ФИАН

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ НАУЧНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

2025

Пётр Николаевич ЛЕБЕДЕВ

www.lebedev.ru

Канал ФИАН в MAX

Группа ФИАН ВКонтакте

Телеграм-канал ФИАН

2025 год в России был объявлен Годом защитника Отечества в честь 80-летия Победы в Великой Отечественной войне 1941–1945 годов. Огромный вклад в нашу науку внесли физики – участники и ветераны Войны. Стоит обратить внимание, что будущие нобелевские лауреаты Николай Геннадиевич Басов и Александр Михайлович Прохоров были фронтовиками. На торжественном мероприятии в ознаменование 80-летия Великой Победы, научные доклады членов РАН были посвящены сотрудникам ФИАН, которые внесли большой вклад в победу. В музыкальной части праздника, прошедшего в нашем Институте, с патриотическими композициями выступил духовой оркестр, а вокалисты исполнили песни военных лет.

Одним из знаменательных для нас событий 2025 года нужно отметить 45-летие Самарского филиала ФИАН. В Самаре создаются новые и развиваются существующие лазерные системы для широкого спектра задач, проводятся комплексные прикладные разработки в области их использования для науки и техники. Сотрудники ведут активную образовательную деятельность и работу по внедрению результатов разработок ученых в практику в интересах промышленных предприятий региона. Ежегодно в филиале проходит ставшая знаковой Всероссийская молодежная Самарская конкурс-конференция по оптике, лазерной физике и физике плазмы.

В целом год прошел для нас успешно и плодотворно. Сотрудники Физического института в 2025 году были отмечены почетными наградами и премиями. По результатам выборов новых членов Российской академии

наук в ФИАН стало больше на трех академиков и одного члена-корреспондента РАН. В 2025 году специалисты Института опубликовали более 1500 научных работ, в том числе 750 в журналах первого уровня Белого списка. В рамках подготовки топовых научных специалистов в ФИАН были подготовлены 11 аспирантов, защищены 19 кандидатских и 3 докторские диссертации.

Но самое главное – фиановцы продолжили активную работу по всему спектру научных исследований. В конце года мы представили самый мощный в России 70-кубитный квантовый компьютер на ионной платформе. В сентябре при непосредственном участии ученых Института в гидролаборатории Центра подготовки космонавтов состоялась тренировка членов космического отряда по отработке монтажа на МКС научной аппаратуры «Солнце–Терагерц», разработанной в Физическом институте. Сотрудники Долгопрудненской научной станции ФИАН подготовили и программный комплекс для обработки экспериментальных данных, получаемых прибором, установка которого на поверхность космической станции запланирована на 2026 год.

Продолжаются работы наших сотрудников на Калининской АЭС. Ученые коллаборации DANSS впервые в мире восстановили доли деления урана-235 и плутония-239 в энергетическом реакторе напрямую по спектру регистрируемых антинейтрино. Новая методика позволяет дистанционно определять состав ядерного топлива с точностью выше 3 %. Антинейтринный мониторинг становится независимым инструментом контроля как режима работы реактора, так и эволюции топливной загрузки, что является важным шагом для повышения надежности атомной энергетики и сопутствующих технологий.

ФИАН также принимает участие в работе ВНИИНМ имени академика А. А. Бочвара (ГК Росатом) по созданию магнетронной технологии получения высокотемпературных сверхпроводящих лент 2-го поколения. В рамках этой работы в 2025 году в Центре высокотемпературной сверхпроводимости и квантовых материалов им. В. Л. Гинзбурга ФИАН была создана импортозамещающая технология получения интерметаллидных мишеней для магнетронного распыления. Разработанная технология по своим свойствам не уступает лучшим западным аналогам и превосходит доступные зарубежные образцы.

Хочу отметить, что в 2025 году наряду с фундаментальными исследованиями ФИАН начал уделять существенное внимание и прикладным разработкам. Физический институт имени Петра Николаевича Лебедева по праву является одним из самых выдающихся физических институтов России и мира.

Директор ФИАН, академик РАН
Николай Николаевич КОЛАЧЕВСКИЙ

Содержание

Астрокосмический центр **13**

Происхождение и перенос воды во Вселенной: обзор ключевых научных задач обсерватории «Миллиметрон»
М. С. Кирсанова, П. В. Бакланов, Е. О. Васильев, С. А. Дроздов, Т. И. Ларченкова, С. Ф. Лихачёв, П. С. Созинова, И. В. Третьяков, А. В. Худченко, Н. Н. Шахворостова 14

Предложен новый механизм решения проблемы «центрального парсека» – вековая эволюция сверхмассивной двойной черной дыры в несферичном звездном скоплении
П. Б. Иванов, А. Г. Полнарев 16

Показано, что учет окружения Млечного Пути повышает точность расчета орбит тел на расстояниях более 100 кпк от центра Галактики
Н. Р. Аракелян, С. В. Пилипенко 18

Анализ гауссовости поляризации реликтового излучения по данным Planck и перспективы обнаружения первичной B-моды экспериментами нового поколения
К. О. Парфенов, Д. И. Новиков, А. О. Михальченко 20

Свойства инфракрасного и рентгеновского излучения остатка сверхновой в неоднородной среде
Е. О. Васильев, С. Ю. Дедиков, С. А. Дроздов 22

Заглядывая внутрь конуса излучения джета высокоэнергетического квазара 1424+240, ассоциированного с источников нейтрино
А. Б. Пушкарев, И. Н. Пащенко 24

Пущинская радиоастрономическая обсерватория им. В. В. Виткевича АКЦ ФИАН **26**

Поиск RRAT на склонениях от +42^{o} до +55^{o} с помощью нейронной сети
И. В. Эльдаров, С. А. Тюльбашев, М. А. Китаева, Г. Э. Тюльбашева 26

Пущинский многолучевой поиск пульсаров. Хронометрирование пульсаров на радиотелескопе БСА3 ФИАН с временно́й привязкой по пульсарному времени
С. А. Андрианов, В. А. Потапов, С. А. Тюльбашев, С. В. Логвиненко и В. В. Орешко 28

Многолучевой поиск пульсаров в Пущино. Яркий радиовсплеск FRB 20190203 внегалактического происхождения обнаружен на частоте 111 МГц
С. А. Тюльбашев, В. А. Самодуров, А. С. Позаненко, Е. А. Брылякова, С. А. Гребенев, И. В. Человеков, П. Ю. Минаев, Е. А. Исаев, М. В. Барков 30

О возможной генетической связи одиночных радиопульсаров с известными остатками сверхновых
З. В. Кенько, И. Ф. Малов 32

Отделение квантовой радиофизики им. Н. Г. Басова **35**

Роль плазменных волн в процессах перерассеяния в интенсивных лазерных полях
В. В. Стрелков, С. А. Бондаренко, И. В. Сметанин 36

Теория релятивистского самозахвата лазерного пучка в плазме
В. Ю. Быченков, В. Ф. Ковалев 38

Сканирование объекта на различных терагерцовых частотах с помощью широкополосного источника на основе филаментационной воздушной плазмы
Г. Э. Ризаев, Л. В. Селезнев 40

Кювета с аксиконом в жидкости для формирования кольцевых пучков накачки и селекции мод в лазерах
О. А. Бурдукова, А. Л. Коромыслов, В. А. Петухов, Ю. В. Сенатский 42

Биохимические маркеры семенной плазмы: новый взгляд на диагностику мужского бесплодия с помощью спектроскопии комбинационного рассеяния света
Е. Н. Римская, А. В. Горевой, А. С. Якимова, Н. П. Макарова, С. И. Кудряшов 44

Нетермический механизм спектрально-селективной инактивации бактерий фемтосекундным лазером среднего ИК-диапазона
С. И. Кудряшов, С. Н. Шелыгина, И. Н. Сараева, Э. Р. Толордава, В. О. Компанец 46

Простая и эффективная фемтосекундная лазерная система среднего ИК-диапазона (λ = 5…11 мкм) на основе нелинейно-оптического преобразования импульсов титан-сапфирового лазера в анизотропном кристалле
И. О. Киняевский, А. В. Корибут, Я. В. Грудцын, М. В. Ионин, Ю. М. Климачев..... 48

Суперлюминесценция когерентного УФ-излучения в углекислом газе при филаментации фемтосекундных лазерных импульсов с длиной волны 950 нм
Я. В. Грудцын, А. А. Ионин, И. О. Киняевский, Ю. М. Климачев, А. В. Корибут..... 50

Эффект допирования в наноразмерных гибридных наноструктурах для плазмонного катализа
И. В. Сметанин, А. В Усков, Н. В. Никоноров..... *52*

Нелинейное поглощение ультракоротких лазерных импульсов с длиной волны 1030 нм в полиметилметакрилате
Ю. С. Гулина, Ц. Чжу, А. В. Горевой, Н. И. Долженко, П. А. Данилов, С. И. Кудряшов 54

Широкотемпературные жидкокристаллические ферриэлектрики
В. А. Барбашов, Т. П. Ткаченко, Е. П. Пожидаев 56

Отделение оптики **59**

Создание экспоненциальной VLS-решетки МР-диапазона
А. И. Аржанов, В. В. Шульга, А. С. Шелковников, К. Е. Алексашин, А. О. Колесников, М. Д. Логачев, А. Н. Шатохин, Е. А. Вишняков, Е. Н. Рагозин, А. В. Наумов..... 60

Особенности пространственного распределения параметров плазмы в разряде, не ограниченном стенками: эффект облета анода электронами
А. В. Бернацкий, И. И. Драганов, Н. А. Дятко, И. В. Кочетов, В. В. Лагунов, В. Н. Очкин ... 62

Случайная лазерная генерация в порошке нитрата бария: аномально высокая энергетическая эффективность и регулируемая временная задержка рассеянного излучения
В. В. Воронова, А. Д. Кудрявцева, Т. В. Миронова, М. А. Шевченко, Н. В. Чернега, С. Ф. Уманская..... 64

Новый подход для решения задачи повышения чувствительности метода лазерно-индуцированной эмиссионной спектроскопии
М. А. Шевченко, А. Н. Маресев, Н. В. Чернега, С. Ф. Уманская, В. В. Воронова 66

Демонстрация времени когерентности кубита на атомах тулия до 1 минуты
Д. А. Мишин, Д. О. Трегубов, Д. И. Проворченко, А. А. Головизин, Н. Н. Колачевский 68

Индуцированные ультракороткими лазерными импульсами периодические структуры на тонких теллуридных пленках
М. П. Смаев, П. А. Смирнов, Я. С. Лебедева, К. Г. Никитин, Д. О. Кузовков, М. Е. Федянина, С. А. Козюхин, П. И. Лазаренко, И. А. Будаговский 70

Фотолюминесценция 1.4 эВ никелевых центров окраски в алмазе при низких температурах (80 ÷ 300 К)
Н. С. Курочкин, В. М. Коршунов, А. В. Грициенко, В. В. Сычев, И. В. Тайдаков..... 72

Прототип пульсоксиметра на базе однопиксельного двухканального органического светодиода
А. И. Корников, М. И. Козлов, А. А. Ващенко, А. А. Поярков, А. С. Головешкин, Е. В. Латипов, Л. С. Лепнев, В. В. Уточникова..... 74

Семикратное повышение точности люминесцентной термометрии с использованием нейронной сети
Т. А. Поликовский, В. Е. Гончаренко, В. М. Коршунов, М. Т. Метлин, Д. А. Метлина, С. В. Самсонов, Ю. А. Белоусов, И. В. Тайдаков 76

Демонстрация эффективности кудитной архитектуры для реализации прикладных алгоритмов с использованием 50-кубитного квантового компьютера
И. В. Заливако, А. С. Николаева, А. С. Борисенко, Н. В. Семенин, К. П. Галстян, А. Е. Корольков, П. Л. Сидоров, К. Ю. Хабарова, И. А. Семериков, Н. Н. Колачевский..... 78

Отделение теоретической физики им. И. Е. Тамма **81**

Возникновение порядка на фоне беспорядка в системах с диффузионной связью
Э. О. Якупов, И. С. Фатеев, А. А. Полежаев..... 82

Определение пределов устойчивости метан-воздушного пламени, стабилизированного на плоской пористой горелке при нормальном и повышенном давлении
А. Д. Морошкина, С. П. Бабина, А. А. Пономарева, Е. В. Серещенко, В. В. Мисла́вский, В. В. Губернов..... 84

Пример замкнутой системы международных расчетов в странах с формирующейся рыночной экономикой
Е. Е. Васильева, А. В. Леонидов, А. А. Пономаренко, С. А. Радионов 86

Ядра теплопроводности для неминимальных причинных операторов и обобщенная функториальность разложения Швингера–ДеВитта
А. О. Барвинский, В. Н. Ваховский, А. Е. Калугин..... 88

Многоточечные конформные интегралы
К. Б. Алкалаев, С. И. Мандрыгин 90

Эффекты сильной турбулентности для волн на глубокой воде
Е. А. Кузнецов, Е. А. Кочурин 92

Квантовый эффект увлечения и котуннелирование флаксонов в джозефсоновских контактах
А. М. Латышев, А. Г. Семенов, А. Д. Заикин 94

Отделение физики твёрдого тела **97**

Связанные состояния в континууме в многозеркальном резонаторе Фабри-Перо на основе виртуальных резонансов Фано
Н. М. Шубин, В. В. Капаев, А. А. Горбацевич..... 98

Компактная нелокальная модель для устройств молекулярной электроники
Н. М. Шубин, М. Н. Журавлев, Ю. А. Успенский, А. В. Емельянов, А. А. Горбацевич 100

Оптические свойства дисульфида олова, легированного тулием
И. И. Усманов, С. Н. Николаев, Е. А. Екимов, Д. А. Зазымкина, В. С. Кривобок 102

Эффект поворота расплава на поверхности облученного плазмой металла и его применение
А. А. Ерискин, В. Я. Никулин 104

Термоэлектрические флуктуации интерферирующих
майорановских связанных состояний
С. Ю. Смирнов 106

О топологических особенностях кирального фазового перехода в MnSi
С. М. Стишов, А. Е. Петрова, А. М. Белемук 108

Когерентные фононы субтерагерцового диапазона частот в InAs/GaSb сверхрешетках
*А. Ю. Клоков, Н. Ю. Фролов, А. И. Шарков, В. С. Кривобок, А. В. Клековкин,
Г. Н. Ерошенко, И. И. Минаев* 110

Влияние закалки на свойства композитов полупроводник – ферромагнетик
Л. Н. Овешников, А. Б. Давыдов, А. Б. Мехия, А. И. Риль, А. В. Овчаров, А. М. Харламова 112

Стабилизация гелимагнитной структуры FeP при десятипроцентном замещении
фосфора на мышьяк
*А. А. Гиппиус, А. В. Гунбин, С. В. Журенко, А. В. Ткачёв, А. В. Кошелев, И. Г. Силкин,
И. В. Морозов* 114

G-факторы электронов и дырок в перовскитных нанокристаллах $CsPbI_3$ в стеклянной
матрице в условиях сильного размерного квантования
С. Р. Меляков, Е. А. Жуков, Д. Р. Яковлев 116

Отделение ядерной физики и астрофизики **119**

Исследование энергетического спектра альфа-частиц в эксперименте по облучению
борной мишени протонным пучком на ускорителе «Прометеус»
*А. С. Русецкий, М. А. Негодаев, А. В. Огинов, В. А. Рябов, К. В. Шпаков, А. Е. Шемяков,
И. Н. Завестовская* 120

Результаты мониторинга магнитара SGR 1935+2154 в 2021–2024 гг.
В. А. Фёдорова, А. Е. Родин 122

Лазерная дифракционная диагностика фазовых микрообъектов: от фундаментальных
закономерностей к решению обратной задачи
Е. В. Паркевич, А. И. Хирьянова, С. Ю. Гаврилов, К. В. Шпаков, Т. Ф. Хирьянов 124

Количественная диагностика при искажении изображения артефактами от металлических
имплантов методами КТ и прицельной абсорбционной рентгеновской спектрометрии с
контрастирующим агентом
А. Г. Турьянский, Чжо Зо Лин, В. М. Сенков, М. З. Зиятдинова 126

Влияние ионизирующего излучения на электростатические свойства золотых наночастиц
М. Ю. Азаркин, М. Р. Киракосян 128

Фотоинактивация коронавируса SARS-CoV-2 ультрафиолетовым излучением
UVA диапазона
*И. Н. Завестовская, А. А. Фроня, М. С. Григорьева, И. М. Тупицын, Е. А. Чешев,
А. Л. Коромыслов* 130

Рождение протонов, дейтронов и трития в аргон-ядерных взаимодействиях при энергии
3.2 А ГэВ
А. Г. Багдатова, М. В. Белов, М. В. Завертяев, В. А. Козлов, П. А. Теремков, В. С. Цхай... 132

Усовершенствование модели квазиупругого интегрального сечения рассеяния нейтрино
на нуклонах и ядрах в программном пакете Geant4
А. В. Багуля, В. М. Гришин, В. А. Рябов 134

Мюонографическое обнаружение неизвестных полостей
на территории Спасо-Каменного Преображенского монастыря
*А. Б. Александров, П. А. Бабаев, А. А. Гиппиус , С. А. Горбунов, Н. С. Коновалова,
Н. Г. Полухина, Н. И. Старков, Е. Н. Старкова, Д. М. Стрекалина, М. М. Чернявский,
Т. В. Щедрина, Д. И. Зайнутдинов, С. Г. Васина, А. Е. Волков, Р. А. Воронков* 136

Происхождение излучения в окрестности сверхмассивной черной дыры
галактики NGC 1275
В. Г. Синицина, В. Ю. Синицина 138

МГД-моделирование коротирующих областей взаимодействия в гелиосфере для
исследования распространения галактических космических лучей
М. Б. Крайнев, М. С. Калинин 140

Низкотемпературный рост частиц размером менее 10 нм
при конденсации нитрата аммония
В. С. Махмутов, М. В. Филиппов 142

Обнаружение возрастания энерговыделения мюонной компоненты космических лучей
в центральной области ШАЛ с использованием сцинтилляционного годоскопа на ТШВНС
А. Л. Щепетов, Л. И. Вильданова, С. А. Мамина, В. А. Рябов, В. В. Жуков 144

Обнаружение сейсмогенных эффектов в вариациях УНЧ/ОНЧ-излучения в комплексном
исследовании литосферно-ионосферных связей перед землетрясением магнитудой 6.1
в районе Северного Тянь-Шаня
А. Л. Щепетов, В. А. Рябов, В. В. Жуков 146

Регистрация экстремально сильного Форбуш-понижения 1–10 июня 2025 года на
детекторных установках Тянь-Шаньской станции космических лучей
А. Л. Щепетов, О. Н. Крякунова, В. А. Рябов, В. В. Жуков 148

Филиалы и особые подразделения **151**

Самарский филиал ФИАН **152**

Влияние кристаллографической текстуры на формирование остаточных напряжений в
алюминиевых сплавах при лазерной ударной обработке
И. А. Бакулин, С. И. Кузнецов, А. С. Панин, Е. Ю. Тарасова 152

Удельная выходная мощность лазера на метастабильных атомах аргона
с оптической накачкой
*П. А. Михеев, М. В. Загидуллин, А. К. Чернышов, М. И. Свистун, А. П. Торбин,
Р. А. Курамшин, Н. И. Уфимцев* 154

Происхождение субструктур в фотодиссоциативной области Orion Bar в результате
изоэнтропической неустойчивости
И. А. Помельников, Н. Е. Молевич, Д. С. Рящиков, Д. И. Завершинский 156

Оптимизация оптотермического пинцета с целью уменьшения лазерного воздействия на захватываемые объекты
С. П. Котова, Н. Н. Лосевский, А. М. Майорова, С. А. Самагин, Д. В. Прокопова, В. К. Урюпина 158

Управление пространственной структурой лазерного излучения через целенаправленное возбуждение и подавление неустойчивостей
А. А. Кренц, Е. А Ярунова, Н. Е. Молевич, Д. С. Рящиков 160

Троицкое обособленное подразделение ФИАН **162**

Полупроводниковый дисковый лазер на гетероструктуре GaInP/AlGaInP с внутрирезонаторной накачкой в квантовые ямы
В. И. Козловский, Я. К. Скасырский, М. П. Фролов 162

Разработка расчетного комплекса для моделирования лазерного упрочнения поверхности материалов большим количеством импульсов
В. В. Лиханский, К. Е. Улыбышев, В. Г. Зборовский 164

Метастабильные состояния, гистерезис и медленная динамика на водном интерфейсе стекла, выявленные с помощью микроскопии генерации второй гармоники
И. А. Ковалев, И. Ю. Еремчев, М. Ю. Еремчев 166

Двухчастотная внутридоплеровская спектроскопия атомов ^{87}Rb
В. Л. Величанский, К. М. Сабакарь, А. С. Фёдоров, Е. А. Цыганков, Д. С. Чучелов, М. И. Васьковская, В. В. Васильев, С. А. Зибров 168

Черенковское дифракционное сверхизлучение как инструмент продольной диагностики ускорительных пучков
И. А. Кищин, Е. Ю. Киданова, А. С. Кубанкин 170

Подразделения при дирекции **173**

Лаборатория тяжелых кварков и лептонов **174**

Поиски больших дополнительных измерений в эксперименте DANSS
Н. А. Скробова *174*

Измерение мощности и восстановление долей деления в энергетическом реакторе с помощью антинейтрино
Н. А. Скробова 176

Монте Карло моделирование процессов с обменом тяжелым нейтрино на лептонных коллайдерах
А. Друцкой, Е. Васенин 178

Отдел физики плазмы **180**

Фокусировка убегающих электронов в плотном газе неоднородным магнитным полем
Н. М. Зубарев, М. И. Яландин, Ю. И. Мамонтов 180

Определение энергии сгустка убегающих электронов методом анализа сопутствующего микроволнового излучения
Н. М. Зубарев, М. И. Яландин, А. А. Вихарев, Н. С. Гинзбург, И. В. Зотова, Л. Н. Лобанов, В. В. Ростов, К. А. Шарыпов, В. Г. Шпак, С. А. Шунайлов 182

Лазерная генерация импульсов звука в массивных металлических образцах
Е. А. Данилов, С. А. Урюпин 184

Аномальный перенос заряда и энергии в неизотермической плазме и расчёт плотности тока в полых катодах
С. А. Урюпин, А. А. Шелковой *186*

Возбуждение поверхностной электромагнитной волны бегущим джозефсоновским вихрем
А. С. Малишевский, С. А. Урюпин 188

Формирование микрорельефа поверхности медных электродов при радиочастотном вакуумном пробое
С. А Баренгольц, Е. В. Орешкин 190

Центр высокотемпературной сверхпроводимости и квантовых материалов им. В. Л. Гинзбурга **192**

Физическое моделирование сверхпроводникового датчика газовой фазы для протяженного азотного криостата на основе результатов исследования фазовых переходов в промышленно-выпускаемых ВТСП лентах с током в условиях неоднородности теплоотвода
В. А. Мальгинов, Л. С. Флейшман 192

Рекордная околокомнатная сверхпроводимость в метастабильном гексагидриде (La,Sc) H_{6-7} с критической температурой Tc = 270…280 K при давлении 155 ГПа
А. В. Садаков, В. М. Пудалов, О. А. Соболевский, К. С. Перваков, И. А. Троян 194

Новый механизм отрицательного магнитосопротивления в слоистых антиферромагнетиках
П. Д. Григорьев, Н. С. Павлов, И. А. Некрасов, И. Р. Шеин, А. В. Садаков, О. А. Соболевский, Е. Мальцев, В. М. Пудалов 196

Высокая и зависящая от магнитного поля подвижность поверхностных носителей заряда в 3D-топологических изоляторах без объемных носителей
М. В. Пугачёв, А. Е. Борисов, А. В. Шуплецов, А. Ю. Кунцевич 198

Определение параметров сверхпроводящего и нормального состояния ферроселенидов с изовалентным замещением двумя спектроскопическими методиками
Ю. А. Алещенко, С. А. Кузьмичев, Т. Е. Кузьмичева, А. Д. Ломоносова, И. В. Морозов, А. В. Муратов, И. А. Никитченков, Е. О. Рахманов, А. И. Шилов 200

Собственный аномальный эффект Холла на поверхности магнитного полупроводника с сильным эффектом Рашбы
В. Н. Меньшов, И. П. Русинов 202

ФИАН в событиях и лицах **205**

Признание научных достижений ФИАН **207**

Выборы членов Российской академии наук – 2025 207

Действительные члены Российской академии наук
Кирилл Петрович ЗЫБИН 207

Николай Николаевич КОЛАЧЕВСКИЙ 208

Владимир Моисеевич ПУДАЛОВ 209

Член-корреспондент Российской академии наук
Михаил Андреевич ВАСИЛЬЕВ 210

Выборы профессоров Российской академии наук – 2025
Константин Борисович АЛКАЛАЕВ 212
Золотые медали РАН имени выдающихся ученых
Золотая медаль имени П. Л. Капицы РАН 213
Золотая медаль имени И. Е. Тамма РАН 213
Сотрудники ФИАН получили почетные ведомственные награды Минобрнауки 214
Премия имени И. Я. Померанчука – 2025 215
Медаль имени академика Е. Н. Аврорина Уральского отделения РАН 215
Сотрудники Самарского филиала ФИАН стали лауреатами областных
научных премий 216
Человек науки из Троицкого обособленного подразделения ФИАН 219
Действительный член Лондонского королевского общества
Аркадий Александрович ЦЕЙТЛИН 220
МОЛОДЕЖЬ ФИАН **221**
Фиановцы – стипендиаты Президента Российской Федерации 221
Молодые сотрудники ФИАН получили медали РАН 222
Персональные стипендии имени Н.Г. Басова для аспирантов ФИАН 223
Молодые ученые ФИАН – лауреаты премии KOLBA 224
Конкурс научных работ молодых ученых ФИАН **225**
Премия имени Н. Г. Басова **226**
Инновационные источники жесткого синхротронного излучения
с высокоинтенсивным фемтосекундным лазерным драйвером
и новый метод диагностики лазерного импульса 226
Взаимодействие излучения с плазмой, образованной
при многофотонной ионизации инертных газов 228
Премия имени С. И. Вавилова **230**
Спектроскопия одиночных центров окраски в алмазе с узкополосной флуоресценцией 230
Развитие корреляционных методов для исследования фотофизических процессов в
одиночных излучателях 232
Премия имени Л. В. Келдыша **234**
Тонкие аморфные пленки Re и VO_x с выдающимися характеристиками,
изготовленные методом электронно-лучевого напыления 234
Высокоэффективная генерация гармоник высокого порядка
в поле интенсивного лазерного излучения 236
Премия имени П. Н. Лебедева **239**
Двухканальный диодный лазерный спектрометр слабого поглощения
для исследования гетерогенных процессов в газе и плазме 239
Разработка новых методов и подходов к построению высокоточных моделей горения
углеводородных топлив 241

Премия имени Д. В. Скобельцына **243**
Поиски явлений за рамками Стандартной модели и мониторирование
ядерного реактора с помощью антинейтрино в эксперименте DANSS 243
Исследование механизмов генерации когерентного рентгеновского излучения в структурах
с мозаичным упорядочением при взаимодействии с релятивистскими электронами 244
Премия имени И. Е. Тамма **247**
Алгебраическая универсальность в теории Черна–Саймонса 247
Многоточечные конформные интегралы 249
Конкурс научных работ им. Н. Г. Басова 250
Сотрудник Самарского филиала ФИАН – в числе героев выставки
«Время действовать молодым» 251
Молодые фиановцы – победители областного конкурса «Молодой ученый – 2025» 252
Номинация «Естественные науки. Студент»
Исследование радиационно-индуцированных процессов в лабораторных аналогах
межзвездных льдов 252
Номинация «Естественные науки. Аспирант»
Диагностика параметров солнечной плазмы на основе анализа затухания и дисперсии
магнитогидродинамических волн 253
Исследование механизмов реакций роста, функционализации и разрушения сложных
органических молекул в условиях космоса 254
Номинация «Естественные науки. Кандидат наук»
Структурированные световые поля для наноскопии
и манипуляции нано- и микрообъектами 255
Молодые ученые и конструкторы из ФИАН 2025 года 256
МЫ В НАУКЕ **259**
Гранты и научные проекты **259**
Победители конкурсов РНФ – 2025 259
Проект «Развитие научно-технологической инфраструктуры и комбинированных
технологий адронной терапии и ядерной наномедицины на базе ускорительных
комплексов отечественного производства» 260
IX Международная конференция по сверхбыстрым оптическим явлениям
«UltrafastLight-2025» 262
6-ая Международная конференция
«Фундаментальные проблемы сверхпроводимости» – ФПС’25 264
IV Международная научная конференция
«Инновационные технологии ядерной медицины и лучевой диагностики и терапии» 266
XLIX Вавиловские чтения 267
Басовские чтения – 2024 267

Симпозиум «Перспективные бинарные технологии протонной и ионной терапии и диагностики» – 2025 ... 268
ФИАН на «Фотонике – 2025» ... 269
ФИАН в День российской науки ... 273
День света в год квантовой науки ... 274
VII Международная молодежная школа «Инновационные ядерно-физические методы высокотехнологичной медицины» ... 276
Школа молодых ученых «Быстропротекающие электровзрывные, электронные и электромагнитные процессы в импульсной электронике и оптоэлектронике» (БПИО-2025) 278
XXIII Всероссийская молодежная Самарская конкурс-конференция по оптике, лазерной физике, и физике плазмы, посвященная 45-летию Самарского филиала ФИАН ... 279
ЗА ГРАНЬЮ НАУКИ **281**
Юбилейно-торжественные страницы 281
45 лет Самарскому филиалу ФИАН ... 281
Открытие таблички в честь Н. Г. Басова ... 283
Единица порядочности в науке «один Тамм» – 130 лет со дня рождения Игоря Евгеньевича Тамма ... 284
Воспитание науки **285**
Экскурсии школьников и абитуриентов в Самарском филиале ФИАН ... 285
XX Международная молодежная научная конференция «Королёвские чтения: школьники» ... 286
ФИАН на Дне открытых дверей МФТИ 2025 ... 287
6-я Всероссийская викторина юных физиков ОФН РАН ... 288
Летняя практика «Прометеус» для учащихся профильных классов общеобразовательных учреждений Российской Федерации ... 289
Школьная секция XXIII Всероссийской молодежной Самарской конкурса-конференции по оптике, лазерной физике и физике плазмы ... 290
ФИАН на Троицкой школе преподавателей физики – 2025 ... 291
Центр межолимпиадной подготовки ФИАН в 2025 году 292
Вокруг науки и не только **297**
Юбилей Великой Победы в ФИАН ... 297
Космонавты открыли новые горизонты в Пущинской обсерватории ... 299
Новую станцию метрополитена назвали в честь первого директора ФИАН ... 300
От научного к популярному **302**

Астрокосмический центр ФИАН

АКЦ ФИАН

ПРАО

Пущинская радиоастрономическая обсерватория имени В.В. Виткевича АКЦ ФИАН

Астрокосмический центр

Происхождение и перенос воды во Вселенной: обзор ключевых научных задач обсерватории «Миллиметрон»

М. С. Кирсанова, П. В. Бакланов, Е. О. Васильев, С. А. Дроздов, Т. И. Ларченкова, С. Ф. Лихачёв, П. С. Созинова, И. В. Третьяков, А. В. Худченко, Н. Н. Шахворостова

Вода является одной из важнейших молекул на Земле, обеспечивая протекание разнообразных химических, включая метаболические, реакций, необходимых для возникновения и поддержания жизни. В 2025 году коллектив из АКЦ ФИАН представил систематическое изложение проблем образования воды в космических объектах — от Солнечной системы до далекой Вселенной. В результате проведенного обзора была разработана основа программы наблюдений воды для перспективной российской обсерватории «Миллиметрон».

В работе выполнен обзор современного состояния проблемы формирования молекул H_2O и их переноса между различными объектами межзвездной среды, протозвездными оболочками и дисками, кометами и протопланетными телами. На основе сопоставления астрохимических моделей, лабораторных данных и ограничений наблюдательной астрономии сформулирован набор приоритетных задач для космической субмиллиметровой обсерватории «Миллиметрон», решение которых недостижимо в полном объеме с Земли из-за атмосферного поглощения водяным паром. Задача о происхождении и переносе воды во Вселенной особенно актуальна в контексте гипотезы о возможном наследовании Землей воды и пребиотических молекул с ранних стадий эволюции протосолнечного газопылевого облака.

Ключевое научное достижение состоит в разработке логически связанной программы наблюдений воды в космосе, ориентированной не на отдельные объекты, а на получение статистически значимых выборок и проверку механизмов образования и разрушения H_2O. В качестве диагностических линий и параметров были выделены: (i) набор линий «холодной», «теплой» и «горячей» воды в диапазоне 500…2700 ГГц, включая изотопологи $H_2{}^{18}O$, $H_2{}^{17}O$, HDO и D_2O; (ii) отношения изотопологов (HDO/H_2O, D_2O/H_2O) как индикаторы путей образования льда на пыли; (iii) соотношение орто/пара воды как маркер условий формирования воды; (iv) сопутствующие трассеры среды (OH, OH+, H_2O+, H_3O+, [OI], [CII], CO, SiO и др.) для ограничения плотности, температуры и скорости ионизации.

В работе обоснована необходимость картирования линий воды в областях звездообразования и ударных волнах. Благодаря трехкратному превосходству в угловом разрешении по сравнению с телескопом Herschel и высокой чувствительности, позволяющей детектировать линии на уровне 10…100 мК, «Миллиметрон» сможет впервые получать карты распределения воды и ее изотопологов (HDO, $H^{18}O$) в компактных объектах. Систематическое наблюдение оптически тонких линий изотопологов позволит снизить неопределенность, связанную с самопоглощением и сложной формой профилей основных линий H_2O, а также уточнить вклад водяного льда в так называемую проблему «дефицита кислорода» в межзвездной среде. Эта проблема заключается в несоответствии между обилием кислорода в космосе и наблюдаемым количеством воды. Среди возможных объяснений, которые «Миллиметрон» сможет проверить: (i) слишком короткая (менее 10^5 лет) протозвездная стадия для полного вымерзания кислорода; (ii) эпизодические вспышки аккреции, испаряющие ледяные мантии; (iii) присутствие крупных пылинок (> 1 мкм), на которых поверхностные реакции идут менее эффективно; (iv) десорбция воды под действием УФ-излучения и космических лучей.

Существуют два основных пути синтеза воды: низкотемпературный ионно-молекулярный (в газе) и реакции на поверхности пылинок (основной канал образования воды в плотных облаках, см. Рисунок 1 [1]). Наблюдения на «Миллиметроне» предоставят наблюдательные тесты для этих каналов для будущих выборок объектов.

На Рисунке 2 показана спектральная линия тяжелой воды HDO в области звездообразования, полученная в наблюдениях на телескопе APEX [2]. Наблюдательные признаки присутствия дейтерированной воды на ранних стадиях образования звезд показывают ценность высокочувствительной спектроскопии изотопологов воды для изучения происхождения воды в протопланетных системах. Обнаружение воды в протопланетных дисках (TW Hya, V883 Ori) в наблюдениях на ALMA и Herschel показало, что вода в дисках может прямо наследоваться из протозвездного облака, о чем свидетельствует сходство изотопного состава ($HDO/H_2O \sim 2.3 \times 10^{-3}$) в диске V883 Ori и кометах. Это подтверждает гипотезу, что вода в Солнечной системе имеет досолнечное происхождение. Однако проблема происхождения земных океанов остается открытой: соотношение HDO/H_2O в воде Земли близко к значению, найденному в комете 103P/Hartley 2, но отличается от данных по другим кометам и астероидам.

Реализация программы на обсерватории «Миллиметрон» позволит получить статистически значимые данные о содержании воды в протозвездах, дисках и кометах, картировать их структуру в линиях воды и изотопологов, а также провести диагностику физических условий в этих объектах. Это приблизит нас к пониманию того, как вода образуется и распространяется во Вселенной и попадает на формирующиеся планеты.

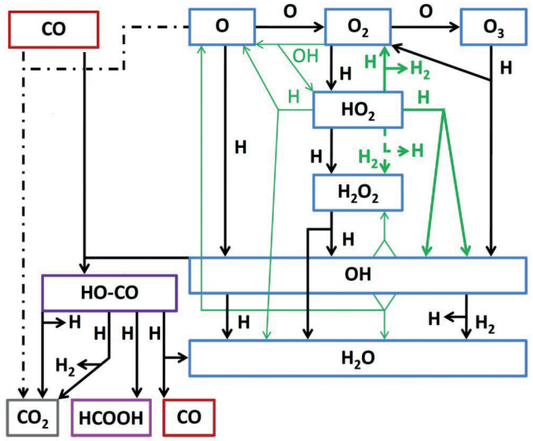


Рисунок 1. Схема реакций образования воды на поверхности межзвездной пыли

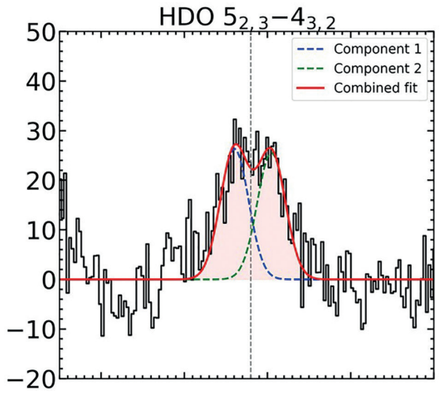


Рисунок 2. Пример спектральной линии полутяжелой воды HDO в области звездообразования. У линии имеются две компоненты, возникающие в молекулярном газе с разными скоростями [2]

Результаты опубликованы:

1. Происхождение и перенос воды во Вселенной. / М. С. Кирсанова, П. В. Бакланов, Е. О. Васильев, [и др.]. // Успехи физических наук. – 2025. – Т. 195. – № 3. – С. 294-310. – DOI 10.3367/UFNr.2024.08.039744.
2. Kirsanova, M. S. Deuterated Water Abundance in the Young Hot Core RCW 120 S2 / M. S. Kirsanova, A. A. Farafontova. // Astronomy Letters. – 2025. – Vol. 51. – Iss. 2. – P. 111-117. – DOI 10.1134/S1063773725700252.

Астрокосмический центр

Предложен новый механизм решения проблемы «центрального парсека» – вековая эволюция сверхмассивной двойной черной дыры в несферичном звездном скоплении

П. Б. Иванов[1], А. Г. Полнарев[2]

[1]Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, [2]Лондонский университет королевы Марии

В работе найден новый механизм решения т. н. «проблемы центрального парсека» – орбитальной эволюции сверхмассивной двойной черной дыры на масштабах меньше или порядка одного парсека. На этих масштабах стандартный механизм, обусловленный динамическим трением, является неэффективным. Новый механизм определяется возможностью формирования сильно вытянутых орбит за счет возможной несферичности центрального звездного скопления с их последующей циркуляризацией за счет излучения гравитационных волн.

Образование тесных сверхмассивных двойных черных дыр (СМДЧД) является следствием процесса слияния галактик и последующей орбитальной эволюции СМДЧД к центру образовавшейся галактики за счет динамического трения. Однако, когда расстояние между двумя ЧД становится достаточно малым, динамическое трение неэффективно. С другой стороны, эти расстояния еще слишком велики для того, чтобы система могла слиться за хаббловское время за счет излучения гравитационных волн (ГВ). Возникает проблема формирования источников ГВ такого типа, которая получила условное название – «проблема центрального парсека». В работе предложено новое возможное решение этой проблемы, определяемое несферичностью центрального звездного скопления (ЦЗС), влияющей на орбиту СМДЧД. Была проанализирована модельная задача, в которой СМДЧД является гравитационно-связанной и двигается по приблизительно кеплеровской орбите, которая медленно эволюционирует за счет влияния внешнего возмущающего гравитационного потенциала несферичного ЦЗС и других факторов, и было показано, что вследствие воздействия возмущающего потенциала орбита может приобрести большой эксцентриситет, что, в свою очередь, приводит к эффективной орбитальной эволюции за счет излучения ГВ. Эта задача возникает в следующей физической постановке. Предполагалось, что отношение масс черных дыр мало, а распределение массы звезд внутри радиуса влияния более массивной черной дыры подчиняется стандартному закону Янга. В этом случае ожидается, что характерный размер орбиты достаточно быстро уменьшится за счет влияния динамического трения до того радиуса, внутри которого начальная масса звезд является величиной порядка массы менее массивной черной дыры. Затем, за несколько динамических времен звезды внутри орбиты выбросятся из ЦЗС за счет воздействия гравитационного поля черной дыры и стандартная орбитальная эволюция остановится. Несферичность внешней по отношениию к орбите СМДЧД части ЦЗС рассматривалась в рамках квадрупольного приближения, в котором, вообще говоря, есть две существенные независимые компоненты возмущающего гравитационного потенциала, определяемые сферическими гармониками с азимутальными числами m = 0 и 2. Первая компонента приводит к обычной эволюции фон Цейпеля–Лидова–Козаи, в которой изменение углового момента орбиты, а следовательно и ее эксцентриситета, ограничено требованием того, что сохраняется проекция углового момента на ось, перпендикулярную плоскости симметрии задачи. Основное внимание было уделено орбитальной эволюции за счет присутствия второй компоненты потенциала, в течение которой могут изменяться все три компоненты углового момента и орбита может, в принципе, стать настолько вытянутой, что окажутся важными эффекты, связанные с излучением ГВ. Так как вековые уравнения, описывающие орбитальную эволюцию этого типа, не обладают какими-либо интегралами движения за исключением гамильтониана, для их аналитического анализа был предложен новый метод «квазисохраняющихся интегралов движения». Суть его состоит в том, что сначала были найдены «сингулярные» аналитические решения, в которых в некоторый начальный момент времени наклонение орбиты к плоскости симметрии формально стремилось к нулю, а эксцентриситет считался малым, но конечным, и было показано, что эволюция этого состояния в дальнейшем приводит к орбите с эксцентриситетом, формально равным единице, за некоторое конечное характерное время. Рассмотрение изменения параметров этого решения со временем позволило аналитически описать, в рамках специфической теории возмущения, как влияние малого, но конечного угла наклона, так и других возмущающих факторов, из которых наиболее важным является Эйнштейновская прецессия угла линии апсид, и приблизительно вычислить крайне существенное, для наших целей, отличие максимального эксцентриситета за один цикл эволюции от единицы. В дальнейшем было численно показано, что и орбиты с большим начальным углом наклона, рассмотренные в течение достаточно длительного времени эволюции, имеют транзиентные периоды, качественно описываемые аналитической теорией.

Показано, для типичных параметров ЦЗС, что рассмотренная вековая эволюция может привести к формированию очень вытянутых орбит (см. Рисунок 1), с периастром порядка нескольких гравитационных радиусов центральной черной дыры, за время меньше или порядка нескольких миллиардов лет. Черные дыры, находящиеся на таких орбитах затем относительно быстро сливаются за счет интенсивной потери орбитальной энергии вследствие излучения ГВ. Отличительной особенностью источников ГВ, образовавшихся за счет нашего эффекта, является то обстоятельство, что эксцентриситет может оставаться существенным на всех этапах слияния.

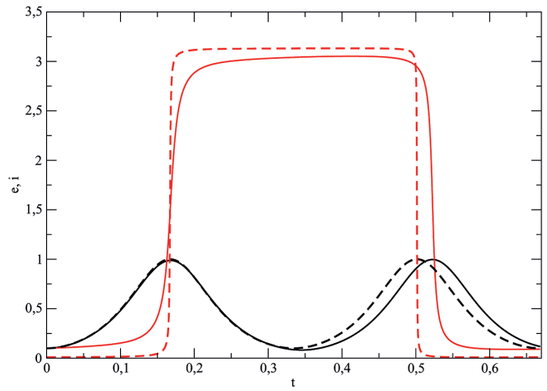


*Рисунок 1. Пример эволюции эксцентриситета **e** (черные линии) и угла наклона орбиты **i** (красные линии) в нашей модели в зависимости от характерного «медленного» времени τ. Сплошные и штриховые линии отличаются начальным значением угла наклона*

Результаты опубликованы:

1. Ivanov, P. B. Evolution of a supermassive binary black hole in a nonspherical nuclear star cluster. / P. B. Ivanov, A. G. Polnarev. // Physical Review D. — 2025. — Vol. 112. — Iss. 4. — Art. ID. 043030. — 22 pp. — DOI 10.1103/mb3k-z5b9.

Астрокосмический центр

Показано, что учет окружения Млечного Пути повышает точность расчета орбит тел на расстояниях более 100 кпк от центра Галактики

Н. Р. Аракелян, С. В. Пилипенко

Мы проанализировали эволюцию гравитационного потенциала аналогов Млечного Пути (МП) в космологических численных моделях Местной Группы (МГ) галактик из проекта HESTIA с целью количественно оценить роль окружающей среды в изменениях потенциала. На расстояниях более 100 кпк от центра МП несферическая часть потенциала демонстрирует существенное влияние МГ: игнорирование распределения масс вне вириального радиуса МП приводит к ошибкам потенциала выше 20 %. Учет МГ приводит к изменению угловых моментов объектов, вращающихся вокруг аналогов МП.

Знание потенциала Галактики важно для изучения многих аспектов астрофизики и космологии. В литературе широко используется несколько статических моделей потенциала. Однако простые стационарные (независимые от времени) потенциалы недостаточны для отслеживания орбитальной эволюции субструктур внутри Млечного Пути (МП). Поскольку МП содержит относительно большой спутник, Большое Магелланово Облако (БМО), одним из усовершенствований модели галактического потенциала является введение движущегося аналога БМО в модель со статическим потенциалом.

Известно, что БМО также существенно возмущает гало МП. Считается, что эти возмущения гало темной материи (ТМ) развиваются со временем и зависят от расстояния, поэтому их нельзя описать статической моделью с движущимся БМО, и требуются дальнейшие улучшения модели.

С другой стороны, космологические симуляции показывают, что гравитационные потенциалы галактик могут быть даже гораздо более сложными. В иерархической модели формирования галактик аккреция материи осуществляется крупномасштабными потоками, и это способствует несферическому распределению плотности и углового момента в формирующемся гало. Моделирования в рамках парадигмы ΛCDM предсказывают, что ~90 % гало ТМ являются существенно трёхосными и имеют измеримое вращение фигуры. Диссипативный коллапс холодного газа и образование звездных дисков изменяют форму гало, делая их сплющенными или почти сферическими, но позволяя им оставаться трехосными на промежуточных радиусах и вытянутыми на больших радиусах. На основе космологического моделирования галактик типа МП было показано, что орбиты звезд не могут быть надежно восстановлены в статических моделях потенциала, если реальная система испытывает слияния с соотношением масс 1:8 или выше. Альтернативой является использование моделей с эволюционирующим потенциалом с использованием разложения в некоторые базисные функции.

Исследования траекторий различных объектов, вращающихся вокруг гало МП с современной точностью, достижимой в наблюдениях Gaia, требуют сложных нестационарных моделей галактического потенциала. В этой работе мы используем ограниченные симуляции из проекта HESTIA для исследования гравитационного потенциала аналогов МП. Наша цель — количественно оценить изменения потенциала со временем и роль окружающей среды (т. е. МГ) в этих изменениях. На основе этого можно предсказать, какими могут быть эти изменения для нашей реальной Галактики.

Мы используем код AGAMA для расчета разложения гравитационного потенциала на сферические гармоники за последние 6 млрд. лет космической эволюции. Основываясь на результатах аналогичного исследования, проведенного для гало ТМ в неограниченном моделировании, мы ограничиваем разложение до $\ell_{max} = 4$.

Простая оценка показывает, что несферическая часть гравитационного потенциала, создаваемого МГ, может быть сопоставима с той, что создается БМО на расстояниях 100…200 кпк.

Мы обнаружили, что на расстояниях $r \geq 100$ кпк от центра МП несферическая часть потенциала демонстрирует существенное влияние окружения: игнорирование распределения масс вне вириального радиуса МП приводит к ошибкам выше 20 % в квадруполе потенциала на этих расстояниях. Учет окружающей среды приводит к заметному изменению угловых моментов объектов, вращающихся вокруг аналогов МП. Из Рисунка 1 видно, что для начального радиуса орбиты 50 кпк нет существенной разницы в изменении углового момента при включении окружения. При 100 и 150 кпк влияние более выражено. Сферические гармоники потенциала существенно меняются в течение последних 6 млрд. лет.

Мы считаем, что вариации потенциала при r ≥ 30 кпк вызваны движениями спутников МП и галактик МГ. Мы также предсказываем, что несферичность реального потенциала МП должна расти с расстоянием в диапазоне $r_{vir} < r < 500$ кпк (где r_{vir} – вириальный радиус), поскольку все реализации моделируемых объектов типа МП демонстрируют такую тенденцию.

Полученные результаты важны для анализа орбитальных движений спутников и шаровых скоплений, для объяснения «плоскостей спутников» и других задач, связанных с формой потенциала Галактики.

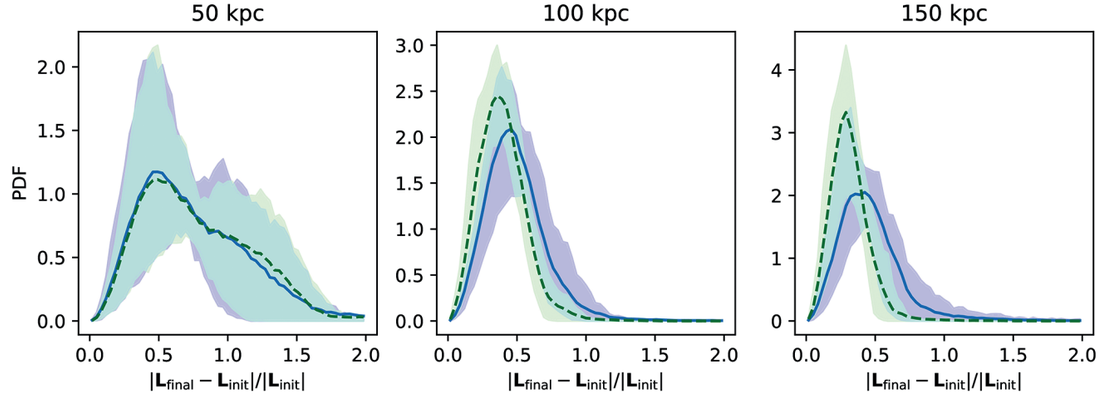


Рисунок 1. Распределение изменения углового момента пробной частицы после 6 млрд. лет эволюции для трех начальных радиусов (слева направо – 50, 100 и 150 кпк). Синие сплошные линии показывают среднее по реализациям с учетом окружения до $r_{max} = 3$ Мпк, зеленые пунктирные линии соответствуют $r_{max} = r_{vir}$ (без учета окружения). Затененные области показывают разброс по реализациям от 10 до 90 %

Результаты опубликованы:

1. Variable gravitational potential of Milky Way analogs in the HESTIA suite. / Naira R. Arakelyan, Sergey V. Pilipenko, Stefan Gottlöber, [et al.]. // Physical Review D. – 2025. – Vol. 112. – Iss. 4. – Art. ID 043515. – 14 pp. – DOI 10.1103/m2tm-tbm4. – arXiv:2412.18880.

Анализ гауссовости поляризации реликтового излучения по данным Planck и перспективы обнаружения первичной B-моды экспериментами нового поколения

К. О. Парфенов, Д. И. Новиков, А. О. Михальченко

Реализован новый метод анализа гауссовости поляризации реликтового излучения (РИ), связанный с изучением статистики трех типов неполяризованных точек на небе (сёдла, клювы и кометы). Отношение чисел точек разных типов к их полному числу не зависит от спектра мощности и отражает только распределение фаз, то есть (не)гауссову природу сигнала. Их же полное число зависит от корреляционного масштаба ℓ_{max}. Анализ данных эксперимента Planck показал сильную негауссовость выделенного сигнала для E- и B-мод поляризации практически на всех угловых масштабах, то есть, что в сигнале присутствует неубранный поляризованный негауссовый фон или карта искажена гравитационным линзированием.

Одной из главных задач современной наблюдательной космологии является обнаружение B-моды линейной поляризации реликтового излучения, которое подтвердит инфляционную модель ранней Вселенной. Установление природы наблюдаемой B-моды поляризации крайне важно для того, чтобы отличить ее первичную космологическую компоненту от поляризованных фонов различного происхождения, а также от искажений карт поляризации ввиду гравитационного линзирования.

Отличительной особенностью первичных скалярных и тензорных возмущений, возникших на стадии инфляции, является их гауссовость. Гауссовость наблюдаемой поляризации реликтового излучения является необходимым условием для подтверждения того, что анализируемый сигнал дошел до нас с поверхности последнего рассеяния и не был вызван другими источниками излучения или посторонними эффектами.

В свете текущих и будущих экспериментов (SO, LiteBIRD) по измерению B-моды критично необходимы методы анализа карт поляризации, которые обладают наибольшей чувствительностью к негауссовым проявлениям двумерных случайных тензорных полей.

В работах [1, 2] был реализован один из наиболее чувствительных тестов на гауссовость в применении к поляризации реликтового излучения, связанный с изучением статистики неполяризованных точек на небе (сёдел, клювов и комет, Рисунок 1). Детальное исследование данных эксперимента Planck показало сильную негауссовость выделенного сигнала как для E- моды, так и для B-моды поляризации практически на всех угловых масштабах, которую мы связываем с остаточным загрязнением от галактического фона, анизотропным шумом и возможной утечкой мощности из E-моды в B-моду.

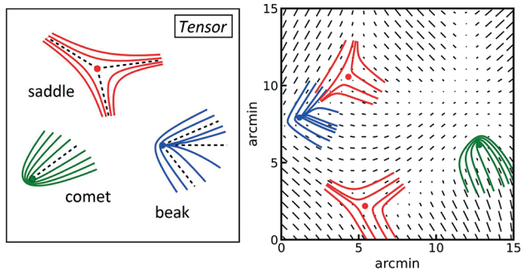


Рисунок 1. Три типа неполяризованных точек на карте поляризации: седло, комета и клюв

Статистика неполяризованных точек обеспечивает многогранный и высокочувствительный тест на гауссовость поляризации реликтового излучения. Этот метод предоставляет важнейшую информацию для диагностики происхождения регистрируемых сигналов [3].

Применение данной методики будет иметь решающее значение для проверки природы любого обнаруженного сигнала B-моды путем подтверждения его гауссова характера и исключения значительного загрязнения от галактического фона. Наше программное обеспечение [4], находящееся в открытом доступе, может помочь в проведении эффективной и быстрой проверки гауссовости карт поляризации для экспериментов как с неполным, так и с полным обзором неба.

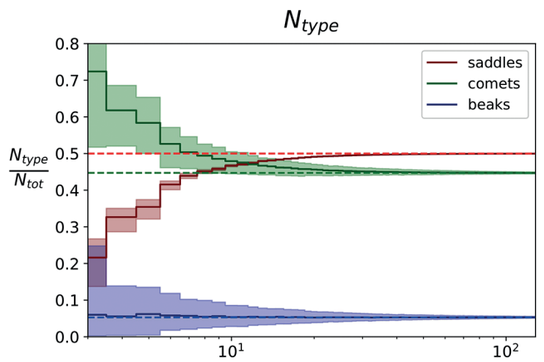


Рисунок 2. Ожидаемые относительные поверхностные плотности трех типов точек (седло, комета и клюв) для чистого от фонов сигнала в инфляционной Вселенной в зависимости от углового масштаба

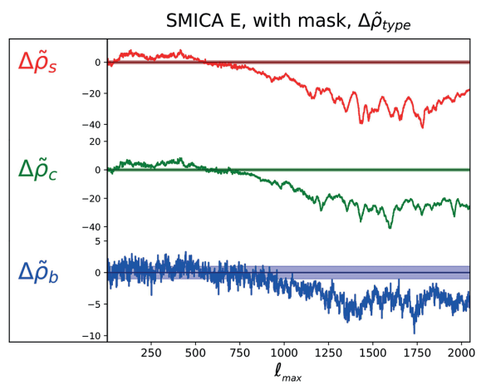


Рисунок 3. Отклонение поверхностной плотности точек трех типов (седло, комета и клюв) в данных Planck от ожидаемой в случае чистого сигнала в инфляционной модели Вселенной

Результаты опубликованы:

1. Novikov, D. I. Gaussianity test of Planck CMB polarization data using the statistics of unpolarized points. / D. I. Novikov, K. O. Parfenov. // Physical Review D. – 2025. – Vol. 111. – Iss. 6. –Art. ID 063536. – 12 pp. – DOI 10.1103/physrevd.111.063536.
2. Parfenov, K. O. Probing CMB polarization Gaussianity with the statistics of unpolarized points: Non-Gaussianity of Planck data and prospects for future B-mode measurements. / K. O. Parfenov, D. I. Novikov, A. O. Mihalchenko. // Physical Review D. – 2025. – Vol. 112. – Iss. 10. – Art. ID 103537. – 13 pp. – DOI 10.1103/zvyc-rxd3.
3. Новые горизонты исследований реликтового излучения Вселенной. / Д. И. Новиков, А. Г. Дорошкевич, Т. И. Ларченкова, [и др.]. // Успехи физических наук. – 2025. – Т. 195. – № 10. – С. 1047–1061. – DOI 10.3367/UFNr.2025.08.040006.
4. Репозиторий https://github.com/koparfenov169-lab/CMB-polarization-Gaussianity-test.

Свойства инфракрасного и рентгеновского излучения остатка сверхновой в неоднородной среде

Е. О. Васильев, С. Ю. Дедиков, С. А. Дроздов

Существующие оценки темпов образования и разрушения межзвездной пыли в галактиках демонстрируют значительное расхождение – разрушение превышает производство. Вместе с тем, оценки скорости разрушения пыли основывались на исследовании динамики сильных ударных волн остатков сверхновых в однородной среде. Впервые рассмотрено разрушение межзвездной пыли при расширении остатка сверхновой (СН) в неоднородной (облачной) среде. Исследована эффективность разрушения пыли и связанные с ним особенности эмиссии остатка СН.

Оценки темпов разрушения и образования пыли в нашей Галактике и других галактиках демонстрируют существенное расхождение в пользу разрушения. Несоответствие этих оценок является важной проблемой в нашем понимании процессов в межзвездной среде в масштабах галактик.

Проведено численное трехмерное моделирование эволюции остатка сверхновой с учетом самосогласованного взаимодействия между газом и межзвездной пылью. В результате выявлено, что разрушение межзвездной пыли, нагребённой расширяющейся оболочкой СН, оказывается менее эффективным при эволюции в неоднородной среде: до двух раз больше пыли выживает в более облачной среде по сравнению с однородной средой. На Рисунке 1 приведена эволюция массы пыли в остатке СН в зависимости от степени неоднородности среды (дисперсии логарифма плотности σ).

При эволюции остатка СН в однородной среде пыль эффективно разрушается в горячем газе либо переходит в более холодные фазы на временах нескольких характерных времен охлаждения (для средней концентрации газа $\langle n \rangle \sim 1$ см$^{-3}$, $t \sim 100$ тыс. лет), поэтому в горячей фазе пыли практически не остается. В неоднородной среде в горячей фазе присутствует небольшая доля крупных пылинок за счет продолжающегося поступления из более холодных и плотных фрагментов.

Особенности эволюции пыли в остатке СН в неоднородной среде могут проявляться в наблюдениях: в инфракрасном диапазоне (в пылевом континууме и в линиях металлов) и в рентгеновском излучении горячего газа, охлаждающегося на пыли. Расчет светимости остатка показал, что отношение светимостей в инфракрасном и

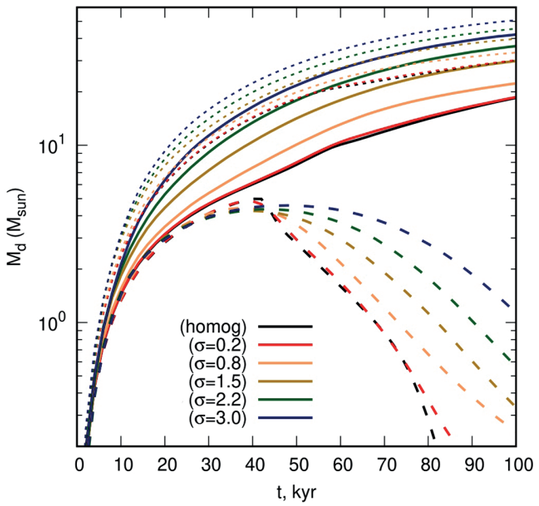


Рисунок 1. Эволюция массы пыли внутри остатка СН в зависимости от степени неоднородности среды. Сплошные линии – эволюция с разрушением пыли; пунктирные – без учета разрушения пыли; штриховые – масса пыли в горячем газе ($T > 10^6$ K)

рентгеновском диапазонах IRX значительно (~3 ÷ 30 раз) изменяется в остатке сверхновой в зависимости от его возраста, прицельного параметра, степени неоднородности среды. На Рисунке 2 на диаграмме T_x–IRX проиллюстрированы зависимости IRX от перечисленных параметров.

Обнаружено, что светимость остатка сверхновой в инфракрасных линиях ионов [O III] 88 мкм, [C II] 158 мкм, [N II] 205 мкм увеличивается при его расширении в более неоднородной среде и превышает светимость пыли в континууме под линией в ~10 ÷ 1000 раз.

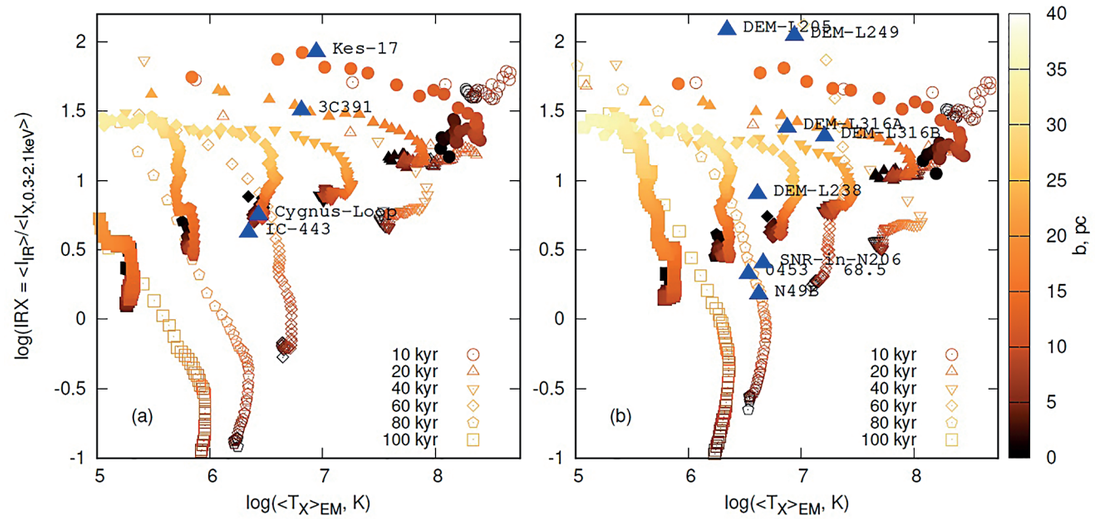


Рисунок 2. Диаграмма T_x–IRX для остатка СН в неоднородной среде с $\sigma = 0.2$ (пустые символы) и $\sigma = 2.2$ (заполненные символы). Типы символов соответствуют различному возрасту остатка, цветовая шкала – прицельному расстоянию в пк. Синим показаны значения для известных остатков в Галактике (слева) и Большого Магелланова облака (справа)

Результаты опубликованы:

1. Dedikov, S. Y. Inhibited destruction of dust by supernova in a clumpy medium. / S. Y. Dedikov, E. O. Vasiliev. // New Astronomy. – 2025. – Vol. 114. – Art. ID 102293. – DOI 10.1016/j.newast.2024.102293.
2. Drozdov, S. A. Far-Infrared Emission from a Late Supernova Remnant in an Inhomogeneous Medium. / S. A. Drozdov, S. Yu. Dedikov, E. O. Vasiliev. // Astrophysical Bulletin. – 2025. – Vol. 80. – Iss. 1. – P. 22–37. – DOI 10.1134/S199034132460090X.
3. Dedikov, S. Yu. Infrared and X-ray Emission of Supernova Remnant in a Clumpy Medium. / S. Yu. Dedikov, E. O. Vasiliev. // Astronomy Reports. – 2025. – Vol. 69. – Iss. 1. – P. 1–13. – DOI 10.1134/S1063772925701495.

Астрокосмический центр

Заглядывая внутрь конуса излучения джета высокоэнергетического квазара 1424+240, ассоциированного с источников нейтрино

А. Б. Пушкарев, И. Н. Пащенко

Поляриметрические наблюдения внутрь раскрыва струи нейтринно-ассоциированного блазара позволили разрешить доплеровский кризис активных ядер галактик.

Процесс ускорения массивных частиц, а также рождение фотонов и нейтрино сверхвысоких энергий (СВЭ) остается фундаментальной проблемой астрофизики. В данной работе проведено исследование структуры парсекового джета блазара PKS 1424+240 и ассоциированное с ним магнитное поле. Данный источник выбран на основе сильного гамма-излучения СВЭ и отождествлен с одним из самых высоких пиков на усредненной за 9-лет наблюдений карте нейтринном неба по данным IceCube (Рисунок 1).

Проанализированы наблюдения этого объекта на частоте 15 ГГц, проведенные на системе апертурного синтеза VLBA, объединяя данные 42 одноэпоховых поляризационно-чувствительных изображений, полученных в интервале 2009–2025 гг. для повышения чувствительности и выявления устойчивой структуры объекта на парсековых масштабах.

Данные наблюдения, проведенные в режиме радиоинтерферометра со сверхдлинными базами (РСДБ) позволили обнаружить редкий феномен. Объект виден внутри конуса излучения релятивистского выброса (Рисунок 2), очень близко к оси струи, с углом к лучу зрения менее 0.6°. Это эффективно максимизирует доплеровское уярчение, достигающее значений около 30, и усиливает электромагнитное и нейтринное излучение в направлении наблюдателя, но в то же время минимизирует видимую скорость движения элементов парсековой структуры струи.

Основываясь на поляриметрических наблюдениях, уверенно обнаружена тороидальная компонента магнитного поля джета (Рисунок 2, справа). Это указывает на токонесущий выброс, направленный почти прямо по лучу зрения. Таким образом, блазары с остронаправленными

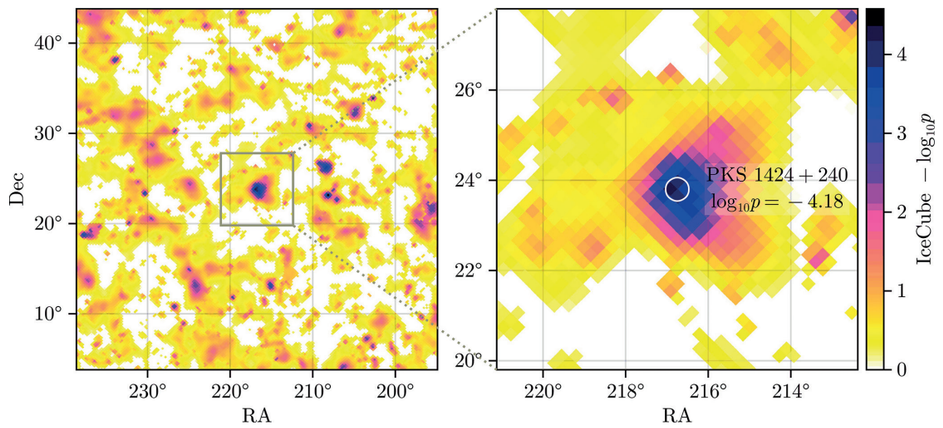


Рисунок 1. Область карты IceCube вокруг положения блазара PKS 1424+240. Цветом показано p-значение после усреднения данных в течение 9 лет, выполненное Abassi et al. (2022)

джетами предлагают решение многолетней проблемы физики релятивистских струй активных ядер галактик – кризис Доплер-фактора, т.е. несоответствия между низкими значениями доплеровских факторов, получаемых из малых видимых скоростей выбросов по РСДБ-наблюдениям, и высокими факторами, полученными из наблюдений на сверхвысоких энергиях. Показано, что релятивистское усиление играет решающую роль в гамма- и нейтринном излучении блазаров.

Результаты обработки РСДБ наблюдений блазара PKS 1424+240 с высокой чувствительностью на существенно более низкой частоте 1.6 ГГц также показывают, что угол к лучу зрения на источник меньше угла раскрыва релятивистской струи. Наблюдение джетов внутри их плазменного конуса предоставляет уникальную возможность определить их истинные параметры и реконструировать проекционную структуру магнитного поля. Более того, эти джеты могут представлять собой отдельный класс активных галактических ядер с усиленным гамма-излучением и нейтрино сверхвысоких энергий.

На основе моделирования методом Монте-Карло полной по плотности потока выборки MOJAVE 1,5JyQC, отобранной с помощью радиоинтерферометрических наблюдений, мы оцениваем, что лишь несколько процентов джетов наблюдаются в пределах одного градуса от луча зрения на источник (Lister et al. 2019).

Полученные по объекту PKS 1424+240 результаты открывают путь к более глубокому пониманию излучения высокоэнергетических фотонов и нейтрино из джетов блазаров.

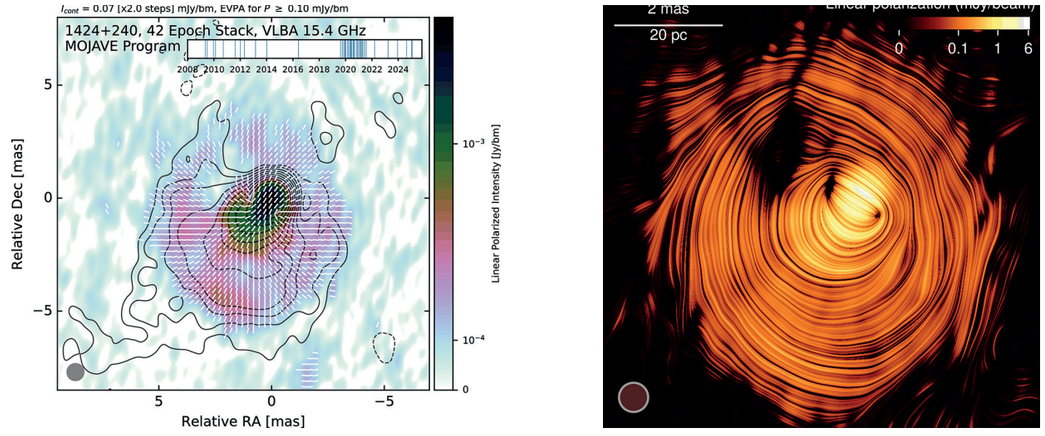


Рисунок 2. Усредненная по 42 эпохам, покрывающим интервал времени около 16 лет, РСДБ-карта блазара 1424+240 на частоте 15 ГГц (слева). Контурами показаны уровни яркости в полной интенсивности, цветом - интенсивность в линейной поляризации, а белыми отрезками – направления векторов электрической поляризации. Визуализация направления магнитного поля, используя метод линейной интегральной конволюции (справа). В левом нижнем углу обеих карт приведен размер диаграммы направленности по уровню половинной мощности

Результаты опубликованы:

1. Looking into the Jet Cone of the Neutrino-Associated Very High Energy Blazar PKS 1424+240. / Y. Y. Kovalev, A. B. Pushkarev, ..., I. N. Pashchenko, [et al.]. // Astronomy & Astrophysics. – 2025. – Vol. 700. – Art. ID L12. – 5 pp. – DOI 10.1051/0004-6361/202555400.

Пущинская радиоастрономическая обсерватория им. В. В. Витквича АКЦ ФИАН

Поиск RRAT на склонениях от +42^{o} до +55^{o} с помощью нейронной сети

И. В. Эльдаров[1], С. А. Тюльбашев[2], М. А. Китаева[2], Г. Э. Тюльбашева[3]

[1]Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ), Пущино, Московская обл., Россия
[2]Физический институт им. П.Н. Лебедева, Астрокосмический центр, Пущинская радиоастрономическая обсерватория, Пущино, Московская обл., Россия
[3]Институт математических проблем биологии Российской академии наук, филиал Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Пущино, Московская обл., Россия

Проведен поиск импульсных диспергированных сигналов с помощью нейронной сети на радиотелескопе БСА ФИАН (Большая Синфазная Антенна Физического института им. П.Н. Лебедева). В результате поиска с помощью нейронной сети найдено три новых вращающихся радиотранзиента (RRAT). Разработана схема поиска RRAT, позволяющая обнаруживать импульсы с отношением сигнала к шуму (СШ) ниже порога, необходимого для достоверного обнаружения.

RRAT – это пульсары с необычными свойствами, временные интервалы между последовательными импульсами которых могут составлять от десятков секунд до сотен часов. На февраль 2025 года в каталоге пульсаров ATNF числится 211 RRAT.

В нашем обзоре обнаруживается около миллиона кандидатов в RRAT при обработке одного года наблюдений. Примерно 75 % из них оказываются помехами разной природы. Подавляющая часть оставшихся кандидатов – это импульсы известных пульсаров. Для найденных кандидатов нейронная сеть выступила в роли фильтра, который выделил надежные источники и значительно сократил время визуального просмотра оставшихся кандидатов в RRAT.

Нейронная сеть обучалась на примере ранее найденных импульсов пульсаров и транзиентов. Всего для обучения было использовано ~6 млн единиц данных положительного (есть источник) и ~8 млн – отрицательного (разного вида помехи) класса, то есть 14 млн элементов.

Нейронная сеть была настроена таким образом, чтобы видеть слабо выраженные линии дисперсионных задержек. Пример работы сети при ее тестировании на известных пульсарах приведен на Рисунке 1. Пульсар J0302+2252 – один из первых, обнаруженных в Пущино, – имеет период P = 1.207165 с и меру дисперсии DM = 18.99 пк/см^3. Нейронная сеть нашла 6 импульсов этого пульсара, а при визуальном поиске в исходных данных было обнаружено порядка 25 импульсов. На динамических спектрах (Рисунок 1, верхняя часть) показаны отождествленные и неотождествленные сетью импульсы. Слева и справа на панелях с динамическими спектрами видны по три линии дисперсионной задержки. Красным цветом на спектрах показана DM = 20 пк/см^3, на которой наблюдался максимум СШ собранных профилей. На нижней панели Рисунка 1 показаны пронумерованные импульсы, расстояние между которыми составляет 1.2 с и 2.41 с, что кратно периоду пульсара. Нейронная сеть увидела импульсы 2, 3, 4 и 5, но не увидела импульсы 1 и 6.

После удаления импульсов известных пульсаров и импульсов, не прошедших визуальную проверку, у нас осталось всего 14 кандидатов в новые RRAT. Два и более импульсов в одном луче БСА не зарегистрированы ни для одного из них. После использования фильтра скользящего среднего мы интегрировали энергию импульсов и оценили СШ кандидатов. Всего проверку прошли 3 источника, которые мы считаем новыми радиотранзиентами. Динамические спектры и профили импульсов этих RRAT можно посмотреть на нашем сайте https://bsa-analytics.prao.ru/en/transients/rrat/.

Работа поддержана грантом РНФ 22-12-00236П.

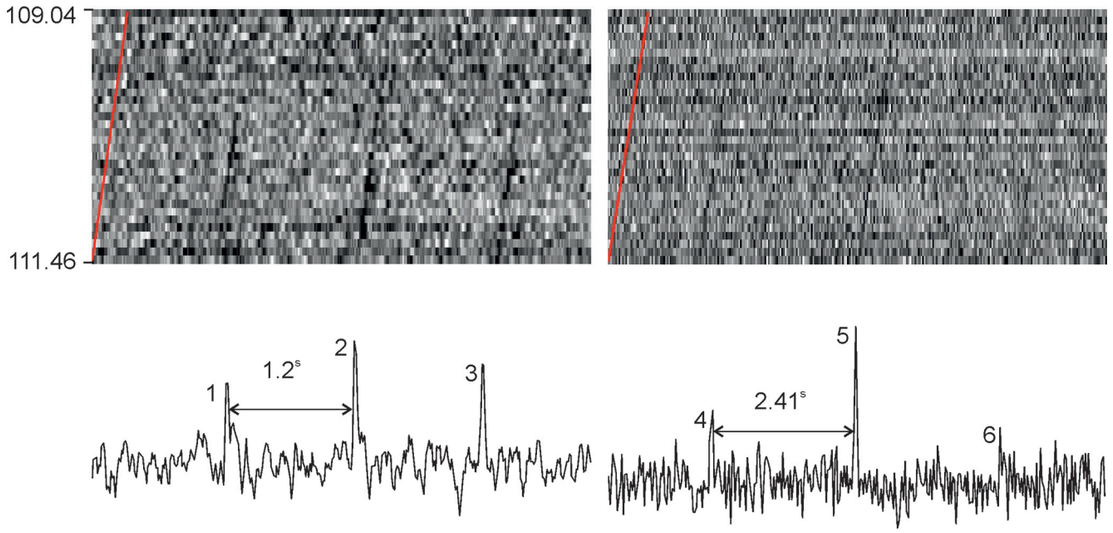


Рисунок 1. Динамические спектры (вверху) и профили шести импульсов (внизу), найденные нейронной сетью в данных за 14.10.2015 г. На вертикальных шкалах динамических спектров и профилей импульсов отображены частоты наблюдений и интенсивности, на горизонтальных – время

Результаты опубликованы:

1. Поиск RRAT на склонениях от +42^{o} до +55^{o} нейронной сетью. / И. В. Эльдаров, С. А. Тюльбашев, М. А. Китаева, Г. Э. Тюльбашева. // Астрономический журнал. – 2025. – Т. 51. – № 12. – С. 1137–1146. – DOI 10.7868/S3034518925120087. – arXiv:2508.11462.

Пущинская радиоастрономическая обсерватория им. В. В. Виткевича АКЦ ФИАН

Пущинский многолучевой поиск пульсаров. Хронометрирование пульсаров на радиотелескопе БСА3 ФИАН с временно́й привязкой по пульсарному времени

С. А. Андрианов, В. А. Потапов, С. А. Тюльбашев, С. В. Логвиненко и В. В. Орешко

Разработана методика хронометрирования (тайминга) пульсаров на 3-й диаграмме направленности Большой Синфазной Антенны (БСА3 ФИАН). Для коррекции ошибки определения Моментов Прихода Импульсов пульсаров (МПИ), связанной с низкой точностью локальных часов, впервые использована промежуточная шкала пульсарного времени. Используя эту методику, нам удалось существенно (на 5–6 порядков) повысить точности оценок вращательных параметров 12 секундных пульсаров каталога ATNF CSIRO.

Предложена, разработана и апробирована методика хронометрирования (тайминга) пульсаров по наблюдениям на радиотелескопах, не обладающих надежной аппаратной привязкой к шкале земного времени (UTC). Методика использована для анализа данных мониторинга северного неба на 3-й диаграмме направленности Большой Синфазной Антенны (БСА3 ФИАН). В качестве локальных часов на БСА3 ФИАН использовались кварцевые генераторы, не обладающие необходимой для хронометрирования пульсаров точностью. Для привязки локальных часов к UTC в качестве промежуточной опорной шкалы времени решено использовать МПИ наблюдавшейся в фоновом режиме группы стабильных секундных пульсаров с хорошо известными параметрами («пульсарное время»). Для учета собственного хода кварцевых часов относительно «пульсарного времени» были привлечены 10-летние ряды наблюдений на БСА3. Методика позволила качественно повысить точность определения МПИ и параметров пульсаров: частоты собственного вращения и ее производной ν и ν' и координат α и δ [1]. С ее помощью было проведено хронометрирование 12 пульсаров с плохо определенными параметрами из каталога ATNF CSIRO.

Точность определенных параметров составила: ν и $\nu' \leq 10^{-10}$ Гц и 10^{-19} с$^{-2}$, соответственно, α и $\delta \leq 10''$ (при угловом разрешении БСА $\leq 30'$) [2]. Для вращательных параметров это принципиально, на 5–6 порядков лучше точности ранее полученных каталожных значений и позволяет проводить прецизионное хронометрирование этих пульсаров (как ранее известных, так и новых, открытых на БСА3 в ходе обзора PUMPS). Кроме того, следует отметить, что

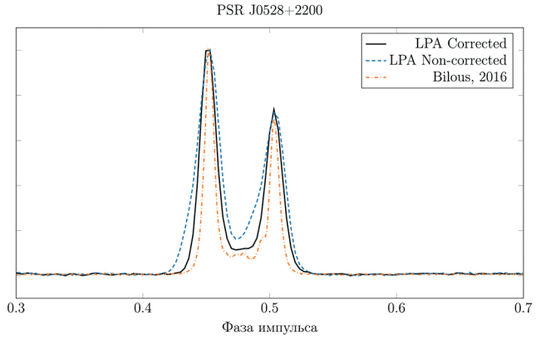


Рисунок 1. Суммарный, накопленный за 1000 сеансов наблюдений, проведенных за 3 года, профиль пульсара J0528+2200. Получен на БСА3 ФИАН с уточнением (LPA-corrected) и без уточнения (LPA non-corrected) хода часов. Для сравнения приведен наилучший доступный на сегодняшний день профиль, полученный в наблюдениях на радиотелескопе LOFAR (Bilous, 2016)

достигнутая в предшествовавших работах точность определения координат открытых на БСА3 пульсаров была ранее ограничена шириной диаграммы направленности антенны. Предложенный метод позволяет улучшить точность примерно на два порядка и организовать программы наблюдений данных пульсаров на радиотелескопах с узкими диаграммами направленности на высоких частотах.

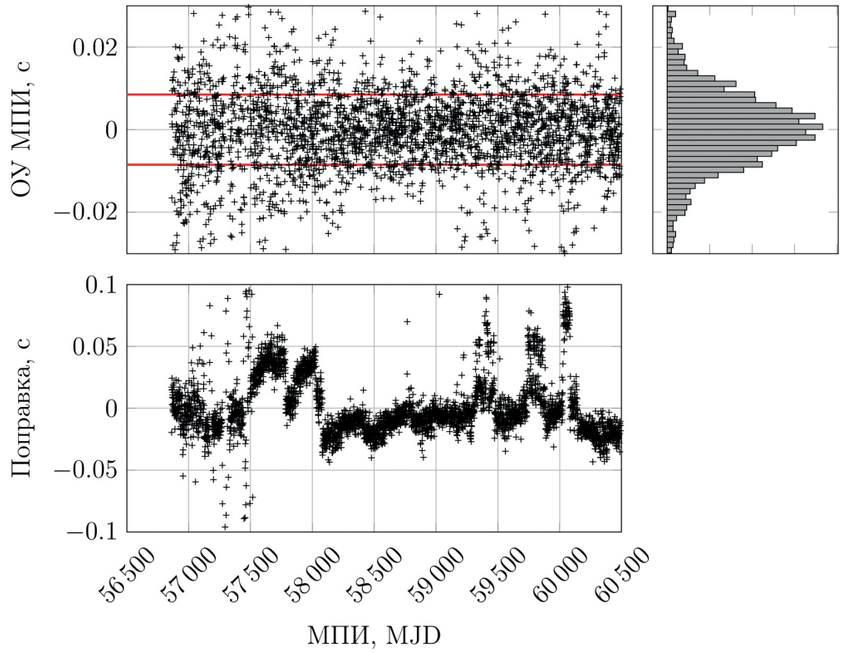


Рисунок 2. Остаточные уклонения (ОУ) МПИ J1921+2153 в секундах после учета хода кварцевых часов (вверху слева); внесенная в исходные ОУ поправка за ход кварцевых часов относительно опорного «пульсарного времени» (внизу); распределение МПИ по фазе пульсара (вверху справа), вертикальная ось – в секундах и соответствует оси на графике ОУ МПИ

Результаты опубликованы:

1. The Pushchino Multibeam Pulsar Search. VI. Method for Pulsar Timing Using Poorly Timed Data. / Andrianov, S. A., Potapov, V. A., Tyul'bashev, S. A. [et.al.]. // Astronomy Reports. – 2025. – Vol. 69 – Iss. 11. – P. 1088-1101. – DOI 10.1134/S1063772925702294.
2. Andrianov, S.A. The Pushchino Multibeams Pulsar Search. VII. The Results of the Timing of 12 Slow Pulsars / S. A. Andrianov, V. A. Potapov, S. A. Tyul'bashev. // Astronomy Reports. – 2025. – Vol. 69 – Iss. 11. – P. 1102-1110. – DOI 10.1134/S1063772925702300.

Пущинская радиоастрономическая обсерватория им. В. В. Витковича АКЦ ФИАН

Многолучевой поиск пульсаров в Пущино. Яркий радиовсплеск FRB 20190203 внегалактического происхождения обнаружен на частоте 111 МГц

С. А. Тюльбашев, В. А. Самодуров, А. С. Позаненко, Е. А. Брылякова, С. А. Гребенев, И. В. Человеков, П. Ю. Минаев, Е. А. Исаев, М. В. Барков

С августа 2014 г. на радиотелескопе Большая Синфазная Антенна Физического института им. П. Н. Лебедева (БСА ФИАН) проводится мониторинговый обзор на частоте 111 МГц. При анализе метаданных обнаружен импульс, имеющий меру дисперсии (DM), равную 134.4 пк/см^3, пиковую плотность потока (S_p), равную 20 Ян, и полуширину (W_e), равную 211 мс. Избыточная DM импульса после учета вклада Млечного Пути составляет 114.1 пк/см^3, что говорит о его внегалактическом происхождении. Оценка нормированной светимости FRB 20190203, полученная в предположении, что вся избыточная DM определяется межгалактической средой, — $L_\nu \sim 10^{34}\, d_{L27.3}{}^2$ эрг/с/Гц. Наблюдаемые свойства всплеска возможно воспроизвести в рамках модели мазерного источника, формируемого в дальней зоне (на расстоянии 10^{15} см).

Быстрые радиовсплески в основном известны по наблюдениям в дециметровом диапазоне, тогда как на метровых волнах их поиск затруднён сильным рассеянием и падением отношения сигнала к шуму. Поэтому обнаружение внегалактического одиночного импульса на 111 МГц представляет особый интерес для низкочастотной радиоастрономии. Мощный всплеск был найден в мониторинговых наблюдениях на БСА ФИАН, работающем на частоте 110.25 МГц в полосе 2.5 МГц. В проекте по поиску пульсаров (PUMPS) используются данные с временным разрешением 12.5 мс и 32 частотными каналами; при поиске анализировались метаданные для 153 729 часовых файлов наблюдений.

Событие FRB 20190203 зарегистрировано 3 февраля 2019 г. в 02:18:10 UT в направлении RA = $13^h40^m46^s \pm 2^m$, Dec = 35°30′ ± 10′. Измеренная мера дисперсии составила DM = 134.4 ± 2 пк/см³, ширина импульса после компенсации дисперсионной задержки – 211 ± 6 мс, а пиковая плотность потока – 20 ± 4 Jy. После компенсации меры дисперсии отношение сигнала к шуму достигает 65; в соседних лучах сигнал не наблюдается.

Вклад Галактики в меру дисперсии в этом направлении составляет около 20.3 пк/см³, поэтому избыточная DM около 114 пк/см³ указывает на внегалактическую природу источника. Если считать, что основная часть избыточной дисперсии накоплена в межгалактической среде, верхняя оценка расстояния до источника составляет около 713 Мпк. Нормированная спектральная светимость события оценивается около 10^{34} эрг с$^{-1}$ Гц$^{-1}$. По совокупности параметров FRB 20190203 является вторым FRB, обнаруженным на длине волны порядка 2.7 м, и первым среди неповторяющихся FRB в метровом диапазоне.

Дополнительный поиск повторных радиоимпульсов в том же направлении не выявил достоверных повторов. Был также проведён поиск возможного высокоэнергичного аналога по данным SPI/ACS и IBIS/ISGRI обсерватории INTEGRAL. Ни в окрестности момента регистрации FRB, ни в архивных наблюдениях с суммарной экспозицией около 73.2 суток статистически значимого гамма- или жесткого рентгеновского всплеска не обнаружено.

Полученный результат показывает, что даже в метровом диапазоне возможно надёжно регистрировать яркие внегалактические радиоимпульсы и использовать их для проверки моделей происхождения FRB.

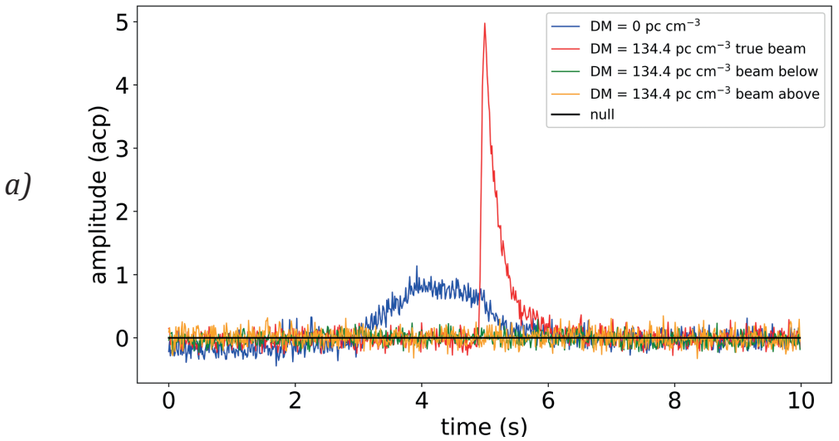


Рисунок 1. а) Сигналы, полученные для: 1) частотные каналы сложены с DM = 0 пк/см³; 2) каналы сложены с DM = 134.4 пк/см³; 3–4) каналы сложены с DM = 0 пк/см³ для лучей выше и ниже обнаруженной вспышки; 5) базовая линия. По вертикальной оси показана плотность потока. б) Динамический спектр детектированного импульса. По вертикальной оси обозначены номера частотных каналов. Горизонтальная ось одинакова для обоих рисунков и показывает время

Результаты опубликованы:

1. Pushchino multibeam pulsar search – V. The bright FRB 20190203 detected at 111 MHz. / S. Tyul'bashev, V. Samodurov, A. Pozanenko, [et al.]. // Publications of the Astronomical Society of Australia. – 2025. – Vol. 42. – Art. ID e059. – 11 pp. – DOI 10.1017/pasa.2024.134.

О возможной генетической связи одиночных радиопульсаров с известными остатками сверхновых

З. В. Кенько, И. Ф. Малов

Показано, что распределения скоростей и их средние величины для пульсаров с возрастом $\tau < 10^5$ лет и с $\tau > 10^5$ лет значимо не отличаются. Это означает, что влияние гравитационного потенциала Галактики и межзвездной среды на движение рассмотренных объектов оказывается несущественным. Для двадцати пульсаров найдены вероятные родительские остатки сверхновых (SNR). Среди них тринадцать пульсаров из каталога ATNF ассоциируются с известными SNR. Для семи пульсаров связь с родительским остатком установлена впервые.

Выявление возможного общего происхождения одиночных радиопульсаров (PSR) и известных остатков сверхновых (SNR) представляет собой важную задачу для понимания эволюции пульсаров, уточнения их реального возраста и оценки их параметров в момент рождения.

По современным представлениям, нейтронные звезды, проявляющиеся в наблюдениях как радиопульсары, рождаются при взрывах проэволюционировавших массивных звезд (с массами $M \geq 10M\odot$). Кроме компактной звезды после взрыва образуется диффузный остаток (SNR), излучающий в разных диапазонах электромагнитного спектра. Время жизни такого остатка, доступное для наблюдений, в значительной части этих объектов не превышает 10^5 лет.

Проанализировано распределение скоростей одиночных пульсаров, связанных с известными остатками сверхновых, а также распределение скоростей для 355 одиночных пульсаров с возрастом $\tau > 10^5$. лет. Сравнение этих двух распределений по критерию Колмогорова–Смирнова показывает, что они статистически неразличимы с почти 100 %-й вероятностью.

Полученный результат означает, что гравитационный потенциал Галактики и межзвёздная среда не оказывают существенного влияния на движение пульсаров, и можно использовать современные оценки их скорости в дальнейших исследованиях.

С использованием данных о скоростях двадцати одного радиопульсара с возрастом $\tau < 10^5$ лет и расстояниях до них, а также расстояниях до известных SNR проведен анализ возможной генетической связи между некоторыми из этих объектов.

Бóльшая часть остатков за 10^5 лет рассеивается в межзвездной среде, и для меньших возрастов вероятность обнаружения родственной связи между ними и одиночными радиопульсарами больше. Оценены угловые расстояния пульсаров от предполагаемых родительских SNR. Выявлено двадцать вероятных пар PSR-SNR, имеющих общее происхождение. Их угловое расстояние на небесной сфере не превышает одного градуса. В каталоге ATNF тринадцать из этих пар уже указаны как родственные, для семи пар такая связь установлена впервые.

Пущинская радиоастрономическая обсерватория им. В. В. Витквича АКЦ ФИАН

Наиболее вероятные пары PSR-SNR в исследованной выборке:

1. J 0614 + 2229 – G 189.1+03.0
2. J 1734 – 3333 – G 355.6-00.0
3. J 1745 – 2900 – G 000.0+00.0
4. J 1809 – 1917 – G 009.9-00.8
5. J 1809 – 1943 – G 010.5-00.0
6. J 1826 – 1334 – G 017.4-00.1

Для остальных пульсаров из рассмотренной популяции требуются дополнительные более тщательные исследования.

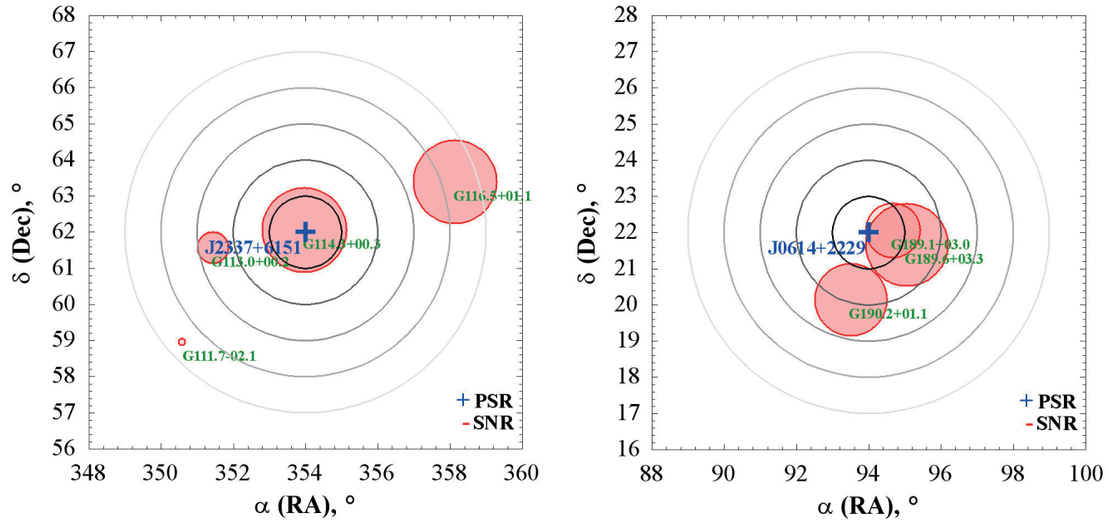
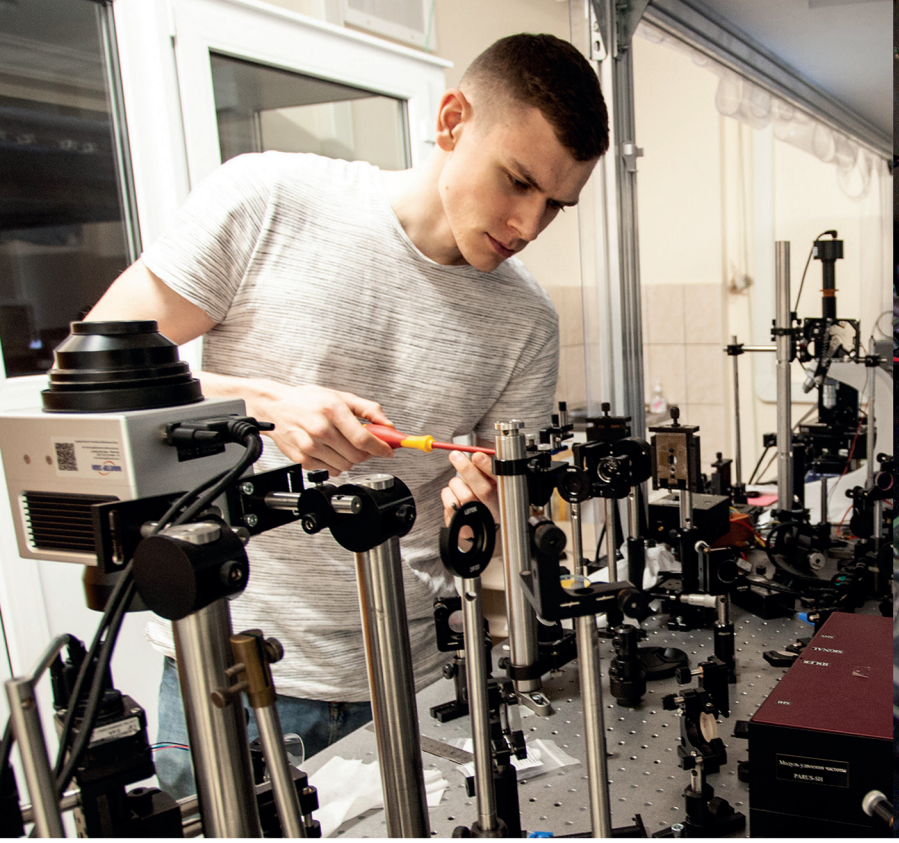
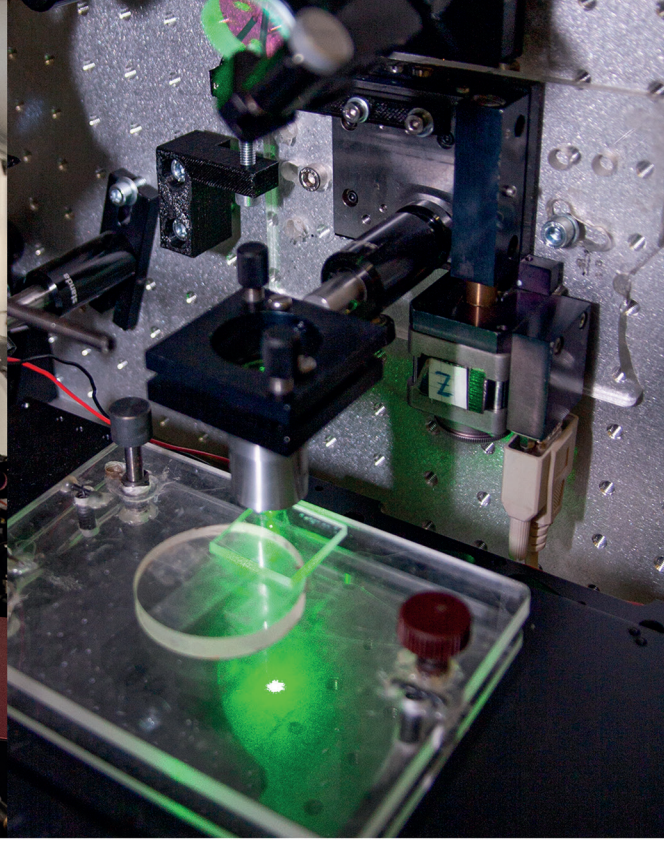


Рисунок 1. Примеры взаимного расположения пульсара и потенциальных SNR, родившихся одновременно с ним. Радиусы кольцевых зон составляют 1°, 2°, 3°, 4° и 5°

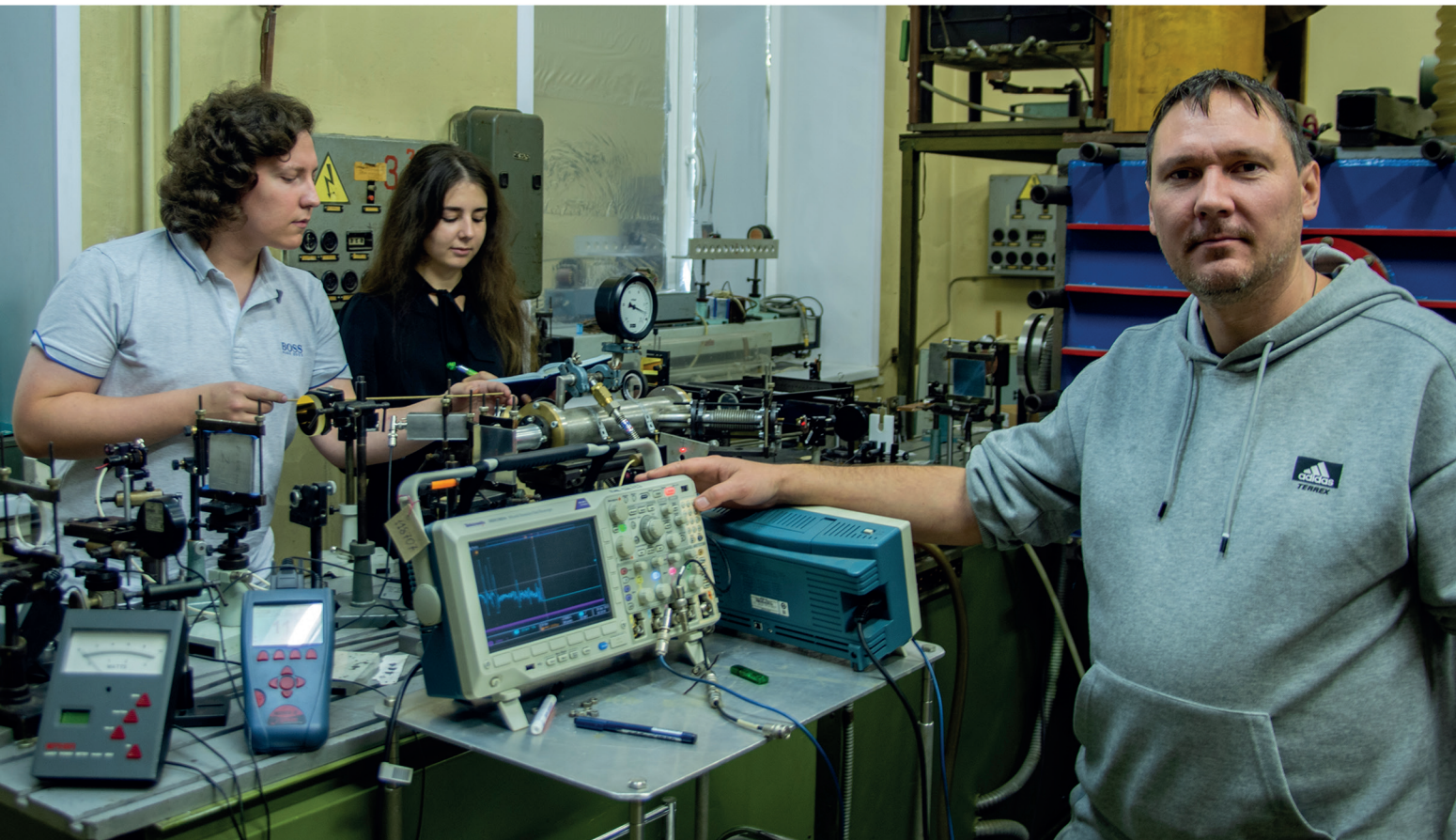
Результаты опубликованы:

1. Кенько, З. В. О возможной генетической связи одиночных радиопульсаров с известными остатками сверхновых / З. В. Кенько, И. Ф. Малов // Астрономический журнал. – 2025. – Т. 102. – № 7. – С. 628–638. – DOI 10.31857/S0004629925070064.





Отделение квантовой радиофизики имени Н.Г. Басова



Роль плазменных волн в процессах перерассеяния в интенсивных лазерных полях

В. В. Стрелков, С. А. Бондаренко, И. В. Сметанин

В работе теоретически исследовано влияние электрического поля плазменной волны на процессы перерассеяния. Показано, что это поле может компенсировать магнитный дрейф, который подавляет эффективность перерассеяния в интенсивных лазерных полях. Наличие поля плазменной волны приводит к появлению новых линий в спектре затухания свободной поляризации. Наблюдение этих линий может позволить, в частности, обнаружить частоты запрещенных переходов, что открывает новые перспективы для спектроскопии.

Перерассеяние фотоэлектрона на родительском ионе лежит в основе ряда явлений в физике взаимодействия интенсивного лазерного излучения с веществом, таких как генерация гармоник высокого порядка, получение аттосекундных импульсов, непоследовательная двойная ионизация атомов и других. Процесс перерассеяния (Рисунок 1) заключается в том, что оторванный лазерным полем от родительского иона фотоэлектрон движется под действием поля на временах порядка оптического периода, возвращается к родительскому иону, набрав значительную энергию, и взаимодействует с ним.

Этот процесс неизбежно сопровождается фотоионизацией среды. Взаимодействие лазерного импульса с плазмой, возникающей в результате фотоионизации, приводит к возбуждению плазменных кильватерных волн. В настоящей работе теоретически исследовано влияние электрического поля плазменной волны на процессы перерассеяния.

