

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Физический институт им. П. Н. Лебедева  
Российской академии наук

# ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ НАУЧНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

2016



Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН) – ведущий российский научный центр мирового значения. Именно в ФИАН было открыто и объяснено излучение Вавилова–Черенкова, созданы генераторы и усилители, основанные на лазерно-мазерном принципе, создана теория сверхпроводимости и сверхтекучести, открыт принцип автофазировки и явление самофокусировки световых лучей в нелинейных средах, предложена концепция суперсимметрии и сделан целый ряд других как экспериментальных, так и теоретических открытий мирового уровня. Семь сотрудников ФИАН были удостоены Нобелевских премий.

В настоящее время Физический институт им. П. Н. Лебедева продолжает активно работать практически по всем направлениям современной физики в рамках семи основных тематик Государственного задания:

1. Фундаментальная и прикладная фотоника, лазерная физика, квантовая и нелинейная оптика; оптика и спектроскопия атомно-молекулярных систем, микро- и наноструктур, конденсированных сред и композитных материалов.
2. Физические основы лазерных, фотонных и оптоэлектронных технологий и взаимодействия лазерного излучения с веществом для решения задач навигации, управляемого термоядерного синтеза, информатики и биомедицины.
3. Физика конденсированного состояния: новых материалов, высокотемпературных сверхпроводников, молекулярных и твердотельных структур нанопотоники, наноэлектроники и спинтроники.
4. Физическая электроника, физика плазмы, пучков заряженных частиц и источников ВУФ и рентгеновского излучения.
5. Физика фундаментальных взаимодействий, ядерная и нейтринная физика, физика элементарных частиц, космических лучей и атмосферных процессов, гамма-астрономия, темная материя.
6. Астрофизика и космология, физика Солнца; рентгеновская, инфракрасная и радиоастрономия; наземно – космическая интерферометрия.
7. Физика нелинейных явлений, моделирование гидродинамических, оптических, астрофизических, физико-химических и медико-биологических систем.

В Физическом институте им. П. Н. Лебедева работает более полутора тысяч сотрудников, в том числе более 200 докторов и около 400 кандидатов наук, 25 членов Российской академии наук. В 2016 году сотрудники ФИАН опубликовали более 1100 публикаций, индексируемых в системе Web of Science, а количество ссылок без учета самоцитирований превышает двадцать пять тысяч.

Физический институт им. П. Н. Лебедева является лидером российской науки по реализации крупных проектов как фундаментального, так и прикладного характера. К таким проектам безусловно относится космический радиointерферометр «РадиоАстрон», который в 2016 году отметил пятилетие успешной работы на орбите Земли. За это время с помощью «РадиоАстрона» были получены уникальные данные о структуре удаленных астрофизических объектов и эта работа продолжается. К важнейшим прикладным разработкам ФИАН 2016 года относятся создание первого российского полноразмерного томографа с полем 1,5 тесла и открытие центра протонной терапии в городе Обнинск с протонным комплексом «Прометеус», разработанным в Физико-техническом центре ФИАН. Закончена модернизация Тянь-Шаньской высокогорной научной станции, где создан новый комплекс детекторов для изучения состава и спектра различных компонент космического излучения в широком диапазоне энергий.

Завершается строительство и комплектация современным научным оборудованием Лаборатории высокотемпературной сверхпроводимости, идет работа в рамках крупных космических проектов «Миллиметр», «Арка», «Гамма-400», ведутся работы в рамках программы «Глонасс 2012–2020».

К научной работе в Физическом институте им. П. Н. Лебедева РАН активно привлекается молодежь. ФИАН сотрудничает с 26 кафедрами ведущих ВУЗов России, более 130 студентов выполняли свои квалификационные работы в Институте. В 2016 году в аспирантуре ФИАН обучалось 77 молодых исследователей, одновременно ведущих научную работу в лабораториях. Все это позволяет Физическому институту им. П. Н. Лебедева оставаться ведущим мировым научным центром и с уверенностью смотреть в будущее.

Настоящий сборник содержит основные результаты исследований, выполненных в ФИАН в 2016 году.

директор ФИАН  
чл.-корр. РАН

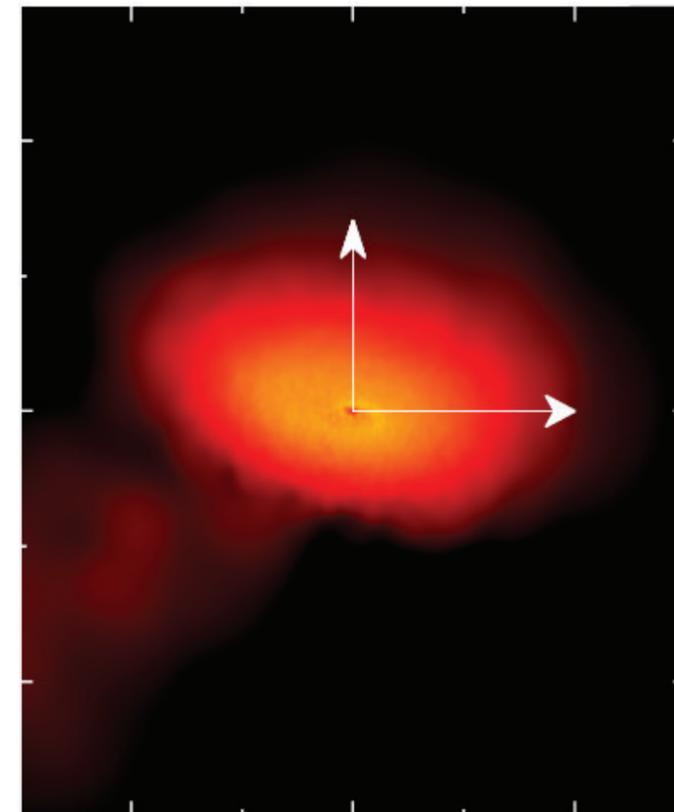
Николай Николаевич КОЛАЧЕВСКИЙ

## Квазистационарный искривленный диск, образовавшийся после приливного разрушения звезды вращающейся черной дырой

*Построена теория искривленного аккреционного диска, образовавшегося после приливного разрушения звезды вращающейся черной дырой, показано, что диск может иметь существенный угол наклона относительно экваториальной плоскости черной дыры в случае достаточно большой вязкости. Угол наклона является функцией радиуса и эволюционирует со временем с характерным масштабом изменения порядка года. Это может привести к эволюции спектра излучения от диска, по которой можно будет судить как о темпе вращения черной дыры, так и о физических условиях в диске.*

Начиная с 80-х годов прошлого века было установлено, что после приливного разрушения звезды сверхмассивной черной дырой в точке минимального сближения (периастре) звезды и черной дыры, возникает струя газа, причем отдельные газовые

элементы струи двигаются по орбитам, обладающим разными периодами, но находящимися в орбитальной плоскости звезды. Газовые элементы, обладающие минимальными периодами, сталкиваются друг с другом вблизи радиуса периастра и образуют



Распределение плотности в диске и в струе газа (внизу слева) в численной модели «гладких частиц». Вертикальная ось совпадает с направлением вращения черной дыры.

аккреционный диск, который подпитывается газовыми элементами, обладающими большими периодами. Поток массы в струе газа падает со временем обратно пропорционально времени в степени  $5/3$ . Для не вращающейся черной дыры плоскость диска совпадала бы с орбитальной плоскостью звезды, тогда как если бы не было эффекта подпитки диска из струи и черная дыра бы вращалась, диск со временем уложился бы в экваториальную плоскость черной дыры. Подчеркнем, что эти плоскости, вообще говоря, на совпадают. В реалистическом случае, когда черная дыра вращается и присутствует подпитка диска из струи, возникает нетривиальная ситуация, когда эффекты, связанные с вращением стремятся уложить диск в экваториальную плоскость, тогда как воздействие струи на диск стремится уложить его в орбитальную плоскость звезды. Диск приобретает нетривиальную форму, которая эволюционирует со временем. В этой работе мы изучили эту ситуацию, применяя комбинацию аналитических и численных методов. Во-первых, была разработана теория искривленных аккреционных дисков с учетом источника углового момента,

поставляемого струей, в квазистатическом приближении, которое подразумевает, что «фоновое» решение, характеризующее некоторый «вспомогательный» плоский диск, подпитываемый струей, достаточно медленно эволюционирует. Эта теория была проверена на упрощенных численных моделях дисков, построенных с помощью метода «гладких частиц».

Было показано, что в рамках квазистатического приближения, характерные углы наклона диска достаточно велики, либо когда параметр вязкости Шакуры и Сюняева больше чем 0.01, либо когда параметр вращения черной дыры меньше единицы. Угол наклона может испытывать очень резкие изменения приблизительно после одного года после приливного разрушения (для черной дыры массой один миллион масс Солнца), если в диске возможно развитие тепловой неустойчивости. Изменение угла наклона должно привести к изменению спектра излучения диска, по которому, в принципе, можно будет судить как о степени вращения черной дыры, так и о физических свойствах диска.

#### Результаты опубликованы:

1. Xiang-Gruess, M., Ivanov, P.B., Papaloizou, J.C.B., On the formation of a quasi-stationary twisted disc after a tidal disruption event, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 463, 2242, (2016).

## Открытие экстремальной яркости квазара 3C273 на «Радиоастроне»

*«Радиоастрон» измерил яркостную температуру ядра квазара на уровне  $2-4 \cdot 10^{13}$  К. Это нарушает известный предсказанный предел яркости синхротронного излучения из-за Комптоновской катастрофы, даже если учесть релятивистское усиление излучения. Полученный результат требует пересмотра физики излучения ядер квазаров.*

Исследование квазаров позволяет лучше понять физику экстремальных состояний материи, и, в частности, изучить как «работают» механизмы генерации излучения вблизи сверхмассивных черных дыр. Наземно-космический интерферометр «Радиоастрон» – один из самых совершенных инструментов для построения радиоизображений квазаров с очень высоким угловым разрешением. Он состоит из российского

космического радиотелескопа «Спектр-Р», работающего совместно с крупнейшими наземными телескопами. Для исследования квазара 3C273 на Земле астрономы привлекли 100-метровый радиотелескоп в Эффельсберге (Германия), 110-метровый в Грин Бэнке (GBT), 300-метровый телескоп Аресибо, и решетку VLA (США). Работая совместно, космическая и наземные радионаблюдения способны дать наивысшее

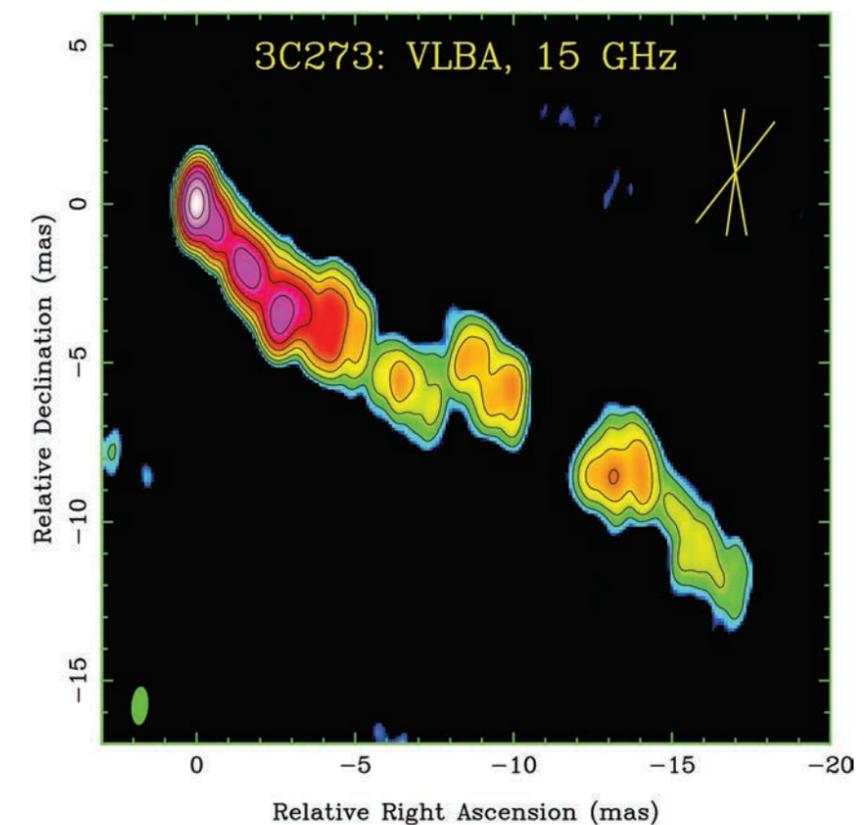


Рис. 1. Изображение джета в квазаре 3C273 на частоте 15 ГГц по данным наблюдений VLBA с желтыми линиями, отмечающими направление баз интерферометра при наблюдениях на РадиоАстроне

угловое разрешение, когда-либо достигнутое в астрономии – в тысячи раз выше, чем у космического телескопа «Хаббл».

Именно возможности «Радиоастрона» позволили впервые зарегистрировать экстремальную яркость ядра квазара – в результате было получено значение эффективной температуры излучения от 20 до 40 триллионов градусов Кельвина. Эффективная температура плазмы, из которой состоят джеты квазаров, не может превышать 500 миллиардов градусов.

Потолок температуры связан с резким возрастанием потерь на обратный эффект Комптона. Если энергия электронов пре-

вышает этот предел, они начинают лавинообразно перекачивать свою энергию в энергию рассеянных фотонов. В результате фотоны переходят из радио в ультрафиолетовый, рентгеновский или гамма-диапазон, а электроны охлаждаются (так называемая Комптоновская катастрофа). Но квазар 3C273 нарушает это ограничение более чем в 10 раз. Даже учет известного релятивистского усиления из-за Допплер-эффекта оказывается недостаточным для объяснения измеренной экстремальной яркости.

Полученный результат указывает на необходимость пересмотра механизма излучения ядер квазаров.

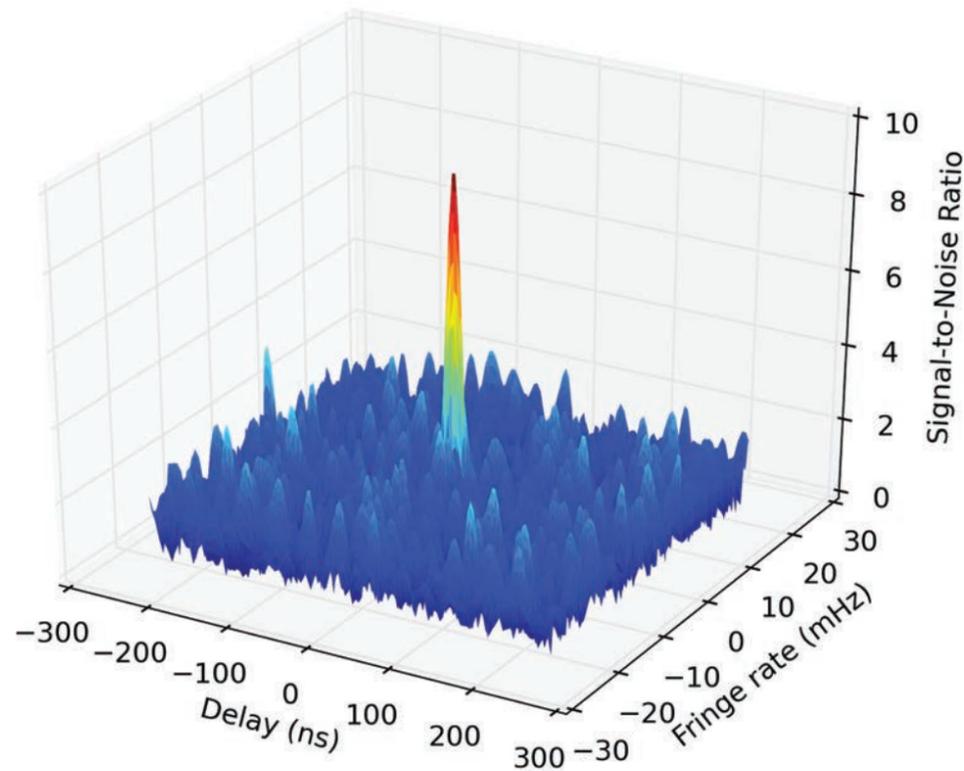


Рис. 2. Пример детектирования сигнала РадиоАстроном от 3C273 на экстремальной наземно-космической базе космический радиотелескоп «Спектр-Р» – GBT, длина волны 1.3 см.

#### Результаты опубликованы:

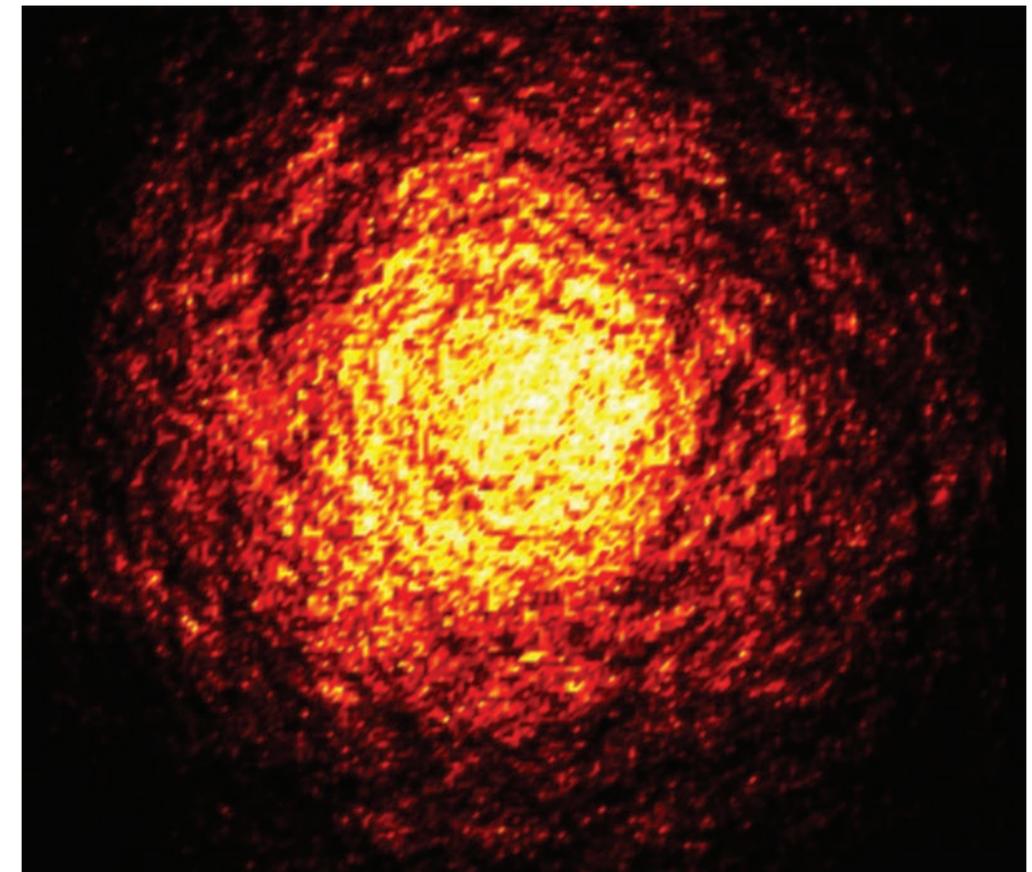
1. Y. Y. Kovalev, N. S. Kardashev, K. I. Kellermann, A. P. Lobanov, M. D. Johnson, L. I. Gurvits, P. A. Voitsik, J. A. Zensus, J. M. Anderson, U. Bach, D. L. Jauncey, F. Ghigo, T. Ghosh, A. Kraus, Yu. A. Kovalev, M. M. Lisakov, L. Yu. Petrov, J. D. Romney, C. Salter, K. V. Sokolovsky, RadioAstron observations of the quasar 3C273: a challenge to the brightness temperature limit", *ApJ*, 820(1), L9 (2016).

## Открытие нового эффекта рассеяния излучения квазаров и пульсаров по наблюдениям на наземно-космическом интерферометре «Радиоастрон»

*Анализ наблюдений пульсара V0329+54 и квазара 3C273 на «Радиоастроне» выявил тонкую субструктуру пятна рассеяния радиоизлучения от них. Ее параметры связаны со свойствами неоднородностей межзвездной плазмы, а анализ свойств позволяет оценить характеристики межзвездной среды и восстановить истинное изображение космического объекта, размытое межзвездными облаками. Последнее открывает новые возможности по изучению массивных черных дыр и их окружения во Вселенной.*

Радиоизлучение космических источников подвергается рассеянию на неоднородностях межзвездной плазмы. Одним из эффектов такого рассеяния является видимое увеличение угловых размеров радиоисточников. В результате анализа РСДБ наблюдений пульсара V0329+54, выполненных с

наземно-космическим интерферометром, РадиоАстрон была обнаружена тонкая структура (субструктура) диска рассеяния радиоизлучения этого пульсара. Измеренный угловой диаметр диска рассеяния составил величину в несколько тысячных долей секунды дуги. Только наземно-кос-



Модельное изображение космического объекта с ярко выраженной субструктурой пятна рассеяния

мический интерферометр РадиоАстрон позволяет реализовать подобное угловое разрешение. Наблюдения были проведены на частоте 324 МГц (92 см), при этом проекции наземно-космических баз интерферометра достигали значений в 300000 км. Параметры обнаруженной субструктуры для пульсаров, точечных излучателей, связаны только со свойствами неоднородностей межзвездной плазмы.

Субструктура рассеяния была также обнаружена при наблюдениях квазара 3C273 на больших проекция базы с РадиоАстроном.

Для квазаров появление субструктуры обусловлено как средой так и структурой самого источника, и влияние субструктуры должно учитываться при построении изображений таких источников. Более того, анализ свойств субструктуры позволяет получить информацию о характеристиках межзвездной среды и даже восстановить истинное изображение космического объекта, размытое межзвездными облаками. Это дало ученым новое окно возможности по изучению массивных черных дыр, скрытых от наблюдателя плотной окружающей их средой.

#### Результаты опубликованы:

1. M. D. Johnson, Y. Y. Kovalev, C. R. Gwinn, L. I. Gurvits, R. Narayan, J.-P. Macquart, D. L. Jauncey, P. A. Voitsik, J. M. Anderson, K. V. Sokolovsky, M. M. Lisakov, Extreme brightness temperatures and refractive substructure in 3C273 with RadioAstron', ApJ, 820(1), L10 (2016).
2. Gwinn, C. R., Popov, M. V., Bartel, N., Andrianov, A. S., Johnson, M. D., Joshi, B. C., Kardashev, N. S., Karuppusamy, R., Kovalev, Y. Y., Kramer, M., Rudnitskii, A. G., Safutdinov, E. R., Shishov, V. I., Smirnova, T. V., Soglasnov, V. A., Steinmassl, S. F., Zensus, J. A., Zhuravlev, V. I., PSR B0329+54: Statistics of Substructure Discovered within the Scattering Disc on RadioAstron baselines of up to 235,000 km, ApJ, 822(2), 96 (2016).
3. Popov, M. V., Bartel, N., Gwinn, C. R., Johnson, M. D., Andrianov, A., Fadeev, E., Joshi, B. C., Kardashev, N. S., Karuppusamy, R., Kovalev, Y. Y., Kramer, M., Rudnitskiy, A., Shishov, V. I., Smirnova, T. V., Soglasnov, V. A., Zensus, J. A., PSR B0329+54: Substructure in the scatter-broadened image discovered with RadioAstron on baselines up to 330,000 km, MNRAS, 465(1), 978 (2017).

## Необычные вспышки интенсивности пульсара J0653+8051

Обнаружен новый эффект: у пульсара J0653+805 зарегистрировано две вспышки радиоизлучения. Необычным является то, что вспышки демонстрирует только центральный компонент в профиле радиоизлучения пульсара, и то, что это очень редкое событие – суммарная длительность обеих вспышек составляет малую долю (~0.0013) от всего времени наблюдения.

Наблюдения проводились в течение двух лет на радиотелескопе БСА Пуштинской радиоастрономической обсерватории ФИАН на частоте 111 МГц с использованием циф-

рового 512-канального приемника с высоким частотно-временным разрешением (5 кГц и 2,5 или 5,1 миллисекунд, соответственно). Всего проведено 402 сеанса наблю-

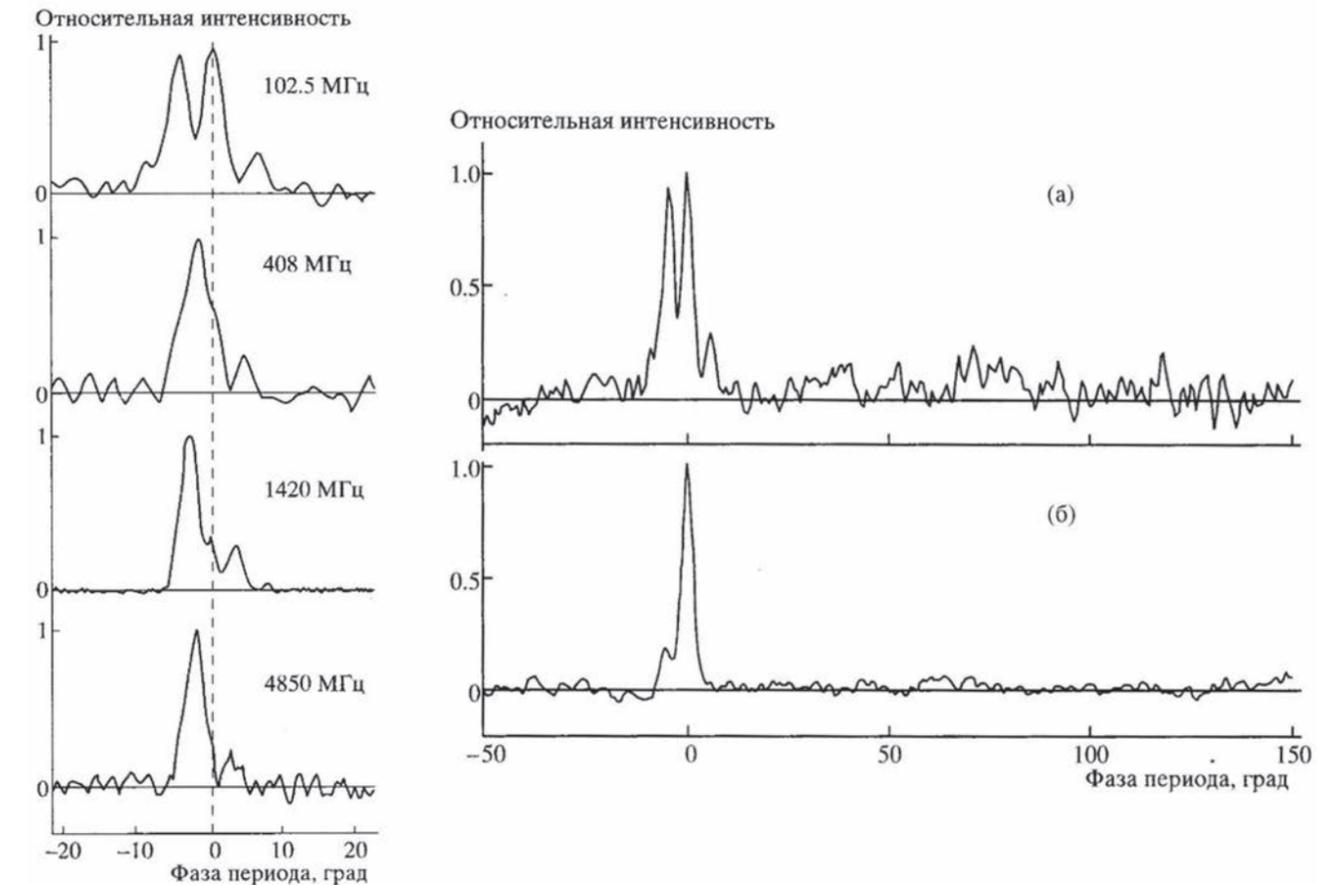


Рис. 1. Справа показан средний профиль пульсара B0643+80 на четырех частотах (штриховой линией отмечена фаза центрального компонента (C2), видно, что с уменьшением частоты происходит уширение профиля пульсара, а центральный компонент (C2) имеет более крутой спектр по сравнению с другими компонентами профиля. Слева представлен интегральный профиль пульсара B0643+80 на частоте 102 МГц: (а) – в обычный день (02.02.1995); (б) – во время вспышки (03.03.1995).

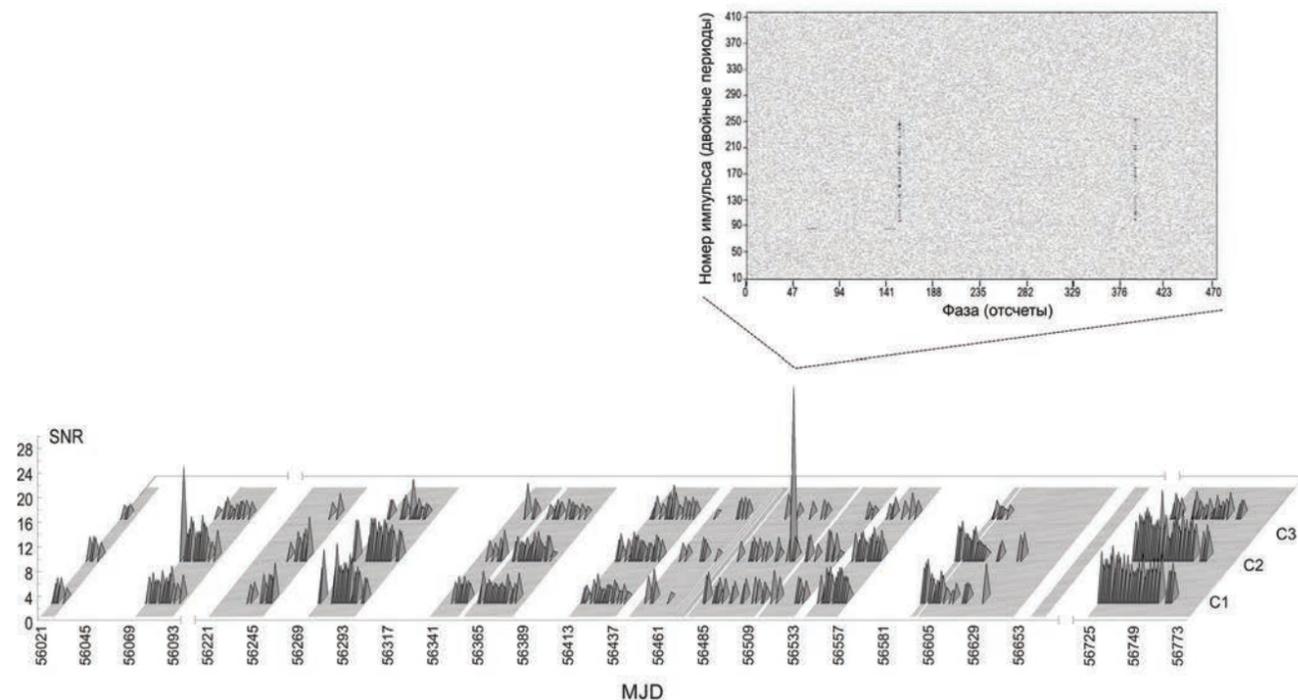


Рис. 2. На нижнем рисунке показано изменение интенсивности всех трех компонент (C1, C2, C3) интегрального профиля со временем. По горизонтали отложены юлианские дни (период с апреля 2012 по апрель 2014 года), а по вертикали – отношение сигнал/шум. Серым цветом отмечены дни наблюдений. Вспышки интенсивности центрального компонента наблюдались 24.05.2012 и 01.10.2013. Вторая вспышка в большем масштабе детально показана на верхнем рисунке. По оси абсцисс здесь отложены номера отсчетов. Интервал между отсчетами составляет 5,12 мс, а общая длина шкалы (470 отсчетов) соответствует удвоенному периоду вращения пульсара (2,4 секунды). По оси ординат – общее время сеанса наблюдения (16 минут) представлено в единицах этого удвоенного периода. Вспышка видна как последовательность темных точек на протяжении примерно 160 удвоенных периодов пульсара (2,4 с x 160 = 6.4 мин.).

дений длительностью 16 минут каждый с регистрацией индивидуальных импульсов. Эти данные не только подтвердили обнаруженную впервые в 1998 году (Малофеев В.М., Малов О.И. и Щеголева Н.В., Астрон. Ж., т. 75, с. 275, 1998) странную активность этого пульсара, но и позволили детально исследовать картину вспышки.

Оказалось, что вспыхивает только центральный компонент трехкомпонентного интегрального профиля. Длительность вспышки составляет около 6 минут, и в этот

период интенсивность отдельных импульсов этого компонента может в 110 раз превышать среднюю величину. Относительная частота подобных событий близка к появлению редких последовательностей импульсов, которое демонстрируют десяток недавно обнаруженных быстро вращающихся радиотранзиентов (RRATs), однако в случае пульсара J0653+805 эти редкие вспышки обнаруживаются не у всего импульса, как целого, а лишь у одного из компонентов в его профиле.

#### Результаты опубликованы:

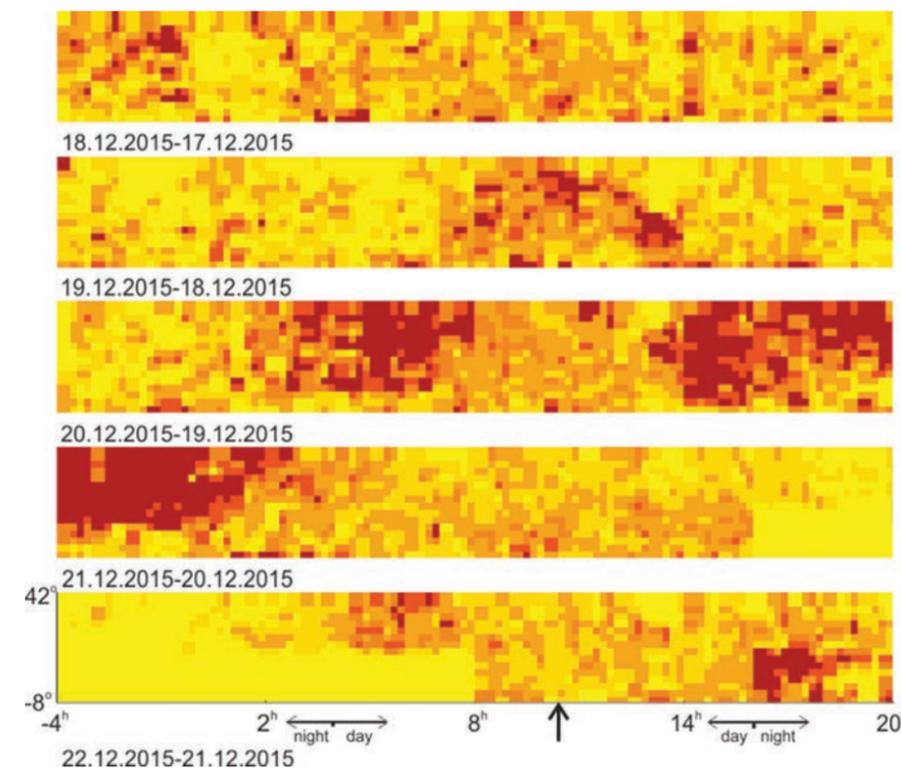
1. Malofeev V., Teplykh D., Malov O., Logvinenko S., MNRAS, 457, 538, 2016.

## Распространяющееся вспыхивающее возмущение в солнечном ветре по данным мониторинга на радиотелескопе БСА ФИАН

Детально исследована динамика усиления межпланетных и ионосферных мерцаний при прохождении выброса корональной массы 18–20 декабря 2015 г. Определены величина и характер изменения скорости распространения выброса от короны Солнца до орбиты Земли. Усиление ионосферных мерцаний сопровождалось значительным уменьшением характерного временного масштаба явления.

