



ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ  
МГУ им. М.В.Ломоносова

# НОВОСТИ НАУКИ

Специальный выпуск к 85-летию  
ФИЗИЧЕСКОГО ФАКУЛЬТЕТА  
Московского государственного университета  
им. М.В. Ломоносова



# МГУ ЗАНЯЛ 27 МЕСТО В РЕЙТИНГЕ QS WORLD UNIVERSITY RANKINGS BY SUBJECT ПО НАПРАВЛЕНИЮ «ФИЗИКА И АСТРОНОМИЯ»

28 февраля 2018 года опубликован список лучших университетов мира по специальностям согласно версии престижного мирового рейтинга QS World University Rankings by Subject. МГУ имени М.В. Ломоносова добился лучших за всю историю показателей в восьмом издании рейтинга QS World University Rankings by Subject, попав в топ-100 лучших вузов мира по четырем из пяти расширенных предметных областей и по 11 отдельным предметам.

Московский университет вошел в топ-20 лучших вузов мира в области точных наук, поднявшись на 18 место в мире в расширенной предметной области «Естественные науки» (40 место в 2017 году). МГУ продемонстрировал значительный рост в области высоких технологий, поднявшись на 76 позицию в мире в расширенной предметной области «Инжиниринг и технологии» (115 место в 2017 году), а в области «Физика и астрономия» занял 27-ю позицию.



Комментируя результаты рейтинга в области «Физика и астрономия», декан физического факультета профессор Николай Сыроев отметил, что результаты рейтинга отражают высочайший уровень исследований сотрудников факультета:

«Мы традиционно входим в топ-30 лучших вузов мира, и, безусловно, в этом заслуга наших ученых. За прошедший год было опубликовано свыше 1300 статей по самым различным направлениям (по данным Scopus). Уникальная особенность физического факультета, в отличие от других вузов физической направленности, состоит в том, что в Московском университете представлена вся физика, начиная от экологии, заканчивая атомной и ядерной физикой».

Факультет занимает одно из лидирующих мест в получении грантов различных фондов, выполнении проектов по целевым программам различных министерств. Тематика исследований полностью отражает современные тенденции развития науки:

«Физики МГУ принимают участие в работе ведущих международных коллабораций, среди которых LIGO, CERN и JUNO, в реализации университетских космических проектов и работ по программе развития Московского университета. МГУ активно работает по реализации программы «Цифровая экономика» по самым различным направлениям сквозных цифровых технологий».

Мы уделяем большое внимание исследованиям в области квантовых технологий, фотоники. Занимаемся разработкой максимально защищенных линий связи между пользователями на основе технологий квантового распределения ключа, в том числе созданием защищенных систем телефонии и шифрования больших потоков данных. Развитием и продвижением этого направления стал проект по созданию первой в России университетской квантовой сети, включенный в программу развития Московского университета. Не могу не отметить, что физический факультет является головной организацией по проектам в области терагерцовой оптоэлектроники и спектроскопии в стране».

## МГУ ЗАНЯЛ 44 МЕСТО В ПРЕДМЕТНОМ РЕЙТИНГЕ GLOBAL RANKING OF ACADEMIC SUBJECTS 2018



В июле был опубликован рейтинг лучших университетов мира Global Ranking of Academic Subjects 2018. Московский университет занял 44 место в предметном рейтинге университетов по направлению «Физика» и стал единственным российским вузом, вошедшим в топ-100.

Результаты рейтинга формировались из пяти параметров: продуктивность научной деятельности, индекс цитирования, количество материалов в ведущих журналах и награды международного уровня.

1	Massachusetts Institute of Technology (MIT)		378.7	90.9
2	University of California, Berkeley		356.2	92.6
3	Stanford University		355.0	80.6
41	University College London		219.3	70.3
43	The Ohio State University - Columbus		217.9	61.3
44	Moscow State University		217.1	81.5
45	Swiss Federal Institute of Technology Lausanne		216.8	62.6

# СОДЕРЖАНИЕ:

- |    |  |    |  |
|----|--|----|--|
| 3  | Из материалов доклада профессора Н.Н. Сысоева на заседании Ученого Совета совместно с Профессорским Собранием (от 27.09.2018 г.) | 38 | Метод создания перепутанных состояний фотонов  |
| 7  | Обнаружение гравитационных волн  | 39 | Изучение констант самодействия полей в секторе Хиггса  |
| 11 | Второе детектирование ГВ от сливающихся черных дыр детекторами LIGO  | 40 | Материалы с нетривиальными топологическими свойствами  |
| 12 | Детекторы LIGO в третий раз зарегистрировали ГВ  | 40 | Суперканал для оптоволоконных систем связи   |
| 14 | Объяснение повышенных шумов гравитационных антенн в проекте LIGO   | 41 | Ограничение на миллиард нейтрино включено в новый перечень основных свойств нейтрино                               |
| 15 | Способ исследования образования бозона Хиггса  | 42 | Удивительные изменения вблизи сверхмассивной черной дыры   |
| 16 | Впервые зарегистрированы ГВ от слияния двух нейтронных звезд   | 43 | Разработаны нанотрубки с бактерицидным эффектом  |
| 19 | Почему результаты нейтронных экспериментов расходятся  | 44 | Создан одноэлектронный транзистор на основе трех атомов фосфора  |
| 20 | Ученые МГУ: чтобы остановить кровотечение, тромбоцит должен «умереть»  | 45 | Электромагнитооптический затвор на доменной границе  |
| 22 | Мощный лазер для генерации рентгеновского излучения  | 46 | Способ управления спиновыми волнами с помощью света  |
| 23 | Созданы оптические элементы для чипов квантового компьютера  | 47 | Систематизированы знания о железосодержащем высокотемпературном сверхпроводнике                                    |
| 24 | Впервые продемонстрирована возможность создания элементов рентгеновской оптики при помощи аддитивных технологий                  | 48 | Новый метод стимуляции нейронов с клеточным пространственным разрешением методами термогенетики                    |
| 25 | Результаты исследования оптических мод наноалмазов   | 50 | Свойства легированных бором наноалмазов  |
| 26 | Экспериментальное исследование эффекта квантового вампира на тепловых состояниях света   | 51 | Способ одновременной диагностики и лечения онкологических заболеваний  |
| 28 | Астрофизики МГУ впервые в мире наблюдали сжимающийся белый карлик  | 52 | Глобальная сеть телескопов-роботов «МАСТЕР» открыла поляризацию собственного оптического излучения гамма-всплесков |
| 29 | Запущен уникальный ускоритель электронов   | 54 | Создан новый мультиферроик   |
| 30 | Новый датчик для марсохода   | 55 | Ученые «наточили» ультразвуковой скальпель   |
| 31 | Создан квантовый генератор случайных чисел   | 56 | Впервые в мире напрямую измерены щели «невозможных» сверхпроводников   |
| 32 | Эффект растяжения игольчатых алмазных кристаллитов   | 58 | В МГУ разработали и успешно протестировали квантовый телефон   |
| 33 | Многослойная и многофункциональная наноструктура   | 59 | Физики МГУ и японские ученые научились замедлять скорость света  |
| 34 | Переливание пациентам искусственных плазмозамещающих растворов может повышать риск тромбозов                                     | 59 | Новые кислородпроводящие соединения  |
| 35 | Анализ спонтанного излучения атомов  | 60 | Уникальные нанокапсулы для адресной доставки лекарств  |
| 36 | Предсказано существование короткоживущего тетранейтрона с беспрецедентными свойствами  | 62 | «Супергерои» среди материалов для сверхбыстрой передачи информации   |
|    |  | 63 | Контроль прочности фталонитрильных полимерных матриц   |

- |   |   |
|---|---|
| <p>64 Выращены алмазы игольчатой и нитевидной форм и исследованы их полезные свойства</p> <p>66 Чип, который может заменить сложную лазерную установку</p> <p>67 Впервые в мире физики смогли контролировать движения электронов с точностью до миллиардной доли секунды</p> <p>68 Российский университетский спутник «Ломоносов»: 5 месяцев полета</p> <p>73 Университетский спутник «Ломоносов» ищет самые мощные ускорители во Вселенной</p> <p>74 Создана основа для высоко-чувствительных газовых датчиков</p> <p>77 Исследование древообразных полимеров из кремния и кислорода</p> <p>79 Уточнен квантовый предел гравитации</p> <p>80 Наноматериал для управления светом</p> <p>81 Впервые получены и с высокой точностью измерены тепловые состояния света с отщеплением 10 фотонов</p> <p>82 Впервые экспериментально подтвердили обратное терагерцевое излучение</p> | <p>83 Модель органической солнечной батареи</p> <p>84 Обнаружен новый механизм нарушения симметрии при ионизации атома</p> <p>85 Предсказано существование новых тетракварков</p> <p>86 Оценка изменения потоков космических лучей</p> <p>87 Исследование процесса превращения диэлектрика в проводник</p> <p>88 Нано-преобразователи света</p> <p>89 На кафедре квантовой электроники продемонстрирована работа «квантового вампира» для классических тепловых состояний света</p> <p>90 Способ диагностики синдрома сухого глаза</p> <p>91 Академик Прохоров Александр Михайлович (1916–2002)</p> <p>93 Мой первый и последний учитель. Воспоминания об академике, лауреате Нобелевской премии А.А. Абрикосове (1928–2017 гг.)</p> <p>97 Из фондов музея физического факультета МГУ</p> |
|---|---|



# ИЗ МАТЕРИАЛОВ ДОКЛАДА ДЕКАНА ФИЗИЧЕСКОГО ФАКУЛЬТЕТА ПРОФЕССОРА Н.Н. СЫСОЕВА НА ЗАСЕДАНИИ УЧЕНОГО СОВЕТА СОВМЕСТНО С ПРОФЕССОРСКИМ СОБРАНИЕМ (от 27.09.2018 г.)

На пороге своего 85-летия физический факультет Московского университета активно развивается, продолжая лучшие традиции отечественной науки и образования.

Это подтверждается результатами международных рейтингов.

Подготовка кадров для научной деятельности начинается с работы со школьниками, которой на факультете уделяется большое внимание.

Это позволяет поддерживать конкурс на достаточно высоком уровне. Количество поданных абитуриентами заявлений растет.



Поступивших без вступительных испытаний стало больше и больше стало абитуриентов, поступивших с льготами по олимпиадам, а это наиболее подготовленная и целеустремленная часть поступающих.

Аспиранты факультета — это самое молодое и очень активное звено научных исследователей. В аспирантуру факультета каждый год зачисляет-

ся около 100 человек. Подавляющее большинство (порядка 96 %) поступающих — выпускники факультета. В 2017 г. впервые в аспирантуру факультета поступали выпускники магистратуры. На факультете в среднем обучается 280 аспирантов. Обучение длится 4 года по всем специальностям, кроме специальностей направления «Науки о Земле», по которым аспиранты обучаются 3 года.

## Учебная работа факультета

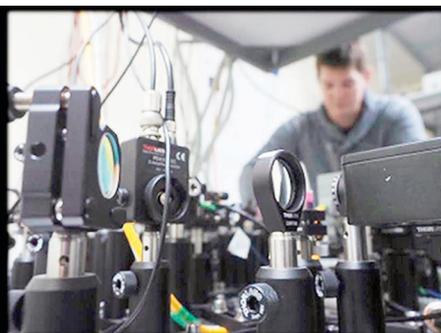
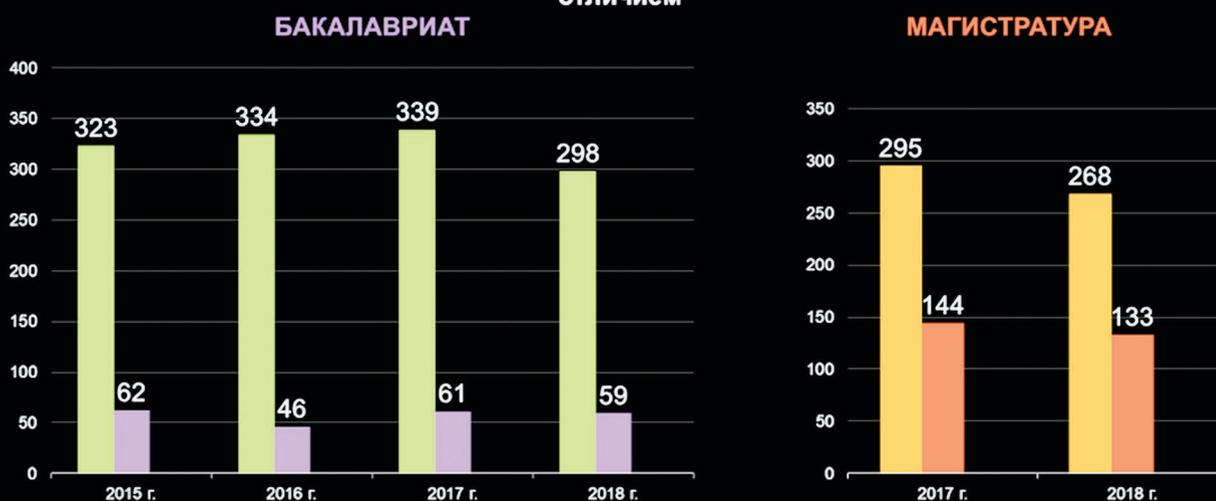
Прием и выпуск студентов



380 студентов зачисляются на 1 курс факультета по программам Бакалавриата

более 260 поступает в магистратуру ежегодно

Соотношение общего числа выпускников и числа выпускников, получивших диплом с отличием



## Учебная работа факультета

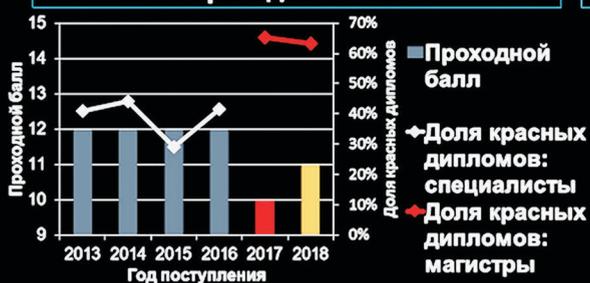
Аспирантура

280 аспирантов обучаются на факультете  
70 выпускается из аспирантуры ежегодно

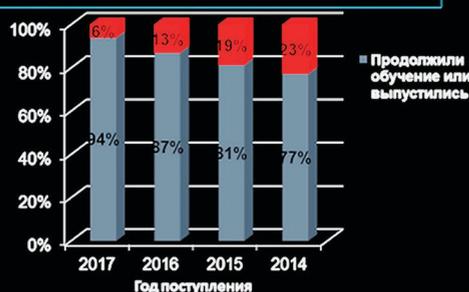
172 спецкурса в осеннем семестре  
126 спецкурсов в весеннем семестре

Обучение длится 4 года по всем специальностям, кроме специальностей направления «Науки о Земле», по которым аспиранты обучаются 3 года.

Поступление в аспирантуру:  
проходной балл



Выпуск аспирантов



Аспирантура традиционно на физическом факультете считается преимущественно научной деятельностью, многие аспиранты ведут научную работу в том числе в кооперации с зарубежными коллегами из ведущих университетов мира — США, Германии, Великобритании, Японии, Франции, Италии и др. стран.

В настоящее время в университете действует 92 диссертационных совета МГУ, примерно 10 % которых работает на физическом факультете.

За время работы новых диссертационных советов (2017–2018 гг.) было защищено 54 диссертации. Из них 6 докторских и 48 кандидатских.



Современной тенденцией является оценка работы научной организации по количеству публикаций ее сотрудников и их цитированию. Видно, что ежегодно публикационная активность факультета возрастает — количество статей в престижных международных журналах увеличилось примерно на 30 % и наблюдается рост суммарного импакт-фактора сотрудников факультета.

Факультет активно развивает издательскую деятельность. «Вестник Московского университета. Физика. Астрономия» издаётся шесть раз в год, переводится на английский язык и распро-

страняется онлайн издательством на платформе Springer. индексируется во всех основных библиографических базах, включая Web of Science, Scopus и РИНЦ. Он единственный из серии журналов «Вестник Московского университета» имеет импакт-фактор, который при этом постоянно растёт.

Начиная с 2013 года, на физическом факультете издаётся бюллетень «Новости науки», выпускаемый два раза в год на русском и английском языках. Бюллетень размещается на сайте физического факультета в разделе «Наука», рассылается по научным и образовательным учрежде-

## Издательская деятельность и публикационная активность



### Вестник Московского Университета. Серия 3. Физика. Астрономия

Журнал издаётся шесть раз в год, переводится на английский язык и распространяется онлайн издательством на платформе Springer. Журнал индексируется во всех основных библиографических базах, включая Web of Science, Scopus и РИНЦ.

Единственная серия Вестника Московского университета, которая имеет импакт-фактор:

год	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
IF	0,199	0,225	0,200	0,250	0,281	0,448	0,506

ниям России и раздается гостям Дней открытых дверей и Фестивалей науки в Московском университете.

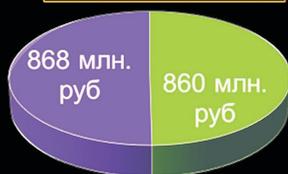
Финансирование физического факультета осуществляется за счет бюджетных и внебюджетных источников. Внебюджетное финансирование формируется главным образом из средств, полученных при выполнении НИР и ОКР, а также от платного обучения.

Соотношение между источниками финансирования существенно изменилось за последние годы. Стоит заметить, что в 2017 году объём средств, полученных из внебюджетных источников, даже немного превысил средства от бюджетного финансирования.

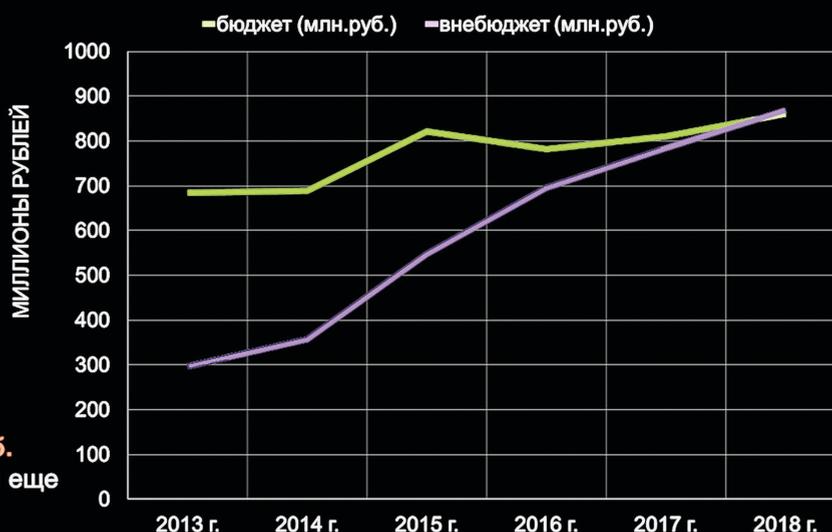
## Финансирование физического факультета



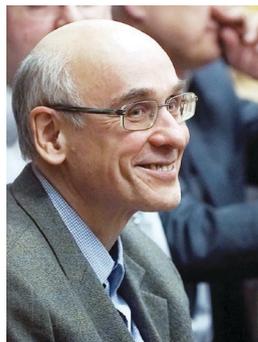
Распределение средств в 2017 году



В 2018 году за 9 месяцев получено **561,225 млн. руб.**  
До конца года планируется еще порядка **500,000 млн. руб.**



# ОБНАРУЖЕНИЕ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН



Проф. Ф.Я. Халили

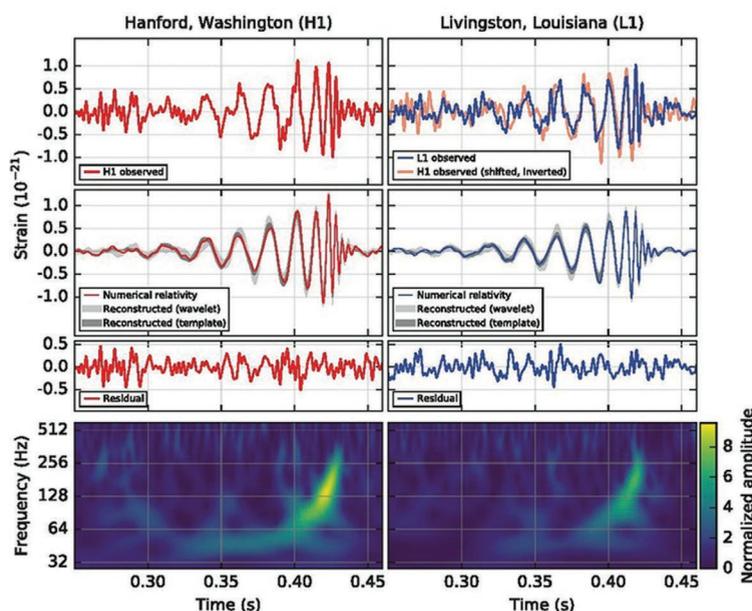


Проф. М.Л. Городецкий



Ассистент Л.Г. Прохоров

11 февраля 2016 года на пресс-конференции в Вашингтоне ученые объявили об обнаружении гравитационных волн, существование которых еще 100 лет назад предсказал Альберт Эйнштейн. В этом крупнейшем научном открытии принимали активное участие исследователи физического факультета МГУ. До последнего времени научную группу возглавлял член-корреспондент РАН Владимир Борисович Брагинский — всемирно известный ученый, один из пионеров гравитационно-волновых исследований. Кроме профессора В.Б. Брагинского в состав этой научной группы и в число соавторов научного открытия входят профессора кафедры физики колебаний И.А. Биленко, С.П. Вятчанин, М.Л. Городецкий, В.П. Митрофанов, Ф.Я. Халили, доцент С.Е. Стрыгин и ассистент Л.Г. Прохоров. Неоценимый вклад в проведение исследований внесли студенты, аспиранты и технический персонал кафедры.



Первый зафиксированный гравитационный сигнал



Проф.  
Владимир Борисович  
Брагинский



Проф. С.П. Вятчанин



Проф. В.П. Митрофанов

## Из истории открытия гравитационных волн

Гравитационные волны впервые были обнаружены в США 14 сентября 2015 года в 9:51 утра по всемирному времени. Их зафиксировали два детектора Лазерной интерферометрической гравитационно-волновой обсерватории (LIGO): первый расположен в Ливингстоне, штат Луизиана, второй — в Хэнфорде, штат Вашингтон. Работу обсерватории и анализ получаемых данных обеспечивает научная коллаборация LSC — коллектив в составе более 1000 ученых из научных центров Соединенных Штатов и 14 других стран, включая Россию, которую пред-



Доц. С.Е. Стрыгин



Проф. И.А. Биленко

ставляют две научные группы: из МГУ имени М.В. Ломоносова (Москва), а также из Института прикладной физики РАН (Нижний Новгород). Сообщение о регистрации гравитационных волн было опубликовано в журнале *Physical Review Letters*, 116, 061102 (2016).

На основании полученных сигналов ученые LIGO пришли к выводу, что обнаруженные гравитационные волны были вызваны слиянием двух черных дыр, которые образовали одну, более массивную вращающуюся черную дыру. Ранее возможность столкновения черных дыр предсказывалась теоретиками, но никогда раньше такое событие не наблюдалось. Сливающиеся черные дыры имели массы в 29 и 36 раз больше массы Солнца. На финальной стадии слияния они двигались со скоростью около половины скорости света, а само событие произошло 1,3 миллиарда лет назад. За доли секунды примерно три солнечных массы превратились в гравитационные волны. На Земле они вызвали относительные колебания пар пробных масс, разнесенных на 4 км, с амплитудой около 10–19 м. Это чрезвычайно малое изменение расстояния между пробными массами и было зарегистрировано интерферометрическими гравитационно-волновыми детекторами LIGO. Детектор в Ливингстоне записал событие на 7 миллисекунд раньше, чем детектор в Хэнфорде. На этом основании ученые определили, что источник был расположен в южном полушарии небесной сферы.

Открытие гравитационных волн имеет огромное значение для современной науки. Начинается новая эра: ученые могут уже не только видеть, но и слышать далекую Вселенную (гравитационно-волновые детекторы принимают сигналы в диапазоне звуковых волн). Несомненно, это может решить многие загадки мироздания.

*Справочно:*

В 1915 году Альберт Эйнштейн предложил Общую Теорию Относительности (ОТО), в которой гравитация трактовалась как искривление пространства-времени. Причиной такого искривления является наличие некой материи, в том числе небесных тел. В качестве простейшей аналогии можно рассмотреть резиновую пленку, натянутую на горизонтальный обруч. Если пускать по пленке маленькие шарики, они будут двигаться по прямой линии. Это аналог плоского пространства. Если же в центре обруча положить массивное яблоко, оно нарушит, «искривит» ровную поверхность пленки. Если после этого пускать по пленке маленькие шарики, то они будут двигаться уже не по прямой, а по дуге, по «кривой» линии. Подчеркну, это не объяснение, а всего лишь грубая аналогия.

Из уравнений ОТО Эйнштейн получил решение, соответствующее гравитационным волнам (ГВ). Однако было ясно, что обнаружить их вряд ли удастся из-за чрезвычайной слабости гравитационного взаимодействия. Образно говоря, ГВ – это летящие кусочки кривизны пространства-времени.

Напомню, что уравнения Джеймса Максвелла, предсказывающие электромагнитные волны, были получены в 1864 г., а экспериментально они были обнаружены Генрихом Герцем лишь двадцать лет спустя (в 1885 г.). Возможность передачи информации с их помощью (радио) была продемонстрирована Александром Поповым еще на 20 лет позже (1905 г.). Поэтому обнаружение значительно более слабых гравитационных волн всего лишь через сто лет (!) после формулировки ОТО можно рассматривать как чудесный подарок Альберту Эйнштейну.

Опыт Герца по обнаружению электромагнитных волн предполагал наличие излучателя и передатчика в лаборатории. Но такую схему типа передатчик-приемник нельзя применить для гравитационных волн – опять же из-за их слабости. Поэтому, все, что нам остается – надеяться на регистрацию ГВ от космологических катастроф: взрывов сверхновых звезд, слияния черных дыр, нейтронных звезд и пр. Кстати, в 1993 г. Р. Халс и Дж. Тейлор получили Нобелевскую премию за открытие ГВ по изменению частоты вращения двойной звезды, которое хорошо описывалось в рамках ОТО как потеря энергии на излучение ГВ. Но следует подчеркнуть, это было лишь косвенное подтверждение ГВ, сами волны еще не были зарегистрированы.

В настоящее время уже работают усовершенствованные антенны второго поколения: Advanced LIGO. Это сложнейшие и уникальные инженерные сооружения. Достаточно сказать, что они измеряют смещение двух зеркал (пробных масс), расположенных на расстоянии 4 км, с невероятной точностью – около  $10^{-19}$  м. Чтобы это проиллюстрировать, напомним известный пример: если Землю уменьшить до размеров апельсина, а апельсин уменьшить во столько же раз, то получится размер атома. Если же во столько раз уменьшить атом, как мы уменьшили Землю, получим размер  $10^{-19}$  м.

Интересно, что эта точность соответствует квантовым ограничениям для непрерывного измерения, называемым Стандартным Квантовым Пределом (СКП). Таким образом, если Advanced LIGO достигнет СКП (а может, и превзойдет) то мы получим еще и квантовый прибор! Причем весьма макроскопический – 4 км.

Первая попытка экспериментального обнаружения гравитационных волн была предпринята примерно через 50 лет после предсказания их существования Альбертом Эйнштейном. Проблема состоит в том, что гравитационные волны, даже порожденные катастрофами вселенского масштаба, на Земле вызывают чрезвычайно слабый отклик. Первые эксперименты по фиксации гравитационных волн, поставил американский физик Джозеф Вебер. В качестве детектора он использовал 1,5 тонный алюминиевый цилиндр с пьезодатчиками, регистрирующими деформирование цилиндра под действием гравитационной волны. В 1969 году он объявил об обнаружении гравитационных волн. Профессор В.Б. Брагинский был первым, кто создал гравитационно-волновой детектор на кафедре физики колебаний физического факультета МГУ, проверил и не подтвердил результаты Вебера о детектировании сигналов гравитационных волн. Но хотя попытка Вебера оказалась неудачной, она положила начало исследованиям по созданию гравитационно-волновых детекторов. Сначала это были

детекторы Веберовского типа, но более совершенные. Здесь ключевым моментом являлось достижение максимальной добротности для механических мод колебаний цилиндра – детектора, а также его охлаждение, что позволяло значительно уменьшить тепловой шум. Было экспериментально продемонстрировано, что такие материалы, как сапфир и кремний, позволяют получить лучшие значения механической добротности, чем алюминий. Однако создание более чувствительных детекторов этого типа в различных лабораториях мира не привело к обнаружению гравитационных волн. В это же время В.Б. Брагинский начал развивать теорию квантовых измерений. Он сформулировал концепции стандартного квантового предела чувствительности и квантово-невозмущающих измерений и вместе с коллегами применил теорию квантовых измерений для анализа чувствительности гравитационно-волновых детекторов. В 80-х годах XX века Калифорнийский технологический институт и Массачусетский институт технологий в США приступили к созданию лазерных интерферометрических гравитационно-волновых детекторов с расстоянием между пробными массами, сначала 10 м, затем 40 м. Позднее в рамках проекта LIGO были созданы четырехкилометровые современные детекторы гравитационных волн. Поскольку сигнал от гравитационных волн пропорционален расстоянию между пробными массами, переход к интерферометрическим детекторам с длинной базой позволил существенно увеличить их чувствительность. В.Б. Брагинский вместе со своей научной группой сразу включился в работу по созданию интерферометрических детекторов. Полномасштабные детекторы первого поколения, создание которых началось в 1992 г., не смогли обнаружить гравитационные волны. Только на более совершенных детекторах Advanced LIGO были обнаружены гравитационные волны от слияния двух черных дыр.

Основой лазерного детектора гравитационных волн является интерферометр Майкельсона. Излучение лазера разделяется на два перпендикулярных луча, которые, отражаясь от зеркал, расположенных на расстояниях в 4 км от светоделителя, возвращаются и попадают на фотоприемник. Сигнал на его выходе зависит от разности фаз в лучах, которая, в свою очередь, зависит от разности пройденных ими путей. Чтобы увеличить набег фазы в каждом плече установлены дополнительные зеркала, образующие резонаторы Фабри-Перо. Можно сказать, что лучи 300 раз пробегают 4 километра в каждом направлении, прежде чем попадают в фотоприемник. Диапазон частот, которые регистрируют детекторы LIGO, составляет от 10 Герц до нескольких килогерц (по совпадению, звуки именно с такими частотами воспринимает человеческий слух). Необходимо измерять очень малые колебания зеркал в этом диапазоне. Это означает, что основной проблемой при разработке детектора является снижение всех видов шумов, которые могут маскировать или имитировать полезный сигнал. Шумы имеют различную природу. Среди них колебания земной поверхности, вызванные сейсмическими возмущениями и антропогенными факторами, на много порядков большей той величины, которую необходимо измерить. Поэтому зеркала подвешиваются на сложном, многоступенчатом фильтре, подавляющем эти колебания. Лучи света распространяются внутри труб, где поддерживается глубокий вакуум. Поскольку свет имеет квантовую природу и состоит из отдельных частиц – фото-

нов, существует особый вид флуктуаций – фотонный дробовой шум. Для уменьшения его влияния необходимо увеличивать интенсивность света в интерферометре. В детекторах второго поколения, которые используются сейчас, мощность лазера составляет от 15 до 100 Ватт, а эффективная мощность внутри интерферометра, с учетом накопления в резонаторах и использования так называемой рециркуляции света, достигает одного мегаватта! Важнейшим фактором, ограничивающим чувствительность, является Бруновский шум – результат теплового движения атомов и молекул. Для его снижения были разработаны монолитные кварцевые подвесы зеркал, обладающие большой механической добротностью. В целом детектор – чрезвычайно сложное устройство, в котором использованы уникальные компоненты, в том числе созданные специально для него в различных лабораториях мира. Достаточно сказать, что покрытие зеркал таково, что из каждого миллиона падающих на них фотонов теряется лишь один, что настройку положения зеркал и других оптических элементов обеспечивают более 5000 следящих систем, а для обработки поступающей информации (порядка 1 терабайта в сутки) задействованы тысячепроцессорные кластеры и глобальная распределенная вычислительная сеть.

С самого начала основные усилия ученых физического факультета МГУ были направлены на исследование условий достижения предельной чувствительности гравитационно-волновых детекторов, определение фундаментальных квантовых и термодинамических ограничений чувствительности, на разработку новых методов измерений. Теоретические и экспериментальные исследования российских ученых нашли свое воплощение при создании детекторов нового поколения, позволивших непосредственно наблюдать гравитационные волны от слияния черных дыр. Из конкретных достижений научной группы можно отметить следующие.

Кварцевые пробные массы, они же зеркала интерферометра, в детекторах первого поколения были подвешены на стальных проволоках. Такие подвесы не позволяли достигнуть минимальных потерь энергии для собственных мод упругих колебаний пробной массы и колебаний ее центра масс. Согласно флуктуационно-диссипационной теореме, это необходимо для снижения теплового шума пробных масс. Кроме того, в них возникали крайне нежелательные дополнительные избыточные шумы. В группе В.Б. Брагинского был разработан монолитный подвес из плавленого кварца и экспериментально продемонстрировано, что время затухания маятниковых колебаний кварцевой пробной массы составляет около 5-ти лет, что соответствует добротности  $1,8 \times 10^8$ . Квасимонолитный кварцевый подвес пробных масс в детекторах Advanced LIGO – это сложнейшая 4-х ступенчатая конструкция, но все начиналось с простых моделей, исследованных в лаборатории кафедры физики колебаний.

Другим источником шума в гравитационных антеннах является дрожание поверхности зеркал. Долгое время с момента предварительных оценок чувствительности антенн предполагалось, что единственным и главным источником такого дрожания являются броуновские флуктуации пробных масс, на которые и нанесены отражающие покрытия. Существенно уменьшить вклад таких флуктуаций на низких частотах гравитационного сигнала можно, изготавливая пробные массы из высококачественного материала, имеющего максимально возможную добротность собственных акустических колебаний. Поэтому для антенн Advanced LIGO планировалось перейти от использовавшегося ранее плавленого кварца к высокочистому лейкосапфиру ( $Al_2O_3$ ). Разработки таких зеркал уже шли полным ходом, когда мы в нашей группе решили посмотреть, какие еще физические процессы приводят к появлению дрожания поверхности. Строгий расчет из первых принципов показал, что один из механизмов, связанный с термодинамическими флуктуациями температуры в объеме кристаллического материала (термоупругий шум), приводит к флуктуациям на поверхности много большим, чем броуновские не только в сапфире, но и в плавленом кварце. Эта работа произвела эффект разорвавшейся бомбы, и проект пришлось переключать на ходу, возвращаясь к кварцевым зеркалам. В дальнейшем выяснилось, что такая простая система – диэлектрический цилиндр с отражающим покрытием, порождает целый зоопарк различных фундаментальных квантовых, термодинамических и других избыточных шумов – их больше десятка. В частности, оказалось, что самым сильным шумом зеркал является не броуновский шум самой пробной массы, а шум тонкого многослойного диэлектрического отражающего покрытия. Вопросами оптимизации такого покрытия мы тоже серьезно занимались.

Еще одна проблема, над решением которой работала научная группа в последнее время, связана с электростатическими зарядами, которые всегда присутствуют на кварцевых пробных массах. Их источником являются любые контакты пробной массы с другими объектами, процессы десорбции газов, космические лучи и пр. Заряды взаимодействуют с окружающими пробную массу телами и электрическими полями, создавая дополнительную флуктуационную силу. Важными факторами снижения шумов, связанных с электростатическими зарядами, является уменьшение их количества и увеличение времени релаксации зарядового распределения. В наших экспериментах оно достигало 3-х лет. Летом 2015 года Л.Г. Прохоров вместе с американскими коллегами исследовал поведение зарядов на пробных массах детектора LIGO в Хэнфорде.

Ими был установлен оптимальный режим работы электростатических актюаторов, используемых для подстройки положения пробных масс – зеркал интерферометра.

Одним из важных достижений группы также является предсказанный в 2001 году В.Б. Брагинским эффект параметрической колебательной неустойчивости. В схемах гравитационно-волновых интерферометров Advanced LIGO для увеличения чувствительности предполагается уменьшить механический шум зеркал и увеличить мощность, циркулирующую в плечах интерферометра, вплоть до значения  $W = 830$  кВт. Однако большие значения циркулирующей мощности вместе с малыми механическими потерями в зеркалах могут привести к нежелательному нелинейному эффекту параметрической колебательной неустойчивости.

Параметрическое взаимодействие между двумя оптическими модами Фабри-Перо резонатора (мода накачки и стоксовая мода) и механическим осциллятором (собственные колебания зеркал) приводит к появлению параметрической неустойчивости. При существовании малых колебаний в стоксовой оптической моде возникает пондеромоторная сила, действующая на подвижное зеркало на разностной частоте, которая резонансно “раскачивает” механические колебания. С другой стороны, малые механические колебания зеркала благодаря эффекту Доплера приводят к появлению отраженных от зеркала волн с комбинационными частотами, одна из которых резонансно возбуждает колебания в оптической стоксовой моде. Очевидно, что при увеличении мощности накачки указанные механизмы будут приводить к дополнительной перекачке энергии. В соответствии с соотношениями Мэнли-Роу, энергия от волны накачки будет передаваться оптической стоксовой и механической модам. Данный эффект может рассматриваться как внесение отрицательного затухания, поэтому при достижении некоторого порогового значения мощности накачки возникнет параметрическая неустойчивость. Из-за несимметричности распределения оптических мод относительно моды накачки эффект одновременного возбуждения антистоксовой моды не полностью подавляет эффект параметрической неустойчивости.

Для интерферометра с планируемой циркулирующей мощностью в плечах были разработаны методы эффективного подавления параметрической неустойчивости. Определены условия параметрической колебательной неустойчивости в гравитационно-волновых детекторах на упругих модах пробных масс. Рассчитаны с высокой точностью собственные частоты и пространственные распределения вектора смещений упругих мод, используя метод суперпозиции, и определены комбинации упругих и оптических стоксовых

мод, приводящие к параметрической колебательной неустойчивости в гравитационно-волновых интерферометрах.

В 2015 году эффект параметрической колебательной неустойчивости был экспериментально обнаружен в гравитационно-волновом детекторе Advanced LIGO, полностью подтвердив все теоретические расчеты группы ученых с физического факультета МГУ.

История гравитационно-волновой астрономии с самого начала была тесно связана с развитием методов макроскопических квантовых измерений. Чувствительность первых резонансных твердотельных детекторов гравитационных волн (конец 60-х — начало 70-х годов) составляла примерно ~100 аттометров. В последующие 20 лет она была улучшена примерно на два порядка, до ~1 аттометра. Эта величина была уже не столь далека от амплитуды квантовых нулевых колебаний механических мод этих детекторов, для типичных “поздних” детекторов составлявшей, по порядку величины примерно 0.01 аттометр.

Необходимость дальнейшего повышения чувствительности детекторов гравитационных волн, по крайней мере, на несколько порядков величин была очевидна уже тогда, что инициировало интерес к исследованию квантовых ограничений в экспериментах с макроскопическими механическими объектами, а также к поиску методов обхода этих ограничений. В 1968 году В.Б. Брагинским было показано наличие так называемого Стандартного Квантового Предела (СКП) для точности измерений, являющегося прямым следствием соотношения неопределенности Гейзенберга и для частного случая гармонического осциллятора совпадающего с амплитудой его нулевых колебаний. Поиск методов обхода этого предела привел к публикации двух пионерских работ, где были предложены идеологически близкие, но различные по реализации схемы измерений, позволяющих преодолеть СКП. Авторами первой был В.Б. Брагинский и его коллеги по группе, второй — один из будущих основоположников проекта LIGO Кип Торн и его коллеги.

Эти ранние работы не получили тогда прямого экспериментального продолжения в силу ограниченных возможностей тогдашних технологий, а главное, из-за того, что развитие детекторов гравитационных волн пошло другим путем. В начале 80-х годов было начато проектирование, а в 90-е — строительство лазерных интерферометрических детекторов, обладавших, при той же примерно точности измерений механических смещений, гораздо более высокой чувствительностью к гравитационным волнам в силу просто гораздо большего их размера — километры по сравнению с метрами у твердотельных детекторов. Чувствительность по смещению детекторов Advanced LIGO сейчас в несколько раз хуже его СКП, примерно равного 0.06 аттометра. Следует подчеркнуть, что при этом чувствительность к гравитационным волнам у Advanced LIGO на несколько порядков выше, чем у лучших твердотельных детекторов.

Проектная чувствительность детекторов Advanced LIGO, которая должна быть достигнута в ближайшие годы, практически соответствует СКП. Следующие итерации Advanced LIGO, как и другие будущие детекторы, должны превзойти этот предел. Единственным альтернативным методом является дальнейшее увеличение длин плеч интерферометров до десятков километров; перспективы такого подхода сомнительны в силу финансовых соображений. Развитие методов квантовых измерений, теперь уже для лазерных интерферометров, началось в Московской группе еще в 90-е годы. Из двух известных сейчас основных вариантов схем лазерных интерферометров, не ограниченных СКП, первая — так называемый квантовый измеритель скорости — была предложена Московской группой а вторая — интерферометр с дополнительными фильтрующими резонаторами — при ее активном участии.

В настоящее время Московская группа является общепризнанным лидером в области квантовых измерений для лазерных детекторов гравитационных волн и продолжает активную деятельность в этой области.

## ВТОРОЕ ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН ОТ СЛИВАЮЩИХСЯ ЧЕРНЫХ ДЫР ДЕТЕКТОРАМИ LIGO

15 июня 2016 года в 20 часов 15 минут по московскому времени в ходе пресс-брифинга, проходившего в Москве (ГАИШ МГУ) и Сан-Диего

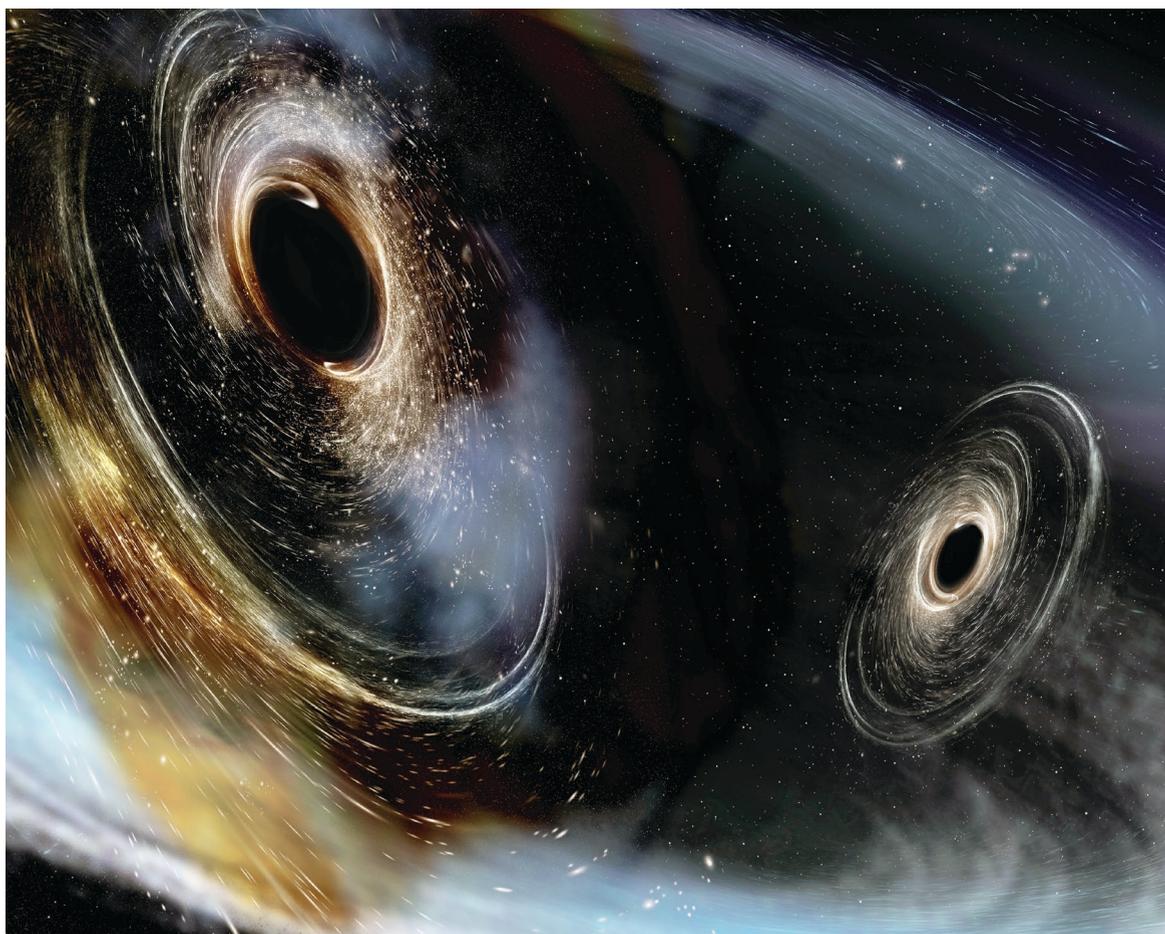
(Американское астрономическое общество) было объявлено, что 26 декабря 2015 года ученые во второй раз обнаружили гравитационные волны.

Волны были зарегистрированы обоими детекторами Лазерной интерферометрической гравитационно-волновой обсерватории (LIGO — Laser Interferometric Gravitational-Wave Observatory)

Исследования в LIGO осуществляются в рамках научной коллаборации LIGO (LSC — LIGO Scientific Collaboration), коллективом из более

1000 ученых из университетов в Соединенных Штатах и 14 других стран. Физический факультет МГУ представлен группой член.-корр. РАН В.Б. Брагинского, в которую входят профессор В.П. Митрофанов, И.А. Биленко, С.П. Вятчанин, М.Л. Городецкий, Ф.Я. Халили, доцент С.Е. Стрыгин и ассистент Л.Г. Прохоров.

## ДЕТЕКТОРЫ LIGO В ТРЕТИЙ РАЗ ЗАРЕГИСТРИРОВАЛИ ГРАВИТАЦИОННЫЕ ВОЛНЫ



Вращающиеся черные дыры.

Гравитационный сигнал был зарегистрирован на двух детекторах LIGO в США. Ученые сообщают, что ни один из экспериментов по детектированию гравитационных волн не опроверг общую теорию относительности Эйнштейна. Особенность слившейся пары черных дыр, зарегистрированной LIGO в третий раз, заключается в том, что по крайней мере у одной черной дыры из пары собственный момент вращения, спин, не со-

впадает по направлению с полным моментом орбитального движения пары. Это говорит в пользу гипотезы, что черные дыры, составляющие пару, образовались далеко друг от друга. Результаты описаны в новой статье, опубликованной в журнале *Physical Review Letters*.

Детекторы Лазерно-интерферометрической гравитационно-волновой обсерватории (LIGO) в третий раз зарегистрировали гравитационные

волны, подтвердив, что новый канал получения астрофизической информации вступил в действие. Как и в первых двух случаях, волны были порождены столкнувшимися черными дырами, в результате слияния которых образовалась новая черная дыра с массой, составляющей около 49 солнечных масс. В предыдущих двух зарегистрированных событиях массы образовавшихся черных дыр составили 61 и 21 масс Солнца соответственно, которые расположены на расстоянии 1,3 и 1,4 миллиарда световых лет от Земли. В случае третьего события источник находился на расстоянии около 3 миллиардов световых лет. Энергия, выделяющаяся при слиянии этих черных дыр, превышает световую энергию, излучаемую за это же время всеми звездами и галактиками во Вселенной.

«Интересно то, где находились черные дыры во время столкновения, а это было миллиарды лет назад. Если в первых зарегистрированных событиях они находились на расстояниях 1,3–1,4 млрд световых лет, то в третьем событии — около 3, примерно в два раза дальше. Два детектора в США зафиксировали сигналы, между которыми есть небольшой временной сдвиг, около 3 миллисекунд, который дает информацию о направлении, откуда пришел этот сигнал. В целом, природа всех трех событий одинаковая: слияние двух черных дыр», — сообщает профессор физического факультета МГУ, доктор физико-математических наук Валерий Митрофанов.

«Масса черной дыры определяется по форме гравитационного сигнала. По частоте вращения возможно оценить расстояние между ними, а значит, и размеры, — комментирует соавтор исследования Сергей Вятчанин, заведующий кафедрой физики колебаний физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова. — Ученые хотят выжать из этих трех сигналов от гравитационных волн максимум возможного. В том числе посмотреть, как соотносятся эти сигналы, нет ли нарушений общей теории относительности по этим событиям».

В результате анализа сигналов, зарегистрированных детекторами обсерватории LIGO, было обнаружено, что с большой вероятностью у вновь обнаруженной пары черных дыр направления собственного вращения (спины) не совпадают, то есть они вращаются в разных направлениях, а значит, эти объекты, по-видимому, сформировались в плотном звездном скоплении отдельно друг от друга, а уже затем образовали двойную систему.

«Теоретики, тоже работающие в коллаборации LIGO, научились более точно говорить о направлении собственного вращения (спине) черных дыр. Они вращаются и вокруг своей оси, и относительно друг друга, около общего центра

масс. И в этом третьем событии регистрации гравитационных волн очень внимательно исследовался процесс собственного вращения черных дыр. Было показано, что вообще оси вращения у них не совпадают. Это позволяет говорить в пользу гипотезы образования этих черных дыр, предполагающей, что сначала они были как бы отдельно в звездном скоплении, каждая черная дыра образовалась сама по себе, а потом они подошли близко друг к другу, образовали двойную систему и, наконец, столкнулись и слились. Есть альтернативная гипотеза, говорящая о том, что две черные дыры образовались из двойной системы звезд. Но в этом случае более вероятно, что направления собственного вращения (спина) были бы одинаковые», — объясняет Валерий Митрофанов.

Один из важных вопросов, относящихся к распространению гравитационных волн: проявляют ли они дисперсию, то есть зависит ли их скорость распространения волн от их частоты. Частоты гравитационных волн, зарегистрированных в третьем событии, лежат в диапазоне примерно от 30 до 350 Гц. Ученые сообщают, что гравитационные волны с разными частотами в исследуемом диапазоне распространяются от своего источника до Земли с одной и той же скоростью, скоростью света, и дисперсия отсутствует. Даже небольшого нарушения между разными частотными компонентами ученые не видят. Таким образом, ничто не ставит под сомнение общую теорию относительности.

Исследователи ждут новых событий — регистраций гравитационных волн не только от слияния черных дыр, но и нейтронных звезд, а также от других источников, на которые нацелены детекторы LIGO.

«Детекторы LIGO смотрят на все небо, охватывают практически всю сферу одновременно. Слияния нейтронных звезд зарегистрировано еще не было, потому что считается, что нейтронные звезды поменьше», — говорит Сергей Вятчанин.

Конечно, по мере увеличения чувствительности детекторов, такие события будут происходить чаще. Ученые МГУ участвуют в исследованиях, направленных на увеличение чувствительности гравитационных антенн.

«В настоящее время основные усилия научной группы из МГУ направлены на разработку криогенных гравитационно-волновых детекторов нового поколения, на использование новых методов квантовых измерений, которые позволят значительно улучшить их чувствительность», — говорит Валерий Митрофанов.