В частности, исследовано движение перерассеивающегося электрона в направлении распространения лазерного поля. Такое движение определяется силой Лоренца (так называемый магнитный дрейф электрона) и полем плазменной волны. Известно, что в отсутствие плазменной волны (например, в очень разряженной среде) магнитный дрейф вызывает «промахивание» фотоэлектрона мимо родительского иона и тем самым во много раз снижает вероятность процессов перерассеяния в интенсивных низкочастотных лазерных полях. В нашей работе показано, что поле плазменной волны может компенсировать магнитный дрейф перерассеивающегося электрона и тем самым приводить к значительному увеличению эффективности процессов перерассеяния. С помощью квантово-механических расчетов найдены условия, при которых происходит такое увеличение.

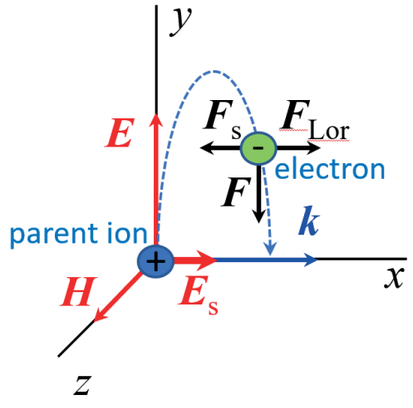


*Рисунок 1. Схема процесса перерассеяния. **E** и **H** – напряженности электрического и магнитного полей лазерной волны, **k** – волновой вектор, E_s – напряженность поля плазменной волны, **F** и F_s – электрические силы со стороны лазерной и плазменной волны, соответственно, F_{Lor} – сила Лоренца*

Кроме того, установлено, что наличие плазменной волны приводит к появлению новых линий в спектре свободного затухания высокочастотной поляризации (XUV free-induction decay), вызванной перерассеянием (Рисунок 2). Наблюдение таких линий позволит, в частности, измерить частоты дипольно-запрещенных переходов и таким образом расширит возможности спектроскопии, основанной на свободном затухании поляризации.

Работа проведена при финансовой поддержке РНФ, грант 24-22-00108.

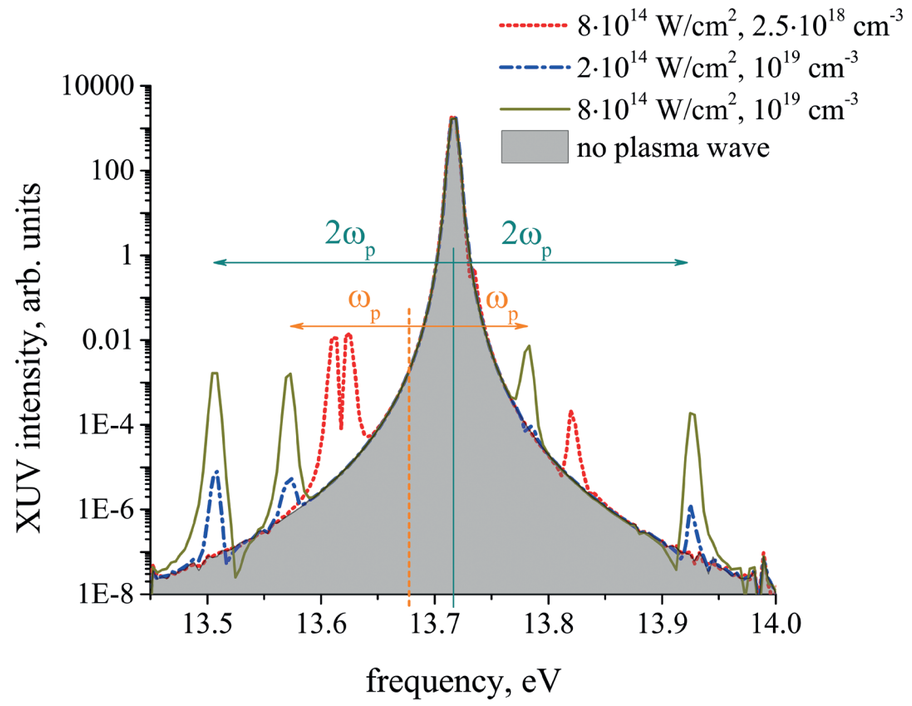


Рисунок 2. Спектры затухания свободной поляризации в отсутствие плазменной волны и при наличии плазменной волны, возбуждаемой при различных плотностях плазмы и интенсивностях лазерного импульса, приведенных на рисунке. Спектры представлены вблизи частоты разрешенного (бирюзовая прямая) и запрещенного (оранжевая прямая) перехода

Результаты опубликованы:

1. Strelkov, V. V. Role of plasma waves in rescattering processes in intense laser fields. / V. V. Strelkov, S. A. Bondarenko, I. V. Smetanin. // Phys. Rev. A. – 2025. – Vol. 112. – Iss. 5. – Art. ID 053101. – 9 pp. – DOI 10.1103/pnh1-nyjh.

Теория релятивистского самозахвата лазерного пучка в плазме

В. Ю. Быченков, В. Ф. Ковалев

Из-за необоснованности или незавершенности предшествующих теоретических подходов условия согласования лазерно-плазменных параметров реализации релятивистского самозахвата (РСЗ) лазерного импульса для произвольной мощности излучения до сих пор не получили теоретического обоснования, что сдерживает широкомасштабные экспериментальные исследования. Представленная теория преодолевает эту проблему, описывая РСЗ при учете релятивистской нелинейности массы электрона и электронной кавитации в плазме, а также формулируя условия реализации РСЗ на количественном уровне.

В 1962 году Г. А. Аскарьяном было сделано величайшее открытие – «самофокусировка электромагнитного луча». При этом оно базировалось на примере плазмы как нелинейной среды и представлении автора о волноводном распространении излучения, впоследствии названном самозахватом. Появившиеся вслед за этим первые теории самозахвата излучения (Таланов, 1964; Таунс, 1964) были ограничены случаем слабых электромагнитных полей, $E << E_0 = mc\omega/e$, и вплоть до настоящего времени не получили своего последовательного продолжения на область их релятивистских значений, $E \sim E_0$ или $E > E_0$. Такие значения сейчас являются типичными для мощных фемтосекундных лазеров, для которых и ультрарелятивистский предел, $E >> E_0$, стал обыденным.

Практическая востребованность теории самозахвата в релятивистски нелинейной плазме (РСЗ), прежде всего для радиационно-ядерных приложений, явилась толчком для восполнения десятилетия существовавшего пробела в теории. Начатые в этом направлении теоретические исследования с асимптотического, ультрарелятивистского случая, $E >> E_0$ (см. [3]), теперь успешно завершились созданием полной теории, позволяющей описывать самозахват лазерного излучения во всем диапазоне амплитуд лазерного поля, от слабо- до ультрарелятивистских значений [1].

Развитая на основе решения нелинейного уравнения Шредингера теория учитывает две основные, хорошо подтвержденные, нелинейности плазмы: релятивистскую нелинейность массы электрона и кавитацию электронной плотности, возникающую в результате ее вытеснения под действием релятивистской пондеромоторной силы. Соответственно, Рисунок 1 иллюстрирует найденные профили поперечного распределения электронной плотности волноводного канала и находящегося практически внутри него лазерного пучка. Полученные решения позволяют найти условие согласования (условие РСЗ) ширины канала (D), электронной плотности плазмы (n_{e0}) и мощности лазерного пучка (P). Это условие весьма востребовано для проведения экспериментов и понимания результатов последних. Условие согласования для РСЗ выполняется на кривой Рисунка 2, где сплошная кривая представляет собой найденную в работе [1] ширину плазменного РСЗ-канала, соответствующая аналитическая аппроксимация дана точками. Последняя, как видно из Рисунка 2, работает с высокой точностью. Отметим, что эксперимент, недавно выполненный на фемтосекундной лазерной установке РФЯЦ–ВНИИА [2], показал наилучшие параметры генерации лазерно-ускоренных протонов именно в установленных развитой теорией условиях реализации РСЗ, которые обеспечивают максимально устойчивое распространение лазерного пучка в плазме вплоть до его поглощения в области критической плотности.

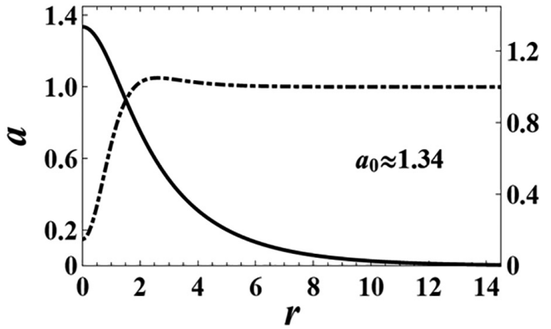


Рисунок 1. Профили э.м. поля $E=aE_0$ и плотности $n_e = n_{e0}N_e$ в канале для лазерного пучка с амплитудой поля a_0E_0.

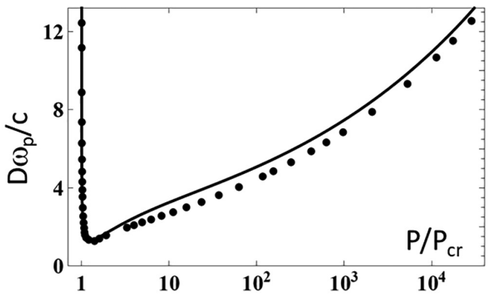


Рисунок 2. Зависимость диаметра плазменного канала от мощности лазерного пучка (критическая мощность – P_{cr}). Теория – точки

Результаты опубликованы:

1. Ковалев, В. Ф. Самозахват лазерного света релятивистской интенсивности / В. Ф. Ковалев, В. Ю. Быченков // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2025. – Т. 167. – № 6. – С. 749–768. – DOI 10.31857/S004445102506001X.
2. Влияние положения фокуса на формирование преплазмы и ускорение ионов при лазерном облучении плоской мишени / К. В. Сафронов, А. В. Брантов, В. А. Флегентов, [и др.] // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2025. – Т. 121. – № 7–8. – С. 562-571. – DOI 10.31857/S0370274X25040052.
3. Быченков, В. Ю. Самозахват лазерного света для ультрарелятивистских интенсивностей / В. Ю. Быченков, В. Ф. Ковалев // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2024. – Т. 120. – № 5-6. – С. 346–353. – DOI 10.31857/S0370274X24090059.

Отделение квантовой радиофизики им. Н. Г. Басова

Сканирование объекта на различных терагерцовых частотах с помощью широкополосного источника на основе филаментационной воздушной плазмы

Г. Э. Ризаев, Л. В. Селезнев

Демонстрируется принципиальная возможность частотно-разрешённой терагерцовой визуализации с использованием излучения, генерируемого воздушной плазмой фемтосекундного лазерного филамента. Показано, что в спектральном диапазоне 1…10 ТГц можно получать изображения объектов и различать их спектральные свойства.

Терагерцовая (ТГц) визуализация активно развивается благодаря приложениям в биомедицине, сфере безопасности и материаловедении. Существуют различные источники ТГц-излучения: узкополосные (гиротроны, квантово-каскадные лазеры, газовые лазеры) и широкополосные импульсные (фотопроводящие антенны, нелинейные кристаллы). Особый интерес представляет генерация ТГц-излучения при филаментации фемтосекундных лазерных импульсов в воздухе. Такое излучение обладает сверхширокими спектром (примерно 0.1…10 ТГц), что делает его потенциально удобным для спектроскопии. Однако его угловое распределение может быть сложным и зависеть от частоты, что затрудняет применение в задачах визуализации.

В работе использовалась Ti:Sapphire лазерная система (750 нм, 90 фс, энергия импульса 3 мДж). Филамент формировался при фокусировке пучка сферическим зеркалом с фокусным расстоянием 25 см. Для регистрации ТГц-излучения применялся сверхпроводящий болометр с высокой чувствительностью. Узкополосные фильтры с центральными частотами 1, 3 и 10 ТГц позволяли выделять отдельные спектральные компоненты.

Метод визуализации основан на измерении двумерного углового распределения ТГц-излучения. Болометр перемещался по углам в горизонтальной и вертикальной плоскостях, формируя матрицу сигналов. Объект размещался за фокальной областью вдоль оптической оси. Для получения изображения матрица сигналов с объектом нормировалась на матрицу без объекта. С учётом расстояния до объекта угловые координаты пересчитывались в пространственные, что позволяло восстановить изображение объекта в ТГц-диапазоне.

В отсутствие внешнего электрического поля угловое распределение излучения имело сложную структуру, например, при 3 ТГц наблюдались два максимума вдоль вертикальной оси. Это приводило к неравномерной освещенности и ухудшению качества изображения в областях с малым исходным сигналом.

Для улучшения характеристик генерации применялось внешнее постоянное электрическое поле (~10 кВ/см), создаваемое электродами в области филамента. Это приводило к существенному (на несколько порядков) увеличению ТГц-энергии и формированию аксиально-симметричного углового распределения. В таком случае достаточно измерять одномерное распределение и восстанавливать двумерную картину, предполагая радиальную симметрию. Показано, что спектр излучения имеет максимум в суб-ТГц области и спадает на несколько порядков к 10 ТГц, однако при наличии поля энергия значительно выше во всём диапазоне.

Для демонстрации частотно-разрешённой визуализации был создан многокомпонентный объект: шайба диаметром 18 мм на тефлоновой пластине толщиной 1 мм с центральным отверстием 10 мм (Рисунок 1, а). Половина шайбы была выполнена из медной фольги (непрозрачной для ТГц-излучения), другая — из плотной бумаги. Бумага имела пропускание около 60 % на 1 ТГц и менее 20 % на 3 ТГц. Тефлон хорошо пропускал излучение на 1…3 ТГц, но сильно поглощал около 10 ТГц.

Изображения, полученные при 1, 3 и 10 ТГц (Рисунки 1, б-г), продемонстрировали выраженную частотную зависимость. На 1 ТГц медная часть выглядела как четкая тень, тогда как бумага была частично прозрачной. На 3 ТГц и медь, и бумага становились практически непрозрачными. На 10 ТГц сигнал регистрировался только в области центрального отверстия, что связано с сильным поглощением в тефлоне. Таким образом, удалось выявить как пространственную структуру, так и спектральные особенности разных материалов.

В заключение, ТГц-излучение филамента, особенно при наличии внешнего электрического поля, может использоваться для спектроскопической визуализации в широком диапазоне 1…10 ТГц. Несмотря на возможные ограничения, связанные с неравномерностью углового распределения, метод демонстрирует принципиальную реализуемость и перспективность для практических приложений.

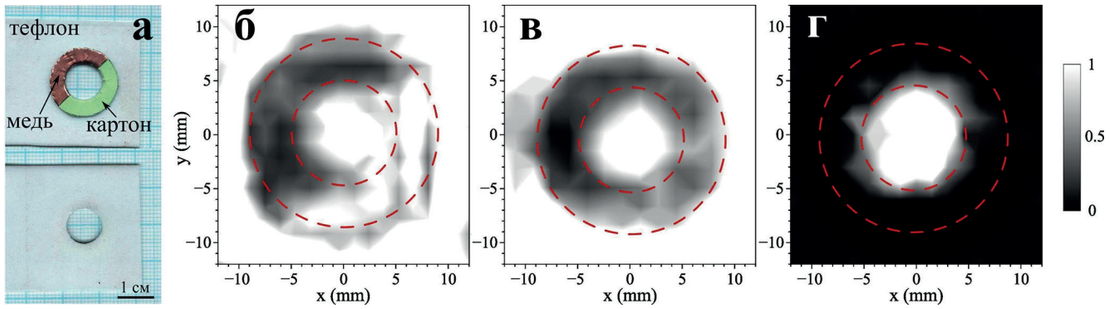


Рисунок 1. Сканируемый объект из тефлона, картона и меди (а) и его изображения, полученные на частотах 1 ТГц (б), 3 ТГц (в) и 10 ТГц (г)

Результаты опубликованы:

1. Seleznev, L. Frequency resolved imaging by laser filament THz emission. / L. Seleznev, G. Rizaev. // Applied Physics B. – 2025. – Vol. 131. – Iss. 7. – Art. ID 128. – DOI 10.1007/s00340-025-08491-2.

Кювета с аксиконом в жидкости для формирования кольцевых пучков накачки и селекции мод в лазерах

О. А. Бурдукова, А. Л. Коромыслов, В. А. Петухов, Ю. В. Сенатский

Предложена кювета с аксиконом в жидкости для формирования кольцевой накачки и селекции мод в лазерах. Меняя состав или температуру жидкости и ход лучей в кювете, можно управлять кольцом инверсии в лазере и возбуждать моды различных порядков. В лазерах Nd:YAG и на красителе получены моды Лагерра–Гаусса ($LG_{0\ell}$), геометрические моды и показано их переключение при замене жидкости в кювете. Предложенное устройство расширяет возможности применений формирователя пучков на аксиконе.

Методам формирования структурированных лазерных пучков посвящено множество статей по лазерам в настоящее время. Моды Лагерра–Гаусса ($LG_{p\ell}$, где p и ℓ – радиальные и азимутальные индексы) привлекают внимание исследователей, поскольку кольцевые *LG*-моды (вида $LG_{0\ell}$) могут переносить орбитальный угловой момент (вихревые пучки). Геометрические моды (ГМ) и способы их генерации также активно исследуются наряду с LG-модами в вырожденных лазерных резонаторах.

В известной двухкомпонентной оптической схеме (аксикон/линза) формирования кольцевого пучка накачки активной среды лазера предложено использовать кювету с аксиконом в жидкости. Используя пустую кювету или заливая в нее жидкости с разными показателями преломления и меняя температуру, можно изменять углы преломления в системе аксикон/линза, управляя в широких пределах размерами кольца инверсии в лазере, возбуждая моды Лагерра–Гаусса ($LG_{0\ell}$) низких и высоких порядков, а также геометрические моды (ГМ), не перемещая оптические элементы лазера и системы накачки (Рисунок 1, А). Предложенная схема допускает аксиконы с различными углами α у основания конуса.

Эффективный угол α_{eff} при основании виртуального аксикона (с показателем преломления n_{ax}), эквивалентного рабочему аксикону (с углом при основании α) в жидкости с показателем преломления n_{liq}, может быть оценен по формуле

$$\alpha_{eff} \approx \alpha \cdot (n_{ax} - n_{liq})/(n_{ax} - 1).$$

При изменениях состава и температуры жидкости в кювете с аксиконом ($\alpha = 5^\circ$) пучки He-Ne лазера преобразованы в кольца с диаметрами D от 60 мкм до 3 мм. В Nd:YAG лазере с диодной накачкой при изменениях состава жидкости в кювете с аксиконом ($\alpha = 31^\circ$) получены «лепестковые» моды $LG_{0\ell}$ и оптические вихри $LG_{0,\pm\ell}$ (Рисунок 1, Б). В лазере на красителе Родамин 6Ж с накачкой импульсами 2-й гармоники Nd:YAG лазера (20 нс, 532 нм) через кювету с аксиконом ($\alpha = 5^\circ$) помимо лепестковых мод $LG_{0\ell}$ получен ансамбль непланарных кольцевых ГМ (включая ряд новых), и впервые продемонстрировано переключение между ГМ и $LG_{0\ell}$ модами простой заменой жидкости в кювете (Рисунок 1, В). Предложенное устройство значительно расширяет возможности применения преобразователей пучка на основе аксиконов, а результаты могут быть полезны для разработки лабораторных устройств с аксиконами, погруженными в жидкость, для селекции мод в лазерах различных типов.

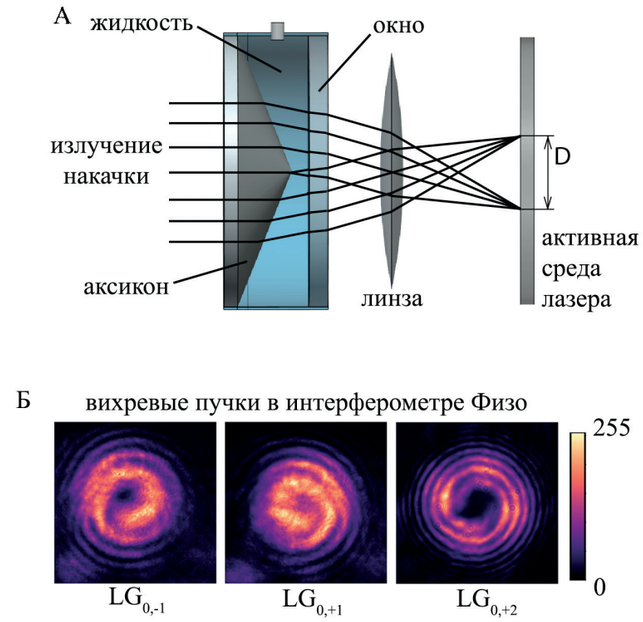


Рисунок 1. А – схема формирования кольцевого пучка накачки при помощи кюветы с аксиконом. Б – изображения в интерферометре Физо вихревых пучков $LG_{0,\pm\ell}$ лазера на Nd:YAG керамике с диодной накачкой через аксикон в жидкости. В – профили пучков генерации импульсного лазера на красителе с кольцевой накачкой (532 нм) через аксикон в кювете до и после её заполнения жидкостями

Результаты опубликованы:

1. Tunable Laguerre–Gaussian modes in an Nd: YAG laser LD-pumped via an axicon in a liquid. / O. A. Burdukova, A. L. Koromyslov, V. A. Petukhov, [et al.]. // Optics&Laser Technology. – 2025. – Vol. 188. – Art. ID 112948. – DOI 10.1016/j.optlastec.2025.112948.

Биохимические маркеры семенной плазмы: новый взгляд на диагностику мужского бесплодия с помощью спектроскопии комбинационного рассеяния света

Е. Н. Римская, А. В. Горевой, А. С. Якимова, Н. П. Макарова, С. И. Кудряшов

Спектроскопия комбинационного рассеяния света представляет собой мощный инструмент анализа молекулярного состава семенной жидкости для оценки мужской фертильности. В совместном с НМИЦ АГП им. В. И. Кулакова исследовании впервые установлено соответствие между спектральными признаками образцов семенной плазмы и критериями, регламентированными ВОЗ для спермограммы. В качестве наиболее эффективного диагностического критерия для дифференциации нормальных и аномальных образцов было выбрано отношение интенсивностей полос при 625, 1440 и 1008 см$^{-1}$, которое позволило достичь специфичности 79 % при чувствительности 95 %.

Согласно ВОЗ, бесплодие определяется как неспособность пар репродуктивного возраста забеременеть после года незащищенных половых контактов, что становится все более острой глобальной проблемой здравоохранения с распространенностью около 15 %. Мужской фактор играет ключевую роль, составляя примерно 50 % всех случаев бесплодия — как самостоятельно, так и в комбинации с женскими нарушениями.

Современная диагностика мужского бесплодия основана на тщательном сборе анамнеза, гормональных тестах и спермограмме, оценивающей параметры эякулята (концентрация сперматозоидов ≥ 15 × 10^6/ мл, прогрессивная подвижность ≥ 32 %, нормальная морфология ≥ 4 %). Хотя спермограмма дает ценные сведения о текущем состоянии спермы, она не отражает фертильный потенциал напрямую: референсные значения ВОЗ широки, что приводит к значительному перекрытию показателей у фертильных и инфертильных мужчин. Для повышения точности диагностики и выявления причин бесплодия анализ состава семенной плазмы (СП) обладает высоким потенциалом. Она составляет приблизительно 95 % объема эякулята и представляет собой сложную смесь секретов из нескольких источников, включая клетки яичек, предстательную железу, семенные пузырьки и т. д. и существенно влияет на качество спермы. Целью исследования являлось доказать применимость спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС) для диагностики бесплодия по критериям ВОЗ, выявив наиболее информативные полосы, коррелирующие с этими параметрами, что позволит идентифицировать ключевые биомаркеры СП и улучшить диагностику и терапию мужского бесплодия.

Микроскопия высушенных образцов СП выявила выраженную гетерогенность внутри и между нормальными и патологическими группами. Спектры КРС СП позволяют детально изучить молекулярный состав ее различных компонентов, включая аминокислоты, нуклеиновые кислоты, фруктозу, глюкозу, и другие важные компоненты. Метод разрешения многомерных кривых (MCR-анализ) позволил разложить спектральные данные на отдельные компоненты, соответствующие конкретным химическим веществам, в частности тирозину (MCR1, полосы КРС 432, 494, 645, 850, 1178, 1612 см$^{-1}$), сперминфосфат гексагидрату (SPH, MCR2, 414, 557, 889, 957, 1008, 1489 см$^{-1}$) и белкам/фосфолипидам (MCR3), см. Рисунок 1. Спермин является полиамином, присутствующим в высоких концентрациях в сперме и известным своим взаимодействием с нуклеиновыми кислотами благодаря своим основным свойствам. В контексте высушенной семенной плазмы спермин существует в твердой форме (SPH), которая вносит значительный вклад в наблюдаемые спектры КРС и может образовывать отчетливо видимые пятна на микроскопических изображениях. Это говорит о том, что тирозин и SPH не служат надежными диагностическими маркерами для оценки качества спермы, более того, они в основном способствуют гетерогенности высушенной спермы образцов.

Сравнение спектров нормальных и патологических групп выявило различия преимущественно в интенсивности пиков, отражающих концентрационные сдвиги веществ. Мы обнаружили, что наиболее репрезентативными были соотношения интенсивностей спектральных полос при 625, 1440 и 1008 см$^{-1}$, которые дают специфичность 79 % при чувствительности 95 %. Эти полосы отражают метаболические нарушения (энергетический обмен, повреждение мембраны и ДНК, окислительный стресс) при патологиях. Впервые спектроскопия КРС СП позволяет выявить биохимические различия между образцами сперматозоидов нормальной и аномальной групп при рассмотрении трёх основных параметров качества спермы отдельно. Результаты расширяют понимание дифференциации СП, углубляя диагностику мужского бесплодия.

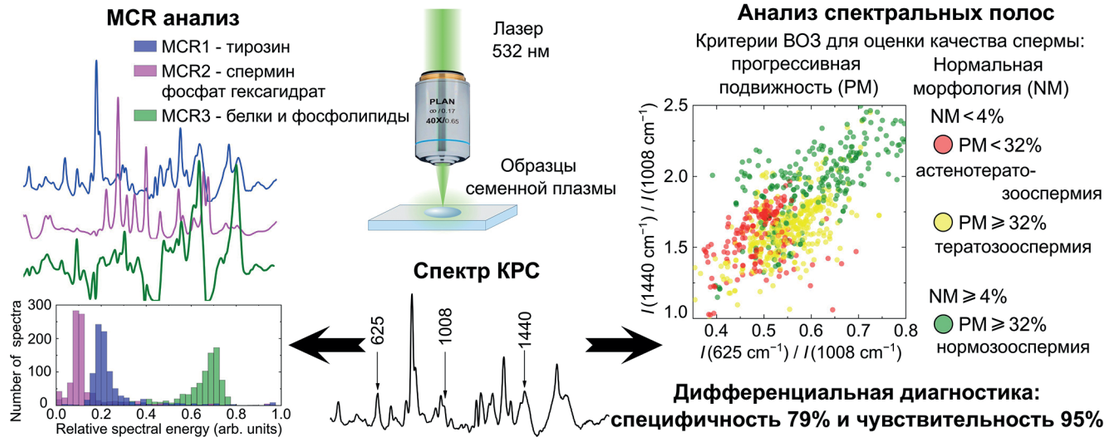


Рисунок 1. Результаты классификации семенной плазмы в соответствии с критериями ВОЗ

Результаты опубликованы:

1. Enhancing male fertility diagnostics with seminal plasma Raman spectroscopy. / E. N. Rimskaya, A. V. Gorevoy, A. S. Yakimova, [et al.]. // Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy. – 2025. – Vol. 340. – Art. ID 126237. – DOI 10.1016/j.saa.2025.126237.

Нетермический механизм спектрально-селективной инактивации бактерий фемтосекундным лазером среднего ИК-диапазона

С. И. Кудряшов, С. Н. Шелыгина, И. Н. Сараева, Э. Р. Толордава, В. О. Компанец

В работе показано, что фемтосекундные лазерные импульсы с длиной волны 6 мкм эффективны для инактивации бактерий P. aeruginosa. Установлено, что инактивация связана не с объемным нагревом клетки, а с локальным высокоинтенсивным колебательным возбуждением, приводящим к денатурации биомолекул. Показана перспективность резонансного воздействия импульсами среднего ИК-диапазона для быстрой дезинфекции.

При облучении на длине волны 6 мкм наблюдается отчетливый пороговый характер инактивации: резкое уменьшение числа жизнеспособных клеток начинается при интенсивности порядка $1.1 \cdot 10^2$ ГВт/ см². При более высоких значениях интенсивности наблюдается полная инактивация (Рисунок 1). При этом воздействие реализуется в одноимпульсном режиме и не сопровождается абляцией.

Для исследования молекулярных механизмов инактивации используется спектроскопия изменения относительного пропускания в области Амид I. На низких интенсивностях фиксируется просветление

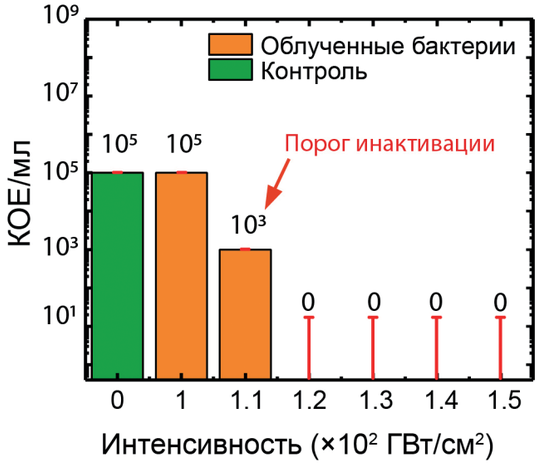


Рисунок 1. Зависимость количества колониеобразующих единиц на мл (КОЕ/мл) бактерий от интенсивности лазерных импульсов

исходной полосы, связанное с насыщением перехода с основного колебательного уровня на первый возбужденный. Это означает, что энергия лазерного импульса непосредственно переводит значительную долю осцилляторов в возбужденное состояние уже в пределах одного импульса, без необходимости многоимпульсного накопления тепла.

С ростом интенсивности возникает «синий» спектральный сдвиг полосы Амид I, то есть ее смещение в высокочастотную область. Этот эффект обусловлен быстрым разрывом водородных связей в системе связанных осцилляторов C = O...H–N. Данный эффект связан с тем, что после возбуждения колебания карбонильной связи энергия оказывается достаточной для ультрабыстрого нарушения слабой водородной связи в течение нескольких периодов колебаний. Разрыв водородной связи приводит к упрочнению связи C = O и, как следствие, к увеличению частоты ее колебаний.

При дальнейшем увеличении интенсивности формируется широкая полоса, сдвинутая в низкочастотную область, связанная с ангармонизмом и многоступенчатым возбуждением высоких колебательных уровней амидных мод.

Вблизи порога инактивации в спектре одновременно присутствуют три характерных признака: просветление исходной полосы Амид I, ее «синий» (разрыв водородных связей) и «красный» (ангармоническое возбуждение высоких уровней) сдвиги (Рисунок 2). Это свидетельствует о последовательном внутриимпульсном протекании нескольких процессов: первичного возбуждения, структурного ослабления водородносвязанного окружения и последующего перехода к высокоэнергетическим ангармоническим состояниям.

Таким образом, именно сильное локальное колебательное возбуждение, а не средний нагрев всей бактериальной клетки, является непосредственной причиной необратимого повреждения жизненно важных биомолекул. Предложенный механизм включает локальную денатурацию белков, то есть утрату их нативной структуры, а также вероятное повреждение нуклеиновых кислот вследствие критического возбуждения амидных и связанных с ними колебательных мод.

Предложенный режим воздействия отличается от многоимпульсных тепловых режимов абляции в среднем ИК-диапазоне, что делает его перспективным для быстрой и энергоэффективной дезинфекции.

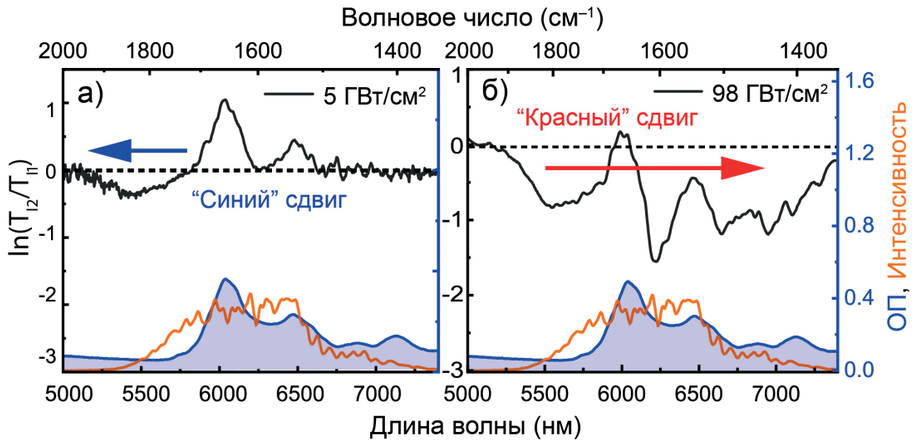


Рисунок 2. Спектры динамического пропускания фемтосекундных лазерных импульсов с интенсивностями: а) 5 ГВт/ см² и б) 98 ГВт/см² образцом слоя бактерий (левая ось). Правая ось на обоих графиках – спектр оптической плотности бактерий (ОП). Спектр лазерного импульса с длиной волны 6 мкм обозначен оранжевой кривой

Результаты опубликованы:

1. Microscopic mechanism of protein and nucleic acid denaturation in P. aeruginosa bacteria under resonant absorption of femtosecond laser pulses at 6 μm wavelength. / S. I. Kudryashov, S. N. Shelygina, V. O. Kompanets, [et al.]. // JETP Letters. – 2025. – Vol. 122. – Iss. 3-4. – P. 184–190. – DOI 10.7868/S3034576625080114 (рус.).

Отделение квантовой радиофизики им. Н. Г. Басова

Простая и эффективная фемтосекундная лазерная система среднего ИК-диапазона (λ = 5…11 мкм) на основе нелинейно-оптического преобразования импульсов титан-сапфирового лазера в анизотропном кристалле

И. О. Киняевский, А. В. Корибут, Я. В. Грудцын, М. В. Ионин, Ю. М. Климачев

В новой схеме, где сигнальная волна формируется в процессе филаментации лазерных импульсов в углекислом газе, реализовано преобразование импульсов титан-сапфирового лазера длительностью 100-фс в средний ИК-диапазон путем генерации разностной частоты в одном анизотропном (нелинейном) кристалле. Продемонстрирована перестройка спектра лазерных импульсов среднего ИК-диапазона в интервале длин волн 5…11 мкм. Наибольшая квантовая эффективность преобразования достигала 30%. Энергия импульса длительностью 0.24 пс с длиной волны 8 мкм достигала 35 мкДж.

Разработка фемтосекундных лазерных источников среднего инфракрасного диапазона (в области длин волн 5…11 мкм) представляет большой интерес для применений в фундаментальных и прикладных областях, таких как ускорение частиц, генерация аттосекундных импульсов, дистанционный анализ газов и многих других. В ОКРФ ФИАН проведен цикл работ, по результатам которого разработана новая простая и эффективная система преобразования фемтосекундных импульсов титан-сапфирового лазера (λ = 0.95 мкм) в область длин волн 5…11 мкм. Эта система базируется на генерации разностной частоты (ГРЧ) с применением всего одного нелинейного кристалла. Отличительной особенностью этой схемы является метод формирования сигнальной волны, а именно путем спектрального уширения лазерного импульса при филаментации в газе.

Отдельной задачей являлся поиск и исследование наиболее эффективного нелинейного кристалла для разрабатываемой лазерной системы. Выбор нелинейного кристалла является нетривиальной задачей, поскольку эффективность преобразования определяется множеством параметров: порогом оптического разрушения, двулучепреломлением, нелинейным поглощением, дисперсией групповых скоростей, диапазоном прозрачности и другими. В цикле экспериментально исследованы традиционные нелинейные кристаллы для среднего ИК-диапазона ($ZnGeP_2$, $AgGaS_2$ и $LiGaS_2$), редко используемый $HgGa_2S_4$ и новый $BaGa_2GeS_6$ кристаллы.

Из данных кристаллов $ZnGeP_2$ имеет наибольшую нелинейность (75 пм/В), но наименьшую ширину запрещенной зоны (2.0 эВ). Кристалл $LiGaS_2$ имеет самую большую ширину запрещенной зоны (3.65 эВ), однако самую низкую нелинейность ~5.5 пм/В.

В разработанной системе осуществлена перестройка спектра лазерных импульсов среднего ИК-диапазона в интервале длин волн 5…11 мкм. Примеры перестройки спектра в $HgGa_2S_4$ и $BaGa_2GeS_6$ представлены на Рисунке 1. Наибольшая квантовая эффективность преобразования фотонов импульса накачки (λ = 0.95 мкм) в фотоны среднего ИК-диапазона (λ = 8 мкм) получена с использованием $HgGa_2S_4$ и достигала 30 %. При этом энергия импульса длительностью 0.24 пс с длиной волны 8 мкм

достигала 35 мкДж, что сравнимо с современными громоздкими многокаскадными оптическими параметрическими усилителями. Новый нелинейный кристалл $BaGa_2GeS_6$ оказался вторым по квантовой эффективности, но его отличительной особенностью является большая ширина спектра преобразованного излучения, что важно для получения предельно коротких длительностей импульсов.

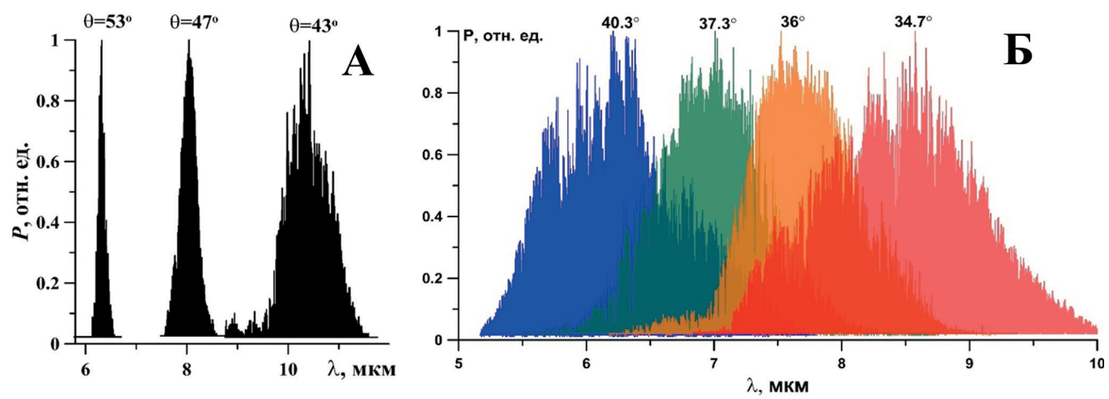


Рисунок 1. Спектры импульсов разностной частоты, полученные в кристаллах $HgGa_2S_4$ (А) и $BaGa_2GeS_6$ (Б)

Результаты опубликованы:

1. Frequency conversion of a 100-fs Ti:sapphire laser pulse into the mid-IR range in a single $HgGa_2S_4$ nonlinear crystal with a quantum efficiency of 30% / I.O. Kinyaevskiy, A.V. Koribut, Ya.V. Grudtsyn, M.V. Ionin // Optics Letters. – 2025. – V. 50. – P. 2267–2269. – https://doi.org/10.1364/OL.555407
2. Frequency conversion of femtosecond Ti:Sapphire laser pulse into 5–11 μm wavelength range with $ZnGeP_2$, $AgGaS_2$ and $LiGaS_2$ crystals / I.O. Kinyaevskiy, A.V. Koribut, Ya.V. Grudtsyn, [et al.] // Optics & Laser Technology. – 2025. – V. 183. – P. 112270. – https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2024.112270
3. Генерация широкополосных фемтосекундных импульсов среднего инфракрасного диапазона путем генерации разностной частоты импульсов титан-сапфирового лазера в кристалле $BaGa_2GeS_6$ / И.О. Киняевский, М.В. Ионин, А.В. Корибут, [и др.]. // Письма в ЖЭТФ. – 2025. – Т.122. – №10. – С.644. – DOI: 10.31857/S0370274X25110174.

Суперлюминесценция когерентного УФ-излучения в углекислом газе при филаментации фемтосекундных лазерных импульсов с длиной волны 950 нм

Я. В. Грудцын, А. А. Ионин, И. О. Киняевский, Ю. М. Климачев, А. В. Корибут

Экспериментально продемонстрирована суперлюминесценция более чем на десяти колебательных полосах перехода $A^2\Pi_u - X^2\Pi_g$ иона CO_2^+ в диапазоне длин волн 310…470 нм, возникающая при филаментации фемтосекундного лазерного импульса с центральной длиной волны 950 нм в углекислом газе. Исследовано влияние давления углекислого газа и энергии лазерного импульса на продемонстрированную суперлюминесценцию.

В ряде работ показано, что при филаментации ультракоротких лазерных импульсов в газах возможна безрезонаторная генерация узконаправленного когерентного излучения, т. е. суперлюминесценция (СЛ), на переходах ионов молекул (N_2, O_2, CO_2 и др.). Это явление привлекает внимание в связи с возможностью его использования в дистанционной диагностике атмосферы, поскольку позволяет получать направленное многоволновое УФ-излучение на переходах ионов атмосферных газов непосредственно в контролируемой зоне филамента.

В настоящее время полная физическая картина механизма СЛ при филаментации до сих пор не установлена. Это связано с тем, что СЛ является результатом одновременного действия комплекса нелинейно-оптических процессов, включающих ионизацию, фазовую самомодуляцию, нелинейное поглощение и генерацию гармоник. При этом одна из гармоник излучения накачки должна попадать в спектральную окрестность перехода иона, чтобы играть роль «затравки».

В настоящей работе исследована СЛ в углекислом газе (CO_2) в условиях «мягкой» фокусировки (f = 2 м) с использованием фемтосекундного титан-сапфирового лазера «СТАРТ-480М» с центральной длиной волны $\lambda \approx 950$ нм, чья третья гармоника $\lambda \sim 317$ нм оказывается вблизи переходов между колебательными состояниями 300→000 электронного перехода $A^2\Pi_u - X^2\Pi_g$ иона CO_2^+. В эксперименте варьировалось давление CO_2 в газовой ячейке и энергия лазерного импульса.

При давлении CO_2 0.3 бар наблюдались такие эффекты, как генерация третьей гармоники и уширение спектра из-за фазовой самомодуляции, СЛ не наблюдалась. Появление СЛ иона CO_2^+ между состояниями $A^2\Pi_u$ и $X^2\Pi_g$ наблюдалось при давлении CO_2 0.5 бар и более, при этом при повышении давления спектр излучения СЛ обогащался и сдвигался в длинноволновую область. При давлении CO_2 4.5 бар наблюдалась СЛ на более чем десяти колебательных полосах иона CO_2^+ в диапазоне длин волн 310…470 нм (Рисунок 1).

Мы полагаем, что бóльшему количеству линий, наблюдаемых в наших экспериментах по сравнению с другими, более ранними работами, способствовали следующие экспериментальные факторы: более мягкая фокусировка, и, как следствие, более длинный филамент, т. е. более протяженная среда для усиления излучения. Кроме этого, в нашем случае наблюдалась близость частоты излучения третьей гармоники к спектральным линиям оптической накачки переходов ионов.

Показано, что при умеренных давлениях CO_2 (0.5…2.5 бар) основным механизмом создания инверсии на переходах $A^2\Pi_u - X^2\Pi_g$ при филаментации лазерных импульсов с длиной волны 950 нм является трехфотонное поглощение излучения накачки, уширенного за счет эффекта фазовой самомодуляции. Отметим, что наличие трехфотонного поглощения на ионах молекул может являться причиной появления аномальных провалов в структуре спектра лазерного излучения после филаментации в атмосфере.

Проведена идентификация переходов в диапазоне длин волн 360…470 нм, которые ранее не наблюдались при филаментации. Отметим, что идентификация переходов существенно затруднена перекрытием различных колебательных полос (у молекулы CO_2 три колебательных моды), а также из-за наличия расщепления уровней благодаря эффекту Ренера–Теллера.

Полученные результаты указывают на перспективность применения этого эффекта в задачах лидарного зондирования атмосферы.

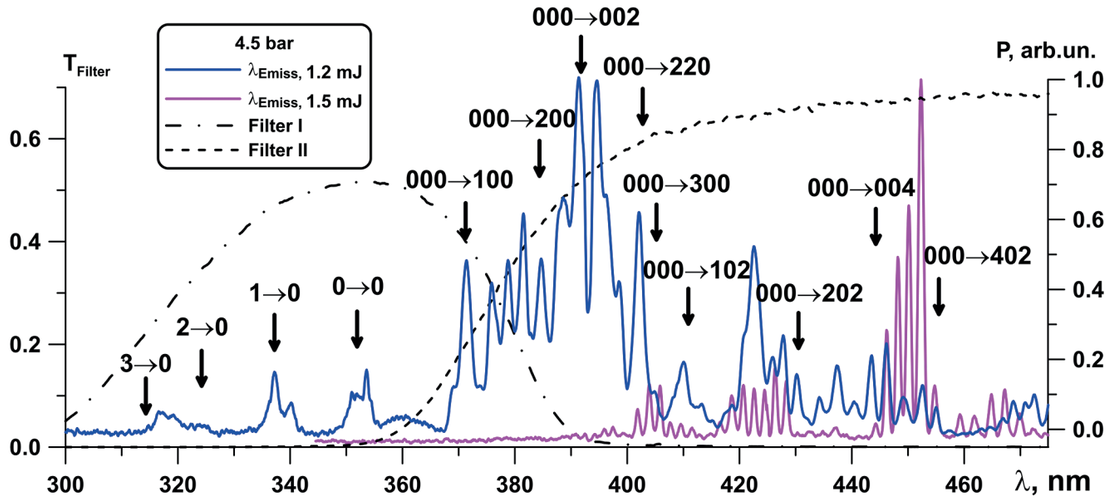


Рисунок 1. Излучение, возникающее между состояниями $A^2\Pi_u$ и $X^2\Pi_g$ ионов CO_2^+, генерируемое в филаменте фемтосекундного импульса, и пропускание использованных УФ-фильтров

Результаты опубликованы:

1. Суперлюминесценция когерентного УФ-излучения в углекислом газе при филаментации фемтосекундных лазерных импульсов с длиной волны 950 нм. / Я. В. Грудцын, А. А. Ионин, И. О. Киняевский, [и др.]. // Письма в ЖЭТФ. – 2025. – Т. 122. – № 2. – С. 87-92. – DOI 10.31857/S0370274X250701.

Эффект допирования в наноразмерных гибридных наноструктурах для плазмонного катализа

И. В. Сметанин, А. В Усков, Н. В. Никоноров

Исследуется влияние легирования на низшее квантовое состояние горячего электрона, захваченного в полупроводниковой оболочке гибридных наночастиц малого размера. Определены условия, при которых эта энергия может варьироваться по всей высоте барьера Шоттки, обеспечивая возможность резонанса с уровнем LUMO химического вещества, адсорбированного на поверхности гибридной наночастицы, что открывает возможность квантово-размерного резонансно-усиленного фотокатализа в гибридной структуре.

Возникшая недавно новая область наноплазмоники, гибридная нанoплазмоника предоставляет нам структурированные наноматериалы, которые позволяют сочетать преимущества высокой скорости поглощения фотонов света в металлах с увеличенным временем жизни горячих электронов в полупроводниках. Таким образом, гибридные наноструктуры открывают хорошие перспективы для фотохимии и фотокатализа, управляемых горячими электронами.

Рисунок 1 иллюстрирует принцип работы гибридных наноструктур с металлическим ядром и полупроводниковой оболочкой в плазмонном катализе. Электроны металлического ядра эффективно поглощают кванты энергии от поверхностных плазмонов, возбужденных фотонами в наноструктуре, и становятся горячими электронами. Горячие электроны с энергией выше барьера Шоттки на границе раздела металл-полупроводник могут относительно легко проникать в полупроводниковую оболочку, где они быстро теряют энергию и падают на дно зоны проводимости полупроводника (ЗП) из-за быстрой внутризонной

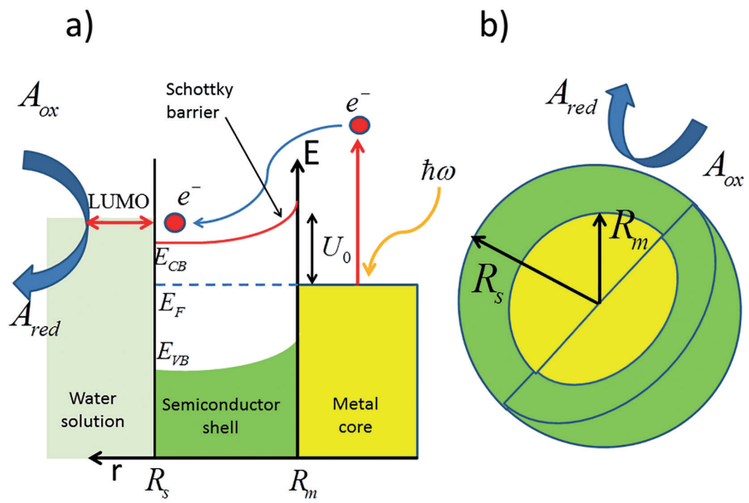


Рисунок 1. а) принцип работы гибридных плазмонных структур в плазмонном катализе; б) поперечное сечение сферической гибридной наночастицы с металлическим ядром радиусом R_m и полупроводниковой оболочкой с внешним радиусом R_s

релаксации. Фактически, полупроводниковая оболочка действует как ловушка, в которой захватываются горячие электроны. Захваченные электроны могут эффективно взаимодействовать с ближним энергетическим состоянием LUMO адсорбированного химического вещества, тем самым стимулируя (катализируя) химические реакции на границе раздела наночастица-раствор.

В настоящей работе изучается влияние уровней легирования на форму барьерного потенциала в сферических Ag-AgBr наночастицах малого размера с металлическим ядром и полупроводниковой оболочкой, в том числе когда оболочка почти полностью находится внутри обедненного слоя барьера Шоттки. Электронные состояния в соответствующей потенциальной яме в полупроводниковой оболочке имеют ширину в несколько нанометров, а движение электронов в оболочке по существу квантовое. Показано, что путем регулирования радиусов металлического ядра и полупроводниковой оболочки, а также уровня легирования, низший энергетический уровень электрона в яме можно регулировать почти по всей высоте барьера, при этом время туннелирования электрона обратно в ядро варьируется от субпикосекунд до сотен наносекунд. Ожидается, что при резонансе с энергетическим уровнем LUMO молекулы, адсорбированной на поверхности гибридной наночастицы, можно достичь соответствующего резонансного усиления скорости окислительно-восстановительной реакции. В целом, это может привести к повышению эффективности плазмонного фотокатализа, так что можно говорить о квантово-размерном резонансно-усиленном фотокатализе в гибридной структуре.

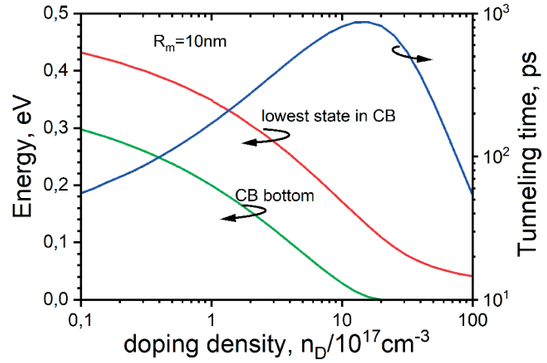


Рисунок 2. Энергия низшего состояния электрона в полупроводниковой оболочке, а также время туннелирования и энергия дна зоны проводимости в гибридной наночастице Ag/AgBr малого размера. Внешний радиус гибридной наночастицы равен R_s=20 nm, радиус металлического ядра равен R_s=10 nm

Работа проведена при финансовой поддержке РНФ, грант 20-19-00559.

Результаты опубликованы:

1. Smetanin, I. V. Effect of doping in small-size hybrid nanostructures for plasmonic catalysis. / I. V. Smetanin, A. V. Uskov, N. V. Nikonorov. // Applied Physics Letters. – 2025. – Vol. 126. – Iss. 1. – Art. ID 011905. – 6 pp. – DOI 10.1063/5.0228172.

Нелинейное поглощение ультракоротких лазерных импульсов с длиной волны 1030 нм в полиметилметакрилате

Ю. С. Гулина, Ц. Чжу, А. В. Горевой, Н. И. Долженко, П. А. Данилов, С. И. Кудряшов

Проведено исследование параметров процесса нелинейно-оптического взаимодействия ультракоротких лазерных импульсов с длиной волны 1030 нм с полиметилметакрилатом при помощи оптимизированного метода z-сканирования. Установлено, что зависимость коэффициента поглощения от длительности импульса носит нелинейный характер: наблюдается его возрастание в диапазоне 250…450 фс, последующее убывание в интервале 450…1500 фс и слабая зависимость при длительностях, превышающих 1500 фс.

Впервые проведено детальное и практически ориентированное исследование параметров процесса нелинейно-оптического взаимодействия 1030 нм лазерных импульсов длительностью 250…2500 фс с полиметилметакрилатом (ПММА). Предложен оптимизированный метод z-сканирования для корректной оценки параметров нелинейного поглощения образцов в условиях возможного формирования дефектов под воздействием ультракоротких лазерных импульсов (УКИ). Показано, что при пиковых интенсивностях менее 0.65 ТВт/см^2 механизм ослабления фемтосекундных лазерных импульсов с длиной волны 1030 нм в ПММА может быть описан как четырехфотонное поглощение. Установлено, что зависимость коэффициента нелинейного поглощения от длительности импульса носит нелинейный характер: наблюдается его возрастание в диапазоне 250…450 фс, последующее убывание в интервале 450…1500 фс и слабая зависимость при длительностях, превышающих 1500 фс (см. Рисунок 1 (а), (б)), что связано с перераспределением вклада многофотонной и лавинной ионизации в процесс нелинейно-оптического взаимодействия УКИ с ПММА и последующей стабилизацией поглощения из-за образующейся плотной околофокальной плазмы.

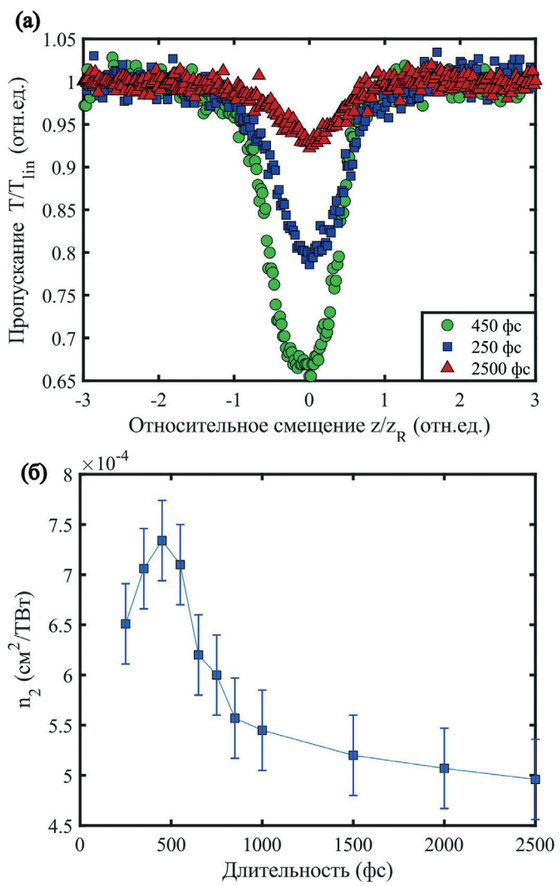


Рисунок 1. а) зависимости нелинейного пропускания от относительного смещения образца; б) зависимость нелинейного показателя преломления от длительности импульса

По результатам экспериментальных исследований определены величины коэффициента четырехфотонного поглощения, нелинейного показателя преломления и критической мощности самофокусировки и показано соответствие выполненной на их основе теоретической оценки смещения нелинейного фокуса положению модифицированных лазерными импульсами областей в ПММА (см. Рисунок 2).

Полученные результаты подтверждают важность экспериментальных измерений параметров нелинейно-оптического взаимодействия и проводимого на их основе моделирования локального вложения энергии ультракоротких лазерных импульсов для задач прецизионной модификации ПММА и других прозрачных биосовместимых полимеров.

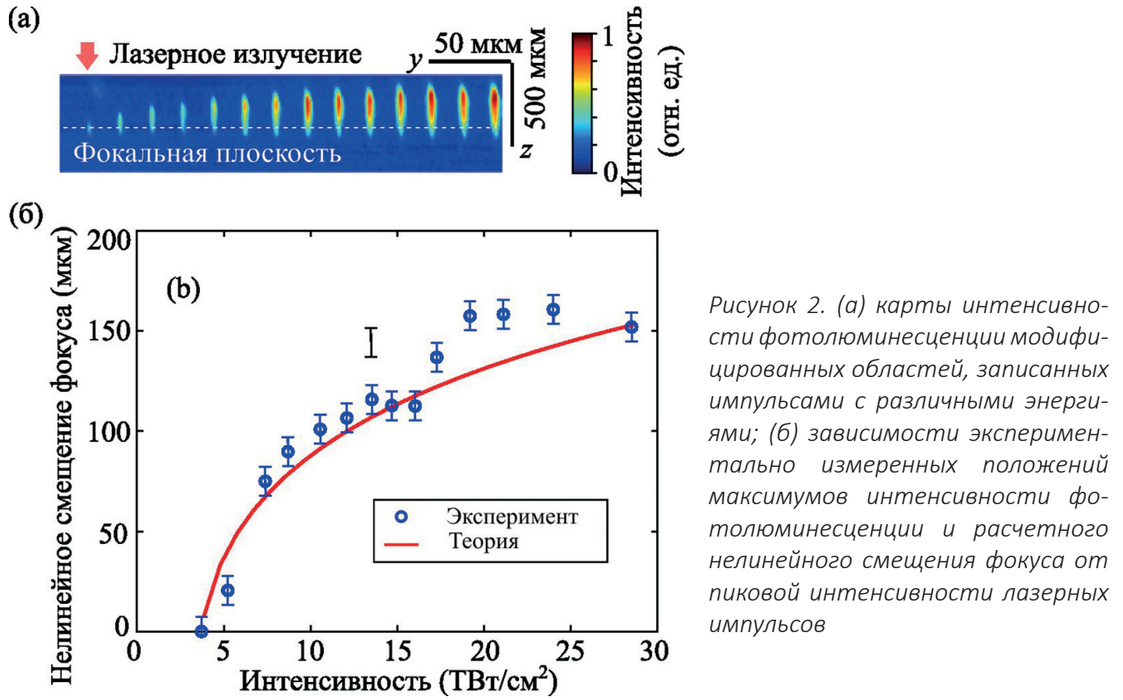


Рисунок 2. (а) карты интенсивности фотолюминесценции модифицированных областей, записанных импульсами с различными энергиями; (б) зависимости экспериментально измеренных положений максимумов интенсивности фотолюминесценции и расчетного нелинейного смещения фокуса от пиковой интенсивности лазерных импульсов

Результаты опубликованы:

1. Nonlinear Absorption of 1030-nm Ultrashort Laser Pulses in Polymethyl Methacrylate / Yu. S. Gulina, J. Zhu, A. V. Gorevoy, [et al.] // JETP Letters. – 2025. – Vol. 122. – Iss. 1. – P. 32–38. – DOI 10.1134/S0021364025607055.
2. Влияние длительности ультракоротких лазерных импульсов с длиной волны 1030 нм на их нелинейное поглощение в полиметилметакрилате. / Ю. С. Гулина, Ц. Чжу, А. В. Горевой, [и др.]. // Краткие сообщения по физике ФИАН. – 2025. – Т. 52. – № 12. – С. 83–90. – ISSN 1068-3356. – e-ISSN 1068-3356. – EDN FYLLGW.

Широкотемпературные жидкокристаллические ферриэлектрики

В. А. Барбашов, Т. П. Ткаченко, Е. П. Пожидаев

В работе исследовано максимальное достижимое двулучепреломление в режиме деформированного геликоида (DHF) для четырёх жидкокристаллических смектических смесей: двух сегнетоэлектрических и двух ферриэлектрических. Экспериментально показано, что для сегнетоэлектрических жидких кристаллов двулучепреломление уменьшается с ростом температуры, тогда как для ферриэлектрических наблюдается зависимость с максимумом. Также показано, что наличие двух критических электрических полей является критерием, достаточным, но не необходимым для существования ферриэлектрической упаковки. Полученные результаты важны для разработки жидкокристаллических устройств фазовой модуляции света видимого диапазона и уточнения теоретических моделей электрооптических свойств таких систем.

Изменение показателя двулучепреломления под действием электрического поля широко используется в современных оптоэлектронных и фотонных устройствах. Жидкие кристаллы (ЖК) удобны для использования в качестве оптической среды в таких устройствах за счет простоты управления ими. Основной их недостаток – это времена электрооптического переключения, обычно превышающие 1 мс, которые, однако, могут быть снижены при повышении температуры (существуют даже коммерчески доступные образцы с подогревом). Но при повышении температуры уменьшается и глубина фазовой модуляции света.

Смектические сегнетоэлектрические (СЖК) и ферриэлектрические (ФЖК) жидкие кристаллы могут использоваться как оптическая среда для дисплейных и фотонных устройств, работающих на частотах в килогерцовом диапазоне. Режим деформированного геликоида (DHF) позволяет плавно и без гистерезиса управлять эффективным электроиндуцированным двулучепреломлением с временами электрооптического переключения 10–300 мкс. Более того, нашей группой было показано в 2024 г. [Tkachenko, T. P., et al. (2024). Optical Materials, 156, 115966; DOI 10.1016/j.optmat.2024.115966], что в широкотемпературных ФЖК (которые также были разработаны нашей группой в 2022 г. [Pozhidaev, E. P., et al. (2022). Optics Letters, 47(7), 1598–1601; DOI 10.1364/OL.450919]) электроиндуцированное двулучепреломление увеличивается с температурой и достигает своего максимума в районе 50 °C. Целью этой работы стало сравнение температурных зависимостей параметров СЖК и ФЖК.

Были исследованы четыре смектические ЖК смеси: две СЖК и две ФЖК (см. Рисунок 1). Измерения проводились в ячейках с толщиной зазора более 50 мкм, чтобы исключить влияние поверхностных эффектов.

Было обнаружено, что температурные зависимости ориентационного коэффициента Керра качественно схожи для всех смесей (экспоненциальный рост с температурой), но зависимости критического электрического поля от температуры различаются за счет ферриэлектрической упаковки. Это приводит к росту двулучепреломления при нагреве до 50…55 °C (Рисунок 2, а). Выше этой температуры оба полевых фазовых перехода в ФЖК начинают происходить при одной температуре и становятся неотличимы. Таким образом, показано, что наличие двух критических электрических полей не является необходимым критерием существования ферриэлектрической упаковки.

Вместе с увеличением двулучепреломления времена электрооптического переключения уменьшаются в 3 раза относительно комнатных температур (Рисунок 2, б) и достигают нескольких десятков микросекунд.

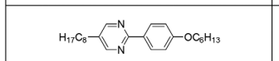
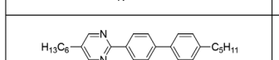
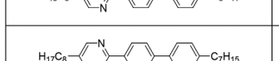
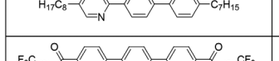
Химические формулы	Мольная концентрация в смеси, %			
	Сегнетоэлектрики		Ферриэлектрики	
	FLC 576	FLC 587-F7	Ferri LCM-1	Ferri LCM-2
	32.8	-	-	-
	42.7	50.0	61.8	69.2
	-	16.8	-	-
	24.5	33.2	28.7	30.8
	-	-	9.5	-

Рисунок 1. Составы исследуемых смесей

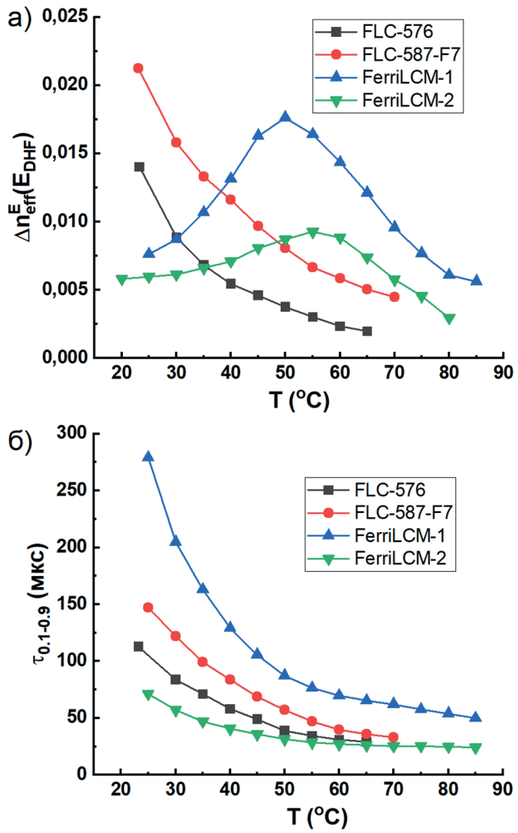
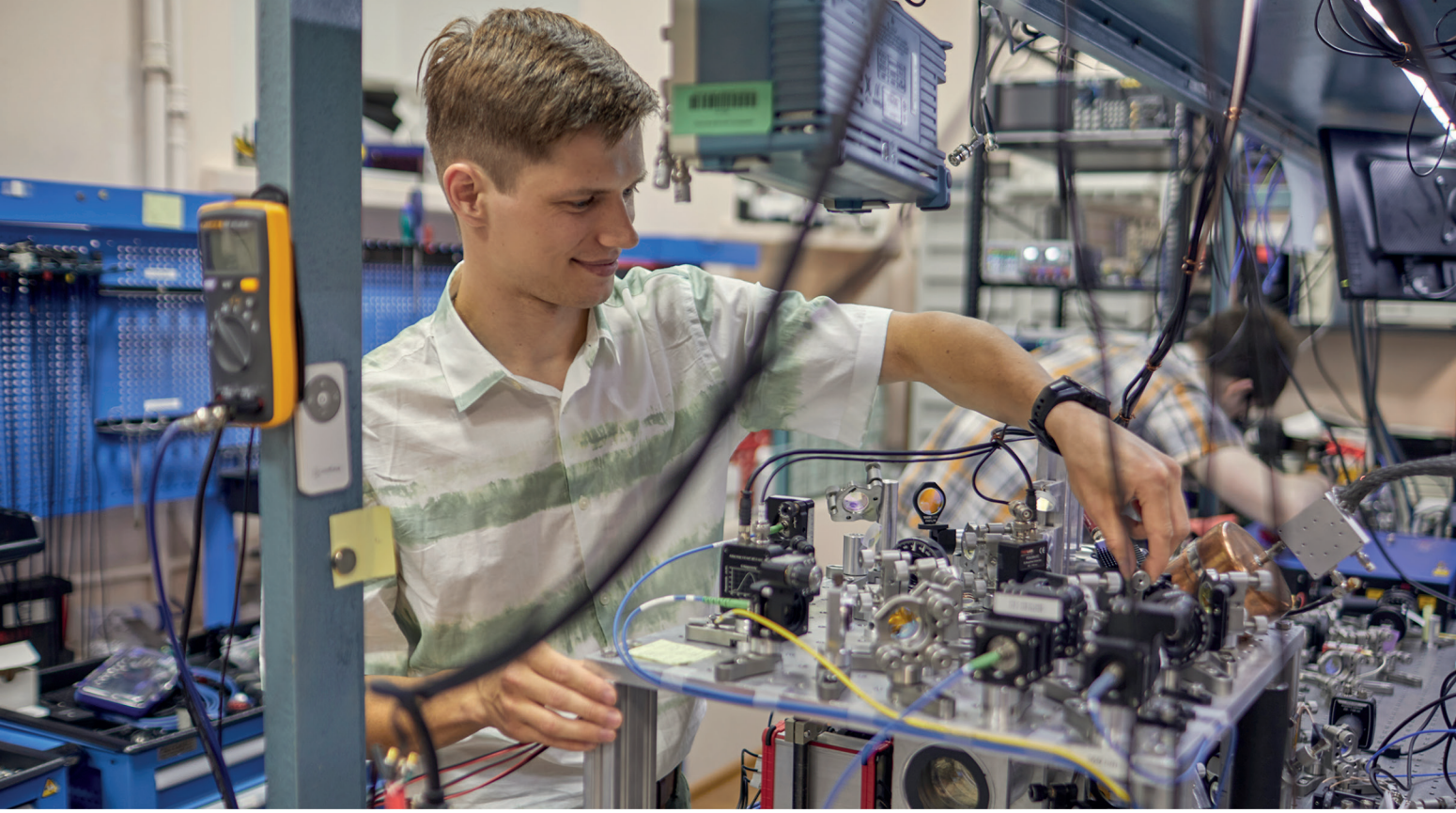


Рисунок 2. Температурные зависимости: а) максимально достижимого эффективного показателя двулучепреломления при электрооптическом переключении (λ = 532 нм); б) времени соответствующего электрооптического переключения

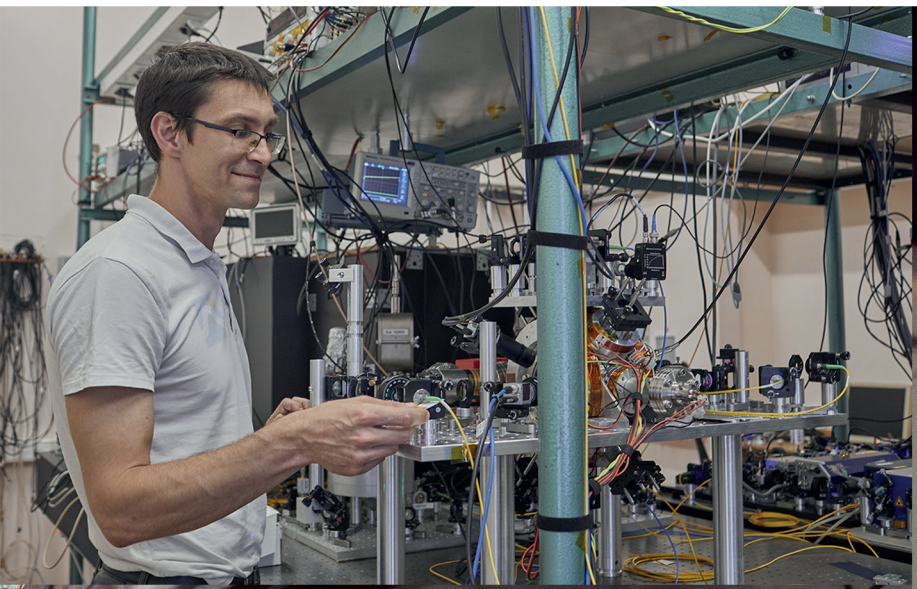
Таким образом, показано, что нагрев не является негативным фактором, а, наоборот, увеличивает глубину и скорость фазовой модуляции. Полученные результаты могут быть использованы при разработке фазовых и амплитудных модуляторов света видимого диапазона.

Результаты опубликованы:

1. Barbashov, V. A. Temperature dependencies of electrically controlled birefringence in the deformed helix ferroelectric mode of ferroelectric and ferrielectric liquid crystals. / V. A. Barbashov, T. P. Tkachenko, E. P. Pozhidaev. // Optical Materials. – 2025. – Vol. 168. – Art. ID 117408. – DOI 10.1016/j.optmat.2025.117408



Отделение оптики



Отделение оптики

Создание экспоненциальной VLS-решетки МР-диапазона

А. И. Аржанов, В. В. Шульга, А. С. Шелковников, К. Е. Алексашин, А. О. Колесников, М. Д. Логачев, А. Н. Шатохин, Е. А. Вишняков, Е. Н. Рагозин, А. В. Наумов

Методом электронно-лучевой литографии на модернизированном нанолитографе ZBA-21 изготовлена плоская VLS-решетка с экспоненциально изменяющейся вдоль ее поверхности частотой линий от 160 до 560 мм$^{-1}$. Решетка предназначена для инновационного одноэлементного монохроматора скользящего падения с высоким спектральным разрешением, в котором сканирование длины волны осуществляется перемещением решетки вдоль ее поверхности. При этом спектральное изображение обладает неизменным высоким качеством в спектральном диапазоне 90–200 Å при ширине решетки 60 мм. Число штрихов решетки превышает 19 тысяч, а зависимость плотности линий от координаты соответствует проектной.

Исследование электронной структуры материалов, контроль оптических элементов литографа для микроэлектроники и оптики для солнечной астрономии требуют монохроматизации мягкого рентгеновского излучения. В ФИАН была предложена инновационная схема одноэлементного монохроматора, в которой сканирование длины волны достигается перемещением решетки вдоль ее поверхности. При этом все параметры волнового фронта выходящего из монохроматора пучка постоянны, что позволяет сохранять неизменное высокое спектральное разрешение во всем диапазоне длин волн (Рисунок 1). Ключевым элементом монохроматора является решетка с переменным шагом (Varied Line-Space grating, VLS-решетка), частота штрихов которой зависит от координаты по экспоненциальному закону. Спектральный диапазон прибора определяется шириной решетки, а качество выходного пучка – точностью позиционирования штрихов.

Решетка была изготовлена в Троицком обособленном подразделении ФИАН с помощью модернизированного электронного нанолитографа ZBA-21, обеспечивающего технологический стандарт 200 нм на поверхностях с размерами до 178×178 мм. Для совмещения отдельных элементов литографируемой структуры используется прецизионная лазерно-интерферометрическая система, обеспечивающая «сквозную» точность позиционирования не хуже 100 нм. Изготовленная решетка представляет собой стеклянную пластину 5×5 дюймов, покрытую 160 нм слоем хрома. Рабочая область решетки 60×10 мм находится в центре пластины (Рисунок 2).

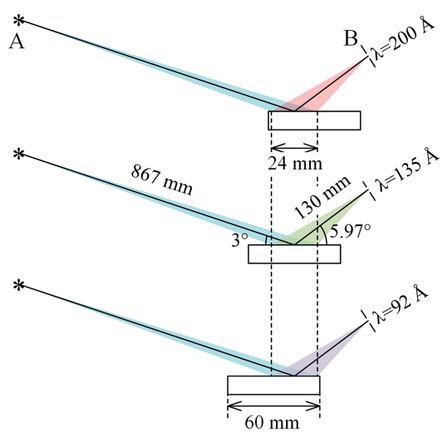


Рисунок 1.Схема монохроматора с линейно перемещаемой плоской VLS-решеткой. Источник (А) и выходная щель (В) неподвижны. При трансляции частота линий в освещенной области решетки изменяется, а с ней и длина волны излучения, собранного VLS-решеткой в точку В

Процесс изготовления включал в себя экспонирование резиста электронным пучком, его проявление, травление слоя хрома под маской остаточного резиста, удаление резиста и промывку изделия.

Профиль штрихов решетки был измерен на атомно-силовом микроскопе NTegra в МПГУ. Глубина профиля 160 нм и его форма соответствуют требуемым параметрам и подтверждают стабильность и воспроизводимость технологии.

Зависимость частоты штрихов от координаты была измерена по углу дифракции излучения He-Ne лазера при нормальном падении на решетку. Она находится в полном согласии с проектным экспоненциальным законом.

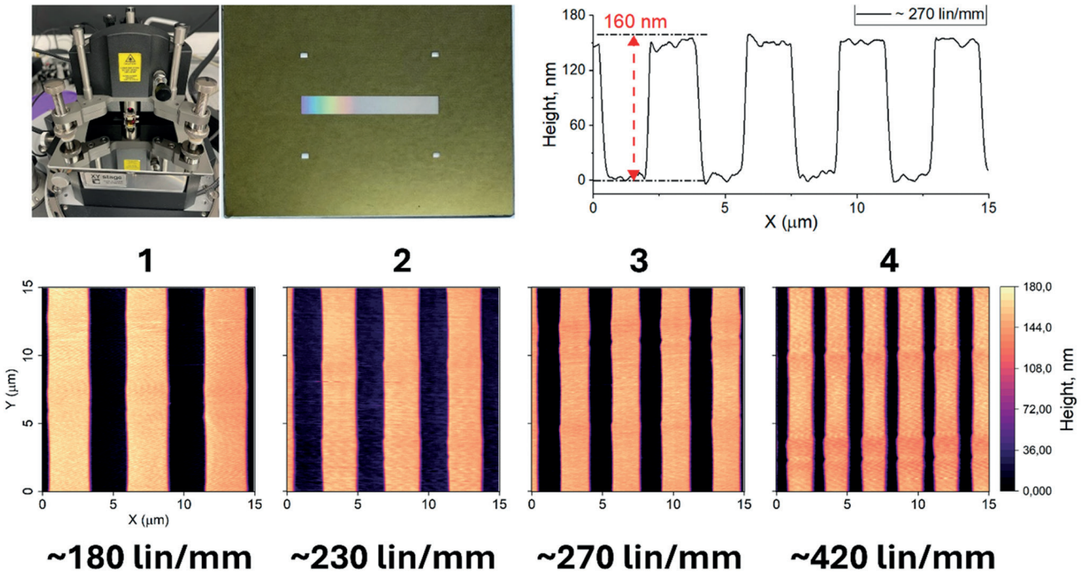


Рисунок 2. АСМ NTegra. Наверху: общий вид изделия (на фотографиях слева) и высота профиля (данные АСМ; график справа). Внизу: участки поверхности с различной частотой линий (данные АСМ)

Полученные результаты демонстрируют потенциал для создания приборов широкого применения: разработка литографических компонентов для микроэлектроники, оснащение синхротронов (СКИФ, СИЛА) отечественной оптикой и проведение анализа электронной структуры новых материалов. Электронная литография способствует развитию телекоммуникационных систем, биомедицинской диагностики, квантовых устройств и рентгеновской оптики нового поколения.

Работа выполнена в рамках Госзадания ФИАН (А. И. Аржанов, В. В. Шульга, А. С. Шелковников, К. Е. Алексашин, А. В. Наумов). Работа А. О. Колесникова, М. Д. Логачева, А. Н. Шатохина, Е. А. Вишнякова и Е. Н. Рагозина поддержана грантом РНФ (25-12-00314).

Результаты опубликованы:

1. Штамповая электронная нанолитография как инструмент изготовления апериодических дифракционных решеток для рентгеновской оптики. / А.И. Аржанов, В.В. Шульга, А.С. Шелковников, [и др.]. // Фотоника.– 2025. – Т. 19. – № 4. – С. 292-295. – DOI 10.22184.1993-7296.FRos.2025.19.4.292.295

Отделение оптики

Особенности пространственного распределения параметров плазмы в разряде, не ограниченном стенками: эффект облета анода электронами

А. В. Бернацкий, И. И. Драганов, Н. А. Дятко, И. В. Кочетов, В. В. Лагунов, В. Н. Очкин

Исследовано пространственное распределение параметров плазмы в разряде, не ограниченном стенками. Разряд зажигался в гелии между полым катодом и сетчатым анодом в вакуумной камере большого объема. Измерения проводились методом зонда Ленгмюра. Установлено, что заметная концентрация электронов в области за анодом обусловлена облетом электронами анода, а не прохождением через него. Результаты 2D моделирования методом Монте–Карло согласуются с результатами измерений.

Обнаружен эффект облета анода электронами в плазме разряда, не ограниченном стенками. Разрядное устройство, расположенное в вакуумной камере большого объема, состояло из прямоугольного полого вольфрамового катода (100×10 мм^2 на срезе) и сетчатого стального анода (100×10 мм^2, толщина проволоки 0.4 мм, размер ячейки 1.25×1.25 мм^2). Расстояние между открытой стороной катода и анодом 30 мм. Разряд зажигался в гелии при давлении ~2 мбар [1].

Методом зондов Ленгмюра измерены двумерные пространственные распределения потенциала плазмы, концентрации электронов и их средней энергии. При обработке измеренных вольт-амперных характеристик зонда использовался предложенный авторами алгоритм выбора параметров сглаживающих фильтров [2] для раздельного получения низкоэнергетичной и высокоэнергетичной частей функции распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ). Результирующая ФРЭЭ получалась путем «сшивки» этих частей.

Показано, что область существования плазмы существенно превышает область, ограниченную апертурой разрядной системы, и значительная концентрация электронов Ne наблюдается в области за анодом (см. Рисунки 1 и 2) [1, 3].

Установлено, что заметная концентрация электронов за анодом обусловлена облетом электронами анода, а не прохождением их через сетчатый анод. Согласно измерениям, доля полного тока, который затекает на анод со стороны противоположной катоду, составляет 12 % в условиях эксперимента [3].

Расчетно-теоретические исследования были выполнены в рамках 2D моделирования методом Монте–Карло (см. Рисунки 1 и 2 (b)) [3]. Движение электронов, стартовавших со среза катода, моделировалось в 2D электрическом поле, рассчитанном по результатам измерений пространственного распределения потенциала плазмы. Результаты моделирования согласуются с результатами измерений.

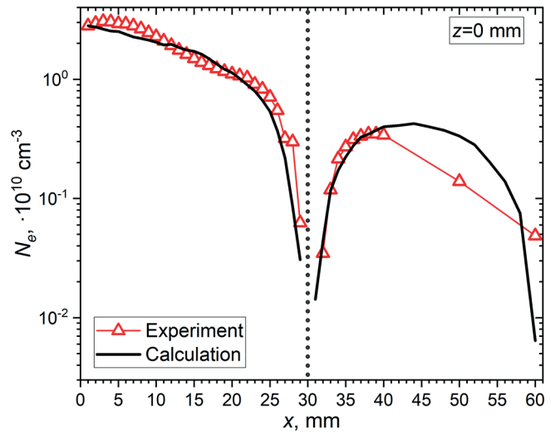


Рисунок 1. Распределение концентрации электронов вдоль оси разрядной системы [3]. x = 0 мм соответствует положению среза катода, x = 30 мм – положению анода

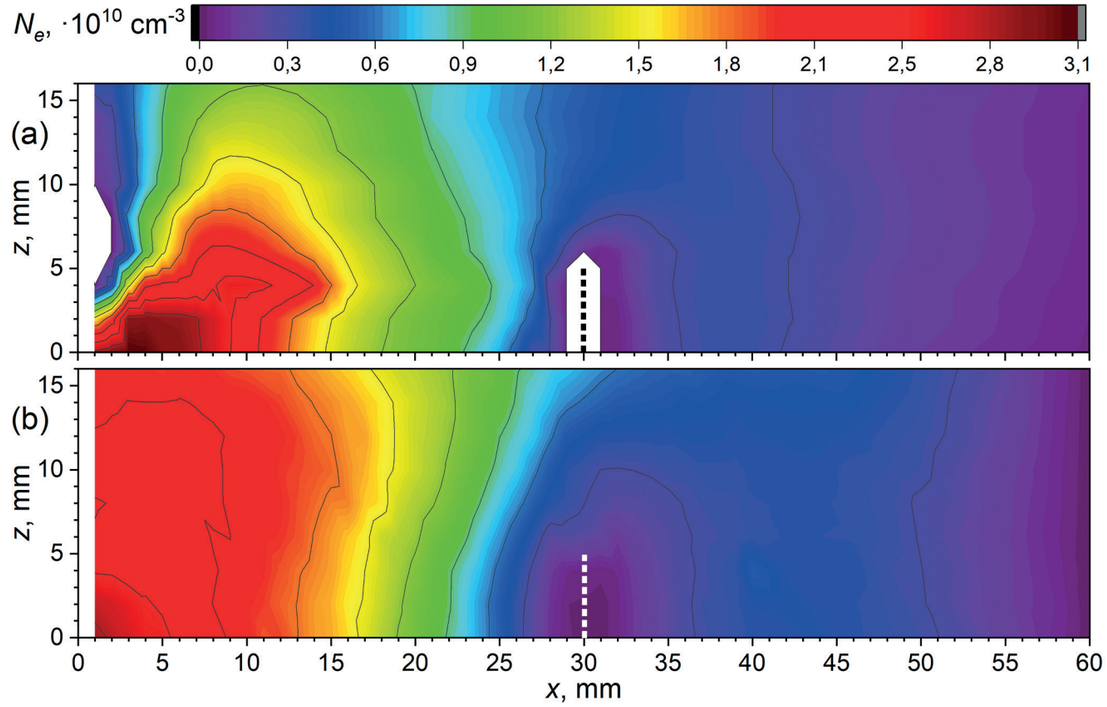


Рисунок 2. Двумерное распределение концентрации электронов в полуплоскости, проходящей через центральную ось (X) разрядной системы перпендикулярно (ось Z) длинной стороне анода [3]. Положение среза катода: x = 0 мм, z = (0: 5) мм; анода: x = 30 мм, z = (0: 5) мм. (a) – измерения, (b) – моделирование

Результаты опубликованы:

1. Local plasma parameters of a discharge without sidewalls supported by a hollow cathode. / A. V. Bernatskiy, I. I. Draganov, N. A. Dyatko, [et al.]. // Plasma Chemistry and Plasma Processing. – 2025. – Vol. 45. – Iss. 3. – P. 993-1009. – DOI 10.1007/s11090-025-10552-5.
2. On the choice of filters and their parameters in the determination of EEDF in gas discharge plasma from the current-voltage characteristic of the Langmuir probe. / A. V. Bernatskiy, I. I. Draganov, N. A. Dyatko, [et al.]. // Vacuum. – 2025. – Vol. 235. – Art. ID 114162. – DOI 10.1016/j.vacuum.2025.114162.
3. Spatial distribution of plasma parameters in a hollow cathode discharge not limited by walls: experiment and modeling. / A. V. Bernatskiy, I. I. Draganov, N. A. Dyatko, [et al.]. // Physical Review E. – 2025. – Vol. 112. – Iss. 2.– Art. ID 025204. – 10 pp. – DOI 10.1103/hfnf-92bq.

Случайная лазерная генерация в порошке нитрата бария: аномально высокая энергетическая эффективность и регулируемая временная задержка рассеянного излучения

В. В. Воронова, А. Д. Кудрявцева, Т. В. Миронова, М. А. Шевченко, Н. В. Чернега, С. Ф. Уманская

В порошке нитрата бария экспериментально получено рекордно высокое для неоднородных сред значение коэффициента преобразования в первую стоксову компоненту ВКР (30 %). При исследовании временной динамики случайной лазерной генерации в $Ba(NO_3)_2$ впервые обнаружена временная задержка первой стоксовой компоненты ВКР, линейно зависящая от энергии накачки.

Выполнен широкий круг исследований спектральных, энергетических, временных и пространственных характеристик случайной лазерной генерации в порошке нитрата бария. Длина свободного пробега фотона в образцах определялась с помощью измерения профиля конуса когерентного обратного рассеяния света. Полученная таким образом длина свободного пробега составляет 5.4 мкм, что соответствует режиму слабого рассеяния, когда некогерентная обратная связь играет основную роль в эффекте рамановской случайной лазерной генерации.

В работе использовались два временных режима: стационарный, когда длительность импульса накачки значительно больше времени дефазировки рамановской моды, и переходный, когда импульс накачки значительно короче. Для осуществления этих двух режимов использовалась вторая гармоника двух Nd:YAG-лазеров: пикосекундного и наносекундного. При пикосекундном возбуждении было зарегистрировано две стоксовых и одна антистоксова компонента вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) в порошке $Ba(NO_3)_2$. При наносекундном возбуждении наблюдалась только первая стоксова компонента.

Были выполнены исследования зависимости интенсивности компонент ВКР от температуры и от интенсивности возбуждающего излучения [1]. Температурные измерения показали, что понижение температуры образцов от комнатной до температуры жидкого азота при пикосекундном возбуждении приводит к существенному росту интенсивности стоксовых компонент ВКР (Рисунок 1).

В экспериментах по исследованию зависимости интенсивности компонент ВКР от интенсивности возбуждающего излучения был получен рекордно высокий для случайных лазеров коэффициент преобразования в ВКР (30 %) [1].

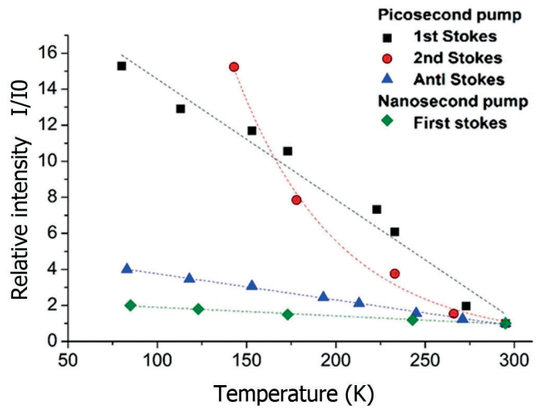


Рисунок 1. Отношение интенсивностей компонент ВКР при заданной температуре к интенсивности при комнатной температуре в зависимости от температуры

В порошке нитрата бария были также измерены временные сдвиги компонент ВКР относительно импульса лазерного излучения (Рисунок 2, (a)). При исследовании временной динамики стоксовых компонент ВКР света в $Ba(NO_3)_2$ обнаружена временная задержка первой стоксовой компоненты, линейно зависящая от энергии накачки, что ранее не наблюдалось в неоднородных средах (Рисунок 2 (b), (c)) [1].

Экспериментально обнаруженная временная задержка импульсов ВКР относительно накачки для неоднородных сред одновременно с рекордно высоким коэффициентом преобразования открывает широкие возможности для создания источников бесспеклового излучения с регулируемой временной задержкой в пикосекундном диапазоне, востребованных для исследования быстропротекающих процессов в прозрачных диэлектриках.

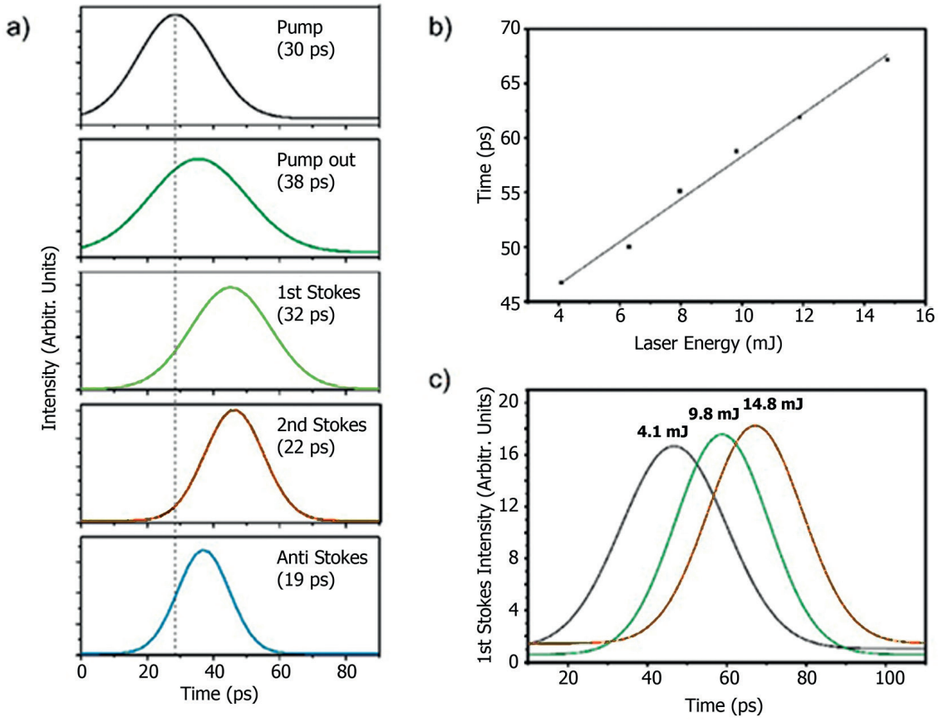


Рисунок 2. (a) Временные характеристики падающего и прошедшего через образец импульса накачки, 1-я, 2-я и антистоксова компоненты ВКР в порошке; (b) зависимость временной задержки 1-й стоксовой компоненты от энергии накачки; (c) зависимость интенсивности импульсов 1-й стоксовой компоненты от временной задержки для различных энергий накачки

Результаты опубликованы:

1. Некоторые фундаментальные и прикладные аспекты случайной лазерной генерации. / А. Д. Кудрявцева, Т. В. Миронова, М. А. Шевченко, [и др.]. // Письма в ЖЭТФ. – 2025. – Т. 122. – № 10. – С. 627-639. – DOI 10.1134/S0021364025608152.

Отделение оптики

Новый подход для решения задачи повышения чувствительности лазерно-индуцированной эмиссионной спектроскопии

М. А. Шевченко, А. Н. Маресев, Н. В. Чернега, С. Ф. Уманская, В. В. Воронова

Впервые для повышения чувствительности лазерно-индуцированной эмиссионной спектроскопии (ЛИЭС) было предложено и реализовано использование упорядоченных структур с локализованным плазмонным резонансом. Методом компьютерного моделирования были исследованы условия резонанса при различных геометрических параметрах подложки. Полученные экспериментально данные согласуются с результатами моделирования.

Лазерно-индуцированная эмиссионная спектроскопия (ЛИЭС) благодаря ряду преимуществ, таких как высокая скорость получения информации об элементном составе образца при минимальной его подготовке, возможность бескалибровочного определения концентрации, гибкая настройка, многоэлементный анализ, выходит на передний план среди методов элементного анализа твердых тел, жидкостей и мезоскопических систем. Метод широко используется в различных областях от медицины до промышленности. В связи с этим разработка новых способов повышения чувствительности ЛИЭС является весьма актуальной задачей.

В данной работе впервые предложен и экспериментально продемонстрирован метод повышения чувствительности ЛИЭС с помощью периодических структур с локализованным поверхностным плазмонным резонансом. Использование таких структур позволяет управлять положением резонанса при изменении геометрических параметров подложки. Предложенный метод был применен для элементного анализа наночастиц TiO_2 с использованием периодических матриц, полученных вертикальным осаждением частиц SiO_2 с последующим напылением золота (структура «золотые шапочки»). Для сравнения в качестве подложек использовались плоские стеклянные пластины с нанесенным на них слоем золота такой же толщины. На подложки наносилась суспензия наночастиц двуокиси титана размером 5–10 нм, и образцы высушивались.

Плазма создавалась излучением Nd:YAG лазера (длина волны 1064, 532 и 355 нм, длительность импульса 30 пс).

Рисунок 1 демонстрирует возрастание интенсивности сигнала ЛИЭС в TiO_2 в упорядоченных образцах по сравнению с плоскими подложками.

Экспериментально получен коэффициент усиления 11.6 для линии Ti при длине волны возбуждения 1064 нм для подложки

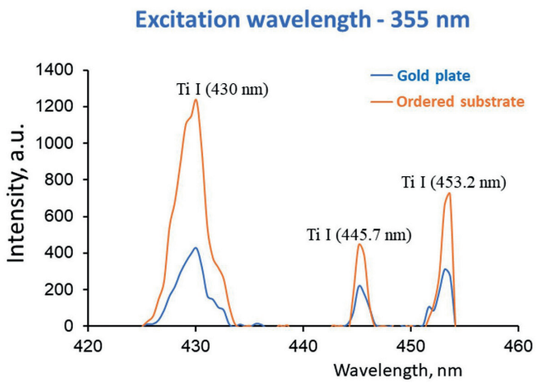


Рисунок 1. Сравнение интенсивностей линий Ti при использовании слоя золота, нанесенного на упорядоченную структуру и на плоскую стеклянную пластину

с радиусом сфер 115 нм и толщиной золота 14 нм [1]. Также было показано, что стабильность сигнала при этом значительно повышается.

Были также определены оптимальные концентрации наночастиц в суспензии TiO_2 для наиболее эффективного усиления сигнала ЛИЭС.

Проведено моделирование плазмонных свойств используемых структур в зависимости от их параметров методом конечных элементов. Результаты моделирования представлены на Рисунке 2. Моделирование дало возможность определить оптимальные параметры подложки (радиус сфер и толщину слоя золота на поверхности подложки). Параметры подложки, при которых в экспериментах наблюдалось наибольшее возрастание эффективности ЛИЭС, близки к оптимальным параметрам, найденным с помощью компьютерного моделирования.

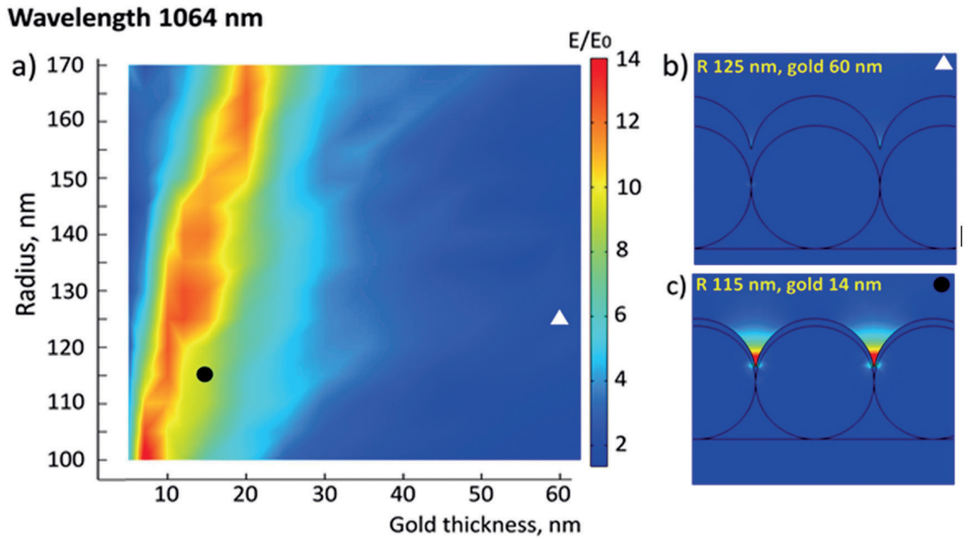


Рисунок 2. a) увеличение напряженности поля на поверхности упорядоченной подложки в зависимости от радиуса и толщины золота при 1064 нм; b) распределение ближнего поля для нерезонансной подложки с радиусом сферы 125 нм и толщиной золота 60 нм (белый треугольник); c) распределение ближнего поля для резонансной подложки с радиусом сферы 115 нм и толщиной золота 14 нм (черный круг)

Результаты опубликованы:

1. Ordered substrate based on gold film over SiO_2 microspheres for increasing the sensitivity of the laser-induced breakdown spectroscopy method in the study of nanoparticles. / M. A. Shevchenko, A. N. Maresev, N. V. Tcherniega, [et al.]. // Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy. – 2025. – Vol. 226. – Art. ID 107159. – DOI 10.1016/j.sab. 2025.107159.

Отделение оптики

Демонстрация времени когерентности кубита на атомах тулия до 1 минуты

Д. А. Мишин, Д. О. Трегубов, Д. И. Проворченко, А. А. Головизин, Н. Н. Колачевский

В лаборатории ФИАН исследованы свойства атомов тулия применительно к квантовым вычислениям. Для микроволнового кубита, работающего на сверхтонком переходе между компонентами основного состояния, продемонстрировано время когерентности в несколько десятков секунд. При этом в стандартной схеме спектроскопии Рамси было получено время когерентности $T_2^* = 22_{-2}^{+2}$ с, а при наличии дополнительных импульсов динамической развязки — $T_2^* = 22_{-14}^{+59}$ с.

Благодаря своей богатой энергетической структуре, атомы тулия находят применение при создании транспортируемых оптических часов и квантовых симуляторов. В рамках исследований, проводимых на установке, разрабатываемой в качестве оптического стандарта частоты, были исследованы характеристики когерентности микроволнового перехода между центральными магнитными подуровнями сверхтонких компонент основного состояния атома тулия, а также возможность когерентных манипуляций над этими состояниями и состояниями часового перехода.

Упрощенная схема эксперимента представлена на Рисунке 1: атомы захвачены в оптическую решетку и подготовлены на центральном магнитном подуровне основного состояния, возбуждение сверхтонкого перехода на частоте 1.5 ГГц осуществляется с помощью дипольной антенны, в то время как для переноса населенности в метастабильные состояния используется излучение, настроенное в резонанс с соответствующими часовыми переходами, которые исследуются в рамках создания транспортируемого стандарта частоты.

Анализ времени когерентности рассматриваемого микроволнового перехода осуществлялся путем исследования затухания контраста осцилляций Рамси при увеличении времени свободной эволюции. Экспериментальные данные приближались функцией $C(T) = C_0 \exp\{-(T/T_2^*)^2\}$, где C_0 и T_2^* – начальный контраст и время когерентности соответственно. Результаты приведены на Рисунке 2.

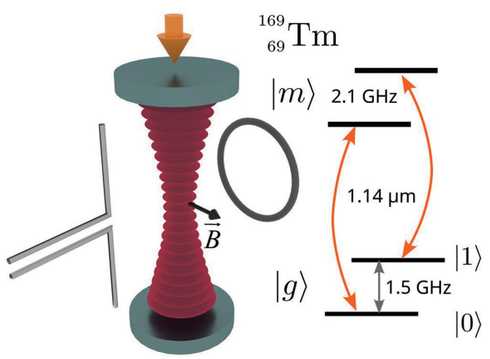


Рисунок 1. Упрощенная схема эксперимента: атомы захвачены в оптическую решетку, с помощью микроволнового и лазерного излучений осуществляются манипуляции состояниями микроволнового и оптического кубита

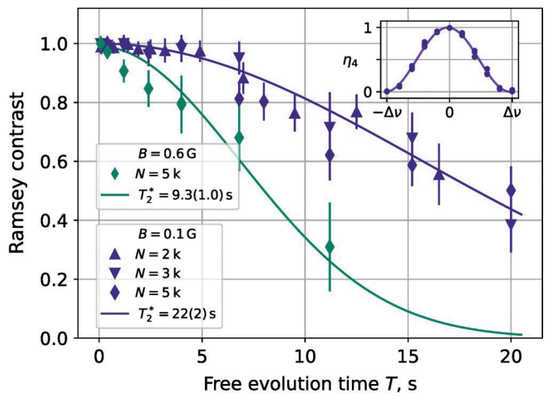


Рисунок 2. Затухание контраста осцилляций Рамси в зависимости от времени свободной эволюции системы. Результаты представлены для двух значений магнитного поля в эксперименте

Также было показано, что основная причина затухания связана с флуктуациями магнитного поля в эксперименте, а применение дополнительных импульсов динамической развязки позволило получить время когерентности $T_2^* = 22_{-14}^{+59}$ c, что сравнимо с рекордными значениями для нейтральных атомов.

Возможность возбуждать атомы тулия в метастабильные часовые состояния потенциально позволяет реализовывать протоколы «omg»-архитектуры и работы в кудитном вычислительном пространстве, что может существенно повысить качество проводимых операций. Для демонстрации возможности когерентной работы с часовыми уровнями в рассмотренную ранее схему были добавлены импульсы часового лазерного излучения и исследовано их влияние на затухание контраста осцилляций Рамси (Рисунок 3). В случае одновременного возбуждения часовых переходов время когерентности ограничено временем жизни часового уровня, что достаточно для реализации «omg»-архитектуры и работы с кудитами.

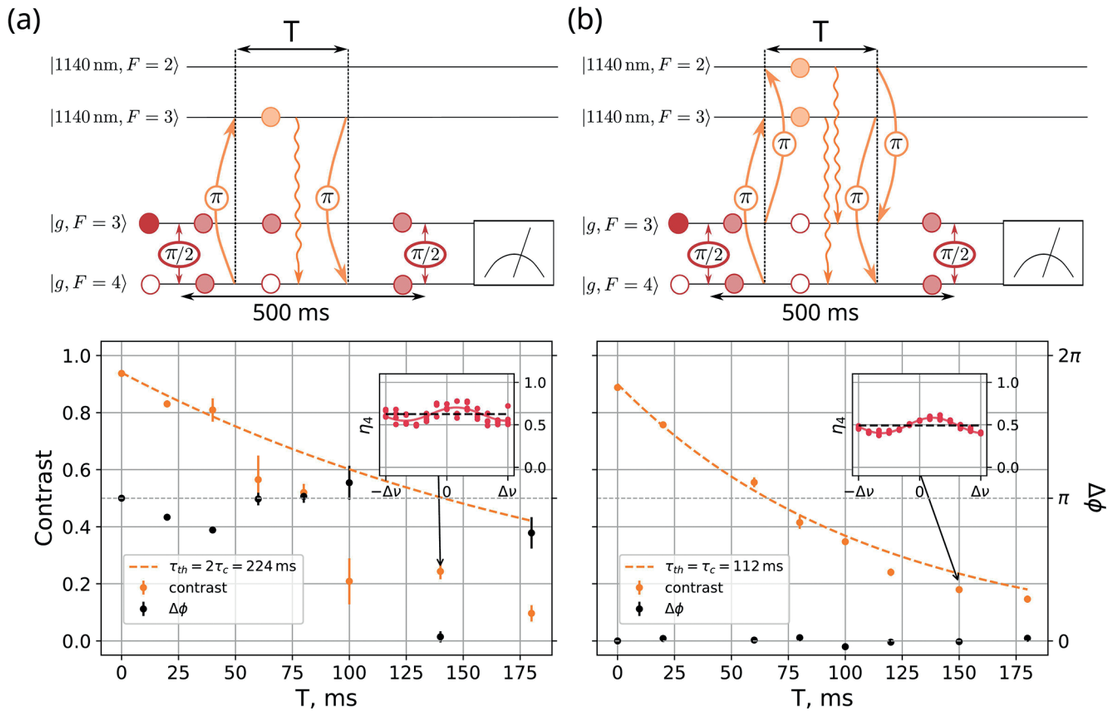


Рисунок 3. Когерентный перенос атомов на метастабильные уровни посредством часового лазерного излучения. Представлены результаты измерений для селективного переноса одного из кубитных состояний (a), а также для одновременного переноса двух кубитных состояний (b)

Результаты опубликованы:

1. Coherence of Microwave and Optical Qubit Levels in Neutral Thulium / D. Mishin, D. Tregubov, N. Kolachevsky, A. Golovizin // PRX Quantum. – 2025. – Vol. 6. – Iss. 4. – Art. ID 040329. – 19 pp. – DOI 10.1103/f8xg-w57m.

