабиринт Морриса», разработаны алгоритмы на основе методов компьютерного зрения и на базе нейросетевого подхода и веб-сервисы. Также созданная ИС позволила объединить в себе набор сервисов и инструментов для хранения экспериментальных данных, их анализа, алгоритмических блоков, базирующихся на методах и подходах машинного и глубокого обучения, позволяющих анализировать видеоданные, получаемые при проведении поведенческих тестов, и изображения, получаемые в экспериментах по изучению репарации ДНК.

Первая версия ИС BIO-HLIT была разработана в 2020 г. и продолжала развиваться при активном участии сотрудников ЛИТ Ю. А. Бутенко, М. И. Зуева, Д. М. Марова, А. В. Нечаевского, Д. В. Подгайного, О. И. Стрельцовой и сотрудников ЛРБ И. А. Колесниковой, Ю. С. Северюхина, М. Г. Лалковичовой, К. Н. Ляховой и Д. М. Утиной. В разработке алгоритмических модулей принимали участие сотрудники ЛИТ А. В. Стадник, О. И. Стрельцова, А. И. Аникина, Т. Бежанян, С. Шадмехри, а также А. И. Стрельцов (Германия) и сотрудник университета «Дубна» М. Ю. Бондарев.

Информационная система реализована в виде веб-приложения и предоставляет удобный и авторизованный безопасный доступ к платформе HybriLIT, включая СК «Говорун», и экосистеме ML/DL/HPC, в которую входит большое количество фреймворков и инструментов. На основе

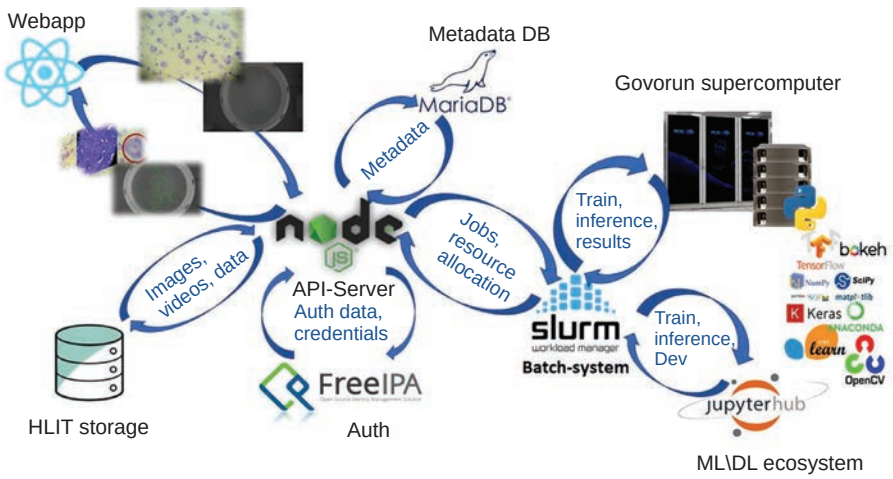


Рис. 9. Архитектура информационной системы BIO-HLIT

веб-технологий реализован общий интерфейс для пользователей, позволяющий взаимодействовать с базой данных и файловыми хранилищами платформы HybriLIT для изменения и добавления данных, полученных в ходе экспериментов[29].

В рамках дальнейшего сотрудничества ЛИТ и ЛРБ в 2024 г. на базе экосистемы ML/DL/HPC платформы HybriLIT был разработан веб-сервис MOSTLIT — инструмент для автоматизации обнаружения в клеточных ядрах радиационно-индуцированных фокусов (РИФ) и последующего анализа их параметров. Сервис призван оптимизировать обработку экспериментальных данных, получаемых в ходе радиобиологических исследований, предоставляя исследователям удобный и эффективный инструментарий для анализа.

Для обнаружения РИФ на флуоресцентных изображениях MOSTLIT использует двухэтапный алгоритм, основанный на методах компьютерного зрения и глубокого обучения. Такой подход позволяет значительно ускорить обработку данных, свести к минимуму ошибки, связанные с человеческим фактором, и получить изображения отдельных клеток с выявленными фокусами. Кроме того, веб-сервис предоставляет исходные изображения с пронумерованными клетками и аналитическую информацию: площадь клеток, количество РИФ в каждой клетке и др. Все результаты доступны

Разработчики веб-сервиса MOSTLIT С. Шадмехри, М. И. Зуев, О. И. Стрельцова, Т. Бежанян

[29] Information Systems for the Radiation Biology Tasks // Proc. Workshop on Information Systems for the Radiation Biology Tasks, Dubna, Russia, June 18, 2020; https://ceur-ws.org/Vol-2743/.

для скачивания в удобном текстовом формате, что обеспечивает гибкость и совместимость с различными программными средствами статистической обработки данных[30]. Благодаря масштабируемой архитектуре сервиса разработчики способны расширять его функционал на основе обратной связи от пользователей. Такой итеративный подход к разработке обеспечивает долгосрочную актуальность и эффективность сервиса для обработки данных, получаемых в ЛРБ ОИЯИ и ФМБЦ им. А. И. Бурназяна.

Название MOSTLIT содержит в себе акроним, образованный из начальных букв имен сотрудников ЛИТ ОИЯИ, принимающих непосредственное участие в разработке сервиса, создании алгоритмов и тестировании функционала: М. И. Зуева, О. И. Стрельцовой, С. Шадмехри и Т. Бежанян. Разработка ведется совместно с коллегами из ЛРБ под руководством А. В. Борейко при активном участии Т. С. Храмко.

Информационная система продолжает развиваться, проводится разработка алгоритмов для анализа данных радиобиологических экспериментов с привлечением новейших нейросетевых архитектур и методов компьютерного зрения. К этим работам привлекаются студенты университета «Дубна» и Тверского государственного университета.

НЕЙТРОННЫЕ МЕТОДЫ ДЛЯ ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ

Лаборатория нейтронной физики ОИЯИ проводит множество прикладных исследований с использованием нейтронных методов, результаты которых имеют высокий инновационный потенциал в медицине, энергетике, экологии и других областях, значимых для экономики и социальной сферы. Кроме того, в лаборатории ведутся методические исследования по развитию нейтронных методов, расширяющие возможности их применения, в том числе в прикладных работах.

МЕТОД МЕЧЕНЫХ НЕЙТРОНОВ

Важным этапом в развитии метода меченых нейтронов (ММН) стала разработка портативного нейтронного генератора, которая была выполнена во ВНИИА им. Н. Л. Духова (Москва) в 2003 г. под руководством Е. П. Боголюбова по техническому заданию ОИЯИ. Портативный нейтронный генератор обладал практически такими же характеристиками, как ускоритель ЭГ-5, однако вместо 6 этажей имел размер 30 см и был выполнен в так называемом отпаянном варианте – нейтронная трубка размещалась в полностью герметичном корпусе.

---

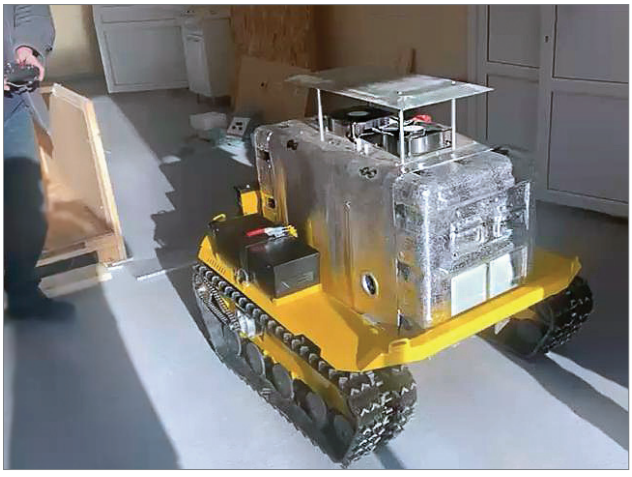
[30] *Shadmehri S., Bezhanyan T., Bondarev M., Streltsova O., Zuev M., Chigasova A., Osipov A., Vorobytea N., Osipov A. N.* A Deep Learning Model for Automated Quantification of DNA Repair Foci in Somatic Mammalian Cells // Phys. Part. Nucl. 2025. V. 56, No. 6.

Алмазные включения в образце кимберлита

Миниатюризация источника нейтронов открыла путь для различных практических применений ММН. Одним из самых первых стало применение ММН для поиска алмазов внутри кимберлитовой породы. Стандартная технология добычи алмазов сводится к дроблению руды и облучению ее рентгеновскими гамма-квантами, под действием которых алмаз начинает светиться и может быть отсортирован. Но свечение возникает только для алмазов, полностью открытых из породы. Поэтому процессы дробления и облучения повторяют до тех пор, пока исходная масса кимберлитовой руды не будет перемолота до крупности 1 мм.

Метод меченых нейтронов позволяет просветить нейтронами кусок кимберлитовой породы и выделить в ней области с повышенным содержанием углерода — признаком наличия в ней алмаза. То есть увидеть алмаз на той стадии, когда он еще скрыт в породе. Способность ММН определять элементный состав в разных пространственных областях работает здесь самым прямым образом. Это было экспериментально подтверждено, когда в одном из 33 образцов кимберлитовой породы было замечено аномально большое содержание углерода, а когда образец был раскрыт, внутри него обнаружились две области скопления мелких алмазов размером до 7 мм каждая.

Постоянное взаимодействие с ВНИИА им. Н.Л.Духова позволило создать законченный коммерческий продукт — нейтронный генератор с 9-пиксельным альфа-детектором с ресурсом в 1500 ч, который нашел различные практические применения. Например, он стал основой поточных



Нейтронный анализатор почвы

анализаторов элементного сырья на конвейере, которые работают по принципу ММН и дают информацию об элементном составе руды, угля, цемента на конвейере каждые 40–60 с.

В 2025 г. совместно с ООО «Диамант» был разработан и испытан мобильный нейтронный анализатор почвы (НАП), работающий по принципу ММН. Он позволяет определять элементный состав почвы при движении нейтронного модуля по полю в режиме реального времени, без предварительного отбора проб.

МЕТОДЫ НЕЙТРОННОГО И РЕНТГЕНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ

На создание нанопрепаратов против амилоидных агрегатов нацелены проводимые в ЛНФ исследования взаимодействия наночастиц с амилоидными фибриллами, вызывающими болезнь Альцгеймера и Паркинсона, с помощью малоуглового рассеяния нейтронов (SANS) на спектрометре YuMO. Нейтронное рассеяние позволяет отслеживать на наноуровне разрушение фибрилл под действием фуллеренов и магнитных частиц магнетита в комплексах с поверхностно-активными веществами. Полученные данные раскрывают молекулярный механизм разрушения агрегатов, открывая путь к созданию наноматериалов с антифибрильным эффектом для терапии нейродегенеративных заболеваний.

Биосовместимые нанокомпозиты являются перспективным средством, снижающим риск распространения антибиотикорезистентности. В ЛНФ разработаны биокомпозиты из соевого лецитина, хитина и Ag/AgCl-наночастиц, синтезированных «зеленым» методом из растительных экстрактов (куркума, виноград, мята). SANS и малоугловое рентгеновское рассеяние (SAXS) подтвердили наноразмер компонентов и стабильность комплексов. Эти материалы показывают высокую антимикробную активность против *Enterococcus faecalis*, *Staphylococcus aureus* и *Escherichia coli*, а также цитотоксичность к раковым клеткам HT-29 и HepG2 без гемолитической активности, что перспективно для медицины.