Около 8 часов московского времени 18 декабря 2015 г. на Солнце была зарегистрирована не очень сильная уединенная рентгеновская вспышка класса С 4.6, которая примерно через 60 часов привела к сильной

геомагнитной буре. Послевспыхивающее возмущение не было зарегистрировано коронографами, но было четко зафиксировано до прихода к Земле в измерениях межпланетных мерцаний. Распространяющееся к



Карты распределения дифференциального уровня межпланетных мерцаний  $\Delta I$ . Оттенки цветов от светло-желтого до темно-красного соответствуют повышению разности относительных уровней мерцаний от  $\Delta I < 0.1$  до  $\Delta I > 0.5$  в площадках неба размером  $3^\circ \times 3^\circ$  между данным и предыдущим днем. Каждая из площадок (пикселей) содержит до 10 мерцающих источников. По оси ординат склонение зондируемой области от  $-8^\circ$  до  $+42^\circ$ , по оси абсцисс всемирное время от  $-4$  час до 20 час, стрелкой обозначено положение Солнца. Сильно возмущенные области в правой части третьей сверху панели и левой части четвертой панели соответствуют приходу возмущения к Земле.

Земле возмущение, примерно симметричное относительно линии Земля–Солнце, проявилось в данных мониторинга солнечного ветра на радиотелескопе БСА ФИАН как заметное усиление уровня межпланетных мерцаний с началом 18 декабря около 13 часов московского времени. Фронтальная часть возмущения при этом находилась примерно на середине расстояния между Солнцем и Землей. Приближающееся к Земле возмущение привело к усилению мерцаний в послеполуденные и вечерние часы 19 декабря и в течение суток 20 декабря.

По оценкам средняя скорость распространения возмущения между вспышкой на

Солнце и началом усиления мерцаний составила около 700 км/с. Средняя скорость распространения между Солнцем и Землей оказалась близкой к этой величине.

В ночные часы с 20 на 21 декабря нами зафиксировано резкое усиление уровня ионосферных мерцаний, причем характерное время флуктуаций ионосферного происхождения уменьшилось примерно на порядок по сравнению со спокойными условиями.

Полученные результаты показывают возможности использования результатов мониторинга межпланетных мерцаний для краткосрочного прогноза геофизической обстановки.

## В эксперименте CLOUD в ЦЕРНе найден механизм влияния космических лучей на образование глобальной облачности

*Новые результаты эксперимента свидетельствуют о том, что ионизация, производимая космическими лучами в атмосфере, увеличивает скорость образования кластеров молекул на 1–2.5 порядка по сравнению с нейтральной нуклеацией. Этот эффект значительно возрастает при уменьшении относительной влажности среды ниже 20%. Исследован процесс нуклеации в присутствии альфа-пенина.*

Одной из задач проекта CLOUD, проводимого в ЦЕРНе, является изучение механизма образования кластеров молекул (частиц) в земной атмосфере, на которых впоследствии образуются центры конденсации водяных паров, являющиеся основой формирования глобальной облачности, и исследование роли космических лучей в этих процессах. Исследования процессов нуклеации проводились в присутствии альфа-пенина ( $C_{10}H_{16}$ ), который является одним из наиболее

распространенных природных соединений в земной атмосфере.

Новые результаты, в частности, свидетельствуют о том, что ионизация, производимая космическими лучами в атмосфере, увеличивает скорость образования кластеров молекул (размером в несколько нанометров) на 1–2.5 порядка по сравнению с нуклеацией на нейтральных частицах (рис. 1; временные интервалы "GCR" и "neutral" соответственно). Скорость ионно-индуцированной

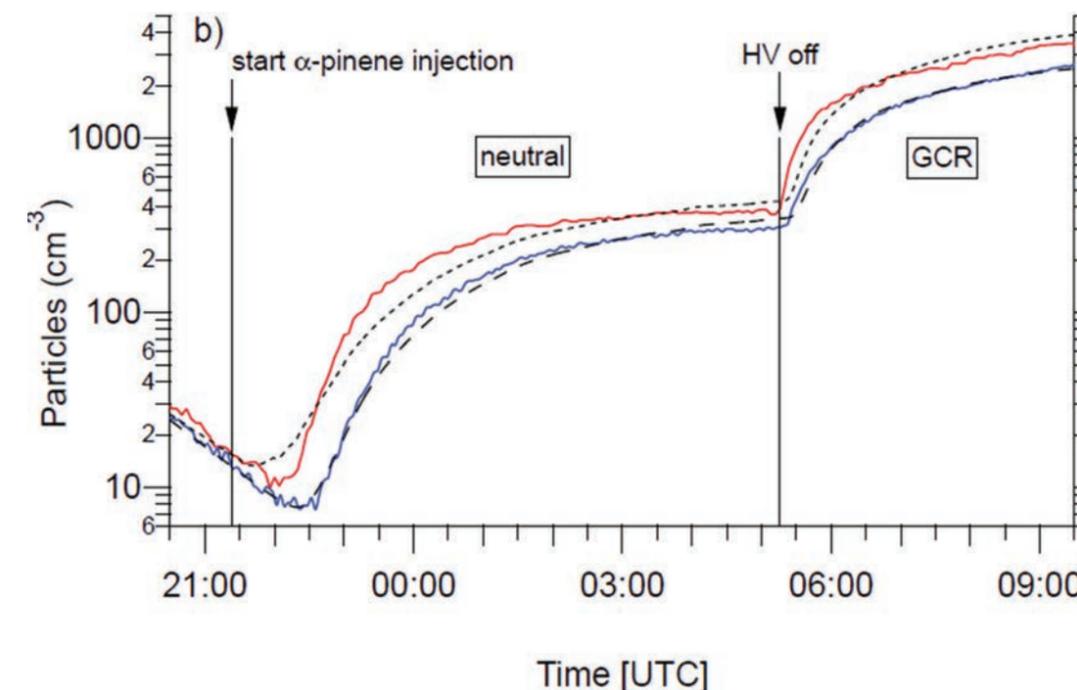


Рис. 1. Характеристики ионно-индуцированной нуклеации. Временные изменения концентрации образованных кластеров в присутствии альфа-пенина ( $C_{10}H_{16}$ ). Красная линия для частиц с диаметром 1.7 нм, голубая — для 2.8 нм. Пунктирные линии — результаты расчетов образования кластеров с использованием модели AEROCLOUD.

### Результаты опубликованы:

1. Chashei I.V., Tyul'bashev S.A., Shishov V.I., Subaev I.A. Interplanetary and ionosphere scintillation produced by ICME 20 December 2015. Space Weather (AGU).

нуклеации, обусловленной космическими лучами, значительно возрастает при уменьшении влажности среды ниже 20 % (рис. 2).

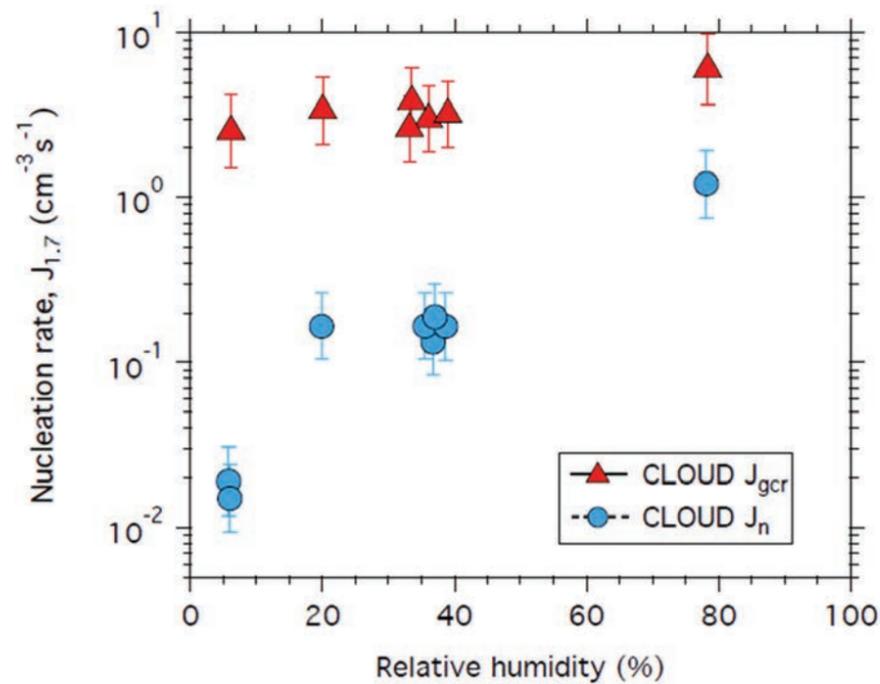


Рис. 2. Зависимость скорости нуклеации (для частиц с размером 1.7 нм) от величины относительной влажности среды в случае ионизации, производимой космическими лучами в атмосфере (красные треугольники) и в отсутствии ионизации (голубые кружки).

#### Результаты опубликованы:

1. J. Duplissy, J. Merikanto, A. Franchin, ..., V. Makhmutov, et al., Effect of ions on sulfuric acid water binary particle formation II: Experimental data and comparison with QC-normalized classical nucleation theory, *J. Geophys. Res. Atmos.* 121 (4) 1752–1775 (2016).
2. J. Kirkby, J. Duplissy, K. Sengupta, ..., V. Makhmutov, ..., Y. Stozhkov, et al., Ion-induced nucleation of pure biogenic particles, *Nature* 533 (7604) 521–540 (2016).
3. H. Gordon, K. Sengupta, A. Rap, J. Duplissy, ..., V. Makhmutov, Mathot, ..., Y. Stozhkov, et al., Reduced anthropogenic aerosol radiative forcing caused by biogenic new particle formation, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 113 (43) 12053–12058 (2016).
4. E.M. Dunne, H. Gordon, A. Kurten, ..., V. Makhmutov, ..., Y. Stozhkov, et al., Global particle formation from CERN CLOUD measurements, *Science* 354 (6316) 1119–1124 (2016).
5. В.С. Махмутов, Е.Н. Мочалова, Ю.И. Стожков, Тайны облаков, *Химия и жизнь* № 9 2–5 (2016).

## Международный эксперимент ПАМЕЛА: исследование космических лучей и античастиц в широком интервале энергий

С помощью орбитального спектрометра ПАМЕЛА международной коллаборацией ученых из России, Италии, Швеции и Германии сделан ряд открытий в области физики космических лучей и античастиц высоких энергий. Обнаружен рост отношения потоков галактических позитронов к полному потоку лептонов (электроны плюс позитроны) с увеличением энергии этих частиц; впервые измерен спектр антипротонов в галактических космических лучах, спектр первичных электронов; измерен спектр протонов и гелия и доказан сложный характер спектров в области энергий сотен ГэВ/нуклон.

Спектрометр ПАМЕЛА для исследования космических лучей и античастиц в диапазоне энергий  $10^9$ – $10^{13}$  эВ был разработан коллаборацией ученых из России, Италии, Швеции и Германии. Прибор был установлен на борту отечественного спутника Ресурс ДК1 и запущен на орбиту 15 июня 2006 г. с космодрома Байконур. Аппаратура успешно проработала почти 10 лет.

Важнейшим достижением этого эксперимента было открытие роста отношения потоков галактических позитронов к полному потоку

лептонов (электроны плюс позитроны) с увеличением энергии этих частиц от 5 до 150 ГэВ. Наблюдаемый рост противоречит общепринятому механизму образования позитронов в нашей Галактике. Это явление получило название эффекта ПАМЕЛЫ (см. рис. 1). Позднее этот результат получил подтверждение в космических экспериментах Ферми и АМС–2.

Впервые в эксперименте ПАМЕЛА с высокой точностью был измерен энергетический спектр галактических антипротонов в диапазоне энергий до 200 ГэВ (см. рис. 2).

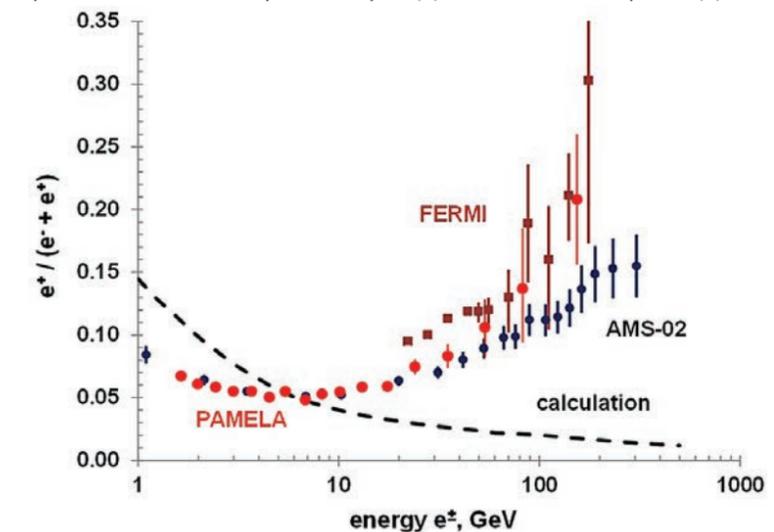


Рис. 1. Отношение потоков галактических позитронов к полному потоку лептонов (электроны плюс позитроны): красные точки – данные спектрометра ПАМЕЛА, синие точки – данные АМС–2 на Международной космической станции, коричневые квадраты – данные космического эксперимента Ферми. Штриховая кривая – расчет по стандартной модели

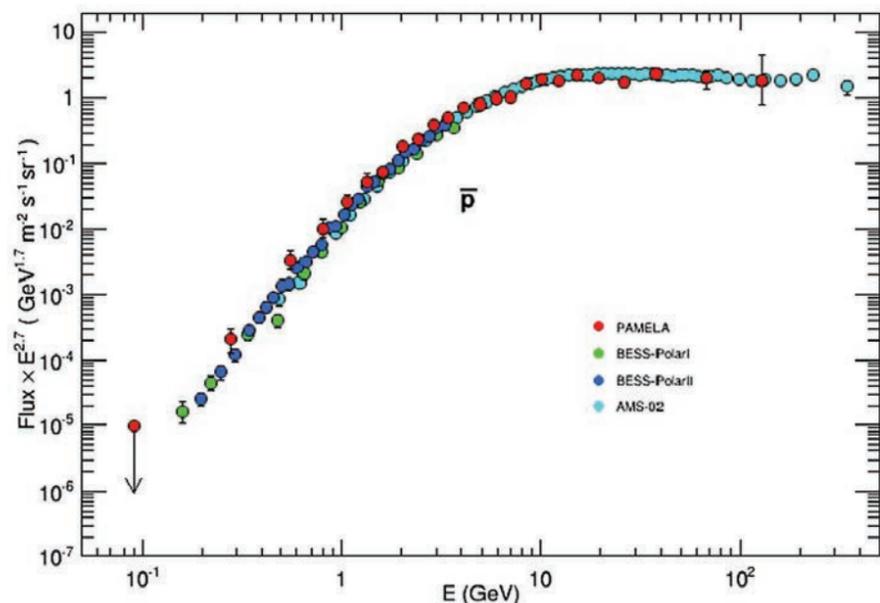


Рис. 2. Энергетический спектр галактических антипротонов: красные точки – результаты спектрометра ПАМЕЛА, голубые точки – данные АМС на Международной космической станции.

Согласно общепринятому представлению, античастицы (позитроны и антипротоны) образуются за счет взаимодействия космических протонов и ядер с ядрами галактического вещества. Детальные расчеты потока антипротонов и сравнение их результатов с экспериментом показывает, что имеется также избыток антипротонов по сравнению с ожидаемым. В настоящее время удовлетворительного объяснения этих результатов не найдено. Возможно,

избыточные античастицы (позитроны и антипротоны) возникают при взаимодействии космических лучей с частицами темной материи.

Прецизионные измерения спектров галактических протонов и ядер гелия в эксперименте ПАМЕЛА показали сложную зависимость от энергии в области энергий сотен ГэВ/нуклон. Такую зависимость можно объяснить при наличии близких источников космических лучей, находящихся на расстоянии порядка сотен парсек.

#### Результаты опубликованы:

1. PAMELA collaboration. An anomalous positron abundance in cosmic rays with energies 1.5–100 GeV. *Nature*, 2009, v. 458(7238), 607–6092.
2. PAMELA collaboration. New measurement of the antiproton-to-proton flux ratio up to 100 GeV in the cosmic ray radiation. *Phys. Rev. Lett.*, 2009, v. 102(5), 051101/1–5.
3. PAMELA collaboration. PAMELA results on the cosmic-ray antiproton flux from 60 MeV to 180 GeV in kinetic energy. *Phys. Rev. Lett.*, 2010, v. 105(12), 121101/1–5.
4. PAMELA collaboration. PAMELA measurements of cosmic-ray proton and helium spectra. *Science*, 2011, v. 332(6025), 69–72.
5. PAMELA collaboration. New upper limit on strange quark matter abundance in cosmic rays with the PAMELA space experiment. *Phys. Rev. Lett.*, 2015, v. 111(11), 111101/1–5.
6. PAMELA collaboration. Search for anisotropies in cosmic-ray positrons detected by the PAMELA experiment. *Astrophys. J.*, 2015, v. 811(1), 21/1–9.
7. PAMELA collaboration. Time dependence of the  $e^-$  flux measured by PAMELA during the 2006 July–2009 December solar minimum. *Astrophys. J.*, 2015, v. 810(2), 142/1–13/

## Высокоточные магнитно-резонансные томографы на базе сверхпроводящего магнита с полем 1.5 Тл

Разработана и проходит медицинскую регистрацию серия уникальных магнитно-резонансных томографов для всего тела на базе сверхпроводящего магнита с индукцией поля 1.5 Тл. Для него создано и зарегистрировано отечественное программное обеспечение. Получены томограммы высокой точности, не уступающие зарубежным аналогам. Разработана революционная технология безгелиевых томографов.

Творческий коллектив ФИАН под руководством проф. Демихова Е.И. создали первый отечественный высокопольный (с полем 1.5 Тл) томограф FullScan, который по многим параметрам превосходит зарубежные аналоги, продемонстрировал конкурентоспособные эксплуатационные характеристики и удобство в работе.



Рис. 1. Томограф FullScan.

FullScan ничем не уступает последним моделям и обладает целым рядом преимуществ среди которых цена, программное обеспечение, сервисное обслуживание и комфортность работы для оператора и пациентов.

Основные достоинства томографа FullScan:

1. Российская локализация по комплектующим на данный момент 80 %.
2. Предлагаемая цена аппарата FullScan в

два раза ниже, чем стоимость западных аналогов.

3. Преимущество в потребительских свойствах:

- FullScan – это малозумящий томограф с шумами в 1000 раз ниже, чем у конкурентов. Это важное свойство делает сканирование томограмм комфортным для пациента и увеличивает их количество.
- Собственное программное обеспечение высокого уровня, которое включает рабочее место врача. Это ПО позволяет проводить обработку томограмм и улучшать пространственное разрешение до 0.4 мм.

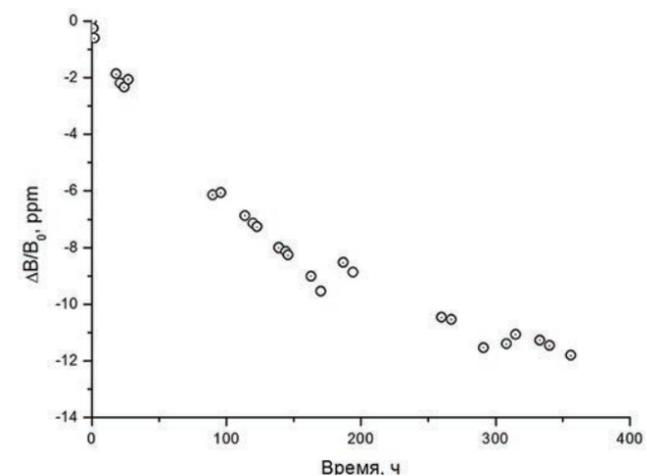


Рис. 2. Временная стабильность Full Scan и другие параметры превосходят западных производителей.

4. Разработана революционная технология «безгелиевых» томографов на примере ортопедического томографа MR Scanex. Эта технология позволяет понизить издержки на производство МРТ на 10–15%. Безгелиевые МРТ особенно важны для малых городов России, где отсутствует инфраструктура доставки и заправки дорогостоящим жидким гелием.
5. Создана структура сервиса и продаж.
6. Единственная отечественная разработка МРТ с полем 1.5 Тл. Возможность монопольного положения на рынке.

По людским ресурсам, технически, технологически, организационно, программно коллектив готов к началу организации производства с годовым оборотом до 6–10 млрд рублей, что позволит заполнить рынок МРТ России и других стран (Китай, Индия, Иран, Ближний Восток, СНГ и др).



Рис. 4. Безгелиевый томограф MR Scanex.



Рис. 3. Томограмма колена.



Рис. 5. Производственная линия.

## Физики ФИАН в экспериментах Belle и Belle-II в научном центре КЕК

*Физиками ФИАН впервые измерена энергетическая зависимость сечения  $e^+e^- \rightarrow h_b(nP)\pi^+\pi^-$  ( $n = 1,2$ ) с использованием полной статистики, набранной в эксперименте Belle на асимметричном  $e^+e^-$ -коллайдере КЕКВ. Обнаружены значимые пики  $\Upsilon(10860)$ - и  $\Upsilon(11020)$ -состояний боттомония с незначительным вкладом континуума. Доказано, что переход  $\Upsilon(11020) \rightarrow h_b(nP)\pi^+\pi^-$  осуществляется исключительно через промежуточные изовекторные экзотические состояния  $Z_b(10610)$  и  $Z_b(10650)$ . Проведены тесты работоспособности самой большой по площади подсистемы установки Belle-II – детектора нейтральных долгоживущих каонов и мюонов, созданной физиками ФИАН.*

Детектор Belle, введенный в эксплуатацию в 1999 году, находился в точке столкновения асимметричного электрон-позитронного коллайдера КЕКВ (Цукуба, Япония). Успешная работа установки при светимости ускорителя, превышающей расчетную почти в 2 раза, позволила набрать за 11 лет рекордный объем данных около  $1000 \text{ фбн}^{-1}$ . Хотя изначальной задачей эксперимента Belle являлось изучение CP-нарушения в распадах B-мезонов, созданный универсальный детектор не только позволил добиться поставленной цели, но и дал возможность получить новые результаты в физике двухфотонных взаимодействий,  $\tau$ -лептона и кваркония. В частности, благодаря интенсивной работе эксперимента Belle, за последнее десятилетие было найдено около трех десятков экзотических состояний чармония и боттомония, и этот список продолжает пополняться. Однако, несмотря на огромный объем экспериментальных результатов и усилия теоретиков, природа большинства открытых экзотических состояний по-прежнему не очевидна.

Недавно в эксперименте Belle при энергии в системе центра масс 10.866 ГэВ российские ученые впервые обнаружили рождение двух

состояний экзотического заряженного боттомония. Хотя новые состояния были найдены в процессе  $e^+e^- \rightarrow Z_b(10610,10650)^+\pi^- \rightarrow h_b(nP)\pi^+\pi^-$  ( $n = 1,2$ ), до последнего времени оставалось неясным, рождаются новые  $Z_b(10610,10650)^+$ -состояния непосредственно в континууме или через промежуточные  $\Upsilon$ -резонансы.

Для выяснения механизма рождения экзотического заряженного боттомония ученые ФИАН, используя полную статистику, набранную в эксперименте Belle, впервые измерили энергетические зависимости сечений  $e^+e^- \rightarrow h_b(nP)\pi^+\pi^-$  ( $n = 1,2$ ). Полученные сечения содержат пики  $\Upsilon(10860)$ - и  $\Upsilon(11020)$ -состояний боттомония, а вклад континуума совместим с нулем. Таким образом, впервые показано, что рождение  $h_b(nP)$ -состояний идет через образование  $\Upsilon(10860)$ - и  $\Upsilon(11020)$ -резонансов в  $e^+e^-$ -аннигиляции.

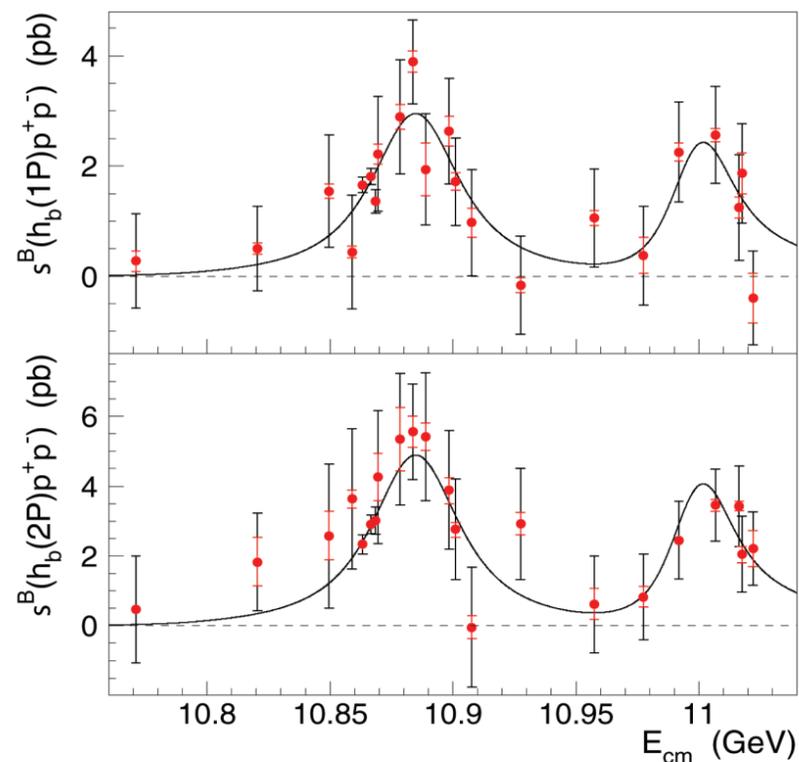
Изучение резонансной структуры переходов  $\Upsilon(11020) \rightarrow h_b(nP)\pi^+\pi^-$  ( $n = 1,2$ ) впервые показало, что этот процесс протекает исключительно через экзотические промежуточные изовекторные состояния  $Z_b(10610)$  и  $Z_b(10650)$ . Гипотеза о том, что рождается только  $Z_b(10610)$  исключена на уровне 3.3 стандартных отклонений.

Эксперимент Belle-II является продолжением эксперимента Belle в научном центре КЕК. Для проведения дальнейших исследований на новом качественном уровне в настоящий момент завершается создание нового усовершенствованного ускорителя SuperKEKB и детектора Belle-II. Интегральная светимость за время работы эксперимента должна составить  $50 \text{ абн}^{-1}$ , при пиковой светимости  $8 \cdot 10^{35} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ . Таким образом, с учетом увеличения эффективности реконструкции, точность измерений по сравнению с экспериментом Belle должна улучшиться почти на порядок.

Группа физиков ФИАН создала самую большую по площади подсистему установки Belle-II – детектор нейтральных долгожи-

вущих каонов и мюонов.

В 2016 г. ученые ФИАН подключили систему реконструкции долгоживущих каонов и идентификации мюонов к системе считывания эксперимента Belle-II, а также провели тесты работоспособности созданной системы. Кроме того, получены первые результаты тестов на шумах кремниевых фотоумножителей (SiPM), пригодные для отладки процедуры их самокалибровки, выработан алгоритм определения и выставления оптимального рабочего напряжения, начата работа по его реализации в прошивке FPGA электроники считывания. Были созданы и оптимизированы программы реконструкции долгоживущих каонов и идентификации мюонов в детекторе.



Зависимость сечения процесса  $e^+e^- \rightarrow h_b(nP)\pi^+\pi^-$  ( $n = 1, 2$ ) от энергии для  $n = 1$  (сверху) и  $n = 2$  (внизу). Точки с ошибками – данные, кривая – результат подгонки когерентной суммой двух амплитуд Брейта-Вигнера. Наблюдаются четкие пики  $\Upsilon(10860)$ - и  $\Upsilon(11020)$ -состояний боттомония.

#### Результаты опубликованы:

1. R. Mizuk et al., Energy scan of the  $e^+e^- \rightarrow h_b(nP)\pi^+\pi^-$  ( $n = 1, 2$ ) cross sections and evidence for  $\Upsilon(11020)$  decays into charged bottomonium-like states, Phys. Rev. Lett. 117, 142001 (2016).

## Обнаружение в плазмофокусной установке сверхбыстрых плотных компактных плазменных сгустков

Впервые лазерно-оптическими методами в электроразрядной установке типа плазменный фокус обнаружены плотные быстро движущиеся плазменные сгустки, генерируемые в момент обрыва тока разряда. Характерные параметры сгустков: электронная плотность  $\geq 10^{19} \text{ см}^{-3}$ , характерный размер порядка 1 мм, аксиальная скорость  $\geq 2 \times 10^7 \text{ см/с}$ , время генерации  $\leq 10 \text{ нс}$ .

Существование таких сгустков расходится с традиционными представлениями о механизмах генерации плазменных потоков за счет эффекта кумуляции при сжатии конической токовой оболочки к оси Z плазменной установки и объясняется, по всей видимости, быстрым развитием МГД неустойчивостей пинча.

Плазма зондировалась излучением второй гармоники YAG лазера с длительностью импульса 5 нс и длиной волны 0.53 мкм.

Измерения электронной плотности плазмы проводились с помощью интерферометра Маха-Цандера.

Полученные результаты позволят полнее и точнее разобраться в процессах генерации жестких и корпускулярных излучений и плазменных потоков в Z-пинчевых разрядах. Результаты найдут применение в материаловедческих экспериментах по созданию новых материалов.

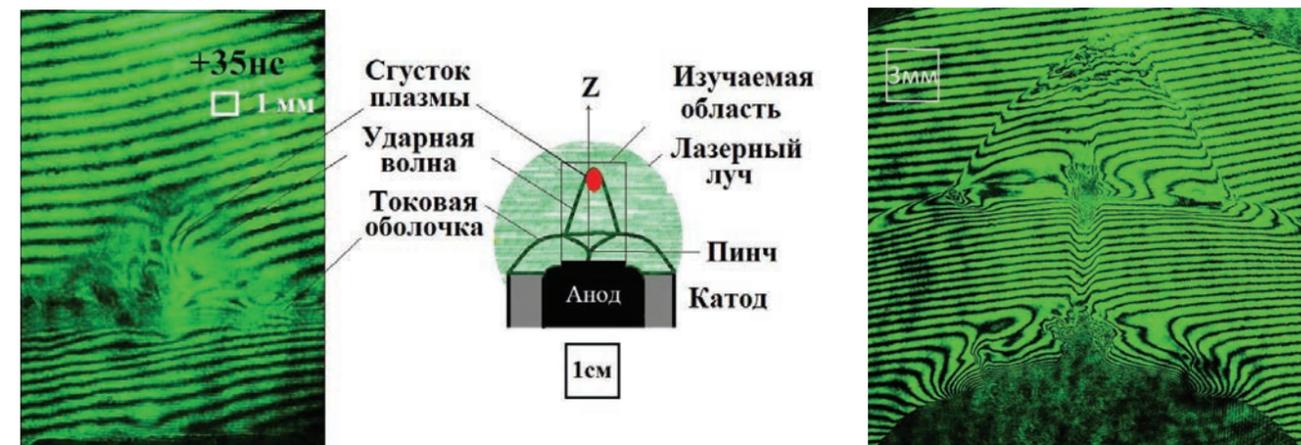


Рисунок слева – фотоснимок сделан через 35 нс после развала пинча, длительность зондирующего лазерного импульса 5 нс. Полный ток разряда 0.3 МА, рабочий газ – аргон при давлении 1 Торр. Рисунок справа – поясняет основные элементы плазменного образования и плазменной установки.

Распространение плазменного сгустка в окружающем пространстве.

#### Результаты опубликованы:

1. С. Н. Полухин, А. М. Джаманкулов, А. Е. Гурей, В. Я. Никулин, Е. Н. Перегудова, П. В. Си-лин. Измерение лазерно-оптическим методом скорости плазменных струй, генерируемых в килоджоульном плазменном фокусе для различных газов. ФИЗИКА ПЛАЗМЫ, 2016, т. 42 (12), 54.

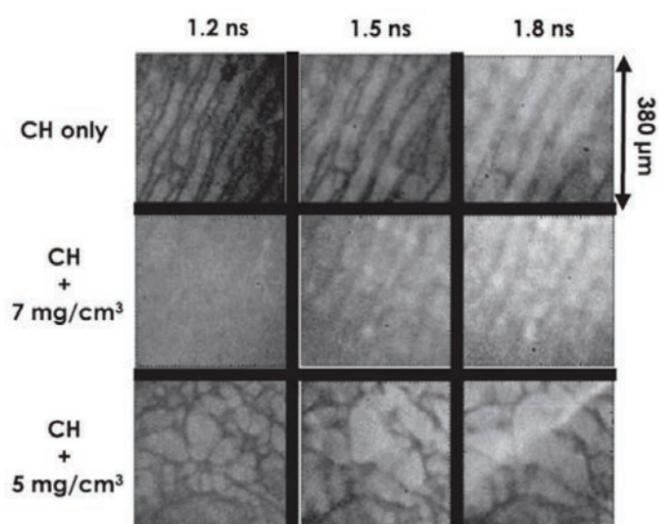
## Мишени с пенами докритической плотности, тормозящие рост неустойчивостей в лазерном эксперименте

В рамках Европейских программ HiPER и COST разработаны и изготовлены мишени с пенами докритической плотности. При лазерном облучении, периодически модулированном по поверхности, продемонстрировано уменьшение роста неустойчивостей в 2–3 раза в присутствии пены на полимерной мишени (CH пленка), что критически важно для успешного сжатия вещества по схеме лазерного термоядерного синтеза.

Коллектив ученых из Франции, США, России и Японии в совместном эксперименте на лазерной установке OMEGA (LLE, Rochester University) продемонстрировали яркое достижение по уменьшению в несколько раз лазерного импринта с применением пластиковых пен докритической плотности (для 351 нм).

На фронте абляции CH-пленки, несущей на облучаемой лазером стороне слой наноструктурированной CHO-пены, РТ-неустойчивости уменьшались в 2 и даже в 3 раза по сравнению с одной только пленкой CH при заданной периодической модуляции интенсивности по сечению лазерного пучка.

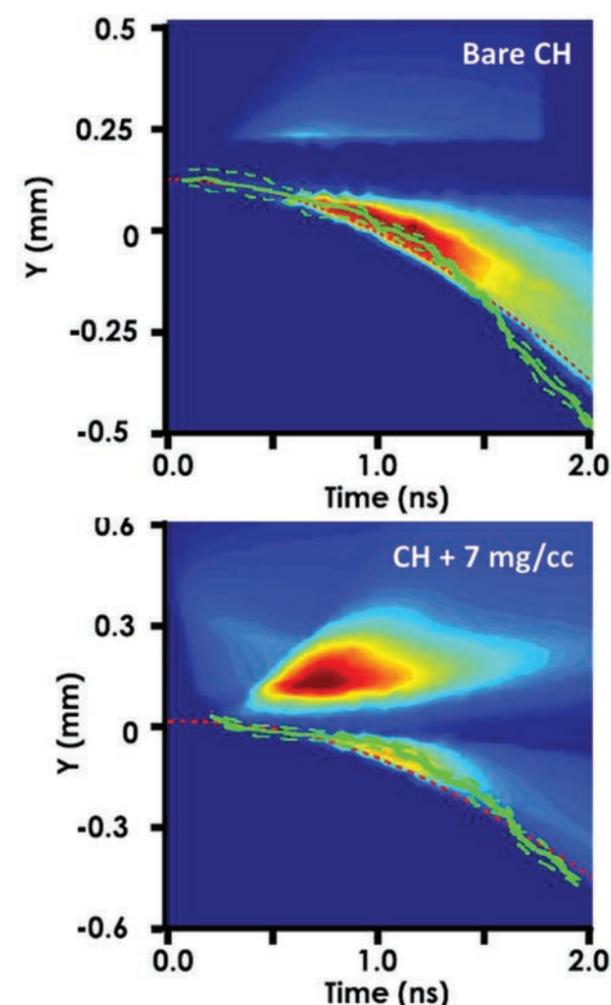
Успеху содействовало конструирование мишени на медном основании с наблюдательной щелью для диагностик собственного свечения плазмы по всей глубине, наноструктурирование пены в виде аэрогеля, создание модульной физической модели оболочечной мишени: полимерный слой (модель оболочки) и пены разной плотности, а также размеры частей мишени, допускающие сравнимые условия облучения и измерений на выбранном лазере и возможность применения последовательно алгоритмов расчета по программам взаимодействия лазерного излучения с плазмой и гидродинамического кода.