Индуцированные ультракороткими лазерными импульсами периодические структуры на тонких теллуридных пленках

М. П. Смаев, П. А. Смирнов, Я. С. Лебедева, К. Г. Никитин, Д. О. Кузовков, М. Е. Федянина, С. А. Козюхин, П. И. Лазаренко, И. А. Будаговский

Двухфазные лазерно-индуцированные периодические поверхностные структуры (ЛИППС) в фазопеременных материалах перспективны для задач микроструктурирования поверхности и создания элементов фотоники. Продемонстрировано формирование аморфно-кристаллических ЛИППС в результате воздействия феттосекундных импульсов на тонкие халькогенидные пленки GeTe и $Ge_2Sb_2Te_5$. Выявлено отсутствие подобных структур в пленках Sb_2Te_3, что объясняется отличиями в механизме кристаллизации и электрофизических свойствах.

Фазопеременные материалы привлекательны сочетанием высокого контраста оптических и электрических характеристик между аморфным и кристаллическим фазовыми состояниями с возможностью быстрого (10^{-8}÷10^{-7} с) и обратимого переключения между этими состояниями при внешнем воздействии. К таким материалам, в частности, относятся тонкопленочные бинарные и тройные соединения на основе халькогенидов, которые демонстрируют быструю смену фазового состояния при воздействии тепловых, электрических или оптических импульсов. Наиболее известным халькогенидным фазопеременным материалом является теллуридное соединение $Ge_2Sb_2Te_5$, являющееся основой для фазопеременных устройств хранения данных.

Воздействие ультракоротких (фемто- и пикосекундных) лазерных импульсов на халькогенидные фазопеременные пленки существенно расширяет диапазон наблюдаемых явлений. В частности, помимо сплошной (локальной, в соответствие с профилем интенсивности) лазерной кристаллизации или аморфизации, могут наблюдаться лазерно-индуцированные периодические поверхностные структуры (ЛИППС) в виде полос аморфной и кристаллической фаз. Механизм формирования ЛИППС обычно связывают с интерференцией падающего излучения и индуцированной вторичной плазмон-поляритонной поверхностной волной.

В рамках представляемого исследования определены режимы возникновения ЛИППС на тонких пленках тройного фазопеременного соединения $Ge_2Sb_2Te_5$ в сравнении с его бинарными компонентами – теллуридными соединениями GeTe и Sb_2Te_3. Модификация проводилась ультракороткими лазерными импульсами длительностью 250 фс с длиной волны 1030 нм, следующих с частотой 100 кГц. Энергия в одном импульсе составляла около 1 мкДж. Перемещение пучка относительно поверхности пленок осуществлялось с помощью гальванометрического сканатора со скоростью 400 мкм/с. Для изменения размера облучаемой области образец смещали относительно фокальной плоскости в область расходящегося пучка. Средняя плотность энергии Fav варьировалась в диапазоне от 2 до 70 мДж/см^2.

В результате лазерного воздействия было продемонстрировано, что в тонких аморфных пленках GeTe и $Ge_2Sb_2Te_5$ толщиной 120 нм формируются двухфазные ЛИППС в виде чередующихся линий аморфной и кристаллической фаз (Рисунок 1, a для GeTe), с периодом, близким к длине волны записывающего излучения (около 1 мкм), и ориентированные перпендикулярно поляризации светового поля. Энергетический диапазон, в котором наблюдаются только ЛИППС (без кристаллической области на оси пучка), является достаточно узким и составляет для GeTe F_{av} = 4.5…5.2 мДж/ см^2, а для $Ge_2Sb_2Te_5$ F_{av} = 2.8…3.3 мДж/см^2. В пленках Ge_2Sb_2 периодические структуры не формируются.

Анализ периодических структур в GeTe, проведенный посредством атомно-силовой микроскопии (Рисунок 1, b и c), а также спектроскопии комбинационного рассеяния света указывает на сходство периодических структур в GeTe и $Ge_2Sb_2Te_5$. Отсутствие ЛИППС в Sb_2Te_3 может быть следствием значительно меньшей проводимости и отличием в механизме кристаллизации (рост размеров кристаллических зародышей или рост их числа).

Предложенный подход к микроструктурированию поверхностей материалов перспективен для дифракционных приложений, создания элементов интегральной оптики и инженерии метаповерхностей на основе тонкопленочных халькогенидных соединений.

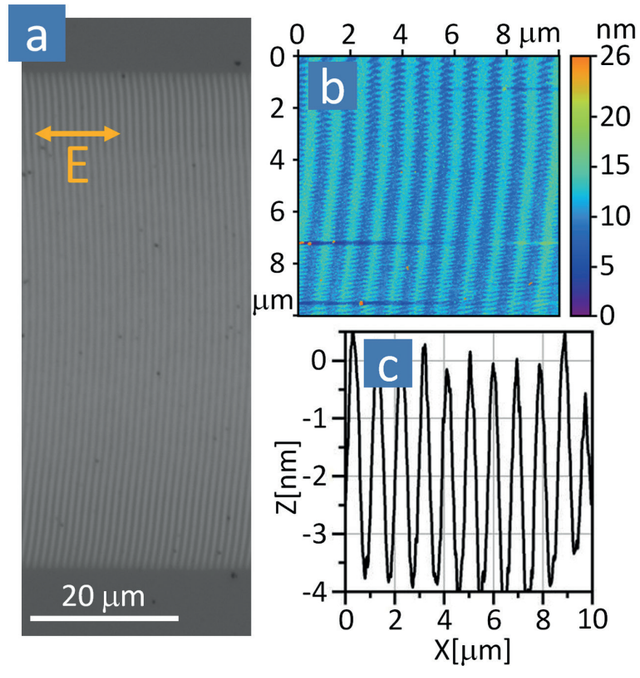


Рисунок 1. Лазерно-индуцированные периодические поверхностные структуры (ЛИППС) на пленке GeTe, сформированные сканирующим пучком феттосекундных импульсов: (a) Изображения с оптического микроскопа, (b) АСМ-изображения и (c) измеренные высотные профили

Результаты опубликованы:

1. Микроструктурирование аморфных теллуридных пленок фемтосекундными лазерными импульсами. / П. А. Смирнов, Я. С. Лебедева, К. Г. Никитин, [и др.]. // Неорганические материалы. – 2025. – Т. 61. – № 1-2. – С. 101-110. – DOI 10.31857/S0002337X25010101.

Отделение оптики

Фотолюминесценция 1.4 эВ никелевых центров окраски в алмазе при низких температурах (80 ÷ 300 К)

Н. С. Курочкин, В. М. Коршунов, А. В. Грициенко, В. В. Сычев, И. В. Тайдаков

Получены зависимости параметров фотолюминесценции (ФЛ) 1.4 эВ Ni центров в алмазах в диапазоне от 79 до 298 К. Показано, что уширение линии происходит по закону T^3, а сдвиг бесфононной линии зависит как T^4. На основе данных измерения полного спектра ФЛ центра получено значение фактора Дебая–Уоллера 0.25 при T = 79 К. Результаты подтверждают предположение о строении центра как NiV– и дают более полное представление о свойствах Ni центров, перспективных для люминесцентной термометрии ближнего ИК диапазона.

В работе представлены результаты температурных зависимостей параметров фотолюминесценции никелевых дефектов (1.4 эВ Ni-центры) в алмазе в широком температурном диапазоне (80 ÷ 298 К).

Были использованы микрокристаллы алмаза со средним размером 30 мкм, изготовленные методом высоких температур и давлений (HPHT-алмазы). Кристаллы содержали азотные и никелевые центры окраски, в частности, 1.4 эВ Ni центры. Предполагаемое строение центров – «никель-дивакансия» (Рисунок 1).

На Рисунке 2 показаны спектры центра при различных температурах. При 79 К в спектре излучения центра различается дублет 883/885 нм с бесфононными линиями (БФЛ), разделенными энергией около 2,8 мэВ. Они образованы за счет спин-орбитального расщепления основного уровня дефекта. С ростом температуры спектральные линии уширяются и становятся неразрешимыми при T > 120 К. Одновременно с этим максимум спектра смещается в сторону меньших длин волн, испытывая аномальное синее смещение.

Так как 1.4 эВ центры имеют фононную полосу, уходящую в ИК область, дополнительно были получены температурные зависимости полных спектров ФЛ при помощи спектрофлуориметра, чувствительного в ближнем ИК (Рисунок 3). Из анализа спектров получены зависимости от температуры параметров ФЛ: ширины БФЛ, ее положения, интенсивности люминесценции центров (Рисунок 4). Высказано предположение, что синий сдвиг БФЛ происходит преимущественно за счет 1.401 эВ компоненты БФЛ дублета.

Также установлено, что время жизни люминесценции падает с 22 до 15 нс при изменении температуры от 79 К до комнатной.

Ввиду того, что HPHT-алмазы, содержащие Ni дефекты, производятся в промышленных масштабах, такие кристаллы являются перспективным материалом для приложений люминесцентной термометрии в широком диапазоне температур. Например, для определения температур элементов различных двигателей, холодильных установок, компонентов электронных плат или же биологических тканей.

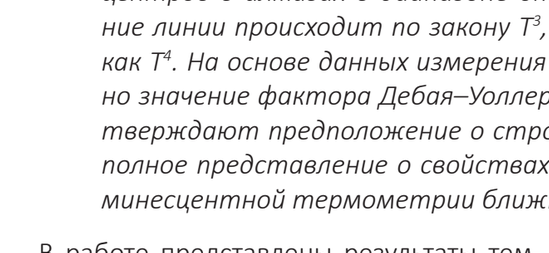


Рисунок 1. Слева – Энергетическая структура центра, который предположительно является NiV– дефектом. Справа – Структура дефекта в кристалле. Серым цветом изображены атомы углерода, белым – вакансии

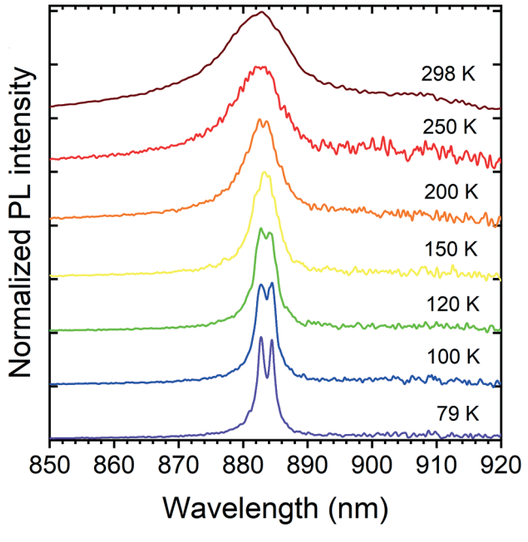


Рисунок 2. Нормированные спектры ФЛ 1,4 эВ центров при разных температурах. Спектры сдвинуты по вертикали для ясности

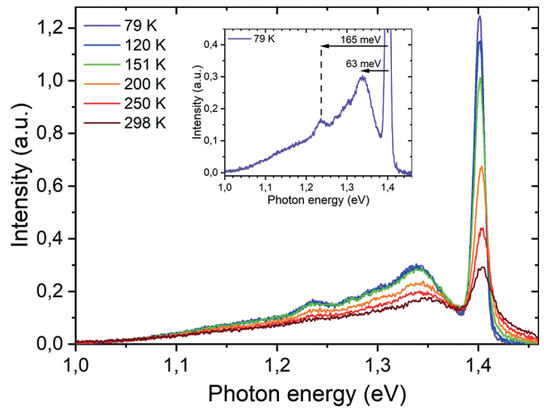


Рисунок 3. Полный спектр ФЛ с фононной полосой 1.4 эВ центров при разных температурах. На вставке: спектр при 79 К с указанными положениями фононных пиков

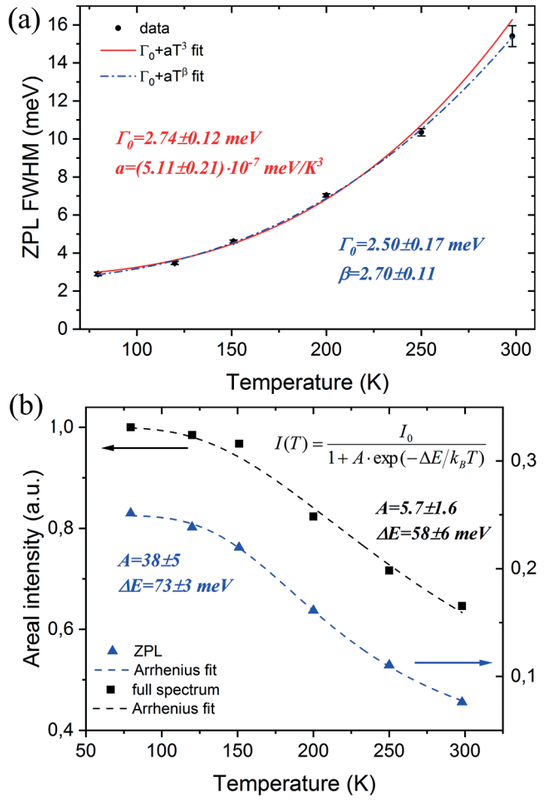


Рисунок 4. Температурные зависимости ширины БФЛ (a), интенсивности (b). Сплошными и пунктирными линиями показаны аппроксимации на основе формул, представленных на соответствующих графиках

Результаты опубликованы:

1. The 1.4 eV nickel color centers in diamonds: Photoluminescence study at low temperatures (80–300 K). / N. S. Kurochkin, V. M. Korshunov, A. V. Gritsienko, [et al.]. // Optical Materials. – 2025. – Vol. 167. – Art. ID 117262. – DOI 10.1016/j.optmat.2025.117262.
2. Температурные зависимости фотолюминесценции никелевых центров в алмазе ближнего ИК диапазона. / Н. С. Курочкин, В. М. Коршунов, А. В. Грициенко, [и др.]. // Матер. XX Междунар. молод. конф-ции по люминесценции и лазерной физике, посвящ. 30-летию со дня образования Иркутского филиала Института лазерной физики СО РАН : Матер. конф-ции, Иркутск, 30 июня–05 июля 2025 года. – Иркутск: изд-во Иркутского гос. ун-та, 2025. – С. 81–82. – ISBN 978-5-9624-2389-0.

Отделение оптики

Прототип пульсоксиметра на базе однопиксельного двухканального органического светодиода

А. И. Корников, М. И. Козлов, А. А. Ващенко, А. А. Поярков, А. С. Головешкин, Е. В. Латипов, Л. С. Лепнев, В. В. Уточникова

Создан прототип пульсоксиметра для постоянного мониторинга оксигенации крови с использованием единого органического светодиода на основе биметаллического комплекса европия–иттербия. Максимальная эффективность устройства достигнута варьированием излучающего комплекса по шести парам нейтрального и основного лигандов. Измеряемые величины оксигенации и частоты пульса полностью совпадали с полученными при помощи референсных коммерческих устройств.

Методика мониторинга оксигенации крови человека предполагает наличие двух излучающих в разных областях спектра светодиодов. По различным величинам поглощения или рассеивания их полос излучения оксигенированным и деоксигенированным гемоглобином вычисляется процент насыщения крови кислородом.

В работе впервые применена методика, где для этой цели используется единый органический светодиод (Рисунок 1, (а)) на основе биметаллического комплекса европия–иттербия $Eu_{0,1}Yb_{0,9}(L)3Q$ (L = β – дикетонаты; *Q* = нейтральные лиганды), обладающий узкополосным излучением в двух различных областях спектра на длинах волн 612 и 978 нм (Рисунок 1, (б)).

Такой подход позволяет увеличить точность измерения, поскольку с использованием узкополосного излучения минимизируется погрешность определения коэффициентов поглощения и рассеивания излучения кровью в тканях организма. Также появляется возможность использования одного органического светодиода, обладающего излучением в двух нужных областях спектра, вместо двух светодиодов, излучающих на разных длинах волн.

Для оптимизации спектра излучения светодиода был произведён подбор оптимального соотношения металлов европия и иттербия в биметаллическом комплексе, а также варьирование проводящей матрицы светодиода. Таким образом удалось получить спектр электролюминесценции, состоящий по большей части из узких линий излучения лантаноидов, без паразитной широкополосной засветки от матрицы светодиода, при этом интенсивность линии излучения европиевой составляющей была в 2–3 раза больше интенсивности иттербиевой составляющей (Рисунок 1, (б)).

Варьирование излучающего биметаллического комплекса по шести парам нейтрального и основного лигандов позволило определить наиболее энергоэффективный комплекс. Максимальная достигнутая яркость видимой компоненты светодиода составила ~500 кд/м^2, а мощность излучения инфракрасной компоненты ~10 мкВт/ см^2, что позволило создать на его основе прототип однопиксельного пульсоксиметра (Рисунок 1, (в)(г)), работающего на базе программного обеспечения платформы Arduino с оснасткой, изготовленной на 3D-принтере.

Полученный результат демонстрирует возможность создания гибких, недорогих, одноразовых медицинских OLED-устройств на основе биметаллических комплексов лантаноидов для постоянного мониторинга пульса и оксигенации крови человека.

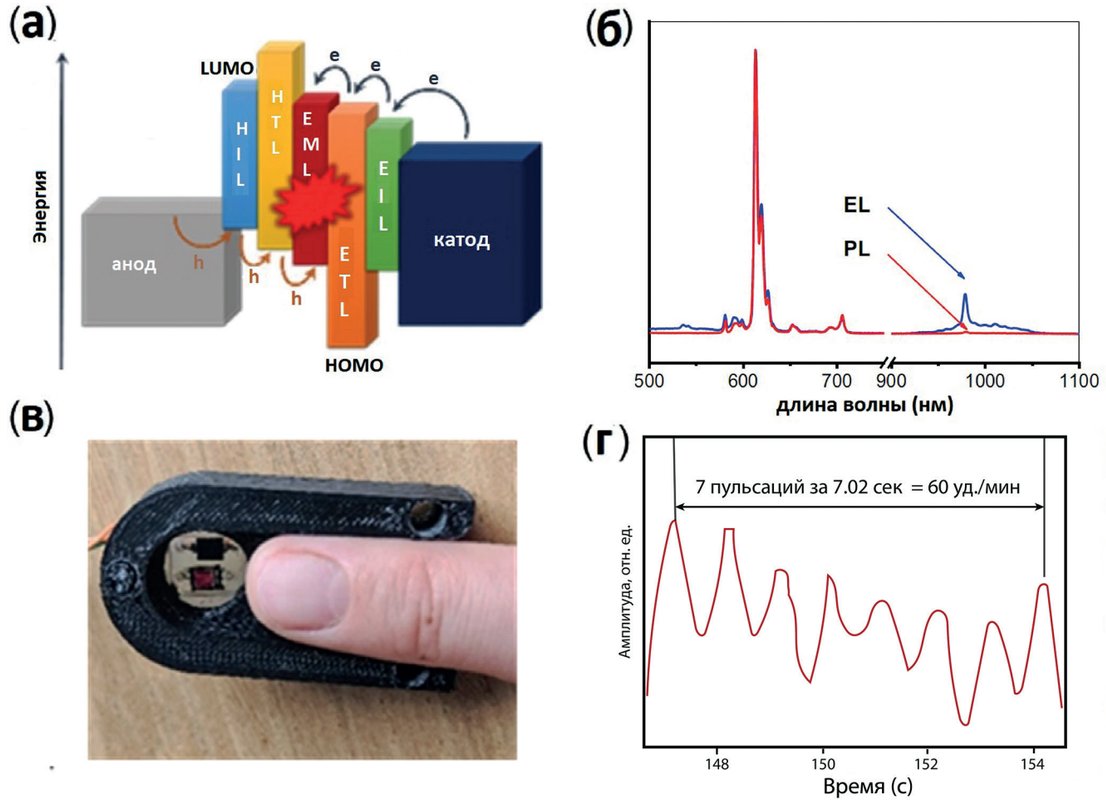


Рисунок 1. (а) энергетическая схема органического светодиода; (б) спектры электролюминесценции светодиода с Eu-Yb комплексом; (в) фотография верхней части прототипа пульсоксиметра; (г) пульсовая кривая в ближнем ИК-диапазоне при напряжении U = 8 В на светодиоде

Результаты опубликованы:

1. A Dual-Emissive Lanthanide Organic light-emitting diode for Single-Pixel Pulse Oximetry: From Molecular Design to Device-Level Integration. / A. I. Kornikov, M. I. Kozlov, A. A. Vashchenko, [et al.]. // ChemMedChem: Chemistry Enabling Drug Discovery. – 2025. – Vol. 20. – Iss. 22. – Art. ID e202500465. – 5 pp. – DOI 10.1002/cmdc.202500465.

Отделение оптики

Семикратное повышение точности люминесцентной термометрии с использованием нейронной сети

Т. А. Поликовский, В. Е. Гончаренко, В. М. Коршунов, М. Т. Метлин, Д. А. Метлина, С. В. Самсонов, Ю. А. Белоусов, И. В. Тайдаков

В работе предложен подход к созданию высокоточных люминесцентных термометров, сочетающий синтез координационного полимера Eu^{3+}/Tb^{3+} с 1,3-дикетонным лигандом и методы машинного обучения. Комплекс демонстрирует выраженную температурную зависимость люминесценции (190…300 K) и высокую чувствительность до 5.5 %·K^{-1}. Применение сверточной нейронной сети для анализа полного спектра позволило снизить ошибку определения температуры с 2.54 до 0.36 K, в семь раз повысив точность люминесцентной термометрии.

В представленной работе разработан подход к созданию высокоточных люминесцентных термометров, объединяющий направленный дизайн координационных соединений лантаноидов и методы машинного обучения. Показано, что широко используемая полуэмпирическая модель Мотта–Зейтца, основанная на распределении Больцмана, учитывает лишь основные процессы переноса энергии, что ограничивает точность измерения температуры. В связи с этим предложено использование методов машинного обучения для повышения точности люминесцентных термометров.

В качестве сенсорного материала был синтезирован новый полимерный координационный комплекс, содержащий трехвалентные ионы европия и тербия и 1,3-дикетонный лиганд 4,4,4-трифтор-1-(5,5-диметил-1H-пиразол-4-ил)бутан-1,3-дион, обеспечивающий эффективную сенсибилизацию люминесценции ионов лантаноидов. Полученный смешанно-металлический Eu^{3+}/Tb^{3+} комплекс образует координационный полимер, в котором реализуется эффективный перенос энергии между излучательными центрами. Это приводит к интенсивной люминесценции, обусловленной характерными f – f переходами ионов Tb^{3+} и Eu^{3+}, и позволяет использовать отношение интегральных интенсивностей полос эмиссии в качестве температурно-зависимого параметра, см. Рисунок 1.

Комплекс был охарактеризован методами структурного и спектроскопического анализа. Фотофизические исследования показали выраженную температурную зависимость люминесцентных свойств в диапазоне 190…300 K. Максимальная относительная температурная чувствительность достигает 5.5 %·K^{-1}, а неопределённость определения температуры составляет 0.1…1.8 K.

Ключевой особенностью стало применение методов искусственного интеллекта для анализа спектральных данных. Традиционные подходы в люминесцентной термометрии используют один параметр (например, отношение интенсивностей полос), что приводит к потере значительной части информации, содержащейся в спектре. В данной работе предложено анализировать полный спектральный сигнал с использованием методов машинного и глубокого обучения. Для этого была сформирована обучающая и тестовая выборка спектров, зарегистрированных при различных температурах, и применены различные алгоритмы, включая линейную и изотоническую регрессию, методы на основе деревьев решений, а также полносвязные и сверточные нейронные сети. Показано, что наиболее эффективным алгоритмом является сверточная нейронная сеть.

Применение сверточной нейронной сети позволило существенно повысить точность температурных измерений: среднеквадратичная ошибка определения температуры снизилась с 2.54 K (для модели Мотта–Зейтца) до 0.36 K, что соответствует улучшению точности примерно в семь раз.

Полученные результаты демонстрируют высокий потенциал применения методов машинного обучения для обработки спектральных данных и измерения температуры в задачах люминесцентной термометрии. Разработанные люминесцентные термометры могут быть перспективны для дистанционного измерения температуры в материаловедении, микро- и наноэлектронике, а также в биомедицинских исследованиях, особенно в системах, где традиционные контактные методы измерения температуры неприменимы.

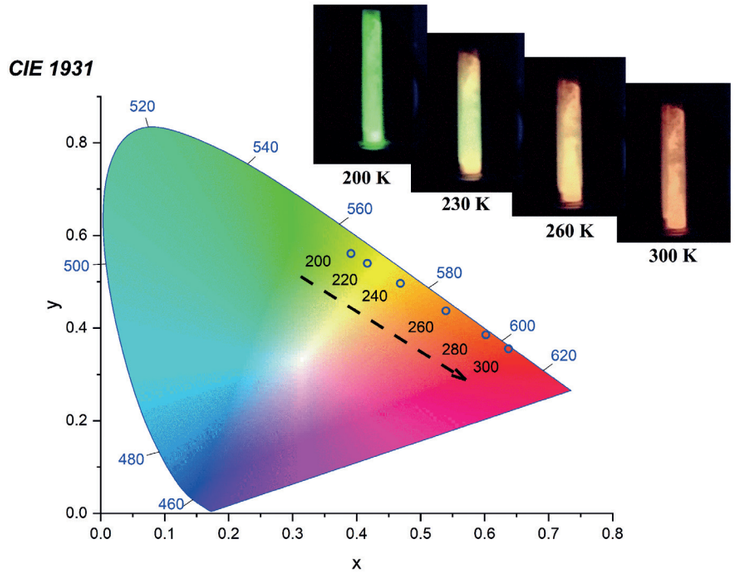


Рисунок 1. Цветовая диаграмма люминесценции исследованных соединений при разных температурах в Кельвинах

Результаты опубликованы:

1. Combining materials design and deep learning: AI-enhanced luminescence thermometry with a novel Eu^{3+} /Tb^{3+} polymeric coordination compound. / T. A. Polikovskiy, V. E. Gontcharenko, V. M. Korshunov, [et al.]. // Materials Chemistry Frontiers. – 2025. – Vol. 9. – Iss. 23. – P. 3443–3459. – DOI 10.1039/d5qm00598a.
2. Real world luminescence thermometry through a novel mixed-metal Eu/Tb complex with furan-containing 1,3-diketone. / T. A. Polikovskiy, V. E. Gontcharenko, A. A. Ivanova, [et al.]. // New Journal of Chemistry. – 2025. – Vol. 49. – Iss. 22. – P. 9214–9225. – DOI 10.1039/d5nj00914f.

Отделение оптики

Демонстрация эффективности кудитной архитектуры для реализации прикладных алгоритмов с использованием 50-кубитного квантового компьютера

И. В. Заливако, А. С. Николаева, А. С. Борисенко, Н. В. Семенин, К. П. Галстян, А. Е. Корольков, П. Л. Сидоров, К. Ю. Хабарова, И. А. Семериков, Н. Н. Колачевский

В рамках Дорожной карты «Квантовые вычисления» был создан 50-кубитный квантовый компьютер (КК) на основе ионов $^{171}Yb+$. Возможности вычислителя продемонстрированы на задачах квантовой химии, машинного обучения и оптимизации. Кудитная архитектура процессора также позволила повысить точность гейта Тоффоли, лежащего в основе алгоритма Гровера. Было показано превосходство кудитного подхода, впервые реализована 10-частичная версия гейта, а ошибка в алгоритме Гровера снижена в 1.8 раза.

Квантовые компьютеры – новый и перспективный класс устройств, имеющий большой потенциал для решения целого спектра прикладных задач в областях логистики, энергетики, фармацевтики, криптографии, машинного обучения и многих других. В рамках Дорожной карты «Квантовые вычисления» был создан 50-кубитный квантовый компьютер на основе ионов иттербия (УГТ-5) (Рисунок 1) [1]. Характеристики компьютера близки к мировым аналогам.

Работа компьютера была продемонстрирована на примерах вычисления энергий основного состояния молекул H_2 и LiH, классификации рукописных цифр и графов на базе алгоритмов квантового машинного обучения [2] и факторизации чисел [1]. Посредством облачного доступа квантовый компьютер был использован Госкорпорацией «Росатом» в рамках проекта «Прорыв» для решения задачи теплопереноса, а также рядом других организаций.

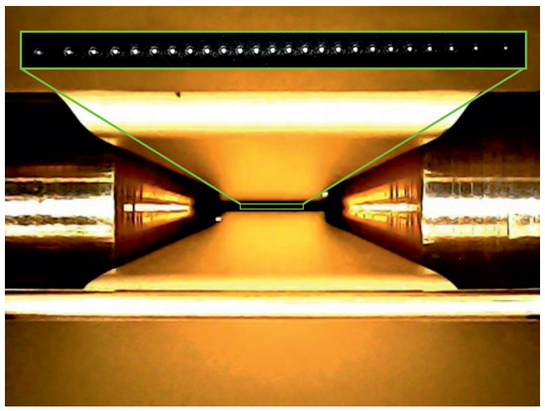


Рисунок 1. Фотография ионной ловушки вычислителя с изображением захваченного ионного кристалла из 25 частиц

Уникальная архитектура процессора, где каждый ион является не кубитом, а кудитом – многоуровневой квантовой системой, позволила достигнуть размерности квантового регистра в 50 кубитов с использованием вдвое меньшего числа ионов. Помимо этого, использование кудитов позволяет более эффективно реализовывать многие квантовые алгоритмы. В частности, с использованием созданного квантового компьютера было экспериментально продемонстрировано существенное повышение точности реализации N-кубитного гейта Тоффоли [3]. Этот гейт является ключевым элементом одного из наиболее важных квантовых алгоритмов – алгоритма Гровера. Он используется в задачах поиска по неупорядоченным базам данных, криптографии, а также задачах оптимизации. Использование кудитов позволяет значительно снизить требуемое число запутывающих операций для реализации гейта Тоффоли, которые являются основным источником ошибок. Так, использование кутритов (кудитов с числом уровней, равным трем) позволяет реализовать N-кубитный гейт Тоффоли за (2N – 3) запутывающих операций, в то время как для кубитных реализаций это число растет квадратично с количеством ионов. Было экспериментально продемонстрировано превосходство предложенного кудитного подхода над кубитным (Рисунок 2), впервые в мире реализована 10-частичная версия гейта Тоффоли и показано снижение ошибки в алгоритме Гровера в 1.8 раза [3]. Также была показана возможность частичного детектирования и смягчения ошибок в кудитной версии гейта, что является важным шагом на пути к практическому применению квантовых вычислителей.

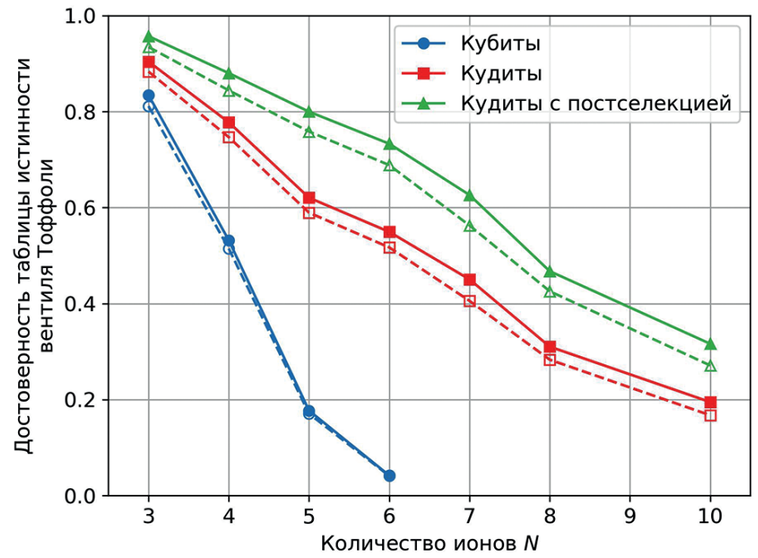
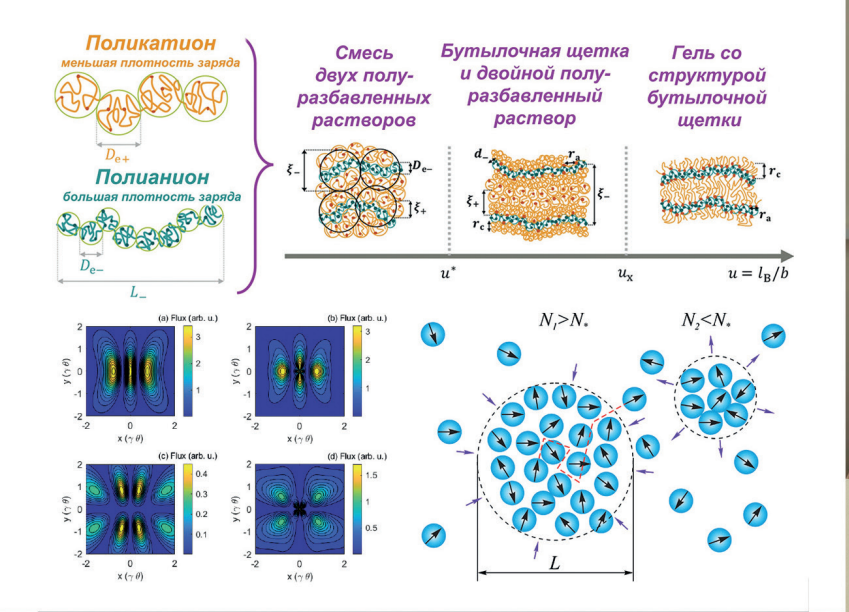
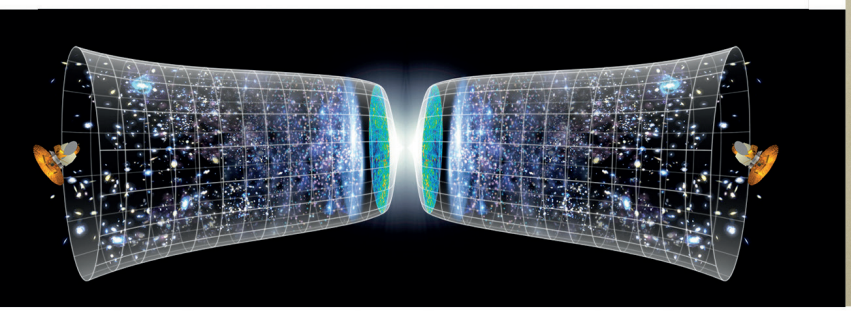


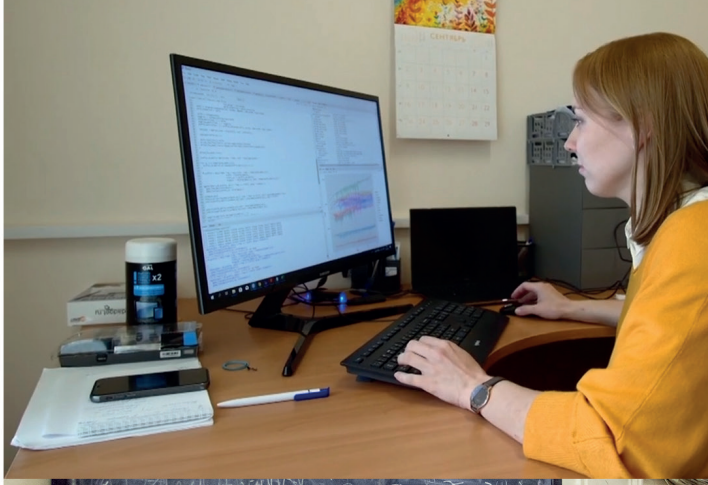
Рисунок 2. Зависимость точности N-частичного гейта Тоффоли от числа задействованных ионов

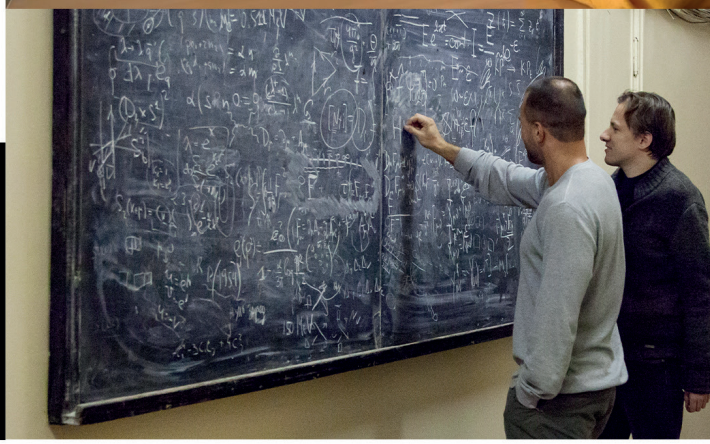
Результаты опубликованы:

1. Квантовые вычисления на ионах в ловушках: принципы, достижения и перспективы. / И. В. Заливако, Н. В. Семенин, Н. О. Жаднов, [и др.]. // Успехи физических наук. – 2025. – Т. 195. – № 6. – С. 585–620. – DOI 10.3367/UFNr.2024.12.039884.
2. Supervised binary classification of small-scale digit images and weighted graphs with a trapped-ion quantum processor. / I. V. Zalivako, A. I. Gircha, E. O. Kiktenko, [et al.]. //Physical Review A. – 2025. – Vol. 111. – Iss. 5. – Art. ID 052436. – 11 pp. – DOI 10.1103/PhysRevA.111.052436.
3. Scalable Improvement of the Generalized Toffoli Gate Realization Using Trapped-Ion-Based Qutrits / A. S. Nikolaeva, I. V. Zalivako, A. S. Borisenko [et al.] // Physical Review Letters. – 2025. – Vol. 135. – Iss. 6. – Art. ID 060601. – 6 pp. – DOI 10.1103/p1z9-6w93.









Отделение теоретической физики имени И.Е. Тамма

Возникновение порядка на фоне беспорядка в системах с диффузионной связью

Э. О. Якупов, И. С. Фатеев, А. А. Полежаев

В реакционно-диффузионной системе, реализованной на базе расширенной нелинейной модели нейрона, исследован новый тип состояний частичной синхронизации — волны-миражи, в которых крупномасштабные структуры возникают на фоне развитого беспорядка. Выделены две разновидности коллективных сценариев и определена их роль в общей иерархии пространственно-временных режимов в динамических системах. Результаты открывают перспективы для применения в областях науки, где критически важны переходы от хаоса к порядку.

В представленной работе проведено фундаментальное исследование нового класса динамических состояний частичной синхронизации, получивших наименование «волны-миражи» (Shadowed waves). Эти явления обнаружены и изучены в рамках реакционно-диффузионных систем, в частности, с помощью расширенной (трехкомпонентной) нелинейной модели типа ФитцХью–Нагумо, используемой для описания возбудимых сред, включая сети нейронов.

Центральным объектом исследования стали особые пространственно-временные структуры, возникающие в среде взаимодействующих осцилляторов. Отличительной чертой «волн-миражей» является формирование крупномасштабных упорядоченных паттернов на фоне интенсивного мелкомасштабного хаоса.

Работа основана на сочетании численного моделирования и аналитического исследования устойчивости. Выявлены два основных типа «волн-миражей» (см. Рисунок 1), различающихся характером движения и взаимодействия с окружающими областями хаоса. Проведён сравнительный анализ устойчивости, показавший крайне низкую устойчивость этих структур даже при минимальных отклонениях параметров системы.

Для количественной характеристики выявленных режимов был применен комплекс стандартных метрик, используемых в теории синхронизации: параметр локального порядка, сила инкогерентности, фактор синхронизации, а также градиент энтропии. Сравнительный анализ показал, что, хотя классические индикаторы позволяют эффективно дифференцировать крупные волновые структуры от химерных состояний, для однозначной идентификации «волн-миражей» требуется применение многокритериального подхода. Традиционные методы оказываются недостаточными для полного описания специфики этих образований, что диктует необходимость разработки специализированных количественных инструментов и новых подходов в будущих исследованиях.

Таким образом, данная работа представляет собой всестороннее исследование феномена «волн-миражей» и дополняет общее понимание явлений сложной пространственной самоорганизации. Полученные результаты создают теоретический фундамент для последующих исследований в области физики, биологии и химии, открывая новые горизонты в изучении механизмов перехода от хаоса к порядку.

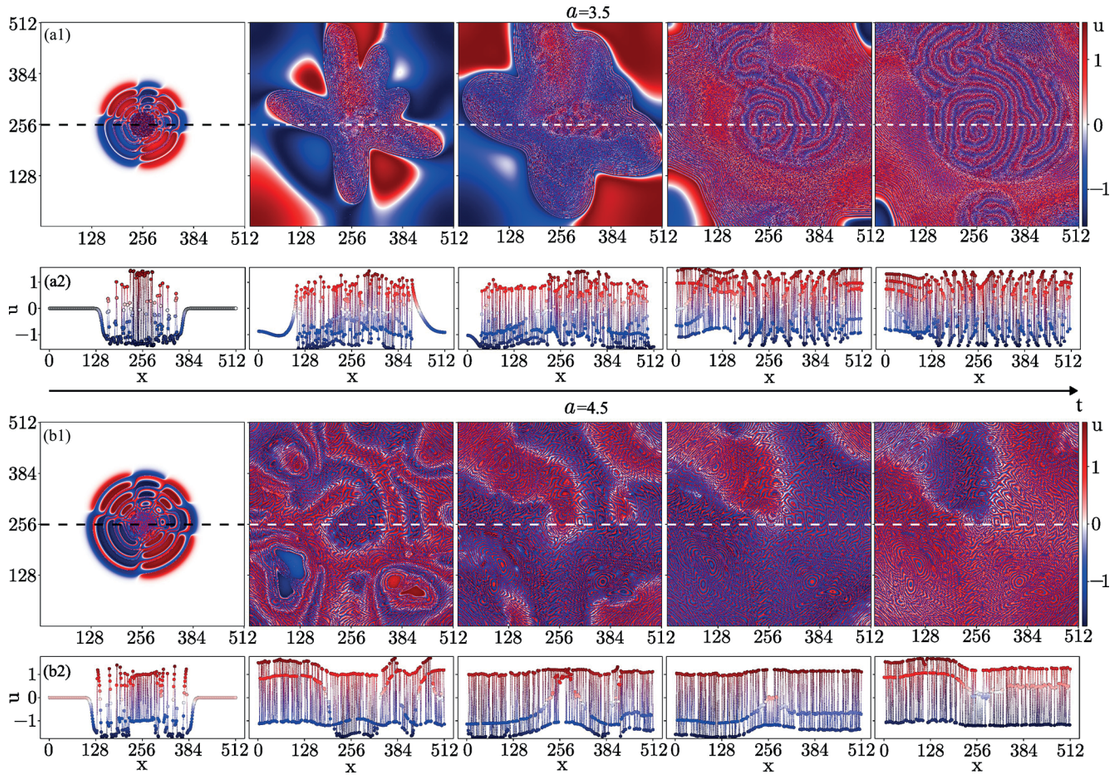


Рисунок 1. Развитие состояний «волн-миражей» в реакционно-диффузионной системе, основанной на расширенной нелинейной модели ФитцХью–Нагумо. На верхней панели показано развитие первого типа крупномасштабных волн на фоне мелкомасштабного хаотического режима. На нижней панели демонстрируется второй тип фазовых крупномасштабных волн на фоне стационарного беспорядка. На одномерных срезах показано сосуществование структур с разными фазами и на разных масштабах

Результаты опубликованы:

1. Yakupov, E. Emergence of order within disorder: Shadowed waves and chimera states in reaction-diffusion systems / E. Yakupov, I. Fateev, A. Polezhaev. // Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science. – 2025. – Vol. 35. – Iss. 10. – Art. ID 103122. – 11pp. – DOI 10.1063/5.0299694.

Определение пределов устойчивости метан-воздушного пламени, стабилизированного на плоской пористой горелке при нормальном и повышенном давлении

А. Д. Морошкина, С. П. Бабина, А. А. Пономарева, Е. В. Серещенко, В. В. Мирославский, В. В. Губернов

Экспериментально и численно определены пределы существования плоского метан-воздушного пламени, стабилизированного на плоской пористой горелке при давлениях 1–6 бар. Определены критические условия срыва пламени и возникновения диффузионно-тепловых колебаний, а также измерена их частота. В рамках детальных механизмов реакций проведено численное моделирование и предложено использовать полученные экспериментальные данные для разработки более точных моделей горения метан-воздушных смесей.

В данной работе экспериментально и численно исследованы критические явления срыва пламени и возникновения диффузионно-тепловых колебаний для метан-воздушных пламен, стабилизированных на плоской пористой горелке при нормальном и повышенном давлении до 6 бар. Экспериментальные измерения проводились на уникальной горелке собственного производства в камере высокого давления. Анализ условий срыва пламени позволил определить массовый расход свободно распространяющегося пламени M (см. Рисунок 1 а), сплошные линии) и скорость ламинарного горения U_b как функции коэффициента избытка топлива φ и давления P. Найденные в данной работе экспериментальные значения находятся в пределах диапазона неопределенности измерений скорости ламинарного горения, известного из литературы. Сравнение полученных экспериментальных данных с предсказаниями различных детальных механизмов реакции, таких как GRI, FFCM, USC II, SanDiego и Aramco, показало, что при нормальном и слегка повышенном давлении до 2 бар такие механизмы, как GRI и FFCM, могут воспроизвести экспериментально измеренную скорость ламинарного пламени с точностью около 15 % в диапазоне изменения φ от 0.6 до 1.4. При больших значениях давления (P = 4 и 6 бар) расхождение в прогнозировании скорости ламинарного пламени различными механизмами реакции значительно возрастает, в то время как только механизм Aramco позволяет воспроизвести экспериментальные данные с относительной точностью ± 15 %. Это свидетельствует о том, что трудно преодолеть ограничения существующих экспериментальных методов измерения скорости ламинарного горения с большей точностью и необходимы альтернативные и независимые источники данных для дальнейшей проверки и обоснования детальных механизмов реакции. В качестве таких вариантов были опробованы критические условия для возникновения диффузионно-тепловых колебаний и их частота колебаний f_{cr}.

Впервые для стабилизированных горелкой метан-воздушных пламен при повышенном давлении была определена граница существования диффузионно-тепловых колебаний (см. Рисунок 1 а), пунктирные линии), условия их возникновения и характеристики пульсаций пламени, такие как частота Хопфа (см. Рисунок 1 б)), т. е. частота пульсаций при критических условиях. Показано, что как экспериментально измеренные критические значения массового расхода для возникновения неустойчивостей, так и частота пульсаций вблизи границы устойчивости в зависимости от коэффициента избытка топлива хорошо описываются механизмом реакции SanDiego при P = 1 бар с относительной точностью 15 %. При P = 2 бар соответствие между численными и экспериментальными результатами хуже, и только механизм реакции FFCM демонстрирует хорошую корреляцию для критических условий и удовлетворительно описывает частоту, за исключением случая обедненных смесей. При бóльшем давлении (P = 4 и 6 бар) ни один из механизмов не может дать удовлетворительного описания экспериментальных данных. Это означает, что специфические характеристики пульсирующих диффузионно-тепловых неустойчивостей сильно зависят от выбора механизма реакции.

Для различных давлений и составов топливо-воздушных смесей проведен анализ чувствительности скорости ламинарного горения и структуры пламени к константам элементарных реакций. Выявлены основные реакции, влияющие на эти характеристики, и показано, что выбирая определенным образом параметры системы, можно последовательно уточнять константы данных реакций. В дальнейших исследованиях планируется провести более детальное изучение того, эволюция каких реагентов и какие элементарные реакции в наибольшей степени влияют на критические условия возникновения и частоту пульсаций, чтобы использовать эту информацию при разработке более точных механизмов реакций.

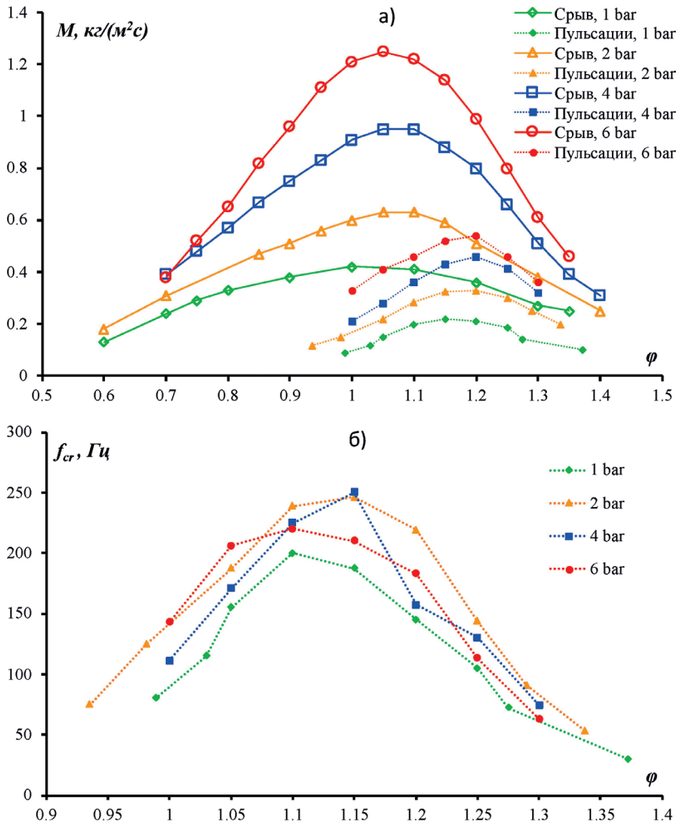


Рисунок 1. Границы срыва пламени (сплошные линии) и возникновения диффузионно-тепловых колебаний (пунктирные линии) при различных давлениях (а) и частота диффузионно-тепловых колебаний пламени (б)

Результаты опубликованы:

1. Numerical and experimental study of stability limits of methane-air flame stabilized on a flat porous burner at normal and elevated pressure / A. Moroshkina, S. Babina, A. Ponomareva, [et al.]. // Combustion and Flame. – 2025. – Vol. 280. – Art. ID 114336. – DOI 10.1016/j.combustflame.2025.114336.

Отделение теоретической физики им. И. Е. Тамма

Пример замкнутой системы международных расчетов в странах с формирующейся рыночной экономикой

Е. Е. Васильева, А. В. Леонидов, А. А. Пономаренко, С. А. Радионов

Мы предлагаем концепцию экономичной системы международных расчётов для стран с развивающейся рыночной экономикой, не требующей трансформации существующих национальных финансовых систем. Моделирование показало, что система способна обеспечить до двух третей международных платёжных потоков между 34 странами. Примечательно, что миграция платёжных потоков в новую систему может быть обусловлена исключительно рыночными силами, связанными с колебаниями обменных курсов.

Рассматривается экономическая система, в которой небанковские посредники совмещают роли поставщиков платежных услуг (PSP) и валютных дилеров (FX). PSP владеют запасом национальной валюты принимающей страны в форме банковского депозита. В каждой стране существует один PSP, и на международном уровне они взаимодействуют только с другими PSP, входящими в систему. PSP работают с экспортерами и импортерами, используя национальные валюты соответствующих стран. PSP в стране-экспортере переводит необходимую сумму со своего банковского счета на банковский счет получателя платежа. PSP в стране-импортере получает необходимую сумму (определяемую по обменному курсу, установленному системой PPS) с банковского счета получателя платежа. Эта транзакция не зависит от источника (направления) полученного (отправленного) платежа. Предполагается, что бизнес-стратегия системы заключается в обеспечении сбалансированных потоков платежей для каждого PSP-участника, чтобы они не истощали или не накапливали соответствующую денежную массу. Эта стратегия соответствует желаемому подходу финтех-платёжных компаний (например, PayPal). Примечательно, что концепция балансировки потоков для стабилизации запасов валют соответствует стратегии дилеров на традиционных валютных рынках, а также алгоритмам автоматического маркет-мейкинга, используемым на инновационных рынках DeFi. Фактически, проактивное установление обменного курса платёжной системой можно рассматривать как эффективный метод балансировки потоков платежей.

Мы иллюстрируем концепцию предлагаемой международной системы расчетов, исследуя ее потенциальную роль в обслуживании платежных потоков между группой развивающихся рынков. Рассматривается 34 страны, выбор которых носит чисто иллюстративный характер, хотя почти все эти страны входят в какой-либо экономический блок и в какой-то момент выразили заинтересованность в создании специализированной платежной системы.

Рассмотрена аналитическая задача максимизации доли платежей, которые могут перейти в новую систему при условии сбалансированности потоков предлагаемого платежного средства. Предложены две постановки, обе сводящиеся к задаче линейного программирования. Различия между результатами в рамках двух предложенных подходов оказываются незначительными, однако отмечено интересное свойство второго подхода – его концептуальная связь с задачей минимизации неплатежей между

предприятиями, исследовавшейся в российской научной литературе в 1990-е гг.

На втором этапе исследования построена симуляционная модель перехода в новую платежную систему. Центральным процессом симуляции является выбор платежной системы импортерами в каждой стране. В частности, мы моделируем изменение доли импорта, закупаемого страной *i* у страны *j* через новую платежную систему. Мы предполагаем, что основным фактором, определяющим миграцию платежных потоков в новую систему, является разница между обменными курсами валюты *i* по отношению к валюте *j* в новой системе и на традиционном валютном рынке. Таким образом, укрепление национальной валюты в новой системе делает ее использование выгодным для импортеров и приводит к увеличению доли импорта, закупаемого через новую систему.

На Рисунке 1 представлена динамика перехода платежей в новую систему в рамках известных подходов Bancor (B) и Mariana (M), полученных путем имитационного моделирования. Как видно по рисунку, при данных имитационных алгоритмах доля расчетов, переходящих в новую систему, не достигает найденных на первом этапе исследования максимально возможных значений, но, тем не менее, оказывается достаточно близка к ним.

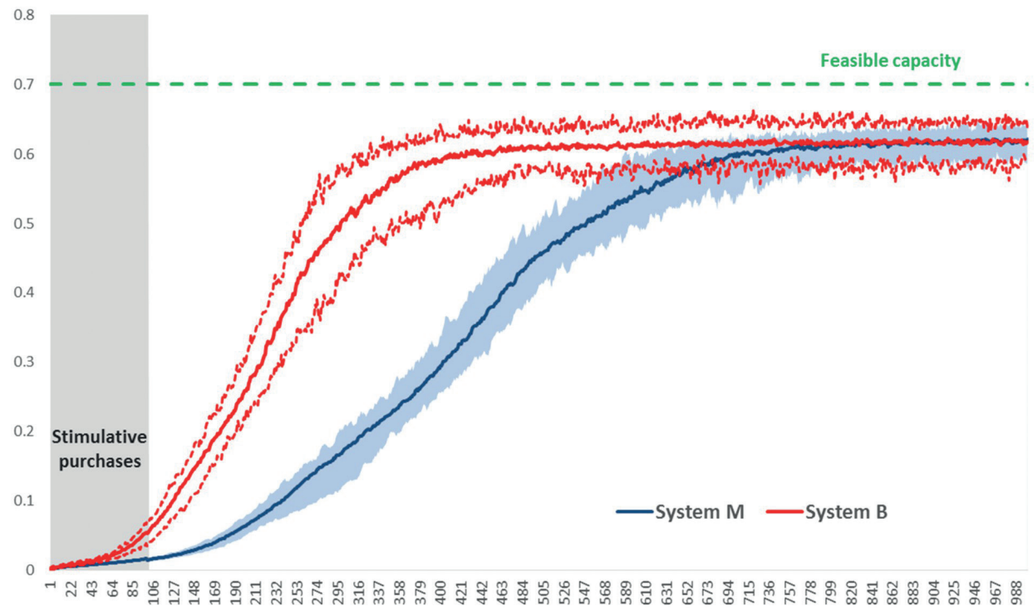


Рисунок 1. Доля платежных потоков в новых системах (медианное, максимальное и минимальное значения)

Результаты опубликованы:

1. A Primer on a Closed-Loop System for International Settlements in Emerging Market Economies. / A. Leonidov, A. Ponomarenko, S. Radionov, E. Vasilyeva. // Journal of Asian Economics. – 2025. – Vol. 101. – Iss. C. – Art. ID 102077. – 17 pp. – DOI 10.1016/j.asieco.2025.102077.

Отделение теоретической физики им. И. Е. Тамма

Ядра теплопроводности для неминимальных причинных операторов и обобщенная функториальность разложения Швингера–Де Витта

А. О. Барвинский, В. Н. Ваховский, А. Е. Калугин

Получен универсальный систематический метод построения ядер теплопроводности неминимальных причинных операторов на искривленном фоне. Техника основана на систематической реализации линейного отображения, связывающего неминимальное ядро теплопроводности с минимальным. Предложена схема построения внедиагональных разложений для функций минимальных операторов на произвольных фонах. С ее помощью явно получены разложения для строительных блоков неминимального ядра теплопроводности.

Метод ядра теплопроводности является мощным инструментом, повсеместно используемым в квантовой теории поля на искривленном пространстве-времени и квантовой гравитации. Основой данного метода служит техника Швингера–Де Витта, в центре которой лежит асимптотический ряд Де Витта для ядра теплопроводности – интегрального ядра операторной экспоненты.

Однако оригинальный ряд Де Витта строится лишь для сравнительно узкого класса минимальных волновых операторов второго порядка, что является его существенным недостатком, так как в таком формализме крайне затруднено изучение многих физически интересных теорий, в частности теорий с калибровочной симметрией. В связи с этим возникает необходимость в обобщении техники Де Витта на более широкий класс причинных неминимальных операторов.

В работе предложен универсальный ковариантный метод построения ядра теплопроводности для неминимальных причинных операторов произвольного порядка вне предела совпадения. На уровне интегральных ядер данный алгоритм представляет собой реализацию отображения ядер псевдодифференциальных операторов, переводящего ядро теплопроводности произвольно выбранного минимального оператора в искомое ядро теплопроводности неминимального. При этом конечность и гладкость ответа достигается при помощи специальной процедуры подвычитаний. В результате начальное приближение для неминимального ядра теплопроводности получается в виде комбинаций ядер некоторых функций минимального оператора. Поверх этого начального приближения строится теория возмущений, реализованная в виде ряда по обратной фоновой длине. В качестве иллюстрации эффективности развитого формализма произведены явные вычисления коэффициентов разложения неминимальных ядер теплопроводности на примерах теории Прока и теории векторного поля в неминимальной калибровке, в которой волновой оператор имеет невырожденный главный символ.

В то же время для исследования строительных блоков неминимального ядра теплопроводности – интегральных ядер функций минимального оператора F вида $F^{-\mu}\cdot\exp(-\tau\ F^{\nu})$ при некоторых целых μ и ν – был развит общий формализм, позволяющий получать внедиагональные разложения для произвольных функций минимальных дифференциальных операторов. В этом методе, основанном на почленном применении интегральных преобразований к внедиагональному ряду Де Витта, разложения имеют вид суммы по коэффициентам Де Витта оператора F, помноженными на базисные ядра — скалярные функции гипергеометрического типа, которые определяются исключительно видом операторной функции, но не зависят от геометрии расслоения и коэффициентов оператора F. Такая процедура оказывается возможной благодаря внедиагональной функториальности разложения Де Витта.

Для исследования базисных ядер чрезвычайно удобным оказывается формализм многократных интегралов Меллина–Барнса. В таком представлении становятся явно видны инфракрасные расходимости, которые проявляются как пинч цепи, по которой ведется комплексное интегрирование. При помощи данного метода исследованы базисные ядра функций-строительных блоков неминимального ядра теплопроводности. Пример полюсной структуры Меллиновского образа такого базисного ядра представлен на Рисунке 1.

Построенные методы могут быть полезны в широком спектре задач квантовой теории поля и квантовой гравитации и могут играть решающую роль в исследованиях свойств различных теорий, таких как непроектируемая гравитация Хоржавы.

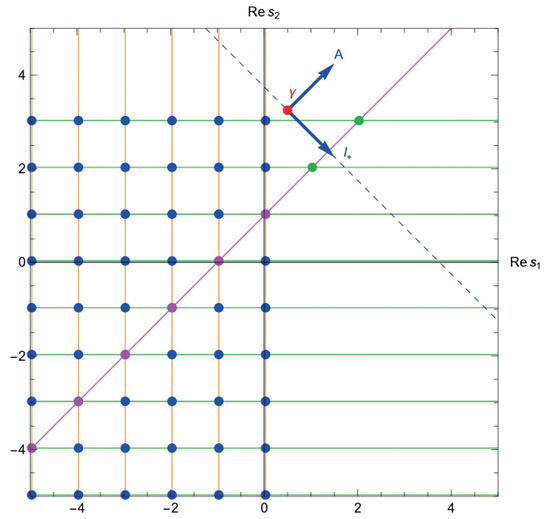


Рисунок 1. Пример полюсной структуры Меллиновского образа базисного ядра строительного блока неминимального ядра теплопроводности

Результаты опубликованы:

1. Barvinsky, A. O. Schwinger-DeWitt expansion for the heat kernel of nonminimal operators in causal theories. / A. O. Barvinsky, A. E. Kalugin, W. Wachowski. // Phys. Rev. D. – 2025. – Vol. 112 – Iss. 7. – Art. ID 076032. – 15 pp. – DOI 10.1103/1njq-346g. – arXiv:2508.06439.

Многоточечные конформные интегралы

К. Б. Алкалаев, С. И. Мандрыгин

Сформулирована процедура реконструкции, в рамках которой построен новый класс гипергеометрических функций многих переменных, дающих явные выражения для однопетлевых конформных фейнмановских интегралов. Предложенный класс функций, названных полигональными, систематически строится согласно диаграммному алгоритму, состоящему из набора геометрических операций на выпуклом многоугольнике, являющемся элементом решетки Бакстера.

Амплитуды рассеяния элементарных частиц выражаются через интегралы Фейнмана, что делает изучение последних ключевым для понимания современной физики высоких энергий. В общем случае вычисление фейнмановских интегралов, т. е. выражение их в терминах специальных функций остается трудной математической задачей, в решении которой удается продвинуться при наличии дополнительных симметрий, позволяющих организовать ответ в терминах удобных инвариантных переменных.

Инвариантность относительно конформной группы фиксирует общий вид интегралов с точностью до произвольной функции от ангармонических отношений. Конформные интегралы возникают, например, в теориях с дуальной конформной симметрией, к которым относится максимально суперсимметричная теория Янга–Миллса в четырёхмерном пространстве.

Тот же класс интегралов естественным образом появляется в многомерных конформных теориях поля, описывающих универсальное поведение различных физических систем вблизи фазовых переходов второго рода. В критической точке корреляционные функции принимают универсальный вид и разлагаются по модельно независимым базисным функциям, допускающим представление через конформные интегралы, которые в данном контексте зависят от набора параметров – конформных размерностей и спинов операторов. Таким образом, конформные интегралы возникают как в задачах физики высоких энергий, так и в статистической физике и теории критических явлений.

Стандартный подход к вычислению конформных интегралов основан на использовании многократных интегралов Меллина–Барнса. Такие интегралы являются сбалансированными, т. е. допускают различные способы замыкания контуров. Интегральная формула Коши, примененная к разным наборам полюсов, приводит к разложению конформного интеграла по разным системам базисных функций, каждая из которых представляется многомерным степенным рядом гипергеометрического типа и характеризуется своей областью сходимости. Разные системы базисных функций могут быть связаны друг с другом, если известны соответствующие формулы аналитического продолжения. С другой стороны, выбор области сходимости, в которой требуется получить асимптотическое разложение, может помочь выбрать конкретный способ замыкания интегральных контуров. Общая проблема этого подхода заключается в отсутствие однозначного критерия выбора способа замыкания контуров, приводящего к систематизированным выражениям в заданной области координат.

В работе [1] было введено двудольное представление Меллина–Барнса, которое позволяет частично обойти эту проблему. Конформный интеграл разбивается на две аддитивные части, одна из которых имеет четкую структуру полюсов, что в сочетании с известными формулами аналитического продолжения делает ее вычислимой, предоставляя подмножество базисных функций. С другой стороны, естественное требование инвариантности n-точечного конформного интеграла относительно циклической перестановки внешних линий позволяет восстановить невычислимую часть в случаях, когда n = 4.5. Эта схема вычисления, названная реконструкцией, позволила получить неизвестное ранее в литературе выражение для параметрического пятиточечного интеграла.

Начиная с n = 6, вычислимая часть не дает поднабор базисных функций, достаточный для восстановления конформного интеграла из требования циклической инвариантности. В связи с этим в работе [2] была развита процедура построения полного набора базисных функций. Для этого было введено семейство полигональных функций – многопараметрических многомерных обобщенных гипергеометрических рядов. Полигональные функции строятся согласно набору диаграммных правил, оперирующих с планарными геометрическими фигурами, построенными на т. н. решетке Бакстера. Аргументами полигональных функций являются конформно-инвариантные ангармонические отношения, изображаемые в виде четырех- и пятиугольников, вписанных в одну из ячеек решетки, см. Рисунок 1. Взаимное расположение фигур, т. е. совпадение или несовпадение вершин и граней, однозначно определяет полигональную функцию и ее свойства.

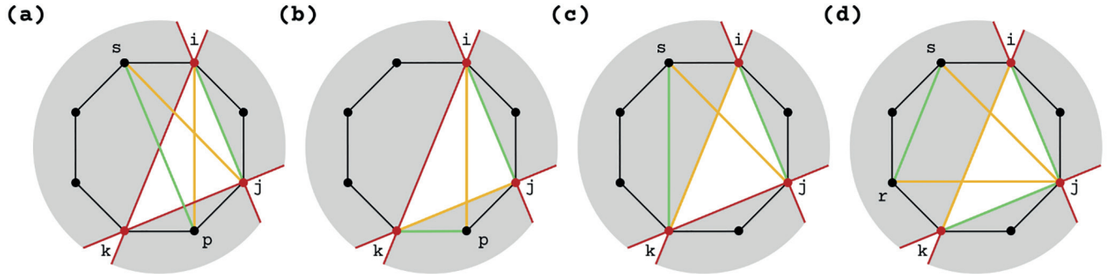


*Рисунок 1. Примеры квадратичных **(a)-(c)** и кубичных **(d)** ангармонических отношений, построенных на решетке Бакстера*

Результаты опубликованы:

1. Alkalaev, K. Multipoint conformal integrals in D dimensions. Part I. Bipartite Mellin-Barnes representation and reconstruction. / K. Alkalaev, S. Mandrygin. // Journal of High Energy Physics. – 2025. — Vol. 9. — Art. ID 118. — 45 pp. – DOI 10.1007/JHEP09(2025)118.
2. Alkalaev, K. Multipoint conformal integrals in D dimensions. Part II. Polygons and basis functions. / K. Alkalaev, S. Mandrygin. // Journal of High Energy Physics. – 2025. — Vol. 12. — Art. ID 088. — 52 pp. – DOI 10.1007/JHEP12(2025)088.

Отделение теоретической физики им. И. Е. Тамма

Эффекты сильной турбулентности для волн на глубокой воде

Е. А. Кузнецов[1], Е. А. Кочурин[2,3]

[1] ФИАН, [2] Сколковский институт науки и технологий (Сколтех), [3] ИЭФ УрО РАН

Представлены результаты прямого численного моделирования турбулентности одномерных волн на воде для потенциальных течений в рамках конформных переменных с учетом низкочастотной накачки и высокочастотного затухания вязкого типа. В данной модели для широкого диапазона амплитуд накачки не обнаружен предсказанный ранее режим слабой турбулентности. Показано, что для типичных параметров турбулентности главными эффектами являются процессы опрокидывания волн, формирования на их гребнях каспов, которые вносят основной вклад в спектры турбулентности с зависимостью от частоты и волнового числа с одной и той же степенью, равной -4, в полном соответствии с теорией.

Основным механизмом затухания морского волнения даже при умеренной ветровой накачке является опрокидывание волн. Как показывают многочисленные наблюдения, процесс опрокидывания начинается на гребне волны в перпендикулярном направлении к его фронту; он носит одномерный характер. В заданной точке x_0 вторая производная профиля поверхности в момент опрокидывания $t = t_0$ становится сингулярной, пропорциональной дельта-функции. При большом числе таких событий частотный спектр турбулентности приобретает степенную зависимость с показателем -4. Аналогично этому находится зависимость спектра от k: $E(k) \sim k^{-4}$ [1]. Важно отметить, что такая же зависимость спектра от частоты имеется у спектра слабой турбулентности Захарова–Филоненко. Это совпадение чисто случайное, поскольку спектр слабой турбулентности предполагает слабонелинейный режим, когда нелинейность мала по сравнению с дисперсией линейных гравитационных волн на глубокой воде. Для выяснения вопроса, при каких условиях реализуется тот или иной спектр, было выполнено прямое численное моделирование одномерной турбулентности волн на глубокой воде для потенциальных течений в рамках конформных переменных с учетом низкочастотной накачки и высокочастотного затухания вязкого типа. В данной модели для широкого диапазона амплитуд накачки нами не был обнаружен предсказанный ранее режим слабой турбулентности. Для типичных параметров турбулентности главным эффектом оказалось опрокидывание волн: формирование на их гребнях каспов, которые вносят основной вклад в спектры турбулентности с зависимостью от частоты (Рисунок 1) и волнового числа с одной и той же степенью, равной -4, в полном соответствии с теоретическим предсказанием [Е. А. Кузнецов, Письма в ЖЭТФ **80**(2), 92 (2004)].

Данные спектры действительно хорошо воспроизводятся в нашем численном эксперименте. Инерционный интервал составил почти три декады, что очень много применительно к методам прямого численного моделирования.

В этом сильнонелинейном режиме плотность вероятности крутизны волн при больших отклонениях имеет степенные (–7/2) хвосты, ответственные за перемежаемость турбулентности (Рисунок 2).

Таким образом, в прямом численном эксперименте для одномерной турбулентности гравитационных волн на глубокой воде продемонстрировано, что главный вклад в турбулентность связан с опрокидыванием волн, которое продуцирует степенные спектры как в частотном диапазоне, так и в пространстве волновых чисел, что представляет первое прямое численное подтверждение спектров сильной турбулентности, предсказанных в работе [Е. А. Кузнецов, Письма в ЖЭТФ **80**(2), 92 (2004)]. Статистическая характеристика, плотность вероятности градиентов поверхности, при больших отклонениях имеет степенные хвосты с показателями, близкими к –7/2. Интересно отметить, что такое поведение типично для одномерной турбулентности Бюргерса, а также наблюдается для сильной трехмерной звуковой турбулентности.

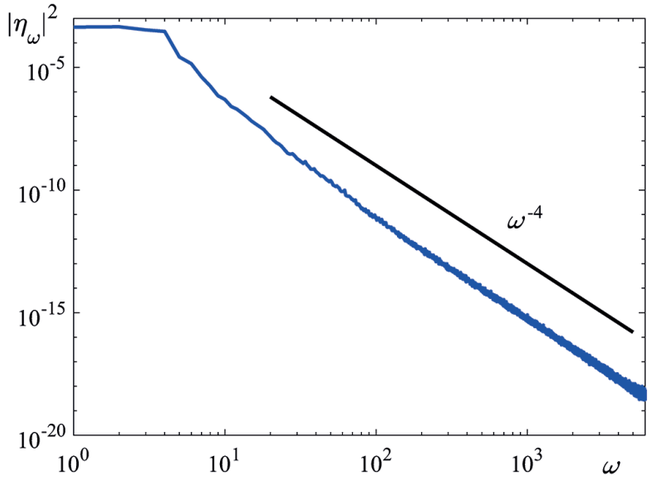


Рисунок 1. Зависимость спектра от частоты

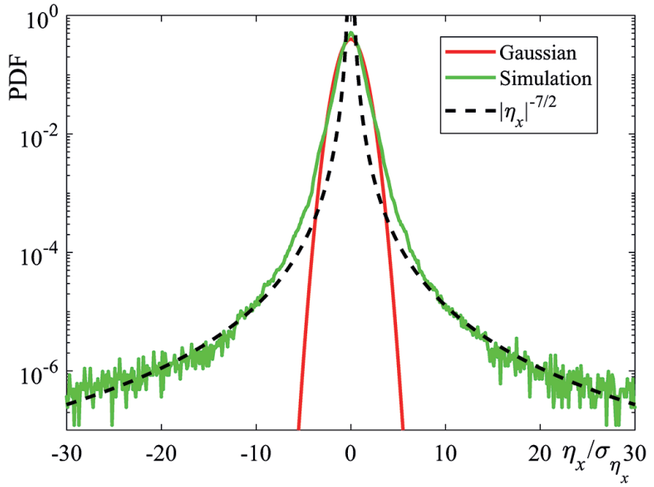


Рисунок 2. Функция плотности вероятности для крутизн волн, нормированных на среднеквадратичное отклонение

Результаты опубликованы:

1. Кочурин, Е. А. Эффекты сильной турбулентности для волн на воде. / Е. А. Кочурин, Е. А. Кузнецов. // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2025. – Т. 122. – Вып. 4. – С. 214–219. – DOI 10.31857/S0370274X25080166.

Квантовый эффект увлечения и котуннелирование флаксонов в джозефсоновских контактах

А. М. Латышев, А. Г. Семенов, А. Д. Заикин

Предсказывается новый эффект – квантовое кулоновское увлечение в системе двух джозефсоновских контактов, связанных емкостным образом. Была построена теория, описывающая данное явление при всевозможных соотношениях между параметрами системы. Также был предсказан аналогичный эффект для куперовских пар в дуальной системе.

Предсказывается новый эффект – квантовое кулоновское увлечение в системе двух джозефсоновских контактов, связанных исключительно через взаимную емкость C_{m} (см. Рисунок 1). Такая конфигурация интересна тем, что контакты электрически изолированы друг от друга, но за счет емкостной связи между ними возникают нелокальные квантовые явления.

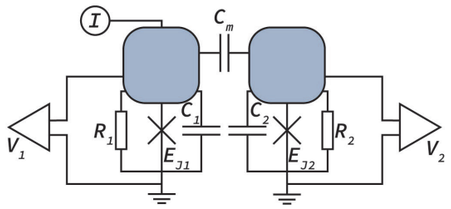


Рисунок 1. Система двух связанных джозефсоновских контактов

Суть эффекта проста. Хорошо известно, что если через джозефсоновский контакт пропускать постоянный ток I, то на нем возникает ненулевое среднее напряжение. Этот механизм связан с квантовыми проскальзываниями фазы – туннелированием магнитных квантов потока (флаксонов) через контакт. Каждое такое проскальзывание создает импульс напряжения, и в результате образуется падение напряжения $\langle V_1 \rangle \neq 0$.

Если рядом с первым контактом разместить второй, аналогичный, и связать их только конденсатором C_{m}, то из классических представлений следовало бы, что на втором контакте, через который не течет внешний ток, напряжение должно оставаться нулевым. В работе [1] было показано, что это не так: на втором контакте тоже возникает ненулевое падение напряжения $\langle V_2 \rangle \neq 0$, причем его знак и величина определяются процессами котуннелирования флаксонов (см. Рисунок 2), когда туннельные события происходят одновременно в обоих контактах.

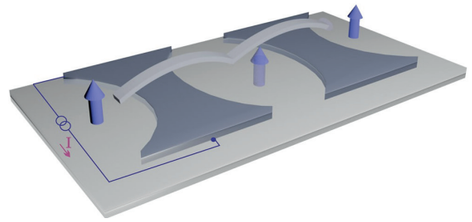


Рисунок 2. Процесс котуннелирования флаксонов

Одним из подходов к теоретическому описанию данной системы является инстантонная техника, в рамках которой различные процессы туннелирования представляются траекториями во мнимом времени (см. Рисунок 3).

Оказалось, что в зависимости от соотношения между взаимной емкостью и собственными емкостями джозефсоновских контактов возможны несколько режимов. При малом значении C_{m} инстантоны, описывающие туннелирование в отдельных контактах (траектории b, c на Рисунке 3), практически не взаимодействуют и величина эффекта кулоновского увлечения мала. При промежуточных значениях $C_{\mathrm{m}} \sim C_{\mathrm{i}}$ инстантоны взаимодействуют и связываются в пары. В этом случае эффект увлечения наиболее выражен. При больших значениях взаимной емкости

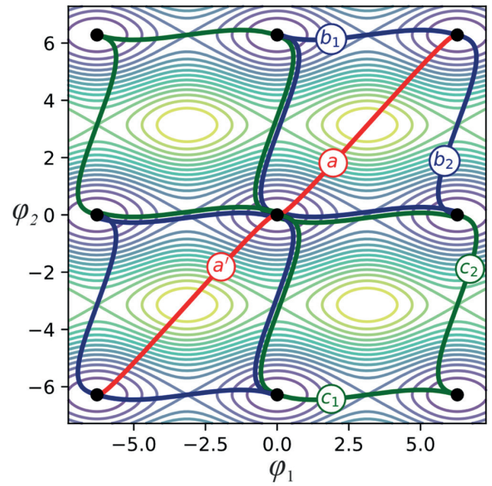


Рисунок 3. Различные инстантонные траектории. Траектории b_i и c_i отвечают обычным процессам туннелирования в каждом отдельном джозефсоновском контакте. Траектория a соответствует процессу котуннелирования флаксонов

инстантоны слипаются в один инстантон, описывающий процесс котуннелирования кванта потока в системе (траектория a на Рисунке 3). В этом случае оба джозефсоновских контакта ведут себя фактически как единый контакт. Все возможные случаи были детально исследованы в работах [1, 2].

Также с использованием аргументов о дуальности заряд-фаза был предсказан аналогичный эффект для куперовских пар [3] (см. Рисунок 4). В этом случае явление состоит в протекании тока через второй контакт при приложении напряжения только к первому контакту за счет процессов котуннелирования куперовских пар.

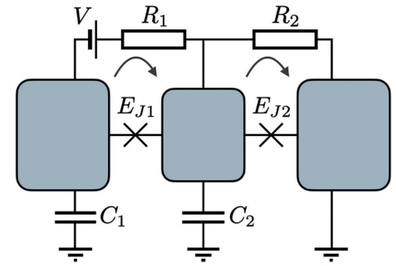
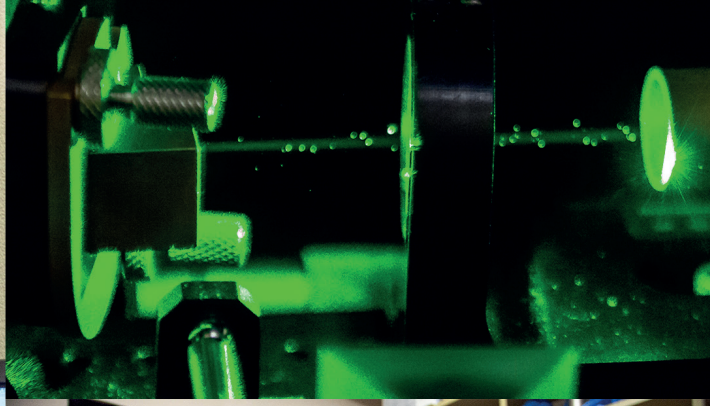
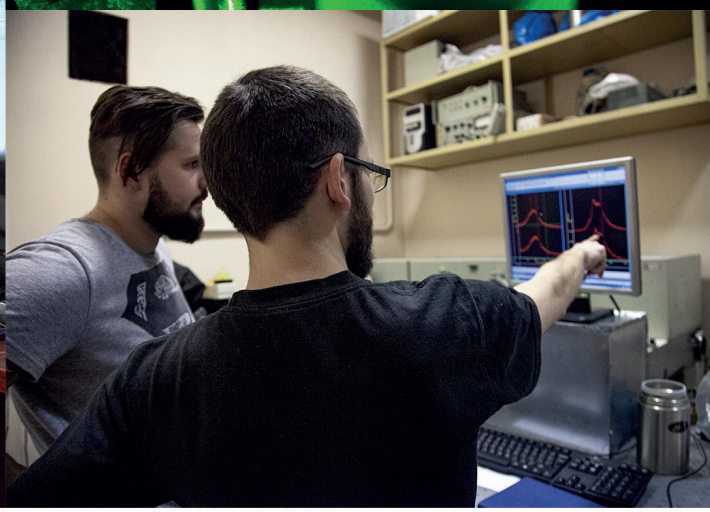


Рисунок 4. Дуальная система из двух джозефсоновских контактов

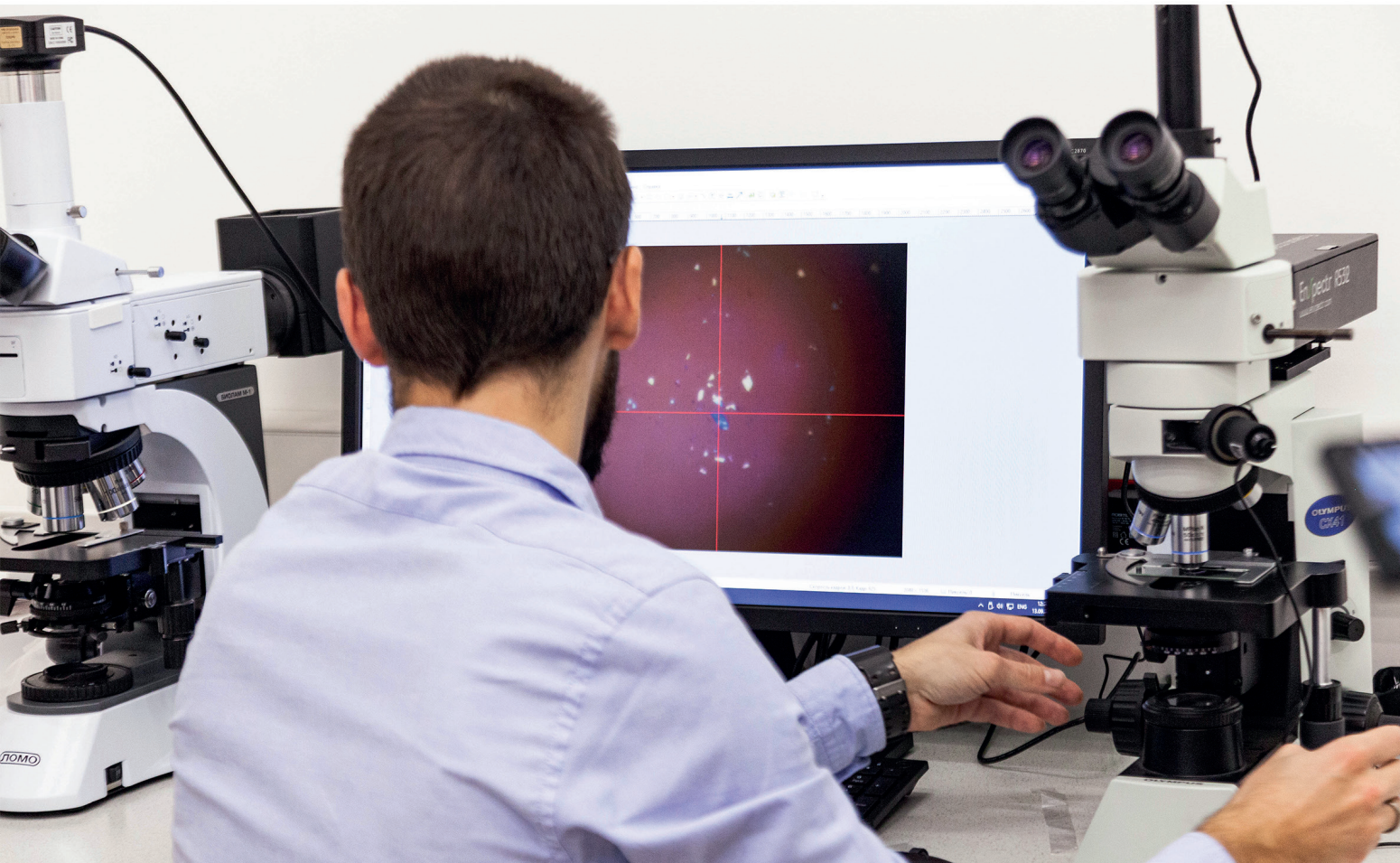
Результаты опубликованы:

1. Semenov, A. G. Quantum Coulomb Drag Mediated by Cotunneling of Fluxons and Cooper Pairs. / A. G. Semenov, A. Latyshev, A. D. Zaikin. // Physical Review Letters. – 2025. – Vol. 134. – Iss. 8. – Art. ID 086001. – 6 pp. – DOI 10.1103/physrevlett.134.086001.
2. Semenov, A. G. Fluxon cotunneling in coupled Josephson junctions: Perturbation theory. / A. G. Semenov, A. Latyshev, A. D. Zaikin. // Physical Review B. – 2025. – Vol. 112. – Iss. 14. – Art. ID 144501. – 7 pp. – DOI 10.1103/1ltt-j2st.
3. Латышев, А. Квантовое кулоновское увлечение куперовских пар/ / А. Латышев, А. Г. Семенов, А. Д. Заикин/ // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2025. – Т. 122. – № 11–12. – С. 843–847. – DOI 10.7868/S3034576625120213.





Отделение физики твердого тела



Отделение физики твердого тела

Связанные состояния в континууме в многозеркальном резонаторе Фабри–Перо на основе виртуальных резонансов Фано

Н. М. Шубин, В. В. Капаев, А. А. Горбацевич

Запирание стоячей волны между зеркалами с резонансами Фано есть один из архетипических механизмов образования связанных состояний в континууме (ССК) на основе соответствующего резонанса Фабри–Перо (ФП). В работе теоретически показана возможность образования ФП ССК в квантово-механическом или оптическом волноводе с тремя зеркалами, чья прозрачность не обращается в ноль при рассмотрении по отдельности. Предложено описание этого явления как реальное проявление виртуального резонанса Фано.

Связанные состояния в континууме (ССК) представляют собой локализованные решения волнового уравнения с энергией, лежащей в области непрерывного спектра. В реальных структурах ССК проявляют себя как сверхвысокодобротные резонансы, что имеет важное практическое значение, особенно в оптике (лазеры, сенсорика, генерация гармоник). Кроме того, в последнее время ССК в волноводах вызывают интерес и в квантовых системах, например, для снижения декогеренции в сверхпроводниковых структурах «гигантских атомов».

В данной работе были теоретически исследованы ССК в резонаторах Фабри–Перо (ФП) в волноводах с несколькими неоднородностями, играющими роль зеркал. Образование ССК как запирание стоячей волны между зеркалами имеет место при энергии, близкой к резонансу Фано одиночного зеркала, при которой оно становится непрозрачным. Естественно ожидать, что модификация одиночного зеркала, сдвигающая энергию резонанса Фано в комплексную плоскость (за порог распространения второй поперечной моды), разрушит соответствующий ФП ССК. Именно это и происходит в типичной системе с двумя зеркалами. Однако, было показано, что образование ССК возможно и в отсутствие идеального отражения одиночных зеркал при их количестве не менее трех. Этот вывод был сделан в рамках аналитической квантово-механической модели как с δ-функционными неоднородностями, так и с зеркалами конечного размера.

Физическое объяснение такого поведения ФП ССК может быть связано с многомодовым «туннельным расщеплением» виртуальных резонансов Фано (резонансов при комплексных энергиях), которое возвращает один из них обратно на действительную ось. Это истинно многомодовое явление, поскольку в одномодовой системе виртуальные состояния не могут быть преобразованы в реальные посредством «туннельного расщепления». Следует отметить, что, вообще говоря, из-за межмодового взаимодействия реальные резонансы Фано могут сохраняться в определенных областях параметров, где связанные с ними связанные состояния в высших модах уже отсутствуют, другими словами, где пространственное распределение пороговых значений мод образует барьер, а не яму.

Аналитические выводы были подтверждены численным моделированием квантово-механического и оптического волноводов с зеркалами в виде областей неоднородного потенциала (Рисунок 1) или вставок диэлектрика, соответственно. Решение двумерного уравнения Шрёдингера и волнового уравнения проводились путем разложения по поперечным модам. Для квантово-механической модели параметры были выбраны типичными для полупроводниковых структур на основе GaAs с эффективной массой m = 0.0665m₀, где m₀ — масса свободного электрона.

Показано, что подобное явление носит универсальный характер и может наблюдаться в волноводных системах разной природы. Контринтуитивный результат работы расширяет спектр систем, обладающих ССК, и углубляет понимание физических механизмов многомодовой интерференции, ответственных за их формирование в волноводных структурах.

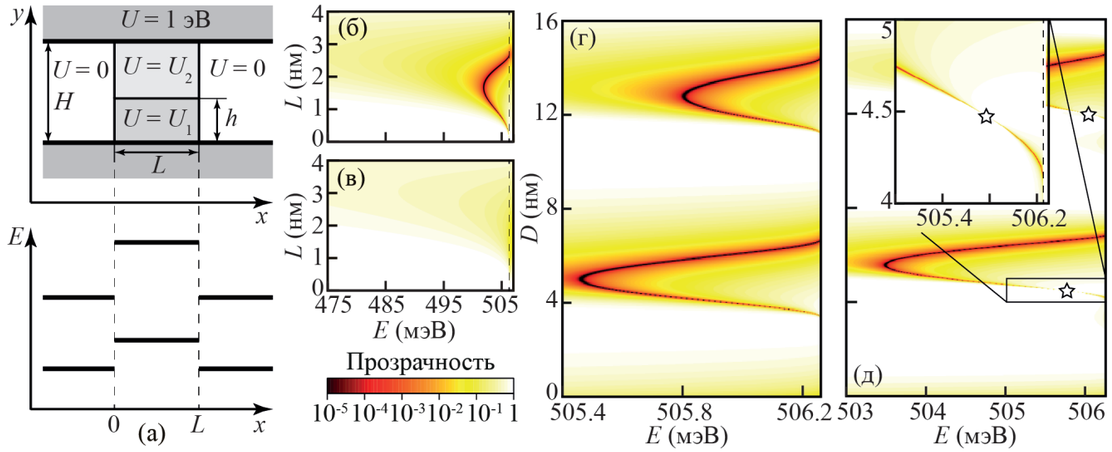


Рисунок 1. (а) пример неоднородности, играющей роль зеркала в квантово-механическом волноводе и соответствующее ей качественное распределение порогов поперечных мод; (б, в) спектр пропускания такого одиночного зеркала как функция его длины L при H = 5 нм, h = 1.2 м, U₀ = 1 эВ, U₂ = U₁ + 1 эВ и U₁ = – 0.7 эВ (б) или U₁ = – 0.6 эВ (в). При U₁ = – 0.6 эВ пропускание одиночного зеркала не обращается в ноль – оно не имеет идеального отражения;. (г) зависимость спектра пропускания от расстояния D между двумя зеркалами при L = 0.8 нм и U₁ = – 0.6 эВ. Резонансы Фано есть, но ССК отсутствуют; (д) зависимость спектра пропускания от расстояния D между тремя зеркалами при L = 0.8 нм и U₁ = – 0.6 эВ. Присутствуют как резонансы Фано, так и ССК (отмечены белыми звёздочками)

Результаты опубликованы:

1. Shubin, N. M. Virtual Fano resonances and multimirror Fabry-Pérot bound states in the continuum. / N. M. Shubin, V. V. Kapaev, A. A. Gorbatsevich. // Physical Review B. – 2025. – Vol. 111. – Iss. 4. – Art. ID. 045433. – 11 pp. – DOI 10.1103/PhysRevB.111.045433.

Компактная нелокальная модель для устройств молекулярной электроники

Н. М. Шубин, М. Н. Журавлев, Ю. А. Успенский, А. В. Емельянов, А. А. Горбацевич

Предложена компактная нелокальная феноменологическая модель на основе гамильтониана Хюккеля для воспроизведения рассчитанных методом DFT спектров пропускания и вольт-амперных характеристик молекулярных проводников. Сама модель, а также полученные численные значения ее параметров для распространенных проводящих молекул и якорных групп позволяют проводить простые, но реалистичные транспортные расчеты молекулярных устройств без привлечения ресурсоемкого первопринципного моделирования.

В полупроводниковой электронике для понимания физики работы отдельных элементов необходимы детальные ресурсоемкие трёхмерные расчеты. Однако проектирование и моделирование интегральных схем, состоящих из большого числа элементов, опираются на эффективные компактные модели. Аналогичный подход требуется и в молекулярной электронике для воспроизведения вольт-амперных характеристик (ВАХ) отдельных устройств без ресурсоемкого первопринципного моделирования, что имело бы решающее значение для практического использования.

В работе развит систематический подход построения таких моделей для описания когерентного транспорта через молекулярные проводники. Предложенный универсальный феноменологический метод нелокальной параметризации ab initio спектров пропускания и ВАХ основан на модели Хюккеля (приближение сильной связи) для π-сопряженных электронов. Он учитывает не только изменения туннельного взаимодействия молекула-электрод, обусловленные различными якорными группами, но и пространственно-однородные и неоднородные изменения потенциальной энергии электрона вдоль молекулы, связанные как с внешним потенциалом, так и с перераспределением заряда при образовании химической связи молекулы с электродами и асимметричного экранирования возникающих при этом поверхностных диполей. Такой подход позволяет достаточно точно воспроизводить ключевые интерференционные особенности электронного транспорта в относительно широком диапазоне приложенных напряжений (до 1 В, см. ВАХ на Рисунке 1), полученные из расчетов DFT, при этом значительно снижая вычислительные затраты.

Простые подходы к аппроксимации ВАХ, использующие один резонанс, связанный с молекулярной орбиталью, ближайшей к уровню Ферми, используют параметры, не дающие физического понимания структурно-специфических особенностей молекулярных проводников. Наш метод, напротив, явным образом учитывает свойства отдельных частей проводящей молекулярной системы и позволяет различать параметры, связанные с интерфейсом молекула-электрод (туннельная связь и сдвиг энергии), которые в основном специфичны для якорных групп и слабо зависят от молекулярного ядра, и параметры, определяющие распределение потенциала вдоль молекулы, на которые сильно влияет внутримолекулярная проводимость.

Метод является согласованным и позволяет использовать параметры, извлеченные из расчетов симметричных конфигураций при нулевом смещении, для подгонки результатов моделирования асимметричных якорных групп при конечном напряжении, обеспечивая эффективную основу для изучения и проектирования молекулярных электронных устройств. Мы проверили его на линейных сопряженных углеводородах при напряжениях смещения ниже 1 В (Рисунок 1 (а, б)). Более того, предварительные расчеты ветвящихся углеводородов также демонстрируют достаточно хорошее соответствие с представленной моделью (Рисунок 1 (в)).

Предложенная модель, а также полученные численные значения ее параметров для часто используемых якорных групп (тиометил, пиридин и бензотиофен) позволяют проводить простые, но реалистичные расчеты молекулярных электронных устройств, что составляет основное прикладное значение полученного в работе результата.

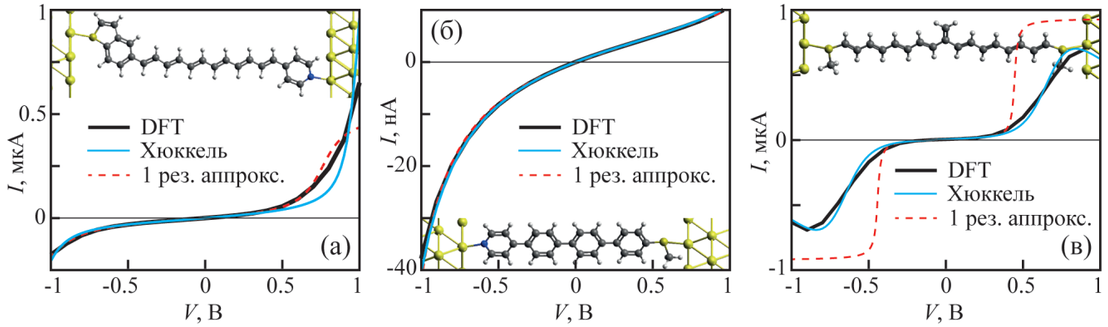


Рисунок 1. Сравнение ВАХ примеров линейных (а), (б) и ветвящихся (в) сопряженных углеводородов с различными якорными группами, посчитанных из первых принципов и с помощью приближенных моделей: предлагаемая в работе компактная модель на основе метода Хюккеля и простая аппроксимация с учетом одного резонанса. Предлагаемая компактная модель демонстрирует хорошее согласие для разных структур, в то время как простая аппроксимация показывает существенное отклонение для ветвящейся структуры из-за деструктивной интерференции

Результаты опубликованы:

1. From DFT to compact non-local model: Accurate and efficient Hückel-based simulation of molecular electronic devices. / N. M. Shubin, M. N. Zhuravlev, Yu. A. Uspenskii, [et al.]. // The Journal of Chemical Physics. – 2025. – Vol. 163/ – Iss. 16. – Art. ID. 164105. – 12 pp. – DOI 10.1063/5.0292753.

Оптические свойства дисульфида олова, легированного тулием

И. И. Усманов, С. Н. Николаев, Е. А. Екимов, Д. А. Зазымкина, В. С. Кривобок

При давлении 8–9 Гпа и температуре 1600 °C синтезированы порошки SnS_2:Tm с оптически-активными центрами Tm^{3+}. Рентгенография, энергодисперсионный анализ и спектроскопия комбинационного рассеяния света подтвердили формирование гексагональной фазы, близкой к чистому SnS_2. В чешуйках SnS_2:Tm обнаружены узкие линии фотолюминесценции переходов Tm^{3+} ($^3F_{2,3}\rightarrow{}^3H_6$; $^3H_4\rightarrow{}^4H_6$) со штарковским расщеплением, соответствующим симметрии D_{3d}. Показана применимость 2H-TMD как матрицы для редкоземельных ионов.

Важным направлением расширения возможностей практического применения слоистых полупроводников является легирование примесями замещения. Ранее было показано, что редкоземельные элементы являются перспективными вариантами лигандов для управления как электрофизическими, так и оптическими свойствами слоистых материалов. Синтез слоистых структур под высоким давлением значительно расширяет возможности легирования элементами, которые плохо растворяются при нормальном давлении.

В данной работе с помощью технологии синтеза при высоком давлении (8–9 ГПа) и температуре (1600 °C) получены монокристаллы 2H–SnS_2, легированные Tm (SnS_2:Tm). В качестве исходных материалов использовался сплав, близкий по составу к $TmSn_3$, смешанный с серой и спрессованный в таблетку. Полученные в результате образцы представляли собой пластинчатые поликристаллы, содержащие фазы SnS_2 и, в незначительном количестве, TmS_2. Исследование образцов методами рентгеновской дифракции, спектроскопии комбинационного рассеяния света и энерго-дисперсионной спектроскопии подтвердили формирование основной фазы гексагонального 2H-SnS_2 с параметрами решётки a = b ≈ 3.649 Å и c ≈ 5.897 Å, практически совпадающими со справочными значениями для нелегированного соединения. Отсутствие заметного расширения кристаллической решетки указывает на то, что Tm^{3+} встраивается как примесь замещения на подрешетку Sn.

В низкотемпературных спектрах фотолюминесценции кристаллов и чешуек SnS_2 обнаружен большой набор узких линий в ближнем инфракрасном и видимом диапазонах, связанных с внутрицентровыми переходами $^3F_{2,3} \rightarrow {}^3H_6$ (≈13700–14500 см$^{-1}$) и $^3H_4 \rightarrow {}^3H_6$ (≈12000–12700 см$^{-1}$) иона Tm^{3+}. С увеличением температуры линии уширяются, однако, в области 12200 см$^{-1}$ (800 нм) сохраняются в спектре вплоть до температуры 300 К (см. Рисунок 1).

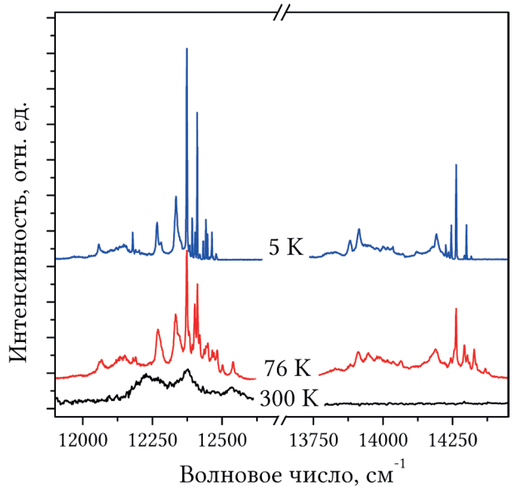


Рисунок 1. Спектры фотолюминесценции SnS_2, легированного Tm, при различных температурах

Анализ тонкой структуры спектров в двух спектральных диапазонах позволил выделить группу узких линий, сохраняющих относительную интенсивность при увеличении плотности мощности возбуждения. Их интенсивность росла по степенному закону $I \propto P^{\alpha}$ с показателем степени α = 0.3, что свидетельствует о насыщении излучающих состояний и обусловлено большим (около миллисекунды) временем жизни возбуждённых состояний в редкоземельных ионах. Наблюдаемое малое неоднородное уширение линий указывает на высокую однородность локального окружения редкоземельных ионов в кристаллической решётке.

Было показано, что этот набор узких линий связан со штарковским расщеплением основного состояния $^3H_6$ Tm^{3+} кристаллическим полем SnS_2 с симметрией D_{3d}. На Рисунке 2 показаны спектры фотолюминесценции чешуйки SnS_2:Tm, на которых отмечены линии, отнесенные к неприводимым представлениям уровней $^3H_6$.

Полученные результаты демонстрируют возможность синтеза слоистых полупроводников высокого структурного совершенства, в частности SnS_2, легированных оптически-активными центрами Tm^{3+}, HPHT методом. Можно утверждать, что решетки дихалькогенидов 2H-переходных металлов могут служить матрицей для редкоземельных ионов, сочетая в себе широкий спектр структурных и электрических свойств двумерных материалов с хорошо изученными оптическими переходами в ионах лантаноидов.

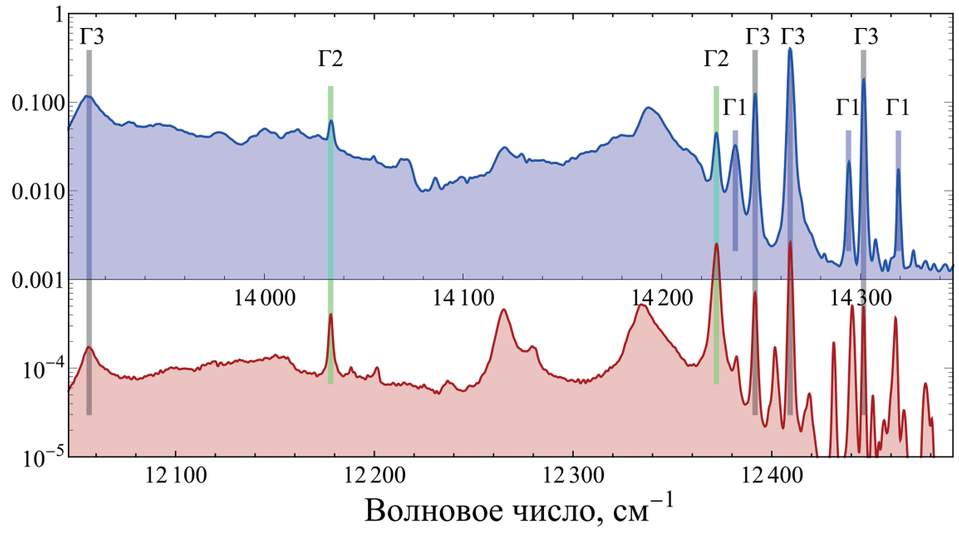


Рисунок 2. Спектры фотолюминесценции SnS_2, легированного Tm, соответствующие переходам $^3H_4 \rightarrow {}^3H_6$ и $^3F_{2,3} \rightarrow {}^3H_6$ с линиями, отнесенными к неприводимым представлениям уровней $^3H_6$

Результаты опубликованы:

1. Spectroscopic properties of thulium-doped tin disulfide synthesized under high pressure. / I. I. Usmanov, S. N. Nikolaev, E. A. Ekimov, [et al.]. // APL Materials. – 2025. – Vol. 13. – Iss. 9. – Art. ID 091106. – 8 pp. – DOI 10.1063/5.0284570.

Эффект поворота расплава на поверхности облученного плазмой металла и его применение

А. А. Ерискин, В. Я. Никулин

Обнаружен эффект поворота расплава на поверхности металла, облученного высокотемпературной плазмой на установке типа плазменный фокус (ПФ). Повторяемость эффекта проверена в ФИАН независимо на двух установках ПФ-4 и ПФ-5. На основе обнаруженного эффекта возможна разработка детекторов магнитного поля (МП), позволяющих определить пространственное распределение МП. Такие детекторы могут найти применение в экстремальных условиях: температура плавления детектора, ударные волны и др.

Под действием высокой температуры (достигающей плавления поверхности материала в результате воздействия высокотемпературной плазмы с плотностью потока энергии выше 10^8 Вт/см^2) и ударной волны на поверхности ферромагнетика (сталь Ст3), а также нержавеющей стали 12Х18Н10Т наблюдается картина из завернутых линий расплава, соответствующая распределению магнитного поля вблизи его поверхности (см. Рисунок 1). На Рисунке 1(б) виден поворот линий как по часовой стрелке, так и против – это объясняется периодическим изменением знака магнитного поля, соответствующего синусоидальному изменению тока во время разряда конденсаторной батареи плазменного фокуса.

