



О развитии квантовых технологий в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова

Московский университет является одним из лидеров в области квантовых технологий в России. Все три направления, составляющие квантовые технологии, — квантовые вычисления, квантовая связь, и квантовые сенсоры — активно развиваются в МГУ. Квантовые технологии являются специфическими в общем ряду сквозных технологий, развиваемых в России, что связано с сильным доминированием фундаментальных и поисковых исследований.

Определяющий задел МГУ по квантовым технологиям базируется на четырех всемирно известных научных Школах физического факультета МГУ: Школе квантовой оптики Д.Н. Клышко (технологии генерации, преобразования и измерения N-фотонного света, абсолютная квантовая фотометрия, квантовая интерферометрия и спектроскопия), Школе квантовых измерений В.В. Брагинского (принципы прецизионных квантовых измерений, квантово-невозмущающие измерения, разработка ключевых элементов для детекторов гравитационных волн), Школе взаимодействия излучения с веществом Л.В. Келдыша (неупругая туннельная спектроскопия, взаимодействие мощного лазерного излучения с ато-



Научный руководитель Центра квантовых технологий профессор Сергей Павлович Кулик.

мами, молекулами и твёрдыми телами, кинетика сильно неравновесных квантовых систем) и Школе квантовой одноэлектроники К.К. Лихарева (одноэлектронные устройства и системы, элементы памяти и логические элементы вычислительных систем).

Коллективами этих Школ было получено большое количество научных результатов, определяющих мировой уровень в этой области знаний. Отмечая задел физического факультета в области квантовой оптики, нельзя также не упомянуть о деятельности лаборатории спонтанного параметрического рассеяния света на кафедре квантовой радиофизики (с 2001 г. — кафедры квантовой электроники) под руководством Александра Николаевича Пенина.

В 2018 г., приказом ректора МГУ им. М.В. Ломоносова академика В.А. Садовниченко на физическом факультете в рамках Национальной технологической инициативы был создан Центр компетенций по направлению «квантовые технологии». Директором Центра был назначен декан физфака Н.Н.Сысоев, научным руководителем — С.П. Кулик.

СОДЕРЖАНИЕ	
1	НОВОСТИ НАУКИ
24	КОНФЕРЕНЦИИ
28	ДИССЕРТАЦИИ
30	ПРЕМИИ / НАГРАДЫ / КОНКУРСЫ
35	ДИССЕРТАЦИОННЫЕ СОВЕТЫ
37	УЧЕННЫЕ ФИЗФАКА МГУ

Продолжая лучшие традиции Московского университета в целом и физического факультета в частности, Центр квантовых технологий (ЦКТ) ведет активную работу по четырем стратегическим направлениям квантовых технологий:

— реализация ключевых комплексных научно-исследовательских и опытно-конструкторских проектов в области квантовых вычислений, квантовых коммуникаций и квантовых сенсоров;

— обеспечение правовой охраны, управления правами и защиты как полученных Центром РИД, так и РИД, переданных ему в управление;

— разработка и реализация основных образовательных программ высшего образования, направленных на формирование компетенций в области квантовых технологий;

— развитие инфраструктуры научной, научно-технической, инновационной и интеллектуальной деятельности.

Деятельность Центра тесно связана с Консорциумом научно-образовательных и коммерческих организаций, реализующих Программу. География консорциума обширна: в него входят организации из Санкт-Петербурга, Новосибирска, Казани, Пензы, Саратова, Черноголовки, Томска, Челябинска и Троицка. В состав Консорциума, кроме лидера — МГУ, входят 23 организации.

В качестве иллюстрации деятельности Центра квантовых технологий рассмотрим два направления — образовательное и научное.

1. Одной из ключевых задач, которую ставит перед собой Центр квантовых технологий, является подготовка высококвалифицированных кадров. В первую очередь, речь идет о магистерских программах.

Центр подготовил и реализует три магистерских программы:

- **«Квантовая криптография и квантовая связь».** Цель данной программы — подготовка специалистов по вопросам квантового распределения ключей и квантовой связи. В рамках программы рассматриваются как вопросы классической теории информации и методов передачи данных, так и изучение в требуемом объеме квантовой теории. В рамках первой части программы изучают вопросы кодирования информации и исправления ошибок, классической криптографии, основ цифровых систем связи, некоторые аспекты современных методов разработки цифровых электронных устройств. Вторая часть посвящена основам квантовой оптики, квантовым технологиям в целом, физическим основам квантовой

криптографии и изучению известных протоколов квантового распределения ключей. Также подробно рассматриваются такие смежные вопросы, как генерация случайных чисел, «постквантовая криптография» и др.

- **«Квантовые вычисления».** Эта программа готовит специалистов нового типа — «квантовых инженеров», специалистов по разработке элементной базы и программного обеспечения для квантовых компьютеров. Междисциплинарная программа подготовки включает в себя как углублённое изучение теории квантовой обработки информации, теории квантовых вычислений и квантовых алгоритмов, так и необходимые разделы физики, лежащие в основе физических моделей квантовых вычислений. В частности, сюда относятся квантовая оптика, физика холодных атомов, физика конденсированного состояния и взаимодействия излучения с веществом. Данная программа содержит курсы для подготовки специалистов в области экспериментальной физики, связанной с созданием квантовых вычислительных систем.

- **«Квантовые и оптические технологии».** В рамках этой программы ведется подготовка специалистов, обладающих навыками и компетенциями, необходимыми для разработки квантовых вычислительных устройств на основе одноатомных центров в твердотельных структурах, а также устройств нанофотоники, интегральной оптики, и использования современных оптических методов диагностики в области квантовых технологий.

Решение проблемы подготовки кадров по квантовым технологиям видится не только в разработке и чтении соответствующих курсов. С 2018 г. ЦКТ регулярно проводит **Школу по квантовым технологиям** (<http://qutes.org/>), с привлечением ведущих российских и зарубежных ученых. В разные годы с лекциями выступили Artur Ekert, Anton Zeilinger, Philippe Grangier, Andrew Forbes, Mark Saffman, Marco Genovese, Marco Bellini, Сергей Вячанин, Фарид Халили, Валерий Рязанов, Алексей Устинов, Сергей Молотков, Николай Колачевский и многие другие ученые — лидеры по квантовой обработке информации.

Здесь нужно сказать об еще одной учебной разработке, уникальной для России. В 2019–2020 гг. в Центре квантовых технологий был разработан и внедрен **учебно-научный комплекс для практических работ по квантовой оптике и квантовой информатике**. Этот комплекс позволяет экспериментально исследовать базовые законы квантовой физики (принцип суперпозиции, соотношение неопределенностей, явление перепутанности, нарушение неравенств Белла и др.) на примере задач квантовой информатики (квантовое распределение ключа, квантовый генератор случайных чисел, томография квантовых состояний и процессов), реализованных на самой простой и наглядной физической платформе — платформе квантовой оптики.

Дело в том, что квантовая физика, несмотря на свою востребованность в современном мире, представляет определенную сложность для понимания, так как ее базовые принципы полностью противоречат нашему повседневному опыту. Возможно, именно с этим связан поток противоречивой информации, нередко появляющейся в СМИ в интерпретации невежественных или, как минимум, неподготовленных «интерпретаторов» науки: и про системы защищенной связи, и про невиданные по возможностям вычислительные устройства. Преодолеть этот разрыв и дать полное понимание законов квантовой физики может только практический опыт работы с квантовыми системами. Поэтому практикум, разработанный в ЦКТ, является чрезвычайно полезным инструментом для обучения и отработки практических навыков. Использование установок практикума на занятиях со студентами подтверждают этот тезис.

Учебный комплекс включает в себя две части — классическую и квантовую. Классическая часть посвящена исследованию поляризации классического света — пожалуй, единственной характеристики классического излучения, описание которой изоморфно описанию свойств двухуровневых систем в квантовой механике. Поляризация — это наглядный мостик между классическим и квантовым описанием явлений. На ее основе можно реализовать процедуры приготовления и измерения одиночных кубитов, практически, не выходя за пределы классической оптики, используя аппарат векторов Джонса. Квантовая часть комплекса, состоящая из пяти модулей, позволяет генерировать перепутанные поляризационные состояния пар фотонов/бифотонов и с их помощью демонстрировать нарушение неравенств Белла, реализовывать различные протоколы квантовой томографии и криптографии, наблюдать интерференцию Хонга–Оу–Мандела, исследовать статистику фотонов различных квантовых состояний света и на основе этих исследований создавать квантовые генераторы случайных чисел.

Работа с практикумом реализована таким образом, что студенты могут выполнять задания как очно, так и удаленно, через интернет. Это оказалось особенно важным во время перехода на дистанционный формат обучения.

Надо отметить, что дистанционное образование, предлагаемое ЦКТ, не ограничивается доступом к практикуму. Сотрудниками центра записано несколько онлайн-курсов, все они доступны на портале Открытое образование (<https://openedu.ru>). Благодаря этому пройти курс и получить сертификат могут и сотрудники технологических компаний, и студенты, имеющие достаточную подготовку и соответствующие базовым требованиям, предъявляемым к слушателям.

Как видим, образовательные курсы и используемые решения позволяют подготовить специалистов по каждой из субтехнологий. Причем, возвращаясь к магистерским программам, отметим, что все учебные

планы составлены таким образом, чтобы обучающиеся могли не только получать фундаментальные и актуальные знания по выбранной программе, но также активно участвовали в реальных разработках, которые ведутся в Центре, взаимодействовали с промышленными партнерами. Это позволяет добиться того, что к окончанию магистерской программы выпускник может одинаково успешно продолжить заниматься научной деятельностью, или применить полученные знания на практике, занявшись разработкой новых технологий или устройств. В ситуации с такой стремительно развивающейся отраслью как квантовые технологии такая возможность кажется особенно актуальной, потому что на данный момент отрасль испытывает катастрофическую нехватку профессионалов высокого уровня. Причем при реализации прикладных задач эта нехватка ощущается ничуть не менее остро, нежели в научной и исследовательской работе.

Важно, что учебные заведения, входящий в Консорциум ЦКТ, активно взаимодействуют с Центром в области подготовки кадров и пользуются разработанными в центре методиками и курсами.

2. Научная деятельность Центра квантовых технологий МГУ, включает выполнение ряда амбициозных проектов:

В области **квантовых вычислений**: разработка квантовых вычислительных устройств, которые к 2024 г. должны продемонстрировать т.н. «квантовое превосходство», т.е. обеспечить решение нескольких вычислительных задач эффективнее, чем это делают самые мощные классические суперкомпьютеры.

В области **квантовых коммуникаций**: вывод на рынок принципиально нового поколения систем связи, с гарантированной защитой от прослушивания.

В области **квантовых сенсоров**: обеспечение устройств навигации, геологоразведки, а также медицинской аппаратуры сверхчувствительными датчиками, способными регистрировать сигналы, недоступные для существующих классических сенсоров.

В области **квантовой оптики**: исследование оптических полей в квантовых и квазиклассических состояниях для прецизионных методов характеристики объектов.

Еще раз подчеркнем, что решение этих задач возможно при тесном контакте научных и производственных организаций, входящих в консорциум. Именно эта связка должна обеспечить продвижение разработок, ведущихся в ЦКТ по цепочке «фундаментальная НИР» — «прикладная НИР» — «ОКР» — «технология» — «продукт»

Приведем ключевые проекты ЦКТ МГУ по каждому направлению.

Квантовые вычисления

Разработки в области квантовых вычислений подчинены главной цели — построению квантового вычислительного устройства — либо компьютера, либо симулятора.

Квантовый компьютер, это физическое устройство, способное решать **определенный круг** математических задач и выполняющее логические операции над квантовыми состояниями путем унитарных преобразований (т.е. сохраняющих энергию), не нарушающих квантовые суперпозиции в процессе вычислений.

Квантовый симулятор, это устройство, моделирующее сложный физический процесс, динамика которого описывается гамильтонианом более или менее воспроизводимым в другой доступной для экспериментального контроля и манипуляций физической системе.

В настоящее время известно порядка десяти физических систем, претендующих на модельные с точки зрения построения на их основе квантовых вычислительных устройств. Адекватность таких систем-кандидатов регламентируется критериями, известными как «критерии Ди Винчецо», которые сводятся к следующим положениям:

- возможность масштабирования;
- надежная инициализация;
- большие времена декогеренции (релаксации) по сравнению с временем срабатывания отдельных логических элементов (гейтов);
- возможность выполнения логических преобразований;
- передача и считывание состояний кубитов.

Здесь, имеет смысл пояснить, что под *кубитом* понимается мера квантовой информации, по аналогии с битом в классической информатике. Кубит может быть реализован на различных физических двухуровневых системах, таких как поляризация фотона, состояние спина электрона, невырожденных энергетических состояниях атома или иона, уровнях энергии в (нелинейном) сверхпроводящем контуре и др.

В стране в настоящий момент в данной области развиваются четыре направления, два из которых разрабатываются в МГУ:

- холодные атомы в микродипольных ловушках (физфак МГУ),
- фотоны в линейно-оптических системах (физфак МГУ),
- сверхпроводниковые системы (МИСиС, ИФТТ, МФТИ),
- холодные ионы (ФИАН).

Также следует упомянуть о направлении, развиваемом на физфаке МГУ и ИФМ РАН — квантовые вычисления на основе примесных полупроводниковых структур.

Наиболее целесообразным для развития отрасли видится путь одновременной поддержки каждого из четырех направлений, поскольку в данный момент нет объективных предпосылок для выделения одного конкретного лидирующего направления.

Перспективной стратегией представляется разработка квантовых вычислительных устройств среднего масштаба (до 100 кубитов) на упомянутых четырех платформах. На них могут быть отработаны системное ПО и определены перспективные прикладные алгоритмы. Одновременно с этим следует развивать интегрально-оптические технологии, с особым акцентом на интеграцию источников одиночных фотонов и многофотонных состояний на оптических чипах.

В ближнесрочной (до 5 лет) перспективе, наиболее быстрого прогресса можно ожидать в системах **на основе одиночных нейтральных атомов**. Это идеальные платформы для реализации вариационных квантовых алгоритмов и симуляции квантовых систем среднего масштаба в рамках парадигмы NISQ (Noisy Intermediate-Scale Quantum) — квантовых вычислений без использования кодов коррекции ошибок. Однако масштабирование этих систем до уровня десятка тысяч кубитов представляется технологически сложным. В долгосрочной перспективе, оптические квантовые вычисления **на основе фотонов** должны оказаться более перспективной платформой благодаря своей технологичности и относительно низкому уровню ошибок при выполнении логических операций.

В рамках крупного проекта Фонда перспективных исследований «Прибой», выполняемого на физическом факультете в ЦКТ МГУ, а также реализации Дорожной карты по квантовым вычислениям, в течение ближайшего времени планируется:

- создать регистр из 50 атомов-кубитов (Rb_{87});
- создать 25-канальный оптический квантовый процессор;
- продемонстрировать выполнение квантово-механического расчета на двух- и трехатомных молекулах.

Для решения этих амбициозных задач в ЦКТ построено несколько лабораторий, оснащенных самым современным оборудованием — это высоковакуумная техника, прецизионные лазерные системы, источники и приемники фотонов. Уже сегодня реализовано управление индивидуальными атомами рубидия в двумерных массивах, разработаны и изготовлены многоканальные программируемые интерферометры на основе литографической технологии и технологии фемтосекундной ла-

зерной печати. Вместе с МГУ эти работы выполняют надежные партнеры Центра — МГТУ имени Н.Э. Баумана, ВНИИА имени Н.Л.Духова (Росатом) и физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе, институт физики полупроводников СО РАН и другие. Значительную технологическую поддержку оказывает совместный научно-образовательный центр Функциональные Микро/Наносистемы (МГТУ/ВНИИА имени Н.Л. Духова), в котором изготавливаются высококачественные чипы для построения оптических квантовых процессоров.

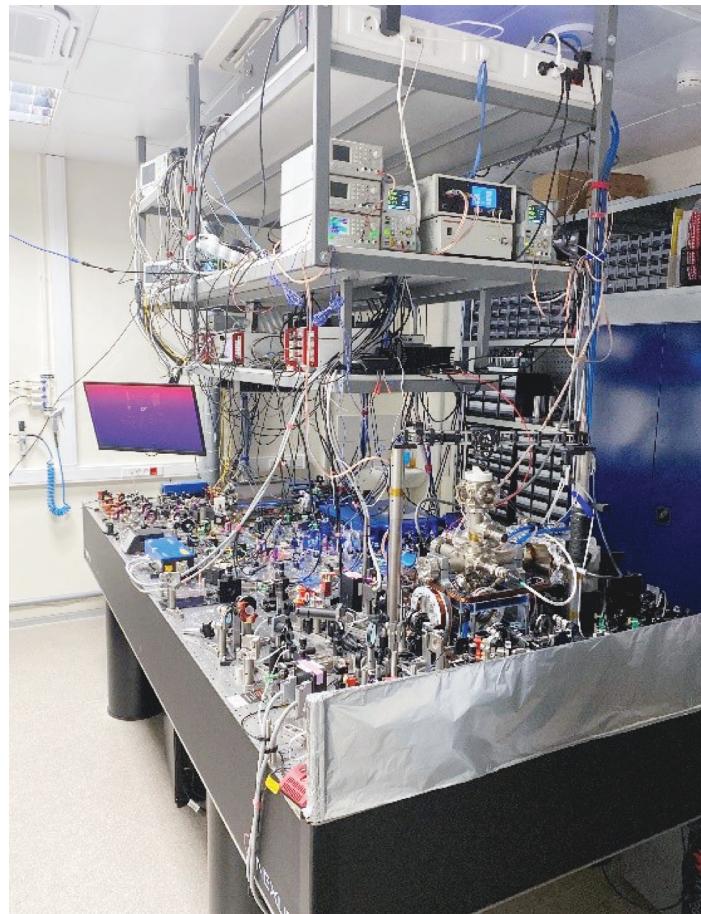
Еще один проект, который ведется ЦКТ — это создание так называемого квантового симулятора — многокубитной квантовой вычислительной системы с возможностью удаленного сетевого доступа для решения тестовых задач, базирующихся на квантовых алгоритмах. Это вычислительное устройство включает в себя два процессора на основе двух различных физических систем — холодные атомы в оптической ловушке и одиночные фотоны в линейно-оптических сетях. Каждый из процессоров может быть использован по отдельности, либо, если возможно разбиение задачи, они могут работать параллельно. Доступ к симулятору организован через сайт ЦКТ (rsc.qotlabs.org). Данный проект будет интересен и научным работникам, и студентам, и представителям коммерческих компаний, которые проходят курсы повышения квалификации, получая или углубляя знания в области квантовых технологий.