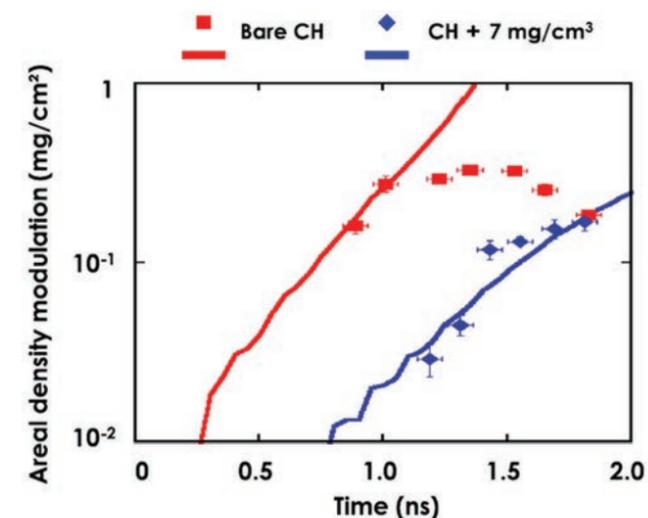
Рентгенограммы мишеней CH и с докритической пеной под действием модулированного лазерного импульса: виден сглаживающий эффект пены, максимальный для 7 мг/см<sup>3</sup>.

Удивило наблюдение периодических трехмерных пространственных структур по поверхности и в объеме плазмы. Динамика и нагрев плазмы (измерения по РЭОК), рассеяние Мандельштама–Бриллюэна (FABS), измерения в проходящем рентгене (U-backlighting, XRFC), а также численные эксперименты взаимно

подтверждают обнаруженный механизм и эффективность параметрических процессов для выравнивания на мишени распределения энергии в лазерном пучке. Всё это оказывается чрезвычайно важным для применения в сферических экспериментах с лазерными мишенями без дорогих усложнений драйвера.



Движение излучающего фронта в мишенях различной плотности: – данные РЭОК; – численное моделирование. Вверху – только CH пленка, внизу – CH пленка с пеной.



Развитие во времени модуляции погонной плотности мишеней. Экспериментальные точки, расчетные линии: – только пленка, – то же с пеной.

### Результаты опубликованы:

1. B. Delorme, M. Olazabal-Loumé, A. Casner, Ph. Nicolai, D. T. Michel, G. Riazuelo, N. Borisenko, J. Breil, S. Fujioka, M. Grech, A. Orekhov, W. Seka, A. Sunahara, D. H. Froula, V. Goncharov, and V. T. Tikhonchuk. Experimental demonstration of laser imprint reduction using underdense foams. *Physics of Plasmas* 23, 042701 (2016).

## Разработка комплекса технологий получения оптических керамик больших размеров

Совместно с ФИРЭ РАН им. В. А. Котельникова создан комплекс технологий получения оптической керамики больших размеров на основе алюмоиттриевого граната легированного неодимом и иттербием, и исследовано лазерное качество полученной керамики методом измерения зависимости порога лазерной генерации при диодной накачке от длины резонатора разработанным методом синхронизации поперечных мод.

Основной проблемой технологии получения ИАГ керамики лазерного качества является задача устранения остаточных пор. В рамках процесса твердофазного реактивного спекания большое число факторов ответственно за появление остаточной пористости. В частности, исследовались такие факты как морфология и дисперсность порошков исходных оксидов, отступление от стехиометрии в химическом составе смеси оксидов, условия компактирования и спекания, а также наличие и тип спекающих добавок.

Исследовано влияние спекающих добавок оксидов  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$  и  $\text{MgO}$  на величину оптимальной температуры спекания, рост зерен керамики, суммарный объем остаточных пор и уровень оптического качества получаемых керамик. Были найдены лучшие комбинации спекающих добавок и, в итоге,

получены образцы YAG:Nd (1 at.%) керамик высокого оптического качества (рис.1).

Предложен оригинальный метод определения остаточной концентрации пор путем измерения порога лазерной генерации полученных керамик при продольной диодной накачке в условиях синхронизации поперечных мод. Детали этого метода описаны в работах [1,2]. При изменениях длины резонатора  $L$  измерялась величина мощности накачки, соответствующая порогу генерации. Диодная продольная накачка имела размер в активном элементе в 2.5 раза меньше, чем размер нулевой пространственной моды резонатора, что удовлетворяло условию реализации синхронизации поперечных мод [1].

Для значений длины резонатора  $L$ , при которых происходит синхронизация попе-

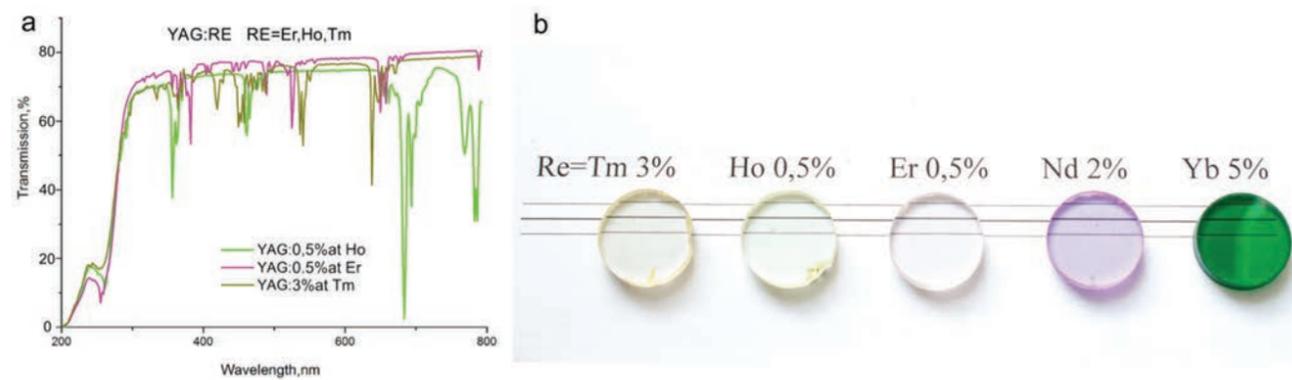


Рис. 1. Оптическое (in-line) пропускание образцов керамик  $(\text{Y}_{2,91}\text{Tm}_{0,09})\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ;  $(\text{Y}_{2,85}\text{Yb}_{0,15})\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ;  $(\text{Y}_{2,985}\text{Ho}_{0,015})\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ;  $(\text{Y}_{2,985}\text{Er}_{0,015})\text{Al}_5\text{O}_{12}$  (a) и общий вид этих образцов (b). Диаметр образцов 21 мм.

речных мод, мощность накачки, соответствующая порогу генерации, резко уменьшается (Рис.2). В этих условиях величина накачки становится очень чувствительной к любым неоднородностям активной среды. С использованием образцов керамики Konoshima Chemical Corp. как эталона были измерены спектры пороговых величин накачки образцов керамик YAG: Nd (1at. %) с различной концентрацией остаточных пор.

Данный метод чувствителен к наличию дефектов и пор в образцах керамик, особенно в случае малых концентраций дефек-

тов и остаточных пор. Увеличение объемной концентрации пор с величины 1–2 ppm (для керамик Konoshima) до 20 ppm и с 20 до 60 ppm приводит к увеличению порога генерации в 10 и 20 раз соответственно.

Сравнение с эталонным образцом керамики фирмы Konoshima Chemical Co., Ltd позволяет утверждать, что лазерное качество полученной керамики практически не уступает качеству эталонного образца (рис. 2).

Полученные результаты позволяют создавать компактные лазеры нового поколения с высокими мощностями и КПД.

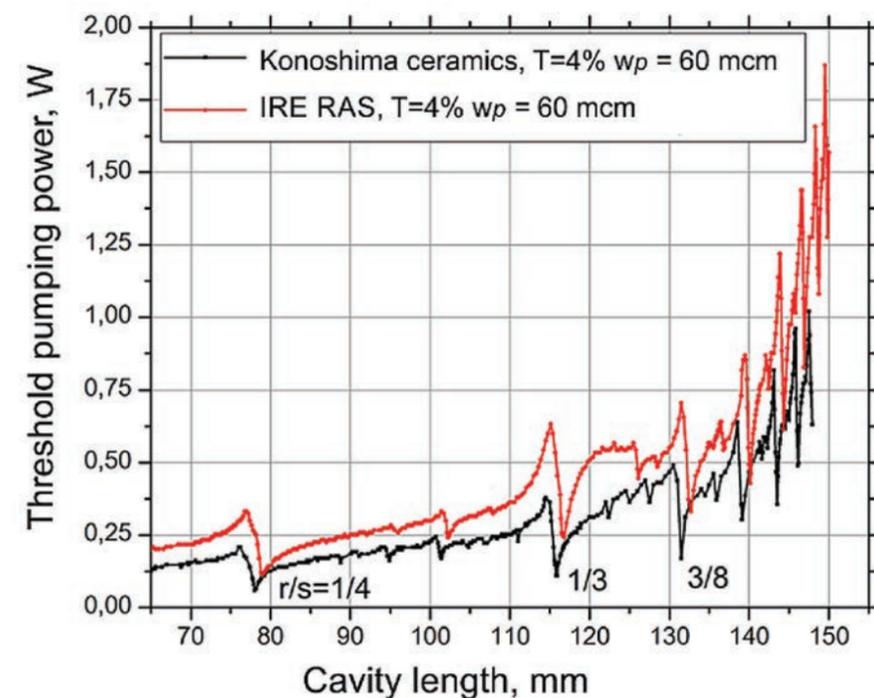


Рис. 2. Пороговая мощность накачки как функция длины резонатора для двух образцов лазерной керамики. Измерения выполнены в одинаковых условиях.  $W_p$  – радиус луча накачки,  $T = 4\%$  – коэффициент отражения выходного зеркала резонатора.

### Результаты опубликованы:

1. V. V. Bezotosnyi, E. A. Cheshev, M. V. Gorbunkov, A. L. Koromyslov, P. V. Kostyukov, M. S. Krivonos, Yu. M. Popov, V. G. Tunkin. Behavior of threshold pump power of diode end-pumped solid-state lasers in critical cavity configurations. *Laser Phys. Lett.*, 2015, 12 ( 2 ), 025001.
2. V. V. Bezotosnyi, O. N. Krokhin, A. L. Koromyslov, E. A. Cheshev, Y. L. Kopylov, V. B. Kravchenko, K. V. Lopukhin, I. M. Tupizin. Generation characteristics of YAG:Nd laser with YAG: Cr<sup>4+</sup> passive lock on the base of oxide ceramics. 2015 Proceedings, 5th symposium on Coherent Optical Radiation of Semiconductor Compounds and Structures. Moscow–Zvenigorod, 2016, 23–6 November.

## О взаимодействии фемтосекундных импульсов с металлами

Представлено решение уравнений, описывающих генерацию низкочастотного электромагнитного излучения при облучении поверхности металла маломощным фемтосекундным импульсом s-поляризованного излучения. Выявлено, что источниками терагерцевого излучения являются пондеромоторное воздействие, ток увлечения и неоднородность температуры вдоль поверхности металла. Сравнение этих источников показало, что в типичных условиях как ток увлечения, так и температурный градиент дают вклады одного порядка в низкочастотный сигнал.

При взаимодействии фемтосекундных импульсов с металлами сравнительно просто реализуются условия, в которых возможно проявление обусловленных электронами проводимости нелинейных эффектов. Одним из таких эффектов является генерация терагерцевого излучения, которая наблюдалась экспериментально в таких металлах, как серебро и золото, железо, никель и медь. Источниками низкочастотного излучения являются нелинейные токи, возникающие в скин-слое металла при воздействии фемтосекундных импульсов s- или p-поляризованного излучения. Количественное те-

оретическое описание генерации нелинейных токов предполагает последовательный учет поляризации воздействующего поля. Вместе с тем, есть и общие закономерности генерации, которые проще выявить в рамках рассмотрения воздействия s-поляризованного излучения. Исходя из этого положения, в настоящем сообщении дан сравнительный анализ трех механизмов генерации нелинейных токов и терагерцевого излучения при воздействии на металл фемтосекундного импульса s-поляризованного излучения.

Наиболее известный механизм – пондеромоторное воздействие неоднородного

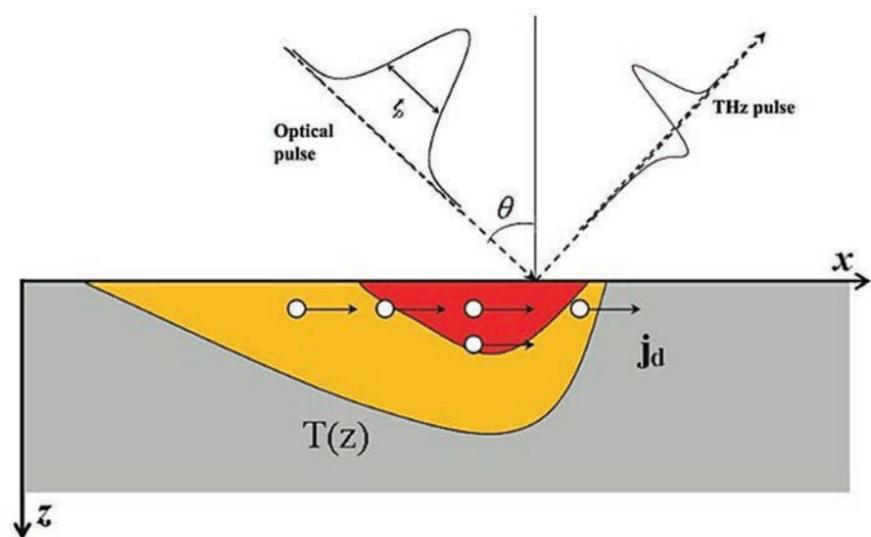


Рис. 1. Поверхность металла, облучаемая оптическим импульсом и сгенерированный терагерцевый импульс

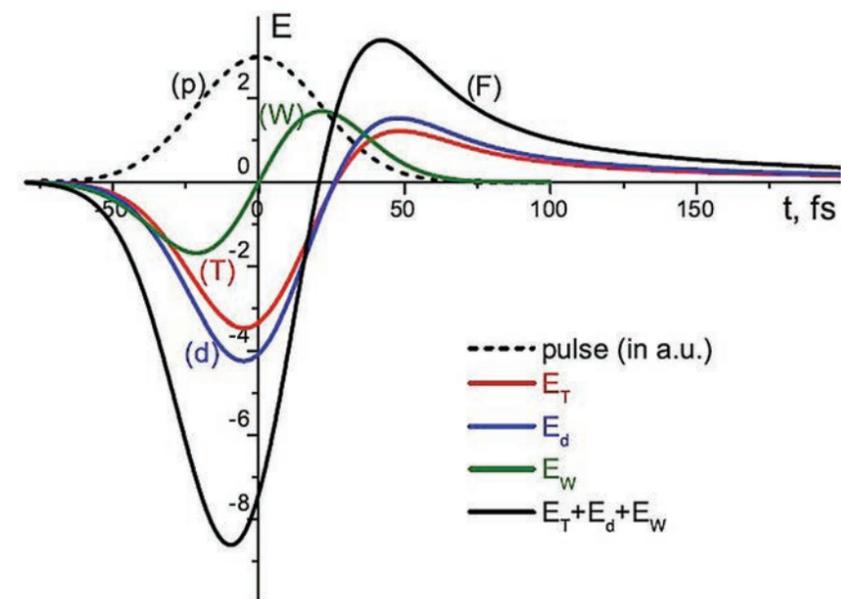


Рис. 2. Зависимости от времени сравнительного вклада в низкочастотное поле от градиента температуры (красная кривая), тока увлечения (синяя) и пондеромоторного воздействия (зеленая). Штриховая кривая – профиль воздействующего импульса.

высокочастотного поля в основном локализованного в скин-слое. Другой механизм реализуется при наклонном падении лазерного излучения, когда высокочастотное излучение порождает нелинейный ток увлечения вдоль поверхности металла. Еще один механизм связан с неоднородным нагревом электронов при поглощении поля в скин-слое из-за столкновений электронов. Возникающий при этом градиент температуры электронов является источником изменяющегося во времени нелинейного тока и низкочастотного излучения.

В работе [1] было получено выражение для упомянутых выше нелинейных токов и найдено порождаемое ими поле низкочастотного излучения. Показано, что во время воздействия фемтосекундного импульса все три источника низкочастотного поля дают

немалый вклад в суммарное поле излучения, хотя вклад из-за пондеромоторного воздействия меньше, чем от тока увлечения в меру произведения частоты столкновений электронов на длительность импульса. После окончания воздействия импульса вклад от пондеромоторного воздействия экспоненциально мал. При этом два других убывают пропорционально времени в степени  $3/2$  и сравнимы по величине. Медленное убывание полей от этих двух источников обусловлено сравнительно медленным уменьшением градиента температуры из-за переноса тепла в глубь металла и медленной диффузией квазистационарного магнитного поля, генерируемого током увлечения. Для золота соответствующие коэффициенты диффузии магнитного поля и температуры сравнимы по величине.

### Результаты опубликованы:

1. S. G. Bezhanov, S. A. Uryupin, Free-electron mechanisms of low-frequency radiation generation on metal surfaces, Optics Letters, Vol. 41, Issue 21, pp. 4975–4978 (2016).

## Синхронизированное ускорение ионов медленным светом

Предложен новый механизм синхронизированного ускорения ионов «медленным» светом из однородных низкоплотных мишеней. Основная идея состоит в первоначальном замедлении падающего лазерного импульса у фронтальной поверхности мишени и последующем ускорении импульса по мере распространения внутри мишени. Это позволяет эффективно захватить и синхронизировать движения лазерно-инициированного ускоряющего электрического поля и ионов. Эффективность предложенной модели ускорения подтверждена с помощью трехмерного численного моделирования для современных лазерных систем петаваттного уровня.

Создание компактных источников энергетичных заряженных частиц и вторичного электромагнитного излучения является одним из основных направлений использования мощных лазерных систем ультракороткой длительности. На пути создания источника электронных пучков высоких энергий лазерными методами достигнут значительный прогресс, связанный с ис-

пользованием схемы ускорения электронов из газовых струй полем кильватерной волны, что привело к росту энергии электронов на несколько порядков. В то же время за последние пятнадцать лет удалось добиться лишь незначительного увеличения максимальной энергии лазерно-ускоряемых ионов. Все еще не ясно, какие мишени являются наиболее оптимальными для ускорения

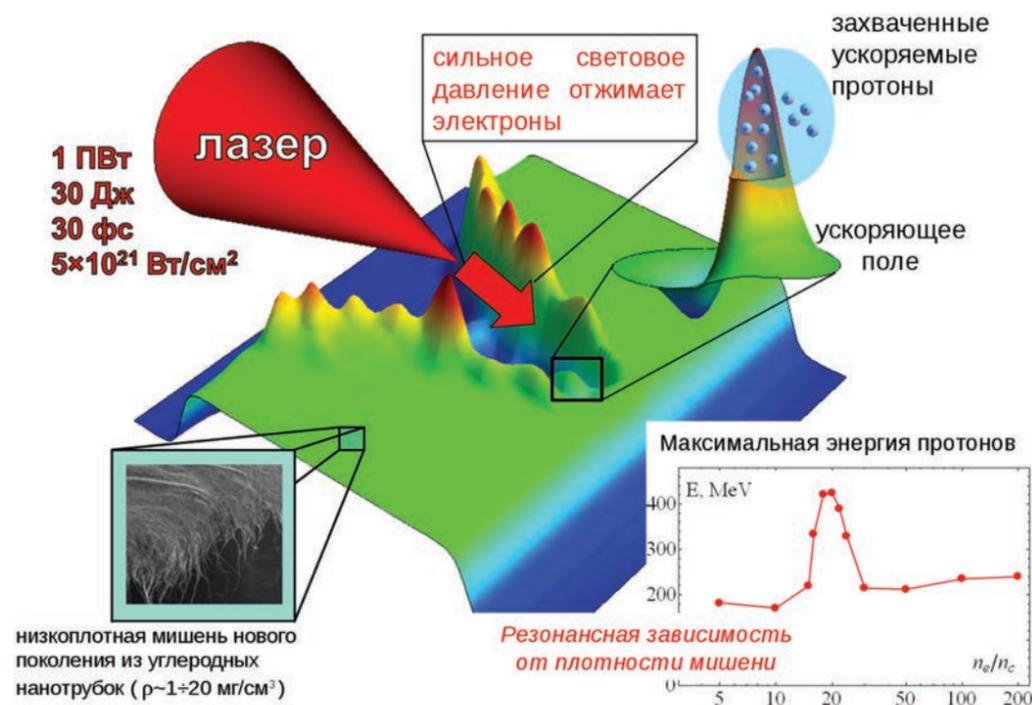


Схема ускорения протонов из малоплотных мишеней (приведены на вставке слева) в режиме СУМС. Зависимость энергии протонов от плотности мишени (вставка справа).

ионов, до конца не исследованы механизмы их ускорения.

Важным механизмом в лазерных методах ускорения частиц является пондеромоторное воздействие мощного импульса света на электроны, которые, выдавливаясь световым давлением, создают сильный электростатический двойной слой, поле которого и ускоряет ионы. В плазменной мишени с околоритической электронной плотностью лазерный импульс может сначала почти остановиться, а затем проникать, ускоряясь по мере движения. Реализуется сценарий ускоренного движения электростатического слоя внутри мишени, поддерживаемого электронным сгустком, движущимся на фронте лазерного импульса под действием его светового давления. Это электростатическое поле способно захватить протоны в момент практически полной остановки на границе мишени, а затем ускорить их до высоких энергий по мере распространения внутри мишени. Описанный механизм синхронизированного ускорения протонов «медленным» светом (СУМС) изучен на основе простой аналитической модели и с помощью трехмерного численного моделирования. Най-

ден режим идеальной синхронизации ускоряемых протонов и распространяющегося лазерного импульса. Рассмотрено ускорение протонов в условиях (более типичных для эксперимента) неидеальной синхронизации с импульсом и найдены условия захвата протонов ускоряющим полем. Обсуждается возможность СУМС с использованием градиентных малоплотных мишеней. Показано, что наиболее эффективной генерации высокоэнергетичных протонов короткими лазерными импульсами релятивистской интенсивности в режиме СУМС можно ожидать из мишеней с наибольшей концентрацией водорода в приповерхностном слое толщиной порядка микрона. Эффективность предложенного механизма ускорения ионов подтверждена с помощью трехмерного численного моделирования взаимодействия лазерного импульса с низкоплотными мишенями. На основе проведенных трехмерных расчетов найдены плотности мишеней, для которых реализуется ускорение протонов в режиме СУМС. Продемонстрировано его преимущество по сравнению с традиционным ускорением из тонких твердотельных фольг для лазерного импульса петаваттной мощности.

### Результаты опубликованы:

1. A.V.Brantov, E.A.Govras, V.F.Kovalev, and V.Yu.Bychenkov, Synchronized ion acceleration by ultraintense slow light. *Phys. Rev. Lett.*, 2016, 116, 085004(1–5).
2. V.Yu.Bychenkov, A.V.Brantov, and E.A.Govras, Comparative study of ion acceleration by linearly polarized laser pulses from optimized targets of solid and near-critical density. *Plasma Phys. Contr. Fus.Special Issue*, 2016, 58, N3, 034022(1–5).
3. A.V.Brantov, D.V.Romanov, and V.Yu.Bychenkov, Optimization of a laser-based proton source and a new mechanism of ion acceleration. *IEEETrans. PlasmaSci.*, 2016, 44, N4, 364–368.
4. В. Ю. Быченков, Е. А. Говрас, А. В. Брантов, Ускорение ионов интенсивным «медленным» лазерным светом в малоплотных мишенях. *Письма в ЖЭТФ*, 2016, 104, N9, 640–645.

## Эффективный лазер на красителях с накачкой полупроводниковыми лазерами

Достигнут рекордный КПД лазера на красителях, накачиваемого полупроводниковыми лазерами, за счет применения 3-х зеркального резонатора с компенсацией астигматизма и поперечной накачки. Дифференциальный КПД для красителя Coumarin 540A составил 18 %.

Разработан способ эффективной накачки полупроводниковыми лазерами лазеров на красителях, позволяющий обеспечить энергетический КПД более 10%. Из-за малого времени релаксации возбужденного состояния молекул красителей лазеры на них требуют высокой плотности мощности накачки, которую трудно обеспечить полупроводниковыми лазерами. Поэтому до настоящего времени с такой накачкой не удавалось получить КПД более нескольких процентов. С появлением мощных полупроводниковых лазеров возникла возможность перехода от

традиционных источников накачки ЛК (громоздких и дорогостоящих систем) к гораздо более компактной и недорогой диодной накачке. Нами применена поперечная накачка мощными нитрид-галлиевыми полупроводниковыми лазерами в схеме с полным внутренним отражением генерируемого излучения в кювете с красителем с целью минимизации потерь внутри резонатора. Такая схема позволяет легко наращивать число лазеров накачки и увеличивать интенсивность возбуждения. В результате при использовании трех полупроводниковых лазеров полу-

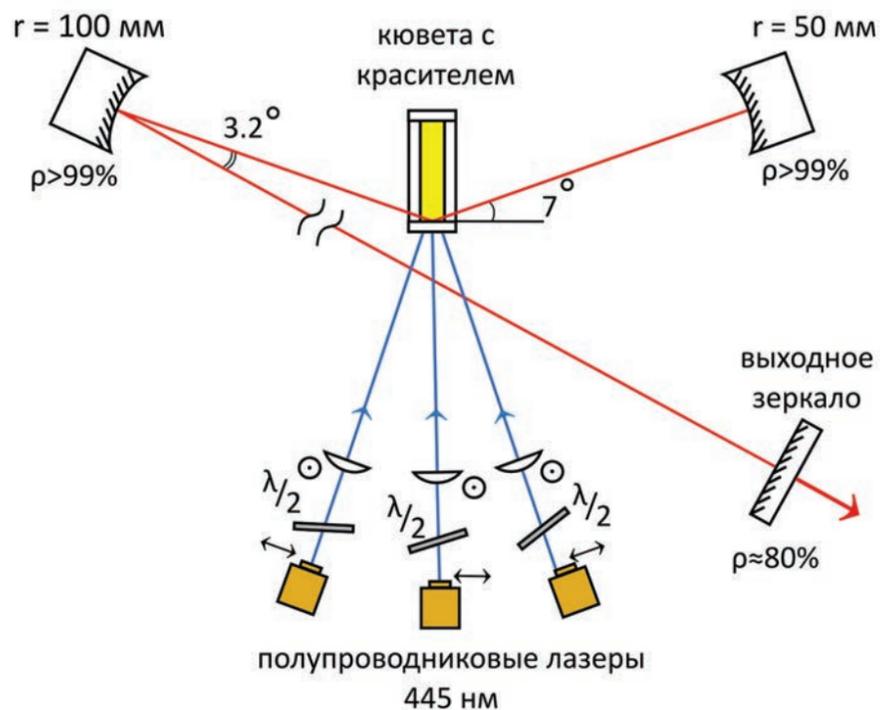


Рис. 1. Схема лазера на красителе с поперечной накачкой полупроводниковыми лазерами.

чена эффективная генерация излучения на растворах ряда красителей. Это открывает возможность создания более простых, компактных и дешевых лазеров на красителях, в том числе и с перестройкой длины волны генерируемого излучения.

Лазеры на красителях с полупроводниковой накачкой могут быть востребованы в разных областях, где требуется простой и недорогой источник света с перестраиваемой длиной волны, вплоть до демонстрационных кабинетов в школах и ВУЗах.

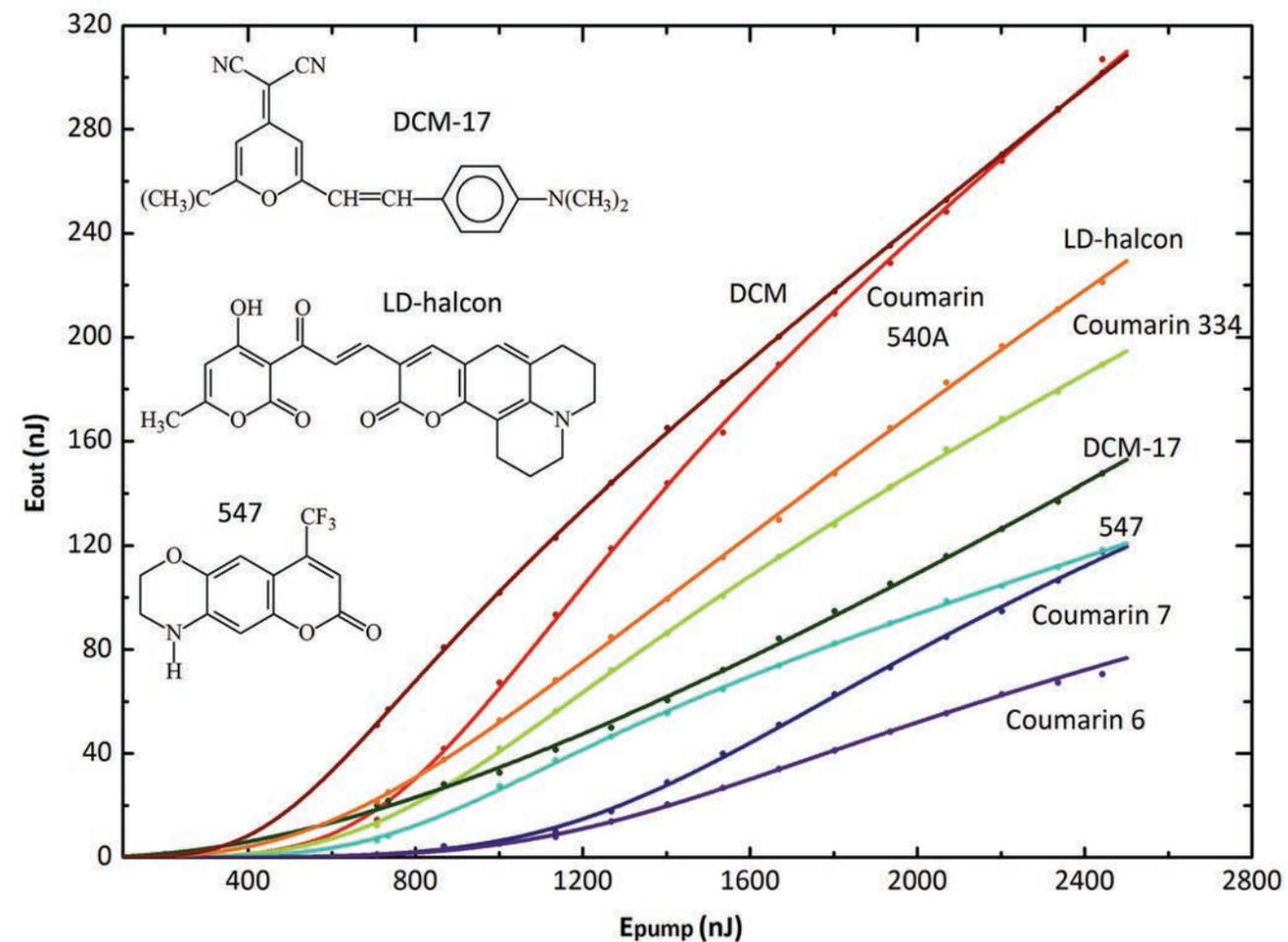


Рис. 2. Зависимость выходной энергии лазера на разных красителях от энергии накачки полупроводниковыми лазерами. Структурные формулы приведены для новых красителей.

### Результаты опубликованы:

1. O.A. Burdukova, M.V. Gorbunkov, V.A. Petukhov and M.A. Semenov. Diode-pumped dye laser. Laser Phys. Lett., 13(10), 105004 (2016).

## Импульсный Fe:ZnSe лазер ( $\lambda = 4.1$ мкм) с энергией в импульсе 10.6 Дж

В Fe:ZnSe лазере с накачкой излучением Er:YAG лазера достигнута импульсная энергия в 10.6 Дж в длинном импульсе (1.3 мс) при  $T = 85$  К.

В Fe:ZnSe лазере с накачкой излучением Er:YAG лазера достигнута импульсная энергия в 10.6 Дж в длинном импульсе (1.3 мс) при  $T = 85$  К. Эффективность преобразования поглощенной энергии накачки в энергию лазера составила 53%. При температурах, обеспечиваемых термоэлектрическим элементом (Пельтье элементом), энергия превышает 1 Дж при эффективности примерно 30%. Предполагается дальнейшее увеличение энергии импульса до уров-

ня 5–7 Дж при температуре кристалла 220–230 К.

Результат достигнут за счет получения активных кристаллов Fe:ZnSe большего объема. Кристаллы были выращены из паровой фазы методом физического транспорта на затравку по уникальной методике, разработанной в ФИАНе. Однородное по объему легирование осуществлялось в процессе роста. Концентрация ионов Fe составляла  $10^{18}$  см $^{-3}$ .