Обсерватория LIGO финансируется Национальным научным фондом США (NSF). Она построена и эксплуатируется Калифорнийским и Массачусетским технологическими институтами

(Caltech и MIT). Финансовая поддержка проекта Advanced LIGO осуществляется Национальным научным фондом США вместе с Обществом Макса Планка Германии, Советом по обеспечению науки и технологии Великобритании и Австралийским советом по исследованиям, которые вносят значительный вклад в проект. Более 1000 ученых из различных стран участвуют в проекте, объединившись в Научную коллаборацию LIGO – LSC, которая включает в себя коллаборацию GEO. Партнером LIGO является коллаборация Virgo, в которой работают еще 280 европейских ученых, поддерживаемые Национальным центром научных исследований Франции (CNRS), Национальным институтом ядерной физики Италии (INFN), Нидерландским Nikhef, а также основными институтами, входящими в Virgo и Европейскую гравитационную лабораторию (см. <http://ligo.org/partners.php>). Третья регистрация гравитационных волн двумя детекторами LIGO, расположенными в Ливингстоне, штат Луизиана, и в Хэнфорде, штат Вашингтон, США, произошла 4 января 2017 г. в цикле наблюдений, который начался 30 ноября 2016 г. и продолжается до настоящего времени.

Россия представлена в LSC двумя научными коллективами: группой физического факультета Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова и группой Института прикладной физики РАН (Нижний Новгород).

Московскую группу создал и вплоть до последнего времени возглавлял член-корреспондент РАН Владимир Брагинский — всемирно известный ученый, один из пионеров гравитационно-волновых исследований в мире. В состав научной группы, также входят профессора кафедры физики колебаний: Игорь Биленко, Михаил Городецкий, Фарит Халили, доцент Сергей Стрыгин и старший преподаватель Леонид Прохоров. Неоценимый вклад в исследования вносят студенты, аспиранты и технический персонал кафедры.

“GW170104: Observation of a 50-Solar-Mass Binary Black Hole Coalescence at Redshift 0.2”, B.P. Abbott et al., *Phys. Rev. Lett.*, **118**, 221101 (2017).

## ОБЪЯСНЕНИЕ ПОВЫШЕННЫХ ШУМОВ ГРАВИТАЦИОННЫХ АНТЕНН В ПРОЕКТЕ LIGO

«Статья связана с нашими исследованиями в проекте LIGO и попытками объяснить пока непонятные повышенные шумы гравитационных антенн на низких частотах. Такие шумы даже называются в проекте загадочными, «mysterious». Мы предположили, что они могут быть связаны со свойствами материала, из которого изготовлены зеркала и подвесы антенн, — плавленого кварца (минерала с формулой  $\text{SiO}_2$ )», — рассказал главный автор статьи, профессор кафедры физики колебаний физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, доктор физико-математических наук Михаил Городецкий.

Плавленый кварц, как и любое стекло, не является кристаллом, а больше похож на сверхвязкую жидкость. Михаил Городецкий и его коллега из Российского Квантового Центра (Сколково) обобщили экспериментальные данные по текучести объектов из плавленого кварца, полученные ра-

нее из измерений очень медленных изменений размеров и формы на многолетнем интервале времени.

«Мы попытались извлечь параметры для модели вязкоупругого тела и, исходя из этого, рассчитать тепловые флуктуации зеркал антенн на низких частотах, которые действительно оказались выше, чем в предыдущих оценках. К сожалению, точность имеющихся экспериментальных данных пока недостаточна, чтобы говорить о том, что объяснение загадочных шумов найдено, и требуется планирование новых экспериментов», — говорит Михаил Городецкий.

“Viscosity of fused silica and thermal noise from the standard linear solid model”, N.M. Kondratiev and M.L. Gorodetsky. *Phys. Rev. D* 94, 081102(R) (2016).

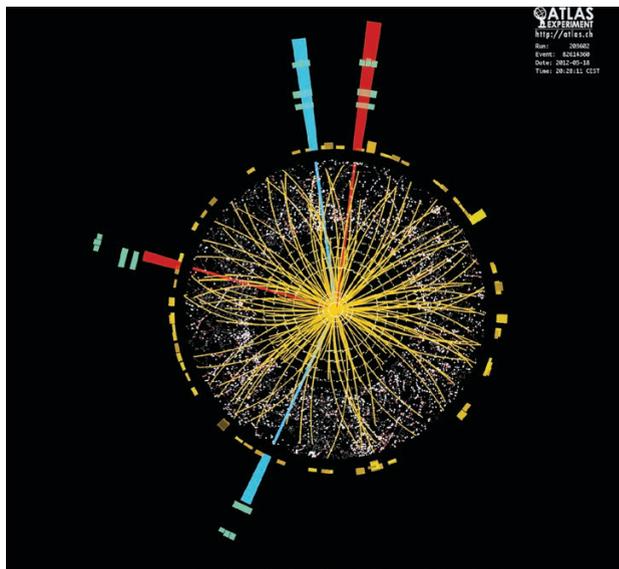
# СПОСОБ ИССЛЕДОВАНИЯ ОБРАЗОВАНИЯ БОЗОНА ХИГГСА

*Сотрудники Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д.В. Скобельцына МГУ имени М.В. Ломоносова предложили гипотезу образования бозона Хиггса на Большом адронном коллайдере (БАК).*

Бозон Хиггса — элементарная частица, возникающая в Стандартной модели физики элементарных частиц. Стандартная модель описывает три типа фундаментальных взаимодействий всех элементарных частиц, однако не затрагивает темную материю, темную энергию и гравитацию. Бозон Хиггса появляется в результате спонтанного нарушения симметрии электрослабого взаимодействия, которое включает в себя два фундаментальных взаимодействия: слабое и электромагнитное. При спонтанном нарушении электрослабой симметрии калибровочные бозоны, которыми обмениваются элементарные частицы при взаимодействии, становятся массивными, в то время как элементарные частицы собственную массу не меняют. Когда это происходит, симметрия взаимодействия нарушается, и образуются бозоны Хиггса.

«При рассмотрении взаимодействий калибровочных бозонов  $W$  спонтанно возникает дополнительное эффективное взаимодействие. А поскольку калибровочные бозоны взаимодействует с бозоном Хиггса, то возникают и дополнительные вклады в процессы рождения частицы Хиггса, которые удобнее всего наблюдать в сопровождении пары тяжелого кварка и его антикварка — самых тяжелых частиц всей системы Стандартной модели. В работе объясняется процесс рождения на Большом адронном коллайдере этих тяжелых частиц с целью изучения непертурбативных вкладов — возможных отклонений от результатов стандартных вычислений по теории возмущений, существование которых является установленным фактом», — рассказал один из авторов статьи, Борис Арбузов, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник отдела теоретической физики высоких энергий Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д.В. Скобельцына МГУ.

Метод, который ученые использовали в работе, основан на подходе компенсации — уравнении действия силы. Подход был разработан для описания явления сверхпроводимости в физике твердого тела. В применении к задачам квантовой теории поля и физики элементарных частиц этот метод приводит к появлению непертурбативных вкладов, которые не описываются теорией возмущений в случае осуществления нетривиальных решений



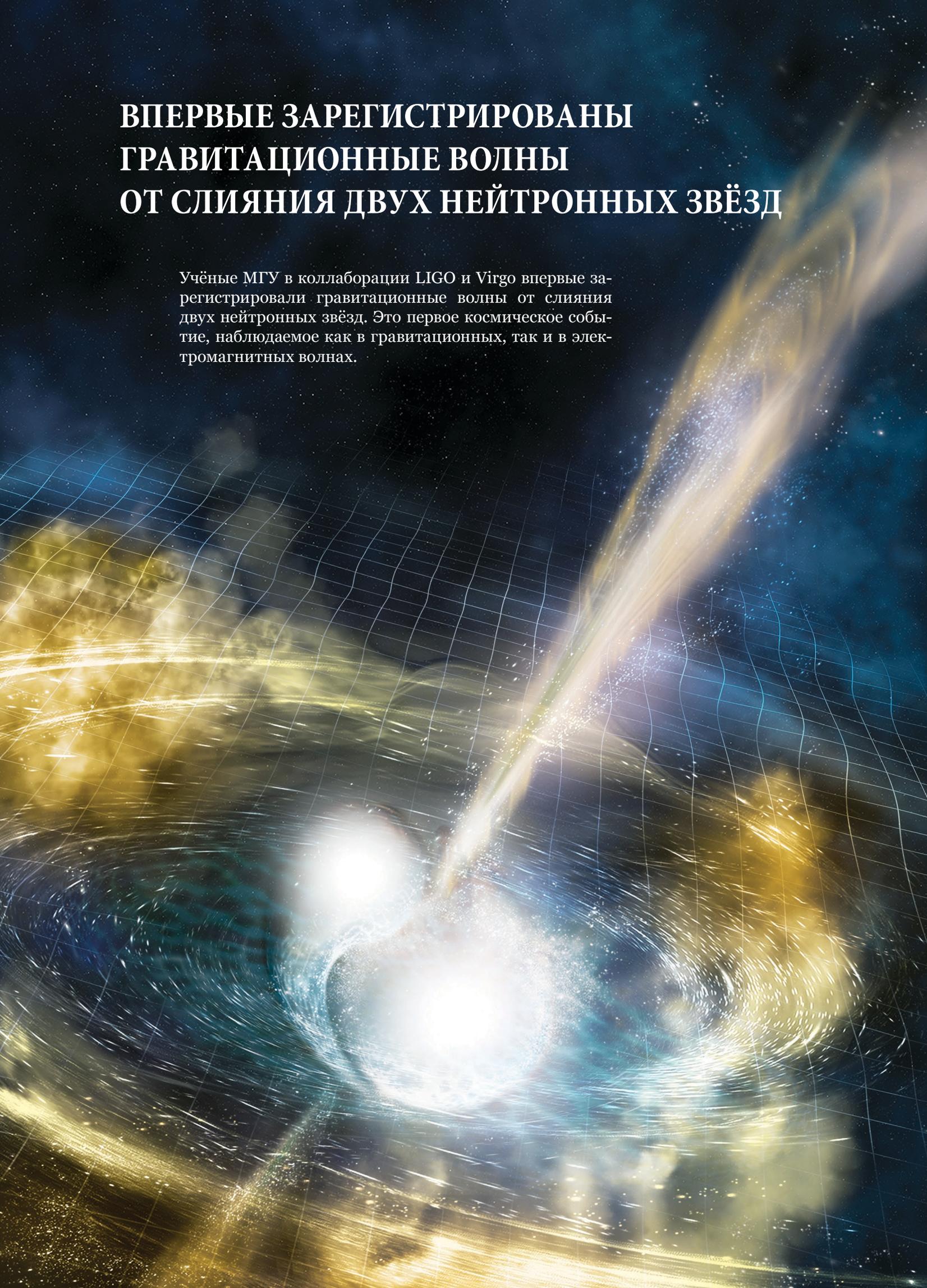
уравнений компенсации. Такие решения реализуются только при определенных значениях параметров задачи, например, констант связи (зарядов). Авторы работы из МГУ применили метод компенсации в квантовой хромодинамике и в электрослабой теории, что позволило получить предсказания процесса рождения тяжелых частиц на Большом адронном коллайдере.

«В работе показано, что текущие эксперименты на Большом адронном коллайдере при повышенной энергии 13 тераэлектронвольт (ТэВ) и с увеличенной светимостью позволяют проверить предсказания работы. В случае подтверждения предсказаний будет впервые доказано существование непертурбативных вкладов в электрослабом взаимодействии. Положительный результат поиска непертурбативных вкладов открывает возможность для выяснения происхождения определенных значений параметров Стандартной теории, таких как константы связи, параметры смешивания и других», — заключил ученый.

“Associated heavy quarks pair production with Higgs as a tool for a search for non-perturbative effects of the electroweak interaction at the LHC”. B.A. Arbuзов, I.V. Zaitsev. *Physics Letters B*, **772**, 184–188 (2017).

# ВПЕРВЫЕ ЗАРЕГИСТРИРОВАНЫ ГРАВИТАЦИОННЫЕ ВОЛНЫ ОТ СЛИЯНИЯ ДВУХ НЕЙТРОННЫХ ЗВЁЗД

Учёные МГУ в коллаборации LIGO и Virgo впервые зарегистрировали гравитационные волны от слияния двух нейтронных звёзд. Это первое космическое событие, наблюдаемое как в гравитационных, так и в электромагнитных волнах.



Спустя 2 недели после присуждения Нобелевской премии по физике за открытие гравитационных волн троим исследователям из США, коллаборации LIGO (Laser Interferometric Gravitational Wave Observatory, США) и Virgo (аналогичная обсерватория в Италии) объявляют о новом открытии. Ученые впервые зафиксировали гравитационные волны от слияния двух нейтронных звезд, причем это явление наблюдали не только на лазерных интерферометрах, регистрирующих гравитационные волны, но и с помощью космических обсерваторий (Интеграл, Fermi) и наземных телескопов, регистрирующих электромагнитное излучение. В сумме это явление наблюдали около 70 наземных и космических обсерваторий по всему миру, в числе которых и сеть роботов-телескопов МАСТЕР (МГУ имени М.В.Ломоносова).

Группу из МГУ имени М.В.Ломоносова возглавляет профессор физического факультета МГУ, доктор физико-математических наук Валерий Митрофанов, под руководством которого ведут работу профессор Сергей Вятчанин и Фарит Халили, доцент Сергей Стрыгин и другие ученые.

«Первая прямая регистрация гравитационных волн от сталкивающихся черных дыр обсерваторией LIGO состоялась около двух лет тому назад. Было открыто новое окно во Вселенную. Уже сегодня мы видим, какие беспрецедентные возможности создает для исследователей этот новый канал получения информации в сочетании с традиционной астрономией» — отметил Валерий Митрофанов.

17 августа 2017 года оба детектора LIGO зарегистрировали гравитационный сигнал, названный GW170817. Информация, предоставленная третьим детектором Virgo, позволила значительно улучшить локализацию космического события. Почти в то же время (примерно через две секунды после гравитационных волн) Космический гамма-телескоп НАСА «Ферми» и Международная орбитальная обсерватория гамма-лучей (INTErnational Gamma-Ray Astrophysics Laboratory/INTEGRAL) обнаружили всплески гамма-лучей. В последующие дни было зарегистрировано электромагнитное излучение и в других диапазонах, включая рентгеновские, ультрафиолетовые, оптические, инфракрасные и радиоволны.

Каждая обсерватория состоит из двух туннелей: длиной 4 км (LIGO) и 3 км (Virgo), расположенных в виде буквы Г. В них находятся трубы, внутри которых поддерживается высокий вакуум. Излучение лазера накачки разделяется светоделителем на два взаимно перпендикулярных луча, которые распространяются в трубах, отражаются от зеркал интерферометра, возвращаются, снова отражаются, и так много раз. При прохождении гравитационной волны изменяется расстояние между зеркалами, что приводит к изменению выходного сигнала интерферометра.

В целом детектор — чрезвычайно сложное устройство, в котором использованы уникальные компоненты, созданные специально для него в различных лабораториях мира. Настройку положения зеркал и других оптических элементов обеспечивают более 5000 следящих систем, а для обработки поступающей информации (порядка 1 терабайта в сутки) задействованы многопроцессорные кластеры.

Сигналы детекторов LIGO показали, что зарегистрированные гравитационные волны излучались двумя астрофизическими объектами, вращающимися друг относительно друга и расположенными на относительно близком расстоянии — около 130 миллионов световых лет от Земли. Оказалось, что объекты были менее массивными, чем ранее обнаруженные LIGO и Virgo двойные черные дыры. Согласно вычислениям, их массы находились в диапазоне от 1,1 до 1,6 массы Солнца, что попадает в область масс нейтронных звезд, самых маленьких и самых плотных среди звезд. Их типичный радиус составляет всего 10–20 километров.

Если сигнал от сливающихся двойных черных дыр обычно находился в диапазоне чувствительности детекторов LIGO в течение долей секунды, то сигнал, зарегистрированный 17 августа, длился около 100 секунд. Спустя примерно две секунды после слияния звезд произошла вспышка гамма-излучения, которая была зарегистрирована космическими гамма-телескопами. Быстрое обнаружение гравитационных волн командой LIGO-Virgo в сочетании с обнаружением гамма-излучения позволило запустить наблюдение оптическими и радиотелескопами по всему миру.

Получив координаты, обсерватории уже через несколько часов смогли начать поиск в области неба, где предположительно произошло событие. Новая светлая точка, напоминающая новую звезду, была обнаружена оптическими телескопами. В конечном итоге около 70 обсерваторий на Земле и в космосе наблюдали это событие в различных диапазонах длин волн. В последующие дни после столкновения было зарегистрировано электромагнитное излучение в рентгеновском, ультрафиолетовом, оптическом, инфракрасном и радиоволновом диапазонах.

«Сочетание одновременного детектирования гравитационных и электромагнитных волн при помощи гравитационно-волновых детекторов и традиционных телескопов позволяет в будущем исследовать удивительный и манящий мир нашей Вселенной», — прокомментировал Сергей Стрыгин.

«Впервые, в отличие от “одиноких” слияний черных дыр, зарегистрировано “компанейское” событие не только гравитационными детекторами, но еще и оптическими и нейтринными теле-

скопами. Это первый такой хоровод наблюдений вокруг одного события», — рассказал Сергей Вятчанин.

Теоретики предсказывают, что при столкновении нейтронных звезд должны излучаться гравитационные волны и гамма-лучи, а также извергаться мощные струи вещества, сопровождающиеся излучением электромагнитных волн в широком частотном диапазоне.

Обнаруженный гамма-всплеск является так называемым коротким гамма-всплеском. Ранее ученые лишь предсказывали, что короткие гамма-всплески генерируются при слиянии нейтронных звезд, а теперь это подтверждено наблюдениями. Но несмотря на то, что источник обнаруженного короткого гамма-всплеска был одним из самых близких к Земле, видимых до сих пор, сам всплеск был неожиданно слаб для такого расстояния. Теперь ученым предстоит найти объяснение этому факту.

В момент столкновения основная часть двух нейтронных звезд слилась в один ультраплотный объект, испускающий гамма-лучи. Первые измерения гамма-излучения в сочетании с детектированием гравитационных волн подтверждают предсказание общей теории относительности Эйнштейна, а именно, что гравитационные волны распространяются со скоростью света.

«Во всех предыдущих случаях источником гравитационных волн были сливающиеся черные дыры. Как это ни парадоксально, черные дыры — это очень простые объекты, состоящие исключительно из искривленного пространства и поэтому полностью описываемые хорошо известными законами общей теории относительности.

В то же время, структура нейтронных звезд и, в частности, уравнение состояния нейтронной материи до сих пор точно неизвестны. Поэтому изучение сигналов от сливающихся нейтронных звезд позволит получить огромное количество новой информации также и о свойствах сверхплотной материи в экстремальных условиях», — рассказал Фарит Халили.

Теоретики предсказали, что в результате слияния образуется «килоновая». Это явление, при котором оставшийся от столкновения нейтронных звезд материал ярко светится и выбрасывается из области столкновения далеко в космос. При этом возникают процессы, в результате которых создаются тяжелые элементы, такие как свинец и золото. Наблюдение после свечения слияния нейтронных звезд позволяют получать дополнительную информацию о различных стадиях этого слияния, о взаимодействии образовавшегося объекта с окружающей средой и о процессах, которые производят самые тяжелые элементы во Вселенной.

«В процессе слияния зафиксировано образование тяжелых элементов. Поэтому можно говорить даже о галактической фабрике по производству тяжелых элементов, в том числе золота — ведь именно этот металл больше всего интересует землян. Ученые начинают предлагать модели, которые объяснили бы наблюдаемые параметры этого слияния», — отметил Вятчанин.

«GW170817: Observation of Gravitational Waves from a Binary Neutron Star Inspiral». B.P. Abbott et al. (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration). *Phys. Rev. Lett.* **119**, 161101. (2017).

#### СПРАВКА:

Обсерватория LIGO финансируется Национальным научным фондом США. Она построена и эксплуатируется Калифорнийским и Массачусетским технологическими институтами. Финансовая поддержка проекта Advanced LIGO осуществляется Национальным научным фондом США вместе с Обществом Макса Планка Германии, Советом по науке и технологии Великобритании и Австралийским советом по исследованиям, которые вносят значительный вклад в проект.

Более 1200 ученых из 100 институтов различных стран участвуют в проекте, объединившись в Научную коллаборацию LIGO — LSC (LIGO Scientific Collaboration), которая включает в себя коллаборации GEO и OzGrav (<http://ligo.org/partners.php>). Партнером LIGO является коллаборация Virgo, в которой работают 280 европейских ученых и инженеров из 20 исследовательских групп, которых поддерживают Национальные центры научных исследований Франции, Италии, Нидерландов, а также ряд институтов из Венгрии, Польши, Испании, входящие в Virgo и Европейскую гравитационную обсерваторию. Детектор Virgo находится недалеко от Пизы (Италия).

В исследованиях LIGO Scientific Collaboration принимают участие два научных коллектива из России: группа физического факультета Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова и группа Института прикладной физики РАН (Нижегород). Исследования поддерживаются Российским фондом фундаментальных исследований и Российским научным фондом.

Ученые МГУ имени М.В.Ломоносова участвуют в проекте с 1992 года. Есоздал и вплоть до последнего времени возглавлял член-корреспондент РАН Владимир Борисович Брагинский — всемирно известный ученый, один из пионеров гравитационно-волновых исследований в мире. С самого начала основные усилия

были направлены на повышение чувствительности гравитационно-волновых детекторов, определение фундаментальных квантовых и термодинамических ограничений чувствительности, на разработку новых методов измерений. Теоретические и экспериментальные исследования российских ученых нашли свое воплощение при создании детекторов, позволивших непосредственно регистрировать гравитационные волны от космических источников.

Орбитальная обсерватория гамма-лучей «Интеграл» — проект Европейского космического агентства с участием России и НАСА. «Интеграл» был выведен в космос ровно 15 лет назад (17 октября 2002 г.) с космодрома Байконур с помощью ракеты-носителя «Протон». В обмен на запуск российские ученые получили право на 25% наблюдательного времени обсерватории и с ее помощью получили целый ряд важнейших научных открытий и результатов. Научный руководитель проекта «Интеграл» со стороны России — выпускник МГУ, главный научный сотрудник ИКИ РАН академик Рашид Сюняев.

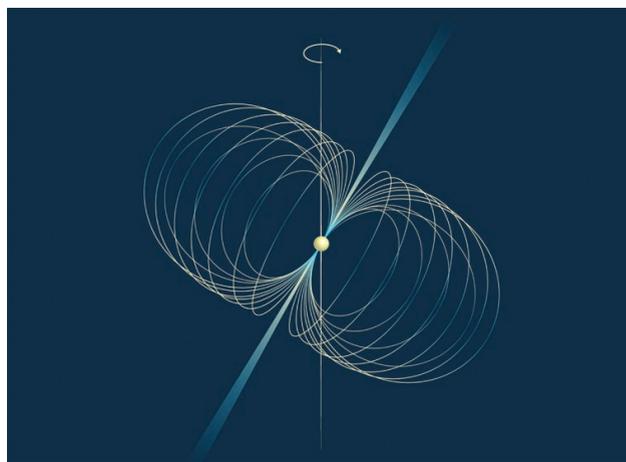
## ПОЧЕМУ РЕЗУЛЬТАТЫ НЕЙТРОННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ РАСХОДЯТСЯ

*Сотрудники физического факультета и Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д.В. Скобельцына МГУ имени М.В. Ломоносова выяснили причину значительного расхождения результатов фотонейтронных экспериментов.*

Все статьи относятся к продолжению серии исследований по проблеме фотоядерных исследований. Проблема заключается в существенных, до 100%, расхождениях результатов разных экспериментов, которые выполняются на пучках гамма-квантов — фотонов большой энергии (больше десяти килоэлектронвольт). Подавляющее большинство данных по сечениям — вероятности протекания — фотонейтронных реакций с разным количеством продуктов на большом числе ядер было получено в двух лабораториях. Ученые использовали разные реализации одного и того же метода, существенно меняя условия экспериментов. Это приводило к систематическим расхождениям их результатов, намного превышающим их статистические погрешности.

Ранее авторы показали, что во многом такие систематические погрешности могут быть связаны с эффективностью использованных нейтронных детекторов, которая меняется в зависимости от энергии нейтронов. Поэтому возникли новые вопросы о достоверности экспериментальных данных и причинах расхождений, потребовалась разработка методов их преодоления.

«В этих работах реализуются два разных подхода к решению проблемы. Предпринимается попытка экспериментально избежать недостатки исполь-



зованных ранее методов разделения нейтронов по множественности путем использования нового нейтронного детектора, эффективность регистрации которого практически не зависит от энергии нейтронов. Показано, что обсуждаемые данные не удовлетворяют новым объективным физическим критериям достоверности, и предлагается вместо таких данных использовать более достоверные данные, оцененные в рамках нового метода с использованием физических критериев достоверности», — рассказал один из авторов работ Владимир Варламов, доктор физико-математических наук, глав-

ный научный сотрудник отдела электромагнитных процессов и взаимодействия атомных ядер Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д.В. Скобельцына МГУ.

Исследования парциальных фотонейтронных реакций ученые выполнили с помощью нового детектора для ядер  $^9\text{Be}$  и  $^{209}\text{Bi}$ . Ученые получили сечения реакций с различной множественностью нейтронов, которые удовлетворяют критериям достоверности. Дополнительно в работе авторы описали результаты исследования для нескольких ядер фотонных силовых функций, которые позволяют достоверно единым образом объяснить соотношения взаимно-обратных реакций. Также ученые провели то же самое исследование конкретно для ядра  $^{59}\text{Co}$ , которое считается относительно легким. Из-за легкости определение реакции по множественности проводится с дополнительными систематическими погрешностями. Ученые выяснили, что именно это является причиной существенных расхождений результатов двух экспериментов, выполненных в одной лаборатории, но с помощью разных методов.

Исследования достоверности экспериментальных фотонейтронных данных авторы проводили с помощью объективных физических критериев достоверности, которые представляют собой отношения сечений некоторых реакций, которые по определению не могут превышать соответствующих абсолютных значений. Превышение такими отношениями соответствующих верхних пределов означает, что те или иные сечения реакций были получены недостоверно, вследствие наличия в методах их определения существенных системати-

ческих погрешностей. При использовании специального метода оценки, основанного на критериях достоверности, обсуждается проблема достоверности экспериментальных данных по сечениям реакций для ядер  $^{65}\text{Cu}$ ,  $^{89}\text{Y}$ ,  $^{91}\text{Zr}$ ,  $^{116}\text{Sn}$ ,  $^{159}\text{Tb}$ ,  $^{197}\text{Au}$ .

«Результаты выполненных исследований вместе с некоторыми аналогичными (для других ядер) результатами, полученными ранее, и теми, что будут выполнены в дальнейшем, позволят получить достоверные сечения различных фотоядерных реакций на разных ядрах, которые будут соответствовать объективным физическим критериям достоверности. Это позволит уточнить оценки некоторых физических эффектов, определяющих основные характеристики электромагнитных взаимодействий, проверить соотношения теоретических моделей, описывающих эти взаимодействия, уточнить и получить новые характеристики фотоядерных процессов, используемых в разнообразных приложениях», — заключил ученый.

Работа проводилась в сотрудничестве с зарубежными учеными.

“Photoneutron cross sections for  $^{59}\text{Co}$ : Systematic uncertainties of data from various experiments”. V.V. Varlamov, A.I. Davydov, B.S. Ishkhanov. Eur. Phys. J. A **53**, 180 (2017).

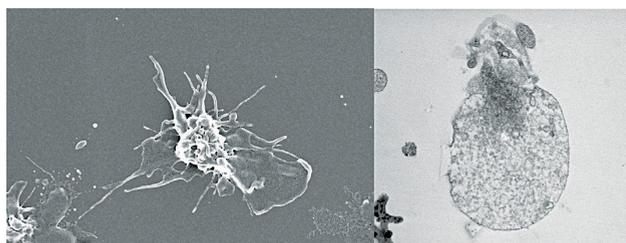
“Photoneutron reaction cross sections from various experiments – analysis and evaluation using physical criteria of data reliability”. V. Varlamov, B. Ishkhanov, V. Orlin, N. Peskov and M. Stepanov. EPJ Web of Conferences **146**, 05005 (2017). <https://doi.org/10.1051/epj-conf/201714605005>

## УЧЕНЫЕ МГУ: ЧТОБЫ ОСТАНОВИТЬ КРОВОТЕЧЕНИЕ, ТРОМБОЦИТ ДОЛЖЕН «УМЕРЕТЬ»

*Коллектив ученых во главе с физиками Московского университета открыл механизм запрограммированной клеточной смерти тромбоцитов, в результате которой процесс свертывания крови ускоряется в 1 000–10 000 раз.*

Тромбоциты — это клетки, содержащиеся в крови и ответственные за остановку кровотечений: они узнают о повреждении кровеносного сосуда и собираются вместе, создавая прочные агрегаты и предотвращая кровопотерю. Этот процесс называется гемостаз (от греч. *haimatos* — кровь, *stasis* — остановка). Способность к слипанию и закупориванию поврежденного участка сосуда тромбоциты получают в результате процесса активации. Ученые считают, что тромбоцит является одной из самых простых клеток в организме

человека, и задача всей его жизни — решить, активироваться или нет. Но несмотря на то, что уже хорошо известно, как устроены тромбоциты, еще остаются вопросы насчет механизмов их функционирования. Статья, ведущим автором которой является профессор кафедры медицинской физики физического факультета МГУ доктор физико-математических наук Михаил Пантелеев, посвящена тому, как происходит процесс активации тромбоцитов.



Слева — обычный активированный тромбоцит (фото со сканирующего электронного микроскопа), справа — сверхактивированный тромбоцит (фото с просвечивающего электронного микроскопа).

Всего есть два вида активированных тромбоцитов: простые (агрегирующие) и сверхактивированные (прокоагулянтные). При активации простые агрегирующие тромбоциты не увеличиваются и принимают амёбовидную форму с множеством ножек для лучшего сцепления и могут растекаться по поверхности. Такие тромбоциты формируют основное тело тромба. А сверхактивированные тромбоциты при активации становятся сферическими и увеличиваются в несколько раз (в английской терминологии их так и называют, «balloons» — «воздушные шары»). Они способны укреплять тромб и ускорять реакции свертывания крови. Но оставался вопрос: как эти клетки при активации делятся на два вида? Коллектив ученых разобрался в важнейшей загадке сигнализации тромбоцитов.

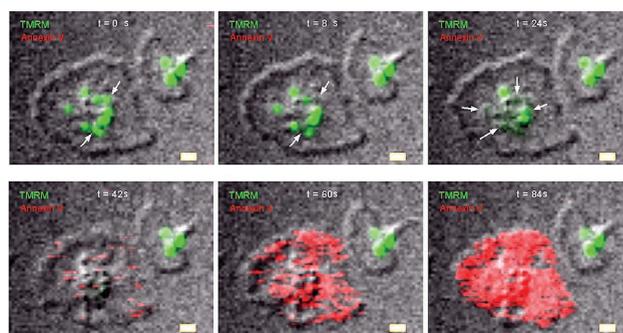
Все дело в митохондриях. Считается, что митохондрии — органеллы, присутствующие во всех без исключения животных (и растительных) клетках, в том числе в тромбоцитах — обеспечивают их энергией за счет окислительно-восстановительных реакций.

«Но похоже, что тромбоцитам митохондрии нужны не столько для получения энергии, сколько для быстрого самоубийства», — начинает рассказ Михаил Пантелеев.

Ученым удалось показать, как клеточная смерть тромбоцитов (митохондриальный некроз) запускает цепочку процессов, ведущих к переходу тромбоцитов в сверхактивированное состояние. Другими словами, чтобы тромбоциту сверх-активироваться, ему нужно умереть, ведь их предназначение начинается с того момента, как они «умерли». По этой причине тромбоциты еще называют «клетки-камикадзе».

«Раньше никто не понимал, как тромбоцит принимает решение, в какую популяцию ему идти. Нами расшифрована последовательность событий: как происходит сигнализация в тромбоците, и как эта клетка принимает решение о смерти», — говорит Михаил Пантелеев.

Вместе с коллегами из ФНКЦ ДГОИ им. Дмитрия Рогачева, Центра теоретических проблем физико-химической фармакологии РАН и терапевтического факультета РНИМУ им. Н.И. Пирогова ученые выяснили, что процесс активации протекает следующим образом. Активаторов у тромбоцита множество, но



Процесс митохондриального некроза в деталях. Два тромбоцита распластаны на подложке. Зеленым светятся живые митохондрии, красным — маркер на клеточную смерть. Тромбоцит слева умирает в результате коллапса митохондрий, а его сосед справа спокойно живет. Фотографии с конфокального микроскопа.

главные среди них: коллаген, АДФ и тромбин. Тромбоциту приходят разные концентрации активатора, и на них он отвечает разной частотой импульса концентраций кальция в цитоплазме. Это явление носит название кальциевых осцилляций. Митохондрии тромбоцита забирают и накапливают в себе кальций, и когда его концентрация превышает критическую отметку, запускается процесс митохондриального некроза (клеточной смерти) тромбоцитов: происходит выплескивание кальция и активных форм кислорода из митохондрий, цитоскелет клетки разрушается, и тромбоцит сильно увеличивается в объеме. В результате на внешней мембране увеличившегося в размере шарообразного тромбоцита появляется липид фосфатидилсерин, ответственный за быстрое свертывание крови. И все это происходит молниеносно.

В прошлом году той же группой исследователей в журнале *Molecular BioSystems* была опубликована статья о теоретическом механизме митохондриального некроза, в настоящей работе этот процесс был экспериментально доказан.

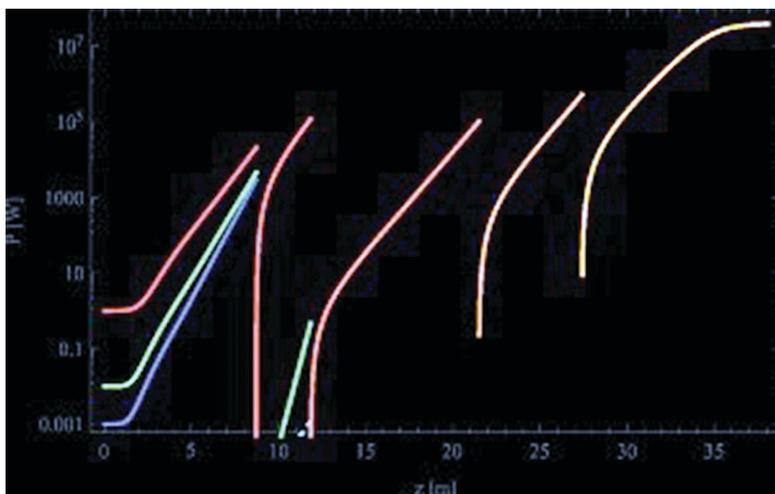
Более того, принята к публикации еще одна статья Михаила Пантелеева и его коллег (“Systems biology insights into the meaning of the platelet’s dual-receptor thrombin signaling”) с физического факультета и факультета фундаментальной медицины МГУ. Ученые объясняют интересную загадку устройства внутриклеточной сигнализации тромбоцитов: впервые было показано, что на один и тот же активатор приходится два рецептора у тромбоцита для достижения максимальной чувствительности.

“Dynamics of calcium spiking, mitochondrial collapse and phosphatidylserine exposure in platelet subpopulations during activation”, S.I. Obyednyy, A.N. Sveshnikova, F.I. Ataulakhov and M.A. Panteleev. *J. of Thrombosis and Haemostasis*. **14**, 9. (2016).

“Compartmentalized calcium signaling triggers subpopulation formation upon platelet activation through PAR1”. A.N. Sveshnikova, F.I. Ataulakhov and M.A. Panteleev. *Mol. BioSyst.*, **11**, 1052–1060 (2015).

# МОЩНЫЙ ЛАЗЕР ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

*Сотрудник физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова исследовал процесс генерации ондуляторного излучения и на основе полученных данных разработал мощный лазер рентгеновского излучения.*



Ондуляторное излучение — это электромагнитное излучение, которое возникает при ускорении электрона в пространственно-периодическом магнитном поле. Это значит, что магнитное поле появляется в пространстве через равные промежутки — периоды.

Ондуляторное излучение может достигать частот рентгеновского диапазона, но оно не когерентно — волны излучения неперiodичны и несогласованы между собой. Источники когерентного излучения — лазеры, которые обычно работают на длинах волн более 200 нанометров. Для генерации более коротковолнового когерентного излучения трудно найти подходящие материалы, поэтому для исследования физических, химических и биологических процессов на масштабе нанометра используют лазеры на свободных электронах (ЛСЭ). В этих устройствах излучение генерируется с помощью электронного пучка, движущегося в ондуляторе (генераторе ондуляторного излучения). Для стабилизации фазы и получения хорошей временной когерентности излучения в ЛСЭ ученые используют затравочное когерентное излучение малой мощности.

Используя гармоники — электромагнитные волны удвоенной частоты — ондуляторного излучения, можно получить рентгеновское излучение в ЛСЭ с электронным пучком относительно невысоких энергий и низкой частотой затравочного лазера.

«Мы провели аналитическое исследование генерации гармоник в ондуляторах и показали, что ондуляторы с двоякопериодическим магнитным полем позволяют усилить излучение высших гармоник ондуляторного излучения по сравнению с обычными ондуляторами. Поэтому такие ондуляторы могут эффективно использоваться в каскадных ЛСЭ с генерацией высших гармоник, где в первом каскаде ЛСЭ происходит группировка электронов на длине волны излучения гармоник, а в последующих каскадах — усиление и излучение этих гармоник», — рассказал автор работ Константин Жуковский, доктор физико-математических наук, ведущий

научный сотрудник кафедры теоретической физики физического факультета МГУ.

С помощью разработанной аналитической модели ЛСЭ ученый предложил и исследовал каскадные ЛСЭ для генерации рентгеновского излучения. Исследование показало, что можно получить ~100 мегаватт лазерного рентгеновского излучения на длине волны в один нанометр.

«Это открывает возможности по исследованию физических, химических и биологических процессов на наномасштабе с компактными ЛСЭ значительно меньших размеров и стоимости, чем того требуют гигантские километровые установки типа Европейского рентгеновского ЛСЭ (European XFEL)», — заключил ученый.

«Generation of coherent soft x-ray radiation in short FEL with harmonic multiplication cascades and two-frequency». K. Zhukovsky. *Journal of Applied Physics*, **122**, 23, 233103 (2017).

«High-harmonic x-ray undulator radiation for nanoscale-wavelength free-electron lasers». Zhukovsky K. *Journal of Physics D - Applied Physics*, **50**, 505601 (2017).

«Soft X-ray generation in cascade SASE FEL with two-frequency undulator». Zhukovsky K. *Europhysics Letters*, **119**, 34002 (2017).

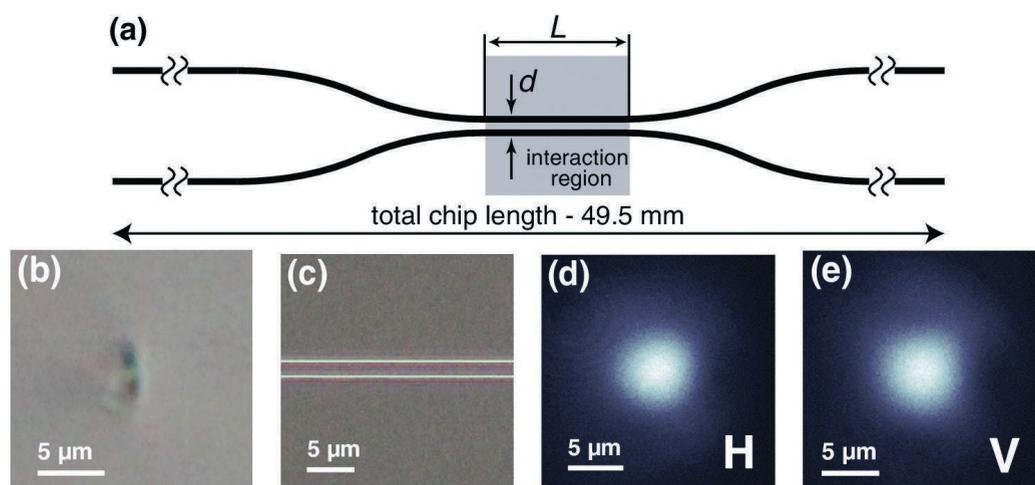
«Two-frequency undulator usage in compact self-amplified spontaneous emission free electron laser in Roentgen range». Zhukovsky K., Potapov I. *Laser and Particle Beams*, **35**, 2, 326–336 (2017).

# СОЗДАНЫ ОПТИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ ДЛЯ ЧИПОВ КВАНТОВОГО КОМПЬЮТЕРА

*Ученые лаборатории квантовых оптических технологий физического факультета МГУ сформулировали новую теоретическую модель и разработали действующую установку, позволяющую создавать компактные оптические элементы для чипов квантового компьютера.*

Одной из важных характеристик светового пучка является поляризация, то есть направление плоскости распространения световой волны. Сведения о поляризации световой волны могут быть использованы в качестве дополнительной информации о состоянии света наряду с другими физическими характеристиками. Возможность управлять поляризационным состоянием значительно расширяет возможности оптических устройств. В частности,

(ФСП) и является наиболее быстрым и дешевым способом создания подобных устройств. В частности, с помощью ФСП создают волноводы — специальные каналы, по которым распространяется свет. Однако в волноводах, созданных при помощи такой техники, физические свойства распределены однородно по всем направлениям (такое свойство называется низкой анизотропией). Этот недостаток не позволяет создавать устройства компактных



оптические элементы, позволяющие контролировать поляризацию света, могут использоваться в чипах квантовых компьютеров. С их помощью увеличивается число способов, которыми можно изменить состояние света. Другими словами, размерность полного преобразования.

«Основная цель работы — развитие методов управления поляризационным состоянием света на чипе. Использование поляризационных преобразований квантовых состояний света вкупе с пространственными преобразованиями позволяет эффективно увеличить размерность полного преобразования без существенного увеличения числа оптических элементов», — рассказал один из авторов исследования Иван Дьяконов, научный сотрудник кафедры квантовой электроники физического факультета МГУ.

Для создания устройства ученые использовали лазер, генерирующий сверхкороткие импульсы. Этот метод называется фемтосекундной печатью

размеров. Ученым физического факультета удалось преодолеть эту сложность.

«В ходе работы был разработан метод локального увеличения анизотропии, дающий возможность изготавливать поляризационные устройства, занимающие значительно меньше места на чипе, нежели продемонстрированные ранее в других группах», — пояснил ученый.

Исследователи описали теоретическую модель компактного поляризационного устройства, а также создали действующую модель, позволяющую реализовывать этот метод. Все этапы работы — от теоретического описания до обработки результатов эксперимента — были осуществлены сотрудниками физического факультета.

“Laser-written polarizing directional coupler with reduced interaction length”. I.V. Dyakonov, M.Yu. Saygin, I.V. Kondratyev, A.A. Kalinkin, S.S. Straupe, and S.P. Kulik. *Optics Letters*. 42, 20, 4231–4234 (2017).

# ВПЕРВЫЕ ПРОДЕМОНСТРИРОВАНА ВОЗМОЖНОСТЬ СОЗДАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ РЕНТГЕНОВСКОЙ ОПТИКИ ПРИ ПОМОЩИ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

*Ученые физического факультета МГУ совместно с учеными из лаборатории рентгеновской оптики БФУ им. Канта продемонстрировали результаты работы по созданию и исследованию полимерных линз для фокусировки рентгеновского излучения. Данные линзы представляют собой двояковогнутые параболоиды вращения с рекордно малым радиусом кривизны в 5 мкм.*

«Для того, чтобы изготовить объект такой сложной формы с высокой точностью, был применен метод двухфотонной лазерной литографии или метод прямой лазерной записи, позволяющий создавать трехмерные структуры с разрешением до 100 нм. Такая установка работает как 3D принтер на наномасштабах, позволяя создавать сколь угодно сложные структуры для нанооптики, микрофлюидики, а также тканевой инженерии. На данный момент в России существует всего лишь три установки двухфотонной лазерной литографии, одна из которых была создана учеными из МГУ», – поясняет соавтор статьи, сотруд-

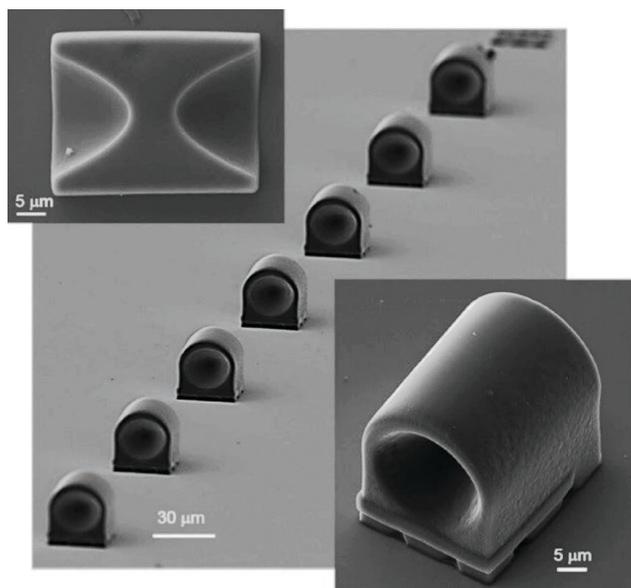
ник физического факультета МГУ и центра функциональных магнитных материалов (FunMagMa) БФУ имени Канта Александр Петров.

Изготовленные полимерные линзы исследовались на установке Synchrotron LIKE в БФУ имени Канта, а также проходили проверку на устойчивость к рентгеновскому излучению на одной из станций синхротрона PETRA- III в научном центре DESY в Гамбурге.

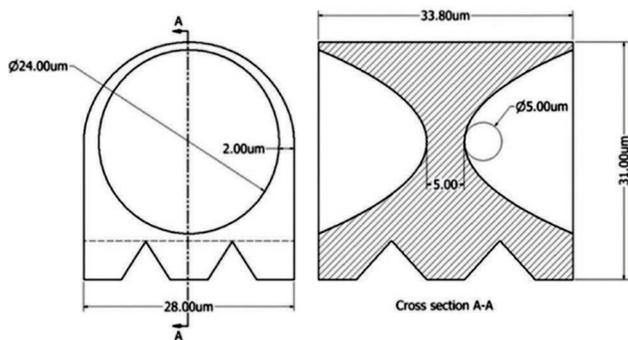
Рентгеновская микроскопия активно применяется в настоящее время. С ее помощью можно изучать строение образцов, непрозрачных для света оптического диапазона. Кроме того, данный метод позволяет добиться высокого разрешения, не требуя вакуума и металлизации образца, как в случае электронной микроскопии. Перечисленные преимущества делают рентгеновскую микроскопию уникальным методом, позволяющим получить структуру образца без его разрушения, что особенно важно для хрупких образцов для задач биологии и медицины. Для фокусировки рентгеновского излучения необходимы эффективные фокусирующие элементы рентгеновской оптики.

Модель одиночной полимерной преломляющей линзы

«В настоящее время наиболее широко используются поликристаллические бериллиевые линзы, однако они обладают рядом существенных недостатков. Во-первых, использование подобных линз в виду наличия внутренней поликристаллической структуры приводит к диффузному рассеянию и образованию спеклов, что приводит к искажению изображения и ухудшению возможного разрешения. Во-вторых, в виду того, что для наилучшего разрешения линзы должны обладать как можно меньшим радиусом



*Изображения изготовленных полимерных составных преломляющих линз. Верхнее изображение — сечение изготовленной полимерной линзы, нижнее — изображение одиночной линзы.*



Модель одиночной полимерной преломляющей линзы.

кривизны, а современные технологии не позволяют создавать бериллиевые линзы с радиусом кривизны менее 50 мкм, их разрешение ограничено пределом в 100 нм. Новые полимерные линзы,

созданные российскими учеными, не только обладают малым радиусом кривизны (что потенциально позволит с их помощью добиться лучшей фокусировки излучения, вплоть до 50 нм), но и являются «рентгено-аморфными», то есть не дают диффузного рассеяния и не искажают изображение. Помимо этого, созданные линзы являются более дешевыми и простыми в изготовлении», – заключил Александр Петров.

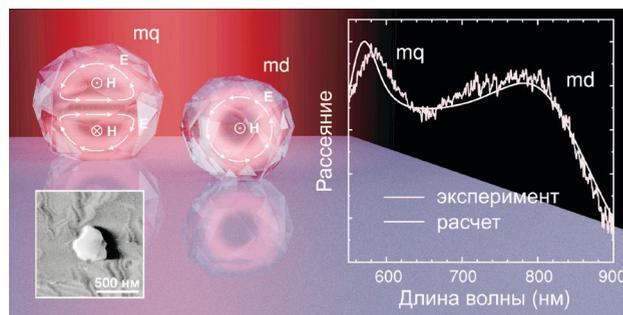
“Polymer X-ray refractive nano-lenses fabricated by additive technology“. A.K. Petrov, V.O. Bessonov, K.A. Abrashitova, N.G. Kokareva, K.R. Safironov, A.A. Barannikov, P.A. Ershov, N.B. Klimova, I.I. Lyatun, V.A. Yunkin, M. Polikarpov, I. Snigireva, A.A. Fedyanin, and A. Snigirev. *Journal Optics Express*. 25, 13, 14173–14181 (2017).

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ МОД НАНОАЛМАЗОВ

*Ученые кафедры квантовой электроники физического факультета МГУ изучили собственные оптические моды нанодiamondов и показали, что, используя частицы резонансных размеров, можно существенно повысить эффективность однофотонных источников и сенсоров на основе центров окраски в нанодiamondах.*

«Мы экспериментально получили спектры рассеяния оптического излучения на отдельных нанодiamondах, форму и размер каждого из которых мы предварительно охарактеризовали с помощью электронной микроскопии. В спектрах рассеяния отчетливо видны резонансы, связанные с возбуждением магнито-дипольной и магнито-квадрупольной мод. Для частиц большего размера эти резонансы возбуждаются на больших длинах волн, для частиц меньшего размера – на меньших. Далее, путем численных расчетов, мы показали, что для частиц, резонанс которых приходится на длину волны люминесценции центра окраски, эффективность люминесценции значительно выше, нежели для нерезонансных частиц. Иными словами, возбужденный центр окраски в алмазе резонансного размера высвечивает фотон более чем на порядок быстрее, чем если бы он находился в частице нерезонансного размера», – рассказал сотрудник лаборатории нанооптики и метаматериалов Данил Шилкин.

Физики МГУ исследовали и обнаружили собственные оптические моды в нанодiamondах, спектральное положение которых смещается при изменении размера частицы, и показали, что используя частицы резонансных размеров, можно существенно повысить эффективность однофо-



тонных источников и сенсоров на основе центров окраски в нанодiamondах.

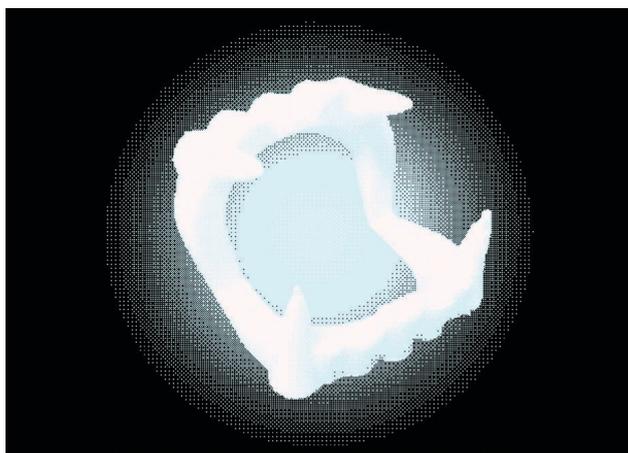
«В нашей работе мы показали, что собственные резонансы нанодiamondов оказывают существенное влияние на свойства люминесценции центров окраски и могут использоваться для повышения эффективности одно-фотонных источников и сенсоров на основе центров окраски в нанодiamondах», – заключил ученый.