По обнаруженному эффекту были получены два патента: № 2793615 РФ от 15.03.2022 (Способ определения распределения магнитного поля) и № 2793610 РФ от 17.06.2022 (Способ определения магнитных свойств материала).

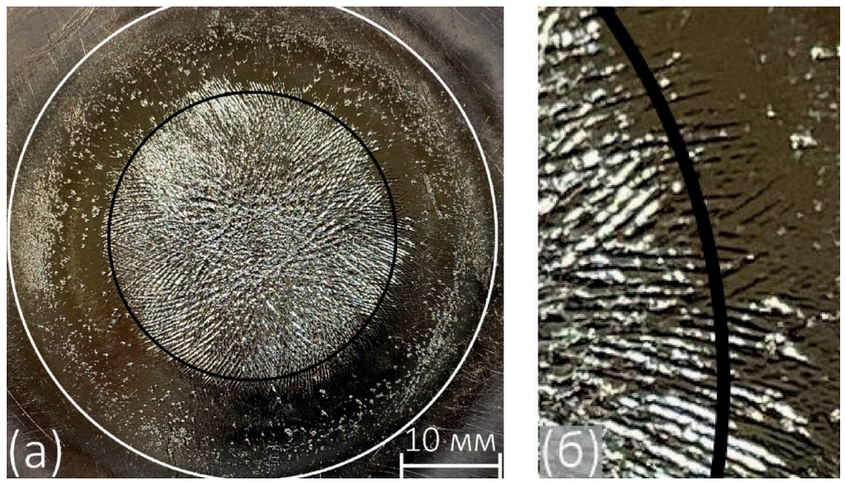


Рисунок 1. (а) образец из нержавеющей стали 12Х18Н10Т после облучения на плазменном фокусе ПФ-5 60-ю импульсами азотной плазмы на расстоянии 25 мм от анода. Черное кольцо – диаметр анода (30 мм), белое кольцо – диаметр катода (50 мм); (б) увеличенный участок поверхности образца, на котором хорошо виден эффект поворота расплава

В первом патенте представлены различные варианты конструкции детекторов, позволяющих исследовать пространственное распределение магнитного поля (МП). Важно отметить, что обнаруженный на установке плазменного фокуса эффект поворота расплава возможно повторить с помощью других способов. Для возникновения эффекта поворота расплава необходимо: 1) мишень из подходящего материала (например, магнитного); 2) нагреть поверхность мишени до температуры плавления материала; 3) осуществить ударное воздействие на нагретую поверхность мишени, в результате которого происходит вылет частиц из материала и их оседание на поверхности мишени (или просто перераспределение расплава по поверхности); 4) зафиксировать картину распределения частиц (расплава) на поверхности мишени, соответствующую картине распределения МП в заданной области пространства.

Основное преимущество предлагаемых детекторов МП заключается в том, что они могут быть использованы в рабочих камерах высокоэнергетических установок, в которых возможно возникновение экстремальных условий, таких как температура, достигающая температуры плавления детектора; агрессивная среда; ударные нагрузки; воздействие мощного рентгеновского и/или нейтронного излучения и др. Практически любой из перечисленных факторов может вывести из строя известные на данный момент детекторы МП, например: датчики Холла или матрицы из десятков таких датчиков; миниатюрные катушки из нескольких витков, обычно помещаемые в кварцевую колбочку.

Одна из предлагаемых конструкций детектора представлена на Рисунке 2.

Для новых детекторов нет необходимости делать дополнительные вводы в вакуумную камеру для проводов питания/сигнальных.

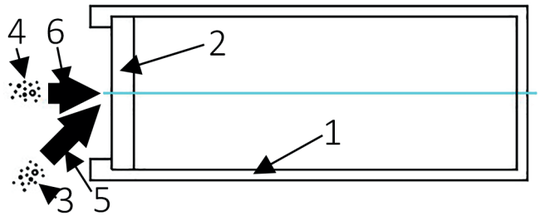


Рисунок 2. Один из предлагаемых примеров конструкции детектора магнитного поля, основанного на обнаруженном эффекте поворота расплава: 1 – корпус детектора, 2 – мишень, 3 – пучок заряженных частиц, осуществляющих нагрев поверхности мишени, 4 – пучок частиц, вызывающий ударную волну, 5 и 6 – направления движения пучков частиц 3 и 4, соответственно

Таким образом минимизируются изменения конструкционных решений установок, в которых проводятся измерения.

Более подробное исследование расплава на поверхности стали Ст3, 12Х18Н10Т, Cu и сплава АМг представлено в работе [1].

Результаты опубликованы:

1. Ерискин, А. А. Особенности морфологии расплава на поверхности металла при воздействии плазмы на установке плазменный фокус. / А. А. Ерискин, В. Я. Никулин, В. Н. Колокольцев. // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2025. – Т. 167. – № 5. – С. 735-745. – DOI 10.31857/S0044451025050116.

Термоэлектрические флуктуации интерферирующих майорановских связанных состояний

С. Ю. Смирнов

Исследуются флуктуации термоэлектрических токов на конечных частотах для квантовой точки, взаимодействующей с двумя интерферирующими майорановскими связанными состояниями. Показано, что при наличии майорановской интерференции дифференциальный термоэлектрический квантовый шум для этой системы антисимметричен по частоте. Это является фундаментальным отличием от андреевских связанных состояний.

Уникальность майорановской интерференции заключается в том, что она вовлекает сразу два майорановских состояния и даёт достаточно высокую степень уверенности, в том что низкоэнергетические состояния имеют майорановскую природу. Майорановская интерференция была выбрана даже компанией Майкрософт в качестве теста майорановских состояний в квантовом чипе Майорана 1. Однако в подавляющем большинстве научных исследований, включая компанию Майкрософт, майорановская интерференция выявляется измерениями среднего электрического тока. Известно, что интерференция андреевских связанных состояний приводит к схожему поведению среднего электрического тока. В работе [1] предложено измерение квантовых флуктуаций электрического тока. В системе, показанной на Рисунке 1, майорановские фермионы интерферируют на квантовой точке. Обнаружено, что дифференциальный термоэлектрический квантовый шум на конечных частотах ω является результатом

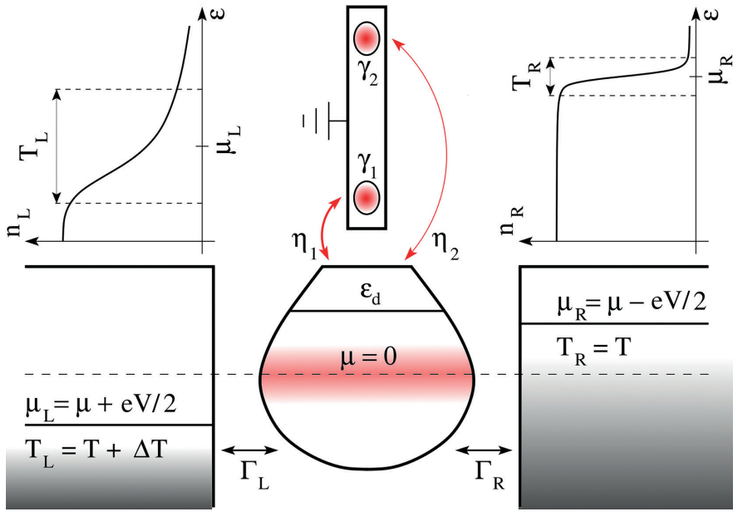


Рисунок 1. Квантовая точка связана с нормальными контактами с химическими потенциалами $\mu_{L,R}$ и температурами $T_{L,R}$. Топологический сверхпроводник характеризуется двумя майорановскими связанными состояниями $\gamma_{1,2}$ и взаимодействуют через эти состояния с квантовой точкой. Взаимодействие реализуется посредством туннельных матричных элементов $\eta_{1,2}$ с конечной разностью фаз $\Delta\varphi$

совместного комплексного взаимодействия эффектов майорановской интерференции, индуцированной разностью фаз $\Delta\varphi$, и неравновесных состояний, источником которых являются электрическое и термическое напряжения: eV и $eV_T = k_B\Delta T$.

Продемонстрировано, что в режиме больших напряжений и температур, который является привлекательным с экспериментальной точки зрения, в дифференциальном термоэлектрическом квантовом шуме возникают уникальные интерференционные участки в спектрах поглощения и испускания в окрестностях конечных частот $\hbar\omega = \pm|eV|/2$ при $\Delta\varphi \neq 0$ таким образом, что дифференциальный термоэлектрический квантовый шум становится антисимметричной функцией частоты ω, как показано на Рисунке 2. Это антисимметричное майорановское поведение качественно отличается от поведения андреевских связанных состояний, которые не приводят к образованию интерференционных участков в частотной зависимости при $\Delta\varphi \neq 0$. На Рисунке 3 показано, что в этом случае дифференциальный термоэлектрический квантовый шум характеризуется лишь простым сдвигом термически возбуждённых пар резонанс-антирезонанс в область положительных частот. Такое поведение ясно демонстрирует, что интерференция андреевских связанных состояний нарушает антисимметричную связь между спектрами испускания и поглощения, которая, таким образом, оказывается уникальной майорановской флуктуационной характеристикой.

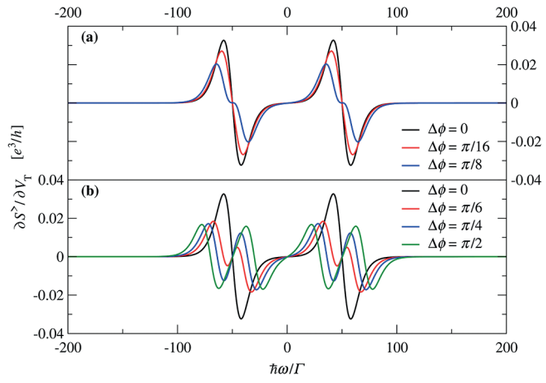


Рисунок 2. Частотные зависимости дифференциального термоэлектрического квантового шума в спектрах испускания ($\omega < 0$) и поглощения ($\omega > 0$) для различных значений туннельной разности фаз $\Delta\varphi$ в режиме больших электрических и термических напряжений V и V_T. Кривые антисимметричны относительно $\omega = 0$ вследствие наличия майорановских связанных состояний

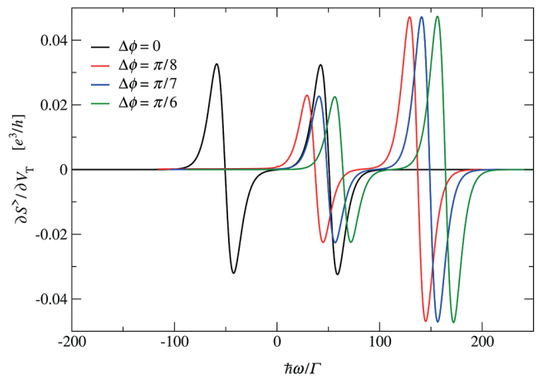


Рисунок 3. То же, что и на Рисунке 2, но для андреевских связанных состояний. Антисимметрия, показанная на Рисунке 2 для майорановских связанных состояний, разрушается интерференцией андреевских связанных состояний. При этом кривые сдвигаются в область положительных частот и при достаточно больших разностях фаз $\Delta\varphi$ наблюдаются только спектры поглощения ($\omega > 0$)

Результаты опубликованы:

1. Smirnov, S. Thermoelectric fluctuations of interfering Majorana bound states. / S. Smirnov. // Physical Review B. – 2025. – Vol. 111. – Iss. 12. – Art. ID 125402. – 15 pp. – DOI 10.1103/PhysRevB.111.125402.

О топологических особенностях кирального фазового перехода в MnSi

С. М. Стишов, А. Е. Петрова, А. М. Белемук

На основании экспериментальных данных и расчетов Монте-Карло предложена новая трактовка кирального фазового перехода в MnSi как двухэтапного фазового превращения из киральной фазы MnSi в парамагнитное состояние. Согласно предложенной трактовке распад топологических объектов спиновых вихрей (подобно возникающим в двумерной XY-модели) завершает фазовый переход в MnSi, происходящий вначале как фазовый переход первого рода.

Одна из ярких особенностей фазового перехода в MnSi состоит в том, что точка перехода сопровождается дополнительными широкими максимумами или минимумами различных термодинамических и кинетических величин чуть выше температуры фазового перехода. Широкий максимум, отмеченный эллипсом (Рисунок 1 (a)), показывает особенность фазового перехода в MnSi по сравнению с другими типичными фазовыми переходами первого рода, близкими ко второму (Рисунок 1 (b)).

Геликоидальный порядок в MnSi можно описать как систему плоскостей, параллельных кристаллографическим плоскостям (111), каждая из которых повернута на небольшой угол по отношению к соседним плоскостям за счет взаимодействия Дзялошинского–Мориа (ДМ). Исчезновение геликоидального порядка в точке фазового перехода означает потерю корреляции

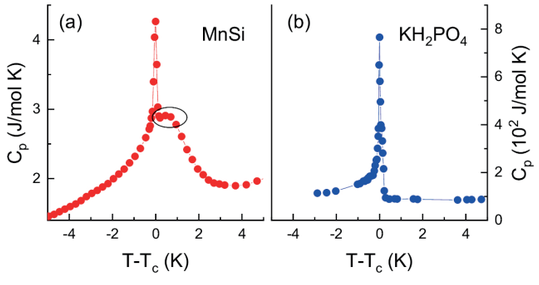


Рисунок 1. Теплоемкость MnSi при магнитном фазовом переходе (a) и теплоемкость KDP (сегнетоэлектрический фазовый переход) (b)

«плоскость-плоскость», что позволяет спинам формировать структуры с меньшей корреляционной длиной. Расчеты методом Монте-Карло показывают, что при определенных условиях в MnSi могут развиваться спиновые вихри с последующим распадом или разрушением при повышении температуры, что приводит к термодинамическим аномалиям. Стоит отметить, что поведение теплоемкости в 3D-модели Гейзенберга со взаимодействием ДМ в некоторой степени аналогично поведению в 2D XY-системе. Чтобы наглядно увидеть разницу между 3D- и 2D-моделями, были проведены расчеты Монте-Карло температурного поведения теплоемкости для 2D XY-модели на квадратной решетке. Теплоемкость в двумерной XY-системе демонстрирует плавный максимум, который не соответствует какому-либо фазовому переходу. Пик теплоемкости возникает при температуре выше температуры перехода Березинского–Костерлица–Таулеса (БКТ). Согласно теории переход БКТ связан с диссоциацией вихревых пар. Температурный интервал с максимальным ростом плотности пар вихрей лежит вблизи максимума теплоемкости.

Геликоидальный фазовый переход первого рода в MnSi не сильно влияет на поведение термодинамических величин при изменении температуры. Фактически маленький скачок энтропии не нарушает общего поведения энтропии. То же самое справедливо для модуля упругости и теплового расширения. Все это, вероятно, доказывает, что фазовый переход, будучи незначительной особенностью большого преобразования, проявляется только в потере дальнего кирального порядка, но сохраняет способность спинов к образованию киральных структур практически нетронутой. В то же время, как следует из данных расчетов Монте-Карло, при определенных условиях взаимодействующие спиновые вихри могут формироваться в MnSi выше температуры фазового перехода с последующим распадом или разрушением под действием температуры, что и приводит к термодинамическому отклику (Рисунок 2). Стоит отметить, что максимумы теплоемкости, наблюдаемые в MnSi выше точки фазового перехода, удивительно похожи на соответствующие максимумы, наблюдаемые в двумерных системах

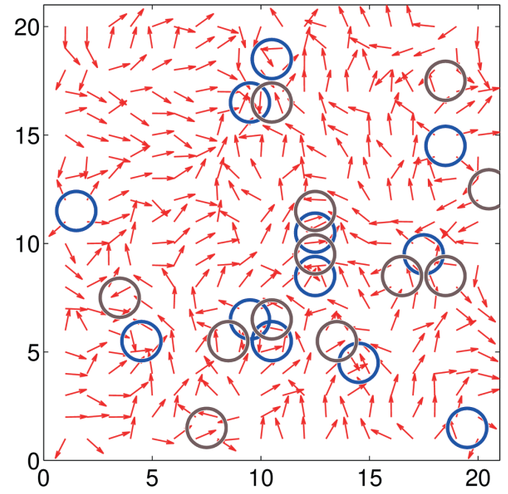


Рисунок 2 Спиновая конфигурация при температуре T = 1.1 по расчетам Монте-Карло. Позиции вихрей и антивихрей обозначены кружками синего ○ и коричневого ○ цвета, соответственно

Таким образом, мы пришли к выводу, что при температурах немного выше T_c в MnSi наблюдаются топологические спиновые возбуждения, подобные возникающим в 2D XY-модели. По-видимому, всю ситуацию можно условно описать как фазовое превращение спиновой фазы MnSi в парамагнитное состояние, которое происходит в два этапа, сначала как фазовый переход первого рода, за которым следует распад топологических объектов, таких как спиновые вихри.

Результаты опубликованы:

1. Стишов, С. М. О топологических особенностях кирального фазового перехода в MnSi. / С. М. Стишов, А. Е. Петрова, А. М. Белемук. // Письма в ЖЭТФ. – 2025. – Т. 121. – № 8. – С. 667–673. – DOI 10.31857/S0370274X25040205.

Когерентные фононы субтерагерцового диапазона частот в InAs/GaSb сверхрешетках

А. Ю. Клоков, Н. Ю. Фролов, А. И. Шарков, В. С. Кривобок, А. В. Клековкин, Г. Н. Ерошенко, И. И. Минаев

Методами лазерной фотоакустики исследованы генерация и распространение когерентных фононов в сверхрешетках InAs/GaSb, выращенных на подложках GaSb (001). Выявленные особенности взаимодействия электромагнитного излучения со «свернутыми» фононными модами позволяют предложить новый метод локального контроля кристаллической структуры сверхрешеток, точность которого сопоставима с рентгеновскими методами.

Когерентные фононы субтерагерцового диапазона частот представляются перспективным инструментом диагностики различных наноструктур на предмет наличия в них наноразмерных дефектов, а также исследования качества их поверхностей.

Короткопериодные сверхрешетки (СР) II-го рода состава InAs/GaSb были выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках p–GaSb. Компенсация упругих напряжений, возникающая вследствие рассогласования решеток InAs и GaSb, достигалась внедрением промежуточных слоев In(As)Sb. Количество периодов (N), толщина периода (L), а также слоев GaSb (dGaSb) и InAs (dInAs) в образцах, отобранных для исследований, приведены в Таблице 1.

Таблица 1. Параметры сверхрешеток

Образец	SL 232	SL 299	SL 302
N	300	100	100
L, нм	7.356	10.226	12.174
d_{GaSb}, нм	2.452	3.409	4.058
d_{InAs}, нм	4.904	6.817	8.116

Генерация и детектирование когерентных фононов осуществлялись на установке, реализующей двухцветную методику «накачка-зондирование» («pump–probe») на основе Ti:Sa лазера Mira-900, генерирующего импульсы длительностью 160 фс. И накачка (на длине волны 400 нм), и зондирование (800 нм) осуществлялись по нормали к анализируемой поверхности (или сколу) излучением, сфокусированным в пятно диаметром 1.5 мкм. Изменения комплексного коэффициента отражения зондирующего пучка, вызванные распространяющимися упругими волнами, регистрировались как на круговой, так и на линейной поляризации.

Исследования были проведены как на ростовой поверхности (001) образцов, так и на свежеприготовленных сколах (110). Регистрируемые отклики (зависимости фазы коэффициента отражения зондирующего излучения от времени) состояли из быстроосциллирующей компоненты на фоне тепловой составляющей, спадающей с характерными временами в сотни пикосекунд. Преобразование Фурье быстроосциллирующей части откликов позволило определить частоты фононов, с которыми взаимодействует зондирующее излучение. Спектры откликов при возбуждении ростовой поверхности и скола показаны на Рисунке 1 а) и б).

Наряду с бриллюэновской компонентой на частоте 40 ГГц (на рисунках не показана), регистрируются пики с частотами в сотни гигагерц, соответствующие взаимодействию зондирующего пучка с фононными модами СР. Для ростовой поверхности наблюдается два пика, для скола – один интенсивный пик.

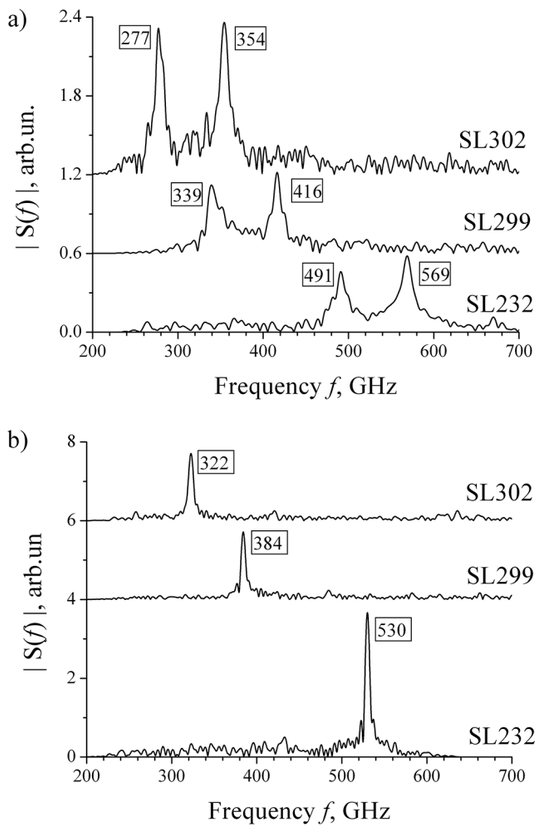


Рисунок 1. Спектры быстроосциллирующей части откликов структур SL232, SL299 и SL302, зарегистрированных: а) на ростовой поверхности на круговой поляризации; b) на сколе на линейной поляризации

Положение и ширина пиков определяются толщиной и совершенством слоев решетки. Расчет показал, что они соответствуют ростовым параметрам. Небольшие вариации формы и положения пика при сканировании вдоль скола связаны с изменением периода СР на уровне 1 % в различных ее областях размером 1.5…2 мкм, что подтверждается анализом топологии ростовой поверхности с помощью АСМ.

Было обнаружено также, что отклик на сколе сильно зависит от поляризации зондирующего пучка: высокочастотный пик имеет наибольшую интенсивность при поляризации перпендикулярно слоям СР и практически исчезает при поляризации вдоль слоев. Это указывает на анизотропный характер взаимодействия фононов со светом. В то же время отклики, зарегистрированные на ростовой поверхности, от поляризации зондирующего пучка не зависели.

Таким образом, методами лазерной фотоакустики исследованы генерация и распространение когерентных фононов в короткопериодных InAs/GaSb сверхрешетках, выращенных на подложках GaSb. На основе выявленных особенностей взаимодействия электромагнитного излучения со «свернутыми» фононными модами предложен новый метод контроля кристаллической структуры сверхрешеток InAs/GaSb, точность которого сопоставима с рентгеновскими методами, а пространственное разрешение достигает единиц микрон.

Результаты опубликованы:

1. Когерентные фононы субтерагерцового диапазона частот в InAs/GaSb сверхрешетках. / А. Ю. Клоков, Н. Ю. Фролов, А. И. Шарков, [и др.]. // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2025. – Т. 122. – № 11–12. – С. 828–834. – DOI 10.7868/S3034576625120197.

Влияние закалки на свойства композитов полупроводник – ферромагнетик

Л. Н. Овешников, А. Б. Давыдов, А. Б. Мехия, А. И. Риль, А. В. Овчаров, А. М. Харламова

Проведен комплексный анализ свойств композитных кристаллов InSb-MnSb, полученных с разной скоростью кристаллизации, в рамках совместной работы с коллегами из ИОНХ РАН, НИЦ КИ и МГУ. Показано, что процедура закалки приводит только к изменению параметров пространственного распределения магнитных включений MnSb и сопутствующему увеличению их магнитной жесткости за счет уменьшения размера, сохраняя фазовый состав системы. Однако электрофизические свойства композитов демонстрируют более комплексное отличие, свидетельствующее об увеличении относительной амплитуды вклада магнитных включений в магнитотранспорт закаленных композитов.

Описание свойств двухкомпонентных систем зачастую учитывает только фракционную долю компонент и, в некоторых случаях, анизотропию формы включений, игнорируя параметры пространственного распределения фаз (размеры включений и расстояния между ними). Однако именно эти параметры должны определять особенности переноса спин-поляризованного тока в системах с магнитной компонентой, представляющих интерес для спинтронных приложений. Управление параметрами распределения фаз в случае объемных систем, в общем случае, составляет довольно нетривиальную задачу. Один из способов повлиять на данный аспект – увеличить скорость кристаллизации, например, в рамках закалки из расплава. Однако, поскольку данный процесс является крайне неравновесным, необходимо комплексно изучать влияние такой процедуры на свойства получаемого композита.

В настоящей работе проводилось сравнение свойств кристаллов InSb-MnSb, полученных в равновесных условиях и с помощью закалки из расплава. Так, было показано, что закалка (с эффективной скоростью охлаждения на уровне 70…90 градусов в секунду) сохраняет фазовый состав композита и элементный состав каждой из фаз, существенно уменьшая размеры магнитных включений MnSb и средние расстояния между ними (Рисунок 1, (a) и (b)). При этом величина намагниченности (Рисунок 1, (c)) оказывается близка к ожидаемой, а некоторые отклонения связаны с флуктуацией состава получаемых слитков. Соответствующие значения позволяют оценить реальное содержание магнитной фазы в конкретном образце. При этом уменьшение размеров включений MnSb приводит к заметному увеличению коэрцитивной силы в закаленных образцах, объясняемому изменением доменной структуры включений при перемагничивании в силу геометрического ограничения. В свою очередь магнитотранспортные исследования показывают более выраженную разницу между двумя типами образцов уже при комнатной температуре. Так, меньшие значения сопротивления (Рисунок 1, (d)) и более высокие значения холловской плотности носителей (Рисунок 1, (e)) и амплитуды аномального эффекта Холла (Рисунок 1, (f)) в закаленных композитах однозначно указывают на то, что вклад включений MnSb в этом случае

оказывается более выраженным, несмотря на номинально одинаковое содержание фазы MnSb. Таким образом, показано, что, во-первых, закалка из расплава является эффективным инструментом управления пространственным распределением магнитной фазы MnSb в композитах на базе полупроводников AIIIBV. А, во-вторых, для корректного описания свойств таких систем даже в классическом пределе, на микронных масштабах, необходимо в явном виде учитывать параметры этого распределения. Результаты работы предполагают возможность получения объемных нанокомпозитов системы AIIIBV – MnSb, необходимых для создания ряда спинтронных устройств.

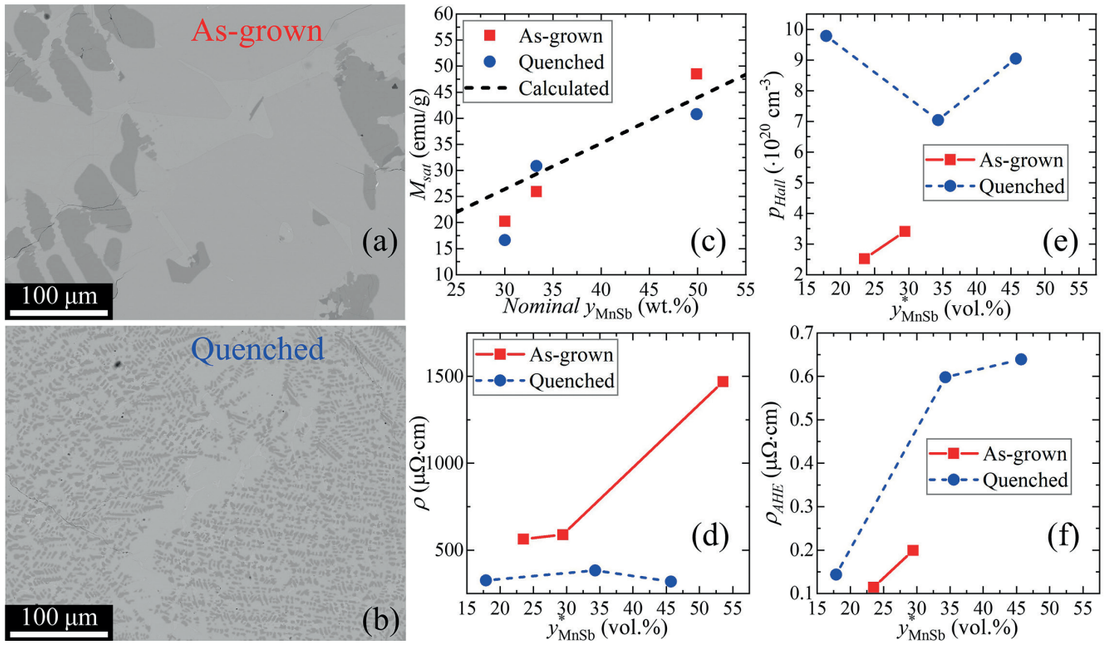


Рисунок 1. Микроструктура равновесного (a) и закаленного (b) кристаллов композита InSb-MnSb (темные области – включения MnSb). Сравнение значений намагниченности (c), удельного сопротивления (d), холловской плотности носителей заряда (e) и аномальной компоненты холловского сопротивления (f) при комнатной температуре для композитов с различным содержанием MnSb (yMnSb)

Результаты опубликованы:

1. Effects of quenching on structure and properties of bulk ferromagnetic composites InSb-MnSb. / L. N. Oveshnikov, E. I. Nekhaeva, M. Jaloliddinzoda, [et al.]. // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2025. – Vol. 628. – Art. ID 173092. – 15 pp. – DOI 10.1016/j.jmmm.2025.173092.

Отделение физики твердого тела

Стабилизация гелимагнитной структуры FeP при десятипроцентном замещении фосфора на мышьяк

А. А. Гиппиус, А. В. Гунбин, С. В. Журенко, А. В. Ткачёв, А. В. Кошелев, И. Г. Силкин, И. В. Морозов

Обнаружено редкое явление стабилизации гелимагнитной структуры при замещении немагнитного иона в бинарном гелимагнетике FeP. В $FeP_{0.9}As_{0.1}$ не было зарегистрировано спин-реориентационного перехода, отчетливо выраженного в FeP в полях более 4 Тл, и каких-либо признаков искажения геликоиды внешним полем вплоть до 12 Тл. Таким образом, $FeP_{0.9}As_{0.1}$ демонстрирует яркий пример стабилизации магнитной геликоиды без существенного искажения параметров кристаллической решётки и магнитных свойств. Исследование проводилось в научном сотрудничестве с коллегами из МГУ и ИЭМ РАН.

Монопниктиды переходных металлов со структурой MnP (B31, Pnma) привлекают существенный научный интерес в связи со своими нетривиальными физическими свойствами и возможными применениями на практике. Четыре из них, – CrAs, MnP, FeAs и FeP, – известны наличием геликоидальной магнитной структуры, при этом детали и механизмы ее формирования остаются дискуссионным вопросом.

FeP, пожалуй, является наименее изученным гелимагнетиком из этого класса. Период его магнитной структуры несоизмерим с кристаллическим и составляет ~5 с. Результаты дифракции нейтронов указывают на наличие двойной геликоиды с разными магнитными моментами железа 0.37 и 0.46 μB, эта модель также хорошо описывает данные ЯМР на немагнитном фосфоре. Кроме того, ЯМР-исследование обнаружило слабую поляризацию геликоиды уже в низких магнитных полях и установило наличие затянутого спин-реориентационного перехода во внешних полях 4 – 7 Тл. Данный переход не разрушает геликоиду, однако изменяет ее ориентацию относительно кристаллической решетки.

Замещение фосфора на мышьяк приводит к формированию непрерывной системы твердых растворов $FeP_{1-x}As_x$, магнитные свойства которых пока мало изучены, хотя есть указания на частичное подавление магнетизма в промежуточной области составов. Нами было выбрано соединение с 10 %-ым замещением, в котором по ранним нейтронографическим данным сохраняется двойная геликоида, хотя и с укороченным периодом ~4 с и неразличимыми магнитными моментами железа 0.42 μB.

В синтезированном $FeP_{0.9}As_{0.1}$ сохраняется кристаллическая структура типа B31, параметры элементарной ячейки и большинство межатомных расстояний увеличиваются по сравнению с незамещенным FeP, в то время как кратчайшее расстояние между атомами железа соседних октаэдров в направлении a остается практически неизменным. Температура магнитного упорядочения $T^N \sim 90$ K определяется как по магнитной восприимчивости, так и по эволюции спектров ЯМР (Рисунок 1).

В отличие от чистого фосфида железа, не было зарегистрировано никаких признаков спин-реориентационного перехода в полях вплоть до 12 Тл. Также полностью отсутствует явление искажения магнитной геликоиды внешним магнитным полем, хотя оно было отчетливо выражено в незамещенном FeP уже в неориентированной фазе в низких полях. Напротив, все наблюдаемые спектры $FeP_{1-x}As_x$ в основном состоянии описываются теоретическими порошковыми ЯМР-спектрами магнетика без каких-либо дополнительных искажений или наклонов в самых высоких использованных нами полях (Рисунок 2).

При этом рентгеновская дифракция, ЯМР в нулевом внешнем поле и ЯКР демонстрируют отсутствие существенных изменений по сравнению с FeP и статистическое распределение пниктогенов, что указывает на стабилизацию магнитной геликоиды без существенного искажения кристаллической и магнитной структуры.

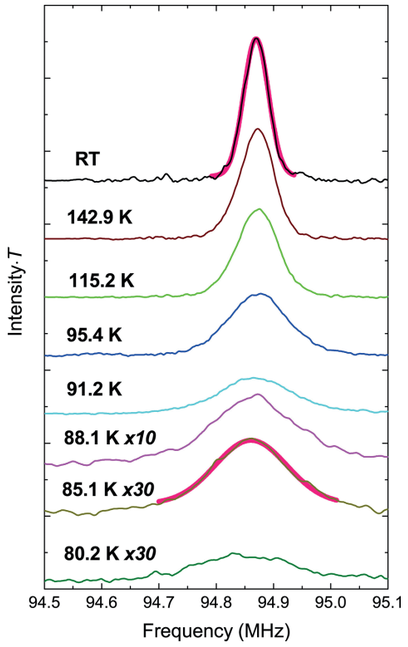


Рисунок 1. Спектры ЯМР 31P с разверткой по частоте в постоянном поле 5.503 Тл. Для спектров RT и 85.1 K приведены гауссовы аппроксимации

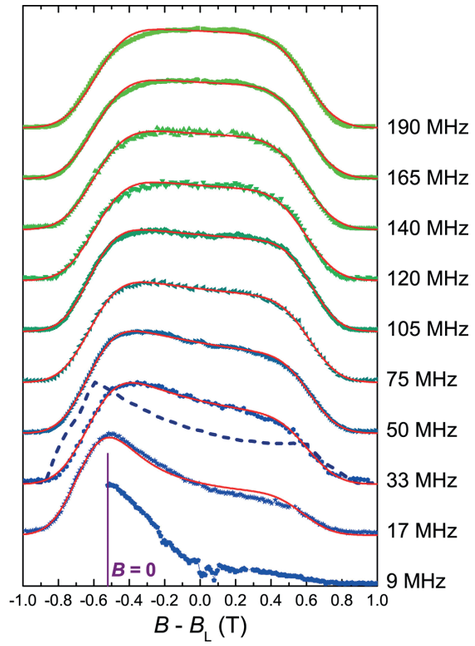


Рисунок 2. Спектры ЯМР 31P с разверткой по полю на фиксированной частоте при температуре T = 5 K. Красные сплошные линии – моделирование порошковым спектром магнетика, не искаженного полем. Пунктирная кривая – спектр незамещенного FeP, искаженный внешним полем

Результаты опубликованы:

1. Arsenic-stabilized magnetic helicoid in FeP0,9As0,1. / A. V. Tkachev, S. V. Zhurenko, A. V. Gunbin, [et al.]. // Physica B: Condensed Matter. – 2025. – Vol. 699. – Art. ID 416792. – DOI 10.1016/j.physb.2024.416792.
2. Журенко, С. В. ЯМР спектроскопия геликоидальных и холдейновских магнетиков : дисс. … канд. физ.-мат. наук : 1.3.8. / Журенко Сергей Викторович ; ФИАН – Москва, 2025. – 178 с.

Отделение физики твердого тела

g-факторы электронов и дырок в перовскитных нанокристаллах $CsPbI_3$ в стеклянной матрице в условиях сильного размерного квантования

С. Р. Меляков, Е. А. Жуков, Д. Р. Яковлев

Измерены g-факторы носителей заряда в нанокристаллах (НК) $CsPbI_3$ с размерами от 4 до 16 нм при температуре 6 К в зависимости от энергии кванта накачки/зондирования (т. е. от размера НК). Теория, учитывающая смешивание электронных зон, успешно описывает поведение g-фактора электронов, но g-фактор дырок изменяется гораздо сильнее, чем следует из теории; причина этого расхождения остается невыясненной. При этом оказывается, что g-фактор светлого экситона почти не зависит от размеров НК.

Бум в исследованиях свинцово-галогенидных перовскитов (СГП) $APbX_3$ (где A – органический или неорганический катион, а X – анион галогена) и нанокристаллов (НК) на их основе связан с перспективами их использования в фотовольтаике и оптоэлектронике. Изучение спиновых свойств носителей заряда в этих полупроводниках началось лишь сравнительно недавно. Они имеют ряд особенностей по сравнению с обычными полупроводниками (Si, GaAs, CdTe и т. п.), связанных с таковыми зонной структуры СГП. Тем не менее, оказалось, что оптические методики, которые на протяжении многих лет плодотворно использовались для изучения спиновых свойств материалов II–VI и III–V и гетероструктур на их основе, могут быть успешно применены и для СГП. К ним относится и метод накачка–зондирование с измерением фарадеевского вращения или эллиптичности, позволяющий исследовать спиновую динамику и измерять частоты и времена затухания ларморовской прецессии носителей заряда в магнитном поле и тем самым определить их *g*-факторы и времена спиновой релаксации при различных экспериментальных условиях.

В настоящей работе изучались спиновые характеристики перовскитных НК $CsPbI_3$ с размерами от 4 до 16 нм в матрице фторфосфатного стекла в магнитных полях до 500 мТ при температуре 6 К. Поскольку энергия основного экситонного перехода в НК зависит от их размера, НК различных размеров адресуются за счет изменения энергии кванта накачки/зондирования $\eta\omega_{ex}$.

Фотовозбуждение создает в исследуемых НК долгоживущие (резидентные) носители заряда, причем в одном и том же образце могут генерироваться как электроны, так и дырки. Измеряя при каждом значении энергии кванта зависимости частоты ларморовской прецессии тех и других от магнитного поля, мы получаем величины соответствующих *g*-факторов. Зависимости электронного и дырочного g-фактора от величины $\eta\omega_{ex}$ (которая, напомним, отражает размер НК) показаны на Рисунке 1.

Размерное квантование в НК вызывает модификацию зонной структуры, которая приводит к перенормировке *g*-факторов носителей заряда. Экспериментальная зависимость электронного *g*-фактора от размера НК может быть хорошо описана расчетом в рамках приближения сильной связи, который учитывает подмешивание состояний вышележащих подзон тяжелых и легких электронов (красная кривая на Рисунке 1). Зависимость же для дырок оказывается существенно более сильной, чем расчетная (синяя кривая). Это расхождение теории с экспериментом требует дальнейшего анализа. Возможно, оно связано с подмешиванием состояний низколежащих зон, учет которого требует выхода за рамки использованного в расчете приближения ближайших соседей.

Интересная особенность показанного на Рисунке 1 поведения электронного и дырочного *g*-факторов состоит в том, что их сумма остается примерно постоянной. Эта величина есть не что иное, как *g*-фактор светлого экситона в полупроводнике, который, таким образом, очень слабо зависит от размера НК. Этот факт может указывать на какие-то скрытые особенности зонной структуры СГП.

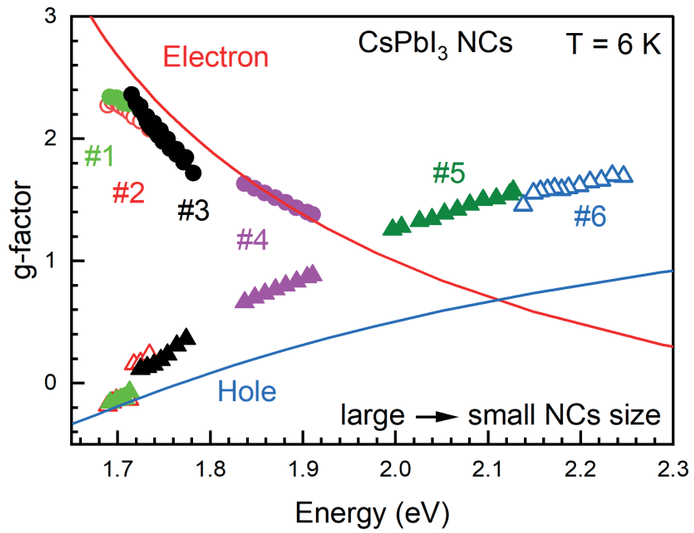


Рисунок 1. Спектральные зависимости g-факторов электронов (кружки) и дырок (треугольники) в НК $CsPbI_3$ в шести образцах (#1–6), отличающихся средними размерами НК. Линии показывают результаты теоретического расчета для электронов и дырок

Результаты опубликованы:

1. Landé g-factors of electrons and holes strongly confined in CsPbI3 perovskite nanocrystals in glass. / S. R. Meliakov, E. A. Zhukov, V. V. Belykh, [et al.]. // Nanoscale. – 2025. – Vol. 17. – No 11. – P. 6522–6529. – DOI 10.1039/d4nr04602a. – URL: https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2025/nr/d4nr04602a.

Отделение ядерной физики и астрофизики

Отделение ядерной физики и астрофизики

Исследование энергетического спектра альфа-частиц в эксперименте по облучению борной мишени протонным пучком на ускорителе «Прометеус»

А. С. Русецкий, М. А. Негодаев, А. В. Огинов, В. А. Рябов, К. В. Шпаков, А. Е. Шемяков, И. Н. Завестовская

Исследование энергетического спектра альфа-частиц ядерной реакции $p+^{11}B \rightarrow 3\alpha$ проведено на пучке инжектора протонного синхротрона комплекса протонной терапии «Прометеус». Определено, что из борной мишени вылетают в основном альфа-частицы с энергией от 3 до 5.5 МэВ.

Эксперимент проводился на базе ускорителя протонов «Прометеус». В качестве источника протонов использовался инжектор, формирующий пучок с энергией 0.6…1.1 МэВ. Схема эксперимента представлена на Рисунке 1. Пучок протонов из инжектора с энергией 0.7 МэВ поступал в вакуумную камеру и попадал на мишень через диафрагму диаметром 8 мм. В качестве мишени использовалась пластина из естественного бора (содержащего изотоп ^{11}B – 80%). Заряженные частицы (протоны и альфа-частицы) регистрировались с помощью трековых детекторов CR-39. Расстояния от центра мишени до середины трековых детекторов (Рисунок 1): № 4 – ок. 2 см и № 5 – ок. 10 см. Детекторы 4 располагались на плоскости диафрагмы параллельно поверхности мишени, и частицы падали на нее под разными углами. Один из этих детекторов был покрыт слоем Al толщиной 4 мкм для уменьшения нагрузки на детектор фоновыми низкоэнергетическими протонами, рассеивающимися на мишени и стенках камеры. Плоскость детектора 5 (10 см от мишени) была повернута к мишени, и частицы падали на нее практически нормально. Тыльная сторона детектора, расположенная на расстоянии 10 см от мишени, была повернута к стенке вакуумной камеры. Передняя и задняя стороны детектора одинаково способны регистрировать треки протонов и альфа-частиц.

После облучения трековые детекторы травились в 6М растворе NaOH при температуре 70 ˚C в течение 7 ч. После травления детекторы исследовались под микроскопом Nikon L200 с объективом 50×.

Для определения энергетического спектра альфа-частиц, испускаемых борной мишенью, были отобраны треки с наиболее круглой формой и сравнены с калибровочными треками. Было проведено два облучения — с борной мишенью и с алюминиевой мишенью. Треки альфа-частиц и протонов различаются по размеру. Исходя из характера результатов калибровки, распределения площади, а также того, что на детекторах, облученных алюминиевой мишенью, регистрировались преимущественно треки протонов, установлено, что треки протонов имеют характерные площади: от 0.7 до 5.9 мкм², а альфа-частиц — от 6.0 до 30.0 мкм².

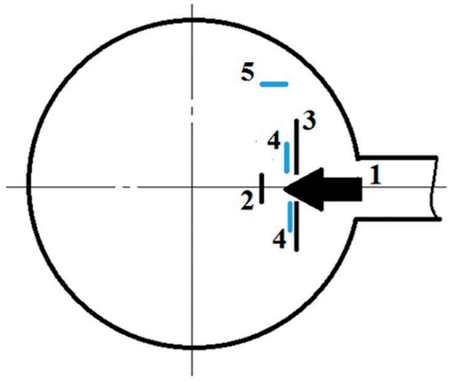


Рисунок 1. Расположение детекторов и мишеней в вакуумной камере: 1 – протонный пучок, 2 – мишень, 3 – диафрагма (диаметр – 8 мм), 4 и 5 – трековые детекторы CR-39

Детекторы, облученные с алюминиевой мишенью, являются фоновыми по отношению к детекторам, облученным борной мишенью. Кроме того, фон для каждого детектора представляет собой вклад дефектов и протонов пучка, рассеянных от стенок камеры. На Рисунке 2 представлены гистограммы результирующих площадей поверхностных объектов (треков и различных дефектов) для детекторов № 7 (позиция 4 на Рисунке 1, без покрытия), № 8 (позиция 4 на Рисунке 1, покрытие 4 мкм Al) и № 9 (позиция 5 на Рисунке 1, без покрытия). Для детекторов № 7 и № 8 четко выраженного пика в спектре нет, поскольку частицы падали на них под разными углами, и значительный вклад овальных треков искажает энергетический спектр. На детекторе 9, расположенном на расстоянии 10 см от мишени, частицы падали преимущественно по нормали, а доля круглых треков была максимальной. Распределение для детектора № 9 (Рисунок 2 (c) и (d) показывает размытый пик в диапазоне 10…20 мкм² (среднее значение ~17 мкм²).

Сравнение распределения площадей треков детектора № 9 (Рисунок 2 (c)) с распределениями калибровочных детекторов, облученных альфа-частицами от источника ^{241}Am, позволяет сделать вывод, что основная часть альфа-частиц, испущенных борной мишенью, имела энергии в диапазоне 3.0…5.5 МэВ.

Исследование выхода ядерной реакции $p+^{11}B \rightarrow 3\alpha$ вблизи резонансной энергии было проведено с использованием трековых детекторов CR-39. Выход альфа-частиц из борной мишени оценивается в ~10^{-4} на протон.

Это позволяет сделать вывод о том, что вклад альфа-частиц из реакции $p+^{11}B \rightarrow 3\alpha$ в общую дозу облучения незначителен. Усиление терапевтического эффекта от присутствия бора, вероятно, объясняется другими (возможно, нерадиационными) эффектами.

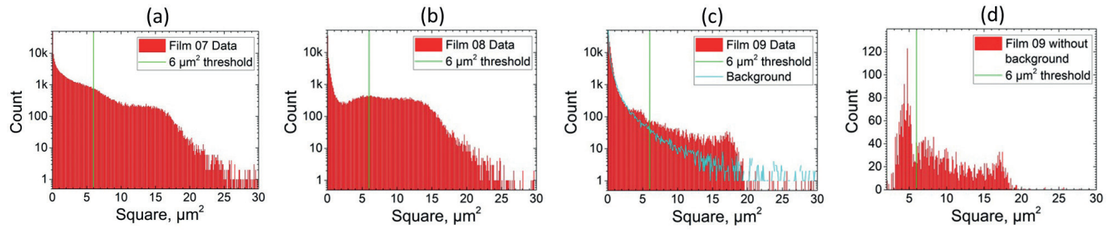


Рисунок 2. Распределение площадей треков для детекторов: (a) № 7 (позиция 4 на Рисунке 1, без покрытия); (b) № 8 (позиция 4 на Рисунке 1, покрытие Al 4 мкм); (c) № 9 (позиция 5 на Рисунке 1, без покрытия); (d) разница между отсчетами переднего и заднего планов для детектора № 9

Результаты опубликованы:

1. Study of the energy spectrum of alpha particles in an experiment on irradiation of a boron target with a proton beam at the Prometheus accelerator / A.S. Rusetskii, M.A. Negodaev, A.V. Oginov, [et al.]. // Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, B. – 2025. – Vol. 563. – Art. ID 165651. – DOI 10.1016/j.nimb.2025.165651.

Отделение ядерной физики и астрофизики

Результаты мониторинга магнитара SGR 1935+2154 в 2021–2024 гг.

В. А. Фёдорова, А. Е. Родин

В работе представлены результаты наблюдений магнитара SGR 1935+2154 на частоте 111 МГц на радиотелескопе БСА ФИАН в период с апреля 2021 года по ноябрь 2024 года. Для поиска как периодических, так и единичных импульсов использовались данные шести частотных каналов с временным разрешением 0.1 с, запись которых ведется на частоте (110.25 ± 1.25) МГц. В ходе обработки данных за указанный период была получена оценка верхнего предела плотности потока радиоизлучения магнитара SGR 1935+2154 – 250 мЯн на частоте 111 МГц.

Магнитар SGR 1935+2154 впервые был зарегистрирован в 2014 году космической обсерваторией Swift в рентгеновском диапазоне. Поздние исследования в радиодиапазоне на частотах 1420 и 408 МГц позволили отождествить SGR 1935+2154 с остатком сверхновой G57.2+0.8, определив возраст и расстояние обоих источников.

В апреле 2020 года телескопами Swift и Fermi/GMB была зарегистрирована крайне высокая активность источника. За 24 минуты наблюдений было зарегистрировано около 35 отдельных импульсов, притом что ранее в периоды активности регистрировалось всего несколько вспышек. Менее, чем через сутки, от магнитара с помощью радиотелескопа CHIME/FRB был зарегистрирован мощный радиосигнал, состоящий из двух импульсов шириной около 5 мс с интервалом 30 мс. Дальнейшее наблюдение SGR 1935+2154 на радиотелескопе STARE2 на частоте 1.4 ГГц позволило зарегистрировать самую мощную вспышку, флюэнс которой составил более 1.5 МЯн×мс. Этот факт позволил охарактеризовать явление как первый галактический быстрый радиовсплеск.

После этого события нерегулярная активность магнитара SGR 1935+2154 продолжалась еще несколько месяцев. В этот период проводился мониторинг источника в широком диапазоне радиочастот. Наблюдения велись, в том числе, и на радиотелескопе БСА ФИАН на частоте 111 МГц. В период полугодовой активности магнитара в 2020 году было зарегистрировано как импульсное, так и периодическое низкочастотное излучение.

Несмотря на то, что вот уже на протяжении многих лет магнитар не проявлял никакой активности, мы не прекращаем его мониторинг. В нашей работе мы приводим результаты наблюдений источника в период с апреля 2021 года по ноябрь 2024 года.

Для поиска единичных непериодических импульсов магнитара SGR 1935+2154 использовались архивные данные шести частотных каналов с временным разрешением 0.1 с. Источник находился ежедневно в поле зрения радиотелескопа 3.5 мин. В ходе исследования было проанализировано 76.5 часов наблюдений. Для выделения импульсного сигнала на фоне шумов к записям применялась методика свертки данных с шаблоном, соответствующим по форме искомому сигналу. На последнем этапе обработки данных проводился визуальный анализ, при котором на динамическом спектре во всех шести частотных каналах выделялся искомый импульс. За период с апреля 2021 года по ноябрь 2024 года отдельных единичных импульсов не обнаружено.

Для поиска периодического импульсного излучения от магнитара также использовались шестиканальные данные радиотелескопа БСА ФИАН с выборкой 0.1 с. Из записи выделялся участок длинной 2048 отсчетов, что соответствует времени прохождения источника через диаграмму направленности БСА. Далее производилась поканальная свертка данных с двойным периодом 2×3.247 с, после чего для дальнейшего анализа формировался динамический спектр. Главным критерием обнаружения являлось наличие двух импульсов в суммарном профиле, а также характерная колоколообразная форма кривой сигнал/шум SNR(DM), максимум которой совпадал с измеренной ранее мерой дисперсии SGR 1935+2154. В ходе исследования был установлен верхний предел плотности потока 250 мЯн для уровня обнаружения 5σ на частоте (110.25 ± 1.25) МГц.

Объяснение отсутствия радиоизлучения геометрическими причинами узости конуса и/или непопадания его к наблюдателю для исследуемого магнетара не применимо, поскольку ранее излучение уже было обнаружено на нескольких далеко разнесенных частотах. Причину отсутствия радиоизлучения нужно искать в чисто астрофизических механизмах. В качестве примера можно привести астероидную гипотезу, в которой астероид, находящийся на высокоэксцентрической орбите, приближаясь к точке периастра, разрывается приливными силами. Часть осколков, если падает на поверхность с противоположного к вектору скорости вращения направления, вызывает так называемый анти-глитч, то есть замедление скорости вращения. Другие фрагменты, попадая в конус излучения, вызывают мощную вспышку радиоизлучения.

Результаты опубликованы:

1. Fedorova, V. A. Results of Monitoring of Magnetar SGR 1935+2154 for 2021–2024. / V. A. Fedorova, A. E. Rodin. // Astronomy Reports. – 2025. – Vol. 69. – No. 10. – P. 971-974. – DOI 10.1134/S1063772925702221.

Отделение ядерной физики и астрофизики

Лазерная дифракционная диагностика фазовых микрообъектов: от фундаментальных закономерностей к решению обратной задачи

Е. В. Паркевич, А. И. Хирьянова, С. Ю. Гаврилов, К. В. Шпаков, Т. Ф. Хирьянов

Разработано аналитическое решение обратной задачи дифракции в первом приближении Рытова для аксиально-симметричных фазовых микрообъектов и изучены фундаментальные следствия из данного приближения. Предложенный метод позволяет восстанавливать диэлектрическую проницаемость исследуемого объекта как по фазовому сдвигу, так и по интенсивности дифрагированного излучения, существенно повышая точность техник лазерной диагностики.

Ключевой проблемой лазерной диагностики плазмы и других фазовых микрообъектов является учет дифракционных эффектов, искажающих визуализацию объектов и препятствующих точному восстановлению их оптических характеристик. В представленном цикле работ сотрудниками Лаборатории лазерной диагностики плазменных структур было получено аналитическое решение обратной задачи дифракции в первом приближении Рытова для аксиально-симметричных фазовых объектов, а также систематически изучены фундаментальные следствия из данного приближения [1, 2]. Теоретически предсказаны и численно подтверждены универсальные закономерности визуализации осесимметричных фазовых объектов: в плоскости симметрии объекта его яркостная картина исчезает – объект становится невидимым, а фазовая – локализуется и однозначно связана с диэлектрической проницаемостью, при этом наблюдается инверсия контраста интенсивности при переходе через плоскость симметрии [1, 2]. Данные закономерности, тесно связанные с эффектом дефокусировки оптики, впервые строго получены как прямое следствие решения волнового уравнения Гельмгольца в первом приближении Рытова и подтверждены численными исследованиями.

На основе выявленных закономерностей построено точное решение обратной задачи дифракции, позволяющее восстанавливать диэлектрическую проницаемость объекта (включая случай с поглощением излучения) по спектрам Фурье характеристик дифрагированной волны, измеренным в произвольной плоскости за объектом [3]. Показано, что диэлектрическую проницаемость объекта можно восстанавливать не только по измеренному фазовому сдвигу, но и по зарегистрированным изменениям интенсивности дифрагированной волны. Для объектов с поглощением излучения получены замкнутые выражения, требующие одновременной регистрации обоих характеристик дифрагированной волны [3]. Полученные решения явно учитывают дифракционные эффекты, обеспечивая существенно более высокую точность восстановления диэлектрической проницаемости объекта по сравнению с методами геометрической оптики.

Знание вышеописанных закономерностей, таких как падение контраста яркостной картины и максимальная локализация фазовой картины объекта, позволяет разработать новые методы и подходы к диагностике быстро эволюционирующих фазовых микрообъектов, повысить точность восстанавливаемых их оптических характеристик, а также значительно упростить дизайн оптических систем регистрации.

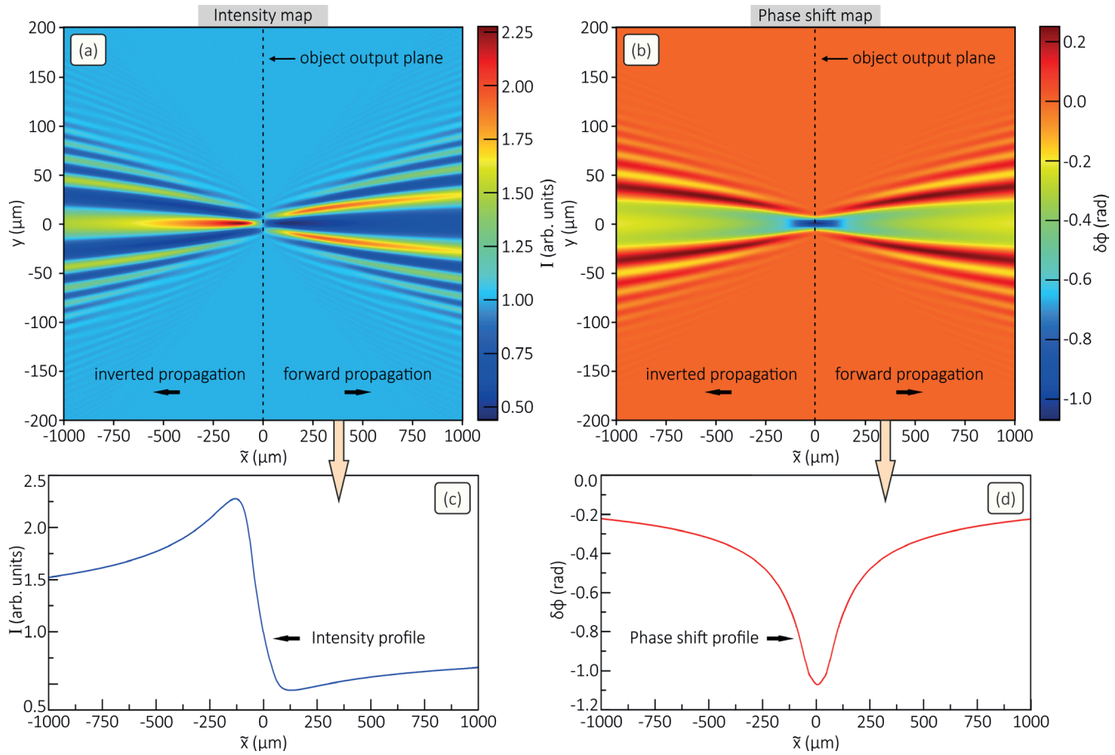


Рисунок 1. Дифракционные картины фазового микрообъекта, раскрывающие особенности его визуализации в поле когерентного лазерного излучения

Результаты опубликованы:

1. Гаврилов, С. Ю. Визуализация микроканалов высокоионизованной плазмы в импульсном наносекундном газовом разряде методом лазерной дифракционной съемки. / С. Ю. Гаврилов, Е. В. Паркевич, А. И. Хирьянова. // Квантовая электроника. – 2025. – Т. 55. – №. 2. – С. 116–122. DOI 10.3103/S1068335625602092.
2. The features of the phase object visualization in the field of coherent laser radiation predicted in the first Rytov approximation. / E. V. Parkevich, A. I. Khirianova, T. F. Khirianov, S. Y. Gavrilov. // Computer Optics. – 2025. – Vol. 49. – Iss. 4. – P. 566-572. – DOI 10.18287/2412-6179-O-1608.
3. Parkevich, E. V. Solving of the inverse diffraction problem in the first Rytov approximation for retrieving the phase object dielectric permittivity. / E.V. Parkevich, A.I. Khirianova, T.F. Khirianov. // Computer Optics. – 2025. – Vol. 49. – Iss. 5. – P. 749-757. – DOI 10.18287/2412-6179-CO-1617.

Отделение ядерной физики и астрофизики

Количественная диагностика при искажении изображения артефактами от металлических имплантов методами КТ и прицельной абсорбционной рентгеновской спектрометрии с контрастирующим агентом

А. Г. Турьянский, Чжо Зо Лин, В. М. Сенков, М. З. Зиятдинова

Металлические эндопротезы, кардиостимуляторы и другие устройства, имплантированные в теле пациента, генерируют сильные артефакты при КТ-сканировании. Это препятствует объективной диагностике заболевания. На фантоме легких показано, что обозначенная проблема может быть успешно решена путем комбинированного применения методов КТ и абсорбционной рентгеновской спектрометрии контрастирующего агента в области К скачка контрастирующего элемента.

При КТ-сканировании металлические эндопротезы, кардиостимуляторы и другие устройства, имплантированные в теле пациента, генерируют сильные артефакты. Это не позволяет проводить объективные исследования структуры и рентгеновской плотности ткани, что препятствует корректной диагностике заболевания. Предложенный метод количественной функциональной диагностики позволяет решить указанную проблему. Метод включает комбинированное применение мультиспиральной компьютерной томографии (КТ) и прицельной абсорбционной спектрометрии скачков фотопоглощения контрастирующих агентов. По данным КТ-сканирования определяются 3D-координаты области интереса, контрастированной, например, препаратом йода или газовой смесью с ксеноном (Рисунок 1). На заданную область исследования направляется зондирующий рентгеновский пучок и спектрометром регистрируется спектр пропускания в узкой спектральной полосе К-скачка фотопоглощения контрастирующего элемента. При этом относительная величина К-скачка фотопоглощения не изменяется при пропускании через металлические или костноэквивалентные объекты.

Дополнительные спектральные измерения обеспечивают решение проблемы влияния сильных искажений изображений при наличии в теле имплантов и эндопротезов на точность количественных измерений рентгеновской плотности при КТ-диагностике. Это также позволяет исследовать динамику переноса контрастирующего препарата в кровеносных и лимфатических сосудах и повысить достоверность диагностики состояния пациента.

Результаты работы подтверждены экспериментами, проведенными на мультиспиральном компьютерном томографе Aquilion Prime SP (Canon) и экспериментальном стенде ФИАН. Фантом из полистирола диаметром 165 мм заполнялся дистиллированной водой. С внешней стороны корпуса фантома устанавливались цилиндры из фторопласта и ортофосфата кальция диаметром 10 мм, имитирующие костную ткань. В качестве металлического тест-объекта использовался однокамерный кардиостимулятор в титановом корпусе Endurity (Abbott / St. Jude Medical). Цилиндрические вставки из полистирола диаметром 70 и 14 мм заполнялись, соответственно, газовой смесью ксенона с объемной концентрацией 72 % и 35 % и йогексола с концентрацией 9 и 38 мг/мл. Спектры измерялись с помощью энергодисперсионного спектрометра Amptek.

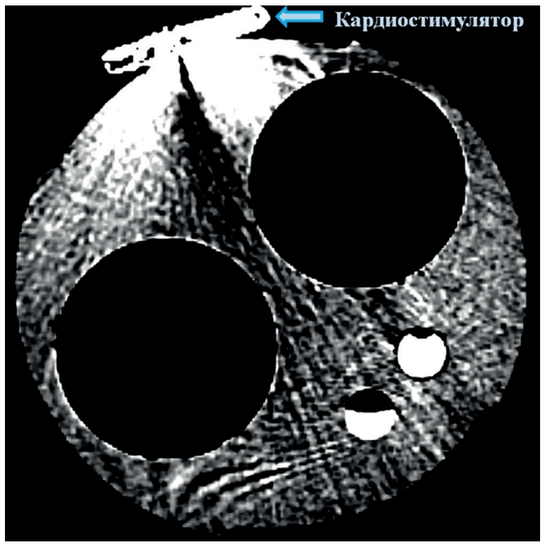


Рисунок 1. Искаженное артефактами изображение сечения фантома грудной клетки с кардиостимулятором (см. стрелку) и вставками, содержащими ксенон и йогексол

Результаты измерений спектров пропускания через фантом с кардиостимулятором в области скачков рентгеновского фотопоглощения контрастирующих агентов представлены на Рисунке 2. Непрерывной линией показаны результаты реконструкции экспериментальных данных путем численного решения уравнения свертки. Предложенный вариант метода является прицельным и при его практической реализации необходима передача данных координат области интереса, полученных на КТ или ангиографе.

Разработанный метод позволяет проводить диагностику вентиляционных характеристик легких и исследовать динамику кровотока в кровеносных сосудах. При прицельной диагностике площадь облучаемой области снижается более чем на 3 порядка, что обеспечивает соответствующее снижение эффективной дозы и позволяет проводить мониторинг состояния пациента практически без радиационных рисков

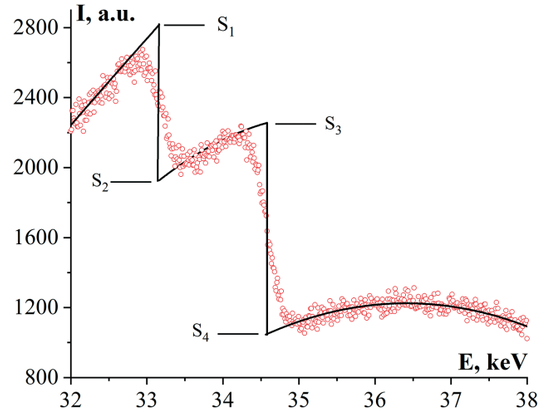


Рисунок 2. Спектры пропускания через фантом в области К-скачков рентгеновского фотопоглощения ксенона (E = 34.58 кэВ) и йода (E = 33.16 кэВ)

Результаты опубликованы:

1. Quantitative diagnostics in the presence of image distortion by artifacts due to metal implants using computed tomography and targeted X-ray absorption spectrometry with a contrast agent. / A. G. Turyanskiy,·R. M. Ainetdinov, Kyaw Zaw Lin,·[et al.]. // Biomedical Engineering. – 2025. – Vol. 59. – Iss. 2 – P. 110–113. – DOI 10.1007/s10527-025-10474-8.

Влияние ионизирующего излучения на электростатические свойства золотых наночастиц

М. Ю. Азаркин, М. Р. Киракосян

В данной работе с помощью моделирования Монте-Карло в программном пакете Geant 4 произведена численная оценка влияния γ-излучения типичных коммерческих медицинских источников на базе рентгеновских трубок и линейных ускорителей на электростатические свойства радиосенсибилизирующих золотых наночастиц (ЗНЧ), находящихся в тканеподобной среде. Показано, что для реалистических доз облучения существенная доля ЗНЧ, вплоть до ~10, может по крайней мере временно изменять свой поверхностный заряд достаточно сильно для перехода анионных ЗНЧ в катионные, что может приводить к цитотоксическим эффектам.

Радиосенсибилизация опухолей наночастицами (НЧ) – одно из наиболее интересных и интенсивно развивающихся направлений радиотерапии раковых опухолей. Несмотря на большое число in vitro и in vivo экспериментов, убедительно подтверждающих эффект, природа явления до сих пор не раскрыта. Исследовались электростатические свойства ЗНЧ, так как они могут играть существенную роль в биологических процессах живой клетки. С этой целью моделировалось взаимодействие γ-излучения типичных источников с ЗНЧ, находящихся в тканеподобной среде. Так было проведено моделирование системы (см. Рисунок 1), представляющей собой куб с линейными размерами (100 × 100 × 100) мкм для источника γ-квантов 140 кВп и, соответственно, (1 × 1 × 1) мм для источника 6 МВ; в центре размещен водный куб размером (10 × 10 ×10) мкм с наночастицей золота, расположенной в центре (моделирование производилось для наночастиц с диаметрами от 10 до 80 нм).

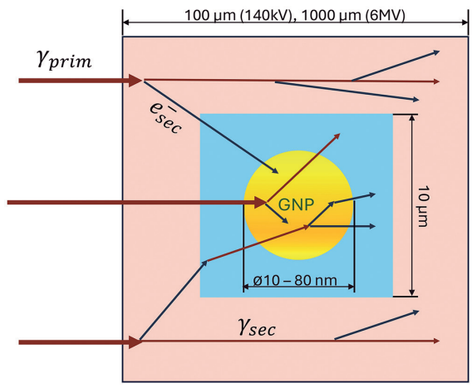


Рисунок 1. Схематическое изображение моделируемой системы

Были использованы самые современные микроскопические модели взаимодействия излучения с веществом, учитывающие их дискретный характер. Также учитывались взаимодействия вторичных частиц. В результате получено распределение НЧ по заряду (Рисунок 2), приобретенному под действием ионизирующего излучения, и продемонстрировано, что значительная доля НЧ приобретает существенный заряд.

В данном in silico исследовании впервые продемонстрировано, что для типичной фракции в 2 Гр, например, доля ЗНЧ с D = 20…40 нм (наиболее исследуемые размеры), изменивших свой поверхностный электрический потенциал φ_s , может находиться приблизительно в диапазоне 1…10 %, а увеличение φ_s может лежать в пределах ≈100…300 мВ. Полученные оценки приобретенного заряда следует принимать во внимание в исследованиях возможных механизмов радиосенсибилизации, связанных с электростатическими свойствами НЧ. В литературе множество упоминаний того, что НЧ с положительными значениями ζ-потенциала, который имеет тот же знак и порядок значений, что и поверхностный потенциал, проявляют цитотоксичное воздействие при концентрациях уже ~10 мг/л. В соответствии с полученными выше оценками, облучение терапевтическими γ-пучками определённо, по крайней мере временно, существенно изменит поверхностный потенциал значимой доли ЗНЧ, и вероятно, даже способно изменить экспериментально измеряемый ζ-потенциал ЗНЧ с типичных для них –50…–20 мВ на значительные положительные значения. Необходимые для цитотоксичности концентрации перезаряженных частиц уже могут быть достигнуты при общей концентрации ЗНЧ в тканях порядка 100 мг/л.

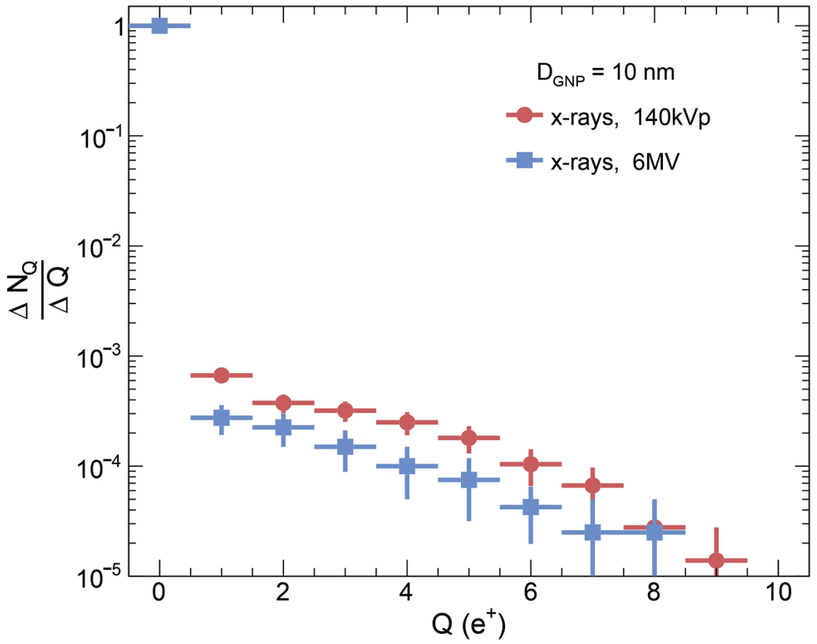


Рисунок 2. Распределения зарядов, приобретенных в результате процессов, индуцированных γ-излучением со спектрами 140 кВ и 6 МВ для золотой наночастицы диаметром 10 нм

Результаты опубликованы:

1. Азаркин, М. Ю. Влияние ионизирующего излучения на электростатические свойства золотых наночастиц. / М. Ю. Азаркин, М. Р. Киракосян // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2025. – Т. 122. – № 9–10. – С. 538–544. – DOI 10.7868/S3034576625110044.

Отделение ядерной физики и астрофизики

Фотоинактивация коронавируса SARS-CoV-2 ультрафиолетовым излучением UVA-диапазона

И. Н. Завестовская, А. А. Фроня, М. С. Григорьева, И. М. Тупицын, Е. А. Чешев, А. Л. Коромыслов

Определены режимы и механизмы фотоинактивации коронавируса SARS-CoV-2 ультрафиолетовым излучением UVA диапазона, безопасного для человека. Выявлена как меньшая чувствительность SARS-CoV-2 на длинах волн 389, 391 нм, по сравнению с 343, 371, 401 нм, так и более высокая доза для достижения 2,0-Log эффекта фотоинактивации. Выявленная фрагментация РНК SARS-CoV-2 указывает на то, что механизм инактивации вирусов под действием UVA-излучения связан с нарушением целостности РНК.

Излучение UV-диапазона обладает выраженным обеззараживающим эффектом. Известно, что поглощение нуклеиновых кислот в этих спектральных областях очень слабое, поэтому прямое повреждение должно практически отсутствовать. Непосредственно в отношении SARS-CoV-2 экспериментально показано, что вирус обладает наибольшей чувствительностью к UV-излучению в диапазоне UVC-250…285 нм. Механизмы инактивации коронавирусов излучением диапазонов UVA и UVB мало изучены. Наблюдаемый экспериментально ингибирующий эффект, оказываемый UVA- и UVB-излучением на РНК-геном SARS-CoV-2, результат крайне важный для объяснения механизма инактивации и дальнейшего практического применения.

В представленной работе проведены эксперименты по облучению вирус-клеточных систем SARS-CoV-2 излучением UVA- диапазона. Исследования на вирус-клеточных системах производилось на базе референс-центра по коронавирусной инфекции НИЦЭМ им. Н. Ф. Гамалеи в «красной зоне» с использованием оборудования и методик, разработанных в ФИАН. В рамках работы определены режимы и механизмы фотоинактивации коронавируса SARS-CoV-2 ультрафиолетовым излучением UVA-диапазона. Получены спектральные зависимости доз, необходимых для фотоинактивации коронавируса SARS-CoV-2 при облучении светодиодами 340…405 нм (Рисунок 1).

Впервые установлено, что механизм инактивации вирусов под действием UVA-излучения связан с нарушением целостности РНК. Выявлена фрагментация РНК SARS-CoV-2 и продемонстрировано увеличение значения порогового цикла для фрагментов при воздействии ультрафиолетового излучения с длиной волны 389 нм (Рисунок 2), что свидетельствует об уменьшении эффективности амплификации целевого продукта, и как следствие, фрагментации (частичное разрушение) РНК.

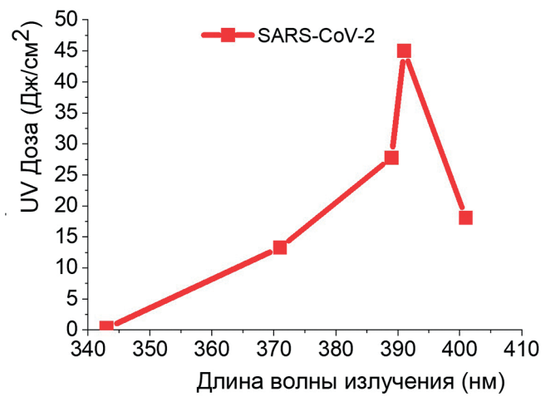


Рисунок 1. Зависимость дозы от длины волны для достижения степени инактивации 2 (в логарифмической шкале) для вируса SARS-CoV-2. Исходный титр составил – LgTCID50/мл – 5

Значимость полученных результатов обусловлена тем, что пандемия SARS-CoV-2 показала острую необходимость в разработке методов дезинфекции различных поверхностей, которые применимы в общественных местах, закрытых помещениях, в том числе в «красных зонах» медицинских учреждений, и в присутствии людей. Таким образом, проведенные исследования, во-первых, показывают чувствительность коронавирусов к излучению UVA-диапазона, с одной стороны, во-вторых, показана качественная схожесть спектральной чувствительности с бычьим коронавирусом, что дает основание предполагать возможность применения безопасного UVA-излучения в отношении всех будущих схожих РНК-вирусов. А благодаря коммерческой доступности светодиодов, полученные спектральные зависимости позволят заложить основы создания персонализированных приборов дезинфекциии их использования в местах с высокой проходимостью.

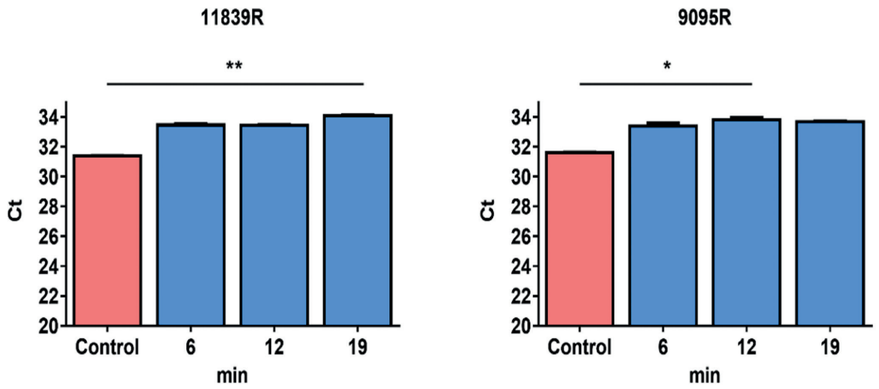


*Рисунок 2. Анализ значений Ct полученных с использованием метода ПЦР для фрагментов длиной 9095 и 11839 нуклеотидов. Показаны средние значения ± SEM для трех временных точек облучения. Kruskal–Wallis ANOVA test: *p < 0.05, **p < 0.01*

Результаты опубликованы:

1. Фотоинактивация коронавируса SARS-CoV-2 ультрафиолетовым излучением UVA диапазона. / И. Н. Завестовская, А. А. Фроня, И. М. Тупицын, [и др.]. // Квантовая электроника. – 2025. – Т. 55. – № 6. – С. 396–400. – DOI 10.3103/S1068335625603668.

Рождение протонов, дейтронов и трития в аргон-ядерных взаимодействиях при энергии 3.2 A ГэВ

А. Г. Багдатова, М. В. Белов, М. В. Завертяев, В. А. Козлов, П. А. Теремков, В. С. Цхай

Приведены результаты по анализу экспериментальных данных по рождению протонов, дейтронов и трития в аргон-ядерных взаимодействиях при энергии 3.2 A ГэВ, проведены сравнения с предсказаниями DCM-SMM и PHQMD моделей и результатами других экспериментов. Исследования выполнены в рамках Эксперимента BM@N.

Эксперимент BM@N является первым, получившим данные, экспериментом, проводимым в рамках мегапроекта NICA. Экспериментальные данные были получены во взаимодействиях ионов аргона с твердотельными мишенями (C, Al, Cu, Sn, Pb).

Полное описание спектромера BM@N опубликовано в [2].

Времяпролетная методика позволила определить тип частиц как статистически значимые пики в распределении по квадрату инвариантной массы (Рисунок 1).

Получены распределения по поперечной массе и средняя кинетическая энергия в зависимости от быстроты и массы рожденных частиц. Установлено, что средняя кинетическая энергия линейно зависит от массы частиц. Анализ данных выполнен в рамках модели Взрывной Волны (Рисунок 2).

Отношение выходов дейтонов к протонам Rdp растет для случая периферических столкновений и выполняется для случаев центральных столкновений. Это указывает на насыщение плотности нуклонов при температуре замерзания. Величина энтропии на нуклон составляет 8, что хорошо соответствует зависимости этой величины от энергии, установленной в других экспериментах.

Результат, полученный в эксперименте BM@N по измерению параметров вымерзания (Ткин и $<\beta>$), приведен на Рисунке 3 в сравнении с аналогичными результатами других экспериментов.

При центральном столкновении Ar+C скорость $<\beta>$ сопоставима с нулем. В этом случае столкновение таких малых систем может рассматриваться как суперпозиция независимых нуклон-нуклонных столкновений. Столкновение более тяжелых систем (Ar+Al, Cu, Sn, Pb), плотность частиц и перерассеяние в области столкновения выше, что приводит к росту скорости $<\beta>$.

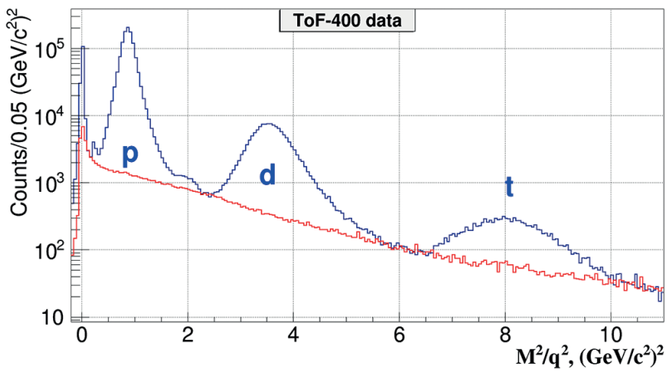


Рисунок 1. Идентификация типа частиц, протонов, дейтонов и трития с помощью времяпролетной методики

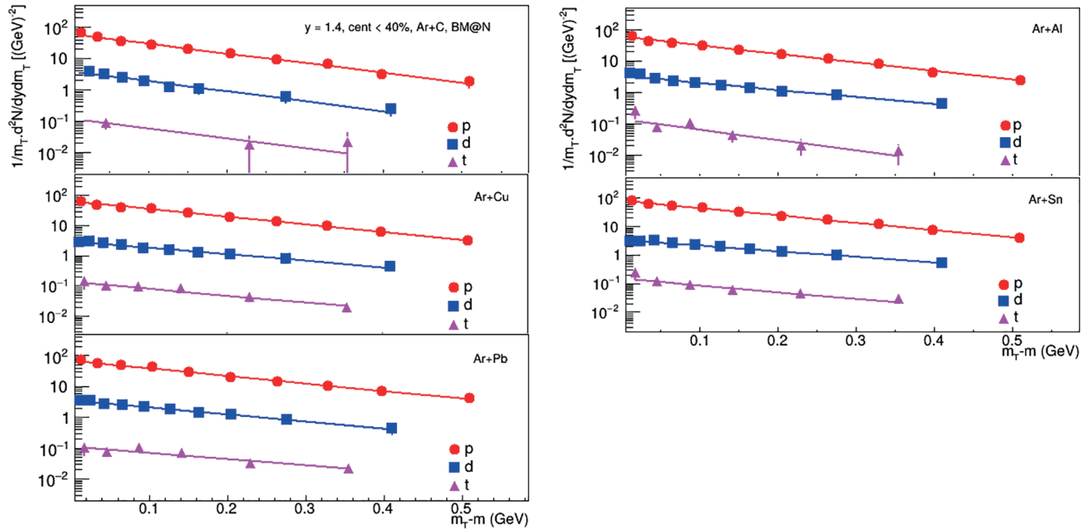


Рисунок 2. Сечение рождения протонов, дейтронов и трития в зависимости от поперечной массы при взаимодействии ионов аргона с мишенями (C, Al, Cu, Sn, Pb)

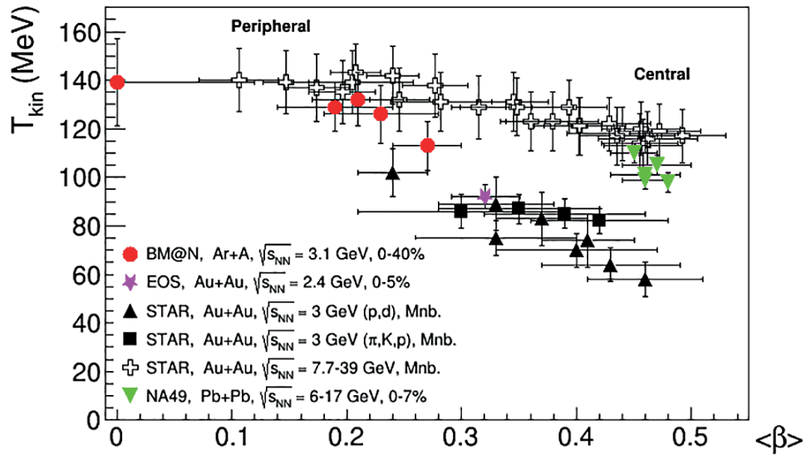


Рисунок 3. Зависимость параметров «вымерзания ($T_{кин}$ и $<\beta>$)», полученных в различных экспериментах

Результаты опубликованы:

1. Production of protons, deuterons and tritons in argon-nucleus interactions at 3,2 A GeV. / The BM@N collaboration, S. Afanasiev, G. Agakishiev, E. Aleksandrov, [et al.]. // Journal of High Energy Physics. – 2025. – Vol. 2025. – Iss. 8. – Art. ID 95. – 36 pp. – DOI 10.1007/JHEP08(2025)095. – arXiv:2504.02759.
2. The BM@N spectrometer at the NICA accelerator complex. / The BM@N collaboration, S. Afanasiev, G. Agakishiev, E. Aleksandrov, [et al.]. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2024. – Vol. 1065. – Art. ID. 169532. – 34 pp. – DOI 10.1016/j.nima.2024.169532.

Усовершенствование модели квазиупругого интегрального сечения рассеяния нейтрино на нуклонах и ядрах в программном пакете Geant4

А. В. Багуля, В. М. Гришин, В. А. Рябов

Впервые сечения квазиупругого рассеяния нейтрино и антинейтрино на нуклонах были промоделированы в рамках программного пакета Geant4. Показано, что использование эмпирической параметризации электрических и магнитных форм-факторов нуклонов позволяет улучшить точность статистического описания экспериментальных данных для интегральных сечений квазиупругого рассеяния нейтрино на нуклоне.

Работающие и планируемые нейтринные эксперименты для исследования физики за рамками Стандартной Модели требуют включения моделирования взаимодействия нейтрино с электронами и ядрами. Исследование квазиупругих реакций и их парциальных вкладов в полное нейтрино-ядерные сечение имеет большое значение для точного определения значений параметров нейтринных осцилляций в исследованиях с пучками мюонных нейтрино с энергиями в диапазоне нескольких ГэВ как в экспериментах на большой пролетной базе (long-baseline) MINOS/MINOS+, NOvA, T2K, так и в короткобазовых экспериментах (short-baseline) MiniBooNE. Это также важно и для нейтринных экспериментов следующего поколения DUNE, Hyper-Kamiokande, потенциал которых определяет горизонты поиска новой физики в нейтринном секторе Стандартной модели.

В настоящее время доступно несколько программных пакетов, описывающих генерацию квазиупругих нейтринных взаимодействий, например Fluka, GENIE, NEUT или GiBUU. Но они позволяют моделировать взаимодействия нейтрино с веществом без моделирования процессов генерации нейтрино. Такая возможность имеется у программного пакета Geant4, предназначенного для моделирования прохождения проникающего излучения через материалы, организованные в сложные геометрические конструкции.

Преимуществом включения нейтринных взаимодействий в программный пакет Geant4 является возможность проводить не фрагментарное, а полномасштабное моделирование распространения нейтрино от точки генерации до точки взаимодействия.

В рамках Geant4 было улучшено [1] описание интегральных квазиупругих сечений рассеяния нейтрино/антинейтрино на нуклонах. Были уточнены соотношения параметризации для форм-факторов нуклонов и использована более точная величина аксиальной массы.

Электрический и магнитный форм-факторы нуклонов параметризованы в форме:

$$G^N_{E,M} = \frac{1 + \sum_{k=1}^{n_1} a_k \zeta^k}{1 + \sum_{k=1}^{n_2} b_k \zeta^k}, \zeta = \frac{Q^2}{4M},$$

где $q^2 = -Q^2$ — квадрат 4-вектора передачи энергии-импульса, M — масса нуклона, $n_1 \sim n_2 \leq 4$, а коэффициенты a_k и b_k фитируются экспериментальными данными. Для аксиального и псевдоскалярного форм-факторов используется дипольное представление:

$$G_A(Q^2) = \frac{-g_A}{(1 + Q^2/M_A^2)^2},$$

$$G_P(Q^2) = \frac{2M^2}{m_\pi^2 + Q^2} G_A(Q^2),$$

где m_π — масса пиона, M_A=1,0282 GeV, $g_A = -1{,}267$.

На Рисунке 1 показаны сечения квазиупругого рассеяния мюонного нейтрино на нейтроне (a) и мюонного антинейтрино на протоне (b). Сплошные кривые показывают лучшее статистическое согласие с данными [1].

Использование эмпирической параметризации электрических и магнитных форм-факторов нуклонов позволило улучшить точность моделирования и анализа экспериментальных данных нейтринных экспериментов. Модель обсуждается для включения в программный пакет Geant4.

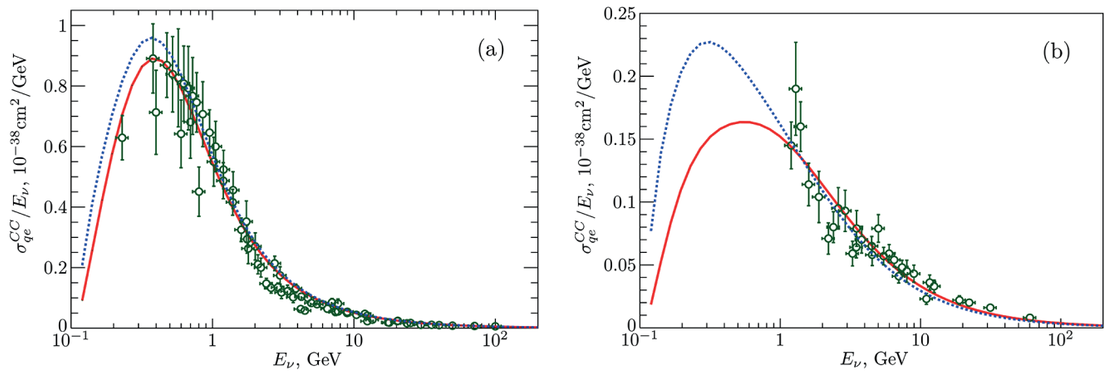


Рисунок 1. Сечения квазиупругого рассеяния: (a) мюонного нейтрино на нейтроне; (b) мюонного антинейтрино на протоне. Сплошная кривая — уточненный расчет [1], пунктирная — результат Geant4. Открытые кружки — компиляция экспериментальных данных [1]

Результаты опубликованы:

1. Bagulya, A. V. Integral cross sections of quasi-elastic scattering of neutrinos on nucleons. / A. V. Bagulya, V. M. Grichine, V. A. Ryabov. // Technical Physics Letters. – 2025. – Vol. 51. – Iss. 10. – P. 66-69. – DOI 10.61011/TPL.2025.10.62119.20393.

Мюонографическое обнаружение неизвестных полостей на территории Спасо-Каменного Преображенского монастыря

А. Б. Александров, П. А. Бабаев, А. А. Гиппиус, С. А. Горбунов, Н. С. Коновалова, Н. Г. Полухина, Н. И. Старков, Е. Н. Старкова, Д. М. Стрекалина, М. М. Чернявский, Т. В. Щедрина, Д. И. Зайнутдинов, С. Г. Васина, А. Е. Волков, Р. А. Воронков

Определены положения и размеры неизвестных ранее подземных полостей в Спасо-Каменном Преображенском монастыре на о. Каменном в Кубенском озере. Особый интерес представляют полости, обнаруженные под алтарём собора, одна из которых может быть местом захоронения в 1533 г. митрополита Варлаама. Результаты являются обоснованием работ по восстановлению древнего объекта культурного наследия.

Неинвазивный метод мюонографии, анализирующий угловые распределения проникающих атмосферных мюонов, позволяет обнаруживать аномалии плотности вещества и восстанавливать объёмные изображения скрытой внутренней структуры крупномасштабных природных и промышленных объектов на поверхности земли и под ней. Результатом мюонографического исследования территории древнего историко-архитектурного комплекса Спасо-Каменного Преображенского монастыря на острове Каменном в Кубенском озере (Вологодская область) стало определение положения и размеров нескольких неизвестных ранее подземных полостей. Наибольший интерес представляют полости, обнаруженные на глубине 1.5…2.0 м под алтарем взорванного в 1937 г. Преображенского собора (Рисунок 1). Одна из найденных полостей, согласно летописям, может быть местом захоронения почившего в 1533 году опального предстоятеля Русской Православной Церкви митрополита Варлаама. Полученные результаты являются экспериментальным обоснованием для организации полномасштабных археологических изысканий и реализации мероприятий по восстановлению разрушенного собора.

На примере успешно реализованного мюонографического эксперимента в Спасо-Каменном Преображенском монастыре в полной мере продемонстрированы возможности мюонографии как уникального метода исследования структуры крупных объектов, получены новые данные о скрытых особенностях внутренней структуры зданий и территории монастыря. Стоит отметить, что мюонография историко-археологических объектов, исключающая проведение раскопок и нарушение целостности памятников, имеет широкие перспективы внедрения для изучения охраняемых объектов культурного наследия.

Нарушения структуры различных крупных объектов, связанных с жизнедеятельностью человека, могут являться причиной природных и техногенных катастроф. Авторские мюонографические методические подходы и технические решения с использованием эмульсионных трековых детекторов открывают широкие перспективы для исследований в области ядерной энергетики, вулканологии, дефектоскопии, геологии, археологии и других областях на основе эффективного, экономичного и экологически безопасного метода мюонографии, используемого, в частности, для создания систем мониторинга проблемных объектов для минимизации последствий возможных природных и техногенных катастроф для населения, инфраструктуры и окружающей среды. Своевременное обнаружение скрытых проблемных зон даёт возможность предотвратить катастрофическое развитие ситуации и обеспечить безопасность людей и экономию материальных ресурсов. Развитие инновационной мюонографии – основа для методик обнаружения проблемных зон и обеспечения безопасности социальных агломераций.

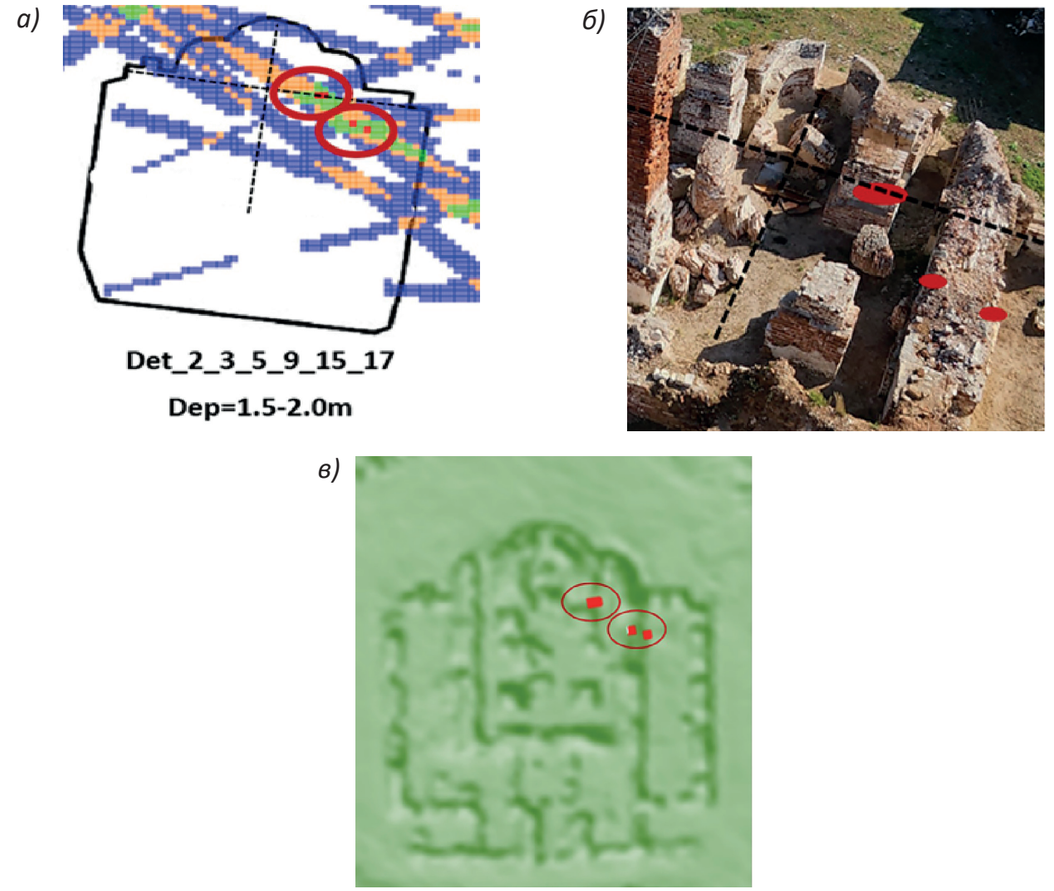


Рисунок 1. а) полости под алтарём и стеной собора на глубине 1,5…2,0 м по данным пересечений показаний нескольких детекторов о направлениях максимумов потоков атмосферных мюонов; б) положение полостей на фотографии руин Преображенского собора; в) положение полостей на авторском ортофотоплане руин собора

Результаты опубликованы:

1. Muography of geometrically complex cultural heritage sites: challenges and solutions on the example of searching for hidden anomalies on the ancient monastery territory in the Vologda Region. / A. Alexandrov, P. Babaev, M. Chernyavsky, [et al.]. // Physics of Atomic Nuclei. – 2025. – Vol. 88. – No. 4. – pp. 615–631. – DOI 10.1134/S106377882570053X.

Происхождение излучения в окрестности сверхмассивной черной дыры галактики NGC 1275

В. Г. Синицина, В. Ю. Синицина

Впервые, при сверхвысоких энергиях, прослежена двадцатилетняя эволюция светимости и спектральных характеристик содержащего массивную черную дыру ядра галактики NGC 1275 из Скопления галактик Персея. Определены ключевые изменения морфологии джетов, приведшие к глобальному росту светимости NGC 1275. Локализован источник γ-излучения в ядре NGC 1275 относительно черной дыры. Обнаружены протяженные γ-яркие области, указывающие на взаимодействие ускоренных в джетах космических лучей с газом скопления.

Активные ядра галактик (АГЯ) – одни из ярчайших космических объектов, а их изучение служит пониманию целого ряда высокоэнергичных процессов во Вселенной, включая генерацию и ускорение релятивистских частиц. Черные дыры в центрах активных галактик являются мощными источниками излучения в широком диапазоне от радиочастот до γ-лучей сверхвысоких энергий, обладающих быстрой переменностью. Свойства АГЯ указывают на то, что генерация и ускорение частиц происходят в небольших областях в результате выброса из окрестностей массивной черной дыры релятивистских струй плазмы, называемых джетами. Тем не менее, вопрос о механизмах ускорения, процессах формирования джетов, а также причины быстрой переменности до сих пор остается открытым. Скопления галактик характеризуются повышенной плотностью межзвездной среды. Благодаря нахождению в их центре активных галактических ядер эти объекты рассматриваются в качестве кандидатов в источники γ-лучей сверхвысоких энергий, излучаемых космическими лучами, ускоренными на крупномасштабных ударных волнах или галактическим ветром, или активными ядрами галактик.

NGC 1275 – доминантная галактика в Скоплении галактик в созвездии Персея. Активное галактическое ядро NGC 1275, содержащее сверхмассивную черную дыру, известно как мощный источник радио- и рентгеновского излучения. Благодаря расположению NGC 1275 в центре скопления этот объект является прототипом активной галактики, взаимодействующей с межзвездным газом скопления посредством релятивистских струй, выбрасываемых центральной черной дырой. Наблюдения NGC 1275 и его окрестностей в широком диапазоне энергий позволяют исследовать как активность черной дыры внутри АГЯ, так и взаимодействие галактики с газом скопления.

В эксперименте ШАЛОН, впервые, при сверхвысоких энергиях 0.8...100 ТэВ, получены уникальные данные о двадцатилетней эволюции светимости и спектральных характеристик АГЯ NGC 1275 и его окрестностей. Обнаружено, что потоки излучения во всем диапазоне от радио- до γ-лучей сверхвысоких энергий, после глобального спада, начали расти в период появления новых структур релятивистского джета, видимых в радиодиапазоне (Рисунок 1) [1–3]. При этом изменения потоков γ-излучения как глобальные так и кратковременные, преимущественно, опережают вариации рентгеновского и радиоизлучения, и связаны с появлением особенностей джета. Локализовано положение источника γ-излучения с энергией выше 0.8 ТэВ в ядре NGC 1275 относительно черной дыры (Рисунок 2, слева) [1].

Показано, что изменение спектральных характеристик в период роста активности, обусловлено вбросом высокоэнергичных электронов (Рисунки 1 и 2, справа). В результате долговременного мониторинга определены ключевые изменения морфологии релятивистских джетов, являющиеся источником глобального роста светимости ядра галактики NGC 1275 во всем диапазоне электромагнитного спектра. Обнаружены протяженные γ-яркие области (Рисунок 2, слева), расположенные к юго-востоку и северо-западу от ядра NGC 1275 вне симметричных радиоособенностей и коррелирующие с рентгеновскими структурами, что подтверждает взаимодействие выбросов, генерируемых черной дырой галактики NGC 1275 с газом скопления, и указывает на происхождение части γ-излучения в результате взаимодействия космических лучей сверхвысоких энергий с межзвездным газом внутри Скопления Персея.

Полученные результаты являются доказательством эффективного ускорения релятивистских частиц в джетах, формирующих излучение АГЯ, подобных NGC 1275, в широком диапазоне электромагнитного спектра как в непосредственной близости к центральной черной дыре, так и в областях, простирающихся в межзвездную среду вместе с распространением струй плазмы.

←———

Рисунок 1. Кривые блеска NGC 1275 в широком диапазоне энергий [1-3]. Красные и желтые треугольники – данные ШАЛОН

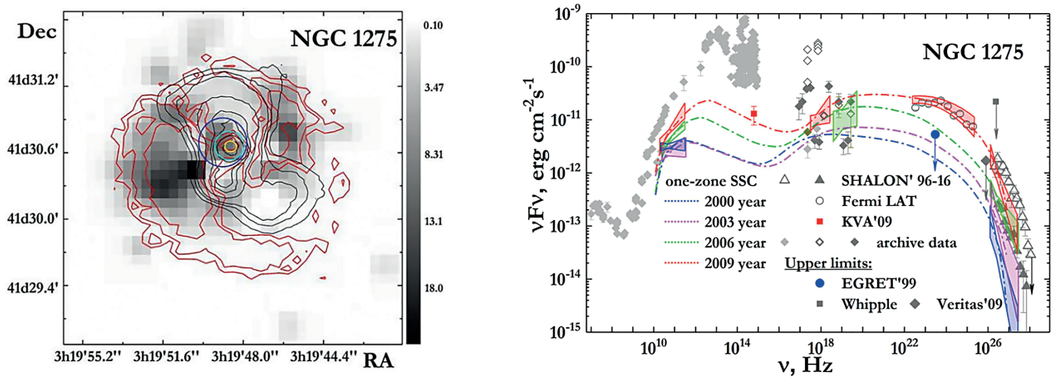


Рисунок 2. Слева – изображение NGC 1275: Серая шкала – данные эксперимента ШАЛОН при энергиях >0.8 ТэВ. Красные линии – данные Chandra в рентгене. Черные линии – радиоструктура VLA при 332 MHz. Справа – Спектральное энергетическое распределение излучения NGC 1275. ▲ Δ – данные ШАЛОН. Красные, зеленые, розовые и синие области и линии: экспериментальные данные и модели излучения в разные периоды активности NGC 1275 [1,2]

Результаты опубликованы:

1. Sinitsyna, V. G. Multiwavelength Long-term Studies of Radio Galaxy NGC 1275. / V. G. Sinitsyna, V. Y. Sinitsyna. // The Astrophysical Journal. – 2025. – Vol. 985. – Iss. 1. – Art. ID 39. – 17 pp. – DOI 10.3847/1538-4357/adc112.
2. Sinitsyna, V. G. Evolution of Multi-Wavelength Emission From NGC 1275 Over the Decade of Activity Growth. / V. G. Sinitsyna, V. Y. Sinitsyna. //Astronomische Nachrichten. – 2025. – Vol. 346. – Iss. 7–8. – Art. ID e70020. – 5 pp. – DOI 10.1002/asna.70020.
3. Sinitsyna, V. G. Multiwavelength Activity of NGC 1275 Nucleus / V. G. Sinitsyna, V. Y. Sinitsyna, S. S. Borisov. // Astronomische Nachrichten. – 2025. – Vol. 346. – Iss. 7–8. – Art. ID e70023. – 5 pp. – DOI 10.1002/asna.70023.

МГД-моделирование коротирующих областей взаимодействия в гелиосфере для исследования распространения галактических космических лучей

М. Б. Крайнев, М. С. Калинин

Двумя независимыми научными группами (российской и китайской) построены МГД-модели коротирующей области взаимодействия (КОВ) разноскоростных потоков солнечного ветра. МГД-модели КОВ сконструированы для двух вариантов граничных условий, учитывающих 1) все составляющие солнечных магнитных полей и 2) только дипольную составляющую [1]. Рассмотрен процесс формирования и эволюции КОВ от основания гелиосферы (r = 0.1 а. е.) до r = 20…30 а. е.