Разработка препаратов на основе водорастворимых фуллеренов является актуальным направлением поиска новых средств онкотерапии. Исследования растворов C60 и C70 фуллеренов в N-метил-2-пирролидоне (NMP) с помощью SANS на спектрометре YuMO и SAXS на инструменте P12 BioSAXS (PETRA III) выявили механизмы стабилизации кластеров. Комплексы фуллеренов с доксорубицином, цисплатином и ландомицином А демонстрируют антиоксидантную активность и перспективы в лечении рака. Результаты позволяют оптимизировать синтез водных растворов для биотестирования.

Разработка новых и оптимизация свойств существующих наноматериалов для литиевых батарей является быстрорастущей областью технологий. Нейтронные исследования на спектрометре YuMO и установке HRFD в ЛНФ ОИЯИ позволили изучить структуру керамических мембран

$Li_{1,5}Al_{0,5}Ge_{1,5}(PO_4)_3$ (LAGP) для твердых электролитов. Добавление оксида иттрия гомогенизирует материал, увеличивая ионную проводимость за счет роста контактов зерен. Также проанализировано заполнение нанопор углеродных катодов пероксидом лития в Li-O_2-батареях и влияние добавок (сажа, графен, CNT) на пористость LFP-катодов, что повышает емкость и смачиваемость.

Важные экспериментальные результаты получены для натриевых батарей с Prussian White. *In situ* нейтронная и рентгеновская дифракция во время циклирования электрохимической ячейки выявила фазовые переходы в $Na_{2-x}Fe[Fe(CN)_6]_{1-y}\cdot\square\cdot yH_2O$ (□ — вакансии $Fe(CN)_6$, y — их количество): ромбоэдрическая R-фаза (R-3) при разряде, кубическая (Fm-3m) при заряде. Выявленные большие объемные изменения кубической фазы в процессе заряда/разряда приводят к структурным деградациям части катодных материалов для натриевых источников тока. Это открывает возможности для снижения потери емкости, предлагая эффективную альтернативу материалам, которые используются в литий-ионных аккумуляторах.

Нейтронные методы являются эффективным инструментом неразрушающего контроля остаточных напряжений в конструкционных материалах и узлах оборудования современных АЭС. С использованием дифракции тепловых нейтронов в ЛНФ проведены исследования остаточных макронапряжений, микродеформаций решетки, плотности дислокаций и размеров областей когерентного рассеяния (кристаллитов) в зонах сварных швов образцов-свидетелей корпусов реакторов, восстановленных различными видами сварки (электронно-лучевой, лазерной, дуговой). Полученные данные о микроструктурных параметрах позволяют прогнозировать изменение механических свойств и прочности материала корпуса реактора. Результаты работ служат необходимым обоснованием для обеспечения безопасности и продления эксплуатационного ресурса критически важных узлов реакторных установок.

НЕЙТРОННО-АКТИВАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ

Нейтронно-активационный анализ (НАА) — высокочувствительный и точный метод количественного анализа — начали применять в ЛНФ в конце 1960-х гг. на реакторе ИБР-30. Ввод в эксплуатацию реактора ИБР-2 с высоким потоком нейтронов способствовал развитию метода на пневмотранспортной установке (ПТУ) «Регата». На начальном этапе метод использовали для определения роли отдельных элементов в развитии онкологических заболеваний, а начиная с 1991 г. и по настоящее время широко применяют для оценки атмосферных выпадений тяжелых металлов на основе анализа мхов-биомониторов в странах-участницах ОИЯИ.

С 2014 по 2022 г. координация программы ООН по состоянию воздушных загрязнений в Европе и, частично, в Азии на основе анализа мхов-биомониторов велась из ОИЯИ (координатор программы М. В. Фронтасьева). В 2020 г. издательским отделом ОИЯИ был выпущен отчет координационного центра Международной программы ООН о состоянии воздушных

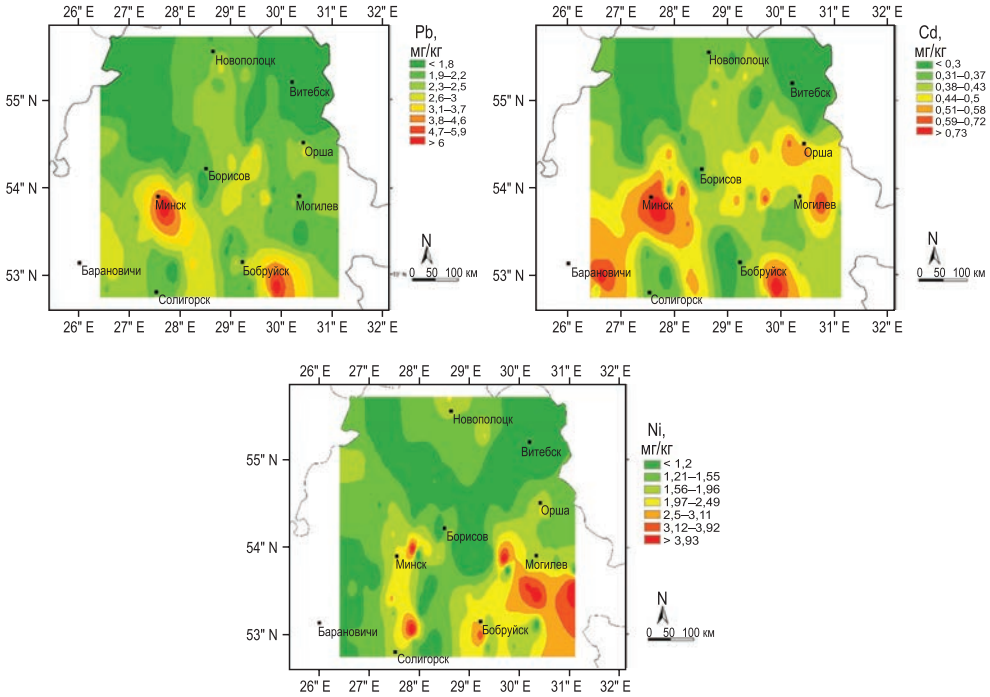
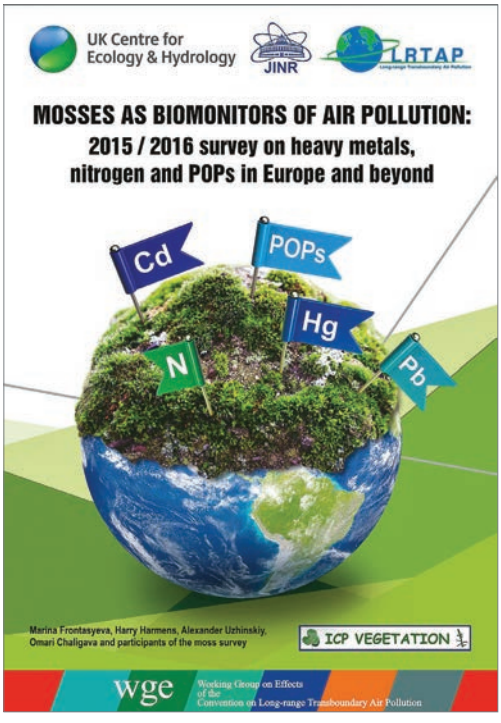


Рис. 10. Карты распределения содержания свинца, кадмия и никеля в образцах мха, отобранных в Республике Беларусь



Обложка отчета о состоянии воздушных загрязнений в Европе на основе анализа мхов-биомониторов

загрязнений в Европе. Он содержит карты распределений по 13 элементам: алюминий, сурьма, мышьяк, кадмий, хром, медь, железо, свинец, ртуть, никель, ванадий, цинк, азот, а также информацию об озоне и стойких органических загрязнениях.

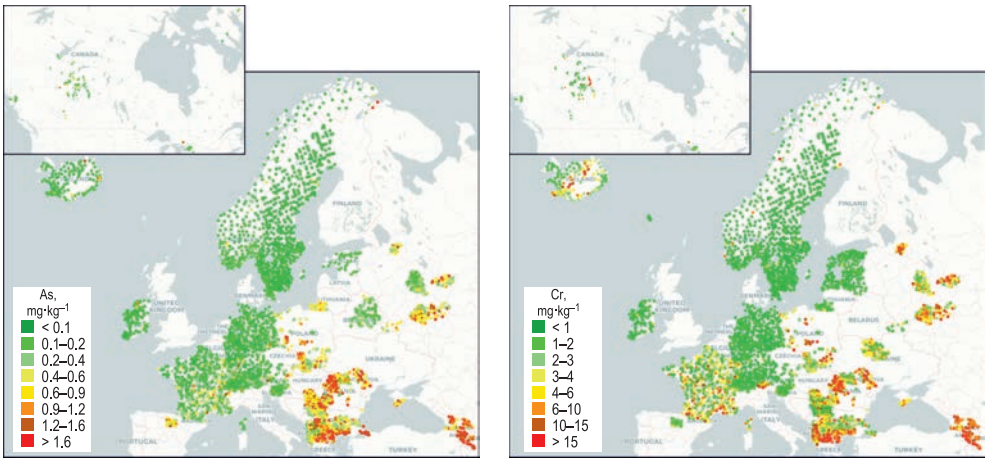


Рис. 11. Содержание мышьяка и хрома во мхах. 2015–2016 гг.

В начале 2000-х гг. НАА начинают широко использовать в биотехнологии для разработки фармацевтических препаратов на основе цианобактерии *Spirulina platensis* и бактериального выщелачивания элементов из обедненных руд. В 2009 г. биологическая тематика была дополнена двумя новыми направлениями: использование биологических объектов для разработки технологий очистки сточных вод и биосинтез наночастиц металлов. Работы по данным направлениям продолжаются в секторе нейтронного активационного анализа и прикладных исследований по настоящее время. Были протестированы абсорбционные способности биологических, неорганических, минерал-органических и наносорбентов для извлечения тяжелых металлов и редкоземельных элементов из промышленных стоков.

В конце 2000-х – начале 2010-х г. НАА стали применять в активном биомониторинге для оценки уровня загрязнения воздуха на урбанизированных территориях. Первые работы были выполнены в сотрудничестве с Белградским университетом. Со временем география исследований значительно расширилась и мониторинговые исследования были выполнены в целом ряде стран, включая Азербайджан, Вьетнам, Казахстан, Египет, Молдову, Монголию, Россию, Румынию и ЮАР.

Тогда же в секторе, в сотрудничестве со Стелленбошским университетом, НАА начинают использовать в комплексных морских биомониторинговых исследованиях, где в качестве биомониторов выступают двустворчатые моллюски (рис. 13). Также в качестве биомониторов изучали водоросли, фитопланктон, кораллы, губки. Данные исследования представляют большой интерес для оценки экологического состояния прибрежных зон, развития марикультуры и пищевой безопасности населения.