Работа была сделана в коллаборации с коллегами из Института общей физики им. А.М. Прохорова

“Optical Magnetism and Fundamental Modes of Nanodiamonds“. Shilkin D.A., Shcherbakov M.R., Lyubin E.V., Katamadze K.G., Kudryavtsev O.S., Sedov V.S., Vlasov I.I., Fedyanin A.A., *ACS Photonics*, 4, N 5, 1153–1158 (2017).

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА КВАНТОВОГО ВАМПИРА НА ТЕПЛОВЫХ СОСТОЯНИЯХ СВЕТА

Группа российских физиков под руководством Сергея Кулика, профессора кафедры квантовой электроники МГУ, провела экспериментальное исследование эффекта квантового вампира на тепловых состояниях света. Они показали, что данный эффект может быть объяснен статистическими свойствами излучения без привлечения понятий запутанности или нелокальности, опровергнув таким образом выводы своих предшественников. Доклад, посвященный результатам данных исследований, был сделан на конференции LPHYS'17, которая проходила в Казани. Тезисы доклада доступны на сайте конференции. <http://www.lasphys.com/workshops/abstracts/files/2017/e2/82/c4/c3da88abfec7ddod878694aboe/abstract.pdf>



Квантовым вампиром называется эффект, заключающийся в том, что при определенных условиях тело, которое находится на пути у света, не отбрасывает тени. Эффект получил название благодаря аналогии с вымышленными фольклорными существами — вампирами, — которые также известны тем, что не отбрасывают тени. Квантовым же он был назван потому, что для его объяснения потребовались понятия, связанные с особенностями физики микромира.

Представим себе следующий мысленный эксперимент. Пусть на пути пучка света расположен некоторый объект, рассеивающий фотоны, например облако атомов. Повседневный опыт подсказывает нам, что в соответствующей области на экране должен наблюдаться провал освещенности, то есть тень. Однако, если предположить, что атомы слабо взаимодействуют с излучением, ситуация может поменяться. Для этого необходимо установить счетчик одиночных фотонов, который фиксирует рассеянные световые частицы. Оказывается, в том случае, когда счетчик срабатывает, вместо образования тени за облаком атомов происходит проседание освещенности по всей площади светового пучка.

На рисунке показана возможная реализация эффекта с помощью облака поглощающих атомов. Регистрация единичного переизлученного фотона сигнализирует об уничтожении фотона в моде, определяемой формой облака, и запускает запись изображения на камере. Вычитание фотона не приведет к

появлению тени от облака на выходном квантовом состоянии, так что распределение интенсивности в нем (оранжевая линия) не изменится. Эта ситуация контрастирует с обычным линейным поглощением, которое приводит к появлению тени на экране (синий пунктир).

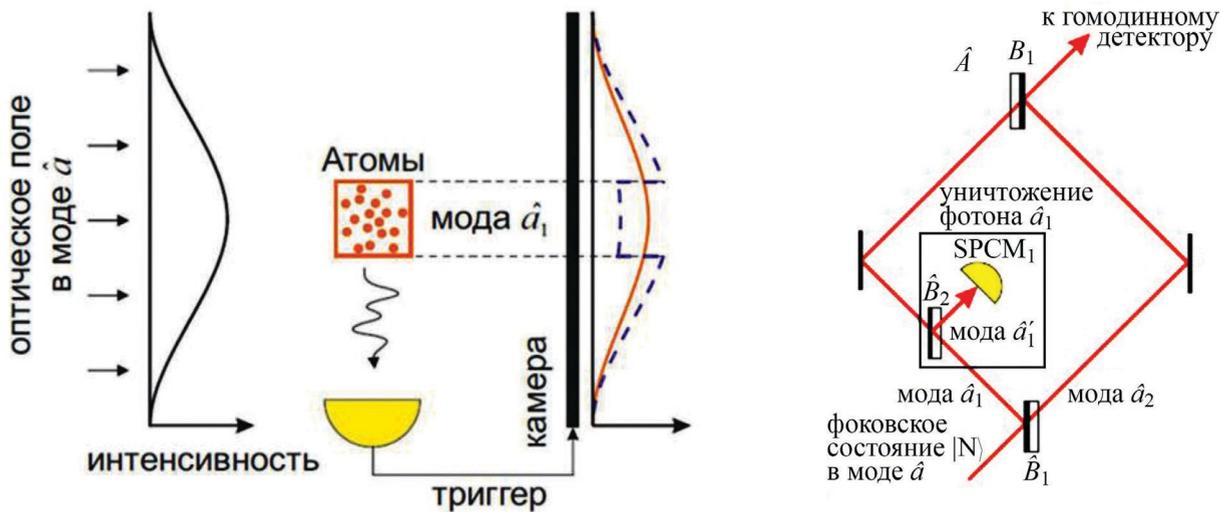
Эффект квантового вампира впервые был экспериментально обнаружен в группе Александра Львовского и опубликован в журнале *Optica* в 2015 году: “Quantum vampire: collapse-free action at a distance by the photon annihilation operator”. I.A. Fedorov, A.E. Ulanov, Yu.V. Kurochkin, and A.I. Lvovsky. *Optica*. Vol. 2, Issue 2, pp. 112-115. (2015).

Реальный эксперимент, как это обычно водится в физике, был реализован на несколько иных объектах, нежели мысленный опыт, описанный выше. Его упрощенная схема приведена на рисунке ниже.

Здесь на вход полупрозрачной пластинки (светоделиителя) подается свет в состоянии, содержащем несколько фотонов в некоторой моде  $a$ . Модой в оптике называется некоторое стационарное решение уравнений на распределение электромагнитного поля. При этом, поскольку свет квантован, то интенсивность излучения, соответствующая данному решению, также квантуется и описывается в рамках числа фотонов — элементарных квантов света.

Когда такой пучок попадает на светоделиитель  $B_1$ , свет переходит в состояние квантовой суперпозиции: он одновременно находится в состоянии отраженном (мода  $a_1$ ) и прошедшем через пластинку (мода  $a_2$ ). Чуть дальше части этого единого когерентного состояния «склеиваются» обратно в исходное состояние другим светоделителем  $B_2$ , после чего с помощью детектора измеряется число его фотонов. При этом на пути моды  $a_1$  реализована система, которая с очень маленькой вероятностью может удалить фотон. Факт удаления фотона регистрируется сигналом от специального счетчика SPCM3.

Эксперимент показал, что если счетчик SPCM3 дает сигнал, то детектор регистрирует число фотонов в исходной моде  $a$ , уменьшенное на единицу. При этом говорят, что квантовый вампир «покусал» моду в одном из плечей интерферометра. Дан-



ный факт был установлен для одно- и двухфотонных состояний света.

Результаты измерения числа фотонов в собранной моде  $a$  в зависимости от того, было поглощение на счетчике SPCM3 (фиолетовые данные) или не было (синие данные). Измерения были проведены для однофотонной (а) и двухфотонной (b) мод.

В группе Львовского этот эксперимент был объяснен в рамках понятий нелокальности и квантовой запутанности. Более подробно об этих интересных явлениях можно прочитать в большом интервью, (<https://nplus1.ru/material/2016/03/24/nonlocality>) которое Александр Исаевич дал для  $N + 1$ . Согласно данному объяснению, важной особенностью такого эксперимента является то, что удаление фотона из одной моды также удаляет фотон и из моды, расположенной от нее на некотором расстоянии, и это изменение происходит мгновенно. Нечто подобное наблюдается при квантовой телепортации.

Это входит в противоречие с повседневным опытом. В обычной жизни мы привыкли к тому, что при поглощении отраженного от какой-либо преграды света интенсивность света, прошедшего эту преграду, не изменяется. В противном случае, если бы мы видели себя в отражении оконного стекла, это означало бы, что по другую сторону окна нас не видно.

Граница, которая пролегает между квантовым и классическим подходами, определяется фактически интенсивностью взаимодействия измерительной системы с модой. Слабое взаимодействие производит преобразование квантового состояния, не разрушающее суперпозицию, в то время как интенсивное взаимодействие, как правило, приводит к ее необратимому измерению, которое также называется коллапсом, или редукцией фон Неймана. Такая редукция это, по сути, многоступенчатый процесс взаимодействия с окружением, в результате чего квантовая система теряет неопределенность. В данном случае, система из состояния с неопределенным выбором пути (отраженный  $a_1$  или прошедший  $a_2$ ) коллапсирует с некоторой вероятностью в состояние, соответствующее либо пути  $a_1$ , либо пути  $a_2$ .

Процесс редукции называется декогерентностью и является одним из самых главных препятствий на пути к созданию квантовых компьютеров.

Авторы же нового исследования отмечают тот факт, что в группе Львовского теоретически и экспериментально работали с состояниями света с фиксированным числом фотоном в моде. Вместе с тем известно, что любой источник света подвержен статистическим флуктуациям числа фотонов, вопрос лишь в том, насколько эти флуктуации существенны. Наиболее сильные флуктуации наблюдаются у источников, генерирующие излучение за счет тепловых процессов (например, лампа накаливания), поэтому свет, описываемый статистическим распределением числа фотонов в моде, получил название теплового света.

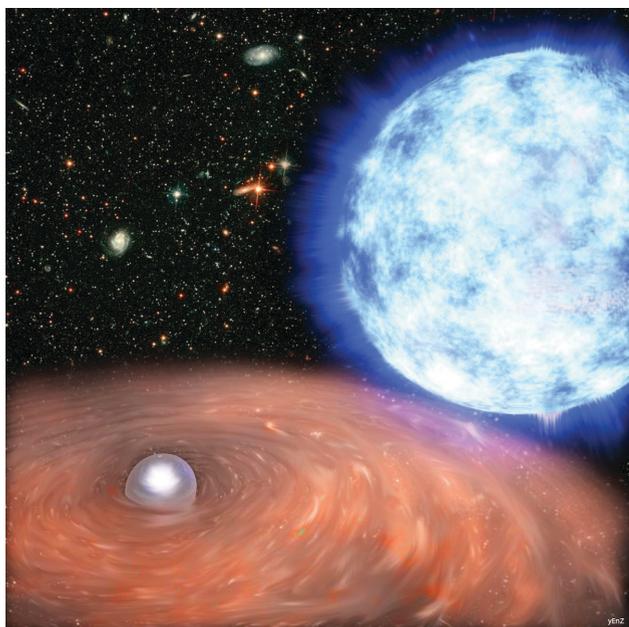
Группа Кулика экспериментально продемонстрировала эффект квантового вампира на тепловых состояниях света, пространственно разделенных на две отдельные моды. Они показали, что удаление фотона в одной из них приводит к тому, что в другой моде детектируется тепловое состояние с измененными статистическими свойствами, соответствующими вычитанию фотона. Оказалось, что результаты экспериментов могут быть объяснены без привлечения понятий квантовой нелокальности и запутанности, если просто учесть статистическую (классическую) корреляцию фотонов между собой. Из выводов данной работы следует, что эффект квантового вампира на самом деле не до конца «квантовый».

Хотя существование квантовой суперпозиции в эффекте квантового вампира оказывается под сомнением, исследования подобных систем вызывает большой интерес. В частности, мы уже рассказывали о недавнем исследовании, в котором физикам удалось создать суперпозицию порядка выполнения операций.

«Quantum Vampire Biting Thermal Light». K.G. Kataramadze, G.V. Avosopyants, Yu.I. Bogdanov, and S.P. Kulik. <http://www.lasphys.com/workshops/abstracts/files/2017/e2/82/c4/c3da88abfec7dd0d878694ab0e/abstract.pdf>

# АСТРОФИЗИКИ МГУ ВПЕРВЫЕ В МИРЕ НАБЛЮДАЛИ СЖИМАЮЩИЙСЯ БЕЛЫЙ КАРЛИК

*Астрофизики кафедры астрофизики и звездной астрономии (ГАИШ) МГУ имени М.В. Ломоносова совместно с российскими и итальянскими коллегами впервые обнаружили непосредственные свидетельства того, что белый карлик на ранних этапах своей эволюции сжимается. Увидеть это явление ученым помогла загадочная двойная звездная система в созвездии Кормы.*



*Белый карлик из системы HD49798/RX J0648.0—4418.  
Автор: Francesco Mereghetti.*

Ранее астрофизики предполагали, что молодые белые карлики, компактные «останки» эволюции звезд солнечного типа, на ранней стадии своей жизни должны сжиматься. Согласно расчетам, из-за постепенного остывания радиус типичного белого карлика может сократиться на несколько сотен километров в течение первого миллиона лет его существования.

Тем не менее, астрономических наблюдений, которые могли бы подтвердить истинность этой теории, до последнего времени не было. Дело в том, что большинство известных ученым белых карликов значительно старше, а также у астрономов не было надежного метода измерения радиуса таких звезд.

Сергей Попов и его коллеги смогли найти четкие признаки сжатия белых карликов, наблюдая за загадочным источником рентгеновского излучения в двойной звездной системе редкого типа. Речь идет о системе HD49798/RX J0648.0—4418,

расположенной на расстоянии 2000 световых лет от Земли, в созвездии Кормы. Ее внимательно изучают с помощью оптических, ультрафиолетовых и рентгеновских телескопов уже десятки лет.

«Благодаря этому открытию астрофизики смогут проверять модели эволюции молодых белых карликов. И искать похожие системы в галактике», — отметил главный автор статьи, ведущий научный сотрудник ГАИШ МГУ, доктор физико-математических наук, профессор, астрофизик Сергей Попов.

В системе находится компактный объект, период вращения которого составляет всего 13 секунд. Что это — белый карлик или нейтронная звезда — было предметом споров на протяжении многих лет. Если это белый карлик, то тогда ученые имеют дело с самым быстрым вращением подобного объекта среди известных астрономам. Соответственно, источник в рентгеновском диапазоне наблюдается благодаря аккреции вещества, падающего на карлика из звездного ветра от его звезды-спутника.

Недавно астрономы обнаружили, что скорость вращения компактного объекта уверенно растет на протяжении последних 20 лет. Период вращения сокращается на семь наносекунд в год — весьма мощный эффект для небесного тела, чья масса превосходит солнечную. Более того, в случае белого карлика такую скорость раскрутки нелегко объяснить в рамках привычных теорий, в которых вращение ускоряется за счет поглощаемого вещества звезды-соседки. А в случае нейтронной звезды не удастся объяснить многие другие особенности системы.

Попов и его коллеги предложили разгадку этого феномена: растущую скорость вращения легко объяснить тем, что белый карлик сжимается — подобно тому как фигурист складывает руки на груди, чтобы быстрее крутиться. По расчетам ученых, возраст звезды в системе HD49798/RX J0648.0—4418 составляет примерно два миллиона лет. Скорость сжатия около сантиметра в год, которая и ожидается для белого карлика такого

возраста, как раз идеально объясняет наблюдаемую скорость вращения и подтверждает, что астрофизики впервые идентифицировали сжимающийся белый карлик.

«У этого открытия есть два важных смысла. С одной стороны, существовала загадочная система. Несколько лет астрономы спорят, что там находится — белый карлик или нейтронная звезда? Это мы объяснили, хотя, возможно, это и не столь важно для астрофизики в целом. По значимости открытие можно сравнить с раскрытием детективом хитрого преступления — хотя событие вполне локальное, все равно интересно. Есть и второй смысл открытия. Десятки лет было понятно, что молодые белые карлики сжимаются. Саму же фазу сжатия “вживую” никогда не видели. И уникальность системы, которую мы наблюдали, в том, что белый карлик как будто подсветили (благодаря аккреции вещества с соседней звезды). Но

подсветили так аккуратно, что это не повлияло на его вращение — вот в чем редкость. В других аналогичных системах аккреция гораздо мощнее: уже она определяет, как белый карлик крутится, отчего заметить “красоту сжатия” невозможно», — рассказал Сергей Попов.

Исследование выполнено совместно с учеными из Института астрономии РАН, Института теоретической и экспериментальной физики имени А.И. Алиханова и Национального института астрофизики (Милан, Италия).

<sup>1</sup>  
“A young contracting white dwarf in the peculiar binary HD 49798/RX J0648.0–4418?” S.B. Popov, S. Mereghetti, S.I. Blinnikov, A.G. Kuranov, L.R. Yungelson. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, stx2910, <https://doi.org/10.1093/mnras/stx2910> Published: 13 November 2017.

## ЗАПУЩЕН УНИКАЛЬНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ ЭЛЕКТРОНОВ

*15 сентября 2017 года на территории промышленного парка «Агропромышленный парк К-Агро» Калужской области состоялось официальное открытие уникального Центра разработки и внедрения технологий обработки ускоренными электронами компании «Теклеор».*

Ускоритель электронов на энергию 10 МэВ и мощность пучка 15 кВт был разработан, изготовлен, установлен в центре «Теклеор» и введен в действие сотрудниками НИИЯФ МГУ, физического факультета МГУ и ООО «ЛЭУ МГУ» совместно с АО «НПП «Торий».

К Центру по снижению микробной загрязненности продуктов уже на стадии старта проявили интерес крупнейшие розничные сети, оптово-распределительные площадки, фабрики социального питания, Министерство обороны, Росрезерв.

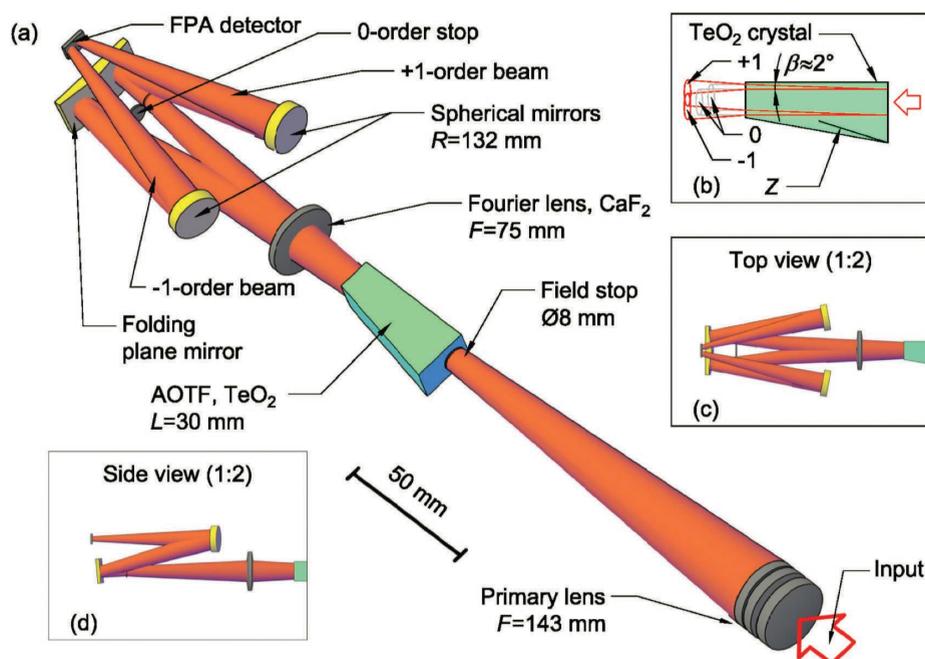
Основной вид деятельности нового центра — обработка ускоренными электронами растительного и животного сырья и конечной продукции, а также косметики с целью обеспечения их биологической безопасности, повышения качества, снижения потерь и увеличения срока годности. Инновационность состоит в том, что в процессе обработки не происходит значительного повышения температуры, продукты не меняют вкус, запах и текстуру. В числе преимуществ — безопасность для потребителя, отсутствие химических отходов. Такой вид обработки позволяет решать задачи снижения риска раковых заболеваний, вызванных развитием канцерогенов, препятствует распространению аллергических реакций и патологий. Именно поэтому продукты, обработанные ускоренными электронами, найдут широкое применение в социальном, лечебном и спортивном питании. Метод одобрен Всемирной организацией здравоохранения,

Всемирной торговой организацией, Международным агентством по атомной энергии и применяется в десятках стран мира.



# НОВЫЙ ДАТЧИК ДЛЯ МАРСОХОДА

Сотрудники физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова в составе международной коллаборации разработали компактный спектрополяриметр, позволяющий исследовать каменные породы на поверхности космических тел.



Устройство нового спектрополяриметра.

Метод спектральных изображений, то есть измерение спектральных характеристик в каждой конкретной точке объекта, широко используется для изучения поверхностей астрономических тел. Важную дополнительную информацию о структуре и составе пород дает спектральная поляриметрия. С помощью этого метода ученые определяют, как направление распространения света (плоскость поляризации) изменяется при его прохождении через минерал.

«Научная ценность данной работы заключается в разработке компактного и легкого спектрополяриметра, который можно было бы без труда разместить на марсоходе», — рассказал один из авторов статьи Сергей Потанин, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры астрофизики и звездной астрономии физического факультета МГУ.

В ходе работы ученые спроектировали спектрополяриметр, работающий в ближнем инфракрасном диапазоне. На основе расчетов группа создала лабораторный прототип и протестировала его гипсе и каолините. Эти минералы лучше прочих эмитируют поверхность Луны и Марса. Авторы исследования ожидают, что в будущем спектропо-

ляриметры такого типа будут использовать как инструмент разведки на планетоходах. В отличие от ныне используемых аналогов, новый прибор более компактный и легкий. Такого результата удалось добиться с помощью новой оптической схемы, в которой одновременно снимаются два изображения в двух перпендикулярных плоскостях поляризации.

«Главный результат работы заключается в разработке и создании опытного образца спектрополяриметра для исследования каменных пород. Предлагается использовать такой прибор в программе исследования планеты Марс (миссия EхоMars)», — добавил Сергей Потанин.

В работе принимали участие ученые из Института космических исследований РАН, Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» и AdlOptica GmbH (Германия).

“Compact acousto-optic imaging spectro-polarimeter for mineralogical investigations in the near infrared”. D.A. Belyaev, K.B. Yushkov, S.P. Anikin, Yu.S. Dobrolenskiy, A. Laskin, S.N. Mantsevich, V.Ya. Molchanov, S.A. Potanin, and O.I. Korablev. *Optics Express*. 25, 21, 25980–25991 (2017).

# СОЗДАН КВАНТОВЫЙ ГЕНЕРАТОР СЛУЧАЙНЫХ ЧИСЕЛ

*Группой ученых из лаборатории квантовых оптических технологий физического факультета МГУ М.В. Ломоносова, Академии Криптографии Российской Федерации и Института физики твердого тела РАН экспериментально реализован компактный высокоскоростной квантовый генератор случайных чисел, использующий регистрацию квазиоднофотонного излучения матрицей SiPM (Silicon Photo-Multiplier), что позволяет надежно достичь пуассоновской статистики фотоотсчетов.*

«Развитие современных квантовых технологий открыло новые перспективы для создания систем защищенной связи. Наиболее яркий пример — квантовая криптография. Для распределения секретных ключей в системах квантовой криптографии требуется большое количество случайных последовательностей 0 и 1. Для этих целей используются квантовые генераторы случайных чисел», — комментирует профессор физического факультета, руководитель лаборатории квантовых оптических технологий, автор статьи С.П. Кулик.

Выбор и использование оптимальной группировки фотоотсчетов для исходной последовательности актов фотодетектирования и полиномиального по длине последовательности метода извлечения случайной последовательности 0 и 1, позволил достичь скорости выходной доказуемо случайной последовательности в 64 Mbit/s, 75 Mbit/s и 100 Mbit/s. Скорость генерации случайной последовательности зависит от типа используемого SiPM. Случайные последовательности успешно прошли статистические тесты NIST.

«Случайные числа широко используются в различных областях науки и техники, например, при вычислении многомерных интегралов, моделировании различных процессов методом Монте-Карло. Наиболее широкое применение случайные числа находят в криптографии. Случайные последовательности используются для секретных ключей в системах симметричного шифрования, генерации паролей, PIN кодов для различных типов пластиковых карт, кодов аутентификации, вероятностных алгоритмов и систем квантового распределения ключей. Практически для всех упомянутых применений требуются случайные числа, полученные исключительно с физических генераторов.

Все генераторы случайных чисел можно разделить на два класса. Первый класс — генераторы, основанные на некоторых математических преобразованиях, как правило, рекуррентных, затравочного числа, обычно случайного. Такие генераторы выдают псевдослучайную последовательность. При известном алгоритме вся случайность связана с неопределенностью затравочного числа.

Второй класс — физические генераторы. Случайная последовательность возникает как результат измерения состояния физической системы. Если эволюция системы описывается законами классической физики, то случайность связана только с неопределенностью начальных условий. Даже при сложном законе классической эволюции начальные условия, в принципе, могут быть восстановлены. После этого эволюция системы будет полностью предсказуемой. Т.е. с логической точки зрения последовательности также будут псевдослучайными, поскольку могут быть в принципе восстановлены по начальным условиям и известному закону эволюции системы.

В этом смысле только квантовые генераторы случайных чисел, представляющие отдельный тип физических генераторов, могут производить истинную случайную последовательность» — прокомментировал один из Авторов статей профессор С.Н.Молотков.

«Результаты измерений над квантовой системой, приготовленной каждый раз в одном и том же состоянии, носят принципиально случайный характер. Поэтому истинная случайность имеет место только в квантовой области», — заключил С.П. Кулик.

При реализации квантовых генераторов случайных чисел принципиально важно иметь математически доказуемый и физически экспериментально проверяемый процесс измерений над системой, из которого генерируется исходная случайная последовательность. Это позволяет быть уверенным, что происхождение случайности действительно имеет квантовую природу.

«Реализация квантового генератора случайных чисел, основанного на оптимальной группировке фотоотсчетов». Балыгин К.А., Зайцев В.И., Климов А.Н., Кулик С.П., Молотков С.Н. Письма в «ЖЭТФ», **106**, 7, 451–458.

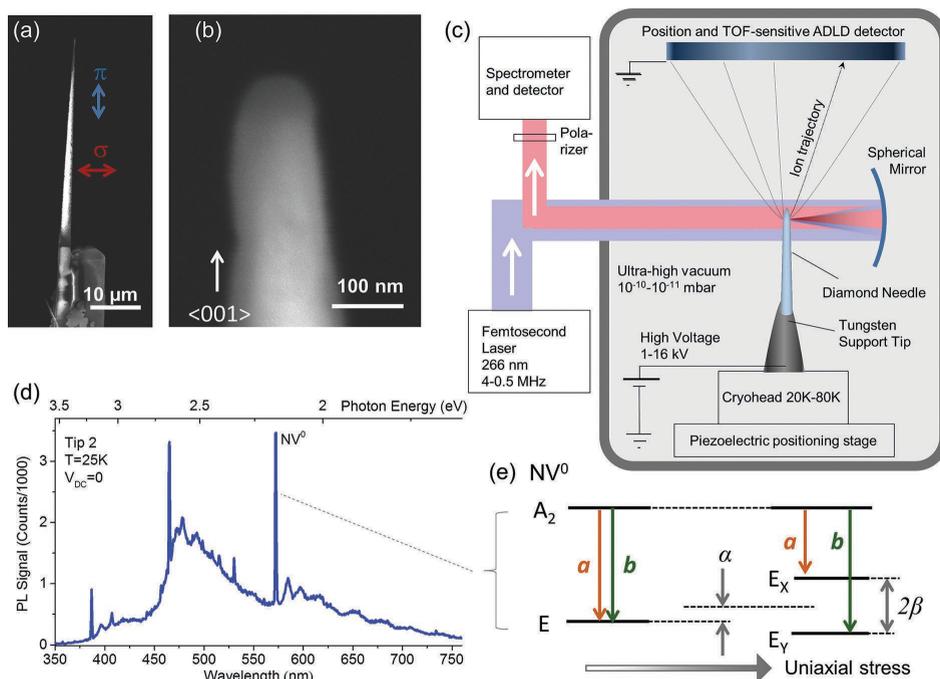
“Quantum random number generator based on ‘Fermi–Dirac’ statistics of photocounts of faint laser pulses with a 75 Mbit s<sup>-1</sup> rate”. Balygin K.A., Zaitsev V.I., Klimov A.N., Kulik S.P., Molotkov S.N., and S. Vinogradov E. Popova. Laser Physics Letters, **14**, 125207–125212.

# ЭФФЕКТ РАСТЯЖЕНИЯ ИГОЛЬЧАТЫХ АЛМАЗНЫХ КРИСТАЛЛИТОВ

На кафедре физики полимеров и кристаллов физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова обнаружили эффект растяжения игольчатых алмазных кристаллитов под действием приложенного электрического поля. Возникающая при таком растяжении деформация приводит к изменению в спектрах люминесценции, что может быть использовано для создания датчиков электрического поля и других квантово-оптических устройств.

Алмазы — это минералы, состоящие из углерода и широко известные своей рекордной твердостью. Однако примечательными являются и другие их свойства. Как и в других кристаллах, в алмазах всегда присутствуют структурные дефекты, некоторые из которых приводят к изменению окраски

мазы выращивают в составе пленок, образующихся в ходе газофазного химического осаждения из смеси метана и водорода, содержащей также и другие «неалмазные» фракции. Затем из полученных пленок удаляют лишний материал, «выжигая» его при нагреве до определенной температуры на воздухе.



(поглощения света) или люминесценции и поэтому называются центрами окраски. Особые свойства некоторых разновидностей центров окраски в алмазе делают их привлекательными для использования в квантово-оптических устройствах, к числу которых относятся, например, кубиты, использующие эффект запутанности квантовых состояний фотонов. Одно из требований, необходимых для использования алмаза в таких устройствах, состоит в том, чтобы расстояние между отдельными центрами окраски было порядка 30 нанометров.

В своих прошлых работах группа исследователей под руководством профессора кафедры физики полимеров и кристаллов физического факультета МГУ, доктора физико-математических наук Александра Образцова нашла способ массового получения алмазных микроиглолок. Согласно их методике, сначала ал-

«В новой работе мы попытались получить как можно больше информации об алмазных иглах, которые мы получаем, в частности о центрах окраски», — рассказал профессор Образцов. Чтобы понять, как в структуре алмазов расположены центры окраски и какие у них свойства, ученые обратились к французским коллегам, которые обладают уникальной методикой, позволяющей провести необходимые измерения. «С помощью этой методики наши французские коллеги изучают химический состав и пространственное расположение примесей в различных материалах», — уточнил Образцов.

В ходе измерений алмазные иглы крепили к электроду, размещенному в камере, которая обеспечивала создание и поддержание высокого вакуума. Для растяжения к электроду прикладывалось высокое

напряжение, что вызывало электрическую поляризацию диэлектрического алмаза и значительное механическое усилие, растягивающее иглу. Растяжение приводило к деформации кристаллической структуры алмаза.

«При этом деформируется и структура отдельных центров окраски, — пояснили авторы исследования. — А вместе со структурой меняются их квантово-оптические характеристики. Если раньше для этого можно было только сжимать алмазы, то теперь нам впервые удалось сделать то, что раньше не удавалось, — растянуть их».

В момент растяжения образца ученые облучали лазером центры окраски и при помощи спектрометра регистрировали их люминесценцию. В ходе эксперимента исследователи обнаружили, что линии люминесценции изменяют свою форму и энергию в зависимости от силы растяжения, которую определяет приложенное электрическое напряжение. Это позволяет надеяться, что на основе аналогичных алмазных иглолок можно будет создать детекторы, обеспечивающие бесконтактное измерение электрических полей с высоким пространственным разрешением.

«Таковыми детекторами можно будет измерять не только поля, созданные с помощью высокого напряжения в условиях высокого вакуума, но и поля, которые существуют в биологических молекулах: ДНК, РНК и других. Измерять такие поля сегодня — гигантская научная проблема», — прокомментировал Образцов. Поскольку острия алмазных игл имеют размеры от нескольких нанометров до сотен, то и измерения, по словам исследователей, можно будет производить с точностью, соответствующей отдельным фрагментам таких молекул. Возможно, что алмазные микроиглы, способ получения которых разработан физиками МГУ, будут способны также обеспечить оптическое, бесконтактное, детектирование не только электрических, но магнитных полей, температуры и других характеристик с нано- и микроскопическим пространственным разрешением.

“Optical Contactless Measurement of Electric Field-Induced Tensile Stress in Diamond Nanoscale Needles”. L. Rigutti, L. Venturi, J. Houard, A. Normand, E.P. Silaeva, M. Borz, S.A. Malykhin, A.N. Obratsov, and A. Vella. *Nano Lett.*, Article ASAP. DOI: 10.1021/acs.nanolett.7b03222. Publication Date (Web): November 2, 2017.

## МНОГОСЛОЙНАЯ И МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНАЯ НАНОСТРУКТУРА

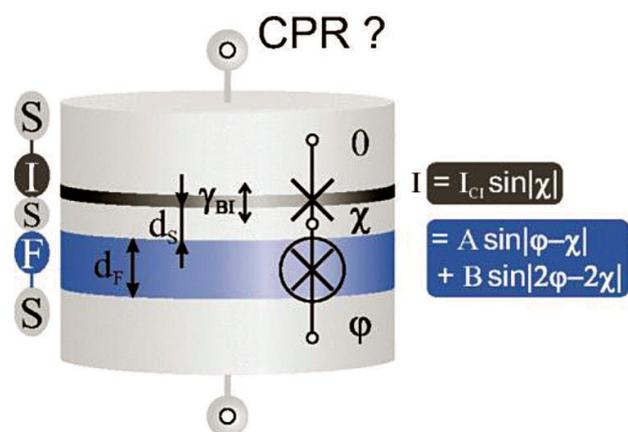
*Ученые кафедры атомной физики, физики плазмы и микроэлектроники физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова исследовали особенности наноструктуры, содержащей слои сверхпроводника, изолятора и ферромагнетика.*

«Особое внимание в работе уделялось связи между макроскопическими (ток) и микроскопическими (разность фаз параметра порядка) величинами, характеризующими состояние системы», — рассказал доцент кафедры атомной физики, физики плазмы и микроэлектроники отделения ядерной физики физического факультета МГУ Николай Кленов.

Для теоретического исследования ученые использовали согласованный анализ уравнений, описывающих транспорт заряда через структуру с макроскопическими (уравнения «резистивной модели») и микроскопическими (уравнения Узаделя с граничными условиями Куприянова-Лукичева) позиций.

«Результаты этой работы будут использованы для проектирования новых устройств быстрой одноквантовой электроники и новых потоковых квантовых битов», — заключил ученый.

Работа проходила в сотрудничестве с исследователями из Московского физико-технического института.



“Current-phase relations in SIsFS junctions in the vicinity of 0- $\pi$  transition”. Bakurskiy S.V., Filippov V.I., Ruzhickiy V.I., Klenov N.V., Soloviev I.I., Kupriyanov M.Yu, Golubov A.A. *J. Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*. **95**, N 9, 094522–1-094522–11. (2017).

# ПЕРЕЛИВАНИЕ ПАЦИЕНТАМ ИСКУССТВЕННЫХ ПЛАЗМОЗАМЕЩАЮЩИХ РАСТВОРОВ МОЖЕТ ПОВЫШАТЬ РИСК ТРОМБОЗОВ

*Ученые физического факультета МГУ и Национального научно-практического центра детской гематологии, онкологии и иммунологии им. Дмитрия Рогачева провели совместные исследования влияния искусственных плазмозамещающих растворов (ПЗР) на состояние системы свертывания крови. Их работа убедительно показала, что переливание таких растворов пациентам может стать риск-фактором развития тромбозов.*

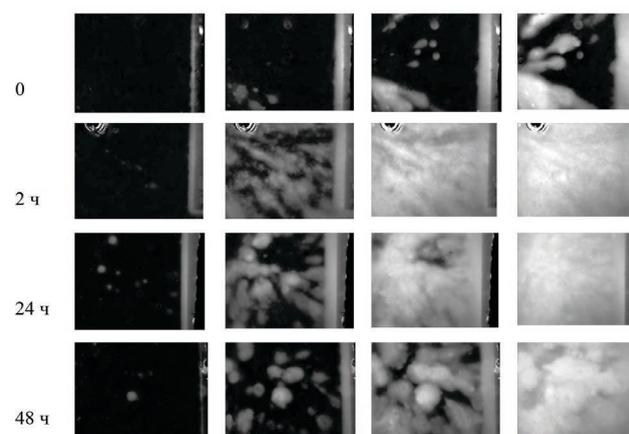
Гемостаз – сложная система, поддерживающая в организме жидкое состояние крови в нормальных условиях и приводящая к быстрому ее свертыванию в условиях нарушения целостности сосудов. Потери жидкости из сосудов обязательно надо компенсировать. Главная цель при этом – простое восполнение объема циркулирующей крови, поэтому для ее достижения широко применяются искусственные плазмозамещающие растворы. Переливание этих растворов влияет на гемостаз, т.к. они не содержат компонентов системы свертывания и просто разбавляют кровь. Однако сведения о влиянии ПЗР на гемостаз до сегодняшнего дня были очень противоречивы, в частности, оставалось неясным, вызывают ли они изменение свертывания крови в сторону его ослабления (гипокоагуляция) или усиления (гиперкоагуляция).

Большинство врачей интуитивно полагает, что разбавление крови должно приводить к замедлению коагуляции, т.к. концентрации прокоагулянтных компонентов системы свертывания (факторов) при разбавлении снижаются. Однако гемостаз является тонко сбалансированной системой, в которой задействовано много участников, причем не только про-, но и антикоагулянтов (ингибиторов свертывания).

В своих исследованиях наши ученые сфокусировались на одном фундаментальном вопросе: как сам процесс разбавления плазмы влияет на состояние гемостаза. Хорошо известно, что все факторы свертывания присутствуют в крови в большом избытке. Свертывание начинает замедляться только когда концентрации этих факторов в плазме снижаются на 50–80%. Ситуация с антикоагулянтами (в первую очередь, антитромбином) другая. Их реакции с соответствующими активными факторами-мишенями подчиняются кинетическим уравнениям второго порядка, что означает, что скорость ингибирования свертывания снижается прямо пропорционально снижению концентрации

ингибитора. Это позволило предположить, что ответом гемостаза на умеренное разбавление плазмы (до 2–2.5 раз) может быть ускорение свертывания, т.к. при этих степенях разбавлений оно не должно сильно подавляться из-за снижения концентраций прокоагулянтных факторов, однако должно быть ускорено из-за снижения концентраций антикоагулянтов.

Проведенные эксперименты подтвердили эту гипотезу. На рисунке мы видим четыре ряда последовательных фотографий, сделанных в крови одного и того же пациента до и через различные времена после переливания ему содержащего желатин ПЗР



*Серии фотографий растущих сгустков в образцах плазмы пациента, взятых в различные моменты времени после переливания ему желатинового ПЗР гелофузина (степень гемодилюции 1.68 раза). Образцы плазмы были получены до, а также через 2, 24 и 48 часов после переливания. Каждый горизонтальный ряд представляет последовательные фотографии одной пробы, снятые через 5, 10, 15 и 25 минут после активации свертывания. Активатор, от которого начинает расти сгусток в экспериментальной камере (стекло), на photographиях расположен справа.*

гелофузина (степень разбавления 1.68 раза). Хорошо видно, что свертывание идет гораздо интенсивнее в крови, разбавленной ПЗР, причем эффект не исчезает полностью даже через двое суток.

Таким образом, разбавление крови может быть риск фактором возникновения тромботических осложнений при переливании ПЗР в ходе терапии. Полученные результаты не только говорят о необходимости контроля за состоянием гемостаза при переливаниях ПЗР. Они привели нас к идее создания нового поколения таких растворов, в состав

которых заранее введен ингибитор тромбина, который нивелирует ускоряющее действие разбавления плазмы на гемостаз.

“Moderate plasma dilution using artificial plasma expanders shifts the haemostatic balance to hypercoagulation”. E.I. Sinauridze, A.S. Gorbatenko, E.A. Seregina, E.N. Lipets, F.I. Ataulakhanov, Sci. Reports, 7, 843 (2017).

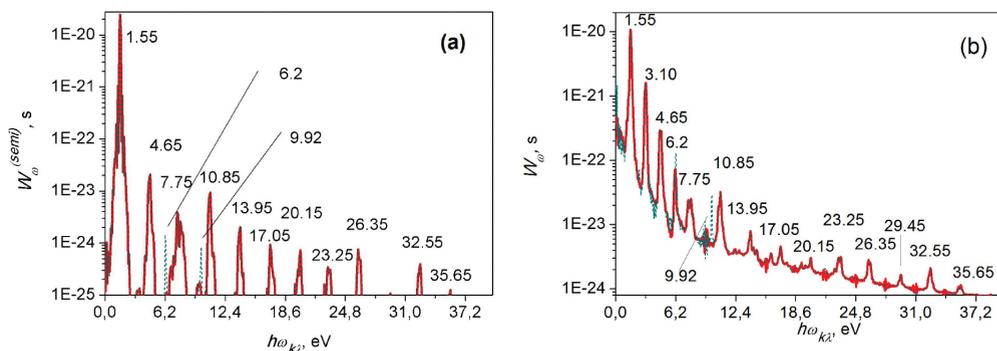
## АНАЛИЗ СПОНТАННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ АТОМОВ

*Сотрудники кафедры атомной физики, физики плазмы и микроэлектроники физического факультета и Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д.В. Скобельцына МГУ имени М.В. Ломоносова сформулировали новый подход к анализу спонтанного излучения атомов при воздействии на них сильного лазерного поля.*

«В статье сформулирован новый подход к анализу спонтанного излучения квантовыми системами — атомами — при воздействии на них

«Мы планируем дальнейшее развитие и совершенствование предложенного подхода, в частности на случай, когда атом находится в некласси-

*Полуклассические (а) и квантово-механические (б) спектры спонтанного атомарного излучения.*



сильного лазерного поля, причем воздействие лазерного поля рассматривается вне рамок теории возмущений, то есть поле может произвольно сильным», — рассказал автор статьи, доктор физико-математических наук, профессор кафедры атомной физики, физики плазмы и микроэлектроники физического факультета МГУ Александр Попов.

В ходе работы авторы использовали возможности университетского суперкомпьютерного кластера «Ломоносов». В результате реализации нового подхода ученые показали возможность анализа начальных стадий развития многочисленных нелинейных эффектов в газовых и плазменных средах на должном уровне строгости, без использования различного рода допущений.

ческом поле, например в так называемом сжатом состоянии, что представляет интерес для современной квантовой оптики. Есть и другие перспективы развития. Основная ценность данной работы — более глубокое понимание физики генерации в среде высоких гармоник лазерного излучения и связанного с этим процесса генерации импульсов аттосекундной длительности», — заключил ученый.

Исследование выполнено совместно с учеными из Физического института имени П.Н. Лебедева РАН.

“Prospects of odd and even harmonic generation by an atom in a high-intensity laser field“, A.V. Bogatskaya, E.A. Volkova, A.M. Popov, Laser Physics Letters, 14, № 5, 055301 (2017).

# ПРЕДСКАЗАНО СУЩЕСТВОВАНИЕ КОРОТКОЖИВУЩЕГО ТЕТРАНЕЙТРОНА С БЕСПРЕЦЕДЕНТНЫМИ СВОЙСТВАМИ

*Сотрудник МГУ имени М.В. Ломоносова и его коллеги, используя новое взаимодействие между нейтронами, теоретически обосновали полученное в эксперименте низкое значение энергии тетранейтронного резонанса.*

Это доказывает возможность существования частицы, состоящей из четырех нейтронов, но в течение очень короткого времени. Согласно расчетам, время жизни тетранейтрона составляет  $5 \times 10^{-22}$  с. С результатами работы можно ознакомиться в высокорейтинговом журнале *Physical Review Letters*.

Коллектив российских, немецких и американских ученых, в состав которого входит старший научный сотрудник Научно-исследовательского института ядерной физики (НИИЯФ) имени Д.В. Скобельцына Андрей Широков, вычислил энергию резонансного состояния тетранейтрона. Их теоретические расчеты, имеющие в своей основе новый подход к исследованию и новое взаимодействие между нейтронами, согласуются с данными эксперимента, в котором был образован тетранейтрон.

В результате столкновения в эксперименте альфа-частица выбивалась из  $^8\text{He}$ , оставляя систему из 4 нейтронов, или тетранейтрон.

В результате столкновения в эксперименте альфа-частица выбивалась из  $^8\text{He}$ , оставляя систему из 4 нейтронов, или тетранейтрон.

## **В поисках нейтронной стабильности**

Нейтрон живет около 15 мин. перед тем, как распадается на протон, электрон и антинейтрино. Известна также стабильная система, состоящая из огромного числа нейтронов, — нейтронная звезда. Целью ученых было выяснить, существуют ли какие-то другие, хотя бы короткоживущие системы, состоящие только из нейтронов.

Система из двух нейтронов не образует даже короткоживущих состояний. На основе много-



летних экспериментальных и теоретических исследований считается общепринятым, что нет таких состояний и в системе из трех нейтронов. Более 50 лет велись поиски тетранейтрона — системы из четырех нейтронов. Многие годы эти поиски не приносили результата, пока в 2002 году группа французских исследователей в эксперименте на Большом национальном ускорителе тяжелых ионов (Grand accélérateur national d'ions lourds — GANIL) в Кане не обнаружила 6 событий, которые могли бы трактоваться как образование тетранейтрона. Однако воспроизвести этот эксперимент не удалось, и некоторые исследователи придерживаются мнения, что в нем использовался некорректный анализ данных.

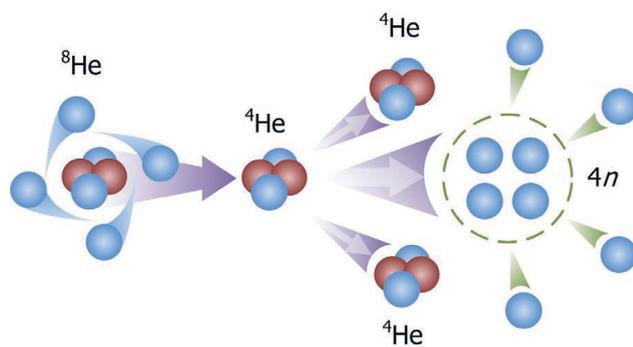
Новый этап поисков тетранейтрона проводится на Фабрике радиоактивных ионов в японском институте RIKEN, где научились создавать хороший пучок ядер  $^8\text{He}$ . Ядро  $^8\text{He}$  состоит из  $\alpha$ -частицы (ядра  $^4\text{He}$ ) и окружающих ее четырех нейтронов. Заявки на проведение экспериментов по поиску тетранейтрона были поданы сразу несколькими группами ученых из разных стран. В первом таком эксперименте, опубликованном в этом году японской группой, ядра  $^8\text{He}$  направлялись на мишень из ядер  $^4\text{He}$ , и в результате столкновения  $\alpha$ -частица выбивалась из  $^8\text{He}$ , оставляя систему из четырех нейтронов. Было обнаружено четыре события, которые интерпретируются как короткоживущее резонансное состояние тетранейтрона. Этот эксперимент продолжается.

### Сколько жить тетранейтрону?

В своей статье ученый МГУ имени М.В. Ломоносова и его коллеги привели теоретические оценки энергии резонансного состояния тетранейтрона и его времени жизни. Они помогли в подготовке одного из экспериментов по поиску тетранейтрона, когда с просьбой обратилась группа экспериментаторов из Германии.

«Такие оценки были проведены нами в разных моделях, и соответствующие результаты легли в основу заявки на эксперимент. После этого был тщательно разработан теоретический подход и проведены многочисленные расчеты на суперкомпьютерах, результаты которых и опубликованы в нашей статье в *Physical Review Letters*», — говорит Андрей Широков, первый автор статьи.

Полученные результаты для энергии тетранейтронного резонанса 0.84 МэВ прекрасно согласуются с данными японского эксперимента 0.83 МэВ, которые, впрочем, характеризуются большой погрешностью (примерно  $\pm 2$  МэВ). Для ширины резонансного состояния тетранейтрона рассчитано значение 1.4 МэВ,



что соответствует времени его жизни примерно  $5 \cdot 10^{-22}$  с.

«Отметим, что до нас ни в одной теоретической работе не предсказывалось существование резонансного состояния тетранейтрона при таких низких энергиях, порядка 1 МэВ», — продолжает Андрей Широков.

Возможно, это связано с тем, что ученые разработали и применили новый теоретический подход к исследованию резонансных состояний в ядерных системах, который был апробирован на более простых задачах и затем применен к исследованию тетранейтрона с учетом специфики распада этой системы на четыре частицы.

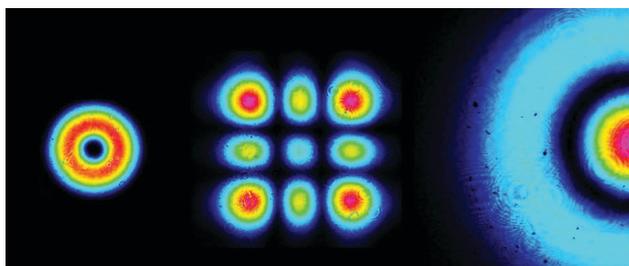
«Однако возможна и другая причина, связанная с тем, что мы использовали новое взаимодействие между нейтронами, разработанное в нашей группе. Исследования эти будут продолжены, мы проведем расчеты с другими, более традиционными взаимодействиями, а наши французские коллеги намерены изучить тетранейтрон с нашим взаимодействием в их подходе. Ну и, конечно, с огромным интересом ожидают результаты новых экспериментов по поиску тетранейтрона», — заключает Андрей Широков.

Исследования проводились большой международной группой теоретиков, где со стороны России участвовали ученые не только из МГУ имени М.В. Ломоносова, но и из Тихоокеанского государственного университета (г. Хабаровск), а также коллеги из США и Германии. В дальнейшем в работы включатся ученые из Южной Кореи. Российская сторона играла ведущую роль в этих исследованиях, в разработке теоретического подхода как к исследованию резонансных состояний, так и к построению нового взаимодействия между частицами в атомных ядрах.

“Prediction for a Four-Neutron Resonance“, A. M. Shirokov, G. Papadimitriou, A. I. Mazur, I. A. Mazur, R. Roth, and J. P. Vary. *Phys. Rev. Lett.*, **117**, 182502 (2016).

# МЕТОД СОЗДАНИЯ ПЕРЕПУТАННЫХ СОСТОЯНИЙ ФОТОНОВ

*Сотрудники физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова разработали новый метод создания перепутанных состояний фотонов — состояния, в которых пары фотонов оказываются коррелированы — взаимосвязаны — между собой.*



*Пучки фотонов, заснятые с помощью ПЗС-матрицы. Цвета соответствуют интенсивности: от черного (мин.) до белого (макс.).*

Физики МГУ изучили перепутанное состояние фотонов. При перепутанном, или запутанном, состоянии фотонов состояние определено только для всей системы, а для каждой частицы в отдельности — нет.

«Перепутанные состояния вообще типичны и повсеместны. Проблема только в том, что для большинства частиц взаимодействие с окружением быстро разрушает перепутывание. Фотоны же практически ни с чем не взаимодействуют, поэтому они являются очень удобным объектом для экспериментов в этой области. Большая часть излучения, с которым мы сталкиваемся в жизни, относится к классическому типу, это, например, тепловой свет (Солнце, звезды, лампы накаливания и т.п.), когерентное излучение лазера — тоже классическое. Создание неклассического света — непростая задача. Можно, например, изолировать одиночный атом или искусственную структуру, типа квантовой точки, и регистрировать его излучение — так получают одиночные фотоны», — рассказал Станислав Страупе, соавтор статьи, кандидат физико-математических наук, сотрудник кафедры квантовой электроники и лаборатории квантовых оптических технологий физического факультета МГУ.