Квантовые коммуникации

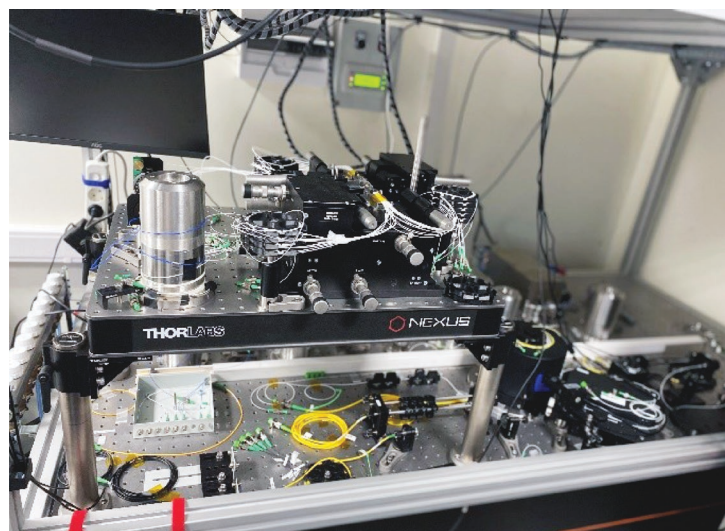
Это область науки и технологии, которая связана с передачей информации посредством квантовых состояний¹. В основе разработок по квантовой защищенной связи лежат три утверждения, фактически являющиеся следствием соотношения неопределенностей Гейзенберга и теоремы о запрете клонирования квантовых состояний: наблюдаемые, описываемые некоммутирующими операторами, нельзя измерить одновременно, неизвестное квантовое состояние нельзя копировать и измерение неизвестного состояния приводит к его возмущению.

В подавляющем большинстве случаев носителями информации в квантовой коммуникации являются фотоны по довольно очевидным причинам: фотоны — быстрые (“flying qubits”); фотоны — дешевые; фотоны плохо взаимодействуют с окружением из-за малых значений соответствующих восприимчивостей; аппаратная и технологическая часть хорошо развита — она базируется на классических технологиях телекоммуникаций и интегральной оптики.

¹Заметим, что квантовые коммуникации, отнюдь не сводятся к квантовой криптографии, как часто можно услышать. Известно множество протоколов, таких как квантовая телепортация, сверхплотное кодирование, протоколы квантовой теории игр и проч., не имеющих отношение к проблеме распределения криптографических ключей.



(a)



(b)

Рис. 1. Установки по квантовым вычислениям на нейтральных атомах (a) и фотонных чипах (b).

Сегодня от «настольных» демонстрационных квантово-оптических экспериментов мир шагнул к высокотехнологическим разработкам.

Основные тенденции этих разработок, в основном, сводятся к построению систем защищенной связи на основе либо волоконно-оптических, либо атмосферных (включая космические) каналов связи.

В волоконно-оптических линиях связи это: шифрование квантовыми ключами данных, передаваемыми по магистральным линиям связи; создание локальных защищенных сетей с электронным документооборотом; создание крупномасштабных сетевых структур через доверенные узлы.

В атмосферных/космических каналах, это: распределение квантовых ключей между мобильными и стационарными объектами; распределение ключей между низкоорбитальными спутниками и наземными объектами; распределение ключей между низко- и высокоорбитальными спутниками; создание глобальных квантовых сетей, охватывающих значительные территории.

На физическом факультете МГУ ведутся исследования по обоим направлениям. Реализовано два крупных научных проекта, в результате которых созданы реальные продукты, готовые к коммерциализации. Это QUANDOR — комплекс квантово-криптографической аппаратуры защиты информации, состоящий из 10G шифратора канального уровня (L2) и оборудования квантового распределения ключей (КРК), и «квантовый телефон» QUANTEL — устройство, в котором текстовые файлы, речь и изображения шифруются «квантовыми ключами».

Квантовый телефон является частью системы коммуникационного оборудования ViPNet Quantum Security System, которая позволяет организовать квантово-защищенную сеть. Первая в России локальная компьютерная сеть на базе квантового распределения секретных ключей развернута на обоих кампусах МГУ (Ленинские горы и Моховая улица). Сеть, протяженностью более 40 км, объединяет более 20 абонентских пунктов и связывает кабинеты Ректора, декана физического факульте-



Рис. 2. Аппаратура квантового шифрования.

UQCN Университетская Квантовая Сеть

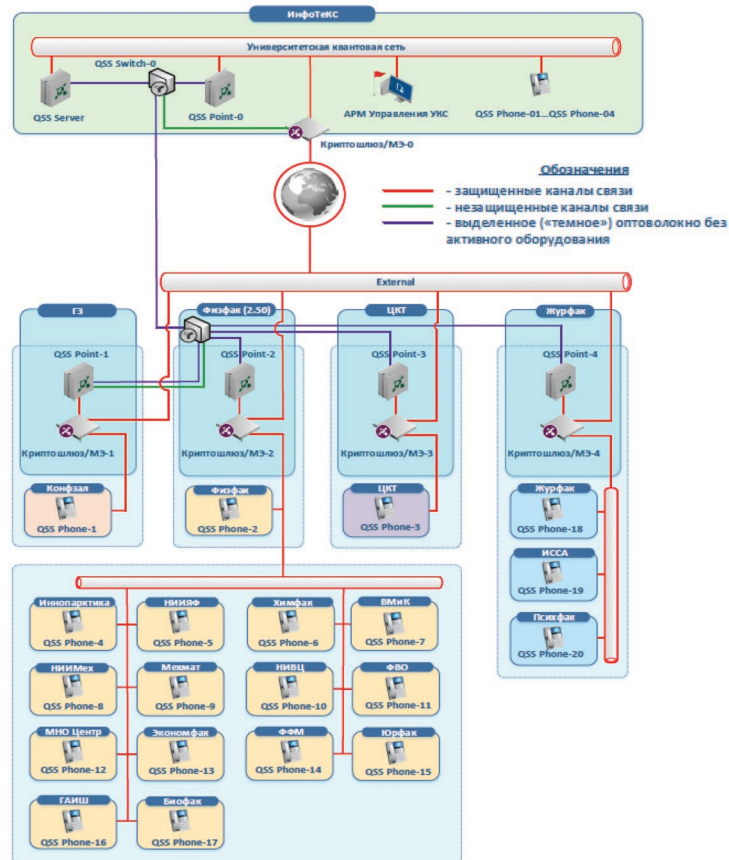


Рис. 3. Архитектура университетской квантовой сети.

та, нескольких проректоров, ЦКТ и другие подразделения университета. На базе университетской квантовой сети (зарегистрированный товарный знак) реализован защищенный документооборот и связь (телефония, видеосвязь, обмен файлами) между легитимными абонентами.

Оба решения созданы ЦКТ в сотрудничестве с индустриальным партнером, компанией «ИнфоТекс» и компанией-оператором волоконно-оптических линий связи ЮЛ-ком Медиа. Эти разработки стали прекрасным образцом плодотворной совместной работы ученых и коммерческих компаний. В результате полученные устройства не просто отвечают запросам рынка на гарантированно безопасную передачу информации, но и полностью отвечают тем функциональным, эстетическим и эргономическим требованиям, которые предъявляются к современному телеком-оборудованию.

Следующим шагом развития университетской квантовой сети будет создание Национальной квантовой (исследовательская) сети — объединения российских университетов и научных центров, ведущих работы в области квантовых технологий на основе магистральных квантовых сетей, и создание инфраструктуры городских квантовых сетей.



Рис. 4. Беседа В. А. Садовниченко и Н. Н. Сысоева по квантовому телефону (длина линии 100 км).

Что касается квантовых систем связи на основе атмосферных каналов, в ЦКТ ведется ряд проектов, в рамках которых исследовано влияние турбулентности на эффективность передачи/приема квантовых состояний света с поляризационными и фазовыми степенями свободы. Здесь ключевым моментом является использование (классических) систем активного трекинга, адаптированных под низкоэнергетические квантовые состояния — для захвата и удержания канала связи. Разработаны системы квантового распределения криптографических ключей между мобильными и стационарными объектами, включая размещение на низкоорбитальном спутнике.

Также стоит отметить разработанный учеными ЦКТ квантовый генератор случайных чисел, основанный на пуассоновской статистике фотоотчетов. Первичным источником случайности являются последовательности фотоотчетов от квазиоднофотонного излучения, которое регистрируется матрицей кремниевых лавинных детекторов — SiPM (Silicon Photo Multiplier). Использование SiPM позволяет надежно контролировать квантовый характер пуассоновской статистики фототчетов. Специальный алгоритм неэкспоненциальной сложности позволяет извлекать из пуассоновского процесса

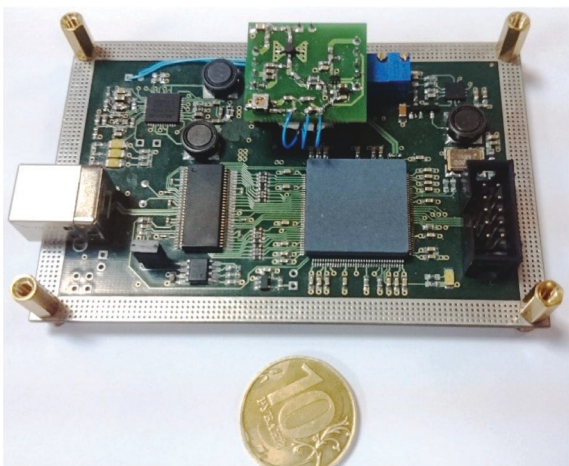


Рис. 5. Модуль генератора случайных чисел.

всю случайность, содержащуюся в нем, а именно, случайную равномерную последовательность 0 и 1. Генератор обеспечивает скорость выработки случайных битов до 270 Мбит/с.

Квантовые сенсоры

Квантовые сенсоры — это высокоточные инструменты, основанные на квантовых системах. Предполагается, что квантовые сенсоры будут иметь характеристики, намного превышающие имеющиеся у классических аналогов. К таким характеристикам относят чувствительность (минимальное значение регистрируемого сигнала), пространственное и временное разрешение, рабочий диапазон измеряемых значений, время отклика или анализа, относительная воспроизводимость (например, частоты в стандартах времени), энергопотребление, габариты, сложность обслуживания, срок службы, стоимость производства и эксплуатации и др. Как и в случае квантовых вычислений, имеются определенные критерии применимости той или иной квантовой системы в качестве сенсора (аналог критериев Ди Винченцо):

1. Квантовая система имеет дискретные уровни энергии. В частности, двухуровневая система (или ансамбль двухуровневых систем) с нижним и верхним уровнями $|0\rangle$ и $|1\rangle$, разделенных энергией перехода $E = \hbar\omega$.
2. Должна иметься возможность приготовления (инициализации) квантовой системы в известных состояниях и выполнения операции считывания (измерения) этих состояний.
3. Квантовой системой можно когерентно манипулировать — обычно с помощью полей, зависящих от времени. Это условие не является строго обязательным для всех протоколов; примеры, выходящие за рамки этого критерия — измерение времен релаксации.
4. Квантовая система взаимодействует с соответствующей физическим объектом $V(t)$, например электрическим или магнитным полем. Взаимодействие количественно оценивается параметром вида

$$\gamma = \partial^q E / \partial V^q,$$

который связывает изменения энергии перехода E_k с изменением внешнего параметра $V(t)$. В большинстве ситуаций связь либо линейная ($q = 1$), либо квадратичная ($q = 2$). Взаимодействие с $V(t)$ приводит к сдвигу энергетических уровней квантовой системы.

В основе действия квантовых сенсоров лежат три свойства квантовых состояний:

- принцип суперпозиции (квантовая когерентность) — волновые функции квантовых объектов представляют собой линейную комбинацию базисных состояний

$$|\psi\rangle = c_1 |0\rangle + c_2 |1\rangle;$$

• перепутывание (entanglement) — квантовое состояние составной системы может быть определено лучше, чем состояния подсистем

$$|\psi_{1,2}\rangle = 1/\sqrt{2} \{|0_1\rangle|1_2\rangle - |1_1\rangle|0_2\rangle\};$$

• и тот факт, что измерение приводит к вероятностным исходам классических состояний

$$p_m = \langle \psi | M_m^\dagger M_m | \psi \rangle, \quad E_m = M_m^\dagger M_m, \quad \sum_m E_m = I.$$

Фактически, квантовый объект (кубит) служит чувствительным зондом для измерения физических (взаимодействующих) систем.

Сегодня устройства на основе квантовых сенсоров принято выделять в три основные группы: сенсоры электрических и магнитных полей; часы, гравиметры и гироскопы, а также группа под условным названием квантовая метрология.

Одним из наиболее интересных проектов в области квантовых сенсоров, реализуемых в ЦКТ, является создание детектора одиночных фотонов на основе планарных лавинных фотодиодов (ОЛФД) на гетероструктурах InGaAs/InP для систем однофотонной квантовой связи. Разработка ведется совместно со специалистами Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова (ИФП СО РАН) на основе разработанной ими базовой технологии.

Данные устройства предназначены для работы в линейном и однофотонном режиме для применения в оптоволоконных системах однофотонной квантовой связи. Также их можно использовать для прецизионных измерений.

Другое устройство, которое относится к квантовым сенсорам и было разработано в ЦКТ — квантовый генератор случайных чисел. Он уже используется в устройствах квантовой связи и был рассмотрено выше.

В ЦКТ активно развивается направление разработки и создания одноэлектронных одноатомных устройств. В частности, ученые из группы О.В. Снигирева работают над созданием *твердотельного одноатомного одноэлектронного транзистора*, изготовленного на поверхности монокристалла полупроводника или диэлектрика с имплантированным в приповерхностный слой одиночным примесным атомом. Электронный транспорт осуществляется в системе исток — примесный атом — сток. Управление током через транзистор осуществляется электростатическим затвором. Свойства примесного атома и полупроводниковой или диэлектрической подложки целиком определяют транспортные свойства такого транзистора.

Одноатомные одноэлектронные транзисторы дадут возможность управлять транспортом одиночных электронов, вплоть до электрического считывания заселен-

ности одночастичных состояний. В них реализуется возможность функционального использования особенности дискретного энергетического спектра электронов.

Создание таких элементов и устройств открывает дорогу к созданию электронных устройств с атомной функциональной структурой и субнанометровыми характерными размерами рабочих элементов. Использоваться подобные устройства могут в элементах твердотельного квантового компьютера, в квантовых сенсорах, зарядовых клеточных автоматах, зарядовых резервуарных нейронных сетях.

Еще один интересный проект, над которым работают сотрудники группы нанофотоники под руководством А.А. Федянина, — создание *однофотонного источника света*.

Однофотонные излучатели являются одним из ключевых элементов во многих задачах в области квантовой информатики, в том числе в квантовых вычислениях и квантовой криптографии. Разрабатываемые в ЦКТ устройства представляют собой наноалмазы с центрами окраски, нанесенные на поверхность фотонного кристалла, который поддерживает распространение поверхностных электромагнитных волн, называемых блоховскими поверхностными волнами (БПВ). Наноалмазы покрываются слоем полимера, а затем в области наноалмазов с единичным центром окраски происходит создание волноводных структур с помощью метода двухфотонной лазерной литографии. Таким образом, реализуется метод интеграции однофотонных источников в волновод с помощью комбинирования двух технологий в рамках одной экспериментальной установки: технологии сканирования сигнала люминесценции и поиска наноалмазов, излучающих в однофотонном режиме, с последующей технологией лазерной литографии для создания волноводов над найденными наноалмазами. Отметим, что применение технологии двухфотонной лазерной литографии позволяет создавать сложные компактные волноводные структуры за один сеанс изготовления без увеличения стоимости конечного устройства.

Безусловными плюсами разрабатываемых устройств является то, что они не требуют сложных алгоритмов настройки и имеют высокую скорость работы. Кроме того, для БПВ отсутствует фиксированный закон дисперсии, а у устройств на их основе — омические потери. Использование БПВ позволяет управлять законом дисперсии за счет подбора материалов и толщин слоев фотонного кристалла, а также существование как ТМ-, так и ТЕ-поляризованных волн.

В ЦКТ традиционно продолжают исследования по *квантовой оптике*. В последнее время усилия сосредоточены, в основном, на исследовании возможностей квантовой когерентной оптической томографии высокого разрешения и методов генерации тепловых полей с вычитанием/добавления определенного числа фотонов. Перспективным представляется проект по разработке

методов характеризации линейно-оптических интегральных схем на основе интерферометрии тепловых полей. Преимуществом этого метода по сравнению со стандартным является то, что с одной стороны он не требует большого времени накопления данных, в отличие от метода, основанного на корреляционных измерениях бифотонов, а с другой стороны, его точность не ограничена фазовыми флуктуациями на входе в систему в отличие от метода, основанного на измерениях когерентных состояний.

Данный метод зависит лишь от уровня темновых шумов детектора. С увеличением шумов потери точности увеличиваются, но их можно скомпенсировать большим временем накопления, что с одной стороны не сильно увеличит время моделирования или эксперимента, а с другой стороны позволит уменьшить погрешности определения параметров передаточной матрицы и получить необходимую точность восстановления. Иными словами, разработанный метод позволяет получить большую точность при менее дорогом экспериментальном оборудовании.

Подводя итог, отметим, что в МГУ сконцентрированы значительные ресурсы и кадровый потенциал для решения разнообразных задач в области квантовых технологий. Выполняемые разработки еще совсем недавно были на переднем крае фундаментальных исследований, а сегодня составляют прочную основу нового технологического направления и подготовки квалифицированных кадров.

Сегодня исследования и разработки в ЦКТ ведутся также в рамках Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского университета «Фотонные и квантовые технологии. Цифровая медицина».

*Научный руководитель Центра квантовых технологий
профессор С.П. Кулик*



Цунами в Тихом океане, вызванное взрывным извержением вулкана Хунга Тонга-Хунга Хаапай 15 января 2022 г.

Сотрудники кафедры физики моря и вод суши по данным наземных барографов IRIS и глубоководных станций уровня моря DART исследовали волновые возмущения в атмосфере и океане, вызванные взрывным извержением вулкана Хунга Тонга-Хунга Хаапай 15.01.2022 в тихоокеанском регионе. Установлено, что атмосферная волна Лэмба, сформированная взрывом вулкана, проявлялась в вариациях придонного давления с усилением при идентичности волновых форм, зарегистрированных наземными барографами и донными датчиками давления. Показано, что атмосферная волна Лэмба способна эффективно возбуждать волны цунами в области резкого изменения глубин океана. Например, на склонах глубоководного желоба Тонга атмосферная волна с амплитудой 1 кПа, способна сформировать волны с амплитудой порядка 1 м.

Когда говорят о вулканогенных цунами, то обычно упоминают два наиболее мощных исторических события: Санторин (около 3,5 тыс лет назад) и Кракатау (1883 г.). В первом случае высоты заплеска волн цунами достигали 90 м, во втором — 41 м. В начале 2022 г. жителям нашей планеты повезло стать свидетелями уникального события, сопоставимого по силе с двумя указанными историческими извержениями.

После 7-летней паузы 20.12.2021 пробудился вулкан Хунга Тонга-Хунга Хаапай (Hunga Tonga-Hunga Ha'apai), извержение которого перешло в активную взрывную фазу 15.01.2022. Взрывная фаза извержения сопровождалась формированием волн цунами, которые наблюдались по всему Тихому океану с высотами до 15 м в ближней зоне и свыше 3 м в дальней зоне — на расстоянии около 10 тыс. км от источника. В результате мощного взрыва в атмосфере возникла волна Лэмба, обогнувшая Землю несколько раз. Атмосферное возмущение было зарегистрировано многочисленными наземными барографами и отчетливо наблюдалось с различных спутников, в том числе с геостационарного спутника GOES-17. Вулканическая активность также регистрировалась сейсмическими сетями и иной геофизической аппаратурой. Впервые в истории науки столь мощное взрывное извержение было аппаратно зарегистрировано с таким высоким качеством и детальностью.