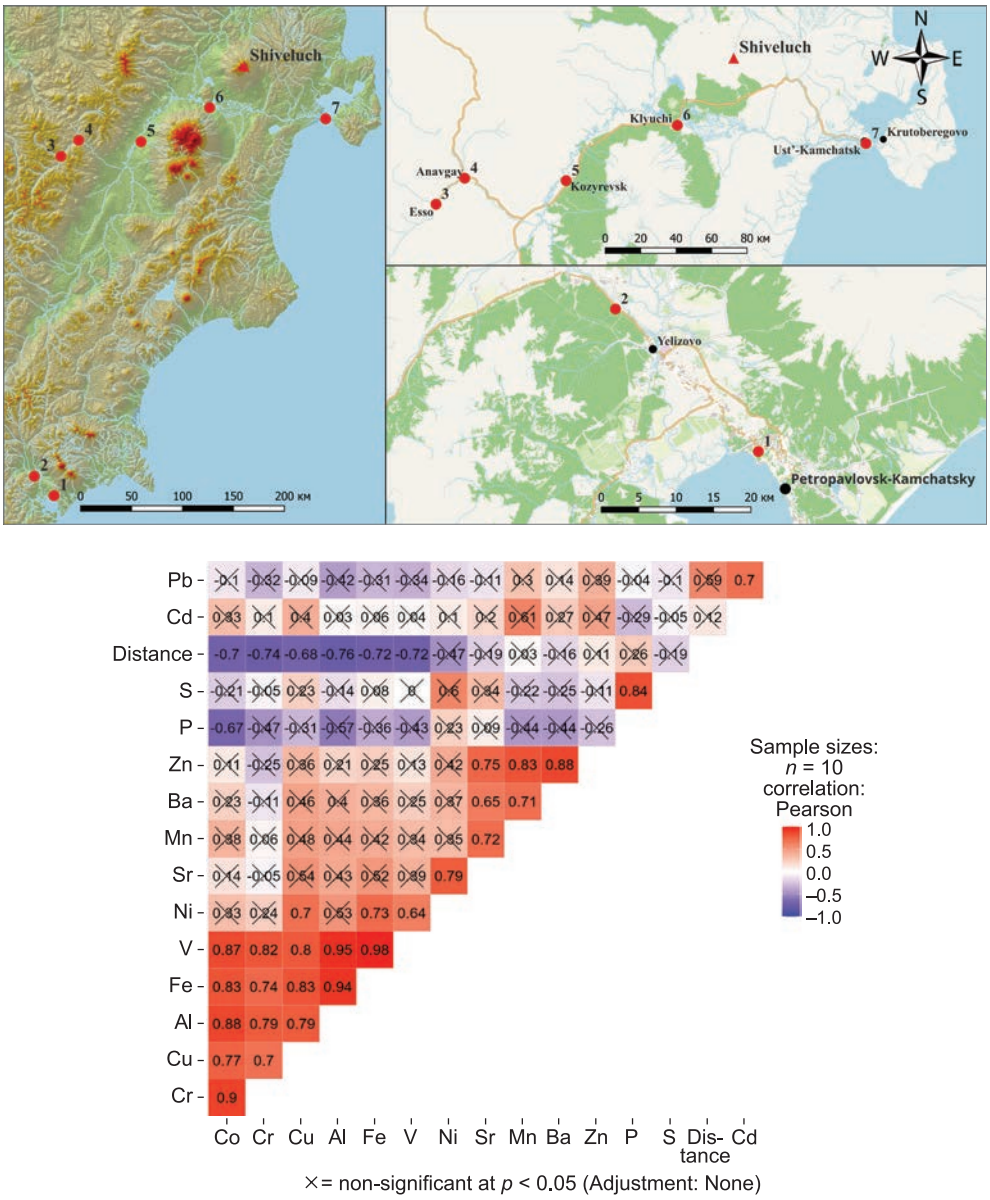


Рис. 12. Вверху: карта экспонирования. Внизу: корреляционная матрица для образцов мха, экспонированных в населенных пунктах, расположенных на разном расстоянии от вулкана Шивелуч (Камчатка)

Параллельно с развитием новых научных направлений шел и процесс автоматизации НАА. Так, в период с 2010 по 2014 г. в рамках программы МАГАТЭ «Развитие интегрального подхода к автоматизации нейтронно-активационного анализа» в секторе были созданы база данных и программно-аппаратный комплекс, включающий в себя три устройства автоматиче-

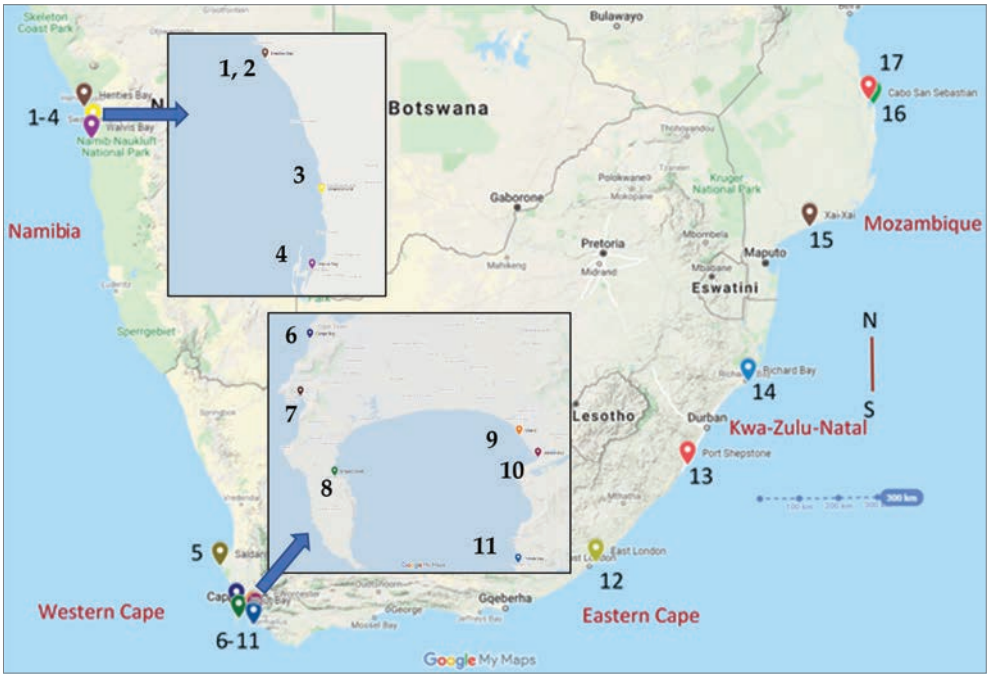


Рис. 13. Вверху: карта пробоотбора мидий в Южно-Африканской Республике. Внизу: коэффициенты риска для Al, Cr, Ni и As в мидиях, отобранных на изучаемых территориях

ской смены образцов на спектрометрах на установке «Регата» (М. В. Фронтасьева, С. С. Павлов и А. Ю. Дмитриев).

В 2021 г. методика определения содержания химических элементов методом нейтронно-активационного анализа на установке «Регата» реактора ИБР-2 была аттестована (авторы методики: Д. С. Гроздов, И. Зиньковская, С. С. Павлов, К. Н. Вергель). Соответствующее свидетельство было выдано Всероссийским научно-исследовательским институтом минерального сырья им. Н. М. Федоровского.

8-я Международная конференция «Биомониторинг атмосферных загрязнений» (BioMAP-8). Дубна, 2–7 июля 2018 г.

Сотрудники сектора нейтронно-активационного анализа и прикладных исследований

В 2020 г. начался второй этап модернизации и автоматизации НАА на установке «Регата», который включил в себя замену канала облучения № 1, замену пульта управления ПТУ «Регата», создание новой базы данных НАА, автоматизацию гамма-спектрометрии (Д. С. Гроздов, В. А. Галустов).

На протяжении многих лет НАА остается важным инструментом для определения элементного состава почв, в том числе сельскохозяйственного

назначения, донных отложений (морских и речных) и геологических пород. Здесь можно отметить работы по определению элементного состава донных отложений рек Нил (Египет), Заравшан (Таджикистан) и Дунай (сербский сектор).

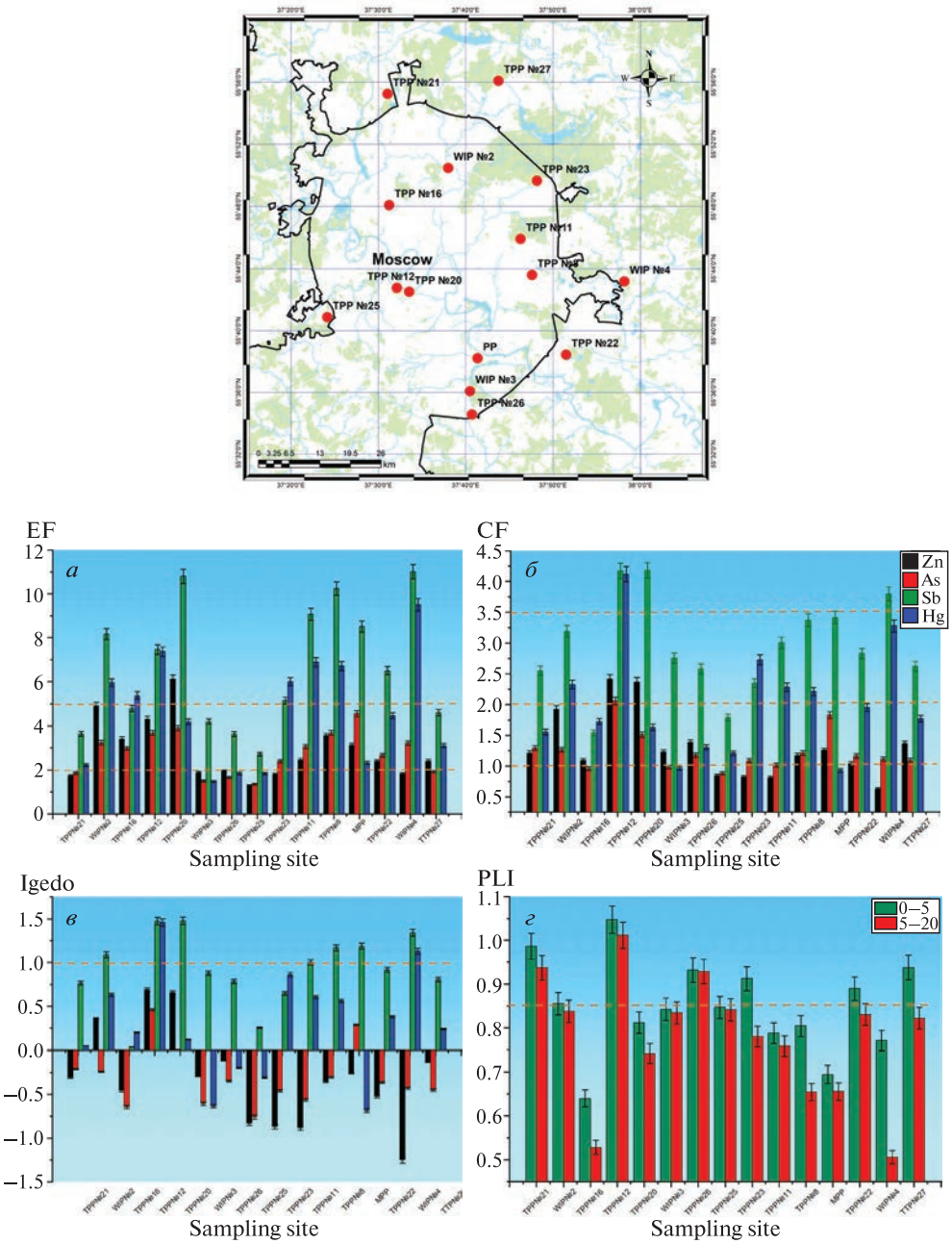
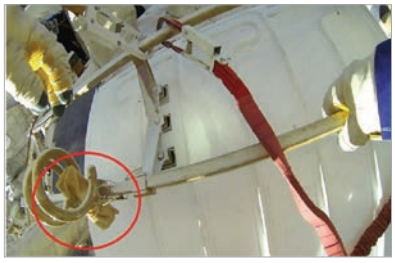


Рис. 14. Вверху: карта пробоотбора почв в г. Москве. Внизу: значения экологических индексов

В 2018 г. в секторе появляется ряд новых научных направлений, среди которых использование микроорганизмов и растений для биоремедиации загрязненных почв, оценка влияния наночастиц металлов на растения и животных, определение элементного состава вин, кофе, лекарственных растений и других типов продуктов питания.