Для получения перепутанных состояний фотонов чаще всего используют эффект спонтанного параметрического рассеяния света в нелиней-

ных кристаллах. В этом процессе фотон лазерной накачки распадается на два фотона. При этом в силу законов сохранения состояния фотонов оказываются коррелированы, перепутаны. «В нашей работе мы предложили и опробовали новый метод создания пространственного перепутывания — пары фотонов, генерируемые в нашем эксперименте, распространяются пучками, которые оказываются коррелированы по “пространственной форме”. Ключевой особенностью нашего метода по сравнению с известными ранее является эффективность», — прокомментировал Егор Ковлаков, соавтор статьи, аспирант кафедры квантовой электроники отделения радиофизики физического факультета МГУ.

Изучение перепутанных состояний фотона началось в 70-х годах, и сейчас особо активно они применяются в квантовой криптографии — это область передачи квантовой информации и квантовой связи.

«Квантовая криптография — лишь одно из возможных приложений, но наиболее на данный момент развитое. В отличие от классической связи, где неважно, какой именно алфавит используется для кодирования сообщения и достаточно использовать бинарный (0 и 1), в квантовой связи все сложнее. Оказывается, что повышение размерности алфавита не только увеличивает количество информации, кодируемое в одном фотоне, но и увеличивает секретность связи. Поэтому хочется развивать системы квантовой связи, основанные в том числе и на кодировании информации в пространственной форме фотонов», — отметил Станислав Страупе. Ученые планируют, что в дальнейшем их разработка будет применяться для создания оптического канала со спутником, куда нельзя протянуть оптическое волокно (световод) — основу для оптоволоконной связи.

“Spatial Bell-State Generation without Transverse Mode Subspace Postselection”. E. V. Kovlakov, I. B. Bobrov, S. S. Straupe, and S. P. Kulik. *Phys. Rev. Lett.*, **118**, 030503 (2017).

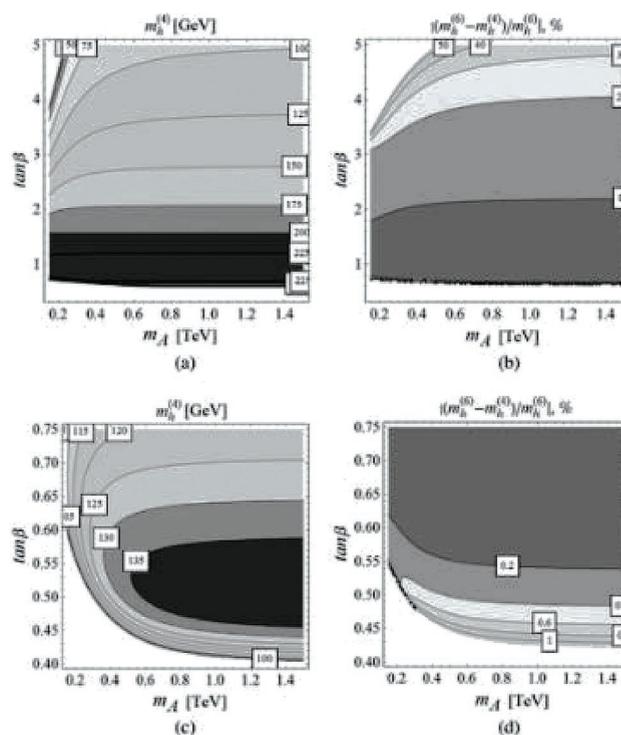
# ИЗУЧЕНИЕ КОНСТАНТ САМОДЕЙСТВИЯ ПОЛЕЙ В СЕКТОРЕ ХИГГСА

Сотрудники физического факультета и Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д.В.Скобельцына МГУ имени М.В. Ломоносова получили аналитические выражения для констант самодействия полей в секторе Хиггса.

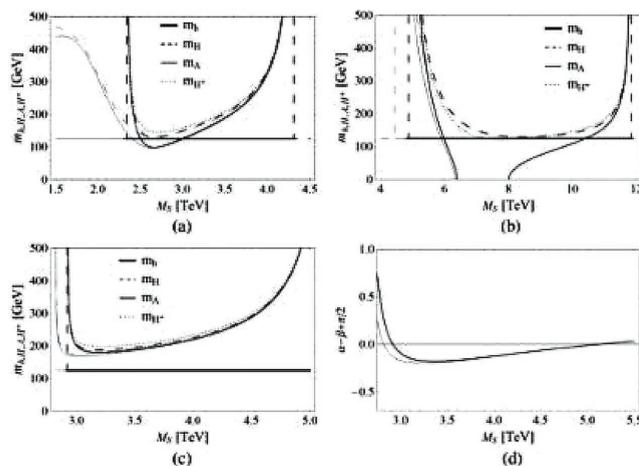
«Получены аналитические выражения для констант самодействия полей в секторе Хиггса минимальной суперсимметричной стандартной модели (МССМ) с эффективными операторами размерности шесть», — рассказала аспирант кафедры физики атомного ядра и квантовой теории столкновений физического факультета МГУ Елена Петрова.

В ходе работы ученые использовали методы теории поля и метод эффективного потенциала. Ученые отмечают, что при анализе сценариев по поиску бозонов Хиггса МССМ необходимо учитывать полученные радиационные поправки.

«Ценность работы в том, что было обращено внимание на необходимость учета радиационных поправок к операторам высших размерностей, продемонстрированы вклады от них. Учет таких поправок позволит получить новые разрешенные области в пара-



Массы бозона Хиггса и комбинация углов смешивания.



Контуры для масс бозона Хиггса.

метрических сценариях по поиску бозонов Хиггса на БАК. Исследования будут продолжены в случае нарушения CP-инвариантности в секторе Хиггса», — заключила Елена Петрова.

“Radiative corrections to Higgs boson masses for the MSSM Higgs potential with dimension-six operators“. M.N. Dubinin and E.Yu. Petrova. Phys. Rev. D **95**, 055021 (2017).

# МАТЕРИАЛЫ С НЕТРИВИАЛЬНЫМИ ТОПОЛОГИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ

*Сотрудники физического и химического факультетов МГУ имени М.В. Ломоносова нашли доказательства гипотезы о существовании спин-поляризованных поверхностных состояний в дираковских материалах.*

«Суть работы заключалась в получении экспериментальных аргументов в пользу гипотезы о том, что в дираковских полуметаллах могут существовать спин-поляризованные поверхностные состояния с высокой подвижностью носителей заряда, аналогично топологическим изоляторам», — рассказал доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой общей физики и физики конденсированного состояния отделения физики твердого тела физического факультета МГУ Дмитрий Ремович Хохлов.

Идеологически работа является продолжением цикла исследований фотоэлектрических свойств топологических изоляторов под действием лазерного терагерцового излучения. Основные измерения проводились под руководством старшего преподавателя кафедры общей физики и физики конденсированного состояния Александрой Галеевой на уникальной установке в Регенсбургском университете в рамках программы совместных исследований, активно функционирующей уже десять лет.

«В рамках этих исследований, в частности, было установлено, что термализация горячих носителей заряда, возбужденных терагерцовым лазерным им-

пульсом, существенно подавлена в топологических изоляторах по сравнению с тривиальными изоляторами. Результаты, полученные в работе, о которой идет речь, свидетельствуют о том, что это утверждение, по всей вероятности, справедливо и для других материалов с нетривиальными топологическими свойствами — дираковских полуметаллов. Дальнейшие исследования в данном направлении должны показать, насколько высказанная гипотеза является общей для всех полупроводниковых материалов с нетривиальными топологическими свойствами», — заключил Дмитрий Ремович Хохлов.

Исследования проводились в сотрудничестве с учеными из Белгородского государственного национального исследовательского университета, из Юго-Западного государственного университета, из Курского государственного политехнического колледжа и из Регенсбургского университета (Германия).

“Electron energy relaxation under terahertz excitation in  $(\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x)_3\text{As}_2$  Dirac semimetals“. A.V. Galeeva, I.V. Krylov, K.A. Drozdov, A.F. Knjazev, A.V. Kochura., A.P. Kuzmenko, V.S. Zakhvalinskii, S.N. Danilov, L.I. Ryabova and D.R. Khokhlov, Beilstein J. Nanotechnol., **8**, 167–171 (2017).

# СУПЕРКАНАЛ ДЛЯ ОПТОВОЛОКОННЫХ СИСТЕМ СВЯЗИ

*Сотрудники кафедр оптики, спектроскопии и физики наносистем физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова разработали устройство для увеличения скорости передачи информации в когерентных волоконно-оптических системах связи.*

Когерентные волоконно-оптические системы связи позволяют передавать крупные массивы информации на большие расстояния с высокой скоростью.

«В работе теоретически и экспериментально продемонстрирована возможность увеличения скорости передачи информации в когерентных волоконно-оптических системах связи при создании суперканалов, объединяющих по три информационных канала в каждом спектральном канале», — рассказал один из авторов статьи, доктор физико-математических наук, профессор Олег Наний, профессор кафедры оптики, спектроскопии и физики наносистем физического факультета МГУ.

Научная ценность работы состоит в том, что при когерентном детектировании, когда используются данные о начальной фазе сигнала, показана возможность разделения информационных каналов, передаваемых в одной оптической полосе. «Использование суперканалов рассматривается сегодня как главное направление увеличения емкости оптических сетей связи», — подытожил Олег Наний.

“Experimental study and numerical modelling of a  $3 \times 100\text{G}$  DP-QPSK superchannel.“ V.A. Konyshv, A.V. Leonov, O.E. Nanii, A.G. Novikov, P.V. Skvortsov, V.N. Treshchikov, R.R. Ubaydullaev. Quantum Electron, **47** (8), 767–772 (2017).

# ОГРАНИЧЕНИЕ НА МИЛЛИЗАРЯД НЕЙТРИНО ВКЛЮЧЕНО В НОВЫЙ ПЕРЕЧЕНЬ ОСНОВНЫХ СВОЙСТВ НЕЙТРИНО

*Лауреат Нобелевской премии по физике, присужденной в 2015 году за открытие осцилляций нейтрино, Такааки Каджита (Япония) и профессор А.И. Студеникин (Россия) после выступления последнего с докладом на международной конференции по осцилляциям нейтрино NOW-2016 (Отранто, Италия, сентябрь 2016 года).*



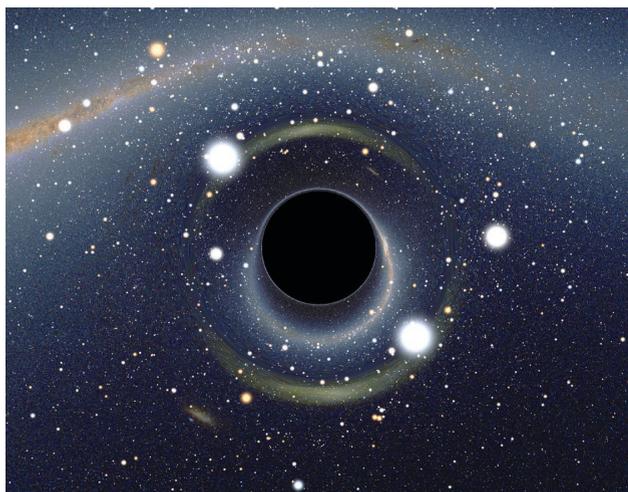
На кафедре теоретической физики предложен и реализован способ получения ограничения на миллизаряд нейтрино на основе анализа экспериментальных данных по рассеянию антинейтрино от реакторов на мишени. Результаты этих исследований были представлены в работе профессора Александра Ивановича Студеникина «New bounds on neutrino electric millicharge from limits on neutrino magnetic moment», опубликованные в *Europhysics Letters*, том 107, с. 21001. 2014. В указанной работе используются последние данные российского эксперимента GEMMA (Germanium Experiment for Measurement of Magnetic Moment of Antineutrino) по исследованию рассеяния антинейтрино на Калининской атомной станции. Полученное А.И. Студеникиным новое ограничение на миллизаряд нейтрино ( $qv \leq 1,5 \times 10^{-12} e_0$ ,  $e_0$  — абсолютное значение заряда электрона) было признано лучшим мировым ограничением, следующим из данных о рассеянии реакторных нейтрино на мишени.

Новое ограничение на миллизаряд нейтрино было включено «Международной коллаборацией по свойствам элементарных частиц»

(«Particle Data Group Collaboration») в новый перечень основных свойств нейтрино и опубликовано в «Обзоре по физике элементарных частиц» («The Review of Particle Physics 2016»).

Изучение электромагнитных характеристик нейтрино будет являться одним из важных направлений исследований в новом международном мега-проекте JUNO (Jiangmen Underground Neutrino Observatory), который в настоящее время находится в стадии активной подготовки в Китае. Начало регистрации нейтринных потоков от различных источников планируется на 2020 год. Научная группа кафедры теоретической физики физического факультета под руководством А.И. Студеникина занимается исследованием возможности экспериментального наблюдения проявления электромагнитных свойств массивных нейтрино. Нужно отметить, что в 2016 году благодаря исследованиям, проводимым на физическом факультете МГУ, Московский университет получил официальный статус полного члена проекта JUNO, а А.И. Студеникин вошел в состав руководящих органов коллаборации как представитель от МГУ.

# УДИВИТЕЛЬНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ВБЛИЗИ СВЕРХМАССИВНОЙ ЧЕРНОЙ ДЫРЫ



Сотрудники ГАИШ МГУ имени М.В.Ломоносова исследовали изменения излучения вещества вблизи сверхмассивной черной дыры в центре галактики, известной астрономам как NGC 2617. Данные изменения были обнаружены несколько лет назад: объект стал намного ярче, и газовые облака вблизи сверхмассивной черной дыры, которые не были видны ранее, стали наблюдаться. Такое резкое изменение может дать ценную информацию для понимания того, каково окружение гигантской черной дыры, как и что происходит вблизи нее. Результаты исследований были опубликованы в *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* (MNRAS).

В ядрах большинства галактик, включая Млечный Путь, находятся гигантские черные дыры. Они имеют массу от миллиона до миллиарда раз больше массы Солнца. Ядро нашей Галактики не является активным, но в некоторых галактиках черная дыра, «питаясь» газом, который падает в нее по спирали, испускает огромное количество излучения. Ядра подобных галактик называются активными галактическими ядрами (АГЯ). Выход энергии из окружения черных дыр в АГЯ может превышать светимость сотен миллиардов звезд в остальной части галактики. Как в этих галактиках образуются сверхмассивные черные дыры, является загадкой. Ядра галактик, где сверхмассивные черные дыры энергично захватывают газ, подразделяются на два типа: те, где непосредственно наблюдаем вещество, падающее по спирали в черную дыру (со скоростью, в тысячи раз превышающей скорость звука), и те, где внутренние области закрыты пылью. В ядрах галактик второго типа виден только более медленно движущийся газ, который находится намного дальше от черной дыры, чем в ядрах галактик первого типа.

На протяжении десятилетий астрономы задавались вопросом, почему мы видим внутренние области в некоторых активных ядрах галактик, но не видим в других. Наиболее распространенным объяснением двух типов активных ядер галактик является то, что на самом деле они одинаковые объекты, отличающиеся для нас только потому, что мы рассматриваем их с разных точек зрения. Если мы видим их плашмя, то можем наблюдать горячий газ, падающий по спирали в черную дыру, непосредственно. Если активное ядро галактики наклонено к лучу зрения, то пыль вокруг закрывает от нашего взгляда центральную область, и мы видим только более медленно движущиеся газовые облака на расстоянии светового года или более от черной дыры.

Инициатор проекта, по которому проводила исследования международная группа ученых, Виктор Окнянский, старший научный сотрудник ГАИШ МГУ имени М.В.Ломоносова, говорит: «Случаи перехода объекта из одного типа в другой являются определенной проблемой для этой популярной модели. Когда в 1984 году мы нашли изменения типа у активного ядра галактики, известной как NGC 4151, то таких случаев было известно всего несколько. Теперь мы знаем десятки активных ядер галактик, которые изменяли свой тип. В нашем недавнем исследовании мы сосредоточились на одном из ярких примеров таких объектов — NGC 2617. В 2013 году команда исследователей в США обнаружила, что NGC 2617 изменила свой тип активной галактики, и внутренние области, которые были скрыты от нас, стали видимыми. Мы не знаем, как долго объект будет оставаться в этом новом состоянии. Это может продолжаться в течение короткого периода времени или в течение десятков лет. Статья американских астрономов о NGC 2617 называлась «Человек за кулисами...». Когда мы начали наше исследование, мы не знали, как долго занавес будет оставаться открытым, но мы назвали нашу статью «Занавес остается открытым...», потому что мы все еще продолжали наблюдать внутренние области NGC 2617.»

По мнению авторов, нет общепринятого объяснения изменениям типа, когда ранее скрытые внутренние области активного ядра галактики становятся видимыми. Виктор Окнянский комментирует: «Совершенно ясно, что это явление не очень редкое, наоборот, мы считаем, что это вполне типично для АГЯ. Существуют различные возможные объяснения этих явлений. Одним из них является то, что, возможно, какая-то звезда

слишком близко приблизилась к черной дыре и была разорвана ее тяготением. Тем не менее разрушение звезды черной дырой происходит очень редко, и мы не думаем, что такие события могут объяснить наблюдаемую частоту изменений типа активных галактических ядер. Вместо этого мы рассматриваем модель, в которой резко меняется «режим питания» черной дыры. По мере того как вещество по спирали падает в направлении черной дыры, она испускает мощное излучение. Мы предполагаем, что это интенсивное излучение разрушило часть пыли, окружающей ядро, что позволило нам увидеть внутренние области в окрестностях черной дыры».

Окнянский продолжает: «Изучение этих быстрых изменений типа очень важно для понимания того, что происходит вокруг сверхмассивных черных дыр, которые «питаются» окружающим газом. В нашей работе мы провели комплексные длительные наблюдения NGC 2617 в различных

длинах волн, от рентгеновских до инфракрасных. Наблюдательные данные для проекта были получены с использованием глобальной сети автоматических телескопов MASTER, управляемой проф. Владимиром Липуновым и его командой, нашего нового 2,5-метрового телескопа, расположенного недалеко от Кисловодска, 2-метрового телескопа обсерватории в Азербайджане, рентгеновского спутника Swift, а также некоторых других телескопов. Это исследование было проведено в сотрудничестве с коллегами из Азербайджана, США, Финляндии, Чили, Израиля и Южной Африки.»

“The curtain remains open: NGC 2617 continues in a high state“. V.L. Oknyansky, C.M. Gaskell, N.A. Huseynov, V.M. Lipunov, N.I. Shatsky, S.S. Tsygankov, E.S. Gorbovskey, Kh.M. Mikailov, A.M. Tatarnikov, D.A.H. Buckley, Mon. Not. R. Astron. Soc., 467 (2), 1496–1504 (2017).

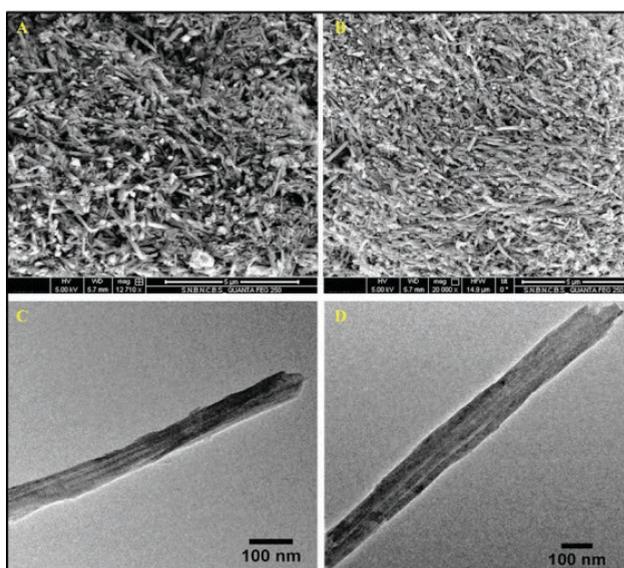
## РАЗРАБОТАНЫ НАНОТРУБКИ С БАКТЕРИЦИДНЫМ ЭФФЕКТОМ

*Ученые кафедры физики низких температур и сверхпроводимости физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова изготовили галлуазитные нанотрубки с осажденными наночастицами серебра.*

«Нами были приготовлены галлуазитные нанотрубки с осажденными наночастицами серебра. Путем оптического измерения поглощения галлуазитных нанотрубок с наночастицами серебра был обнаружен широкий пик плазмонного резонанса в спектральном диапазоне 400–600 нм. Также был обнаружен бактерицидный эффект, который был более выражен при освещении образцов», — рассказал младший научный сотрудник кафедры физики низких температур и сверхпроводимости физического факультета МГУ Кирилл Гончар.

Галлуазитные нанотрубки были исследованы методами просвечивающей электронной микроскопии, рентгеновской дифракции, оптической спектроскопии, также были проведены эксперименты с *E. coli* бактериями. Вклад ученых физического факультета состоял в изучении оптических свойств галлуазитных нанотрубок и проведении экспериментов с бактериями.

«В работе обсуждается роль плазмонного возбуждения серебряных наночастиц в их биоактивных свойствах. Полученные результаты показывают, что галлуазитные нанотрубки, покрытые серебряными наночастицами, являются очень перспективными для антибактерицидной обработки», — заключил ученый.



Работа проходила в сотрудничестве с ученым из Национального центра фундаментальных наук имени Бозе (Индия).

“Halloysite nanotubes with immobilized silver nanoparticles for anti-bacterial application“. Jana S., Kondakova A.V., Shevchenko S.N., Sheval E.V., Gonchar K.A., Timoshenko V.Yu., Vasiliev A.N. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 151, 249–254 (2017).

# СОЗДАН ОДНОЭЛЕКТРОННЫЙ ТРАНЗИСТОР НА ОСНОВЕ ТРЕХ АТОМОВ ФОСФОРА

Ученые лаборатории «Криоэлектроника» физического факультета провели исследования по разработке, созданию и изучению вычислительных электронных устройств на новых физических принципах. Физикам МГУ удалось создать одноэлектронный транзистор на основе трех атомов фосфора.

«В серии последовательных процессов реактивно-ионного травления (РИТ) кремниевой структуры одноэлектронного транзистора удалось наблюдать по диаграммам стабильности постепенную трансформацию устройства от классического состояния с макроскопическим островом до одноатомного состояния, когда электронный транспорт в транзисторе осуществлялся через единичные примесные атомы», — рассказал автор статьи, старший научный сотрудник лаборатории «Криоэлектроника» физического факультета МГУ Владимир Крупенин.

Оптимизированные технологические процессы для изготовления нового устройства из кремния на изоляторе (КНИ) позволили увеличить коэффициент управления транзистора за счет приближения управляющего затвора к области локализации примесных атомов. Созданный сотрудниками факультета и НИИЯФ транзистор позволил изучить закономерности параллельного переноса электронов через три примесных атома фосфора. В результате исследования удалось обнаружить характерное расщепление кулоновских токовых треугольников, которое ранее было предсказано в теоретических работах.

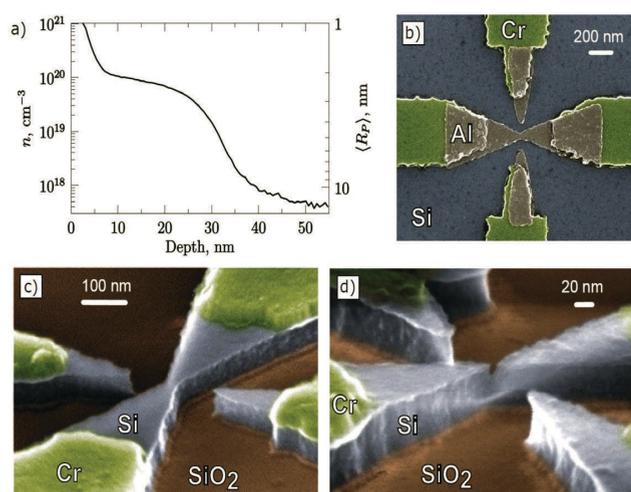


Рис 1. а) — концентрация (левая ось) и среднее расстояние между атомами фосфора (правая ось) в слое Si слоя. б) - д) — этапы изготовления транзистора (окраска цветами: темно-синий — верхний Si слой, зеленый — Cr электроды, серый — Al маска, коричневый — SiO<sub>2</sub> изолирующий слой): б) — структура до реактивно-ионного травления (РИТ) Si слоя; в) — структура после анизотропного РИТ Si слоя; д) — структура после первого изотропного РИТ с зазором в центре Si наномостика.

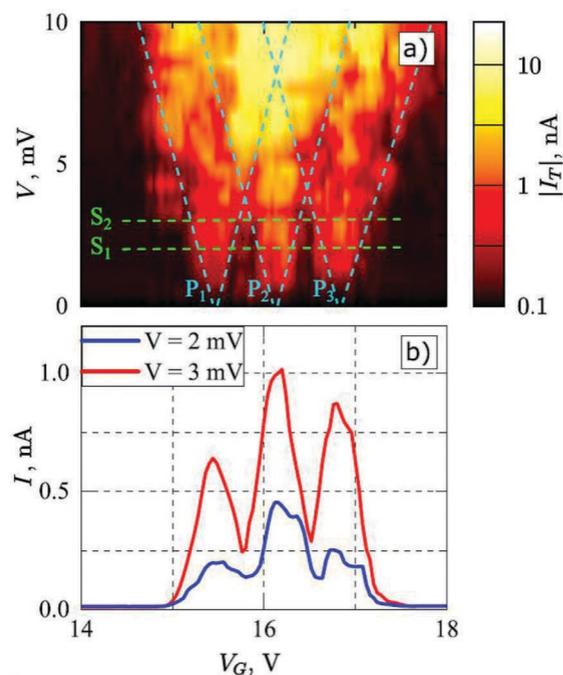


Рис. 2. (а): расщепление токового треугольника; (б): поперечное сечение токового треугольника при низких туннельных напряжениях  $V = 2$  мВ ( $S_1$ ) и  $V = 3$  мВ ( $S_2$ ).

«По обнаруженному расщеплению удалось оценить среднее расстояние между примесными атомами фосфора в мостике транзистора. Продолжающиеся исследования проводятся в направлении поиска оптимальных кристаллических материалов и примесных атомов, которые определяют рабочую температуру одноатомного одноэлектронного транзистора и уровень его шумов. Исследователи надеются увеличить рабочую температуру подобных устройств вплоть до комнатной. Уже в ближайшее время планируется изготовление одноатомных транзисторов на основе нетрадиционных для полупроводниковой промышленности примесных атомов и кристаллических подложек», — заключил ученый.

Работа сотрудников физического факультета МГУ поддержана Российским научным фондом.

“Sequential reduction of the silicon single-electron transistor structure to atomic scale“. Dagesyan S.A., Shorokhov V.V., Presnov D.E., Soldatov E.S., Trifonov A.S., Krupenin V.A. *Nanotechnology*, **28**, 225304 (2017).

# ЭЛЕКТРОМАГНИТООПТИЧЕСКИЙ ЗАТВОР НА ДОМЕННОЙ ГРАНИЦЕ

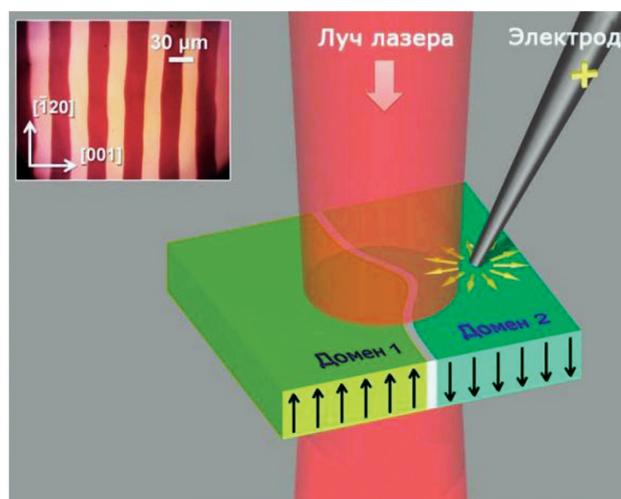
*Группа проф. В.И. Белотелова (кафедра фотоники и физики микроволн) и группа проф. А.П. Пятакова (кафедра физики колебаний) в сотрудничестве с коллегами из Российского квантового центра создали прототип устройства, управляющего интенсивностью света, которое работает на новом электро-магнитооптическом принципе. Этот принцип управления может стать основой функционирования миниатюрных и быстродействующих модуляторов света для передачи информации в оптических системах связи.*

Магнитооптические затворы, работающие на эффекте фарадеевского вращения плоскости поляризации света в намагниченном веществе, нашли широкое применение в экспериментальной практике. В частности, они служат оптическими изоляторами, пропускающими свет только в одном направлении, защищая, таким образом, лазерные источники от обратного влияния отраженных сигналов. С помощью магнитного поля можно менять угол фарадеевского вращения и, тем самым, регулировать интенсивность света, проходящего через магнитооптический затвор.

Однако сделать на этом принципе быстродействующий и миниатюрный модулятор излучения невозможно ввиду громоздкости и инерционности катушек, создающих магнитное поле. Альтернативой является электрооптическая модуляция, но из-за малости электрооптических эффектов миниатюризация устройств также затруднена.

А можно ли управлять магнитооптическим вращением, прикладывая электрическое напряжение? Такой эффект, действительно, был обнаружен еще в 80-х годах прошлого века в группе проф. Р.В. Писарева из ФТИ им. Иоффе и получил название электро-магнитооптического. Он позволил бы заменить инерционные катушки индуктивности на более технологичные планарные структуры — конденсаторы, если бы не обескураживающе малые величины наблюдавшегося эффекта: даже в поле ~100 кВ/см изменение угла фарадеевского вращения не превышало нескольких угловых минут. Это тем более обидно, что обычное, магнитооптическое, вращение поляризации света в доменах в пленках ферритов гранатов составляет несколько градусов.

«Полностью, на все 100%, реализовать потенциал, заключенный в электромагнитооптическом эффекте, удалось, объединив идеи двух научных коллективов: группы фотоники и плазмоники, возглавляемой проф. РАН В.И. Белотеловым и нашей лаборатории фотоники и спинтроники — рассказывает проф. А.П. Пятаков. Ранее мы открыли магнитоэлектрическое явление, которое планировали использовать в электрических затворах спинтрон-



ных устройств. Оно заключалось в кулоновском взаимодействии магнитных доменных границ с электрически заряженной иглой. В то же время в группе проф. В.И. Белотелова был накоплен большой опыт в области создания наноразмерных гетероструктур с усиленными магнитооптическими эффектами».

В результате взаимодействия двух научных коллективов родилась следующая идея: прикладывая переменное напряжение к электроду-игле, можно заставить доменную границу двигаться, открывая и закрывая путь лучу лазера, подобно краю шторки пленочного фотоаппарата. В области нахождения светового пятна два соседних домена последовательно сменяют друг друга, давая максимальное изменение угла фарадеевского вращения. «Такая схема сочетает в себе гигантскую оптическую активность магнитных пленок с преимуществами электрического управления», — резюмирует А.П. Пятаков.

“Electric-field-driven magnetic domain wall as a microscale magneto-optical shutter”. N.E. Khokhlov, A.E. Khramova, E.P. Nikolaeva, T.B. Kosykh, A.V. Nikolaev, A.K. Zvezdin, A.P. Pyatakov & V.I. Belotelov. Scientific reports, 8, 13985 (2017).

# СПОСОБ УПРАВЛЕНИЯ СПИНОВЫМИ ВОЛНАМИ С ПОМОЩЬЮ СВЕТА

*Физики из МГУ (кафедра фотоники и физики микроволн физического факультета) совместно с коллегами из Российского квантового центра и Технического университета Дортмунда (Германия) исследовали возбуждение спиновых волн в магнитных пленках с помощью периодических лазерных импульсов и добились управления их свойствами.*

Ученые МГУ в рамках международного сотрудничества проводят исследования по сверхбыстрому оптическому управлению намагниченностью. Это активно развивающееся научное направление позволит увеличить быстродействие устройств хранения и обработки информации. Кроме того, это перспективный метод возбуждения спиновых волн (волн намагниченности), которые являются объектом изучения магноники — современного направления в физике, которое может стать основой для посткремниевых энергосберегающих технологий, в которых вместо электронов используются их спины. Ожидается, что развитие магноники откроет множество приложений в области телекоммуникаций, обработки изображений и квантовых вычислений.

Чтобы запустить спиновые волны в магнитоупорядоченном материале (ферро-, ферри- или антиферромагнетике) необходимо вывести намагниченность из равновесия. Обычно это делается с помощью микроволн, генерируемых микроантенной в непосредственной близости от образца. Однако для практических применений требуется сильная локализация возбуждения. Например, обработка квантовой информации требует обращения к кубиту (единица информации в квантовом компьютере) магнитным полем с субмикронным градиентом. К тому же, для регулировки параметров спиновой волны требуется изменение формы и размера антенны, что невозможно делать оперативно. Поэтому в настоящее время очень перспективным является метод возбуждения спиновых волн ультракороткими лазерными импульсами, которые воздействуют на намагниченность только внутри освещаемого пятна. «Таким образом можно добиться разрешения порядка длины волны света или даже меньше, если использовать плазмонику, еще одно направление физики, над которым работают в нашей группе, — сообщил проф. РАН В.И. Белотелов. — Минусом оптического метода генерации является довольно широкий спектр возбуждаемых спиновых волн, из-за чего они колебания намагниченности быстро рассинхронизируются и затухают. Нами был предложен способ нивелировать этот недостаток».

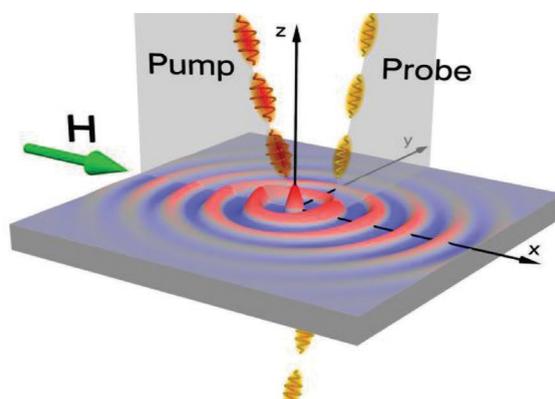


Схема эксперимента по оптическому управлению спиновыми волнами.

Аспирантом МГУ И.В. Савочкиным совместно с немецкими коллегами был проведен эксперимент, в котором спиновые волны возбуждались в пленке феррита-граната фемтосекундными импульсами лазера, следовавшими с частотой 1 ГГц. Такая высокая частота повторения импульсов позволила достичь усиления спиновых волн с кратными частотами, значительно увеличив длину распространения. «Нам удалось значительно сузить спектр возбуждаемых спиновых волн и детектировать их на расстоянии почти 100 микрон от области возбуждения, — отметил Игорь Савочкин. — Кроме того, меняя величину внешнего магнитного поля, можно увеличить амплитуду волн более, чем в десять раз». Данное исследование поможет в развитии квантовой обработки информации на основе спиновых волн. В дальнейшие планы ученых входит нанесение плазмонных структур на магнитной пленке для еще большего усиления наблюдаемых эффектов за счет концентрирования оптического излучения в области диаметром менее 100 нм.

“Magnon Accumulation by Clocked Laser Excitation as Source of Long-Range Spin Waves in Transparent Magnetic Films.” M. Jackl, V.I. Belotelov, I.A. Aki-mov, I.V. Savochkin, D.R. Yakovlev, A.K. Zvezdin and M. Bayer. *Physical Review X* 7, 021009 (2017).

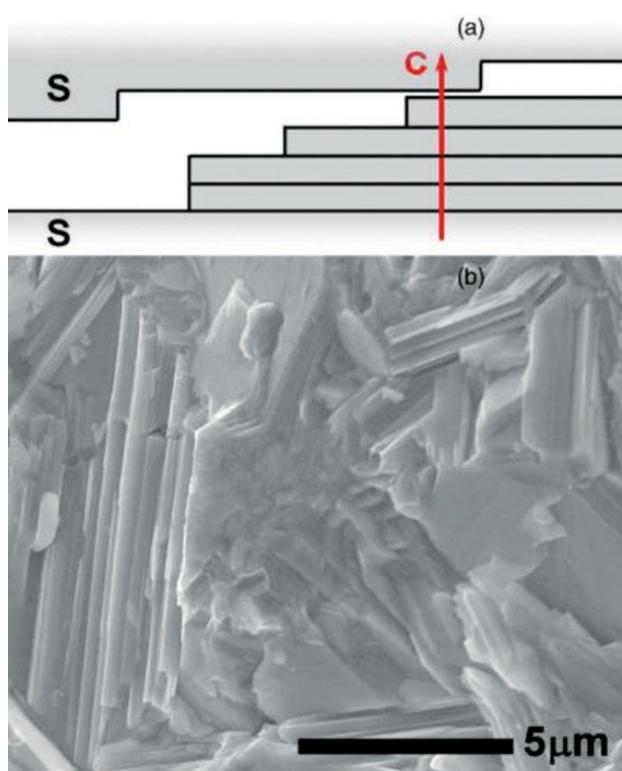
# СИСТЕМАТИЗИРОВАНЫ ЗНАНИЯ О ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩЕМ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМ СВЕРХПРОВОДНИКЕ

*Сотрудники физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова провели систематизацию данных о параметрах высокотемпературного сверхпроводника состава (Sm,Th)OFeAs.*

Мы систематизировали сведения о структуре параметра сверхпроводящего порядка в высокотемпературном сверхпроводнике (ВТСП) (Sm,Th)OFeAs так называемой системы 1111 с оригинальным замещением самария (Sm) на торий (Th). Подобные образцы исследовались только нашей группой. В работе были с высокой точностью измерены амплитуды параметров порядка в широком диапазоне замещения Sm на Th и, соответственно, в широком диапазоне критических температур ( $21\text{K} < T_c < 54\text{K}$ ) семейства этих сверхпроводников», — рассказал Светослав Кузьмичев, старший научный сотрудник кафедры физики низких температур и сверхпроводимости физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Ученые использовали метод получения туннельных наноконтактов на микротрещине. Контакты имели поперечник порядка нескольких десятков нанометров, в них ученые наблюдали эффект многократных внутренних андреевских отражений. Расшифровка полученных в работе спектров динамической проводимости этих андреевских контактов позволила авторам сделать важные выводы как об амплитуде параметров сверхпроводящего порядка, так и о степени его анизотропии.

«Исходя из полученных нами зависимостей амплитуды параметров порядка от  $T_c$  и, соответственно, определенного характеристического отношения теории БКШ (Теория Бардина, Купера, Шриффера), которое определяет силу связи носителей тока в куперовской паре, становится возможным отнести это соединение к классу ВТСП (высокотемпературных сверхпроводников) и провести сравнительный анализ сверхпроводящих свойств системы (Sm,Th)OFeAs со свойствами других семейств железосодержащих сверхпроводников. Надо отметить, что физика многощелевой сверхпроводимости значительно сложнее, чем физика классических сверхпроводников. Она во многом определяется соотношением сил внутризонного и межзонного взаимодействия носителей тока (электронов или дырок) в куперовской паре. Надеюсь, что наша работа поможет пролить



*Схематическое изображение ступеней, соприкасающихся друг с другом в многослойном образце с микротрещинами.*

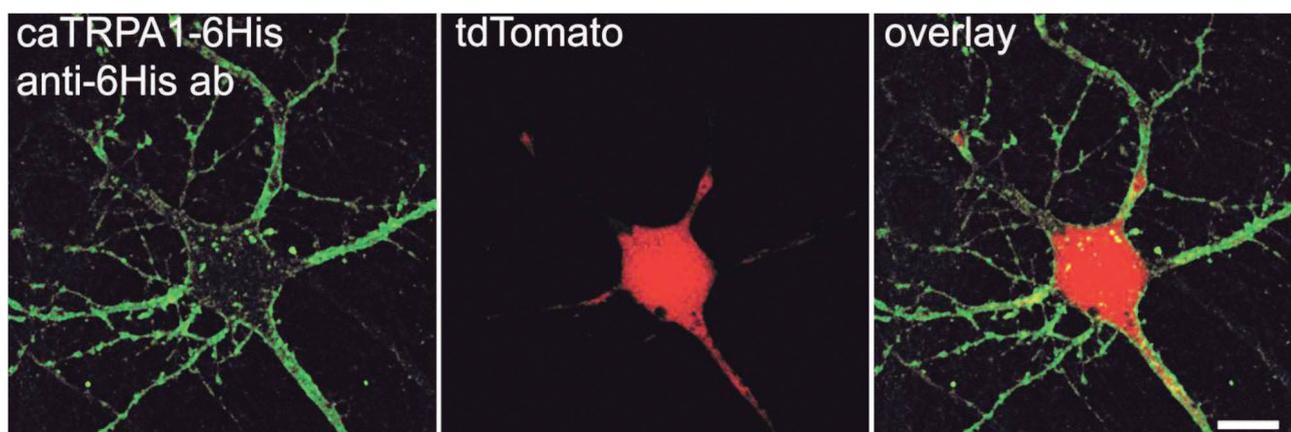
свет на эту актуальную проблему фундаментальной физики твердого тела», — заключил ученый.

Работа проходила в сотрудничестве с учеными из Физического института имени П.Н. Лебедева Российской академии наук.

“Evolution of superconducting gaps in Th-substituted  $\text{Sm}_{(1-x)}\text{Th}_x\text{OFeAs}$  studied by multiple Andreev reflection spectroscopy“, Kuzmicheva T.E., Kuzmichev S.A., Pervakov K.S., Pudalov V.M., Zhigadlo N.D., *Physical Review B*, **95** (2017).

# НОВЫЙ МЕТОД СТИМУЛЯЦИИ НЕЙРОНОВ С КЛЕТОЧНЫМ ПРОСТРАНСТВЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ МЕТОДАМИ ТЕРМОГЕНЕТИКИ

*Ученые кафедры общей физики и волновых процессов физического факультета МГУ продемонстрировали комплексную технику термогенетических исследований индивидуальных нейронов в культурах клеток и живых животных с использованием инфракрасного лазерного излучения.*



Покадровая развертка реакция *Danio rerio* на лазерный импульс длительностью 250 мс. (а) Локальный нагрев нейрона (лазерный пучок показан красной окружностью), (б) ответная реакция в виде удара хвостом.

«В результате проделанной работы получен необходимый набор методик и инструментов, позволяющий проводить исследования в области нейронаук с помощью термогенетических методов. Именно термогенетика представляет альтернативу широко распространенным в настоящее время оптогенетическим исследованиям. Идеологически термогенетика и оптогенетика сходны — оба метода требуют встраивание мембранных каналов в исследуемую клетку, активация которых приводит к стимулированию физиологического отклика клетки, например, генерации потенциала действия нейроном. Используемые каналы в оптогенетике (например, канал-родопсин ChR) обладают хромофором, поглощение фотона видимого излучения которым приводит к активации канала. Термоканалы же чувствительны к локальной температуре, а не к энергии кванта света. Поэтому преимущество термогенетики над оптогенетикой состоит в возможности использовать излучение инфракрасного спектрального диапазона. Свет в инфракрасной области спектра рассеивается и поглощается биотканями в значительно меньшей степени, чем в видимой, что потенциально позволит неинвазивно стимулировать клетки, расположенные в глубоких

слоях. Также инфракрасное излучение обладает меньшей фототоксичностью, чем используемый в оптогенетике свет видимого диапазона», рассказывает соавтор статьи, кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник кафедры общей физики и волновых процессов физического факультета МГУ Александр Ланин.

В работе демонстрируется методика быстрой, надежной и воспроизводимой адресной активации одиночных клеток в культуре и живом организме (*in vitro* и *in vivo*), экспрессирующих генетически встроенные термочувствительные каналы семейства TRPA1 с помощью перестраиваемого по длине волны инфракрасного лазерного излучения. В ходе работы были использованы чувствительные к теплу мембранные каналы *caTRPA1* техасской гремучей змеи *Crotalus atrox*, активирующиеся при превышении пороговой температуры 28°C. Исследования показали, что такие термочувствительные каналы могут быть успешно экспрессированы нейронами рыбы и теплокровных животных.

«Управление и мониторинг локальной температурой в экспериментах с адресной активацией термочувствительных клеток являются основной

задачей и особенностью наших исследований. Локальный нагрев клеток был реализован при помощи инфракрасного лазерного излучения. Правильный подбор параметров излучения (длина волны и энергия) позволяет активировать термочувствительные клетки в культуре и в живой рыбе *Danio rerio*. Эксперименты по термогенетической активации проводились с живыми трансфицированными клетками Human Embryonic Kidney (HEK-293), HeLa, нейронами и эмбрионами рыбок *Danio rerio*. Клеточные культуры подвергались генной модификации с помощью векторов, которые встраиваясь в ДНК позволяют экспрессировать кальциевый индикатор GCaMP6s и термочувствительные каналы *saTRPA1*. Отклик биологической системы на лазерный нагрев полностью контролировался за счет оптической визуализации кальциевых токов и электрофизиологии. Одной из основных особенностей работы является создание и использование квантового термометрического зонда на основе волоконно-оптического/СВЧ волновода с квантовым сенсором (микрочастицей алмаза с дефектами азот-вакансия (NV-центрами), закрепленной на торце волновода) для адресного измерения температуры с высоким (клеточным) пространственным разрешением (рис. 1, средняя строка). Уникальные свойства реализованного зонда имеют большой потенциал для задач термогенетики, поскольку позволяют не только измерять температуру биологических объектов с высокой точностью и микронным (вплоть до субклеточного) пространственным разрешением, но и локально изменять температуру, тем самым реализуя возможность управления функциональной активностью термочувствительных клеток», — поясняет ученый.

В работе была реализована серия поведенческих экспериментов на рыбе *Danio rerio*, в нейронах которой была осуществлена экспрессия термочувствительных каналов *saTRPA1*. Активация одного из группы этих нейронов (Rohon-Beard), расположенных на спинке рыбы, приводит к реакции убегающего, проявляющаяся в резком ударе хвоста. Проведение флуоресцентной микроскопии позволило находить успешно трансфицированные нейроны, локальный нагрев которых осуществлялся импульсом инфракрасного излучения на длине волны 1342 нм длительностью 250 мс. Импульсный нагрев Rohon-Beard нейронов сопровождался ударом хвоста у трансфицированной рыбы, тогда как контрольная рыба (не обладающая каналами *saTRPA1*) не реагировала на лазерный нагрев.

Работа представляет результаты комплексного совместного исследования российских ученых из МГУ имени М.В. Ломоносова, Института биоорганической химии им (ИБХ РАН), Института высшей нервной деятельности и нейрофизиологии (ИВНД и НФ РАН).

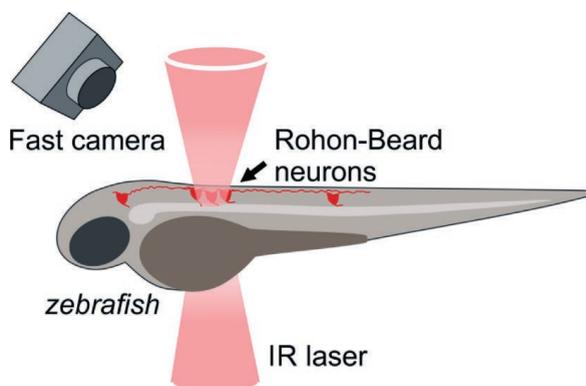
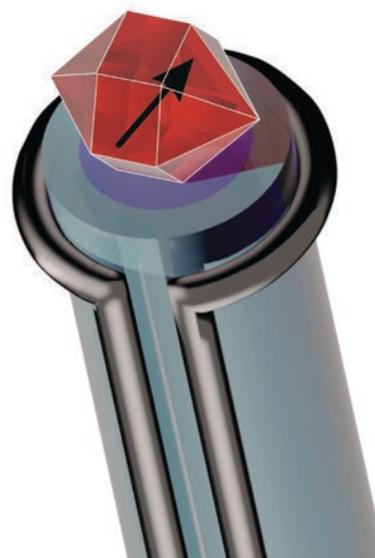


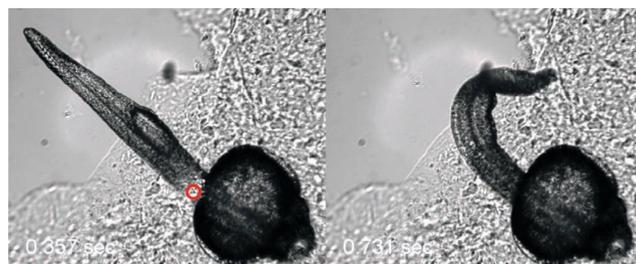
Схема поведенческого эксперимента с рыбой *Danio rerio*, включающего локальный нагрев трансфицированных Rohon-Beard нейронов инфракрасным лазерным излучением и запись реакции рыбки быстрой камерой.

**Справочно:** \*Термогенетика - новая перспективная междисциплинарная область науки, суть которой заключается в принудительной и целенаправленной температурной активации физиологической деятельности клеток, в частности нейронов, за счет использования термочувствительных катионных каналов (TRP), генетически встроенных в мембраны этих клеток. До недавнего времени широкое применение этой техники было ограничено невысокой чувствительности известных термочувствительных каналов, а также низкого пространственно-временного разрешения методики их активации при стандартном нагреве среды или использовании химических агентов. Термогенетика обладает большими перспективами в области управления физиологической активностью клеток. Методы термогенетики не привязаны к спектрам поглощения хромофоров, лежащих в видимой области спектра, как это реализовано в оптогенетике. В связи с этим возникает



Термометрическое устройство на основе гибридного оптического/СВЧ зонда с квантовым сенсором — микрочастица алмаза с дефектами азот-вакансия.

возможность выбирать центральную длину волны лазерного излучения в окне прозрачности биологической ткани для осуществления стимуляции глубоких слоев. Используемые нами термочувствительные каналы саTRPA1 змеи не являются селективными по ионам, поэтому обладают проводимостью на несколько порядков превышающую проводимость популярных каналов семейства канал-родопсин ChR оптогенетики. Каналы саTRPA1 осуществляют в основном ток катионов кальция через мембрану, что позволяет управлять распространением в живых организмах системой сигналинга, основанной на концентрации катионов кальция. На сегодняшний момент с этой задачей методы оптогенетики справляются плохо. На практике это может быть реализовано как малоинвазивная стимуляция тканей (нейронов, клеток сердца, клеток надпочечников и т.д.) для активации или ингибирования физиологического ответа клеток.



“Thermogenetic neurostimulation with single-cell resolution”. Ermakova Y.G., Lanin A.A., Fedotov I.V., Roshchin M., Kelmanson I.V., Kulik D., Bogdanova Y.A., Shokhina A.G., Bilan D.S., Staroverov D.B., Balaban P.M., Fedotov A.B., Sidorov-Birykov D.A., Nikitin E.S., Zheltikov A.M., Belousov V.V. Nature communications, **8**, 15362–15362 (2017).

## СВОЙСТВА ЛЕГИРОВАННЫХ БОРОМ НАНОАЛМАЗОВ

*Ученые кафедры квантовой электроники синтезировали наноалмазы, легированные бором, и обнаружили, что они нагревают суспензии быстрее детонационных наноалмазов<sup>1</sup>. В результате исследований физики из МГУ выяснили, что полученные наноматериалы можно использовать в качестве наноагентов для локальной лечебной и онкологической гипертермии.*

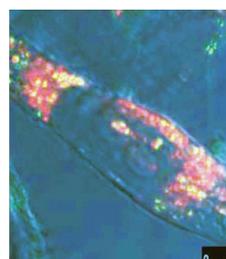
Физики лаборатории лазерной спектроскопии растворов супрамолекулярных соединений и наноструктур обнаружили способность наноалмазов, легированных бором (ЛБНА), существенно нагревать окружающую среду под действием лазерного излучения.