При катастрофическом извержении вулкана Санторин, конечно, не существовало никакой регистрирующей аппаратуры. Это событие осталось в памяти человечества как одна из крупнейших природных катастроф, которая погубила Крито-Микенскую культуру и, возможно, породило легенду об Атлантиде.

Взрывное извержение вулкана Кракатау произошло уже в инструментальную эпоху. Сохранились записи барографов, зарегистрировавших атмосферные волны Лэмба, которые неоднократно обогнули Землю, а также

записи мареографов, которые регистрировали колебания уровня моря (волны цунами) не только в Индийском, но и в Тихом, и в Атлантическом океанах. Анализ записей мареографов позволил выявить удивительный факт: вступление волн цунами часто происходило существенно раньше расчетного времени. Дело в том, что гравитационные поверхностные волны на воде обладают предельной скоростью распространения \sqrt{gH} , которая зависит только от глубины океана H и ускорения силы тяжести g . Предельная скорость соответствует длинным волнам. Это своего рода «скорость света», которая не может быть превышена гравитационными волнами на воде. Распределение глубин Мирового океана известно в настоящее время с хорошей точностью. Поэтому задача о времени добегающего волнового фронта от источника до заданной точки побережья решается достаточно легко в рамках лучевой теории.

Парадокс о раннем вступлении волн цунами, которые были вызваны взрывом вулкана Кракатау, обсуждался в нескольких научных работах 20-го и начала 21-го веков. В целом было понятно, что эффект связан с возможностью формирования волн цунами вдали от вулкана под действием атмосферной взрывной волны. Но за недостатком натуральных данных эта тема развития не получила.

Событие 15.01.2022 позволило пролить свет на парадокс раннего вступления вулканогенных цунами. В своем исследовании мы опирались на данные 26 наземных барографов тихоокеанского региона сети IRIS, расположение которых показано на рис. 1 зелеными квадратами. На каждой из записей отчетливо видна атмосферная волна Лэмба, вызванная взрывом вулкана. Волна биполярная: сначала следует положительная фаза, затем — отрицательная (пример записи барографа представлен на рис. 3). Максимумы положительной фазы однозначно выделяются на записях — соответствующие моменты времени мы ассоциировали с временами вступле-

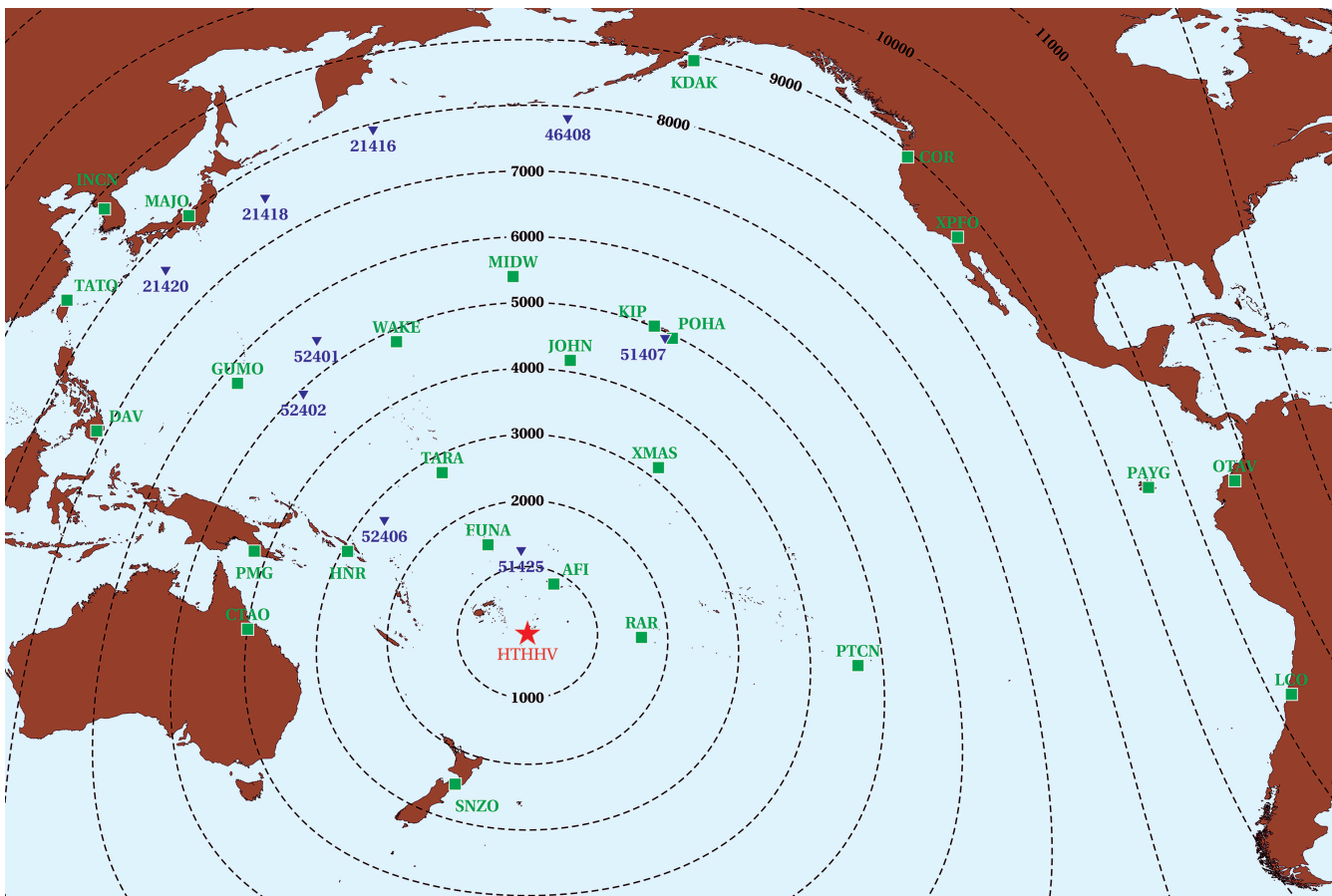


Рис. 1. Взаимное расположение вулкана Хунга Тонга – Хунга Хаапай (HTHHV – красная звездочка), барографов (зеленые квадраты) и глубоководных станций уровня моря DART (синие треугольнички). Черные пунктирные линии показывают удаление от вулкана (цифры у линий – расстояние в километрах).

ния волны Лэмба. Ближайший к вулкану барограф AFI (829 км) зарегистрировал размах вариаций давления 0.980 кПа, наиболее удаленный барограф OTAV (10749 км) — 0.225 кПа. Период волны Лэмба составил примерно 1 ч.

Зависимость времени вступления волны Лэмба от расстояния между вулканом и барографами оказалась близка к линейной. Методом наименьших квадратов была построена регрессионная зависимость, которая позволила оценить скорость распространения волны Лэмба $U = 312 \pm 4$ м/с и время в источнике $04: 27 \text{ UTC} \pm 4$ мин. Интервальные оценки соответствуют 95% вероятности.

Из 33 глубоководных станций уровня моря DART, функционировавших 15.01.2022, только 9 станций, расположение которых показано на рис. 1 синими треугольничками, зарегистрировали событие, включая его начальную фазу, с дискретностью не более 1 мин. Для остальных станций дискретность составляла 15 мин или имелись значительные пропуски в данных, что делало невозможным интерпретацию сигналов. На рис. 2 представлены записи вариаций придонного давления, зарегистрированные 9 станциями DART. Из оригинальных сигналов предварительно была удалена

низкочастотная приливная компонента (частота отсечки фильтра 10^{-4} Гц). На рисунке отмечены: полученное по нашим оценкам время в источнике (HTHHV), моменты вступления волны Лэмба (L) с учётом 95%-ного доверительного интервала и расчётное время вступления длинных гравитационных волн (G). Моменты вступления волны Лэмба рассчитаны по регрессионной зависимости, исходя из расстояния между вулканом и станциями DART. Время вступления гравитационных волн определено с использованием длинноволнового блока оригинальной численной модели цунами CPTM, разработанной в нашей группе.

Из рис. 2 видно, что датчики придонного давления регистрируют сигнал с амплитудой около 0.1 м задолго (от 1 до 4 ч) до расчётного времени вступления длинных гравитационных волн. Это свидетельствует о том, что наблюдаемые возмущения не могли быть сформированы вблизи вулкана за счёт “традиционных” для вулканогенных цунами механизмов (выброс в воду большого объёма вещества, коллапс кальдеры, оползни и т.д.). Возмущения, опережающие гравитационные волны, своим возникновением обязаны волне Лэмба, распространяющейся в атмосфере в среднем быстрее, чем длинные волны в океане.

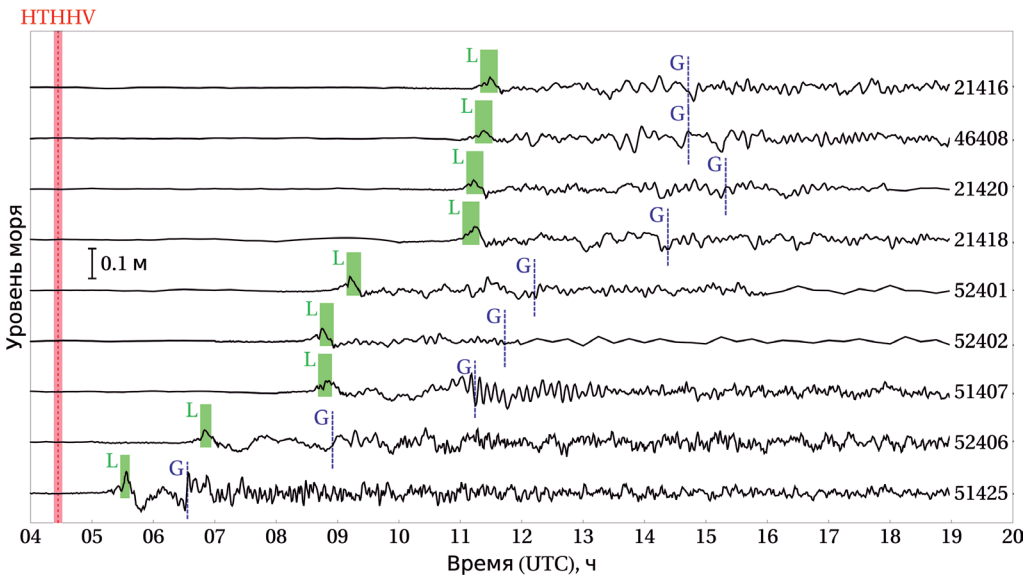


Рис. 2. Колебания уровня моря, зарегистрированные станциями DART. Из оригинальных сигналов предварительно была удалена приливная компонента. НТННУ — время в источнике (4:27 UTC ±4 мин), L — моменты вступления волны Лэмба с учетом 95% доверительных интервалов, G — расчетное время вступления длинных гравитационных волн.

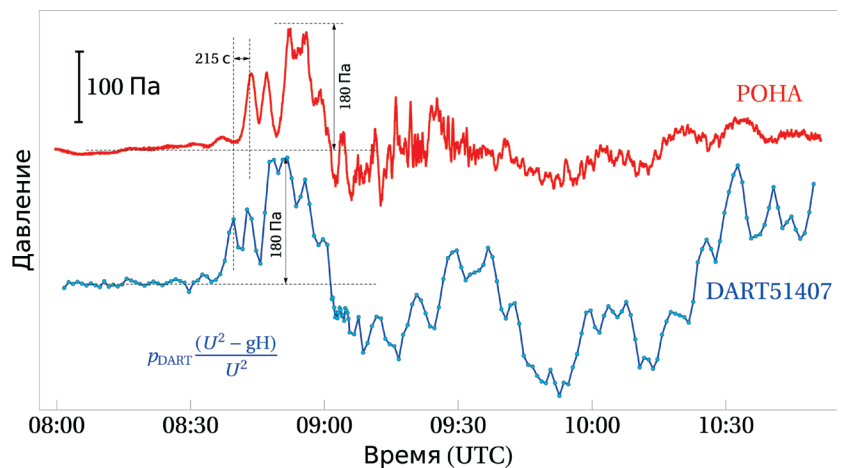
Теоретически показано, что в океане постоянной глубины бегущее возмущение атмосферного давления вызывает только вынужденное возмущение водной поверхности аналогичной формы, а свободные гравитационные волны (цунами) при этом не возникают. Для возникновения свободных волн необходимо резкое изменение глубин вдоль трассы распространения волны Лэмба. Для случая скачкообразного изменения глубин получены аналитические выражения, позволяющие рассчитать амплитуду свободных гравитационных волн, формируемых в океане атмосферным возмущением. Установлено, что при прохождении волной Лэмба с амплитудой 1 кПа области глубоководной впадины (например, желоб Тонга) формируются свободные гравитационные волны с амплитудой порядка 1 м.

Из рис. 2 хорошо видно, что первый отчетливо различимый всплеск сигнала на записях DART, имеющий амплитуду близкую к амплитуде последующих гравитационных волн, в точности соответствует времени прохождения волны Лэмба, следовательно, этот всплеск есть не что иное, как непосредственное проявление колебаний атмосферного давления в вариациях придонного давления. После проявлений волны Лэмба на запи-

сках начинаются продолжительные колебания, которые представляют собой волны цунами, вызванные прохождением атмосферного возмущения. Позже к ним присоединяются волны, сформированные вблизи вулкана, которые, как правило, не имеют четко выраженных моментов вступления. Единственным исключением здесь является сигнал, зарегистрированный ближайшей к источнику станцией DART51425.

Как видно из рис. 1, станции DART и барографы сети IRIS практически во всех случаях располагались на расстояниях от нескольких сотен до тысяч километров друг от друга. Исключением из этого правила является пара измерителей, установленные в районе Гавайских островов: барограф РОНА и глубоководная станция уровня моря DART51407. Близкое расположение наземного барографа и глубоководного измерителя давления дает уникальную возможность прямого сопоставления зарегистрированных волновых форм. На рис. 3 красной кривой представлены вариации атмосферного давления, зарегистрированные барографом РОНА. Синей кривой и голубыми точками на рисунке показаны вариации придонного давления. Теоретически показано, что в силу близости к резонансу Праудмена вариации атмосферно-

Рис. 3. Сопоставление вариаций атмосферного давления (РОНА) и придонного давления (DART51407) при прохождении волны Лэмба. Вариации придонного давления помножены на величину $(U^2 - gH)/U^2$. Стрелками отмечены временные задержки вступления сигналов и амплитуда положительной фазы волны.



го давления должны проявляться в придонной области глубокого океана с определенным усилением. Поэтому для сравнения с колебаниями атмосферного давления вариации придонного давления представлены на рисунке помноженными на величину $(U^2 - gH)/U^2$, где U — скорость распространения волны Лэмба, g — ускорение силы тяжести, H — глубина океана. При $U = 312$ м/с, $g = 9.8$ м/с² и $H = 4793$ м — соответствует глубине океана в точке расположения станции DART51407 — величина $(U^2 - gH)/U^2 = 0.518$.

Из рис. 3 можно заключить, что волновые формы, регистрируемые станцией DART51407 и барографом

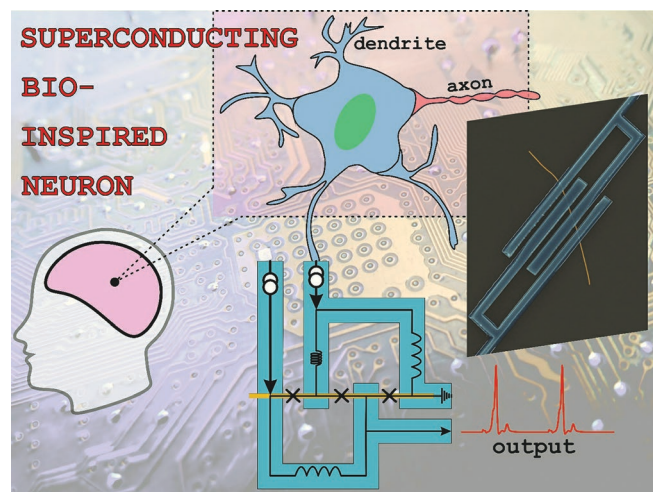
РОНА, фактически идентичны примерно в течение получаса (с 8:30 до 9:00 UTC). С учетом коэффициента пересчета весьма близки и амплитуды зарегистрированных сигналов (180 Па). Небольшой временной сдвиг между волновыми формами объясняется тем, что станция DART51407 расположена ближе к вулкану на 66.9 км. Волна Лэмба преодолевает это расстояние за время 215 с.

Носов М.А., Семенцов К.А., Колесов С.В., Прядун В.В. Вулканогенное цунами 15.01.2022 по данным глубоководных станций DART // ДОКЛАДЫ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК. НАУКИ О ЗЕМЛЕ, 2022, том 507, № 11, с. 61–66.

Аналог биологического нейрона на основе джозефсоновских контактов

Струдники НОШ МГУ «Фотонные и квантовые технологии. Цифровая медицина» с коллегами создали аналог биологического нейрона на основе джозефсоновских контактов. Учеными экспериментально исследованы двух- и трехпереходные сверхпроводящие квантовые интерферометры со слабыми джозефсоновскими связями на основе золотых нанопроволок. Исследуемые клетки использовались для реализации биоинспирированных нейронов – высокопроизводительных, энергоэффективных и компактных элементов нейроморфного процессора.

Для понимания принципов работы нашего мозга весьма важно уметь создавать искусственные аналоги больших нейрофизиологических систем, способных решать модельные задачи, находясь при этом «под постоянным наблюдением». Однако большие международные проекты, занимающиеся сейчас созданием аналогов человеческого мозга, пока не добились полного успеха, что связано среди прочего со слишком большим энергопотреблением и недостаточным быстродействием используемой традиционной полупроводниковой компонентной базы. Макроскопические квантовые технологии, использующие возможности сверхпроводимости и эффекта Джозефсона, могли бы решить эту проблему, если бы удалось сделать существующие быстродействующие и энергоэффективные аналоги диодов и транзисторов достаточно компактными.



Ученые сумели продвинуться в решении этой проблемы за счет использования золотых нанопроводов для реализации джозефсоновских контактов в сверхпроводниковых аналогах нейронов. Эксперименты и проведенное на их основе имитационное моделирование показали: сверхпроводящий контур с двумя джозефсоновскими контактами позволяет получить такие же импульсы напряжения в ответ на воздействие, что и в «биологическом» нейроне. Вот только характерные длительности таких импульсов измеряются пикосекундами, а энергии на один импульс выделяется меньше аттоДжоуля (10-18 Дж).