НАА на установке «Регата» применяется и для анализа уникальных образцов. Так, были проанализированы фрагменты хлопчатобумажного свертка ткани, размещенного космонавтами Ю. Лончаковым и М. Финке на внешней поверхности МКС в рамках космического эксперимента «Тест» (рис. 15).



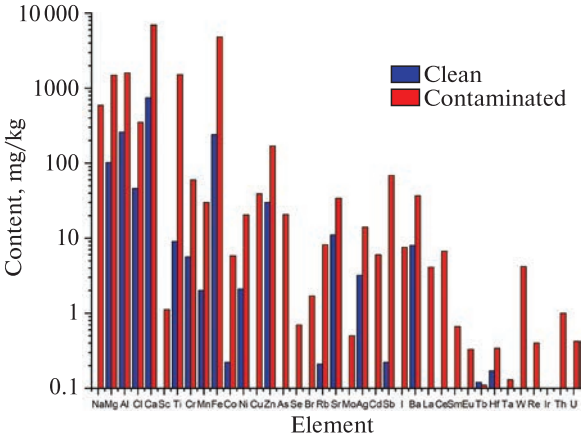


Рис. 15. Элементный состав хлопчатобумажной ткани, закрепленной на внешней поверхности международной космической станции

Сегодня нейтронно-активационный анализ на установке «Регата» реактора ИБР-2 — это мощный аналитический инструмент для решения задач экологии, геологии, нанотоксикологии, археологии, медицины и материаловедения.

МЕТОД НЕЙТРОННОЙ РАДИОГРАФИИ И ТОМОГРАФИИ

С 2018 г. на установке нейтронной радиографии и томографии проводятся систематические исследования цементных материалов (С. Е. Кичанов, Д. П. Козленко, М. Балашою, И. Ю. Зель), перспективных для строительства хранилищ радиоактивных отходов различного типа или в гражданском строительстве. Для таких материалов критически важным является наличие и характер внутренних трещин или полостей, которые могут выступать путями проникновения воды в цементное или бетонное изделие и быть причиной его разрушения. В рамках этих работ были разработаны новые подходы анализа трехмерных данных нейтронной томографии (И. Ю. Зель)

для неразрушающего микроструктурного контроля цементных материалов. Полученные методом нейтронной радиографии и томографии результаты имеют важное значение для разработки новых и совершенствования существующих технологий синтеза новых составов перспективных цементных материалов, прогнозирования влияния внешних условий (влажность климата, атмосферные осадки и др.) на их механические и физические свойства.

Приведенные примеры демонстрируют универсальность нейтронных методов ЛНФ для инноваций, с потенциалом применения в здравоохранении, энергетике, экологии и иных областях.

ПОДГОТОВКА КАДРОВ

История подготовки кадров началась практически вместе с историей Института. Уже в 1961 г. в Дубне был создан филиал НИИЯФ МГУ. Позднее, в целях системной организации работы, эффективного планирования и координации усилий всех заинтересованных участников образовательной деятельности в рамках ОИЯИ, в 1991 г. было образовано самостоятельное структурное подразделение — Учебно-научный центр. В 1993 г. в Дубну приехали первые студенты из МФТИ.

Огромные усилия для реализации идеи Учебно-научного центра (УНЦ) приложила Светлана Петровна Иванова, физик-теоретик, талантливый и энергичный организатор образования из филиала НИИЯФ МГУ. Она и стала первым директором УНЦ и возглавляла его до 2005 г. С. П. Иванова была инициатором, вдохновителем и двигателем многих важных дел, среди которых создание материальной базы УНЦ, открытие аспирантуры ОИЯИ, организация летних студенческих практик, международных школ и визитов школьников из стран-участниц.

Вице-директор ОИЯИ А. Н. Сисакян, директор УНЦ С. П. Иванова, директор ОИЯИ В. Г. Кадышевский. 1995 г.

Одновременно с формированием УНЦ в 1994 г. в Дубне открывается Международный университет природы, общества и человека «Дубна», соучредителем которого выступает ОИЯИ. Со временем в нем возникают направления подготовки в интересах научной программы ОИЯИ и базовые кафедры ОИЯИ, которых к 2025 г. насчитывается уже 7. По одной базовой кафедре действует в Казанском (Приволжском) федеральном и Санкт-Петербургском государственном университетах, в МИФИ и МФТИ, а также две базовых кафедры в филиале НИИЯФ МГУ. Студенты этих кафедр составляют большинство студентов, проходящих практики в Институте, и среди них высок процент трудоустройства в лаборатории ОИЯИ.

Развитие Института как крупного образовательного центра привело к тому, что в 2022 г. университет «Дубна» получает федеральный статус, а филиал НИИЯФ преобразуется в филиал МГУ.

Работа по подготовке кадров в ОИЯИ, как международной организации, не ограничивается страной местопребывания Института. Сегодня в распоряжении УНЦ имеется целый набор программ и инструментов в области подготовки научно-инженерных кадров для заинтересованных государств-членов и других стран, активное формирование которых пришлось на начало 2000-х гг. и продолжается до сих пор. В частности, это трехнедельные международные студенческие практики в Институте, более длительные стажировки START (очные) и INTEREST (онлайн), школы для учителей, соглашения с университетами. В ОИЯИ проходят международные стажировки для руководителей и координаторов науки и высшего образования JEMS, развивается сеть информационных центров в разных городах и странах.

Особенно заметно программы и инструменты ОИЯИ в области подготовки кадров развиваются в течение последних 20 лет в русле развития ОИЯИ и его многосторонней научной программы, а также в связи с востребованностью со стороны государств-членов и партнеров. За эти годы работу УНЦ возглавляли ученые ОИЯИ: Д. В. Фурсаев (2006–2009 гг.), С. З. Пакуляк (2009–2022 гг.), А. Ю. Верхеев (2022–2023 гг.), Д. В. Каманин (с 2023 г.)

Ниже более детально раскрываются особенности каждой из реализуемых УНЦ программ.

МЕЖДУНАРОДНАЯ СТУДЕНЧЕСКАЯ ПРАКТИКА

Программа Международной студенческой практики (МСП) реализуется в ОИЯИ с 2004 г. Инициаторами ее создания выступили Учебно-научный центр ОИЯИ и ряд вузов РФ, в частности Московский инженерно-физический институт (МИФИ) и Московский физико-технический институт (МФТИ), Польши и Чешской Республики.

По направлению полномочных представителей правительств заинтересованных стран-участниц или национальных координаторов стран — ассоциированных членов национальные группы участников прибывают в лаборатории ОИЯИ для прохождения трехнедельной практики. Отбор участников МСП из числа студентов старших курсов университетов и начинающих

Участники международной летней практики для студентов и аспирантов 2004 г. с директором УНЦ С. П. Ивановой и вице-директором ОИЯИ А. Н. Сисакяном

аспирантов проводится направляющей стороной, а модель финансирования строится с использованием грантов стран в бюджете ОИЯИ.

Программа МСП включает в себя ознакомительные лекции о проводимых в ОИЯИ исследованиях и работу над учебно-исследовательскими проектами под руководством специалистов Института в интернациональных командах. Такой формат позволяет студентам из разных стран обмениваться знаниями и опытом, развивать навыки командной работы, межкультурной коммуникации и эффективного решения порой непростых задач.

Постоянно поддерживается и обновляется база учебно-исследовательских проектов, доступная на сайте УНЦ (http://uc.jinr.ru), участники имеют возможность выбрать из этой базы несколько проектов, соответствующих их научным интересам. С 2023 г. в этот перечень добавился инженерный практикум, который предоставляет заинтересованным участникам расширенные возможности для практической работы.

Важной составляющей МСП является культурная программа, направленная на знакомство участников с историей и культурой страны местопребывания ОИЯИ. Традиционными стали и международные дни, на которых студенты имеют возможность представить свою страну, поделиться культурными и фольклорными традициями.

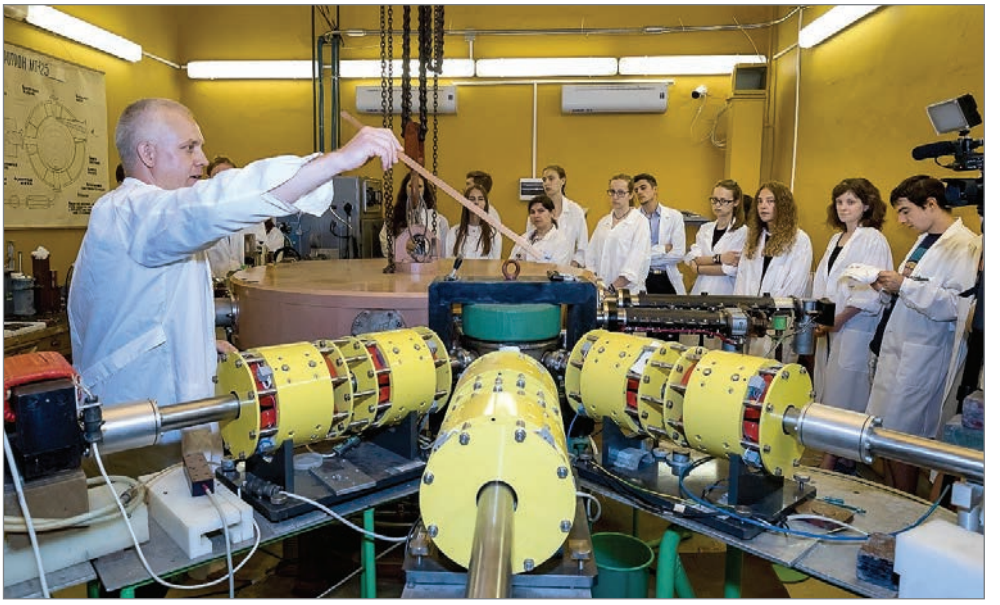
Как правило, рабочий язык практик – английский.

ГЕОГРАФИЯ МСП И ЕЕ УЧАСТНИКИ

В 2004 г., в первый год запуска, в программе МСП приняли участие 23 студента, а всего за годы реализации по 2025 г. включительно в число alumni программы вошло 1946 участников из 20 стран.

За исключением 2020 и 2021 гг., когда из-за пандемии коронавируса все очные контакты были проблематичны, интерес к МСП неизменно растет. В 2024 г. к ней присоединился Вьетнам, направив первую группу из 6 студентов; в 2025 г. их число удвоилось. Среди участников МСП по численности в лидеры вышли студенты из Южно-Африканской Республики (418 участ-

«Международное утро» в программе осенней сессии МСП 2019 г. Кубинские участницы показывают элементы популярных кубинских танцев, участник из Мексики рассказывает о традициях мексиканских праздников



Сотрудник ЛЯР Г. Каминski (Польша) проводит экскурсию на микротрон МТ-25 для участников летней сессии МСП 2018 г. из Польши, Чехии и Словакии

Совместное мероприятие для участников Международной студенческой практики и 12-й стажировки JEMS в визит-центре ОИЯИ в июне 2019 г. проводит руководитель Департамента международного сотрудничества ОИЯИ Д. В. Каманин

ников с 2007 г.) и Арабской Республики Египет (328 с 2009 г.). Эти страны рассматривают подготовку кадров в качестве одного из приоритетных направлений углубления своего участия в ОИЯИ. С самого начала для студентов из этих стран были организованы специализированные программы МСП. Примеру ЮАР и Египта последовала Сербия, также активно использующая эту программу в целях подготовки национальных специалистов в области ядерных наук и технологий. В первое десятилетие программы МСП ее активными пользователями были также студенты из Польши, Румынии и Чехии — более 50 студентов от каждой из этих стран.