Работа выполнена совместной научной группой Лаборатории физики Солнца и космических лучей ОЯФА, Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) и Шаньдунского института передовых технологий (SDIAT, SIAT CAS; г. Цзинань, Шаньдун, КНР).

В работе [1] в развитие предыдущих совместных работ [Крайнев, М. Б., et al. (2023). Солнечно-земная физика. 9(1), 10–21; DOI 10.12737/szf-91202302 и Kalinin, M. S., et al. (2023). Geomagnetism and Aeronomy. 63(5), 536-546; DOI 10.31857/S0016794023600606] показано, что эволюция КОВ с расстоянием может приводить к существенным эффектам в гелиосферных характеристиках, важным как для рекуррентных (с периодом вращения Солнца, ≈27 дней), так и для долговременных вариаций интенсивности галактических космических лучей (ГКЛ).

Модели КОВ различались, во-первых, степенью детальности СМП, лежащих в основе моделирования, и, во-вторых, исходными данными СМП, пакетами программ и деталями алгоритма, используемыми для моделирования КОВ российской и китайской группами.

Подробно обсуждается выбор периода моделирования, моделей фотосферного магнитного поля, системы МГД-уравнений, методики формулирования граничных условий и технических средств решения системы российской группы.

На Рисунке 1 образование и эволюция КОВ до расстояний 7 а.е. по результатам российской группы сравнивается для сложной и более простой моделей СМП. Видно, что уже на таких небольших расстояниях для сложной модели гелиосферный токовый слой (ГТС, важная особенность ГМП, особенно для распространения ГКЛ) становится изломанным, да и для простой модели на нее возникают особенности. По-видимому, это обусловлено недостатками схемы решения МГД-системы.

Рисунок 2 иллюстрирует для моделей разной сложности СМП образование и эволюцию КОВ до больших расстояний по результатам китайской группы. Видно, что для сложной модели происходит сильное уплощение ГТС, возможно, тоже по техническим причинам. Однако простая модель демонстрирует значительно бóльшую устойчивость, что делает ее более подходящей для моделирования поведения в КОВ галактических космических лучей.

Таким образом, как и ожидалось, общая картина распределения всех гелиосферных характеристик для модели детального СМП значительно более сложная, чем для

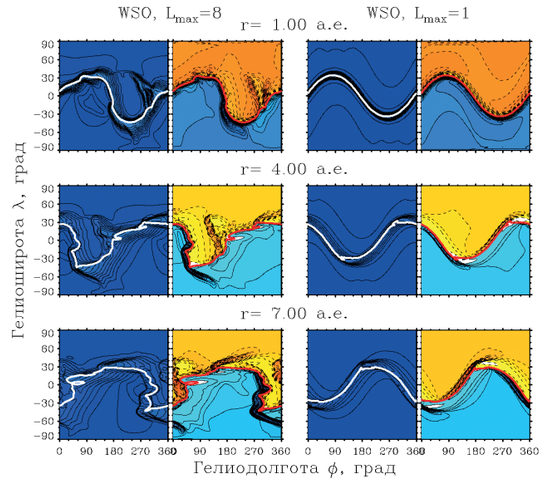


Рисунок 1. Образование и эволюция с расстоянием КОВ, рассчитанной российской группой при использовании двух моделей фотосферного магнитного поля по данным WSO для КО 2066 с учетом гармоник до L_{max} = 8 (слева) и до L_{max} = 1 (справа)

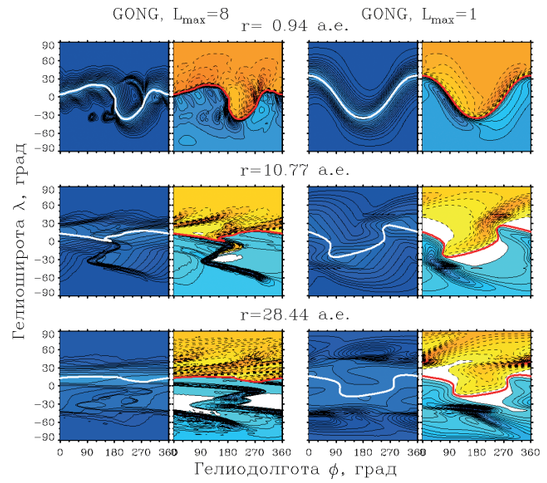


Рисунок 2. Образование и эволюция с расстоянием КОВ рассчитанной китайской группой, при использовании двух моделей фотосферного магнитного поля по данным GONG для КО 2066 с учетом гармоник до L_{max}=8 (левые панели) и до L_{max}=1 (правые панели)

дипольного. Однако при детальном рассмотрении можно выделить как схожие, так и специфические черты.

Что касается особенностей моделей китайской группы по сравнению с российскими моделями основную роль могут играть три различия в постановке граничных условий на внутренней границе гелиосферы:

1) различная связь между скоростью V и плотностью N СВ (VN = const и $V^3N \approx$ const) на сфере r = 0.1 а.е. в моделях российской и китайской групп, соответственно;

2) использование на 0.1 а.е. инварианта T/V = const и T/V^2 = const в моделях российской и китайской групп, соответственно;

3) использование существенно разных величин модуля радиальной напряженности магнитного поля.

Проанализированы различия в результатах моделирования КОВ российской и китайской группами и намечены пути совместной разработки моделей КОВ и их влияния на ГКЛ.

Результаты опубликованы:

1. МГД-моделирование коротирующих областей взаимодействия в гелиосфере с разными граничными условиями и разными пакетами. / Д. А. Павлов, М. Б. Крайнев, М. С. Калинин, [и др.]. // Солнечно-земная физика. – 2025. – Т. 11, № 4. – С. 114–126. – DOI 10.12737/szf-114202511.

Лаборатория физики Солнца и космических лучей им. академика С. Н. Вернова (ДНС)

Низкотемпературный рост частиц размером менее 10 нм при конденсации нитрата аммония

В. С. Махмутов, М. В. Филиппов

В эксперименте CLOUD (CERN) впервые установлено, что процесс конденсации паров азотной кислоты и аммиака с образованием химически активного нитрата аммония ($NH_4 \cdot NO_3$) характеризуется наличием критического (активационного) диаметра частиц, который в атмосферных условиях может составлять всего 1 нм. А величина скорости роста частиц аэрозолей при этом может быть чрезвычайно высокой, превышая 1000 нм/ч при температуре выше 263 К.

Экспериментальные данные, использованные в работе, получены в международном эксперименте CLOUD/PS215 в ЦЕРНе (CERN, Женева). Исследования проводятся в камере CLOUD, предназначенной для моделирования процессов образования и роста атмосферных аэрозольных частиц при строго контролируемых условиях температуры, давления и прецизионного химического состава газовой смеси.

В камере создавалась газовая смесь, содержащая аммиак (NH_3), азотную кислоту (HNO_3) и небольшие количества серной кислоты (H_2SO_4), которая использовалась для инициирования нуклеации частиц. Основной исследуемый процесс заключался в образовании нитрата аммония (NH_4NO_3) в результате реакции аммиака с азотной кислотой и последующей конденсации этого соединения на поверхности аэрозольных частиц.

Эксперименты проводились при температурах 263…278 К, что соответствует условиям холодных областей земной тропосферы. Концентрации исследуемых газов в камере составляли примерно 1…3 pbv для аммиака (1 ppbv соответствует одной молекуле NH_3 на 10^9 всех молекул) и 10…1000 pptv для азотной кислоты (1 pptv – одна молекула HNO_3 на 10^{12} молекул газа в смеси).

В ходе эксперимента измерялись:

– минимальный размер частиц (activation diameter), при котором начинается быстрый рост кластеров молекул;

– скорость роста частиц (growth rate);

– зависимость этих параметров от концентраций NH_3, HNO_3 и температуры.

Установлено, что совместная конденсация паров азотной кислоты и аммиака с образованием нитрата аммония демонстрирует переход от полностью полулетучего поведения при относительно теплых условиях (273 К и выше, что характерно для сезонного планетарного пограничного слоя атмосферы) к практически нелетучему и необратимому поглощению ограничивающего пара при низких температурах (значительно ниже 273 К, что типично для верхней тропосферы и, в отдельных случаях, для зимнего приземного слоя).

Это приводит к смене режима системы — от равновесного состояния, регулируемого полулетучими соединениями (как это традиционно интерпретируется), к режиму, управляемому необратимым реактивным поглощением даже на субнанометровых частицах. Процесс характеризуется наличием критического (активационного) диаметра частиц, который при типичных атмосферных концентрациях может составлять всего 1 нм. При этом последующие скорости роста частиц могут быть чрезвычайно высокими, превышая 1000 нм/ч.

Основной вывод работы состоит в том, что нитрат аммония (NH_4NO_3) может играть гораздо более важную роль в росте ультрамалых атмосферных аэрозольных частиц, чем считалось ранее.

Показано, что при низких температурах конденсация аммиака (NH_3) и азотной кислоты (HNO_3) на поверхности частиц становится практически необратимой, так как один из реагентов выступает лимитирующим. В результате образующийся нитрат аммония эффективно накапливается на частицах и способствует их быстрому росту уже начиная с размеров около 1…2 нм.

Это означает, что в холодных областях земной атмосферы, особенно в верхней тропосфере (например, в азиатском аэрозольном слое тропопаузы), конденсация нитрата аммония может быть важным механизмом роста новых частиц. Такой процесс позволяет частицам быстрее достигать размеров, при которых они способны участвовать в формировании облаков в атмосфере.

Кроме того, по мере снижения выбросов серы роль нитратных аэрозолей в атмосфере будет возрастать. Поэтому учет этого механизма роста частиц необходим для более точного описания процессов образования аэрозолей, облачных ядер и климатических процессов в атмосферных моделях.

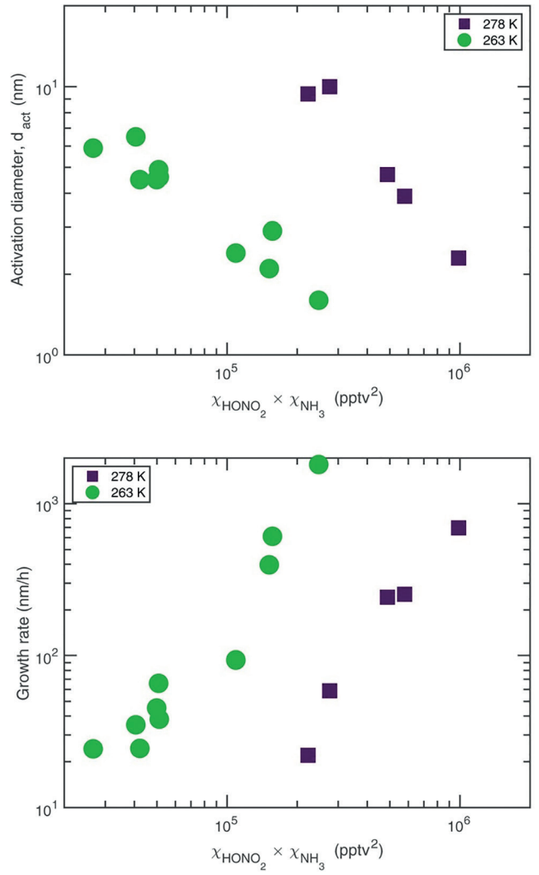


Рисунок 1. Активационный диаметр (a) и скорость роста активированных частиц (b) по данным эксперимента CLOUD

Результаты опубликованы:

1. Low temperature growth of sub 10 nm particles by ammonium nitrate condensation. / N. M. Donahue, …, V. Makhmutov, M. Philippov, [et al.]. // Environmental Science: Atmospheres. – 2025. – Vol. 5. – Iss. 1. – P. 67-81. – DOI 10.1039/D4EA00117F

Обнаружение возрастания энерговыделения мюонной компоненты космических лучей в центральной области ШАЛ с использованием сцинтилляционного годоскопа на ТШВНС

А. Л. Щепетов, Л. И. Вильданова, С. А. Мамина, В. А. Рябов, В. В. Жуков

С введением в эксплуатацию мюонного годоскопа в подземном помещении Тянь-Шаньской высокогорной научной станции ФИАН (ТШВНС) проведено измерение потока мюонов космических лучей во время совместной работы подземного годоскопа и ливневой установки. Обнаружено, что рост энерговыделения мюонной компоненты в больших широких атмосферных ливнях (ШАЛ) с размером N_e выше $10^{6.5}$–$10^{6.7}$ связано с увеличением количества мюонов, а не их средней энергией.

На ТШВНС было проведено измерение потока мюонов космических лучей с использованием сцинтилляционного годоскопа и сопоставление с данными ливневой установки. Поскольку суммарное количество мюонов в ШАЛ зависит от его размера N_e (то есть первичной энергии E_0), а плотность мюонного потока уменьшается с расстоянием от оси ливня, корректность работы мюонного годоскопа и эффективность разработанной процедуры автоматического поиска сцинтилляционных импульсов протестировано на основе сравнения результатов, полученных в измерениях на подземном годоскопе, с характеристиками соответствующих ШАЛ.

Используя процедуру автоматизированного поиска коротких импульсных сигналов в годоскопе, мы идентифицировали $3.2{\cdot}10^5$ импульсов от прохождения мюонов. Для анализа использовались значения общего числа заряженных частиц в ливне и координаты его оси (x, y) в плоскости ливневой установки, которые определялись для всех зарегистрированных ливней. Координаты (x, y) используются для расчета расстояния R между осью ШАЛ и центром ливневой установки с расположенными непосредственно под ним подземным помещением и мюонным годоскопом.

Распределение усредненной амплитуды сцинтилляционного сигнала, полученного от детекторов мюонного годоскопа, в зависимости от среднего размера ШАЛ N_e и среднего расстояния до его оси R представлено на Рисунке 1. Как следует из рисунка, интенсивность регистрируемого в подземном годоскопе отклика на прохождение частиц мюонной компоненты ШАЛ очевидно коррелирует как со средним размером соответствующих ливней, так и расстоянием между годоскопом и их центральной областью, так что усредненная амплитуда сцинтилляций $\bar{A}$ систематически растет с увеличением N_e и падает с удалением от центра ливня. Такое поведение вполне естественно для потока мюонов в ШАЛ.

Интересно отметить, что резкое увеличение средней амплитуды сцинтилляционного сигнала $\bar{A}$ в событиях, относящихся к центральной области ШАЛ, R = 0–6 м, которое наблюдается на Рисунке 1 для больших ливней с Ne выше $10^{6.5}$–$10^{6.7}$, также подтверждает вывод об ускоренном росте мюонного потока в центре ШАЛ, который делался ранее на основе данных о множественности испарительных нейтронов, образуемых частицами мюонной компоненты ливней большого размера ($N_e > 10^6$). В первую очередь, рост энерговыделения мюонной компоненты в больших ШАЛ вызван именно увеличением количества мюонов, а не их средней энергией.

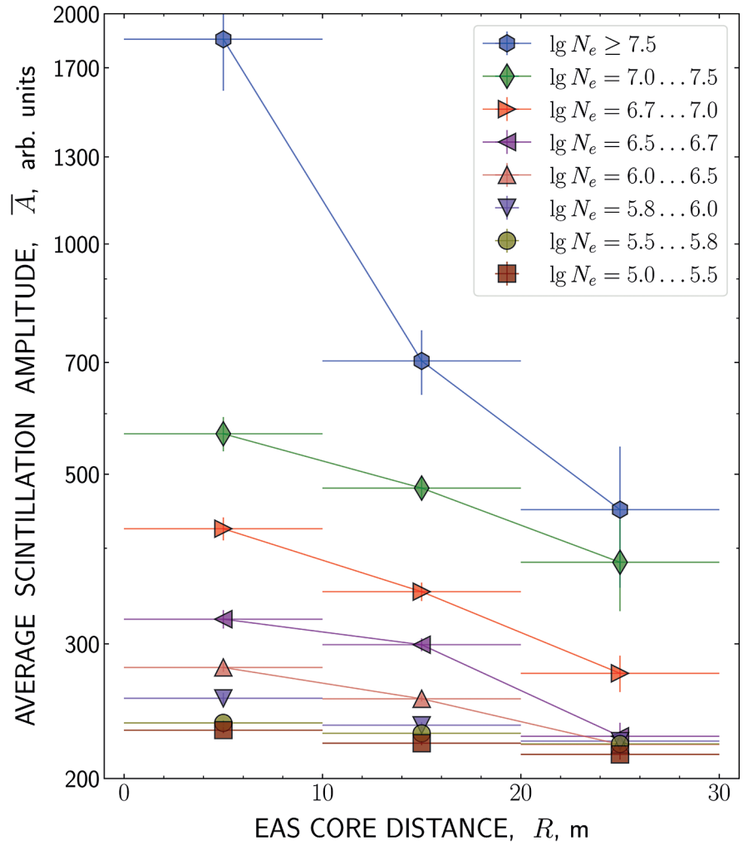


Рисунок 1. Распределение усредненной амплитуды сцинтилляционного сигнала, полученного от детекторов мюонного годоскопа, в зависимости от среднего размера ШАЛ N_e и среднего расстояния до его оси R

Результаты опубликованы:

1. The Scintillation Hodoscope for Measuring the Flux of Cosmic Ray Muons at the Tien Shan High Mountain Station / A. Shepetov, A. Baktoraz, O. Kalikulov, [et al.]. // Particles. – 2025. – Vol. 8. – Iss. 3. – Art. ID 73. – 16 pp. DOI 10.3390/particles8030073.
2. Сцинтилляционный годоскоп для исследования мюонной компоненты космических лучей на Тянь-Шаньской высокогорной станции. / А. Л. Щепетов, Л. И. Вильданова, Н. О. Ережеп, [и др.]. // Краткие сообщения по физике ФИАН. – 2025. – Т. 52. – № 10. – С. 3–10. – ISSN 0455-0595. – EDN YTLZQN.

Обнаружение сейсмогенных эффектов в вариациях УНЧ/ОНЧ-излучения в комплексном исследовании литосферно-ионосферных связей перед землетрясением магнитудой 6.1 в районе Северного Тянь-Шаня

А. Л. Щепетов, В. А. Рябов, В. В. Жуков

Комплексные наблюдения, проведенные 4 марта 2024 года на ТШВНС во время землетрясения с магнитудой M 6.1, позволили существенно расширить возможность интерпретации сейсмогенных аномалий. Показано, что наблюдаемые аномалии несут информацию о механических процессах, протекавших в литосфере в краткосрочный подготовительный период перед землетрясением.

Эпицентр землетрясения находился на расстоянии 12.2 км от комплекса геофизического мониторинга. Подготовка землетрясения была зафиксирована в режиме реального времени за восемь дней до главного толчка, когда на глубине 100 м от поверхности земли появилось характерное снижение потока гамма-излучения, что с высокой вероятностью указывало на приближающееся землетрясение. Помимо потока гамма-излучения, аномалии, связанные с подготовкой землетрясения, изучались в вариациях естественного электромагнитного поля Земли на очень низких частотах (ОНЧ) f = 7.5 кГц и f = 10.0 кГц и на ультранизких частотах (УНЧ) в диапазоне 0.001…20 Гц, а также в сдвиге доплеровской частоты (СДЧ) ионосферного сигнала. Схема размещения регистрирующей аппаратуры на ТШВНС представлена на Рисунке 1.

На Рисунке 2 проведено сравнение временны́х рядов по данным об интенсивности импульсов естественного электромагнитного поля Земли в диапазоне СНЧ, радиационного гамма-фона на глубине горных пород и доплеровского сдвига частоты ионосферного сигнала, зарегистрированных в период подготовки этого сейсмического события.

На Рисунке 2 отчетливо видна последовательность проявления возмущений, связанных с развитием сейсмических процессов: подавление нормальной суточной вариации в интенсивности электромагнитных сигналов СНЧ (21 февраля 2024 года), затем начало характерного понижения в потоке подповерхностного гамма-излучения (24 февраля 2024 года), а затем в аномалии в доплеровском сдвиге частоты (25 февраля 2024 года).

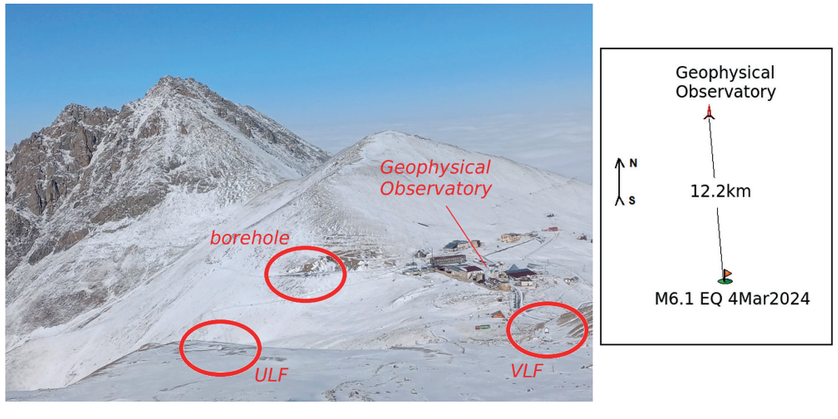


Рисунок 1. Слева – расположение регистрирующей аппаратуры на ТШВНС. Справа – схема взаимного расположения станции и эпицентра землетрясения магнитудой 6.1 4 марта 2024 года

После подавления суточного цикла электромагнитного поля (верхний график) интенсивность импульсов СНЧ достигает максимума накануне главного толчка. По-видимому, такое поведение поля отражает динамику процессов деформации и разрушения горных пород в очаге землетрясения. В свою очередь, вариация стрессовой нагрузки и объема порового пространства в массиве горных пород влияют на процесс эманации радона и его гамма-радиоактивных дочерних продуктов. Это проявляется в виде снижения интенсивности гамма-лучей (средний график). Следовательно, обнаруженные аномалии могут нести информацию о механических процессах, протекавших в литосфере в краткосрочный подготовительный период перед землетрясением. Наконец, распространение сейсмогенного возмущения до высот ионосферы, которое было обнаружено посредством доплеровского зондирования, можно объяснить в рамках гипотезы о литосферно-ионосферной связи. Этот процесс может быть инициирован изменениями в ионизации пограничного слоя атмосферы, которая зависит от скорости выделения радиоактивных газов из глубины горных пород на поверхность Земли.

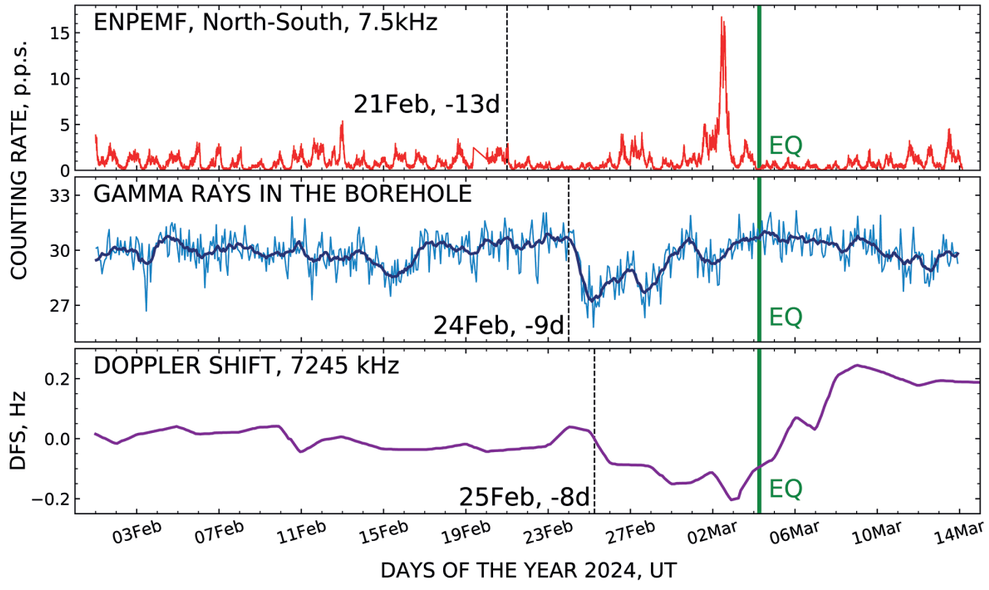


Рисунок 2. Взаимное сравнение временных рядов данных о естественном электромагнитном поле Земли в ОНЧ-диапазоне (f = 7.5 кГц), потока гамма-излучения под землей в скважине и доплеровского сигнала перед землетрясением 4 марта 2024 г. Момент землетрясения (EQ) обозначен на графиках сплошной вертикальной линией; пунктирные линии – последовательность возникновения аномального поведения распределений

Результаты опубликованы:

1. Seismogenic effects in variation of the ULF/VLF emission in a complex study of the lithosphere–ionosphere coupling before an M6.1 earthquake in the region of northern Tien Shan. / N. Salikhov, A. Shepetov, G. Pak, [et al.]. // Geosciences. – 2025. – Vol. 15. – Iss. 6. – Art. ID 203. – 17 pp. – DOI 10.3390/geosciences15060203.

Регистрация экстремально сильного Форбуш-понижения 1–10 июня 2025 года на детекторных установках Тянь-Шаньской станции космических лучей

А. Л. Щепетов, О. Н. Крякунова, В. А. Рябов, В. В. Жуков

Экстремальное Форбуш-понижение, начавшееся 1 июня 2025 года, одновременно наблюдалось на различных детекторных установках Тянь-Шаньской высокогорной научной станции космических лучей (ТШВНС): нейтронным супермонитором NM64, детекторами тепловых нейтронов и детекторами фонового жесткого гамма-излучения. Данные наблюдений впервые продемонстрировали возможность использования подобных приборов для обнаружения неоднородностей в потоке космических лучей (КЛ), вызванных крупными возмущениями в гелиосфере и магнитосфере, тем самым расширяя возможности экспериментального комплекса ТШВНС.

Форбуш-эффекты (ФЭ) являются наиболее разнообразными и многочисленными явлениями в вариациях космических лучей, измеряемых наземной сетью нейтронных мониторов и аппаратурой в космическом пространстве. В настоящее время принято наиболее полное определение ФЭ как изменения плотности и анизотропии космических лучей в крупномасштабных изменениях солнечного ветра. Изучение ФЭ дает ценную информацию о процессах, происходящих в межпланетной и околоземной среде, что делает эти задачи важными для прогнозирования прихода межпланетных возмущений в околоземное космическое пространство и его влияния на атмосферу и магнитосферу Земли. Особый интерес представляет изучение больших ФЭ, связанных с приходом к Земле крупных межпланетных возмущений.

Интенсивное возмущение гелиосферы, вызванное серией солнечных вспышек, произошедшее в конце мая 2025 года, проявилось в потоке галактических космических лучей как экстремально сильное Форбуш-понижение, которое началось 1 июня 2025 года и наблюдалось на всемирной сети нейтронного мониторинга. Вместе с интенсивностью космических лучей, регистрируемой стандартным нейтронным супермонитором типа NM64 на Тянь-Шаньской высокогорной станции космических лучей (3340 м над уровнем моря), влияние этого события было обнаружено как синхронное понижение скорости счета локального фона тепловых нейтронов и жесткого гамма-излучения с энергией порядка нескольких мегаэлектрон-вольт, которое также непрерывно отслеживается на станции (Рисунок 1).

Все детекторы продемонстрировали взаимное согласие в поведении темпов счета во время ФЭ. Хотя нейтронный супермонитор остается наиболее подходящим инструментом для прецизионного мониторинга потока космических лучей, ФЭ отчетливо проявились также и во временны́х рядах интенсивности нейтронов и гамма-излучения окружающей среды, где относительная величина эффекта, была вполне сопоставима с данными супермонитора.

Эти данные наблюдений демонстрируют возможность использования подобных приборов для обнаружения неоднородностей в потоке космических лучей, вызванных крупными возмущениями в гелиосфере и магнитосфере, тем самым расширяя возможности экспериментального комплекса ТШВНС.

Временны́е ряды интенсивности событий, генерируемых в Тянь-Шаньском нейтронном супермониторе с различной множественностью M в конце мая — начале июня 2025 года, показаны на Рисунке 2. Влияние Форбуш-понижения 1 июня 2025 года достаточно очевидно во всех этих распределениях, отражая влияние возмущения гелиосферы, связанного с солнечными вспышками 30–31 мая 2025 года, отдельно на компоненты космических лучей с различной энергией.

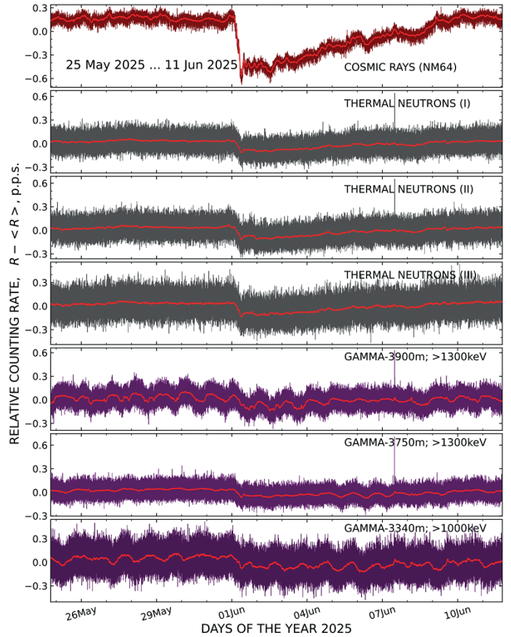


Рисунок 1. Синхронизированные временны́е ряды интенсивности космических лучей с жесткостью обрезания 5.9 ГВ по данным нейтронного супермонитора NM64 (верхний кадр) и фонового теплового нейтронного и гамма-излучения окружающей среды, измеренного на ТШВНС в конце мая – июне 2025 года (кадры 2–6 сверху)

Анализ временны́х рядов интенсивности событий рождения нейтронов с различной множественностью в Тянь-Шаньском нейтронном супермониторе, показал, что Форбуш-понижение 1 июня 2025 года оказало наибольшее влияние на поток адронов космических лучей в диапазоне энергий около (3...20) ГэВ. Систематическое отслеживание интенсивности событий взаимодействия таких адронов в нейтронном супермониторе можно рассматривать как способ эффективного обнаружения событий Форбуш-понижения с малыми амплитудами.

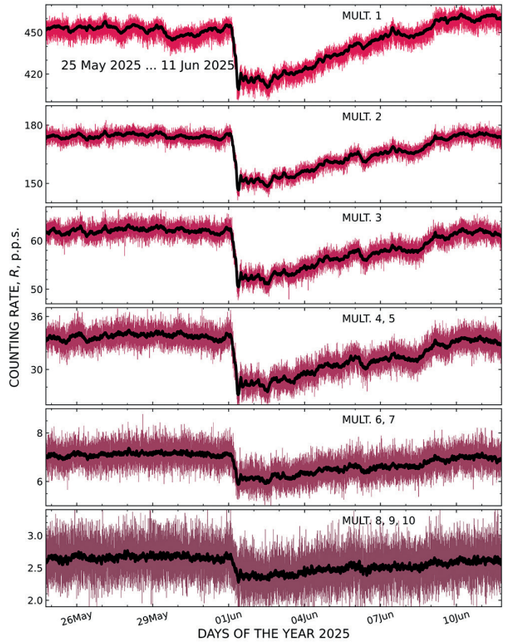
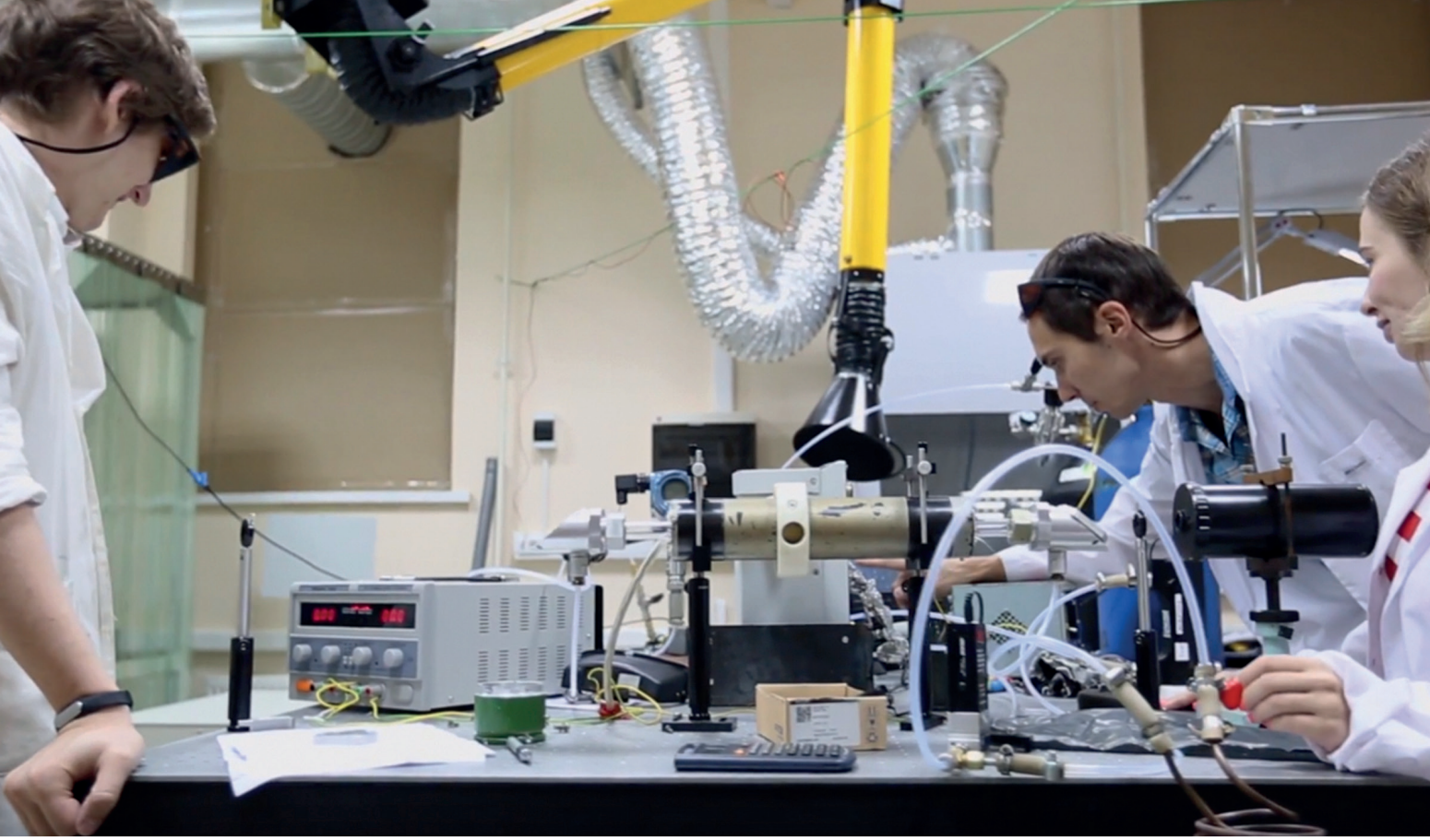


Рисунок 2. Форбуш-понижение 1 июня 2025 г., наблюдаемое по интенсивности событий генерации нейтронов с различной множественностью на Тянь-Шаньском нейтронном супермониторе

Результаты опубликованы:

1. Observation of the Large Forbush Decrease Event on 1–10 June 2025 at the Tien Shan Cosmic Ray Station. / A. Shepetov, O. Kryakunova, R. Koichubayev, [et al.]. // Atmosphere. – 2025. – Vol. 16. – Iss. 12. – Art. ID 1349. – 16 pp. – DOI 10.3390/atmos16121349..

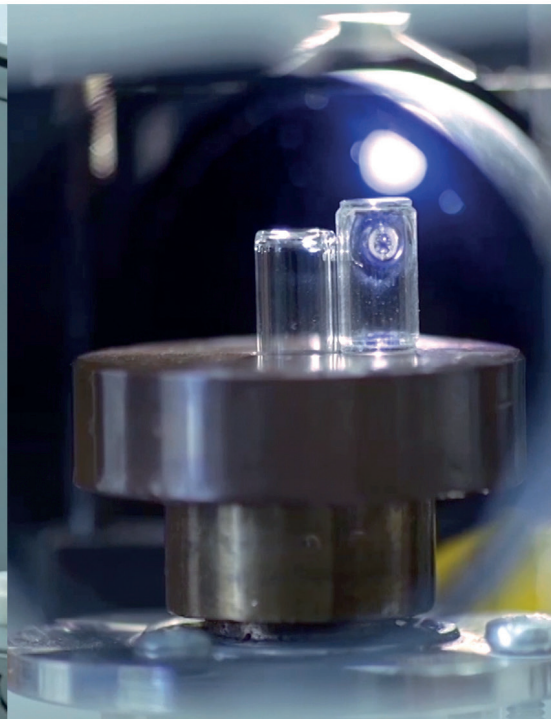


ФИАН САМАРА

Филиал ФИАН в Самаре

Троицкое обособленное подразделение, включающее
«Троицкий Технопарк ФИАН»
г. Троицк (ТОП ФИАН)

ТЕХНОПАРК ФИАН



Самарский филиал ФИАН

Влияние кристаллографической текстуры на формирование остаточных напряжений в алюминиевых сплавах при лазерной ударной обработке

И. А. Бакулин, С. И. Кузнецов, А. С. Панин, Е. Ю. Тарасова

Определены структура и напряженное состояние сплава АМг6 с различной кристаллографической текстурой после лазерной ударной обработки без покрытия. Установлено, что глубина и профиль сжимающих остаточных напряжений (СОН) в сплаве с ГЦК-решеткой зависят от ориентации кристаллографических плоскостей относительно действующей силы. При благоприятной кристаллографической текстуре получено увеличение глубины СОН в 1.5…3 раза в зависимости от плотности мощности излучения и диаметра лазерного пятна.

Лазерная ударная обработка без покрытия (ЛУОбП; LSPwC в английской аббревиатуре) как одно из направлений лазерной ударной обработки (ЛУО) является методом поверхностного упрочнения путем холодной пластической деформации. ЛУО представляет собой нетермический способ упрочнения за счет создания в поверхностном слое сжимающих напряжений без фазовых переходов структуры обрабатываемого материала. Несмотря на активное развитие в течение последних десятилетий и большой объем проведенных работ, до сих пор нет полного представления о возможном влиянии на результат ЛУО исходной структуры самого обрабатываемого материала, в частности, его кристаллографической текстуры.

В работе [1] на примере алюминиевого сплава АМг6 (ГЦК-решетка) впервые представлен экспериментальный анализ влияния кристаллографической текстуры на структуру и остаточные макронапряжения после лазерной ударной обработки.

Для ЛУОбП использовались плоские образцы, вырезанные из стержня поликристаллического сплава АМг6, имеющего многокомпонентную осевую текстуру, вдоль и поперек его оси. Соответственно, в поперечных образцах наблюдается преимущественная ориентация параллельно обрабатываемой поверхности кристаллографических плоскостей (111) и (100), тогда как в продольных параллельно обрабатываемой поверхности преимущественно расположены плоскости (100) и (110) при существенном снижении интенсивности линии, соответствующей системе плоскостей {111}. Обработке подвергались образцы в состоянии поставки и после отжига в воздушной среде. Источником импульсов служил YAG:Nd лазер (λ = 0,532 мкм; $\tau_{имп}$ = 10 нс; $E_{имп}$ = 0.32 Дж). Плотность мощности q = 4.1 и 1.2 ГВт/см^2, плотность импульсов N = 2000 имп/см^2. Обработка проводилась под слоем воды.

Согласно рентгеноструктурному анализу распределения плотности дислокаций, областей когерентного рассеяния и микродеформаций по глубине зоны обработки в продольных и поперечных образцах после ЛУОбП зависят, в основном, от плотности мощности и мало отличаются друг от друга в области существования СОН как по величине, так и по виду.

В отличие от структурных характеристик, распределения остаточных макронапряжений по глубине зоны обработки в продольных и поперечных образцах после ЛУОбП кардинально различны, особенно распределение в направлении сканирования σ_x (Рисунок 1).

Формы профиля напряжений в отожженных и неотожженных образцах схожи, включая глубину СОН, достигающую 2000 мкм.

Влияние ориентации кристаллитов на форму распределения и глубину СОН более ярко проявляется при ЛУОбП с плотностью мощности 1.2 ГВт/см^2 (Рисунок 2). В поперечных образцах глубина СОН σ_x весьма незначительна (700 мкм) и примерно одинакова в неотожженных и отожженных образцах. В продольных образцах глубина СОН σ_x увеличивается в 3 раза: до 2000 мкм в отожженных образцах и 2200 мкм – в неотожженных. Отмеченные различия в распределении остаточных напряжений вызваны тем, что в ГЦК-структурах преимущественное скольжение дислокаций происходит в системе наиболее плотноупакованных направлений и плоскостей <110>{111}. То есть преимущественная ориентация плоскости (111) перпендикулярно действующей при ЛУОбП силе в поперечных образцах является менее выгодной для скольжения дислокаций.

Таким образом, можно утверждать, что наряду с параметрами лазерного воздействия – плотностью мощности, диаметром лазерного пятна, коэффициентом перекрытия и кратностью обработки – кристаллографическая текстура обрабатываемого материала является важным фактором, определяющим структуру и распределение остаточных напряжений после лазерной ударной обработки.

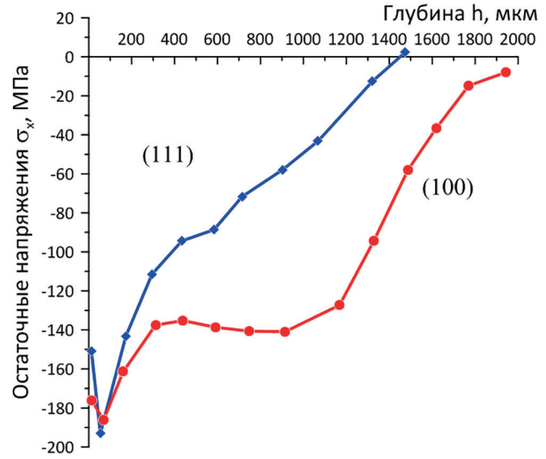


Рисунок 1. Распределение остаточных напряжений σ_x после ЛУОбП АМг6 с различной преимущественной ориентацией кристаллографических плоскостей (hkl); q = 4.1 ГВт/см², N = 2000 имп/см²

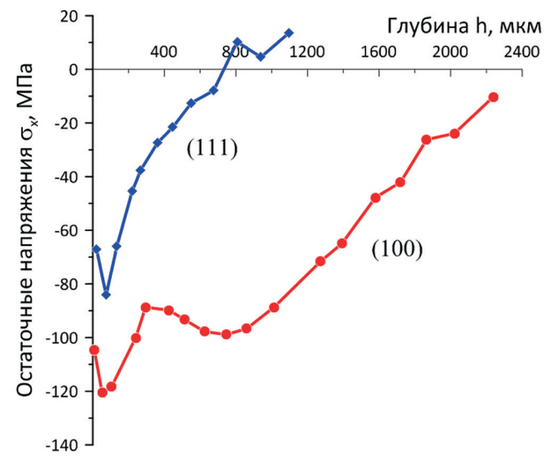


Рисунок 2. Распределение остаточных напряжений σ_x после ЛУОбП АМг6 с различной преимущественной ориентацией кристаллографических плоскостей (hkl); q = 1.2 ГВт/см², N = 2000 имп/см²

Результаты опубликованы:

1. Влияние кристаллографической текстуры на формирование остаточных напряжений в алюминиевых сплавах при лазерной ударной обработке без покрытия. / И. А. Бакулин, С. И. Кузнецов, А. С. Панин, Е. Ю. Тарасова. // Квантовая электроника. – 2025. – Т. 55. – № 4. – С. 234-241. – DOI 10.3103/S106833562560250X (англ.). – ISSN 0368-7147.

Удельная выходная мощность лазера на метастабильных атомах аргона с оптической накачкой

П. А. Михеев, М. В. Загидуллин, А. К. Чернышов, М. И. Свистун, А. П. Торбин, Р. А. Курамшин, Н. И. Уфимцев

Впервые экспериментально измерена удельная выходная мощность лазера с оптической накачкой на инертных газах с использованием смеси аргона и гелия. Данные, полученные на двух различных установках в РФЯЦ ВНИИЭФ (136 Вт·см$^{-3}$ при средней мощности 4.5 Вт) и в СФ ФИАН (150 Вт·см$^{-3}$ при пиковой мощности 2.1 Вт), впервые экспериментально подтвердили существующие теоретические оценки этого параметра.

Лазер с оптической накачкой на метастабильных атомах инертных газов (ЛОНИГ) – газовый лазер нового типа, основными преимуществами которого являются высокий квантовый КПД, однородная активная среда и высокое качество выходного излучения. В активной среде происходит преобразование излучения накачки от сборок лазерных диодов накачки в мощное излучение газового лазера с высоким качеством волнового фронта. ЛОНИГ является кинетическим аналогом лазеров с диодной накачкой на парах щелочных металлов, но его активная среда химически инертна, что существенно упрощает техническую реализацию.

Получена удельная выходная мощность более 100 Вт·см$^{-3}$ в ЛОНИГ с использованием метастабильных атомов аргона. Измерения на двух различных экспериментальных установках в СФ ФИАН (150 Вт·см$^{-3}$ при пиковой мощности 2.1 Вт) и в РФЯЦ ВНИИЭФ (136 Вт·см$^{-3}$ при средней мощности 4.5 Вт), отличающихся особенностями конструкций, впервые экспериментально подтвердили существующие теоретические оценки этого параметра. Активная среда ЛОНИГ создавалась наносекундным импульсно-периодическим разрядом (НИПР), с помощью которого создавались метастабильные атомы аргона, которые накачивались излучением четырех линеек лазерных диодов. Измерялись размеры плазмы, перетяжки излучения накачки, мгновенная и средняя мощности излучения. Результаты измерений представлены на Рисунке 1.

С целью дальнейшего повышения удельной выходной мощности ЛОНИГ определен набор констант столкновительных процессов методом лазерно-индуцированной флюоресценции, обеспечивающих энергообмен между 2p-состояниями лазерного цикла. С помощью численного моделирования выявлено влияние оптической накачки и лазерного излучения на параметры НИПР. Особенности кинетики ЛОНИГ таковы, что оптическая накачка обедняет населенность нижнего лазерного уровня, заселяя уровень с близкой энергией. Это приводит к уменьшению поглощения накачки и мощности лазерной генерации, увеличению тепловыделения. Исправить ситуацию можно с помощью вспомогательной оптической накачки, возвращающей атомы аргона в лазерный цикл.

Полученные результаты подтверждают потенциал ЛОНИГ для создания мощных лазерных систем.

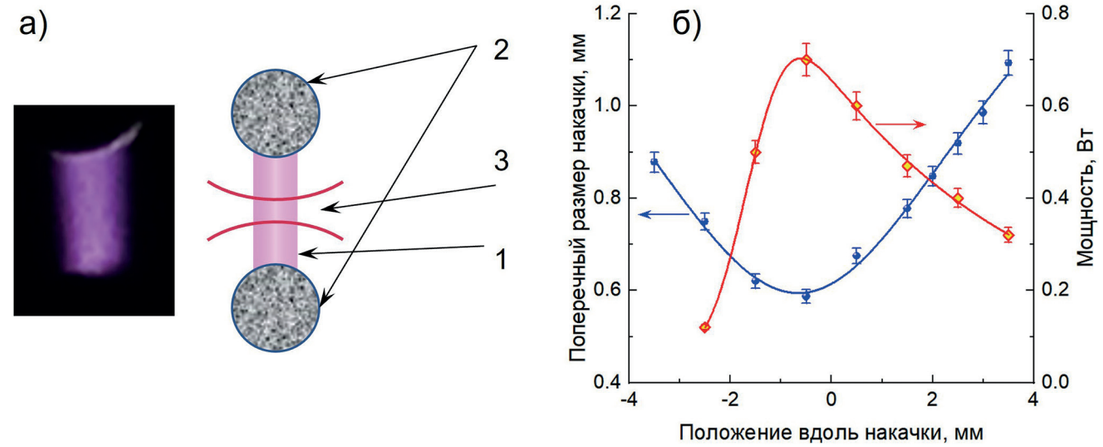


Рисунок 1. а) плазма НИПР (1) между цилиндрическими электродами (2) и излучение накачки (3); б) средняя мощность лазерного излучения в зависимости от положения середины плазмы относительно перетяжки (красные точки и линия) и поперечный размер излучения накачки вблизи перетяжки, измеренный при мощности 100 Вт (синие точки и линия)

Результаты опубликованы:

1. Экспериментальное определение удельной выходной мощности лазера на метастабильных атомах инертных газов с оптической накачкой. / П. А. Михеев, А. К. Чернышов, М. И. Свистун, Н. И. Уфимцев, [и др.]. // Квантовая электроника. – 2025. – Т. 55. – № 4. – С. 197–200. – ISSN 0368-7147. – EDN NVXDSE.
2. Zagidullin, M. V. Kinetic analysis of an optically pumped rare gas lasing medium with a nanosecond repetitively pulsed discharge in Ar-He mixture. / M. V. Zagidullin, P. A. Mikheyev. // Optics & Laser Technology. – 2025. – Vol. 181. – Art. ID 111702. – DOI 10.1016/j.optlastec.2024.111702.
3. Особенности энергообмена между 2p-состояниями аргона в активной среде лазера на метастабильных атомах инертных газов с оптической накачкой. / А. П. Торбин, Р. А. Курамшин, А. К. Чернышов, П. А. Михеев. // Квантовая электроника. – 2025. – Т. 55. – № 4. – С. 201–203. – ISSN 0368-7147. – EDN JEVEIB.

Самарский филиал ФИАН

Происхождение субструктур в фотодиссоциативной области Orion Bar в результате изоэнтропической неустойчивости

И. А. Помельников, Н. Е. Молевич, Д. С. Рящиков, Д. И. Завершинский

Изоэнтропическая тепловая неустойчивость может быть причиной образования плотных динамических субструктур и турбулентного движения газа в фотодиссоциативной области Orion Bar. Результаты проведенного моделирования и сравнение их с наблюдениями высокого разрешения, полученными при помощи телескопов наземного и космического базирования (ALMA и JWST), убедительно совпадают, подтверждая, что этот механизм способен объяснить характерные размеры наблюдаемых субструктур.

Одним из наиболее изучаемых классов астрономических объектов в настоящее время являются фотодиссоциативные области (ФДО), то есть области, подверженные сильному воздействию ультрафиолетового излучения. Среди них, наиболее изученной ФДО является Барьер Ориона, располагающаяся в туманности Ориона возле скопления Трапеции Ориона, звезды которого оказывают сильное воздействие на окружающую газовую среду. В ФДО Барьер Ориона наблюдаются мелкомасштабные вкрапления плотного газа в менее плотную среду. Недавно при помощи телескопов JWST и Keck возле диссоциативного фронта были обнаружены тонкие протяженные динамические структуры шириной $(1...20) \times 10^{-3}$ пк, расположенные на расстоянии друг от друга 2×10^{-2} пк, имеющие резкий градиент плотности. Также на основе многих наблюдений известно, что в ФДО Барьер Ориона присутствует нетепловое движение газа, турбулентная скорость в плотных структурах значительно превышает скорость в окружающей среде. Помимо Orion Bar подобные тонкие структуры в атомарных и молекулярных зонах с аномальной турбулентной скоростью обнаруживают и в других ФДО. Однако, такие тонкие структуры как в Барьере Ориона еще не удалось обнаружить из-за расстояния до этих туманностей, намного превышающего расстояние до Туманности Ориона.

В рамках исследования области фотодиссоциации Orion Bar методами газодинамического моделирования построены равновесные кривые «температура – плотность» для различных условий (поток дальнего УФ-излучения G_0, оптическая толщина τ_c) (Рисунок 1). Проанализирована эволюция параметров (амплитуды плотности и скорости) формируемых ударноволновых структур во времени. Установлена зависимость характерного пространственного размера (ширины) ударноволновых импульсов от температуры среды, которая количественно согласуется с ширинами динамических структур, наблюдаемых космическим телескопом James Webb.

Показано, что изоэнтропическая тепловая неустойчивость может являться причиной возникновения плотных динамических субструктур и областей нетеплового движения межзвездной среды, обнаруженных в фотодиссоциативной области Orion Bar. Полученные авторами аналитические и численные результаты предсказывают характерные размеры нелинейных структур и периоды их следования (Рисунок 1), которые близко соответствуют размерам наблюдаемых субструктур и расстояниям между ними, в то время как амплитуды согласуются с оценками скорости нетеплового движения.

Исследование демонстрирует, что изоэнтропическая неустойчивость способна воспроизвести ряд динамических особенностей Orion Bar, что позволяет связать теоретические предсказания с наблюдениями высокого разрешения, полученными при помощи телескопов наземного и космического базирования (ALMA и JWST).

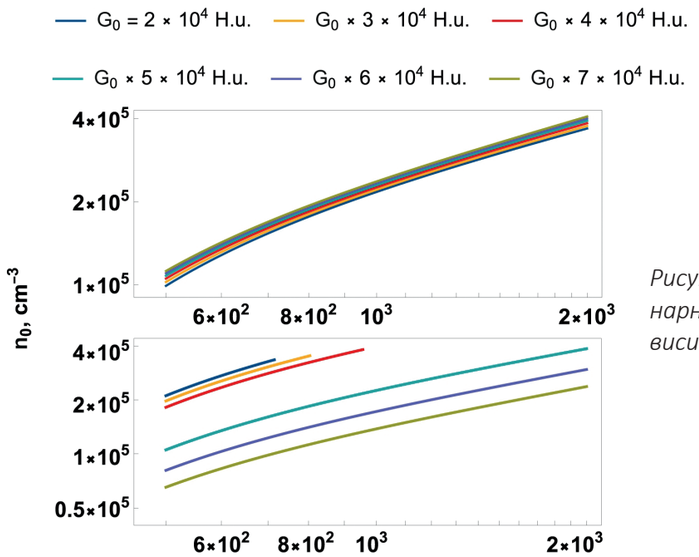


Рисунок 1. Равновесные кривые стационарных температуры и плотности в зависимости от параметров G_0(а) и τ_c(б)

Рисунок 2. Периодические структуры в фотодиссоциативной области Orion Bar

Результаты опубликованы:

1. Isentropic instability and dynamic substructures in the Orion Bar photodissociation region: Analytical and numerical insights / I. A. Pomelnikov, D. S. Riashchikov, D. I. Zavershinskii, N. E. Molevich // Astronomy and Astrophysics. – 2025. – Vol. 701. – Art. ID A59. – 13 pp. – DOI 10.1051/0004-6361/202554479.
2. The influence of steady temperature on the noise-induced structures in the Orion Bar PDR / I. A. Pomelnikov, D. S. Riashchikov, D. I. Zavershinskii, N. E. Molevich // Astronomical and Astrophysical Transactions. – 2025. – Vol. 35. – Iss. 4. – P. 423–430. – DOI 10.17184/eac.9925.

Самарский филиал ФИАН

Оптимизация оптотермического пинцета с целью уменьшения лазерного воздействия на захватываемые объекты

С. П. Котова, Н. Н. Лосевский, А. М. Майорова, С. А. Самагин, Д. В. Прокопова, В. К. Урюпина

Понижение температуры в оптотермических ловушках до актуальных для работы с биообъектами значений 25…35 °C реализовано в охлаждаемой кювете. Продемонстрированы возможности управления скоростью перемещения микросфер по вихревому кольцу в оптотермической ловушке без изменения мощности лазерного излучения непосредственно на световом кольце.

Оптотермические ловушки представляют интерес для манипулирования биологическими микрообъектами, при этом актуальной является задача понижения температуры в таких ловушках.

Экспериментально и методами численного моделирования показано, что, используя специально изготовленную охлаждаемую кювету (температура охлаждения 5…7 °C), можно понизить температуру в оптотермической ловушке до значений 25…35 °C. Численные и натурные эксперименты проводились для точечной ловушки и ловушки в форме кольца. Показано, что скорости формируемых в ловушке конвективных потоков и, соответственно, скорости перемещения микрообъектов в область ловушки определяются градиентом температуры и не зависят от ее начального значения. На Рисунке 1 представлены результаты численного моделирования и экспериментов для точечной ловушки в охлаждаемой (а) и обычной кюветах (б). Видно, что радиальные и вертикальные составляющие скоростей перемещения жидкости (сплошные линии) и скорости перемещения микросфер в ловушку (точки) для разных температур охлаждения совпадают.

Исследовалось поведение микросфер непосредственно в вихревой оптотермической ловушке. Показано, что можно управлять скоростью перемещения микросфер по вихревому кольцу в оптотермической и составной оптотермической ловушках без изменения мощности лазерного излучения непосредственно на световом кольце, которым захватываются и по которому перемещаются микросферы. Для реализации способа формируется ловушка в виде светового кольца с точечной тепловой ловушкой в ее центре. Мощность лазерного излучения светового кольца для оптической и оптотермической ловушек одинакова (и составляет 37 мВт), однако наличие дополнительной точечной оптотермической ловушки (20 мВт) позволяет ускорить движение частиц по вихревому кольцу в 1.8 раз. Значения скорости составили 9.1 ± 1.5 °/с для оптической и 16.7 ± 1.7 °/с для оптотермической ловушек, соответственно. Кадры видеофиксации эксперимента представлены на Рисунке 2.

Эксперименты были также реализованы в схеме составной (на двух длинах волн) оптотермической ловушки. Включение инфракрасного лазера, формирующего точечную тепловую ловушку, увеличивало скорость перемещения микросфер по кольцу в 2.1 раза.

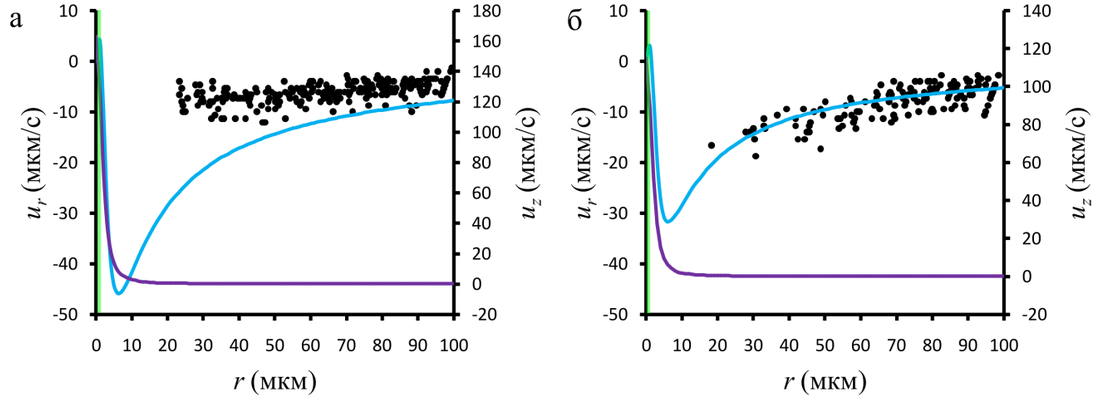


Рисунок 1. Радиальная (голубая линия) и вертикальная (фиолетовая линия) составляющие скорости перемещения слоя жидкости на высоте 1.5 мкм от дна кюветы при температуре охлаждения 6 °C (а) и 23 °C (б). P = 46 мВт, λ = 0.53 мкм. Точками обозначены экспериментально измеренные скорости движения микросфер диаметром 3 мкм в оптотермическую ловушку

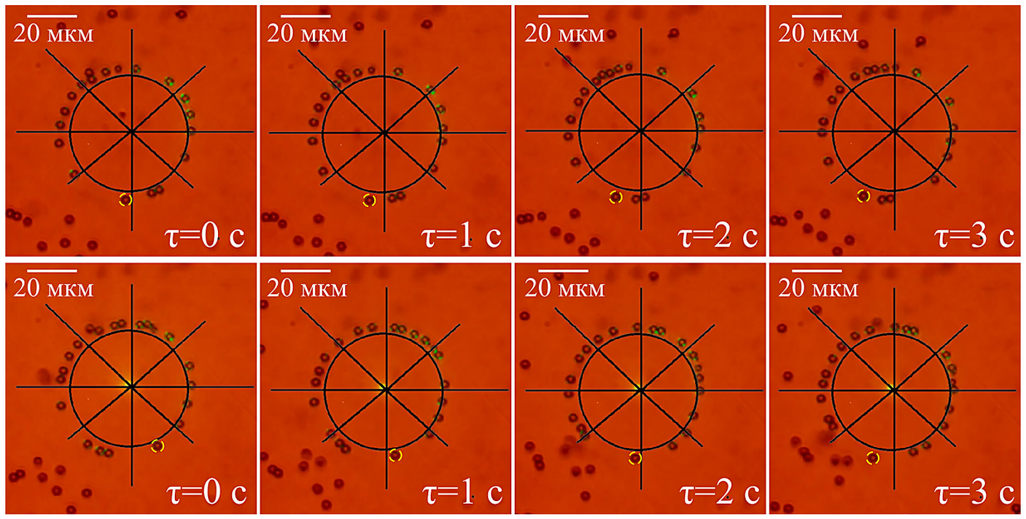


Рисунок 2. Кадры видеофиксации эксперимента, иллюстрирующие перемещение микросфер диаметром 2 мкм по двум вихревым оптотермическим ловушкам – кольцевой ловушке (верхний ряд) и кольцевой ловушке с точечным пятном в центре (нижний ряд)

Результаты опубликованы:

1. Capture and Retention of Polystyrene Microspheres with Biomarkers in Optical and Optothermal Traps. / V. K. Uryupina, N. A. Gorbunov, S. P. Kotova, [et al.]. // Journal of Biomedical Photonics & Engineering. – 2025. – Vol. 11. – Iss. 2. – Art. ID 020302. – 6 pp. – DOI 10.18287/JBPE25.11.020302.
2. Оптотермическое манипулирование в охлаждаемой кювете. / С. П. Котова, Н. Н. Лосевский, А. М. Майорова, С. А. Самагин. // Квантовая электроника. – 2025. – Т. 55. – № 4. – С. 224–229. – EDN ECLELO.
3. Motion of Microspheres in Vortex Optothermal Traps. / S. P. Kotova, N. N. Losevsky, A. M. Mayorova, [et al.]. // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2025. – Vol. 89. – № 12. – P. 2332–2338. – DOI 10.1134/S1062873825713613.

Управление пространственной структурой лазерного излучения через целенаправленное возбуждение и подавление неустойчивостей

А. А. Кренц, Е. А Ярунова, Н. Е. Молевич, Д. С. Рящиков

Теоретически исследованы механизмы формирования поперечных оптических структур в широкоапертурных лазерах различных классов (A, B, C, включая VCSEL), в том числе при внешней оптической инжекции. С помощью анализа Флоке впервые количественно предсказаны масштабы нелинейных паттернов: модулированных стоячих волн и спиральных доменов с вихревой фазой. Установлено, что слабая внешняя инжекция позволяет как подавлять деструктивные неустойчивости, так и контролируемо переключать упорядоченные конфигурации. Результаты открывают перспективы для оптоинформатики, нейроморфных вычислений и интегральной нанофотоники.

Теоретически исследована динамика различных типов широкоапертурных лазеров, в том числе с инжекцией внешнего излучения. При этом внешний оптический сигнал играет роль управляющего поперечной структурой генерируемого лазерного пучка.

Широкоапертурные лазеры обладают высоким потенциалом выходной мощности, однако их практическое применение ограничено развитием пространственно-временных неустойчивостей, приводящих к филаментации, хаотизации пучка и, как следствие, к резкому ухудшению качества излучения. Современные требования к скорости передачи данных в беспроводных каналах связи, вычислительной мощности нейроморфных систем и эффективности оптической обработки информации стимулируют поиск принципиально новых подходов к управлению светом. Одним из наиболее перспективных направлений оптоинформатики становится использование лазерного излучения со сложной пространственной структурой, где информация кодируется не только в интенсивности или частоте, но и в поперечном распределении поля — в виде полос, гексагонов, колец или спиральных волн.

Показано, что в широкоапертурных лазерах динамического класса C существует механизм формирования поперечных оптических структур, связанный с развитием вторичных неустойчивостей. Полученные с помощью модифицированного анализа Флоке результаты впервые позволили количественно предсказать характерные пространственные масштабы нелинейных паттернов – как модулированных стоячих волн, так и спиральных доменов с вихревой структурой фазы (Рисунок 1).

Установлено, что внешняя оптическая инжекция малой (по сравнению с величиной генерируемого лазером поля) амплитуды позволяет полностью подавить эти вторичные неустойчивости, предотвращая распад однородных колебаний в сложные вихревые структуры и стабилизируя режим генерации.

Показано, что слабая внешняя оптическая инжекция служит эффективным инструментом управления типом формирующихся структур, обеспечивая как полное подавление неустойчивостей, так и контролируемое переключение между различными упорядоченными конфигурациями (страйпы, гексагоны (Рисунок 2), кольца).

Исследование демонстрирует возможность целенаправленного формирования пространственной структуры лазерного пучка на основе фундаментальных свойств активной среды, что открывает новые перспективы для создания продвинутых источников структурированного излучения в нанофотонике и интегральной оптике.

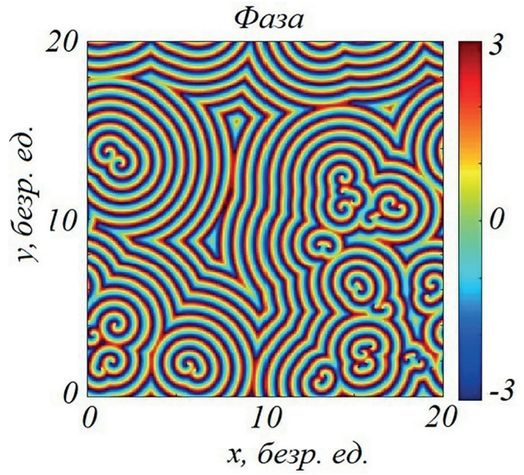


Рисунок 1. Спиральные домены с вихревой структурой фазы в лазерах динамического класса C

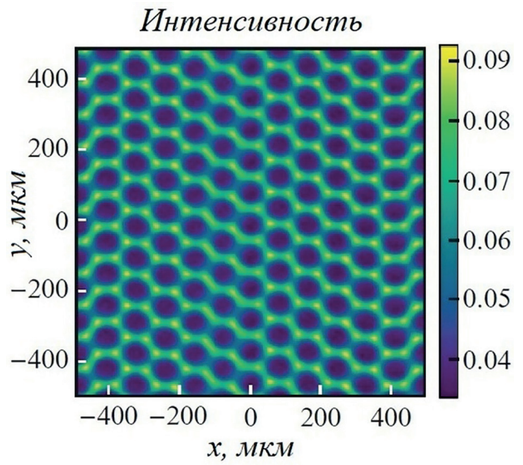


Рисунок 2. Гексагоны в поперечном сечении пучка широкоапертурного VCSEL с внешней инжекцией

Результаты опубликованы:

1. Krents, A. A. Secondary instabilities in broad-area homogeneously broadened class-C lasers. / A. A. Krents, N. E. Molevich, E. A. Yarunova. // Journal of the Optical Society of America B. – 2025. – Vol. 42. – Iss. 8. – P. 1680–1688. – DOI 10.1364/JOSAB.563810.
2. Complex Spatial Structures in the Optically Driven VCSELs. / E. A. Yarunova, D. S. Riashchikov, A. A. Krents, N. E. Molevich. // Optical Memory and Neural Networks. – 2025. – Vol. 34. – Suppl. 2. – P. S346–S356. – DOI 10.3103/S1060992X25601927.
3. Молевич, Н. Е. Поперечные структуры оптического поля: генерация и управление в лазерах с большой апертурой. Ч. I. Лазеры с однородной линией уширения. / Н. Е. Молевич, А. А. Кренц, Е.А. Ярунова. // Квантовая электроника. – 2025. – Т. 55. – №. 4. – С. 204–214. – ISSN 0368-7147.
4. Поперечные структуры оптического поля: генерация и управление в лазерах с большой апертурой. Ч. II. Полупроводниковые лазеры с вертикальным резонатором. / Е. А. Ярунова, Д. С. Рящиков, А. А. Кренц, Н. Е. Молевич. // Квантовая электроника . – 2025. – Т. 55. – №. 4. – С. 215–223. – ISSN 0368-7147.

Полупроводниковый дисковый лазер на гетероструктуре GaInP/AlGaInP с внутрирезонаторной накачкой в квантовые ямы

В. И. Козловский, Я. К. Скасырский, М. П. Фролов

Исследован впервые реализованный импульсный полупроводниковый дисковый лазер на гетероструктуре GaInP/AlGaInP с 25 квантовыми ямами, излучающий на длине волны 642.5 нм при внутрирезонаторной накачке в квантовые ямы излучением лазера на красителе с длиной волны 614.5 нм. Достигнута импульсная мощность ~80 Вт при длительности импульса ~0.5 мкс. Мощность ограничивается процессом разрушения структуры. Обнаружена временная модуляция излучения лазера на красителе с гетероструктурой внутри резонатора с периодом ~6 нс, равным времени обхода резонатора.

Полупроводниковые дисковые лазеры (ПДЛ) с оптической накачкой отличаются высокой мощностью и эффективностью при высоком качестве лазерного пучка. При накачке в квантовые ямы (КЯ) уменьшаются тепловыделения в гетероструктуре за счет уменьшения квантового дефекта, а также не возникают проблемы с эффективным сбором неравновесных носителей в КЯ, наблюдаемые при накачке в барьерные слои. Однако при этом снижается эффективность накачки. Для повышения этой эффективности используют сложные многопроходные системы накачки. В настоящей работе впервые предложено для повышения эффективности накачки использовать схему, в которой гетероструктура размещается внутри резонатора лазера накачки.

В качестве активного элемента использовалась гетероструктура GaInP/AlGaInP с 25 КЯ, рассчитанная на достижение резонансно-периодического усиления на длине волны 640 нм. На поверхность структуры наносилось диэлектрическое зеркало с расчетным коэффициентом отражения 99.3% в спектральной области 600–650 нм. Этим зеркалом структура приклеивалась к кварцевой подложке. Ростовая подложка GaAs затем удалялась селективным химическим травлением. Для накачки использовался импульсный лазер на красителе 6G. Оптическая схема внутрирезонаторной накачки представлена на Рисунке 1.

Длина волны генерации ПДЛ составила 642.5 нм при накачке излучением с λ = 614.5 нм. Ширины линий на полувысоте излучения обоих лазеров составляют примерно 1 нм, что сравнимо с разрешением спектрального прибора. Линия излучения лазера на красителе в основном определяется модами малодобротного резонатора, образованного гетероструктурой (свободной поверхностью гетероструктуры и обратной ее поверхностью с нанесенным зеркальным покрытием).

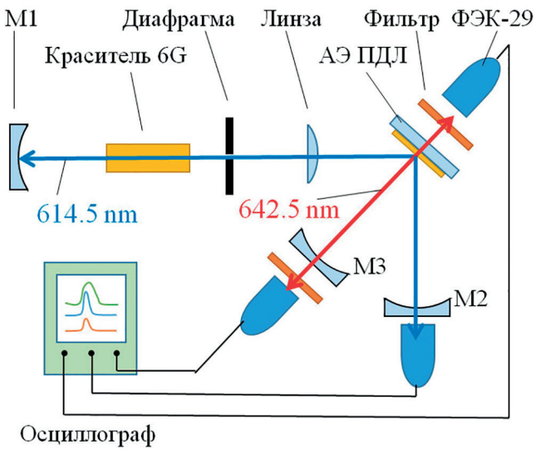


Рисунок 1. Оптическая схема ПДЛ

Зависимость мощности излучения ПДЛ от мощности лазера на красителе представлена на Рисунке 2.

Предельная мощность излучения ограничена деградацией гетероструктуры. Деградация наблюдалась при внутрирезонаторной интенсивности излучения лазера на красителе примерно 1 МВт/см^2. Характер разрушений свидетельствует, что основным механизмом разрушения является термоупругие напряжения. Рассчитанный порог деградации согласуется с полученными экспериментальными данными.

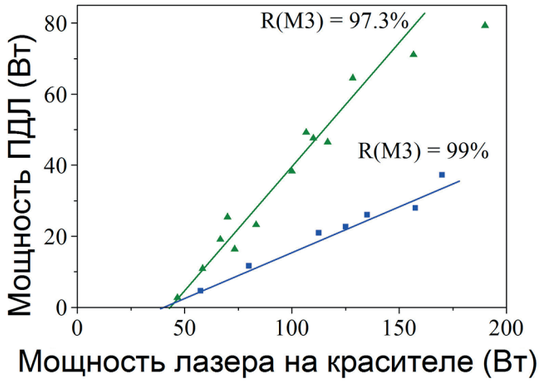


Рисунок 2. Зависимость мощности импульса ПДЛ от мощности импульса лазера на красителе

Обнаружена высокочастотная модуляция излучения лазера на красителе. Период этой модуляции был равен времени обхода резонатора 6 нс. Предполагается, что модуляция связана с синхронизацией мод резонатора. Нелинейным элементом, порождающим модуляцию, является гетероструктура. Осциллограммы импульсов лазера на красителе и ПДЛ представлены на Рисунке 3. Временное разрешение ~1 нс определяется фотоэлементами (ФЭК-29).

Полученные результаты могут быть использованы в медицине, дисплейных технологиях, системах лазерного шоу, навигационных системах.

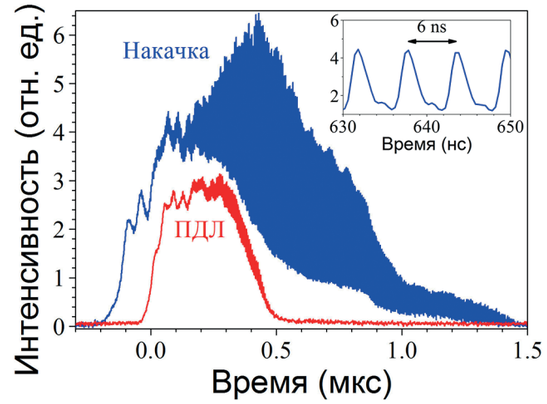


Рисунок 3. Осциллограммы импульсов излучения лазера на красителе и ПДЛ

Результаты опубликованы:

1. Полупроводниковый дисковый лазер на гетероструктуре GaInP/AlGaInP с внутрирезонаторной накачкой в квантовые ямы / А.А. Елшербини, В.И. Козловский, Я.К. Скасырский, М.П. Фролов. // Письма в ЖЭТФ. – 2025. – Т. 122. – №. 4. – С. 201–207. – DOI 10.31857/S0370274X25080148.

Разработка расчетного комплекса для моделирования лазерного упрочнения поверхности материалов большим количеством импульсов

В. В. Лиханский[2,1], К. Е. Улыбышев[2,1], В. Г. Зборовский[1,2]

[1]Физический институт им. П..Н. Лебедева РАН

[2] Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»

Разработан расчетный комплекс для моделирования процессов в материалах при лазерном ударном упрочнении. Получено качественное соответствие результатов расчета остаточных напряжений в сплаве АМг6 экспериментальным данным.

Лазерное ударное упрочнение является одной из перспективных технологий улучшения эксплуатационных характеристик материалов. Для широкого использования данной технологии в различных отраслях промышленности желательно иметь расчетный код, позволяющий предсказать результат обработки в зависимости от свойств обрабатываемого материала и характеристик лазерного импульса.

В рамках работы по данной тематике авторами создан расчетный комплекс для оптимизации и обоснования технологических режимов лазерного ударного упрочнения поверхностей обрабатываемого материала [1–3]. Указанный комплекс включает программу расчета импульса давления на поверхность образца при воздействии лазерного излучения (расчет оптического пробоя и расширения слоя лазерной плазмы), а также трехмерный конечно-элементный код для расчета распространения в образце ударной волны, создаваемой импульсом давления. Основной проблемой моделирования обработки поверхности большим количеством лазерных импульсов с перекрытием является большое расчетное время.

Новизна созданного расчетного комплекса заключается в возможности выбора режимов обработки поверхности большим количеством лазерных импульсов с перекрытием, что позволяет учитывать неоднородность формируемых на обрабатываемой поверхности остаточных напряжений.

Основная идея рассматриваемого метода расчета заключается в использовании малого отличия остаточных пластических деформаций, сформированных соседними импульсами (за исключением импульсов, прилегающих к границе обрабатываемой области). При этом для части импульсов производится полный расчет распространения ударной волны, для остальных пластические деформации находятся путем экстраполяции (Рисунок 1, а)).

Проведена предварительная верификация созданного расчетного комплекса на экспериментальных данных из открытых публикаций и на экспериментальных результатах по обработке образцов из сплава АМг6, полученных Самарским филиалом ФИАН (Рисунок 1, б)). Из приведенных результатов видно, что расчет воспроизводит основные особенности экспериментальных данных (неравномерность остаточных напряжений по глубине, различие напряжений в направлениях, параллельном и перпендикулярном направлению обработки). Количественные отличия расчета от эксперимента, возможно, связаны с ограниченной применимостью используемой в расчетах модели пластического деформирования при скоростях деформаций, характерных для лазерного ударного упрочнения.

Основные особенности поведения кристаллических материалов при высокоскоростном деформировании описаны в [2].

Созданный расчетный комплекс может быть использован для выбора оптимальных параметров лазерного импульса и оптимальной схемы обработки поверхности большим количеством импульсов (направление обработки, величина перекрытия и т. д.). Расчеты по указанному комплексу могут применяться при проектировании различных деталей в авиа- и ракетостроении, ядерной энергетике, станкостроении и других областях.

Троицкое обособленное подразделение ФИАН

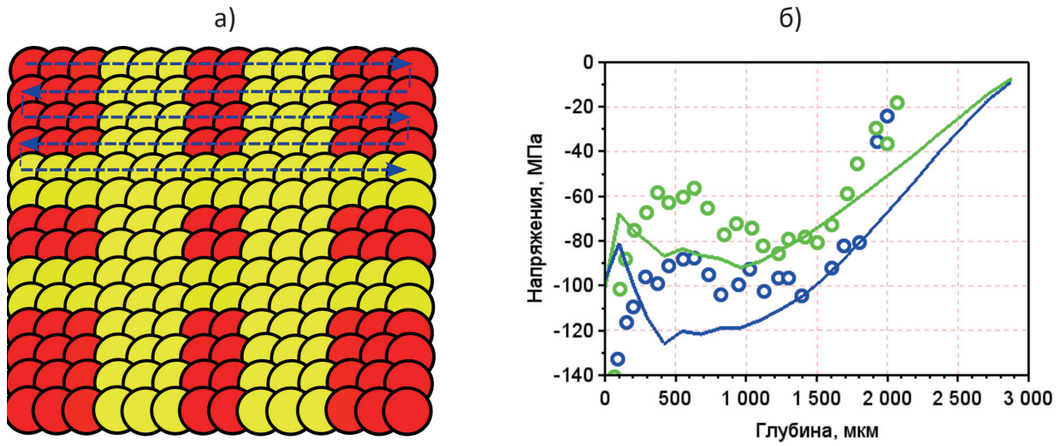


Рисунок 1. Расчет остаточных напряжений в образце из сплава АМг6 после лазерного ударного упрочнения: а) схема приближенного расчета: красные кружки — полный расчет распространения ударной волны, жёлтые кружки — экстраполяция пластических деформаций, стрелки — направление обработки; б) распределение остаточных напряжений в центре упрочняемого образца по глубине: зелёная кривая – σ_{xx}, синяя кривая – σ_{yy}, окружности – экспериментальные данные[1] для σ_{xx}, σ_{yy}

1 Лазерная ударная обработка сплава АМг6 без защитного покрытия / И. А. Бакулин, С. И. Кузнецов, А. С. Панин, Е. Ю. Тарасова // Физика и химия обработки материалов. – 2021. – № 1. – С. 31-39. – DOI 10.30791/0015-3214-2021-1-31-39.

Результаты опубликованы:

1. Лиханский, В. В. Численное моделирование процессов при лазерном ударном упрочнении алюминиевого сплава АМг6. / В. В. Лиханский, К. Е. Улыбышев, Н. Н. Елкин. // Авиационные материалы и технологии. – 2025. – № 2(79). – С. 33–47. – DOI 10.18577/2713-0193-2025-0-2-33-47.
2. Изменения микроструктуры поликристаллических сплавов при ударном воздействии короткими лазерными импульсами / В. В. Лиханский, К. Е. Улыбышев, Н. Н. Елкин, М. В. Хорохорин // Фотоника. – 2025. – Т. 19, № 3. – С. 210–222. – DOI 10.22184/1993-7296.FRos.2025.19.3.210.222.
3. Моделирование лазерного ударного упрочнения образцов из поликристаллических сплавов / В. В. Лиханский, Н. Н. Елкин, В. Г. Зборовский, К. Е. Улыбышев // Новые материалы: Перспективные технологии и методы исследования материалов : Сб. тезисов докладов 23-й Международ. школы-конф. для мол. уч. и спец-тов им. проф. Б. А. Калина, Москва, 21–23 октября 2025 года. – М.: НИЯУ МИФИ, 2025. – С. 164.

Метастабильные состояния, гистерезис и медленная динамика на водном интерфейсе стекла, выявленные с помощью микроскопии генерации второй гармоники

И. А. Ковалев, И. Ю. Еремчев, М. Ю. Еремчев

Методом микроскопии генерации второй гармоники (ГВГ) совместно со спектроскопией комбинационного рассеяния света (КРС) отслеживались изменения поверхностного потенциала стекла при циклическом изменении pH раствора. Обнаружен гистерезис в скорости релаксации поверхностного потенциала при pH = 7 после кислотно-щелочного титрования, а значение поверхностного потенциала при этом изменяется от −110 до −25 мВ. Эффект следует учитывать в экспериментах на стекле и в микрофлюидных чипах.

Показано, что интерфейс стекло/вода не является стационарной электростатической границей, а может занимать множество метастабильных зарядовых состояний с выраженным гистерезисом по pH. Метод микроскопии генерации второй гармоники (ГВГ), после калибровки, позволил напрямую отслеживать изменение электростатического потенциала стекла в реальном времени при переключении pH потока в микрокапилляре. Установлено, что при переходах pH 7 → 12 и 7 → 2 изменение ГВГ-интенсивности на интерфейсе происходит быстро, и определяется временем замещения раствора (характеристическая временна́я константа ~1…2 с была получена при измерении динамики замещения раствора в капилляре с помощью комбинационного рассеяния света). В то же время обратные переходы 12 → 7 (Рисунок 1, А) и 2 → 7 (Рисунок 1, Б) демонстрируют замедленное восстановление сигнала (типичные временные константы ~20 и ~7 с, соответственно), что свидетельствует о кинетическом гистерезисе, обусловленном молекулярной перестройкой силанольных центров на поверхности стекла.

Обнаружено, что поверхностный потенциал стекла при pH = 7 существенно зависит от предыстории pH: после контакта с раствором pH = 12 он составляет около −110 мВ, тогда как после контакта с pH = 2 – около −62 мВ (Рисунок 2, А). При многократных циклах pH 7 ↔ 2 поверхностный потенциал при pH = 7 последовательно изменяется от −110 до почти −25 мВ (Рисунок 2, Б), при этом значения потенциала при pH = 2 и 12 остаются воспроизводимыми.

Это демонстрирует существование целого набора метастабильных зарядовых состояний интерфейса, зависящих от истории кислотно-щелочной обработки.

Результат имеет существенную значимость для микрофлюидики, электрокинетики и биофизических экспериментов на стеклянных подложках (липидные бислои, одиночные молекулы, квантовые эмиттеры, живые клетки), где обычно предполагается фиксированное поверхностное состояние стекла: показано, что последовательность изменений pH способна радикально изменить электростатические условия для объекта исследований.

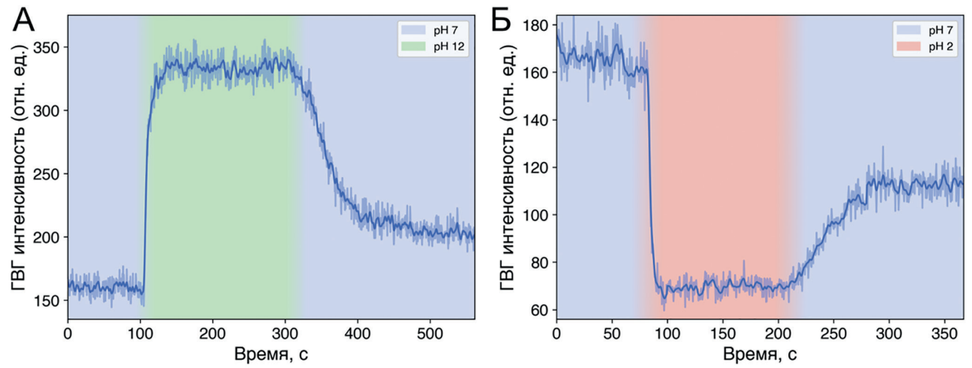


Рисунок 1. Кинетика интенсивности ГВГ с поверхности стекла, зарегистрированная для цикла pH: (А) 7 → 12 → 7; (Б) 7 → 2 → 7. Полупрозрачные голубые линии на фоне показывают исходные данные, а сплошные синие линии – данные, сглаженные с использованием гауссового фильтра

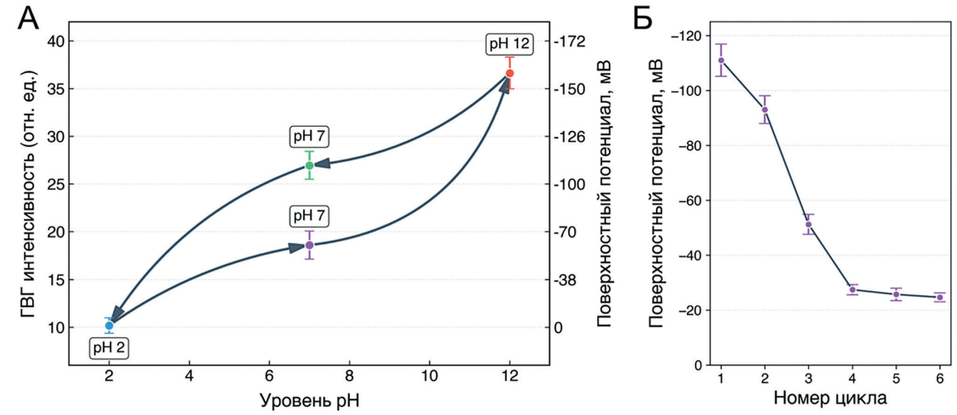


Рисунок 2. А – уровни интенсивности ГВГ на интерфейсе стекло/вода, измеренные при pH = 2 (синий), pH = 12 (красный), а также при pH = 7 после предварительного контакта с pH 12 (зеленый) и с pH 2 (фиолетовый). Дополнительная вертикальная ось показывает пересчет интенсивности ГВГ в значение поверхностного потенциала. Б – поверхностный потенциал интерфейса стекло/вода при pH = 7 в ходе циклических переходов между pH = 7 и pH = 2. Начальная точка соответствует состоянию интерфейса стекла при pH = 7 после воздействия pH = 12

Результаты опубликованы:

1. Метастабильные состояния, гистерезис и медленная динамика на водном интерфейсе стекла, выявленные с помощью микроскопии генерации второй гармоники / И. А. Ковалев, И. Ю. Еремчев, Д. Резел, М. Ю. Еремчев // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2025. – Т. 122. – № 9-10. – С. 554–562. – DOI 10.7868/S3034576625110067.

Двухчастотная внутридоплеровская спектроскопия атомов ^{87}Rb

В. Л. Величанский, К. М. Сабакарь, А. С. Фёдоров, Е. А. Цыганков, Д. С. Чучелов, М. И. Васьковская, В. В. Васильев, С. А. Зибров

Одним из возможных частотных реперов для компактных оптических стандартов частоты является внутридоплеровский резонанс, сформированный встречными двухчастотными оптическими полями. Обнаруженные впервые в атомах Cs, резонансы такого типа не были изучены подробно в других атомных системах. В настоящей работе эффект был исследован в D₁-линии ^{87}Rb в схемах с параллельными и ортогональными поляризациями встречных полей.

Метод внутридоплеровской спектроскопии основан на нелинейном отклике атомов на интенсивность лазерного излучения. Такой отклик может быть создан за счёт различных механизмов насыщения поглощения, среди которых оптическая накачка в непоглощающие суперпозиционные состояния между сверхтонкими или зеемановскими подуровнями (эффекты когерентного пленения населенностей (КПН) и Ханле, соответственно). Высококонтрастные узкие внутридоплеровские пики поглощения в двухчастотных встречных лазерных полях с ортогональными линейными поляризациями, впервые зарегистрированные в атомах цезия, объясняются подавлением непоглощающих состояний для определенных скоростных групп атомов.

В отличие от большинства работ, посвящённых исследованию данного типа внутридоплеровских резонансов, в которых для формирования двухчастотного оптического поля использовался электрооптический модулятор, в настоящей работе применялся диодный лазер с внешним резонатором, работающий в режиме СВЧ-модуляции тока накачки. Такой подход может позволить уменьшить габариты разрабатываемых приборов. В работе наблюдались резонансы в двух оптических схемах, отличающихся ориентацией поляризаций встречных оптических полей. Для ортогональных поляризаций ($\mathrm{lin} \perp \mathrm{lin}$) наблюдались высококонтрастные собственные внутридоплеровские резонансы, тогда как в параллельных поляризациях ($\mathrm{lin} \parallel \mathrm{lin}$) доминирующим был перекрестный резонанс. Обнаружено, что резонанс, соответствующий переходам на подуровень возбужденного состояния $F_e = 1$, регистрируемый в $\mathrm{lin} \perp \mathrm{lin}$ схеме, демонстрирует необычное поведение при росте двухфотонной отстройки: его амплитуда увеличивается, а ширина уменьшается (Рисунок 1, (a), (b)). Наличие двухфотонной отстройки приводит к подавлению сверхтонких когерентностей, поэтому амплитуда наблюдаемого в таких условиях резонанса $F_e = 1$ не зависит от набега фаз встречных полей, т. е. от положения атомной ячейки вдоль оптической оси, что позволяет уменьшить габариты оптической схемы. Перекрестный резонанс, соответствующий переходам на оба подуровня возбужденного состояния $F_e = 1, 2$, имеет заметно большую амплитуду в схеме $\mathrm{lin} \parallel \mathrm{lin}$, чем в $\mathrm{lin} \perp \mathrm{lin}$ и обладает меньшей шириной в сравнении с собственными резонансами (Рисунок 1 (c)). Полученные результаты объясняются перераспределением атомной населенности между непоглощающими состояниями, возникающими вследствие оптической накачки и формирования когерентностей разных типов.

Исследованные внутридоплеровские резонансы представляют интерес в качестве опорных при создании источников стабилизированного оптического излучения, в том числе в компактных атомных часах.

Работа выполнена в рамках гранта РНФ №24-72-10134.

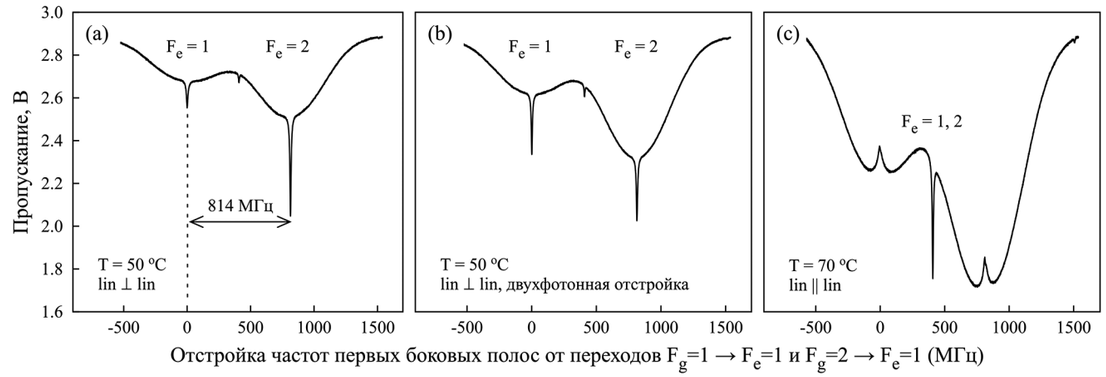


Рисунок 1. Двухчастотные внутридоплеровские спектры D₁-линии ^{87}Rb, полученные в ортогональных (a), (b) и параллельных (c) поляризациях встречных волн

Результаты опубликованы:

1. Double-Frequency Doppler-Free Spectroscopy of 87Rb Atoms. / V. L. Velichansky, K. M. Sabakar, A. S. Fedorov, [et al.]. // JETP Letters. – 2025. – Vol. 121. – Iss. 8. – P. 602–607. – DOI 10.1134/S0021364025605615.

Троицкое обособленное подразделение ФИАН

Черенковское дифракционное сверхизлучение как инструмент продольной диагностики ускорительных пучков

И. А. Кищин, Е. Ю. Киданова, А. С. Кубанкин

Разработана и экспериментально апробирована прецизионная методика неинвазивной диагностики продольного профиля релятивистских электронных пучков. В основе метода лежит регистрация спектральных характеристик когерентного черенковского дифракционного излучения (ЧДИ), генерируемого в сверхизлучающем режиме.

В рамках совместных исследований Лаборатории ускорительных устройств ФИАН и коллаборации ведущих научных центров (ОИЯИ, ТПУ, БелГУ) разработана инновационная система диагностики параметров ультракоротких электронных сгустков для современных ускорительных комплексов. Экспериментальные исследования проводились на базе микротрона МТ-25 (ЛЯР ОИЯИ), где была отработана методика измерения когерентного излучения в субтерагерцевом диапазоне.

Актуальность данной работы обусловлена жесткими требованиями, предъявляемыми к параметрам пучков в современных ускорительных установках — лазерах на свободных электронах, коллайдерах и источниках синхротронного излучения. Для обеспечения их стабильной работы необходим точный контроль продольных размеров электронных сгустков и структуры их последовательностей. При этом традиционные диагностические методы, основанные на прямом взаимодействии с пучком, приводят к недопустимым потерям частиц и возмущению их траекторий, что делает актуальной разработку неинвазивных методов диагностики.

В ходе работы была разработана уникальная методика измерения когерентного излучения в субтерагерцевом диапазоне со сверхвысоким спектральным разрешением. Экспериментальная установка включала коллимированный электронный пучок, пролетающий параллельно основанию диэлектрической призмы на расстоянии 20 мм. Излучение, выходящее под черенковским углом через вторую грань призмы, регистрировалось пирамидальной рупорной антенной, установленной на вращающемся валу с точностью позиционирования ± 0.01°, что позволяло проводить прецизионные измерения углового распределения. Сигнал по калиброванному высокочастотному коаксиальному кабелю передавался на анализатор спектра Ceyear 4052 (диапазон до 40 ГГц, уровень собственных шумов –171 дБм), где проводился детальный спектральный анализ.

С беспрецедентной точностью измерены спектральные характеристики субтерагерцевого сверхизлучения, генерируемого в диэлектрических мишенях различного состава (фторопласт, PLA и PETG) и трехмерной формы при пролете в их близи коротких банчей релятивистских электронных пучков. Измерения проводились в сверхизлучающем режиме, при котором интенсивность излучения пропорциональна квадрату числа частиц в сгустке. Удалось зафиксировать угловые распределения ЧДИ (Рисунок 1) для трех гармоник — 3-й (8.382 ГГц), 5-й (13.97 ГГц) и 7-й (19.558 ГГц).

Продольный форм-фактор одиночного сгустка определен как огибающая функция всех гармоник, нормированная с учетом эффективности линии передачи и спектра одиночного электрона (Рисунок 2). Экспоненциальная аппроксимация, использованная для определения средней длины сгустка, позволила получить значение σ = 8.8 ± 0.1 мм. Разработанные методики открывают новые возможности для прецизионной неинвазивной диагностики ультракоротких банчей в ускорительной технике.

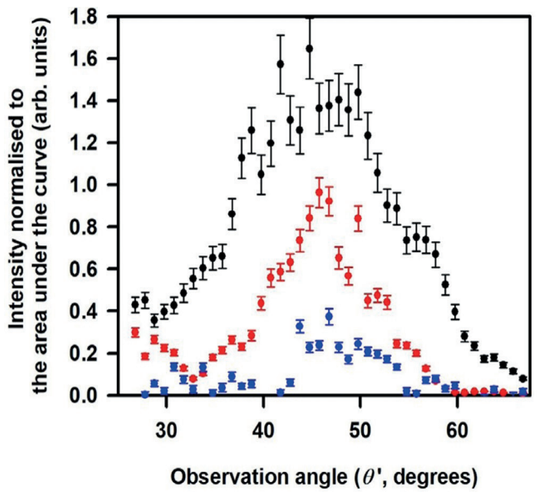


Рисунок 1. Измерения углового распределения ЧДИ, выполненные для трех гармоник — 3-й (8,382 ГГц), 5-й (13,97 ГГц) и 7-й (19,558 ГГц)

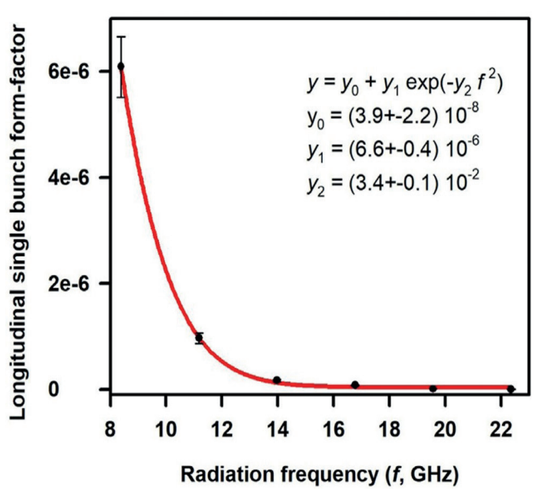
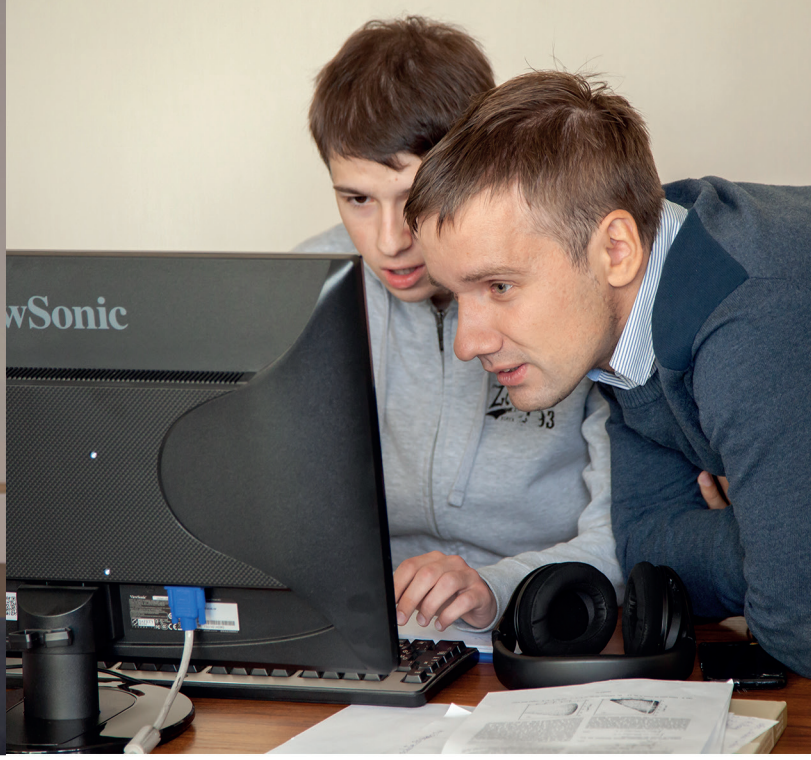


Рисунок 2. Продольный форм-фактор одиночного сгустка

Результаты опубликованы:

1. Coherent Cherenkov diffraction radiation in super-radiant regime as a tool for longitudinal diagnostics. / I. Kishin, E. Kidanova, A. Kubankin, [et al.]. // Radiation Physics and Chemistry. – 2026. – Vol. 240. – Art. ID 113415. – DOI 10.1016/j.radphyschem.2025.113415.
2. The technique of measuring coherent radiation on the MT-25 microtron. / E. Kidanova, I. Kishin, A. Kubankin, [et al.]. // Physics of Particles and Nuclei Letters. – 2025. – Vol. 22. – Iss. 5. – P. 1086–1089. – DOI 10.1134/S1547477125701171.
3. Observation of Cherenkov diffraction radiation from 3D printed plastic targets / E. Kidanova, I. Kishin, A. Kubankin, [et al.]. // Journal of Instrumentation. – 2025. – Vol. 20. – Iss. 7. – Art. ID P07026. – 10 pp. – DOI 10.1088/1748-0221/20/07/P07026.



Лаборатория тяжелых кварков и лептонов

Отдел физики плазмы

Центр высокотемпературной сверхпроводимости и квантовых материалов им. В. Л. Гинзбурга

Поиски больших дополнительных измерений в эксперименте DANSS

Н. А. Скробова

На Калининской АЭС (КАЭС) в рамках эксперимента DANSS проведены поиски Больших Дополнительных Измерений (LED), которые могут объяснить дефицит нейтрино (реакторная антинейтринная и галлиевая аномалии), решить проблему иерархии и малости нейтринных масс. Статистически значимых указаний на существование LED не обнаружено. Для ряда значений размера дополнительного измерения получены лучшие в мире ограничения на массу нейтрино, исключающие параметры, необходимые для объяснения реакторной и галлиевой аномалий.

Теория больших дополнительных измерений (Large Extra Dimensions, LED) была предложена для объяснения Проблемы Иерархий. Если бы эти дополнительные измерения существовали, они могли бы изменять гравитацию на коротких расстояниях, что привело бы к перенормировке массы Планка на больших масштабах. Такая теория предполагает, что наблюдаемое нами пространство-время размерности 3+1 существует на «бране», помещенной в пространство большей размерности, а остальные измерения компактифицированы на масштабе a, обычно не превышающем нескольких мкм. Кроме того, если дополнительные измерения существуют, они могут привести к распространению стерильных нейтрино в балке (многомерном пространстве), что изменит их эффективное смешивание с активными нейтрино. DANSS, как и другие нейтринные эксперименты, может найти искажения в вероятностях осцилляций нейтрино или неожиданные спектральные особенности, которые могут указывать на эффекты в других измерениях. В теории с большими дополнительными измерениями вероятность осцилляции электронного антинейтрино зависит не только от уже известных разностей квадратов масс, но и от размера наибольшего дополнительного измерения a и массы легчайшего нейтрино m_0.

В данной работе был рассмотрен случай одного большого дополнительного измерения, остальные полагаются меньше него. Было показано, что чувствительность DANSS к осцилляциям в LED выше для обратной иерархии нейтринных масс.

Был проведен анализ почти 5.8 млн антинейтринных событий, набранных на двух расстояниях между детектором и реактором. Наблюдаемое отношение спектров зарегистрированных позитронов от реакции обратного бета-распада (ОБР) сравнивалось с предсказаниями в случае существования LED. При таком подходе к анализу сравниваются только искажения спектров ОБР на разных расстояниях от реактора до детектора. Таким образом, систематическая неопределеность, связанная со спектром антинейтрино от реактора, сокращается. Статистически значимых указаний на существование LED обнаружено не было. Статистическая значимость лучшей точки составила лишь 2.0 (1.8)σ для нормальной (обратной) иерархии масс нейтрино. Были получены ограничения для размера дополнительного измерения и массы легчайшего нейтрино. Для ряда областей эти ограничения являются лучшими в мире. Они включают большую долю параметров, предпочитаемых для объяснения в рамках этой модели галлиевой аномалии и реакторной антинейтринной аномалии, включая соответствующие лучшие точки.

Полученные области исключения также согласуются с ограничениями, полученными из данных Daya Bay и MINOS, дополняя их в ряде областей и являясь в этих местах лучшими в мире.

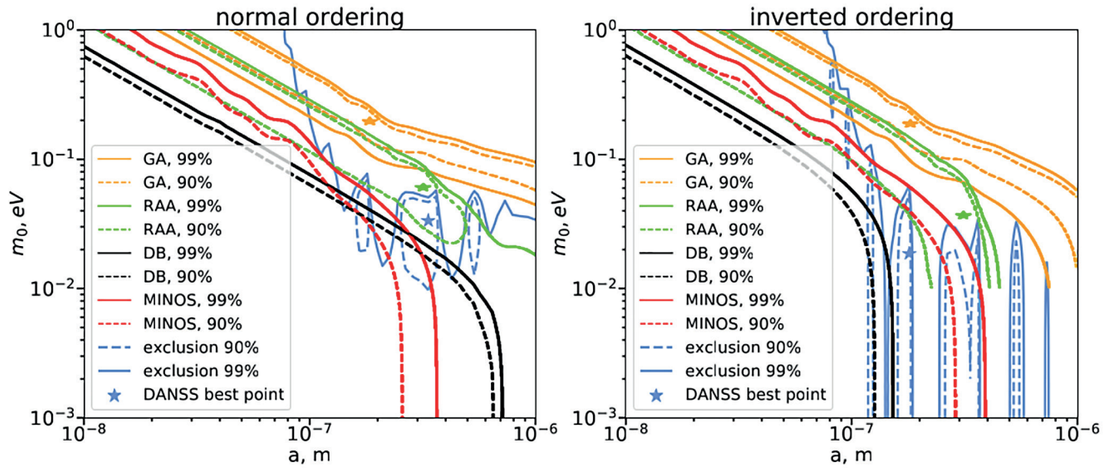


Рисунок 1. Сравнение контуров исключения в пространстве параметров больших дополнительных измерений (размер наибольшего измерения и масса легчайшего нейтрино), построенных по данным DANSS (синие линии), а также объясняющих галлиевую аномалию (оранжевые линии), и реакторную антинейтринную аномалию (зеленые линии) и исключения Daya-Bay (черные линии). Пунктирные линии соответствуют 90 % CL, сплошные 99 % CL. Результаты DANSS (в отличие от Daya-Bay) получены модельно-независимым образом

Результаты опубликованы:

1. Search for Large Extra Dimensions in the DANSS Experiment / I. G. Alekseev, V. V. Belov, A. D. Bystryakov [et al.] // JETP Letters. – 2025. – Vol. 122. – No. 1. – P. 1–7. – DOI 10.1134/S0021364025607110.
2. Gorovtsov, P. Searches for Large Extra Dimensions in the DANSS Experiment / P. Gorovtsov, N. Skrobova // Physics of Atomic Nuclei. – 2025. – Vol. 88. – No. 3. – P. 413–417. – DOI 10.1134/S1063778825600824.