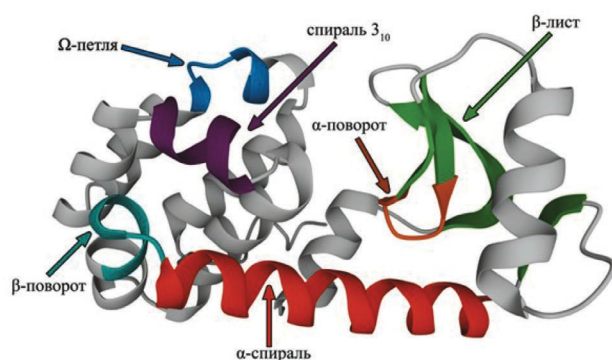
Доцент физического факультета МГУ, сотрудник НОШ «Фотоника» Николай Кленов отметил: «Мы продолжили исследование изготовленных образцов и обнаружили, что замена одного из джозефсоновских

контактов на двухконтактный интерферометр, то есть переход к "трехконтактному нейрону", позволяет получить особые режимы работы, аналогичные поведению биологической системы в случае заболеваний или под действием медикаментов. Это существенно расширяет наши возможности по исследованию нейрофизиологических процессов».

Skryabina O.V., Schegolev A.E., Klenov N.V., Bakurskiy S.V., Shishkin A.G., Sotnichuk S.V., Napolskii K.S., Nazhestkin I.A., Soloviev I.I., Kupriyanov M.Yu, Stolyarov V.S. "Superconducting Bio-Inspired Au-Nanowire-Based Neurons." *Nanomaterials*. Том 12, № 10, с. 1671 (2022).

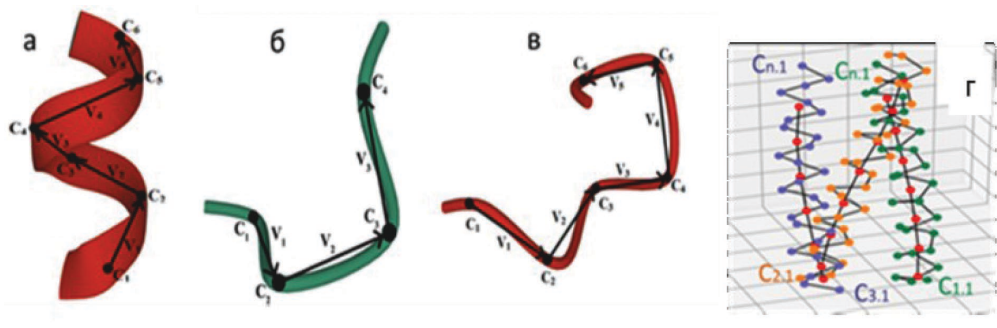
МЕТОД ОЦЕНКИ ХИРАЛЬНОСТИ БЕЛКОВЫХ СТРУКТУР И ПЕПТИДНЫХ НАНОТРУБОК КАК ЭФФЕКТИВНЫЙ ИНСТРУМЕНТ НАНОБИОИНЖЕНЕРИИ

Ученые кафедры биофизики физического факультета разработали универсальный метод оценки хиральности регулярных и нерегулярных структур белка. На основе этого метода, совместно с ИМПБ РАН — филиал ИПМ им. М.В. Келдыша, — создаются спиральные фенилаланиновые и дифенилаланиновые нанотрубки двух типов хиральности. Полученные результаты позволяют расширить возможности для создания белков и искусственных конструкций для адресной доставки лекарственных препаратов, разработки интеллектуальной микроэлектроники следующего поколения, различных микромеханических устройств и др.



Элементы вторичной структуры белка 2LZM.

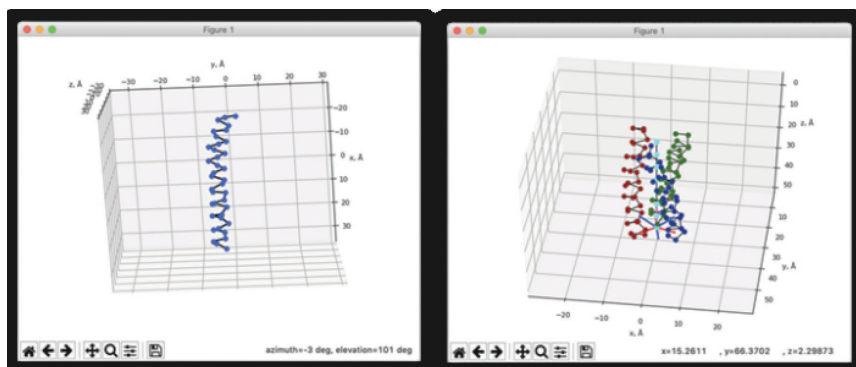
Опорные точки: а) α -спираль (белок 1L63 [22]); б) β -поворот (белок 1A4G [23]); в) Ω -петля (белок 1ACT [23]); г) суперспираль coiled coil белка 1BB.



При укладке полипептидной цепи в трехмерную конструкцию происходит формирование различных белковых структур — спиралей, суперспиралей, листов, поворотов и петель. Для подтверждения выявленной на кафедре биофизики закономерности смены знака хиральности в иерархии белков является разработанный на кафедре биофизики метод оценки хиральности регу-

лярных и нерегулярных структур белков. Множество подобных методов, созданных ранее, не позволяют однозначно оценивать знак хиральности различных структур белков, часто узкоспециализированы и требуют больших вычислительных затрат.

Векторный метод оценки хиральности регулярных (спиральных и суперспиральных) и нерегулярных (по-

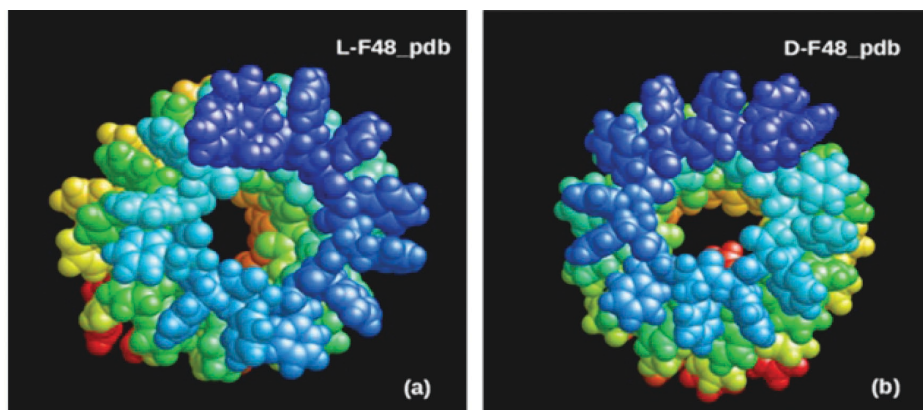


Програмная визуализация структуры спирали и суперспирали.

воротов и петель) белковых структур основан на небольшом количестве исходных данных - взаимном расположении α -углеродов в белковых структурах из банка данных PDB, что позволяет на порядок снизить количество обрабатываемой информации и является значительным преимуществом при обработке больших массивов данных (среднее время расчета — 30 миллисекунд). Анализ множества (сотни, тысячи) различных белковых структур показал абсолютную адекватность метода. Разработаны компьютерные программы для оценки хиральности спиральных (ECPHS) и суперспиральных (ECSSP) структур. Программы позволяют определять знак и величину хиральности и выводить трехмерное изображение, позволяющее визуализировать пространственную структуру. Получены свидетельства о государственной регистрации для ЭВМ. Учитывая частоту встречаемости спиралей, суперспиралей, α - и β -поворотов, а также Ω -петель, данное исследование позволяет лучше понять особенности структурообразования белков, как природных, так и искусственных.

Ввиду биосовместимости, прямой химической модифицируемости, свойств молекулярного распознавания и доступности для производства, биомолекулярные наноструктуры являются привлекательными объектами в различных областях биомедицины, биотехнологии и биоинженерии. Например, пептидные нанотрубки используются при изучении способности очень коротких ароматических пептидов образовывать упорядоченные амилоидные фибриллы, которые обладают сходными биофизическими свойствами и являются отличительным признаком разнообразной группы заболеваний (болезнь Альцгеймера, диабет II типа, прионные болезни). При этом искусственные пептиды, подобно природным, могут быть ориентированы на самосборку для выполнения определенной функции. Применительно к биоинженерии, на основе данного метода создан аналогичный метод определения хиральности фенилаланиновых и дифенилаланиновых спиральных структур разной хиральности, основанный на четкой пространственной последовательности в этих спиральных векторах дипольных моментов молекул пептидов. Расчеты дипольных

моментов отдельных витков спиралей нанотрубок F PNT показали, что, аналогично смене знака хиральности при переходе на более высокий уровень иерархической организации в белках — от спиралей к суперспиралям, нанотрубки демонстрируют характерное изменение знака хиральности — от мономеров к спиральным нанотрубкам. Поскольку хиральность спиральных структур нанотрубок определяет их биологическую активность, этот аспект необходимо учитывать при взаимодействии природных биополимеров с искусственно созданными биохимическими структурами, что особенно важно в области фармакологии.



Фенилаланиновые спиральные нанотрубки (PNT): а) правая хиральная нанотрубка D-PNT исходной хиральности L-F; б) левая хиральная нанотрубка L-PNT исходной хиральности D-F.

Глубокое понимание структуры различных типов белков позволяет расширить возможности управления сборкой как природных белков, так и искусственных конструкций в области нанобиотехнологий.

1. Sidorova A.E., Malyshko E.V., Lutsenko A.O., Shpigun D.K., Bagrova O.E. "Protein Helical Structures: Defining Handedness and Localization Features." *Symmetry* (2021), 13: 879 DOI:10.3390/sym13050879

2. Sidorova A., Bystrov V., Lutsenko A., Shpigun D., Belova E., Likhachev I. "Quantitative Assessment of Chirality of Protein Secondary Structures and Phenylalanine Peptide Nanotubes". *Nanomaterials*, 11, № 12, 3299 (2021).

РЕЗОНАНСНОЕ РАССЕЯНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН МАЛЫМИ МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ЧАСТИЦАМИ: НОВЫЙ ВЗГЛЯД НА СТАРУЮ ПРОБЛЕМУ



Профессор Михаил Исаакович Трибельский.

Обзор под таким названием за авторством ведущего научного сотрудника кафедры физики полимеров и кристаллов физического факультета МГУ, заведующего лабораторией нелинейных, неравновесных и сложных систем, доктора физ.-мат. наук, профессора Михаила Исааковича Трибельского и профессора the University of New South Wales (Австралия) Андрея Е. Мирошниченко вышел в январском выпуске журнала Успехи физических наук [УФН 192, 45-68 (2022)]. Обзор является итогом многолетнего труда авторов в этом направлении.

Они в этой области хорошо известны как в нашей стране, так и в мировом обществе. В этой связи уместно отметить, что массовым журналом Американского оптического общества Optics and Photonics News работа авторов по предсказанию направленных резонансов Фано (впоследствии подтвержденная экспериментально) была включена в число лучших мировых достижений года в этой области [Opt. Phot. News N 12, 48 (2008)].

Проблема, вынесенная в заголовок обзора, имеет давнюю историю. Первое точное решение задачи о рассеянии плоской волны сферой было опубликовано Клебшем за год до того, как Максвелл сформулировал свои уравнения! Этой задачей занимались Рэлей, Герц, Лоренц, Ми, Дебай и многие, многие другие. Казалось бы, после них что нового можно здесь найти? Но, как справедливо отмечают авторы обзора, «дьявол в деталях». Да, точное математическое решение было получено более 150 лет назад. Но это решение сложным образом зависит от параметров задачи. В результате, в разной области значений этих параметров рассеяние происходит качественно различным образом. Выяснение этих качественных различий, представляет собой уже физическую задачу, которая, как показывают авторы, еще далека от своего завершения.

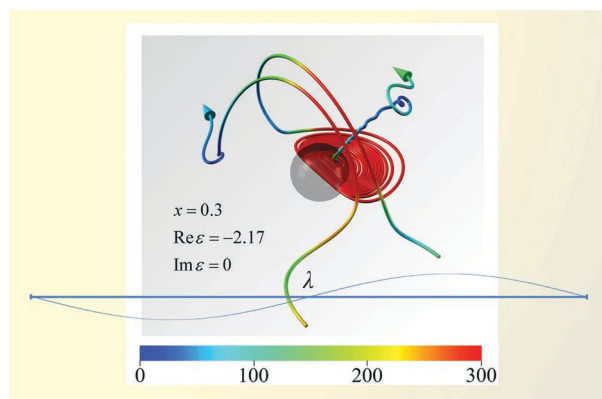


Рис. 1. Две линии тока при резонансном рассеянии плоской электромагнитной волны металлической сферой. Цветом

В частности, авторы подробно обсуждают новые эффекты, такие как аномальное рассеяние и поглощение света, а также направленные резонансы Фано и показывают, что, несмотря на малость рассеивающей частицы по сравнению с длиной волны падающего излучения, рассеяние света в этих случаях не имеет почти ничего общего с описанным в учебниках рэлеевским рассеянием света. В качестве примера, на рис. 1 приведено поведение двух характерных «линий тока» вектора Пойнтинга при аномальном рассеянии света субволновой сферой с характеристиками близкими к оптическим свойствам алюминия в УФ диапазоне спектра.

Важно отметить, что эти эффекты и им подобные открывают уникальные возможности для управления оптическим излучением на масштабах существенно меньших его длины волны — задача, которая еще недавно казалась принципиально неразрешимой из-за существования дифракционного предела, не позволяющего сфокусировать излучение в пятно с субволновыми размерами. Традиционными оптическими методами это действительно сделать нельзя, а при помощи резонансного рассеяния наночастицами — можно. Излишне говорить, какие перспективы открывают эти эффекты в различных нанотехнологиях.

показано значение интенсивности излучения, нормированное на интенсивность падающей волны. Весь рисунок имеет масштаб сильно меньший длины волны, которая для сравнения показана в виде горизонтального отрезка. (Из обзора М.И. Трибельский, А.Е. Мирошниченко УФН 192, 45 (2022)).

Нематические жидкие кристаллы с гигантской диэлектрической проницаемостью



К.ф.-м.н. С.А. Швецов



К.ф.-м.н. В.Ю. Рудяк

Сотрудники кафедры физики полимеров и кристаллов и лаборатории жидких кристаллов физического факультета МГУ (д.ф.-м.н. А.В. Емельяненко, к.ф.-м.н. В.Ю. Рудяк и к.ф.-м.н. С.А. Швецов) совместно с учеными из Японии (RIKEN Center for Emergent Matter Science и Tokyo Institute of Technology) впервые установили молекулярные причины существования уникальных сегнетоэлектрических нематических фаз и нашли точное решение, описывающее их структуру и свойства.



Д.ф.-м.н. А.В. Емельяненко

ных молекул жидкого кристалла, благодаря которым возникают сегнетоэлектрические нематические фазы. Было показано, что спонтанная поляризация возникает, благодаря полярности формы молекул (см. рис. 1).

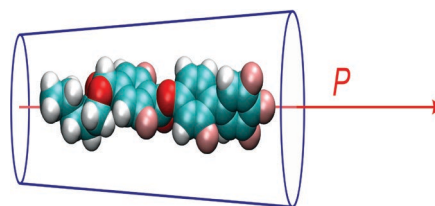


Рис. 1.

Жидкие кристаллы — «умные» материалы, используемые для создания дисплеев, модуляторов, датчиков, солнечных батарей и многих других устройств, с которыми мы имеем дело в нашей повседневной жизни. Они представляют собой промежуточные состояния между жидкостью и твёрдым телом. Вещества, в которых электрическая поляризация возникает спонтанным образом (в отсутствие электрического поля) называются сегнетоэлектриками. Благодаря сегнетоэлектричеству, материалы могут обладать гигантской диэлектрической проницаемостью, которая позволяет использовать совершенно новые принципы создания различных устройств. В частности, в технологии создания дисплеев это позволяет значительно улучшить контрастность изображения и цветовую гамму, а также значительно снизить энергопотребление. До недавнего времени считалось, что только смектические (слоистые) жидкие кристаллы обладают сегнетоэлектричеством. Однако слоистая структура смектиков в большинстве случаев (например, если речь идёт о больших дисплеях) делает их непригодными для использования, потому что приложенное напряжение нарушает однородность «слишком сложной» фазы.

Сегнетоэлектричество в нематических жидких кристаллах, структура которых проста и удобна для использования, было обнаружено японскими учёными (соавторами и партнёрами по международному проекту РФФИ 21-53-50008), а сотрудниками физического факультета МГУ под руководством д.ф.-м.н. А.В. Емельяненко впервые были точно описаны структуры сегнетоэлектрических нематических фаз, изучены особенности отдель-

В этом случае при более низких температурах образуется собственная сегнетоэлектрическая фаза, при более высоких температурах — параэлектрическая фаза (обычный нематик), а при промежуточных температурах может образовываться причудливая антисегнетоэлектрическая сплей-фаза (см. рис. 2). Факт существования собственного сегнетоэлектричества вообще для любых жидких кристаллов был установлен российской группой учёных впервые.

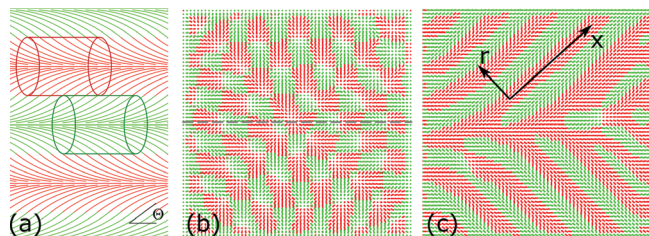


Рис. 2.

A.V. Emelyanenko, V.Yu. Rudyak, S.A. Shvetsov, F. Araoka, H. Nishikawa, and K. Ishikawa. “Emergence of paraelectric, improper antiferroelectric, and proper ferroelectric nematic phases in a liquid crystal composed of polar molecules.” *Phys. Rev. E*, 105, 064701 (2022).

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГЕНЕРАЦИИ ВЫСОКИХ ГАРМОНИК В ГАЗОВЫХ СРЕДАХ В УСЛОВИЯХ ПЛАЗМОННОГО РЕЗОНАНСА НА ПОВЕРХНОСТНЫХ НАНОСТРУКТУРАХ

Сотрудники кафедр общей физики и волновых процессов и оптики, спектроскопии и физики наносистем физического факультета МГУ показали, что металлические поверхностные нанорешетки с оптимизированным профилем в условиях возбуждения плазмонного резонанса позволяют за счет усиления напряженности электрического поля фемтосекундного лазерного импульса вблизи поверхности решетки значительно повысить эффективность нелинейно-оптических процессов, в частности, генерации гармоник высокого порядка, и обогатить фотоэмиссионный спектр генерируемого в газовых средах излучения.



Анатолий Васильевич Андреев.



Андрей Андреевич Коновко.