«Нагревательные» свойства ЛБНА обусловлены особой структурой наноматериала, создаваемой во время прямого синтеза ЛБНА из C16H30V2 при высокой температуре и высоком давлении (T = 1550°C, P = 9 ГПа)», — рассказала старший научный сотрудник кафедры квантовой электроники физического факультета МГУ Татьяна Доленко.

Ученые кафедры квантовой электроники физического факультета установили, что наноалмазы, легированные бором, сильнее ослабляют сетку водородных связей при диспергировании в воде по сравнению с детонационными наноалмазами. «Обнаружено и изучено необычное свойство наноалмазов, легированных бором, нагревать суспензии под лазерным возбуждением в 2–5 раз сильнее обычных детонационных наноалмазов (в зависимости от длины волны лазера)», — пояснил аспирант кафедры квантовой электроники физического факультета МГУ Алексей Вервальд.

Исследования проводились с использованием спектроскопии комбинационного рассеяния света, корреляционной спектроскопии и спектрофотометрии.

«Новый наноматериал — впервые синтезированные ЛБНА размером 10 нм — является перспективным материалом для создания наноагентов лечебной и онкологической гипертермии», — поясняет Татьяна Доленко. Благодаря обнаруженным свойствам, а также нетоксичности и высокой биосовместимости, ЛБНА имеют гораздо большие преимущества в качестве тераностических наноагентов перед металлическими и ферромагнитными наночастицами.



*Справочно: Детонационные наноалмазы — те, которые получают путем химических превращений на фронте детонационной волны при взрыве мощных взрывчатых веществ.*

*Изображение наноалмазов, инжектированных в раковую (HeLa) клетку, полученное на флуоресцентном микроскопе.*

“Boron-doped nanodiamonds as possible agents for local hyperthermia”. A.M. Verval, S.A. Burikov, I.I. Vlasov, E. Ekimov, T.A. Dolenko, Laser Physics Letters, **14**(4):045702 (2017).

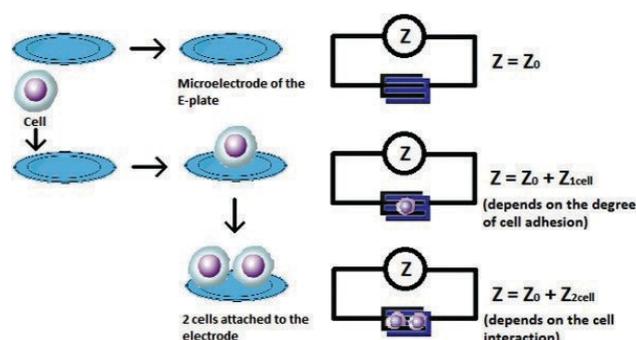
# СПОСОБ ОДНОВРЕМЕННОЙ ДИАГНОСТИКИ И ЛЕЧЕНИЯ ОНКОЛОГИЧЕСКИХ ЗАБОЛЕВАНИЙ

Физиками МГУ имени М.В. Ломоносова под руководством профессора Виктора Юрьевича Тимошенко была опубликована статья в журнале *Nanotechnology*, в которой приводятся результаты исследования наночастиц пористого кремния, покрытых декстраном, в качестве люминесцентных меток и сенсibilизаторов (усилителей) ультразвуковых волн для тераностики (одновременной терапии и диагностики) раковых заболеваний. Ученые обнаружили «щадящий» сонотерапевтический эффект воздействия ультразвука на культуры клеток, содержащих нанокремний: значительное подавление опухолевых клеток при практически неизменном количестве общего числа клеток.

«Несмотря на то, что на сегодняшний день довольно хорошо апробированы такие методики терапии рака, как хирургическое вмешательство, химиотерапия, радиационная терапия, задача разработки новых прецизионных, малоинвазивных и эффективных способов борьбы с заболеванием остается весьма актуальной целью как с точки зрения фундаментальной, так и прикладной науки», — рассказал аспирант кафедры физики низких температур и сверхпроводимости физического факультета МГУ Андрей Свиридов.

Целью исследования являлась оценка влияния совместного действия наночастиц, покрытых декстраном, и терапевтического ультразвука на пролиферацию раковых клеток гортани человека. Было обнаружено, что отдельное облучение клеток терапевтическим ультразвуком слабо влияет на их пролиферацию и выживаемость. В то же время, совместное действие покрытых декстраном кремниевых наночастиц и ультразвука привело к значительному подавлению количества раковых клеток. При этом, как было отмечено в работе, инициировался «щадящий» механизм гибели раковых клеток: клетки не разрушались полностью, а гибель их происходила, по-видимому, по механизму апоптоза.

По мнению ученых физического факультета, задача использования наночастиц для диагностики и терапии рака может быть решена именно с помощью кремниевых наночастиц, которые обладают биodeградируемостью, минимальной общей токсичностью для организма и могут быть одновременно метками для люминесцентной диагностики и усилителями (сенсibilизаторами) для «щадящего» терапевтического воздействия.



«Механизмы терапевтического воздействия ультразвука, где посредником выступают наночастицы, затрагивают ряд физических и биологических явлений, таких как акустическая кавитация, поглощение ультразвуковой энергии твердотельными частицами, локальное повышение проницаемости мембран и т.п.», — пояснил природу терапевтического воздействия ультразвука Андрей Свиридов.

Работа проводилась при участии сотрудников НИЯУ МИФИ и Института теоретической и экспериментальной биофизики РАН совместно с коллегами Лионского университета, Института Нанотехнологий в Лионе и Тринити-колледжа (Дублин).

“Cytotoxicity control of silicon nanoparticles by biopolymer coating and ultrasound irradiation for cancer theranostic applications“. Sviridov A.P., Osminkina L.A., Kharin A.Yu., Gongansky M.B., Kargina J.V., Kudryavtsev A.A., Bezsudnova Yu.I., Perova T.S., Geloan A., Lysenko V., Timoshenko V.Yu. *Nanotechnology*, **28**, 10 (2017).

# ГЛОБАЛЬНАЯ СЕТЬ ТЕЛЕСКОПОВ-РОБОТОВ «МАСТЕР» ОТКРЫЛА ПОЛЯРИЗАЦИЮ СОБСТВЕННОГО ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ГАММА-ВСПЛЕСКОВ

*Ученым МГУ впервые удалось зарегистрировать поляризацию собственного оптического излучения гамма-всплесков — самых мощных и очень коротких взрывов во Вселенной, длящихся несколько десятков секунд. Собственным излучением гамма-всплесков называется оптическое излучение в момент взрыва. Такие наблюдения представляют собой сложнейшую научно-техническую задачу, поскольку взрыв длится менее нескольких минут. И эту задачу удалось решить в МГУ с помощью Глобальной сети телескопов-роботов МАСТЕР (Мобильная Астрономическая Система Телескопов-Роботов).*



*Робот-телескоп МАСТЕР на Канарских островах впервые открыл поляризацию собственного излучения гамма-всплесков 25 июня 2016 года. Тенерифе. Обсерватория Тейде Канарского института астрофизики (Испания).*

25 июня 2016 года в 22 часа 40 минут 16 секунд всемирного времени космическая обсерватория имени Энрике Ферми (НАСА, США) зарегистрировала всплеск гамма-излучения, который впоследствии оказался лишь предвестником настоящей гигантской вспышки. Через 31 секунду российский робот-телескоп Глобальной сети МАСТЕР МГУ имени М.В.Ломоносова, расположенный на Канарах (Обсерватория Института астрофизики Канарских островов, Тенерифе, Испания), получил сообщение Ферми и еще через 26 секунд начал съемку квадрата ошибок оптическими камерами.

Несмотря на большие ошибки в первичных координатах гамма-всплеска, весь квадрат ошибок попал в камеры сверхширокого поля МАСТЕР-ШОК — наземный аналог камер ШОК, установленных на борту космической обсерватории «Ломоносов». Поэтому МАСТЕР уже «смотрел» в нужное место, когда через 131 секунду после первого сообщения

космическая обсерватория НАСА зарегистрировала саму катастрофу с высокой координатной точностью. Теперь к Канарскому МАСТЕРу присоединился Крымский МАСТЕР-Таврида МГУ — новый узел Глобальной сети, работавший тогда в тестовом режиме. Через 12 секунд после получения уточненных координат в 22 часа 44 минуты 30 секунд МАСТЕР-Таврида получил первые кадры.

Главная задача состояла в том, чтобы обнаружить поляризацию собственного оптического излучения гамма-всплесков. Собственное оптическое излучение — это оптическое излучение, возникающее синхронно с гамма-излучением. Наблюдение собственного оптического излучения — одна из сложнейших задач современной экспериментальной астрофизики, поскольку требует полной роботизации процесса наблюдений и оригинальной конструкции самого телескопа.

В результате МАСТЕР не только снял весь фильм о взрыве с лучшим разрешением по времени, но и впервые в истории зарегистрировал поляризацию оптического излучения гамма-всплеска в тот момент, когда вспышка еще продолжалась.



*Глобальная сеть космического мониторинга МАСТЕР МГУ.*



Телескоп-робот МАСТЕР-Таврида на Крымской обсерватории МГУ. 25 июня 2016 г. телескоп принял участие в наблюдении сверхъяркого гамма-всплеска GRB 160625B.

Гамма-всплеск GRB160625B оказался одним из самых мощных космических взрывов, который возник в узком потоке релятивистских частиц, ускоренных электромагнитным полем образующейся на наших глазах быстровращающейся черной дыры на другом конце Вселенной.

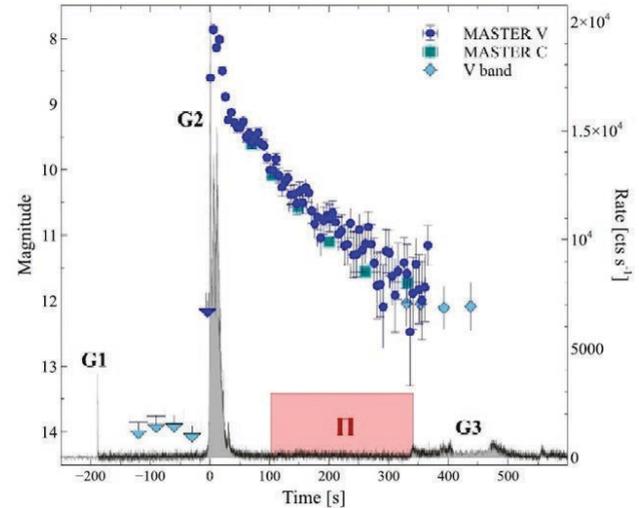
«Обнаруженная поляризация собственного оптического излучения показала, что жерло самой мощной космической пушки образовано упорядоченным мощным магнитным полем, сформированным образующейся черной дырой», — говорит руководитель проекта МАСТЕР, профессор отделения астрономии физического факультета МГУ, заведующий лабораторией космического мониторинга Государственного астрономического института имени П.К. Штернберга МГУ, доктор физико-математических наук Владимир Липунов.

15 лет назад, весной 2002 года, группа ученых МГУ под руководством профессора Владимира Липунова при финансовой поддержке Московского объединения «Оптика» приступила к созданию первого российского, полностью роботизированного телескопа МАСТЕР, способного наблюдать самые мощные и очень короткие взрывы во Вселенной — гамма-всплески, которые длятся, как правило, несколько десятков секунд. Первые наблюдения были проведены уже осенью 2002 года. За шесть последующих лет наблюдений группа энтузиастов зарегистрировала только два гамма-всплеска.

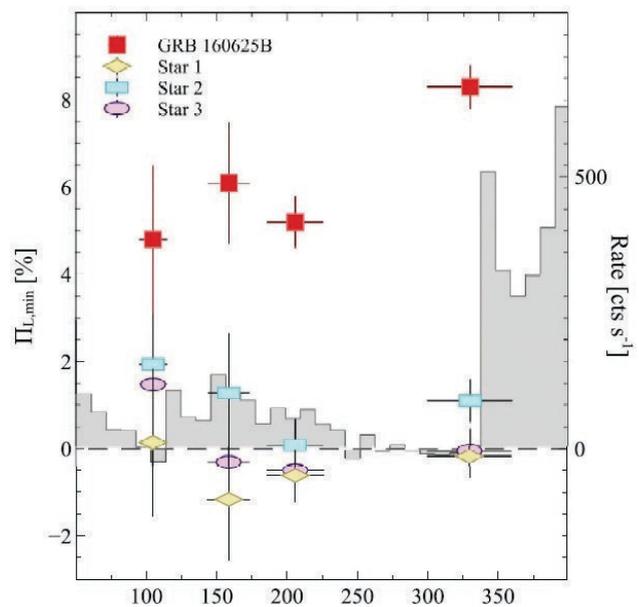
Этот крупномасштабный астрофизический эксперимент удался благодаря взаимодействию ученых нескольких стран, создавших уникальное роботизированное оборудование в гамма-лучах, инфракрасном излучении, и единственной в мире глобальной оптической поисковой сетью телескопов-роботов МАСТЕР, созданной по программе развития МГУ имени М.В.Ломоносова при поддержке Московского объединения «Оптика». Среди соавторов статьи в Nature большинство (8 человек)

— ученые из России. Работа проходила совместно с коллегами из Испании, ЮАР, США, Мексики, Великобритании, Италии, Израиля, Австралии.

Сейчас создано 8 роботизированных обсерваторий МАСТЕР, расположенных на четырех



Черным цветом показаны наблюдения гамма-события, зарегистрированные американской космической обсерваторией Ферми 25 июня 2016 года (G1 — предвестник, G2 — основной импульс, G3 — повторный импульс). Синим и голубым показаны оптические наблюдения двух роботов МАСТЕР на Канарских островах и в Крымской обсерватории МГУ. Обратите внимание на треугольнички слева от основного события — это верхние пределы на поток излучения.



Обнаружение поляризации собственного (синхронного с гамма-) оптического излучения гамма-всплеска GRB160625B телескопом-роботом МАСТЕР, установленным на Канарских островах (красные квадраты — переменная поляризация гамма-всплеска, голубые, сиреневые и желтые — поляризация опорных звезд, серый цветом показана интенсивность гамма-излучения).

континентах в Северном и Южном полушариях. Глобальная сеть МАСТЕР стала лидером ранних оптических наблюдений гамма-всплесков в мире. Параллельно МАСТЕР открыл более тысячи взрывных явлений во Вселенной. МАСТЕР внес решающий вклад в оптический поиск источника первого гравитационно-волнового всплеска, обнаруженного детектором LIGO (США); также он сотрудничает с большими нейтринными установками ICESCube (США) и ANTARES (Франция). Попутно Глобальная сеть МАСТЕР открыла 8 потенциально опасных астероидов.

Регистрация поляризации оптического излучения, синхронного с гамма-излучением, является не только большим научным достижением, о котором команда МАСТЕР мечтала 15 лет с момента начала проекта, но и свидетельством высокого качества отечественных инновационных технологий, созданных при участии ученых МГУ и ОАО «МО «Оптика»».

Уникальное математическое обеспечение, созданное российскими учеными, может быть ис-

пользовано для решения не только фундаментальных научных задач, но и прикладных, среди которых борьба с космическими угрозами, мониторинг ближнего космоса, наблюдение космического мусора.

В проекте МГУ участвуют Благовещенский государственный педагогический университет, Иркутский государственный университет, Крымская астрономическая станция МГУ и Кисловодская солнечная станция Пулковской обсерватории, Южноафриканская астрономическая обсерватория (ЮАР), Канарский институт астрофизики.

“Significant and variable linear polarization during the prompt optical flash of GRB 160625B”. E. Troja, V.M. Lipunov, C.G. Mundell, N.R. Butler, A.M. Watson, S. Kobayashi, S.B. Cenko, F.E. Marshall, R. Ricci, A. Fruchter, M.H. Wieringa, E.S. Gorbovskoy, V. Kornilov, A. Kutuyev, W.H. Lee, V. Toy, N.V. Tyurina, N.M. Budnev, D.A.H. Buckley, J. González, O. Gress, A. Horesh, M.I. Panasyuk, J.X. Prochaska, E. Ramirez-Ruiz, R. Rebollo Lopez, M.G. Richer, C. Román-Zúñiga, M. Serra-Ricart, V. Yurkov, N. Gehrels, *Nature*, **547**, p. 425–427 (2017).

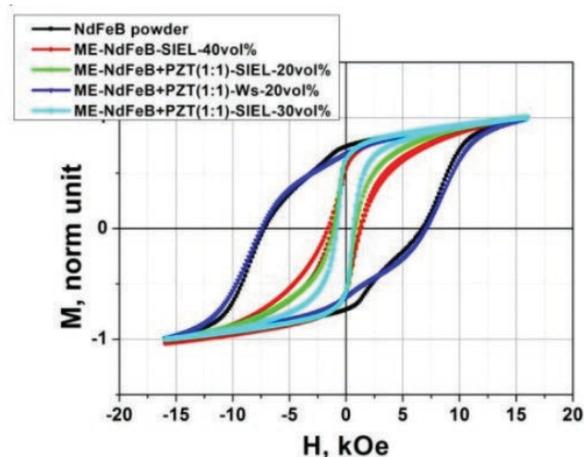
## СОЗДАН НОВЫЙ МУЛЬТИФЕРРОИК

*Ученые физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова разработали новый мультиферроик — материал, который обладает своим постоянным магнитным полем, всегда электрически поляризованным.*

«Разработан и исследован новый функциональный композитный материал с мультиферроидными свойствами на основе полимерной матрицы с добавлением ферромагнитных и сегнетоэлектрических микрочастиц», — рассказал Николай Перов, автор статьи, доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой магнетизма физического факультета МГУ.

Физики Московского университета предложили идею функционального композитного материала и реализовали его синтез, а также исследовали его магнитные, электрические и магнитоэлектрические свойства. «Изготовленные материалы относятся к классу мультиферроиков, область применения которых очень широка. В отличие от всех известных мультиферроиков, разработанные нами материалы очень просты в изготовлении, изготовить можно образец любой формы, размера. Эти материалы являются гибкими и устойчивыми к агрессивным средам. Дальнейшее развитие заключается в поиске подобных материалов, обладающих улучшенными свойствами, а также в поиске возможностей для прикладного развития», — заключил ученый.

Работа проходила в сотрудничестве с учеными из Балтийского федерального университета имени Иммануила Канта.



Магнитные свойства эластомеров.  
Петли гистерезиса образцов.

“New multiferroic composite materials consisting of ferromagnetic, ferroelectric and polymer components”. L.A. Makarova, V.V. Rodionova, Yu.A. Alekhina, T.S. Rusakova, A.S. Omelyanchik, N.S. Perov. *IEEE Transactions on Magnetics*, **99**, 2699740–2699740 (2017).

# УЧЕНЫЕ «НАТОЧИЛИ» УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СКАЛЬПЕЛЬ

*Сотрудники лаборатории медицинского и промышленного ультразвука (кафедра акустики физического факультета МГУ) вместе с коллегами из Университета штата Вашингтон выяснили, какими характеристиками должны обладать ультразвуковые излучатели для дистанционного разрушения опухолей внутри тела человека сфокусированными нелинейными волнами.*

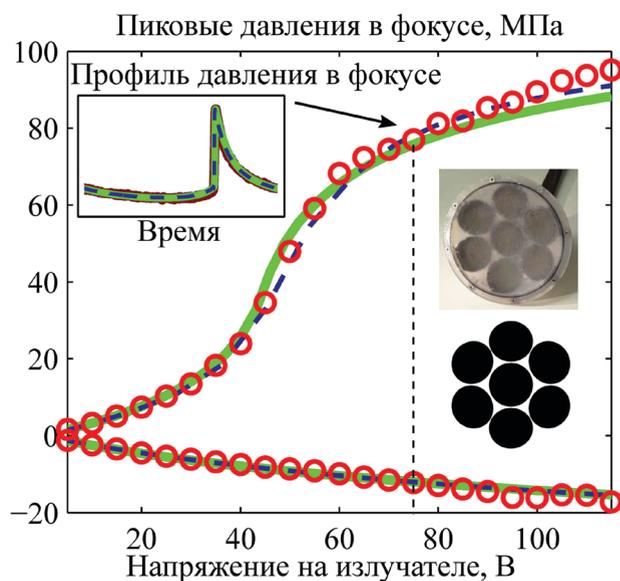
Физики МГУ в составе международного коллектива проводят исследования по воздействию сфокусированного ультразвукового излучения на различные ткани и органы внутри тела человека неинвазивно, без обычного хирургического вмешательства. Это активно развивающееся научное направление существует примерно четверть века и довольно быстро от чисто лабораторных экспериментов перешло к клиническому использованию. В последние десять лет оно приобрело особую актуальность — сфокусированным ультразвуком высокой интенсивности исследователи научились вызывать тепловой некроз опухолевых тканей в предстательной железе, почках, печени, молочной железе и даже в мозге, причем список этим перечислением не исчерпывается.

В последнее время возник интерес к использованию нелинейных ультразвуковых волн для хирургического воздействия на ткани. Форма таких волн в фокусе излучателя не гармоническая, она искажена за счет нелинейных эффектов и может даже содержать ударные участки большой амплитуды. Ультразвуковые волны с ударными фронтами не только нагревают ткань гораздо быстрее, чем гармонические, но и способны вызывать совершенно новые биологические эффекты. Появилось множество идей, как можно использовать такой усовершенствованный ультразвуковой скальпель, но специалисты до сих пор не знали, какой именно фокусирующий излучатель нужен в том или ином случае.

«Недавно, года два назад, к нашей группе стали обращаться с вопросами о том, какой нужен преобразователь, чтобы в его фокусе формировался профиль волны с ударным фронтом необходимой амплитуды. Такие нелинейные обратные задачи никто не умел решать, они содержат множество взаимосвязанных параметров. Нужно было понимать, как устроены нелинейные ультразвуковые поля в биологической ткани, какими математическими моделями их нужно описывать, а также научиться проводить расчеты с использованием этих моделей. Боюсь показаться нескромной, но, наверное, никто, кроме нас, не смог бы быстро разобраться с этой задачей. Необходимо было учитывать множество технических, численных и чисто научных деталей, обладать серьезным опытом

работы в этой области. Такой опыт был накоплен в нашей лаборатории», — говорит ведущий автор статьи, доктор физико-математических наук Вера Хохлова, доцент кафедры акустики физического факультета МГУ.

Задача теоретически обосновать связь между параметрами нелинейного профиля волны в фокусе и параметрами ультразвукового преобразователя действительно оказалась очень непростой. Ученым удалось показать, что основным параметром излучателя является угол схождения волнового пучка, показывающий, насколько сильно должен быть сфокусирован ультразвук. Было доказано, что чем больше этот угол, тем большей амплитуды ударного фронта можно достичь в фокусе. Хотя данное утверждение может показаться очевидным, получить необходимые количественные оценки такой зависимости до сих пор никому не удалось. Авторами статьи эта задача была успешно решена численными методами. Показано, например, что, если в фокусе нужно добиться амплитуды ударного фронта в 100 мегапаскалей, то требу-



Экспериментальные и теоретические зависимости пиковых давлений в фокусе 7-элементного излучателя ультразвуковой хирургии в зависимости от напряжения на источнике.

ется излучатель с углом схождения в 60 градусов, а если нужна амплитуда поменьше, скажем, 35 мегапаскалей, то потребуется угол схождения в 20 градусов.

Разумеется, ученые не обошли теоретическим обоснованием и свою гордость — разработанный ими метод так называемой «гитотрипсии с кипением». Термин «гитотрипсия» в данном случае можно перевести как «механическое разрушение ткани». Дело в том, что на сегодняшний день при клиническом использовании методов ультразвуковой хирургии некроз опухолевой ткани достигается за счет ее нагрева до высокой температуры. Это не всегда удобно, поскольку диффузия тепла от нагреваемой области делает результат воздействия непредсказуемым и, что очень важно, с помощью УЗИ нельзя увидеть результат такого облучения, поэтому при подобных операциях приходится использовать дорогостоящие магнито-резонансные томографы.

Избавиться от этих и других проблем, сопутствующих тепловому механизму воздействия, помогли сразу две методики, разрабатываемые параллельно учеными Мичиганского университета и физиками МГУ совместно с учеными университета штата Вашингтон в Сиэтле. Мичиганские исследователи научились механически разрушать ткани, создавая в области размером с рисовое зерно «облако кавитации» с помощью микросекундных ультразвуковых импульсов с «безумно высокой» амплитудой. Ученые из Москвы и Сиэтла решили ту же проблему путем локализованного вскипания ткани. Они использовали более длительные импульсы, порядка миллисекунды, но меньшей амплитуды. При распространении таких импульсов за счет нелинейных эффектов в очень небольшой области (диаметром около 0.1

мм и длиной 1 мм) вблизи фокуса в профиле волны образуются ударные фронты. Под действием этих ударных фронтов ткань нагревается и взрывным образом вскипает, вырастая в пузырь миллиметрового размера. Пузырь вырастает настолько быстро, что начинает перекрывать путь тонкому фокусированному ультразвуковому «лучу» еще до окончания действия импульса. Иначе говоря, «хвост» импульса, состоящий из нескольких сотен периодически повторяющихся ударных участков, падает уже не на сплошную биоткань, а на границу раздела ткани и газа. В этих условиях возникают хорошо известные ученым эффекты акустического фонтана и ультразвукового распыления. В результате ткань разрывается на частицы микронного размера, которые выбрасываются внутрь пузыря, образуя в его центре гомогенизированную массу.

Оба этих метода механического разрушения ткани, по мнению Веры Хохловой, открывают новые возможности в ультразвуковой хирургии: их действие предсказуемо, а, главное, и рождающееся кавитационное облако, и возникающий в процессе кипения пузырь одинаково дают о себе знать ответным ультразвуковым эхом, которое проявляется при использовании простого УЗИ. Это позволяет контролировать действие нелинейного ультразвукового скальпеля.

Исследование выполнено совместно с учеными из Университета штата Вашингтон (Сиэтл).

“Design of HIFU Transducers for Generating Specified Non-linear Ultrasound Fields”. P.B. Rosnitskiy, P.V. Yuldashev, O.A. Sapozhnikov, A. Maxwell, Wayne Kreider, M.R. Bailey, V.A. Khokhlova. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. PP, 99, (2016).

## ВПЕРВЫЕ В МИРЕ НАПРЯМУЮ ИЗМЕРЕНЫ ЩЕЛИ «НЕВОЗМОЖНЫХ» СВЕРХПРОВОДНИКОВ

*Специалисты физического факультета МГУ провели исследование, в котором оценили возникновение сверхпроводящего состояния в железосодержащих сверхпроводниках с двумя энергетическими щелями.*

Группа российских ученых, возглавляемая физиками из МГУ имени М.В. Ломоносова, впервые в мире сумела достоверно и напрямую измерить энергетические щели целой серии сверхпроводников, в первую очередь, содержащих железо. По словам Светослава Кузьмичева, возглавля-

ющего это исследование, результаты данной работы позволят снять некоторые вопросы, касающиеся возникновения сверхпроводимости в железосодержащих материалах.

В этом эксперименте физиков в первую очередь интересовало измерение характеристик

двух энергетических щелей (их еще называют зонами или параметрами порядка) — под которыми понимается диапазон энергий (или, что то же самое, температур), при которых в материале возникает сверхпроводимость. С 1957 года, когда американские физики Джон Бардин, Леон Купер и Роберт Шриффер сформулировали свою объясняющую эффект сверхпроводимости теорию (теория БКШ, удостоенная Нобелевской премии по физике за 1972 год), такая щель была только одна: от нуля до температуры перехода в сверхпроводящее состояние. Но эта ситуация просуществовала недолго — уже в 1959 году о возможном существовании двухзонных сверхпроводников заговорили советский физик В.А. Москаленко и его коллега из США Г. Сул. Ученые независимо друг от друга создали системы уравнений, описывающих механизм подобной сверхпроводимости, однако экспериментально первый двухзонный сверхпроводник — довольно простой по химическому составу диборид магния — был обнаружен только в начале этого века, в 2001 году.

Физики к тому времени сомневались в реализуемости двухщелевой сверхпроводимости. Что-то новое, не укладывающееся в привычные рамки, всегда является тяжелой психологической ношей для исследователей, работающих в любом направлении науки. Чтобы облегчить этот «груз», в научном сообществе, занимающемся проблемами физики сверхпроводимости, повелось рассматривать диборид магния в качестве исключения, подтверждающего правило.

Однако спустя всего семь лет, в 2008 году, двухщелевой феномен сверхпроводимости был открыт и подтвержден экспериментально в железосодержащих материалах. Сверхпроводящее «железо» начали исследовать во многих лабораториях мира, счет материалов с двумя энергетическими щелями пошел на десятки, и исключение превратилось в правило. Этот сюрприз, преподнесенный железосодержащими сверхпроводниками, оказался не единственным — восемь лет назад, к моменту их открытия, считалось, что их просто не может существовать, поскольку магнитное поле губит сверхпроводимость. С момента появления теории БКШ отсутствие магнитных атомов в сверхпроводнике казалось непреложным условием.

Согласно этой теории, сверхпроводимость возникает за счет взаимодействия электронов и колебаний кристаллической решетки, в результате чего электроны с разнонаправленными спинами объединяются в так называемые куперовские пары (соответственно, с нулевым суммарным спином) и получают возможность двигаться без столкновения с решеткой. Поскольку спин представляет собой магнитный момент частицы, то в присутствии магнитных взаимодействий сохранить нулевой суммарный спин не представ-

ляется возможным. По словам первого автора статьи старшего научного сотрудника физического факультета МГУ Светослава Кузьмичева, это неоднократно подтверждалось в экспериментах с обыкновенными сверхпроводниками. Если ученые вносили в сверхпроводник небольшую магнитную примесь или заменяли в его структуре какой-нибудь из атомов на ферромагнитный, сверхпроводимость резко ухудшалась вплоть до полного исчезновения.

После открытия железосодержащих проводников этот новый класс материалов сразу стал главным объектом интереса физиков, занимавшихся сверхпроводимостью. До этого они больше интересовались высокотемпературными купратами (сверхпроводниками, содержащими медь) и двухщелевым диборидом магния. За восемь последующих лет количество сверхпроводников на основе соединений железа с мышьяком или селеном, равно как и количество возможных объяснений «железной» сверхпроводимости, превысило количество всех найденных сверхпроводящих купратов, но до сих пор четкого понимания происходящего нет.

«Удалось выяснить, что именно блоки железо–мышьяк или железо–селен ответственны в этих соединениях за возникновение сверхпроводимости, — комментирует Светослав Кузьмичев. — Практически все исследователи согласны с тем, что, хотя внешнее магнитное поле в них подавляется, внутри этих блоков его флуктуации в виде квазичастиц магнонов вполне могут существовать и с большой вероятностью принимать участие в формировании сверхпроводящего состояния. Но дело это настолько новое, и мы знаем на сегодня настолько мало, что практически ни один из предложенных механизмов формирования здесь сверхпроводимости пока не удастся ни подтвердить, ни опровергнуть».

Сложностей добавляет и то, что железосодержащие сверхпроводники — многощелевые. Это обстоятельство чрезвычайно осложняет понять и без того непростые процессы, сопровождающие феномен сверхпроводимости, несмотря на существование уже упомянутых уравнений Москаленко и Сула.

На основе этих уравнений ученые рассчитали особенности температурного поведения двух сверхпроводящих щелей для целого спектра железосодержащих сверхпроводников и «нежелезного» диборида магния (с частичным замещением магния на алюминий), затем впервые в мире провели прямые экспериментальные измерения этих зависимостей и в результате обнаружили хорошее соответствие между своими расчетами и данными измерений. К тому же им удалось оценить, что вносит в формирующуюся в них сверхпроводимость наибольший вклад — межзонное или внутризонное спаривание. Иначе говоря, они выяснили, насколько сильной связью обладают куперовские пары, которые создаются объединением электронов из

одной и той же зоны и из разных зон. По словам Кузьмичева, это особенно важно для понимания механизмов «железной» сверхпроводимости.

«До сих пор подобные оценки характеристик щелей основывались на косвенных измерениях, — говорит ученый. — Измеряли, например, зависимость от температуры других параметров сверхпроводящего состояния, а потом экстраполировали результат для определения энергетических щелей. Это были довольно приблизительные измерения, а в случае двух щелей их точность, грубо говоря, становится плюс-минус километр. Профессор физического факультета МГУ Ярослав Пономарев (1938–2015 гг.) на основе уже существующей развил методику, с помощью которой мы впервые в мире сумели измерять непосредственно сами энергетические щели высокотемпературных сверхпроводников при любых температурах вплоть до критической температуры сверхпроводящего перехода, минуя процедуру косвенных измерений. Это наше главное «ноу-хау», которое позволило нам оценить силу межзонного и внутризонного спаривания электронов. В результате нами было показано, что определяющую роль в механизме сверхпроводимости диборида магния и железосодержащих сверхпроводников играет внутризонное спаривание носителей. Между собой конденсаты взаимодействуют слабее, при этом в дибориде магния

межзонное взаимодействие намного слабее, чем в железосодержащих сверхпроводниках».

Кузьмичев надеется, что эта работа несколько прояснит ситуацию с возникновением «железной» сверхпроводимости. И хотя на сегодня в отношении критических температур эти сверхпроводники пока уступают купратам — если максимальная температура перехода в сверхпроводящее состояние, зафиксированная на пленках железа с селеном, составляет примерно 85 К, то для медных сверхпроводников она доходит до 135 К, — главным достоинством «железных» сверхпроводников Кузьмичев считает небывало высокую плотность тока, которую они могут пропускать.

«Они могут нести ток на порядок-два выше, чем купраты и даже ниобий и его сплавы, применяемые сегодня в сверхпроводящих магнитах для генерации очень высоких полей на мощных ускорителях и токамаках. Сравниться с ними сегодня не может ни один сверхпроводник, разве что борид магния, который может при очень хорошей чистоте пропускать токи плотностью до миллиона ампер на квадратный сантиметр. В лабораторных условиях, конечно, эти цифры проверить нельзя, но по имеющимся оценкам такие плотности тока вполне достижимы на «железных» образцах. Так что, я думаю, в этом смысле им скоро не будет альтернативы», — заключает ученый.

## В МГУ РАЗРАБОТАЛИ И УСПЕШНО ПРОТЕСТИРОВАЛИ КВАНТОВЫЙ ТЕЛЕФОН

*«Рабочее место квантового телефона ViPNet — обычный персональный компьютер, в котором установлен оптоэлектронный модуль, соединенный оптическим волокном напрямую с сервером квантового распределения ключей. Кроме того, компьютер использует ПО ViPNet, разработанное компанией «ИнфоТеКС» и модифицированное специально для работы с этим оптоэлектронным устройством», — рассказал руководитель лаборатории квантовых оптических технологий физического факультета МГУ, профессор Сергей Кулик.*



Архитектура сети передачи данных при использовании квантового телефона довольно проста: сервер находится в центре звезды, на лучах которой располагаются

клиенты. При этом трафик между клиентами шифруется напрямую, минуя сервер, который используется только для квантового распределения ключей. «Квантовые ключи важны для того, чтобы при передаче данных большого объема можно было часто менять ключи в режиме симметричного шифрования», — пояснил Сергей Кулик.

По инициативе ректора МГУ Виктора Садовниченко, одним из пунктов Программы развития Московского университета стало создание первой в России университетской квантовой сети. Первый этап этого проекта — разработка квантового телефона. Разговоры по квантовым телефонам абсолютно защищены от перехватов или подслушиваний. В перспективе такими «квантовыми телефонами» предполагается оснастить и другие подразделения Московского университета.

Физические принципы, реализуемые в данном проекте, могут широко применяться в сфере безопасности и для обеспечения защиты банковских операций от взлома и мошенничества.

Разработка выполняется совместно с ОАО «ИнфоТеКС».

# ФИЗИКИ МГУ И ЯПОНСКИЕ УЧЕНЫЕ НАУЧИЛИСЬ ЗАМЕДЛЯТЬ СКОРОСТЬ СВЕТА

Скорость света под контролем ученых. А именно — физиков из МГУ и японского Технологического университета Тойохаши. Исследователи создали особенные магнитофотонные кристаллы, благодаря которым и происходит замедление скорости света — снижается скорость в десять раз. Еще в 1998 году данную концепцию предложил японский физик Мицутеру Иноуэ. По словам ученых, разработки помогут при создании трехмерных дисплеев, сенсоров магнитного поля и суперкомпьютеров.

Они словно играют в необычную, только им известную игру. В полной темноте, в специальной экипировке они пытаются поймать и направить в нужное русло лазерные лучи. Это необходимо для эксперимента со скоростью света. Физики МГУ совместно с японскими коллегами из Технологического университета Тойохаши, разработали методику, благодаря которой можно управлять и даже «тормозить» скорость света. Помогает в этом ученым эффект, открытый Фарадеем еще в XIX веке.

«Всегда считалось, что эффект Фарадея может только возражать. Со временем поворот поляризации, как бы свет ни проходил внутри магнитного вещества, — он всегда накапливается. Оказалось, что если мы измеряем на сверхкоротких временах,

то в этих средах мы можем добиться того, что не только скорость изменения меняется, но и знак — в какой-то короткий момент он может даже может убывать. Это противоречит всем представлениям о магнитооптических эффектах Фарадея, которые имелись до сих пор», — рассказала руководитель проекта, старший научный сотрудник Лаборатории нанооптики метаматериалов физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова Татьяна Долгова.

Главные помощники ученых — нанокристаллы. В них свет попадает как в ловушку — сразу выбраться наружу не может, долго блуждает и выходит оттуда с большим — в десять раз — запозданием, чем если бы шел просто в воздухе. Над этой методикой ученые работали 15 лет. «Замедление» света, по их словам, открывает большие перспективы.

«Например, для создания голографической памяти. Сейчас наши японские коллеги очень активно этим занимаются и делают трехмерную запись, память, которая очень емкая и очень-очень быстрая», — пояснила Татьяна Долгова.

По словам физиков, освоение технологии поможет создать сверхбыстрые дисплеи, компьютерные сети и даже световые компьютеры, в которых вместо электронов будут работать исключительно фотоны.

## НОВЫЕ КИСЛОРОДПРОВОДЯЩИЕ СОЕДИНЕНИЯ

*Сотрудники кафедры физики полимеров и кристаллов обнаружили новые кислородпроводящие соединения с экстремально высокой проводимостью.*

Создание новых материалов с высокой кислородной проводимостью — одна из важнейших проблем современного материаловедения. Она возникла в связи с разработкой новых источников электроэнергии, преобразующих химическую энергию в электрическую. Такие материалы могут быть использованы для разнообразных электрохимических приложений, включающих высокотемпературные твердооксидные топливные элементы, мембраны для выделения кислорода, газовые сенсоры.

«В результате исследований в тройной системе  $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{--La}_2\text{O}_3\text{--MoO}_3$  были обнаружены новые кислородпроводящие соединения с экстремально высокой проводимостью по кислороду —  $0,1\text{--}0,6 \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$  при  $800 \text{ }^\circ\text{C}$ », — рассказала Валентина Воронкова, один из авторов статьи, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник кафедры физики полимеров и кристаллов физического факультета МГУ.

«Поиск и исследование новых материалов, в том числе для новой энергетики, является перспективным направлением современной науки. С научной точки зрения в опубликованной работе представляет интерес исследование фазообразования и полиморфных превращений кислородпроводящих соединений на основе оксида висмута. Практическая ценность работы может проявляться в перспективах использования полученных в работе кислородпроводящих соединений в водородной энергетике в качестве материалов для твердооксидных топливных элементов или материалов для фотокатализа», — заключила Валентина Воронкова.

“Phase formation and electrical properties of  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ -based compounds in the  $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{--La}_2\text{O}_3\text{--MoO}_3$  system“. E.I. Orlova, E.P. Kharitonova, N.V. Gorshkov, V.G. Goffman, V.I. Voronkova. *Solid State Ionics*, **302**, 158–164 (2017).

# УНИКАЛЬНЫЕ НАНОКАПСУЛЫ ДЛЯ АДРЕСНОЙ ДОСТАВКИ ЛЕКАРСТВ

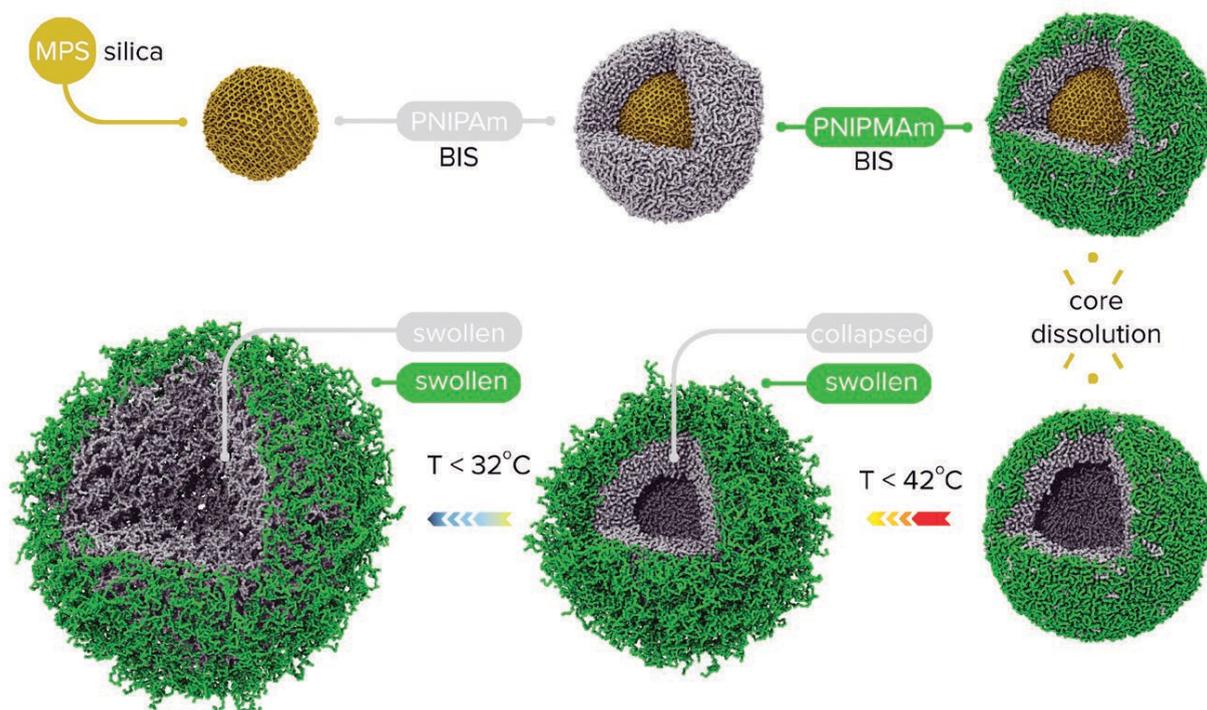
*Международная группа исследователей при участии физиков из МГУ имени М.В. Ломоносова разработала совершенно новый тип носителя лекарств для их адресной доставки к больному органу — гелевые нанокapsулы с двойной оболочкой.*

Исследование пока носит фундаментальный характер. Однако один из авторов исследования Игорь Потемкин (профессор кафедры физики полимеров и кристаллов физического факультета МГУ) утверждает, что в ближайшие годы на основе этой работы станет возможным создание нанокapsул, которые будут идеальными носителями для адресной доставки лекарств, а их производство будет относительно дешевым.

Адресной доставкой лекарств ученые занимаются уже давно, множество лабораторий мира работают над их созданием, поскольку перспективы этого направления огромны. Создано множество «нанопипеток» для доставки лекарств по нужно-

му адресу, но перед учеными все еще стоит множество проблем. Главной из них многие исследователи считают проблему того, как заставить лекарство начинать действовать только тогда, когда оно попадет в нужное место.

«Многие существующие носители инкапсулируют лекарства за счет дальнего действия электростатического взаимодействия — заряд носителя противоположен заряду лекарства. У нас же никакой электростатики нет, все здесь контролируется температурой — и заполнение внутренней полости, и ее запираение, и высвобождение ее содержимого там, где это требуется. Поэтому сами лекарства могут быть как заряжен-



*Способ изготовления наноконтeйнеров и их структура в зависимости от температуры.*

ными, так и нейтральными», — комментирует один из российских соавторов статьи, доктор физико-математических наук Игорь Потемкин.

По словам авторов статьи, существуют и другие стимулы для высвобождения лекарств, например, внешнее магнитное поле, кислотность среды (рН), однако в каждом случае, как и в случае с электростатикой, исследователи сталкиваются с проблемой преждевременного выпуска лекарств.

Ученые решили использовать структуры, которые ранее практически не исследовались, — гелевые нанокапсулы. Основной проблемой, прежде резко снижавшей интерес к ним, было то, что такие капсулы, едва появившись, тут же слипались со своими соседками (теряли коллоидную стабильность) при попытке «загрузки» их лекарствами, что делало доставку невозможной (или малоэффективной). Ученым удалось решить эту проблему, создав носитель, внутренняя полость которого, словно яйцо с двумя скорлупами, окружена двумя оболочками разного химического состава. Внешняя пористая оболочка играет защитную (стабилизирующую) роль и препятствует слипанию нанокапсул, а поры внутренней оболочки могут открываться и закрываться в зависимости от температуры за счет изменения взаимодействия между ее мономерными звеньями.

В момент заполнения полости поры открыты, и лекарство всасывается в нее как в губку, затем температура меняется, поры внутренней оболочки закрываются, и лекарство отправляется в путь. В дальнейшем поры смогут открыться вновь только там, где это позволит температура.

Приготовление двухслойных капсул в этом эксперименте сводилось к послойному синтезу двух полимерных оболочек разного химического состава вокруг ядра из оксида кремния, а по окончании синтеза это ядро химическим образом растворялось, оставляя вместо себя пустое пространство.

Основная трудность этой работы заключалась в том, что исследователи во многом шли вслепую, не зная наверняка, как поведет себя их нанокапсула, не «схлопнется» ли ее полость, оставшаяся после удаления кремниевого ядра, достаточного ли размера окажутся поры оболочек для того, чтобы всосать в себя транспортируемое вещество, а затем высвободить его там, где требуется, надежно ли оно будет заперто во время транспортировки. К счастью, все эти опасения оказались напрасными — в ответ на

изменения температуры поры открывались и закрывались, «по дороге» (в эксперименте, настоящей «дороги» не было — ученые измеряли возможные потери из полости по мере течения времени) содержимое капсул практически не терялось, а внутренняя полость не только не схлопывалась — она становилась даже больше первоначального размера кремниевого ядра.

Изготовление наногелевых капсул и связанные с ними измерения проводились в Европе, главным образом в Германии, а российские ученые из МГУ, Игорь Потемкин и его коллега Андрей Рудов, работали над компьютерным моделированием, с помощью которого исследователи изучали зависимость структуры нанокапсул от температуры. Также физиками МГУ с помощью компьютерного моделирования был продемонстрирован способ инкапсулирования и высвобождения транспортируемых молекул при изменении температуры.

На данном этапе работа носила чисто фундаментальный характер и была предназначена в первую очередь для демонстрации эффективности концепции. Эксперименты проводились в диапазоне температур 32–42°C. Это несколько больше диапазона температур, благоприятных для человека, хотя в дальнейшем, утверждает Игорь Потемкин, этот диапазон легко можно будет сузить.

Совместные работы группы рассчитаны еще на четыре года. «Осталось еще много вопросов, — комментирует ученый. — Например, мы «поймали» структуру, в которой полость не схлопывается по мере коллапса (то есть в момент закрытия пор). Теперь осталось понять, как это получается, как влияет плотность сшивки слоев, т.е. какое минимальное количество сшивателя не приводит к схлопыванию полости, и так далее».

Потемкин уверен, что в любом случае созданные исследовательской группой наноконтейнеры представляют собой идеальные носители для адресной доставки лекарств. Более того, их синтез не отличается сложностью и относительно дешев. Хотя на данном этапе исследований его конкретную стоимость назвать сложно, в планах коллаборации уже сейчас стоит создание крупнотоннажного, приемлемого с коммерческой точки зрения, производства микрогелей.

“Nanogels with Responsive Shell Permeability”. A.J. Schmid, J. Dubbert, A.A. Rudov, J. Skov Pedersen, P. Lindner, M. Karg, I.I. Potemkin & W. Richtering. *Scientific Reports* 6. Article number: 22736 (2016).

# «СУПЕРГЕРОИ» СРЕДИ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ СВЕРХБЫСТРОЙ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ

*Международная группа ученых под руководством исследователей из МГУ имени М.В. Ломоносова впервые смогла при помощи нелинейных метаматериалов продемонстрировать эффект полностью оптического переключения между потоками фотонов, рожденных в процессе генерации третьей оптической гармоники. По словам Максима Щербакова, научного сотрудника лаборатории нанооптики метаматериалов физического факультета МГУ, проделанная ими работа позволит в будущем использовать метаматериалы для создания высокоскоростных коммуникационных технологий.*

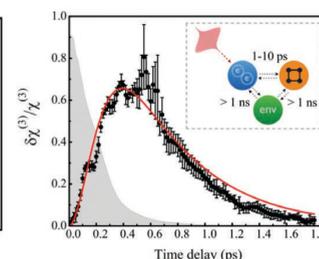
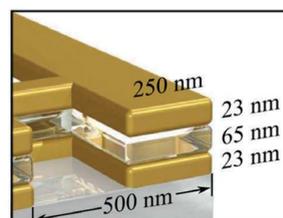
## Метаматериалы: когда $1+1=3$

Иногда в команде несколько человек могут достичь большего, чем была бы сумма их достижений по отдельности, словно, объединяясь, они приобретают новые полезные свойства. Это справедливо и для метаматериалов. И если в примере с людьми в команде, когда вместо простой суммы известных величин мы получаем что-то принципиально иное, ситуация объясняется разными психологическими эффектами, то в случае с метаматериалами причиной таких «сверхспособностей» как «невидимость» (правда, пока только в микроволновом диапазоне и двумерном пространстве), «видение сквозь стены», оптическое увеличение предметов и отрицательные показатели преломления является их искусственно созданная упорядоченная структура, чередующая слои вполне обыденных веществ. Вместе же они ведут себя как принципиально новый материал с уникальными электромагнитными свойствами, благодаря которым можно манипулировать фотонами (то есть светом) по-новому.

Метаматериалы, с которыми работали авторы статьи, имеют структуру, напоминающую рыбацкую сеть, основные «нити» которой состоят из золота и оксида магния, а прямоугольные отверстия заполнены кварцевым стеклом. Они относятся к классу нелинейных метаматериалов, необычные оптические свойства которых можно использовать, например, чтобы упростить обработку информации и создать новые устройства, работающие намного быстрее современных.

## Повелители света

Фотоны, в отличие от электронов, перемещающихся по проводам электронных устройств, не имеют заряда и массы покоя, поэтому передача информации с их помощью может производиться



намного быстрее. Существует проблема в создании фотонного транзистора, столь же компактного, как современный электронный транзистор.

Для этого предлагали использовать металлические и полупроводниковые наночастицы, микрорезонаторы, фотонные кристаллы и другие искусственно созданные среды. Недостаток этих сред в том, что для наблюдения переключения в них требуется мощное лазерное излучение. Однако нелинейные метаматериалы, как сообщается в статье, имеют более высокую чувствительность к фемтосекундным лазерным импульсам по сравнению с линейными, что дает им преимущества в управлении потоками света с помощью этих импульсов.