Измерение мощности и восстановление долей деления в энергетическом реакторе с помощью антинейтрино

Н. А. Скробова

На Калининской АЭС (КАЭС) в рамках эксперимента DANSS проводится мониторинг реактора с помощью антинейтрино. За 7 лет измерялась мощность реактора по скорости счета антинейтрино с точностью 1.0 % за недельные периоды. Систематическая неопределенность данного измерения составляет менее 0.8 %. Впервые доли деления ^{239}Pu и ^{235}U были восстановлены по спектру обратного бета-распада антинейтрино. Восстановленные доли деления за двухнедельные измерения совпали с данными КАЭС с точностью лучше 3 %, подтвердив новый метод.

Электронные антинейтрино испускаются в цепочках распада продуктов деления в активной зоне ядерного реактора. Нейтрино почти не взаимодействуют с веществом и легко покидают защиту реактора, поэтому их можно использовать для дистанционного мониторирования ядерных реакторов. Эта идея была более 30 лет назад предложена Микаэляном и соавторами. Однако только сейчас удалось реализовать прецизионное мониторирование мощности ядерного реактора с помощью антинейтрино, сравнимое по точности с конвенциональными методами.

Детектор DANSS расположен под активной зоной энергетического реактора мощностью 3.1 ГВт на Калининской атомной электростанции (КАЭС) и регистрирует до 5000 событий с антинейтрино в день. Для измерения мощности реактора с помощью антинейтринного счета, производилась нормировка наблюдаемой скорости счета в течение месяца работы детектора в ноябре 2016 г. Кроме того, измеренные скорости счета антинейтринных событий корректируются на эффективность детектора, мертвое время и выгорание топлива (данные о долях деления предоставлены со станции). В результате, DANSS измерял изменения мощности реактора по скорости счета антинейтрино в течение 7 лет с точностью 1.0 % за недельные периоды. Систематическая неопределенность данного измерения составляет менее 0.8%. Она сравнима с точностью традиционных методов измерения мощности реактора, хотя основана на совершенно ином подходе.

В рамках данной работы впервые в мире доли деления ^{239}Pu и ^{235}U были восстановлены с использованием спектра обратного бета-распада (ОБР) антинейтрино, что является совершенно новой методикой. В реакции ОБР практически вся энергия антинейтрино передается позитрону. Спектры зарегистрированных в детекторе позитронов отличаются для разных делящихся изотопов как по форме, так и по абсолютной нормировке. Основные делящиеся изотопы в энергетическом реакторе – это ^{235}U, ^{238}U, ^{239}Pu, ^{241}Pu.

Доли деления ^{238}U и ^{241}Pu невелики и изменяются мало по ходу топливной кампании. Поэтому для параметризации зависимости долей деления ^{238}U и ^{241}Pu от времени можно использовать стандартную топливную кампанию. Тогда единственный неизвестный параметр – это доля деления ^{239}Pu (которая вместе с другими долями деления в сумме составляет 1). Для исследуемой топливной кампании доля деления ^{239}Pu извлекается путем фитирования наблюдаемого позитронного спектра за время набора около двух недель модельными предсказаниями со свободной долей деления ^{239}Pu.

Этот метод был применен к данным трех топливных кампаний (продолжительностью примерно 1.5 года каждая). Для предсказанных антинейтринных спектров использовались модели Хубера и Мюллера и модель на основе данных Курчатовского института. Восстановленные доли деления за примерно двухнедельные измерения и доли деления, предоставленные КАЭС, совпали с точностью лучше 3 % (для обеих моделей). Это подтверждает надежность двух совершенно различных подходов к определению долей деления. На Рисунке 1 представлено сравнение восстановленных долей деления ^{239}Pu по антинейтринному счету и расчетных данных со станции для топливной кампании №6.

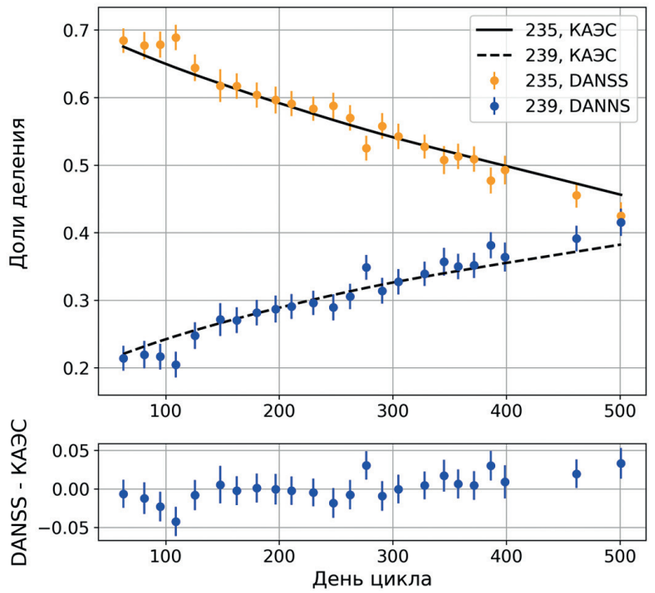


Рисунок 1. Вверху: доли деления для ^{235}U и ^{239}Pu, полученные на основе фитирования спектра ОБР (желтый и синий кружки соответственно). Данные, полученные с КАЭС, показаны сплошной и пунктирной линиями соответственно. Внизу: разница между долями деления ^{239}Pu, полученными с КАЭС, и результатами анализа спектра ОБР. Иллюстрации для топливной кампании №6

Результаты опубликованы:

1. Long term remote reactor power and fuel composition monitoring using antineutrinos / I. Alekseev, V. Belov, A. Bystryakov [et al.] // Physics Letters. Section B: Nuclear, Elementary Particle and High-Energy Physics. – 2025. – Vol. 866. – Art. ID 139575. – 7 pp. – DOI 10.1016/j.physletb.2025.139575.
2. Samigullin, E. Nuclear Power Reactor Studies with Antineutrinos from the DANSS Experiment / E. Samigullin, N. Skrobova // Physics of Atomic Nuclei. – 2025. – Vol. 88. – No. 4. – P. 561–567. – DOI 10.1134/S1063778825601040.

Лаборатория тяжелых кварков и лептонов

Монте-Карло моделирование процессов с обменом тяжелым нейтрино на лептонных коллайдерах

А. Друцкой, Е. Васенин

Исследуется вклад тяжелых правых нейтрино (heavy neutral leptons, HNL) в процесс $e^+e^- \to W^+W^-$. Этот процесс чувствителен к тяжелым нейтрино с массами, превышающими энергию столкновения. Проведено моделирование методом Монте-Карло в рамках модели типа-I seesaw. Показано, что интерференция стандартной амплитуды со вкладом HNL приводит к характерным изменениям угловых распределений рождения и распада W-бозонов. С применением метода расширенного правдоподобия получены верхние пределы на параметр смешивания $|V_{eN}|^2$ как функцию массы тяжелого нейтрино.

Тяжелые правые нейтрино возникают в расширениях Стандартной модели в рамках подхода, объясняющего малые массы активных нейтрино. В модели типа-I seesaw такие частицы вводятся как синглетные фермионы, взаимодействующие с лептонным сектором через юкавские взаимодействия. Наличие тяжелых нейтрино приводит к естественному объяснению малости масс активных нейтрино и предсказывает существование тяжелых нейтральных лептонов.

В данной работе исследуется процесс $e^+e^- \to W^+W^-$, в котором возможен вклад тяжелого правого нейтрино через t-канальный обмен. В Стандартной модели этот процесс описывается диаграммами с обменом фотона или Z-бозона в s-канале, а также обменом легкого нейтрино в t-канале. При наличии тяжелого правого нейтрино возникает дополнительная t-канальная амплитуда, интерферирующая со стандартным вкладом. Это приводит к изменениям угловых распределений W-бозонов.

Моделирование выполнялось для будущего линейного электрон-позитронного коллайдера при энергии центра масс $\sqrt{s} = 1$ ТэВ и поляризации пучков $P(e^+e^-) = (20\%, -80\%)$, что соответствует стандартной конфигурации проекта International Linear Collider. Генерация событий проводилась с использованием генератора WHIZARD с подключенной моделью HeavyN. Распады W-бозонов и адронизация моделировались программой Pythia6, быстрая симуляция детектора выполнялась пакетом DELPHES, а анализ реконструированных событий проводился с использованием пакета ROOT.

В анализе рассматривался канал распада W-бозонов на адроны с образованием четырех струй. Для реконструкции струй применялся алгоритм Valencia. Отбор событий включал требования на поперечный импульс и псевдобыстроту струй, а также дополнительные кинематические ограничения, позволяющие подавить фоновые процессы.

Основными фоновыми процессами являются $e^+e^- \to W^+W^-$, $e^+e \to q\bar{q}$, $e^+e^- \to ZZ$, а также процессы с нейтрино в конечном состоянии. Для подавления фона применялись ограничения на инвариантные массы струй и суммарный поперечный импульс события.

Для оценки вклада тяжелых нейтрино использовались угловые распределения рождения и распада W-бозонов. Поскольку тяжелое нейтрино имеет большую массу, распределения углов отличаются от предсказаний Стандартной модели. Для количественной оценки чувствительности применялся метод расширенного правдоподобия, учитывающий как изменение формы распределений, так и изменение числа событий.

Получены верхние пределы на параметр смешивания $|V_{eN}|^2$ как функцию массы тяжелого нейтрино $M(N)$. Соответствующая зависимость показана на Рисунке 1. Показано, что будущие лептонные коллайдеры при энергии порядка 1 ТэВ способны существенно улучшить существующие ограничения в области масс $0.3 < M(N) < 1$ ТэВ, а также сохраняют чувствительность вплоть до масс порядка 10 ТэВ.

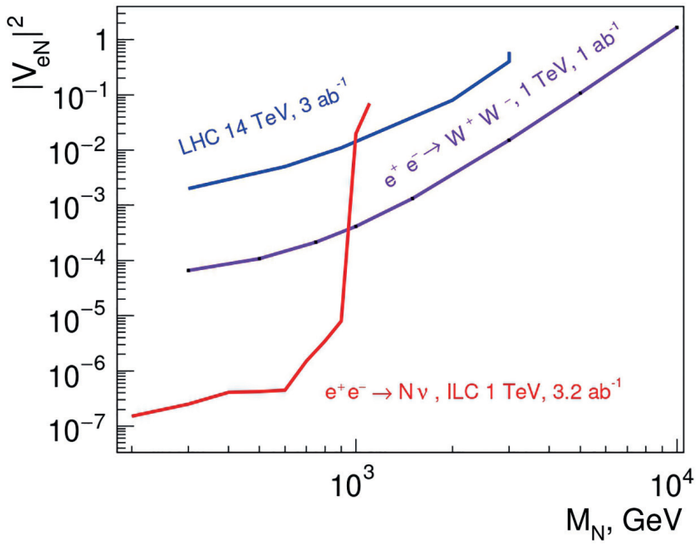


Рисунок 1. Верхние пределы на параметр смешивания $|V_{eN}|^2$ как функцию массы тяжелого нейтрино $M(N)$. Полученные результаты для $\sqrt{s} = 1$ ТэВ сравниваются с ожидаемой чувствительностью экспериментов на LHC и поисками прямого рождения тяжелых нейтрино

Результаты опубликованы:

1. Drutskoy, A. Simulation of the process $e^+e^- \to W^+W^-$ with the heavy right-handed neutrino exchange at 1 TeV future lepton colliders / A. Drutskoy, E. Vasenin // Physical Review D. – 2025. – Vol. 111. – No. 1. – Art. ID 015025. – 7 pp. – DOI 10.1103/physrevd.111.015025.

Фокусировка убегающих электронов в плотном газе неоднородным магнитным полем

Н. М. Зубарев, М. И. Яландин, Ю. И. Мамонтов

В рамках 2D-3V модели Монте-Карло описана фокусировка неоднородным магнитным полем трубчатого потока убегающих электронов (УЭ) в плотном газе. Выявлены качественные различия в поведении УЭ для различных конфигураций электродов. При сравнительно большом диаметре трубчатого катода (22 мм) вероятность прохождения УЭ области магнитного зеркала не превышала 20%, а при малом (8 мм) была в разы выше. Это объясняет регистрируемые в экспериментах более высокие токи УЭ для катодов сравнительно малого диаметра.

Описана фокусировка неоднородным магнитным полем трубчатого потока убегающих электронов (УЭ) в плотном газе – азоте атмосферного давления. Кинетика УЭ рассчитывалась в рамках кинетической осесимметричной 2D-3V (две координаты – три компоненты скорости) модели Монте-Карло для двух различных электродных конфигураций – с трубчатыми катодами большого и малого диаметра в 22 и 8 мм, соответственно (см. Рисунок 1).

Установлено, что для большего диаметра катода в типичных экспериментальных условиях – напряжение 110 кВ и максимальное магнитное поле 5 Тл – вероятность прохождения УЭ области магнитного зеркала не превышает 20 %. Основными каналами потерь УЭ были отражение от магнитного зеркала (40 %), термализация (30 %) и дрейф поперек линий магнитного поля (10 %).

Для меньшего диаметра катода вероятность прохождения области магнитного зеркала оказалась в разы выше – она составила 60 % (отражается только 15 %), причем она увеличивается до 75 % при увеличении приложенного к газовому зазору напряжения до 130 кВ.

Таким образом, выявлены качественные различия в поведении УЭ для различных электродных систем. Полученные результаты объясняют более высокие регистрируемые в экспериментах токи УЭ для трубчатых катодов малого диаметра, несмотря на меньшую площадь эмитирующей поверхности.

Определены также сходства и различия в поведении электронов в плотном газе и вакууме. Показано, что наибольшую вероятность достижения анода в газе имеют электроны, стартующие с края катода под углами, соответствующими траекториям с минимальным временем пролета через межэлектродный промежуток в вакууме (см. Рисунок 2). Такие траектории обеспечивают минимальную амплитуду циклотронных осцилляций электронов.

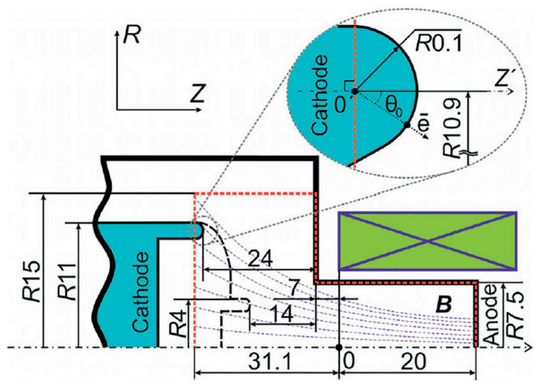


Рисунок 1. Геометрия задачи (единица длины – миллиметр). При моделировании использовались типичные экспериментальные условия: разность потенциалов 110 кВ и максимальное магнитное поле 5 Тл

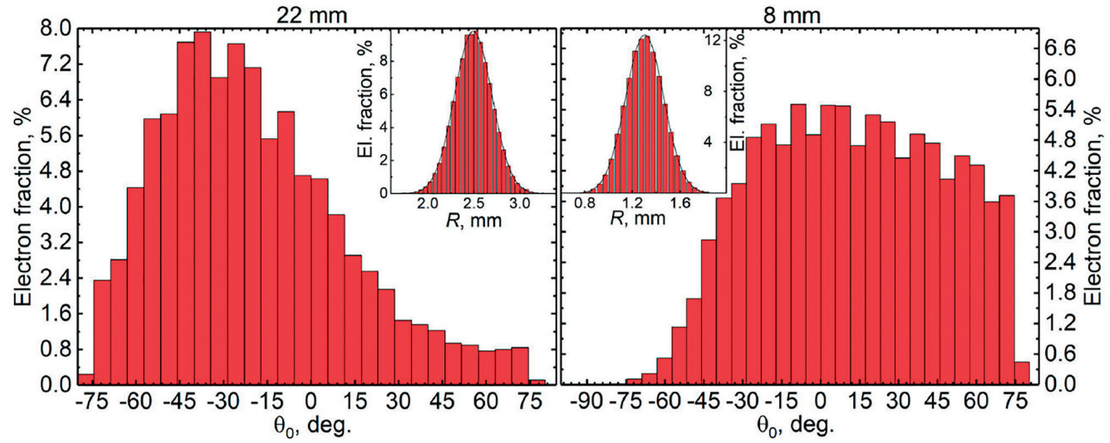


Рисунок 2. Распределения УЭ, преодолевших магнитное зеркало в плотном газе (азот атмосферного давления), по углу эмиссии для 22 и 8 мм катодов. На вставках – радиальные распределения электронов на аноде, демонстрирующие фокусировку потока УЭ в неоднородном магнитном поле

Результаты опубликованы:

1. Mamontov, Yu. I. Simulation of runaway electron kinetics in magnetized gas diodes with a strongly inhomogeneous electric field. / Yu. I. Mamontov, M. I. Yalandin, N. M. Zubarev. // Phys. Plasmas. – 2025. – Vol. 32. – Iss. 5. – Art. ID 053502. – 11 pp. – DOI 10.1063/5.0273887.
2. Зубарев, Н. М. Кинетика радиального потока убегающих электронов в поперечном магнитном поле. / Н. М. Зубарев, Ю. И. Мамонтов, М. И. Яландин. // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – Вып. 11. – 21 стр. – DOI 10.30898/1684-1719.2025.11.22.
3. Зубарев, Н. М. Размеры прикатодных плазменных областей – источников убегающих электронов – в условиях резко неоднородного электрического поля. / Н. М. Зубарев, О. В. Зубарева, М. И. Яландин. // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – Вып. 11. – 22 стр. – DOI 10.30898/1684-1719.2025.11.19.

Отдел физики плазмы

Определение энергии сгустка убегающих электронов методом анализа сопутствующего микроволнового излучения

Н. М. Зубарев, М. И. Яландин, А. А. Вихарев, Н. С. Гинзбург, И. В. Зотова, Л. Н. Лобанов, В. В. Ростов, К. А. Шарыпов, В. Г. Шпак, С. А. Шунайлов

Анализ сопутствующего микроволнового излучения позволяет определить кинетическую энергию пикосекундного сгустка убегающих электронов с энергией в сотни килоэлектронвольт, сформированного в воздушном промежутке. Черенковское излучение замагниченного сгустка в диэлектрической замедляющей системе даёт оценку энергии электронов за один импульс, так как дисперсионные кривые возбуждаемых мод TE11 и TM01 вырождаются, начиная с некоторой частоты. Поэтому спектральный пик излучения не смещается при регистрации в произвольной точке диаграммы направленности.

Оценка кинетической энергии сгустков убегающих электронов (УЭ), формируемых в газовых электродных промежутках – важный вопрос при изучении критериев их появления, анализе физики эмиссии и для практических применений. При энергиях в сотни килоэлектронвольт пикосекундные сгустки УЭ в сильном продольном магнитном поле могут проходить достаточно длинные дистанции с малыми потерями, сохраняя поперечную структуру (Рисунок 1). В этих условиях возможен анализ их энергии по спектрам сопутствующего микроволнового излучения.

Излучение сгустка, проходящего в продольном магнитном поле через полый волновод или канал диэлектрика, представляет собой спектральные пики, связанные с циклотронным и черенковским механизмами возбуждения волноводных мод. Однако излучение при циклотронном резонансе электронов на обратных ветвях дисперсионных характеристик мод пустого волновода или вблизи их критических частот не позволяет однозначно оценить кинетическую энергию сгустка УЭ по спектру возбуждаемых микроволн. Это потребовало бы за одно включение идентифицировать моды спектральных пиков.

Такая идентификация не требуется, когда наблюдается интенсивное микроволновое черенковское излучение при фазовом синхронизме электронов с модами замедляющей системы (ЗС) в виде волновода с диэлектрической втулкой. Как показали расчёты, дисперсионные характеристики низших, преимущественно возбуждаемых мод TM01 и HE11 такой ЗС вырождены, начиная с некоторой частоты (Рисунок 2, (а)). Область вырождения задаёт верхний предел для оценок энергий сгустков – в нашем случае ≈400 кэВ. Пик черенковского излучения на частоте 20 ГГц, соответствующий синхронизму 30-пикосекундного сгустка с любой из указанных мод при его типичной энергии ≈280 кэВ, наблюдался вне зависимости от точки регистрации – в центре или на периферии диаграммы направленности (Рисунок 2, (б)). Эти данные соответствовали контрольным измерениям энергии времяпролётным методом и дублировались при других значениях энергии электронов и частоты излучения.

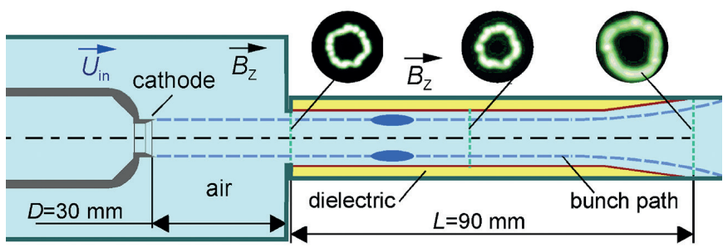


Рисунок 1. Геометрия газового диода – источника УЭ, диэлектрической замедляющей системы и структура трубчатого сгустка УЭ при дрейфе в магнитном поле ≈3 Тл

Отметим, что сильное ведущее магнитное поле позволяет отстроиться от паразитного (в данном случае) циклотронного резонанса и выделить спектральные пики черенковского излучения, которое является когерентным. Когерентность была подтверждена численным моделированием возбуждения черенковского излучения коротким электронным сгустком в вакуумном приближении. В этих расчётах также было показано, что когерентным будет суммарное излучение набора дискретных 30-пс сгустков, образующих трубчатый поток УЭ (Рисунок 1) при нестабильности их эмиссии ≈10 пс.

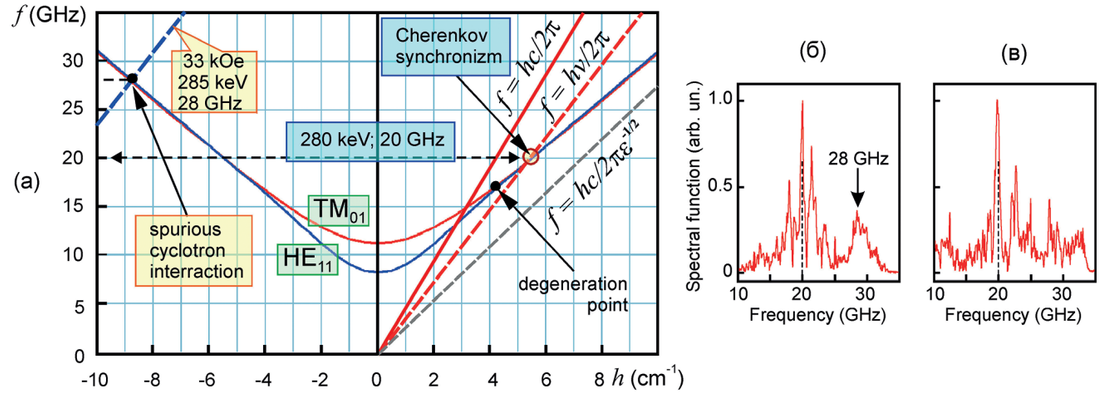


Рисунок 2. (а) дисперсионные характеристики мод HE11 и TM01 в замедляющей системе (волновод с диэлектриком) и точка черенковского синхронизма для электронного потока с энергией 280 кэВ; (б), (в) спектры черенковского излучения, полученные на оси и на периферии диаграммы направленности, соответственно

Результаты опубликованы:

1. Ginzburg, N. S. Characterization of the energy of runaway electron bunches by analyzing emitted microwave radiation / N. S. Ginzburg, L. N. Lobanov, V. V. Rostov, [et al.]. // Phys. Plasmas. – 2025. – Vol. 32. – Iss. 5. – Art. ID 053103. – 7 pp. – DOI 10.1063/5.0271488.

Отдел физики плазмы

Лазерная генерация импульсов звука в массивных металлических образцах

Е. А. Данилов, С. А. Урюпин

Изучено возбуждение звука при воздействии на массивный металл импульса лазерного излучения. Описана форма генерируемых акустических импульсов. Показано, что при возбуждении звука из-за нагрева электронов ширина звукового импульса определяется временем, за которое звук догоняет фронт теплового потока. Передача энергии от электронов к решетке приводит к уменьшению области прогрева металла, что сопровождается сокращением длительности звукового импульса до времени прохождения звука по области прогрева.

Воздействие лазерных импульсов на металлы сопровождается генерацией импульсов звука. Импульсы звука используются, например, для исследования структуры образцов, обнаружения инородных образований, для изучения физических свойств и процессов в металлах. Важными характеристиками генерируемых акустических импульсов являются их форма и ширина. Несмотря на наличие большого числа экспериментальных данных по генерации импульсов звука, их детальное теоретическое описание к настоящему времени отсутствует. Работа [1] посвящена изучению формы звуковых импульсов, генерируемых в массивном металле из-за нагрева электронов, а также одновременного нагрева электронов и решетки.

Рассмотрено воздействие импульса несфокусированного лазерного излучения на массивный металл. Записаны и решены уравнения, описывающие нагрев металла и деформацию кристаллической решетки. Получены общие выражения для смещения атомов решетки. С их помощью проведен анализ формы акустических импульсов и определена их характерная ширина. Основное внимание уделено генерации звука из-за воздействия греющего металл фемтосекундного лазерного импульса. При слабом нагреве решетки генерация звука происходит из-за нагрева электронов. В этом случае акустический импульс состоит из резкого переднего фронта шириной порядка времени, за которое звук достигает фронта теплового потока τ_{sh}, и медленно убывающего хвоста, возникающего из-за того, что распространяющийся тепловой поток продолжает генерировать звук (см. Рисунок 1, а)). При этом время τ_{sh} порядка 1 нс для типичных металлов.

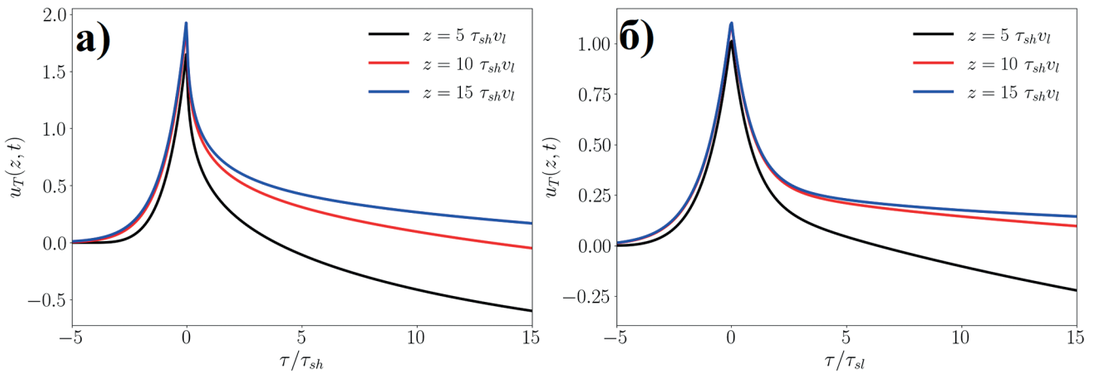


Рисунок 1. Зависимость смещения атомов решетки серебра $u_T(\tau)$ от времени $\tau = t - z/v_l$ (v_l – продольная скорость звука), возникающего из-за нагрева электронов а) и электронов и решетки б), на различных расстояниях от поверхности z. Для серебра $\tau_{sh} \approx 1$ нс и $\tau_{sl} \approx 25$ нс

В свою очередь, наличие заметного нагрева решетки приводит к изменению ширины звуковых импульсов. Это связано с тем, что передача энергии от электронов к решетке происходит за меньшее время ~1 пс. За это время тепловая энергия проникает на глубину ~100 нм. Поскольку теплоемкость решётки значительно превышает теплоемкость электронов, а ее теплопроводность существенно меньше электронной, тепловая энергия длительное время остается в этой области. Это приводит к тому, что звук проходит по прогретой области быстрее, чем изменяется профиль температуры. Как следствие, ширина акустического импульса сокращается с τ_{sh} до времени τ_{sl} – времени прохождения звука по области прогрева металла. Это время для типичных металлов составляет примерно 20 пс. При этом форма импульса аналогична имеющей место в случае генерации из-за нагрева электронов (см. Рисунок 1, б)). А именно, профиль смещения содержит резкий передний фронт шириной τ_{sl}, и медленно убывающий хвост.

Помимо фемтосекундного лазерного воздействия было изучено возбуждение звука пикосекундными и наносекундными лазерными импульсами, когда длительность лазерного импульса превышает характерные времена τ_{sh} или τ_{sl}. В этом случае звуковой импульс в области прогрева почти не виден на фоне смещения атомов решётки, которое подстраивается под вид распределения теплового потока (см. Рисунок 2). В свою очередь, впереди фронта теплового потока проявляется акустический импульс с характерной шириной порядка длительности лазерного импульса t_p и медленно спадающим хвостом.

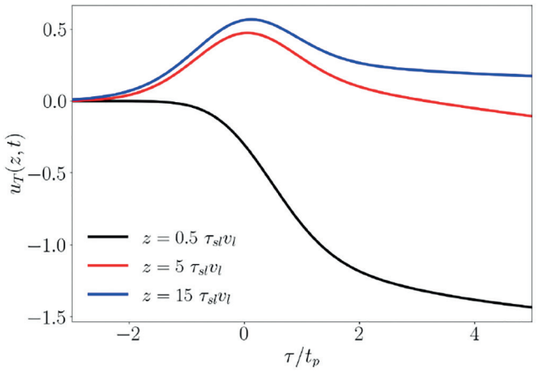


Рисунок 2. Смещения атомов решетки серебра $u_T(\tau)$ при $t_p = 50$ пс на различных расстояниях от поверхности z

Результаты опубликованы:

1. Данилов, Е. А. Звуковые импульсы, возникающие при воздействии лазерного импульса на металл. / Е. А. Данилов, С. А. Урюпин. // Journal of Experimental and Theoretical Physics. – 2025. – Vol. 168. – Iss. 4. – P. 453–463. – DOI 10.7868/S3034641X25100014.

Аномальный перенос заряда и энергии в неизотермической плазме и расчёт плотности тока в полых катодах

С. А. Урюпин, А. А. Шелковой

Не налагая ограничений на величину индуцированного рассеяния волн на ионах, мы получили численное решение нелинейного интегрального уравнения для распределения ионно-звуковых волн по углам волнового вектора. С помощью полученного решения найдены электронные потоки заряда и энергии в плазме с ионно-звуковой турбулентностью в широком диапазоне скоростей направленного движения электронов. Вычислена плотность тока на выходе из полого катода.

Полые катоды находят своё применение в исследованиях взаимодействия плазмы с поверхностью, нанесении покрытий и двигателях космических аппаратов. Установлено, что в полых катодах ключевой неустойчивостью является ионно-звуковая. Именно она является причиной аномального сопротивления и турбулентного нагрева основной массы ионов. В полых катодах основной вклад в потоки заряда и энергии вносят электроны. Как известно, электронные потоки в неизотермической плазме существенно зависят от вида распределения ионно-звуковых волн по углам волнового вектора θ_k, которое описывается функцией $\Psi(\cos\theta_k)$. Полученные ранее выражения для $\Psi(\cos\theta_k)$ применимы лишь при малых или больших значениях параметра

$$K = \frac{6\pi R r_{Di}^2}{mnv_s\omega_{Li}r_{De}^2(1+\delta)^2}, \qquad (1)$$

который зависит от: $R = |enE - \nabla n\kappa T|$; e – заряда, n – плотности, κT – температуры, m – массы, r_{De} – дебаевского радиуса электронов; ω_{Li} – ленгмюровской частоты и r_D – дебаевского радиуса ионов, v_s – скорости ионно-звуковых волн, E – напряженности электрического поля, а также δ – отношения декремента затухания ионно-звуковых волн на горячих ионах к декременту затухания на электронах. В свою очередь, в работе [1] установлено, что в экспериментах, проводимых в полых катодах, параметр $K \sim 1$, поэтому аналитические выражения для $\Psi(\cos\theta_k)$, полученные для случаев малых или больших K, могут давать существенную ошибку при вычислении электронных потоков заряда и энергии.

В работе [1], не налагая каких-либо ограничений на величину индуцированного рассеяния волн на ионах, получено численное решение интегрального уравнения для функции $\Psi(\cos\theta_k)$. Это решение дополняет аналитические выражения для $\Psi(\cos\theta_k)$, полученные ранее, и пригодно в случае $K \sim 1$. С его помощью можно вычислить плотность тока в полых катодах:

$$j = envs\left[\frac{3}{2}\beta_1 + \frac{16}{\pi}\beta(1+\delta) - \frac{24}{\pi}\beta(1+\delta)\frac{n}{R}\frac{\partial\kappa T}{\partial z}\right], \qquad (2)$$

где β и β_1 – коэффициенты (см. Рисунок 1, (a) – (c)). С хорошей точностью зависимости β и β_1 от K можно аппроксимировать функциями

$$\beta = 0.023 + 0.285\sqrt{K} + \frac{0.154}{1+0.46\sqrt{K}}, \qquad (3)$$

$$\beta_1 = \frac{1.23 + 0.91\sqrt{K}}{1.5 + \sqrt{K}}, \qquad (4)$$

дающими правильные асимптотики при $K \ll 1$ и $K \gg 1$.

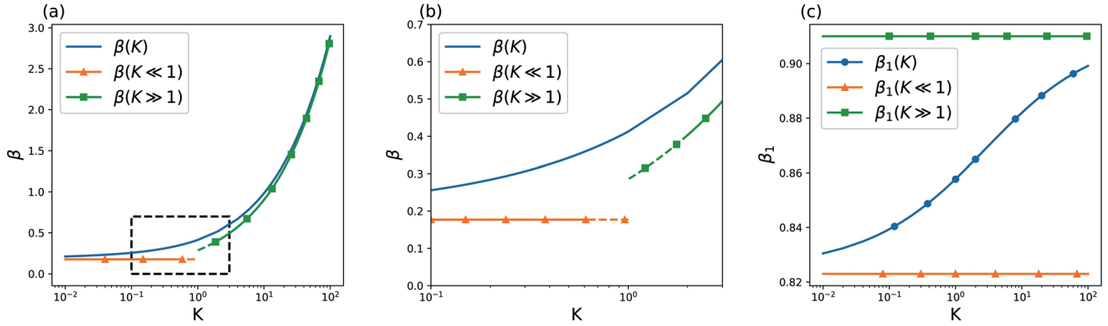


Рисунок 1. Зависимости коэффициентов β и β_1 от K

В работе [1] дано сравнение плотности тока, вычисленной по формуле (2), с экспериментальным значением плотности тока. Участок, в котором максимальна турбулентная частота столкновений в плазме ксенона, находится в интервале от 1.6 до 1.7 см от выхода из полого катода. На этом интервале расстояний плотность электронов n уменьшается с 1.25×10^{13} см$^{-3}$ до 1.08×10^{13} см$^{-3}$, температура электронов убывает с 3.40 эВ до 3.37 эВ, а потенциал поля φ убывает с 13.9 В до 13.7 В. В этих условиях для градиентов давления и температуры имеем $\nabla n\kappa T = 5.65\times10^{13}$ эВ/см^4, $\nabla\kappa T = -0.278$ эВ/см, а напряженность поля $E = -\nabla\varphi = 1.85$ В/см. Кроме того, для вычисления плотности тока необходимо знать параметр δ, который зависит от температуры горячих ионов. При расчетах учтено, что в аналогичных условиях температура горячих ионов T_h в несколько раз превышает T. В указанных условиях установлено, что на расстоянии 1.7 см от выхода из полого катода $j = 9.9\div10.9$ А/см^2. В свою очередь, экспериментальное значение плотности тока в этой точке $j_{exp} = 14.9$ А/см^2. Как можно видеть, с учётом погрешностей измерения и отсутствия данных о температуре горячих ионов, расчёт по формуле (2) даёт плотность тока, близкую к j_{exp}.

Результаты опубликованы:

1. Shelkovoy, A. A. Anomalous charge and energy transfer in a nonisothermal plasma and possibility of calculation of current density in hollow cathodes. / A. A. Shelkovoy, S. A. Uryupin. // Phys. Rev. E. – 2025. – Vol. 112. – Iss. 2. – Art. ID 025210. – 6 pp. – DOI 10.1103/dtq6-43xn.

Отдел физики плазмы

Возбуждение поверхностной электромагнитной волны бегущим джозефсоновским вихрем

А. С. Малишевский, С. А. Урюпин

Описано возбуждение поверхностной электромагнитной волны терагерцового диапазона джозефсоновским вихрем, движущимся по протяжённому джозефсоновскому сандвичу с постоянной скоростью. Сандвич помещён в диэлектрик, при этом поверхностная волна распространяется вдоль внешней поверхности сандвича и имеет скорость, меньшую скорости света в диэлектрике. Найдена амплитуда магнитного поля поверхностной волны, генерируемой позади вихря, и переносимый волной поток энергии.

На сегодняшний день актуально исследование методов генерации терагерцовых волн с использованием компактных твердотельных устройств. В частности, широко исследуются методы, использующие структуры с джозефсоновским взаимодействием, в которых источником волн являются джозефсоновские вихри. В простейшей структуре типа сандвича генерация электромагнитных волн вихрем рассматривалась в ряде работ, в частности, описано черенковское излучение джозефсоновского вихря во внешний диэлектрик. Возможность такого излучения реализуется при скорости вихря больше скорости света в диэлектрике.

Нами рассмотрены иные условия, когда скорость вихря в сандвиче меньше скорости света в диэлектрике. В этих условиях вихрь возбуждает досветовую поверхностную терагерцовую волну, которая распространяется вдоль поверхности сандвича. Терагерцовые поверхностные волны могут составить основу потенциально эффективного способа реализации интегрированных терагерцовых устройств и систем.

Рассмотрен вихрь в джозефсоновском сандвиче, помещённом в диэлектрик. Движение вихря описывается в приближении, когда характерный пространственный масштаб велик по сравнению с лондоновской глубиной λ, а скорость вихря v меньше скорости света в диэлектрике c_m.

Интересуясь возможностью возбуждения поверхностной волны вихрем, естественно рассмотреть условия, в которых влияние самой волны на вихрь мало. В этих условиях магнитное поле волны на поверхности сандвича можно найти аналитически. Оно изображено на Рисунке 1. Там же для сравнения показано поле самого вихря, возбудившего эту волну. На Рисунке 1 бегущая координата $\zeta = z - vt$ обезразмерена на джозефсоновскую длину λ_J. При построении выбраны следующие параметры системы: $\lambda/\lambda_J = 0.01$, скорость Свихарта сандвича равна c_m, толщина сверхпроводящих электродов равна 4 λ, размер вихря составляет 0.4 длины поверхностной волны.

Пространственная структура магнитного поля вблизи сандвича, создаваемого вихрем, показана на Рисунке 2 в виде тепловой карты при тех же значениях параметров системы. Рисунок 2 построен в той же области изменения координаты ζ, что и Рисунок 1, и в широком диапазоне значений координаты x, которая отсчитывается в глубь диэлектрической среды.

Видно, что при $\zeta < 0$ наблюдается четко выраженная волна с периодически чередующимися минимумами (черные области) и максимумами (светлые области). Хорошо видно, что область локализации этой поверхностной волны за пределами сандвича значительно больше лондоновской глубины.

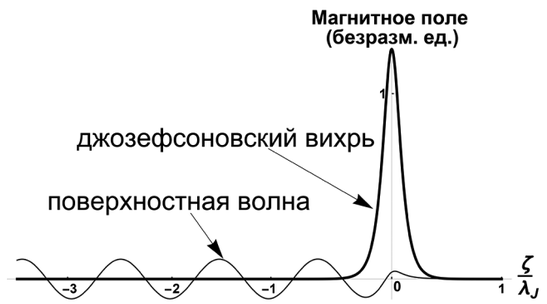


Рисунок 1. Безразмерное поле на поверхности сандвича и поле вихря как функции безразмерной бегущей координаты

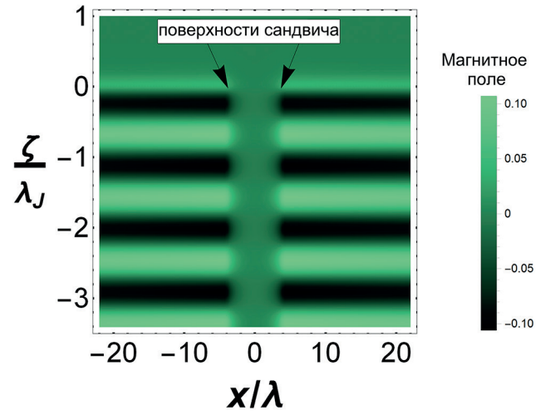


Рисунок 2. Линии уровня безразмерного магнитного поля, создаваемого вихрем, в плоскости безразмерных координат

Для типичных параметров сандвича и скоростей вихря, близких к скорости Свихарта сандвича, частота генерируемой поверхностной волны попадает в терагерцовый диапазон.

Так как поле поверхностной волны в основном локализовано во внешнем диэлектрике, в области шириной большей, чем лондоновская длина, то основной вклад в поток энергии поверхностной волны вдоль структуры происходит от внешнего диэлектрика. Для сандвичей, у которых размер в направлении, перпендикулярном как направлению движения вихря, так и направлению протекания джозефсоновского тока, составляет порядка 100 λ_J, мощность поверхностной волны составляет несколько десятков милливатт.

В экспериментах равномерное движение вихря можно поддерживать сторонним током, ускоряющее действие которого компенсирует замедление, вызванное возбуждением поверхностной волны. Такое управление скоростью вихря позволяет надеяться на возможность генерации поверхностных терагерцовых волн, плавно перестраиваемых по частоте. Поскольку поле поверхностной волны в основном сосредоточено вне сандвича, то несложно реализовать эффективный вывод излучения из слоистой структуры.

Результаты опубликованы:

1. Malishevskii, A. S. Excitation of a surface electromagnetic wave by a traveling Josephson vortex. / A. S. Malishevskii, S. A. Uryupin. // Physics Letters A. – 2025. – Vol. 540. – Art. ID 130389. – DOI 10.1016/j.physleta.2025.130389.

Отдел физики плазмы

Формирование микрорельефа поверхности медных электродов при радиочастотном вакуумном пробое

С. А. Баренгольц, Е. В. Орешкин

Представлены результаты численного моделирования микровзрывных процессов на поверхности медных электродов, сопровождающих радиочастотный вакуумный пробой. Использованное при расчетах широкодиапазонное уравнение состояния вещества позволило исследовать динамику изменения фазового состояния медного электрода при этом пробое. Определены условия формирования микровыступов на бруствере образующегося при выдавливании жидкого металла кратера. Эти микровыступы способствуют самоподдержанию разряда или приводят к инициированию нового пробоя при воздействии следующего импульса электромагнитной волны.

Исследование радиочастотного вакуумного пробоя прототипов ускорительных структур показало, что во многих случаях он возникает спонтанно и неконтролируемо, т. е. перед его инициированием структура подвергается воздействию десятков – сотен тысяч импульсов без пробоя. Наряду с этим типом пробоя, получившим название «обычный пробой» (NL-BD), существует так называемый «пробой на следующем импульсе» (FP-BD). Как понятно из названия, FP-BD пробой возникает при подаче следующего за NL-BD пробоем импульса электромагнитной волны.

Сравнительный анализ характеристик радиочастотного вакуумного пробоя ускорительной структуры и вакуумного пробоя при постоянном напряжении на диоде показал, что в их основе лежат одни и те же физические процессы. В обоих случаях пробой сопровождается резким ростом эмиссионного тока, а в месте привязки тока на катоде формируются поражения поверхности в виде кратеров микронного размера.

Предполагаемая длительность воздействия ускоряющей радиочастотной электромагнитной волны составляет 250 нс, т. е лежит в наносекундном диапазоне. Исследование вакуумного пробоя диода в этом временном диапазоне показало, что основной его причиной является электрической взрыв микровыступов на катоде под действием эмиссионного тока высокой плотности. Эмиссионный ток в диоде резко возрастает при переходе вещества катода в плазменное состояние, когда эмиссия электронов происходит с границы расширяющейся плазмы. Это явление было названо взрывной электронной эмиссией. Воздействие разлетающейся плазмы на жидкометаллическую ванну в основании микровыступа приводит к образованию кратеров на поверхности катода.

Для моделирования микровзрывных процессов на катоде при радиочастотном вакуумном пробое использовалась магнитогидродинамическая программа, которая включает совместное решение систем уравнений гидродинамики, отражающих законы сохранения массы, импульса и энергии, а также уравнений Максвелла и закона Ома. Используемое при расчетах широкодиапазонное уравнение состояния меди позволило исследовать динамику изменения фазового состояния катода при микровзрывных процессах.

Результаты этих расчетов представлены на Рисунке 1, а) и б). Из рисунков видно формирование нового микровыступа, который увеличивается со временем и с высокой степенью вероятности может привести к инициированию пробоя при подаче следующих импульсов электромагнитной волны (FP-BD пробою).

Проведенный анализ формирования рельефа поверхности при микровзрывных процессах, сопровождающих радиочастотный вакуумный пробой, позволяет сделать вывод о том, что в основе механизма инициирования FP-BD пробоя лежат те же процессы, которые определяют механизм самоподдержания вакуумного дугового разряда. Если амплитуда взрывоэмиссионного тока достаточна для формирования новых микровыступов, то они становятся инициаторами пробоя при подаче следующих импульсов радиочастотной электромагнитной волны. Кроме этого, образующиеся микровыступы могут приводить к инициированию новых взрывоэмиссионных центров в течение времени воздействия импульса электромагнитной волны, обеспечивая поддержание разряда. Существует некоторое пороговое значение амплитуды тока, ниже которого новые микровыступы не формируются и условия для нового пробоя или самоподдержания разряда не возникают.

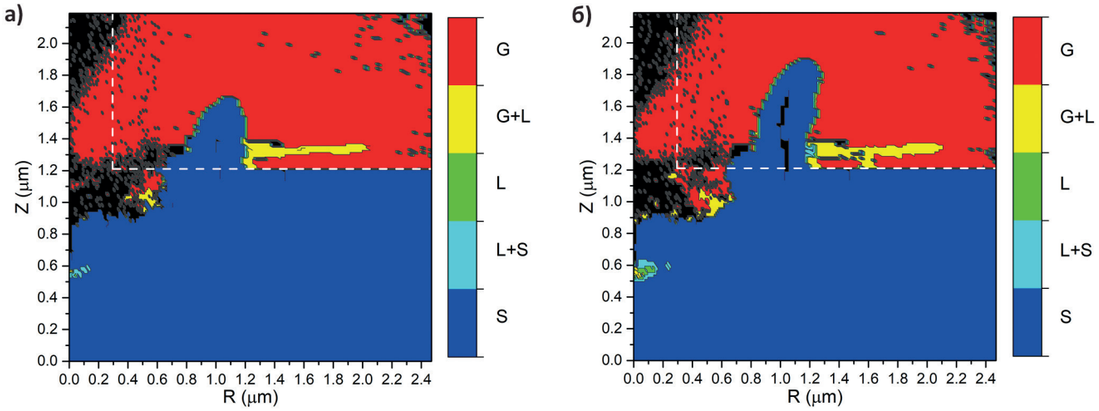


Рисунок 1. Фазовые состояния вещества катода в поствзрывной стадии в моменты времени 4 нс (а) и 4.5 нс (б) при амплитуде тока 6.4 А. Обозначения на рисунках: G – газ, G+L – газ и жидкость, L – жидкость, L+S – жидкость и твердое тело, S – твердое тело

Результаты опубликованы:

1. Formation of the surface microrelief of copper electrodes during radiofrequency vacuum breakdown. / S. A. Barengolts, I. V. Uimanov, V. I. Oreshkin, K. V. Khishchenko, E. V.Oreshkin. // Vacuum. – 2026. – Vol. 244, Part B. – Art. ID 114947. – DOI 10.1016/j.vacuum.2025.114947.

Физическое моделирование сверхпроводникового датчика газовой фазы для протяженного азотного криостата на основе результатов исследования фазовых переходов в промышленно-выпускаемых ВТСП-лентах с током в условиях неоднородности теплоотвода

В. А. Мальгинов[1], Л. С. Флейшман[2]

[1]Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН,
[2]Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе

В настоящей работе, на основе исследования фазовых переходов в различных ВТСП-лентах с током в условиях неоднородности теплоотвода, была обоснована работоспособность и экспериментально проверена эффективность датчика газовой фазы, который позволяет в протяженных ВТСП-устройствах купировать аварийную ситуацию на начальной стадии ее возникновения.

В настоящее время одним из наиболее перспективных направлений в использовани высокотемпературных сверхпроводников в электроэнергетике является создание ВТСП-кабелей. Кабель находятся в азотном криостате, который имеет значительную протяженность при малом поперечном сечении. При этом существует опасность аварийного образования газового пузыря, которое может произойти в любой точке вдоль длины криостата. Схема модели датчика, способного зафиксировать появление газовой фазы, показана на Рисунке 1.

Газовая фаза на датчике появлялась при понижении уровня азота (позиция 7, Рисунок 1) ниже нулевого значения (ось *h*). При этом на оголенном участке происходили

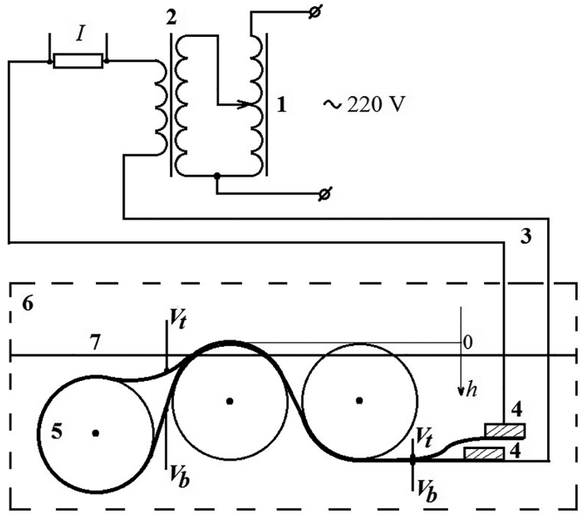


Рисунок 1. Схема модели датчика газовой фазы: 1 – автотрансформатор, 2 – понижающий трансформатор, 3 – токовводы, 4 – токовые прижимные контакты, 5 – возвратная петля бифиляра, 6 – азотный криостат, 7 – уровень жидкого азота. I – ток в цепи, V_t – потенциальные контакты на верхней ленте, V_b – потенциальные контакты на нижней ленте бифиляра

скачки сигналов, которые свидетельствовали о начале фазового перехода (Рисунок 2, начало перехода t = 4.5 с). Для оптимизации работы и повышения безопасности устройства были применены следующие оригинальные решения: 1) применялась ВТСП-лента без стабилизатора – это позволило существенно увеличить амплитуду полезного сигнала; 2) использовалось бифилярное соединение лент, что позволило существенно снизить паразитный индуктивный сигнал; 3) между лентами в бифиляре использовалась сетчатая изоляция – это позволило снизить тепловое сопротивление между лентами, ускорить процесс перехода и снизить перегрев датчика; 4) использовался трансформаторный источник тока с минимальным сопротивлением во вторичной цепи, в этом случае при переходе спад тока определялся сопротивлением образца в нормальном состоянии – это позволило избежать опасного перегрева датчика во время фазового перехода.

Работа выполнена в рамках научной темы «Физика и технология новых высокотемпературных сверхпроводников».

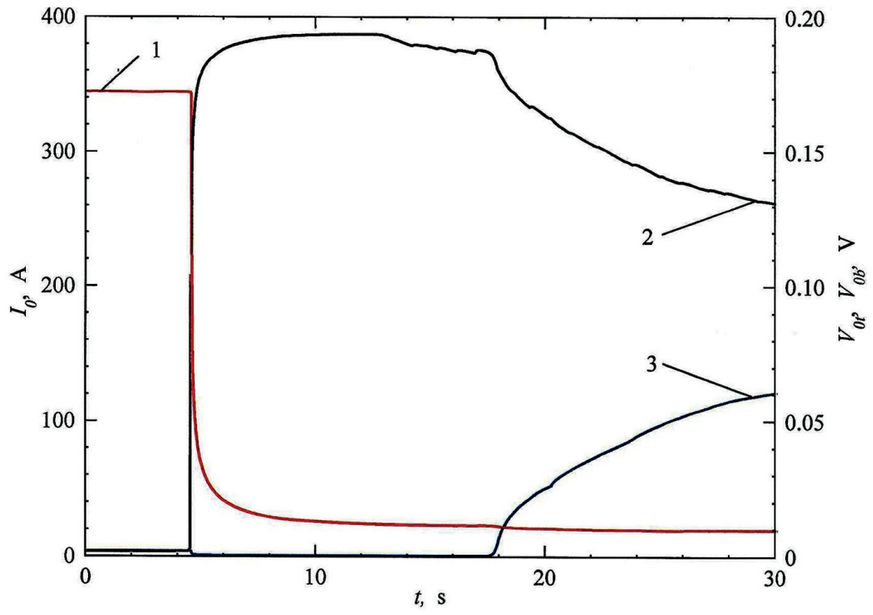


Рисунок 2. Временны́е зависимости амплитуды тока (I_0) в ВТСП-бифиляре и амплитуд напряжений на верхней (V_{0t}) и нижней (V_{0b}) ВТСП-лентах: 1 – I_0, 2 – V_{0t}, 3 – V_{0b}

Результаты опубликованы:

1. Мальгинов, В.А. Физическое моделирование сверхпроводникового датчика газовой фазы для протяженного азотного криостата. / В.А. Мальгинов, Л.С. Флейшман. // Письма в ЖТФ. – 2025. – Т. 51. – № 8. – С. 30-34. – DOI 10.61011/PJTF.2025.08.60160.20141.
2. Мальгинов, В.А. Фазовые переходы в ВТСП с током в условиях неоднородности теплоотвода. / В.А. Мальгинов, Л.С. Флейшман. // ЖТФ. – 2025. – Т. 95. – № 11. – С. 2148–2162 – DOI 10.61011/JTF.2025.11.61598.64-25.

Рекордная околокомнатная сверхпроводимость в метастабильном гексагидриде (La,Sc)H₆₋₇ с критической температурой Tc = 270…280 K при давлении 155 ГПа

А. В. Садаков, В. М. Пудалов, О. А. Соболевский, К. С. Перваков, И. А. Троян

Достижение сверхпроводимости при комнатной температуре (КТСП) является сверхважной и сверхсложной задачей физики твердого тела. В данной работе экспериментально показано, что система (La,Sc)Hx является одним из самых перспективных гидридов для достижения КТСП. Обнаружена метастабильная гексагональная фаза (La,Sc)H_{6-7}, в которой сопротивление R падает до нуля, начиная с T_c^{onset} = 274 К. На кривой перехода R(T) также наблюдаются особенности при 249 К и 242 К. При этих же температурах зафиксированы аномалии в радиочастотном отклике, что подтверждает сверхпроводящий переход при рекордно высокой критической температуре.

Физика сверхпроводимости вступила в новую эру после открытия сверхпроводимости в гидридах под давлением. Теоретические работы указывают, что тройные гидриды системы La-Sc способны демонстрировать сверхпроводимость до 271…298 К.

В нашей работе синтез соединений проводился в камерах с алмазными наковальнями (DAC) при давлениях до 200 ГПа. Исходный сплав La и Sc с источником водорода BH_3NH_3 загружался в ячейку. Для инициации реакции прекурсоры в камере давления подвергались нагреву импульсным лазером. Фазовый состав образовавшегося соединения контролировался рентгеноструктурным анализом на синхротроне. Электрическое сопротивление измерялось четырехзондовым методом. Одновременно с ним проводилось измерение радиочастотного поглощения, чувствительного к переходу в сверхпроводящее состояние из-за изменения поверхностного импеданса.

Как было установлено, основным продуктом синтеза являлась кубическая фаза $(La,Sc)H_{12}$ с падением сопротивления до нуля при 244…248 К. Помимо нее, нами была также идентифицирована метастабильная гексагональная фаза $(La,Sc)H_{6-7}$, чувствительная к флуктуациям давления и температуры при лазерном нагреве. Ключевой результат — падение сопротивления, начинающееся при T_c^{onset} = 274 К, т. е. T_c^{onset}=+1 °C. Это значение всего на 21 °C ниже комнатной температуры (+22 °C) и делает соединение самым «горячим» достоверно полученным сверхпроводником.

Кривая сверхпроводящего перехода имеет особенности в виде «колена» при 249 и 242 К, что может указывать на многофазность образца (наличие «паразитных» кубических фаз). Решающим аргументом стали бесконтактные измерения ВЧ-поглощения: при температурах 274, 249 и 242 К зафиксированы изменения импеданса, синхронные с результатами контактных измерений сопротивления на постоянном токе и низкой частоте, являющиеся независимым подтверждением перехода в сверхпроводящее состояние.

Таким образом, в данной работе экспериментально подтверждено существование сверхпроводящего состояния в метастабильной гексагональной фазе $(La,Sc)H_{6-7}$ с рекордной T_c^{onset} = 274 К. На сегодняшний день это значение — самое высокое из достоверно зарегистрированных и подтвержденных. Комплексный анализ сопротивления и ВЧ-отклика доказывает сверхпроводящую природу перехода. Данное открытие подтверждает, что тройные гидриды La-Sc — перспективный класс для продвижения к комнатной сверхпроводимости. Дальнейшие исследования будут направлены на оптимизацию синтеза и стабилизацию этой фазы при пониженных давлениях.

Центр высокотемпературной сверхпроводимости и квантовых материалов им. В. Л. Гинзбурга

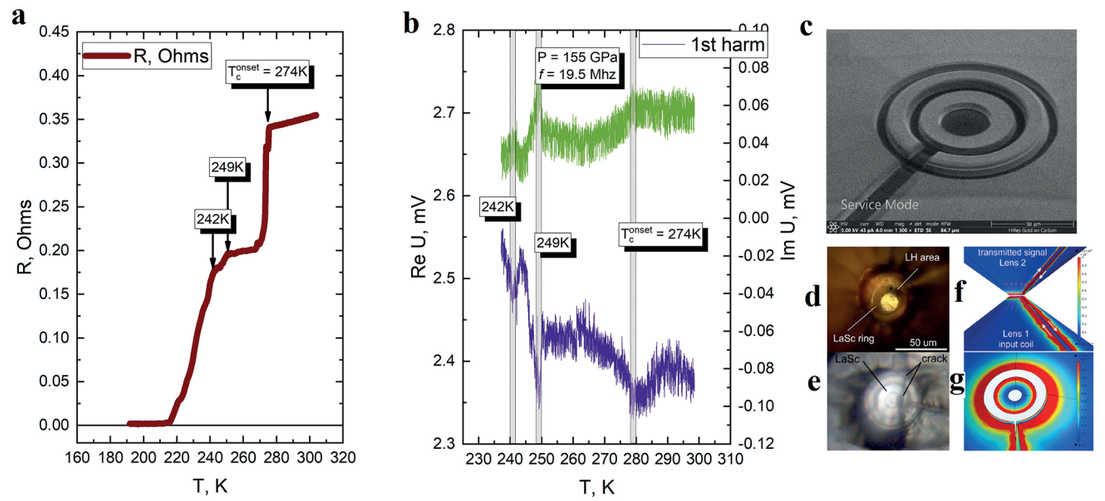


Рисунок 1. Температурная зависимость сопротивления (a) и высокочастотного отклика (b) для образца (La,Sc)Hx с особенностями при температурах 274, 249 и 242 К; (c) сканирующая электронная микроскопия кольцеобразного образца LaSc в центре системы линз Ленца; (d) оптическое изображение образца после частичного лазерного нагрева; (e) фотография образца после частичного растрескивания алмазной наковальни и падения давления до 155 ГПа; (f) схема передачи ВЧ-сигнала от Линзы 1 к Линзе 2 через образец-гидрид; (g) цветовая карта, соответствующая распределению плотности поверхностных потерь на металлических поверхностях при частоте возбуждающего тока 200 МГц

Результаты опубликованы:

1. Ternary Superhydrides Under Pressure of Anderson's Theorem: Near-Record Superconductivity in $(La, Sc)H_{12}$. / D. V. Semenok, I. A. Troyan, Di. Zhou, [et al.]. // Advanced Functional Materials. – 2025. – Vol. 35. – Iss. 42. – Art. ID 2504748. – 12 pp. – DOI 10.1002/adfm.202504748.

Центр высокотемпературной сверхпроводимости и квантовых материалов им. В. Л. Гинзбурга

Новый механизм отрицательного магнитосопротивления в слоистых антиферромагнетиках

П. Д. Григорьев, Н. С. Павлов, И. А. Некрасов, И. Р. Шеин, А. В. Садаков, О. А. Соболевский, Е. Мальцев, В. М. Пудалов

Слоистые кристаллы полуметаллов с антиферромагнитным (AFM) упорядочением ($EuFe_2As_2$, $EuSn_2As_2$, $EuSn_2P_2$ и др.) демонстрируют отрицательное изотропное параболическое магнитосопротивление (NIMR), которое хорошо коррелирует с изменением AFM намагниченности в магнитном поле. Предложен теоретический механизм, описывающий NIMR как следствие рассеяния точечными дефектами при нарушении бинарной симметрии T_2. Теоретически рассчитанное NIMR качественно согласуется с экспериментальными данными для различных слоистых соединений.

На Рисунке 1 (a) изображена зависимость сопротивления от магнитного поля для $EuSn_2As_2$ – типичного AFM-полуметалла. Как видно, отрицательное магнитосопротивление (NIMR) изотропно и коррелирует с намагниченностью (Рисунок 1 (b)).

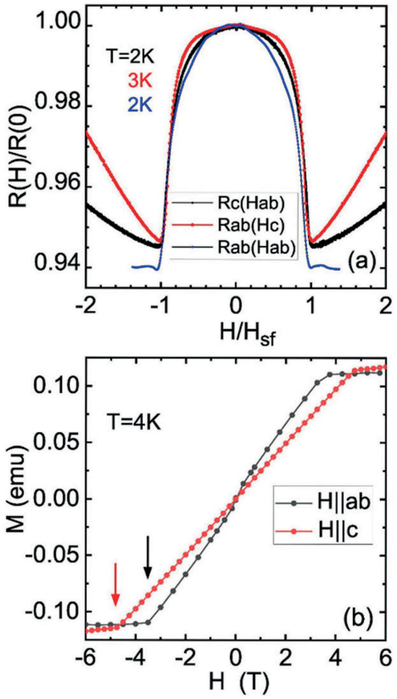


Рисунок 1. Зависимости от магнитного поля сопротивления (a) и намагниченности (b) $EuSn_2As_2$

Хотя подобное магнитосопротивление наблюдалось во многих работах, объяснение этому эффекту до настоящего времени отсутствовало. В предложенной нами модели [1] NIMR возникает из-за рассеяния точечными примесями при нарушении пространственной инверсии распределения плотности электронов с различной проекцией спина (Рисунок 2).

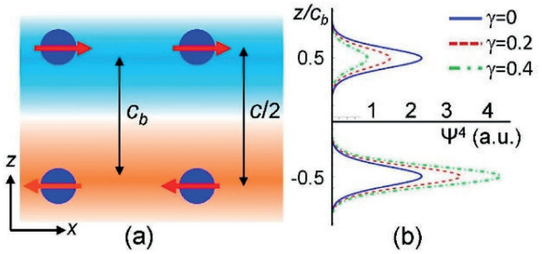


Рисунок 2. (a) схема перераспределения в AFM-решетке электронов с разной проекцией спинов; (b) амплитуда волновой функции для двух проекций спина и разных значений γ

Величина NIMR зависит от обменного взаимодействия электронов, которое нами определено из DFT-расчетов плотности (Рисунок 3) и зонной структуры для $EuSn_2As_2$ в AFM-состоянии.

В борновском приближении частота рассеяния на точечных примесях квантового состояния n:

$$\frac{1}{\tau_n} \propto n_{imp} U^2 v_F I \propto \int |\psi_n|^2 \, |\psi_{n'}|^2 \cdot d^3 r.$$

Вследствие перераспределения электронов в AFM упорядоченной решетке интеграл I, а вместе с ним и сопротивление ρ, претерпевает изменение, зависящее от магнитного поля H:

$$\frac{\delta\rho(H)}{\rho(0)} = \frac{\delta I}{I} = \frac{\gamma^2}{1+2\gamma^2} \approx \left(\frac{E_{ex0}}{2t_0}\right)^2 \left(1 - \frac{H^2}{H_{sf}^2}\right).$$

Здесь H_{sf} – поле полной спиновой поляризации, E_{ex0} – обменное расщепление в спектре в отсутствие магнитного поля, t_0 – интеграл перескока между слоями вдоль направления c.

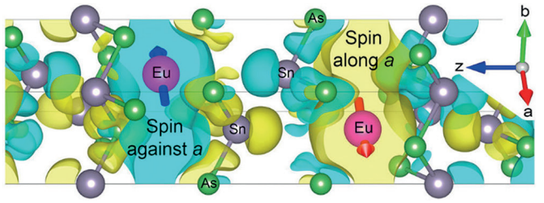


Рисунок 3. Распределение плотности спин-поляризованных электронов. Желтые и бирюзовые изоповерхности отвечают фиксированным разностям плотности заряда со спином вдоль и против оси a упорядочения спинов Eu, соответственно

В результате перераспределения электронной плотности в AFM упорядоченной решетке, магнитосопротивление коррелирует с полем полной намагниченности AFM-подрешетки атомов Eu и в первом приближении изменяется квадратично с полем. Теоретическая зависимость, соответствующая последней формуле, изображена на Рисунке 4 (a); она обращается в нуль в поле H_{sf} и далее переходит в обычное положительное магнитосопротивление орбитального характера.

Таким образом, предложенный механизм предсказывает изотропное отрицательное магнитосопротивление. Амплитуда NIMR универсальна и зависит только от одного безразмерного параметра $\gamma = E_{ex0}/t_0$. Как видно из Рисунка 4 (b) амплитуда NIMR, в принципе, может достигать 45 %, хотя на практике для всех топологически тривиальных слоистых антиферромагнитных полуметаллов имеет одинаковый порядок величины 4...10 %.

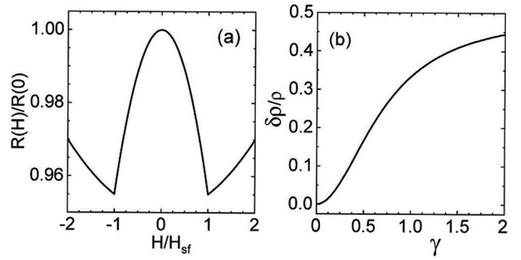


Рисунок 4. (a) рассчитанное NIMR при $E_{ex}(0)/2t_z = 0.23$; (b) величина NIMR как функция $\gamma_0 = E_{ex0}/t_0$ вдоль и против оси a упорядочения спинов Eu, соответственно

Суммируя полученные результаты заключаем, что предсказываемые в рамках предложенного механизма NIMR свойства (изотропность, универсальность, отрицательный знак, корреляция с зависимостью намагниченности от поля, а также амплитуда) согласуются с экспериментально наблюдаемыми характеристиками [1].

Результаты опубликованы:

1. Universal negative magnetoresistance in antiferromagnetic metals from symmetry breaking of electron wave functions. / P. D. Grigoriev, N. S. Pavlov, I. A. Nekrasov, [et al.]. // Communications Materials. – 2025. – Vol. 6. – Iss. 1. – Art. ID 252. – 8 pp. – DOI 10.1038/s43246-025-00970-5.

Центр высокотемпературной сверхпроводимости и квантовых материалов им. В. Л. Гинзбурга

Высокая и зависящая от магнитного поля подвижность поверхностных носителей заряда в 3D топологических изоляторах без объемных носителей

М. В. Пугачёв, А. Е. Борисов, А. В. Шуплецов, А. Ю. Кунцевич

В работе показано, что для топологического изолятора семейства тетрадимита $Bi_{1.1}Sb_{0.9}Te_2S$ при низкой температуре наблюдаются рекордные значения холловской подвижности, ожидаемые, но не наблюдавшиеся в топологических изоляторах ранее. С ростом магнитного поля данные можно описать, только предположив подавление данной подвижности.

В материалах класса трехмерных топологических изоляторов объем не должен обладать проводящими свойствами, а на поверхности должны распространяться электроны с линейной (релятивисткой) зависимостью энергии от импульса. Эти носители должны обладать уникальными свойствами, в частности высокой подвижностью и эффективностью конверсии спина в заряд. На практике получить такие материалы обычно не удается, т. к. они принадлежат к узкозонным полупроводникам, имеют большую объемную проводимость, шунтирующую поверхность. У поверхностных состояний подвижность тоже, как правило низкая, порядка 1000 см²/Вс.

В описываемой работе мы детально исследовали магнитопроводимость и эффект Холла в системе $Sn_{0.02}$–$Bi_{1.1}Sb_{0.9}Te_2S$, в которой при низкой температуре (меньше 100 K) проводимость по объемным состояниям исчезает и транспорт определяется поверхностными состояниями.

Исследуя кристаллы с очень разной толщиной (от 0.2 до 70 мкм), мы обнаружили практически одинаковые свойства (см. Рисунок 1). Сильная нелинейность зависимости эффекта Холла от магнитного поля указывала, что в проводимости участвовало как минимум две приповерхностных группы носителей, у одной из которых наблюдалась рекордная для данного семейства холловская подвижность ~20000 см²/Вс. Этот результат указывает, что отсутствие объемных состояний критично для высокой подвижности поверхностных.

Более детальные исследования магнитосопротивления и эффекта Холла показали, что данные невозможно описать в предположении постоянной подвижности: подвижность должна падать с магнитным полем. Поведение системы в больших полях можно описать только сильно меньшей подвижностью (см. Рисунок 2 d)). Такое поведение хоть и не наблюдалось ранее, кажется естественным для топологических изоляторов, ведь магнитное поле нарушает симметрию по обращению времени, обеспечивавшую «топологическую защиту» поверхностных состояний от рассеяния. Используя теорию, учитывающую эффект Зеемана как механизм нарушения симметрии по обращению времени, мы смогли разумно объяснить наблюдавшиеся зависимости сопротивления и холловского коэффициента от магнитного поля.

Наши результаты показывают, что высокая подвижность поверхностных носителей в 3D-топологических изоляторах может быть, но в ограниченном диапазоне температур и при подавлении объемных. В системе, где это удалось наблюдать, поверхностные «топологические» носители, по всей видимости, сосуществуют со второй приповерхностной группой с низкой подвижностью, вероятно являющейся рашбовскими или квантовоямными состояниями, притянутыми поверхностным зарядом.

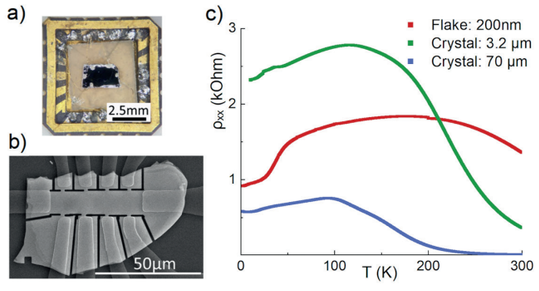


Рисунок 1. Слева – изображения исследуемых образцов: a) объемный монокристалл, b) тонкая чешуйка. Справа c) зависимости сопротивления на квадрат от температуры, демонстрирующие «вымерзание» объемной проводимости: у всех образцов сопротивление ~1 кОм при T < 100 K

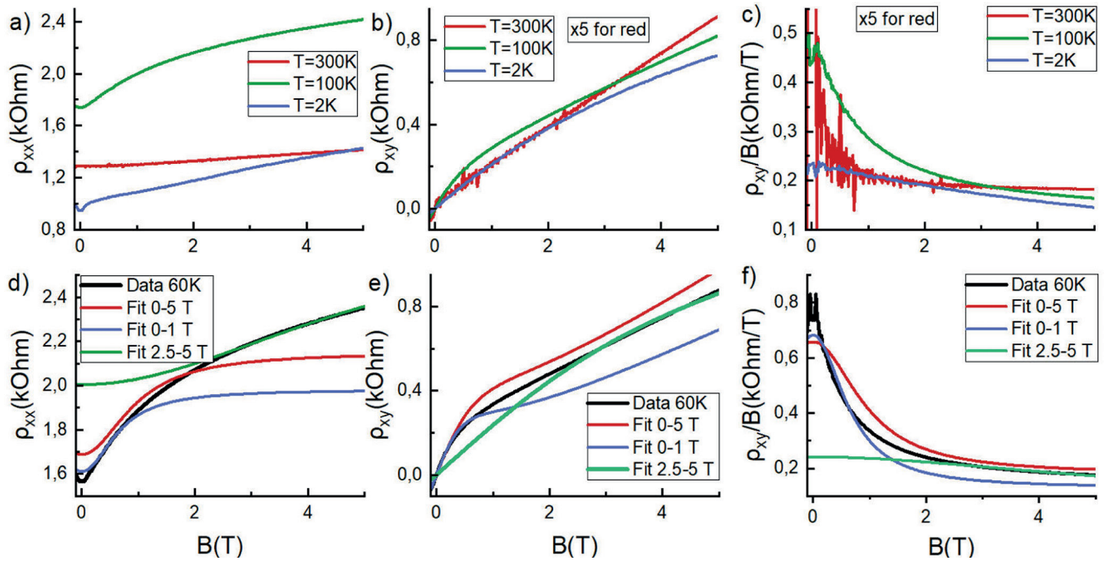


Рисунок 2. Экспериментальные зависимости сопротивления (a), холловского сопротивления (b) и холловского коэффициента (c) самого тонкого образца при различных температурах. (d-f) подгонка соответствующих данных при помощи стандартной двухжидкостной модели с фиксированными концентрациями и подвижностями при T = 60 K с использованием различных диапазонов магнитных полей. Основное экспериментальное наблюдение — сильнейшая нелинейность коэффициента Холла(падение в 4 раза, панель f)

Значимым результатом работы для экспериментаторов является появление в их руках системы, проявляющей некоторые топологические свойства и переживающей технологические операции на воздухе, что дает надежду на создание приборов из данного материала.

Работа поддержана грантом РНФ 25-42-01036.

Результаты опубликованы:

1. High and magnetic-field-dependent surface carriers mobility in 3D topological insulators without bulk states. / M. Pugachev, A. Borisov, A. Shupletsov, [et al.]. // Applied Physics Letters. – 2025. – Vol. 127. – Iss. 19. – Art. ID 193103. – 6 pp. – DOI 10.1063/5.0297373. – arxiv 2511.07992.

Определение параметров сверхпроводящего и нормального состояния ферроселенидов с изовалентным замещением двумя спектроскопическими методиками

Ю. А. Алещенко, С. А. Кузьмичев, Т. Е. Кузьмичева, А. Д. Ломоносова, И. В. Морозов, А. В. Муратов, И. А. Никитченков, Е. О. Рахманов, А. И. Шилов

Впервые двумя спектроскопическими методиками исследованы свойства сверхпроводящей (СП) и нормальной фазы ферроселенидов семейства 122-Se, характеризующихся мезоскопическим разделением магнитной и СП фаз и нетривиальной топологией поверхности Ферми.

Ферроселениды щелочных металлов $A_xFe_{2-y}Se_2$ (A = Na, K, Rb, Cs, Tl), относящиеся к семейству 122-Se железосодердащих сверхпроводников, представляют собой естественные композиты диэлектрической антиферромагнитной фазы $A_2Fe_4Se_5$ и металлической $A_{0.3}Fe_2Se_2$ фазы, переходящей в СП-состояние. Из-за малой объемной доли СП-фазы (около 15…20 %) и быстрой деградации СП-свойств на открытом воздухе ферроселениды до сих пор остаются относительно малоизученными.

Для туннельных экспериментов в ферроселенидах с двумя типами изовалентного замещения $(K,Na)_{0.9}Fe_{1.7}Se_2$ с $T_c \approx 32$ К и $K_{0.8}Fe_{1.7}(Se,S)_2$ с $T_c \approx 26$ К с помощью техники «break-junction» были созданы наноконтакты типа SnS и ScS (S – сверхпроводник, n – тонкий нормальный металл, c – сужение или СП-закоротка). В SnS-контактах ниже T_c наблюдался эффект некогерентных многократных андреевских отражений (ЭНМАО). По результатам туннельных экспериментов тремя способами подтверждено существование ниже T_c единственной СП-щели в ферроселенидах обоих составов: напрямую с помощью ЭНМАО-спектроскопии SnS-контактов, на основе измерений температурной зависимости андреевского избыточного тока $I_{exc}(T)$ в ЭНМАО-режиме, а также температурной зависимости сверхтока Ic(T) ScS-контактов.

Получены температурные зависимости микроскопического Δ(T) и макроскопического $n_S(T)$ СП-параметра порядка. В обоих материалах показана реализация сильной связи электронов в куперовской паре с характеристическим отношением $2\Delta(0)/k_BT_c = 4.1…4.6 > 3.5$. Это отношение остается примерно постоянным в диапазоне критических температур $T_c \approx 23…30$ К, что означает $\Delta(0) \propto T_c$ и указывает на то, что исследованные типы изовалентного замещения не оказывают заметного влияния на механизм куперовского спаривания ферроселенидов $(K,Na)_{0.9}Fe_{1.7}Se_2$ и $K_{0.8}Fe_{1.7}(Se,S)_2$.

Методами инфракрасной (ИК) фурье-спектроскопии отражения и спектроскопической эллипсометрии в спектральном диапазоне 25…30 000 $см^{-1}$ при температурах 4…300 К исследованы оптические свой-

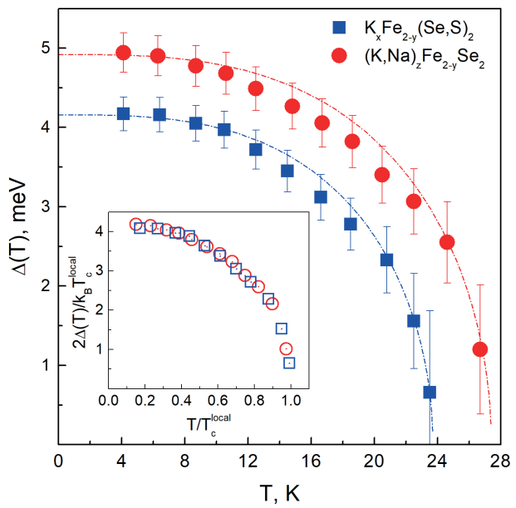


Рисунок 1. Температурная зависимость СП-щели Δ(T) и характеристического отношения $2\Delta(T)/k_BT_c$ (на вставке) в ферроселенидах $(K_{0.8}Na_{0.2})_{0.9}Fe_{1.7}Se_2$ и $K_{0.8}Fe_{1.7}(Se_{0.73}S_{0.27})_2$ по данным ЭНМАО-спектроскопии

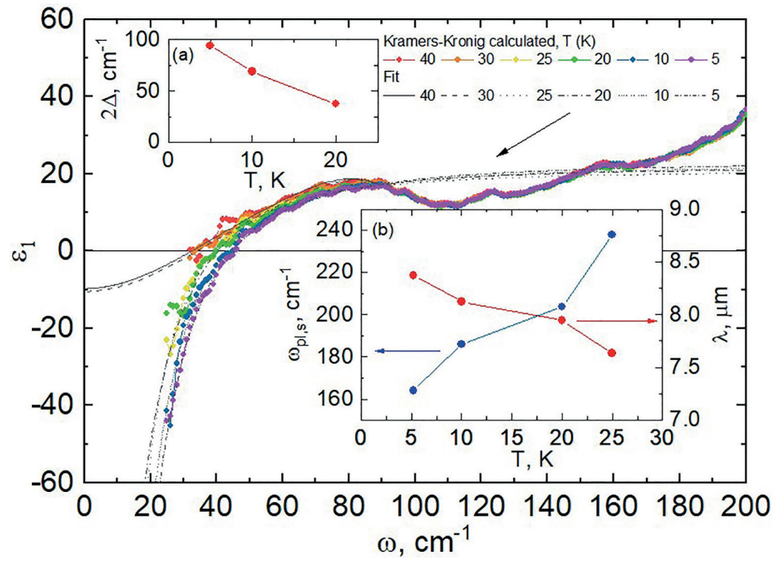


Рисунок 2. Спектры диэлектрической проницаемости ε_1 $K_{0.8}Fe_{1.7}(Se_{0.73}S_{0.27})_2$ при различных температурах (точки) и подгонка к спектрам соотношением $\varepsilon_1 \propto -(\omega_{pl,s}/\omega)^2$ (черные линии). Вставка (a): температурная зависимость СП-щели (2Δ); вставка (b): температурные зависимости СП плазменной частоты ($\omega_{pl,s}$) и магнитной глубины проникновения (λ)

ства СП-монокристаллов $K_{0.8}Fe_{1.7}(Se_{0.73}S_{0.27})_2$ ($Tc \approx 26$ К). Из спектров ИК-отражения с помощью анализа Крамерса–Кронига рассчитаны спектры оптической проводимости. Последние проанализированы в рамках модели Друде–Лоренца комплексной диэлектрической проницаемости с одним вкладом Друде и набором лоренцианов, описывающих вклады фононов и высокочастотных межзонных переходов.

В спектрах оптической проводимости обнаружены вклады несверхпроводящей АФМ-фазы и СП-конденсата при температурах ниже T_c. Величина СП-щели 2Δ при 5 К составляет 95 $см^{-1}$ (11.8 мэВ).

Определены зависимости от температуры параметров сверхпроводящего (СП-щель и плазменная частота, магнитная глубина проникновения) и нормального (оптическая проводимость, плазменная частота, скорость рассеяния) состояний монокристаллов $K_{0.8}Fe_{1.7}(Se_{0.73}S_{0.27})_2$.

Результаты опубликованы:

1. Сравнение сверхпроводящих свойств ферроселенидов калия с изовалентным замещением. / Т. Е. Кузьмичева, С.А. Кузьмичев, А.Д. Ильина, [и др.]. // Письма в ЖЭТФ. – 2025. – Т. 121. – № 8. – С. 696–703. – DOI 10.1134/S0021364025605792.
2. Однощелевая сверхпроводимость селенидов $(K_{0.8}Na_{0.2})_{0.9}Fe_{1.7}Se_2$ и $K_{0.8}Fe_{1.7}(Se_{0.73}S_{0.27})_2$ по данным спектроскопии эффекта многократных андреевских отражений. / Т. Е. Кузьмичева, А. Д. Ильина, И. А. Никитченков, [и др.]. // Физика твердого тела. – 2025. – Т. 67. – № 6. – С. 1069-1078. – DOI 10.61011/PSS.2025.06.61704.8НН-25.
3. Optical Properties of Superconducting $K_{0.8}Fe_{1.7}(Se_{0.73}S_{0.27})_2$ Single Crystals. / A. Muratov, Ye. Rakhmanov, A. Shilov, [et al.]. // Journal of Superconductivity and Novel Magnetism. – 2025. – Vol. 38. – Iss. 6. – Art. ID 236. – 11 pp. – DOI 10.1007/s10948-025-07078-4. – arXiv:2511.11123.

Собственный аномальный эффект Холла на поверхности магнитного полупроводника с сильным эффектом Рашбы

В. Н. Меньшов, И. П. Русинов

Работа посвящена теоретическому изучению влияния рассеяния электронов на доменных стенках на модификацию аномальной поперечной проводимости на поверхности магнитного полупроводника с сильным эффектом Рашбы. Зонная структура такого полупроводника, характеризуемая нетривиальной кривизной Берри, предопределяет возникновение на доменной стенке одномерного резонансного состояния в локальной обменной щели. При относительно слабом обменном расщеплении резонансное состояние имеет линейную дисперсию с малым спектральным уширением и обладает свойством киральности. Показано, что присутствие на поверхности пары параллельных доменных стенок может иметь измеряемое физическое следствие: почти полуквантованный вклад в аномальный эффект Холла.

Вопрос о природе аномального эффекта Холла обсуждался с момента его открытия. В магнитных топологических изоляторах был предсказан и экспериментально подтвержден квантовый аномальный эффект Холла. Однако в других материалах с сильной спин-орбитальной связью, таких как полупроводники с расщеплением по Рашбе, явление поперечной проводимости изучено слабо.

Авторы теоретически исследовали, как рассеяние электронов на доменных стенках (ДС) модифицирует собственный аномальный отклик Холла на поверхности магнитного полупроводника с сильным эффектом Рашбы. Зонная структура такого полупроводника характеризуется нетривиальной кривизной Берри. Если химический потенциал находится внутри обменной щели, $|\mu| < \Delta_0$, которая меньше величины расщепления Рашбы, $\Delta_0 << E_{so}$, топологический индекс испытывает близкое к единице изменение $C_d \approx 1 - (\Delta_0/(4E_{so})$ при переходе через уединенную магнитную ДС $\Delta(x) = e_z \Delta_0 \mathrm{sgn}(x)$. Такая ситуация предопределяет появление внутри локальной обменной щели особого одномерного резонансного состояния, локализованного на ДС. В окрестности Γ точки резонансное состояние имеет линейную дисперсию, $\sim \alpha k_y$, с небольшим спектральным уширением $\Gamma_R = (\Delta_0^3)/(8E_{so}^2)$ (α – параметр Рашбы). Это состояние сильно поляризовано по спину вдоль оси, ортогональной ДС.

Кроме того, мы описали случай гладкой границы между доменами с профилем обменного поля $\Delta(x) = e_z \Delta_0 \tanh(x/\varsigma)$. Показано, что с ростом ширины ДС ς спектральное размытие бесщелевого резонансного состояния Γ_R уменьшается, а его спиновая поляризация, то есть степень киральности, усиливается. Отсюда следует: чем мягче ДС, тем более устойчивое резонансное состояние она индуцирует. Если ДС достаточно широкая, в пределах локальной обменной энергетической щели также присутствуют резонансные состояния типа Волкова–Панкратова с параболической дисперсией.

Для изучения особенностей собственного аномального эффекта Холла, возникающих в магнитном полупроводнике с эффектом Рашбы, мы предлагаем использовать образец, поверхность которого содержит пару параллельных ДС. Аналогия с традиционной геометрией Холла, применяемой для транспортных измерений в магнитных топологических изоляторах, очевидна. В нашем случае роль физических границ выполняют ДС, а роль краевых состояний на границах – киральные резонансные состояния (как представлено на Рисунке 1). В такой геометрии реализуется дополнительный вклад в аномальную холловскую проводимость, который имеет почти полуквантованную величину $\sigma_{xy}^W \approx e^2/2h$ при выполнении условия $\Delta_0 << 4E_{so}$ (e – заряд электрона, h – постоянная Планка).

Проведенные нами оценки показывают, что поверхность полярного полупроводника BiTeI, легированного атомами переходных металлов (например, V или Mn), является подходящей материальной платформой для экспериментального обнаружения полуквантованного вклада в аномальный эффект Холла при температурах порядка нескольких десятков Кельвинов.

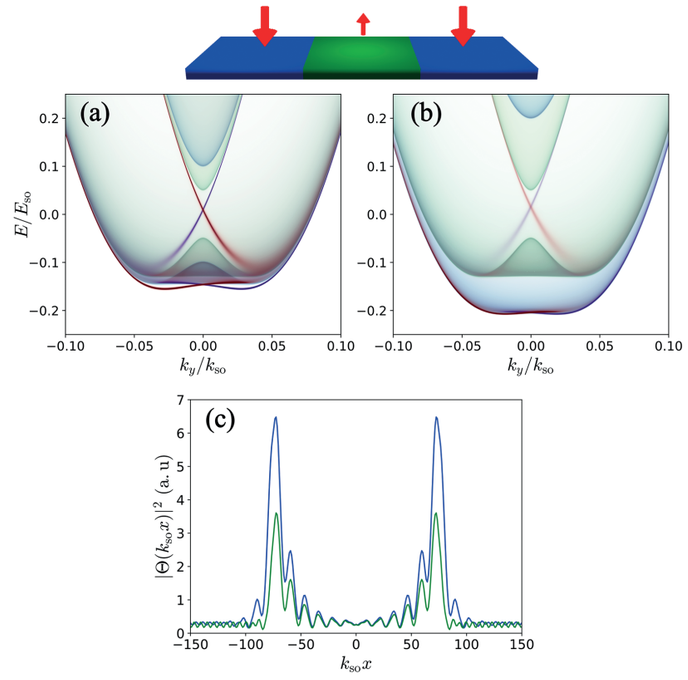


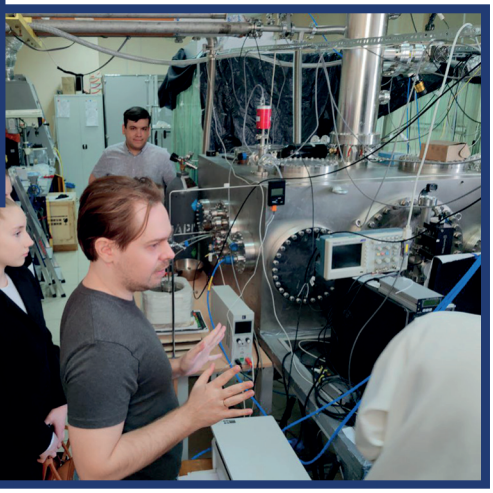
Рисунок 1. Спектральное поведение (a) и (b) и пространственный профиль (c) электронных резонансных состояний на поверхности магнитного полупроводника с эффектом Рашбы, содержащей две параллельные и удаленные друг от друга доменные стенки. Показано, как варьируются эти характеристики при изменении величины намагниченности в доменах

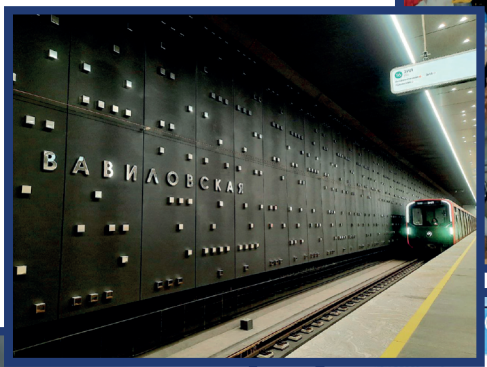
Результаты опубликованы:

1. Меньшов, В. Н. Собственный аномальный эффект Холла на поверхности магнитного полупроводника с сильным эффектом Рашбы. / В. Н. Меньшов, И. П. Русинов, Е. В. Чулков. // Письма в ЖЭТФ. – 2025. – Т. 121. – Вып. 5. – С. 393–401. – DOI 10.31857/S0370274X25030104.
2. Меньшов, В. Н. Модификация электронной структуры поверхности магнитного полупроводника с сильным эффектом Рашбы, вызванная присутствием доменных стенок. / В. Н. Меньшов, И. П. Русинов, Е. В. Чулков. // Физика твердого тела. – 2025. – Т. 67. – Вып. 8. – С. 1476–1482. – DOI 10.61011/FTT.2025.08.61320.173-25.

Центр высокотемпературной сверхпроводимости и квантовых материалов им. В. Л. Гинзбурга

ФИАН в событиях и лицах





Признание научных достижений ФИАН

Выборы членов Российской академии наук – 2025

29–30 мая 2025 г. прошло Общее собрание членов Российской академии наук, на котором состоялись выборы новых членов РАН. Всего по результатам обсуждений и закрытых голосований были одобрены кандидатуры 84 действительных членов РАН (из 353 кандидатов) и 165 членов-корреспондентов РАН (из 1455 кандидатов). Среди них – ученые ФИАН, избранные по Отделению физических наук РАН. Выборы проводятся один раз в три года.

Действительные члены Российской академии наук

По Отделению физических наук РАН было подано 51 заявление на избрание действительным членом Академии, избрано – 15 человек. Из них трое – наши ученые.

Кирилл Петрович ЗЫБИН

Руководитель Отделения теоретической физики им. И. Е. Тамма ФИАН, доктор физико-математических наук.

Кирилл Петрович – специалист в области кинетики, физики плазмы, радиофизики и астрофизики.

Наукометрические показатели (по Google Scholar):

автор 190 научных работ;

индекс Хирша h = 38;

Ччсло цитирований – 4400.

Основные научные результаты:

- развита кинетическая теория пробоя на быстрых и релятивистских электронах;
- разработана теория инициирования молнии в результате совместного воздействия широкого атмосферного ливня космических лучей и пробоя на быстрых электронах;
- развита нелинейная теория взаимодействия мощных радиоволн с ионосферной плазмой, дано объяснение эффекта магнитного зенита;
- развита нелинейная теория джинсовской неустойчивости темной материи в расширяющейся Вселенной;
- разработана теория возникновения в турбулентном потоке квазидинамических структур, определяющих корреляции пульсаций скорости;
- показано отсутствие обратного влияния однородных мелкомасштабных флуктуаций на турбулентное течение плазмы;
- найдены новые лагранжевые интегралы для изотропной турбулентности.

Премии и награды:
- Премия им. А. А. Фридмана РАН (2005 г.), присуждаемая Российской академией наук за выдающиеся работы в области космологии и гравитации;
- Премия И. Е. Тамма РАН (2020 г.), присуждаемая Российской академией наук за выдающиеся работы в области теоретической физики и физики элементарных частиц, а также теории поля.

Образовательная, научно-популярная и др. деятельность:
- член диссертационного совета ФИАН;
- является профессором на факультете математики Высшей школы экономики;
- член редколлегии журнала «Геомагнетизм и Аэрономия».

Николай Николаевич КОЛАЧЕВСКИЙ

Директор ФИАН, доктор физико-математических наук, профессор МФТИ.

Николай Николаевич – специалист в области прецизионной лазерной спектроскопии, физики ультрахолодных атомов и ионов, генерации стабильных сигналов частоты, рентгеновской и нелинейной оптики, квантовых вычислений.

Наукометрические показатели (по Google Scholar):

автор 350 научных работ;

индекс Хирша h = 31;

число цитирований – 6500.

Основные научные результаты:
- впервые осуществил лазерное охлаждение и захват атома тулия в магнитооптическую ловушку; выполнил цикл передовых исследований по физике взаимодействия ультрахолодных магнитных атомов и возможности использования узких переходов для создания оптических часов;
- разработал новый оптический метод определения энергии сверхтонкого расщепления в водородоподобных атомах, экспериментально реализовал метод модельнонезависимой оценки верхней границы дрейфа постоянной тонкой структуры α;
- выполнил работы по измерению частоты перехода 2S-4P на криогенном пучке метастабильных атомов водорода, получил новые точные значения постоянной Ридберга и зарядового радиуса протона, внёс существенный вклад в решение «загадки зарядового радиуса протона»;
- реализовал новый подход к созданию ультрастабильных лазеров, которые используются в оптических стандартах, создал транспортируемые оптические часы на одиночном ионе иттербия;
- разработал и создал 50-кубитный квантовый компьютер на ионах иттербия, реализовал одно- и двухкубитные операции на ионах, подключение к облачной вычислительной платформе.

Премии и награды:
- юбилейная медаль «300 лет Российской академии наук» (2024 г.);
- медаль «За вклад в реализацию государственной политики в области научно-технического развития» (Минобрнауки России);
- серебряная и золотая медали «За содействие» (Росфинмониторинг).

Образовательная, научно-популярная и др. деятельность:
- член Президиума Совета при Президенте Российской Федерации по науке и образованию;
- член Президиума РАН. Председатель диссертационного совета ФИАН. Под его руководством защищено 10 кандидатских диссертаций, научный консультант докторской диссертации. Имеет 28-летний стаж педагогической работы в МФТИ и МИФИ. Главный редактор журналов «Краткие сообщения по физике ФИАН» и «Квантовая электроника».

Владимир Моисеевич ПУДАЛОВ

Главный научный сотрудник Отдела «Центр высокотемпературной сверхпроводимости и квантовых материалов им. В. Л. Гинзбурга» ФИАН, руководитель ЦКП ФИАН «Исследования сильнокоррелированных систем», доктор физико-математических наук.

Владимир Моисеевич – специалист в области физики конденсированного состояния.

Наукометрические показатели (по Google Scholar):

автор 380 научных работ, из них 5 монографий и 3 авторских свидетельства;

индекс Хирша h = 46;

число цитирований – 9800.

Основные научные результаты:
- фундаментальным вкладом В. М. Пудалова в физику конденсированного состояния является создание и исследование новых высокотемпературных сверхпроводников с рекордно высокими критическими параметрами и доказательство электрон-фононного механизма спаривания в них, а также обнаружение и исследование новых состояний и эффектов сильных корреляций в термодинамике и транспорте низкоразмерных систем, которые привели к кардинальному пересмотру сложившейся точки зрения: отрицательной сжимаемости двумерной системы электронов, чередующихся с магнитным полем переходов между фазами квантованного холловского проводника и изолятора, перехода металл-изолятор, металлической проводимости в двумерной сильнокоррелированной системе, новых фаз в квазиодномерных органических кристаллах в квантующем поле; спонтанного возникновения спин-поля-

ризованных «капель» (наномагнитов) и фазового расслоения в коррелированной двумерной электронной жидкости; создания высокотемпературных сверхпроводников на основе железа с критическими магнитными полями более 100 Т;
- исследование взаимной игры магнитного упорядочения и сверхпроводящего спаривания в высокотемпературных сверхпроводниках с магнитными атомами;
- открытие и исследование сверхпроводимости в ряде гидридов при температурах вплоть до 253 К.

Премии и награды:
- Премия РАН им. А. Ф. Иоффе (2015 г.);
- медаль «В память 850-летия Москвы»;
- Золотая медаль РАН им. П. Л. Капицы (2024 г.) за цикл работ «Экспериментальные исследования эффектов фазового расслоения в низкоразмерных материалах и электронных системах» (1999–2024 гг.);
- Демидовская премия (2024 г.).

Образовательная, научно-популярная и др. деятельность:
- член двух научных советов РАН; член Бюро Отделения физических наук РАН; заместитель председателя диссертационного совета ФИАН, член диссертационного совета при Институте физических проблем РАН; профессор Московского физико-технического института и Высшей школы экономики; руководитель образовательной программы «Физика сверхпроводников и квантовых материалов» Физтех-школы физики и исследований им. Ландау МФТИ (ЛФИ МФТИ); главный редактор журнала «Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики».

Члены-корреспонденты Российской академии наук

По Отделению физических наук РАН было заявлено 215 кандидатов в члены-корреспонденты. По результатам обсуждения и тайного голосования избрано 20 человек. Среди них сотрудник Отделения теоретической физики им. И. Е. Тамма ФИАН.

Михаил Андреевич ВАСИЛЬЕВ

Главный научный сотрудник Отделения теоретической физики им. И. Е. Тамма ФИАН, доктор физико-математических наук.

Михаил Андреевич – теоретик, специалист в области квантовой теории поля и теории фундаментальных взаимодействий.

Наукометрические показатели (по Scopus):

автор 162 научных работ;

индекс Хирша h = 47;.

число цитирований – 8600.

Основные научные результаты:

основное направление исследований – изучение возможности построения теории фундаментальных взаимодействий, основанной на принципах симметрии, связанных с полями произвольных спинов. Исследования по теории высших спинов потребовали от Васильева М. А. разработки новых методов, таких как координатно независимая «развернутая формулировка» релятивистских уравнений, нашедших применение и в физических моделях далёких от теории высших спинов, как, например, в явной конструкции волновых функций N – частичной квантовой модели Калоджеро и координатно-независимой формулировке чёрнодырных решений ОТО.

К основным научным результатам можно отнести следующие:
- построение кубических вершин взаимодействия полей высших спинов друг с другом и с гравитацией (совместно с Е. С. Фрадкиным);
- построение полных нелинейных уравнений движения (уравнения Васильева), описывающих взаимодействия калибровочных полей всех спинов, включая поля Янга– Миллса и гравитационное поле;
- нахождение точного решения нелинейных уравнений высших спинов, которое в режиме слабого поля воспроизводит решение Шварцшильда ОТО.

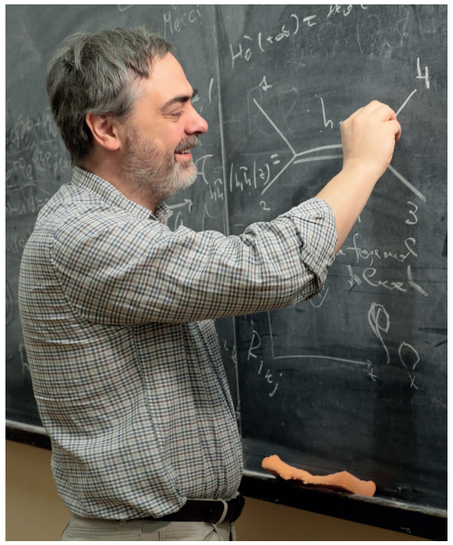
Премии и награды:
- - Золотая медаль им. И. Е. Тамма РАН;
- - Премия им. И. Я. Помернчука.

Образовательная, научно-популярная и др. деятельность:
- член диссертационного ученого совета ФИАН;
- подготовил 6 кандидатов физико-математических наук;
- ведет преподавательскую работу и возглавляет образовательную программу «Теория фундаментальных взаимодействий и квантовая гравитация» в Физтех-школе физики и исследований им. Ландау МФТИ (ЛФИ МФТИ);
- член редакционных коллегий журналов «Успехи физических наук» и «Физика элементарных частиц и атомного ядра».

Выборы профессоров Российской академии наук – 2025

Всего в 2025 году корпус профессоров РАН пополнился 85 учеными. Утверждение кандидатов на присуждение звания «Профессор РАН» в 2025 году прошло в отделениях по областям и направлениям науки на общих собраниях отделений 8 декабря 2025 года. В состав профессоров РАН вошел сотрудник Отделения теоретической физики им. И. Е. Тамма (ОТФ) ФИАН.

Константин Борисович АЛКАЛАЕВ



Ведущий научный сотрудник ОТФ ФИАН, заместитель руководителя Отделения, доктор физико-математических наук.

Константин Борисович – специалист по квантовой теории поля и математической физике, включая конформную теорию поля; квантовую гравитацию; голографическую дуальность теории полей произвольного спина.

Наукометрические показатели (по Google Scholar):

автор 50 научных работ;

индекс Хирша h = 26;

число цитирований – 1800.

Научная, образовательная и др. деятельность:

– член диссертационного совета ФИАН;

– член временных диссертационных советов МФТИ и ОИЯИ РАН4 под его руководством прошла успешная защита диссертации на звание кандидата физико-математических наук; в настоящее время руководит 2 аспирантами, один из которых удостоен Медали РАН для молодых ученых;

– Профессор МФТИ (с 2014 г.), старший преподаватель МГУ (с 2018 г.). Под руководством Константина Борисовича успешно защищено 5 магистерских и 6 бакалаврских работ. Член оргкомитетов научных школ и международных конференций. Член экспертного совета Фонда БАЗИС по магистерской программе Механико-математического факультета и Института теоретической и математической физики МГУ;

– рецензент журналов Physical Review D, Physics Letters B, Nuclear Physics B, Journal of High Energy Physics, Modern Physics Letters A, Теоретическая и математическая физика и др.

Профессор РАН – почетное ученое звание, присуждаемое Президиумом РАН за научные достижения национального или международного уровня, а также за активное участие в реализации основных задач и функций Академии. Учреждено в 2015 году. Присваивается российским ученым не старше 50 лет, осуществляющим научно-исследовательскую или научно-образовательную деятельность в различных областях знания и не являющимся членами РАН.

Золотые медали РАН имени выдающихся ученых

Золотые медали Российской академии наук имени выдающихся ученых – это высшие награды РАН, присуждаемые за выдающиеся научные работы, открытия и изобретения или по совокупности работ большого научного и практического значения.

Золотая медаль имени П. Л. Капицы РАН

В 2025 г. Золотая медаль им. П. Л. Капицы РАН присуждена академику Владимиру Моисеевичу ПУДАЛОВУ за цикл работ 1994–2024 гг. «Экспериментальные исследования эффектов фазового расслоения в низкомерных материалах и электронных системах».

Золотая медаль им. П. Л. Капицы РАН учреждена в 1994 г. и присуждается за выдающиеся научные работы по физике.

Владимир Моисеевич ПУДАЛОВ и президент РАН Геннадий Яковлевич КРАСНИКОВ во время церемонии вручения Золотой медали им. П. Л. Капицы РАН

Золотая медаль имени И. Е. Тамма РАН

Постановлением Президиума Российской академии наук Золотой медали имени И. Е. Тамма РАН в 2025 году удостоен член-корреспондент РАН Владимир Иванович РИТУС.