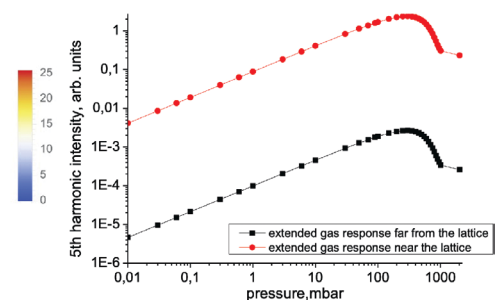
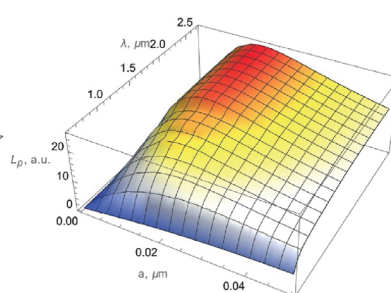
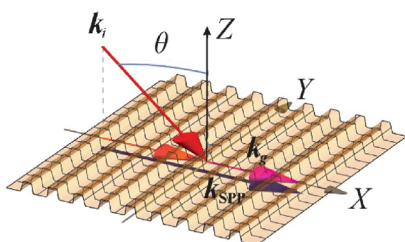
Металлические микро- и наноструктуры привлекают внимание исследователей благодаря возможности возбуждения резонансных колебаний электронов проводимости – плазмонных поляритонов. В условиях возбуждения плазмонного резонанса амплитуда напряженности электрического поля на границе раздела металл-диэлектрик резко возрастает. Этот эффект используется для усиления таких нелинейно-оптических явлений, как гигантское комбинационное рассеяние света и генерация второй и третьей оптических гармоник. Кроме того, заостренные металлические наночастицы позволяют дополнительно усилить локальное поле у острия за счет нерезонансного эффекта громоотвода. Следует отметить, что создание наночастиц для усиления локального поля более чем на порядок в настоящее время является сложной технологической проблемой, требующей соблюдения геометрических размеров структур с атомной точностью.

На основе строгого метода связанных волн (RCWA) разработан алгоритм решения векторной задачи дифракции фемтосекундного ла-

зерного импульса на одномерной дифракционной наноструктуре. Для расчета фотоэмиссионных спектров протяженного неоновго газа использована интерференционная модель. В рамках указанной модели отклик протяженного газа моделируется как сумма откликов одиночных атомов, образующих цепочку, ориентированную вдоль направления распространения лазерного импульса, а фотоэмиссионные отклики атомов рассчитываются в рамках уникального непертурбативного подхода.

Показано, что коэффициент усиления локального поля немонотонно зависит от высоты профиля решетки и достигает максимума при некотором оптимальном значении высоты. Примечательно, что оптимальная высота слабо зависит от длины волны в диапазоне 1,1–2,8 мкм. Средняя оптимальная высота в этом диапазоне равна 17,4 нм.

Проведено сравнение параметров отклика протяженного неоновго газа, расположенного вдали от решетки, т.е. когда поверхностная решетка не оказывает существенного влияния на распределение лазерного поля в пространстве, и вблизи



решетки, когда амплитуда и фаза поля определялись взаимодействием лазерного импульса с поверхностной решеткой. Оказалось, что фотоэмиссионный отклик одиночного атома неона, находящегося вблизи решетки, содержит большее количество гармоник, поскольку амплитуда напряженности электрического поля лазерного импульса, с которым он взаимодействует, увеличилась. Кроме того, эффективность генерации гармоник также возросла: по сравнению с откликом среды, удаленной от решетки, эффективность генерации гармоник низкого порядка увеличилась на три порядка.

Проведенные исследования открывают перспективу создания компактного («table-top») фемтосекундного источника когерентного коротковолнового излучения, который может быть использован для проведения предварительных исследований и отработки методик исследования вещества с их последующим масштабированием на станциях установок класса «мегасайенс».

Andreev A.V., Konovko A.A., Stremoukhov S.Y. "High harmonics generation in gases near the gratings: towards the spectrum enhancement and enrichment." *Laser Physics Letters*, 19, 4. P. 045401 (2022).



Сергей Юрьевич Стремухов.

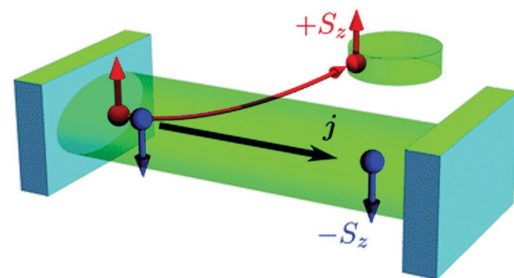
Способ управлять одиночным спином

Сотрудники физического факультета МГУ и ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН предложили оригинальный дизайн полупроводниковой наноструктуры, который позволяет ориентировать одиночный спин электрическим током. Это поможет разработать компоненты квантовых устройств.

Локализованные спины в полупроводниках являются перспективной платформой для масштабируемых квантовых вычислений, которые обещают произвести революцию в мире информатики. Скорейшая их реализация является стратегически важной задачей, и на ее решение нацелены усилия множества научных групп по всему миру. Экспериментальные успехи полупроводниковой спиновой физики привлекают внимание и ставят важные вопросы для фундаментальных исследований. Один из них был недавно решен в совместной работе теоретиков из Москвы и Санкт-Петербурга.

История сделанного открытия восходит к 70-ым годам прошлого века, когда пионерами полупроводниковой спинтроники был теоретически предсказан и экспериментально обнаружен удивительный эффект: пропускание электрического тока через некоторые «гиротропные» полупроводники приводит к ориентации спинов носителей заряда. Сперва этот эффект не привлек к себе широкого внимания, но со временем оказалось, что именно он дает ключ к управлению спинами электронов, которые теоретически могут иметь огромное практическое значение.

Вместе с тем, исследования эффекта ориентации током спинов электронов, а также создание новых низкоразмерных полупроводниковых систем показали, что во всех случаях спиновая поляризация не превышает всего лишь нескольких процентов. Это связано со слабостью спин-орбитального взаимодействия для электронов, так называемых членов Рашбы и Дрессельхауза, которые ответственны за конверсию тока в спин.



Сотрудникам физического факультета МГУ и ФТИ им. А. Ф. Иоффе в данной работе удалось совершить фундаментальный прорыв и предложить способ полностью поляризовать локализованные спины в полупроводниках.

«Для этого необходимо создать структуру на основе двумерного дырочного газа, состоящую из квантового провода с тяжелыми дырками и квантовой точки с легкими дырками», — рассказал Владимир Манцевич, профессор кафедры физики полупроводников и криоэлектроники физического факультета МГУ.

Ученые отмечают, что предложенный ими оригинальный дизайн наноструктур может реализовываться на основе разных полупроводников, например кремния, германия или арсенида галлия.

"Current-induced hole spin polarization in a quantum dot via a chiral quasi bound state." V. N. Mantsevich and D. S. Smirnov. *Nanoscale Horiz*, 7, 752–758 (2022).

НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ КОДИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИИ В ФАЗОПЕРЕМЕННОМ МАТЕРИАЛЕ

Сотрудники кафедры общей физики и молекулярной электроники совместно с коллегами из Института общей и неорганической химии имени Н.С. Курнакова РАН и Национального исследовательского университета МИЭТ придумали способ кодировать информацию по пяти измерениям (5D), используя фазопеременный материал GST₂₂₅ и излучение лазера. Эта технология позволит в перспективе уменьшать размер носителей информации, в которых запись и считывание производятся оптическим способом. Грант РФФИ № 20-32-90111 по поддержке молодых ученых, обучающихся в аспирантуре.



Доцент Заботнов Станислав Васильевич и научный сотрудник Шулейко Дмитрий Валерьевич в лаборатории кафедры общей физики и молекулярной электроники

В стандартных компакт-дисках для персональных компьютеров запись и считывание информации реализуются по принципу 3D — за счет перемещения лазерного луча по трем координатам в объеме используемого материала, в частности, обеспечивая возможность многослойного кодирования информации. При этом максимальная плотность записи информации зависит от возможности сфокусировать лазерный луч в минимально возможную область, где происходит кодирование, так называемый воксель.

Важно отметить, что характерный размер фокусировки светового луча не может быть существенно меньше длины волны согласно фундаментальному ограничению, называемому дифракционным пределом. Таким образом, для увеличения плотности записи информации можно до определенной степени уменьшать длину волны излучения. На этом принципе базируется современная технология Blue-ray, в которой используют коротковолновое фиолетовое излучение. Дальнейшее уменьшение длины волны и переход в ультрафиолетовую область приводят к существенному увеличению затрат на произ-

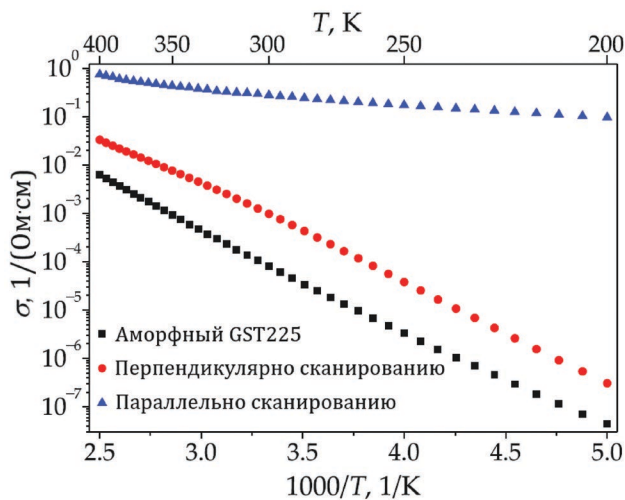
водство как устройств записи-считывания, так и носителя информации. Альтернативный способ — произвести запись с дополнительными параметрами кодирования. Этого можно добиться, создавая анизотропные области, в которых оптические или электрофизические свойства материала зависят от поляризации падающего света или направления приложенного тока соответственно. Тогда две дополнительные размерности кодирования могут быть обеспечены направлением оси анизотропии и ее величиной, что и обуславливает название 5D памяти. При этом отпадает необходимость уменьшения длины волны излучения, используемого для записи.

Ранее подобная технология реализовывалась на различных стеклах, в которых запись анизотропных областей производилась сфокусированными фемтосекундными лазерными импульсами. Подбор поляризации, числа и энергии импульсов позволяет контролируемым образом управлять параметрами анизотропии. Однако в стеклах на практике невозможна перезапись информации, то есть по аналогии с компакт-дисками реализуется только технология CD-R, но не CD-RW.

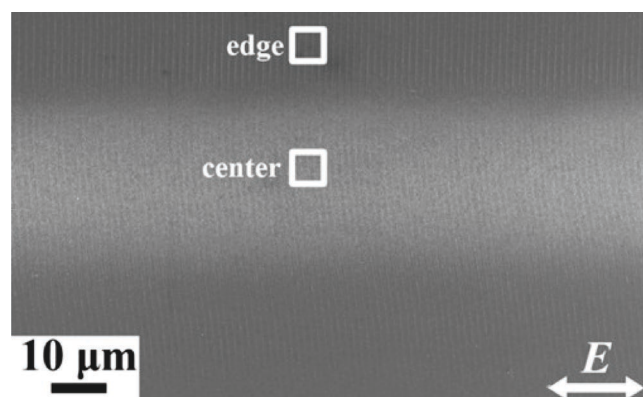
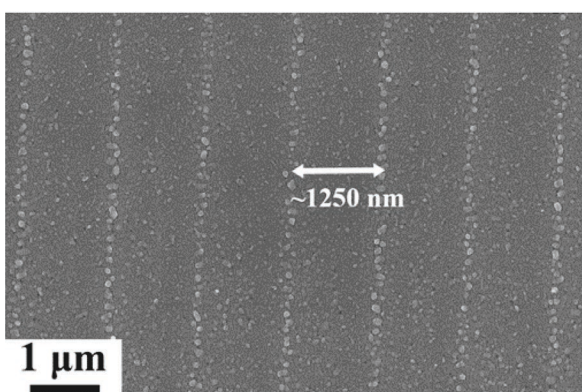


Аспирант кафедры общей физики и молекулярной электроники Колчин Александр Валерьевич

Чтобы решить эту проблему в качестве материала для изготовления перезаписываемого носителя информации ученые физического факультета МГУ выбрали тонкую пленку из GST225 — халькогенидного соединения с фазопеременными свойствами: при воздействии на него лазерными импульсами с определенными характеристиками вещество переходит из аморфного состояния в кристаллическое. Также возможен и обратный переход при подобранных соответствующим образом параметрах излучения. Разница между оптическими и электрофизическими характеристиками GST225 в аморфной и кристаллической фазах достаточно велика и может быть легко зарегистрирована на практике, что делает данный материал перспективным в современных информационных технологиях.



Температурные зависимости удельной проводимости исходной аморфной пленки GST225 и этой же пленки после облучения фемтосекундными лазерными импульсами, приводящего к кристаллизации материала. Показана анизотропия проводимости облученной поверхности при протекании измеряемого тока в плоскости образца перпендикулярно и параллельно направлению сканирования лазерным лучом.



Изображения в растровом электронном микроскопе облученной фемтосекундными лазерными импульсами тонкой пленки GST225: слева — при большом увеличении лазерно-индуцированные поверхностные периодические структуры, обуславливающие наличие анизотропии, справа — наличие горизонтальной светлой полосы по центру соответствует аморфной фазе материала в результате обратного перехода, темные области соответствуют кристаллической фазе.

«При падении сфокусированного излучения фемтосекундного лазера на пленку из GST225 возбуждаются поверхностные плазмоны-поляритоны. В результате их интерференции с падающим излучением происходят не только фазовые переходы данного материала, но и образуются поверхностные периодические структуры, существование которых мы обнаружили с помощью оптической и растровой электронной микроскопии. Наличие таких структур и обуславливает анизотропию в облученном материале», — пояснил один из соавторов работы Александр Колчин, аспирант физического факультета МГУ.

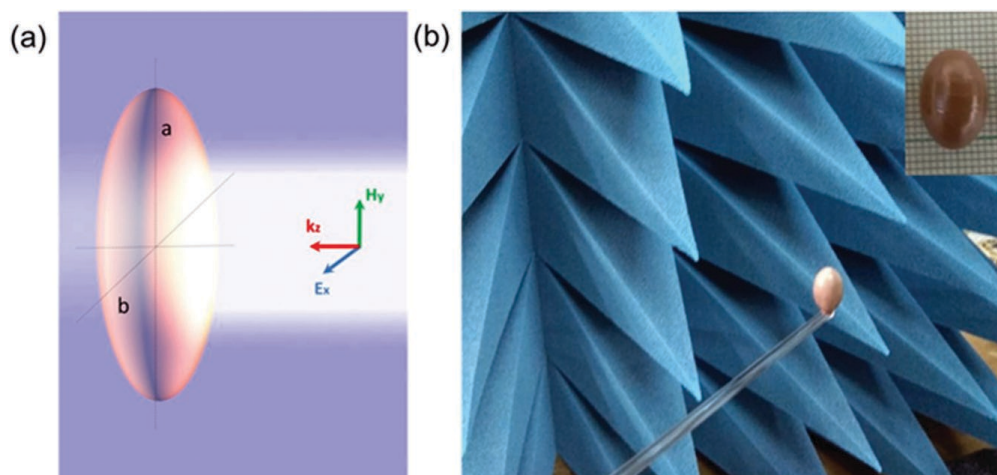
«Мы надеемся, что эта работа привлечет внимание к развитию новой технологии оптической записи информации. Возможно, в дальнейшем это приведет к появлению компактных систем хранения информации, чувствительных к поляризации зондирующего лазерного луча или направлению приложенного тока при считывании», — прокомментировал доцент физического факультета МГУ, кандидат физико-математических наук Станислав Заботнов.

«Artificial anisotropy in Ge₂Sb₂Te₅ thin films after femtosecond laser irradiation» A. Kolchin, D. Shuleiko, M. Martyshev, A. Efimova, L. Golovan, D. Presnov, T. Kunkel, V. Glukhenkaya, P. Lazarenko, P. Kashkarov, S. Zaboltnov, S. Kozyukhin. *Materials*, 15, 3499 (2022).

«Periodic relief fabrication and reversible phase transitions in amorphous Ge₂Sb₂Te₅ thin films upon multi-pulse femtosecond irradiation» S. Zaboltnov, A. Kolchin, D. Shuleiko, D. Presnov, T. Kaminskaya, P. Lazarenko, V. Glukhenkaya, T. Kunkel, S. Kozyukhin, P. Kashkarov. *Micro*, 2, 88–99 (2022).

ФИЗИКИ «НАУЧИЛИ» ЧАСТИЦЫ РАССЕЙВАТЬ СВЕТ В ФОРМЕ ГАНТЕЛИ

Физики определили условия, в которых шарообразные частицы начинают рассеивать свет преимущественно в двух боковых направлениях, в результате чего диаграмма рассеяния по форме становится похожей на гантель. Оказалось, что для этого нужно подействовать микроволнами на сфероидные диэлектрические частицы с большим показателем преломления. Предложенный подход поможет разработать высокочувствительные наноантенны и лазеры, а также детекторы пылевых зерен в космосе.



(a) Модель сфероидной частицы, на которую падает линейно поляризованная плоская волна. (b) Экспериментальный образец керамической сфероидной частицы в безэховой камере. Источник: Bukharin et al. *Scientific Reports*, 2022.

Сегодня носители информации и запоминающие устройства создаются не на основе традиционных электронных технологий и механизмов передачи сигналов, а с использованием оптических систем. Так, передача и обработка информации с помощью квантов света (фотонов) позволяет увеличить скорость процесса и хранить больше данных в меньшем объеме носителя по сравнению с микросхемой. Чтобы передавать световые импульсы, ученые все чаще используют шарообразные керамические частицы, поскольку они обладают особыми физическими свойствами — магнитным и электрическим дипольными моментами. Это означает, что частица представляет собой диполь, то есть несет два противоположных заряда (плюс и минус), находящиеся на некотором расстоянии друг от друга. Взаимодействие дипольных моментов приводит к тому, что частицы по-разному рассеивают свет — известно либо рассеяние вперед, либо же рассеяние назад. Оба они осуществляются благодаря эффекту Керкера — явлению, при котором происходит подавление одного из таких рассеяний. Среди важных проблем фотоники — создание направленного рассеяния света, необходимого, например, для производства наноантенн.

Группа ученых МГУ с коллегами из российских университетов и научных институтов, а также Университета Восточной Финляндии выявила, что с помощью диэлектрических частиц можно создавать необычные виды рассеяния.

В ходе экспериментов специалисты облучали сфероидные керамические частицы микроволнами. Керамика в качестве материала была выбрана по причине ее чрезвычайно высокой диэлектрической проницаемости, что позволяет использовать интенсивные магнитные резонансы в рассеянии. В качестве альтернативных материалов для такого рассеяния исследователи предлагают использовать кремний (Si) или его диоксид (SiO_2). Также ученые считают, что в оптической области спектра сфероидные частицы можно будет заменить цилиндрическими, то есть модифицировать не материал, а форму. Это позволит улучшить качество эксперимента, поскольку сфера не способна давать полный спектр рассеяния в отличие, например, от частицы в форме эллипсоида.

Авторы впервые экспериментально продемонстрировали эффект бокового рассеяния, когда прямое и обратное пренебрежимо малы. В отличие от стандартного эффекта Керкера, обусловленного интерференцией (наложением) дипольных составляющих электрического и магнитного компонентов рассеянного света, эффект бокового рассеяния связан с интерференцией электрического диполя и магнитного квадруполь (по сути совокупности двух диполей). Экспериментальные результаты хорошо согласуются с математическими расчетами.