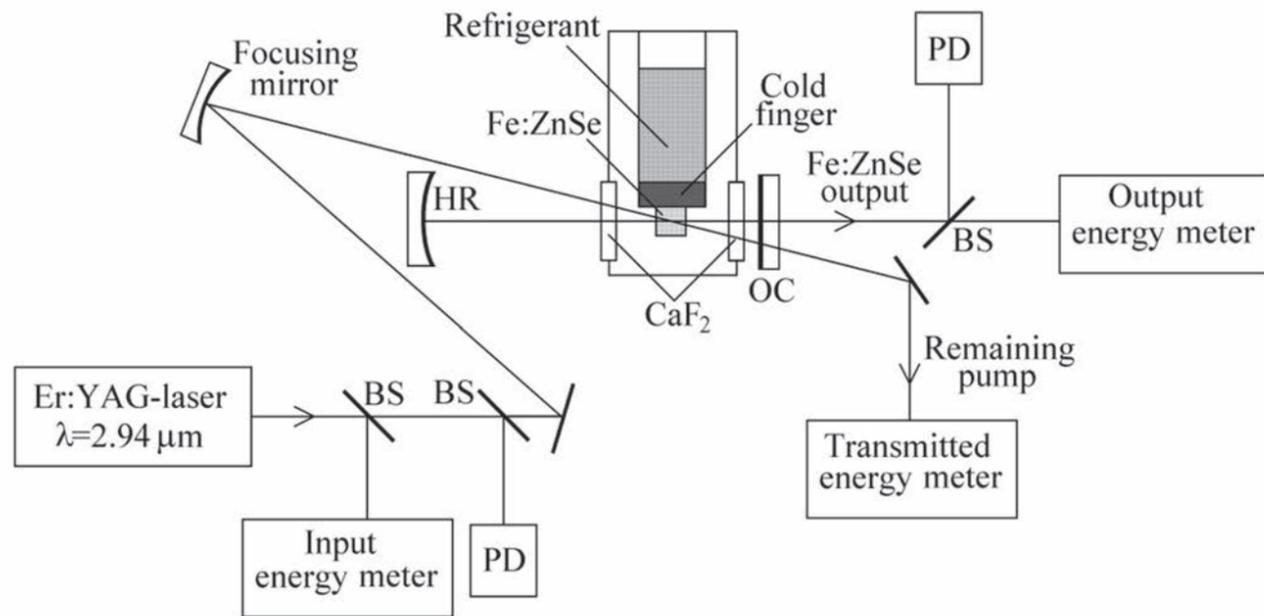
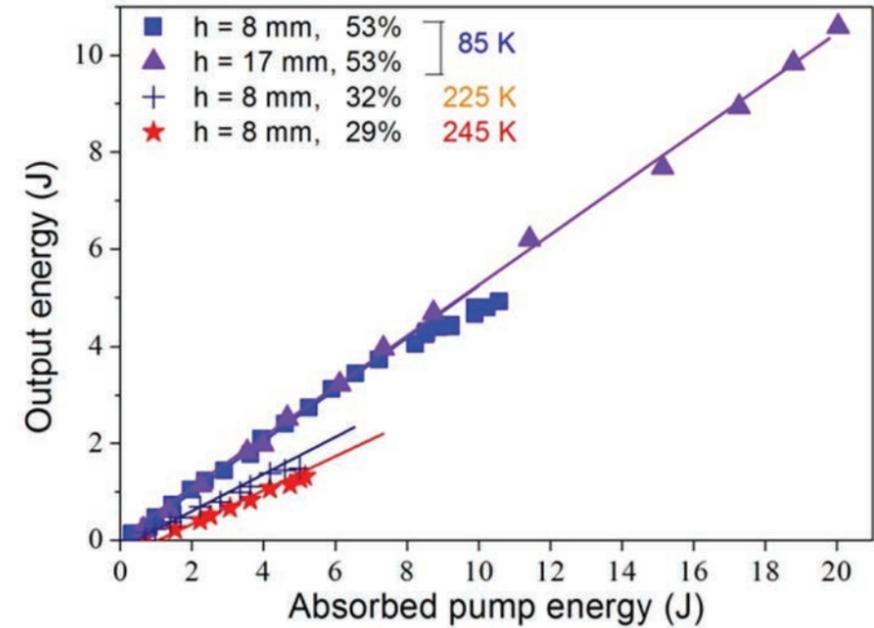
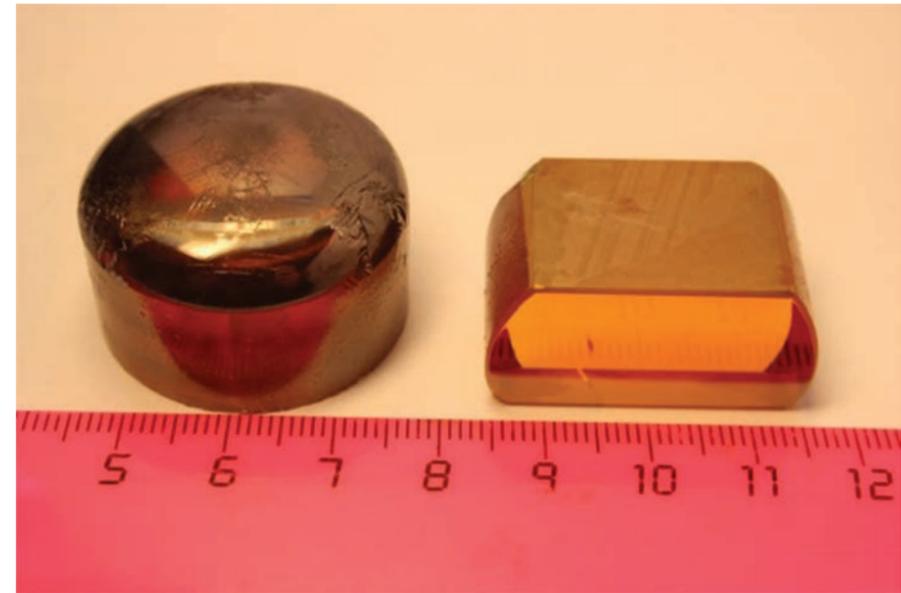


Схема экспериментальной установки для исследования Fe:ZnSe лазера.



Зависимости выходной энергии лазера от вложенной энергии для двух различных кристаллов Fe:ZnSe при температурах 85, 225 и 245 К.



Выращенные кристаллы Fe:ZnSe.

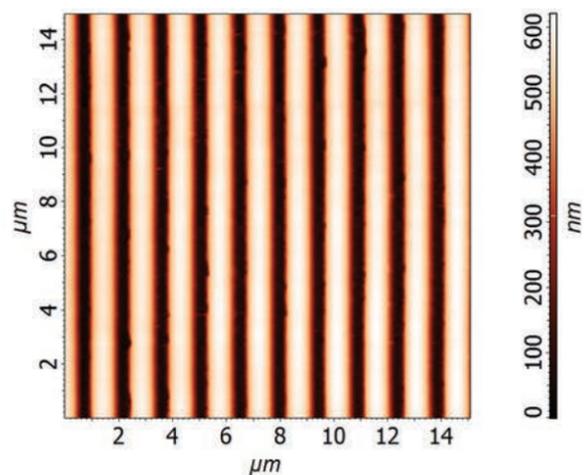
### Результаты опубликованы:

1. Kozlovsky V.I., Korostelin Y.V., Podmar'kov Y.P., Skasyrsky Y.K., Frolov M.P. Middle infrared Fe $^{2+}$ :ZnS, Fe $^{2+}$ :ZnSe and Cr $^{2+}$ :CdSe lasers: New results. Journal of Physics: Conference Series. 740 (1), 1 September 2016, Article number 012006.
2. Frolov M.P., Korostelin Y.V., Kozlovsky V.I., Podmar'kov Y.P., Skasyrsky Y.K. Efficient 10-J pulsed Fe:ZnSe laser at 4100 nm. Proceedings – 2016 International Conference Laser Optics, LO 2016, 7549630, pp. R110.

## Формирование микрорельефа на поверхностях кристаллов ZnSe и CdSe при абляции излучением эксимерного KrF-лазера

На поверхностях кристаллов ZnSe и CdSe при абляции излучением наносекундного эксимерного KrF-лазера сформированы просветляющие микрорельефы для среднего инфракрасного излучения.

Создание просветляющего микрорельефа на поверхностях оптических элементов представляет значительный интерес для ряда применений, в частности в мощных лазерах среднего ИК диапазона.



Рисю 1. Изображение решетки с периодом 1.5 мкм на поверхности CdSe :Cr, сформированной пятью импульсами с  $F = 140$  мДж/см<sup>2</sup> (слева), и усредненный по вертикали профиль решетки (справа).

На поверхностях кристаллов CdSe и ZnSe были сформированы одномерные решетки с периодом 0.5–2.3 мкм при абляции двумя интерферирующими пучками излучения наносекундного эксимерного KrF-лазера, обеспечивающих плотность энергии облучения до 500 мДж/см<sup>2</sup> за один импульс. Поверхности с нанесенным микрорельефом исследовались с помощью сканирующего зондового микроскопа Solver P-47 Pro (NTMDT). Спектры пропускания исследуемых образцов измеряли с помощью ИК фурье-спектрометра ФСМ 2201 (ООО «Инфраспек»).

Исследованы зависимости формы и глубины решетки от плотности энергии при облучении одиночным импульсом, а также от числа импульсов при заданной плотности энергии (рис. 2).

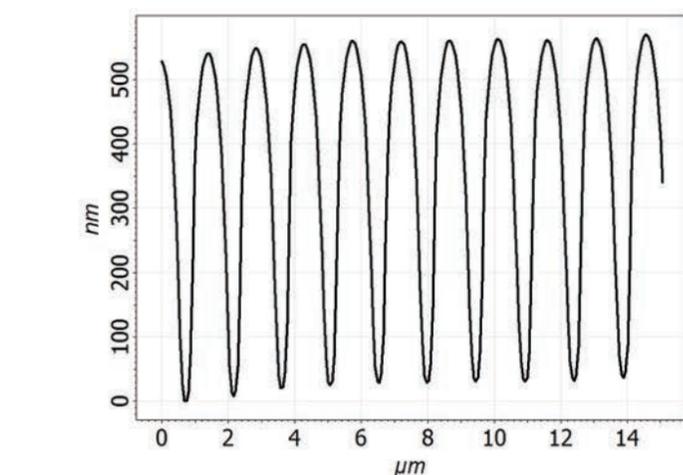


Рис. 2. Зависимость глубины решетки  $h$  с периодом 1.5 мкм на поверхности кристалла ZnSe от числа импульсов лазера  $N$  при  $F = 100$  мДж/см<sup>2</sup> и частотах следования 100 Гц.

Порог абляции был равен 80 мДж/см<sup>2</sup>. Максимальная глубина одномерной решетки составила ~0.57 периода. Продемонстрирована возможность нанесения двумерных решеток с периодами 1 и 1.5 мкм. Путем нанесения одномерной решетки с периодом 1.5 мкм и глубиной 0.53 мкм на поверхность кристалла CdSe получено просветление этой поверхности на длине волны 4 мкм.

Полученный результат позволяет увеличить эффективность и надежность мощных лазеров среднего инфракрасного диапазона.

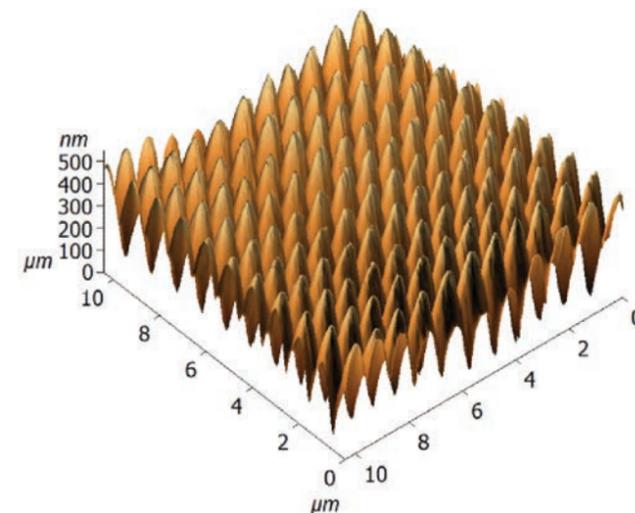


Рис. 3. Изображение микроструктуры поверхности кристалла ZnSe, полученное с помощью атомно-силового микроскопа.

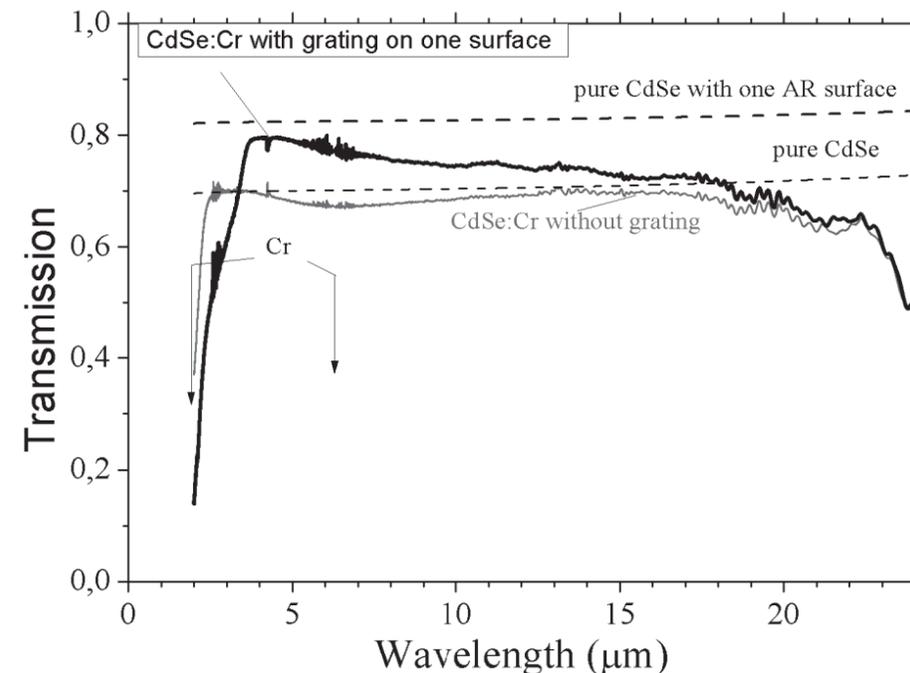


Рис. 4. Спектры пропускания  $T$  исходного кристалла CdSe:Cr (1) и кристалла с решеткой на одной из его поверхностей (2), а также расчетные спектры пропускания чистого кристалла CdSe с френелевским отражением от обеих поверхностей (3) и кристалла, идеально просветленного с одной стороны (4). Стрелки указывают положение линий поглощения Cr. На вставке представлены соответствующие разности  $\Delta T$  спектров пропускания кристалла CdSe:Cr с решеткой и без нее.

### Результаты опубликованы:

1. С.К. Вартопетов, А.В. Захряпа, В.И. Козловский, Ю.В. Коростелин, В.А. Михайлов, Ю.П. Подмарьков, И.Ю. Порофеев, Д.Е. Свиридов, Я.К. Скасырский, М.П. Фролов, И.М. Юткин. Исследование формирования микрорельефа на поверхности кристаллов ZnSe и CdSe методом абляции с использованием эксимерного KrF-лазера. Квантовая Электроника 2016, т. 46(10), 903.

## Двухкаскадная временная компрессия фемтосекундного импульса излучения иттербиевого лазера

*На основе эффектов уширения спектра импульса при фазовой самомодуляции и генерации второй гармоники осуществлено сжатие 260 фс импульса излучения иттербиевого лазера до 11 фс с энергетической эффективностью 14%.*

Мощные фемтосекундные лазерные системы на основе кристаллов, активированных ионами иттербия, в настоящее время получили наиболее широкое распространение вследствие их высокой энергетической эффективности, компактности, надежности и низкой стоимости по сравнению с другими фемтосекундными лазерами. Обычно иттербиевые фемтосекундные лазерные системы строятся по схеме: задающий генератор – регенеративный усилитель. В задающем генераторе в качестве активной среды используется кварцевое волокно, в регенеративном усилителе – кристалл, активированный ионами иттербия. Достаточно узкая полоса усиления в кристаллах не позволяет генерировать в таких лазерных системах импульсы короче 200 фс. Поэтому при необходимости для получения импульсов более короткой длительности используются методы нелинейной компрессии.

В данном сообщении приводятся результаты экспериментов по временной компрессии импульса излучения иттербиевой

лазерной системы ТЕТА (Авеста-Проект). Выходная мощность излучения составляла 5 Вт при частоте повторения импульсов 100 кГц и длительности импульса 260 фс. Схема двухкаскадной компрессии показана на рис. 1.

На первом этапе компрессия импульса осуществлялась на основе эффекта уширения спектра в процессе нелинейной фазовой самомодуляции при распространении импульса в газонаполненном капилляре. После проведенного анализа [1] для достижения максимальной степени компрессии был выбран кварцевый капилляр длиной 600 мм и внутренним диаметром 150 мкм, заполненный ксеноном при давлении 10 атм. Пропускание капилляра составило 40 %. На рис. 2а показан спектр импульса с положительным частотным чирпом на выходе капилляра. Временная компрессия импульса проводилась при многократном отражении широкополосного излучения от чирпированных зеркал. На рис. 2б показана автокорреляционная функция компрессированного

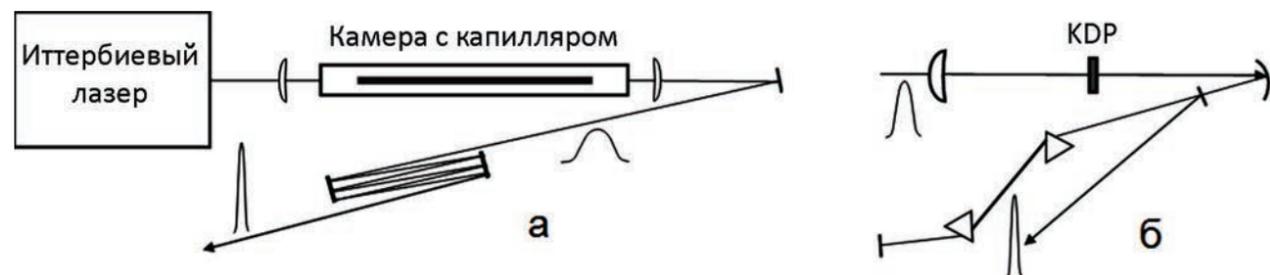


Рис. 1. Схема двухкаскадного компрессора импульсов с использованием капилляра (а) и генератора второй гармоники (б).

импульса, длительность которого в предположении гауссовой формы составила 17 фс.

Второй этап компрессии был выполнен с использованием эффекта уширения спектра импульса при генерации в кристалле второй гармоники от чирпированного импульса [2]. Схема компрессора показана на рис. 2б. Вторая гармоника генерировалась в кристалле KDP, в который фокусировался импульс излучения после выхода из систе-

мы чирпированных зеркал капиллярного компрессора. Величина частотного чирпа варьировалась посредством изменения числа отражений от чирпированных зеркал. Импульс второй гармоники сжимался в призмном компрессоре. Длительность компрессированного импульса составила 11 фс (рис.3), эффективность генерации второй гармоники – 35%. В целом, эффективность двухкаскадной компрессии достигала 14%.

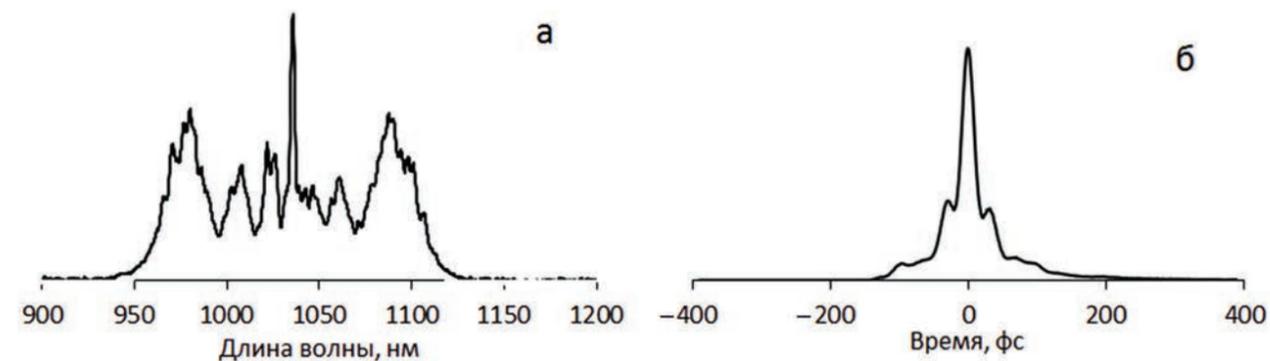


Рис. 2. Спектр импульса на выходе капилляра (а) и автокорреляционная функция компрессированного импульса (б).

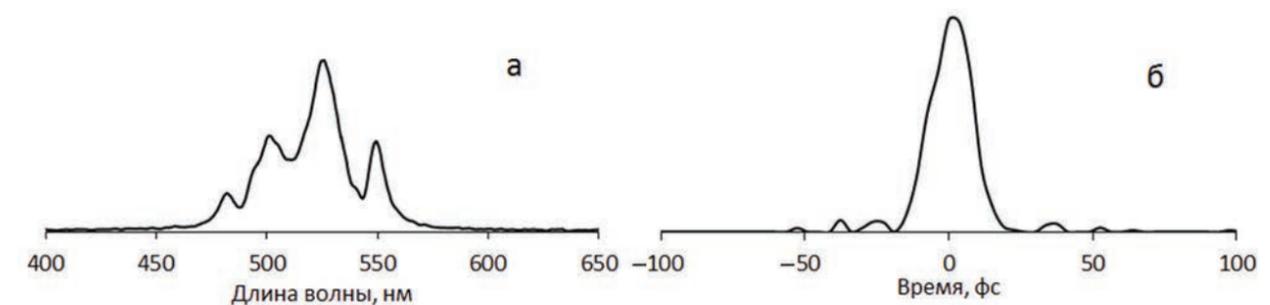


Рис. 3. Спектр импульса второй гармоники (а) и автокорреляционная функция компрессированного импульса (б).

### Результаты опубликованы:

1. Н.В. Диденко, А.В. Конященко, П.В. Кострюков, Л.Л. Лосев, В.С. Пазюк, С.Ю. Теняков, В.В. Брюханов, Временная компрессия импульсов излучения фемтосекундного иттербиевого лазера при частоте повторения импульсов 100 кГц, Квантовая электроника 46 (8) 675 (2016).
2. N.V. Didenko, A.V. Konyashchenko, L.L. Losev, V.S. Pazyuk, S. Yu. Tenyakov, Femtosecond pulse compression based on second harmonic generation from a frequency chirped pulse, Optics Communications 282 (5) 997 (2009).

## Определена возможная версия деградации сжатия термоядерных мишеней непрямого облучения на установке NIF и причина недостижения зажигания

На основе анализа опубликованных результатов экспериментов на мегаджоульном лазере NIF по сжатию капсул в мишенях непрямого облучения с помощью 1D-программы RADIAN в сферической геометрии определены основные параметры процесса сжатия мишени и тенденции при изменении условий облучения. В данной работе рассматривается возможная версия «незажигания» мишени непрямого сжатия в условиях установки NIF, связанная с переносом излучения. Применение 1D-модели к анализу экспериментов NIC позволило выделить условия, соответствующие режиму зажигания, и отличить их от условий, при которых зажигания не наступает.

В 2010–2014 гг. в Ливерморской лаборатории США (LLNL) на лазерной установке NIF (National Ignition Facility, энергия импульса до 1.9 МДж,  $\lambda = 0.35$  мкм) были проведены обширные экспериментальные исследования с целью достижения термоядерного зажигания мишеней непрямого облучения, в том числе в рамках специальной программы NIC (National Ignition Campaign). Как известно, на этом этапе достичь зажигания не удалось. С целью анализа экспериментальных данных нами в работе исследована возможность использования одномерной программы RADIAN и одномерной модели мишени для анализа крайне сложного набора процессов при непрямом сжатии мишени на установке NIF в геометрии, на начальной стадии близкой к цилиндрической. Физическим основанием возможности одномерного описания является необходимость близости последней стадии сжатия капсулы к одномерному процессу.

Численное моделирование в 1D-геометрии не позволяет проводить строгий количественный анализ экспериментальных данных, однако оно реализуемо при меньшем объеме начальной информации

и позволяет определить основные параметры процесса сжатия мишени и тенденции при изменении условий облучения.

Здесь рассматриваются вопросы, связанные с переносом энергии излучением. Отсутствие зажигания может быть связано с недостаточной эффективностью ускорения и сжатия мишени за счет более высокой прозрачности мишени для квантов излучения с энергией в диапазоне 1–6 кэВ, чем предсказывалось в численных расчетах Ливерморской лаборатории. Использование модели, в которой во внутренней капсуле между DT-льдом и испаряемым слоем CH вводится слой, эффективно поглощающий излучение из хольраума, позволяет получить положительный нейтронный выход из мишени (см. таблицу).

Полученный результат указывает, что для достижения зажигания необходим усовершенствованный выбор конструкции капсулы мишени и режима воздействия рентгеновского импульса, которые бы обеспечили снижение пробегов квантов в указанном диапазоне их энергии в 2–4 раза по сравнению с использованными в численных расчетах.

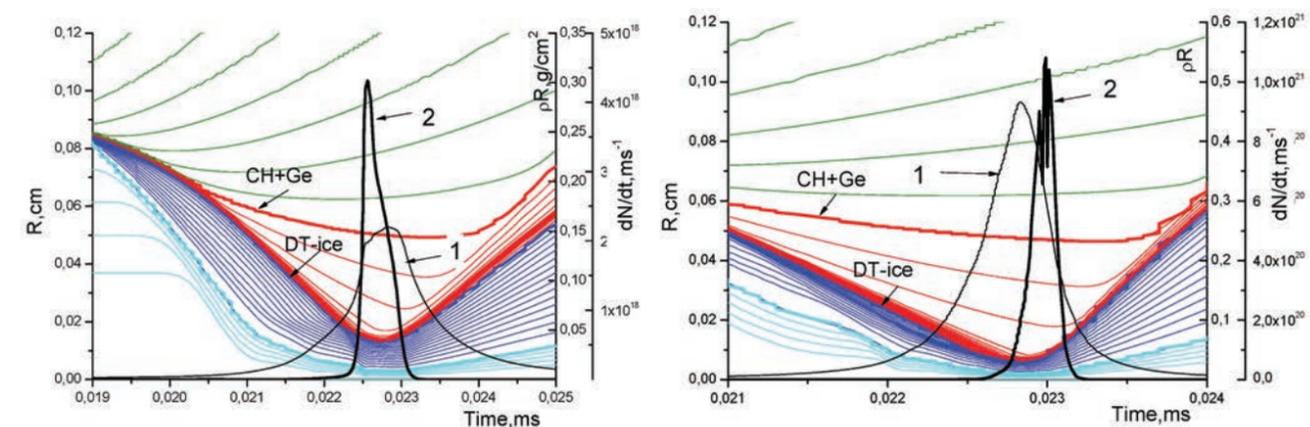
Зависимость нейтронного выхода  $N_{\text{нейтр}}$  и термоядерного энерговыделения  $E_{\text{тр}}$  от коэффициента  $k$  увеличения спектральных коэффициентов поглощения в области CH-капсулы мишени непрямого облучения с добавкой 1% Ge.

$k$	1	3	3.5	4	7	10	20
$N_{\text{нейтр}}, 10^{15}$	1.46	25.6	54.6	187	5560	6000	6440
$E_{\text{тр}}, 10^3$ Дж	4,2	72	154	525	15600	16800	18100

Примечание:  $k$  — коэффициент увеличения спектральных коэффициентов поглощения в области, содержащей примесь Ge.  $k=1$  соответствует спектральным коэффициентам поглощения в CH — веществе капсулы мишени непрямого облучения с добавкой 1% Ge, рассчитанным по методике работы А.Ф. Никифорова, В.Г. Новикова и В.Б. Уварова (Квантово-статистические модели высокотемпературной плазмы. М.: Физматлит, 2000)

Из приведенных данных видно, что существенное увеличение скорости термоядерных реакции и выделение энергии происходит при значениях  $k=3.5-4$  и требует увеличения спектральных коэффициентов поглощения или уменьшения спектральных пробегов в 3–4

раза. Такое уменьшение пробегов излучения приводит к снижению потока энергии излучения в центр мишени, что приводит к увеличению плотности и уменьшению температуры центральной части капсулы, что в конечном итоге приводит к зажиганию.



Зависимости от времени радиусов  $R$  различных слоев внутренней CH-капсулы мишени, оптической толщины  $\rho R$  сжатых областей DT-горючего (кривые 1) и скорости реакций синтеза  $dN/dt$  (кривые 2). Варианты: слева —  $k = 1$ , справа —  $k = 4$ . Наблюдаются отличия в движении оболочки для различных значений  $k$  вблизи момента коллапса.

### Результаты опубликованы:

1. В.Б. Розанов, Г.А. Вергунова. Возможная версия деградации сжатия термоядерных мишеней непрямого облучения на установке NIF и причина недостижения зажигания. ЖЭТФ, том 150, вып. 6 (12), стр. 210–220, 2017.

## Абсорбционно-спектральный фотометрический метод контроля характеристик теплоносителя в ядерном энергетическом реакторе

*Задача измерения малых концентраций борной кислоты в теплоносителе водо-водяного энергетического реактора тесно связана с проблемой безопасности атомных электростанций. Её решение предложено на основе модификации лазерного абсорбционно-спектрального фотометрического метода. Высокая чувствительность метода и возможность мониторинга позволят своевременно обнаруживать разгерметизацию первого контура, а возможность дистанционного измерения – снизить дозы облучения обслуживающего персонала.*

Для своевременного обнаружения протечки теплоносителя из первого контура реактора во второй требуется высокая чувствительность измерения концентрации борной кислоты (до сотых долей миллиграмма на литр теплоносителя). В предлагаемом методе это достигается многократным прохождением импульса зондирующего лазерного излучения через измерительную кювету с веществом теплоносителя с помощью системы отражательных зеркал, образующих петлю

оптической обратной связи выхода измерительной кюветы с её входом, на который через полупрозрачное зеркало посылаются лазерные импульсы с длительностью меньшей времени обхода петли оптической обратной связи. Каждый импульс совершает много оборотов по петле, на каждом из которых его амплитуда регистрируется фотоприёмником и в цифровом виде подаётся на компьютер. Для исключения влияния воды на измерения малых концентраций борной кислоты и по-

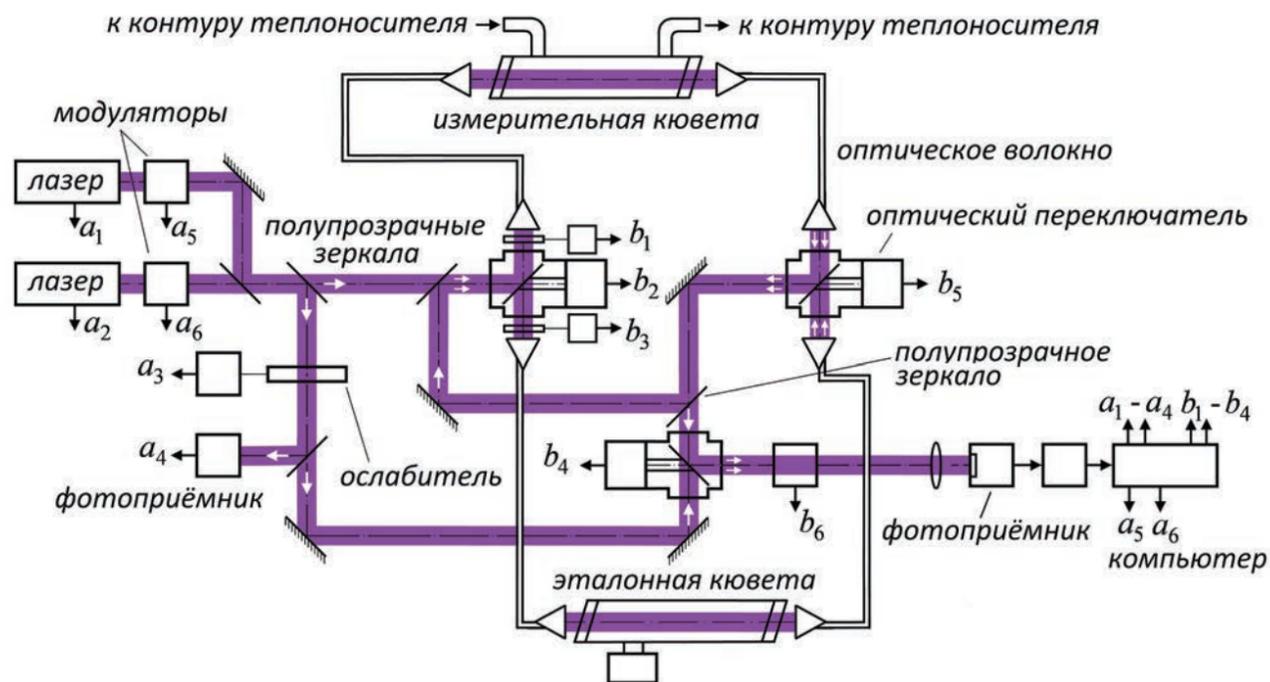


Рис. 1. Оптическая схема системы измерения.

вышения их точности используется дополнительная эталонная кювета, являющаяся полным аналогом измерительной кюветы, но заполненная дистиллированной водой.

Она просвечивается тем же лазерным излучением, что и измерительная кювета, импульсы которого регистрируются после каждого оборота по петле оптической обратной связи тем же фотоприёмником. В компьютере вычисляется отношение амплитуд импульсов, прошедших через измерительную кювету, к амплитудам импульсов, прошедших через эталонную кювету.

Концентрация борной кислоты определяется по изменению этого отношения при каждом новом проходе петли обратной связи. Чувствительность метода зависит от числа проходов, которое обусловлено энергией лазерных импульсов и чувствительностью фотоприёмника. Результаты численного моделирования системы измерения показаны на рисунке ниже.

Вся аппаратура, с которой контактирует человек, с помощью волоконно-оптической линии удалена от реактора на радиационно-безопасное расстояние.

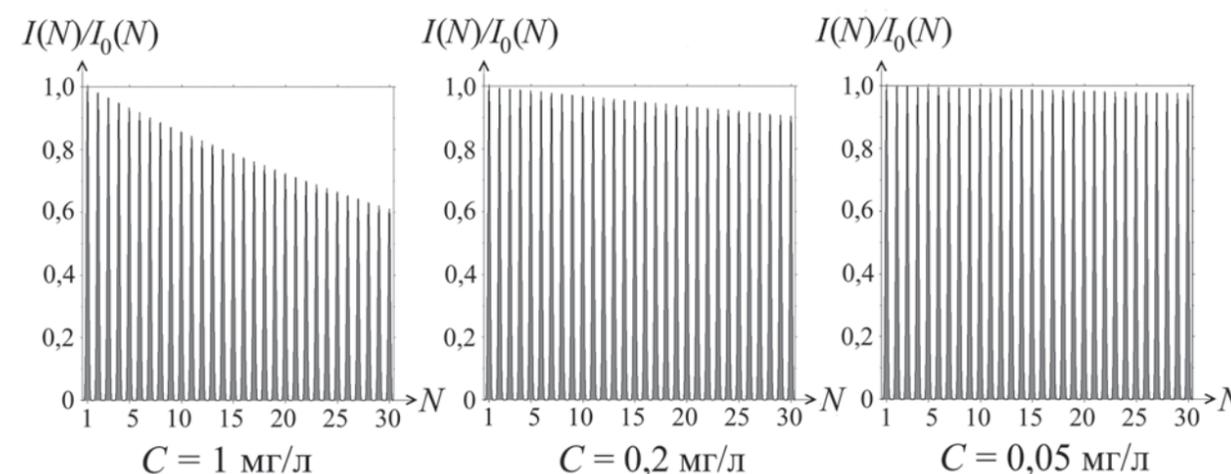


Рис. 2. Зависимость отношения амплитуды лазерных импульсов, прошедших измерительную кювету, к амплитуде лазерных импульсов, прошедших эталонную кювету, от числа проходов  $N$  по петле оптической обратной связи при разных концентрациях борной кислоты.

### Результаты опубликованы:

1. С.К. Манкевич, Е.П. Орлов, Система измерения концентрации борной кислоты в первом контуре теплоносителя ядерного энергетического реактора, Патент № 2594364 РФ. Бюллетень «Изобретения. Полезные модели» № 23 (2016).
2. С.К. Манкевич, Е.П. Орлов, Абсорбционно-спектральный метод контроля характеристик теплоносителя в ядерном энергетическом реакторе, Препринт ФИАН № 12. Москва, 2015.
3. С.К. Манкевич, Е.П. Орлов, Абсорбционно-спектральный фотометрический метод измерения концентрации борной кислоты в теплоносителе контура охлаждения энергетического ядерного реактора, Атомная энергия 121(5): 265–269 (2016).
4. С.К. Манкевич, Е.П. Орлов, Л.Л. Филичкина, Система измерения концентрации борной кислоты в контуре теплоносителя энергетического ядерного реактора, Патент № 2606369 РФ. Бюллетень «Изобретения. Полезные модели» № 36 (2016).

## Безнейтронная ядерная реакция при инерциальном удержании замагниченной плазмы лазерно-ускоренных протонов и ядер бора

*Предложен и теоретически обоснован наименее энергозатратный из известных на сегодняшний день подход к зажиганию безнейтронной ядерной реакции  $p+^{11}B \rightarrow 3\alpha + 8.62 \text{ МэВ}$ .*

Развитие безнейтронной ядерной энергетики на основе реакции протона с бором, которая приводит к образованию трех  $\alpha$ -частиц с суммарной энергией около  $\epsilon_r \approx 8.6 \text{ МэВ}$ , является принципиальной, хотя и трудно осуществимой задачей. По сравнению с другими безнейтронными реакциями эта реакция имеет наиболее высокое сечение главного резонанса,  $\sigma_{\text{max}} \approx 1 \text{ барн}$  (при энергии относительного движения ядер  $E_{\text{rel}} \approx 675 \text{ кэВ}$ ), которое, тем не менее, значительно ниже максимального сечения реакции дейтерия с тритием (6 барн при  $E_{\text{rel}} \approx 60 \text{ кэВ}$ ). По этой причине иницирование энергетически выгодной рВ-реакции сопряжено со значительными начальными затратами энергии, существенно более высокими по сравнению с реакцией синтеза между изотопами водорода.