«В стандартных устройствах полностью оптического переключения один поток фотонов контролирует другой поток, примерно так же, как в электронном транзисторе это происходит с потоками электронов. В нашей предыдущей работе мы облучали двумя лазерными импульсами кремниевую наноструктуру, и пропускание одного импульса менялось в зависимости от того, есть ли второй импульс или нет», — рассказал соавтор исследования, кандидат физико-математических наук Максим Щербаков.

### Рождение фотонов

В ходе работы Максим Щербаков и его коллеги из лаборатории нанооптики метаматериалов МГУ экспериментально продемонстрировали управление потоками фотонов с помощью лазерных импульсов и даже смогли запустить процессы слияния фотонов с помощью внешнего воздействия.

«В оптике есть интересный эффект, который наблюдается, когда три фотона сливаются в один с утроенной энергией (практически как ядра при термоядерном синтезе). Этот эффект называется “генерация третьей гармоники”. В нашей работе мы одновременно (и впервые, насколько нам известно) пронаблюдали оба эффекта: полностью оптическое переключение и генерацию третьей гармоники. Иным образом, мы контролируем

при помощи внешнего оптического импульса процесс “синтеза” фотонов. Это все очень важно для перспективных схем интегральной фотоники, где нужно будет иметь полный контроль над всеми возможными процессами с участием света», — отмечает Максим Щербаков, подчеркивая, что высокая чувствительность нелинейных метаматериалов позволит в будущем использовать их для создания технологий высокоскоростных коммуникаций.

“Ultrafast control of third-order optical nonlinearities in fishnet metamaterials”. A.S. Shorokhov, K.I. Okhlopov, J. Reinhold, Ch. Helgert, M.R. Shcherbakov, Th. Pertsch & A.A. Fedyanin. *Scientific Reports* **6**, Article number: 28440 (2016).

## КОНТРОЛЬ ПРОЧНОСТИ ФТАЛОНИТРИЛЬНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТРИЦ

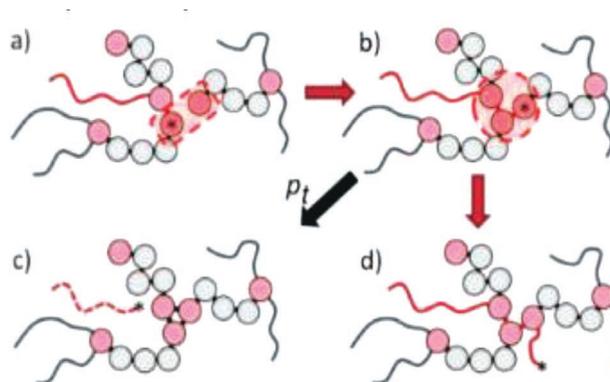
*На кафедре физики полимеров и кристаллов физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова доказали, что повышение количества триамина во фталонитрильных матрицах — высокотемпературных полимерах — не повышает прочность материала, а, наоборот, снижает ее.*

Матрицы на основе соединений фталонитрилового ряда — одни из перспективных термостойких материалов. Сшивание в таких матрицах включает несколько химических реакций, приводящих к различным структурам матриц и, как следствие, к различным свойствам конечного материала.

«Опубликованные исследования показали, что повышение количества тройных сшивок триамина во фталонитрильных полимерных матрицах, вопреки общепринятому мнению, не приводит к упрочнению таких материалов. Наоборот, матрицы с большим количеством триамина оказываются менее плотно сшитыми и более мягкими, чем матрицы без триамина», — рассказал один из авторов работы, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник кафедры физики полимеров и кристаллов физического факультета МГУ Владимир Рудяк.

В ходе работы ученые использовали методы компьютерного моделирования, метод диссипативной динамики частиц. Расчеты ученые провели на суперкомпьютере «Ломоносов-2» НИВЦ МГУ.

«Введение дополнительных ингибиторов и катализаторов позволяет контролировать про-



исходящие химические реакции при сшивании матриц фталонитрилового ряда. Данная работа может быть использована для планирования эксперимента и адаптации свойств синтезируемых матриц под текущие технические нужды», — заключил ученый.

“Complex Curing Pathways and Their Influence on the Phthalonitrile Resin Hardening and Elasticity“. V.Yu. Rudyak, A.A. Gavrilov, D.V. Guseva, A.V. Chertovich. *Macromolecular Theory and Simulations*. 1700015 (2017).

# ВЫРАЩЕНЫ АЛМАЗЫ ИГОЛЬЧАТОЙ И НИТЕВИДНОЙ ФОРМ И ИССЛЕДОВАНЫ ИХ ПОЛЕЗНЫЕ СВОЙСТВА

*Физики МГУ имени М.В. Ломоносова получили кристаллы алмаза в форме геометрически правильных пирамид микрометрового размера и совместно с коллегами из других российских и зарубежных научных центров изучили их люминесцентные и электронно-эмиссионные свойства.*

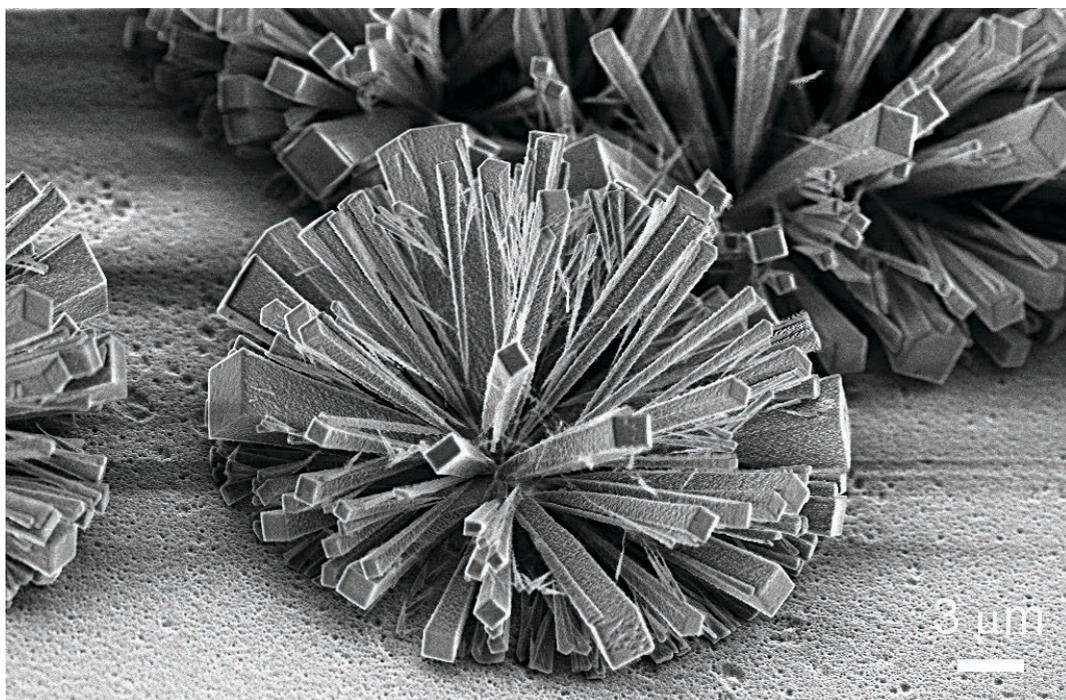
Сотрудники физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова описали структурные особенности микрометровых кристаллов алмаза иглоподобной или нитевидной формы и их взаимосвязь с люминесцентными характеристиками и эффективностью автоэлектронной эмиссии. Люминесцентные свойства таких иглоподобных кристаллов алмаза могут найти применение в сенсорах различных типов, квантово-оптических устройствах, могут использоваться для создания элементной базы квантовых компьютеров и в других областях науки техники.

## ***Лучшие друзья девушек и технологов***

Бриллианты, представляющие собой ювелирно обработанные кристаллы алмаза, многократно воспеваются как «лучшие друзья девушек». Относительно меньшую известность для обывателя получил факт широкого использования алмазов в разнообразных промышленных технологиях. Масштабы технологических применений алмазов значительно превышают их ювелирное

использование и имеют тенденцию к постоянному увеличению, как в количественном отношении, так и в смысле расширения разнообразия областей их применения. Такое высокое прикладное значение служит постоянным стимулом для исследователей, занимающихся разработкой новых методов синтеза, обработки, придания алмазу необходимых качеств.

Одной из проблем, решение которой требуется для развития ряда технологий, является изготовление алмазных кристаллов иглоподобной или нитевидной формы. Придание такой формы исходным природным или синтетическим алмазам возможно путем их индивидуальной ручной обработки (шлифовки) аналогично тому, как это делается при изготовлении бриллиантов. Другие способы включают использование литографических и ионно-пучковых технологий, с помощью которых фрагменты необходимой формы отделяют от кристаллов большого размера. Однако такие методы «выпиливания» достаточно затратны и не всегда приемлемы.



*Пример алмазного кристаллита.*

В группе исследователей, работающих на физическом факультете МГУ под руководством профессора Александра Образцова, была предложена технология, с помощью которой возможно массовое производство небольших по размерам кристаллов (или кристаллитов) алмаза иглоподобной и нитеобразной формы. Первые результаты, полученные в ходе исследований, проводимых в этом направлении, были опубликованы семь лет назад в журнале *Diamond & Related Materials*.

«Суть предложенного метода состоит в использовании хорошо известной закономерности, определяющей формирование поликристаллических пленок из кристаллитов вытянутой («столбчатой») формы. Из таких кристаллитов, например, часто состоит лед на поверхности озер, что можно увидеть при его таянии. При изготовлении алмазных поликристаллических пленок обычно стремятся обеспечить условия, при которых составляющие их кристаллиты столбчатой формы тесно примыкают друг к другу, формируя плотную однородную структуру», — комментирует главный автор исследований, профессор кафедры физики полимеров и кристаллов физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова, доктор физико-математических наук Александр Образцов.

#### ***Все, что не алмаз, превращают в газ***

Исследователями из МГУ было показано, что считавшиеся ранее «плохими» алмазные пленки, состоящие из отдельных не соприкасающихся друг с другом кристаллитов, могут использоваться для изготовления алмаза в виде иглоподобных или нитевидных образований геометрически правильной пирамидальной формы. Для этого необходимо нагреть такие пленки до определенной температуры на воздухе (или в другой кислородсодержащей среде). При нагреве часть материала пленки окисляется, превращаясь в газ. Поскольку температура окисления зависит от характеристик углеродного материала, и для алмазных кристаллитов она максимальна, то удастся так подобрать эту температуру, чтобы превратить в газ весь материал, кроме самих алмазных кристаллитов. Эта относительно простая технология, объединяющая формирование поликристаллических алмазных пленок с заданными структурными характеристиками с их нагревом на воздухе, позволяет получать в массовом количестве алмазные кристаллиты с некоторым варьированием их формы (иглообразные, нитевидные и т.п.). Представление о таких кристаллитах можно получить из электронно-микроскопических изображений.

Такие кристаллиты могут использоваться, например, в качестве элементов с высокой твердостью: режущий инструмент для сверхточной обработки, индентеры или зонды для сканирующих

микроскопов. Такое применение было описано в статье, опубликованной учеными ранее в журнале *Review of Scientific Instruments*. В настоящее время произведенные по этой технологии зонды реализуются, как иностранными компаниями, так и на отечественном рынке.

#### ***Управление полезными свойствами алмаза возможно!***

В ходе последующих работ, которые были проведены на физическом факультете МГУ, исходная технология была существенно усовершенствована, что позволило варьировать форму и размеры иглообразных кристаллитов и расширило потенциальную область их применения. Исследователи из МГУ обратили внимание также на оптические характеристики алмаза, представляющие значительный фундаментальный научный и прикладной интерес. Результаты этих исследований были представлены в серии статей в *Journal of Luminescence*, *Nanotechnology*, *Scientific Reports*.

В этих недавних публикациях описаны структурные особенности таких кристаллитов и их взаимосвязь с люминесцентными характеристиками и эффективностью автоэлектронной эмиссии. Причем последнее, как отмечают ученые, видимо, является первым примером реализации истинно алмазного автоэмиссионного (или холодного) катода, к получению и исследованию которого было привлечено значительное внимание на протяжении последних двух десятилетий. Люминесцентные свойства иглообразных кристаллов алмаза могут найти применение в сенсорах различных типов, квантово-оптических устройствах, для создания элементной базы квантовых компьютеров и в других областях науки техники.

«Мне особенно хочется отметить значительный вклад в данные работы со стороны молодых ученых Виктора Клеца и Рината Исмагилова, энтузиазм и интенсивная работа которых позволили получить описанные в обсуждаемых работах научные результаты, отличающиеся высокой степенью новизны, фундаментальной научной и прикладной значимостью», — отмечает Александр Образцов.

Исследования выполнены при поддержке Российского научного фонда.

“Structural peculiarities of single crystal diamond needles of nanometer thickness”. A.S. Orekhov, F.T. Tuyakova, E.A. Obratsova, A.B. Loginov, A.L. Chuvilin, and A.N. Obratsova. *Nanotechnology*, 27, No 45 (2016).

“Photo- and cathodo-luminescence of needle-like single crystal diamonds”. F.T. Tuyakova, E.A. Obratsova, E.V. Korostylev, D.V. Klinov, K.A. Prusakov, A.A. Alekseev, R.R. Ismagilov, A.N. Obratsova. *Scientific Reports*. 179, 539–544 (2016).

# ЧИП, КОТОРЫЙ МОЖЕТ ЗАМЕНИТЬ СЛОЖНУЮ ЛАЗЕРНУЮ УСТАНОВКУ

Эту работу можно назвать заключительным аккордом в серии работ группы, касающихся исследований оптических гребенок — так называются сигналы, чей частотный спектр представляет собой набор равноотстоящих друг от друга линий. Начавшись с исследования шумов в оптических сигналах такого сорта, эти работы привели сначала к созданию генераторов этих сигналов с сердцем в виде диска миллиметрового диаметра и закончились созданием полноценного чипа, почти пригодного для коммерческого использования.

Фемтосекундные оптические гребенки — недавнее изобретение. Появившись в конце 90-х, они оказались настолько востребованными в самых разных областях — в системах телекоммуникации, в лазерной спектроскопии, в астрофизике и так далее, — что уже в 2005 году их авторы, Теодор Хэнш из Германии и Джон Холл из США, получили за них Нобелевскую премию. Для получения таких гребенок использовались лазеры с синхронизацией мод. При этой методике лазер, излучает свет не одной частоты, как это принято думать о лазерах, а сразу несколько «мод» — световых лучей с кратными частотами. Если эти моды синхронизировать, то есть сделать так, чтобы их фазы были жестко связаны между собой, то в результате интерференции этих мод непрерывный луч лазера превратится в последовательность импульсов со спектром «гребенки».

За этой, без преувеличения, технологической революцией вскоре последовала другая — в 2007 году в лаборатории Тобиаса Киппенберга (тогда работавшего в группе Т. Хэнша, а ныне возглавляющего лабораторию в Федеральной политехнической школе Лозанны (Лозанна, Швейцария)) в микрорезонаторах из плавленого кварца, открытых, кстати, в МГУ, тоже были получены оптические гребенки, и для их создания уже не требовались громоздкие и сложные установки. Появилась возможность на порядки уменьшить размеры устройств. Генерация таких гребенок связана с так называемым эффектом Керра, состоящим в том, что в нелинейных средах показатель преломления зависит от интенсивности падающего на него света.

Правда, это была не столько революция, сколько ее начало — швейцарские исследователи, а позже и другие группы в разных лабораториях, фактически только показали принципиальную возможность создавать «гребенки» подобным образом, но то, что у них получалось, было еще очень далеко от идеала, гребенки получались шумными, нестабильными (они походили на расчески с выломанными, да еще вдобавок ползающими туда-сюда зубьями) и ученым предстояло решить массу проблем, чтобы запустить эти резонаторы в работу. Первой из них была проблема шумов. В сотрудничестве с группой Киппенберга ученые физического

факультета МГУ в начале 2013 года решили ее, доказав, что эти шумы не носят фундаментального характера, что от них можно избавиться, и показали, как это сделать. Оставалось главное — сделать «правильные» гребенки и создать с этим спектром последовательность импульсов с очень короткой, фемтосекундной длительностью (то есть с длительностью порядка 10 в минус пятнадцатой степени секунды). В конце того же года они справились и с этой проблемой.

Для создания таких гребенок физики МГУ и Российского квантового центра предложили использовать «солитоны», то есть компактно упакованные волны, своеобразные электромагнитные цунами, которые ведут себя, как частицы. По развитой в МГУ теории облучение лазерным светом дисков из таких нелинейных сред порождает в этих дисках движущиеся по кругу солитоны, в результате чего на выходе связанного с диском оптоволокна возникает последовательность импульсов, следующих друг за другом через время одного обхода солитоном окружности диска. В качестве резонатора физики использовали тогда миллиметровый диск из кристалла фторида магния. С его помощью им удалось получать импульсы-гребенки длительностью в 100–200 фемтосекунд.

В этом году российско-швейцарская команда закрепила успех и научилась напылять специальные микрорезонаторы для гребенок в чипах.

«Разница, конечно, огромная, — говорит один из российских соавторов статьи профессор физического факультета МГУ Михаил Городецкий. — Если в лазерах с синхронизацией мод для генерации импульсов используются сложные оптические устройства, среды и специальные зеркала, то мы получаем такие же стабильные импульсы в простом пассивном резонаторе, внедренном в микрочип и имеющем размеры не более 100–200 микрон».

Изменилось и качество гребенок — теперь длительность импульсов удалось сократить со 100–200 до 30 фемтосекунд. Последнее достижение группы «Москва-Лозанна», по словам профессора Городецкого, не только самым категорическим образом снижает размеры, сложность и стоимость генераторов гребенок, но вдобавок открывает новые горизонты для их использования в режимах, «недостижимых другими методами»

“Photonic chip-based optical frequency combing soliton Cherenkov radiation”. V. Brasch, M. Geiselmann, T. Herr, G. Lihachev, M.H.P. Pfeiffer, M.L. Gorodetsky, T.J. Kippenberg. *J. Science*. **351**, 6271, 357–360. (2016).

# ВПЕРВЫЕ В МИРЕ ФИЗИКИ СМОГЛИ КОНТРОЛИРОВАТЬ ДВИЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ С ТОЧНОСТЬЮ ДО МИЛЛИАРДНОЙ ДОЛИ СЕКУНДЫ

*Международная группа ученых при участии физиков из МГУ имени М.В.Ломоносова впервые в мире смогла доказать, что возможно контролировать квантовые процессы с точностью до нескольких аттосекунд — одной миллиардной доли миллиардной доли секунды.*

Группа исследователей при участии российских физиков сумела провести эксперимент, в котором впервые в мире удалось контролировать сверхбыстрые движения электронов с точностью до трех аттосекунд (одна аттосекунда относится к одной секунде также, как одна секунда к времени жизни Вселенной), что открывает возможность для проведения ранее невозможных квантовых исследований. Эксперимент проводился на лазере на свободных электронах FERMI, установленном в международном исследовательском центре “Elettra Sincrotrone” в итальянском городе Триесте.

Химические, физические и биологические процессы протекают чрезвычайно быстро, связи между атомами рвутся и образуются за времена, исчисляемые фемтосекундами (миллионная доля миллиардной доли секунды). Египетско-американский химик Ахмед Зевейл первым сумел наблюдать динамику химических процессов, за что в 1999 году был удостоен Нобелевской премии по химии.

Однако природа может работать еще быстрее. Если время движения атомов в молекуле характеризуется фемтосекундами, то электронная динамика, которая и определяет химические связи, протекает в тысячу раз быстрее — за промежутки времени, исчисляемые десятками и сотнями аттосекунд.

Для исследования таких процессов нужны лазеры, причем подходят только так называемые рентгеновские лазеры на свободных электронах. В «обычных» газовых, жидкостных или твердотельных лазерах источниками фотонов служат возбуждения электронов, находящихся в связанном атомном или молекулярном состоянии. В отличие от них, лазеры на свободных электронах работают от электронного пучка очень высокого качества, движущегося по синусоиде под действием отклоняющих магнитных полей. Теряя при этом энергию, электроны испускают ее в виде излучения.

Рентгеновские лазеры на свободных электронах генерируют излучение с уникальной комбинацией

свойств: длиной волны в ультрафиолетовом или мягком рентгеновском диапазонах, беспрецедентной яркостью, ультракороткими фемтосекундными импульсами, перестраиваемостью частоты и поляризации, когерентностью. Характеристики лазера не позволяли проводить наблюдения за аттосекундными изменениями, однако выход из положения все же был найден. В своем эксперименте физики облучали атом неона импульсами излучения лазера на свободных электронах не одной частоты, а сразу двух — гармониками с длинами волн в 63,0 и 31,5 нанометров (в данном случае гармоники — это составляющие лазерного излучения с кратными друг другу длинами волн), а затем наблюдали за направлением вылета фотоэлектронов из атома.

Меняя временную задержку между гармониками, ученые следили за динамикой этого процесса — а именно, измеряли изменения формы угловых распределений фотоэлектронов. В результате им удалось преодолеть поставленные природой препятствия и осуществить наблюдение за квантовой интерференцией между двумя каналами фотоионизации атомов с временным разрешением в три аттосекунды (упрощенно, по косвенным признакам удалось отследить, чтобы именно с таким интервалом по времени из атома вылетали электроны).

«В этой работе нам впервые удалось реализовать схему, которая позволяет определять относительные фазы двух гармоник лазера на свободных электронах, — комментирует один из авторов работы Елена Грызлова, старший научный сотрудник отдела электромагнитных процессов и взаимодействия атомных ядер НИИ ядерной физики имени Д.В. Скобельцына МГУ имени М.В. Ломоносова. — Для подавления или, наоборот, выделения дополнительных частот создано множество методов, но все они неприменимы в высокочастотных диапазонах вакуумного ультрафиолета и рентгена, так как здесь нет обычных для лазеров зеркал или поляризаторов. Однако главный вывод, следующий из этого эксперимента, наверное, заключа-

ется в том, что это вообще в принципе возможно — контролировать квантовые процессы с точностью до нескольких аттосекунд».

Вклад российских ученых в успех этой работы значителен: «В частности, нашему коллеге, Алексею Грум-Гржимайло (старшему) принадлежит сама идея использовать для определения роли второй гармоники интерференцию резонансного и нерезонансного путей ионизации и ее проявление в вероятностях вылета электронов, — рассказывает Елена Грызлова. — Позже, совместно с профессором Светланой Страховой, нам удалось рассчитать величину эффекта, понять, будет ли он наблюдаем в принципе, и получить выражения для извлечения нужных характеристик из экспериментально измеренных параметров».

«Двухцветные» лазерные измерения, по словам авторов статьи, открывают целое поле для исследований физики ультрабыстрых процессов.

Как утверждает Елена Грызлова, уже сейчас учеными подана заявка для проведения на FERMI аналогичного эксперимента с более сложными, чем атом неона, системами — с молекулами. Они предполагают изучать сложные явления, имеющие отношение к каталитическим процессам и атмосферной химии.

«Мы ожидаем, — говорит Елена, — что это направление будет развиваться и дальше, поскольку проблема осуществления квантового управления и контроля — один из краеугольных вопросов фундаментальной физики».

“Coherent control with a short-wavelength free-electron laser”. K.C. Prince, E. Allaria, C. Callegari, R. Cucini, G. De Nino, S. Di Mitri, B. Diviacco, E. Ferrari, P. Finetti, D. Gauthier, L. Giannessi, N. Mahne, G. Penco, O. Plekan, L. Raimondi, P. Rebernik, E. Roussel, C. Svetina, M. Trovò, M. Zangrando, M. Negro, P. Carpeggiani, M. Reduzzi, G. Sansone, A.N. Grum-Grzhimailo, E.V. Gryzlova, S.I. Strakhova et al. Nature Photonics **10**, 176–179. (2016).



## РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТСКИЙ СПУТНИК «ЛОМОНОСОВ»: 5 МЕСЯЦЕВ ПОЛЕТА



*Спутник «Ломоносов» запущен 28 апреля 2016 года с нового российского космодрома «Восточный» на солнечно-синхронную орбиту высотой около 500 км. Об экспериментах, проводимых на спутнике, рассказывает Михаил Панасюк, профессор, докт. физ.-мат. наук, директор НИИЯФ МГУ.*

Спутник «Ломоносов», запущенный 28 апреля 2016 г. с нового российского космодрома «Восточный» на солнечно-синхронную орбиту высотой около 500 км и уже более 5-ти месяцев передает на Землю научную информацию.

Разработчики и постановщики экспериментов из Московского университета со своими коллегами из других организаций в качестве основных научных целей проекта выбрали амбициозные научные задачи по изучению экстремальных явлений в нашей Вселенной. Все они — предмет интенсивных научных исследований и образовательного процесса в Московском университете. Среди них: исследования заряженных частиц наиболее высоких энергий существующих в природе, — космических лучей предельно высоких энергий (КЛПВЭ); — с энергиями более 10<sup>19</sup> эВ, гамма-всплесков — явлений в ранней Вселенной, связанных с наиболее мощным высвобождением энергии в астрофизических процессах, а также изучение природы воздей-

ствия энергичных частиц в околоземном космическом пространстве на земную атмосферу. На борту спутника разработчики установили также прибор, позволяющий смоделировать коррекцию зрительного аппарата человека в экстремальных условиях космоса — практическом отсутствии гравитации.

В течение последних месяцев участники проекта проводили интенсивное тестирование научной аппаратуры и оптимизировали программные режимы их работы.

К настоящему времени испытания аппаратуры практически закончились и специалисты приступили к плановым исследованиям по разработанной научной программе. Тем не менее, уже первые месяцы работы спутника принесли интересные и значимые научные результаты, которые станут основой для планирования будущих экспериментов на этом спутнике.

На спутнике установлено несколько приборов — детекторов для регистрации космических частиц



*Испытания космического аппарата «Ломоносов».*

и излучений, созданных учеными МГУ вместе со студентами, аспирантами и преподавателями университета нескольких подразделений нашего университета: НИИЯФ, физического факультета, ГАИШ, НИИмех, мехмата и ИМИСС. Именно они и были инициаторами и главными разработчиками всего комплекса научной аппаратуры на спутнике. Вместе с нами работали коллективы и зарубежных университетов. Среди них основные: Университеты Южной Кореи и Университет Калифорнии в Лос-Анжелесе. Космическая служебная платформа для спутника была разработана специалистами АО «ВНИИЭМ» на базе серийной платформы «Канопус» при самом активном участии специалистов МГУ. Вот вкратце эти результаты.

Орбитальный телескоп ТУС (Трековая УСтановка), на «Ломоносове» является первым в мире ин-



*Космический аппарат «Ломоносов» перед отправкой на космодром.*

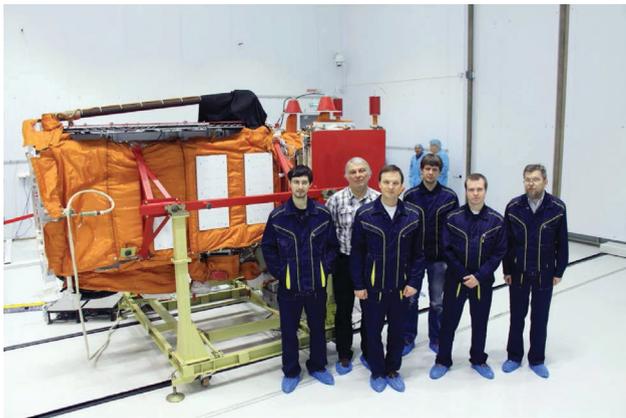


*Участники проекта перед отправкой КА «Ломоносов» на космодроме.*

струментом, предназначенным для регистрации световых треков КЛПВЭ в атмосфере Земли с борта космического аппарата. Он регистрирует в атмосфере Земли «следы» космических частиц — их быстрые ультрафиолетовые (УФ) вспышки, возникающие при взаимодействии каскада вторичных частиц от КЛПВЭ атомами воздуха на высотах в десятки километров. Актуальность изучения КЛПВЭ — самых высокоэнергичных заряженных частиц во Вселенной, связана с тем, что специалистам пока не в полной мере выяснена сама природа этих удивительных частиц. Дело в том, что еще 50 лет назад известные физики Грейзен, Зацепин и Кузьмин теоретически предсказали (академик Г.Т. Зацепин был профессором МГУ и заведующим кафедры физики космоса физического факультета), что эти частицы, зарождаясь вне пределов нашей Галактики, не могут достичь нашей планеты вследствие так называемого эффекта обрезания их потока (ГЗК — обрезание) на реликтовом излучении Вселенной, образовавшемся после Большого взрыва. Наземные установки по изучению космических лучей несколько лет назад действительно зарегистрировали похожее на ГЗК-эффект уменьшение интенсивности таких частиц. Но в силу очень малой статистики событий (так, при энергии 10<sup>19</sup> эВ на Землю «падает» 1 частица на 1 кв. км в год!) пока не удастся сделать окончательный вывод о том, является ли наблюдаемый эффект действительно ГЗК-обрезанием.

По сути, орбитальный телескоп ТУС на «Ломоносове» использует атмосферу нашей планеты в качестве гигантской мишени, в которой происходит процесс взаимодействия КЛПВЭ. Тем самым удастся значительно увеличить эффективную площадь обзора (по сравнению, например, с наземными установками).

Кроме выполнения этой задачи, направленный в нади́р телескоп ТУС на «Ломоносове», способен фиксировать и другие разнообразные быстрые атмосферные процессы, проявляющиеся в УФ излучении. Среди них — как широко известные молниевые разряды, так и мало изученные до сих пор



*Команда МГУ на космодроме «Восточный».*

так называемые транзиентные световые явления (спрайты, эльфы, синие джеты, гигантские джеты и пр.). Уже первые выборочные измерения на «Ломоносове» в тестовом режиме позволили накопить достаточно большой объем полезной информации как по атмосферным явлениям, так и по работе самого прибора на борту спутника.

В одном из режимов работы телескопа ТУС удалось зарегистрировать мощные УФ-вспышки в атмосфере Земли, продолжительностью от нескольких единиц до ста миллисекунд. Как правило, многие из них связаны с грозовыми областями на средних и низких широтах и дают одновременный сигнал во всем поле зрения прибора вследствие рассеяния излучаемого свечения в облака (рис).

Однако целый ряд наиболее интересных событий представляют собой сложную пространственно-временную структуру, которая подлежит дальнейшему детальному исследованию. Эти явления,

видимо, принадлежат к классу надоблачных, высоко- атмосферных транзиентных световых явлений (так-называемые «эльфы», «спрайты»). Примеры таких событий приведены на рис. 10. Интересно отметить, что по данным мировой сети радиочастотной локации молний некоторых таких событий не нашлось ни одной области грозовой активности в пределах области их регистрации. Этот факт может поставить под сомнение модель их генерации, связанной с интенсификацией атмосферного электричества в нижних слоях атмосферы. В ближайшее время будет произведена типологизация событий и сравнение данных с наземными сетями регистрации молний и другими экспериментами.

Подобного рода ультрафиолетовые вспышки в атмосфере Земли, являясь, с одной стороны, нежелательным «фоном» при выполнении основной задачи телескопа ТУС — регистрации КЛПВЭ, представляют, тем не менее, отдельную актуальную физическую цель проводимого эксперимента — выяснение их физической природы.

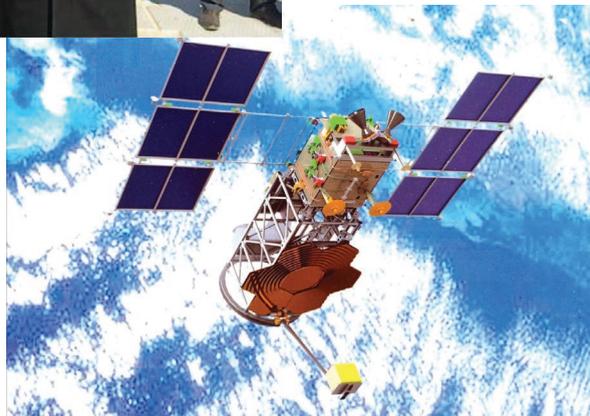
При гамма-всплесках выделяется огромная энергия — свыше 10<sup>53</sup> эрг/с. Это примерно столько же, сколько при взрыве сверхновой звезды, но за одну секунду. Природа гамма-всплесков (наряду с ускорением КЛПВЭ) остается одной из загадок современной астрофизики. Считается, что их источники находятся на очень далеких, так называемых космологических расстояниях, и связаны с коллапсом массивных звезд. Для понимания природы гамма-всплесков очень важны одновременные наблюдения в оптическом и гамма-диапазонах. До сих пор удавалось зарегистрировать

*Старт ракеты «Союз» со спутником «Ломоносов» на космодроме «Восточный»*



*Руководители проекта на космодроме «Восточный» после удачного старта 28.04.16*

*Спутник «Ломоносов» в полете*



в основном лишь оптическое «послесвечение», то есть отклик межзвездной среды на проходящую через нее ударную волну, возникающую во время космического взрыва. «Поймать» оптическое излучение непосредственно в момент самого гамма-всплеска необычайно трудно, поскольку заранее неизвестно, из какой области Вселенной придет сигнал.

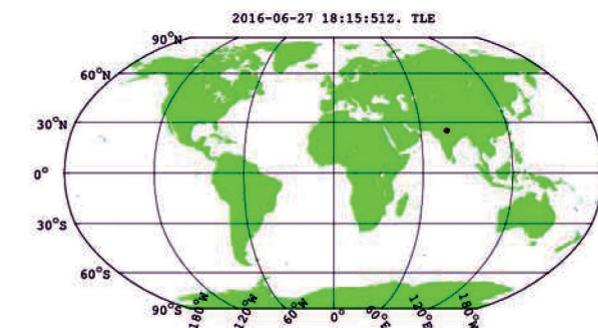
«Ломоносов» — первая российская многоволновая обсерватория, способная регистрировать излучение объектов от гамма-диапазона до оптического. Для этого на «Ломоносове» установлены приборы, позволяющие измерять эмиссию излучений этих необычных явлений в широком диапазоне длин волн.

Прежде всего, это — гамма-спектрометр БДРГ (Блок Детекторов Рентген-Гамма), обеспечивающий регистрацию гамма-излучения с высоким временным разрешением и чувствительностью. При этом БДРГ выдает специальный триггерный сигнал на оптические широкопольные мини-телескопы ШОК (Широкопольные Оптические Камеры), по которому осуществляется запоминание оптического изображения области неба, где произошел всплеск. Кроме того, этот прибор позволяет определять местоположение на небе источника гамма-всплеска и оперативно передавать информацию в мировую сеть для наведения на эту область наземных телескопов.

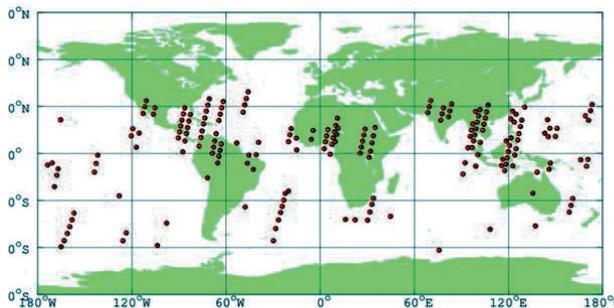
На сегодняшний день с помощью БДРГ зарегистрировано девять космических гамма-всплесков космологической природы, а также пять гамма-всплесков от магнитара SGR (Soft Gamma Repeater) 1935+2154 — быстро вращающейся нейтронной звезды с очень сильным магнитным полем (порядка  $10^{15}$  Гс). Особый интерес представляет собой всплеск GRB160802, временной профиль которого показан на рис. 11. Для этого всплеска характерно наличие нескольких пиков на временном профиле, которые могут быть обусловлены сталкивающимися релятивистскими оболочками, возникшими во время взрыва. Все эти события вошли в реестр мирового каталога, созданного NASA.

На «Ломоносове» установлен еще один прибор для изучения гамма-всплесков — установленный на «Ломоносове», — UFFO (Ultra Fast Flash Observatory). Он представляет собой 20-сантиметровый УФ-телескоп, работающий по принципу адаптивной оптики и управляемый по триггеру от расположенной в нем широкоугольной рентгеновской камеры. Задача рентгеновского детектора — зафиксировать направление и время появления транзientа в рентгене и по этой информации направить УФ-телескоп УФФО на его источник. В настоящее время заканчивается отработка программного обеспечения по управлению этого прибора в условиях реального полета.

Наряду с астрофизическими событиями, прибор БДРГ зарегистрировал гамма-излучение от нескольких солнечных вспышек, а также множе-



Примеры УФ вспышек в атмосфере Земли со сложной пространственно-временной структурой (слева), их географическое положение (справа).



Карта событий транзientного УФ-свечения в атмосфере Земли по данным первых трех месяцев работы телескопа ТУС.

ство высыпаний магнитосферных электронов (из радиационных поясов Земли) релятивистских и субрелятивистских энергий (по тормозному рентгеновскому излучению).

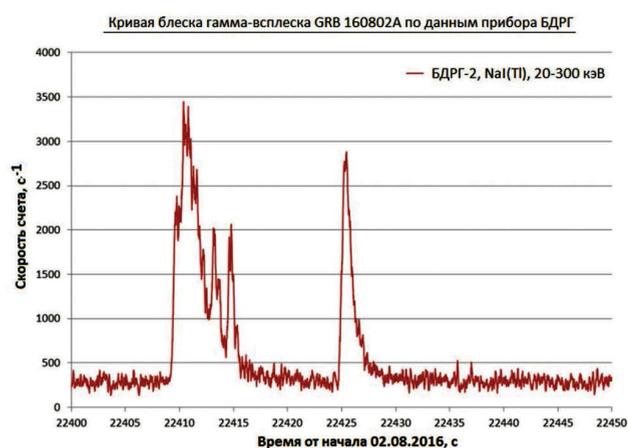
Заряженные частицы, захваченные в магнитную ловушку в околоземном пространстве (радиационные пояса), могут покидать ее (так называемый процесс их «высыпания»), в результате ряда физических процессов, природа которых недостаточно исследована.

Высыпание частиц из зоны устойчивого захвата в магнитной ловушке Земли может происходить под воздействием различных физических механизмов. Но в качестве доминирующего рассматривается взаимодействие электромагнитных волн в околоземном пространстве и заряженных частиц. Волны могут быть как техногенного (наземные радиопередатчики), так и естественного (развитие плазменных неустойчивостей) происхождения.

Высыпающиеся частицы (в основном — электроны) могут достигать релятивистских энергий и их воздействие на атмосферу путем ионизации может иметь существенные последствия для изменения ее свойств.

В связи с этим направлением исследований следует упомянуть о начале совместных экспериментов по наблюдениям высыпаний электронов из радиационных поясов Земли на «Ломоносове» и в серии аэростатных экспериментов BARREL (Ballon Array for RBSP Relativistic Electron Losses).

Международная коллаборация BARREL проводит запуск аэростатов в авроральных широтах (в настоящее время из Кируны в Швеции). Идея

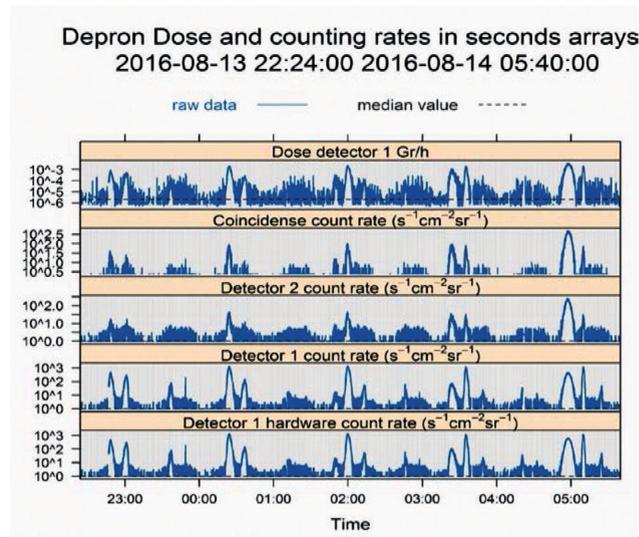


Один из гамма-всплесков, зарегистрированных на спутнике «Ломоносов».

совместных с Ломоносовым» экспериментов — в измерении характеристик высыпающих частиц одновременно на больших и малых высотах. Измерения заряженных частиц на «Ломоносове» проводятся с помощью трех приборов — БДРГ, ДЭПРОН (Дозиметр Электронов, ПРОтонов, Нейтронов) и ELFIN-L (Electron Loss and Fields INvestigator for Lomonosov), охватывающих широкий диапазон энергий частиц радиационных поясов Земли, их спектральные и угловые характеристики высоким временным разрешением — от миллисекунд и более. В ходе совместных экспериментов BARREL и «Ломоносова» уже получены уникальные данные о тонкой временной структуре потоков высыпающихся электронов, которые могут пролить свет на выяснение природы этого уникального явления в ближнем космосе.

Наряду с решением фундаментальных космофизических задач, один из «радиационных» приборов на «Ломоносове» — ДЭПРОН — обеспечивает мониторинг радиационной обстановки в околоземном космическом пространстве. Благодаря двум полупроводниковым детекторам для регистрации заряженных частиц, а также двум счетчикам медленных нейтронов, это устройство позволяет регистрировать потоки протонов, электронов и нейтронов, а также мощность поглощенной дозы радиации на траектории полета «Ломоносова». Наряду с данными других приборов по мониторингу радиационной обстановки, созданных в НИИ ядерной физики МГУ и установленных на других спутниках (низкоорбитальных — серии «Метеор» — и геостационарном «Электро»), данные «Ломоносова» является важным элементом в единой системе контроля радиационной обстановки в околоземном космическом пространстве, созданной в МГУ.

На рис. представлены примеры данных, полученных примерно за 12 часов полета. Можно видеть значительные изменения мощности дозы радиации и плотности потока частиц, обусловленные характером орбитального движения спутника в околоземном пространстве.



Еще один эксперимент, осуществляемый на борту спутника «Ломоносов», также предназначен для изучения экстремальных явлений в космосе, но из области космической биологии и физиологии. Прибор ИМИСС-1 («Институт Математических Исследований Сложных Систем») позволяет регистрировать и анализировать ускорения в условиях орбитального полета спутника.

Основные цели данного исследования связаны с так называемой «болезнью движения в условиях микрогравитации», одним из проявлений которой является запаздывание стабилизации взора человека в условиях космического полета. Борьба с описанным явлением можно путем разработки специального устройства — корректора стабилизации взора. Сигналы корректора предлагается формировать в зависимости от движения головы космонавта по показаниям инерциальных микромеханических датчиков и передавать с помощью гальванической стимуляции на первичные афферентные нейроны его вестибулярного аппарата.

В ходе эксперимента с помощью прибора ИМИСС-1 предстоит выяснить, каким образом изменяются характеристики датчиков в условиях космического полета по сравнению с данными наземных испытаний. В настоящее время идет накопление данных для проведения статистического анализа. Начавшаяся обработка информации предполагает получить данные об инструментальных ошибках микроакселерометров в орбитальном полете. Для этого будут использованы значения микроперегрузок для чувствительных масс при наличии данных об орбите и показаний штатных датчиков угловой скорости спутника.

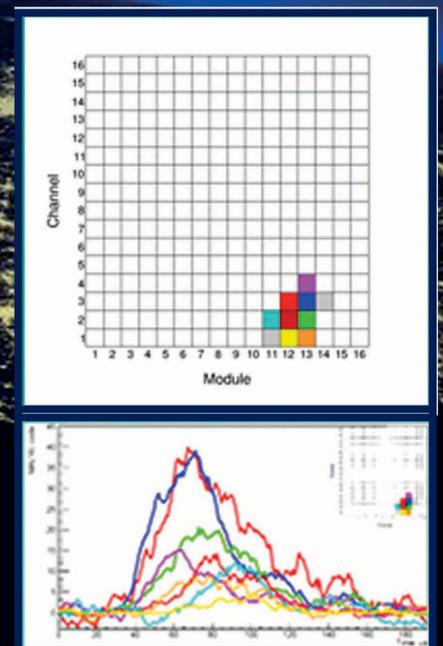
Созданный в НИИЯФ МГУ Центр обработки космических данных продолжает получение и обработку информации спутника «Ломоносов».

М. И. Панасюк  
НИИ ядерной физики им Д.В. Скобельцына,  
физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова  
panasyuk@sinp.msu.ru  
Сайт проекта: lomonosov.sinp.msu.ru

# УНИВЕРСИТЕТСКИЙ СПУТНИК «ЛОМОНОСОВ» ИЩЕТ САМЫЕ МОЩНЫЕ УСКОРИТЕЛИ ВО ВСЕЛЕННОЙ

Проект «Ломоносов» — масштабный научно-образовательный космический проект Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, направленный на изучение экстремальных астрофизических явлений. За время работы спутника сотрудники Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д.В. Скобельцына МГУ с коллегами получили новые данные о многих малоизученных физических явлениях во Вселенной и в атмосфере Земли. Результаты исследований опубликованы в таких высокорейтинговых журналах, как *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* и *Space Science Reviews*.

## LOMONOSOV



Спутник «Ломоносов» — проект МГУ имени М.В. Ломоносова — стартовал с космодрома «Восточный» в 2016 году. Основная цель спутника: исследовать космические лучи предельно высоких энергий — это частицы во Вселенной, ускоренные до самых больших значений энергии. Также ученых интересуют быстропотекающие процессы оптического, рентгеновского и гамма-диапазонов, которые происходят во Вселенной и затрагивают верхние слои атмосферы Земли. Все это — экстремальные процессы в космосе, и их исследования — актуальная проблема современной астрофизики. Помимо фундаментальных задач, спутник предназначен и для решения некоторых практических проблем. Оборудование, установленное на борту «Ломоносова» позволяет наблюдать за потенциально опасными космическими объектами: малыми небесными телами, астероидами и космическим мусором.

Космические лучи — это потоки частиц (преимущественно протонов) высоких энергий, заполняющие межзвездное пространство. Большой интерес для современной науки представляет изучение происхождения, химического состава и энергетического спектра космических лучей предельно высоких энергий (порядка 10<sup>19</sup>-10<sup>20</sup> эВ). Наземные измерения подобных лучей очень трудны из-за малого количества таких частиц — в среднем на площадке размером 1 км<sup>2</sup> появляется лишь одна частица, причем раз в сто лет. Физики МГУ впервые провели эксперименты по регистрации лучей предельных энергий в верхних слоях атмосферы Земли при помощи телескопа, установленного на борту спутника «Ломоносов». Попадая в атмосферу, космические лучи предельно высоких энергий взаимодействуют с ней и порождают широкие атмосферные ливни — каскады вторичных частиц — и, как следствие, кратковременные мощные вспышки ультрафиолетового излучения.

Орбитальный телескоп ТУС (Трековая Установка) использует атмосферу Земли в качестве гигантской мишени, в которой происходит процесс взаимодействия с космическими лучами предельно высоких энергий. ТУС регистрирует ультрафиолетовые вспышки, порожденные вторичными частицами широких атмосферных дождей, а по числу зарегистрированных фотонов этих вспышек можно будет определить энергии первичных частиц. Российские ученые находятся на этапе изучения данных, собранных орбитальным телескопом за первые месяцы работы, что в дальнейшем поможет прояснить природу и механизмы ускорения частиц предельно высоких энергий.

Кроме световых вспышек, обусловленных космическими лучами предельно высоких энергий, телескоп зарегистрировал и другие быстрые атмосферные события, проявляющиеся в ультра-

фиолетовом диапазоне. Наибольший интерес представляют транзитные световые явления — кратковременные, длительностью от одной до сотен миллисекунд, вспышки электромагнитного излучения, предположительно связанные с грозowymi областями в средних и нижних слоях атмосферы.

С одной стороны, такие события создают нежелательный фон при выполнении основной задачи телескопа — регистрации космических лучей предельно высоких энергий, а с другой, представляют собой отдельную актуальную задачу современной физики — выяснение физической природы транзитных световых явлений и их связи с атмосферным грозвым электричеством.

На космическом аппарате «Ломоносов» ученые также установили комплекс аппаратуры, состоящий из трех приборов: БДРГ, ШОК и UFFO. Комплекс предназначен для изучения гамма-всплесков. Гамма-всплески — это кратковременные возрастания потока гамма-квантов до энергий, равных, по крайней мере, 10<sup>9</sup> эВ. Во время таких всплесков выделяется примерно столько же энергии, сколько при взрыве сверхновой, но за одну секунду. Эти явления считаются одними из самых мощных во Вселенной, однако при этом они слабо изучены.

Для правильного понимания природы гамма-всплесков необходимо проводить наблюдения одновременно в оптическом и гамма-диапазонах. Однако, зарегистрировать оптическое излучение в момент явления очень трудно, поскольку заранее не известно, в какой области неба оно произойдет. Оборудование на борту космического аппарата «Ломоносов» позволяет регистрировать оптическое излучение непосредственно в момент гамма-всплесков.

Прибор БДРГ (Блок Детекторов Рентген-Гамма) представляет собой три детектора гамма-квантов, оси которых перпендикулярны друг другу. Трехмерные измерения обеспечивают определение точных координат источника всплеска. При регистрации явления БДРГ передает специальный сигнал-триггер на оптические широкоугольные камеры (ШОК). При регистрации сигнала осуществляется запоминание оптического изображения области неба, где произошел всплеск, и передача информации в мировую сеть для наведения на эту область наземных телескопов.

Еще один прибор — UFFO (Ultra Fast Flash Observatory) по специальной команде включает рентгеновский телескоп для регистрации всплеска в жестком рентгеновском диапазоне. Кроме того, UFFO быстро наводит в область локализации явления оптический телескоп. В ходе проведения экспериментов было достигнуто рекордное на сегодняшний день время наведения оптики — около одной секунды.

За период с запуска спутника до августа 2017 года «Ломоносов» зарегистрировал 20 гамма-всплесков космологического происхождения, а также гамма-всплески от магнетаров — нейтронных звезд с очень сильным магнитным полем. Данные, полученные со спутника, представляют собой уникальную информацию широкого диапазона длин волн (оптического, рентгеновского, гамма). Российские ученые утверждают, что эта информация позволит сделать большой шаг к пониманию до сих пор мало изученного явления гамма-всплесков.

«Мы осуществили коррелированные наземные и космические измерения гамма-всплеска в оптическом и гамма-диапазонах одновременно на спутнике и на наземной сети роботизированных телескопов МГУ «МАСТЕР». При современном уровне развития космических исследований наземные гамма-обсерватории очень важны для исследований в области высоких энергий, а в космических экспериментах они являются считаются существенным их дополнением», — рассказал один из авторов статьи Михаил Панасюк, доктор физико-математических наук, директор научно-исследовательского института ядерной физики имени Д.В. Скобельцына МГУ имени М.В. Ломоносова.

В ходе работ по проектированию научных приборов и бортовых систем для спутника «Ломоносов» ученые использовали самые современные достижения в области электроники, ядерно-физических методик, оптических средств мониторинга и программного обеспечения. У некоторых из этих разработок нет мировых аналогов.

«В инициативном порядке в рамках реализации проекта «Ломоносов» по программе развития МГУ специалистами МГУ создан и успешно протестирован в ходе летных испытаний космический аппарат «Ломоносов» — прообраз космического сегмента оптического мониторинга потенциально опасных объектов техногенного и природного происхождения в околоземном космическом пространстве», — добавил Михаил Панасюк.