«Управление рассеянием микроскопических частиц и наночастиц представляет важную задачу, связанную с разработкой современных оптических устройств. На-

пример, можно создавать невидимость и суперпрозрачность оптических материалов, конструировать новые типы нанолазеров, генерировать магнитные поля, сопоставимые с полями в нейтронных звездах, делать линзы, позволяющие увидеть вирусы в школьном микроскопе, и многое другое», — рассказал руководитель проекта по гранту РФФИ Борис Лукьянчук, доктор физико-матема-

тических наук, профессор кафедры нанофотоники физического факультета МГУ.

"Transverse Kerker effect in all-dielectric spheroidal particles." M.M. Bukharin, V. Ya. Pecherkin, A. K. Ospanova, V. B. Il'in, L. M. Vasilyak, A. A. Basharin & B. Luk'yanchuk. *Scientific Reports*. **12**, 7997 (2022).

ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИХ ФОТОННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ В СИЛЬНЫХ ГРАВИТАЦИОННЫХ ПОЛЯХ

Недавно возник новый канал получения информации о сильных гравитационных полях в окрестности черных дыр с помощью радиоинтерферометрии сверхдлинной базы (систем синхронизированных радиотелескопов с эффективной апертурой размером Земли) [1], что позволило получить изображения в радиодиапазоне от аккреционных дисков, находящихся в непосредственной близости от черных дыр, формирующихся в условиях экстремального гравитационного линзирования. Это стимулировало разработку новых теоретических методов создания шаблонов для таких изображений в зависимости от предположений о структуре гравитационного поля, а также с учетом возможной модификации уравнений Эйнштейна.

В работах проф. Д.В. Гальцова, м.н.с. К.В. Кобялко и асп. И.А. Богуша [2–8], выполненных на кафедре теоретической физики, была построена новая теория характеристических поверхностей в сильных гравитационных полях, позволяющая описать сильное гравитационное линзирование и тени черных дыр, не прибегая к интегрированию уравнений геодезических, что может быть не всегда возможно. Такие поверхности являются частично ловушечными [2–3], они отделяют области захвата фотонов, не имеющих импульса, направленного наружу, и лежат вне горизонта событий. В сферически симметричном случае эти поверхности обладают свойством омбиличности (пропорциональности первой и второй квадратичных форм), но в более общем случае, как было выяснено авторами, они обладают свойством «частичной омбиличности» [4], связывающим выполнение этого условия со значением прицельного параметра орбит. Выяснилось, что существование таких характеристических подмногообразий коррелирует со скрытыми симметриями гравитационных полей, выражаемых тензорными полями Киллинга второго ранга, и был предложен новый метод построения таких полей [5–6].

На основании развитой теории были разработаны численные алгоритмы получения шаблонов изображений аккреционных дисков, в том числе, в модифицированной гравитации, и построен ряд новых шаблонов [7] для анализа будущих экспериментальных изображений. Новая теория была также обобщена на случай траекторий массивных частиц [8].

[1] K. Akiyama et al. [Event Horizon Telescope], "First Sagittarius A* Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole in the Center of the Milky Way," *Astrophys. J. Lett.* **V. 930**, L12 (2022).

[2] D. V. Gal'tsov and K. V. Kobialko, *Phys. Rev. D* **99**, no. 8, 084043 (2019).

[3] D. V. Gal'tsov and K. V. Kobialko, *Phys. Rev. D* **100**, no. 10, 104005 (2019).

[4] K.V. Kobialko, D.V. Gal'tsov, *Eur. Phys. J. C* **80**, 527 (2020).

[5] Kobialko Kirill, Bogush Igor, Gal'tsov Dmitri. // *Phys. Rev. D*. Vol. 104, no. 4. — P. 044009 (2021).

[6] Kobialko Kirill, Bogush Igor, Gal'tsov Dmitri. // *Phys. Rev. D* Vol. 106, no. 2. — P. 024006 (2022).

[7] Bogush Igor, Gal'tsov Dmitri, Gyulchev Galin, Kobialko Kirill, Nedkova Petya and Vetsov Tsvetan // *Phys. Rev. D* **106**, no. 2. — P. 024034 (2022).

[8] Kobialko Kirill, Bogush Igor, Gal'tsov Dmitri. // *arXiv* **2208.02690** (2022).

XI-й Семинар Д. Н. Клышко в Московском университете



*профессор физического факультета МГУ
Давид Николаевич Клышко.*

8–10 июня 2022 г. в Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова прошел XI-й Семинар Д.Н. Клышко. Организаторы Семинара — Центр квантовых технологий и кафедра квантовой электроники физического факультета. С полным основанием можно говорить, что Семинар стал традиционным, собирающим практически всех ведущих российских специалистов в области квантовой/атомной оптики и квантовой информации. На протяжении последних двадцати лет интервал его проведения — раз в два года — с единственным исключением, вызванным пандемией. Одна из отличительных особенностей Семинара — это его рабочий характер. Дело даже не в том, что большинство представляемых докладов являются оригинальными. Под «рабочей» в данном случае мы понимаем ту обстановку, в которой проходили заседания, плотное расписание, острые дискуссии в ходе докладов и в кулуарах, оживленную стендовую секцию. Регламент Семинара предусматривал специальное время для обсуждения каждого доклада, что на наш взгляд способствовало естественному поддержанию рабочей атмосферы.

Говоря о географии Семинара, следует, прежде всего, выделить многочисленную Санкт-Петербургскую команду участников. Она установила своеобразную «планку», уровень которой задавался традиционно сильной научной школой. Эти доклады охватывали все тематики Семинара — квантово-оптическое и оптико-статистическое направления (А.А. Торопов), взаимодействие света с индивидуальными атомами (Л. Герасимов и Д.В. Куприянов) и приготовление специфических квантовых состояний для задач квантовых технологий (Т.Ю. Голубева). Коллеги из института спектроскопии (Троицк) запомнились докладами А.В. Наумова о природе уширения спектров люминесценции одиночных квантовых излучателей и А.Е. Афанасьева об использовании атомных чипов в задачах квантовой метрологии. Казанская школа была представлена ведущими специалистами в области квантовой памяти — А.А. Калачевым и С.А. Моисеевым. Сильная минская школа квантовой оптики, к сожалению, была представлена единственным докладом Д.Б. Хорошко о пространственном уравнении Гейзенберга для электромагнитного поля. Мы очень надеемся видеть большее число участников из Минска на следующих Семинарах, особенно в связи с наметившимся пересечением ряда тематик минской и некоторых Санкт-Петербургских и московских групп. Что же касается представителей Москвы, их, по-прежнему,

было большинство. Наряду с «классиками» С.П. Вятчинным, Ф.Я. Халили, В.И. Манько, С.Н. Молотковым, Н.Н. Колачевским, А.В. Масаловым и М.В. Федоровым запомнились доклады О.В. Тихоновой об управлении спектральными свойствами и модовым составом яркого сжатого вакуума в квантово-оптическом «затворе», С.Н. Филиппова о логарифмическом неравенстве Соболева и гипотезе о гауссовских максимизаторах для пропускной способности квантового гетеродинамирования с шумом, а также Н.С. Масловой о перепутанных состояниях электронной и колебательной подсистем во взаимодействующих атомно-молекулярных структурах. Своеобразной традицией Семинара — хотя и сильно редуцированной в силу ряда обстоятельств — становятся выступления наших соотечественников, работающих за рубежом: в этом году на Семинаре сделала доклад выпускница физфака А.В. Патерова из Института исследования материалов и инженерии (Сингапур).

Если говорить о молодых участниках, то прошедший Семинар запомнился докладами ребят из группы О.В. Астафьева (МФТИ) — Ш.В. Сандуляну, Г.П. Федорова, А.Ю. Дмитриева, С.А. Гунина и А.В. Васенина, Ильи Семерикова из ФИАНа и Ильи Бетерова из Института физики полупроводников СО РАН. Кроме того, на заседаниях постоянно присутствовало около двух десят-



ков студентов и аспирантов МГУ, которые, стесняясь задавать вопросы докладчикам, активно обсуждали происходящее в аудитории между собой и вовлекая в дискуссию «мэтров», сидящих неподалеку.

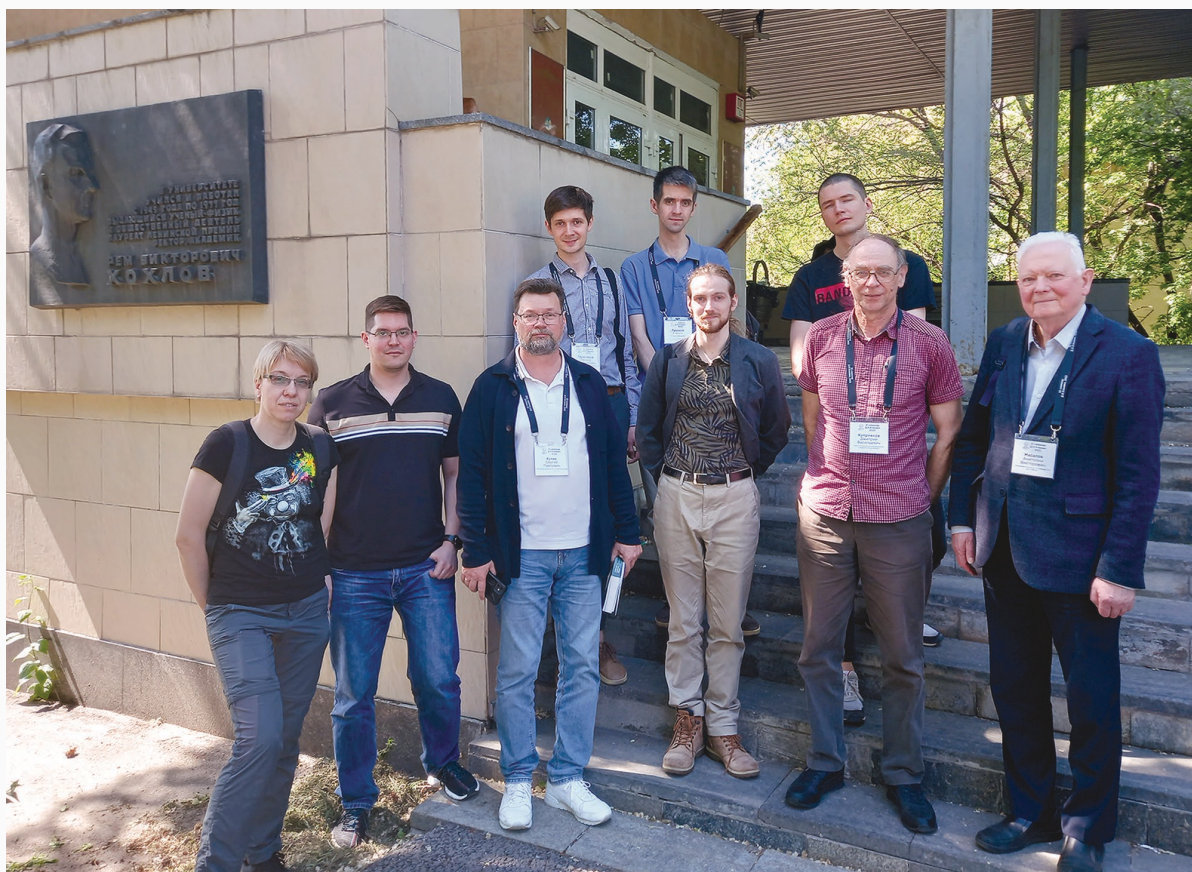
Некоторые цифры: всего было представлено 56 докладов, из них 16 стендовых. 38 докладов сделано представителями г. Москвы, 11 — Санкт-Петербурга, 2 — Казани, Троицка, по одному докладу от Владимира, Минска, Сингапура (Сингапур).

Материалы докладов выложены на сайте <http://qopt.org/ru/seminardnk> — нам представляется, что эти публикации правильно отражают тематику и дух семинара.

Мы благодарны всем участникам — как докладчикам, так и слушателям — всего в работе семинара приняло участие около восьмидесяти человек. Нам кажется, что проведение таких семинаров будет лучшей памятью о Давиде Николаевиче Клышко, которому организаторы Семинара обязаны очень многим.

Выражаем также глубокую благодарность нашим спонсорам — компаниям ООО «ЕТМ Фотоника» и ООО «ЭкспертЛабс», которые поддержали проведение Семинара.

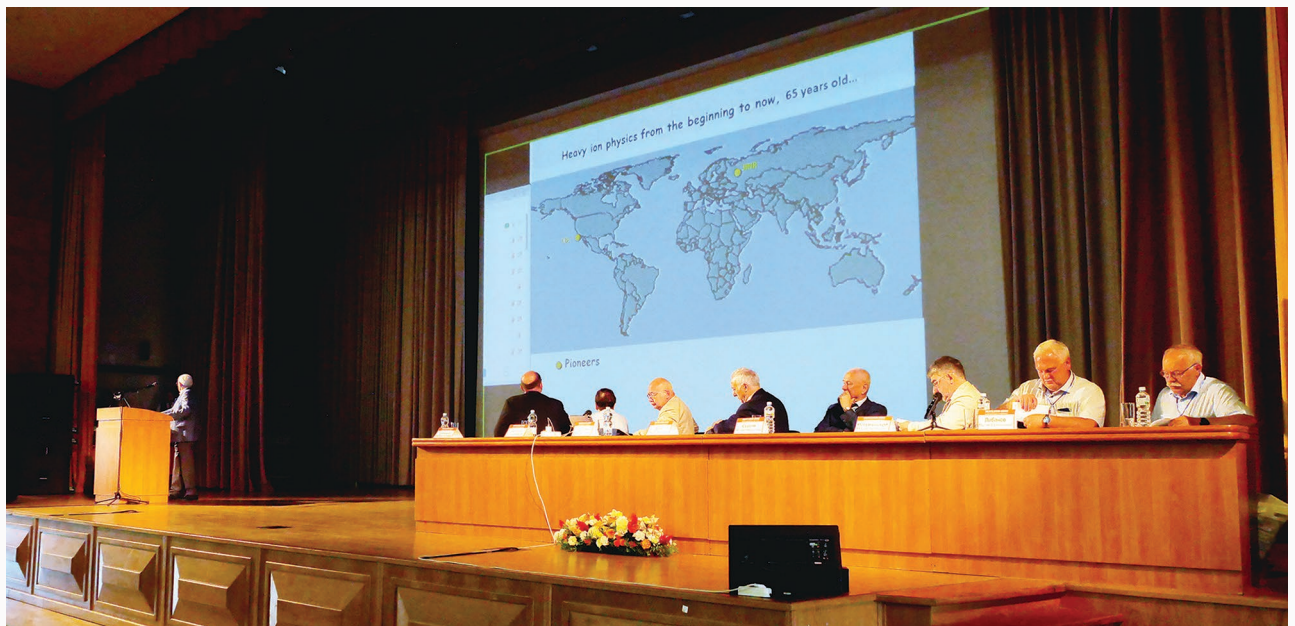
Профессор С.П. Кулик



LXXII Международная конференция «Ядро-2022. Физика атомного ядра и элементарных частиц. Ядерно-физические технологии».



С 11 по 16 июля 2022 г. в МГУ (в НИИЯФ и на физическом факультете) прошла традиционная LXXII Международная конференция «Ядро-2022. Физика атомного ядра и элементарных частиц. Ядерно-физические технологии». Эта конференция, известная в советское время как «Международное совещание по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра», проводится ежегодно с 1951 г. и является одной из старейших и известнейших в мире конференций по ядерной физике. Ее тематика посвящена обсуждению актуальных проблем теоретической и экспериментальной ядерной физики, ядерных и ускорительных технологий, ядерной медицины, а также нейтринной физики и физики высоких энергий.



На протяжении длительного времени в области ядерной физики конференция остается важнейшим мероприятием страны и является крупным научным форумом, привлекающим внимание ученых всего света. В разные годы здесь были представлены до-

клады выдающихся физиков, в том числе лауреатов Нобелевской премии Л. Д. Ландау, П. А. Черенкова, первооткрывателя несохранения четности в слабых взаимодействиях Ву Цзяньсюн, а также Б. М. Понтекорво, Я. Б. Зельдовича и многих других.



С первых лет ведущая роль в организации этих совещаний принадлежит Московскому университету. Председателем Программного комитета первого Совещания был Президент АН СССР Келдыш М.В., а председателем оргкомитета директор НИИЯФ академик Скобельцын. Первые 6 совещаний прошли в МГУ, а всего мы принимали ее у себя 16 раз.

В этом году на конференции отмечалось 100-летие со дня зарождения ядерной физики в России. В ее работе принимали участие около четырехсот специалистов, в том числе более 100 молодых ученых из научных центров Российской Федерации и стран ближнего и дальнего зарубежья. На заседаниях 8 секций конференции было сделано около 500 докладов учеными из около чем тридцати стран ближнего и дальнего зару-

бежья. На конференции среди докладчиков были известные ученые академики и члены-корреспонденты РАН Ю. Ц. Оганесян, И. В. Мешков, Г. В. Домогацкий, Е. Б. Левичев. На конференции на вновь организованных секциях было уделено значительное внимание прикладным задачам ядерной физики в промышленности, сельском хозяйстве и медицине.





Сотрудник кафедры оптики, спектроскопии и физики наносистем Сергей Юрьевич Стремоухов.

16 июня 2022 года в диссертационном совете МГУ.01.13 Стремоухов Сергей Юрьевич защитил диссертацию на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.21 — Лазерная физика.

на тему:

«Механизмы генерации произвольно поляризованного излучения в интенсивных лазерных полях»

С развитием методов генерации ультракоротких (вплоть до одного цикла поля) интенсивных лазерных импульсов различных спектральных диапазонов, ученые получили возможность экспериментального изучения взаимодействия такого излучения с веществом. В результате было обнаружено множество явлений, которые не смогли получить своего теоретического объяснения в рамках существующих в то время подходов, основанных, в основном, на теории возмущений, феноменологических принципах и методе медленно меняющихся амплитуд и фаз электромагнитного поля. При таких (в первую очередь, фемтосекундных) длительностях импульсов пиковая напряженность лазерного поля перестает быть малой величиной по сравнению с внутриатомной ($E_{at} = 5 \cdot 10^9$ В/см), и отклик среды становится существенно нелинейным, что открывает возможности генерации когерентного излучения различных спектральных диапазонов. В связи с этим возникла необходимость развития принципиально новых, так называемых непертурбативных подходов, учитывающих энергетическую структуру атомов и молекул и свободных от использования отношения величины напряженности лазерного поля к внутриатомной напряженности в качестве малого параметра. К таковым относится развитая в рамках диссертационной работы уникальная непертурбативная теория. Она основана на решении квантово-механической задачи взаимодействия одиночного атома с произвольно поляризованными многокомпонентными интенсивными лазерными полями. Последовательный учет симметрии и всех нелинейностей задачи взаимодействия одиночного атома с лазерным полем позволяет применять развиваемую теорию к описанию генерации гармоник высокого (и низкого) порядков и генерации терагерцового излучения — одних из самых интересных нелинейно-оптических явлений, происходящих в результате такого взаимодействия.