Награда присуждена за цикл работ «Обнаружение дуальной связи электродинамики и двумерной теории скалярного поля, приводящей к уникальному конечному значению затравочного заряда и перенормировочному фактору Дайсона».

Золотая медаль им. И. Е. Тамма РАН вручается с 1995 года за выдающиеся работы по теоретической физике и физике элементарных частиц, теории поля.

Владимир Иванович РИТУС

Сотрудники ФИАН получили почетные ведомственные награды Минобрнауки

Глава Министерства науки и высшего образования Российской Федерации Валерий ФАЛЬКОВ наградил сотрудников ФИАН нагрудным знаком «Ветеран».

Согласно Приказу № 237 «О награждении нагрудным знаком “Ветеран” Министерства науки и высшего образования Российской Федерации работников Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П. Н. Лебедева Российской академии наук» за заслуги в труде и продолжительную работу были награждены:

Валерий Николаевич АЗЯЗОВ,	директор Самарского филиала;
Наталия Глебовна БОРИСЕНКО,	ведущий научный сотрудник;
Владимир Леонидович ВЕЛИЧАНСКИЙ,	ведущий научный сотрудник;
Мария Николаевна ДМИТРИЕВА,	техник 1 категории;
Владимир Сергеевич ЛЕБЕДЕВ,	руководитель Отделения оптики.

Отметим, что сотрудники ФИАН получают данную ведомственную награду впервые.

Награждение нагрудным знаком производится за заслуги в труде и продолжительную работу в сфере высшего образования и соответствующего дополнительного профессионального образования, научной, научно-технической и инновационной деятельности, нанотехнологий, развития федеральных центров науки и высоких технологий, государственных научных центров и наукоградов, интеллектуальной собственности, в сфере социальной поддержки и социальной защиты обучающихся, молодежной политики.

Ведомственная награда Министерства науки и высшего образования Российской Федерации нагрудный знак «Ветеран» была учреждена в августе 2021 года.

Премия имени И. Я. Померанчука – 2025

В 2025 году Премия им. И. Я. Померанчука присуждена научному руководителю Астрокосмического центра Физического института им. П. Н. Лебедева РАН, д-ру физ.-мат. наук, члену-корреспонденту РАН Игорю Дмитриевичу НОВИКОВУ за выдающийся вклад в общую теорию относительности и физику черных дыр.

Игорь Дмитриевич Новиков и Кип Торн, лауреат Нобелевской премии по физике 2017 года, в ФИАН (фотография 2012 г., ©ФИАН)

Отметим, что И. Д. Новиков стал шестым сотрудником ФИАН – лауреатом Премии им. И. Я Померанчука. В 2000 году премию получил Е. Л. Фейнберг, в 2014 – Л. В. Келдыш, в 2020 – М. А. Васильев, в 2023 – А. А. Цейтлин, а в 2024 – И. В. Тютин.

Премия имени И. Я. Померанчука – премия в области теоретической физики, присуждаемая Институтом теоретической и экспериментальной физики РАН.

Награда носит имя Исаака Яковлевича Померанчука — выдающегося физика-теоретика. Она была учреждена в 1998 году, в год 85-летия со дня рождения выдающегося ученого, а имена лауреатов называются непосредственно в день его рождения – 20 мая. Премии ежегодно удостаиваются по два ученых-физика – российский и иностранный.

Медаль имени академика Е. Н. Аврорина Уральского отделения РАН

Академик Геннадий Андреевич МЕСЯЦ получил награду Уральского Отделения РАН, медаль имени академика Е. Н. Аврорина за экспериментальные и теоретические исследования, имеющие важное практическое значение в различных областях научного знания.

Вручение состоялось на Общем собрании Отделения физических наук РАН, прошедшем 8 декабря 2025 г. в ФИАН.

Медаль имени академика Е. Н. Аврорина является междисциплинарной наградой, учрежденной Уральским отделением РАН в 2018 г., и присуждается один раз в два года за экспериментальные и теоретические исследования, имеющие важное практическое значение.

Сотрудники Самарского филиала ФИАН стали лауреатами областных научных премий

Ежегодно губернатором Самарской области вручаются награды за достижения в области науки – Премия Губернатора Самарской области за выдающиеся результаты в решении научных проблем в различных направлениях исследований и Губернская премия в области науки и техники. Для ученых Самарского филиала ФИАН стало уже хорошей традицией получать эти награды.

Церемония награждения проводится в преддверии Дня российской науки, который ежегодно отмечается 8 февраля. Лауреатам вручаются дипломы, нагрудные знаки и денежные премии.

Премия Губернатора Самарской области за выдающиеся результаты в решении технических, естественно-математических, медико-биологических, социально-экономических, гуманитарных и авиационно-космических проблем в 2025 г. вручена Игорю Владимировичу ШИШКОВСКОМУ – главному научному сотруднику Лаборатории лазерно-индуцированных процессов Самарского филиала (СФ) ФИАН, доценту, д-ру физ.-мат. наук – за выдающиеся результаты в решении технических задач.

Игорь Владимирович является ведущим специалистом в области аддитивных технологий. В последние годы при его активном участии разрабатываются новые методы 3D/4D печати, топологического дизайна и синтеза уникальных изделий из метаматериалов, созданы концепции цифровых двойников процессов порошковой 3D печати. И. В. Шишковский – автор более 210 публикаций, нескольких монографий и 11 патентов. Его научная активность многократно поддержана грантами РНФ, РФФИ, ФЦП – БРИКС, Программой Президиума РАН «Фундаментальные науки – медицине». В разные годы являлся руководителем индустриальных проектов с государственными корпорациями – Росатом и Ростех.

Губернских премий в области науки и техники в 2025 г. удостоены:

1) Сергей Иванович КУЗНЕЦОВ – старший научный сотрудник Лаборатории лазерно-индуцированных процессов СФ ФИАН, канд. физ.-мат. наук – за научное исследование «Лазерная ударная обработка деформируемых алюминиевых сплавов: формирование структуры, остаточные напряжения, применение в промышленности».

Определены параметры шероховатости Ra и Rz после лазерной ударной обработки (ЛУО). Установлено, что величина, глубина и профиль сжимающих остаточных напряжений зависят от плотности мощности, плотности импульсов, толщины материала и предварительной термической обработки. Показана эффективность ЛУО импульсами малой энергии для создания в алюминиевых сплавах остаточных сжимающих напряжений на глубину более 2 мм с максимальным значением на поверхности –300 МПа. Методом послойного рентгеноструктурного анализа показана корреляция между параметрами кристаллической структуры и профилем остаточных напряжений обработанных сплавов. Обнаружены эффекты гомологических искажений кристаллической решетки в зоне остаточных напряжений и влияния исходной кристаллографической текстуры обрабатываемого сплава на профиль и глубину остаточных напряжений после ЛУО. Зафиксировано образование значительных, до –100 МПа, остаточных напряжений на необработанной стороне образцов. Определены значения сжимающих остаточных напряжений на поверхности при двукратной односторонней и двусторонней обработках. Установлено, что износостойкость поверхностного слоя сплава АМг6 после лазерной ударной обработки повышается не менее, чем на 20 %. Результаты работы являются базой для разработки технологий ЛУО на предприятиях машиностроительной отрасли, в том числе аэрокосмического профиля.

О влиянии кристаллографической текстуры на формирование остаточных напряжений при лазерной ударной обработке алюминиевых сплавов — см. стр. 152–153 настоящего сборника;

2) Антон Анатольевич КРЕНЦ – старший научный сотрудник теоретического сектора СФ ФИАН, канд. физ.-мат. наук – за научное исследование «Управление поперечной структурой излучения широкоапертурных лазеров на основе методов внешней оптической инжекции и модуляции накачки».

Исследование посвящено решению фундаментальной задачи нелинейной лазерной динамики — пространственно-временной неустойчивости в широкоапертурных полупроводниковых лазерах, приводящей к хаотизации излучения и филаментации пучка. Актуальность проблемы обусловлена не только необходимостью подавления этих неустойчивостей для стабилизации излучения, но и возможностью целенаправленного управления поперечной структурой пучка, что открывает перспективы для создания источников структурированного света, востребованных в системах передачи и обработки информации, включая нейроморфные вычисления.

В рамках исследований предложен и всесторонне изучен комплексный подход к управлению поперечной структурой лазерного пучка, основанный на синергии двух методов: стабилизирующей внешней оптической инжекции и управляющей мо-

Лауреаты премий губернатора Самарской области за 2025 г. С. И. Кузнецов, И. В. Шишковский и А. А. Кренц (слева направо)

Признание научных достижений ФИАН

дуляции параметра накачки. На основе численного анализа впервые установлены количественные пороги амплитуды инжекции, необходимые для эффективного подавления как волновой, так и параметрической (фарадеевской) неустойчивости. Показано, что стабилизация достигается при малой интенсивности инжекции (порядка 1 % от интенсивности поля лазера), что свидетельствует о высокой эффективности и экономической целесообразности метода.

Ключевым результатом является демонстрация возможности целенаправленного переключения типа стационарных поперечных структур (оптических паттернов), таких как кольца, полосы и гексагоны, путем варьирования параметров инжекционного пучка на фоне резонансной модуляции накачки. Исследована устойчивость метода к реалистичным условиям, включая различные формы профиля накачки и частотную расстройку инжекции.

Практическая значимость работы заключается в разработке физических основ для создания нового поколения стабильных и управляемых источников лазерного излучения, востребованных в оптоволоконной связи, интегральной фотонике («On-chip VCSELs»), а также в устройствах оптической обработки информации, сенсорики и нейроморфных вычислений. Полученные результаты могут быть непосредственно использованы при проектировании стабильных источников для высокоскоростных систем оптической связи следующего поколения, при создании элементной базы для нейроморфных и сенсорных систем на основе перестраиваемых оптических паттернов, а также при разработке новых компонентов интегральной фотоники для аэрокосмической и IT-отраслей.

Подробнее об управлении пространственной структурой лазерного излучения через возбуждение и подавление неустойчивостей

см. стр. 160–161 настоящего сборника.

Человек науки из Троицкого обособленного подразделения ФИАН

В преддверии Дня российской науки в г.о. Троицке назвали имена самых ярких представителей научного сообщества и вручили премии «Человек науки – 2025».

Премию, история которой насчитывает уже 17 лет, получили сотрудники местных НИИ и инновационных компаний, чьи исследования и разработки были признаны лучшими за 2025 год.

В специальной номинации награду получил Антон Владленович ЗАЛЫГИН, старший научный сотрудник отдела «Технопарк “Прецизионные оптические технологии”» Троицкого обособленного подразделения (ТОП) ФИАН.

Антон Владленович занимается исследованиями в области оптики, спектроскопии, биофизики, приборостроения и микроскопии сверхвысокого разрешения. Одно из основных направлений научной деятельности посвящено разработке молекулярных моделей наночастиц для таргетной доставки гидрофобных лекарств и подходов для их изучения.

В 2025 г. А. В. Залыгин стал председателем вновь созданного Совета молодых ученых и специалистов г. о. Троицка. Является автором программы РАН, победившей в конкурсном отборе МДЦ «Артек». В 2025 г. организовал и провел уникальную образовательную программу Российской академии наук «300 лет РАН: фундаментальный взгляд на окружающий мир».

Кроме того, почетной грамотой премии «Человек года – 2025» награжден ведущий научный сотрудник Лаборатории инновационных лазерных систем ТОП ФИАН Михаил Павлович ФРОЛОВ за вклад в развитие науки.

Церемония награждения лауреатов премии «Человек науки – 2025»: слева – А. В . Залыгин, справа – М. П. Фролов (фотография с сайта Управы г. о. Троицка

Действительный член Лондонского королевского общества

Аркадий Александрович ЦЕЙТЛИН

В мае 2025 года Лондонское королевское общество — ведущее научное сообщество Великобритании, национальная академия наук — избрало более 90 выдающихся исследователей со всего мира в число своих членов. В эту плеяду вошли ученые из самых различных областей: от искусственного интеллекта и электронной микроскопии до глобального здравоохранения и нейробиологии. И один из них – выдающийся российский ученый, ведущий научный сотрудник Отделения теоретической физики им. И. Е. Тамма ФИАН, д-р физ.-мат. наук Аркадий Александрович Цейтлин.

Аркадий Александрович – один из ведущих ученых-специалистов в теории суперструн. Его научные интересы включают квантовую теорию поля и квантовую гравитацию, теорию суперструн, конформную теорию поля и AdS/CFT соответствие. А. А. Цейтлин внес фундаментальный вклад в теорию суперструн и теорию поля. Он разработал описание теории суперструн с помощью сигма-моделей, открыл фундаментальную роль действия Борна—Инфельда как эффективного действия для открытой струны, разработал метод построения сложных солитонных решений, описывающих суперсимметричные связанные состояния бран в супергравитации, внес вклад в исследования D-бран, что привело к AdS / CFT соответствию, построил действие для суперструны в пространстве AdS5 x S5 и внес значительный вклад в подход к дуальности калибровочных полей и струн, основанный на интегрируемости.

К Аркадию Александровичу в полной мере можно отнести слова президента Королевского общества, сэра Адриана Смита, сказанные им на церемонии объявления результатов: *«Их достижения воплощают самые высокие идеалы научного поиска – от фундаментальных открытий до исследований, оказывающих реальное влияние на здравоохранение, технологии и государственную политику. … их труд свидетельствует о силе исследований, движимых любопытством и стремлением к инновациям»*.

Молодежь ФИАН

Фиановцы – стипендиаты Президента Российской Федерации

В мае 2025 года были подведены итоги ежегодного конкурса на назначение стипендии Президента Российской Федерации для аспирантов и адъюнктов. Из более чем 4600 заявок, поступивших из 73 регионов, были отобраны 500 победителей по разным научным направлениям. Победа в этом конкурсе означает признание выдающихся научных результатов и актуальности проводимых работ молодыми учеными.

Это событие тем более значимо для ФИАН, что победителями стали сразу три кандидата от Института. И это, с одной стороны, несомненное признание научных заслуг и личных исследовательских качеств лауреатов, а с другой – высокая оценка аспирантской школы ФИАН и научного руководства ее наставников.

Один из победителей, младший научный сотрудник Лаборатории лазерной нанофизики и биомедицины ОКРФ ФИАН Иван Михайлович ПОДЛЕСНЫХ узнал о результатах конкурса от коллег. «Победа стала для меня скорее неожиданностью, так как это конкурс очень высокого уровня, хотя я и приложил все усилия во время подготовки своей заявки», – рассказывает Иван.

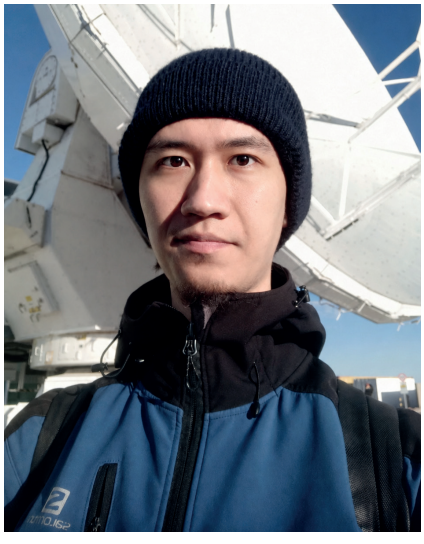
Лауреат конкурса 2025 года отметил возможности, которые дает Физический институт Академии наук молодым ученым: *«В силу огромного разнообразия тематик научных исследований ФИАН позволяет реализовать огромный спектр идей и индивидуальный потенциал каждого молодого ученого. Для меня Институт – это прежде всего возможность совместных исследований и коллабораций между учеными различной специализации для достижения научных результатов мирового уровня»*.

И. М. Подлесных занимается разработкой технологии лазерного легирования кремния, которая позволит интегрировать быстродействующие фотодетекторы в фотонные интегральные чипы. Научный руководитель – М. С. Ковалев, руководитель Лаборатории – С. И. Кудряшов.

Кроме того, победителем конкурса и бу-

Виктория Евгеньевна ГОНЧАРЕНКО

Иван Михайлович ПОДЛЕСНЫХ



*Фёдор Владимирович ХАН**

* Обсерватория ALMA, плато Чахнантор, Чили, 5000 м над уровнем моря

дущим стипендиатом стала Виктория Евгеньевна ГОНЧАРЕНКО, младший научный сотрудник лаборатории «Молекулярная спектроскопия люминесцентных материалов» ФИАН. Она занимается синтезом, исследованием структуры и спектральных свойств новых материалов на основе координационных соединений лантаноидов для создания люминесцентных сенсоров нового поколения. Научный руководитель – Ю. А. Белоусов, руководитель Лаборатории – И. В. Тайдаков.

И третий стипендиат – Фёдор Владимирович ХАН, инженер Лаборатории терагерцовых приборов и технологий АКЦ ФИАН. Федор занимается разработкой и исследованиями сверхпроводниковых интегральных структур терагерцового диапазона частот на основе туннельных переходов «сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник». Научный руководитель – В. П. Кошелец, руководитель Лаборатории – А. В. Худченко.

Молодые сотрудники ФИАН получили медали РАН

Российская академия наук ежегодно присуждает медаль с премиями за лучшие научные работы по 21 направлению исследований молодым ученым и студентам высших учебных заведений России. Медаль является одной из наиболее значимых наград для молодых ученых России, во многих научных учреждениях и вузах служит объективным критерием признания их заслуг.

Медаль РАН присуждается научным работам или циклам работ, вносящим вклад в развитие научных знаний, отличающимся оригинальностью в решении научных задач, выполненным молодыми учеными в возрасте моложе 36 лет. В 2025 году в области ядерной физики медали РАН получили научные сотрудники Отделения теоретической физики им. И. Е. Тамма ФИАН:

– научный сотрудник Лаборатории теории фундаментальных взаимодействий, канд. физ.-мат. наук Никита Михайлович КОЛГАНОВ за работу «Неравновесные явления в ранней Вселенной и непертурбативных квантовых системах»;
– научный сотрудник Лаборатории квантовой теории поля Мария Геннадьевна БЕЛЯКОВА за работу «Спин-независимое взаимодействие дираковских частиц темной материи с нуклонами в моделях составного Хиггса».

Никита Михайлович КОЛГАНОВ

Мария Геннадьевна БЕЛЯКОВА

Персональные стипендии имени Н. Г. Басова для аспирантов ФИАН

В 2025 г., согласно приказу Министерства науки и высшего образования РФ, лауреатами персональной стипендии имени Н. Г. Басова стали:

Сергей Юрьевич ГАВРИЛОВ – младший научный сотрудник Лаборатории лазерной диагностики плазменных структур Отделения ядерной физики и астрофизики ФИАН;

Петр Павлович ПАХОЛЬЧУК – младший научный сотрудник Лаборатории лазерной нанофизики и биомедицины Отделения квантовой радиофизики ФИАН;

Иван Михайлович ПОДЛЕСНЫХ – младший научный сотрудник Лаборатории лазерной нанофизики и биомедицины Отделения квантовой радиофизики ФИАН;

Никита Викторович СЕМЕНИН – младший научный сотрудник лаборатории «Распределенные квантовые технологии для задач машинного обучения» Отделения оптики ФИАН;

Евгения Валерьевна УЛТУРГАШЕВА – младший научный сотрудник Лаборатории лазерной нанофизики и биомедицины Отделения квантовой радиофизики ФИАН.

Об истории учреждения стипендии

В августе 2022 года Президент Российской Федерации Владимир Путин издал указ «О праздновании 100-летия со дня рождения Н. Г. Басова», в котором в т. ч. постановил учредить, начиная с 2023 года, пять персональных стипендий имени Н .Г. Басова для аспирантов ФИАН. Согласно Правилам назначения и выплаты стипендии она назначается сроком на 1 учебный год по результатам конкурсного отбора. В состав конкурсной комиссии входят как ведущие ученые ФИАН, так и представители Министерства науки и высшего образования РФ. Кандидатов на конкурс выдвигает Ученый совет ФИАН.

Кандидат должен показывать высокие успехи в учебе, а также высокую результативность научно-исследовательской или научно-практической деятельности в области лазерной физики: иметь публикации в рецензируемых научных изданиях, участвовать в работах по грантам, являться победителем региональных, всероссийских и международных конкурсных мероприятий.

Молодые ученые ФИАН – лауреаты премии KOLBA

KOLBA — единственная в России премия, посвященная исключительно достижениям женщин в науке и технологиях. Цель проекта — сделать видимым вклад женщин в развитие этих сфер, вдохновить новое поколение и укрепить профессиональное сообщество.

В 2025 году премия была вручена 77 женщинам-ученым в 30 номинациях, охватывающих естественные, технологические, социально-гуманитарные, фундаментальные и прикладные науки. Среди лауреатов премии – две молодые сотрудницы-ученые ФИАН.

Анна Викторовна БОГАЦКАЯ
старший научный сотрудник Сектора теоретической радиофизики ОКРФ ФИАН, канд. физ.-мат. наук, лауреат в номинации «Физика»

Мария Андреевна ТИМИРКЕЕВА
научный сотрудник Отдела плазменной астрофизики АКЦ ФИАН, канд. физ.-мат. наук, лауреат в номинации «Астрономия»

Премия была учреждена в 2023 г. Фондом развития профессиональных инициатив «Женщины атомной отрасли» по инициативе главы национального отделения WiN Russia – Евгении Еньшиной в целях популяризации науки через формирование ролевых моделей среди женщин и девочек – будущих ученых, создания современного образа и усиления медиазначимости, объединения женщин в самое крупное научное сообщество для обмена опытом и знаниями, а также усиления кадрового и интеллектуального капитала в стране.

Конкурс научных работ молодых ученых ФИАН

Традиционно одной из форм поддержки молодых ученых со стороны ФИАН является организация ежегодного Конкурса научных работ молодых ученых.

В 2025 году Конкурс проводился по следующим номинациям:

Премия имени Н. Г. Басова – за работы по направлениям «Лазерная физика», «Радиофизика», «Физика плазмы»;

Премия имени С. И. Вавилова присуждается за работы по направлениям «Оптика» и «Атомная физика»;

Премия имени Л. В. Келдыша – за работы по направлению «Физика конденсированных сред»;

Премия имени П. Н. Лебедева – за работы по направлению «Техника физического эксперимента»;

Премия имени Д. В. Скобельцына – за работы по направлениям «Физика высоких энергий», «Ядерная физика», «Астрофизика»;

Премия имени И. Е. Тамма присуждается за работы в области общей и теоретической физики.

Согласно «Положению о Конкурсе научных работ», участие в конкурсе могут принять сотрудники, аспиранты и студенты организаций–участниц в возрасте не старше 33 лет. К рассмотрению принимаются отдельные работы или циклы оригинальных работ, существенный вклад в выполнение которых внесен конкурсантами.

При проведении Конкурса ставились следующие задачи:

1. Стимулирование творческой инициативы и научной активности молодых ученых ФИАН;
2. Ознакомление научной общественности с достижениями молодых ученых ФИАН.

Для реализации последней задачи работы-победители представляются на всероссийских конференциях молодых ученых, а в дальнейшем публикуются в сборнике, посвященном Конкурсу, и в научных журналах.

В 2025 году молодые ученые ФИАН представили столь интересные и равноценные по научному вкладу работы, что было сложно однозначно определить среди них победителей. В связи с этим сложилась уникальная за всю историю конкурса ситуация, когда жюри приняло решение о присвоении премий сразу двум циклам работ-кандидатов в каждой из номинаций.

Молодёжь ФИАН

Премия имени Н. Г. Басова

Первый лауреат премии им. Н. Г. Басова – научный сотрудник Сектора лазерно-плазменной физики высоких энергий ОКРФ ФИАН, канд. физ.-мат. наук,

Ольга Евгеньевна ВАЙС

за цикл работ

Инновационные источники жесткого синхротронного излучения с высокоинтенсивным фемтосекундным лазерным драйвером и новый метод диагностики лазерного импульса

Проведено численное и теоретическое исследование генерации синхротронного излучения ускоренными электронами в плазменных мишенях околокритической плотности. Показано, что ускорение частиц релятивистской лазерной пулей наименьшего размера обеспечивает как наибольший коэффициент конверсии во вторичное излучение, так и наибольшие энергии генерируемых фотонов.

Источники синхротронного излучения, в основе которых лежит взаимодействие коротких лазерных импульсов с низкоплотной плазмой, обладают уникальными свойствами, такими как малый размер (порядка микронов) и высокая яркость, что связано в том числе с узкой направленностью (~10 мрад) и ультракороткой длительностью генерируемого излучения (~10 фс). В свою очередь, характеристики такого источника зависят от параметров плазменной мишени и взаимодействующего с ней лазера.

В работах предшественников для генерации синхротронного излучения использовался либо режим пузыря в малоплотных мишенях ($c\tau \leq D$), либо прямое лазерное ускорение электронов ($c\tau >> D$), энергии фотонов вторичного излучения не превышали единиц килоэлектронвольт (кэВ). В представленном цикле работ было проведено исследование по генерации излучения в мишенях околокритической плотности для коротких лазерных импульсов. В этом случае стабильное распространение лазерно-плазменной структуры может быть реализовано только в режиме релятивистского самозахвата (РСЗ) лазерного импульса.

Было показано, что в силу высокой самоинжекции электронов в плотной мишени спектр высокоэнергетичных частиц приобретает платообразную форму, а полный заряд превышает единицы нанокулонов, что представляется многообещающим с точки зрения генерации синхротронного излучения. Кроме того, укорочение лазерного импульса до 10 фс обеспечивает конверсию в энергию высокоэнергетичных электронов при $c\tau \approx D$ вплоть до рекордных 50 %, что может повысить эффективность генерации синхротронного излучения.

В ходе исследований генерации синхротронного излучения в режиме РСЗ в широком диапазоне энергий лазера было показано, что при РСЗ в плотной плазме критическая частота вторичного излучения превосходит десятки кэВ даже для 0.85 Дж лазера (см. Рисунок 1) и растет с увеличением его энергии, достигая уровня 1...10 МэВ. Излучение имеет среднюю расходимость (см. Рисунок 2), с более широким углом раствора вдоль поляризации лазерного импульса из-за взаимодействия с ним электронов, что также приводит к поляризации рентгеновского излучения с $\zeta = (I_{lp} - I_{\perp})/(I_{lp} + I_{\perp}) > 0.7$.

Была получена оценка для критической частоты синхротрона при $c\tau \leq D$:

$$\hbar\omega_c \propto P_L^{3/2} \frac{r_\beta}{D} \left(\frac{c\tau}{D}\right)^2,$$

из которой следует, что для лазерного импульса мощностью PL и длительностью τ для генерации жесткого излучения наиболее оптимален режим лазерной пули ($D \approx c\tau$). Кроме того, для меньшего диаметра пучка необходима плазма большей плотности, где электроны самоинжектируются дальше от центральной оси полости, т. е. и относительная амплитуда бетатронных осцилляций r_β/D оказывается выше. Последнее объясняет невысокие значения энергии фотонов в экспериментах с малоплотной плазмой. Для лазерной пули заданной энергии наиболее жесткое излучение будет генерироваться при наибольшей мощности, т. е. после сжатия импульса. Таким образом, инновационный источник синхротронного излучения на РСЗ режиме при $D \approx c\tau$ для ультракороткого импульса обладает рекордными значениями энергии фотонов, узкой направленностью и крайне высокой яркостью.

Острая фокусировка ультракоротких лазерных импульсов – технически сложная задача, требующая контроля непосредственно в фокусе пучка. В цикле работ был предложен метод диагностики параметров лазера на основе прямого ускорения частиц. Было показано, что внедрение современных мето-

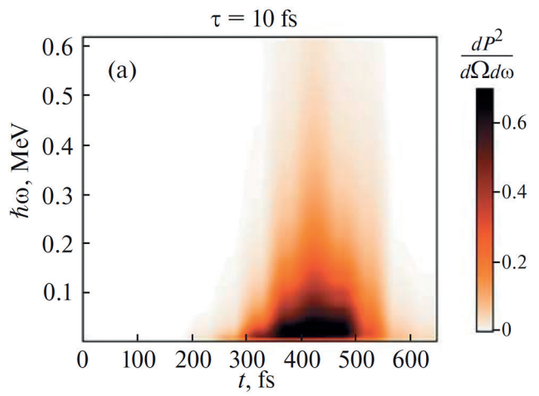


Рисунок 1. Динамика спектра генерируемого электронами рентгеновского излучения (в единицах [Вт/(эВ мрад²)]) в направлении распространения лазерного импульса

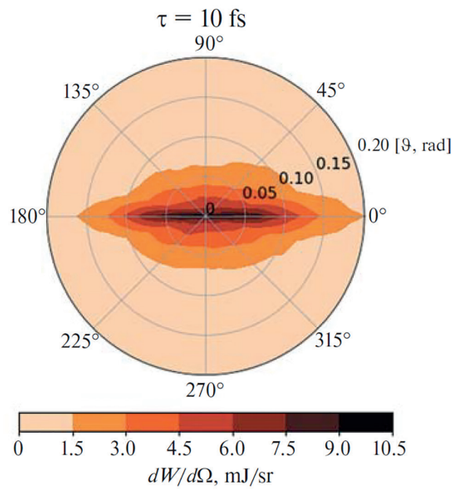


Рисунок 2. Угловое распределение энергии $dW/d\Omega$ синхротронного излучения, генерируемого пучком ускоренных электронов

дов машинного обучения дает возможность восстанавливать также и пространственный профиль лазерного пучка, что крайне актуально для стабилизации режима РС3.

Результаты опубликованы:

1. Vais, O. E. Generation of Synchrotron Radiation During the Interaction between a Multiterrawatt Laser Pulse and a Transparent Plasma. / O. E. Vais, M. G. Lobok, V. Y. Bychenkov. // Plasma Physics Reports. – 2025. – Vol. 51. – Iss. 4. – P. 439-450. – DOI 10.1134/S1063780X25602597.
2. Vais, O. E. Compression of high-power laser pulse leads to increase of electron acceleration efficiency. / O. E. Vais, M. G. Lobok, V. Yu. Bychenkov. // Physical Review E. – 2024. – Vol. 110. – Iss. 6. – Art. ID 065202. – 10 pp. – DOI 10.1103/PhysRevE.110.065202. – arXiv:2409.02671.

Второй лауреат премии им. Н. Г. Басова – научный сотрудник Лаборатории теории плазменных явлений Отдела физики плазмы, канд. физ.-мат. наук

Татьяна Вячеславовна МАМОНТОВА

с циклом работ, полученных в составе научного коллектива Лаборатории.

Взаимодействие излучения с плазмой, образованной при многофотонной ионизации инертных газов

В работе исследовано взаимодействие электромагнитного излучения с плазмой, формирующейся при многофотонной ионизации инертных газов. Особое внимание уделено влиянию эффекта Рамзауэра–Таунсенда на процессы распространения и поглощения волн. Показано, что наличие внешнего магнитного поля и пространственная неоднородность плазмы могут приводить к усилению терагерцового излучения.

Фотоионизованная плазма существенно отличается от термодинамически равновесной вследствие неравновесного распределения электронов по энергиям и скоростям. В режиме многофотонной ионизации энергетический спектр электронов представляет собой узкий пик: электроны приобретают энергию, остающуюся после поглощения минимально необходимого числа фотонов для преодоления потенциала ионизации атома. После завершения действия лазерного импульса вследствие частых столкновений с нейтральными атомами происходит быстрая изотропизация распределения фотоэлектронов по направлениям скоростей, тогда как неравновесность по энергии сохраняется в течение значительно большего времени.

При характерных концентрациях фотоэлектронов, возникающих при многофотонной ионизации, плазменная частота оказывается порядка 10^{12} $с^{-1}$, что соответствует терагерцовому диапазону. Именно в этой области частот наиболее ярко проявляются особенности взаимодействия излучения с неравновесной плазмой. В этих условиях фотоионизованная плазма может выступать в качестве активной среды, в которой энергия неравновесных фотоэлектронов передаётся электромагнитной волне, что приводит к возможности усиления терагерцового излучения.

Рассмотрено взаимодействие циркулярно поляризованной электромагнитной волны со слоем фотоионизованной плазмы инертного газа, помещенным во внешнее магнитное поле (см. Рисунок 1). В работе [2] получены аналитические выражения для коэффициентов отражения и прохождения излучения. Показано, что в условиях циклотронного резонанса возможно значительное увеличение этих коэффициентов при малых отрицательных значениях мнимой части диэлектрической проницаемости.

Появление отрицательной мнимой части

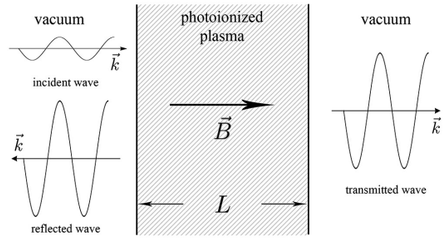


Рисунок 1. Взаимодействие электромагнитной волны с фотоионизованной плазмой [2]

диэлектрической проницаемости связано с эффектом Рамзауэра–Таунсенда, проявляющимся в инертных газах. В условиях циклотронного резонанса диэлектрическая проницаемость определяется эффективной частотой столкновений $\nu_{\text{eff}} = \nu/(1-\alpha/3)$, где ν – частота столкновений электронов с нейтральными атомами инертного газа, $\alpha = \partial \ln \nu / \partial \ln \nu_0$, ν_0 – средняя скорость электронов в плазме. Для ксенона условие $\alpha > 3$, при котором мнимая часть диэлектрической проницаемости становится отрицательной, реализуется при средней энергии фотоэлектронов в диапазоне $0.5\ \text{eV} \lesssim \varepsilon \lesssim 4\ \text{eV}$. Данный диапазон соответствует характерным средним энергиям фотоэлектронов после процесса многофотонной ионизации.

Эти результаты получили дальнейшее развитие в работе [1], где аналогичная задача была рассмотрена для неоднородного плазменного слоя в магнитном поле. Показано, что в условиях циклотронного резонанса энергия неравновесных фотоэлектронов может эффективно передаваться электромагнитной волне, что приводит к усилению терагерцового излучения более чем на два порядка по амплитуде. Установлено также, что размытие границы плазмы и учет уширения функции распределения по скоростям лишь незначительно уменьшают величину усиления, сохраняя сам эффект в практически реализуемых условиях (см. Рисунок 2).

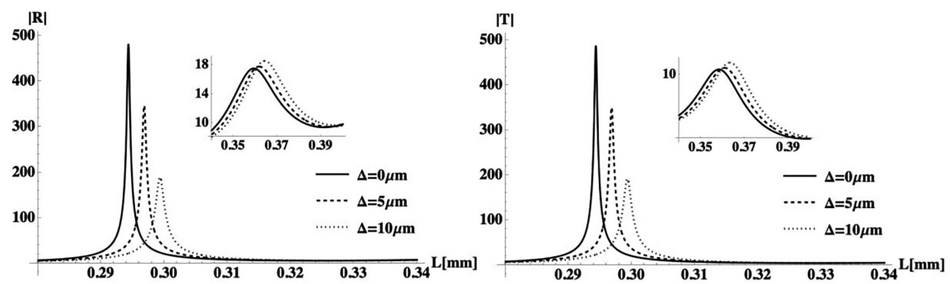


Рисунок 2. Абсолютные значения коэффициентов отражения $|R|$ и прохождения $|T|$ в зависимости от толщины слоя L[мм] при частоте падающего излучения $\omega = 2.2$ ТГц и трех значениях толщины неоднородной части слоя $\Delta = 0, 5, 10$ мкм [1]

Результаты опубликованы:

1. Mamontova, T. V. Amplification of terahertz radiation in inhomogeneous plasma produced by multiphoton ionization of inert gas in a magnetic field. / T. V. Mamontova, S. A. Uryupin. // Physical Review E. — 2025. — Vol. 112. – Iss. 6. — Art. ID 065207. – 8 pp. — DOI 10.1103/pt3c-cwkk.
2. Мамонтова, Т. В. Усиление излучения слоем фотоионизованной плазмы инертного газа в магнитном поле. / Т. В. Мамонтова, С. А. Урюпин. // Физика плазмы. – 2024. – Т. 50. – № 12. – С. 1518-1526. – DOI 10.31857/S0367292124120098 (англ.).

Премия имени С. И. Вавилова

Первый цикл работ представили

научный сотрудник лаборатории «Оптика сложных квантовых систем» ОО ФИАН, канд. физ.-мат. наук

Артур Юрьевич НЕЛЮБОВ

младший научный сотрудник Лаборатории квантовых излучателей ТОП ФИАН

Маргарита Игоревна ПАВЛЕНКО

Спектроскопия одиночных центров окраски в алмазе с узкополосной флуоресценцией

Цикл работ посвящен исследованию оптических свойств одиночных центров окраски в алмазе, образованных элементами IV группы (GeV^-, SnV^-), и новому типу центров (LX). Установлено, что неоднородное уширение бесфононных линий в CVD-материалах вызвано механическими напряжениями решетки, которые могут быть уменьшены отжигом. Впервые охарактеризованы одиночные LX-центры, демонстрирующие рекордно узкую бесфононную линию при комнатной температуре, подавленное фононное крыло и высокую температурную чувствительность.

Представленная работа посвящена экспериментальному изучению фотофизики малых ансамблей (вплоть до одиночных) центров окраски в алмазе. В отличие от широко известных NV^--центров, высокая симметрия центров IV группы (SiV^-, GeV^-, SnV^-) ослабляет фононное взаимодействие, концентрируя излучение в узкой бесфононной линии (БФЛ), что перспективно для источников одиночных фотонов и оптической термометрии.

В первой части исследовано неоднородное уширение БФЛ в CVD-пленках и микроалмазах. Показано, что CVD-материалы характеризуются высокой степенью напряжений кристаллической решетки, причем в пленках напряжения пространственно неоднородны. При криогенных температурах в спектрах флуоресценции и возбуждения GeV-центров вместо стандартной четырехпиковой структуры БФЛ наблюдаются ансамбли крайне узких линий. В областях с низкой концентрацией примесей спектры дифракционно ограниченных зон состоят из одиночных линий шириной вплоть до времени жизни (~130 МГц). Высокотемпературный отжиг в инертной среде снижает напряжения и восстанавливает квартет БФЛ. Аналогичные эффекты выявлены в CVD-микроалмазах с GeV^- [2] и SnV^- [3] при 7 К: вместо квартета регистрируются одиночные узкие линии или их наборы. Таким образом, контролируемое механическое воздействие может служить инструментом настройки спектральных характеристик одиночных дефектов.

Вторая часть [1; Neliubov, A. Yu., et al. (2023). Phys. Rev. B, 107(8), L081406, 10.1103/PhysRevB.107.L081406] характеризует впервые обнаруженные авторами LX-центры (Рисунок 1). При комнатной температуре их спектр содержит рекордно узкую БФЛ (до 0.52 нм) и слабое фононное крыло (фактор Дебая–Уоллера > 70 %). Узкие линии возбуждения позволяют селективно адресовать отдельные центры, что важно для мультицветовой микроскопии и наноскопии сверхвысокого разрешения. Высокая температурная чувствительность БФЛ (0.5 К/Гц$^{1/2}$) при яркости до 10^6 отс/с дает возможность бесконтактной локальной термометрии. При 120 К ширина линии ограничена аппаратной функцией спектрометра (0.028 нм), что обещает работу в качестве источника неразличимых фотонов при более высоких температурах, чем у известных центров. Анализ автокорреляционной функции выявил мерцание на микросекундах; предложена модель с двумя метастабильными уровнями, подтвержденная численным моделированием. Полученные результаты углубляют понимание временной динамики LX-центров и приближают их интеграцию в квантово-оптические устройства.

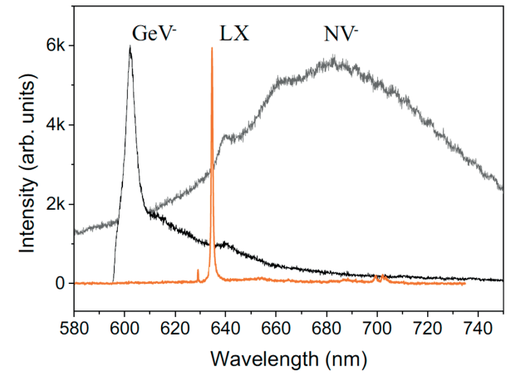


Рисунок 1. Сравнение спектров флуоресценции центров окраски при комнатной температуре: NV (светло-серый), GeV (черный) и LX (оранжевый)

Результаты опубликованы:

1. Photophysics of single LX centers in high pressure–high temperature microdiamonds. / A. Yu. Neliubov, A. O. Tarasevich, M. I. Pavlenko, [et al.]. // Physical Review B. – 2025. – Vol. 111. – Iss. 15. – Art. ID. 155420. – 8 pp. – DOI 10.1103/physrevb.111.155420.
2. Low-Temperature Spectroscopy of Single CVD Microdiamonds with GeV Color Centers. / M. I. Pavlenko, A. Yu. Neliubov, I. Yu. Eremchev, [et al.]. // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2024. – Vol. 88. – Iss. S4. – P. S658-S663. – DOI 10.1134/S1062873824710651.
3. Narrowband photoluminescence of Tin-Vacancy colour centres in Sn-doped chemical vapour deposition diamond microcrystals. / V. Sedov, …, A. Y. Neliubov, M. I. Pavlenko, [et al.]. // Philosophical Transactions: Mathematical, Physical and Engineering Sciences (Series A). – 2024. – Vol. 382. – Iss. 2265. – DOI 10.1098/rsta.2023.0167.

Молодёжь ФИАН

Второй цикл работ представил младши научный сотрудник Лаборатории квантовых излучателей ТОП ФИАН

Александр Олегович ТАРАСЕВИЧ

Развитие корреляционных методов для исследования фотофизических процессов в одиночных излучателях

Разработаны новые методы анализа данных в эксперименте с коррелированным по времени счетом одиночных фотонов от одиночных квантовых излучателей, позволяющие выделять фотолюминесцентный сигнал для отдельных состояний системы, что существенно расширяет информативность по сравнению со стандартными интегральными методами. Методы применены к перовскитным нанокристаллам и одиночным центрам в алмазе, где продемонстрирована возможность выявления ловушечных дефектов, анализа механизмов мерцания и реконструкции энергетических схем излучателей.

Исследование одиночных квантовых излучателей является одной из ключевых задач современной оптики и физики конденсированного состояния. Анализ фотолюминесценции позволяет получать информацию о структуре энергетических уровней, рекомбинационной динамике и роли метастабильных состояний. Одним из основных методов является коррелированный по времени счет одиночных фотонов (time correlated single photon counting, TCSPC) в сочетании с измерением корреляционной функции второго порядка. Стандартный анализ TCSPC-данных, как правило, ограничивается использованием интегрального сигнала. Однако в случае одиночных излучателей, характеризующихся нестационарностью люминесцентных свойств, в том числе мерцанием люминесценции, такой подход приводит к потере значительной части информации.

В данной работе разработан набор методов, основанных на времяразрешённом анализе фотонных корреляций. Ключевая идея заключается в переходе к анализу сигнала для отдельных состояний системы — либо выделяемых по времени задержки после возбуждения, либо соответствующих различным уровням интенсивности люминесценции. Так, например, метод стробированного анализа корреляционной функции второго порядка, при котором фотоны отбираются по времени задержки относительно возбуждающего импульса, позволил раздельно исследовать быструю и замедленную компоненты люминесценции в одиночных перовскитных кристаллах [Eremchev, I. Yu., et al. (2023). Nano Letters, 23(6), 2087-2093, 10.1021/acs.nanolett.2c04004]. Показано, что в хвосте кривой затухания может возникать выраженная антигруппировка фотонов даже при её отсутствии в интегральном сигнале, что свидетельствует о крайне малом числе дефектов, приводящих к замедленной люминесценции.

Развитые методы также были применены для исследования эволюции люминесцентных свойств перовскитных нанокристаллов $CsPbBr_3$ при фотодеградации [Baitova, V. A., et al. (2023). JETP Letters, 118(8), 560-567, 10.1134/S002136402360283X]. Анализ корреляционных функций для различных уровней интенсивности позволил перейти от качественного описания мерцания к количественной идентификации механизмов тушения люминесценции.

Дополнительно методы использованы для исследования одиночных LX-центров в микрокристаллах алмаза [1]. Обнаружено быстрое мерцание в микросекундном диапазоне и антигруппировка фотонов в наносекундном диапазоне, подтверждающая одиночный характер излучателя. В ходе анализа формы корреляционной функции была предложена четырехуровневая энергетическая схема LX-центра.

В заключительной части разработан подход к количественному анализу влияния метастабильных центров безызлучательной рекомбинации [2]. Введена времязависимая характеристика эффективности тушения, позволяющая оценивать вклад различных центров на разных стадиях релаксации. Показано, что в одном кристалле могут сосуществовать несколько тушителей с различной динамикой.

Таким образом, разработанные корреляционные методы существенно расширяют возможности исследования фотофизических процессов в одиночных излучателях и позволяют проводить их детальную диагностику на уровне отдельных состояний.

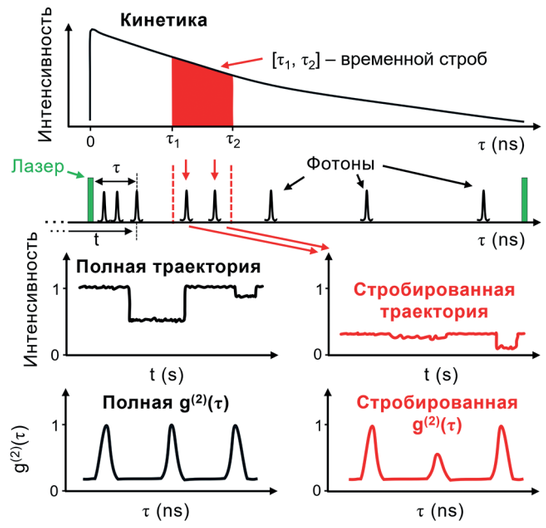


Рисунок 1. Принцип построения стробированных флуоресцентных траекторий и корреляционных функций второго порядка

Результаты опубликованы:

1. Photophysics of single LX-centers in high pressure-high temperature microdiamonds. / A. Yu. Nelubov, A. O. Tarasevich, M. I. Pavlenko, [et al.]. // Physical Review B. – 2025. – Vol. 111. – Iss. 15. – Art. ID 155420. – 8 pp. – DOI 10.1103/PhysRevB.111.155420.
2. Hybrid Nature of Metastable Nonradiative Recombination Centers in Perovskites: Merging Shallow and Deep Defect States. / A. O. Tarasevich, J. Li, M. A. Kniazeva, [et al.]. // PRX Energy. – 2025. – Vol. 4. – Iss. 2. – Art. ID 023005. – 10 pp. – DOI 10.1103/PRXEnergy.4.023005.

Молодёжь ФИАН

Премия имени Л. В. Келдыша

Первый цикл работ представили младшие научные сотрудники отдела «Центр высокотемпературной сверхпроводимости и квантовых материалов им. В. Л. Гинзбурга» ФИАН

Валерия Андреевна ИЕВЛЕВА

и

Елизавета Владимировна ТАРКАЕВА

Тонкие аморфные пленки Re и VO_x с выдающимися характеристиками, изготовленные методом электронно-лучевого напыления

Методом электронно-лучевого напыления получены тонкие аморфные пленки сверхпроводника рения с критической температурой выше 7 К и критическим током 5 кА/мм^2 и аморфные пленки оксида ванадия с температурным коэффициентом сопротивления ТКС ~ 2.5 %/К. Оба материала совместимы с литографией и перспективны для применений в криоэлектронике в качестве сверхпроводящего детектора или элемента квантовой электроники (рений), или как чувствительный слой для болометров (оксид ванадия).

В науке и производстве постоянно возникает запрос на новые функциональные материалы. Способ их изготовления определяет не только структуру и состав, но и совместимость с другими технологическими процессами. В данном цикле работ представлены аморфные тонкие пленки сверхпроводника рения с рекордными параметрами и аморфные пленки оксида ванадия с высоким температурным коэффициентом сопротивления. Оба материала совместимы с литографией, так как получены методом электронно-лучевого напыления (ЭЛН) без дополнительного нагрева подложки выше комнатной температуры.

ЭЛН является одним из способов напыления в вакууме, при котором мощный электронный луч фокусируется на поверхности материала, локально нагревая его выше температуры плавления, что позволяет напылять даже тугоплавкие металлы, например, рений. ЭЛН позволяет контролировать скорость осаждения пленок с точностью до долей ангстрема, создавать сплошные и однородные пленки на достаточно больших площадях. Процесс напыления происходит в высоком вакууме порядка 10^{-8} мбар, что обеспечивает для испаряемых молекул длину свободного пробега много больше размеров камеры. Установка ЭЛН находится в чистой зоне ЦВСиКМ им. В. Л. Гинзбурга.

Критическая температура T_c перехода в сверхпроводящее состояние изготовленных нами тонких рениевых пленок (меньше 50 нм толщиной) достигает 7.5 К, что в несколько раз превышает T_c объемного кристалла, равную 1.7 К. Помимо этого, были обнаружены большие критические токи, составляющие порядка 5000 А/мм^2 при гелиевых температурах. Терагерцовая спектроскопия позволила измерить величину щели в спектре сверхпроводника, оказавшуюся равной 2Δ = 2 мэВ в полном согласии с теорией БКШ.

Работа, посвященная исследованию сверхпроводящих свойств рениевых пленок, была отмечена журналом Journal of Applied physics как одна из лучших в выпуске, украсила обложку номера (Рисунок 1) и была освещена в прессе.

Технология ЭЛН позволяет производить напыление пленок не только в вакууме, но и в азотной или кислородной атмосфере при давлении до 10^{-4} мбар. Соответствующий метод называется реактивным ЭЛН и позволяет получать оксиды и нитриды различных материалов. В отличие от, например, оксидирования пленки из простого вещества, подразумевающего нагрев до достаточно высоких температур, реактивное ЭЛН позволяет, испаряя простое вещество, осаждать непосредственно оксид на холодную подложку. В работе [2], опубликованной в журнале Optical

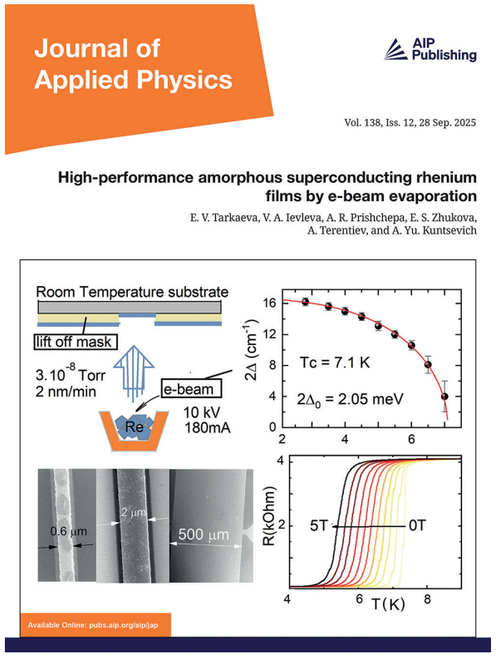


Рисунок 1. Статья [1] вынесена на обложку 12 выпуска 138 тома JAP

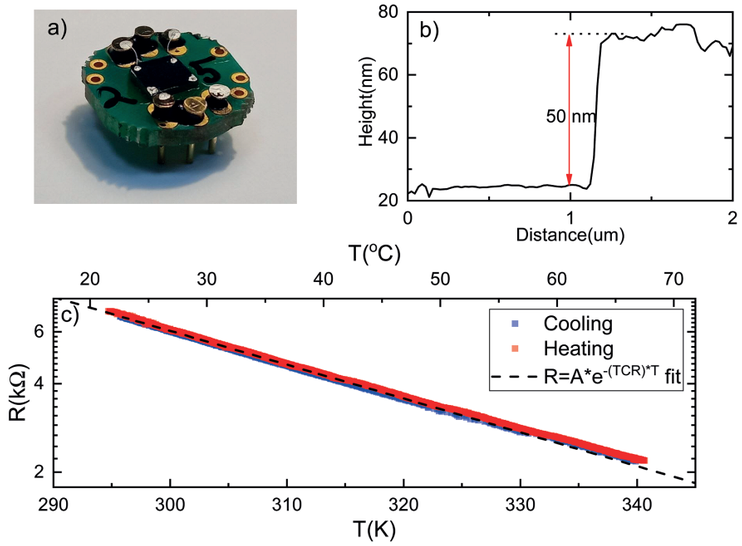


Рисунок 2. a) фотография образца; b) АСМ-скан границы пленки для определения ее толщины; c) вид типичной зависимости сопротивления от температуры одной из пленок VO_x. Красные точки – нагрев, синие – охлаждение, гистерезис отсутствует [2]

Materials, мы демонстрируем получение и изучение свойств аморфного оксида ванадия методом реактивного ЭЛН с достаточно высоким ТКС (около –2.5 %/K) при отсутствии необходимости нагрева подложки в принципе, что открывает возможности для применения данных пленок в качестве чувствительного материала для болометров. Пленки VO_x, предложенные в нашей работе, характеризуются меньшим количеством технологических параметров, однородностью, плавной температурной зависимостью сопротивления в широком интервале температур.

На основе данных пленок уже отрабатываются фотоприемные элементы и on-chip термометры.

Результаты опубликованы:

1. High-performance amorphous superconducting rhenium films by e-beam evaporation. / E. V. Tarkaeva, V. A. Ievleva, A. R. Prishchepa, [et al.]. // Journal of Applied Physics. – 2025. – Vol. 138. – Iss. 12. – Art. ID 123904. – 6 pp. – DOI 10.1063/5.0292196.
2. Amorphous VO_x films with a high temperature coefficient of resistance for bolometric applications grown by reactive e-beam evaporation of V metal. / E. V. Tarkaeva, V. A. Ievleva, A. I. Duleba, [et al.]. // Optical Materials. – 2024. – Vol. 151. – Art. ID 115378. – 15 pp. – DOI 10.1016/j.optmat.2024.115378.

Второй цикл работ представила младший научный сотрудник Сектора теоретической радиофизики ОКРФ им. Н. Г. Басова ФИАН
София Андреевна БОНДАРЕНКО

Высокоэффективная генерация гармоник высокого порядка в поле интенсивного лазерного излучения

В работе исследованы различные механизмы, определяющие эффективность генерации высоких гармоник при взаимодействии интенсивных лазерных импульсов с газами и плазмой. Изучено влияние резонансов генерирующей системы на величину микроскопического отклика, а также на процессы фазового согласования при генерации высоких гармоник. Также исследовано влияние электрического поля плазменной волны, формируемой в результате взаимодействия лазерного импульса со средой, на процессы перерассеяния. Полученные результаты могут быть использованы для разработки источников когерентного ультрафиолетового излучения.

Взаимодействие интенсивных фемтосекундных лазерных импульсов с газами или плазмой сопровождается различными нелинейными явлениями, одним из которых является генерация гармоник высокого порядка (ГГВП). Однако широкое применение этого явления ограничено низкой эффективностью генерации, что определяет актуальность изучения методов увеличения интенсивности гармоник.

Одним из путей увеличения эффективности ГГВП является использование резонансных переходов между состояниями в атоме или ионе. В работе [1] изучается возможность использования автоионизационного состояния (АИС) для увеличения интенсивности излучения при взаимодействии коротких импульсов с газом. В работе изучены модель одномерного атома He и модель двойного маятника и проведена аналогия между ними. При увеличении длительности импульса величина резонансного вклада убывает (Рисунок 1), что соответствует истощению населенности АИС, а фаза резонансного вклада изменяется линейно в результате сдвига уровней атома в результате эффекта Штарка. Показано, что изменения собственной частоты колебаний и затухание в классической системе являются аналогами сдвига частоты в результате эффекта Штарка и изменением населенности АИС в квантовой системе.

При ГГВП происходит фотоионизация среды, в результате чего образуется плазма. При распространении лазерного импульса в плазме происходит формирование плазменной кильватерной волны. Смещение электрона под действием силы Лоренца (магнитный дрейф) ограничивает эффективность генерации высоких гармоник. В работе [2] теоретически исследовано влияние электрического поля плазменной волны на процессы перерассеяния. Показано, что возможна компенсация магнитного дрейфа электрона полем плазменной волны, что приводит к увеличению эффективности процессов перерассеяния. Кроме того, в работе [2] изучено влияние плазменной волны на спектр свободного

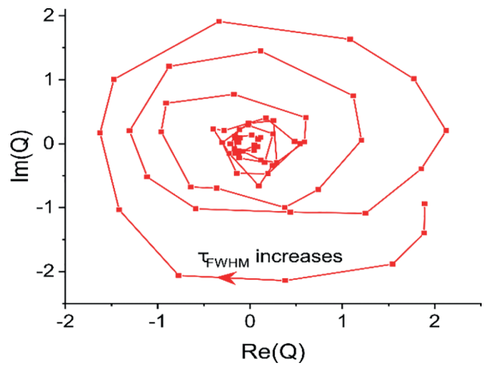


Рисунок 1. Действительная и мнимая часть комплексного параметра Фано Q, описывающего резонансный вклад, для различных длительностей импульса τ_{FWHM}

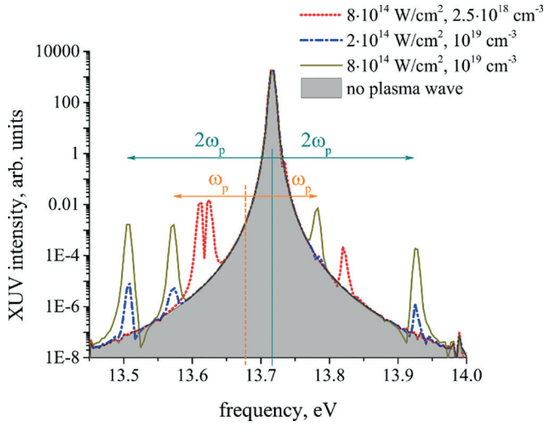


Рисунок 2. Спектры свободного затухания поляризации в отсутствие плазменной волны и при наличии плазменной волны вблизи частоты разрешенного (бирюзовая прямая) и запрещенного (оранжевая прямая) перехода. Интенсивность лазерного излучения и плотность плазмы приведены на рисунке

затухания поляризации. Показано, что наблюдение спектра затухания свободной поляризации в присутствии плазменной волны позволяет измерить частоты дипольно-запрещенных переходов (Рисунок 2) и тем самым расширяет возможности спектроскопии, основанной на свободном затухании поляризации.

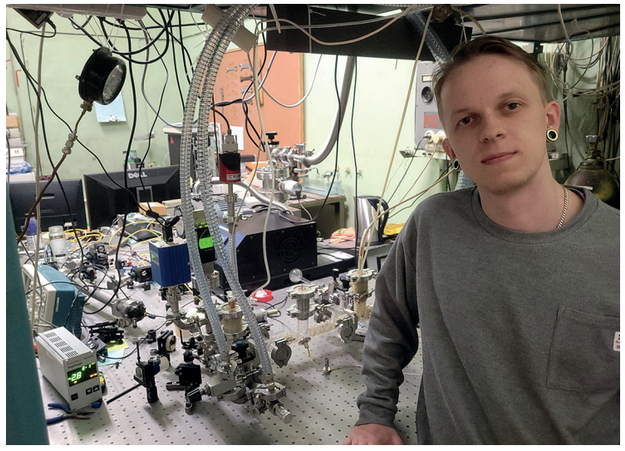
Эффективность ГГВП зависит не только от величины микроскопического отклика атома на частоте гармоники, но и от макроскопических эффектов, связанных с распространением поля в среде. Процессами, ограничивающими рост макроскопического отклика с длиной распространения, являются поглощение излучения в среде и фазовое рассогласование генерирующего и генерируемого излучения.

В работе [3] теоретически изучается макроскопические эффекты при резонансной генерации гармоник высокого порядка в плазме индия. Показано, что резонансные эффекты могут приводить к увеличению как микроскопического, так и макроскопического отклика на определенных частотах.

Результаты опубликованы:

1. Strelkov, V. V. Role of plasma waves in rescattering processes in intense laser fields. / V. V. Strelkov, S. A. Bondarenko, I. V. Smetanin. // Physical Review A. – 2025. – Vol. 112. – Iss. 5. – Art. ID 053101. – 9 pp. – DOI 10.1103/pnh1-nyjh.
2. Bondarenko, S. A. Fano resonance in the XUV generated by helium with few-cycle intense laser pulses and its classical analogy. / S. A. Bondarenko, V. V. Strelkov. // Physical Review A. – 2025. – Vol. 111 – Iss. 5. – Art. ID 053104. – 10 pp. – DOI 10.1103/PhysRevA.111.053104.
3. Strelkov V. V. Macroscopic Aspects of Resonant Generation of High-Order Harmonics in Indium Laser Plasma. / V. V. Strelkov, S. A. Bondarenko. // Physics of Wave Phenomena. – 2025. – Vol. 33. – Iss. 1. – P. 65-71. – DOI 10.3103/S1541308X24700547

Премия имени П. Н. Лебедева



Первый цикл работ представил научный сотрудник Отдела оптики низкотемпературной плазмы ОО ФИАН
Владимир Владимирович ЛАГУНОВ

Двухканальный диодный лазерный спектрометр слабого поглощения для исследования гетерогенных процессов в газе и плазме

Разработан новый экспериментальный комплекс для исследований изменений концентраций молекул во времени в неравновесных условиях в газе и плазме на основе двухканального диодного абсорбционного лазерного спектрометра с цифровым управлением для индивидуальных и коррелированных измерений поглощения в видимой и ближней ИК-областях. Измерения поглощения проводятся во внешнем оптическом резонаторе, базой которого является газоразрядная трубка.

Подробная схема и описание нового двухканального спектрометра представлены в работе [3]. Спектральное разрешение составляет ~10^{-4} см$^{-1}$; чувствительность: ~10^{12} см$^{-3}$ для концентрации молекул H_2O и HDO и ~10^{15} см$^{-3}$ для O_2; временно́е разрешение 1 с.

Обнаружен эффект искажения формы контура линии в резонаторе при скоростях записи спектра ~10^3 см$^{-1}\cdot$с$^{-1}$. Разработана физическая модель эффекта в предположении, что механизм аппаратных искажений связан с конечностью времени жизни фотонов в резонаторе. Результаты сравнения эксперимента и расчета приведены на Рисунке 1 [Lagunov, V. V., et al. (2021). Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 246, 119060, 10.1016/j.saa.2020.119060]. Показано, что при искажениях спектра величина ин-

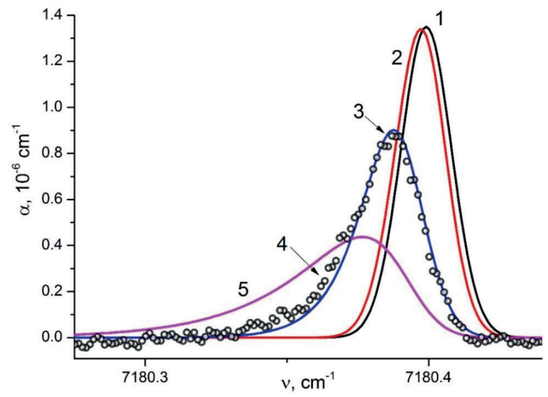


Рисунок 1. Контуры линии поглощения воды P(4) (0_{00}– 0_{20}) при различных скоростях перестройки частоты: 1 – доплеровский контур; (2–5) – рассчитанные и измеренные контуры поглощения; 2– скорость перестройки частоты –100 см$^{-1}\cdot$с$^{-1}$; 3 и 4 –800 см$^{-1}\cdot$с$^{-1}$; 5 –2000 см$^{-1}\cdot$с$^{-1}$ [2]

тегрального поглощения сохраняется, однако для корректных измерений концентрации по поглощению в неравновесных условиях необходима информация о температуре газа, которую получают из ширины доплеровского контура, что становится невозможным и при наличии искажений. Это позволило подбирать режимы работы, оптимизированные по скорости измерения концентраций, чувствительности и точности измерения температуры исследуемой среды.

Оптимизированный комплекс позволил впервые исследовать влияние разряда на активность стенок в процессах формирования химического состава газа в объеме на примере разрядов в смесях гелия с кислородом [Ochkin, V. N., et al. (2022). Applied Physics B, 128(4), 75, 10.1007/s00340-022-07800-3]. Впервые реализован одновременный мониторинг пары H_2O-O_2 в двух его каналах, некоторые результаты приведены на Рисунке 2, подробнее см. [3].

Показано, что процесс распада молекул в плазме инициируется электронами. В исследуемой области пониженных давлений (~1 мбар) и геометрии разряда последующие взаимодействия их фрагментов между собой, включая рекомбинацию молекул, атомов, радикалов, электронов и ионов, происходят преимущественно на стенках, ограничивающих плазму. Обнаружена реакция атомов кислорода в газовой фазе и молекул воды на центрах адсорбции, приводящая к нарушению баланса элементов в разряде [1, 2]. Выявлены определяющие реакции [2].

Обнаружено, что при преобразованиях изотопомеров воды в разряде в смесях газов He-H_2O-D_2 при давлениях (0.7…1.3 мбар) при избыточных по отношению к H_2O количествах D_2 время установления соотношения H_2O и HDO ~5 с. Оно не зависит от пропорций воды и дейтерия [H2O]/[HDO] = 3.2 ± 0.3.

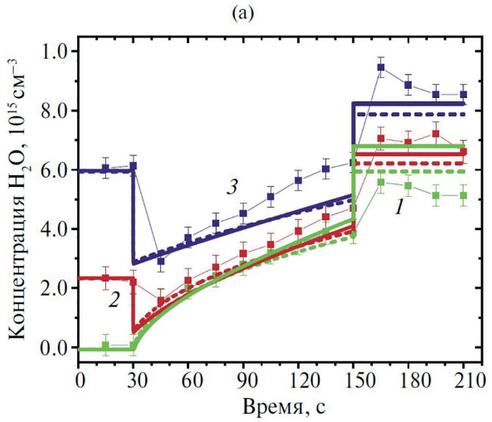


Рисунок 2. Сопоставление измеренных зависимостей от времени концентраций молекул H_2O с расчетными для разных начальных парциальных давлений молекул воды: 1 – O_2 (2 мбар), 2 – H_2O (0.1 мбар) + O_2 (2 мбар), 3 – H_2O (0.25 мбар) + O_2 (2 мбар); сплошные кривые и штриховые кривые – расчеты для разных констант скоростей плазмохимических реакций [5]

Результаты опубликованы:

1. The Influence of Heterogeneous Processes on the Balance of Particles in the Bulk Phase of a DC Glow Discharge in Gas Mixtures Containing Water and Oxygen Molecules. / A. V. Bernatskiy, I. V. Kochetov, V. V. Lagunov, V. N. Ochkin. // Plasma Chemistry and Plasma Processing. – 2025. – Vol. 45. – Iss. 6. – P. 1997-2013. – DOI 10.1007/s11090-025-10603-x.
2. Механизмы нарушения объемного баланса молекул воды и кислорода в отпаянном тлеющем разряде постоянного тока. / А. В. Бернацкий, И. И. Драганов, И. В. Кочетов, [и др.]. // Теплофизика высоких температур. – 2025. – Т. 63. – № 6. – С. 665-673. – DOI 10.7868/S3034610X25060012.
3. Parallel Monitoring of the Dynamics of Oxygen and Water Molecule Concentrations under the Action of a Glow Discharge Using Diode Laser Spectroscopy. / A. V. Bernatskiy, I. V. Kochetov, V. V. Lagunov, V. N. Ochkin. // Physics of Wave Phenomena. – 2024. – Vol. 32. – Iss. 6. – P. 410-422. – DOI 10.3103/S1541308X24700419.

Второй цикл работ представила младший научный сотрудник лаборатории «Динамика реагирующих систем» ОТФ им. И. Е. Тамма ФИАН

Анастасия Дмитриевна МОРОШКИНА

Разработка новых методов и подходов к построению высокоточных моделей горения углеводородных топлив

В цикле работ проведены исследования структуры и динамики пламен метан-воздушных и метан-водород-воздушных смесей при нормальном и повышенном давлении. Существенное развитие получила методика верификации детальных кинетических механизмов горения на основе определения характеристик диффузионно-тепловых осцилляций. На основе полученных данных создан одностадийный механизм горения метан-воздушного пламени, применимый в широком диапазоне составов и давлений.

В настоящее время для моделирования структуры и динамики метан/водород-воздушных пламен существует множество детальных механизмов реакции. Вопрос о верификации и дальнейшей их модернизации по-прежнему остается открытым. Для решения этих проблем нами было предложено использовать характеристики диффузионно-тепловых осцилляций пламени, а именно, критические параметры возникновения колебаний фронта пламени, стабилизированного на плоской пористой горелке, и соответствующую этому режиму частоту колебаний. Была разработана экспериментальная установка, позволяющая исследовать структуру и динамику стационарных и пульсирующих пламен методами анализа сигнала хемилюминесценции OH*, лазерно-индуцированной флуоресценции и тонко-волоконной пирометрии при нормальном и повышенном давлении. Фото экспериментальной установки представлено на Рисунке 1.

На Рисунке 2 показаны: осциллограмма сигнала хемилюминесценции OH*, фотография пламени и двумерные распределения концентрации радикала OH в двух

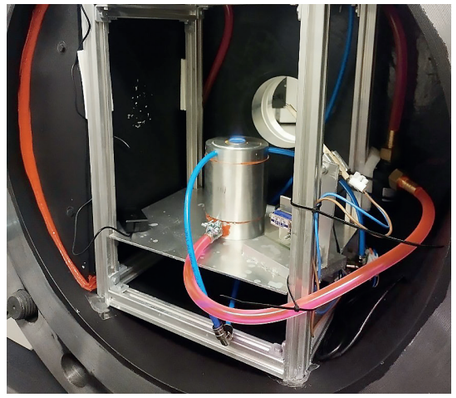


Рисунок 1. Фото экспериментальной установки – камера повышенного давления

фазах пульсаций, полученные методом лазерно-индуцированной флуоресценции.

В работах [1, 2] представлены результаты экспериментального определения границ устойчивости метан-воздушных пламен при нормальном и повышенном давлении и метан-водород-воздушных пламен различного состава с помощью анализа сигнала хемилюминесценции возбужденного радикала OH*. Показано, что при увеличении доли водорода в смеси или увеличении давления общая предсказательная способность численных моделей падает. Это говорит о необходимости дальнейшего совершенствования механизмов реакции для этих практически важных условий.

Полученные результаты позволяют провести сравнение различных детальных кинетических механизмов между собой и являются основой для дальнейшего улучшения их предсказательной способности, поскольку погрешность экспериментального метода меньше, чем различие между разными механизмами.

В случаях, когда решаются задачи газодинамики и использование детальной кинетики является излишним, процессы горения могут быть описаны с помощью одностадийных моделей, однако выбор кинетических констант реакции является неоднозначным. На основе измеренной в наших работах величины общей энергии активации и зависимости ламинарной скорости пламени от состава и давления был построен одностадийный механизм горения метан-воздушного пламени, полностью опирающийся на экспериментальные данные, для широкого диапазона коэффициентов избытка топлива и давлений.

Предложенные в данном цикле работ методы и подходы могут быть распространены на любые виды углеводородных топлив и позволяют улучшать существующие и строить новые модели горения.

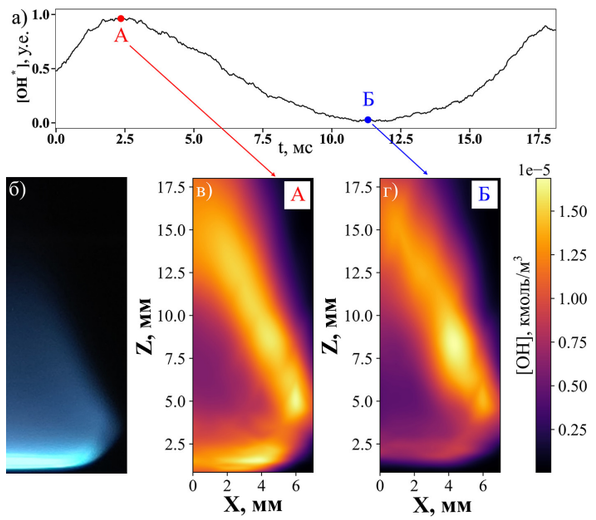


Рисунок 2. Осциллограмма сигнала OH (а), фото пламени (б) и двумерное распределение концентрации OH в двух фазах пульсаций (в)-(г) для метан-воздушного пламени с φ = 1.15, M = 0.1 кг/м²с, MN2 = 0.065 кг/м²с*

Результаты опубликованы:

1. Numerical and experimental study of stability limits of methane-air flame stabilized on a flat porous burner at normal and elevated pressure. / A. Moroshkina, S. Babina, A. Ponomareva, [et al.]. // Combustion and Flame. – 2025. – Vol. 280. – Art. ID 114336. – 11 pp. – DOI 10.1016/j. ombustflame.2025.114336.
2. The performance of reaction mechanism in prediction of the characteristics of the diffusive-thermal oscillatory instability of methane–hydrogen–air burner-stabilized flames. / A. Moroshkina, E. Yakupov, V. Mislavskii, [et al.]. // Acta Astronautica. – 2024. – Vol. 215. – P. 496-504. – DOI 10.1016/j.actaastro.2023.12.032.

Премия имени Д. В. Скобельцына

Первый цикл работ представила старший научный сотрудник Лаборатории тяжелых кварков и лептонов ФИАН, канд. физ.-мат. наук
Наталия Алексеевна СКРОБОВА

Поиски явлений за рамками Стандартной модели и мониторирование ядерного реактора с помощью антинейтрино в эксперименте DANSS

Стандартная модель описывает лишь 5 % Вселенной. Поиск явлений за ее пределами — главная задача физики частиц, особенно нейтринной. Экспериментальные аномалии (реакторная и галлиевая) могут объясняться стерильным нейтрино или гипотезой больших дополнительных измерений (Large Extra Dimensions, LED).

В эксперименте DANSS (эксперимент на Калининской АЭС, КАЭС) впервые применен метод анализа осцилляций по форме энергетического спектра позитронов от обратного бета-распада (ОБР) на разных расстояниях от реактора. Получены лучшие в мире ограничения на параметры стерильного нейтрино: область, предсказываемая предыдущими экспериментами, исключена на уровне более 5σ. Для некоторых Δm^2 установлен предел $\sin^2 2\theta_{ee} < 0.008$. Полный анализ с учетом абсолютной скорости счета ОБР исключает практически всю область BEST и лучшую точку Neutrino-4. Статистически значимых осцилляций стерильных нейтрино не обнаружено.

Теория больших дополнительных измерений была предложена для объяснения Проблемы Иерархий. Если бы эти дополнительные измерения существовали, они могли бы изменять гравитацию на коротких расстояниях, что привело бы к перенормировке массы Планка на больших масштабах. Кроме того, если дополнительные измерения существуют, они могут привести к распространению стерильных нейтрино в балке (многомерном пространстве), что изменит их эффективное смешивание с активными нейтрино. DANSS как и другие нейтринные эксперименты, может найти искажения в вероятностях осцилляций нейтрино или неожиданные спектральные особенности, которые могут указывать на эффекты в других измерениях. Для модели LED показано, что чувствительность DANSS выше при обратной иерархии масс. Полученные ограничения исключают бóльшую часть области, предсказываемой для объяснения аномалий, и являются самыми строгими для ряда значений параметра размера дополнительного измерения.

Кроме фундаментальных исследований свойств нейтрино, детектор DANSS успешно реализует и прикладные задачи. На протяжении более чем 7 лет работы DANSS измеряют тепловую мощность реактора с точностью 1 % для недельного интервала набора статистики, после поправки на выгорание топлива согласно данным о долях деления, полученных от персонала КАЭС. Впервые в мире доли деления ^{235}U и Pu были определены на основе соответствия измеренного спектра антинейтрино от ОБР, с использованием предсказания модели реакторных спектров для четырех основных изотопов ^{235}U, ^{239}Pu, ^{238}U и ^{241}Pu. Восстановленные доли деления ^{235}U и ^{239}Pu по двухнедельным интервалам набора данных с точностью лучше 3 % согласуются в абсолютных долях деления ^{239}Pu с данными, полученными на КАЭС на основе моделирования нейтронных потоков. Отличное соответствие между двумя подходами обеспечивает уверенность в их достоверности. Полученные результаты важны для многочисленных прецизионных исследований в области фундаментальной физики на реакторах, поскольку они помогают ограничить спектр антинейтрино. Они также могли бы быть интересны для контроля за нераспространением ядерного оружия и для улучшения работы реактора.

Более подробно с описанием результатов исследований можно ознакомиться в первой части настоящего сборника, стр. 174–177, а также в сборнике «ФИАН. Основные результаты научной деятельности – 2023», стр. 166–167.

Второй цикл работ представила старший научный сотрудник Лаборатории ускорительных устройств и электромагнитных взаимодействий ТОП ФИАН

Екатерина Юрьевна КИДАНОВА

Исследование механизмов генерации когерентного рентгеновского излучения в структурах с мозаичным упорядочением при взаимодействии с релятивистскими электронами

В работе проведено комплексное экспериментальное и теоретическое исследование параметрического рентгеновского излучения (ПРИ) из высокоориентированного пиролитического графита (ВОПГ). Целью исследования являлось определение влияния степени мозаичности на интенсивность и спектрально-угловые характеристики излучения в геометрии строгого обратного рассеяния. Эксперименты, проведенные при энергии электронов 7 МэВ, позволили зафиксировать более шести порядков дифракции и установить оптимальный диапазон мозаичности (0.4°...1.7°) для создания компактных источников рентгеновского излучения. Выявлены границы применимости кинематической теории и показана необходимость учета динамических эффектов для отражений высоких порядков.

Параметрическое рентгеновское излучение (ПРИ) рассматривается как перспективный механизм для создания компактных и перестраиваемых источников рентгеновского излучения. Одной из ключевых задач является повышение эффективности генерации за счет использования мозаичных кристаллов.

Экспериментальные исследования проводились на установке «Рентген-1» ТОП ФИАН с использованием образцов высокоориентированного пиролитического графита (ВОПГ) различной мозаичности. Для обеспечения точности анализа была реализована методика нормализации сигнала по характеристическому излучению меди (Рисунок 1, справа).

В ходе работы были зафиксированы спектры ПРИ из графита с мозаичностью 0.4°, в которых положения максимумов строго соответствуют условию Вульфа–Брэгга, что подтверждает когерентную природу излучения.

На Рисунке 1 (слева) наглядно продемонстрированы четкие пики различных порядков дифракции. Анализ ширин линий показал их соответствие разрешению детектора, что указывает на высокую монохроматичность.

Особое внимание было уделено влиянию структурных характеристик мишени. Установлено, что увеличение углового разброса микрокристаллитов ведет к снижению пиковой интенсивности и уширению ориентационных зависимостей (кривых качания). На Рисунке 2 приведено сопоставление экспериментальных данных с расчетами в рамках кинематической теории. Выявленные расхождения для высших порядков свидетельствуют об ограниченности кинематического приближения.

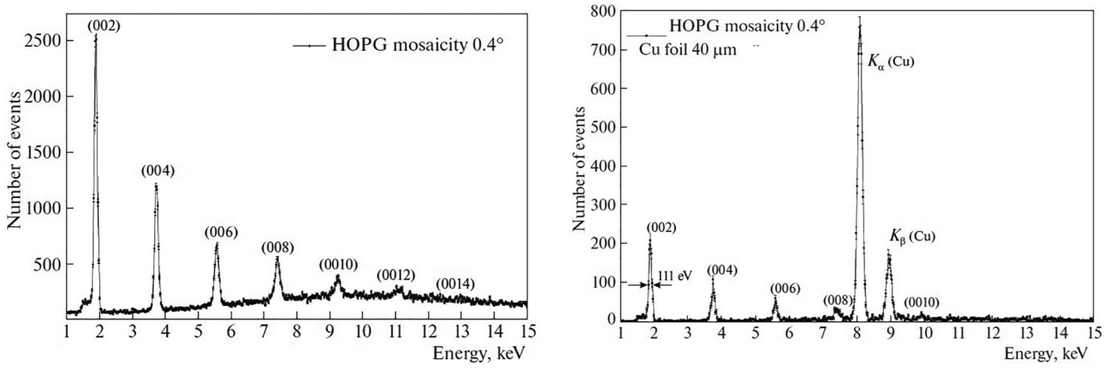


Рисунок 1. Слева: первичный спектр ПРИ из ВОПГ с мозаичностью 0.4°; справа: спектр ПРИ из ВОПГ с мозаичностью 0.4° после размещения за ним медной мишени [Kishin, I. A.,et al. (2023). Bulletin of the Lebedev Physics Institute, 50(11), 30–40, 10.3103/S1068335623110064]

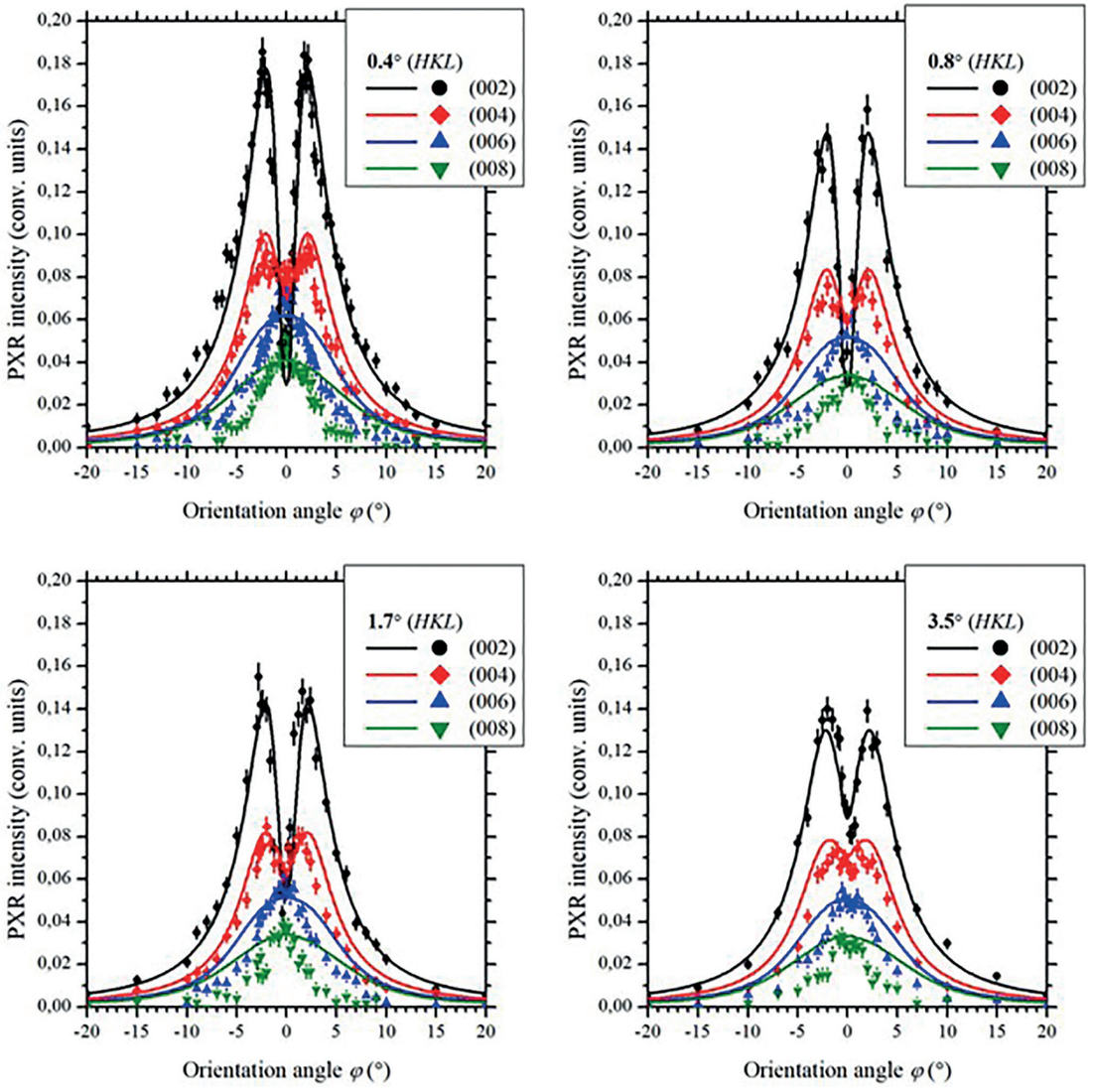


Рисунок 2. Ориентационные зависимости ПРИ в кристаллах графита с различной мозаичностью: точки — экспериментальные данные; линии — теоретические расчеты [1]

Результаты опубликованы:

1. The effect of crystalline mosaicity on the spectral-angular distribution of parametric X-ray radiation. / Alekseev, V. I., Elissev, A. N., Kidanova, E. Yu., [et al.]. // Radiation Physics and Chemistry. – 2026. – Vol. 242. – Art. ID 113595. – DOI 10.1016/j.radphyschem.2026.113595

Премия имени И. Е. Тамма

Первый цикл работ представила научный сотрудник Лаборатории физики высоких энергий ОТФ им. И. Е. Тамма ФИАН

Людмила Владимировна БИШЛЕР

Алгебраическая универсальность в теории Черна–Саймонса

Алгебраическая универсальность в смысле П. Вожеля является новым и интригующим явлением в теоретической физике, которое можно пронаблюдать на примере величин, связанных с присоединенным сектором теории представлений простых алгебр Ли. Оно заключается в том, что корреляторы в теории Черна—Саймонса, а также другие величины, необходимые для их вычисления, возможно записать сразу для всех простых алгебр Ли с помощью трех параметров. Мы расширили набор примеров универсальных величин в рафинированной теории Черна—Саймонса и исследовали их свойства.

Симметрия является фундаментальным принципом при построении физических теорий. Математические конструкции, которые широко используются для описания симметрии, — группы и алгебры Ли. П. Вожель работал над построением конструкции, которая объединила бы все простые алгебры Ли. Построить универсальную алгебру не получилось, однако идея универсальности обрела другую форму: появились универсальные величины. Универсальные величины — рациональные функции трех параметров (см. Таблицу 1), которые при определенном выборе значений параметров совпадают с выражениями для конкретной алгебры Ли. Важной особенностью универсальности является то, что она находится в присоединенном секторе теории представлений алгебр Ли. Алгебраическая универсальность исследовалась как со стороны теории представлений, так и со стороны калибровочных теорий поля.

В теориях поля с развитыми непертурбативными методами есть возможность изучать точные ответы для корреляторов и исследовать их зависимость от калибровочной группы. Одной из таких теорий является (2+1)-мерная теория Черна—Саймонса — простейшая топологическая квантовая теория поля, которая описывает инварианты контуров в трехмерном пространстве – средние значения петель Вильсона. Рафиниро-

ванная теория Черна—Саймонса является ее обобщением с одним параметром и тесно связана с полиномами Макдональда — симметрическими функциями от n переменных с двумя параметрами, которые являются собственными функциями релятивистской системы коммутирующих Гамильтонианов.

Средние значения петель Вильсона тривиальных контуров называют квантовыми размерностями. Они обобщают классические размерности и переходят в них, когда параметр квантования равен единице. Известны универсальные выражения для многих квантовых размерностей представлений из присоединенного сектора, а также универсальные выражения для средних значений петель Вильсона двух- и трехнитевых торических узлов.

В наших работах мы продвинулись в исследовании явления алгебраической универсальности в смысле Вожеля в рафинированной теории Черна—Саймонса. А именно, мы определили аналог квантовых размерностей в рафинированной теории – размерности Макдональда [1,2] и построили для них универсальную формулу для однонитевых корневых систем. Помимо этого, мы получили универсальную формулу [3] для корреляторов в рафинированной теории Черна-Саймонса (гиперполиномов) для зацепления Хопфа и других двухнитевых торических зацеплений. В результате данного исследования было показано, что универсализуются произведения размерностей Макдональда и коэффициентов Литтлвуда—Ричардсона, которые являются строительными блоками инвариантов узлов. Это важное свидетельство в пользу того, что универсальность — характеристика именно калибровочной теории, а не теории представлений. Мы также исследовали вильсоновские средние в теории Черна-Саймонса для четырехнитевых торических узлов и построили для них универсальное выражение [4].

Важнейшие наблюдения данных работ заключаются в следующем. При переходе к рафинированной теории Черна—Саймонса универсальность сохраняется только для алгебр, соответствующих однонитевым корневым системам. При этом алгебраическая универсальность является свойством именно теории Черна—Саймонса, то есть физической теории, а не теории представлений. Универсализуются величины, которые вносят вклад в корреляторы данной теории, как происходит при вычислении универсальных гиперполиномов.

Таблица 1 – Параметры Вожеля

Root system	Lie algebra	$\mathfrak{a}$	$\mathfrak{b}$	$\mathfrak{c}$	$\mathfrak{t}=\mathfrak{a}+\mathfrak{b}+\mathfrak{c}$
A_n	sl_{n+1}	-2	2	$n+1$	$n+1$
B_n	so_{2n+1}	-2	4	$2n-3$	$2n-1$
C_n	sp_{2n}	-2	1	$n+2$	$n+1$
D_n	so_{2n}	-2	4	$2n-4$	$2n-2$
G_2	g_2	-2	$\frac{10}{3}$	$\frac{8}{3}$	4
F_4	f_4	-2	5	6	9
E_6	e_6	-2	6	8	12
E_7	e_7	-2	8	12	18
E_8	e_8	-2	12	20	30

Результаты опубликованы:

1. Bishler, L. On refined Vogel's universality. / L. Bishler, A. Mironov. // Physics Letters B. – 2025. – Vol. 867. – Art. ID 139596. – 5 pp. – DOI 10.1016/j.physletb.2025.139596. – arXiv:2504.13831.
2. Bishler, L. Vogel's universality and Macdonald dimensions. / L. Bishler. // Nuclear Physics: Section B. – 2025. – Vol. 1018. – Art. ID 117085.– 26 pp. – DOI 10.1016/j.nuclphysb.2025.117085. – arXiv:2507.11414.
3. Bishler, L. Macdonald deformation of Vogel's universality and link hyperpolynomials. / L. Bishler, A. Mironov, A. Morozov. // Physics Letters B. – 2025. – Vol. 868. – Art. ID 139695. – 12 pp. – DOI 10.1016/j.physletb.2025.139695. – arXiv:2505.16569.
4. Bishler, L. Torus knots in adjoint representation and Vogel's universality. / L. Bishler, A. Mironov. // The European Physical Journal C. – 2025. – Vol. 85. – Iss. 8. – Art. ID 911. – 12 pp. – DOI 10.1140/epjc/s10052-025-14651-7. – arXiv:2507.11414.

Второй цикл работ представил младший научный сотрудник Лаборатории квантовой теории поля ОТФ им. И. Е. Тамма ФИАН

Семён Иванович МАНДРЫГИН

Многоточечные конформные интегралы

Сформулирована процедура реконструкции, в рамках которой построен новый класс гипергеометрических функций многих переменных, дающих явные выражения для конформных фейнмановских интегралов.

Конформные фейнмановские интегралы позволяют вычислять конформные корреляционные функции квантовой теории поля, в том числе при конечной температуре, играют ключевую роль, например, в суперсимметричной теории Янга—Миллса в четырёх измерениях, а также в голографической дуальности при анализе чернодырных решений в пространствах с отрицательной космологической постоянной.

Предложенный класс функций, названных полигональными, систематически строится согласно набору диаграммных правил, оперирующих с планарными геометрическими фигурами, построенными на решетке Бакстера. Аргументами полигональных функций являются конформно-инвариантные ангармонические отношения, изображаемые в виде четырех- и пятиугольников, вписанных в одну из ячеек решетки. Взаимное расположение фигур, т. е. совпадение или несовпадение вершин и граней, однозначно определяет полигональную функцию и её свойства.

Более подробно о полученных результатах можно узнать в первой части настоящего сборника, стр. 90–91.

Конкурс научных работ им. Н. Г. Басова

Ежегодно Отделением квантовой радиофизики (ОКРФ) ФИАН им. Н. Г. Басова проводится конкурс среди молодых сотрудников подразделения с целью поощрения научных достижений и развития творческих инициатив талантливой молодежи.

Одним из основных условий для кандидатов является публикация результатов исследований и разработок в научных журналах по профилю выбранного направления исследований, признанных на уровне Белого списка и ВАК как критерия значимости и успешности работы. Кроме того, это должны быть новые исследования, т. е. не получавшие иные премии или награды (от ФИАН, Министерства, региональные или федеральные конкурсы и проч.). Такие требования направлены на стимулирование научной деятельности начинающих свой путь в науке: не почивать на лаврах прошлых побед, а двигаться непрерывно вперед.

Победителям конкурса вручается диплом и денежная премия, размер которой ежегодно устанавливается руководством Отделения до объявления о начале конкурса.

В 2025 г. победителями конкурса научных работ им. Н. Г. Басова стали три научных исследования коллективов молодых ученых ОКРФ ФИАН:

Богацкая А. В., Гулина Ю. С., Рупасов А. Е., Попов А. М. «Экспериментальное и теоретическое исследование механизмов прямой лазерной записи двулучепреломляющих периодических субволновых структур в объеме плавленого кварца»;

Врублевская Н. Р., Левусь М. В. «Длинноволновый сдвиг спектра ультрафиолетового филамента — квантово-механический эффект запаздывания нелинейности на аттосекундных временах»;

Киняевский И. О., Корибут А. В., Грудцын Я. В., Ионин М. В. «Фемтосекудная лазерная система среднего ИК-диапазона (5-11 мкм) на основе генерации разностной частоты в нелинейном кристалле с сигнальной волной, формируемой в процессе филаментации в газе».

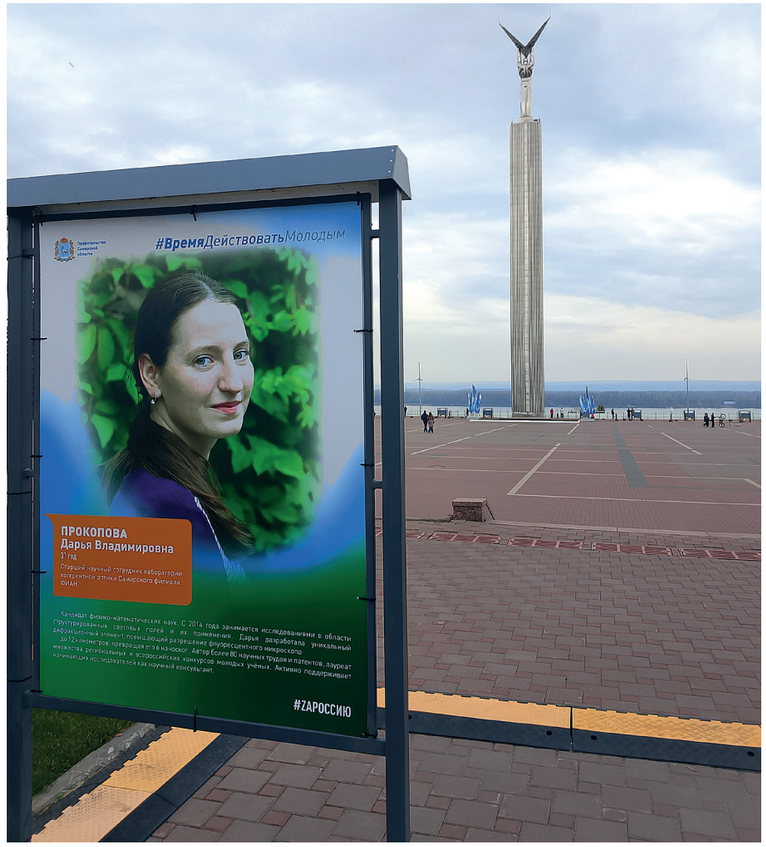
Сотрудник Самарского филиала ФИАН – в числе героев выставки «Время действовать молодым»

В октябре 2025 г. в Самаре на площади Славы прошла масштабная информационно-просветительская выставка #ВремяДействоватьМолодым. Организованное Правительством Самарской области мероприятие было призвано продемонстрировать и отметить вклад молодежи в социально-экономическое развитие региона и страны в целом.

Экспозиция включала в себя фотопортреты, биографии и профессиональные истории успеха представителей различных отраслей – от промышленности, здравоохранения и спорта до образования, IT-сферы и науки.

Среди ста героев выставки – старший научный сотрудник Лаборатории когерентной оптики Самарского филиала Физического института им. П. Н. Лебедева РАН, канд. физ.-мат. наук Дарья Владимировна ПРОКОПОВА.

Дарья Прокопова более 10 лет занимается исследованиями в области структурированных световых полей и их применения, является автором более 80 научных трудов и патентов. Она разработала уникальный дифракционный элемент, повышающий разрешение флуоресцентного микроскопа до 12 нанометров, превращая его в наноскоп.



Молодёжь ФИАН

Молодые фиановцы – победители Самарского областного конкурса «Молодой ученый – 2025»

«Молодой ученый» – ежегодный конкурс, проводимый Министерством науки и высшего образования Самарской области. На протяжении 20 лет конкурс способствует побуждению молодых исследователей к научным свершениям. Для многих конкурсантов региональный этап становится подготовкой к участию в проектах федерального уровня. В 2025 г. участие в конкурсе приняли 298 молодых специалистов из 14 университетов и научных организаций региона.

Победителями Конкурса – 2025 на различных уровнях в номинации «Естественные науки» стали четыре молодых научных сотрудника Самарского филиала (СФ) Физического института им. П. Н. Лебедева РАН.

Номинация «Естественные науки. Студент»

В этой номинации победу одержала Евгения Алексеевна БАТРАКОВА, младший научный сотрудник Центра лабораторной астрофизики СФ ФИАН, с проектом

Исследование радиационно-индуцированных процессов в лабораторных аналогах межзвездных льдов

Работа Евгении Алексеевны посвящена разработке и применению высокоточного квантово-химического подхода для изучения сложных органических молекул (COM) в лабораторных аналогах межзвездных льдов.

Цель исследования: прогнозирование потенциалов ионизации (ПИ) изомеров COM, что необходимо для их однозначной идентификации в фотоионизационной масс-спектрометрии (ФИМС), ключевом методе лабораторной астрофизики. Актуальность обусловлена тем, что традиционная масс-спектрометрия не различает структурные изомеры, имеющие одинаковую массу, а базы данных содержат ПИ лишь для ограниченного числа молекул. Между тем понимание синтеза COM в условиях межзвездной среды (криогенные температуры, вакуум, радиация) необходимо для выяснения путей абиогенного образования пребиотически значимых соединений.

В ходе исследования разработан оригинальный вычислительный протокол на языке Python, включающий автоматическую генерацию всех возможных ротамеров (поворот вокруг σ-связей с шагом 120°), их квантово-химическую оптимизацию (B3LYP/6-31G*) и последующую фильтрацию уникальных конформеров на основе анализа евклидовых норм межатомных расстояний в третьей координационной сфере. Для финального расчета энергий нейтральных молекул и катионов использован композитный метод CBS-QB3 (точность ~0.01…0.02 Å для длин связей).

Подход успешно применен для двух систем:

1. Реакция этанола с CO. Показано, что этилформиат является наиболее термодинамически стабильным продуктом и обладает наибольшим ПИ (10.6 эВ), что делает его устойчивым к фотоионизации излучением Лайман-альфа (10.2 эВ) в межзвездной среде. Это объясняет недавнее обнаружение этилформиата в облаке Стрелец B2;
2. Реакция ацетальдегида с CO. Впервые теоретически предсказана и затем экспериментально подтверждена (в составе международной группы) возможность синтеза метилглиоксаля – ключевого пребиотического кетоальдегида, предшественника аланина, пировиноградной и молочной кислот, глицеральдегида.

Результаты используются на уникальной российской установке «Криогенные поверхностные процессы» (СФ ФИАН) для планирования экспериментов по моделированию химии межзвездных льдов.

Номинация «Естественные науки. Аспирант»

В этой номинации Самарский филиал представил двух победителей.

Первый победитель: Дарья Вадимовна АГАПОВА, младший научный сотрудник Теоретического сектора СФ ФИАН, с проектом

Диагностика параметров солнечной плазмы на основе анализа затухания и дисперсии магнитогидродинамических волн

В проекте разработана самосогласованная магнитогидродинамическая модель распространения магнитоакустических волн в термически активной плазме солнечной короны, в которой функция нагрева зависит не только от температуры и плотности плазмы, но и от величины магнитного поля. В приближении геометрии магнитного слоя выведено общее дисперсионное соотношение, описывающее одновременно быстрые и медленные осесимметричные и изгибные магнитоакустические волны. Это решение снимает ограничения приближения «тонких трубок» и существенно расширяет область применимости метода корональной сейсмологии.

Установлено, что совместное действие геометрической дисперсии и дисперсии, обусловленной тепловым дисбалансом, приводит к формированию модифицированной трубочной скорости, представляющей собой длинноволновый предел фазовой скорости медленных волн. Важным результатом стало обнаружение возможности усиления быстрых магнитоакустических волн в условиях, когда медленные волны остаются затухающими. Данный эффект предлагает новый механизм возбуж-

Молодёжь ФИАН

дения устойчивых изгибных колебаний в корональных петлях за счет обратной связи между плазмой и волной. Количественный анализ погрешностей традиционной сейсмологической диагностики показал, что пренебрежение влиянием теплового дисбаланса, зависящего от магнитного поля, приводит к существенным ошибкам в определении напряженности магнитного поля — более 50 % для длиннопериодных возмущений. При этом величина погрешности слабо зависит от конкретного вида функции нагрева, что позволяет рассматривать расхождение между традиционными и новыми оценками как ценный диагностический инструмент для ограничения возможных механизмов коронального нагрева.

Полученные результаты существенно расширяют теоретическую базу корональной сейсмологии, повышают точность определения магнитного поля, температуры и плотности плазмы и открывают новые пути изучения механизмов нагрева солнечной атмосферы. Разработанные модели имеют важное прикладное значение для прогнозирования космической погоды и могут быть использованы в исследованиях высокотемпературной плазмы, в том числе в задачах управляемого термоядерного синтеза.

Второй победитель: Алина Александровна КУЗНЕЦОВА, младший научный сотрудник Центра лабораторной астрофизики СФ ФИАН, с проектом

Исследование механизмов реакций роста, функционализации и разрушения сложных органических молекул в условиях космоса

Впервые с использованием высокоуровневых теоретических методов установлены механизмы и кинетические параметры трех ключевых типов реакций сложных органических молекул в условиях горения, межзвездной среды и космических льдов.

Установлен механизм окисления аценафтилена – ключевого звена роста полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) по механизму HACA (Hydrogen abstraction acetylene addition). Построена детальная поверхность потенциальной энергии (ППЭ) реакции 1-аценафтила с молекулярным кислородом. Рассчитаны константы скоростей и относительные выходы для различных каналов в диапазоне температур 500…2500 К и давлений 0.01…100 атм. Полученные данные впервые позволили количественно описать конкуренцию путей окисления аценафтилена, что критически важно для моделей роста и разрушения ПАУ в космосе и процессах горения.

Теоретически обоснован механизм последовательной функционализации пиримидина гидроксильным радикалом и аминогруппой с последующей миграцией водорода, приводящей к образованию азотистого основания РНК – цитозина. Показано, что в газовой фазе ключевой этап миграции водорода характеризуется высоким энергетическим барьером, однако при явном добавлении одной-двух молекул воды (моделирование космического льда) барьер снижается до ~50 кДж/моль, что делает реакцию энергетически доступной. Таким образом, было продемонстрировано, что образование цитозина из пиримидина в условиях космических льдов идет значительно эффективнее, чем в газовой фазе, что подтверждает возможность пребиотического синтеза в межзвездной среде.

Определен механизм образования ненасыщенного резонансно стабилизированного радикала гептатриинилидина (C_7H) в реакции трикарбона (C_3) с диацетиленом (C_4H_2). Построена ППЭ реакции $C_3 + C_4H_2$, выявлены ключевые интермедиаты и переходные состояния. Установлено, что реакция начинается с образования ван-дер-ваальсового комплекса, затем через серию изомеризаций и раскрытий циклов приводит к линейному радикалу C_7H – гептатриинилидину, который наблюдался в эксперименте и астрономически в оболочке углеродной звезды IRC+10216. Впервые предложен и квантово-химически подтвержден маршрут синтеза этого радикала в условиях, близких к околозвездной среде.

Номинация «Естественные науки. Кандидат наук»

Победителем в номинации стала Дарья Владимировна ПРОКОПОВА, старший научный сотрудник Лаборатории когерентной оптики СФ ФИАН, канд. физ.-мат. наук.

Отметим, что Дарья Владимировна собрала полный комплект номинаций – Студент, Аспирант и Кандидат наук, – став полным кавалером конкурса «Молодой ученый». В 2025 году она победила с проектом

Структурированные световые поля для наноскопии и манипуляции нано- и микрообъектами

Структурированные световые поля – это поля с заданным распределением интенсивности и/или фазы, и/или поляризации. Их применение открывает новые возможности для развития различных областей науки и техники. В рамках работы голографическим методом были физически реализованы Три-Эйри пучки с различным значением параметров смещения, изучены их свойства при распространении и фокусировке. Установлено согласие поведения экспериментально сформированных пучков с предсказанием теории.