В результате наших исследований предложен и теоретически обоснован наименее энергозатратный из известных на сегодняшний день подход к зажиганию безнейтронной ядерной реакции протона с бором, который состоит в: (1) создании замагниченной рВ-плазмы с энергией частиц около 0.5–1 МэВ и плотностью, в 3–5 раз превышающей критическую плотность плазмы, во внутренней полости сферической или цилиндрической оболочки за счет воздействия пикосекундного петаваттного лазерного импульса через вводной канал на внутреннюю поверхность оболочки и (2) сжатия до плотности, в несколько раз превышающей плотность твердого бора, и удержании такой плазмы при воздействии

на внешнюю поверхность оболочки наносекундного тераваттного лазерного импульса. Для согласования процессов образования и сжатия плазмы воздействие плазмообразующего импульса должно происходить на финальной стадии ускорения мишени под действием сжимающего импульса. В качестве мишеней предлагается использовать мишени, конструкции которых аналогичны конструкциям сферической (Л.П. Феоктистов. Горизонты ЛТС, в сб. Будущее науки, 1985, вып. 18, с. 168,) или цилиндрической (S.Yu. Gus'kov. Laser and Particle Beams, 2005, v. 23, p. 255) мишеней, предназначенных для быстрого зажигания (N.G. Basov, S.Yu. Gus'kov, L.P. Feoktistov. J. Soviet Laser Research, 1992, v. 13, p. 396) предварительно сжатой плазмы при инерциальном способе удержания (см. рис. 1). Сферическая мишень сжимается вдоль конического направляющего канала, а цилиндрическая, имеющая форму катушки – вдоль торцевых стенок. Отверстия в вершине конического канала и торцевых стенках служат для ввода излучения плазмообразующего лазерного импульса.

На Рис. 2 представлены спектры быстрых электронов, протонов и ядер бора, полученные в расчетах по двумерному PIC-коду при наклонном падении пучка лазерного излучения с длиной волны 1.06 мкм, радиусом 20 мкм, интенсивностью  $10^{19} \text{ Вт/см}^2$  и длительностью импульса 1.6 пс на внутреннюю поверхность цилиндрической мишени радиусом 180 мкм. Образующиеся протоны и ядра бора с энергией несколь-

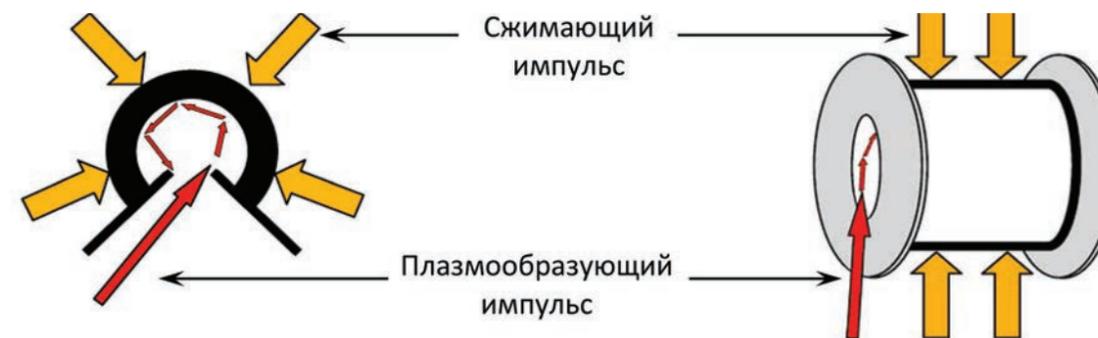


Рис. 1. Сферическая (слева) и цилиндрическая (справа) оболочечные мишени для сжатия и инерциального удержания замагниченной плазмы, образующейся при скользком падении релятивистского лазерного импульса на поверхность внутренней полости мишени.

ко МэВ оказываются замагниченными во «вмороженном» в плазму магнитном поле с напряженностью около 100 МГс.

Установленные параметры лазерных импульсов, необходимые для зажигания рВ-реакции, составляют: плазмо-

образующий импульс – энергия 50 кДж, интенсивность –  $10^{20} \text{ Вт/см}^2$ , длительность – 15 пс, радиус пучка – 36 мкм; сжимающий импульс – энергия 4.1 МДж, интенсивность –  $5 \times 10^{13} \text{ Вт/см}^2$ , длительность – 30 нс.

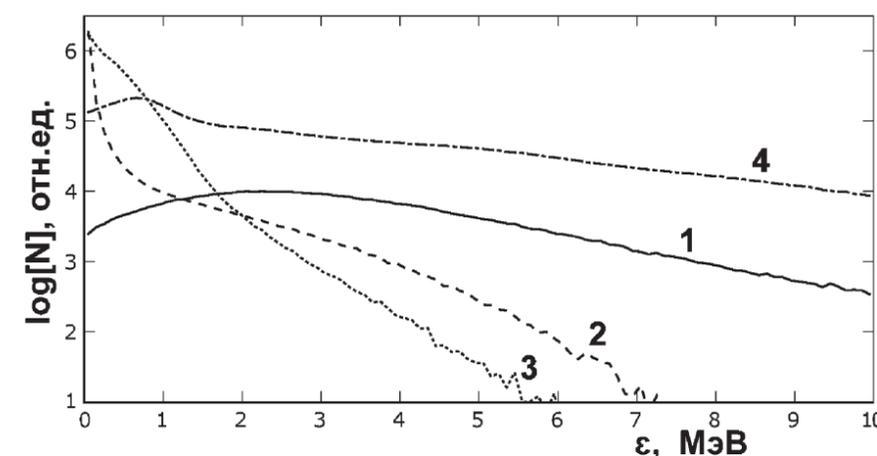


Рис. 2. Энергетический спектр электронов в моменты времени 1.7 пс (кривая 1) и 9.5 пс (2), протонов в момент времени 9.5 пс (3) и ядер бора в момент времени 9.5 пс (4) во внутренней области мишени, ограниченной расстоянием до центра мишени 50 микрон.

### Результаты опубликованы:

1. С.Ю. Гуськов, Ф.А. Корнеев. Безнейтронная ядерная реакция при инерциальном удержании замагниченной плазмы лазерно-ускоренных протонов и ядер бора. Письма в ЖЭТФ, 2016, том 104, вып. 1, стр. 3–8.

## Аналитическое решение для изотермического разлета в вакуум сферического слоя шара с заданной поверхностной плотностью

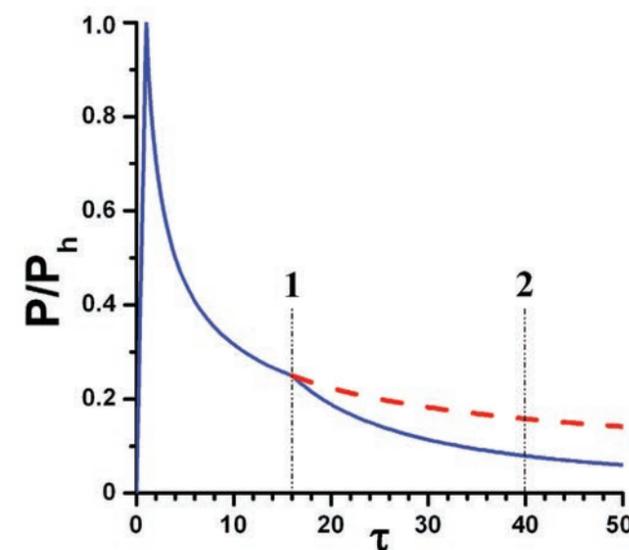
*Получено аналитическое решение, описывающее изотермический разлет в вакуум внешнего слоя шара, при котором масса слоя, нагреваемого при постоянной мощности источника энергии, увеличивается при неизменной поверхностной плотности слоя, остающейся равной произведению начальных значений плотности слоя и глубины его прогрева вплоть до момента, когда движение охватывает всю массу шара.*

Найденное решение, описывающее изотермический разлет в вакуум внешнего слоя шара, при его неизменной поверхностной плотности отличается от известного авторского решения для изотермического сферического разлета заданной массы вещества (В.С. Имшенник. ДАН, 1960, том. 5, с. 263) более медленным законом уменьшения со временем плотности и, как следствие, давления разлетающегося вещества. При разлете массы вещества, значение которой регулируется неизменной поверхностной плотностью, массовая плотность разлетающегося вещества падает со временем значительно медленнее (по закону  $\rho \propto t^{-3/4}$ ), чем в случае разлета с постоянной массой, когда плотность падает как  $\rho \propto t^{-9/2}$ . Температура разлетающегося вещества при сохранении поверхностной плотности падает со временем по закону  $T \propto t^{-1/2}$ , в то время как при постоянной массе нагреваемого вещества она линейно растет со временем. В итоге, сферический разлет внешнего слоя шара с заданной поверхностной плотностью отвечает значительно более медленному уменьшению давления со временем по закону  $P \propto t^{-5/4}$ , чем разлет заданной массы вещества, когда давление падает как  $P \propto t^{-7/2}$ .

Полученное решение является ключевым для решения двух задач инерциального термоядерного синтеза (ИТС): (1) зажигания

предварительно сжатой мишени ИТС сфокусированной ударной волной при нагреве мишени потоком быстрых электронов, ускоренных в поле мощного лазерного излучения и (2) сжатия мишени ИТС при ее облучении потоком высокоэнергетических ионов.

Особенно интенсивные исследования в различных лабораториях мира ведутся в области первой задачи в связи с развитием работ в области одного из наиболее перспективных методов зажигания мишени ИТС сфокусированной ударной волной (В.А. Щербakov. Физика плазмы, 1983, том 9, с. 409), получившего название «shock ignition». Этот метод предполагает использование лазерного импульса, состоящего из двух частей. Первая, протяженная во времени часть предназначается для предварительного сжатия мишени, а вторая, более короткая и значительно более мощная – для генерации зажигающей ударной волны. На стадии зажигания интенсивность излучения на поверхности предварительно сжатой мишени должна составлять не менее 10 ПВт/см<sup>2</sup>. Сценарий зажигания предполагает, что при таких условиях облучения значительная часть лазерной энергии трансформируется в энергию быстрых электронов, которые вносят доминирующий вклад в абляционное давление, обеспечивающее генерацию зажигающей ударной волны.



*Зависимость от времени давления, возникающего при нагреве внешнего слоя сферической дейтерий-тритиевой мишени для типичных условий ее предварительного сжатия (радиус мишени – 250 мкм, плотность – 10 г/см<sup>3</sup>) пучком моноэнергетических быстрых электронов с энергией 50 кэВ, образующихся при воздействии импульса третьей гармоники излучения Nd-лазера с интенсивностью  $5 \times 10^{16}$  Вт/см<sup>2</sup> (сплошная линия). Давление нормировано на давление  $P_h = 2.3$  Гбар в момент начала плоского разлета слоя  $t_p$ , безразмерное время есть  $\tau = t/t_p$ . Маркерами 1 и 2 показаны, соответственно, время смены плоского разлета слоя на сферический и конечное время генерации ударной волны. Штриховая линия – продолжение зависимости давления плоского решения на область сферического разлета.*

### Результаты опубликованы:

1. С.Ю. Гуськов. Изотермический разлет в вакуум сферического слоя шара с заданной поверхностной плотностью. Письма в ЖЭТФ, 2016, том 103, вып. 7, стр. 557–560.

На рисунке представлена зависимость уменьшения абляционного давления для типичных условий зажигания мишени ИТС сфокусированной ударной волной, рассчитанная на основе полученного решения, описывающего разлет внешнего слоя шара при его нагреве потоком моноэнергетических быстрых электронов. Радиус сжатой мишени в виде дейтерий-тритиевого шара составляет 250 мкм, плотность – 10 г/см<sup>3</sup>, мощность источника нагрева – 110 ТВт, длительность импульса – 600 пс, энергия электронов – 50 кэВ (M. Lafon, X. Ribeyre, and G. Schurtz. Phys. Plasmas, 2010, vol.20, 052704).

Представленные данные показывают, что эффект сферического разлета при нагреве предварительно сжатой мишени потоком моноэнергетических быстрых электронов приводит к значительному (более, чем в 2 раза) уменьшению давления зажигающей ударной волны по сравнению с используемым ранее решением для плоского разлета. Полученное решение дает количественные соотношения для коррекции условий генерации зажигающей волны, а именно, для увеличения энергии быстрых электронов, начальной массы мишени и, следовательно, интенсивности лазерного импульса, как на стадии сжатия, так и на стадии зажигания.

## Эксперименты по взаимодействию коротковолнового лазерного импульса с протяженной плазмой

Выполнен цикл экспериментальных и теоретических исследований взаимодействия мощного лазерного импульса с предварительно созданной лазерной плазмой. Эксперименты выполнены на йодном лазере PALS (Исследовательский центр PALS, Прага, Чехия) при последовательном облучении плоских мишеней двумя импульсами. Численные расчеты проведены по двумерной гидродинамической программе ATLANT-HE (Физический институт им. П.Н. Лебедева), описывающей тормозное и резонансное поглощение лазерного излучения и генерацию быстрых электронов.

Область исследований относится к одному из наиболее перспективных методов зажигания мишени инерциального термоядерного синтеза – зажиганию сферической мишени сходящейся ударной волной (В.А. Щербаков. Физика плазмы, 1983, том 9, с. 409), получившего название «shock ignition». Этот метод предполагает использование лазерного импульса, состоящего из двух частей. Первая, протяженная во времени часть, предназначена для предварительного сжатия мишени, а вторая, более короткая и значительно более мощная, – для генерации зажигающей ударной волны. На стадии зажигания интенсивность излучения на поверхности предварительно сжатой мишени должна быть не менее  $10^{16}$  Вт/см<sup>2</sup>. При воздействии мощной части импульса на плазму, образующуюся на стадии предварительного сжатия, значительная часть лазерной энергии трансформируется в энергию быстрых электронов. Ключевым является вопрос о вкладе переноса энергии быстрыми электронами в абляционное давление, которое должно обеспечить генерацию зажигающей ударной волны.

В экспериментах мишень, состоящая из массивной основы из меди, покрытой слоем полиэтилена, облучалась двумя лазерными пучками. Первый, с энергией 40 Дж

излучения на основной частоте и с радиусом 300 мкм, создавал плазму, на которую с задержкой в 1.2 нс воздействовал второй лазерный импульс со значительно большей энергией (200 Дж) излучения на частоте третьей гармоники (Рис. 1). Длительность каждого импульса была 0.3 нс. За счет из-

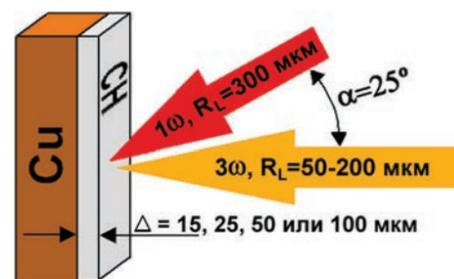


Рис. 1. Конструкция мишени и способ ее облучения в эксперименте.

менения радиуса пятна фокусировки от 200 до 50 мкм исследовалось влияние интенсивности мощного лазерного импульса в интервале  $10^{15}$ – $10^{16}$  Вт/см<sup>2</sup> на передачу лазерной энергии в быстрые электроны и ударную волну.

Наиболее важные результаты состоят в следующем. В случае первой гармоники излучения основного импульса эффективность передачи энергии в ударную волну определяется переносом поглощенной лазерной энергии быстрыми электронами,

образующимися в процессе резонансного поглощения. Это приводит к значительному увеличению абляционной плотности и, как следствие, абляционного давления по сравнению с электронной теплопроводностью. Наличие предварительно образованной плазмы приводит в этом случае к значительному увеличению энергии, содержащейся в быстрых электронах (до 8% от лазерной энергии). Несмотря на это, в итоге, наличие предварительно созданной плазмы приво-

дило к незначительному снижению эффективности передачи энергии в ударную волну, что объясняется негативным влиянием на условия генерации волны протяженного распределения плотности плазмы между областью генерации быстрых электронов и поверхностью неиспаренной части мишени – эффекта, описанного ранее теоретически (Ph. Nicolai, J.-L. Feugeas, M. Touati, X. Ribeyre, S. Gus'kov, V. Tikhonchuk, et al., Phys. Rev. E, 2014, vol. 89, 033107).

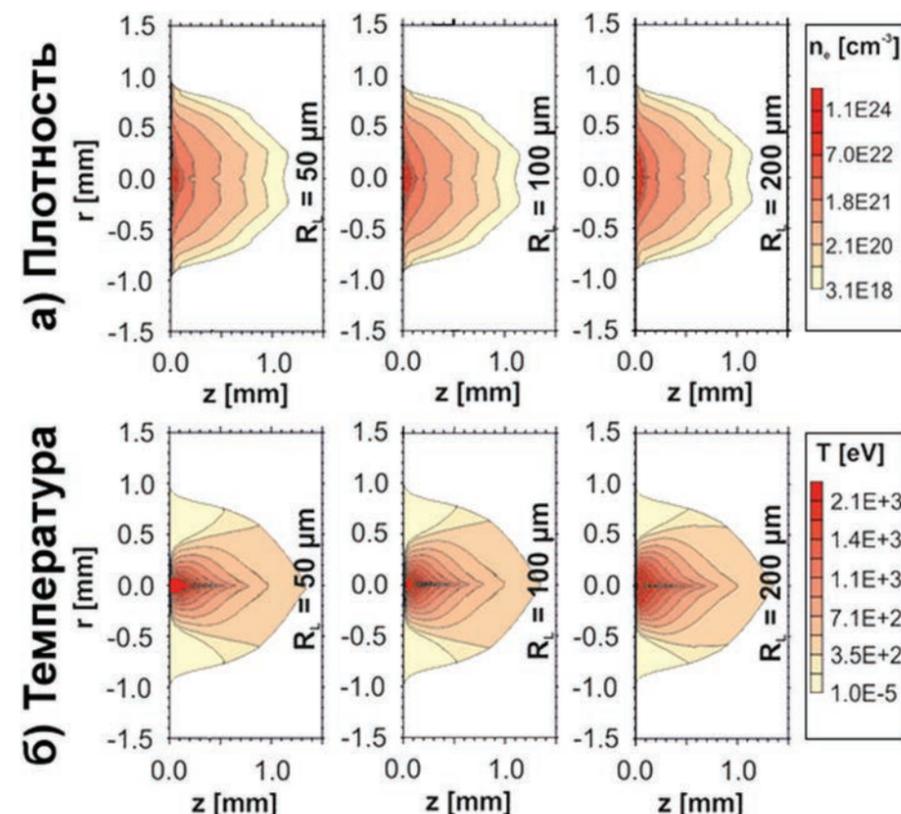


Рис.2. Распределения плотности (а) и температуры (б) плазмы в момент окончания действия основного лазерного импульса на плазму, созданную при предварительном воздействии на мишень вспомогательного лазерного импульса. Расчет по программе ATLANT-HE

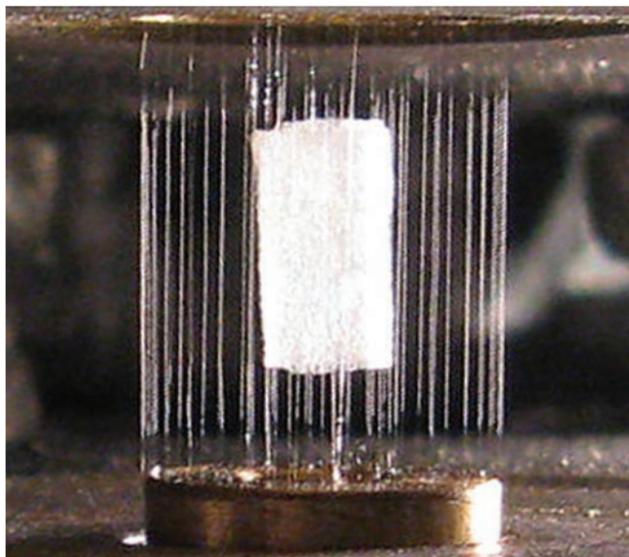
### Результаты опубликованы:

1. T. Pisarczyk, S.Yu. Gus'kov, O. Renner, R. Dudzak, J. Dostal, N.N. Demchenko, M. Smid, T. Chodukowski, Z. Kalinowska, M. Rosinski, P. Parys, J. Badziak, D. Batani, S. Borodziuk, L.A. Gizzi, E. Krousky, Y. Maheut, G. Cristoforetti, L. Antonelli, P. Koester, F. Baffigi, J. Ullschmied, J. Hrebicek, T. Medrik, M. Pfeifer, J. Skala, P. Pisarczyk. Short-wavelength experiments on laser pulse interaction with extended pre-plasma at PALS-installation, Laser and Particle Beams, 2016, vol. 34, p. 94–108.

## Регистрация спектра излучения мегаамперного многопроволочного Z-пинча с внутренней низкоплотной пенной оболочкой на установке «Ангара-5-1»

*Экспериментально исследован спектр излучения многопроволочного пинча с высокой начальной аксиальной неоднородностью распределения массы сжимаемого вещества. В качестве нагрузки сильноточного генератора «Ангара-5-1» (ТРИНИТИ, г. Троицк) использовалась двойная многопроволочная сборка из вольфрамовых проволок и внутренней, соосной с ней, пенной цилиндрической оболочки. Спектры излучения пинча в интервале энергий квантов 50 – 900 эВ исследовались спектрографом с пропускающей дифракционной решеткой.*

Одним из перспективных направлений реализации импульсного термоядерного синтеза является использование мягкого рентгеновского (МР) излучения для сжатия сферических термоядерных мишеней. В настоящее время наибольший прогресс достигнут в схеме непрямого сжатия мишеней мягким рентгеновским излучением, которое генерируется при взаимодействии мощного импульсного лазера с внутренней поверхностью «хольраума» или Z – пинчами, создаваемыми импульсными сильноточными генераторами. В экспериментах, проведенных на установке «Ангара-5-1» (ТРИНИТИ, г. Троицк), использовалась схема многопроволочной сборки с высокой начальной аксиальной неоднородностью распределения массы сжимаемого вещества с целью определения излучательных характеристик пинча в МР-диапазоне спектра. В качестве нагрузки сильноточного генератора (ток до 4 МА, напряжение ~ 1 МВ, длительность импульса напряжения 140 нс) использовалась каскадная структура, состоящая из двойной многопроволочной сборки из вольфрамовых проволок и внутренней, соосной с ней, пенной цилиндрической оболочки, расположенной симметрично относительно электродов.

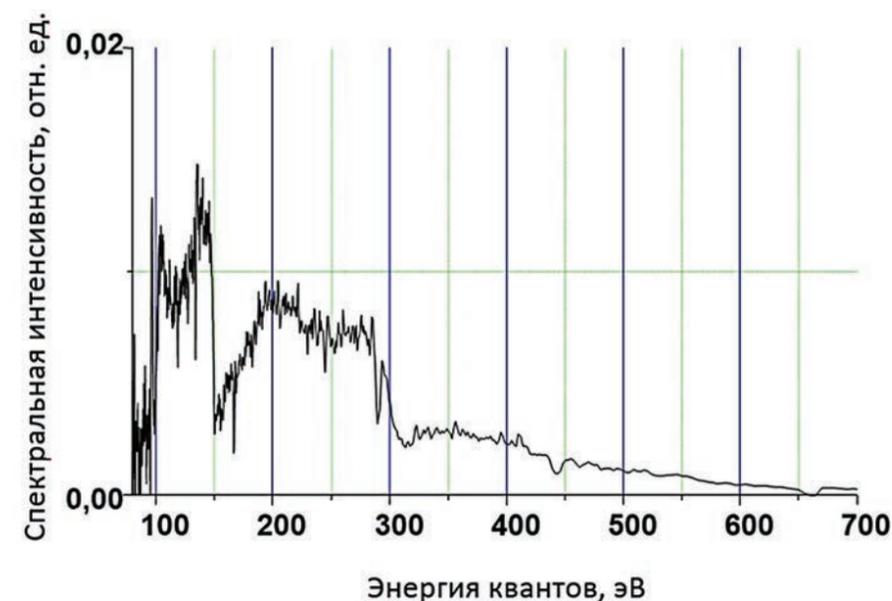


*Геометрия многопроволочной пинчевой нагрузки длиной 15 мм. Сборка внешняя диаметром 12 мм – 40 вольфрамовых проволок  $\varnothing 6$  мкм, погонная масса 220 мкг/см; сборка внутренняя диаметром 5 мм – 20 вольфрамовых проволок  $\varnothing 6$  мкм, погонная масса 110 мкг/см; пенный цилиндр (агар-агар), погонная масса 250 мкг/см, диаметр 5 мм, толщина слоя 0.2 мм, длина 8.5 мм*

Спектры излучения плазмы пинча в интервале энергий квантов 50 – 900 эВ регистрировались спектрографом со специально разработанной в ФИАН и изготовленной пропускающей дифракционной решеткой с периодом  $d = 1.4$  мкм, сформированной внутри щели шириной  $D = 70$  мкм свободнови-

сущими золотыми полосками количеством 50, длиной 1.7 мм. Такая дифракционная решетка имеет определенные преимущества по сравнению с отражающей решеткой. В частности, её эффективность и дисперсия не зависят от длины волны, так что она позволяет проводить абсолютные измерения спектра мягкого рентгеновского излучения в широком спектральном диапазоне.

Восстановленная по полученным спектрограммам зависимость спектральной плотности излучения от энергии квантов показывает, что основной вклад в излучение плазмы сосредоточен в интервале энергий квантов от 100 эВ до 600 эВ. Спектральная плотность излучения в области 300–600 эВ в 3–4 раза меньше, чем в области 100–300 эВ.



*Спектральная интенсивность излучения Z-пинча, полученная с использованием спектрографа с пропускающей дифракционной решеткой (ширина решетки 70 мкм, число полосок 50, период 1.4 мкм).*

### Результаты опубликованы:

1. Александров В.В., Болховитинов Е.А., Волков Г.С., Грабовский Е.В., Грицук А.Н., Медовщиков С.Ф., Олейник Г.М., Рупасов А.А., Фролов И.Н. Динамика сжатия мегаамперного многопроволочного Z-пинча с внутренней низкоплотной пенной оболочкой на установке «Ангара-5-1». Физика плазмы. 2016, т. 42, № 12, с. 1046–1056.

## Бистабильное светорассеяние в негеликоидальных сегнетоэлектрических жидких кристаллах

*Разработан новый тип сегнетоэлектрических жидких кристаллов, в которых переориентация директора происходит за счет движения солитонов и сопровождается интенсивным рассеянием света. Показано, что при определённых условиях светорассеяние имеет бистабильный характер. Эти материалы перспективны для использования в эффективных по свету бесполяроидных модуляторах и дисплеях.*

Разработан новый тип негеликоидальных сегнетоэлектрических жидких кристаллов (СЖК), в которых переориентация директора (главной оптической оси) происходит за счет движения пространственно локализованных волн стационарного профиля – солитонов, возникающих при переходе к максвелловскому механизму диссипации энергии и приводящих к образованию структуры переходных доменов, интенсивно рассеивающих свет.

Переходы между светорассеивающими модами, которым соответствуют различные максимумы эффективности светорассеяния, при одновременной подаче на электрооптическую ячейку импульсов на-

пряжения, длительность которых соответствует различным максимумам, вызывают хаотичное изменение положения индикатрисы рассеяния. Как следствие этого, в объеме СЖК формируются структуры со случайным распределением градиентов показателя преломления.

Измерения, проведенные совместно с британскими учёными, показали, что при определенном соотношении между амплитудой и длительностью импульсов, энергией деформации смектических слоев и спонтанной поляризацией СЖК светорассеяние имеет бистабильный характер, причём и рассеивающее, и нерассеивающее состояние включается за десятки микро-

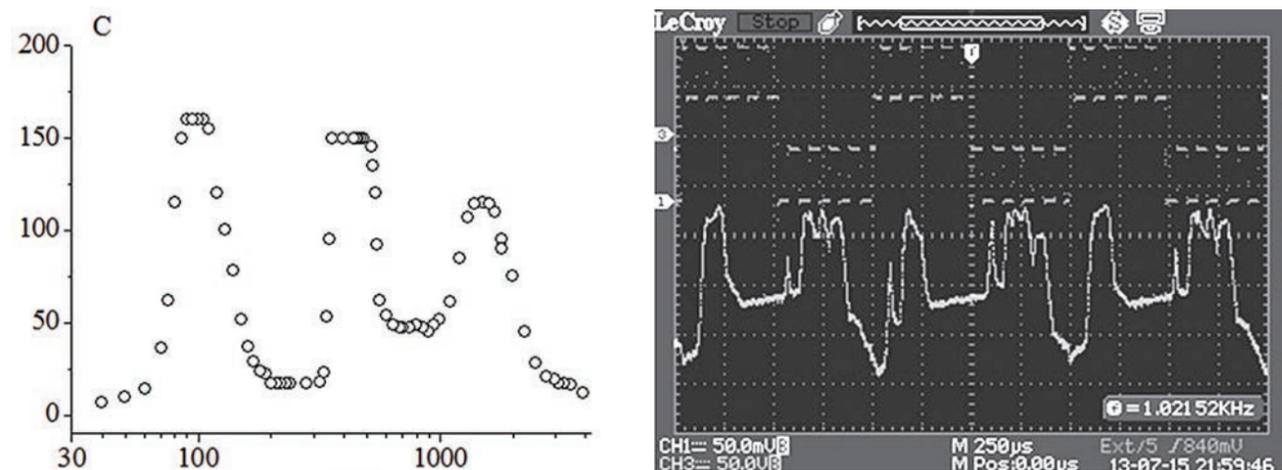


Рис. 1. Максимумы светорассеяния в зависимости от длительности импульсов (слева) и осциллограммы двухчастотного управляющего напряжения (в верхней части правого рисунка) и модуляции света (в нижней части). Стрелки указывают на ноль напряжения (верхняя) и ноль оптического отклика.

кунд и сохраняется в течение нескольких десятков секунд до выключения электрического поля или до прихода импульса обратной полярности.

Структуры со случайным распределением градиентов показателя преломления, формируемые в объеме СЖК, являются причиной пространственно-неоднородной фазовой модуляции света, проходящего через электрооптическую ячейку. Такая модуляция

позволяет разрушить фазовые соотношения в лазерном пучке и существенно уменьшить контраст спекл-шума в записываемых с его помощью изображениях.

Выявленные свойства материалов перспективны для их использования в бесполяроидных модуляторах видимого и ИК-излучения, в светоэффективных дисплеях электронных книг, в устройствах устранения спекл-шума и др.

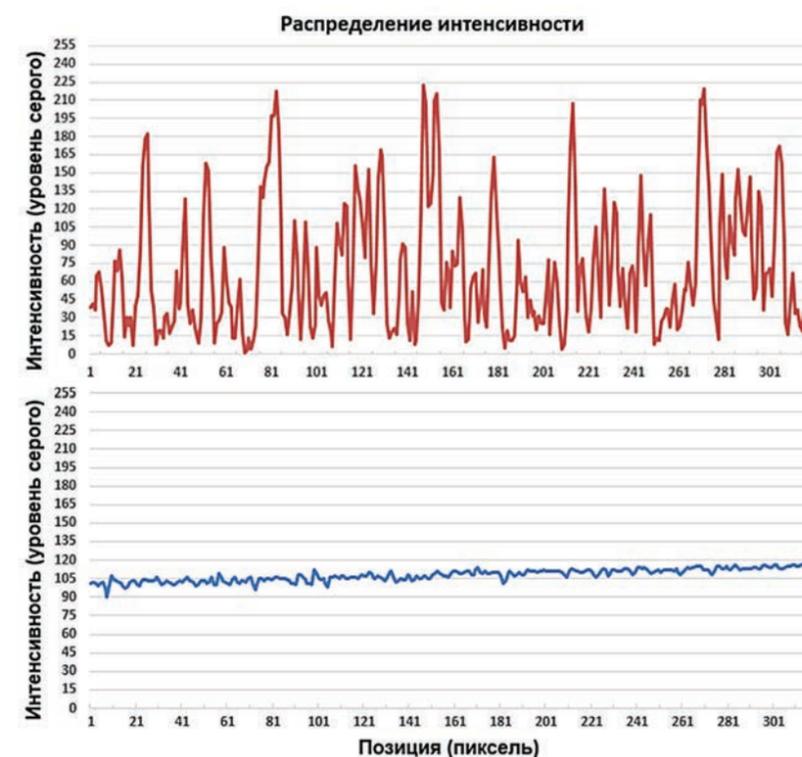


Рис. 2. Распределение интенсивности света в сечении пучка при отсутствии напряжения (красная линия с максимальным контрастом спекл-шума 0.72) и в присутствии двухчастотного напряжения (синяя линия с контрастом 0.07). Эффективность подавления спеклов – 10.7 dB.

### Результаты опубликованы:

1. А.Л. Андреев, И.Н. Компанец, Н.В. Заляпин, Новые жидкокристаллические материалы и 3D технологии записи и отображения информации, Радиоэлектронные технологии, 2 (1), 82–85 (2016).
2. Alexander Andreev, Tatiana Andreeva, Igor Kompanets, Nikolay Zalyapin, Huan Xu, Mike Pivnenko, and Daping Chu, Fast bistable intensive light scattering in helix-free ferroelectric liquid crystals, J. of Applied Optics, 55 (13), 3483–3492 (2016).
3. A.L. Andreev, T.B. Andreeva, I.N. Kompanets, N.V. Zalyapin, R.S. Starikov, Speckle-noise suppression using electro-optical cell with helix-free ferroelectric LC, J. of Physics: Conference Series, 737, 012019 (2016).

## Нано- и микроструктурные оптические платформы для высокочувствительной оптической экспресс-диагностики патогенных микроорганизмов

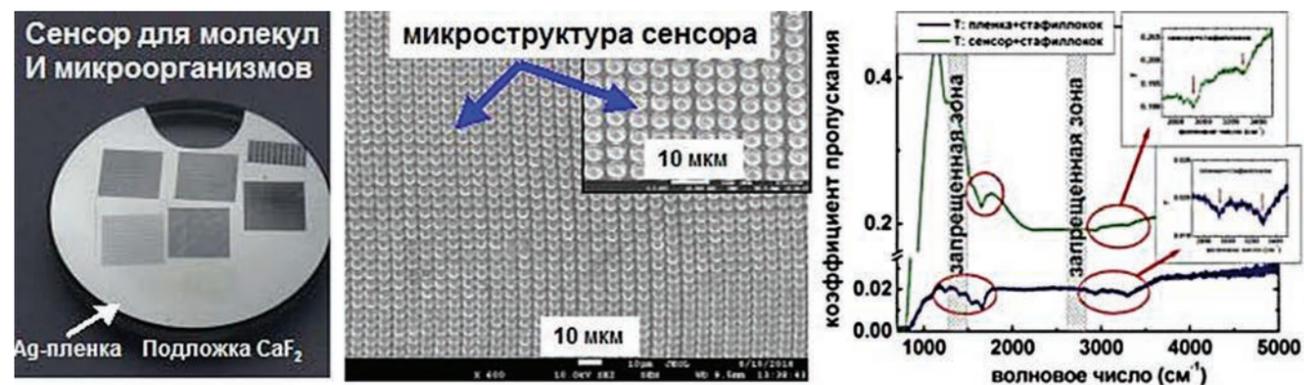
*Разработаны различные нано- и микроструктурные оптические платформы – дифракционные микрорешетки, высокоаспектная развитая поверхностная субмикронная шероховатость, массивы гибридных плазмонно-диэлектрических (суб)микрочастиц – для высокочувствительной оптической экспресс-диагностики патогенных микроорганизмов.*

С использованием наносекундных и фемтосекундных лазеров с высокой частотой повторения, высокоскоростных систем прецизионного позиционирования и сканирования разработаны технологии лазерной фабрикации нано- и микроструктурных хемо- и биосенсорных подложек, а также разработаны их передовые дизайны. Впервые с помощью лазеров были подготовлены тестовые хемо- и биосенсорные подложки реальных лабораторных размеров (от нескольких квадратных мм и более).

Наноструктурные сенсорные подложки из плазмонных наночастиц, нанесенных на тонкие пленки плазмонных металлов, были использованы для высокочувствительного детектирования отдельных бактерий золотистого стафилококка методом поверхностно-усиленного комбинационного рассеяния.