Также в диссертационной работе была предложена интерференционная модель, позволяющая рассчитать нелинейно-оптический отклик газовых (плазменных) сред на воздействие интенсивного лазерного поля. В рамках этой модели отклик ансамбля распределенных в среде атомов рассчитывается с использованием разработанного уникального непертурбативного подхода с учетом изменения параметров лазерного поля при его

распространении в веществе. Развитый согласованный теоретический подход был применен к исследованию физики процессов генерации когерентного излучения в результате взаимодействия интенсивного произвольно поляризованного многокомпонентного лазерного поля с газовыми (плазменными) средами. Он был апробирован на конкретных экспериментальных данных в рамках проведенных теоретико-экспериментальных исследований генерации излучения в газовых и плазменных средах, полученные с помощью разработанного теоретического подхода результаты находятся в количественном или хорошем качественном согласии с экспериментальными данными.

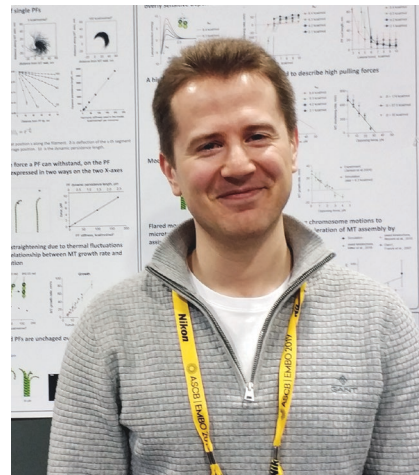
В результате проведенных исследований были изучены механизмы генерации произвольно поляризованного когерентного излучения терагерцового, ультрафиолетового и мягкого рентгеновского диапазонов длин волн, а также развиты методы управления характеристиками (эффективностью, состоянием поляризации, частотно-угловым спектром) такого излучения. В диссертационной работе предсказан ряд новых эффектов, не наблюдавшихся до сих пор экспериментально и не обсуждавшихся в статьях других авторов. Некоторое количество предсказаний было экспериментально подтверждено после опубликования результатов теоретических исследований.

Разработанные методы управления характеристиками генерируемого излучения могут быть использованы для создания компактных и более доступных (по сравнению с такими установками класса «мегасайенс»), как современные источники синхротронного излучения, лазеры на свободных электронах) источников когерентного излучения в терагерцовой, ультрафиолетовой и рентгеновской областях спектра. Такие источники, обладая несомненно меньшей мощностью, могут использоваться как для проведения предварительных исследований, так и для отработки методик исследования вещества для их последующего масштабирования на станциях установок класса «мегасайенс». Кроме того, использование генерируемого лазерными методами когерентного излучения в качестве затравочного позволяет улучшать как энергетические, так и когерентные свойства излучения, генерируемого лазерами на свободных электронах.

Сотрудник кафедры биофизики
Никита Борисович Гудимчук.

17 февраля 22 года в диссертационном совете МГУ.01.04 Гудимчук Никита Борисович защитил диссертацию на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 03.01.02 — Биофизика.

на тему:



«Динамика микротрубочек и механизмы транспорта хромосом при делении клеток»

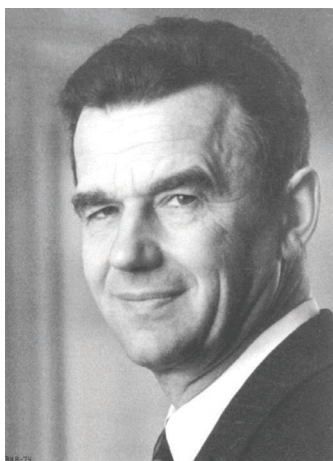
Тубулиновые микротрубочки — это белковые структуры, формирующие один из трех основных компонентов внутреннего скелета всех клеток животных, растений и грибов. Микротрубочки выполняют разнообразные функции в живых клетках, от транспорта везикул (мембранных пузырьков с разнообразными веществами внутри) и позиционирования органелл до участия в миграции и изменении формы всей клетки. Эти полимеры тубулина представляют собой неравновесную систему: они осуществляют циклы сборки и разборки со спонтанными переключениями между этими динамическими фазами при наличии источника свободной энергии. Более того, микротрубочки способны преобразовывать энергию гидролиза молекул гуанозинтрифосфата в механическую работу, генерируя в клетках значительные силы, которые управляют рядом жизненно важных процессов, включая перемещение хромосом для распределения генетического материала между дочерними клетками во время их деления. При этом концы микротрубочек прикрепляются к хромосомам при помощи крупного специализированного комплекса белков — кинетохора. Многие фундаментальные механизмы, лежащие в основе динамической нестабильности микротрубочек и их работы в качестве молекулярных машин для совершения механической работы по перемещению хромосом, а также принципы устройства кинетохора как сопрягающего устройства для передачи сил от микротрубочек к хромосомам до сих пор неизвестны.

В диссертационной работе впервые разработана многомасштабная теория работы микротрубочек от атомарного до клеточного уровня. С помощью метода «оптического пинцета» были экспериментально измерены максимальные силы, развиваемые отдельной разбирающейся микротрубочкой в очищенной белковой системе. Измеренные силы составили около 30 пН — значитель-

ную величину по масштабам клетки. Методом криоэлектронной томографии были найдены ранее не известные структуры на концах полимеризующихся микротрубочек — изогнутые протофиламенты тубулина. Это позволило пересмотреть существующие представления о механизме сборки микротрубочек. Показано, что изогнутые протофиламенты обнаруживаются на микротрубочках в широком диапазоне экспериментальных условий и в разных организмах — от дрожжей до животных. Кроме того, в диссертационной работе с помощью методов молекулярной динамики обнаружена роль неструктурированных доменов белков тубулинов в регуляции скорости сборки микротрубочек. Данное теоретическое предсказание было подтверждено экспериментально в сотрудничестве с американскими коллегами. Открыта и исследована способность кинетохорного белка — кинезина CENP-E — следовать за динамическими концами микротрубочек и тем самым способствовать транспорту хромосом при клеточном делении.

Совокупно полученные теоретические результаты проясняют фундаментальные принципы работы микротрубочек во многих физиологически значимых процессах и особенно в процессе деления клеток. В практическом смысле, собранные данные могут помочь установить молекулярные основы патологических изменений в работе клеток при нарушениях динамики микротрубочек. Кроме того, построенные теоретические модели позволяют уточнить механизмы действия существующих препаратов химиотерапии, направленных на ингибирование процессов сборки и разборки микротрубочек, и указывают на возможности разработки принципиально новых препаратов, нацеленных на блокирование эффективного взаимодействия кинетохорных белков и микротрубочек при делении клеток.

РЕЗУЛЬТАТЫ КОНКУРСА НАУЧНЫХ СТУДЕНЧЕСКИХ РАБОТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА Р.В. ХОХЛОВА



Определены победители конкурса научных студенческих работ имени академика Р. В. Хохлова среди выпускников специалитета, магистратуры и бакалавриата 2022 г. Всего на конкурс было подано 32 работы выпускников магистратуры и специалитета и 26 работ выпускников бакалавриата. По результатам конкурса в число лучших вошли 18 научных студенческих работ.

Жюри конкурса отметило высокий научный уровень представленных на конкурс работ.

Дипломом I степени награжден выпускник бакалавриата Мартыненко Николай Сергеевич за работу «Рождение нейтрино и гамма-квантов во взаимодействиях космических лучей с окологалактическим газом». Труд представляет собой законченное масштабное исследование, целью которого было определить, могут ли взаимодействия покидающих диск нашей Галактики космических лучей с окологалактическим газом объяснить наблюдаемый поток астрофизических нейтрино высоких энергий. Такой сценарий мог бы согласовать проблемы мультимессенджерного анализа нейтринного сигнала IceCube в предположении внегалактических источников с отсутствием видимой анизотропии направлений прихода нейтрино, указывающей на диск Млечного Пути. Предыдущие приближенные исследования в разных вариантах указывали на теоретически ожидаемые потоки нейтрино, различающиеся примерно в 100 раз. В работе Н.С. Мартыненко была поставлена и корректно решена задача количественного описания рождения нейтринного и сопутствующего гамма-излучения в гало окологалактического газа, простирающегося вплоть до вириального радиуса Галактики.

Дипломом I степени среди магистров и специалистов награжден **Крамарев Никита Ильич** с работой «Развитие модели обдирания нейтронных звезд для коротких гамма-всплесков», посвященной развитию одной из моделей коротких гамма-всплесков, т.н. модели «обдирания» (stripping model). После исторического совместного детектирования гравитационно-волнового сигнала GW170817 и сопутствующего гамма-всплеска GRB170817A, с последующим открытием килоновой at2017gfo, связь между короткими гамма-всплесками и слиянием нейтронных звезд стала неоспоримой. Однако многие свойства GRB170817A оказались пекулярны. Подробное исследование с участием Крамарева Н.И. показало, что эти свойства можно естественно объяснить именно в сценарии обдирания (stripping) в противовес общепринятому сейчас сценарию слияния (merging) нейтронных звезд.

Поздравляем победителей и выражаем благодарность всем участникам конкурса и их научным руководителям!

Бакалавры и студенты специалитета

Мартыненко Николай Сергеевич	Кафедра физики частиц и космологии	Рождение нейтрино и гамма-квантов во взаимодействиях космических лучей с окологалактическим газом	I
Порошенко Анатолий Георгиевич	Кафедра физики атмосферы	Тропические циклоны и их трансформирование во внетропические в последние десятилетия: региональные особенности и тенденции изменения	II
Карташова Анна Дмитриевна	Кафедра медицинской физики	Детектирование билирубина с использованием плазмонных структур на основе модифицированных кремниевых нанонитей	II

Хмелева Мария Юрьевна	Кафедра квантовой электроники	Влияние функционализации поверхности углеродных точек на их фотолуминесцентные свойства в суспензиях	II
Гасымов Дамир Фариз оглы	Кафедра астрофизики и звёздной астрофизики	История формирования дисковой галактики со звёздным противовращением PGC 066551	III
Васильев Григорий Андреевич	Кафедра биофизики	Модель агрегации тромбоцитов с учетом их активации	III
Максимовская Анастасия Александровна	Кафедра атомной физики, физики плазмы и микроэлектроники	Элементная база сверхпроводниковой фазовой логики	III
Михеев Константин Евгеньевич	Кафедра общей физики и волновых процессов	Генерация оптических гармоник при взаимодействии высокоинтенсивного фемтосекундного лазерного излучения среднего инфракрасного диапазона с газовой струей	III
Максименко Дарья Максимовна	Кафедра квантовой теории и физики высоких энергий	Инвариантная регуляризация теорий с мягким нарушением суперсимметрии	III
Стамер Катерина Станиславовна	Кафедра физики полимеров и кристаллов	Особенности создания композитов на основе биополимера хитозана и наночастиц меди в растворах угольной кислоты под высоким давлением диоксида углерода	III

Магистры и специалисты

ФИО	Кафедра	Название работы	Степень диплома
Крамарев Никита Ильич	Астрофизики и звездной астрономии	Развитие модели обдирания нейтронных звезд для коротких гамма-всплесков	I
Комлев Алексей Степанович	Магнетизма	Механизмы магнитных фазовых переходов в сплавах на основе FeRh	II
Дюков Владислав Алексеевич	Общей физики и волновых процессов	Преобразование орбитальной и спиновой частей момента импульса световых пучков в объеме и на поверхности изотропной нелинейной среды	II
Хасаева Татьяна Тимуровна	Математики	Радиальные и азимутальные переходные слои в задачах галактического динамо	III
Котельникова Любовь Михайловна	Акустики	Метод измерения акустической радиационной силы, действующей на упругий сферический рассеиватель в жидкости при его облучении фокусированным ультразвуковым пучком	III
Мелкозерова Юлия Алексеевна	Физической электроники	Трёхмерное моделирование электронного обмена атомной частицы с поверхностями, содержащими атомы адсорбата	III
Неделько Никита Сергеевич	Физики частиц и космологии	Анализ расширений стандартной космологической модели в свете современных данных	III
Савченко Елена Михайловна	Квантовой теории и физики высоких энергий	Спектроскопия четырежды тяжёлых тетракварков в релятивистской кварковой модели	III

ПОЗДРАВЛЯЕМ СОТРУДНИКОВ ФИЗИЧЕСКОГО ФАКУЛЬТЕТА, ИЗБРАННЫХ АКАДЕМИКАМИ И ЧЛЕНАМИ-КОРРЕСПОНДЕНТАМИ РАН



1 июня 2022 г. в ходе общего собрания Российской академии наук состоялись выборы новых членов РАН.

Результаты тайного голосования были оглашены на заседании 2 июня.

Академиками Российской академии наук стали:

Фазоил Иноятович Атауллаханов

профессор кафедры биофизики
физического факультета



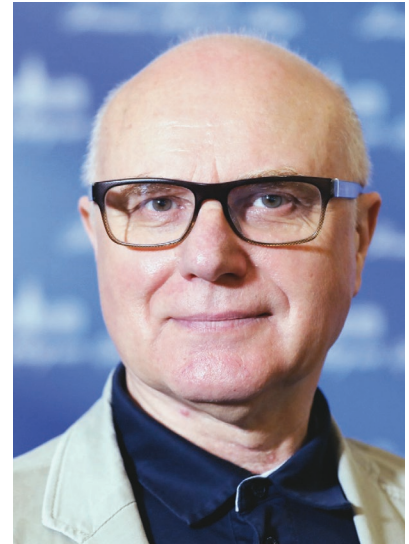
Владимир Алексеевич Черепенин

профессор кафедры фотоники и физики микро-
волн физического факультета

Членами-корреспондентами Российской академии наук стали:

Константин Александрович Постнов

директор Государственного астрономического
института им. П.К. Штернберга



Сергей Григорьевич Тиходеев

профессор кафедры общей физики и физики кон-
денсированного состояния физического факультета

НАГРАЖДЕН ОРДЕНОМ ПОЧЕТА

*В соответствии с Указом Президента
Российской Федерации от 5 сентября
2022 года № 606 за «заслуги в научно-
педагогической деятельности, подготовке
квалифицированных специалистов и
многолетнюю добросовестную работу»
заведующий кафедрой общей физики
физического факультета МГУ*

Александр Михайлович Салецкий

Сердечно поздравляем!



ДИССЕРТАЦИОННЫЕ СОВЕТЫ МГУ С ЗАЩИТАМИ В 2022 Г.

МГУ.01.01

*Председатель – Хохлов Алексей Ремович, д.ф.-м.н., проф., acad. РАН
Зам. председателя – Орешко Алексей Павлович, д.ф.-м.н., проф.*

Уваров Александр Викторович, д.ф.-м.н., проф.

Уч. секретарь – Малышкина Инна Александровна, к.ф.-м.н., доц.

19.05.2022

МАЛЫХИН Сергей Александрович «Получение и исследование люминесцентных центров в монокристаллических алмазных иглах» 01.04.07 – Физика конденсированного состояния. Кандидатская диссертация.

БУЛАТ Матвей Владимирович «Бифазные системы с диоксидом углерода под высоким давлением для создания биосовместимых и функциональных материалов из природных и синтетических полимеров и композитов» 02.00.06 – Высокомолекулярные соединения. Кандидатская диссертация.

9.06.2022

АНАХОВ Михаил Владимирович «Компьютерное моделирование набухания полимерных микрогелей в смесях двух несовместимых жидкостей» 02.00.06 – Высокомолекулярные соединения. Кандидатская диссертация.

23.06.2022

ПЧЕЛИНА Диана Игоревна «Структурные и магнитные свойства легированных манганитов лантана: $\text{La}_{1-x}\text{AxMnO}_3+\delta$ ($\text{A} = \text{Ca}, \text{Sr}; x = 0.05, 0.10, 0.20$)» 01.04.07 – Физика конденсированного состояния. Кандидатская диссертация.

ЛЯО Юйгань «Взаимодействие наносекундного поверхностного скользящего разряда с зоной отрыва в сверхзвуковом потоке» 01.04.17 – Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества. Кандидатская диссертация.

15.09.2022

ПЕТРОВСКИЙ Владислав Сергеевич «Изучение структурирования водных растворов полимеров и синтетических пептидов с ПАВ и гидрофобными мономерами методом атомистического моделирования» 02.00.06 – Высокомолекулярные соединения. Кандидатская диссертация.

ОСТАПОВ Илья Евгеньевич «Оптимизация оптических и энергетических свойств полимерных солнечных батарей посредством варьирования состава донорно-акцепторных звеньев сопряженных полимеров и нефуллереновых акцепторов» 02.00.06 – Высокомолекулярные соединения. Кандидатская диссертация.

МГУ.011.1 (МГУ.01.04)

Председатель – Твердислов Всеволод Александрович, д.ф.-м.н., проф.

Зам. председателя – Синецын Аркадий Пантелеймонович, д.х.н., проф.

Яковенко Леонид Владимирович, д.ф.-м.н., доц.

Уч. секретарь – Сидорова Алла Эдуардовна, к.т.н.

09.06.2022

ГУДИМЧУК Никита Борисович «Динамика микротрубочек и механизмы транспорта хромосом при делении клеток» 03.01.02 – Биология. Докторская диссертация.

СУЛИМОВ Алексей Владимирович «Молекулярный докинг: математические модели, суперкомпьютерная реализация и их применение для разработки лекарств» 03.01.08 – Бионженерия. Кандидатская диссертация.

МГУ.01.08

Председатель – Салецкий Александр Михайлович, д.ф.-м.н., проф.

Зам. председателя – Балакиев Владимир Иванович, д.ф.-м.н., проф.

Васильев Андрей Николаевич, д.ф.-м.н.

Уч. секретарь – Косарева Ольга Григорьевна, д.ф.-м.н., доц.

23.06.2022

РУМЯНЦЕВА Ольга Дмитриевна «Методы решения обратных многомерных задач акустического рассеяния и их практические приложения» 01.04.06 – Акустика. Докторская диссертация.

БЕРВАЛЬД Алексей Михайлович «Наноалмазы в суспензиях: лазерная спектроскопия взаимодействий с окружением и поверхностная фотолюминесценция» 01.04.05 – Оптика. Кандидатская диссертация.

МГУ.01.12

Председатель – Федянин Андрей Анатольевич, д.ф.-м.н., проф., проф. РАН

Зам. председателя – Вятчанин Сергей Петрович, д.ф.-м.н., доц.

Кузелев Михаил Викторович, д.ф.-м.н., проф.

Черныш Владимир Савельевич, д.ф.-м.н., проф.

Уч. секретарь – Карташов Игорь Николаевич, к.ф.-м.н.

18.05.2022

ИВАНЕНКО Илья Петрович «Структурные и транспортные свойства sp содержащих углеродных пленок, синтезированных на различных металлических подложках» 01.04.04 – Физическая электроника. Кандидатская диссертация.

КОДИРЗОДА Заъфари Абдуламин «Структура электромагнитного поля и резонансы в высокочастотных емкостных разрядах низкого давления» 01.04.08 – Физика плазмы. Кандидатская диссертация.