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ПРОГРАММЫ МСП

Со временем общая концепция Международной студенческой практики получила дальнейшее развитие, в котором роль «застрельщиков» сыграли южноафриканские коллеги. Партнеры в ЮАР всегда подчеркивали ценность использования МСП в подготовке своих национальных научных и инженерных кадров. Стремясь повысить отдачу от своего участия в программе, несколько лет назад ЮАР выступила с инициативой проводить в ЮАР специальную Летнюю школу (SAINTS Summer School) в преддверии планового приезда в Дубну южноафриканских студентов. Основная задача программы Летней школы – предварительно познакомить студентов с научными исследованиями в лабораториях ОИЯИ и парком исследовательских установок, где предстоит проходить практику, сориентировать в выборе будущего научного проекта с учетом исследований, уже реализуемых в совместных группах учеными ЮАР и ОИЯИ, возможно, определить научного руководителя. Лекции на этой школе читаются смешанной командой лекторов из лабораторий ОИЯИ и южноафриканских партнерских организаций.

Студенты из ЮАР на практике

Первая SAINTS Summer School прошла в ЮАР в январе 2023 г. За три года она подтвердила свою полезность в повышении эффективности южноафриканского участия в МСП. Успешный опыт ЮАР не остался незамеченным и вызвал горячий интерес со стороны других стран. В итоге, после консультаций национальных координаторов участия в МСП ЮАР и АРЕ ведется подготовка к реализации в 2026 г. первой совместной программы МСП.

Начиная с 2026 г. предполагается синхронизировать в ЮАР и АРЕ отбор студентов и проведение подготовительных мероприятий к участию в МСП, которая запланирована к проведению в ОИЯИ для африканских участников во второй половине июня – начале июля.

Своими впечатлениями об участии ЮАР в программе МСП и планами на будущее поделился Рудольф Нчоду, национальный координатор участия ЮАР в МСП:

С самого начала сотрудничества ЮАР и ОИЯИ развитие человеческого потенциала было стратегическим приоритетом, сохраняющим свою актуальность и по сей день. Ключевым компонентом этой инициативы является структурированная двухэтапная программа обучения, включающая Летнюю школу в iThemba LABS и Международную студенческую практику в Объединенном институте ядерных исследований в Дубне (Россия).

Первая международная студенческая практика для южноафриканских студентов состоялась в декабре 2007 г., в ней приняли участие 23 студента из 10 университетов, затем ее перенесли на сентябрь, а сейчас она проводится в июне-июле во время зимних каникул в южноафриканских университетах.

Многие участники первых международных студенческих практик в настоящее время являются лидерами в академической и промышленной сферах в ЮАР. В частности, доктор Нтомбизихона (Зина) Ндлову Ндабени, которая в 2010 г. защитила докторскую диссертацию в Лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка и продолжает сотрудничать с исследователями ЛНФ, а также является соруководителем работ южноафриканских студентов в лаборатории. Доктора Жак О'Коннелл и Жако Оливье из Университета Нельсона Манделы участвовали в программе международных студенческих практик в 2008 г. Они сразу же увидели возможность долгосрочного сотрудничества между ЛНФ и Университетом Нельсона Манделы. С 2009 г. это сотрудничество расширилось и включает группы из Беларуси, Казахстана и Сербии. Команда Университета Нельсона Манделы и ЛНФ получила 4 исследовательских гранта Национального исследовательского фонда Южной Африки и ОИЯИ, опубликовала более 60 рецензированных статей и ежегодно принимает участие в совместных исследовательских визитах в свои учреждения.

Об опыте АРЕ в использовании возможностей МСП для подготовки египетских специалистов рассказала Джина Эль-Феки, президент Академии научных исследований и технологий АРЕ и полномочный представитель правительства АРЕ в ОИЯИ:

Студенты АРЕ начали участвовать в программе Международной студенческой практики, проводимой УНЦ ОИЯИ, и с 2009 г. в этой программе приняли участие в общей сложности 328 студентов старших курсов и аспирантов АРЕ.

Программа Международной студенческой практики предоставляет заинтересованным египетским студентам возможность быть в курсе научных исследований, проводимых в ОИЯИ, выполнять исследовательские проекты на базовых экспериментальных установках ОИЯИ под руководством квалифицированных специалистов, устанавливать контакты с потенциальными научными руководителями для будущей длительной работы в ОИЯИ с целью подготовки диссертации. Фактически, эта программа может рассматриваться как отправная точка в научной карьере многих выдающихся египетских исследователей.

Сегодня, в связи с планами нашего правительства по развитию ядерных наук и промышленности, включая атомную энергетику, мы будем использовать программу Международной студенческой практики вместе с прочими инструментами для удовлетворения растущего спроса на высококвалифицированных исследователей и инженеров. Кроме того, мы видим, что расширение и совершенствование деятельности, связанной с программой, будет способствовать развитию сети информационных центров ОИЯИ и, в более широком контексте, послужит движущей силой для укрепления международного исследовательского сообщества государств-членов ОИЯИ и стран-партнеров.

«СТУДЕНЧЕСКОЕ ЛЕТО»: ПРОГРАММЫ START И INTEREST

Студенческая программа START (STudent Advanced Research Training) была запущена в ОИЯИ в 2014 г. сначала под названием Летняя студенческая программа. Идея создания программы принадлежала УНЦ, однако необходимость подобного инструмента привлечения молодежи в Институт зрела давно. Фактически программа START «выросла» из международных студенческих практик, но, в отличие от них, она должна была давать возможность сотрудникам подразделений Института самостоятельно участвовать в отборе студентов, а студентам – выполнять научные проекты на более продвинутом уровне. Кроме того, в крупных международных научных

Участники летней сессии программы START 2022 г. у экспоната «Стрела времени» на мультимедийной выставке «Базовые установки ОИЯИ» в ДК «Мир»

центрах, например в ЦЕРН, DESY, GSI, и других уже существовали подобные программы.

Инициатива была поддержана руководством ОИЯИ в лице директора В. А. Матвеева и с энтузиазмом встречена ведущими сотрудниками Института, которые стали первыми руководителями научных работ студентов.

К участию в программе приглашаются студенты естественно-научных, инженерных и IT специальностей, окончившие 3 и более курса подготовки в вузах, а также аспиранты 1-го года обучения со всего мира. Прошедшие отбор студенты получают возможность пройти очную 6–8-недельную стажировку в ОИЯИ, где они работают над решением реальных научных и инженерных задач под руководством ведущих специалистов Института. По завершении программы участники готовят и публикуют на сайте программы отчеты о проделанной за время пребывания в Дубне работе, все отчеты публикуются в открытом доступе. За последнее десятилетие участники программы START опубликовали 907 научных работ.

Для удобства сбора заявок, их сортировки, размещения сведений о программе, автоматизации информационных рассылок и публикации отчетов участников создан сайт start.jinr.ru.

Участие в START дает возможность найти научного руководителя для будущей бакалаврской, магистерской или кандидатской диссертации, увеличивает шансы стать частью большой международной команды Института.

В качестве дополнения к основной научной составляющей программы — проектной работе, для студентов проводятся экскурсии на действующие установки Института, на мультимедийную выставку ОИЯИ, культурные мероприятия.

За время существования программы в ней приняли участие более 500 студентов из 34 стран.

Участники Летней студенческой программы 2017 г. вместе с директором музея ОИЯИ Н. С. Кавалеровой изучают историю Института (слева), а в часы отдыха едут на остров Липня вместе с участниками Международной студенческой практики (справа)

За последние десять лет наиболее многочисленные группы участников программы START прибывали из Армении, Беларуси, АРЕ, Кубы, Мексики, России и Узбекистана. Интерес к программе продолжает расти, о чем свидетельствует увеличивающееся число поступающих заявок и расширение географии участвующих в программе государств. Об успехе программы говорит и тот факт, что около 20 % участников после окончания START устраиваются на работу в Институт. Среди сегодняшних руководителей проектов START есть вчерашние участники, прошедшие эту программу в студенческие годы.

Старший научный сотрудник ЛФВЭ А. А. Апарин проводит экскурсию для участников летней сессии программы START-2025 из Беларуси, Вьетнама, Египта, Индонезии, Испании, Кубы, Мексики, России, Туниса, Турции, Узбекистана, ЮАР

В 2020 г., стремясь адаптироваться к сложным условиям ковидного локдауна, Учебно-научный центр запустил новую программу для студентов со всего мира. Она получила название INTEREST — сокращение от английского INTErnational REmote Student Training. В своем роде программа стала уникальной, а ОИЯИ — первым международным научным центром, применившим такую технологию взаимодействия со студентами.

Программа позволяет знакомиться с деятельностью Института и выполнять исследовательские проекты удаленно, не покидая собственного дома. Информационной площадкой программы стал сайт interest.jinr.ru, на котором регистрируются студенты, а также сотрудники ОИЯИ, готовые предложить научно-исследовательские проекты для выполнения в удаленном формате.

Программа помогает наладить полезные контакты, найти научного руководителя для своей квалификационной работы, а также проявить себя в роцессе работы, тем самым повысив шансы быть отобранным для участия в очных стажировках ОИЯИ, например в START. Кроме того, работа, проделанная удаленно в рамках программы, может стать подготовительной базой для будущей реализации более масштабных проектов.

За время существования программы в ней приняли участие 450 студентов из 39 стран. В качестве руководителей проектов на сайте зарегистрировано около 80 сотрудников ОИЯИ.

Неоднократное участие в программе INTEREST — достаточно распространенное явление. Абсолютный рекордсмен по этому показателю — Ле Бинь Ан, гражданин Вьетнама, в настоящее время научный сотрудник Лаборатории ядерных реакций, пять раз принимавший участие в INTEREST, поделился своими впечатлениями:

Мой путь к тому, чтобы стать официальным сотрудником Объединенного института ядерных исследований, начался с участия в программе дистанционного обучения студентов INTEREST, когда я был студентом университета.

Научные руководители с большим интересом и самоотдачей помогали мне в выполнении заданий, направленных на достижение цели обучения. Именно энтузиазм, преданность делу и профессионализм моих научных руководителей, а также моя страсть к ядерным наукам побудили меня принять участие в программе INTEREST 5 раз.

В конечном итоге, при поддержке профессора Ле Хонг Кхьема, на тот момент полномочного представителя Вьетнама в ОИЯИ, я подал заявку на работу в ОИЯИ и был принят.

Мое участие в программе INTEREST оказалось очень ценным и дало мне базовые знания для формирования физического мышления, что поддерживает мою мотивацию в текущей работе. Я считаю, что эта программа полезна для любого студента из любой точки мира, мечтающего о карьере в ядерных науках.

ПРОГРАММА СТАЖИРОВОК JEMS

СТРУКТУРА И ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОГРАММЫ

Стажировка JEMS — это пятидневная программа для организаторов международных научных и образовательных проектов, которая позволяет максимально полно представить ОИЯИ как международную межправительственную научную организацию, принципы планирования и организации научных исследований в его рамках, основные направления и результаты работ всех лабораторий Института и УНЦ в форме лекций/презентаций руководителей или ответственных сотрудников подразделений ОИЯИ, а также организовать визиты на объекты исследовательской инфраструктуры ОИЯИ, круглые столы и прямые переговоры с участниками и делегациями.