Высокоаспектная развитая поверхностная субмикронная шероховатость, представляющая собой продукты распада нанопены при фемтосекундной лазерной откольной абляции, исследована в плане хемосенсорики модельных молекулярных аналитов методом поверхностно-усиленного комбинационного рассеяния – с коэффициентом усиления порядка  $10^5$ , а также поверхностно-усиленной фотолюминесценции – с коэффициентом усиления  $10^2$ – $10^3$ .

Наконец, для высокочувствительного детектирования молекулярных аналитов и микроорганизмов без флуоресцентного фона методом поверхностно-усиленного ИК-поглощения/отражения разработан дизайн и подготовлены сенсорные подложки лабораторных размеров в виде решеток микроотверстий в тонких металлических пленках плазмонных металлов. Прове-



*Внешний вид (слева, с набором сенсорных участков) и микроструктура (в центре) сенсорной подложки, справа – ИК-спектры пропускания сенсорной подложки с био пленкой золотистого стафилококка в сравнении с серебряной пленкой.*

монстрировано практически 500-кратное усиление ИК-поглощения модельного молекулярного аналита, а также усиление

ИК-поглощения/отражения био пленки золотистого стафилококка в несколько раз по сравнению с тонкой плазмонной пленкой.

### Результаты опубликованы:

1. Д.А. Заярный, А.А. Ионин, И.В. Киселева, С.И. Кудряшов, С.В. Макаров, А.А. Руденко, И.А. Тимкин, Р.А. Хмельницкий, Ч.Т.Х. Нгуен, Гигантское инфракрасное поглощение света родамина на металлической микрорешетке, Письма в ЖЭТФ 100 (5), 332–335 (2014).
2. S.A. Gonchukov, T.V. Baikova, M.V. Alushin, T.S. Svistunova, S.A. Minaeva, A.A. Ionin, S.I. Kudryashov, I.N. Saraeva, D.A. Zayarny, Single bacterium detection using SERS, J. Phys.: Conf. Series 691(1): 012010 (2016).
3. P.A. Danilov, S.A. Gonchukov, A.A. Ionin, R.A. Khmel'nitskii, S.I. Kudryashov, T.T.H. Nguyen, A.A. Rudenko, I.N. Saraeva, D.A. Zayarny, Background-free, highly-sensitive surface-enhanced IR absorption of rhodamine 6G molecules deposited onto array of microholes in thin silver film, Las. Phys. Lett. 13 (5) 055602 (2016).
4. T.V. Baikova, P.A. Danilov, S.A. Gonchukov, V.M. Yermachenko, A.A. Ionin, R.A. Khmel'nitskii, S.I. Kudryashov, T.T.H. Nguyen, A.A. Rudenko, I.N. Saraeva, T.S. Svistunova, D.A. Zayarny, Dif-fraction microgratings as a novel optical biosensing platform, Las. Phys. Lett. 13 (7), 070602 (2016).
5. Kuchmizhak, A.; Pustovalov, E.; Syubaev, S.; Vitrik, O.; Kulchin, Yu.; Porfirev, A.; Khonina, S.; Kudryashov, S.; Danilov, P.; Ionin, A., On-fly femtosecond-laser fabrication of self-organized plasmonic nanotextures for chemo- and biosensing applications, ACS Applied Materials & Interfaces 8, 24946 (2016).

## Вынужденное концентрационное рассеяние света на частицах в жидкости

Во взвешах субмикронных частиц в воде обнаружены нелинейность интенсивности рассеяния света и появление новой спектральной линии, сдвиг которой, стоксов или антистоксов, соответствует предсказанному для вынужденного рассеяния. Таким образом, показан переход концентрационного рассеяния света в вынужденный режим.

Зафиксирован нелинейный рост интенсивности света, рассеянного частицами в жидкости во взвешах агрегатов наночастиц алмаза с радиусом 1200 нм в воде и субмикронных частиц латекса в воде, с увеличением мощности непрерывного возбуждающего излучения при его интенсивности более 100 Вт/см<sup>2</sup> (рис. 1). С помощью корреляционной спектроскопии показано появление спектральных линий, соответствующих линиям вынужденного концентрационного рассеяния света

на этих частицах, сдвинутых относительно возбуждающего излучения на частоту, близкую к полуширине линии спонтанного концентрационного рассеяния на частицах в жидкости  $\Gamma = Dq^2$  (рис. 2). Одновременными измерениями скорости конвективного потока воды с частицами и частотного сдвига вынужденного концентрационного рассеяния света в потоке в направлениях вдоль и против потока показано, что для частиц латекса радиусом  $R = 375$  и  $750$  нм сдвиг антистоксов, а для частиц латекса ра-

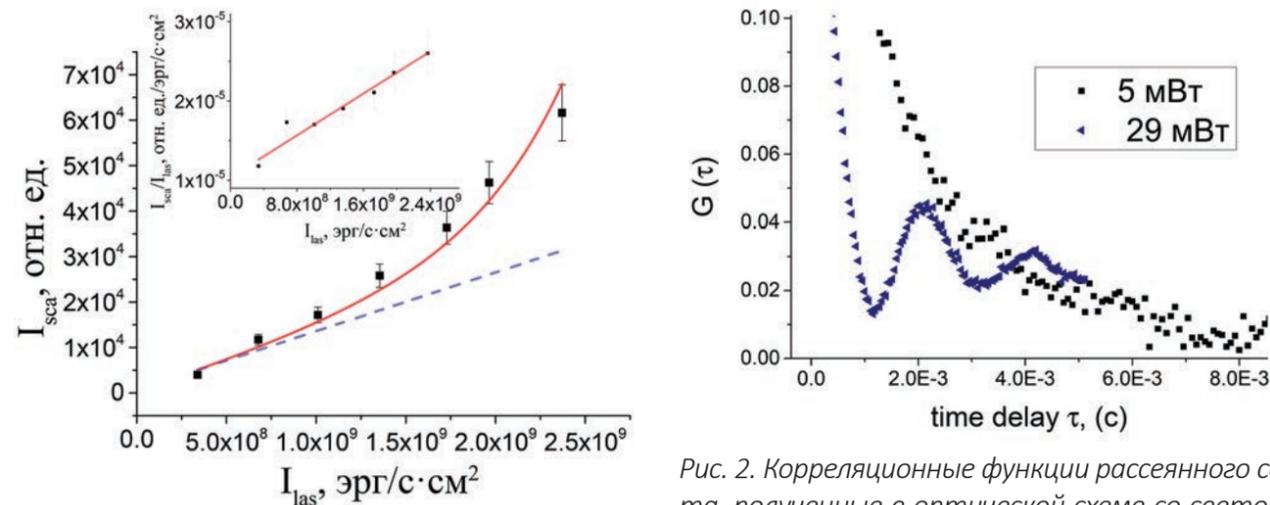


Рис. 1. Нелинейный рост интенсивности света, рассеянного частицами в жидкости во взвешах микронных агрегатов наночастиц алмаза с радиусом 1200 нм в воде. Пунктирная линия  $I_{sca} = AI_L$ , где  $A = (I_{sca}/I_L)$  при  $I_L \rightarrow 0$ . Кривая – аппроксимация формулой  $I_{sca} - AI_L = I_{sp} \exp(gI_L)$ .

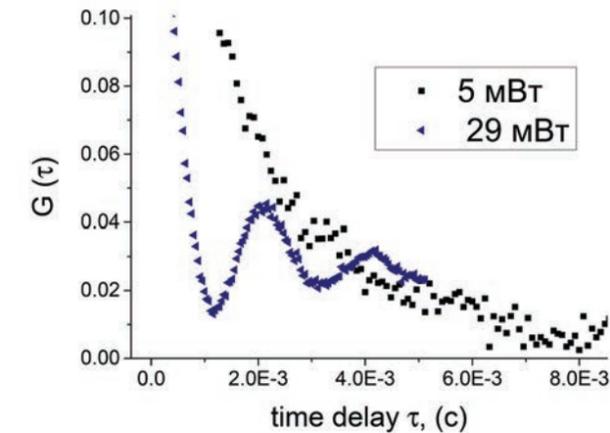


Рис. 2. Корреляционные функции рассеянного света, полученные в оптической схеме со световодом на частицах латекса радиусом  $R = 480$  нм и объемной концентрацией  $C_v = 5 \times 10^{-3} \%$ , свидетельствующие о появлении спектрального сдвига линии вынужденного рассеяния света, сдвинутой относительно возбуждающего излучения на частоту, близкую к полуширине линии спонтанного концентрационного рассеяния, при увеличении мощности возбуждающего излучения.

диусом  $R = 480$  нм – стоксов (рис. 3), что согласуется с теоретическим предсказанием зависимости направления спектрального сдвига вынужденного концентрационного рассеяния света от радиуса частиц  $R$ .

Экспериментально измерены коэффициенты усиления вынужденного концентра-

онного рассеяния света для взвеси агрегатов наночастиц алмаза и взвеси субмикронных частиц латекса, которые удовлетворительно согласуются с теоретическими оценками.

Таким образом, обнаружен переход концентрационного рассеяния света на частицах в жидкости в вынужденный режим.

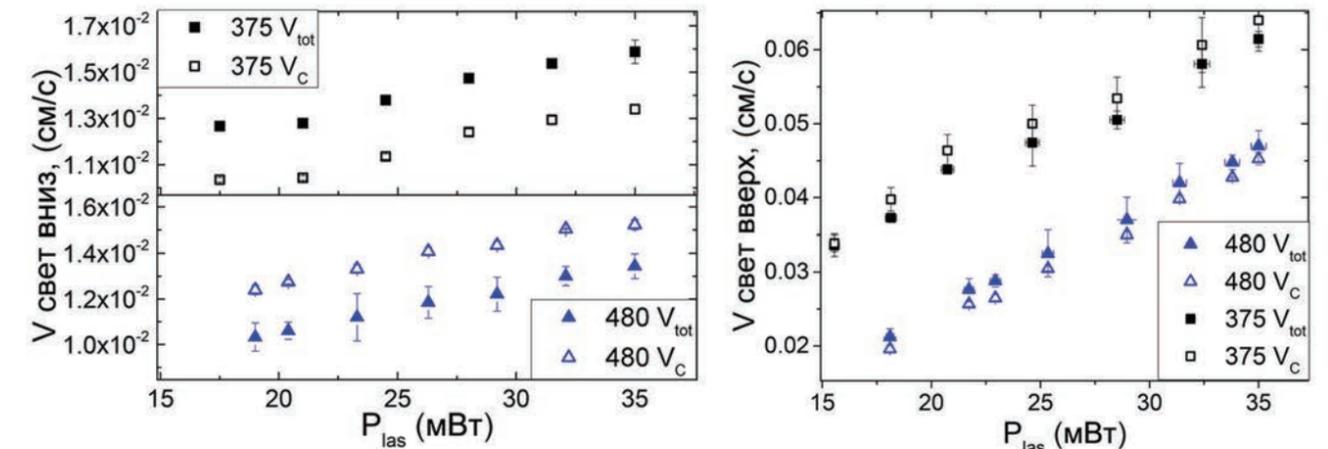


Рис. 3. Полная скорость концентрационной волны ВКорС вместе с конвекционным потоком  $V_{tot}$  и скорость конвекционного потока  $V_c$  для взвесей частиц латекса с радиусами  $R = 375$  и  $480$  нм при направлении возбуждающего света вертикально вниз (слева) и вверх (справа).

### Результаты опубликованы:

1. Burkhanov I.S., Krivokhizha S.V, Chaikov L.L., Stokes and anti-stokes stimulated Mie scattering on nanoparticle suspensions of latex, Optics Communications. 2016. Vol. 381. P. 360–364.
2. Бурханов И.С., Кривохижа С.В., Чайков Л.Л., Вынужденное концентрационное (диффузионное) рассеяние света на наночастицах жидкой суспензии, Квантовая электроника. 2016 Т. 46, № 6. С. 548–554.

## Наблюдение брейкаут-пересоединения по данным ВУФ телескопа ТЕСИС

В данных наблюдений солнечной короны с помощью ВУФ телескопа ТЕСИС на спутнике КОРОНАС–ФОТОН обнаружено явление брейкаут-пересоединения магнитных силовых линий, приводящее к неустойчивости квадрупольных магнитных структур и к корональным выбросам массы. Явление удалось обнаружить благодаря широкому полю зрения телескопа – до одного радиуса Солнца над фотосферой – и увеличенному динамическому диапазону регистрации. Полученный результат необходим для развития теории корональных выбросов массы.

Корональные выбросы массы (КВМ) это гигантские выбросы плазмы короны Солнца в межпланетное пространство. КВМ возникают из-за процессов высвобождения энергии в солнечной короне, и они являются одним из основных факторов, влияющих на космическую погоду. Исследования КВМ важны для солнечной физики и вопросов солнечно-земных связей.

На сегодняшний день существует множество моделей, которые объясняют причины возникновения КВМ. Однако, чтобы подтвердить или опровергнуть эти модели, необходимы наблюдения короны Солнца в диапазоне расстояний 1.2–2 солнечных радиусов от центра Солнца.

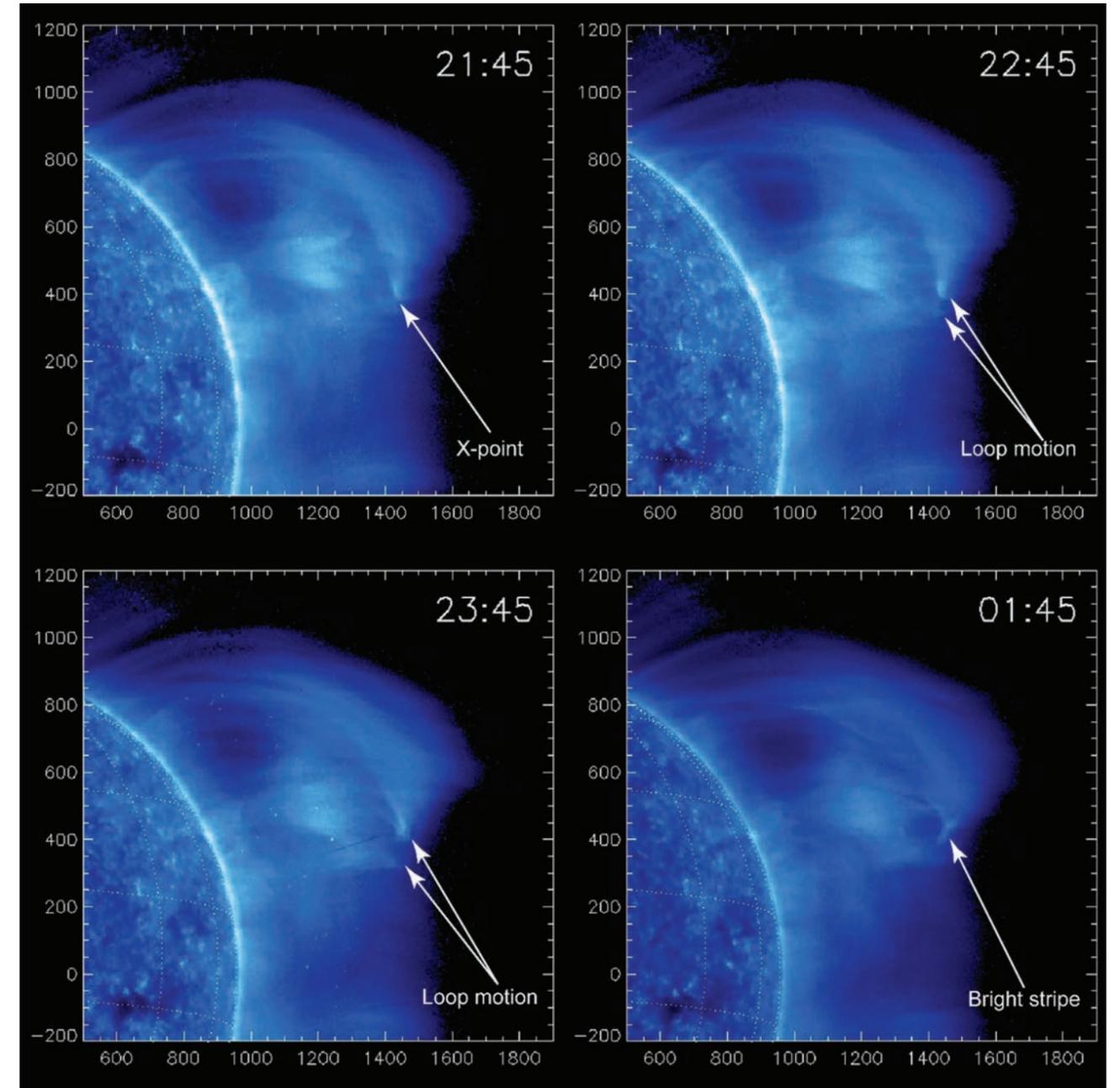
В данной работе экспериментально обнаружено брейкаут-пересоединение в короне Солнца. Брейкаут-пересоединение – это небольшие изменения связности магнитных силовых линий квадрупольной структуры, которые могут привести к неустойчивости всей структуры и вызвать корональный выброс массы.

Явление наблюдалось с помощью ВУФ телескопа ТЕСИС на спутнике КОРОНАС–

ФОТОН. Особенностью ВУФ телескопа ТЕСИС являлась его способность строить изображения короны в линии Fe 171 Å вплоть до расстояний в 2 солнечных радиуса от центра Солнца с высоким пространственным разрешением. Излучение линии Fe 171 Å подсвечивает магнитные силовые линии, и на изображениях ВУФ телескопа ТЕСИС видна магнитная структура короны Солнца на больших высотах.

8 апреля 2009 года на изображениях ВУФ телескопа ТЕСИС в линии Fe 171 Å наблюдалась активная область с квадрупольной структурой магнитного поля. Мы наблюдали, как петли, формирующие X-точку квадрупольной структуры, начали удаляться друг от друга, а затем произошел корональный выброс массы. Наблюдавшаяся эволюция магнитной структуры полностью согласуется с моделью брейкаут-пересоединения.

Полученные наблюдения – это экспериментальное подтверждение модели брейкаут-пересоединения. Эти наблюдения необходимы для построения полной теории корональных выбросов масс.



Изображения Солнца, зарегистрированные ВУФ телескопом ТЕСИС на длине волны 17,1 нм, демонстрирующие брейкаут-пересоединение.

### Результаты опубликованы:

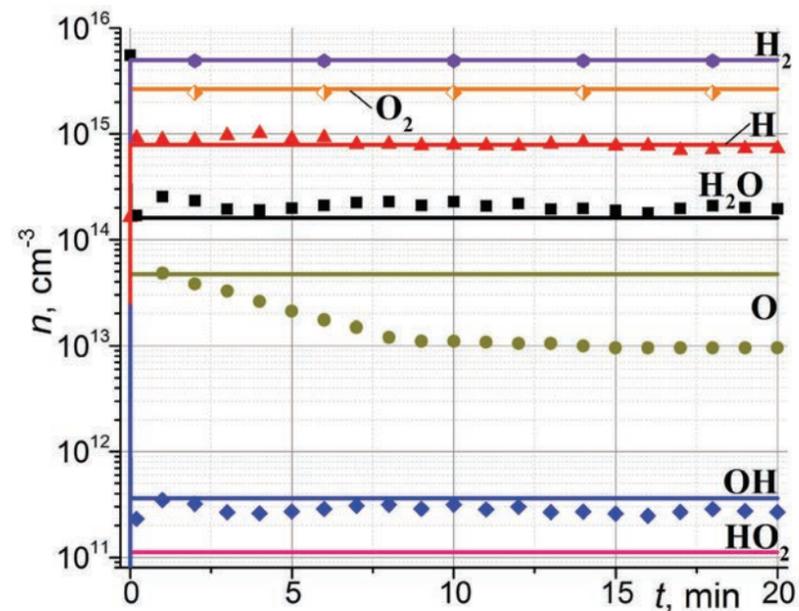
1. A. A. Reva, A. S. Ulyanov, S. V. Shestov, and S. V. Kuzin. Breakout reconnection observed by the TESIS EUV TELESCOPE. *Astrophysical Journal*, 916, 90 (2016).

## Метод мультиспектральной актинометрии плазмы

*Расширены возможности методов оптической актинометрии многокомпонентной неравновесной плазмы. В сочетании с измерениями интенсивностей во вращательной структуре спектра гидроксила это дало возможность исключить зондовые измерения из диагностики контроля за герметичностью контуров охлаждения в плазменных установках, сделав технику бесконтактной и дистанционной.*

Разработан метод мультиспектральной актинометрии плазмы [1], использующий одновременно ряд эмиссионных линий нескольких опорных и искоемых частиц. Вводится новая концепция промежуточных актинометров, в т.ч. и нестабильных частиц, концентрация которых контролируется первичными стабильными (инертные газы) актинометрами. Обеспечиваются большой динамический диапазон чувствительности, широкий набор определяемых частиц, выбор удобного для конкретной задачи диапазона спектра. Результаты измерений

слабо зависят от параметров электронной компоненты, что снимает необходимость электрических измерений, обычно сопутствующих диагностике плазмы. Предложенная итерационная схема работы с интенсивностями групп линий учитывает влияние тушения излучения в плазме реального состава. Метод применен в условиях плазмы с примесями молекул воды в интересах диагностики пристеночной плазмы в реакторе ИТЭР. Результаты измерений оказались в согласии с результатами плазмохимического моделирования. Достигнута рекордная



*Поведение во времени концентраций частиц в плазме инертных газов с парами воды. Символы – результаты измерений методом мультиспектральной актинометрии на установке "Течь" (ФИАН); кривые – результаты плазмохимического моделирования.*

чувствительность к проникновению паров воды в реактор не хуже  $10^{-7} \text{ Па} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ , обеспечивающая заданную проектом реактора предельную мощность потока натекания.

В условиях положительного столба тлеющего разряда измерения концентраций молекул воды разработанным методом мультиспектральной актинометрии контролировались известным методом диодной лазерной спектроскопии по поглощению. Результаты измерений двумя методами находятся в хорошем согласии в широком диа-

пазоне разрядных токов [2].

Показано, что молекулы воды, проникающие в плазму, испытывают глубокую диссоциацию. Как в полном катоде [1], так и в положительном столбе тлеющего разряда [2] степень диссоциации составляет 96–98% в исследованном диапазоне плотностей разрядных токов ( $1\text{--}30 \text{ mA/cm}^2$ ). Вода преобразуется преимущественно в молекулы водорода и кислорода, концентрации атомов, радикалов и многоатомных молекул на несколько порядков ниже.

### Результаты опубликованы:

1. A.V. Bernatskiy, V.N. Ochkin, I.V. Kochetov. Multispectral actinometry of water and water derivate molecules in moist inert gas discharge plasmas. Journal of Physics D: Applied Physics. 2016, V. 49, No. 39, 395204 (10pp).
2. A.V. Bernatskiy, V.V. Lagunov, V.N. Ochkin, S.N. Tskhai. Study of water molecule decomposition in plasma by diode laser spectroscopy and optical actinometry methods. Laser Physics Letters. 2016, V. 13, No. 7, 075702 (4pp).

## Изображающий спектрометр в мягкой рентгеновской области спектра

Разработан стигматический (изображающий) спектрометр на область  $\lambda > 12$  нм для спектральной диагностики плазмы, включающий фокусирующее широкополосное многослойное зеркало и VLS-решетку – дифракционную решетку с частотой штрихов, монотонно изменяющейся по заданному закону. Продемонстрирована работа спектрометра с лазерно-плазменным источником излучения.

Создан лабораторный изображающий спектрометр высокого разрешения для мягкого рентгеновского (МР) диапазона. Схема спектрометра включает аperiodическое многослойное зеркало (МЗ) нормального падения, оптимизированное на максимальное равномерное отражение в области 125–250 Å. За счёт падения излучения, близкого к нормальному, МЗ создаёт слабо астигматический пу-

чок, который посылаётся на плоскую решётку с переменной частотой штрихов (VLS-решётку). За счёт выбора геометрии прибора и закона изменения частоты штрихов прибор получается строго стигматическим для двух длин волн ( $\lambda_{1,2}$ ) и практически стигматическим в интервале более октавы. Частота штрихов решетки описывается полиномом  $p(w) = p_0 + p_1 w + p_2 w^2$ . Коэффициент  $p_1$  модифицирует спектральную

фокальную кривую и совмещает ее с вертикальным фокусом в рабочем спектральном диапазоне, а коэффициент  $p_2$  подавляет меридианальную кому.

Плоские решётки были изготовлены методами электронно-лучевой (ЦКП МФТИ, вольфрам) и интерференционной литографии (ГИПО, золотое покрытие). Источником МР-излучения служила плазма, создаваемая при фокусировке импульса излучения Nd-лазера (0.5 Дж на мишени, 10 нс) на плоскую вращающуюся мишень, поверхность которой лежала в главной

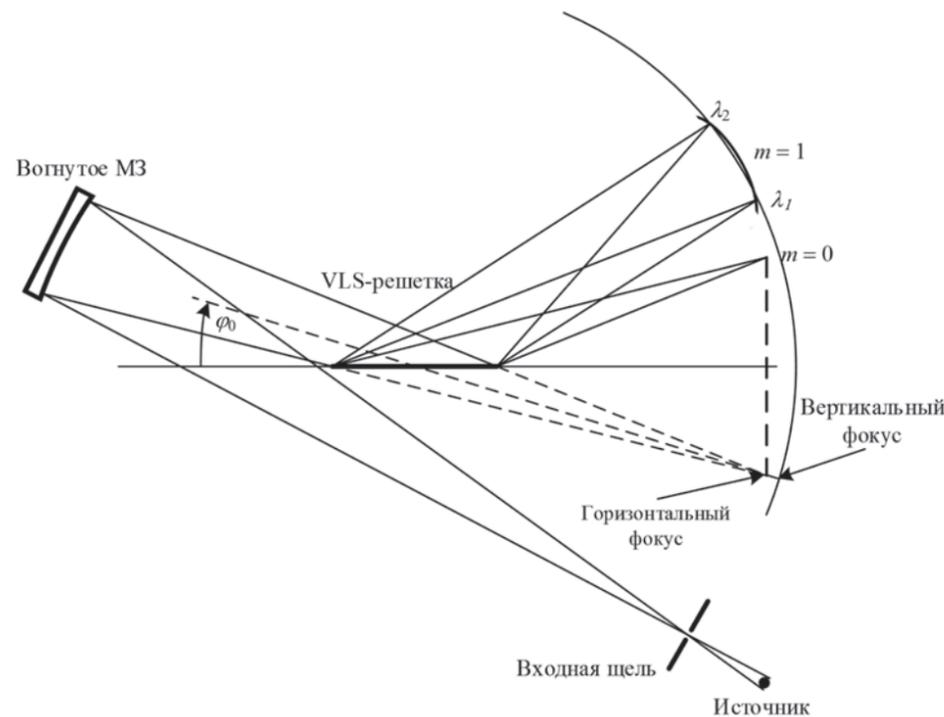


Рис. 1. Схема спектрометра. Радиус сферического МЗ – 1 м; угол падения на МЗ – 7.6°; частота штрихов в центре решетки  $p_0 = 600 \text{ мм}^{-1}$ ;  $p_1 = 2.3 \text{ мм}^{-2}$ ;  $m$  – порядок дифракции; расчетные  $\lambda_1 = 144 \text{ Å}$  и  $\lambda_2 = 272 \text{ Å}$ ; обратная линейная дисперсия составляет  $5.5 \text{ Å/мм}$ .

плоскости спектрометра. Излучение регистрировалось при помощи матричного ПЗС-детектора (2048 × 1024 ячеек размером 13 мкм).

Спектральная разрешающая способность составила  $\approx 500$  в схеме с вольфрамовой решеткой и не менее 900 в схеме с позолоченной

решеткой. Пространственное разрешение, оцененное по границе света и тени, в обоих случаях составило две ячейки детектора (26 мкм).

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-12-00506).

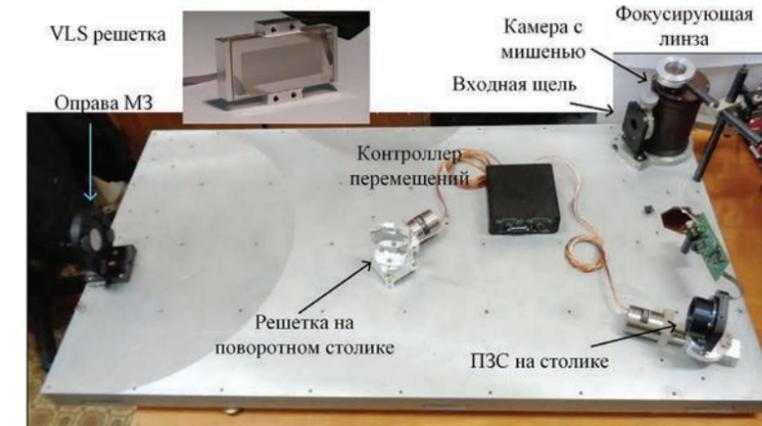


Рис. 2. Элементы спектрометра на плите 1.1×0.6 м. На врезке: вольфрамовая VLS-решетка.

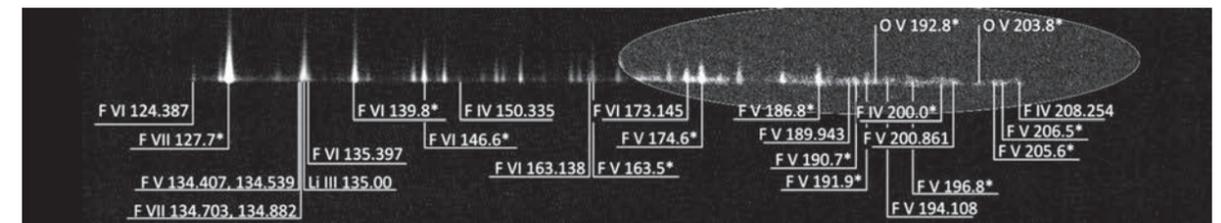


Рис. 3. Стигматический спектр многозарядных ионов Li, F и O (одна лазерная вспышка, 0.5 Дж, 10 нс, вольфрамовая решетка). Звездочки обозначают неразрешенные группы линий.

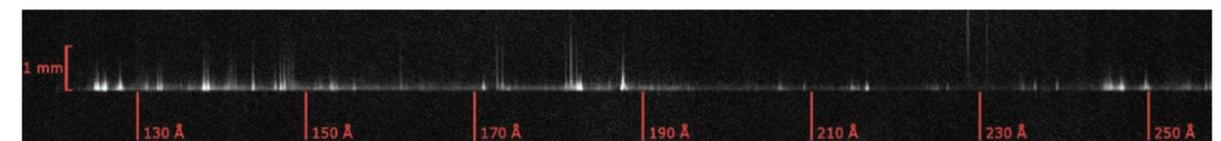


Рис. 4. Спектр магниевой мишени с пространственным разрешением (позолоченная VLS-решетка, метод интерференционной литографии). Вертикальное направление совпадает с нормалью к мишени.

### Результаты опубликованы:

1. Е.А. Вишняков, А.О. Колесников, А.А. Кузин, Д.В. Негров, Е.Н. Рагозин, П.В. Сасоров, А.Н. Шатохин, Изображающий дифракционный VLS-спектрометр на область длин волн  $\lambda > 120 \text{ Å}$ , Квант. электрон. 47 (1) 54–57 (2017).
2. Е.А. Вишняков, А.О. Колесников, Е.Н. Рагозин, А.Н. Шатохин, Стигматический спектрометр высокого разрешения для диапазона 120–250 Å на основе многослойного зеркала и плоской VLS-решетки, Нанопластика и наноэлектроника (Труды XXI Международного симпозиума, 13–16 марта 2017 г., г. Н. Новгород, том 1, 377–378 [http://nanosymp.ru/UserFiles/Symp/2017\\_v1.pdf](http://nanosymp.ru/UserFiles/Symp/2017_v1.pdf)).
3. E.N. Ragozin, A.A. Belokopytov, A.O. Kolesnikov, E. Muslimov, A.N. Shatokhin, E.A. Vishnyakov, Flat-field VLS spectrometers for laboratory applications, Proc. SPIE 10235, 102350L (2017).

## Определена точность тулиевых часов

Впервые выполнены экспериментальные и теоретические исследования магнитодипольного перехода на длине волны 1.14 мкм между тонкими компонентами основного состояния атома Tm-169. Этот переход рассматривается в качестве стандарта частоты для новых сверхточных оптических атомных часов – ближайшего будущего систем спутниковой навигации, транспортных сетей, национальных шкал времени и скоростной передачи данных. Относительная точность тулиевого репера частоты в 10 раз выше часов на атомах Cs.

Атом тулия представляет собой редкоземельный элемент с одной вакансией на внутренней 4f-оболочке, расположенной внутри заполненных 5s и 6s оболочек. Специфика электронной структуры делает этот элемент интересным с точки зрения метрологии времени и частоты. В частности, выполненные экспериментальные и теоретические исследования магнитодипольного перехода между тонкими компонентами основного состояния на длине волны 1.14 мкм показали его перспектив-

ность для создания репера частоты в оптическом диапазоне.

Естественная ширина линии, являющаяся ключевой характеристикой часового перехода, была определена через измерение времени жизни его верхнего уровня в лазерно-охлажденных атомах тулия, удерживаемых в оптической решетке. Оно составило 112 мс, что соответствует естественной ширине линии перехода 1.4 Гц.

Также была исследована чувствительность частоты часового перехода к внеш-

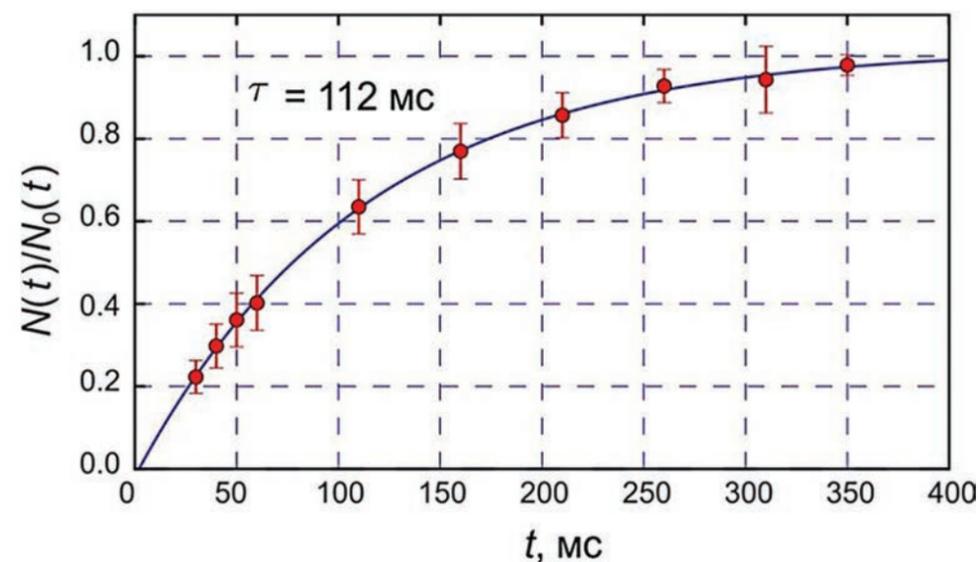


Рис. 1. Измерение времени жизни верхнего уровня часового перехода в тулии. Атомы тулия, удерживаемые в оптической решетке, возбуждаются импульсом излучения на длине волны 1.14 мкм, после чего измеряется доля атомов, вернувшихся в основное состояние как функция времени.

ним возмущениям. Для определения влияния удерживающего потенциала оптической решетки и его минимизации был осуществлен расчет динамических поляризуемостей уровней часового перехода в диапазоне длин волн от 250 нм до 1200 нм. Это позволило определить магическую длину волны для формирования оптической решетки, не возмущающей часовой переход, которая составила 807 нм. Корректность расчетов была проверена экспериментально посредством измерения динамической поляризуемости перехода на длине волны 532 нм, значение которой в пределах ошибки эксперимента совпало с теоретическим предсказанием.