Работу над проектом космического эксперимента «Ломоносов» выполняли специалисты, студенты и аспиранты Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д.В. Скобельцына, Государственного астрономического института имени П.К. Штернберга, Научно-исследовательского института механики, Института



математических исследований сложных систем и механико-математического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. Работа проходила в сотрудничестве с учеными из АО «Корпорация ВНИИЭМ», Объединенного института ядерных исследований, Университета Сонгюнван (Республика Корея), Калифорнийского университета в Лос-Анжелесе и из университета Пуэбла (Мексика).

Базируясь на опыте работы со спутником «Ломоносов» и на основе уже полученных результатов, ученые приступили к реализации следующего проекта под названием УНИВЕРСАТ — СОКРАТ (Система Оповещения Космической Радиационной, Астероидной и Техногенной опасности). Этот проект посвящен созданию космической группировки малых спутников для мониторинга, обнаружения и оперативного прогноза природных и техногенных космических угроз. Проект предусматривает мониторинг радиационной обстановки, электромагнитных транзиентов и потенциально опасных объектов естественного (астероиды, метеоры) и техногенного (космический мусор) происхождения. Мониторинг осуществляют в режиме, близком к реальному времени в околоземном космическом пространстве, что чрезвычайно важно для оперативного оповещения о существовании угроз как для космических аппаратов, так и для человека в космосе.

«First results from the TUS orbital detector in the extensive air shower mode». B.A. Khrenova, P.A. Klimova, M.I. Panasyuka, S.A. Sharakina, L.G. Tkachevb, M.Yu. Zotova, S.V. Biktemerovab, A.A. Botvinkod, N.P. Chirskayaa, V.E. Ereemeeva. *J. of Cosmology and Astroparticle Physics*, 2017 (2017).

«SHOK—The First Russian Wide-Field Optical Camera in Space». V.M. Lipunov, E.S. Gorbovskey, V.G. Kornilov, M.I. Panasyuk, A.M. Amelushkin, V.L. Petrov, I.V. Yashin, S.I. Svertilov, N.N. Vedenkin. *J. of Cosmology and Astroparticle Physics*, 2017 (2017).

# СОЗДАНА ОСНОВА ДЛЯ ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ГАЗОВЫХ ДАТЧИКОВ

*Сотрудники кафедры физики низких температур физического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова предложили использовать массивы пористых наноразмерных нитей кремния для высокочувствительных газовых датчиков. Такие датчики смогут определять содержание молекул токсичных и нетоксичных газов в воздухе при комнатной температуре.*

В современном мире с достаточно высоким уровнем загрязнения окружающей среды важной является разработка новых высокочувствительных сенсоров, способных точно и выборочно обнаруживать молекулы в газовой фазе. Это от-

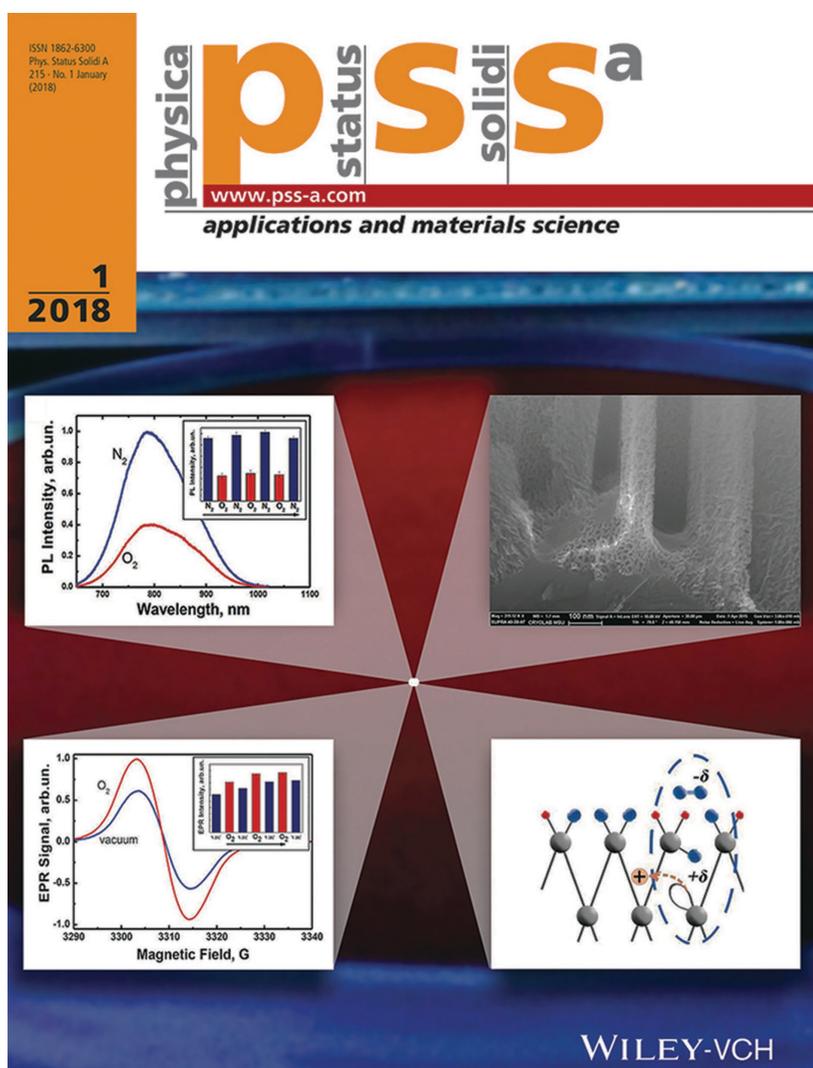
носится как к токсичным, так и к нетоксичным газам. Большинство современных газовых сенсоров работает только при высоких температурах, что накладывает ограничения на область их применения. Именно поэтому разработка высоко-

чувствительных газовых датчиков многообразного использования, работающих при комнатной температуре, считается сейчас актуальным направлением физики.

Ученые МГУ предложили использовать в качестве чувствительного элемента такого датчика массивы пористых наноразмерных нитей кремния, которые можно получить с помощью недорогого метода металл-стимулированного химического травления. Этот метод основан на селективном химическом травлении — технологии частичного удаления поверхностного слоя материала с заготовки — с использованием наночастиц металла в качестве катализатора. К тому же процедура получения образцов достаточно быстрая: за час в лабораторных условиях можно изготовить не менее ста элементов.

Каждый датчик состоит из массива упорядоченных нанонитей кремния длиной 10 микрометров

*Принцип работы сенсора на основе массивов пористых наноразмерных нитей кремния. (Иллюстрацию ученых из МГУ вынесли на обложку журнала).*



(мкм) и диаметром от 100 до 200 нанометров (нм). При этом каждая нанонить имеет пористую нанокристаллическую структуру. Размер кристаллов кремния и пор между ними варьируется от трех до пяти нанометров.

Исследования показали, что такие пористые нанонити имеют огромную удельную площадь поверхности, за счет чего их физико-химические свойства обладают высокой чувствительностью к молекулярному окружению. Авторы также обнаружили, что для полученных образцов характерна эффективная фотолюминесценция с максимумом в красной области спектра при комнатной температуре.

«Впервые мы показали, что фотолюминесценция кремниевых нанонитей тушится в атмосфере кислорода (O<sub>2</sub>), но затем восстанавливается до исходных значений в атмосфере инертного газа, азота (N<sub>2</sub>), что повторяется в нескольких циклах адсорбции-десорбции», — рассказала руководитель работы Любовь Осминкина, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник кафедры физики низких температур физического факультета МГУ.

Полученные экспериментальные результаты ученые объяснили микроскопической моделью, согласно которой чувствительность оптических свойств образцов к их молекулярному окруже-

нию определяется обратимым зарядением/разрядкой Рb-центров — дефектов типа оборванных связей кремния на поверхности нанонитей. Авторы подтвердили модель с помощью результатов измерений методом электронного парамагнитного резонанса, который помогает определить наличие и концентрацию Рb-центров.

«Важно, что полученные нами сенсоры на основе пористых нанонитей кремния не только работают при комнатных температурах, но и могут быть использованы много раз, поскольку наблюдаемые нами эффекты были полностью обратимыми», — говорит Любовь Осминкина.

Следует отметить, что созданные учеными сенсоры перспективны как для эффективного контроля степени загрязнения окружающей среды, так и для мониторинга состава воздуха в замкнутых помещениях, начиная от учебных аудиторий и заканчивая космическими станциями.

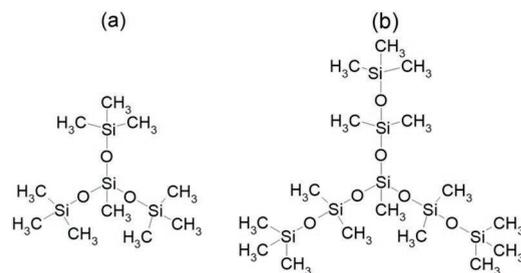
Работа поддерживалась грантом Российского научного фонда.

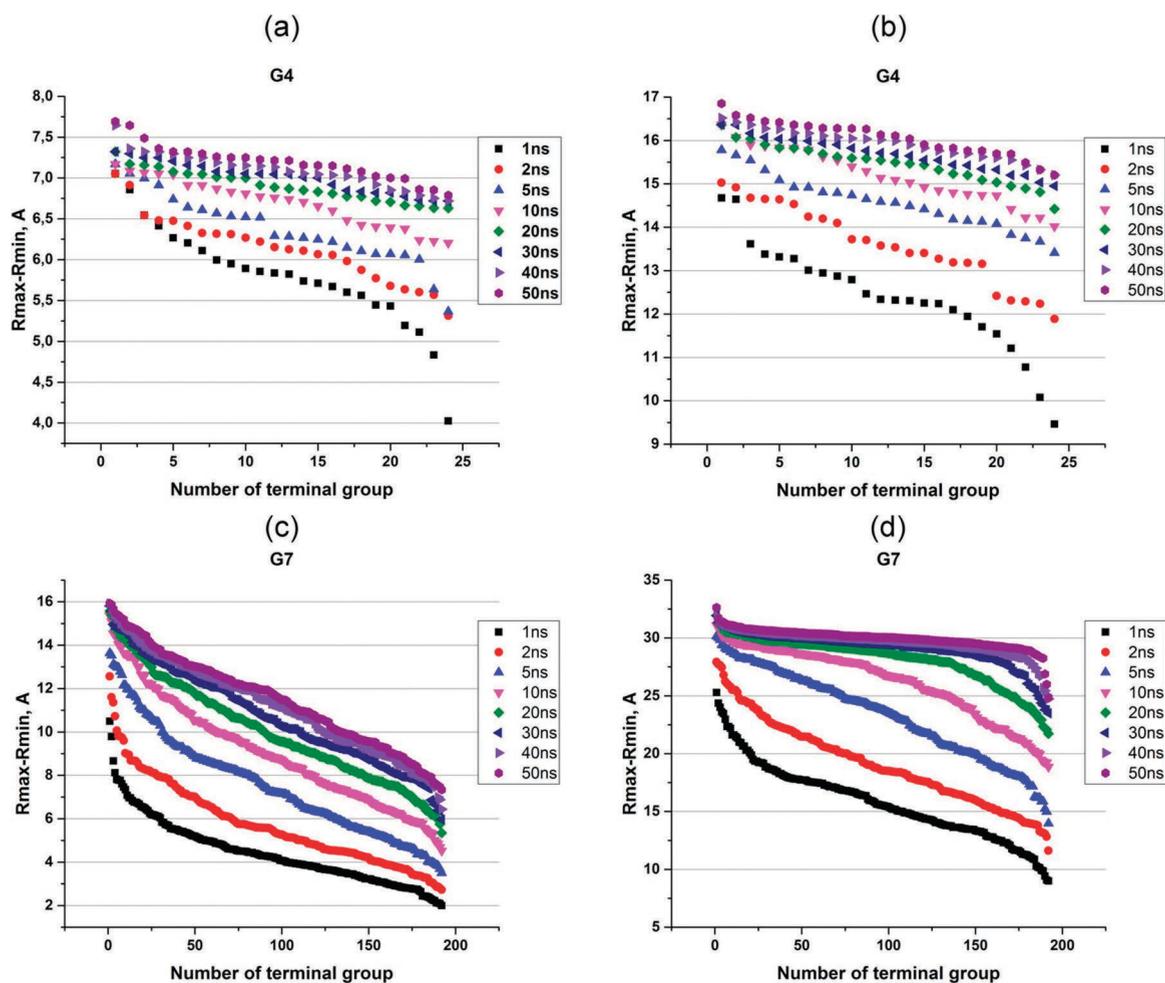
«Porous Silicon Nanowire Arrays for Reversible Optical Gas Sensing». V.A. Georgobiani, K.A. Gonchar, E.A. Zvereva, and L.A. Osminkina. *Physica Status Solidi A: Applications and Materials Science*. **215**, 1, 1700565 (2018).

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДРЕВООБРАЗНЫХ ПОЛИМЕРОВ ИЗ КРЕМНИЯ И КИСЛОРОДА

*Сотрудники кафедры физики полимеров и кристаллов физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова исследовали два типа силоксановых дендримеров — древообразных полимеров разных генераций — и определили, как строение молекул влияет на их поведение и структуру.*

Силоксановые дендримеры — это полимерные вещества, которые состоят из чередующихся атомов кремния и кислорода. Их широко применяют в медицине, фармакологии и других областях. Ученые исследовали два типа силоксановых дендримеров различных генераций для того, чтобы определить, как внутреннее строение молекул влияет на их поведение и структуру.





«Мы показали, что укладка в пространстве дендримеров больших генераций — с большим количеством разветвлений — реализуется за счет растяжения исходного центра, а не периферии. Также мы выяснили, что динамическое перемещение терминальных (концевых) групп дендримеров, которые отвечают за такие свойства молекулы как растворимость в воде, занимает на порядки больше времени, чем релаксация таких характеристик», — рассказала один из авторов статьи Елена Крамаренко, доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики полимеров и кристаллов отделения физики твердого тела физического факультета МГУ.

Ученые провели моделирование с помощью метода молекулярной динамики с использованием программного пакета PUMA и силовых потенциалов PCFF. Для расчетов авторы использовали суперкомпьютер «Ломоносов» и в дальнейшем обрабатывали вручную.

«Понимание фундаментальных законов и принципов поведения дендримеров является одной из первостепенных задач теоретической полимерной физики, в особенности в контексте уникальности их поведения, например, беспрецедентного скачка вязкости расплавов при переходе от малых генераций к большим. Эта работа характеризует дендримеры в разбавленных растворах и является хорошим фундаментом для дальнейшего изучения расплавов», — заключила Елена Крамаренко.

“Molecular dynamics simulations of single siloxane dendrimers: Molecular structure and intramolecular mobility of terminal groups”. A.O. Kurbatov, N.K. Balabaev, M.A. Mazo, E.Yu. Kramarenko. *The Journal of Chemical Physics*. **148**(1), 014902 (2018).

# УТОЧНЕН КВАНТОВЫЙ ПРЕДЕЛ ГРАВИТАЦИИ

*Профессор кафедры квантовой теории и физики высоких энергий физического факультета МГУ, ведущий научный сотрудник Государственного астрономического института имени П.К. Штернберга (ГАИШ) МГУ имени М.В. Ломоносова С. Алексеев с коллегами уточнил масштаб нелокальности в квантовом пределе общей теории относительности с помощью*

*экспериментальных исследований на Большом адронном коллайдере. Исследование позволяет приблизиться к созданию «теории всего».*



Общая теория относительности (ОТО) — самая успешная теория гравитации, существующая на данный момент. Она была сформулирована еще в начале XX века и хорошо подтверждается экспериментально. Например, без ее учета современные системы глобального позиционирования (GPS) не смогли бы достигнуть существующей точности. Одна из задач ОТО на сегодняшний день — построение теории квантовой гравитации, то есть объединение гравитационного взаимодействия и квантовой механики в областях, где гравитация сильна. Это позволит создать «теорию всего», объединить в одной теории все известные фундаментальные взаимодействия (гравитационное, электромагнитное, сильное и слабое).

Основная трудность заключается в том, что две физические теории, которые она пытается связать воедино (квантовая механика и ОТО) опираются на разные наборы принципов. Квантовая механика описывает физические явления в микроскопических масштабах, например, свойства и поведение атомов, ионов, молекул и других систем с электронно-ядерным строением, в макроскопических масштабах она переходит в классическую механику. В отличие от теории относительности, она рассматривает эволюцию физических систем во времени на фоне внешнего пространства-времени. В ОТО же пространство-время само является динамической системой.

«Мы пытаемся создать еще один мост между физикой высоких энергий и современными теориями гравитации. Обнаруженные в создающейся теории квантовой гравитации новые эффекты мы применяем для расчета возможных нетривиальных эффектов, регистрация которых возможна на Большом адронном коллайдере (БАК)», — расска-

зал ведущий научный сотрудник ГАИШ МГУ, профессор кафедры квантовой теории и физики высоких энергий физического факультета МГУ, доктор физико-математических наук Станислав Алексеев.

Ученые применили новый подход, используя опыт по взаимодействию частиц на БАК для расчетов своей модели. Синтез гравитации и физики высоких энергий позволил получить данные из значительно лучше изученной области: величины, относящиеся к гравитации, измеренные на БАК, вставляли в расчеты в виде дополнительных поправок. С их помощью ученые вывели ограничения на гравитационные параметры и предсказали появление так называемых «эффектов нелокальности» и их допустимый масштаб. Эти эффекты проявляются в квантовой механике, где принцип локальности, предсказывающий, что физическое состояние объекта нельзя изменить, не вступая с ним в непосредственный контакт, может нарушаться. Такой подход позволяет получать новую информацию о природе и структуре гравитационного взаимодействия.

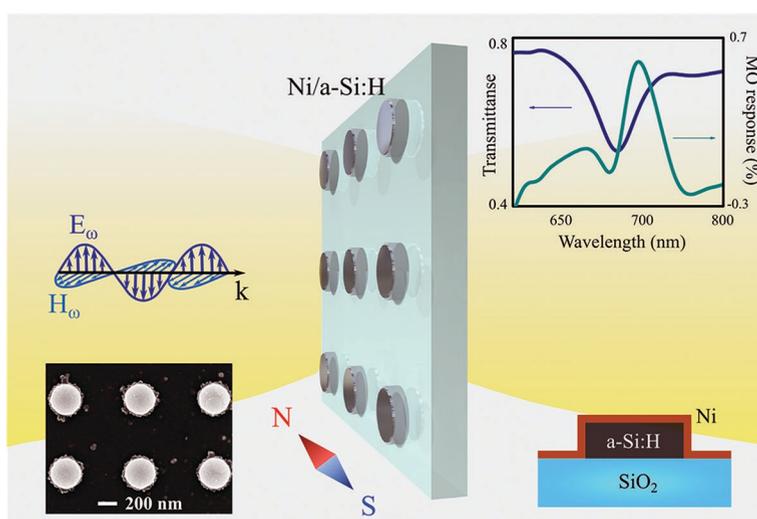
«Мы планируем продолжить совместную работу для учета более широкого класса моделей гравитации и поиска их проявлений в физике высоких энергий», — поделился ученый.

Исследования проводились совместно с коллегами из Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ, г. Дубна), Университета Сассекса (Англия) и Института теоретической физики Майнца (Университет им. Йоханнеса Гутенберга, Германия).

«Gravity induced non-local effects in the standard model». S.O. Alexeyev, X. Calmet, B.N. Latosh. *Physics Letters B*. 776, 10, 111–114 (2018).

# НАНОМАТЕРИАЛ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ СВЕТОМ

*На кафедре квантовой электроники совместно с австралийскими коллегами разработали новые композитные материалы и изучили их магнитооптические свойства. Благодаря уникальному составу материала ученые могут найти новые возможности в управлении фотонными устройствами.*



Фотонные устройства — это аналоги электронных устройств, в которых вместо электронов используются кванты электромагнитного поля — фотоны. Для эффективного (энергетически более выгодного) управления такими устройствами ученым нужны метаматериалы, которые обладают магнитными свойствами и малыми резистивными потерями. Метаматериалы — это композитные материалы, которые обладают уникальными свойствами не за счет свойств составляющих его элементов, а благодаря искусственно созданной периодической структуре.

«Работа посвящена изучению магнитооптических эффектов в метаматериалах, совмещающих в себе свойства полностью диэлектрических структур с особенностями магнитных сред и дающих благодаря этим свойствам новые возможности и преимущество в управлении светом. Изучаемый эффект интенсивностный: он проявляется в изменении интенсивности электромагнитного излучения, прошедшего через исследуемый образец при наличии внешнего магнитного поля», — рассказали авторы статьи Александр Шорохов и Александр Мусорин, научные сотрудники кафедры квантовой электроники отдела радиофизики физического факультета МГУ.

Разработанный материал — это субмикронная метаповерхность, которая представляет собой массив кремниевых нанодисков с магнитными дипольными резонансами, покрытыми тонкой пленкой никеля и расположенными на прозрачной подложке из диоксида кремния. Возможность управлять светом на наномасштабах с помощью таких систем

обусловлена сильной локализацией в них электромагнитного поля. Разработанная метаповерхность увеличивает эффективность управления светом с помощью внешнего магнитного поля. Ученые отмечают, что управление откликом таких объектов с помощью внешнего магнитного поля более выгодно, чем управление с помощью электрического поля, потому что нет потерь на нагрев, которые вызваны электрическим током.

Используя накопленный опыт, авторы придумали идею, проверили ее при помощи численных расчетов и оптимизировали параметры. После этого один из соавторов изготовил в Австралии образец методами плазмохимического осаждения и электронно-лучевой литографии. Далее

на оборудовании МГУ ученые провели экспериментальные исследования, которые подтвердили эффекты, обнаруженные в ходе численного расчета.

Полученные результаты являются основой для активных невязимых фотонных наноструктур и метаповерхностей. Активные структуры — это объекты, оптические свойства которых можно изменять под внешним воздействием. В невязимых материалах проходящий среду световой луч удваивает эффект, а не отменяет накопленный.

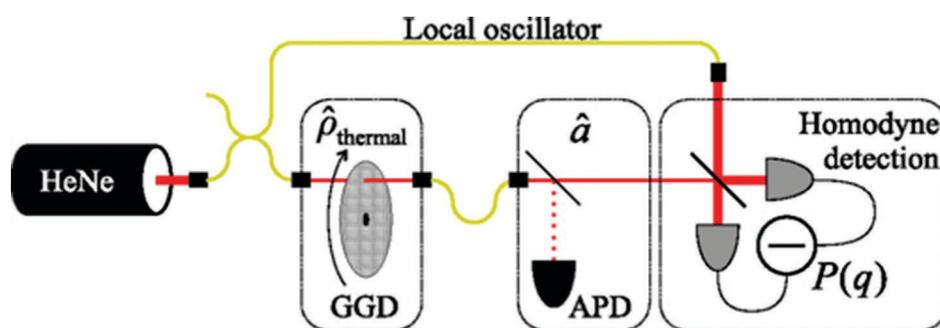
«Полученные в рамках данной работы результаты позволят создать компактные оптические устройства и интегрировать их на фотонном чипе с последующим применением в будущих оптических микросхемах и в адаптивной оптике. Усиление магнитооптического отклика в предложенных структурах может быть использовано при создании магнитооптических модуляторов и изоляторов», — добавили ученые.

Результаты данной работы также можно использовать для активных устройств плоской оптики и высокочувствительных сенсоров на их основе. Это легкие и тонкие аналоги таких объемных оптических элементов, как линзы, фазовые маски, поляризаторы.

«Magneto-Optical Response Enhanced by Mie Resonances in Nanoantennas». Barsukova M.G., Shorokhov A.S., Musorin A.I., Neshev D.N., Kivshar Yu.S., Fedyanin A.A. *ACS Photonics*, 4, 2390–2395 (2018).

# ВПЕРВЫЕ ПОЛУЧЕНЫ И С ВЫСОКОЙ ТОЧНОСТЬЮ ИЗМЕРЕНЫ ТЕПЛОВЫЕ СОСТОЯНИЯ СВЕТА С ОТЩЕПЛЕНИЕМ 10 ФОТОНОВ

*В лаборатории квантовых оптических технологий группа ученых с физического факультета МГУ и Физико-технологического института РАН разработала действующую установку, позволяющую в разы увеличить чувствительность интерферометров со слабыми тепловыми полями. Исследование расширяет возможности по управлению светом на квантовом уровне.*



Группа ученых из физического факультета МГУ и Физико-технологического института РАН разработала действующую установку, позволяющую в разы увеличить чувствительность интерферометров со слабыми тепловыми полями. Результаты работы опубликованы в журнале *Physical Review A*. Исследование расширяет возможности по управлению светом на квантовом уровне.

Операторы рождения и уничтожения фотонов – это базовые операторы квантовой физики и их экспериментальная реализация представляет как фундаментальный, так и практический интерес. С их помощью, на пример, можно увеличить перепутанность световых полей, а также усилить их без добавления шума. Последнее свойство применимо даже к классическим тепловым полям, поэтому многократное отщепление фотонов позволяет в несколько раз повысить чувствительность интерференционных схем.

«Основная цель работы – разработать простой для реализации метод отщепления достаточно большого заданного числа фотонов», – рассказал один из авторов исследования Константин Катамадзе, старший научный сотрудник кафедры квантовой электроники физического факультета МГУ.

Для создания устройства ученые использовали обычный гелий-неоновый лазер, вращающийся матовый диск, модулирующий случайным об-

разом амплитуду и фазу лазерного излучения, чтобы превратить его в тепловое, а также светоделитель с однофотонным детектором, расположенным в отраженном канале, сигналы с которого определяют количество отщепленных фотонов.

«Ключевая особенность эксперимента состоит в том, что мы подобрали временные параметры теплового излучения таким образом, чтобы один детектор мог последовательно зафиксировать несколько фотонов, отщепленных от одного и того же квантового состояния света», – пояснил ученый.

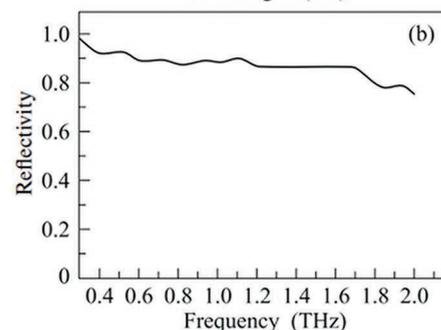
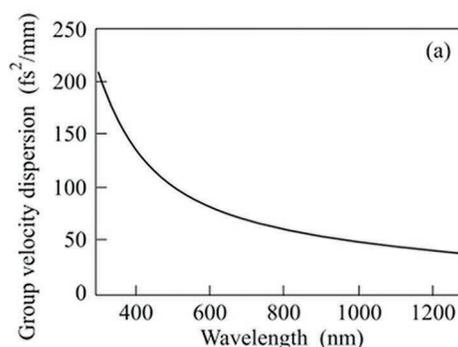
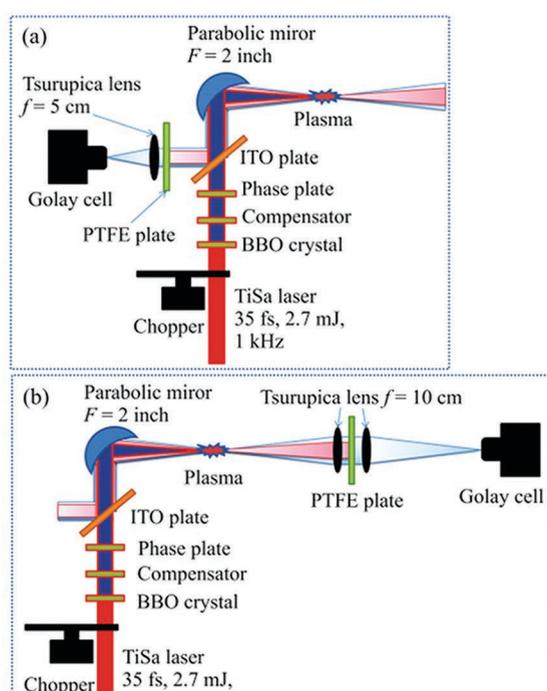
Также необходимо отметить, что специально для этой задачи коллегами из ФТИАН РАН был разработан метод статистической обработки экспериментальных данных, который позволил восстановить приготовленные квантовые состояния с рекордной точностью.

Разработанный метод может быть в дальнейшем использован для отщепления и добавления фотонов к неклассическим состояниям света, что безусловно найдет применение в задачах квантовой информации и квантовой метрологии.

«Multiphoton subtracted thermal states: Description, preparation, and reconstruction». Yu.I. Bogdanov, K.G. Katamadze, G.V. Avosopiants, L.V. Belinsky, N.A. Bogdanova, A.A. Kalinkin, and S.P. Kulik. *Phys. Rev. A*. **96**, 6 (2017).

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО ПОДТВЕРЖДЕНО ОБРАТНОЕ ТЕРАГЕРЦЕВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

*Сотрудники кафедры общей физики и волновых процессов физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова совместно с российскими и зарубежными коллегами впервые экспериментально наблюдали обратное терагерцевое электромагнитное излучение (с длиной волны порядка 1 мм). Ранее ученые лишь теоретически предсказывали существование обратного излучения.*



Мощное лазерное излучение сверхкоротких импульсов — фемтосекундное излучение — широко используют в качестве источника терагерцевого излучения, однако ранее наблюдалось лишь прямое излучение (то есть направленное в ту же сторону, что и луч лазера). Существование обратного излучения предсказывалось теоретически, но ни разу не было подтверждено экспериментально. Авторы впервые смогли экспериментально наблюдать терагерцевое излучение, направленное в сторону, обратную лучу лазера.

«Основной вывод состоит в том, что при жестком режиме фокусировки фемтосекундного лазера существует часть излучения, распространяющегося в обратном направлении относительно падающего оптического излучения накачки, которая нами была впервые зарегистрирована», — рассказал Александр Ушаков, один из авторов работы, аспирант кафедры общей физики и волновых процессов физического факультета МГУ.

Ученые исследовали задачу как экспериментально, так и теоретически. Для вычисления доли обратного излучения исследователи создали компьютерную модель, воссоздающую условия эксперимента. Результаты с высокой точностью сошлись с экспериментальными данными: доля обратного излучения составляет около 4%.

Ученые считают, что их работа позволит более глубоко изучить лазерные источники терагерцевого излучения для различных прикладных и фундаментальных исследований. Анализ обратного излучения сможет помочь более эффективно управлять прямым терагерцевым излучением.

«Ценность работы заключается в том, что полученная информация об обратном терагерцевом излучении позволяет сделать выводы об излучении, распространяющемся в прямом направлении, и, таким образом, проводить постоянный контроль основных характеристик терагерцевого излучения, используемого для различных фун-

даментальных и прикладных задач», — добавил Александр Ушаков.

В работе принимали участие ученые из Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Международного учебно-научного лазерного центра МГУ, Университет Токио (Япония), Института физико-химических исследований RIKEN (Япония) и Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ».

“Backward Terahertz Radiation from a Two-Color Femtosecond Laser Filament”. A.A. Ushakov, M. Matoba, N. Nemoto, N. Kanda, K. Konishi, P.A. Chizhov, N.A. Panov, D.E. Shipilo, V.V. Bukin, M. Kuwata-Gonokami, J. Yumoto, O.G. Kosareva, S.V. Garnov, A.B. Savel'ev. JETP Letters, **106** (11) 706–708. (2017).

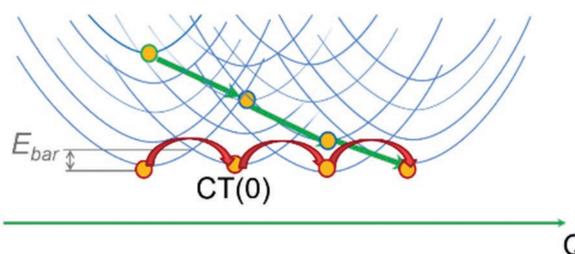
## МОДЕЛЬ ОРГАНИЧЕСКОЙ СОЛНЕЧНОЙ БАТАРЕИ

*Сотрудники кафедры общей физики и волновых процессов физического факультета и Международного лазерного центра МГУ имени М.В. Ломоносова разработали аналитическую модель органической солнечной батареи и с ее помощью определили характеристики наиболее эффективных материалов.*

В солнечных батареях для преобразования энергии используют в основном неорганические элементы. Наиболее распространены кремниевые ячейки (их фотоэлементы состоят из кристаллического или аморфного кремния) и арсенид галлия. Они показывают высокую эффективность, но слишком дороги и сложны в изготовлении. Органические солнечные элементы дешевле и удобны в использовании: в них для сбора солнечной энергии применяют полимеры, что позволяет производить пленки-фотоэлементы в виде больших пластиковых листов, практически на принтере.

Однако они встречаются гораздо реже, так как их эффективность значительно ниже, чем у неорганических солнечных элементов, несмотря на большой прогресс за последнее десятилетие. Их основной недостаток — низкий коэффициент преобразования световой энергии в электрическую. Достигнут ли предел эффективности органической фотовольтаики, или возможны новые пути развития? Для решения этого вопроса ученые создали аналитическую модель органической солнечной батареи, решив систему кинетических уравнений.

«Наша «горячая» кинетическая модель учитывает результаты последних экспериментальных исследований фотофизики органических полупроводников, в частности участия неравновесных (горячих) состояний в разделении зарядов», — рассказал один из авторов исследования, профессор кафедры общей физики и волновых процессов физического факультета МГУ, старший научный сотрудник Международного учебно-научного лазерного центра МГУ, доктор физико-математических наук Дмитрий Парашук.



С помощью «горячей» кинетической модели ученые сформулировали критерии материалов, наиболее подходящих для использования в органической фотовольтаике. Они оценили влияние различных параметров материала (движущую силу разделения заряда, диэлектрическую проницаемость, подвижность зарядов и другие) на характеристики органических солнечных батарей и предложили наиболее перспективные пути увеличения их эффективности.

Также в последние годы активно исследуется новая форма фотоэлектрических преобразователей — органо-неорганические материалы. Хорошую эффективность показали вещества со структурой минерала перовскита. Поэтому важной задачей науки является поиск материалов, пригодных для синтеза перовскитных структур.

«Органическая и гибридная (в том числе, перовскитная) фотовольтаика нуждается в новых эффективных материалах. Предложенная модель позволяет сделать поиск таких материалов более целенаправленным и найти наиболее перспективные материалы», — прокомментировал ученый.

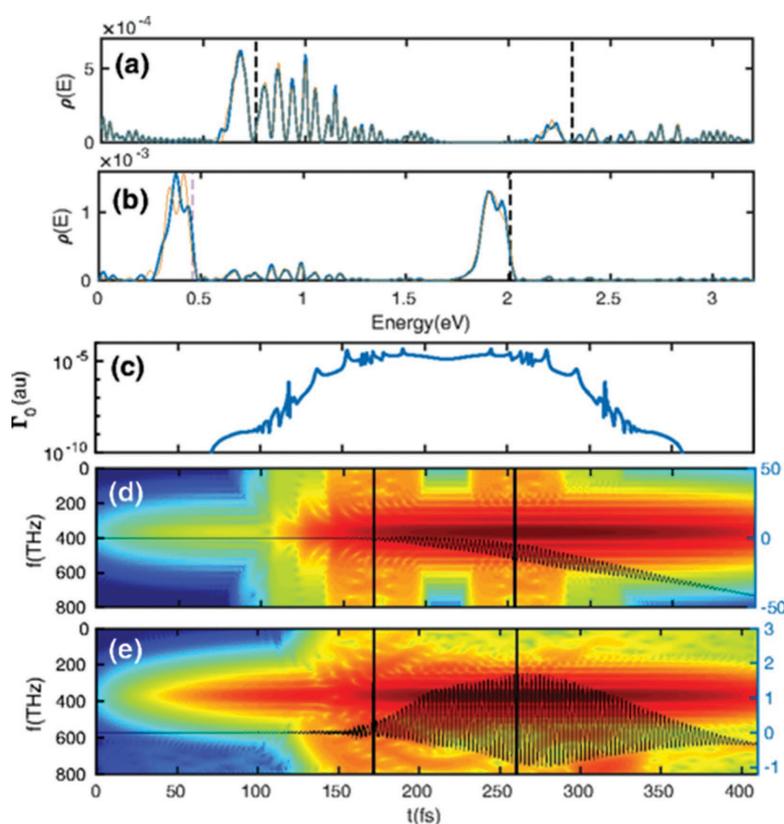
“Hot kinetic model as a guide to improve organic photovoltaic materials.” A.Yu. Sosorev, D.Yu. Godovsky and D.Yu. Parashuk. Phys. Chem. Chem. Phys., **20**, 3658–3671 (2018).

# ОБНАРУЖЕН НОВЫЙ МЕХАНИЗМ НАРУШЕНИЯ СИММЕТРИИ ПРИ ИОНИЗАЦИИ АТОМА

Сотрудникам кафедры общей физики и волновых процессов физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова вместе с немецкими коллегами удалось добиться асимметричного выхода электронов в процессе ионизации атома под действием сильного лазерного излучения. Вследствие этого было получено излучение в широком диапазоне частот с необычными спектральными характеристиками. Результаты их работы были опубликованы в журнале *Physical Review Letters*.



Проф. А. Савельев-Трофимов



Ионизация атомов — это процесс отрыва электронов с внешней оболочки атома, который может происходить под действием внешнего электромагнитного поля. В ходе работы ученые обнаружили неизвестный ранее механизм нарушения симметрии при ионизации — средний ток электронов, полученных в ходе этого процесса, не был одинаковым в двух противоположных направлениях в плоскости поляризации возбуждающего элек-

тромагнитного излучения. Физики также выяснили, что такой пространственно-несимметричный ток — это источник ультракоротких импульсов низкочастотного излучения в терагерцевой области и поэтому важен для применений в терагерцевой оптике. Терагерцевое излучение — это электромагнитное излучение, спектр частот которого находится между инфракрасным и сверхвысокочастотным диапазонами.

«Механизм нарушения симметрии основан на тонком взаимодействии резонансов Фримана и быстрых колебаний внешнего лазерного поля. Резонансы Фримана возникают как всплески вероятности ионизации при определенных интенсивностях возбуждающего поля. В ионизирующем лазерном импульсе интенсивность поля достигает своего пика не мгновенно — она может проходить за время импульса один или несколько резонансов Фримана. Когда это происходит, формируется пик ионизации, которых может оказаться даже короче, чем период колебаний лазерного излучения», — рассказал один из авторов статьи Андрей Савельев-Трофимов, доктор физико-математических наук, профессор кафедры общей физики и волновых процессов физического факультета МГУ.

Ионизированные электроны находятся под действием «квазистационарного» поля, которое придает им ускорение в определенную сторону. В результате по скорости электронов можно получить информацию о параметрах поля в момент прохождения резонанса Фримана. Более того, поскольку таких резонансов может быть более одного, в результате формируется несколько потоков электронов. Взаимодействие излучения от них приводит к формированию спектра в виде множества узких полос (частотной гребенки) в области от терагерцевого до видимого диапазонов. Ученые отмечают, что расстояние между отдельными зуб-

цами можно настраивать изменением параметров импульса.

«Полученные результаты могут иметь приложения для генерации терагерцевого излучения, частотных гребенок и для исследования динамики электронов в процессе взаимодействия с сильным излучением», — заключил ученый.

“Symmetry Breaking and Strong Persistent Plasma Currents via Resonant Destabilization of Atoms”. Br’ee C., Hofmann M., Demircan A., Morgner U., Kosareva O., Savel’ev A., Husakou A., Ivanov M., Babushkin I. *Physical Review Letters*, **119** (24), 243202 (2017).

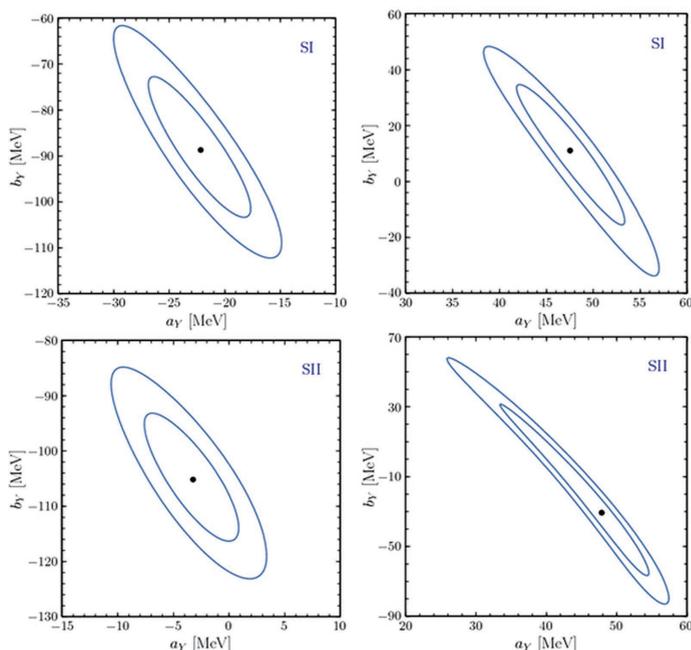
## ПРЕДСКАЗАНО СУЩЕСТВОВАНИЕ НОВЫХ ТЕТРАКВАРКОВ

*Сотрудник кафедры теоретической физики физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова вместе с иностранными коллегами открыл и описал тетракварки, состоящие из двух кварков и двух антикварков.*

При столкновении электронов и позитронов высоких энергий рождаются различные сильновзаимодействующие частицы — адроны. Они делятся на две группы: мезоны и барионы. Обычные мезоны представляют собой связанные состояния кварка и антикварка, а барионы — 3-кварковые состояния. Однако могут существовать и так называемые экзотические состояния, содержащие большее число кварков и антикварков.

«Мы проанализировали данные нескольких недавних экспериментов на электрон-позитронных коллайдерах Belle, BaBar и BES III, в которых были открыты тетракварки  $Y$ , образующие семейство из четырех частиц, каждая из которых состоит из двух кварков и двух антикварков. Мы описали их свойства на основе нашей модели и предсказали существование новых тетракварков», — рассказал один из авторов статьи Анатолий Борисов, доктор физико-математических наук, профессор кафедры теоретической физики отделения экспериментальной и теоретической физики физического факультета МГУ.

Физики описали свойства тетракварков с помощью модели и предсказали существование большого числа новых тетракварковых состояний указанием их масс и квантовых чисел. Для описания тетракварков ученые использовали дикуарковую модель, согласно которой тетракварк — это связанное состояние дикуарка (эта частица состоит из двух кварков) и антидикуарка (состоящего из двух антикварков). Авторы отмечают, что это позволило чрезвычайно сложную проблему четырех частиц свести к сравнительно простой и хорошо изученной проблеме двух частиц.

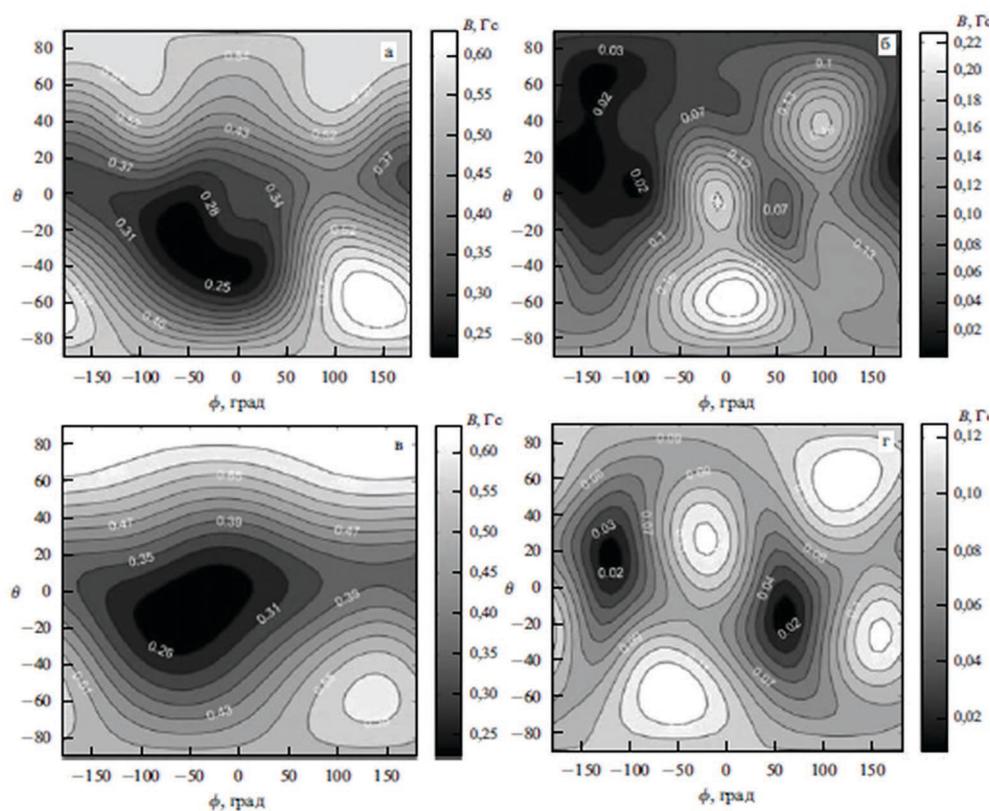


«Если мы экспериментально обнаружим предсказанные в нашей работе новые частицы, то это послужит доказательством правильности дикуарковой модели и расширит возможности ее дальнейшего использования в адронной спектроскопии», — заключил ученый.

«A new look at the  $Y$  tetraquarks and  $W_c$  baryons in the diquark model». Ali Ahmed, Maiani L., Borisov A.V., Ahmed Ishtiaq, Jamil Aslam M., Parkhomenko A.Ya., Polosa A.D., Rehman Abdur. *European Physical Journal C*, **78**, 29-1–29-13 (2018).

# ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ ПОТОКОВ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

Сотрудники кафедры математики физического факультета и Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д.В. Скобельцына МГУ имени М.В. Ломоносова вместе с коллегами из ИКИ РАН и ИФЗ РАН проследили за тем, как могут измениться потоки галактических и солнечных космических лучей в околоземном пространстве и на поверхности Земли в результате инверсии земного магнитного поля.



станции», — рассказал один из авторов статьи Виктор Попов, доктор физико-математических наук профессор кафедры математики отделения прикладной математики физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова.

Ученые оценили масштаб времени, когда наиболее сильная компонента магнитного поля Земли обратится в ноль и предложили сценарий инверсии. Авторы создали численную модель, которая позволяет оценить и провести сравнение потоков галактических и солнечных космических лучей в магнитосфере Земли, а также на ее поверхности в определенные промежутки времени.

Глобальное магнитное поле Земли с момента своего формирования подвержено непрерывным изменениям, которые происходят на различных масштабах времени. Палеоданные показывают, что сравнительно длительные периоды эволюционных изменений сменяются быстрыми инверсиями — глобальными сменами направления магнитного поля на противоположное. Согласно длительным наземным и космическим наблюдениям, современное магнитное поле Земли ослабевает, а магнитные полюсы смещаются, что значит, что процесс инверсии уже начался.

«Мы разработали модель взаимодействия потоков галактических и солнечных космических лучей с магнитосферой Земли в процессе предполагаемой инверсии земного магнитного поля и оценили степень радиационной опасности для людей на Земле и на высоте ~400 км, которая соответствует орбите Международной космической

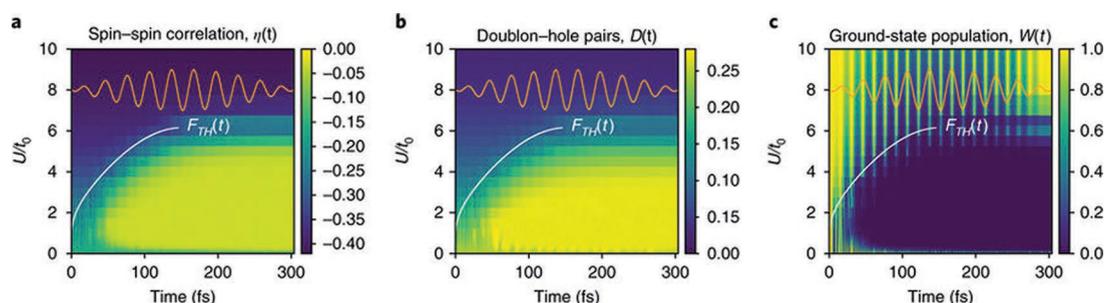
«Мы показали, во сколько раз в максимально неблагоприятный для человечества период инверсии, когда магнитное поле Земли достигнет минимума, возрастет поток галактических и солнечных космических лучей на Земле и в околоземном пространстве», — заключил ученый.

Работа проходила в сотрудничестве с учеными из Института космических исследований РАН, Института физики земли РАН и из Высшей школы экономики.

«What expects humankind during the inversion of the Earth's magnetic field: threats imagined and real». Tsareva O.O., Zelenyi L.M., Malova H.V., Podlozko M.V., Popova E.P., Popov V.Yu. Phys. Usp. 61 (2) (2018).

# ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРЕВРАЩЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИКА В ПРОВОДНИК

*Сотрудники кафедры квантовой электроники физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова совместно с российскими и немецкими коллегами исследовали изменение поведения электронов в одном из видов диэлектриков и с высоким временным разрешением и проследили за превращением материала в проводник под действием ультракоротких импульсов лазера. Использованный метод можно применять для изучения процессов, протекающих с высокой скоростью.*



Авторы статьи рассматривали моттовский диэлектрик, свойства которого связаны с сильным взаимодействием электронов. Необходимость учитывать это взаимодействие и затрудняла ранее изучение процессов в моттовских диэлектриках. В этой работе для его исследования физики использовали метод спектроскопии высоких гармоник. Он заключается в том, что на материал направляют очень короткие, в масштабах десятков или сотен фемтосекунд (квадриллионных долей секунды), импульсы лазера с заданными характеристиками. При отражении луча от материала эти характеристики изменяются, в том числе часть фотонов приобретает в десятки раз большую энергию и частоту колебаний, чем фотоны исходного импульса (это и называется генерацией оптических гармоник). По изменению характеристик луча можно судить о свойствах материала.

«Эксперименты начались около 20 лет назад, и тогда в основном изучали, как свет воздействует на молекулы или атомы. Последние лет пять экспериментаторы начали переключаться на твердое тело, на кристаллы. Известно, что в кристаллах важны эффекты, связанные с тем, что множество электронов взаимодействуют друг с другом. Однако в описании генерации высоких гармоник от твердого тела до сих пор о таких многочастичных эффектах речи не шло. Наша теоретическая статья — это первая попытка исследования того, как многочастичная физика будет себя проявлять при генерации сверхвысоких оптических гармоник», — рассказал один из авторов статьи, профессор физического факультета МГУ Алексей Рубцов.

Физики исследовали изменения свойств моттовского диэлектрика под действием лазерных им-

пульсов. Его диэлектрическое состояние возникает благодаря тому, что энергия взаимодействия электронов (отталкивания друг от друга отрицательно заряженных частиц) выше их средней кинетической энергии. В результате электроны не могут свободно передвигаться внутри материала, и он не проводит электрический ток.

При попадании луча на поверхность моттовского диэлектрика многочастичное состояние электронов перестраивается под действием сильного переменного поля. Кинетическая энергия электронов возрастает, материал теряет свойства диэлектрика. Этот процесс и удалось исследовать с помощью спектроскопии высоких гармоник.

Продолжение исследования, по мнению авторов работы, зависит от достижений ученых-экспериментаторов. «Как только они увидят что-нибудь похожее, будет ясно, куда двигаться дальше, в первую очередь, в описании конкретных результатов экспериментов», — добавил Алексей Рубцов.