СТАЖИРОВКИ JEMS В ЦИФРАХ И ФАКТАХ

В прошедших 27 стажировках JEMS с 2017 по 2025 г. приняло участие 365 человек из 35 стран и одной международной организации (AAEA).

Участники представляли как государства-члены и ассоциированные члены ОИЯИ, так и страны, не имевшие на момент участия в стажиров-

Участники первой программы JEMS в апреле 2017 г. В центре Салем Хамди — директор международной межправительственной организации Арабского агентства по атомной энергии, открывшего в своей штаб-квартире Информационный центр ОИЯИ в 2023 г.

Закрытие 21-й стажировки JEMS с участием директора ОИЯИ Г. В. Трубникова. Среди участников — руководители информационных центров ОИЯИ в Архангельске, Владивостоке, Томске, Петропавловске-Камчатском

ке формальных связей с Институтом. Наиболее многочисленную группу — 109 участников за весь период реализации программы составили участники из страны местопребывания ОИЯИ. Без учета страны местопребывания 49 % участников программы JEMS пришлось на страны-участницы и 37 % — на ассоциированные члены, где запрос на знакомство с ОИЯИ был особен-

Подписание Соглашения о сотрудничестве между ОИЯИ и Гаванским университетом на полях стажировки JEMS-13 в сентябре 2019 г.

Среди участников стажировки JEMS-13 полномочный представитель Вьетнама Ле Хонг Кхьем, будущий полномочный представитель Египта Д. Эль-Феки, координатор по сотрудничеству с Сербией Л. Хаджиевский

но высок. Наиболее активными участниками из числа государств-членов, направивших за рассматриваемый период наибольшее количество участников, являются Вьетнам (38 человек), Болгария (29), а также Египет (18) — преимущественно в период, когда страна еще находилась в статусе ассоциированного члена. Абсолютным рекордсменом среди ассоциированных членов, пользующихся этим инструментом, является ЮАР (62 человека), за которой следует Сербия (24).

Что касается состава участников стажировок JEMS, то они представляют, прежде всего, университеты, научно-исследовательские центры, национальные и международные профильные ведомства. Причем доля университетского сообщества в этом составе существенно преобладает: за период 2017–2025 гг. в стажировках JEMS приняло участие 207 представителей университетов, что составило почти 60% от всего количества участников; на втором месте по востребованности — научные центры — 100 человек, на третьем — научная бюрократия (руководители и сотрудники национальных и международных профильных ведомств) — 58 человек.

Заметное явление программ JEMS — визиты VIP-делегаций и отдельных VIP-гостей, в том числе официальных лиц стран-участниц ОИЯИ, пожелавших лично подробно ознакомиться с Институтом. Среди них полномочный представитель Вьетнама Ле Хонг Кхьем, полномочный представитель Монголии С. Даваа, полномочный представитель Чехии М. Вышинка, член Финансового комитета Х. Дона (Куба), председатель ПКК по физике конденсированных сред Д. Л. Надь (Венгрия), член Финансового комитета К. А. Гинеску (Румыния), член Ученого совета Р. Рашков (Болгария).

В разные годы среди участников JEMS были руководители высшего уровня профильных национальных и международных организаций, например генеральный директор Арабского агентства по атомной энергии (AAEA), зам. гендиректора Национального исследовательского фонда ЮАР (NRF), президент Египетского агентства по атомной энергии (EAEA).

«НА МОЙ ВЫБОР ПРОФЕССИИ ПОВЛИЯЛ УЧИТЕЛЬ ФИЗИКИ»: РАБОТА УНЦ СО ШКОЛЬНЫМИ УЧИТЕЛЯМИ

История научных школ ОИЯИ для учителей физики началась в 2009 г., когда в Европейской организации ядерных исследований (ЦЕРН) было решено открыть национальные программы для школьных преподавателей физики с привлечением лекторов и гидов, говорящих на родных языках слушателей.

Взять на себя задачи, связанные с решением всех логистических, визовых и организационных вопросов по реализации программы на русском языке, смогли только в ОИЯИ. Руководство Института поддержало идею, поручив работу УНЦ. В 2009 г. состоялась первая Всероссийская научная школа для молодых российских учителей физики, организованная по инициативе Министерства образования и науки РФ и ОИЯИ. С лекциями на школе выступили сотрудники ОИЯИ Д. В. Фурсаев, Г. А. Шелков, С. В. Шматов, В. В. Кореньков, Р. Ледницки, Н. И. Зимин, а также коллеги из партнерских организаций. Это знаменательное событие дало начало новому направлению деятельности УНЦ и ОИЯИ: работе со школьными педагогами, как «мультипликативному фактору» в привлечении молодых кадров к научной и инженерной деятельности.

В разные годы в программе в качестве лекторов участвовали сотрудники Института ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Петербургского института ядерной физики им. Б. П. Константинова, других организаций страны местопребывания Института. Одним из основателей и руководителем учительских программ на протяжении более чем 10 лет был Мик Сторр.

Видеоконференцию ОИЯИ–ЦЕРН для слушателей научной школы ОИЯИ для учителей физики в Учебно-научном центре проводит директор УНЦ С. З. Пакуляк. 2011 г.

Участники школы для учителей из Беларуси, Индии, России и Украины со своими лучшими учениками на экскурсии в зале синхроциклотрона. Июнь 2018 г.

Существенную финансовую поддержку участникам оказывал ОИЯИ. Русскоязычные программы для школьных учителей проводились в ЦЕРН до 2019 г. За это время было проведено 12 школ, в которых приняли участие 403 учителя из Азербайджана, Армении, Беларуси, Казахстана, Молдовы, Украины, России, Швейцарии.

Уже через год после запуска русскоязычных научных школ ЦЕРН была организована аналогичная программа в ОИЯИ для учителей из государств-членов Института. С 2010 по 2025 г. было проведено 14 таких международных научных школ.

«Понравилась возможность поработать с современным оборудованием, увидеть применение физических законов в реальных экспериментах. Школа помогла мне лучше понять, как связать школьную программу с реальной жизнью и сделать уроки более интересными и понятными для учеников», — поделилась впечатлениями о школе-2025 учитель Ирина Кузьминых из Тюменской обл. (РФ). «Для меня это была не просто научно-образовательная программа, а поистине незабываемое погружение в мир настоящей науки. Я по-новому взглянула на физику, глубже прочувствовала ее масштаб и значение», — написала в своем отзыве Медина Асылбек из Алматы (Казахстан).

К настоящему времени ежегодная линейка научных школ УНЦ для учителей физики была расширена и сейчас включает три основных формата: международная научная школа для учителей из государств-членов ОИЯИ, научно-методическая школа для учителей и школа «Учителя будущего» для студентов естественно-научных факультетов, которые решили посвятить себя преподаванию физики в школах и делают первые шаги в этом направ-

Вице-директор ОИЯИ Л. Костов (Болгария) приветствует участников первой школы-семинара «Учителя будущего» для студентов физико-математических направлений — будущих школьных учителей в Доме ученых ОИЯИ. Февраль 2025 г.

Ведущий научный сотрудник УНЦ И. А. Ломаченков проводит лабораторный практикум на научной школе ОИЯИ для учителей физики Камчатского края. 2023 г.

Директор ОИЯИ Г. В. Трубников знакомит Президента России В. В. Путина с учебником «Инженеры будущего» в зале детектора MPD комплекса NICA. 2024 г.

лении. В 2025 г. впервые опробован формат школы для методистов образовательных центров Южной Африки.

Основная задача научных школ ОИЯИ — сокращение «расстояния» между школой и фундаментальной наукой, содействие распространению современных научных знаний среди широкой аудитории. Программы для учителей включают в себя не только лекции ведущих ученых ОИЯИ, но и экскурсии на экспериментальные установки, выполнение лабораторных работ, практикумы «виртуальной лаборатории» ОИЯИ, освоение материалов учебно-методического комплекса «Физика. Инженеры будущего» (под ред. Ю. А. Панебратцева (ОИЯИ)).

За время существования программ для учителей физики их участниками стали более 600 педагогов из Азербайджана, Армении, Беларуси, Болгарии, Индии, Казахстана, Молдовы, Польши, России, Украины и ЮАР. В настоящее время в формировании групп учителей, приезжающих на учительские школы в Дубну, значительную роль стали играть информационные центры ОИЯИ.

ДЕТИ — НАШЕ БУДУЩЕЕ: ПРОГРАММЫ ОИЯИ ДЛЯ ШКОЛЬНИКОВ

УНЦ ОИЯИ рассматривает работу с детьми, которая стала активно развиваться с 2009 г., как часть профориентационных мероприятий ОИЯИ, проводимых в рамках задач по подготовке квалифицированных кадров для науки.

За этот период накоплен существенный опыт реализации разнообразных программ для школьников в стране местопребывания и других государствах-членах ОИЯИ. В частности, в России при поддержке ОИЯИ регулярно проходит областной турнир по робототехнике «CyberDubna», технический хакатон «Дубна», фестиваль «Дни физики» ОИЯИ, Международная компьютерная школа, впервые проведенная в Дубне еще в 1989 г. для детей из стран-участниц ОИЯИ (Чехословакии, Германии, Болгарии) и республик СССР.

С 2021 г. УНЦ организует научную школу для слушателей Детского университета при Академии научных исследований и технологий АРЕ. Пятнадцать слушателей программы отбираются на основе конкурса из сотен заявок со всего Египта. В ОИЯИ их ждет интенсивная программа: знакомство с проектом класса мегасайенс NICA, визиты в лаборатории Института и лабораторные работы в Учебно-научном центре ОИЯИ.

«Арабская Республика Египет уделяет особое внимание в сотрудничестве с ОИЯИ вопросам образования и подготовки кадров. Хорошо известно, что подготовка кадров для современной науки, для работы со сложной научной инфраструктурой требует и современных подходов, в том числе мотивации талантливых школьников с тем, чтобы они дальше осознанно выбирали свою научную траекторию. Как говорят наши египетские партнеры, привлечь школьников в физику – это очень важная задача для Египта.

Слушатели Детского университета при Академии научных исследований и технологий Египта у Периодической системы химических элементов Д. И. Менделеева. Сентябрь 2022 г.

Одними из первых посетителей выставки «Базовые установки ОИЯИ» в Доме культуры «Мир» 15 апреля 2021 г. стали учащиеся 2 «В» класса лицея № 6 им. Г. Н. Флёрова

Команда молодых ученых, специалистов и инженеров Института на Всероссийском фестивале «Наука 0+». Москва, октябрь 2022 г.

Старший научный сотрудник ЛФВЭ М. М. Шандов читает лекцию «Ускорительный комплекс NICA: Вселенная в лаборатории» на Фестивале науки в Центральном ботаническом саду Национальной академии наук Беларуси. Минск, 6 сентября 2025 г.

А для ОИЯИ задача состоит в том, чтобы для кого-то из них Институт в будущем стал вторым домом», — отметил важность подобных школ директор УНЦ ОИЯИ Д. В. Каманин.

В НАУКУ — СО СТУДЕНЧЕСКОЙ СКАМЬИ: БАЗОВЫЕ КАФЕДРЫ ОИЯИ И СТУДЕНЧЕСКИЕ ПРАКТИКИ

Первые базовые кафедры открылись при ОИЯИ еще в 1961 г.: две кафедры физического факультета МГУ готовили специалистов в области физики элементарных частиц и атомного ядра. Сегодня при ОИЯИ работают тринадцать базовых кафедр шести российских вузов: Казанского (Приволжского) федерального университета, Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Национального исследовательского ядерного университета МИФИ, Московского физико-технического института, Санкт-Петербургского государственного университета, государственного университета «Дубна».