Исследованы возможности и особенности создания массивов световых ловушек с использованием дифракционных оптических элементов (ДОЭ) на основе фазовых распределений призмы. Показано, что качество формируемых световых полей зависит от формы секций, на которые разбивается рабочая область модулятора света, найдена оптимальная шестиугольная форма области. Использование ДОЭ с шестиугольной и квадратной формами субэлементов в схеме оптотермического пинцета позволило получить набор симметричных точечных ловушек. Проведены эксперименты по захвату ла-

Молодёжь ФИАН

тексных микрочастиц диаметром 3 и 5 мкм. Продемонстрирована возможность формирования упорядоченных структур из таких микрочастиц. Качество формируемой структуры зависело как от типа используемой маски, так и от размера и плотности частиц.

Исследованы стационарные ДОЭ, позволяющие формировать двухлепестковые вращающиеся световые поля. Такие элементы могут модифицировать функцию рассеяния точки (ФРТ) флуоресцентных микроскопов для реализации экспериментов по трехмерному определению пространственного положения точечных излучателей с нанометровой точностью (3D-наноскопия). Исследованные ДОЭ были изготовлены на бихромированной желатине (БХЖ) методом контактной печати и методом прямой лазерной записи по фоторезисту с последующим напылением слоя алюминия на сформированные структуры. Показано, что обе методики позволяют физически реализовать рабочую структуру ДОЭ, которая эффективно формирует двухлепестковую картину. Средняя эффективность работы ДОЭ, изготовленного методом прямой лазерной записи по фоторезисту составила ~76 %, что позволяет применять такие ДОЭ в задачах трехмерной локализационной микроскопии сверхвысокого разрешения. Использование ДОЭ на БХЖ в системе люминесцентного трехмерного наноскопа позволило провести осевую локализацию положения точечных флуоресцентных меток с субдифракционной точностью ≈ 30 нм.

Конкурс «Молодой ученый» проводится Министерством науки и высшего образования Самарской области с 2007 года. Программа конкурса включает гуманитарные, общественные, естественные и технические науки. Согласно требованиям конкурса, в каждой из его номинаций – Студент, Аспирант, Кандидат наук – конкурсанты могут победить лишь единожды. Став победителем, второй раз уже нельзя подать заявку на участие в конкурсе в той же самой номинации.

Молодые ученые и конструкторы из ФИАН 2025 года

В апреле 2025 г. в Министерстве науки и высшего образования Самарской области состоялось подведение итогов конкурса на назначение денежных выплат молодым ученым и конструкторам, работающим в регионе. В рамках данного конкурса были рассмотрены 175 заявок, поступивших от 23 организаций, включая университеты, научно-исследовательские институты и предприятия реального сектора экономики Самарской области. Тематика представленных научных проектов полностью соответствовала приоритетным направлениям научно-технологического развития Российской Федерации.

Помимо научного исследования критериями конкурсного отбора являются активное участие соискателя в течение года в научно-исследовательских и опытно-конструкторских работах (количество выполненных в течение года НИР и НИОКР), научных мероприятиях различного уровня, публикационная активность, а также возможность коммерциализации и практического применения результатов НИОКР (количество патентов, свидетельств о регистрации программ и актов внедрения результатов НИР и НИОКР за последние 5 лет).

По итогам конкурса в ТОП-100 молодых ученых и конструкторов Самарской области вошли шесть сотрудников Самарского филиала (СФ) ФИАН:

1) по приоритетному направлению Космические и авиационные технологии

Дмитрий Сергеевич РЯЩИКОВ, старший научный сотрудник Теоретического сектора СФ ФИАН, канд. физ.-мат. наук, с проектом «Конструирование функции коронального нагрева для численного моделирования гравитационно стратифицированной атмосферы с эффектом теплового дисбаланса»,

Дарья Вадимовна АГАПОВА, младший научный сотрудник Теоретического сектора СФ ФИАН, с проектом «Моделирование и анализ коэффициента поглощения/усиления изгибных магнитоакустических волн в неоднородных тепловыделяющих плазменных средах»;

2) по приоритетному направлению Экология и рациональное природопользование

Любовь Ивановна КРИКУНОВА, младший научный сотрудник Центра лабораторной астрофизики СФ ФИАН, с проектом «Квантово-химическое исследование химических реакций нитрилов R-CN с метиновым радикалом CH»;

3) по приоритетному направлению Информационные технологии и электроника

Елизавета Андреевна ЯРУНОВА, младший научный сотрудник Теоретического сектора СФ ФИАН, канд. физ.-мат. наук, с проектом «Внешнее оптическое излучение как метод управления оптическим полем миниатюрных широкоапертурных полупроводниковых лазеров»,

Дарья Владимировна ПРОКОПОВА, старший научный сотрудник Лаборатории когерентной оптики СФ ФИАН, канд. физ.-мат. наук, с проектом «Особенности формирования спиральных полей голографическим способом для задач наноскопии, микроманипуляции, распознавания изображений»;

4) по приоритетному направлению Производственные технологии (лазерные и электронно-ионно-плазменные технологии)

Алексей Петрович ТОРБИН, старший научный сотрудник Лаборатории физико-химической кинетики СФ ФИАН, канд. физ.-мат. наук, с проектом «Исследование характера возникновения филаментов в диэлектрическом барьерном разряде в кислород-азотных смесях».

Слева направо: Д. С. Рящиков, Д. В. Агапова, Л. И. Крикунова, Е. А. Ярунова, Д. В. Прокопова, А. П. Торбин

МЫ В НАУКЕ

Гранты и научные проекты

Победители конкурсов РНФ – 2025

по мероприятию «Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований отдельными научными группами»

1. Грант 25-12-00314. «Разработка и исследование новых оптических элементов для мягкой рентгеновской области спектра (5–25 нм)», руководитель – д-р физ.-мат. наук, гл. научн. сотр. Отдела спектроскопии ОО Е. Н. Рагозин.
2. Грант 25-13-00399. «Создание новых люминофоров и люминесцентных сенсоров на основе гетерометаллических комплексов лантаноидов: рациональный дизайн, основанный на повышении эффективности передачи энергии возбуждения», руководитель – д-р хим. наук, вед. научн. сотр. Лаборатории «Молекулярная спектроскопия люминесцентных материалов» ОО И. В. Тайдаков.

по приоритетному направлению деятельности РНФ «Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований малыми отдельными научными группами»

3. Грант 25-22-00565. «Состояния частичной синхронизации в распределенных динамических системах, основанных на реакционно-диффузионном представлении и его модификациях», руководитель – д-р физ.-мат. наук, гл. научн. сотр. Лаборатории нелинейной динамики и теоретической биофизики ОТФ им. И. Е. Тамма А. А. Полежаев.
4. Грант 25-22-00566. «Оптическая актинометрия плазмы разряда с полым катодом: влияние актинометрических добавок на плазменные параметры и результаты измерений», руководитель – канд. физ.-мат. наук, ст. научн. сотр. Отдела оптики низкотемпературной плазмы ОО А. В. Бернацкий.
5. Грант 25-22-00614. «Редкие четырехлептонные распады тяжелых мезонов в технике ортогональных амплитуд», руководитель – д-р физ.-мат. наук, гл. научн. сотр. Лаборатории взаимодействия излучения с веществом ОЯФА С. П. Баранов.
6. Грант 25-22-00716. «Исследование физических процессов и методов реконструкции ISR-фотонов на будущем коллайдере CEPC», руководитель – д-р физ.-мат. наук, вед. научн. сотр. Лаборатории тяжелых кварков и лептонов А. Г. Друцкой.
7. Грант 25-22-00763. «Моделирование населения космологических пустот», руководитель – канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр. Лаборатории теоретической и наблюдательной космологии АКЦ С. В. Пилипенко.
8. Грант 25-22-00832. «Неравновесная квантовая теория поля: квантовые квенчи и негауссовы начальные корреляции», руководитель – канд. физ.-мат. наук, ст. научн. сотр. Лаборатории теории конденсированного состояния ОТФ им. И. Е. Тамма А. Г. Семенов.
9. Грант 25-22-00899. «Мультиспектральная цифровая голографическая микроскопия на осно-

ве акустооптической фильтрации излучения для исследования лазерно-индуцированной оптической анизотропии в диэлектрических материалах», руководитель – канд. физ.-мат. наук, науч. сотр. Лаборатории лазерной нанофизики и биомедицины ОКРФ А. В. Горевой.

10. Грант 25-22-00944. «Теоретическое исследование структур в молекулярной системе C-N-O, представляющих интерес для создания новых энергоемких материалов», руководитель – канд. физ.-мат. наук, ст. научн. сотр. Лаборатории теории сверхпроводимости и статистической физики сложных систем ОТФ им. И. Е. Тамма С. В. Лепешкин.

по итогам пятого совместного конкурса РНФ и DST – Департамента науки и технологий Министерства науки и технологий Республики Индии по приоритетному направлению деятельности РНФ «Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований международными научными коллективами»

11. Грант 25-42-01036. «Закрученные 2D материалы с нарушенными симметриями как платформа для электронных и оптических устройств нового поколения», руководитель – д-р физ.-мат. наук, рук-ль Лаборатории спиновой физики двумерных материалов ФИАН ОФТТ А. Ю. Кунцевич.

Проект «Развитие научно-технологической инфраструктуры и комбинированных технологий адронной терапии и ядерной наномедицины на базе ускорительных комплексов отечественного производства»

Работы по проекту выполняются в Физическом институте им. П. Н. Лебедева РАН (головная организация) в рамках соглашения с Министерством науки и высшего образования о предоставлении из федерального бюджета гранта в форме субсидии от 30.05.2025 г. № 075-15-2025-453. Соисполнители проекта – Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» и «НМИЦ радиологии» Минздрава России.

Цель исследовательской программы проекта – реализация следующих мероприятий Федеральной научно-технической программы развития синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры на период до 2030 года и дальнейшую перспективу:

1. Проведение синхротронных и нейтронных исследований (разработок), необходимых для решения принципиально новых фундаментальных и крупных прикладных задач;
2. Создание сетевой синхротронной и нейтронной научно-исследовательской инфраструктуры на территории Российской Федерации;
3. Подготовка специалистов в области разработки, проектирования и строительства источников синхротронного и нейтронного излучения, а также научных кадров для проведения синхротронных и нейтронных исследований (разработок) в целях получения результатов мирового уровня.

В 2025 г. в соответствии с планом-графиком выполнены работы первого этапа проекта, в ходе реализации которого были получены значимые результаты.

Усовершенствованы методы лазерной абляции и модернизирована установка лазерного синтеза для увеличения производительности наработки наночастиц (НЧ) нитрида гафния, карбида титана, нитрида циркония и висмута. Проведена их комплексная физико-химическая характеризация современными аналитическими методами. На основе полученных НЧ созданы наноформуляции (НФ) путём функционализации поверхности биополимерами для исследования биораспределения и накопления в опухолях. Технология внедрена в МРНЦ им. А.Ф. Цыба — филиале НМИЦ радиологии Минздрава РФ.

Для развития адресной протонной терапии наработан и очищен рекомбинантный иммунотоксин DARP-LoPE, продемонстрировавший специфичное связывание с клетками SKOV3 и BT-474 со сверхэкспрессией рецептора HER2.

Оценена цитотоксичность наноформуляций (Ti3C2-PAA, HfN-PEG, ZrN-Chit) in vitro: установлено отсутствие выраженной токсичности в концентрациях до 300 мкг/мл на линиях меланомы B16/F10 и карциномы 4T1. НФ HfN-PEG повышают радиочувствительность опухолевых стволовых клеток линий SiHa и MCF-7 к протонному облучению, причём более выраженный эффект наблюдается для клеток рака шейки матки.

В экспериментах in vivo подтверждена хорошая переносимость HfN-Plu при интратуморальном введении (3 мг/мышь) и отсутствие системной токсичности. Выявлен значимый противоопухолевый эффект сочетанного нейтрон-протонного облучения по оптимизированной схеме.

Разработана математическая модель комбинированной протонной терапии с радиосенсибилизирующими НЧ, позволившая определить оптимальные параметры введения биомолекул и синхронизации с облучением. Установлено, что терапевтическая эффективность зависит от концентрации, пространственной однородности распределения НЧ и временного согласования с моментом облучения.

Для облучения движущихся опухолей на КПТ «Прометеус» внедрена технология респираторного гейтинга на основе четырехэлектродной схемы измерения биоимпеданса, обеспечивающей улучшенное соотношение сигнал/шум. Разработан и протестирован элемент магнитной системы для вывода пучка под углом к горизонту на протонном синхротроне ФИАН.

Изготовлен экспериментальный стенд для формирования мини-пучков протонов на КПТ «Прометеус». Проведено математическое моделирование отклика ионизационных камер для задач референсной дозиметрии.

В части подготовки кадров модернизирован образовательный модуль «Адронная лучевая терапия в онкологии» программы ординатуры, разработана и реализована программа ДПО «Ядерная наномедицина» (21 слушатель), проведены международная конференция и молодежная научная школа.

Мы в науке

IX Международная конференция по сверхбыстрым оптическим явлениям «UltrafastLight-2025»

Время проведения – с 29 сентября по 2 октября 2025 г.
Место проведения – ФИАН

UltrafastLight – это ежегодная международная конференция, посвященная наиболее важным аспектам сверхбыстрых явлений в различных областях естественных наук и техники. Организатором традиционно выступает Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН. Тематика конференции охватывает сверхбыстрые явления в ионизированных газах, полупроводниках и металлах, сверхбыстрые лазерные технологии, частотные гребни в спектроскопии и оптических часах, экстремальный свет и многие другие.

В рамках Конференции было представлено шесть пленарных докладов по приоритетным направлениям мировой науки (лазерная физика, материаловедение, лазерные технологии и науки о жизни), 50 приглашенных и 120 устных докладов, а также более 30 стендовых сообщений. Общее число участников превысило 190 человек, из которых более 170 представляли различные города России (Москва, Санкт-Петербург, Томск, Нижний Новгород, Новосибирск, Саров и другие). Также в мероприятии приняли участие зарубежные ученые из Китая, Ирана и Индии. В последнее время отмечается значительный интерес к Конференции со стороны азиатских исследователей, и участие ученых этого региона планируется существенно расширить в следующем году. Отметим, что «UltrafastLight» является одной из трех ключевых международных конференций в данной области наряду с «Ultrafast Phenomena» (США) и «Ultrafast Science» (КНР).

На открытии Конференции с приветственным словом выступил руководитель Отделения квантовой радиофизики им. Н. Г. Басова (ОКРФ) ФИАН, вице-председатель программного комитета профессор **А. А. Ионин**.

В пленарном докладе проректора Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова (МГУ) и заведующего кафедрой нанофотоники, члена-корреспондента РАН, профессора **А. А. Федянина** был представлен обзор достижений в области лазерных методов создания метаоптических элементов в объеме прозрачных диэлектриков, а также перспективы нейроморфной фотоники и оптической обработки информации.

Участники IX Международной конференции «UltrafastLight-2025»

Пленарный доклад «Многофункциональная лазерная установка килоджоульного уровня «ЭЛЬФ»: концептуальное проектирование и программа исследований в области высоких плотностей энергии» представили соавторы: директор Института лазерных и плазменных технологий НИЯУ МИФИ **А. П. Кузнецов** и заведующий кафедрой теоретической и ядерной физики НИЯУ МИФИ **С. В. Попруженко**. Выступление было посвящено программе исследований на лазерной установке с пользовательским интерфейсом, которая по своим характеристикам предоставит учёным из различных лабораторий и институтов широкий спектр возможностей для исследований.

Профессор **Хау Тиан**, декан Школы физики Харбинского технологического института (Harbin Institute of Technology, КНР) осветил вопросы инженерии доменной структуры и сверхбыстрых динамических процессов в оптоэлектронных функциональных материалах.

Профессор МГУ **А. Б. Федотов** в пленарном докладе сделал обзор недавних достижений по механизмам генерации, характеристикам и применениям фазово-стабильных однопериодных импульсов.

В приглашенном докладе профессор **Шао Цзянда** Шанхайского института оптики и точной механики (SIOM, КНР), директор Китайско-российской совместной лаборатории, иностранный член РАН дал обзор последних разработок в области компрессии и посткомпрессии в петаваттных лазерах, рассказал о существующих проблемах и путях их решения.

В приглашенном докладе руководителя Лаборатории нанофизики и биомедицины Центра лазерных и нелинейно-оптических технологий ОКРФ ФИАН, вице-председателя программного комитета профессора **С. И. Кудряшова** были представлены результаты бесконтактного измерения структурных и электрических свойств сверхлегированного кремния с помощью терагерцового зондирования и спектроскопии комбинационного рассеяния света.

Директор Центра международных обменов и сотрудничества Школы физики Харбинского технологического института профессор **Лю Сингуанг** (КНР) выступил с докладом «Многомерное управление хироптическим откликом с помощью метаструктур» рассмотрел подход к управлению подобными метаструктурами.

Участники китайской делегации посетили мемориальный кабинет академика Н. Г. Басова – директора ФИАН (1973-1989) и лауреата Нобелевской премии по физике (1964). Профессор **А. А. Ионин** рассказал гостям об истории ФИАН и основателе Отделения квантовой радиофизики Николае Геннадиевиче Басове, после чего состоялась дискуссия о перспективах развития квантовой электроники и лазерной физики в России, Китае и странах Азии.

6-ая Международная конференция «Фундаментальные проблемы сверхпроводимости» – ФПС’25

Время проведения – с 28 сентября по 4 октября 2025 г.
Место проведения – г. Москва

Конференция посвящена сложным и перспективным новым материалам, результатам исследований и разработок в области сверхпроводимости. Организатором Конференции выступил «Центр высокотемпературной сверхпроводимости и квантовых материалов им. В. Л. Гинзбурга» ФИАН.

В мероприятии приняли участие более 140 исследователей из Москвы, Санкт-Петербурга, Красноярска, Нижнего Новгорода, Екатеринбурга, Казани и других городов России, а также ученые из Индии, Китая, Германии и Италии. Тематика Конференции включала в себя фундаментальные вопросы сверхпроводимости, сверхпроводимость при высоких давлениях, свойства сверхпроводников и квантовых материалов, сверхпроводимость и магнетизм, фундаментальные аспекты прикладной сверхпроводимости.

В честь 10-летнего юбилея открытия сверхпроводимости в супергидридах на ФПС’25 была организована секция памяти М. И. Еремца, на которой академик **В. В. Стружкин** (HPSTAR, China) и академик РАН **В. М. Пудалов** (ФИАН) представили достижения в области синтеза новых супергидридов и экспериментального исследования свойств.

С пленарными докладами выступили **В. А. Зюзин** (ИТФ РАН), чл.-корр. РАН **М. М. Коршунов** (ИФ СО РАН), **Дж. Уммарино** (Политехнический институт Турина, Италия) и другие.

Широко обсуждались идеи новых механизмов куперовского спаривания для объяснения неклассической сверхпроводимости. Здесь слушателей заинтересовали доклады чл.-корр. РАН **М. Ю. Кагана** (ИФП РАН), **Вэй Ку** (Институт Цун Дао Ли, Шанхай, Китай).

Отдельный интерес представлял обзорный доклад проф. **Пратапа Райчаудхури** (Институт фундаментальных исследований Тата, Мумбаи, Индия) об экспериментальных исследованиях сверхпроводимости.

В секции по прикладной сверхпроводимости рассказали:

– о современных низкотемпературных сверхпроводниках и их применении в магнитных системах для ИТЭР и для ускорителей, первых полученных образцах проводов на основе железосодержащих сверхпроводников (**И. Абдюханов**, АО «ВНИИНМ»);
– об истории развитии производства ВТСП лент II поколения и внедрении их в различные устройства, включая магнитные системы для УТС (**М. Мойзых**, ООО «СуперОкс»);
– о воздействии различных видов облучения, которые в дальнейшем будут подвержены ВТСП-ленты в процессе эксплуатации (**П. Дегтяренко**, ООО «С-Инновации»);
– о проектируемой сверхпроводящей магнитной системе для малогабаритного сферического токамака MEPHIST-1 (**С. Покровский**, НИЯУ МИФИ);
– о пилотном проекте криомагнитной системы со стационарным магнитным полем 35 Тл (**А. Левахова**, ЦВСиКМ ФИАН)
– и многие другие.

Актуальные задачи для исследования и не решенные до сих пор теоретические и экспериментальные проблемы активно обсуждались на круглом столе в неформальной открытой дискуссии.

Организаторы не обошли вниманием и молодых участников Конференции. В последний день ФПС’25 была организована специальная секция, на которой студенты и аспиранты могли устно рассказать об исследованиях, представленных в своих постерных докладах, и приобрести опыт устных выступлений и ведения научных дискуссий на английском языке.

Подводя итоги, можно отметить, что в России направление прикладных работ и фундаментальных исследований сверхпроводимости развивается достаточно интенсивно, создавая возможности для реализации крупномасштабных проектов на основе сверхпроводящих материалов. Можно также с уверенностью сказать, что несмотря на 10-летний перерыв, организаторам удалось сохранить традиции и особую атмосферу конференции ФПС, заложенные в 2004 г. нобелевским лауреатом академиком В. Л. Гинзбургом.

Участники 6-ой Международной конференции «Фундаментальные проблемы сверхпроводимости» – ФПС’25

Мы в науке

IV Международная научная конференция «Инновационные технологии ядерной медицины и лучевой диагностики и терапии»

Время проведения – с 22 по 24 октября 2025 г.
Место проведения – ФИАН

Конференция продолжила цикл мероприятий, проводимых при реализации проектов по ядерной медицине и адронной терапии, реализуемых при поддержке ФНТП «Развитие синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры» Минобрнауки России и прошла в рамках III Международного Форума природоподобных технологий НИЦ «Курчатовский институт». Тематика была посвящена ядерно-физическим методам в ядерной медицине, лучевой диагностике и терапии, нанобиомедицинским технологиям диагностики, бинарным технологиям сенсибилизации протонной терапии, сочетанным технологиям лучевой терапии, математическим методам моделирования роста злокачественных новообразований, оптимизации режимов протонной и ионной терапии, протонной томографии, технологиям модернизации комплексов протонной и ионной терапии.

Конференцию торжественно открыли академик РАН, директор ФИАН **Н. Н. Колачевский**; академик РАН, главный научный сотрудник Лаборатории радиационной биофизики и биомедицинских технологий ФИАН **С. М. Деев**; член-корреспондент РАН, помощник директора Объединенного института ядерных исследований по развитию медико-биологических проектов **Г. Д. Ширков**; руководитель Лаборатории радиационной биофизики и биомедицинских технологий ФИАН **И. Н. Завестовская**.

Участники IV Международной научной конференции «Инновационные технологии ядерной медицины и лучевой диагностики и терапии»

Программа Конференции включала в себя 9 пленарных докладов, 10 докладов, посвященных результатам реализации проектов в области ядерной медицины в рамках ФНТП «Развитие синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры», доклады и дискуссии на тему создания кластеров ядерной медицины в регионах Российской Федерации и странах СНГ.

В рамках IV Международной научной конференции «Инновационные технологии ядерной медицины и лучевой диагностики и терапии» прошел также конкурс молодежных научных работ.

Всего в работе Конференции приняли участие 178 человек, из которых 122 человека в возрасте до 39 лет. Среди участников мероприятия были именитые и молодые ученые, аспиранты и студенты. Были представлены 8 институтов РАН и 7 научно-исследовательских организаций, 20 университетов, 7 медицинских организаций, 1 фармацевтическая компания и 4 научно-производственных предприятия. Насыщенная программа и представленные доклады вызвали большой интерес у всех слушателей. Заявки на участие подали более 260 человек из 42 городов России, Казахстана, Китая, Молдовы, Беларуси и Мьянмы.

XLIX Вавиловские чтения

Время проведения – 17 апреля 2025 г.
Место проведения – ФИАН

Вавиловские чтения – ежегодная научная конференция – традиционно приурочивается ко дню рождения выдающегося отечественного ученого-физика, одного из основателей отечественной школы по люминесценции Сергея Ивановича Вавилова.

В рамках Вавиловских чтений в ФИАН встречаются ведущие ученые и научные сотрудники институтов РАН. Помимо вопросов люминесценции здесь обсуждаются наиболее актуальные вопросы современной оптики, в самых разных ее направлениях. Так, в 2025 году Конференция была посвящена обсуждению вопросов фотоники и фотонных систем.

Басовские чтения – 2024

Время проведения – 19 декабря 2025 г.
Место проведения – ФИАН

Басовские чтения – ежегодная Конференция, проводимая ФИАН и НИЯУ МИФИ в память о научных заслугах великого отечественного ученого-физика, выпускника МИФИ, лауреата Нобелевской премии Н. Г. Басова, о значении его деятельности для ФИАН и науки в целом. На Конференции были сделаны доклады ведущих отечественных ученых в области оптики и лазерной физики, а также прошло награждение победителей Конкурса им. Н. Г. Басова ОКРФ ФИАН. Традиционно докладчики поделились результатами работы своих институтов в области квантовой радиофизики, которые во многом стали воплощением идей, основы которых были заложены работами Николая Геннадиевича.

Мы в науке

Симпозиум «Перспективные бинарные технологии протонной и ионной терапии и диагностики» – 2025

Время проведения – 14 февраля 2025 г.
Место проведения – ФИАН

Симпозиум проводился в рамках VIII Всероссийского научно-образовательного Конгресса с международным участием «Онкорадиология, лучевая диагностика и терапия». В работе приняли участие докладчики из ФИАН, МРНЦ им. А.Ф. Цыба, НИЦ «Курчатовский институт» и ИТЭБ РАН, которые познакомили участников с актуальными проблемами лучевой терапии; с созданием новых методов бинарных ядерно-физических технологий, нацеленных на разработку адресных технологий лучевой терапии; с использованием бинарных технологий в клинической практике. Ученые ФИАН представили два доклада.

Первый доклад «Бинарные технологии протонной терапии: состояние вопроса и перспективы» представила И. Н. Завестовская, д-р физ.-мат. наук, заведующая Лабораторией радиационной биофизики и биомедицинских технологий ОЯФА ФИАН. Она рассказала о развитии технологий бинарных методов в протонной терапии, направленных на увеличение эффективности лечения. А также представила результаты проекта «Разработка новых технологий диагностики и лучевой терапии социально значимых заболеваний протонными и ионными пучками с использованием бинарных ядерно-физических методов», реализуемого ФИАН совместно с НМИЦ радиологии и НИЯУ МИФИ в рамках ФНТП СНИ. Акцент в докладе был сделан на бинарных технологиях сенсибилизации на основе адресных наноформуляций, а также перспективах развития этих технологий для их внедрения на КПТ «Прометеус».

Заведующая Лабораторией Радиационной биофизики и биомедицинских технологий ОЯФА ФИАН, д-р физ.-мат. наук И. Н. Завестовская

Второй доклад сделал М. Р. Киракосян, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник Лаборатории фундаментальных свойств материи ОЯФА ФИАН, на тему «Исследование механизмов радиосенсибилизации раковых клеток к радиотерапии с помощью наночастиц методами Монте-Карло», в котором представил исследование ядерных и атомных процессов в разных видах радиотерапии, совмещенных с использованием наночастиц. Были представлены результаты Монте-Карло моделирования с помощью программы Geant4 и ее расширения Geant4DNA. В частности, оценены выходы разных частиц и факторы усиления доз на макроскопических масштабах, а также получена микроскопическая картина распределения доз вокруг наночастиц. Полученная физическая картина проинтерпретирована в контексте имеющихся экспериментальных данных по радиосенсибилизации и проведён анализ влияния физических процессов на химико-биологическую стадии механизма радиосенсибилизации.

ФИАН на Фотонике – 2025

Время проведения – с 1 по 4 апреля 2025 г.
Место проведения – г. Москва

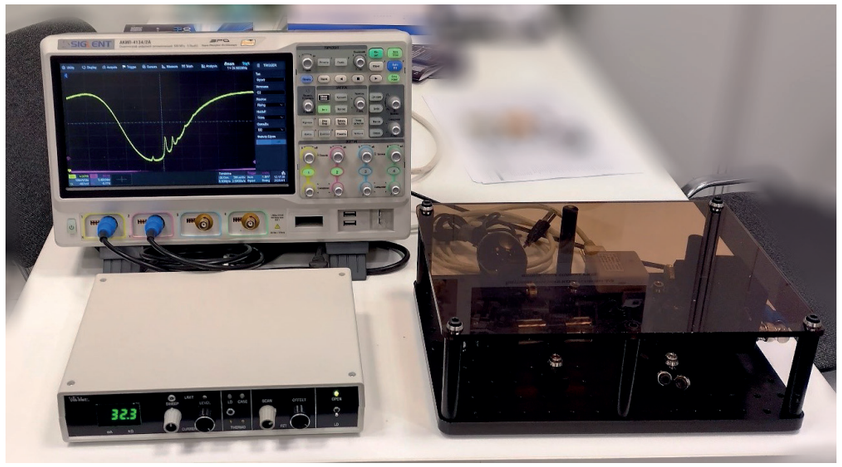
Международная специализированная выставка лазерной, оптической и оптоэлектронной техники «Фотоника. Мир лазеров и оптики» проводится ежегодно с 2006 года. За это время выставка стала главной коммуникационной площадкой лазерно-оптической отрасли России, получила признание российского и международного сообщества профессионалов фотоники. И ФИАН ежегодно принимает участие в ее работе.

В 2025 году Выставка объединила представителей более 230 предприятий и фирм – производителей лазерной и оптической продукции, научно-исследовательских институтов и ведущих учебных заведений из Армении, Индии, Китая, Республики Беларусь и России. Свои инновационные разработки представили 138 российских компаний.

На стенде ФИАН были представлены научно-технологические разработки Института в области оптики, лазерных технологий, фотоники и сенсорики, оптической голографии и литографии, микроэлектроники, действующие макеты экспериментальных стендов, образцы прецизионных оптических изделий, лазерных кристаллов и микроструктур. В течение всего времени работы Выставки последовательно были представлены разработки отделений центральной площадки, Троицкого обособленного подразделения и Самарского филиала ФИАН, в т. ч. результаты совместной работы разных отделений:

1. Компактный высококогерентный перестраиваемый диодный лазер с внешним резонатором для спектроскопии высокого разрешения (Лаборатория стандартов частоты, Отдел лазерных технологий ТОП ФИАН). Экспозиция подготовлена сотрудниками Лаборатории стандартов частоты ТОП ФИАН канд. физ.-мат. наук **В. Л. Величанским**, канд. физ.-мат. наук **М. И. Васьковской**, **В. В. Васильевым**, **Д. С. Чучеловым**,

Стенд ФИАН на выставке «Фотоника – 2025»



Компактный высококогерентный перестраиваемый диодный лазер с внешним резонатором для спектроскопии высокого разрешения (см. п. 1).

К. М. Сабакарем; руководитель лаборатории – канд. физ.-мат. наук С. А. Зибров;

2. Лазерные методы создания метаоптических элементов в объеме прозрачных диэлектриков (Лаборатория лазерной нанофизики и биомедицины, руководитель лаборатории – д-р физ.-мат. наук С. И. Кудряшов). Перспективным направлением в этой области выступает использование трехмерных структур из двулучепреломляющих микротреков, формируемых в объеме прозрачных диэлектриков посредством фемтосекундной лазерной записи;

3. Технология синтеза монокристаллов A_2B_6, легированных переходными металлами, и образцы кристаллов для лазерной генерации в среднем инфракрасном диапазоне на длинах волн 2–7 мкм (Лаборатория лазеров с катодно-лучевой накачкой, Отдел лазерных технологий ТОП ФИАН). Экспозиция подготовлена ведущим научным сотрудником Лаборатории лазеров с катодно-лучевой накачкой канд. техн. наук Ю. В. Коростелиным; руководитель Лаборатории – д-р физ.-мат. наук В. И. Козловский;

4. Образцы изделий и оборудования, произведенные при помощи 3D печати из пластика (Центр высокотемпературной сверхпроводимости и квантовых материалов им. В. Л. Гинзбурга ФИАН). Экспозиция подготовлена сотрудниками ЦВСиКМ ФИАН; руководитель лаборатории – д-р физ.-мат. наук А. Ю. Кунцевич;

5. Выставочный макет медицинского лазерного аппарата на парах меди для микрохирургических операций в области дерматологии, косметологии, гинекологии, онкологии и офтальмологии (Лаборатория медицинской лазерной техники, Отдел Технопарк «Прецизионные оптические технологии» ТОП ФИАН). Макет подготовлен сотрудниками Лаборатории медицинской лазерной техники ТОП ФИАН; руководитель Лаборатории – канд. физ.-мат. наук И. В. Пономарев;

6. Технология изготовления и выставочные образцы прецизионных оптических компонент: зеркал, многослойных интерференционных фильтров, просветляющих покрытий (Отдел Технопарк «Прецизионные оптические технологии» ТОП ФИАН). Презентация оптического производства включала в себя технологии изготовления оптических деталей с шероховатостью ~1 Å, зеркал с малыми потерями (коэффициент

Юбилейная эмблема ФИАН в скрещенных поляризаторах, выполненная к 90-летнему юбилею ФИАН в 2024 году, стала яркой демонстрацией возможностей технологии, разработанной сотрудниками Лаборатории лазерной нанофизики и биомедицины ОКРФ ФИАН (см. п. 2). С помощью прецизионной фемтосекундной лазерной системы ученые реализовали трехмерную запись эмблемы института в пластине плавленого кварца. Параметры записи: длина волны 1030 нм, длительность 300 фс; частота следования импульсов 500 кГц; энергия в импульсе 5 мкДж

отражения ~99,999 %), зеркал с высокой лучевой стойкостью, спектральных фильтров с полушириной ~3 Å и коэффициентом пропускания более 90 % и других типов оптических покрытий для широкого спектра оптических изделий: дихроичные зеркала, поляризаторы, чирпированные зеркала, просветляющая оптика, спектральные фильтры, светоделители, металлические зеркала и др. Экспозиция подготовлена сотрудниками Отдела Технопарк «Прецизионные оптические технологии» ТОП ФИАН С. В. Кузьмичем и Г. П. Карповым; руководитель Отдела – канд. физ.-мат. наук А. В. Залыгин;

7. Высокостабильный метановый оптический стандарт частоты (Лаборатория стандартов частоты, Отдел лазерных технологий ТОП ФИАН). Применяемые отечественные технологии, разработанные в сотрудничестве с высокотехнологическими компаниями-арендаторами, многолетними партнерами ФИАН ООО «Авеста» и ООО «Флавт», обеспечивают устойчивую автономную работу лазера при сохранении параметров в течение не менее 5 лет. Экспозиция подготовлена сотрудниками Лаборатории стандартов частоты Отдела лазерных технологий ТОП ФИАН; руководитель Отдела – д-р физ.-мат. наук М. А. Губин;

8. Техника трехмерной флуоресцентной микроскопии с использованием адаптивной оптики (Отдел перспективной фотоники и сенсорики ТОП ФИАН и Лаборатория когерентной оптики СФ ФИАН в коллаборации с Институтом спектроскопии РАН и Московским педагогическим государственным университетом). Экспериментальная установка 3D флуоресцентного наноскопа была создана в межинститутской научной группе по лазерно-селективной спектроскопии и наноскопии одиночных молекул, конденсированных сред и наноструктур под руководством д-ра физ.-мат. наук, чл.-корр. РАН А. В. Наумова. Экспозиция подготовлена сотрудниками Отдела перспективной фотоники и сенсорики ТОП ФИАН и Лаборатории когерентной оптики СФ ФИАН (руководитель Лаборатории – д-р физ.-мат. наук С. П. Котова);

9. Генератор вихревых световых полей на основе жидкокристаллического сегнетоэлектрика (Лаборатория когерентной оптики СФ ФИАН и Лаборатория оптоэлектронных процессоров Отделения квантовой радиофизики им. Н. Г. Басова ФИАН). Презентация

подготовлена сотрудниками Лаборатории когерентной оптики СФ ФИАН; руководитель Лаборатории – д-р физ.-мат. наук **С. П. Котова;**

10. Лазерная термообработка сплавов на основе железа: металлофизические и технологические аспекты (Лаборатория лазерно-индуцированных процессов СФ ФИАН совместно с ООО НПП «ИНЖЕКТ», г. Саратов). Презентация подготовлена сотрудниками Лаборатории лазерно-индуцированных процессов СФ ФИАН; руководитель Лаборатории – д-р техн. наук **С. И. Яресько;**

11. Лазерные технологии изготовления композиционных пьезоматериалов на основе поливинилиденфторида ПВДФ (Лаборатория лазерно-индуцированных процессов СФ ФИАН). Презентация подготовлена сотрудниками лаборатории лазерно-индуцированных процессов СФ ФИАН; руководитель Лаборатории – д-р техн. наук **С. И. Яресько**;

12. Инновационный электрод ионной оптики для времяпролетного масс-спектрометра, изготовленный методом лазерной сварки с профилированным импульсом излучения (Центр лабораторной астрофизики и Лаборатория лазерно-индуцированных процессов СФ ФИАН). Выставочный образец подготовлен сотрудниками Центра лабораторной астрофизики СФ ФИАН (руководитель лаборатории – Ph. D. **И. О. Антонов**) и Лаборатории лазерно-индуцированных процессов СФ ФИАН (руководитель Лаборатории – д-р техн. наук **С. И. Яресько**).

Помимо презентации разработок на стенде сотрудники ФИАН выступили с докладами в заседаниях научно-практической конференции XIII Конгресса технологической платформы «Фотоника».

В рамках Выставки состоялось расширенное заседание Научного совета по фотонике ОФН РАН (председатель комиссии – директор ИОФ РАН, чл.-корр РАН **С. В. Гарнов**, заместитель председателя – директор ФИАН **Н. Н. Колачевский**), организованное при активном участии сотрудников ФИАН. Программа заседания включала в себя обсуждение избранных направлений и научных результатов в области оптики и фотоники, полученных в 2024 году в научных институтах, находящихся под научно-методическим руководством ОФН РАН. На заседании с докладами выступили директор ФИАН **Н. Н. Колачевский** и д-р физ.-мат. наук, чл.-корр. РАН **А. В. Наумов**

Участники семинара были награждены благодарственными письмами Отделения физических наук РАН.

Расширенное заседание Научного совета по фотонике ОФН РАН

ФИАН в День российской науки

Время проведения – 8 февраля 2025 г.
Место проведения – г. Москва

В рамках фестиваля «Громкий голос науки» в Зарядье состоялась научно-популярная лекция директора ФИАН Н. Н. Колачевского и руководителя ТОП ФИАН А. В. Наумова «Квантовые технологии: будущее наступает».

2025 год объявлен Организацией Объединенных Наций Международным годом квантовых наук и технологий в ознаменование 100-летия возникновения квантовой механики. С момента появления гипотез и теорий, утверждающих, что материя и энергия в микромасштабах (на уровне отдельных атомов, электронов, фотонов) ведут себя удивительным образом, необъяснимым с помощью классических уравнений физики, к настоящему времени квантовая наука достигла впечатляющих успехов.

Большинство современных технологий, многие используемые человеком устройства и инструменты основаны на квантовых принципах: лазеры (квантовые генераторы света), спутниковая (ГЛОНАСС, GPS) навигация, телекоммуникационное оборудование, источники и детекторы света, устройства микроэлектроники, компьютеры и робототехника, энергетика, новые медицинские технологии. Выдающиеся достижения квантовой науки и технологий отмечены и Нобелевскими премиями, среди которых яркое место занимают российские ученые, представители Российской академии наук. Еще более впечатляющие перспективы обещают современные разработки: квантовые компьютеры и вычисления, квантовые телекоммуникации и криптография, квантовая сенсорика. Эти и другие вопросы обсуждались в научно-популярной лекции директора ФИАН чл.-корр. РАН **Николая Колачевского** и руководителя ТОП ФИАН чл.-корр. РАН **Андрея Наумова** «Квантовые технологии: будущее наступает», представленной в рамках проекта «Громкий голос российской науки» на Дне науки 8 февраля 2025 г. в Зарядье.

День света в год квантовой науки

Время проведения – 16 мая 2025 г.
Место проведения – г. о. Троицк

Организаторами мероприятия, приуроченного к Международному дню света и световых технологий 16 мая и Международному 2025 году квантовой науки ЮНЕСКО, выступили представители Российской академии наук и Физического института им. П. Н. Лебедева РАН.

В День света, 16 мая, в г.о. Троицке состоялась открытая лекция, соединяющая два мира: магию света и парадоксы квантового мира.

Руководитель Троицкого обособленного подразделения ФИАН д-р физ.-мат. наук, чл.-корр. РАН **А. В. Наумов** рассказал, как свет становится инструментом для самых смелых теорий и экспериментов. Выступление Андрея Витальевича стало не просто лекцией, а путешествием в сердце современной физики, где фотоны и атомы творят чудеса, проникая во все сферы человеческой жизни, производство и быт.

В лекции также принял участие ведущий научный сотрудник ТОП ФИАН **Е. В. Хайдуков**, исследования которого лежат на стыке физики, химии и новых материалов. Евгений Валерьевич рассказал о том, как достижения квантовой науки уже сегодня меняют нашу повседневность: от медицины до энергетики, от гаджетов до космоса.

Отечественная наука внесла фундаментальный вклад в развитие квантовых технологий и оптики/фотоники, от первых экспериментов по давлению света П. Н. Лебедева и открытия эффекта Вавилова–Черенкова до создания первых лазеров и теории сверхпроводимости. Так, Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН стал ключевым центром этих исследований: исследования С. И. Вавилова в области оптики; отмеченные Нобелевскими премиями эффект Вавилова–Черенкова, а также работы Н. Г. Басова и А. М. Прохорова в области квантовой электроники, приведшие к созданию мазеров и лазеров.

Еще одна Нобелевская тематика – сверхпроводимость и, в целом, физика низких температур, где выдающихся успехов достигли научные школы П. Л. Капицы, В. Л. Гинзбурга, А. А. Абрикосова, Л. Д. Ландау.

Атомная отрасль Российской Федерации, лидирующая на международной арене, базируется на выдающихся достижениях академической науки (И. В. Курчатов, А. Д. Сахаров), обеспечивает энергетическую безопасность страны, оборонный комплекс, стимулирует развитие современных медицинских технологий.

Ленинградская (Санкт-Петербургская) научная школа академика А. Ф. Иоффе заложила основы многих прорывных направлений, среди которых – физика полупроводников (Ж. И. Алферов, Нобелевская премия 2000 года), астрофизика, ядерная физика. В Нижнем Новгороде, Новосибирске, Черноголовке, Красноярске, Дубне, Владивостоке и многих других научно-образовательных центрах страны проводятся исследования в области фотоники и квантовой физики. Современные разработки (квантовые компьютеры, телекоммуникации, сенсоры) продолжают традиции ФИАН, ФТИ, ИОФАН и многих других центров российской науки.

Все эти вопросы были затронуты во время встречи.

После лекции состоялась открытая дискуссия, где каждый мог задать вопросы или просто вдохновиться смелыми идеями и фантастической историей развития наук о свете и квантах. В увлекательном мероприятии, сочетающем в себе встречу-беседу с учеными, популярную лекцию и экспериментальную демонстрацию, приняли участие более 100 школьников, учителей и сотрудников институтов.

VII Международная молодежная школа «Инновационные ядерно-физические методы высокотехнологичной медицины»

Время проведения – с 20 по 21 октября 2025 г.
Место проведения – ФИАН

Мероприятие было посвящено ядерной медицине – ключевому трансдисциплинарному направлению, выступающему локомотивом, стимулирующим развитие таких крупных направлений как ускорительная техника, нанотехнологии, новые материалы, структурная и радиобиологии и фармацевтические науки. Школа продолжила цикл мероприятий, проводимых при реализации проектов в рамках ФНТП «Развитие синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры на период до 2030 года и дальнейшую перспективу» Минобрнауки России.

Организаторы обозначили тему VII Школы как «Ядерная медицина – трансдисциплинарный локомотив развития высокотехнологичной медицины». Сегодня конкурентоспособность российской науки в области разработки лекарственных препаратов и изделий медицинского назначения является определяющим фактором обеспечения биологической безопасности и укрепления технологического суверенитета страны. Одним из приоритетных направлений развития здравоохранения в России является переход к персонализированной и высокотехнологичной медицине.

Школу торжественно открыли заместитель директора ФИАН, руководитель Отделения ядерной физики и астрофизики ФИАН **В. А. Рябов** и руководитель Лаборатории радиационной биофизики и биомедицинских технологий ФИАН, и. о. заместителя директора по ядерной медицине НИЦ «Курчатовского института» **И. Н. Завестовская**.

«Физический институт имени Лебедева на протяжении многих лет играет важную роль в развитии ядерной медицины. В начале 2000-х годов в Физико-техническом центре ФИАН был разработан и создан ускоритель «Прометеус», который используется не только для научных исследований, но и для лечения пациентов. Аналогичные установки с некоторыми модификациями успешно функционируют во многих мировых центрах. В настоящее время ФИАН реализует проект в области ядерной медицины в рамках федеральной научно-технической программы, благодаря которому достигнуты значительные успехи, включая важные результаты в образовательной деятельности», – отметил **Владимир Алексеевич**.

В рамках работы Школы свои лекции представили ведущие специалисты научных, образовательных и медицинских организаций:

С. Н. Корякин, заведующий отделом радиационной биофизики МРНЦ им. А. Ф. Цыба – филиала ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России;

Т. В. Кулевой, заместитель директора по научной работе по ускорительному направлению НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ;

О. А. Короид, генеральный директор и главный врач ООО «Медицина и ядерные технологии»;

В. В. Крылов, директор Института ядерной медицины, врач-радиолог МРНЦ им. А. Ф. Цыба – филиала ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России.

В работе Школы приняли участие 121 человек, из которых 90 – в возрасте до 39 лет.

Среди участников мероприятия были именитые и молодые ученые, аспиранты и студенты, а также школьники. Были представлены 4 института РАН и 6 научно-исследовательских организаций, 21 университет (из которых 5 – медицинских), 2 общеобразовательных учреждения и 7 медицинских организаций. Насыщенная программа и представленные лекции вызвали большой интерес у слушателей. Заявки на участие подали более 180 человек из 34 городов России, Белоруссии, Казахстана и Китая.

Участники VII Международной молодежной школы «Инновационные ядерно-физические методы высокотехнологичной медицины»

Школа молодых ученых «Быстропротекающие электровзрывные, электронные и электромагнитные процессы в импульсной электронике и оптоэлектронике» (БПИО-2025)

Время проведения – с 24 по 27 ноября 2025 г.
Место проведения – ФИАН

Открыл мероприятие член Президиума РАН академик Г. А. Месяц. Прозвучали пленарные доклады ведущих ученых – докторов наук (14 докладов), 29 устных и 10 стендовых докладов молодых ученых. В Школе приняли участие ведущие и молодые ученые, представляющие крупнейшие отечественные научные организации, в том числе ФИАН, ОИВТ РАН, ИОФ РАН, МГТУ им. Н. Э. Баумана, МФТИ (НИУ), РУДН, НИУ «ВШЭ», НИЦ «Курчатовский институт» и др.

В рамках БПИО-2025 были представлены результаты передовых исследований по многим актуальным направлениям современной физики – физике плазмы и физике газового разряда, сильноточной электронике, оптоэлектронике, атомно-молекулярной физике, нелинейной оптике, физике низкоразмерных структур и др. Обсуждались способы экспериментального определения параметров разрядов, генерация рентгеновского, СВЧ-излучения и мощных пучков электронов, использование проекционной рентгенографии в биологии. Широко обсуждались физические процессы при столкновениях атомных частиц в плазме и их излучение, а также физика и технология газовых лазеров. Ряд докладов был посвящен проблемам теплофизики и их связи с оптикой – физико-химии реагирующих сред и применению в ней методов оптической спектроскопии, физическим процессам при плавлении графита и других сверхтугоплавких веществ и др. Существенное внимание было уделено оптическим и люминесцентным свойствам конденсированных сред, в том числе полупроводниковых наноструктур, мягкой материи, широкозонных кристаллов и др.

Школа молодых ученых «Быстропротекающие электровзрывные, электронные и электромагнитные процессы в импульсной электронике и оптоэлектронике» 2025 года проведена при поддержке гранта РНФ №19-79-30086.

XXIII Всероссийская молодежная Самарская конкурс-конференция по оптике, лазерной физике и физике плазмы, посвященная 45-летию Самарского филиала ФИАН

Время проведения – с 11 по 15 ноября 2025 г.
Место проведения – СФ ФИАН и СамГУ (г. Самара)

В мероприятии, посвященном 45-летию Самарского филиала Физического института им. П. Н. Лебедева РАН (СФ ФИАН), приняли участие молодые исследователи из различных научных и образовательных организаций Самары, Москвы, Воронежа, Казани, Саратова, Сарова, Снежинска, Томска, Троицка, Челябинска, Нефтегорска и др.

Конференция проходила на территории Самарского филиала ФИАН и Самарского национального исследовательского университета имени академика С. П. Королева (СамГУ).

Работа Конференции проводилась по следующим секциям:

- оптика, лазерная физика и физика плазмы;
- биофотоника;
- микрофлюидные системы и нанотехнологии;
- физика и химия космоса.

С приветственными словами к участникам обратились сопредседатели организационного комитета директор СФ ФИАН **В. Н. Азязов** и директор Института естественных и математических наук Самарского университета **А. А. Грисяк**, а также председатель программного комитета директор ФИАН, академик РАН **Н. Н. Колачевский** и министр науки и высшего образования Самарской области **М. А. Шлеенков**.

«Конференция продолжает лучшие традиции ФИАН, 90-летие которого мы отмечали в минувшем году. В этом году

Участники Всероссийского молодежного Самарского конкурса-конференции

Самарскому филиалу исполнилось 45, у филиала тесные связи с университетами, и очень важно, чтобы ребята, которые в них учатся, оставались в регионе и продолжали исследования, в которых заинтересована самарская промышленность. Перспективы и в Самаре, и в России очень интересные», – подчеркнул Николай Николаевич.

На церемонии открытия директор ФИАН вручил ведомственную награду Министерства науки и высшего образования Российской Федерации – медаль «За безупречные труд и отличие», – главному научному сотруднику СФ ФИАН М. В. Загидуллину.

По словам директора СФ ФИАН В. Н. Азязова, Самарская конференция-конкурс по оптике, лазерной физике и физике плазмы стала стартовой площадкой для многих молодых ученых, которые успешно выстраивают свою карьеру в науке.

«У нашей Конференции оригинальный формат: она не только чисто молодежная, это еще и конкурс, а кроме того, мы приглашаем выступить с лекциями известных ученых. Это дает возможность нашим участникам увидеть, в каком направлении развивается физическая наука, найти свое место в ней», – отметил Валерий Николаевич.

Программа мероприятия включала 96 конкурсных докладов (62 устных, включая 8 докладов школьной секции, 34 стендовых), 3 приглашенных доклада и 9 приглашенных пленарных лекций.

Экспертная комиссия по результатам работы определила победителей и призеров по следующим номинациям:

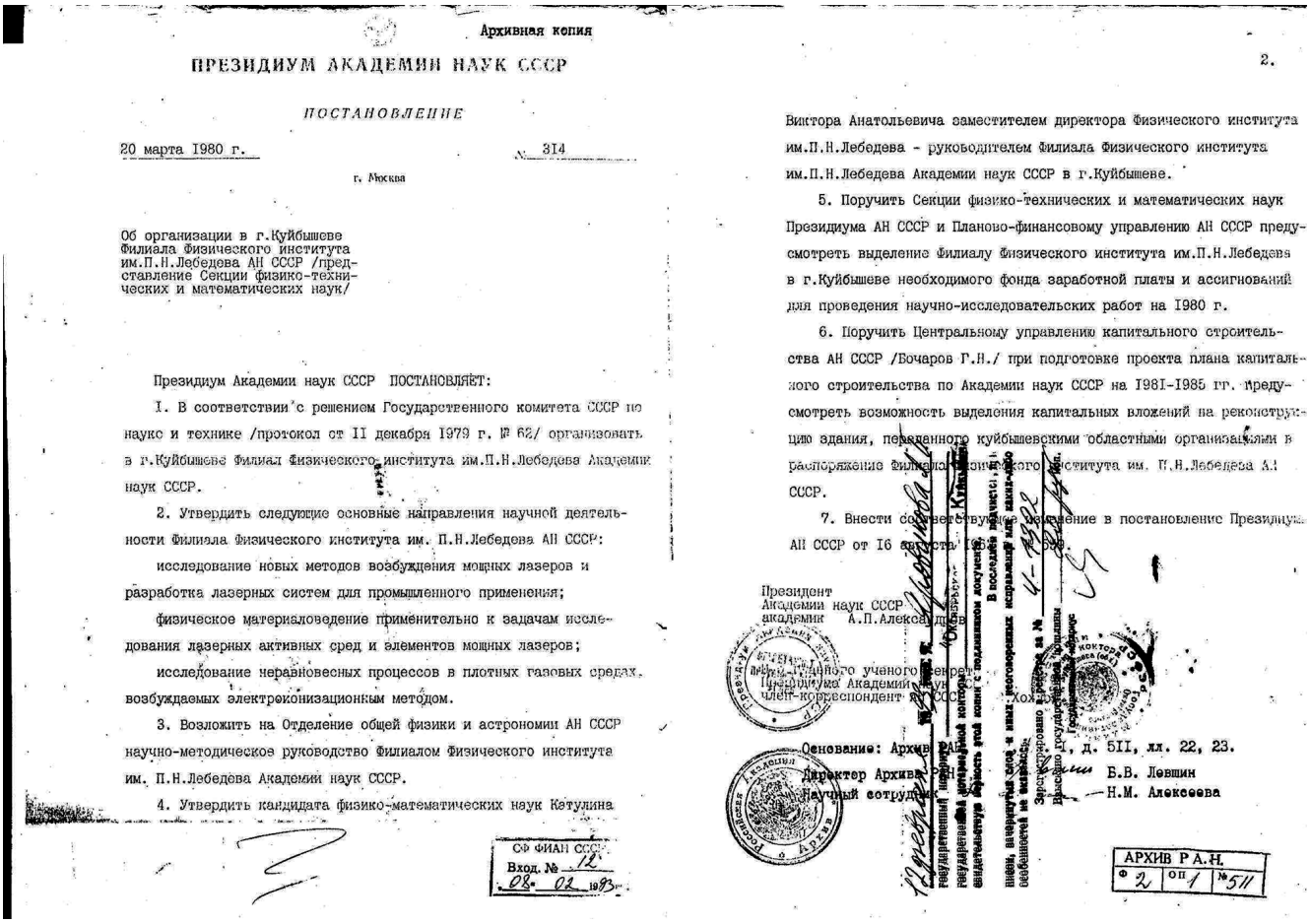
- «Оптика и лазерная физика. Аспиранты» и «Оптика и лазерная физика. Студенты»;
- «Биофотоника»;
- «Микрофлюидные системы и нанотехнологии»;
- «Физика и химия космоса»;
- стендовые доклады.

ЗА ГРАНЬЮ НАУКИ

Юбилейно-торжественные страницы

45 лет Самарскому филиалу ФИАН

20 марта 1980 года Президиум АН СССР принял постановление № 314 «Об организации в г. Куйбышеве филиала Физического института имени П. Н. Лебедева АН СССР».



Архивная копия

ПРЕЗИДИУМ АКАДЕМИИ НАУК СССР

ПОСТАНОВЛЕНИЕ

20 марта 1980 г. № 314

г. Москва

Об организации в г.Куйбышеве Филиала Физического института им.П.Н.Лебедева АН СССР /представление Секции физико-технических и математических наук/

Президиум Академии наук СССР ПОСТАНОВЛЯЕТ:

1. В соответствии с решением Государственного комитета СССР по науке и технике /протокол от 11 декабря 1979 г. № 62/ организовать в г.Куйбышеве Филиал Физического института им.П.Н.Лебедева Академии наук СССР.

2. Утвердить следующие основные направления научной деятельности Филиала Физического института им. П.Н.Лебедева АН СССР:

исследование новых методов возбуждения мощных лазеров и разработка лазерных систем для промышленного применения;

физическое материаловедение применительно к задачам исследования лазерных активных сред и элементов мощных лазеров;

исследование неравновесных процессов в плотных газовых средах, возбуждаемых электроионизационным методом.

3. Возложить на Отделение общей физики и астрономии АН СССР научно-методическое руководство Филиалом Физического института им. П.Н.Лебедева Академии наук СССР.

4. Утвердить кандидата физико-математических наук Катулина

ФИАН СССР Вход. № 12 08. 02 1983

2.

Виктора Анатольевича заместителем директора Физического института им.П.Н.Лебедева - руководителем Филиала Физического института им.П.Н.Лебедева Академии наук СССР в г.Куйбышеве.

5. Поручить Секции физико-технических и математических наук Президиума АН СССР и Планово-финансовому управлению АН СССР предусмотреть выделение Филиалу Физического института им.П.Н.Лебедева в г.Куйбышеве необходимого фонда заработной платы и ассигнований для проведения научно-исследовательских работ на 1980 г.

6. Поручить Центральному управлению капитального строительства АН СССР /Бочаров Г.Н./ при подготовке проекта плана капитального строительства по Академии наук СССР на 1981-1985 гг. предусмотреть возможность выделения капитальных вложений на реконструкцию здания, переданного куйбышевскими областными организациями в распоряжение Филиала Физического института им. П.Н.Лебедева АН СССР.

7. Внести соответствующее дополнение в постановление Президиума АН СССР от 16 августа

Президент Академии наук СССР академик А.П.Александров

Основание: Архив РАН, ф. 2, оп. 1, д. 511, лл. 22, 23.

Директор Архива Б.В. Левшин

Научный сотрудник Н.М. Алексеева

АРХИВ РАН Ф 2 ОП 1 № 511

Архивная копия приказа о создании Самарского филиала ФИАН

Самарский (Куйбышевский) филиал ФИАН организован в 1980 году по совместной инициативе областного руководства и лауреата Нобелевской премии академика Н. Г. Басова для решения фундаментальных и прикладных задач в области создания новых лазерных систем и технологий. На тот момент в Куйбышеве насчитывалось почти 40 конструкторских бюро, целый ряд крупных научно-исследовательских институтов, 12 высших учебных заведений, в том числе Авиационный институт имени Королёва и молодой Куйбышевский государственный университет. В результате вышеупомянутого постановления Президиума Академии наук СССР в Куйбышеве появился первый академический институт, был дан толчок развитию академической науки в регионе.

Первым директором филиала стал дважды лауреат Государственной премии, док-

тор физ.-мат. наук, профессор В. А. Катулин (1936–1998). Под его руководством молодой коллектив, состоящий в основном из выпускников ведущих московских вузов, провел огромную работу: за короткий срок филиал был обеспечен установками, производственными площадями. Были получены новые научные результаты по лазерной технологии и технологическим лазерам, решены актуальные фундаментальные и инженерные задачи, установлено плодотворное сотрудничество с вузами, предприятиями и НИИ как в нашей стране, так и за рубежом.

Сегодня Самарский филиал Физического института им. П. Н. Лебедева РАН представляет собой научно-исследовательский институт с общим количеством сотрудников около 100 человек, из которых более 50 – научные сотрудники (9 докторов наук, 24 кандидата наук). При этом тематика исследований также расширилась. В Институте разрабатываются новые лазеры, включая мощные лазеры для широкого спектра задач, развиваются существующие лазерные системы, проводятся комплексные прикладные разработки в области использования лазерных технологий.

Последние годы активно развиваются направления, связанные с астрохимией и астрофизикой. По результатам Мегагранта в филиале создан Центр лабораторной астрофизики и запущена уникальная научная установка мирового уровня, воссоздающая условия глубокого космоса.

Ежегодно работники СФ ФИАН публикуют более 50 статей в ведущих мировых журналах, входящих в Белый список, а общее количество публикаций за все годы работы Института превысило 2500. Сотрудники также ведут активную образовательную деятельность и работу по распространению результатов разработок ученых в практику в интересах промышленных предприятий региона.

Сотрудники Самарского филиала ФИАН

Открытие таблички в честь Н. Г. Басова

В г. Самаре, в сквере Николая Басова состоялось торжественное открытие памятной таблички в честь великого русского физика, лауреата Нобелевской премии по физике, Ленинской премии и Государственной премии СССР, дважды Героя Социалистического Труда, директора ФИАН, академика Н. Г. Басова.

На открытии присутствовали сотрудники Самарского филиала Физического института им. П. Н. Лебедева РАН (СФ ФИАН), учащиеся Самарского лицея информационных технологий, почетные гости и жители района.

Церемонию открытия провел директор СФ ФИАН **В. Н. Азязов**. На открытии выступили представитель инициативной группы жителей дома по адресу пр. Ленина д. 3 – соорганизатора мероприятия **Л. В. Лаврик**, представитель Министерства высшего образования и науки Самарской области **Н. В. Кудашева**, глава Октябрьского внутригородского района г.о. Самара **С. О. Радько**, директор института естественных и математических наук Самарского университета **А. А. Грисяк**, декан физического факультета Самарского университета **И. А. Платонов**, заместитель директора Российского государственного архива (РГА) в г. Самаре **О. Ю. Козыль**.

Выступающие отмечали достижения Н. Г. Басова как ученого, говорили о его изобретениях, вспоминали события, которые связывают Н. Г. Басова с г. Самарой – это учеба в военно-медицинской академии г. Куйбышева в военные годы и создание первого в регионе академического института – филиала ФИАН.

«Много ли исторических личностей, жизнь которых так или иначе была связана с Самарой, и которых знают во многих уголках мира, запечатлены на карте Самары?», – спросил присутствующих Валерий Николаевич и сам ответил, что не так много. – *«У нас есть проспект Ленина, его бесспорно знают везде, и он проживал в Самаре. В честь Юрия Гагарина, чтимого во всем мире, как первого человека, шагнувшего в космос, названа улица в Самаре, и он у нас тоже бывал. Академик Басов стоит в этом же ряду!»*.

Единица порядочности в науке «один Тамм» – 130 лет со дня рождения Игоря Евгеньевича Тамма

8 июля 2025 года исполнилось 130 лет со дня рождения Игоря Евгеньевича Тамма – выдающегося физика-теоретика, академика Академии наук СССР, лауреата Нобелевской премии, первого руководителя Теоретического отдела (ныне – Отделения теоретической физики им. И. Е. Тамма) ФИАН.

Основные направления научного творчества И. Е. Тамма относятся к квантовой механике, физике твердого тела, теории излучения, ядерной физике, физике элементарных частиц, а также к решению ряда прикладных задач. Совместно с И. М. Франком описал движение частиц в среде со скоростью, превышающей скорость света в этой среде (эффект Вавилова–Черенкова), за что в 1958 г. был удосьоен Нобелевской премии. Лауреат Сталинской премии первой степени 1946 года. В 1967 году был награжден Большой золотой медалью имени М. В. Ломоносова за выдающиеся достижения в теории элементарных частиц и других областях теоретической физики. Совместно с А. Д. Сахаровым разработал принципы удержания плазмы в токамаке.

Теоретический отдел ФИАН был образован одновременно с Физическим институтом АН СССР в 1934 году. На должность начальника Отдела первый директор Физического института Сергей Иванович Вавилов пригласил лидера московской школы теоретической физики Игоря Евгеньевича Тамма. И. Е. Тамм принял руководство Теоретическим отделом 15 октября 1934 года. Игорь Евгеньевич возглавлял Теоротдел со дня основания и до своей кончины в 1971 году. В 1972 году Отделу теоретической физики было присвоено имя академика И. Е. Тамма.

По словам руководителя Отделения теоретической физики имени И. Е. Тамма ФИАН, академика Российской академии наук **Кирилла Петровича Зыбина**, наследием Тамма по праву можно назвать и его учеников:

«Благодаря Игорю Евгеньевичу возникли такие люди, как Андрей Дмитриевич Сахаров, Виталий Лазаревич Гинзбург. Оба в дальнейшем стали нобелевскими лауреатами. В физике твердого тела – Леонид Вениаминович Келдыш, в квантовой теории поля – Ефим Самойлович Фрадкин, а также Евгений Львович Фейнберг и Владимир Яковлевич Файнберг. Мы знаем, что Игорь Евгеньевич вызывал и вызывает восхищение. Понятие честности, справедливости, порядочности и подхода в науке – "один Тамм"».

Именем академика И. Е. Тамма названа площадь на Ленинском проспекте в Москве. Также в честь выдающегося физика назван самолет в парке Аэрофлота. В 1976 году Международный астрономический союз присвоил имя И. Е. Тамма кратеру на обратной стороне Луны.

Воспитание науки

Экскурсии школьников и абитуриентов в Самарском филиале ФИАН

Время проведения – с марта по май 2025 г.
Место проведения – г. Самара

Самарский филиал Физического института им. П. Н. Лебедева РАН стал площадкой сразу нескольких экскурсионно-образовательных мероприятий весной 2025 года.

Первая экскурсия состоялась для участников Дня открытых дверей физического факультета Самарского университета. Напомним, СФ ФИАН является базовой организацией для двух кафедр университета – кафедры физики и кафедры оптики и спектроскопии (ОиС). В ходе мероприятия директор СФ ФИАН **Валерий Азязов** познакомил участников с уникальной экспериментальной установкой, воссоздающей условия глубокого космоса, и разрабатываемым в филиале новым мощным лазером с оптической накачкой на метастабильных атомах инертных газов.

На День космонавтики Самарский филиал посетили участники Международной молодежной научной конференции «XX Королёвские чтения: школьники».

Еще одна экскурсия прошла 23 апреля для участников тематической смены направления «Наука» Самарского регионального центра для одаренных детей. Участниками стали учащиеся 8-9 классов образовательных учреждений Самарской области. Сотрудники Самарского филиала ФИАН **Евгения Батракова, Диана Кашапова, Данила Труфанов** и **Сергей Тучин** рассказали школьникам о научно-исследовательских работах и экспериментах, которые они проводят в Институте.

21 мая 2025 года в СФ ФИАН прошло юбилейное мероприятие «45 лет в кругу друзей», в рамках которого состоялись научно-популярные лекции, квизы и мастер-классы, а также экскурсии по лабораториям филиала.

Научный сотрудник Центра лабораторной астрофизики СФ ФИАН, канд. физ.-мат. наук И. О. Антонов проводит экскурсию в лаборатории Центра

XX Международная молодежная научная конференция «Королёвские чтения: школьники»

Время проведения – с 10 по 12 апреля

Место проведения – г. Самара

В Самарском университете прошла XX Международная молодежная научная конференция «Королёвские чтения: школьники». Сотрудники СФ ФИАН приняли активное участие в организации и проведении чтений.

Согласно Положению о Конференции, чтения проводятся в целях выявления и развития у молодежи творческих способностей и интереса к проектной, научно-исследовательской, инженерно-технической, изобретательской и творческой деятельности, пропаганды научных знаний и достижений. К участию традиционно приглашались учащиеся 7–11 классов, 1–2 курсов учреждений среднего профессионального образования, кадеты. Формат чтений предполагал участие как индивидуально, так и в составе научных групп.

Секция «Естественные науки: физика и астрономия» прошла под председательством научного сотрудника Центра лабораторной астрофизики СФ ФИАН, канд. физ.-мат. наук, Ph.D. **Ивана Антонова**. В состав жюри вошла мл. научн. сотр. Центра лабораторной астрофизики (ЦЛА) СФ ФИАН, ассистент кафедры физики Самарского университета **Любовь Крикунова**. Жюри заслушало 27 докладов, 7 из которых отметило дипломами и призами. Специальным призом ФИАН (приз от работодателя) был отмечен доклад **Колесова Владислава** (МБОУ «Ольховская СШ», с. Ольховка) «Визуализация стоячих волн».

Сотрудники ЦЛА СФ ФИАН и Научно-исследовательской лаборатории «Физика и химия горения» Самарского университета **Михаил Евсеев** и **Олег Кузнецов** познакомили участников Конференции с уникальной научной установкой «Реакционная кинетика и динамика в экстремальных условиях».

Участники и жюри секции «Естественные науки: физика и астрономия»

Экскурсионной площадкой Конференции выступил и Самарский филиал ФИАН. **Дарья Прокопова**, ст. научн. сотр. Лаборатории когерентной оптики СФ ФИАН, канд. физ.-мат. наук, показала как формируются структурированные пучки, рассказала об их уникальных свойствах и применениях. Особый интерес вызвала продемонстрированная **И. О. Антоновым** экспериментальная установка ЦЛА, позволяющая воссоздавать условия глубокого космоса: низкую плотность газа, температуру от четырех до 350 К, жесткое излучение (вакуумный ультрафиолет, галактические космические лучи).

Старший научный сотрудник Лаборатории когерентной оптики СФ ФИАН Д. В. Прокопова с участниками молодежной конференции

ФИАН на Дне открытых дверей МФТИ 2025

Время проведения – апрель 2025 г.

Место проведения – г. Москва

Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН принял участие в Дне открытых дверей Московского физико-технического института для абитуриентов и школьников старших классов.

Физический институт академии наук, который традиционно участвует на мероприятии Физтеха, представляли **В. В. Губернов** (Кафедра проблем физики и астрофизики МФТИ), **Л. А. Моргун** (образовательная программа Физика сверхпроводимости и квантовых материалов), **А. Д. Морошкина** (Кафедра квантовой радиофизики МФТИ), **Н. В. Пестовский** и **А. А. Родионов** (Кафедра электрофизики МФТИ).

На стенде ФИАН были представлены установки, демонстрирующие такие физические процессы как люминесценция, газовые разряды, сверхпроводимость, которые вызвали большой интерес у посетителей. Молодые сотрудники Физического института, принимавшие участие в Дне открытых дверей, рассказали студентам младших курсов и абитуриентам об исследованиях, проводимых в Институте, и своем личном опыте работы в ФИАН.

В рамках весеннего Дня открытых дверей состоялась экскурсия в Лабораторию оптики ультрахолодных атомных систем и функциональных материалов Физтех-школа физики и исследований им. Ландау (ЛФИ) МФТИ. Лаборатория, открытая совместно с ФИАН в 2022 году, занимается лазерным охлаждением и удержанием в магнито-оптической ловушке атомов рубидия. Данная методика позволяет охлаждать атомы до крайне низких температур: сотни, десятки микрокельвин и даже ниже, что соответствует очень маленьким скоростям, менее 1 см/с. Такие атомные ансамбли позволяют реализовывать прецизионные спектроскопические исследования. В ходе экскурсии абитуриентам показали научную экспериментальную установку, а также некоторые стенды для работ из лабораторного практикума по фундаментальной фотонике и квантовой физике.

Помощник директора Физического института им. П. Н. Лебедева РАН по работе с молодежью **Владимир Владимирович Губернов** отметил важность посещения подобных мероприятий:

«В этом году День открытых дверей посетило большое количество абитуриентов, планирующих поступление в ЛФИ МФТИ. Одним из главных вопросов, который интересует будущих студентов, является выбор направления научно-исследовательской работы на период обучения в МФТИ и, в более широкой перспективе, возможность реализовать себя на стезе научной работы в стенах, в том числе, базовых организаций в дальнейшем. День открытых дверей безусловно поможет будущим студентам ЛФИ МФТИ в выборе базовых кафедр. Мы очень надеемся, что он будет сделан в нашу пользу,и мы скоро увидим участников мероприятия на наших базовых кафедрах».

6-я Всероссийская викторина юных физиков ОФН РАН

Время проведения – с 1 по 16 мая 2025 г.

Викторина в 2025 году проходила в 9 туров. Участникам было необходимо решить задачу и отправить ответ через интерактивную форму. Вопросы – нестандартные, требуют смекалки и логики, могут иметь несколько решений. Дополнительные баллы начисляются за эксперименты, подробные рассуждения и неординарные подходы. Было получено и проверено 1750 ответов, принято 388 участников из 66 населенных пунктов, 36 регионов РФ и 3 стран.

Ученые Физического института им. П. Н. Лебедева РАН традиционно участвовали в разработке заданий викторины. Автором одного из вопросов первого тура стал директор ФИАН **Николай Николаевич Колачевский**. В составлении задач 3 и 5 туров приняли участие руководитель ТОП ФИАН **Андрей Витальевич Наумов** и академик РАН **Сергей Михайлович Стишов**.

Победители получили возможность посетить Президиум РАН, встретиться с руководством Академии и ведущими учеными страны. Также победители и призеры викторины получили льготы и персональные приглашения на академическую смену в лагерь Артек, где в августе 2025 года прошла первая смена, приуроченная к 100-летию Артека и 300-летию РАН, где победители и призеры викторины приняли участие в дополнительной общеразвивающей программе «300 лет РАН: фундаментальный взгляд на окружающий мир» в рамках тематического партнерства Российской академии наук и Международного детского центра «Артек».

Летняя практика «Прометеус» для учащихся профильных классов общеобразовательных учреждений Российской Федерации

Время проведения – с 28 июля по 8 августа 2025 г.
Место проведения – г. Москва

Тема практики 2025 года – «Физика в медицине». Мероприятие было нацелено на популяризацию науки и улучшение навыков работы учащихся 8–11 классов с программными продуктами для обработки экспериментальных данных. По окончании Летней практики участники представляли и защищали свои проекты, посвященные использованию физических методов в медицине.

Летняя практика «Прометеус» (далее — Практика) была проведена в рамках реализации проекта «Развитие научно-технологической инфраструктуры и комбинированных технологий адронной терапии и ядерной наномедицины на базе ускорительных комплексов отечественного производства» при поддержке Федеральной научно-технической программы «Развитие синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры на период до 2030 года и дальнейшую перспективу» Минобрнауки России.

На момент открытия Практики было зарегистрировано 48 участников из 12 городов России.

Формат Практики предполагал лекции и практические занятия, проводимые научными сотрудниками лаборатории «Радиационная биофизика и биомедицинские технологии» ФИАН, лаборатории «Тераностика и ядерная медицина» ИТЭБ РАН, кафедры № 88 «Полупроводниковая квантовая электроника и биофотоника» НИЯУ МИФИ, а также консультационные встречи по подготовке практических работ.

Всего в ходе Практики было прочитано семь лекций и проведено 10 практических занятий. Лекции были рассчитаны на уровень знаний учащихся профильных физико-математических, естественно-научных и медицинских классов. В течение лекции учащиеся могли задавать интересующие их вопросы, сложные вопросы обсуждались отдельно на практических занятиях, консультационных встречах. Практическая работа заключалась в решении задачи, подготовке презентации с изложением хода решения задачи и представлении доклада по презентации перед комиссией.

В ходе консультационных встреч участники практики задавали интересующие их вопросы, разбирали варианты задач, получали уточняющие разъяснения по вопросам из разделов физики, биологии и медицины.

По итогам Летней практики участники подготовили презентации на основе решения заданий, представили свои презентации в виде докладов, рассказали о методах, применяемых при решении заданий, и о полученных результатах.

Школьная секция XXIII Всероссийской молодежной Самарской конкурса-конференции по оптике, лазерной физике и физике плазмы

Время проведения – 9 ноября 2025 г

Место проведения – г. Самара.

Перед стартом основной, «взрослой» научной программы XXIII Всероссийской молодежной Самарской конкурса-конференции по оптике, лазерной физике и физике плазмы в СФ ФИАН прошла школьная секция конкурса-конференции. Организаторы школьной секции – СФ ФИАН и физический факультет Самарского национального исследовательского университета имени академика С. П. Королева.

Было представлено много интересных докладов, экспериментов, продемонстрированных вживую на самодельных установках, привезенных за сотню (из г. Нефтегорска) и даже несколько сотен (из с. Ольховка Волгоградской области) километров! Демонстрировались фигуры Хладни и пушка Гаусса, квадрупольные ионные ловушки, эргономичные системы дистанционного полива, зарядное устройство на основе солнечной батареи, модель гидропневматической ракеты и многое другое.

Оценивала доклады экспертная комиссия под председательством канд. физ.-мат. наук, зав. кафедрой физики Самарского университета, ст. научн. сотр. СФ ФИАН **Д. И. Завершинского**. В состав комиссии от СФ ФИАН также входили Ph.D, научный руководитель СФ ФИАН, зав. ЦЛА, ст. научн. сотр., доцент кафедры оптики и спектроскопии СамГУ **И. О. Антонов**, канд. физ.-мат. наук, ст. научн. сотр. Лаборатории когерентной оптики СФ ФИАН **Д. В. Прокопова**, канд. физ.-мат. наук, ст. научн. сотр. Лаборатории физико-химической кинетики СФ ФИАН, доцент кафедры физики СамГУ **А. П. Торбин**, младшие научные сотрудники СФ ФИАН, аспиранты СамГУ **Р. А. Курамшин**, **В. К. Урюпина**, **К. А. Целогородцев** и лаборанты СФ ФИАН, магистранты Самарского университета **И. Матвеев** и **Д. Чабуркин**.

В зале собрались люди, увлеченные физикой, экспериментом, наукой. Поэтому было много вопросов, обсуждений, советов, предложений приходить в лаборатории СФ ФИАН и университета для дальнейших исследований и глубокого изучения физики и химии. Победителем конкурса-конференции (школьная секция) стала ученица 11 класса ГБОУ СОШ № 2, г. Нефтегорска Харламова Ева с работой «Исследование пушки Гаусса» (научный руководитель Е. В. Кортунова).

Призеры и участники школьной секции XXIII Всероссийской молодежной Самарской конкурса-конференции по оптике, лазерной физике и физике плазмы

Антон Анатольевич Кренц (канд. физ.-мат. наук, ст. научн. сотр. Теоретического сектора СФ ФИАН, доцент кафедры физики Самарского университета) прочитал для участников конференции лекцию «Эволюция компьютеров: от вакуумных ламп к лазерам». В лекции был прослежен путь развития вычислительной техники, объяснены причины неизбежного перехода к фотонным технологиям и рассмотрены принципы работы лазерных процессоров, способных совершить революцию в скорости обработки данных.

Иван Олегович Антонов продемонстрировал юным исследователям и их научным руководителям уникальную научную установку Центра лабораторной астрофизики СФ ФИАН.

Все участники конференции были награждены дипломами и памятными призами, педагоги и научные руководители получили благодарственные письма оргкомитета.

Юные физики проводят демонстрационный эксперимент

ФИАН на Троицкой школе преподавателей физики – 2025

Троицкая школа повышения квалификации преподавателей физики «Актуальные проблемы физики и астрономии: интеграция науки и образования» (ТШПФ) – ежегодное мероприятие в формате конференции, которое проходит при поддержке Президиума Российской академии наук. Программа Школы, ориентированная на учителей физики, которые участвуют в проекте «Базовые (опорные) школы РАН», предусматривает обзорные лекции ведущих ученых мирового уровня по актуальным вопросам современного естествознания с привязкой к соответствующим предметным курсам, а также экскурсии по лабораториям научно-исследовательских институтов Троицка.

По словам сопредседателя Организационного комитета ТШПФ-2025, руководителя Троицкого обособленного подразделения Физического института им. П. Н. Лебедева РАН (ТОП ФИАН) члена-корреспондента РАН **А. В. Наумова**, задачей Школы является не только повышение квалификации преподавателей, но и знакомство учителей с последними достижениями науки. Так, с 2017 года через Троицкую школу прошло более 500 преподавателей из 26 городов Российской Федерации.

В 2025 году в рамках лекционной части с докладом выступил директор Физического института им. П. Н. Лебедева РАН, академик РАН **Н. Н. Колачевский**. В своем высту-

плении он рассказал о развитии в стране квантовых вычислительных технологий на примере созданного в ФИАН 50-кубитного квантового компьютера на ионах иттербия.

В ТОП ФИАН участники Школы посетили Лабораторию стандартов частоты, Лабораторию квантовых излучателей, Отдел Технопарк «Прецизионные оптические технологии», а также Лабораторию электронной литографии и микроскопии.

Центр межолимпиадной подготовки ФИАН в 2025 году

ЦЕНТР МЕЖОЛИМПИАДНОЙ ПОДГОТОВКИ

В целях развития системы образования в сфере финансовой безопасности отдельным структурным подразделением на базе Физического института им. П. Н. Лебедева продолжает работу Центр межолимпиадной подготовки школьников и студентов, учрежденный в рамках реализации поручений Президента Российской Федерации в 2023 году.

В 2025 году Центр обеспечил полный цикл методического сопровождения V Международной олимпиады по финансовой безопасности. Разработаны 12 уникальных комплектов олимпиадных заданий для школьников на все этапы: пригласительный, 1-й и 2-й отборочный тур и финальный. Организована двухуровневая система проверки работ, подготовлены текстовые и видеоразборы верных решений. С заданиями всех прошедших этапов Олимпиады можно ознакомиться на официальном сайте Олимпиады (https://rosfinolymp.ru) и платформе «Содружество» (https://sodrujestvo.org/ru).

Международная олимпиада по финансовой безопасности дала старт для проведения национальных олимпиад в странах СНГ, вдохновив образовательные сообщества и государственные структуры на развитие совместных инициатив в области финансовой безопасности. С 2023 года Центр координирует этот проект.

Благодаря организационной и методической поддержке Центра на регулярной основе проводятся Олимпиады в Казахстане, Кыргызстане, Таджикистане и Узбекистане,

Результаты работы Центра межолимпиадной подготовки (ЦОП) ФИАН в 2025 году

в которых только в 2025 году приняли участие более 3000 школьников.

Организаторами Национальных олимпиад выступают подразделения финансовой разведки стран-партнеров, а также вузы Международного сетевого института в сфере ПОД/ФТ, в том числе подведомственные Министерству науки и высшего образования Российской Федерации (например, Кыргызско-Российский Славянский Университет им. Б. Н. Ельцина и Российско-Таджикский (Славянский) университет).

Визитной карточкой Центра стали ежегодные выездные очные мероприятия, так называемые Летние и Зимние школы по финансовой безопасности. В 2025 году, впервые, эти мероприятия проводились в международном формате, в них приняли участие более 140 школьников из 5 стран.

Кроме того, в целях подготовки школьников к участию в Международной олимпиаде по финансовой безопасности, повышения предметных знаний и развития компетенций в сфере финансовой безопасности (включая критическое и аналитическое мышление) Центр реализует самостоятельный образовательный проект «Школа межолимпиадной подготовки». В 2025 году обучение в Школе прошли более 300 человек, в том числе 35 человек из стран СНГ.

Обучение осуществляется на цифровой платформе https://finolympschool.ru/, обеспечивающей доступность образовательных ресурсов вне зависимости от географического положения участника. Архитектура платформы, интерфейсы, системы аналитики и автоматизации, учебно-методические материалы и наполнение содержанием образовательных программ Школы полностью разработаны сотрудниками Центра.

Совместно с Росфинмониторингом и подразделениями финансовой разведки стран-партнеров Центр проводит большую работу по обучению педагогов. В отчетном

Участники Международной Зимней школы по финансовой безопасности, федеральная территория Сириус, 2025 год

периоде были организованы обучающие семинары для учителей практически из всех федеральных округов РФ, а также стран-партнеров проведения Национальных олимпиад по финансовой безопасности. В обучающих мероприятиях Центра в 2025 году приняли участие 1232 человека.

В 2025 году во второй раз проведен Международный диктант по финансовой безопасности. Тема Диктанта – «Новые технологии на страже финансовой безопасности: от личной защиты до суверенитета государства»[1].

В Диктанте приняли участие 53 252 человека из 36 стран. География участников — от стран СНГ до государств Европы, Азии, Африки и Америки. Диктант проводится на русском и английском языках, что снимает языковые барьеры и подтверждает готовность России к равноправному международному диалогу в образовательной сфере. Традиционно мероприятие проходило в дистанционном формате с 1 по 30 сентября, а завершилось мероприятием программы финальной недели V Международной олимпиады по финансовой безопасности в городе Красноярске, в Сибирском федеральном университете.

Центр принимает активное участие в организации и проведении мероприятий финальной недели Олимпиады:

– образовательный трек: инструктаж перед написанием олимпиады, организация

1 Шемякина, М. С. Международный диктант по финансовой безопасности: глобальный срез компетенций и стратегический инструмент превентивных мер. / М. С. Шемякина, А. В. Ващенко. // Финансовая безопасность. – 2025. – № 46. – С. 79–82.

Участники Международного диктанта по финансовой безопасности на площадке Сибирского федерального университета, 2025 год

контрольного испытания для школьников, организация разбора решений олимпиадных заданий;

– профессиональный трек: разговоры о важном со школьниками, разговоры на равных со студентами, встреча со сборной РФ, профориентационное мероприятие для школьников – «КЛАССный час: как поступить в вуз мечты»;

– культурный трек: церемония награждения самых активных участников финальной недели Олимпиады.

Все мероприятия имеют методическое обеспечение, разработанное сотрудниками Центра.

К примеру, в 2025 году, в поддержку Всероссийского Урока по финансовой безопасности Центр снял 8 тематических видеороликов по отдельным блокам – о проблемах дропперства, финансовом мошенничестве, цифровой кибербезопасности, про расчеты криптовалютами – с приглашением ведущих экспертов в сфере финансовой безопасности из Росфинмониторинга, ФИАН, ПАО Сбербанк, Лаборатории Касперского и др.

Кроме того, экспертами Центра разработан «Курс по финансовой безопасности», который включает более 300 единиц образовательного контента: лекции и видеоуроки, презентации, тесты, домашние задания и видеоразборы домашних заданий.

Успешная реализация образовательных и международных проектов Центра невозможна без высокопрофессионального кадрового состава. Штат Центра сформирован из специалистов, имеющих базовое академическое образование и практический опыт в областях математики, информатики, экономики, права и обществознания. Ключевая особенность кадровой модели Центра — интеграция фундаментальной научной базы с прикладными задачами олимпиадной и просветительской деятельности. Сотрудники Центра не только разрабатывают олимпиадные задания и методические материалы, но и выступают в роли лекторов, экспертов и наставников на выездных школах, семинарах для педагогов и международных мероприятиях. Для организации и проведения мероприятий Центра приглашаются ведущие эксперты в области финансовой безопасности. Такой кадровый подход — сочетание научной глубины, педагогического мастерства и практической ориентированности — явля-

Церемония награждения самых активных участников мероприятий финала Олимпиады (г. Красноярск, 2 октября 2025 года)

ется ключевым условием устойчивого развития Центра межолимпиадной подготовки, масштабирования его проектов и достижения стратегических целей в области непрерывного образования в сфере финансовой безопасности.

Таким образом, Центр межолимпиадной подготовки школьников и студентов ФИАН выступает ключевым звеном в реализации государственной политики по формированию культуры финансовой безопасности среди молодёжи, сочетая образовательные, научные и международные инициативы.

Международная составляющая работы Центра — от проведения российской и национальных олимпиад в странах СНГ до организации международного диктанта и международных выездных школ — выводит российские подходы к преподаванию финансовой безопасности на мировой уровень, способствует экспорту образования и укреплению доверия между государствами.

Вокруг науки и не только

Юбилей Великой Победы в ФИАН

Великая Отечественная война стремительно ворвалась в жизнь ФИАН и его сотрудников, одни из которых ушли на фронт, а другие продолжали заниматься научными исследованиями в тылу – в Москве и в эвакуации в Казани, – направив весь свой интеллект, все свои знания и умения на общую борьбу за победу. Практически вся работа Института была подчинена военной тематике. Поэтому в Институте всегда отмечают великий праздник Дня Победы.

В апреле 2025 года в Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН состоялось торжественное мероприятие в формате совместного заседания научных коллективов ФИАН и ИОФ РАН, посвященного 80-летию Победы в Великой Отечественной войне.

Открыл мероприятие директор ФИАН, член-корреспондент РАН **Н. Н. Колачевский**. В своем выступлении он рассказал об отечественных физиках, которые сыграли важнейшую роль в разгроме вражеских оккупантов. Николай Колачевский напомнил, что сотрудники Физического института продолжали вести научные исследования в самые тяжелые годы войны. Ученые Института не прекращали исследовательскую деятельность в эвакуации и внесли большой вклад в спасение Родины и мира.

Научный руководитель Института общей физики им. А. М. Прохорова РАН, академик РАН **И. А. Щербаков** выступил с докладом «Дважды изменившие облик окружающего нас мира» об Александре Михайловиче Прохорове и Николае Геннадиевиче Басове. Жизненный путь обоих ученых объединяет участие в Великой Отечественной войне и последующее получение Нобелевской премии по физике 1964 г. Эти два общие события дают основание назвать Н. Г. Басова и А. М. Прохорова «дважды изменившими мир».

В своем выступлении заведующий Лабораторией лазерной биофизики ЦЕНИ ИОФ РАН **В. В. Савранский** поделился воспоминаниями о своем детстве в годы ВОВ, осветив трудности и испытания, с которыми столкнулись люди того времени. Особое внимание было уделено ветеранам Войны,

которые после окончания боевых действий трудились в Физическом институте имени Лебедева и внесли значительный вклад в развитие науки и страны.

Помощник директора ФИАН по научной работе, профессор **С. Ю. Савинов** представил доклад «Война после войны», в котором рассказал о холодной войне, начавшейся в 1946 году. Глобальная конфронтация западных стран с СССР и гонка вооружений, активизировавшийся после войны научный шпионаж и участие ФИАН в атомном проекте – и снова отечественные ученые сыграли важную роль в научном, технологическом и военном суверенитете Отчизны.

В торжественной атмосфере сотрудники ФИАН, ИОФ РАН и гости мероприятия вспомнили поименно и почтили память сотрудников Физического института Академии наук СССР, которые храбро сражались на фронте и без устали трудились в тылу во время Великой Отечественной войны.

В музыкальной части выступил Концертный образцовый оркестр ОАО «РЖД» под управлением народного артиста России, заслуженного деятеля искусств России, капитана первого ранга **А. С. Данильченко.** Прозвучали патриотические композиции, а вокалисты исполнили песни военных лет.

Незадолго до этого торжественного мероприятия, в преддверии празднования 80-летия Победы вдова одного из директоров ФИАН, нобелевского лауреата, академика Н. Г. Басова, Ксения Тихоновна Басова передала в мемориальный кабинет выдающегося ученого, который был открыт в Отделении квантовой радиофизики ФИАН в честь его юбилея, Орден Отечественной войны, которым был награжден Николай Геннадьевич за боевые заслуги.

Для ФИАН это событие стало одним из самых дорогих и значимых подарков ко Дню Победы, своеобразным символическим знаком признания заслуг всех фиановцев – и фронтовиков, и тружеников тыла – в годы Великой Отечественной войны.

Орден Отечественной войны, копии Золотых Звезд Героя Советского Союза и других наград Николая Геннадьевича в мемориальном кабинете Н. Г. Басова

Космонавты открыли новые горизонты в Пущинской обсерватории

В начале лета 2025 года состоялся визит космонавтов и сотрудников Центра подготовки космонавтов имени Ю. А. Гагарина в Пущинскую радиоастрономическую обсерваторию (ПРАО) Астрокосмического центра Физического института им. П. Н. Лебедева Российской академии наук (АКЦ ФИАН).

Визит стал очередным шагом в формировании новой, но прочной традиции проведения научно-образовательных мероприятий для космонавтов на базе ПРАО АКЦ ФИАН. Программа встречи была направлена на расширение научных знаний участников. Космонавты прослушали две лекции: заведующая Отделом теоретической астрофизики и космологии АКЦ ФИАН **Татьяна Ларченкова** представила обзор актуальных астрофизических проектов, реализуемых в Астрокосмическом центре, а директор Государственного астрономического института им. П. К. Штернберга (ГАИШ МГУ) **Константин Постнов** рассказал о современных проблемах астрофизики.

После лекций слушатели ознакомились с инфраструктурой Пущинской радиоастрономической обсерватории. Заместитель руководителя ПРАО АКЦ ФИАН **Сергей Тюльбашев** показал радиотелескопы, включая знаменитые ДКР-1000 и РТ-22, и рассказал об их роли в изучении пульсаров, квазаров и других космических объектов. Особый интерес космонавтов вызвало производство высокоточных панелей главного зеркала космической обсерватории «Миллиметрон». Участники смогли увидеть, как создаются элементы для

будущих космических миссий. Проект «Миллиметрон» – космическая обсерватория миллиметрового и дальнего инфракрасного диапазонов длин волн с криогенным телескопом диаметром 10 м. Его создание представляет собой яркий пример применения передовых технологий в астрофизике.

В составе делегации были Герои России **Иван Вагнер** и **Николай Чуб**, а также кандидаты в космонавты из нового набора: **Анастасия Бурчуладзе, Эльчин Вахидов, Владимир Ворожко и Александр Жеребцов**.

Подобные научно-образовательные мероприятия не только знакомят космонавтов с новейшими достижениями астрофизики, но и способствуют укреплению взаимодействия между научным сообществом и космической индустрией. Они вдохновляют новое поколение исследователей и подчеркивают важность междисциплинарного подхода в изучении космоса.

Новую станцию метрополитена назвали в честь первого директора ФИАН

13 сентября 2025 года в г. Москве состоялось открытие станции «Вавиловская». Она названа в честь Сергея Ивановича Вавилова. Открыл новую станцию Владимир Путин.

Первый директор Физического института Академии наук С. И. Вавилов родился в Москве, учился на Остоженке, участвовал в Первой мировой войне. Во время Великой Отечественной войны руководил сразу двумя институтами, которые находились в эвакуации и внесли существенный вклад в разгром фашистских захватчиков. А уже через полтора месяца после победы над гитлеровской Германией в 1945 году Вавилов был избран Президентом Академии наук СССР.

Сергей Иванович широко известен как историк науки, особенно работами, посвященными Исааку Ньютону и М. В. Ломоносову. Директор ФИАН сочетал научную деятельность с широкой популяризацией достижений науки, был одним из инициаторов создания и первым председателем общества по распространению политических и научных знаний (сейчас – общество «Знание»), а также главным редактором второго издания Большой советской энциклопедии.

Отметим, что Сергей Иванович Вавилов относился к редкому типу людей, умеющих сочетать в себе талант организатора и ученого. Это неотъемлемая особенность и навык всех директоров ФИАН.

Фото: Артём Доев, ФИАН

Новая станция Троицкой линии метро расположена вдоль Ленинского проспекта на пересечении с улицами Строителей и Панферова, имеет два подземных вестибюля и выходы на обе стороны проспекта. Дизайн станции посвящен исследованиям С. И Вавилова в области люминесценции. Как было написано о проекте станции в телеграмм-канале мэра Москвы С. С. Собянина (https://www.mos.ru/mayor/themes/12590050/),

«Светильники над платформой будут символизировать частицы света. В перспективе они создадут эффект движения, увеличивая диаметр от 10 до 30 сантиметров. Стены вдоль платформы декорируем мелкими стальными элементами с зеркальной поверхностью. Они будут мерцать, отражая свет.»

Расположение станции, посвященной первому директору ФИАН, на Ленинском проспекте в определенном смысле очень символично. В конце 1940-х годов именно Сергей Иванович выбирал новое место, где предстояло жить и работать послевоенному ФИАНу и в буквальном смысле творить историю отечественной и мировой науки. И именно С. И. Вавилов разрабатывал совместно с А. В. Щусевым концепцию и утверждал проект главного здания ФИАН, которое сегодня по праву является украшением архитектурного ансамбля Ленинского проспекта, и которое, к сожалению, ему не удалось увидеть уже построенным.

Есть и другой «уровень символизма». В топонимике г. Москвы звучат имена А. Д. Сахарова, Н. Г. Басова, А. М. Прохорова, И. Е. Тамма – нобелевских лауреатов из ФИАН. Кстати, два из наименований расположены также на Ленинском проспекте – площади им. А. М. Прохорова и И .Е. Тамма, а еще одно – площадь им. Н. Г. Басова – неподалеку, на пересечении улиц Дм. Ульянова и Вавилова. И теперь появилось еще одно упоминание имени С. И. Вавилова – человека, чьи научный, творческий и организационный таланты, его научное предвидение породили концепцию ФИАНа как многогранного физического института, в стенах которого только и могло появиться такое множество выдающихся ученых с мировым именем.

Скромно заметим, что у ФИАН есть еще очень много «претендентов» на новые наименования на карте г. Москвы. Пока что – несколько десятков точно. А там и новые подоспеют: ФИАН продолжает творить историю в отечественной и мировой науке.

От научного к популярному

ФИАН традиционно уделяет большое внимание научно-популярной деятельности. Здесь развиваются такие направления, как публикации в СМИ и интернет-изданиях, активное сотрудничество с федеральными телевизионными каналами и ведение социальных сетей Результатом этого являются телепрограммы и отдельные видеосюжеты на общие научно-популярные темы и печатные материалы о деятельности сотрудников Института.

Научные конференции, организатором и участником которых выступил наш Институт; визит делегации Китайской академии наук в ФИАН; успешное испытание первого в России 70-кубитного квантового компьютера; создание нового материала для сверхбыстрой электроники, нанопленки из аморфного рения; 45-летний юбилей Самарского филиала – это лишь некоторые мероприятия и события, которые получили должное информационное сопровождение. Количество публикаций в средствах массовой информации с упоминанием ФИАН и его сотрудников в 2025 году значительно выросло. При этом в разделе «СМИ о нас» на сайте Института, где фиановцы могут ознакомиться с отражением своей деятельности в прессе, размещено более 550 наиболее цитируемых материалов.

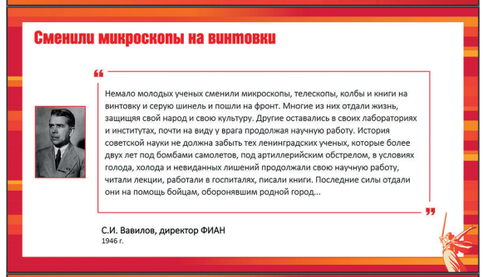
В 2025 году вся страна громко и гордо праздновала юбилей Великой Победы. В Физическом институте также состоялось масштабное торжество, посвященное 80-летию Победы в Великой Отечественной войне. Мероприятие стало одним из знаковых и ответственных для Отдела по связям с общественностью. Ещё до празднования был не просто обновлен, а полностью переработан и создан новый интернет-сайт, посвященный работе Института в годы Войны. Сайт, который также получил и новое доменное имя victory.lebedev.ru. Он надолго сохранит память о всех фиановцах-ветеранах ВОВ, работниках тыла и научных исследованиях, которые внесли огромный вклад в победу.

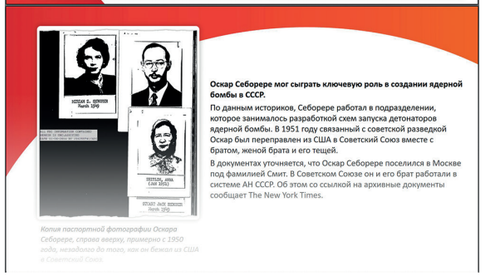
На ресурсе собрана вся имеющаяся информация о сотрудниках Института, которые сражались на фронте и трудились в лабораториях. Для этого были перепроверены личные дела работников, базы данных Министерства обороны и прочие открытые источники. Итогом проведенной Отделом по связям с общественностью работы стала уточненная информация по наградам, годам жизни и занимаемым должностям в ФИАН наших коллег во время войны. Также на соответствующий раздел сайта были добавлены электронные версии всех юбилейных изданий «ФИАН и фиановцы в годы Великой Отечественной войны» и другая тематическая литература. Теперь вся имеющаяся информация о деятельности Института с 1941 по 1945 год структурирована и собрана в одном месте.

В полном соответствии с государственным официальным брендбуком (графическим и шрифтовым оформлением) празднования этого исторического события были созданы афиши для дисплеев в главном здании ФИАН, а также заставки для большого экрана в конференц-зале, где проходило торжество.

Кроме того, в едином стиле были оформлены презентации для выступлений директора ФИАН Н. Н. Колачевского и помощника директора ФИАН С. Ю. Савинова.

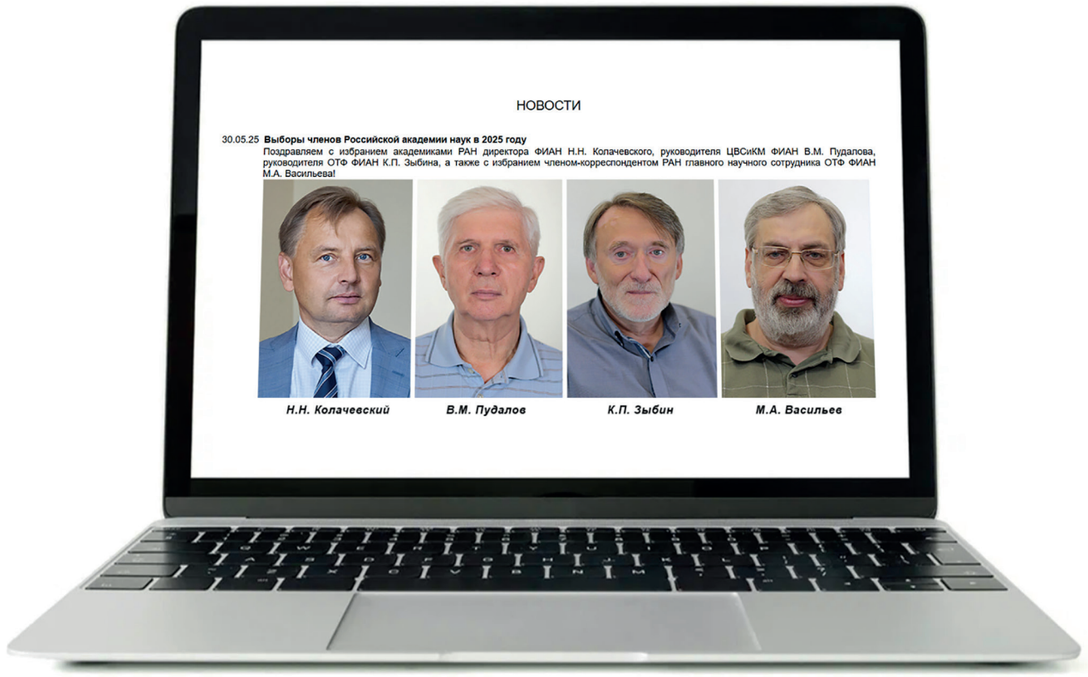
Научно-популярная деятельность ФИАН





В 2025 году продолжилось продуктивное взаимодействие Отдела по связям с общественностью с учеными секретарями отделений и филиалов Института. Результатом стали своевременные анонсы и пост-релизы по итогам проводимых мероприятий, нацеленных в том числе на популяризацию науки: экскурсии для школьников и абитуриентов в Самарском филиале ФИАН, визит российских космонавтов в Пущинскую радиоастрономическую обсерваторию АКЦ ФИАН, участие в днях открытых дверей вузов и другое. Также должное информационное освещение получили события, связанные с участием фиановцев в мероприятиях, проводимых в рамках Дня российской науки и Международного дня света и световых технологий.

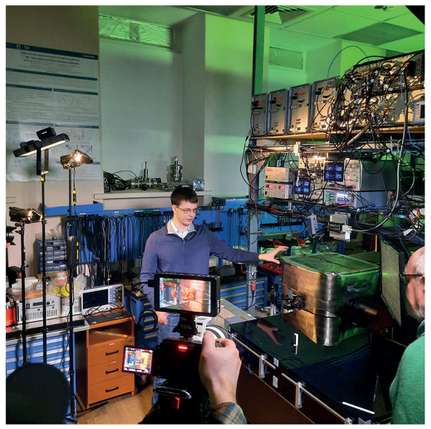
Летом 2025 года состоялись выборы членов Российской академии наук, по итогам которых мы поздравляли сразу 4 сотрудников Института. Информация о победе на выборах после объявления официальных результатов была оперативно размещена максимально на всех доступных площадках и носителях: официальный сайт ФИАН, социальные сети, экраны в здании Института и электронные рассылки.

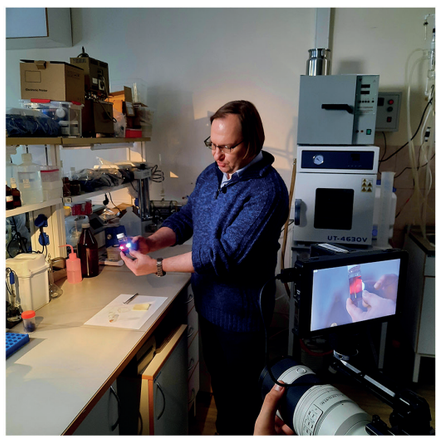


С. Ю. Савинов в студии МИР 24

В. Ю. Авдеев в студии ОСН

В течение всего 2025 года сотрудники Физического института им. П. Н. Лебедева Российской академии наук регулярно появлялись в эфире федеральных телеканалов и на первых полосах газет. Видеосъемки проводились не только на территории Института, записи интервью с научными сотрудниками проходили в ТТЦ «Останкино» и других телестудиях.





Стоит отметить ряд знаковых пресс-релизов, реализованных Отделом по связям с общественностью ФИАН совместно с госкорпорацией «Росатом» и Российским квантовым центром. Для создания новостных материалов Отдел начал взаимодействовать не только с пресс-службами и информационными департаментами партнеров, но и с их учеными и руководителями, которые выступили в качестве спикеров.

В 2025 году было налажено сотрудничество с официальным сайтом Десятилетия науки и технологий, где регулярно размещаются научные новости ФИАН. Кроме того, в социальных сетях Наука.рф (Телеграм, ВКонтакте, Одно-

классники) в формате коротких постов (сообщений) впервые стали появляться фотографии сотрудников Института за работой.

Оперативное реагирование и профессиональный подход к делу Отдела по связям с общественностью позволяют Физическому институту им. П. Н. Лебедева РАН в 2025 году оставаться источником достоверной информации не только в сфере физики. Так, информация и авторские фотографии, сделанные в день открытия новой станции Московского метрополитена «Вавиловская», были перепечатаны рядом средств массовой информации в оригинальном виде со ссылкой на ФИАН.