Исследование проводилось совместно с учеными из Института нелинейной оптики и спектроскопии имени Макса Борна, Российского квантового центра, Московского физико-технического института, Берлинского технического университета, Королевского колледжа в Лондоне и Берлинского университета имени Гумбольдта.

«High-harmonic spectroscopy of ultrafast many-body dynamics in strongly correlated systems». R. E. F. Silva, I.V. Blinov, A.N. Rubtsov, O. Smirnova, M. Ivanov. *Nature Photonics* **12**, 266–270 (2018)

# НАНОПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ СВЕТА

*Ученые кафедры квантовой электроники физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова создали компактные преобразователи частоты светового излучения. Разработанная технология будет использоваться в области нанофотоники (область физики, изучающая взаимодействие света с наноразмерными объектами).*



«Нашей основной задачей была разработка новых типов компактных преобразователей частоты оптического излучения. В настоящее время для этого используются объемные кристаллы из специальных материалов. Размер этих кристаллов колеблется от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров. Это неприемлемо для использования их в нанофотонике», — рассказывает Борис Афиногенов, автор исследования, научный сотрудник кафедры квантовой электроники физического факультета МГУ.

В качестве основы для создания преобразователей ученые использовали фотонные кристаллы. Это многослойные кристаллические структуры с толщиной слоев около 100 нанометров, обладающие диэлектрическими свойствами. У таких кристаллов есть фотонная запрещенная зона — диапазон длин волн, которые полностью отражаются от образца.

Для создания преобразователей исследователи покрыли фотонный кристалл пленкой металла толщиной около 30 нанометров. Благодаря этому, ученые добились того, что свет в запрещенной зоне кристалла начал не отражаться, а наоборот, концентрироваться. Из-за такой концентрации

светового излучения в кристалле начинают генерироваться так называемые гармоники — волны с частотой, превышающей изначальную в два (для второй гармоники), три (для третьей гармоники) и более раз. Таким образом можно изменять частоту входящего излучения. Это свойство созданных систем на основе фотонных кристаллов и было использовано учеными для разработки наноразмерных преобразователей оптического излучения.

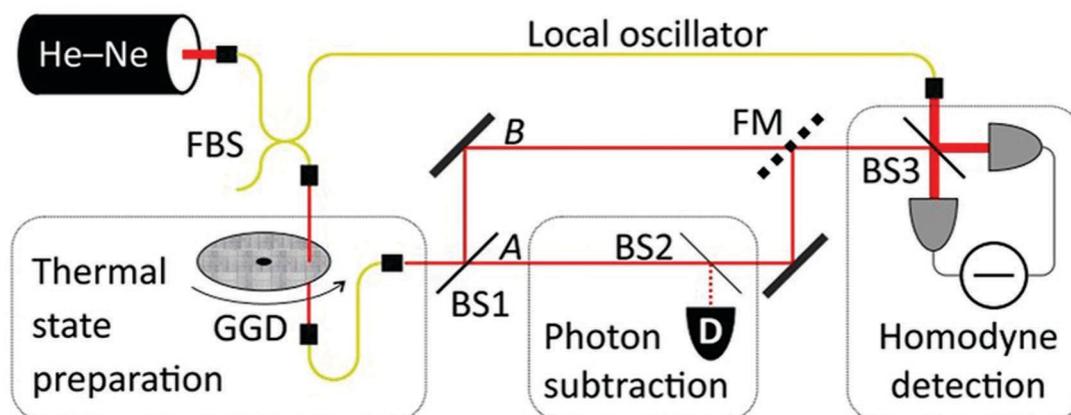
«Поскольку использованный нами метод крайне чувствителен к геометрии образца, он может быть применен для создания сенсоров наночастиц и биологических объектов с исключительно низким уровнем фонового сигнала», — комментирует Андрей Федянин, профессор, руководитель лаборатории нанооптики и метаматериалов МГУ.

Работа была выполнена в рамках мегагранта Министерства образования и науки «Нелинейная и экстремальная нанофотоника».

“Phase matching with Tamm plasmons for enhanced second- and third-harmonic generation”. B.I. Afanogenov, A.A. Popkova, V.O. Bessonov, B. Lukyanchuk, and A.A. Fedyanin. *Phys. Rev. B* **97**, 115438 (2018).

# НА КАФЕДРЕ КВАНТОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ ПРОДЕМОНСТРИРОВАНА РАБОТА «КВАНТОВОГО ВАМПИРА» ДЛЯ КЛАССИЧЕСКИХ ТЕПЛОВЫХ СОСТОЯНИЙ СВЕТА

*Недавно был предложен новый квантовый эффект, получивший название «квантового вампира». Ученые физического факультета МГУ теоретически и экспериментально показали, что эффект может работать для классических тепловых состояний света, и продемонстрировали, что эффект основан не на квантовой перепутанности, а на классических корреляциях.*



Эффект «квантового вампира» состоит в том, что если некоторое состояние света разделено по нескольким каналам или модам, то отщепление фотона в одной из мод приводит к тому, что фотон исчезает одновременно во всех модах, даже в тех, которые не подвергались действию оператора уничтожения фотона. Например, если фотон отщепляется лишь из центра широкого пучка света, то энергия проседает одновременно во всем пучке, что можно интерпретировать, как отсутствие тени (отсюда и название эффекта).

«При первой демонстрации этого эффекта использовались неклассические состояния света, и его авторы описывали эффект в терминах квантовой перепутанности и нелокальности. Наша группа теоретически и экспериментально показала, что этот эффект может также работать и для классических тепловых состояний света. Это показывает, что эффект основан не на квантовой перепутанности, а на классических корреляциях», – комментирует автор статьи, старший научный сотрудник кафедры квантовой электроники Константин Катамадзе.

Вместо фоковских состояний света авторы использовали квазитепловое состояние света, тра-

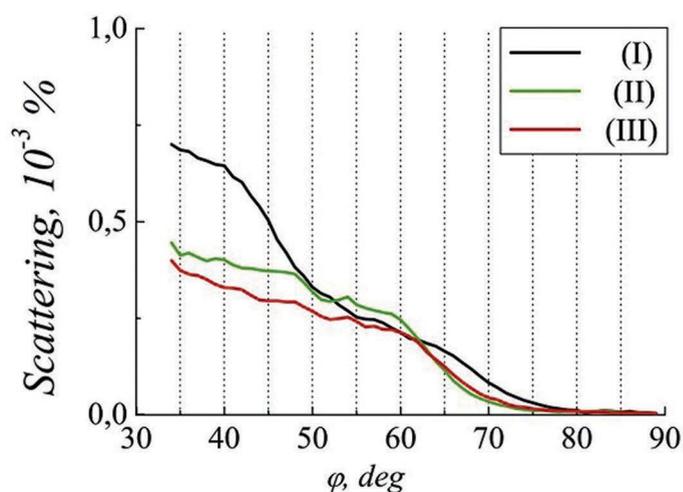
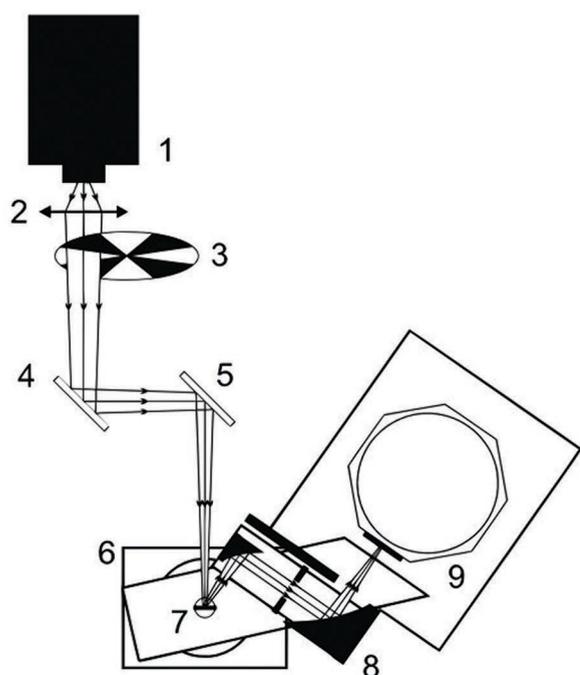
диционно получаемое с помощью пропускания лазерного излучения через вращающийся матовый диск. «Как и в предыдущей нашей работе, мы подбирали скорость вращения матового диска таким образом, чтобы время прохождения его зерна через лазерный пучок было много больше чем мертвое время фотонного детектора. Это позволило продемонстрировать эффект квантового вампира с отщеплением не только одного, но и двух фотонов», – добавил ученый.

Исследования показали, что эффект квантового вампира, к сожалению, не совсем квантовый, поскольку он также хорошо работает и для классических состояний света. Это с одной стороны сужает область его возможных применений, а с другой – делает его доступным для более широкого круга экспериментаторов.

«How quantum is the “quantum vampire” effect?: testing with thermal light». K.G. Katamadze, G.V. Avosopiants, Yu.I. Bogdanov, and S.P. Kulik. *Optica* 5, 6, 723–726 (2018).

# СПОСОБ ДИАГНОСТИКИ СИНДРОМА СУХОГО ГЛАЗА

*Сотрудники кафедры общей физики и волновых процессов физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова совместно с российскими и зарубежными коллегами предложили новый способ оценки того, насколько роговица глаза насыщена влагой. Метод основан на определении коэффициента отражения роговицы в терагерцовом диапазоне.*



Для диагностики некоторых заболеваний глаз, таких как синдром сухого глаза, необходимо точно измерять содержание влаги в роговице глаза и оценивать состояние слезной пленки. Авторы работы предложили неинвазивный (то есть не требующий нарушения тканей) способ оценки того, насколько роговица насыщена водой. Для этого необходимо измерить коэффициент отражения роговицы в терагерцовом диапазоне — с длиной волны 1-0,1 мм.

«Предлагаемый нами подход принципиально отличается от существующих и доступных в настоящее время методов офтальмологической диагностики, поскольку является полностью неинвазивным. В настоящее время созданный

нами макет диагностического прибора проходит этап клинических испытаний, по результатам которых можно будет сделать вывод о перспективах диагностической значимости разработанного метода, а также оценить возможности его клинических применений», — пояснил один из авторов работы, старший преподаватель физического факультета МГУ Илья Ожередов.

«In vivo THz sensing of the cornea of the eye». I. Ozheredov, M. Prokopchuk, M. Mischenko, T. Safonova, P. Solyankin, A. Larichev, A. Angeluts, A. i Balakin and A. Shkurinov. *Laser Physics Letters*, 15, N 5 (2018).

# АКАДЕМИК ПРОХОРОВ АЛЕКСАНДР МИХАЙЛОВИЧ (1916–2002)

Среди замечательной плеяды выдающихся ученых, которые внесли существенный вклад в развитие оптики на физическом факультете МГУ, видное место занимает Нобелевский лауреат академик Прохоров Александр Михайлович. В 1980–1988 гг. он возглавлял кафедру оптики и спектроскопии (ныне кафедра оптики, спектроскопии и физики наносистем). На посту заведующего кафедрой он сменил профессора Королева Федора Андреевича. При Ф.А. Королеве кафедра оптики и спектроскопии стала крупнейшей кафедрой физического факультета, на которой развивался целый ряд новых научных направлений. К последним следует отнести прежде всего исследования в области физики лазеров. В этом отношении приход на кафедру Прохорова, ставшего в



А.М. ПРОХОРОВ  
1916–2002

**ПРОХОРОВ**  
Александр Михайлович — академик, лауреат Нобелевской премии, директор ИОФ РАН, зав. кафедрой оптики и спектроскопии физического факультета МГУ.

1964 г. Нобелевским лауреатом за фундаментальные исследования по квантовой электронике, обеспечил несомненную преемственность в руководстве кафедрой. Став заведующим,

А.М. Прохоров, опираясь на помощь своего заместителя профессора Корниенко Л.С., придал новый импульс развитию квантовой электроники и физики лазеров на кафедре. Получение в этом направлении ряда важных приоритетных результатов во многом было связано с тем, что интенсивно использовался задел, сформировавшийся в других традиционных для кафедры областях (спектроскопия, люминесценция и др.).

Биография А.М. Прохорова не совсем обычна. Он родился 11 июля 1916 г. в Атертоне (Австралия) в семье русского рабочего-революционера Михаила Ивановича Прохорова, бежавшего в Австралию от преследований царского режима. В 1923 г. семья вернулась на родину. В 1939 г. он с отличием окончил физический факультет Ле-



После возвращения в 1923 году из Австралии в Россию. Саша с родителями: отцом Михаилом Ивановичем, матерью Марией Ивановной и сестрой Женей (1925 год).



Мл. лейтенант А.М. Прохоров (1941 г.).



Конец 1965 года: А.М. Прохоров, Ч.Х. Таунс и Н.Г. Басов в Физическом институте Академии наук.



А.М. Прохоров с внуком Александром и Н.Г. Басов с внуком Дмитрием. 2001 г.

нинградского государственного университета и поступил в аспирантуру ФИАН. С началом Великой Отечественной войны А.М. Прохоров ушел на фронт, сражался в пехоте, в разведке, был награжден высоко ценимой медалью “За отвагу”. В 1944 году, после тяжелого ранения, он был демобилизован и вернулся к научной работе, которой был предан до конца своих дней. В 1960 г. А.М. Прохоров избран членом-корреспондентом АН СССР, а в 1966 г. — академиком. Талант ученого сочетался в нем недюжинными организаторскими способностями. В Физическом институте АН СССР он руководил лабораторией колебаний, с 1968 г. являлся заместителем директора. В 1982 году был назначен директором Института общей физики АН СССР, который возглавлял до 1998 г., а затем являлся его почетным директором.

Характеризуя научную деятельность А.М. Прохорова, ее проблематику, нельзя не отметить присутствие в ней четко выраженной “оптической” компоненты. Так, оптические представления лежали в основе высказанной им в 1958 г. идеи использовать открытый резонатор при создании квантовых генераторов. За основополагающую рабо-

ту в области квантовой электроники, которая привела к созданию лазера и мазера, А.М. Прохоров и Н.Г. Басов были награждены Ленинской премией в 1959 г., а в 1964 г. совместно с Ч.Х. Таунсом — Нобелевской премией по физике. С тем, чтобы выделить оптическую составляющую в исследованиях по лазерной физике, он предложил регулярно организовывать конференции по оптике лазеров, которые регулярно проводятся в нашей стране. По его инициативе в различных подразделениях возглавляемого им института и кафедры стали интенсивно развиваться исследования, направленные на создание высокоэффективных волоконно-оптических линий связи. Материалы научных статей и монографий А.М. Прохорова широко используются в учебном процессе при подготовке специалистов-оптиков.

Любопытным представляется еще один эпизод его научной биографии. В 1950 г. он предложил новый режим генерации миллиметровых волн в синхротроне, установил их когерентный характер и по результатам этой работы защитил докторскую диссертацию “Исследование когерентного излучения электронов, ускоряемых в ускорителе типа

синхротрона”. В то время не было генераторов миллиметрового диапазона, поэтому разработанный А.М. Прохоровым синхротронный излучатель сразу нашел применение в спектроскопии. На этом эпизоде стоит остановиться хотя бы потому, что сейчас физика синхротронного излучения и ее приложения стали одним из основных научных направлений кафедры оптики, спектроскопии и физики наносистем, которую в настоящее время возглавляет член-корреспондент РАН профессор Ковальчук М.В. Благодаря его инициативе, сотрудники и студенты кафедры получили возможность использовать при проведении экспериментов излучение крупнейшего в стране синхротрона, созданного в возглавляемом М.В. Ковальчуком НИЦ “Курчатовский институт”. Таким образом, на примере кафедры оптики, спектроскопии и физики наносистем видно, что такие лидеры отечественной науки, как А.М. Прохоров, обеспечивают связь времен, без которой невозможно поступательное движение физики и ее важнейшего раздела — оптики.

Проф. каф. оптики,  
спектроскопии  
и физики наносистем  
П.В. Короленко

# МОЙ ПЕРВЫЙ И ПОСЛЕДНИЙ УЧИТЕЛЬ

## Воспоминания об академике, лауреате Нобелевской премии А.А. Абрикосове (1928–2017 гг.)

Ю. Голанд

Я познакомился с Алексеем Алексеевичем Абрикосовым в 1964 году, после того как распределился на кафедру «Физика низких температур». Он читал тогда теоретический курс по этой специализации. Читал он очень ясно и понятно. Хорошо известно, кто ясно мыслит, тот ясно и излагает.

Когда пришло время выбирать тему дипломной работы, я обратился к нему с просьбой стать моим научным руководителем. Он ответил, что сможет это сделать, если я сдам несколько экзаменов по предметам из «теорминимума» Ландау. За несколько месяцев я сдал 5 экзаменов, причем экзамен по теоретической механике сдал ему самому.

Согласившись на руководство, А. Абрикосов предложил мне интересную и физически достаточно наглядную тему — «Дополнительные осцилляции сопротивления металлических пленок в магнитном поле, связанные с зеркальным отражением электронов от границы». Его идея состояла в том, что расчет таких осцилляций может дать величину коэффициента зеркального отражения в том случае, если отношение амплитуд дополнительных и основных осцилляций будет содержать только этот коэффициент.

Я все аккуратно посчитал, и мне удалось вывести простую



*АБРИКОСОВ Алексей Алексеевич — Лауреат Ленинской премии, член-корреспондент Академии наук СССР, 1966 год.*

формулу, которая позволяла из экспериментальных данных определить величину коэффициента. В постановке задачи проявилась характерное для А. Абрикосова желание получать такие теоретические результаты, которые потом можно будет проверить экспериментально.

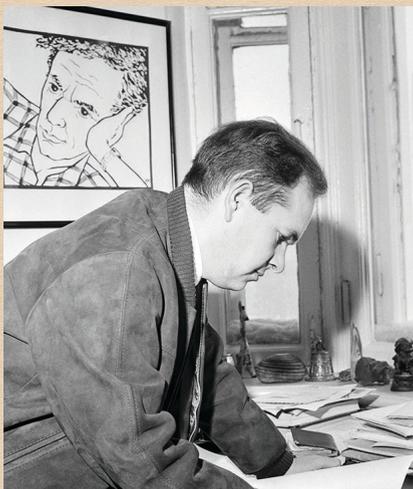
Работать с ним мне было совсем не сложно. Правда, однажды был момент, когда у меня возникли некоторые вычислительные проблемы. Однако я не стал просить его о помощи. Причина моей «самостоятельности» объяснялась просто. Одновременно со мной у А.А. Абрикосова был еще один студент-дипломник из МФТИ, у которого

возникли трудности с решением задач. Алексей Алексеевич как-то обмолвился при мне, что если дипломник попросит у него помощи, то он ему, конечно же, поможет, но в аспирантуру не возьмет.

Мне удалось самостоятельно разобраться в возникших проблемах, не прибегая к помощи руководителя. Полученные мною результаты понравились А. Абрикосову, и в отзыве на мою дипломную работу он написал, что она выходит за рамки обычных студенческих работ, и он рекомендует меня в аспирантуру физического факультета МГУ.

Но совершенно неожиданно у меня с рекомендацией в аспирантуру возникли серьезные проблемы. В те времена для оставления после окончания обучения во внутренней аспирантуре МГУ необходимо было получить рекомендацию партбюро физфака.

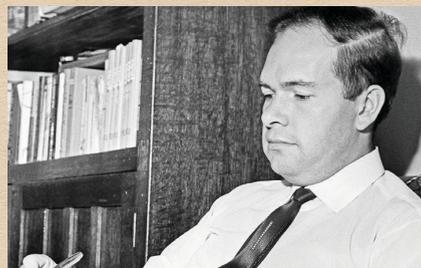
В студенчестве я активно занимался общественной работой и был единственным студентом на своем курсе, которого во время обучения приняли в КПСС<sub>1,2</sub>. Однако партийное бюро факультета мне отказало в рекомендации для поступления в физфаковскую аспирантуру, правда, при этом согласившись дать рекомендацию во внешнюю аспирантуру. После того как я сказал об этом А. Абрикосову, он тут же заявил, что попробует побороться за отмену этого реше-



*Заведующий отделом Института теоретической физики Академии наук СССР Алексей Абрикосов в своем рабочем кабинете, 1966 год.*



*Профессор Николай Брандт и член-корреспондент АН СССР, лауреат Ленинской премии Алексей Абрикосов в лаборатории физического факультета МГУ, 1975 год.*



*Член-корреспондент Академии наук СССР Алексей Абрикосов, 1966 год.*

ния и стал выяснять у своих знакомых профессоров физфака, в чем причина такого странного отказа. Партийная организация отказала не какому-то обычному студенту, а коммунисту, принятому ею же в свои ряды!

Алексею Алексеевичу окольными путями удалось выяснить, что причиной отказа послужила моя активная общественная деятельность в качестве организатора встреч студентов с разными известными публицистами и деятелями культуры. Некоторые из тех, кого я приглашал для выступлений в гостиной общежития МГУ, имели репутацию диссидентов.

Много позднее я узнал, что основное недовольство факультетского партийного руководства вызвала встреча с Эрнстом Генри (Семеном Николаевичем Ростовским<sup>3</sup>), специалистом по истории германского фашизма, который в середине 60-х годов прошлого века был широко известен своими выступлениями против реабилитации Сталина.

На встрече в общежитии МГУ ему задавали весьма острые политические вопросы — и устно, и с помощью записок. Одну из записок он не стал зачитывать сам, а отдал ее мне, как ведущему встрече. Я же решил огласить ее содержание всей аудитории. Автор записки спрашивал, не думает ли он, что у нас в стране после снятия Хрущева воцарилась фашистская диктатура. Он не стал на нее отвечать, а я сказал, что не понимаю, откуда у автора возникло такое предположение.

В многочисленных записках было задано немало других острых вопросов и суждений. После окончания встречи

Э. Генри попросил у меня разрешения взять с собой эти записки, и я ответил согласием на эту просьбу. Вряд ли это имело бы какое-то особое значение, если бы спустя какое-то время Э. Генри в газетной статье, опубликованной в ФРГ, не процитировал некоторые вопросы из записок, как показатель настроений советской молодежи.

Тем не менее, Алексей Алексеевич и тогдашний заведующий кафедрой физики низких температур, замечательный человек по своим душевным качествам и крупный экспериментатор Александр Иосифович Шальников сделали попытку оставить меня в аспирантуре. С просьбой помочь им в этом они вдвоем пошли к ректору МГУ академику АН СССР Ивану Георгиевичу Петровскому, но тот сказал, что он не может вмешиваться, ибо уже содействует оставлению в аспирантуре другого студента нашего курса Дмитрия Михеева, у которого возникли проблемы также из-за общественной деятельности.

Д. Михеев организовал на факультете «Дискуссионный клуб физиков» и был его руководителем. Ему удалось провести два или три заседания клуба, однако они не привлекли к участию в диспутах заметного количества студентов. Последним заседанием клуба стал диспут под названием «Цинизм и общественные идеалы», на котором выступил оратор с антисоветской речью по тогдашней терминологии.

После отказа в содействии И.Г. Петровского я оказался в очень трудной ситуации, однако, в конце концов, все разрешилось для меня благополучно весьма неожиданным образом. В Институте физических проблем АН СССР, где А.А. Абрикосов и А.И. Шальников работали в качестве научных сотрудников, функционировал Научный совет АН СССР по проблеме «Физика низких температур». Весной 1967 года этот Совет был реорганизован, прежние пред-

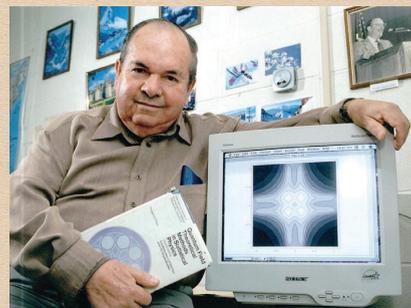
седатель и ученый секретарь оставили свои должности. Совет возглавил директор ИФП академик АН СССР Петр Леонидович Капица. А.А. Абрикосов и А.И. Шальников предложили ему назначить меня ученым секретарем Совета. С этим предложением П.Л. Капица согласился.

Я спросил тогда у Алексея Алексеевича, достаточно ли моих знаний для этой работы, на что он ответил, что вполне достаточно. К тому времени я завершил написание научной статьи по материалам своей дипломной работы, и в июне 1967 года доложил ее на заседании Ученого совета ИФП, ученым секретарем которого в то время был А.А. Абрикосов. Понятно, что я, недавний выпускник МГУ, сильно волновался, когда делал свой доклад перед крупнейшими специалистами и выступил, мягко говоря, не очень хорошо. В зале стали говорить, что им нечего непонятно. Тогда выступил А.А. Абрикосов, и после его разъяснений сразу стали говорить, что все все поняли. Ученый совет ИФП рекомендовал мою статью к печати, и спустя какое-то время она была опубликована в одном из ведущих отечественных физических журналов.

После заседания Ученого совета А.А. Абрикосов мне сказал, что П.Л. Капица просил его руководить моей научной работой, не сильно понуждая меня к ней, так как она не входит в мои обязанности ученого секретаря. При этом сам Алексей Алексеевич пожелал мне проявлять больше самостоятельности в выборе темы. Это подействовало на меня так, что, когда спустя примерно год Абрикосов предложил мне одну тему, никак не связанную с физикой металлов, я отказался. У меня к тому времени уже появились другие научные интересы.

Наше тесное сотрудничество с Алексеем Алексеевичем продолжилось уже в иной ипостаси, а именно в области научно-ор-

ганизационной деятельности. Я организовывал школы для молодых ученых по физике низких температур, а Абрикосов был их научным руководителем вместе с крупным физиком-экспериментатором членом-корреспондентом АН СССР Михаилом Семеновичем Хайкиным. Алексей Алексеевич уделял большое внимание этой школе и старался подбирать хороших лекторов, которые, как правило, не отка-



*АБРИКОСОВ Алексей Алексеевич — последние годы жизни.*



*Американский президент Джордж Буш с лауреатами Нобелевской премии (среди которых Алексей Абрикосов) в Овальном офисе Белого дома, 2003 год.*

зывались от его предложения. Школы молодых ученых проходили регулярно и пользовались большим успехом. В ходе их подготовки и проведения нам приходилось часто общаться и вести беседы на самые разные темы. Алексей Алексеевич обладал хорошим чувством юмора и был прекрасным рассказчиком с широким кругом интересов, знал множество занимательных историй.

В 1991 году А. Абрикосов, ставший к тому времени уже академиком АН СССР и директором Института физики высоких давлений АН СССР, решил покинуть СССР и уехать в США. Он считал, что все способные ученые должны уезжать на Запад, потому что в России нет условий для эффективной научной работы.

Когда в 2003 году он стал лауреатом Нобелевской премии по физике, я поздравил его и

выразил надежду, что он скоро у нас появится. Он мне ответил, что не приедет никогда. И действительно, Алексей Алексеевич больше ни разу не приезжал на свою Родину. У него было ни на чем не основанное чувство, что его могут, как П.Л. Капицу, задержать в России и не выпустить назад в США.

Он приглашал меня навещать его, когда я там бывал, но встретиться в США нам так и не удалось. Я несколько раз приезжал в США, выступал с докладами в разных американских университетах, но до него и так не добрался. Надеялся сделать это позднее, но, к сожалению, опоздал.

Об Алексее Алексеевиче Абрикосове у меня остались самые лучшие воспоминания не только как о выдающемся ученом, но и просто об обаятельном остроумном человеке, легким в общении и оптимистично настроенном.

### **Примечания.**

1. Для вступления в ряды КПСС кандидату надо было получить три рекомендации членов партии. Студенты-члены ВЛКСМ вместо одной рекомендации члена КПСС должны были получить рекомендацию комсомольской организации, первым этапом в оформлении которой было комсомольское собрание студенческой группы. В большинстве случаев, претенденты на вступление в партию из числа студентов рассматривались сокурсниками как карьеристы, что чаще всего и бывало на самом деле, поэтому с присутствием молодежи максимализмом решения собраний заканчивалось простой резолюцией «В рекомендации отказать!».

2. Юру Голанда товарищи уважали за действительно честное и искреннее отношение к общественной деятельности и к друзьям, поэтому ему была дана комсомольская рекомендация для вступления в КПСС. В итоге оказалось, что за пять с половиной лет совместного обучения на факультете он на курсе стал единственным членом партии, принятым в студенческие годы.

3. Эрнст Генри — псевдоним Семена Николаевича Ростовского (1904–1994). С.Н. Ростовский — советский разведчик-незаконник, писатель, журналист, историк-публицист. В своей книге «Гитлер против СССР», изданной в 1934 году в Англии под псевдонимом Эрнст Генри и переведенной и изданной в СССР в 1937 году, он предсказал, что Гитлеровская Германия начнет войну против СССР, изложил план нападения Германии, позднее ставший известным как «План Барбаросса», и предсказал СССР победу в будущей войне. После заключения с Германией Пакта о ненападении книгу изъяли из библиотек, а вернули в открытый доступ уже в начале 60-х годов. На той встрече в общежитии МГУ Се-

мену Николаевичу был задан вопрос, не хотел бы он что-либо исправить в новом издании своей книги. Его ответ звучал примерно «Я предсказал Победу СССР и разгром гитлеровской Германии, так что исправлять нечего».

В то время, когда его пригласили в МГУ, в СССР готовился XXIII съезд КПСС, и среди московской интеллигенции ходили слухи о возможном пересмотре на этом съезде решений XXII съезда КПСС и реабилитации И.В. Сталина. Эрнст Генри был инициатором письма к Генеральному Секретарю ЦК КПСС Л.И. Брежневу о недопустимости такого решения. Письмо подписали более тридцати известных ученых, писателей, журналистов, артистов, художников.

Текст письма у нас опубликован не был, но достаточно широко распространялся в списках в «самиздате». Не удивительно, что сам Эрнст Генри воспринимался в партийных кругах настороженно, и его приглашение в МГУ не могло остаться незамеченным партийным руководством физфака.

3. Дмитрий Михеев был сокурсником Ю. Голанда. Он организовал на физфаке МГУ такую общественную организацию как «Дискуссионный клуб физиков». Ему удалось провести несколько заседаний, последним из которых стал диспут под названием «Цинизм и общественные идеалы». Это заседание клуба привлекло достаточно большое количество гостей, и туда явилась почти в полном составе кафедра философии во главе с заведующим. Более того, к физикам приехали корреспонденты московского радио с звукозаписывающей аппаратурой. Одним из выступающих оказался человек, не имевший ни к физфаку, ни вообще к МГУ никакого отношения, назвавшийся Кузнецовым. Он выступил с антисоветской речью по тогдашней терминологии, сравнивал режи-

мы Сталина и Гитлера, ставя их в один ряд, приводил тщательно подобранные «жареные» факты из материалов, которые звучали на волнах зарубежных радиостанций таких как «Би-Би-Си», «Голос Америки», «Немецкая волна».

Слушатели, большинство которых составляли молодые люди, воспринимали его выступление как новую, ранее недоступную информацию. Когда выступавший исчерпал время, определенное заранее регламентом, то по просьбе аудитории Д. Михеев несколько раз ставил вопрос на голосование о продлении выступления. В результате вместо 15 минут выступление длилось более часа.

После завершения заседания Клуба пленка с записью выступлений попала на стол первому секретарю городского комитета КПСС В.В. Гришину со всеми последовавшими действиями и вытекавшими выводами. Выговора сыпались как из рога изобилия, а заведующий кафедрой философии МГУ был уволен за то, что не выступил с противоположной точкой зрения и с опровержением тех фактов, которые приводил оратор.

Д. Михееву удалось-таки поступить в аспирантуру, однако позже он попытался по чужим документам выехать за границу, был арестован и осужден по статье «За измену Родине». Дальнейшая его судьба довольно интересна. После отбытия наказания он выехал за границу, работал в США на одной из радиостанций, написал несколько книг и даже подвизался некоторое время в роли советника президента США Рональда Рейгана.

В настоящее время Д. Михеев живет в г. Королеве Московской области. Из яркого антисоветчика он превратился в патриота новой России.

*Профессор А.С. Илюшин*

# ИЗ ФОНДОВ МУЗЕЯ ФИЗИЧЕСКОГО ФАКУЛЬТЕТА МГУ

**А.С. Илюшин**

Музей физического факультета был открыт решением Ученого совета МГУ в ноябре 1996 г. Основой музея явилась фотовыставка «Развитие физики в Московском университете», созданная в 1980 году в связи с 225-летием МГУ. Ныне музей официально включен в число музеев Евразийской ассоциации университетов и музеев высших учебных заведений г. Москвы.



Директор музея —  
профессор А.С. Илюшин



В музее физического факультета и в его фондах хранятся и демонстрируются разнообразные артефакты, связанные с историей становления развития физики в нашем университете, и с историей самого физического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова. Многие из этих материалов неизвестны большей части сотрудников и студентов факультета, а ведь эти материалы — часть их личной истории.

С некоторыми историческими материалами из фондов музея мы и хотим познакомить читателей журнала.

В начале XX века при Императорском московском университете было построено здание физического института, в стенах которого впоследствии был организован и начал работать физический факультет МГУ.

Чтобы представлять себе состояние физической науки в Российской империи, достаточно ознакомиться с отчетом Московского физического общества имени П.Н. Лебедева за академический 1916/1917 год. Сто лет тому назад перечень всех членов этого общества уместился всего на двух страничках небольшой брошюры формата А5.

## Московское Физическое Общество имени П. Н. Лебедева.

Первый председатель Общества П. Н. Лебедев † 1 марта 1912 г.

### Совѣтъ Общества.

Председатель: А. А. Эйхенвальдъ.  
Товарищъ председателя: П. П. Лазаревъ.  
Членъ совѣта: Г. В. Вульфъ.  
Н. Е. Жуковскій.  
К. А. Тимирязевъ  
Секретари: Н. Н. Лебедеико.  
А. К. Тимирязевъ.  
Казначей: В. И. Романовъ.  
Библиотекаръ: А. Б. Млодзѣвскій.  
Члены ревизионной коммисіи: А. А. Титовъ  
Б. С. Швецовъ  
А. В. Цингеръ.

### Списокъ членовъ.

Авраменко Евгенія Ивановна.	Бѣликовъ Петръ Николаевичъ.
Андреевъ Николай Николаевичъ.	Вавиловъ Сергѣй Ивановичъ.
Аркадьевъ Владимиръ Константиновичъ.	Велиховъ Павелъ Аполлоновичъ.
Бачинскій Алексѣй Иосифовичъ.	Величковскій Анатолій Порфирьевичъ.
Блажко Сергѣй Николаевичъ.	Вильборгъ Михаилъ Васильевичъ.
Богословскій Евгеній Васильевичъ.	Вильзаръ Андрей Карловичъ † 26 октября 1915.
Богуславскій Сергѣй Анатольевичъ.	Виноградовъ Дмитрій Ивановичъ.
Боргманъ Иванъ Ивановичъ † 9 мая 1914.	Волошинъ Федоръ Ефимовичъ.
Брюсовъ Евграфъ Ивановичъ † 18 июля 1911.	Вульфъ Георгій Викторовичъ.
	Галанинъ Дмитрій Дмитриевичъ (мл.).

Гезехус Николай Александрович.  
 Глаголева Александра Андреевна.  
 Гопиус Евгений Александрович.  
 Егоров Николай Григорьевич.  
 Жуковский Николай Егорович.  
 Зелинский Николай Дмитриевич.  
 Зернов Владимир Дмитриевич.  
 Иванов Константин Иванович.  
 Ильин Борис Владимирович.  
 Левева Варвара Петровна.  
 Юлосль Александр Григорьевич † 13 июня 1911.  
 Юффе Абрам Федорович.  
 Кабуков Иван Алексеевич.  
 Казанский Всеволод Сергеевич.  
 Кандидов Петр Петрович.  
 Капцов Николай Александрович.  
 Кастерин Николай Петрович.  
 Кодли Андрей Робертович.  
 Кольцов Николай Константинович.  
 Корольков Алексей Львович.  
 Кравец Торичан Павлович.  
 Краснощек Фодор Иванович.  
 Крашенинников Федор Николаевич.  
 Круг Карл Адольфович.  
 Крылов Алексей Николаевич.  
 Курепин Федор Константинович.  
 Лазарев Петр Петрович.  
 Ландсберг Григорий Самуилович.  
 Лебедеко Николай Николаевич.  
 Лебедев Петр Николаевич † 1 марта 1912.

Лейберг Павел Борисович.  
 Леонтьев Константин Александрович.  
 Лисицин Леонтий Иванович † 21 августа 1915.  
 Лютца Григорий Иванович.  
 Мандельштам Леонид Исаакович.  
 Мейер Павел Константинович.  
 Михельсон Владимир Александрович.  
 Млодзевский Анатолий Болеславович.  
 Млодзевский Волеслав Корнелиевич.  
 Молодой Трофим Кононович.  
 Моршкин Александр Иванович.  
 Муравьев Александр Георгиевич.  
 Некрасов Александр Иванович.  
 Орлов Сергей Владимирович.  
 Павлов Владимир Петрович.  
 Павлов Иван Петрович.  
 Павлов Павел Петрович.  
 Павша Алексей Васильевич.  
 Папалекси Николай Дмитриевич.  
 Писаржевский Лев Владимирович.  
 Пришеников Василий Иванович.  
 Порт Гебгардт Брунович.  
 Ржевкин Сергей Николаевич.  
 Розанов Борис Федорович.  
 Романов Вячеслав Ильич.  
 Селяков Николай Яковлевич.  
 Семенов Юлий Федорович.  
 Сиротинская Нина Евгеньевна.  
 Сиротин Ефим Еремьевич.  
 Смирнов Леонид Петрович.  
 Соколов Алексей Петрович.

Стрѣлцкий Николай Станиславович.  
 Тимирязев Аркадий Климентович.  
 Тимирязев Климент Аркадьевич.  
 Титов Александр Андреевич.  
 Титов Вениамин Семенович.  
 Трапезников Александр Константинович.  
 Умов Николай Алексеевич † 2 января 1915.  
 Усагин Александр Иванович.  
 Усагин Иван Филиппович.  
 Успенский Николай Евгеньевич.  
 Ферингер Анна Богдановна.  
 Фишер Владимир Максимович.  
 Фредерикс Всеволод Константинович.  
 Хвольсон Орест Данилович.  
 Цебрикова Лидия Владимировна.

Цингер Александр Васильевич.  
 Чичибабин Алексей Евгеньевич.  
 Чугаев Лев Александрович.  
 Чупрова Мария Александровна.  
 Шапошников Константин Николаевич.  
 Шатерников Михаил Николаевич.  
 Швецов Борис Сергеевич.  
 Шилов Николай Александрович.  
 Шмаков Павел Васильевич.  
 Щегляев Владимир Сергеевич.  
 Щдро Николай Ксаверьевич.  
 Эйхенвальд Александр Александрович.  
 Эренфест Павел Сигизмундович.  
 Эренфест Татьяна Алексеевна.  
 Эсмарх Василий Иванович.  
 Эштейн Павел Сигизмундович.  
 Яковлев Константин Павлович.

**Отчет за 1916—17 годъ.**

В истекшем академическомъ году Общество имѣло 22 очередныхъ заседанія, одно соединенное съ Обществомъ изучения и распространения физическихъ знаний имени Н. А. Умова и одно публичное. Всего 24 заседанія на которомъ членами общества и сторонними посѣтителями было прочтено 49 докладовъ. Обиліе темъ и ихъ разнообразіе, какъ это видно изъ прилагаемаго списка докладовъ, свидѣтельствуетъ объ упорной научной работѣ, которую продолжали вести члены общества, несмотря на тяжелыя затрудненія связаннаыя съ переживаемой войной.

Секретарь *А. Тимирязевъ.*

*Страницы из отчета Московского физического общества имени П.Н. Лебедева за академический 1916/1917 год. На этих трех страницах перечислены практически все физики России 1916 года*

В списке членов Общества было упомянуто 112 человек, из которых семерых к моменту выхода отчета уже не было в живых. На всю огромную Россию в 1917 году приходилось всего около ста (!) физиков, причем членами физического общества состояли и математики, и химики, и биологи, и врачи.

За отчетный академический 1916/17 год Общество провело 24 очередных заседания, на которых было сделано 49 докладов. По словам Секретаря Общества А. Тимирязева «обилие тем и их разнообразие свидетельствовало об упорной научной работе, которую продолжали вести члены общества, несмотря на тяжелые затруднения, связанные с переживаемой войной.»

Библиотека Общества состояла из 217 томов книг и 322 журналов, причем во времен-

ном пользовании Общества находилась также библиотека П.Н. Лебедева, состоящая из 176 томов книг, и 210 томов журналов и 36 томов журнала были переданы во временное пользование К.А. Тимирязева.

В 1919 году в стенах физического института МГУ профессором В.А. Аркадьевым была организована Магнитная лаборатория. Там зародилась и развилась Московская научная школа магнитологов, из которой выросли такие известные ученые как Б.А. Введенский, В.А. Корчагин, Н.С. Акулов, К. Теодорчик и многие другие.

Под руководством В.А. Аркадьева в МГУ в магнитной лаборатории регулярно проводились коллоквиумы, в работе которых принимали участие и иностранные ученые с мировой известностью, такие как М. Планк,

П. Ланжевэн, Ч. Раман и ряд других.

В фондах музея имеются подлинные фотографии, сохранившиеся в личном архиве профессора К. Теодорчика. На этих фотографиях, сделанных по окончании заседаний, запечатлены и великие физики и сотрудники магнитной лаборатории, участвовавшие в коллоквиумах.

На заседании одного из коллоквиумов, проходившем в МГУ, был сделан групповой снимок членов магнитной лаборатории. В центре в первом ряду — руководитель лаборатории профессор В.А. Аркадьева, слева от него — профессор К. Файнс из Мюнхена (Германия), справа — профессор Ч. Раман из Калькутты (Индия).



Сотрудники магнитной лаборатории и члены лоллоквиума, проходившего в МГУ. В центре в первом ряду — руководитель лаборатории профессор В.А. Аркадьев, слева от него — профессор К. Файнс из Мюнхена (Германия), справа — профессор Ч. Раман из Калькутты (Индия).



Приезд профессоров М. Планка и Ч. Рамана в МГУ. На снимке: сидят справа налево — М. Планк, А.А. Глаголева-Аркадьева и жена М. Планка.

На другом снимке запечатлен приезд в МГУ профессоров М. Планка и Ч. Рамана. (На снимке: сидят справа налево — М. Планк, А.А. Глаголева-Аркадьева и жена М. Планка.)

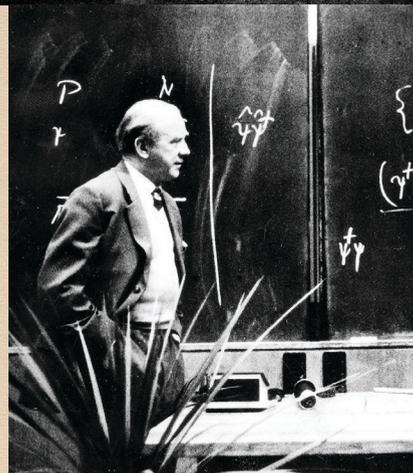
Во втором ряду — в центре профессор Ч. Раман.

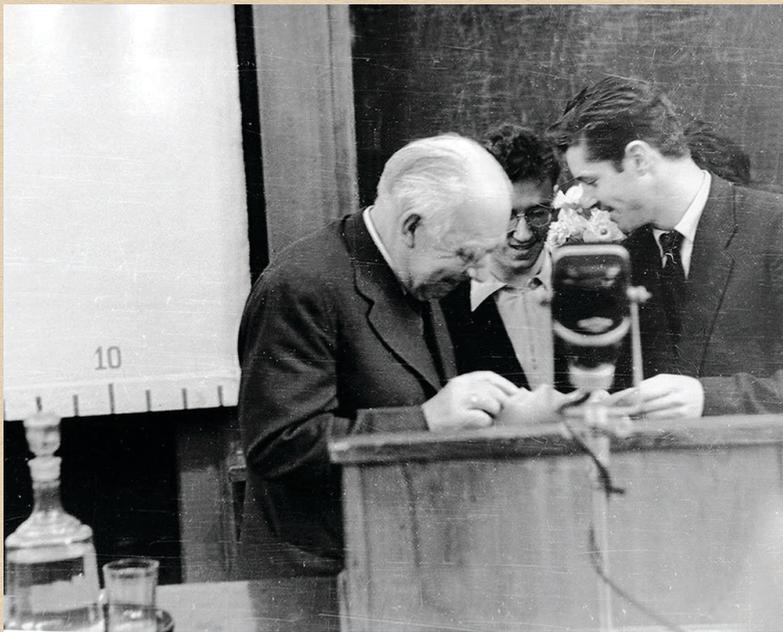
Вышеупомянутые фотографии относились к довоенному времени и к зданию физического факультета, размещавшемуся на Моховой улице.

После открытия зданий МГУ на Ленинских горах в новом здании физического факультета также выступали с докладами многие выдающиеся иностранные физики, имена которых навсегда сохранятся в истории науки.

В 1961 году физический факультет посетил Нильс Бор и выступил с докладом в Центральной физической аудитории. Это важное событие в истории нашего факультета запечатлено на серии фотографий.

В 1965 году в этой же аудитории выступал немецкий физик, один из создателей квантовой механики Вернер Гайзенберг. На фотографии В. Гайзенберг запечатлен во время чтения им лекции для сотрудников и студентов физфака.

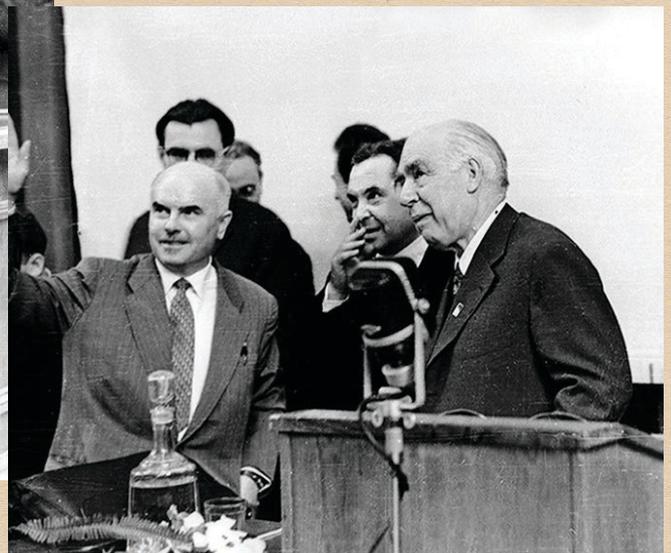




*В 1961 году физический факультет посетил Нильс Бор и выступил с докладом в Центральной физической аудитории. Это важное событие в истории нашего факультета запечатлено на серии фотографий.*



*Нильс Бор и его переводчик Е.М. Лившиц.*



*В.С. Фурсов, Д.Д. Иваненко и Н. Бор.*

# 5 лет журналу “НОВОСТИ НАУКИ”



Декан физического факультета  
МГУ им. М.В. Ломоносова  
профессор  
Николай Николаевич Сысоев



Зам. декана физического факультета  
МГУ им. М.В. Ломоносова  
профессор Андрей Анатольевич Федянин



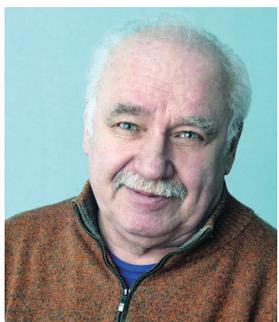
Начальник Научного отдела  
физического факультета  
МГУ им. М.В. Ломоносова  
Надежда Богдановна Баранова



Начальник Издательского отдела  
физического факультета МГУ  
им. М.В. Ломоносова  
Ольга Владимировна Салецкая



Пресс-секретарь физического факультета  
Диана Игоревна Пчелина



Фотограф физического факультета  
Сергей Алексеевич Савкин

РЕДКОЛЛЕГИЯ  
НАУЧНОГО БЮЛЛЕТЕНЯ  
физического факультета  
МГУ им. М.В. Ломоносова  
“НОВОСТИ НАУКИ”



Директор института спектроскопии РАН,  
профессор физического факультета  
МГУ им. М.В. Ломоносова  
Виктор Николаевич Задков



Программист Издательского отдела  
физического факультета  
Ирина Анатольевна Силантьева

SCIENCE NEWSLETTER № 10/2015

**НОВОСТИ НАУКИ**

Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова

**СОДЕРЖАНИЕ**

- 2 Новости науки
- 9 Контракты
- 11 Конференции
- 14 Диссертации
- 16 Ученые физфака МГУ
- 17 Физика — широкое

SCIENCE NEWSLETTER № 20/2015

**НОВОСТИ НАУКИ**

Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова

**СОДЕРЖАНИЕ**

- 2 Новости науки
- 3 Пресс-фото
- 16 Диссертации
- 19 Конференции
- 19 Физика — широкое

SCIENCE NEWSLETTER № 1/2016

**НОВОСТИ НАУКИ**

Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова

**Как готовить настоящих физиков**

**СОДЕРЖАНИЕ**

- 1 Новости науки
- 10 Контракты
- 12 Диссертации
- 14 Конференции
- 16 Ученые физфака МГУ
- 18 Физика — широкое

SCIENCE NEWSLETTER № 2/2016

**НОВОСТИ НАУКИ**

Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова

**О проекте «Технологическая долина «Воробьевы горы»**

**СОДЕРЖАНИЕ**

- 1 Новости науки
- 18 Контракты
- 20 Диссертации
- 22 Ученые физфака МГУ
- 23 Физика — широкое

SCIENCE NEWSLETTER № 10/2015

**НОВОСТИ НАУКИ**

Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова

**Трудяки наших ученых вот уже 70 лет не знают войны...**

**СОДЕРЖАНИЕ**

- 1 Новости науки
- 21 Диссертации
- 22 Контракты
- 29 Ученые физфака МГУ
- 33 Физика — широкое

SCIENCE NEWSLETTER № 20/2015

**НОВОСТИ НАУКИ**

Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова

**Нобелевская премия 2015 года по физике**

**СОДЕРЖАНИЕ**

- 1 Новости науки
- 20 Контракты
- 22 Ученые физфака МГУ
- 25 Физика — широкое

SCIENCE NEWSLETTER № 1/2016

**НОВОСТИ НАУКИ**

Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова

**Обнаружение гравитационных волн**

**СОДЕРЖАНИЕ**

- 1 Новости науки
- 20 Контракты
- 22 Ученые физфака МГУ
- 25 Физика — широкое

SCIENCE NEWSLETTER № 2/2016

**НОВОСТИ НАУКИ**

Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова

**СОДЕРЖАНИЕ**

- 1 Новости науки
- 40 Контракты
- 42 Ученые физфака МГУ
- 44 Диссертации
- 45 Физика — широкое

SCIENCE NEWSLETTER № 1/2017

**НОВОСТИ НАУКИ**

Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова

**СОДЕРЖАНИЕ**

- 1 Новости науки
- 40 Контракты
- 44 Диссертации
- 45 Физика — широкое

SCIENCE NEWSLETTER № 3/2017

**НОВОСТИ НАУКИ**

Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова

**Реорганизация работы аспирантуры на физическом факультете МГУ**

**СОДЕРЖАНИЕ**

- 1 Новости науки
- 32 Препринты
- 33 Диссертации
- 38 Физика — широкое
- 40 Ученые физфака МГУ
- 46 Новые диссертационные соискатели

Бюллетень «НОВОСТИ НАУКИ». ©2018 Физический факультет МГУ. Под ред. Н.Н. Сысоева, 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. press@phys.msu.ru

Подписано в печать 10.09.18. Тираж 250 экз.

Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, 119991, Москва ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.