Первая совместная ОИЯИ—МФТИ Школа по физике кварк-глюонной материи прошла в марте 2023 г.

Программы базовых кафедр охватывают специализацию в ядерной физике, физике элементарных частиц, физике конденсированных сред, теоретической физике, технической физике и радиобиологии. Учебно-научный центр создает и координирует единый образовательный процесс для данных кафедр, привлекает к преподаванию ведущих сотрудников Института, помогает в организации научной работы старшекурсников в исследователь-

2 сентября 2022 г. в филиале МГУ в Дубне, открывшемся на базе филиала НИИЯФ, прошла встреча студентов кафедр физики элементарных частиц и фундаментальных ядерных взаимодействий с их научными руководителями, руководством и преподавателями кафедр и филиала, а также представителями дирекции ОИЯИ

ских коллективах Института. Учебные планы кафедр дополняются спецкурсами в соответствии с направлениями научных исследований ОИЯИ как базового научно-исследовательского института. Многие из студентов, проходивших практику в ОИЯИ, становятся сотрудниками Института и после окончания вуза остаются здесь работать.

28 февраля 2022 г. Правительство Российской Федерации приняло постановление о внесении изменений в устав Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, согласно которому в Дубне создан филиал МГУ. Его возглавил Э. Э. Боос. Основой для филиала стали действующее структурное подразделение НИИЯФ МГУ и две кафедры физического факультета МГУ в Дубне.

В филиале открыты магистерские программы «Фундаментальная и прикладная ядерная физика», «Физика элементарных частиц», «Методы и технологии обработки данных в гетерогенных вычислительных средах» под руководством ведущих ученых ОИЯИ Г. В. Трубникова, В. А. Матвеева и В. В. Кореньков.

В перспективе филиал ориентирован на расширение спектра направлений в сотрудничестве с химическим, биологическим, ВМК и другими факультетами МГУ. Филиал МГУ в Дубне создан по инициативе ОИЯИ и использует возможности Института как уникальной международной межправительственной организации на территории РФ по установлению связей и использованию научных результатов и лучших образовательных практик через взаимодействие с зарубежными партнерами, участие в международных проектах в целях подготовки кадров для фундаментальных исследований в государствах-членах ОИЯИ.

Учебные, производственные и преддипломные практики в ОИЯИ могут пройти студенты любых вузов соответствующих профилей обучения. Для организации практики вузы заключают с ОИЯИ договор, на основании которого Учебно-научный центр может помочь найти научного руководителя и составить индивидуальный учебный план, оформляет приказ о направлении студента на практику и бронирует место в общежитии.

Количество студентов и аспирантов, принявших участие в преддипломных и производственных практиках и специализированных школах УНЦ, стабильно растет год от года. Так, в 2022–2023 гг. ОИЯИ принял на практику 444 студента, а в 2024–2025 гг. — 785 (из них 67 человек — участники специализированных школ, проведенных УНЦ для МФТИ, ТПУ и ВШЭ). В основном это студенты российских вузов, также среди практикантов – студенты из Казахстана, Беларуси, Вьетнама, Китая, Таджикистана и других стран (данные 2025 г.).

Большую часть студентов на практику принимают лаборатории Института. Так, летом 2025 г. прошли практику в ЛИТ 62 человека, в ЛНФ — 81 человек, в ЛРБ — 7, в ЛТФ — 86, в ЛФВЭ — 188, в ЛЯП — 72 и в ЛЯР — 89 человек. Однако и инфраструктурные подразделения пользовались популярностью у студентов профильных вузов (летом 2025 г. принято 12 человек), а значит, и они могут рассчитывать на будущее пополнение квалифицированными кадрами.

Кроме студентов высших учебных заведений пройти практику в ОИЯИ могут и учащиеся колледжей. Так, с 2025 г. в ОИЯИ принимают на практику студентов филиала Подмосковного политехнического колледжа, которые в дальнейшем могут стать сотрудниками инженерных и рабочих специальностей на исследовательских и инфраструктурных объектах ОИЯИ.

ПОПУЛЯРИЗАЦИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ОИЯИ И ПРОФОРИЕНТАЦИОННАЯ РАБОТА

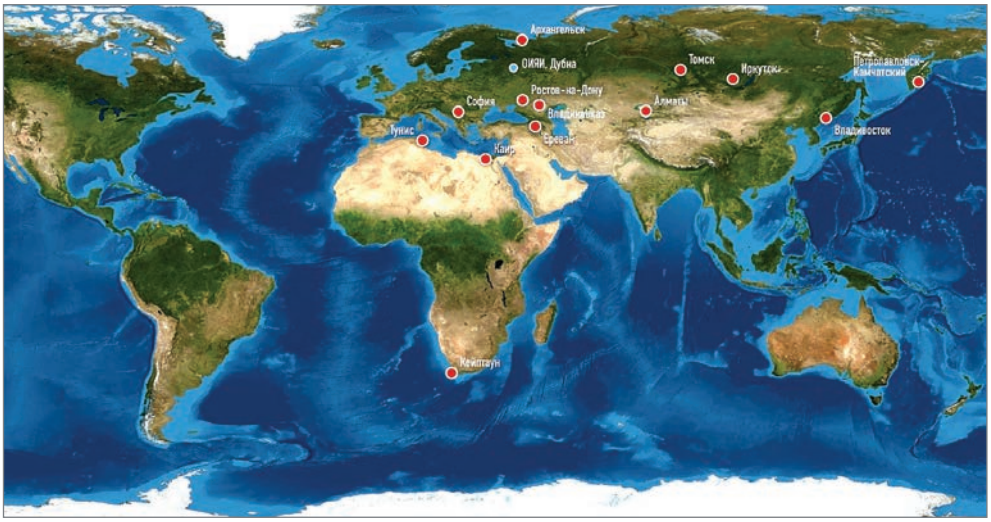
Важная часть деятельности Учебно-научного центра ОИЯИ — популяризация научных исследований и достижений ОИЯИ, а также работа по профориентации среди студентов и школьников, направленная на привлечение будущих кадров в Институт. Этими задачами с 2017 г. занимается группа социальных коммуникаций УНЦ. Она была создана с целью разработки и реализации широкого спектра научно-популярных и профориентационных мероприятий в рамках комплексной программы по формированию общественного мнения в узком целевом сегменте — среди школьников и студентов, а также учителей и родителей.

В сотрудничестве с лабораториями, базовыми кафедрами и информационными центрами ОИЯИ группа разрабатывает различные информационные материалы: выставочные, полиграфические, видео для дальнейшего распространения. Мобильная выставка о научных исследованиях, проводимых в ОИЯИ, разработанная совместно с учеными всех лабораторий ОИЯИ, путешествует по профориентационным форумам, фестивалям науки, выставкам в вузах России и других стран.

Для школ и вузов группа организует научно-популярные лекции ученых ОИЯИ, экскурсии и научные мастер-классы, погружая аудиторию в захватывающий мир исследований, открывая двери в лаборатории и вдохновляя талантливую молодежь на выбор научной карьеры, формируя тем самым будущий карьерный резерв Института.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ЦЕНТРЫ ОИЯИ КАК ИНСТРУМЕНТ ПРОДВИЖЕНИЯ НАУЧНЫХ И ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ПРОЕКТОВ ОИЯИ

Информационные центры (ИЦ) призваны формировать образовательную и информационную среду в целях продвижения в странах и регионах деятельности ОИЯИ и его многосторонней научной программы, а также программ в области подготовки кадров, организации новых научно-образовательных проектов, вовлечения молодых научно-исследовательских кадров в исследования, реализуемые в лабораториях ОИЯИ, а также научные работы в организациях партнеров.



Официально открытые информационные центры ОИЯИ на карте мира по состоянию на начало 2026 г.

ИЦ создаются в рамках специальных соглашений между директором ОИЯИ и соответствующим полномочным представителем или национальным координатором в качестве структурных подразделений выбранной базовой национальной организации (университет, крупный научный центр или академия).

Первый Информационный центр ОИЯИ был открыт 12 октября 2018 г. в Российской Федерации, в Северо-Осетинском государственном университете им. К.Л.Хетагурова (СОГУ). В 2020 г. открылся Информационный центр в Каире, в Академии научных исследований и технологий Египта, в 2021 г. — в Софийском университете им. святого Климента Охридского (Болгария) и Камчатском государственном университете им. Витуса Беринга (Россия). В 2023 г. Информационный центр ОИЯИ впервые был открыт в международной межправительственной организации — в штаб-квартире Арабского агентства по атомной энергии (ААЭА) в Тунисе.

К середине 2025 г. открыто и успешно работает 13 информационных центров ОИЯИ в 6 странах (Армении, Болгарии, Египте, Казахстане, России, Южной Африке) и одной международной межправительственной организации (ААЭА).

При том, что основные категории целевой аудитории для деятельности ИЦ в стране — это в первую очередь университетские сообщества (студенты, аспиранты, профессорско-преподавательский состав) и ученые, среди ИЦ уже накоплен интересный опыт работы и со школьной аудиторией (школьники и учителя).

Такая работа ведется в разных форматах. Например, очные школы в Дубне с посещением базовых установок и лабораторий Института, практическими и лабораторными занятиями на учебной базе УНЦ, лекциями ученых, мастер-классами по учебно-методическому комплексу «Физика.

Университет Западного Кейпа (UWC), ЮАР, 29 января 2016 г. Открытие выставки, посвященной ОИЯИ и сотрудничеству с ЮАР. Ленточку перерезают руководитель отдела международного сотрудничества ОИЯИ Д. В. Каманин и декан факультета естественных наук UWC профессор М. Дэвис-Колман

Высший институт технологий и прикладных наук (InSTEC), Куба, 1 февраля 2016 г. Постерную выставку, посвященную 60-летию ОИЯИ и 40-летию участия Кубы, открыли директор ОИЯИ академик В. А. Матвеев, ректор InSTEC Б. Гареа Мореда и полномочный представитель Республики Кубы в ОИЯИ Ф. К. Диас-Баларт

В церемонии открытия первого Информационного центра ОИЯИ в Северо-Осетинском государственном университете участвует вице-директор ОИЯИ Р. Ледницки (Чехия). Октябрь 2017 г.

Круглый стол в Северном (Арктическом) федеральном университете, посвященный развитию международного сотрудничества в партнерской сети ИЦ ОИЯИ «Меридианы ОИЯИ, широта Арктики». Руководители информационных центров из Владивостока, Иркутска, Каира, Кейптауна, ректор университета «Дубна». Архангельск, июнь 2021 г.

Инженеры будущего», с использованием образовательных он-лайн ресурсов ОИЯИ.

Сеть ИЦ ОИЯИ продолжает устойчиво развиваться. Своего официального открытия в 2026 г. ожидает Информационный центр в Институте физики Вьетнамской академии наук и технологий (Ханой). ИЦ в Ханое уже начал работу, одним из результатов которой стала успешная организация участия вьетнамских студентов в программе Международной студенческой практики в сентябре 2025 г.