МГУ.01.134(МГУ.01.13)

Председатель – Андреев Анатолий Васильевич, д.ф.-м.н., проф.

Зам. председателя – Макаров Владимир Анатольевич, д.ф.-м.н., проф.

Уч. секретарь – Коновко Андрей Андреевич, к.ф.-м.н.

12.05.2022

СОКОЛОВСКАЯ Юлия Глебовна «Лазерная оптико-акустическая диагностика неоднородных коллоидных растворов и композиционных материалов» 01.04.21 – Лазерная физика. Кандидатская диссертация.

МИТЕТЕЛО Николай Викторович «Нелинейно-оптическая спектроскопия микрорезонаторов на основе органических материалов» 01.04.21 – Лазерная физика. Кандидатская диссертация.

19.05.2022

МИГАЛЬ Екатерина Александровна «Генерация лазерной плазмы и нелинейно-оптическое преобразование частоты высокоинтенсивного фемтосекундного излучения ИК диапазона в конденсированных и плотных газовых средах» 01.04.21 – Лазерная физика. Кандидатская диссертация.

САФРОНОВ Кирилл Романович «Диэлектрические микро-структуры для генерации и управления блоховскими поверхностными электромагнитными волнами» 01.04.21 – Лазерная физика. Кандидатская диссертация.

16.06.2022

СТРЕМОУХОВ Сергей Юрьевич «Механизмы генерации произвольно поляризованного излучения в интенсивных лазерных полях» 01.04.21 – Лазерная физика. Докторская диссертация.

29.06.2022

СТЕПАНОВ Евгений Александрович «Формирование предельно коротких импульсов среднего инфракрасного диапазона и их применение для нелинейной спектроскопии полупроводников на основе генерации высших оптических гармоник» 01.04.21 – Лазерная физика. Кандидатская диссертация.

ЯКИМОВ Борис Павлович «Лазерная флуоресцентная спектроскопия эндогенных гетерогенных систем флуорофоров в коже и её применение для биомедицинской диагностики» 01.04.21 – Лазерная физика. Кандидатская диссертация.

МГУ.013.5 (МГУ. 01.18)

Председатель – Перов Николай Сергеевич, д.ф.-м.н., проф.

Зам. председателя – Васильев Александр Николаевич, д.ф.-м.н., проф.

Кашкаров Павел Константинович, д.ф.-м.н., проф.

Уч. секретарь – Шапаева Татьяна Борисовна, к.ф.-м.н.

16.06.2022

СОБОЛЕВ Кирилл Владимирович «Магнитные и транспортные свойства MAX-фазы $(\text{Cr}_{1-x}\text{Mn}_x)_2\text{AlC}$ » 01.04.11 – Физика магнитных явлений. Кандидатская диссертация.

ОМЕЛЬЯНЧИК Александр Сергеевич «MAGNETIC ANISOTROPY OF OXIDE NANOARCHITECTURES» (Магнитная анизотропия оксидных наноархитектур) 01.04.11 – Физика магнитных явлений. Кандидатская диссертация.

БЕЛЯЕВ Виктор Константинович «Магнитные, оптические и магнитооптические свойства магнитоплазменных кристаллов» 01.04.11 – Физика магнитных явлений. Кандидатская диссертация.



К 60-летию научной школы нелинейной оптики в Московском университете и 55-летию открытия спонтанного параметрического рассеяния света

В 2022 г. лазерная физика отмечает два юбилея в своей истории — 60-летие создания Р.В. Хохловым и С.А. Ахмановым всемирно известной научной школы нелинейной оптики в Московском университете и 55-летие одного из наиболее значимых достижений этой школы — открытия спонтанного параметрического рассеяния света (СПР).

Профессор физического факультета МГУ, академик Р.В. Хохлов и американский физик Н. Бломберген по праву считаются основателями нелинейной оптики. В 1981 г. за вклад в лазерную спектроскопию, включающий создание нелинейной оптики, Н.Бломберген получил Нобелевскую премию, возможно, получил бы и Р.В. Хохлов, если бы трагические события при восхождении на пик Коммунизма не оборвали его жизнь в августе 1977 г.

Считается, что нелинейная оптика ведёт свою историю с 1961 г., когда был обнаружен эффект удвоения частоты излучения рубинового лазера [Franken P. A., Hill A. E., Peters C. W., Weinreich G. // Phys. Rev. Lett. 1961. 7. P. 118.]. Однако значительно раньше (в 1950 г.) была зафиксирована нелинейность поглощения (отклонение от закона Бугера) мощного излучения конденсированной искры при его распространении через урановое стекло. Эффект описан в книге С.И. Вавилова «Микроструктура света» и там же введён термин «нелинейная оптика».

Научная школа нелинейной оптики в Московском университете берёт своё начало в 1962 г., когда профессором кафедры теории колебаний Р.В. Хохловым и доцентом кафедры физики СВЧ С.А. Ахмановым была сформирована на физическом факультете группа из сотрудников, аспирантов и студентов этих кафедр, перед которой была поставлена задача ис-

следования нелинейных явлений в оптике, ставших возможными с изобретением лазеров. Особое место в ряду этих эффектов Хохлов и Ахманов отводили параметрической генерации света — созданию устройства (параметрического генератора света, ПГС), обеспечивающего плавную широкодиапазонную перестройку длины волны лазерного излучения. Идея ПГС с перестройкой длины волны излучения была выдвинута ими в 1962 г. в работе [Ахманов С.А., Хохлов Р.В. // ЖЭТФ. 1962. 43. С. 351] и тогда же Н. Кроллом [Kroll N. // Phys. Rev. 1962. 127. P. 1207] (вопросы параметрического усиления и параметрической генерации света обсуждались также в работе Р. Кингстона [Kingston R. // Proc. IRE. 1962. B50. P. 472.], но без указания на возможность создания источника когерентного оптического излучения с перестраиваемой длиной волны). Как неоднократно подчёркивал Р.В. Хохлов, параметрическая генерация рассматривалась как единственный способ перестройки длины волны излучения оптических квантовых генераторов, без чего было бы невозможным применение лазеров в науке и технике (в дальнейшем были изобретены и другие способы перестройки длины волны лазерного излучения, но тогда, в начале 60-х гг. прошлого века, это было так). Задача реализации идеи ПГС решалась одновременно с исследованиями и других нелинейных эффектов в оптике — генерации гармоник, вынужденного комбинационного рассеяния, самофокуси-

ровки, а несколько позже — когерентной антистоксовой рамановской спектроскопии (КАРС), нелинейной лазерной флуориметрии и др., что сформировало новое научное направление — нелинейную оптику. Команда Хохлова–Ахманова успешно работала практически на всех участках этого фронта, тем самым создавая школу нелинейной оптики в Московском университете. Уже в 1964 г. (всего через два года после создания группы!) была опубликована монография «Проблемы нелинейной оптики» (Ахманов С.А., Хохлов Р.В. 1964), в основном, по результатам собственных исследований группы Хохлова–Ахманова. Монография «Нелинейная оптика» будущего Нобелевского лауреата Н. Бломбергена была опубликована позже — в 1965 г. (перевод на русский язык, под редакцией Р.В. Хохлова и С.А. Ахманова, вышел в 1966 г.). В 1965 г. Р.В. Хохлов и С.А. Ахманов организовали первый симпозиум по нелинейной оптике, который прошёл в Белоруссии, на озере Нарочь. Эти симпозиумы, бессменным председателем которых был Р.В. Хохлов, стали проводиться ежегодно — в столицах союзных республик, Ленинграде и Новосибирске, тем самым расширяя и укрепляя научную школу нелинейной оптики, возглавляемую Р.В. Хохловым.

В том же 1965 г. Р.В. Хохлов и С.А. Ахманов оформляют свою группу как новую кафедру — получившую мировую известность кафедру волновых процессов как



Пионеры Нелинейной оптики. Визит Нобелевского лауреата Ч. Таунса в МГУ. В первом ряду (сидят, слева направо): Л.С. Корниенко, Р.В. Хохлов, Ч. Таунс, С.А. Ахманов. Стоят: ученики Р.В. Хохлова и С.А. Ахманова, сформировавшие стартовый состав их команды. Правый крайний во втором ряду — один из ближайших сподвижников Р.В. Хохлова Э.С. Воронин

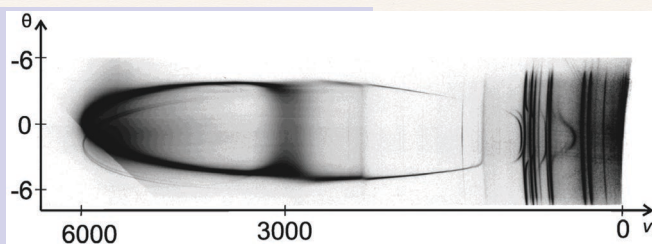
базу формируемой ими учебно-научной школы нелинейной оптики в Московском университете. В 1973 г. С.А. Ахманов занимает позицию заведующего кафедрой общей физики для мехмата, после ухода из жизни её основателя и руководителя Сергея Павловича Стрелкова. Вместе с С.А. Ахмановым перешли на эту кафедру несколько ведущих сотрудников кафедры волновых процессов. С их помощью Сергей Александрович очень быстро переформатировал тематику кафедры общей физики для мехмата на нелинейную оптику. Таким образом, школа нелинейной оптики в МГУ продолжала своё развитие на двух кафедрах. В августе 1977 г. произошла трагедия: в результате драматических событий, разыгравшихся при восхождении группы Р.В. Хохлова на пик Коммунизма, ушёл из жизни Рем Викторович Хохлов. Через несколько месяцев после этого последовала реорганизация двух кафедр, основной тематикой которых была нелинейная оптика, на их базе возникли кафедра квантовой ра-

диофизики (переименованная позже в кафедру квантовой электроники) во главе с академиком Л.В. Келдышем и кафедра общей физики и волновых процессов (ОФиВП) во главе с С.А. Ахмановым. Эти кафедры продолжают успешно, в дружбе и согласии, работать и поныне, постоянно расширяя научную тематику, продолжая развивать школу нелинейной оптики. Её воспитанники работают как на этих кафедрах, так и в других ведущих университетах мира.

Ученые физического факультета внесли огромный вклад в развитие нелинейной оптики, который был отмечен государственными наградами нашей страны. Ленинской премии (высшей награды СССР за научную деятельность) были удостоены С.А. Ахманов, Р.В. Хохлов, А.П. Сухоруков, Государственных премий СССР и РФ — О.А. Акципетров, Э.С. Воронин, Ю.А. Ильинский, П.К. Кашкаров, Д.Н. Клышко, А.И. Ковригин, В.И. Панов, А.Н. Пенин,

В.С. Соломатин, А.П. Сухоруков, В.В. Фадеев. Ломоносовские премии за работы в области нелинейной оптики в разное время присуждались В.А. Алешкевичу, С.А. Ахманову, В.И. Емельянову, В.П. Кандидову, А.В. Козарю, Н.И. Коротееву, В.А. Макарову, А.П. Сухорукову, Р.В. Хохлову, А.С. Чиркину. За эти годы в МГУ было подготовлено большое число специалистов, активно работающих в области нелинейной оптики и лазерной физики в нашей стране и за рубежом. Среди них — лауреат Ленинской премии Н.Ф. Пилипецкий, лауреаты Государственной премии СССР В.Г. Дмитриев, Б.Я. Зельдович, И.Г. Зубарев, А.С. Пискараскас, Т. Усманов. Успехи в воспитании научных кадров отмечены в 2003 г. премией Президента РФ в области образования. Она присуждена Л.В. Келдышу, В.А. Макарову, В.В. Михайлину.

Среди достижений школы особое место занимает открытие спонтанного параметрического рассеяния



Частотно-угловой спектр СПР в кристалле йодноватой кислоты. По горизонтали: волновое число холостой волны, см⁻¹, по вертикали: угол рассеяния в градусах. Рисунок из статьи «Спонтанное параметрическое рассеяние света» (Г.Х. Китаева, А.Н. Пенин, Письма в ЖЭТФ 2005, т. 82, с. 388–394).

света, в котором ключевую роль сыграл профессор кафедры волновых процессов, а затем кафедры квантовой радиофизики/квантовой электроники Давид Николаевич Клышко. Р.В. Хохлов, С.А. Ахманов, Л.В. Келдыш, Д.Н. Клышко — выдающиеся учёные, работы которых определили мировой уровень школы нелинейной оптики в Московском университете.

Открытие принципиально нового вида рассеяния света — спонтанного параметрического рассеяния света (СПР), в процессе исследования параметрических усилителей и генераторов света, имело фундаментальное значение для нелиней-

ной, когерентной оптики. Это подтвердилось и при разработке нового научного направления — квантовой оптики, одним из создателей которого является профессор физического факультета МГУ Давид Николаевич Клышко, а затем и квантовой информатики.

Спонтанное параметрическое рассеяние света основано на трех- или четырехфотонном параметрическом взаимодействии световых волн, в результате которого один или два фотона падающего света спонтанно распадаются на пару фотонов с выполнением условий сохранения энергии и импульса. СПР — спонтанный

аналог вынужденного процесса, генерации комбинационных частот, в частности разностной частоты, за счёт квадратичной (трёхфотонное СПР) или кубической (четырёхфотонное СПР) поляризуемостей. При типичных для лазерной спектроскопии значениях интенсивности лазерного излучения кубичный член разложения поляризации по степеням напряжённости электрического поля световой волны на много порядков меньше квадратичного. Поэтому неудивительно, что в спектроскопии и квантовой оптике оказалось востребованным только трёхфотонное СПР, и когда в литературе используется термин «спонтанное параметрическое рассеяние света», то подразумевается только трёхфотонное СПР.

При фиксированных значениях частоты падающего света («накачки») и угла между волновым вектором волны накачки и оптической осью кристалла каждой паре частот рассеянного излучения соответствует пара волновых векторов рассеянного излучения, т.е. пара углов рассеяния. Весь континуум пар частот образует континуум углов рассеяния. Таким образом, рассеянное излучение имеет строго определённую (условиями синхронизма) частотно-угловую структуру. При этом частоты рассеянного излучения могут меняться в очень широком интервале. Это основное свойство явления, которое вместе с коррелированным образованием пар фотонов («бифотонов») позволяет выделить его в особый вид рассеяния света — СПР.

Причина спонтанного распада фотона на пару фотонов в среде с нелинейной поляризуемостью — вакуумные флуктуации, которые можно охарактеризовать «плотностью энергии», если описывать процесс на языке классической нелинейной оптики. Поэтому можно рассчитать яркость рассеянного излучения. Это и было сделано в 1966 г. сотрудником кафедры волновых процессов Давидом Николаевичем Клышко, теоретически предсказавшим явление СПР [Клышко Д.Н. // Письма в ЖЭТФ 1967. 6, С. 490]. В начале 1967 г. СПР было экспериментально обнаружено на той же кафедре (В.В. Фадеев и О.Н. Чунаев), о чём доложено Ремом Викторовичем Хох-



Авторы открытия СПР (справа налево) Д.Н. Клышко и В.В. Фадеев (крайний слева — студент А. Демидов) у лаборатории лазерного зондирования на борту НИС «Дмитрий Менделеев». Экспедиция в Тихий океан, 1977 г.

ловым (в рамках сводного доклада о параметрической генерации света) на симпозиуме по современной оптике в США в марте 1967. Там же о наблюдении СПР доложили ещё две группы, обе из США. В 1967 г. все три группы опубликовали статьи о наблюдении СПР в ведущих журналах [Ахманов С.А., Фадеев В.В., Хохлов Р.В., Чунаев О.Н. // Письма в ЖЭТФ. 1967. 6. С.575; Harris S.E., Oshman M.K., Byer R.L. // Phys. Rev. Lett. 1967. 18, P. 732; Magde D., Mahr H. // Phys. Rev. Lett. 1967. 18. P. 905]. Таким образом, можно считать, что СПР было одновременно и независимо открыто тремя группами. Поначалу это явление получило название «параметрическая люминесценция», а позже — более правильное «параметрическое рассеяние света». (Отметим, что в англоязычной литературе укоренился термин «Spontaneous Parametric Down Conversion».)

На самом деле за этой сухой информацией кроется цепочка драматических событий, наглядно демонстрирующих, что такое «человеческий фактор» в научной деятельности (см. статью в газе-

те «Советский физик», № 4 (156), с. 11–19, 2022).

В 1974 г. явление СПР было зарегистрировано в качестве открытия, определяемое формулой: «Установлено неизвестное ранее явление спонтанного распада в твёрдом теле одного или двух фотонов падающего света на пару фотонов с другими частотами», № 150 в Госреестре открытий СССР, 1974. Последнее требует пояснений. В Советском Союзе регистрировались не только изобретения, но и открытия (был Комитет по делам изобретений и открытий), причём получить диплом на открытие было не менее престижно, чем получить Государственную премию. В 1973 г. Р.В. Хохлов стал ректором МГУ, и в качестве одной из первых его инициатив был импульс к регистрации наиболее значимых научных достижений сотрудников университета в качестве открытий. В Комитет поступило две заявки на регистрацию открытия спонтанного параметрического рассеяния света — от авторов из МГУ (Д.Н. Клышко, В.В. Фадеев и О.Н. Чунаев) на регистрацию открытия трёхфотонного СПР и группы из пяти авторов из

Ленинградского физико-технического института — четырёхфотонного СПР. Решение, принятое Комитетом, было вполне разумным — объединить заявки в одну и зарегистрировать две разновидности СПР как единое открытие.

Основополагающий вклад в исследование явления СПР и развитие спектроскопии СПР, а затем и методов квантовой оптики, использующих СПР как источник бифотонов, внесла лаборатория профессора А.Н. Пенина.

Итог первых 15 лет исследований СПР и его применений был подведён присуждением Государственной премии СССР [Клышко Д.Н., Пенин А.Н., Фадеев В.В. Диплом о присуждении Государственной премии СССР «За открытие и исследование явления параметрического рассеяния света и его применение в спектроскопии и метрологии, опубликованных в 1966–1981 гг.». 1981].

*В.В. Фадеев,
профессор кафедры
квантовой электроники*



Сотрудники лаборатории СПР кафедры квантовой электроники (1990-е годы). Руководитель лаборатории профессор А.Н. Пенин (второй слева). Ученики Д.Н. Клышко и А.Н. Пенина: Г.Х. Китаева, в настоящее время профессор, руководитель лаборатории (первая слева) и С.П. Кулик, в настоящее время профессор, руководит в МГУ крупным проектом в области квантовых оптических технологий (третий слева).

Бюллетень «НОВОСТИ НАУКИ».
© 2022 Физический факультет МГУ.
Под ред. Н.Н. Сысова, В.Н. Задкова,
А.А. Федянина, Н.Б. Барановой

Дизайн и верстка: И.А. Силантьева

Фотограф С.А. Савкин

Пресс-секретарь физического факультета:
Пчелина Д.И.
di.pchelina@physics.msu.ru

Подписано в печать 20.09.2022. Формат 60×90/8.
Усл.-печ. л. 2,5 Бумага мелованная.
Тираж 150 экз.
Физический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова,
119991, Москва ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

ISSN 2500–2384