В дополнение был выполнен расчет сдвигов частоты часового перехода за счет взаимодействия атомов с тепловым излучением окружающей среды, Ван-дер-Ваальсовского взаимодействия и магнитного диполь-дипольного взаимодействий атомов друг с другом. На основе результатов расчетов был составлен протокол работы оптических часов, минимизирующий влияние этих возмущений, и была дана оценка соответствующей стабильности оптических часов.

В результате было показано, что суммарная нестабильность частоты разрабатываемых оптических часов составляет менее  $5 \times 10^{-18}$ , что находится на уровне лучших современных достижений в этой области.

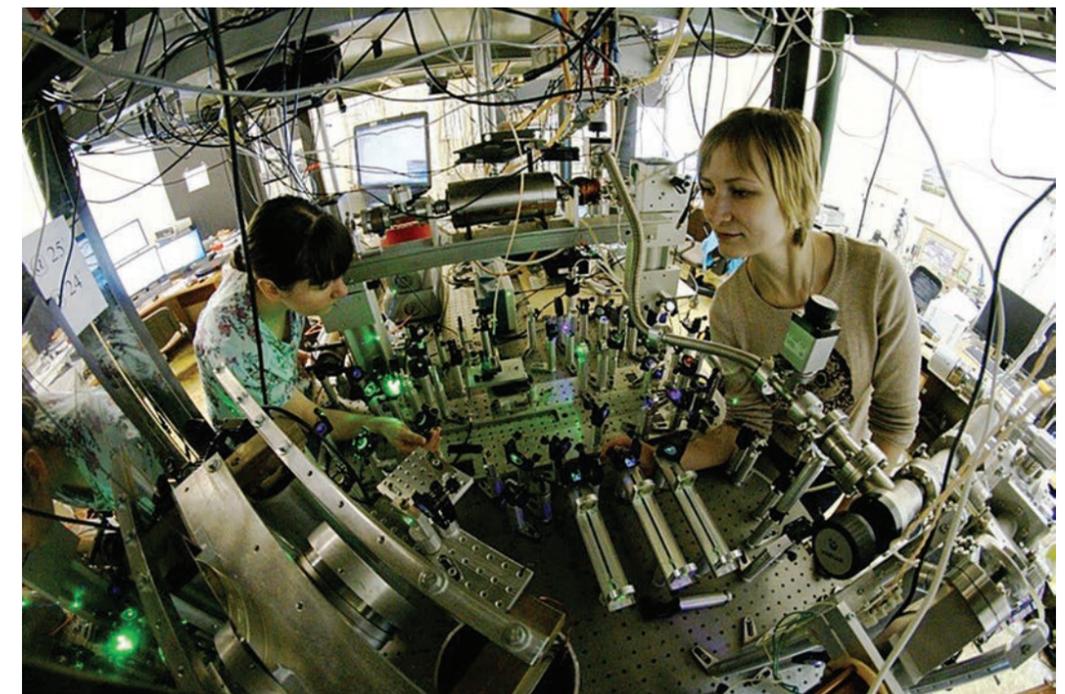


Рис. 2. Экспериментальная установка: оптические часы на атомах тулия.

### Результаты опубликованы:

1. D. Sukachev, S. Fedorov, I. Tolstikhina, D. Tregubov, E. Kalganova, G. Vishnyakova, A. Golovizin, N. Kolachevsky, K. Khabarova, and V. Sorokin, Inner-shell magnetic dipole transition in Tm atoms: A candidate for optical lattice clocks, Phys. Rev. A 94, 022512 (2016).

## Нарушение соотношения Гольдрайха–Джулиана в нейтронной звезде

*Вычислены электромагнитное поле внутри замагниченной нейтронной звезды и вызывающие его объемные заряды и токи. Показано, что плотность заряда не равна обычной плотности Гольдрайха–Джулиана и может значительно ее превышать. Примером структуры внутреннего магнитного поля, при которой плотность заряда на порядок больше плотности Гольдрайха–Джулиана, является витой тор. В случае вращающейся нейтронной звезды скрутка магнитных силовых линий вызывает накопление зарядов и протекание токов. Это говорит о возможной связи между изменением топологии внутреннего магнитного поля и наблюдаемой активностью нейтронных звезд.*

Как хорошо известно, классическим наблюдательным проявлением нейтронной звезды является радиопульсар. В последние годы активно изучаются и другие интересные проявления, например, магнитары, вращающиеся радиотранзиенты (RRAT), экстремальные нуллеры и даже гибриды вышеуказанных объектов. Такое разнообразие проявлений связано с переменной активностью внешних областей нейтронной звезды — ее магнитосферы — и говорит о том, что магнитосфера может быть не только чисто вакуумной или полностью заполненной плазмой, но и существенно нестационарной, когда состояние некоторых ее областей постоянно меняется от вакуумного к плазмозаполненному и наоборот.

В то же время свойства внутренних областей нейтронной звезды также могут проявляться в различных наблюдаемых эффектах, таких как, например, прецессия, глитчи и вспышки. Эти эффекты могут быть связаны с деформацией нейтронной звезды. Внутреннее магнитное поле играет при этом важную роль, т.к. магнитные напряжения дают вклад в деформацию и могут опосредованно, через механические эффекты, изменять наблюдательные свойства нейтронных

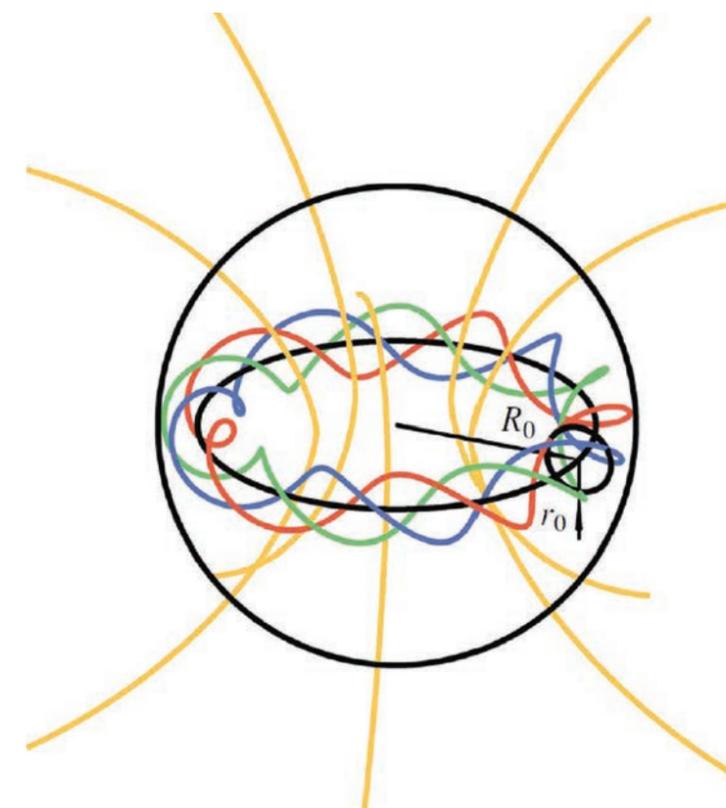
звезд. Могут ли существовать иные, кроме механических, проявления внутреннего магнитного поля? Одна из возможностей заключается в генерации токов переменным полем, что может проявиться, например, в нагреве коры, сопровождающимся рентгеновским и радиоизлучением. Токи вызываются перераспределением зарядов и могут быть высоки, если плотность заряда может меняться и достигать значительных величин. Однако широко распространено мнение, что плотность заряда ограничена плотностью Гольдрайха–Джулиана и, более того, просто равна ей. В работе получено подтверждение, что на самом деле это не так.

Найдено внутреннее электромагнитное поле идеально проводящей замагниченной нейтронной звезды, которая твердотельно вращается вокруг неподвижной точки. Ось вращения и абсолютное значение угловой скорости могут изменяться произвольным образом, а скорость вещества на поверхности звезды может достигать скорости света. Для описания вращения и определения магнитного поля использованы кватернионы. Показано, что электрическое поле коротит с нейтронной звездой, когда угловая скорость

постоянна, в то время как магнитное поле коротит всегда, даже когда направление и абсолютное значение угловой скорости меняются со временем. Магнитная коротация означает отсутствие каких бы то ни было поправок к магнитному полю в случае вращения звезды по сравнению со случаем покоя.

Вычислены объемные плотности заряда и тока, которые генерируют внутреннее поле, и изучена их взаимосвязь. Показано, что соотношение Гольдрайха–Джулиана в нейтронной звезде неверно: плотность заряда не равна плотности Гольдрайха–Джулиана. Это обстоятельство открывает связь между распределением заряда в нейтронной звезде и топологией магнитного поля:

плотность заряда определяется не только абсолютным значением поля, но и степенью его скрутки. Перестройка внутреннего магнитного поля потенциально наблюдаема: скрутка и раскрутка магнитных силовых линий вызывает токи, которые могут нагреть кору и изменить наблюдательные свойства нейтронных звезд, таких как RRAT, гибриды и магнитары. Заряд, накопленный в результате скрутки, может играть основную роль и значительно превышать стандартное значение Гольдрайха–Джулиана. Примером структуры магнитного поля, при которой плотность заряда на порядок больше плотности Гольдрайха–Джулиана, является витой тор — одна из предполагаемых структур внутреннего магнитного поля магнитара.



*Витой тор.*

### Результаты опубликованы:

1. Собьянин Д. Н. Нарушение соотношения Гольдрайха–Джулиана в нейтронной звезде. Письма в Астрон. журн. 2016. Т. 42, № 11. С. 818—825.

## Дробовой шум в ультратонких сверхпроводящих проволоках

*Предсказано новое явление: существование дробового шума напряжения в ультратонких сверхпроводящих проволоках, связанного с топологическими квантовыми флуктуациями фазы параметра порядка – квантовым проскальзыванием фазы. Впервые получено выражение для мощности дробового шума как функции частоты и температуры при прохождении тока. В настоящее время в ведущих мировых научных лабораториях идут эксперименты по обнаружению данных флуктуаций.*

Может ли сверхпроводник создавать флуктуации напряжения? Или, более конкретно, возникнет ли дробовой шум, если сквозь сверхпроводник пропустить ток? Задавая данные вопросы, мы подразумеваем, что сверхпроводник находится при низкой температуре практически в основном состоянии, а все характерные частоты и энергетические масштабы много меньше величины сверхпроводящей щели. На первый взгляд, ответ на данный вопрос отрицательный, поскольку одним из фундаментальных свойств сверхпроводящего состояния является полное отсутствие сопротивления, а значит ни падения напряжения, ни его флуктуаций в системе быть не может.

Однако, данные простые рассуждения применимы лишь в случае объемного сверхпроводника и нарушаются в случае ультратонких квазиодномерных сверхпроводящих проволок, где существует особый вид флуктуаций – квантовые проскальзывания фазы. При таком процессе происходит кратковременное локальное подавление модуля параметра порядка, и, одновременно с этим, фаза параметра порядка изменяется на  $\pm 2\pi$ . В силу соотношения Джозефсона каждое такое событие приводит к возникновению положительного или отрицательного импульса напряжения. Когда сквозь систему течет ток, нарушается симметрия между положительными и отрицательными импульсами напряжения, делая одни из них более вероятными, что приводит к возникновению ненулевого падения напряжения и ненулевой величине сопротивления сверхпроводящего провода. Это означает, что в присутствии квантовых проскальзыва-

тратонких квазиодномерных сверхпроводящих проволок, где существует особый вид флуктуаций – квантовые проскальзывания фазы. При таком процессе происходит кратковременное локальное подавление модуля параметра порядка, и, одновременно с этим, фаза параметра порядка изменяется на  $\pm 2\pi$ . В силу соотношения Джозефсона каждое такое событие приводит к возникновению положительного или отрицательного импульса напряжения. Когда сквозь систему течет ток, нарушается симметрия между положительными и отрицательными импульсами напряжения, делая одни из них более вероятными, что приводит к возникновению ненулевого падения напряжения и ненулевой величине сопротивления сверхпроводящего провода. Это означает, что в присутствии квантовых проскальзыва-

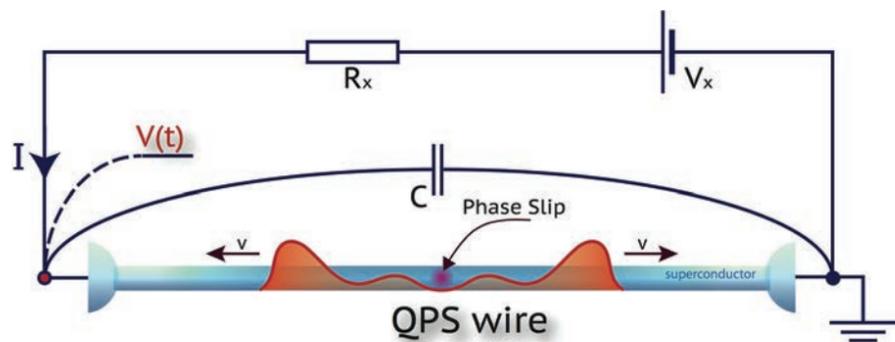


Рис. 1 Рассматриваемая система — ультратонкий сверхпроводящий провод, подключенный к внешней цепи.

ний фазы в системе возникает диссипация, а значит, в силу флуктуационно-диссипативной теоремы, и флуктуации напряжения. Данные аргументы позволяют положительно ответить на вопрос о существовании равновесных флуктуаций напряжения, однако используя их, мало что можно сказать о существовании дробового шума в системе.

В работах [1–3] нами был проведен детальный теоретический анализ флуктуаций напряжения в ультратонких сверхпроводящих проволоках, и впервые получено выражение для мощности дробового шума  $S_\Omega(I)$  как функции частоты  $\Omega$  и температуры  $T$

при пропускании сквозь провод тока  $I$ . Было показано, что при нулевой температуре зависимость мощности шума напряжения от частоты имеет пороговый характер. В длинном проводе шум отличен от нуля лишь при частоте  $\Omega$  меньшей  $\Phi_0 I/2$ , где  $\Phi_0 = \pi/e$  – сверхпроводящий квант потока. На рис. 1 показана обсуждаемая в работах система, а на рис. 2 изображен пример зависимости мощности шума от частоты и температуры при некотором значении параметров системы. В настоящее время в ведущих мировых научных лабораториях идут эксперименты по обнаружению данных флуктуаций.

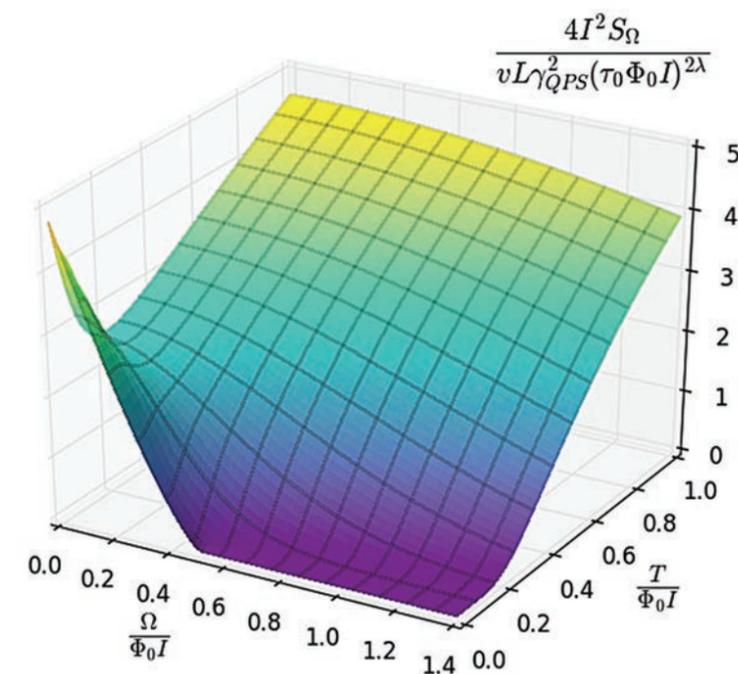


Рис. 2. График зависимости мощности дробового шума от частоты и температуры.

### Результаты опубликованы:

1. Andrew G. Semenov and Andrei D. Zaikin, Quantum phase slip noise, Phys. Rev. B 94, 014512, 2016.
2. Andrew G. Semenov and Andrei D. Zaikin, Quantum phase slips and voltage fluctuations in superconducting nanowires, принято к печати в Fortschritte der Physik, 2017.
3. Andrew G. Semenov and Andrei D. Zaikin, Shot noise in ultrathin superconducting wires, Journal of Superconductivity and Novel Magnetism, 30, 139, 2017.

## Особенности электронного спектра в кулоновском поле сверхтяжелых ядер

*Получены точные уравнения, определяющие дискретный энергетический спектр и соответствующие связанные состояния электрона в кулоновском поле произвольного заряда, обрезанном на некотором радиусе, зависящем от заряда (модель сверхтяжёлого ядра), и точные уравнения для зарядов, дающих связанные состояния электрона с энергией  $E = -m$ , совпадающей с верхней границей нижней ветви непрерывного спектра. Вычислен сверхкритический заряд.*

Релятивистские квантовые эффекты в сверхсильном кулоновском поле, в частности, рождение электрон-позитронных пар, уже давно привлекают внимание физиков. Считается, что качественное и особенно количественное описание может быть достигнуто только в рамках непертурбативной КЭД, где сверхсильное кулоновское поле выступает в качестве бэкграунда. Для построения такой КЭД необходимо иметь полное математическое решение спектральной задачи для гамильтониана Дирака с кулоновским полем сколь угодно большого заряда  $Z_e$  ядра (ниже просто  $Z$ ). Энергетический спектр релятивистского электрона в атоме с  $Z \leq Z_c \leq 137.04$  хорошо описывается с помощью уравнения Дирака, которое даёт спектр Зоммерфельда в согласии с экспериментом. Что касается зарядов ядра с  $Z > Z_c$ , то принято было считать, что уравнение Дирака в этом случае неприменимо. Однако недавно нами было показано, что это заключение ошибочно, см. [1, 2]. Известные трудности не возникают, если гамильтониан Дирака с кулоновским полем корректно определяется как самосопряженный оператор. До работ [1, 2] считалось, что эти трудности можно устранить, если рассматривать ядро конечного радиуса. Тем не менее, в процессе реализации этой идеи её авторы пришли к выводу, что при обрезании кулоновского

потенциала на конечном малом радиусе гамильтониан Дирака имеет физически осмысленный спектр, если заряд  $Z$  не превышает так называемого сверхкритического заряда  $Z_{scr}$ . Разными авторами приводились следующие значения сверхкритического заряда:  $Z_{scr} = 200$  (Померанчук, Смородинский),  $Z_{scr} = 170$  (Зельдович, Попов),  $Z_{scr} = 172$  (Грайнер). И вновь применимость уравнения Дирака, теперь уже в случае неточечных ядер с зарядами  $Z \geq Z_{scr}$ , была поставлена под сомнение. Было высказано предположение, что новые трудности связаны с многочастичным характером рассматриваемой задачи, в частности, с возможным рождением  $e^+e^-$ -пар ядром с зарядом  $Z \geq Z_{scr}$ . С тех пор почти все исследователи в этой области повторяли эту точку зрения в своих публикациях. Спустя много лет, в недавней публикации [3] это заключение было признано ошибочным. Что касается нас, то после восстановления в правах уравнения Дирака с кулоновским полем произвольного точечного ядра для нас было бы странным принять тот факт, что устранение сингулярности кулоновского потенциала в начале координат (обрезанием) не только не улучшает ситуацию со спектром, но ухудшает её. Ввиду большой важности этого вопроса для построения последовательной вторично-квантованной теории, мы в работе [4]

вновь обратились к спектральной задаче с обрезанием, соответствующим полю положительного заряда  $Z$ , равномерно распределённого по сферической поверхности ядра радиуса  $r_0 = R_0(2.5Z)^{1/3}$ ,  $R_0 = 1.25 \times 10^{-15} \text{ м}$ . Мы вывели точные уравнения, определяющие весь дискретный спектр в интервале энергий  $[-m, m]$  и нашли его численные решения. В отличие от более ранних работ мы не использовали приближение малого радиуса обрезания. Никаких ограничений для нахождения спектра при любых сколь угодно больших зарядах  $Z$  не было обнаружено. При анализе точного уравнения для зарядов  $Z(j, \zeta)$ , дающих связанные состояния с энергией  $E = -m$  и с данным полным угловым моментом  $j$  и спиновым числом  $\zeta$ , было установлено, что существует бесконечное число таких зарядов  $Z_n(j, \zeta)$ ,  $n = 1, 2, \dots$ , растущих с  $j$ . При этом  $Z_n(j, \zeta) \rightarrow \infty$  при  $n \rightarrow \infty$  и разность между последовательными членами этой последовательности уменьшается с увеличением  $n$ . Минимальный заряд

$Z_1(1/2, -1)$  среди всех зарядов  $Z_n(j, \zeta)$  мы называем сверхкритическим зарядом. Сверхкритический заряд в нашей модели есть  $Z_{scr} = 174$ . Однако наличие сверхкритических зарядов в нашей модели и аналогичных моделях не свидетельствует о невозможности нахождения полного точечного спектра и полной системы собственных функций для гамильтониана Дирака со сколь угодно сильным кулоновским полем неточечного ядра. И так, можно сказать, что одночастичная релятивистская квантовая механика с гамильтонианом Дирака с любым сколь угодно сильным кулоновским полем точечного или неточечного ядра математически последовательна, в частности, описывает унитарную эволюцию. Конечно, она неудовлетворительна с физической точки зрения ввиду неограниченности энергетического спектра электрона снизу. В любом случае только будущая последовательная КЭД с сильным кулоновским полем может дать правила для вычисления всех квантовых процессов.

### Результаты опубликованы:

1. Б.Л. Воронов, Д.М. Гитман и И.В. Тютин, ТМФ 150(1) (2007) 34; D.M. Gitman, A.D. Levin, I.V. Tyutin, B.L. Voronov, Phys. Scripta 87 (2013) 038104.
2. D.M. Gitman, I.V. Tyutin, B.L. Voronov, Self-adjoint Extensions in Quantum Mechanics. General theory and applications to Schrödinger and Dirac equations with singular potentials. (Birkhäuser, Boston 2012).
3. В.М. Кулешов и др., УФН 185 (8) (2015) 845.
4. Б.Л. Воронов, Д.М. Гитман, А.Д. Левин, Р. Феррейра, ТМФ 187(2) (2016); D. M. Gitman, B. Voronov, R. Ferreira, A. Levin, Theor. Math. Phys., 187(2) (2016) 633.

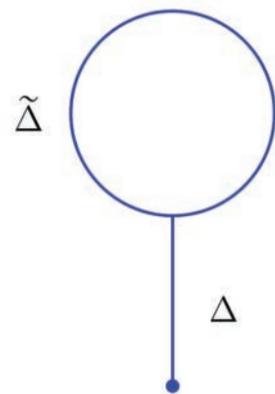
## Голографическая интерпретация одноточечного тороидального блока в квазиклассическом пределе

*Изучено АдС/КфТП соответствие между граничной двумерной конформной теорией поля и трехмерной гравитацией в объеме. В качестве трехмерного пространства выбирается пространство анти-де Ситтера с замкнутым временем и топологией бублика, границей которого является тор. При этом корреляционные функции конформной теории на граничном торе воспроизводятся через действие гравитации в объеме.*

Рассмотрен частный случай 1-точечной корреляционной функции конформного оператора в квазиклассическом приближении. Коррелятор раскладывается на так называемые конформные блоки, которые являются модельно-независимыми величинами и служат аналогами парциальных волн в квантовой теории. Явный вид функции конформного блока неизвестен, в силу чего коррелятор рассматривается в рамках теории возмущений, когда конформный оператор близок к единичному оператору. Показано, что такой линеаризованный 1-точечный конформный блок на торе опи-

сывается как длина графа из геодезических линий типа «головастик» в трехмерном пространстве, который воспроизводит вид диаграммы блока (см. рисунок). Геодезические линии являются мировыми линиями двух массивных частиц, описываемых стандартным гравитационно-механическим действием. Согласно АдС/КфТП соответствию, массивные частицы в объеме описывают конформные операторы на границе в квазиклассическом приближении. Особенностью трехмерного описания двумерного конформного блока является то, что замкнутое время АдС пространства может быть

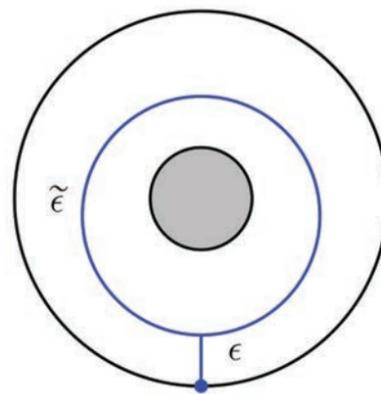
Конформная теория поля



АдС/КфТП



АдС гравитация



*Слева: Графическое представление конформного блока на торе. В силу нетривиальной топологии тора, у диаграммы блока есть замкнутая петля, внешний конец соответствует конформному оператору, петля – внутреннему каналу рассеяния. Справа: Геодезический граф на продольном сечении трехмерного пространства АдС типа бублик. Синие линии являются мировыми линиями массивных частиц.*

проинтерпретировано как термодинамическая температура в граничной конформной теории. Показано, что соответствие имеет место при низких температурах.

Полученные результаты служат естественным развитием предыдущих работ авторов по квазиклассическому АдС/КфТП

соответствию [К.В. Alkalaev, V.A. Belavin, JHEP 1505 (2015), Nucl. Phys. B904 (2016), JHEP 1603 (2016)], в которых была предложена реализация многоточечных конформных блоков на двумерной сфере в терминах длин геодезических графов на пространстве типа АдС с конической сингулярностью.

**Результаты опубликованы:**

1. K.V. Alkalaev, V.A. Belavin, Holographic interpretation of 1-point toroidal block in the semiclassical limit, JHEP 1606 (2016) 183; arXiv:1603.08440 [hep-th].

## Исследование пульсирующих режимов распространения волн горения в богатых водород-воздушных смесях

Исследована диффузионно-тепловая устойчивость волн дефларгации и появление пульсирующих волн горения в богатых водород-воздушных смесях вблизи предела воспламенения для нормальных и повышенных давлений и различных начальных температур свежей смеси в рамках моделей с детальными и редуцированным кинетическими механизмами реакций. Рассмотрен случай плоской волны горения в бесконечной среде и в условиях микропотокового реактора с контролируемой температурой стенок.

Исследование свойств пламен вблизи пределов воспламенения является важной задачей с фундаментальной и прикладной точек зрения. Это позволяет, с одной стороны, установить условия возникновения и изучить свойства сложных пространственно-временных режимов горения, а, с другой стороны, вызвано практической необходимостью установления пределов динамического гашения.

Для случая свободного распространения пламени в водород-воздушной смеси проведены численные расчеты на основе детальными кинетическими схем, которые позволили найти нейтральную границу устойчивости по давлению, коэффициенту избытка топлива и начальной температуре, а также частотно-амплитудные характеристики возникающих пульсаций пламени.

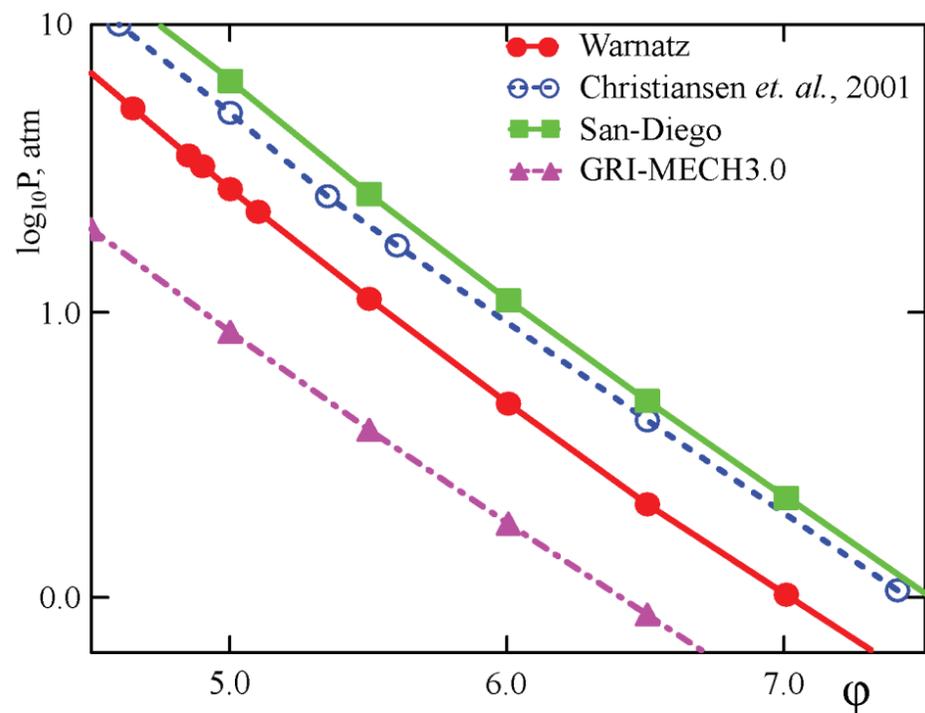


Рис. 1. Нейтральная граница устойчивости на плоскости параметров давление – коэффициент избытка топлива для нормальных условий и нескольких кинетических механизмов.

Мы впервые показали, что описание волн дефларгации с помощью различных детальными кинетическими механизмов дает количественно не согласующиеся оценки границ устойчивости и амплитудно-частотные характеристики осцилляций. Результаты продемонстрированы на рисунке выше. Установленные противоречия указывают на необходимость проведения экспериментальных исследований диффузионно-тепловых неустойчивостей, которые в случае успешной реализации позволят

создать новые методики верификации детальными кинетическими механизмов.

Практически подобные экспериментальные исследования могут быть проведены в микропотоковом реакторе с контролируемым распределением температуры стенок, для которого возникновение диффузионно-тепловых осцилляций пламени были предсказаны нами в рамках моделей горения водород-воздушных смесей с редуцированной кинетикой (см. рис. 2).

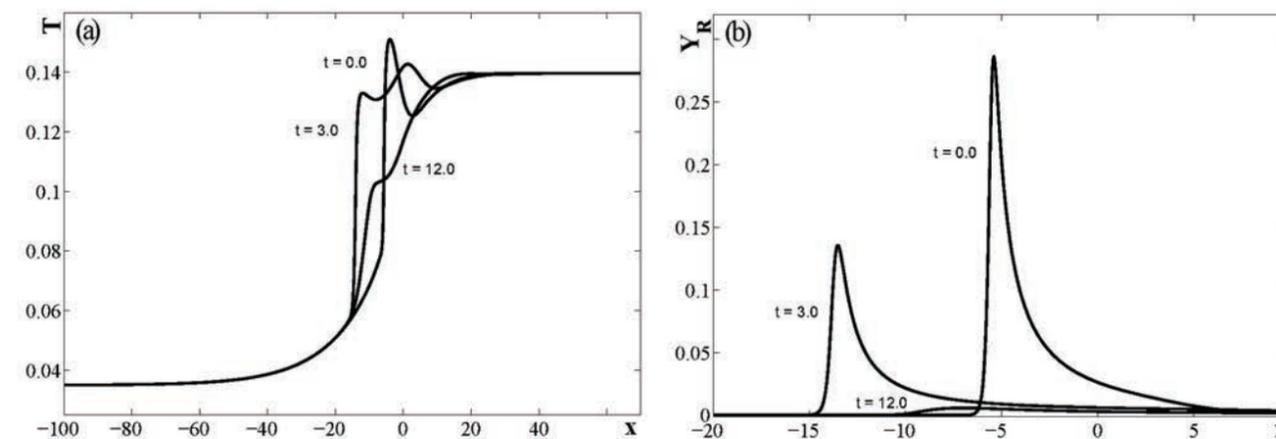


Рис. 2. Распределения температуры и концентрации радикалов в микропотоковом реакторе, построенные для трех моментов времени в течение периода пульсаций.

### Результаты опубликованы:

1. Korsakova, A.I., Gubernov, V.V., Kolobov, A.V., Bykov, V., Maas, U., Stability of rich laminar hydrogen-air flames in a model with detailed transport and kinetic mechanisms, *Combustion and Flame*, 2016, 163, 478–486.
2. Miroshnichenko, T., Gubernov, V., Maruta, K., Minaev, S., Diffusive–thermal oscillations of rich premixed hydrogen–air flames in a microflow reactor, *Combustion Theory and Modelling*, 2016, 20, 313–327.
3. Gubernov, V.V., Kolobov, A.V., Bykov, V., Maas, U., Investigation of rich hydrogen-air deflagrations in models with detailed and reduced kinetic mechanisms, *Combustion and Flame*, 2016, 168, 32–38.

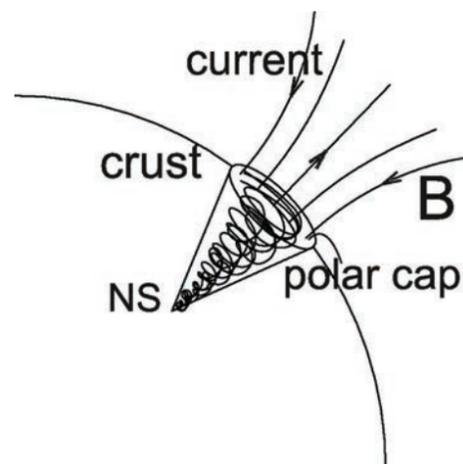
## Эволюция магнитного поля аккрецирующих нейтронных звезд

*Показано, что затухание магнитного поля аккрецирующих нейтронных звезд уменьшается на 3–4 порядка за время нескольких миллионов лет за счет проникновения электрических токов, сопровождающих дисковую аккрецию на звезду от звезды-компаньона, глубоко в кору нейтронных звезд.*

Поток вещества, аккрецирующий на замагниченную нейтронную звезду, сопровождается электрическим током, текущим по аккреционному диску, далее вдоль силовых линий магнитного поля, связывающего диск с полярной шапкой нейтронной звезды. Этот электрический ток и осуществляет передачу углового момента от диска к звезде. Замыкание электрического тока происходит в коре нейтронной звезды в полярной области поперек магнитного поля.

Но проводимость коры вдоль магнитного поля значительно превосходит проводимость поперек поля, поэтому ток глубоко проникает в кору, вплоть до сверхпроводящего ядра. Магнитное поле, создаваемое аккреционным током, значительно усиливается с глубиной проникновения из-за того, что Холловская проводимость коры также сильно превосходит поперечную проводимость. В результате ток начинает преимущественно течь в тороидальном направлении, создавая сильное продольное поле, значительно превышающее первоначальное дипольное поле. Это поле существует только в узкой полярной трубке шириной  $r$ , сужающейся с глубиной, т. е. с увеличением плотности вещества коры  $\rho$ ,  $r \propto \rho^{-1/4}$ . Соответственно, магнитное поле  $B$  в трубке растёт с глубиной,  $B \propto \rho^{1/4}$ , и достигает ве-

личины порядка  $10^{17}$  Гаусс во внутренней области коры. Оно разрушает сверхпроводящие вихри в ядре звезды в узкой области вдоль оси диполя размером порядка десятка сантиметров. Из-за создаваемого градиента плотности вихрей они постоянно втекают в эту мертвую зону и количество вихрей уменьшается, уменьшается и собственное магнитное поле звезды. Затухание магнитного поля происходит степенным образом,  $B = B_0(1 + t/\tau)^{-1}$ . Характерное время уменьшения магнитного поля составляет величину  $\tau \approx 10^3$  лет. Таким образом, магнитное поле аккрецирующих нейтронных звезд уменьшается до величин  $10^8$ – $10^9$  Гаусс за время  $10^6$ – $10^7$  лет.



*Магнитное поле и электрические токи внутри нейтронной звезды и в магнитосфере*

### Результаты опубликованы:

1. Istomin Ya.N., Semerikov I. A., Magnetic field evolution of accreting neutron stars, Monthly Notices of Royal Astronomical Society, V. 455, P. 1938–1945, 2016.