Вся система ИЦ ОИЯИ становится платформой для взаимного обогащения опытом, обмена лучшими практиками налаживания научных и образовательных процессов, открывая широкие возможности международного сотрудничества. «Каждый открытый ИЦ может работать с остальными информационными центрами ОИЯИ, которые уже есть в Ростове-на-Дону, во Владикавказе, в Софии, в Каире и так далее, — и стать членом большой международной научной семьи ОИЯИ, распределенной по миру, но работающей над общими задачами», — отметил директор ОИЯИ академик Г. В. Трубников на совещании руководителей ИЦ в Архангельске в июне 2025 г.

Главным следствием реализации всех вышеописанных программ является их непосредственный вклад в выполнение уставной задачи ОИЯИ — подготовку кадров в интересах многосторонней мультидисциплинарной научной программы Института и обеспечения потребностей государств-членов в высококвалифицированных кадрах.

Для многосторонней научной программы Института образовательные программы остаются надежным источником молодых научно-инженерных кадров. Например, как уже упоминалось, 20 % участников программы START в последующие годы находят постоянную работу в лабораториях ОИЯИ.

Как показывает пример программ международных студенческих практик и INTEREST, образовательные программы ОИЯИ обладают потенциалом саморазвития и адаптации к новым условиям, открывают возможности для инновационных решений в организации новых образовательных инициатив в интересах государств-членов и партнеров.

Нельзя принизить значение коллектива alumni, формируемого из студентов, участвовавших в прошлые периоды в образовательных программах ОИЯИ, а также международного сообщества лекторов и научных руководителей проектов из лабораторий ОИЯИ и партнерских организаций в деле продвижения научной и образовательной повестки ОИЯИ в других регионах мира. Горизонтальные связи между учеными, инженерами, специалистами в разных точках земного шара, начавшими профессиональную карьеру в ОИЯИ, могут составить еще один интеграционный контур ОИЯИ, ресурс укрепления и дальнейшего развития Института.

СОДЕРЖАНИЕ

От составителей 5

ФИЗИКА ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ **7**

Создание Нуклотрона 9

Рождение релятивистской ядерной физики. Эксперименты на Нуклотроне 16

Проект ускорительного комплекса NICA 31

Криогеника и сверхпроводимость в мегапроекте NICA 38

Эксперименты на ускорительном комплексе NICA 47

Эксперимент BM@N 48

Эксперимент MPD 50

Эксперимент SPD 55

Эксперименты на Большом адронном коллайдере 57

Эксперимент ATLAS 58

Эксперимент CMS 74

Эксперимент ALICE 87

LHC Damper 91

Другие ускорительные эксперименты 93

Эксперимент COMPASS 93

Эксперимент NA45/CERES 95

Эксперименты NA48, NA48/1, NA48/2, NA62 96

Эксперимент NA64 100

Эксперименты NA49 и NA61/SHINE 102

Проект CDF 104

Проект D0 107

Эксперимент BES III 108

Эксперимент STAR 109

Эксперимент CBM 112

Эксперимент HADES 113

ФИЗИКА НЕЙТРИНО И РЕДКИХ ПРОЦЕССОВ **115**

Нейтринная астрофизика 120

Проект Baikal-GVD 120

Эксперимент TAIGA 127

Эксперименты на Калининской АЭС 130
Эксперимент νGeN 130
Эксперимент DANSS 131
Эксперименты в других научных центрах 135
Эксперимент Daya Bay 135
Эксперимент JUNO 136
Эксперименты EDELWEISS, Ricochet, CUPID-Mo 138
Эксперименты NEMO и SuperNEMO 142
Эксперименты GERDA, Majorana, LEGEND 143
Эксперимент MONUMENT 147
Эксперименты NOvA и T2K 148
Эксперимент Borexino 151
Эксперимент OPERA 152
Эксперимент Mu2e 155
Эксперименты PEN, MEG, MEG II 158
Эксперимент PIBETA 159

ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА 161

Развитие ускорительного комплекса ЛЯР 164
Проект DRIBs-I 164
Ионные источники 164
Циклотроны ЛЯР 167
Электромагнитные сепараторы ЛЯР: сверхтяжелые элементы 173
Реконструкция сепаратора ВАСИЛИСА 173
Газонаполненные сепараторы 174
Экспериментальные исследования на ускорительном комплексе ЛЯР . . 177
Открытие и исследование сверхтяжелых элементов 177
Изучение свойств радиоактивного распада тяжелых и сверхтяжелых ядер, получаемых в реакциях с ускоренными многозарядными ионами 184
Химия СТЭ 187
Изучение динамики и механизмов реакций с тяжелыми ионами при энергиях вблизи кулоновского барьера 189
Физика экзотических ядер 193
О сетевой базе знаний по ядерной физике низких энергий NRV (Nuclear Reactions Video) 201
Радиационное материаловедение 202
Образование треков и рекристаллизация 205
Перекрытие треков 207
Взаимосвязь радиационных дефектов на поверхности и объеме материала 209
Трековые мембраны, микро- и наноструктурированные материалы, получаемые на пучках тяжелых ионов 211
Модернизированный циклотрон ИЦ-100 213

Функциональные микроструктурированные материалы 215
Трековые мембраны как модельные капиллярно-пористые тела в нанофлюидике и физических экспериментах 215
Композиционные и гибридные трековые мембраны 218
Развитие инструментального парка и создание специализированной лаборатории (наноцентра) 221

НЕЙТРОННАЯ ФИЗИКА 225

Физика взаимодействия нейтронов с ядрами 229
Импульсные источники нейтронов ИБР, ИБР-30, ИБР-2, ИРЕН . . . 229
Открытие ультрахолодных нейтронов и экспериментальные исследования с ними 238
Поиск и исследование эффектов нарушения фундаментальных симметрий в нейтронно-ядерных взаимодействиях 239
Применение метода меченых нейтронов для фундаментальных исследований 241
Спектрометры и исследования на ИБР-2 244
Международная пользовательская программа ЛНФ 244
Фурье-дифрактометры и роль ЛНФ в создании методики 245
Нейтронные исследования наносистем на ИБР-2 251
Нейтронная радиография и томография на ИБР-2 и других источниках нейтронов государств-членов ОИЯИ 259
Развитие неупругого рассеяния в ЛНФ и его место в ландшафте мировых исследований 263
Холодные замедлители нейтронов 265
Нейтронные исследования конденсированных сред при воздействии высоких давлений 275

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА 281

Теория фундаментальных взаимодействий 288
Ренормализационная группа и ее разнообразные приложения 288
Квантовая электродинамика 291
Нейтринная физика 293
Квантовая хромодинамика 301
Правила сумм квантовой хромодинамики 302
Аномалии в физике адронов и тяжелых ионов 303
Эффективные теории для тяжелых и легких кварков 306
Партонные распределения в эксклюзивных и инклюзивных процессах 308
Адронная материя при экстремальных условиях 309
Теория атомного ядра 316
Ядерная структура 316
Ядерная астрофизика 321
Ядерные реакции 322
Гало-ядра 326

Теория малочастичных систем 327
Релятивистская ядерная физика 331
Исследования в смежных областях 338
Теория конденсированных сред 340
Высокотемпературные сверхпроводники и купраты 340
Конденсация Бозе–Эйнштейна и квантовые системы 342
Фракталы и малоугловое рассеяние 343
Теория самоорганизованной критичности и точно решаемые модели статистической физики 344
Модели взаимодействующих частиц и универсальность Кардара–Паризи–Чжана 345
Квантовые интегрируемые системы и суперконформные индексы . . . 346
Топологические дефекты, наноструктуры и транспортные явления . . 347
Методы квантовой теории поля в физике конденсированного состояния 350
Современная математическая физика 356
Геометрия лагранжевых подмногообразий 357
Расщепленный оператор Казимира, степени присоединенного представления и параметры Вожеля 358
Голографический подход 360
Струны, дуальность и интегрируемость 360
Суперсимметричные шварцианы 361
Суперсимметрия 362
Модели частиц и полей с высшими и непрерывными (бесконечными) спинами 362
Эффективное действие в суперсимметричных квантовых калибровочных теориях 364
Новые модели суперсимметричной механики 365
Бозонные звезды, черные дыры и проблемы в двух- и трехмерных теориях поля 367
Теории модифицированной гравитации и космология 369
Гравитационные ударные волны в общей теории относительности . . 371
Квантовая гравитация, аномалии, связь между гравитацией, термодинамикой и квантовым перепутыванием 372
Квантово-полевые вакуумные эффекты 376

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ 379

Телекоммуникационные каналы связи 383
Внешние каналы связи 384
Локальная вычислительная сеть ОИЯИ 388
Грид-среда 392
Облачные вычисления 408
Гетерогенные вычисления 411
Кластер HybriLIT 411

Суперкомпьютер «Говорун» 415
Платформа HybriLIT. 420
Интеграция ресурсов МИВК 425
Модели и пакеты программ для обработки данных 429
Генераторы событий 430
Моделирование физических процессов 430
Реконструкция траекторий заряженных частиц 431
Идентификация частиц 433
База знаний смоделированных событий Monte Carlo Data Base 434
Участие в проектах ATLAS TDAQ, EventIndex и CREST 436
Развитие методов вычислительной физики 439
Цифровая экосистема 449

РАДИАЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В НАУКАХ О ЖИЗНИ 455

Радиационная биология 461
Направления научных исследований. 461
Молекулярная радиобиология 462
Радиационная генетика и цитогенетика 465
Радиационная физиология 468
Медицинская радиобиология 471
Математическое моделирование 473
Радиационные исследования на базовых установках 475
Астробиология 479
Подготовка кадров, сотрудничество, конференции. 480

ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ 485

Прикладные исследования на комплексе NICA 493
Направления прикладных работ в ЛЯП 513
ЛИНАК: новый ускорительный комплекс для фундаментальных и прикладных исследований 513
Лазерная метрология: от физики частиц до мониторинга сейсмических колебаний земной поверхности 516
Протонная терапия 519
Радиохимические исследования 522
Позитронно-аннигиляционная спектроскопия 526
Проект TARDISS 528
Методы искусственного интеллекта в прикладных задачах 530
Нейтронные методы для прикладных задач 539
Метод меченых нейтронов. 539
Методы нейтронного и рентгеновского рассеяния 541
Нейтронно-активационный анализ. 542
Метод нейтронной радиографии и томографии 549

ПОДГОТОВКА КАДРОВ 551

Международная студенческая практика 554
География МСП и ее участники 555
Перспективы развития программы МСП 557
«Студенческое лето»: программы START и INTEREST 559
Программа стажировок JEMS 563
Структура и организация программы 563
Стажировки JEMS в цифрах и фактах 563
«На мой выбор профессии повлиял учитель физики»: работа УНЦ со школьными учителями 566
Дети — наше будущее: программы ОИЯИ для школьников 569
В науку — со студенческой скамьи: базовые кафедры ОИЯИ и студенческие практики 572
Популяризация исследований ОИЯИ и профориентационная работа . . 575
Информационные центры ОИЯИ как инструмент продвижения научных и образовательных проектов ОИЯИ 575

ДЛЯ ЗАМЕТОК

ДЛЯ ЗАМЕТОК

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

70 штрихов к портрету

Главный редактор *А. Н. Шабашова*
Редакторы: *Е. В. Калинникова, Е. В. Сабаева*
Верстка *И. Г. Андреевой, В. А. Жбанковой*
Корректоры: *Т. Е. Попеко, Е. А. Черногорова*
Допечатная подготовка фотографий *Е. П. Белолаптиковой*
Обложка *В. О. Тамоновой*

Подписано в печать 05.03.2026.
Формат 70×100/16. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 47,6. Уч.-изд. л. 43,6. Тираж 185 экз. Заказ № 61264.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.
E-mail: publish@jinr.ru
publish.jinr.ru