## Нарушение РТ-симметрии в резонансно-туннельных структурах

*Представлена фермионная модель, основанная на симметричной резонансно-туннельной структуре, которая демонстрирует спонтанное нарушение симметрии по отношению к одновременному действию операций пространственной инверсии (P) и обращения времени (T). Нарушение РТ-симметрии проявляется в слиянии (коллapse) резонансов.*

Построена теория спонтанного нарушения симметрии в резонансно-туннельных структурах в отсутствие диссипации. Решена известная проблема определения точного положения резонансных пиков прозрачности на шкале энергии. В случае узких и хорошо разделенных резонансов (формула Брейта–Вигнера) положение резонансных пиков с высокой точностью определяется действительной частью полюсов матрицы рассеяния. Ранее было отмечено, что для широких, но по-прежнему хорошо разделенных резонансов лучшее соответствие с положением пика дает модуль полюса матрицы рассеяния. В настоящей работе показано, что положения резонансных пиков даже для случая сильно перекрывающихся и сливающихся резонансов в точности совпадают с собственными значениями некоторого вспомогательного неэрмитового гамильтониана, который может быть получен непосредственно из неэрмитового эффективно-квантовую систему в рамках формализма Фешбаха. В пространственно-симметричных структурах неэрмитов вспомогательный гамильтониан обладает РТ-симметрией и

действительным спектром собственных значений. Каждое собственное значение вспомогательного гамильтониана соответствует единичному резонансу прозрачности. В особой точке происходит слияние собственных значений и, соответственно, слияние резонансов, которое сопровождается нарушением пространственной симметрии распределения волновой функции в резонансе (при заданном направлении потока электронов). В работе рассмотрена, по-видимому, первая фермионная бездиссипативная модель, в которой проявляется феномен нарушения РТ-симметрии. В работе показано, что действительными собственными значениями могут обладать и неэрмитовы гамильтонианы, не обладающие пространственной симметрией. Такие гамильтонианы имеют непосредственное отношение к полупроводниковым гетероструктурам, обладающим идеальной прозрачностью при заданной энергии. Представлена также классификация различных типов слияния резонансов в терминах теории катастроф. Полученные результаты могут быть использованы при конструировании широкополосных фильтров и высокочувствительных сенсоров.

### Результаты опубликованы:

1. А.А.Горбачевич, Н.М.Шубин, Нарушение РТ-симметрии в резонансно-туннельных структурах, Письма в ЖЭТФ 103 (12) 866 (2016).
2. А.А. Gorbachevich, N.M. Shubin, Coalescence of resonances in dissipationless resonant tunneling structures and PT-symmetry breaking, Annals of Physics 376, 353 (2017).

## Выявлено проявление спонтанно и искусственно образованных неоднородностей в проводимости 2D системы

Спонтанно образующиеся спиновые капли (~100 нм), ранее наблюдавшиеся авторами в термодинамике 2D системы, впервые обнаружены и в проводящих свойствах. Найден масштаб энергии плавления капель. Обнаружено новое явление: нелинейная зависимость холловского сопротивления от магнитного поля, указывающая на явление перераспределения транспортногo тока в области оболочек антиточек с ростом магнитного поля. Предложено качественное объяснение наблюдаемого эффекта.

В 2012 году группой ФИАН–университет Технион (Израиль) было экспериментально продемонстрировано, что двумерная сильновзаимодействующая система при низких температурах может стать неоднородной: в ней образуются спиновые капли. С тех пор не было предложено независимого способа подтвердить существование этих низко-

энергетических объектов. Наконец, в 2016 году признаки спиновых капель физикам из ФИАН удалось увидеть и в проводимости системы (на рис. 1 — фазовая диаграмма системы в координатах температура/концентрация, области I и II соответствуют режимам плавления и роста спиновых капель соответственно).

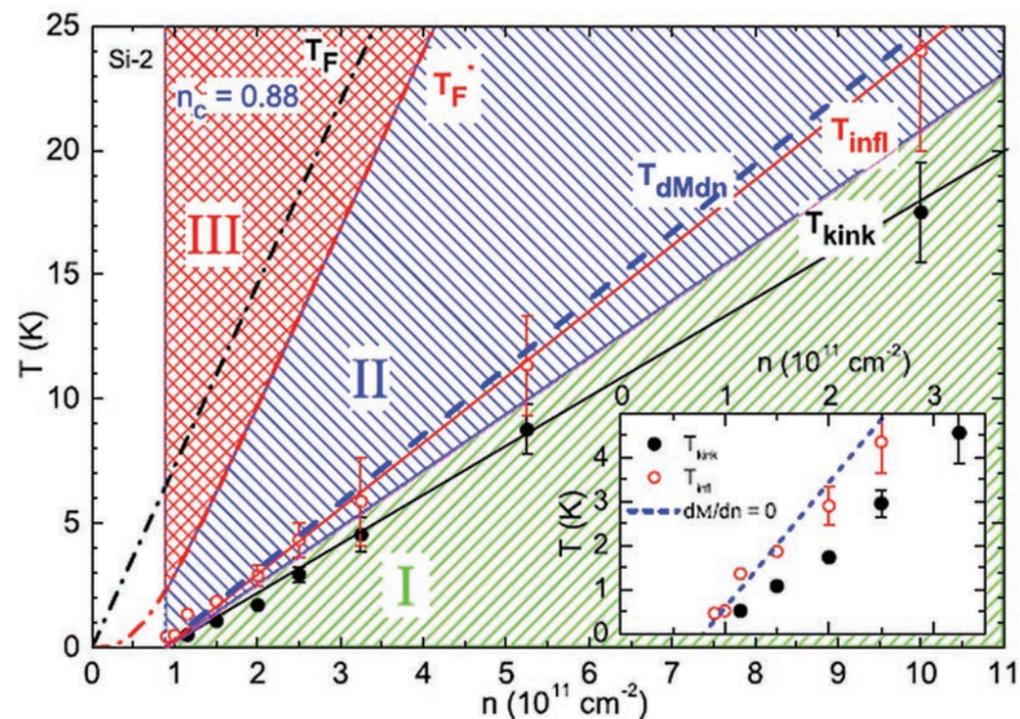


Рис. 1. Экспериментально установленная фазовая диаграмма сильновзаимодействующей разупорядоченной электронной системы в кремнии. Точками показаны найденные разными способами границы раздела двух металлических фаз.

Параллельно исследователи задались вопросом: а можно ли искусственно создать неоднородности в системе, которые приведут к таким же особенностям в проводимости? Экспериментальной площадкой для таких исследований явился массив антиточек (см. рис. 2). Если взять классический

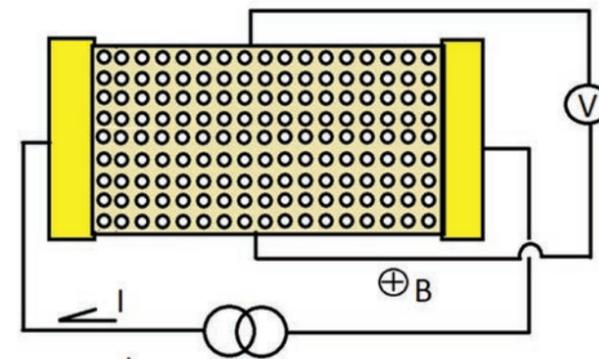


Рис. 2. Геометрия эксперимента по исследованию эффекта Холла в массиве антиточек.

предел, то для двумерных систем холловское сопротивление  $R_{xy} = V/ne$  определяется исключительно концентрацией  $n$  и не зависит от формы образца. Поэтому, если в 2D системе просверлить классически большое отверстие (антиточку) или сделать массив

таких отверстий, то эффект Холла не должен измениться.

В данной работе проведены измерения магнитосопротивления и эффекта Холла в системе антиточек в Si–МОП структуре при низких температурах в перпендикулярных полях. Характерные размеры антиточек (~5 мкм) и их границ (~300 нм) были больше остальных размеров задачи (фермиевской длины волны ~10 нм, длины свободного пробега ~100 нм), см. изображение в просвечивающий электронный микроскоп. В результате проведенных исследований обнаружено новое явление – нелинейная зависимость холловского сопротивления от магнитного поля. Эта зависимость показывает, что с ростом магнитного поля транспортный ток перераспределяется в области оболочек антиточек, обладающих пониженными значениями концентрации и подвижности носителей. Предложено качественное объяснение наблюдаемого эффекта.

Результаты получены в лаборатории сильно-коррелированных электронных систем Отделения физики твердого тела ФИАН с использованием оборудования ЦКП ФИАН.

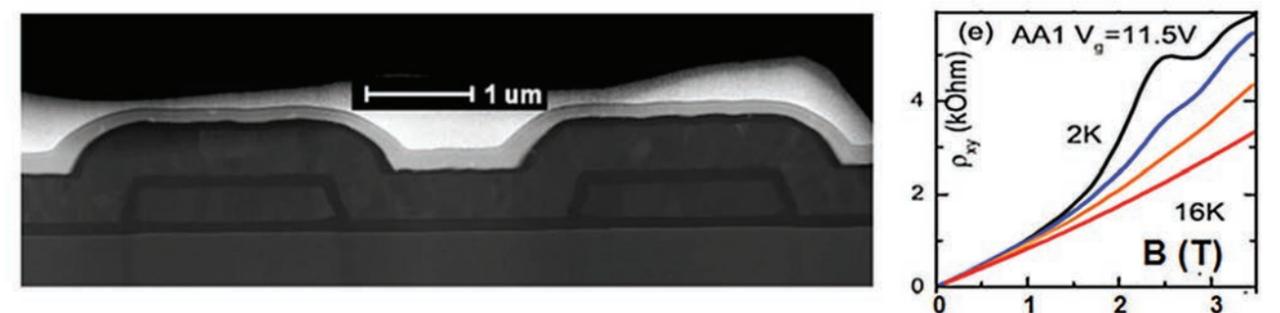


Рис. 3. Изображение двухзатворной системы с массивом антиточек, полученное в просвечивающем электронном микроскопе (слева). Зависимость Холловского сопротивления массива антиточек от температуры при различных температурах (справа).

### Результаты опубликованы:

1. А.Ю. Kuntsevich, А.В. Shupletsov, М.С. Nunuparov, Physical Review B 93, 205407 (2016).

## Режекторная фильтрация спектра возбуждения при энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии слабых сигналов

Сотрудниками Лаборатории «Рентгеновские методы диагностики наноструктур» Инновационного центра ФИАН разработан метод эффективной режекторной фильтрации непрерывного рентгеновского спектра возбуждения в области энергии излучения  $E \geq 8$  кэВ.

Режекторная фильтрация непрерывного рентгеновского спектра возбуждения в области энергии излучения  $E \geq 8$  кэВ обеспечивает возможность резко повысить чувствительность энергодисперсионной рентгеновской спектрометрии при определении низких концентраций примесей тяжелых элементов ( $Z > 25$ ), оказывающих существенное влияние на оптические и электрические свойства полупро-

водниковых наноструктур и метаматериалов. Предложенный метод обеспечивает также подавление интенсивных спектральных линий на 1–2 порядка, что позволяет исключить перегрузку рентгеновского спектрометра.

Расчеты, проведенные в рамках статистической динамической теории рентгеновской дифракции, показывают возможность получения спектральных долин

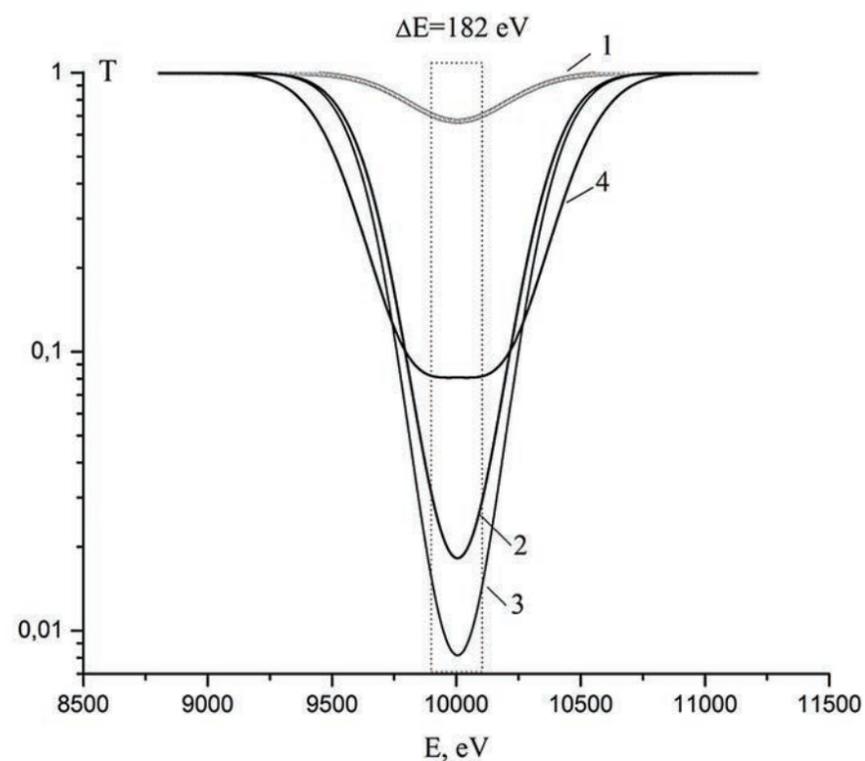


Рис. 1. Энергетические зависимости коэффициента пропускания  $T_{ex}$ , обусловленные экстинкцией: 1 – фильтр из единичной плёнки толщиной 75 мкм ( $\Delta\omega=0,540$ ); 2, 3 – соответственно наборы из 10 и 12 плёнок высокоориентированного пиролитического графита (ВПГ); 4 – набор из 12 плёнок ВПГ с попарным смещением брэгговского угла  $\Theta B$  на величину  $\Delta\omega=0,380$ .

шириной до 1000 эВ с ослаблением в минимуме более 20 дБ.

Результаты расчетов подтверждены экспериментальными измерениями спектров

рентгеновского пропускания через тонкопленочные структуры эшелонного типа из высотекстурованного пиролитического графита (ВПГ).

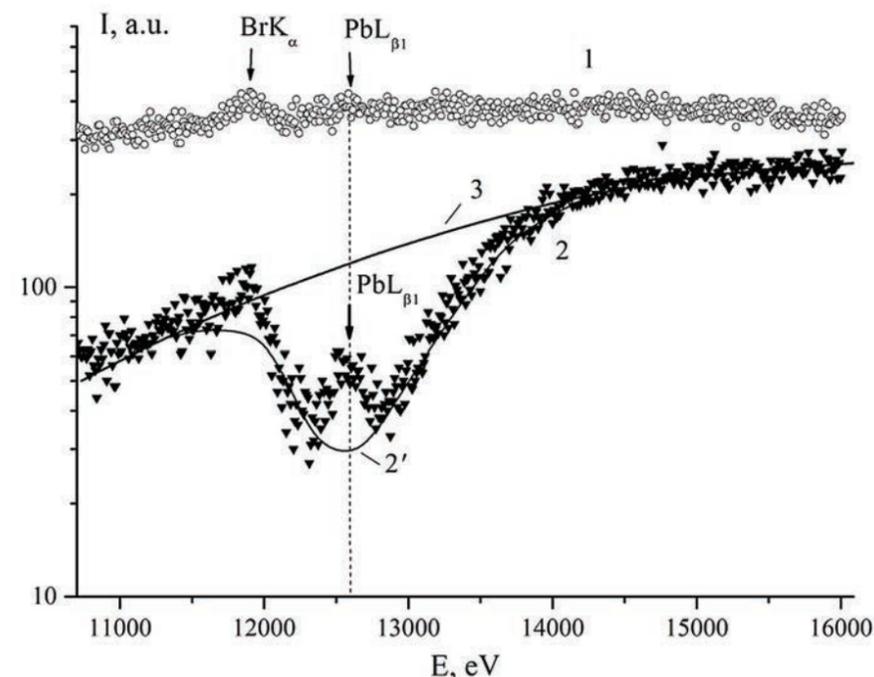
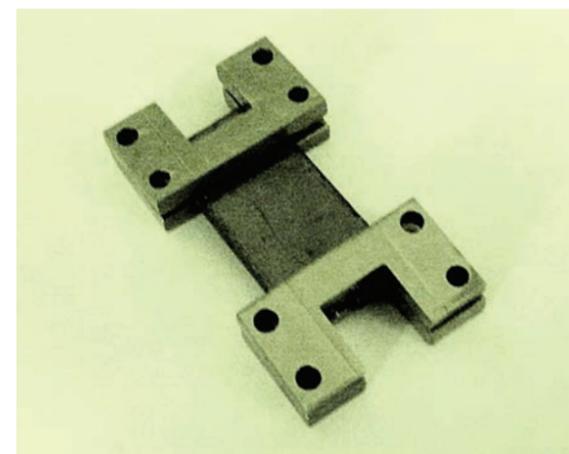


Рис. 2. Экспериментальные спектры флуоресценции образца полистирена с включениями PbO: 1 – без спектральной режекции; 2 – со спектральной режекцией с помощью пластины пиролитического графита толщиной 0,71 мм ( $\Delta\omega=0,950$ ) в области флуоресцентной линии  $PbL_{\beta 1}$ ; 2' и 3 – расчётная спектра пропускания через графит с учётом и без учёта дифракционной экстинкции



Режекторный фильтр из ВПГ

### Результаты опубликованы:

1. А. Г. Турьянский, С. С. Гига, В. М. Сенков, И. В. Пиршин, Я. М. Станишевский. Письма в ЖЭТФ, том 104, вып. 6, с. 430 – 434, 2016.

## Многослойная графеновая структура углерода в короткопериодных сверхрешетках

Впервые получены сверхрешетки, содержащие графеноподобные углеродные слои. Использовался разработанный ранее в лаборатории метод лавинного отжига аморфной сверхрешетки с коротким периодом. Экспериментально получены сверхрешетки C/SiC, в каждом углеродном слое которых реализовалось 3–5 слоёв графена.

Идея данной технологии описана в [1]. Было показано, что при отжиге аморфной, короткопериодной сверхрешетки (СР) периодический потенциал, возникающий при чередовании слоев с различной шириной запрещенной зоны, может влиять на то, в какую пространственную модификацию будет кристаллизоваться вещество слоев СР. Для отжига использовался аморфный подслой

углеродных слоев различных образцов выбиралась кратная периоду кристаллической решетки известной структурной модификации углерода (графита и алмаза).

Исследования спектров КРС и ФЛ показали, что изменяя только геометрические параметры СР, можно получать углеродные слои с различным соотношением  $sp^3/sp^2$  связей, т.е. синтезировать «алмазоподобные»

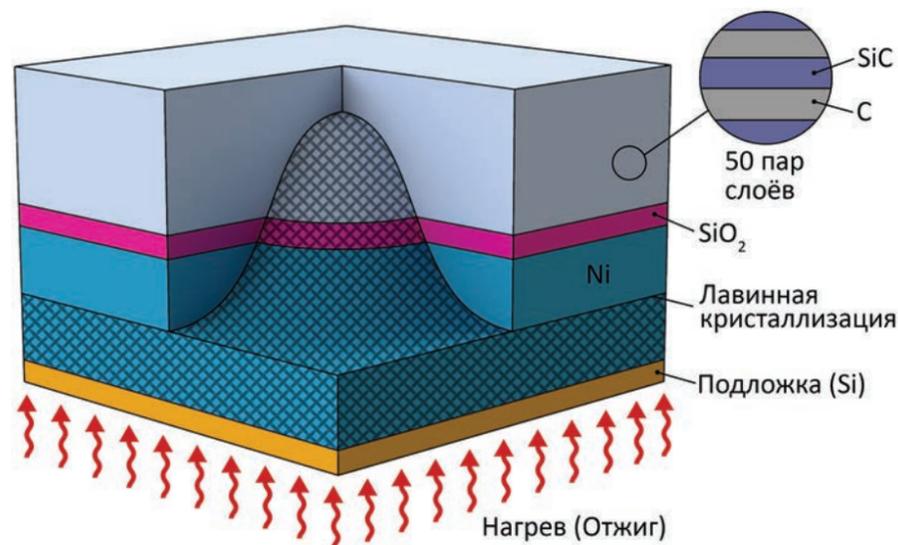


Рис. 1. Схема аморфной сверхрешетки и ее лавинная кристаллизация.

Со или Ni, напыленный между подложкой и СР, который, при кратковременном нагреве, переходил из аморфизированного состояния в кристаллическое, выделяя тепло, достаточное для отжига сверхрешетки.

В работе [2] данная методика была применена для сверхрешеток, содержавших углеродные слои и слои нитрида кремния. Тол-

щины углеродных слоев различных образцов

или «графитоподобные» слои углерода. В следующей серии образцов (#4, #5 и #6) толщины углеродных и слоев SiC были уменьшены [3]. На рисунке приведены их спектры КРС и, для сравнения, спектры монокристалла графита и графена высокого качества.

Хорошо известно, что спектр графена содержит характерные линии D, G, и G'. Линия D

определяется дефектами и неоднородностями в структуре. Малая интенсивность полосы D свидетельствует о качестве графеновой пленки. Отношение интенсивностей полос G' и G характеризует количество слоев графена.

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что образец #6 представляет собой сверхрешетку, углеродные слои которой содержат несколько графеновых

слоев, не связанных друг с другом валентными и  $sp^3$  связями. Т.е. углеродные слои имеют структуру многослойного графена. Сравнение частотного положения максимума полосы G' для образца #6 и величины отношения  $IG'/IG$  с литературными данными позволяют сделать полуколичественный вывод, что в каждом углеродном слое СР реализовались 3–5 слоёв графена.

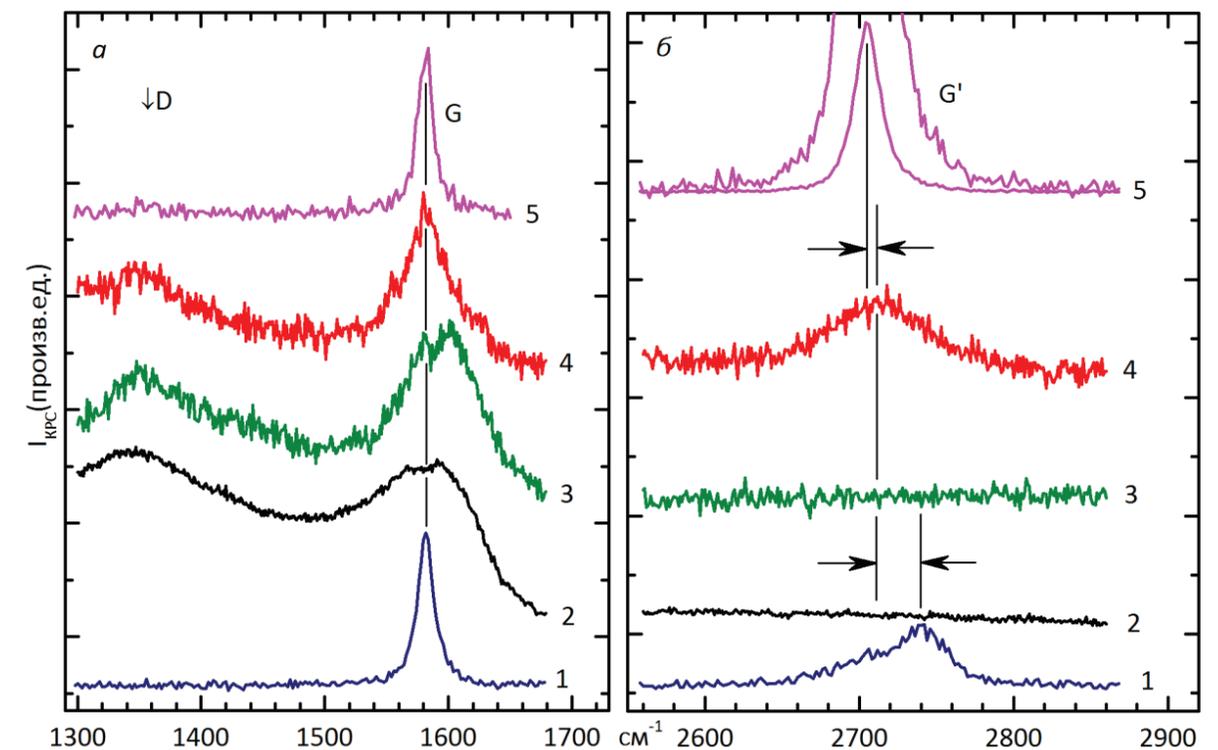


Рис. 2. Спектры КРС первого (а) и второго (б) порядков образцов #4, #5 и #6, а также графена и монокристалла графита. Кривые 1 – графит, 2 – образец #4, 3 – образец #5, 4 – образец #6, 5 – графен. Интенсивность спектров 3 и 4 увеличена в 22 раза по сравнению со спектром 2. Внутренняя кривая спектра 5б – полоса G' графена, интенсивность которой уменьшена в 7.4 раза.

### Результаты опубликованы:

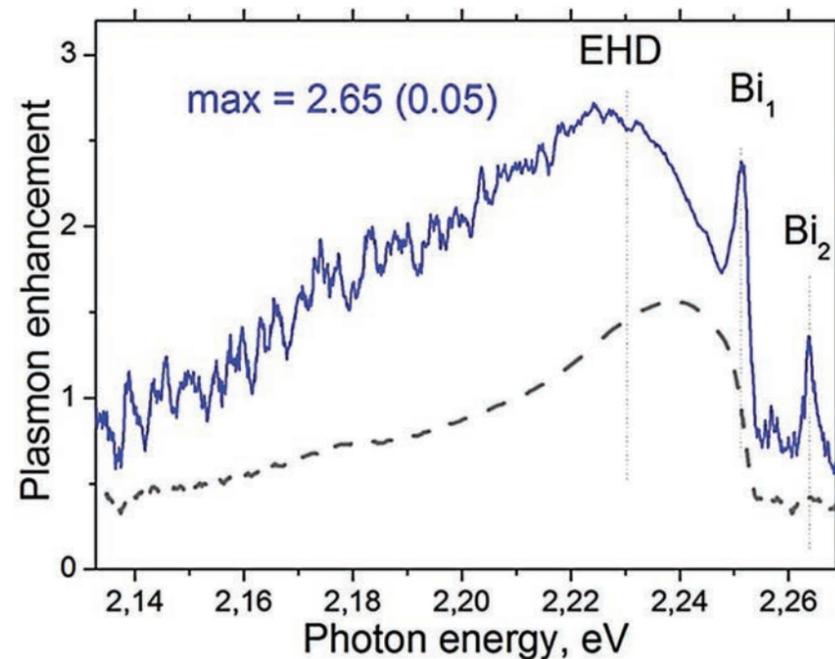
1. Плотников А.Ф., Пудонин Ф.А., Стопачинский В.Б., Кристаллизация сверхрешеток Si-SiO<sub>2</sub>, стимулированная одноосным периодическим потенциалом, Письма ЖЭТФ. 1987. Т. 46. Вып. 11. С. 443.
2. Заварицкая Т.Н., Караванский В.А., Мельник Н.Н., Пудонин Ф.А., Алмазоподобные и графитоподобные состояния углерода в короткопериодных сверхрешетках, Письма ЖЭТФ. 2004. № 6. С. 340.
3. Заварицкая Т.Н., Мельник Н.Н., Пудонин Ф.А., Шерстнев И.А., Многослойная графеновая структура углерода в короткопериодных сверхрешетках, Письма в ЖЭТФ. 2016. Т. 103. № 5. С. 385.

## Плазмонное усиление многочастичных процессов излучательной рекомбинации

*Продemonстрировано плазмонное усиление золотыми наночастицами коллективных процессов, при которых после рекомбинации двух дырок и двух электронов из противоположенных долин энергия полностью передается одному кванту света.*

Экспериментально продемонстрировано увеличение интенсивности коллективных излучательных процессов в квантовых ямах SiGe/Si с малой толщиной покровного слоя кремния за счет взаимодействия многочастичных состояний квантовых ям с плазменными колебаниями золотых наночастиц. Показано, что величина эффекта плазмонного усиления интенсивности люминесценции, соответствующей удвоенной частоте излучения электронно-дырочной системы в квантовой яме ( $2E_g$ -люминесценция), зависит от типа мно-

гочастичных состояний, формирующихся в неравновесной электронно-дырочной системе квантовой ямы. Максимально достигнутое в данной работе увеличение интенсивности фоторекомбинационного излучения соответствует низкочастотным состояниям квазидвумерной электронно-дырочной жидкости и составляет  $\sim 2.6$  при температуре 5 К. Полученные результаты важны для развития альтернативных методов кремниевой фотоники, в основе которых лежат не использованные ранее физические принципы.



Изменение спектра  $2E_g$ -люминесценции в присутствии золотых наночастиц с концентрацией  $\sim 10^{12} \text{ см}^{-2}$  ( $T = 5 \text{ K}$ , плотность мощности фотовозбуждения  $0.25 \text{ мВт/см}^2$ ). EHD – полоса излучения электронно-дырочной жидкости,  $Bi_1$  и  $Bi_2$  – линии излучения биекситонных состояний с участием тяжелой и легкой дырок, соответственно.

При гелиевых температурах в квантовых ямах  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$  с  $x < 0.1$  в неравновесной электронно-дырочной системе с ростом мощности фотовозбуждения наблюдается фазовый переход экситонный газ – электронно-дырочная жидкость. Помимо экситонного газа и конденсированной фазы (электронно-дырочной жидкости) при промежуточных мощностях возбуждения в системе также существуют многочастичные состояния различных типов (биекситоны, многоэкситонные комплексы и т.д.). Помимо излучения в ближней ИК-области, в структурах  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$  регистрируется излучение, связанное с четырехчастичной рекомбинацией, когда в результате одновременной рекомбинации двух дырок с двумя электронами из симметрично расположенных электронных долин зоны проводимости энергия полностью передается одному кванту света видимого диапазона. Подобное излучение (так называемая  $2E_g$ -люминесценция) связано только с многочастичными состояниями (биекситонами, электронно-дырочной жидкостью), что делает  $2E_g$ -люминесценцию полезным инструментом для идентификации каналов излучательной рекомбинации в наноструктурах кремний–германий.

Было исследовано влияние золотых наночастиц на спектры низкотемпературной фотолюминесценции квантовых ям  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$  с тонким покровным слоем кремния. Регистрация излучения биекситонов и электронно-дыроч-

ной жидкости, локализованных в квантовой яме  $\text{Si}_{0.95}\text{Ge}_{0.05}/\text{Si}$ , проводилась в видимой и ближней инфракрасной областях спектра из двух различных областей, расположенных на внешней поверхности образца: 1) области без наночастиц и 2) области, покрытой частицами золота с регулируемой поверхностной плотностью. В результате было обнаружено значительное плазмонное усиление частицами золота интенсивности четырехчастичных излучательных процессов ( $2E_g$ -люминесценция). Показано, что величина эффекта плазмонного усиления интенсивности  $2E_g$ -люминесценции зависит от типа многочастичных состояний, формирующихся в неравновесной электронно-дырочной системе квантовой ямы. Максимально достигнутое в данной работе увеличение интенсивности фоторекомбинационного излучения соответствует низкочастотным состояниям квазидвумерной электронно-дырочной жидкости и составляет  $2.65 \pm 0.5$  при температуре 5 К.

Обнаруженный эффект плазмонного усиления рекомбинационного излучения, связанного с многочастичными состояниями, в непрямозонных полупроводниках не наблюдался ранее и представляет существенный интерес с точки зрения развития альтернативных методов кремниевой фотоники, в основе которых лежат не использованные ранее физические принципы.

### Результаты опубликованы:

1. В.С.Кривобок, С.Н.Николаев, А.В.Новиков, М.В.Шалеев, В.С.Багаев, Е.Е.Онищенко, В.С.Лебедев, М.Л.Скориков, Е.В.Уцина, М.В.Кочиев, Письма в ЖЭТФ, т.104, в.4, с.229–234 (2016).

## Механизм релаксации энергии в системе уровней Ландау в квантовых ямах

Обнаружен необычный характер релаксации энергии возбуждения электронной подсистемы в системе уровней Ландау, где доминирующим механизмом межуровневого рассеяния является электрон-электронное рассеяние, принципиально отличающийся от характера релаксации в двумерной непрерывной подзоне. Несмотря на то, что ее основным каналом является испускание оптических фононов, полное время релаксации на несколько порядков превышает характерные времена рассеяния на оптических фононах.

Рассмотрена кинетика релаксации энергии электронов в системе уровней Ландау в квантовой яме, находящейся ниже энергии оптического фонона. В такой системе, вследствие подавления в квантующем магнитном поле процессов одноэлектронного межуровневого рассеяния (на примесях, шероховатости гетерограниц и акустических фононах) определяющим механизмом рассеяния между уровнями Ландау является электрон-электронное рассеяние. Необычность механизма релаксации обусловлена качественным различием в рассматриваемой системе уровней Ландау механизмов термализации электронной подсистемы и релаксации ее энергии. Термализация обусловлена перераспределением электронов по уровням Ландау посредством электрон-электронного рассеяния и происходит без изменения полной энергии электронной подсистемы. Релаксация же энергии происходит в результате испускания оптических фононов электронами, которые доставляются процессами электрон-электронного рассеяния на уровни Ландау, лежащие выше

энергии оптического фонона. Вследствие относительно малой доли электронов, достигающих таких уровней, изменение энергии электронной подсистемы происходит медленно по сравнению с процессом термализации. В результате в каждый момент времени в электронной подсистеме успевает установиться квазиравновесная функция распределения с температурой, которая медленно убывает со временем.

Рассматривалась кинетика распределения электронов по уровням Ландау в ситуации, когда в начальный момент времени происходит мгновенное возбуждение (внутриподзональное либо межподзональное) электронов на уровень Ландау, лежащий ниже энергии оптического фонона. Временная эволюция населенностей уровней отслеживалась путем решения системы уравнений баланса между приходом электронов на уровень и уходом электронов с уровня вследствие двухчастичных актов электрон-электронного рассеяния и испускания продольных оптических фононов:

$$\frac{dN_i}{dt} = \sum_{j,g,f} W \begin{pmatrix} i & j \\ f & g \end{pmatrix} N_i N_j \left[ 1 - \frac{N_f}{\alpha} \right] \left[ 1 - \frac{N_g}{\alpha} \right] - \sum_{j,f,g} W \begin{pmatrix} f & g \\ i & j \end{pmatrix} N_f N_g \left[ 1 - \frac{N_i}{\alpha} \right] \left[ 1 - \frac{N_j}{\alpha} \right] + \sum_f \left\{ \frac{1}{\tau_{f \rightarrow i}^{(LO)}} N_f \left[ 1 - \frac{N_i}{\alpha} \right] - \frac{1}{\tau_{i \rightarrow f}^{(LO)}} N_i \left[ 1 - \frac{N_g}{\alpha} \right] \right\}$$

Здесь  $N_i$  – двумерная концентрация электронов на уровне Ландау с номером  $i$  (населенность уровня),  $\alpha = 1/(\pi \ell^2)$  – кратность вырождения уровня Ландау,  $\ell = \sqrt{\hbar c / (eB)}$  – магнитная длина. Предварительно была рассчитана матрица вероятностей  $W \begin{pmatrix} i & j \\ f & g \end{pmatrix}$  электрон-электронного рассеяния для всех возможных двухчастичных переходов.

Результаты приведены на рис. 1. Как видно, процесс релаксации системы состоит из двух стадий. Первая короткая (несколько пикосекунд) стадия (рис. 1а) представляет

собой процесс термализации электронной подсистемы с установлением распределения бoльцмановского типа с температурой  $\sim 50$  К, значительно превышающей температуру решетки (4.2 К). Существенно, что перераспределение электронов по уровням Ландау происходит практически без изменения полной энергии электронной подсистемы. Во время второй стадии происходит медленное снижение концентрации электронов на возбужденных уровнях Ландау.

В итоге полное время релаксации электронной подсистемы оказывается на несколько порядков больше как характерного времени термализации, так и времени рассеяния на оптических фононах.

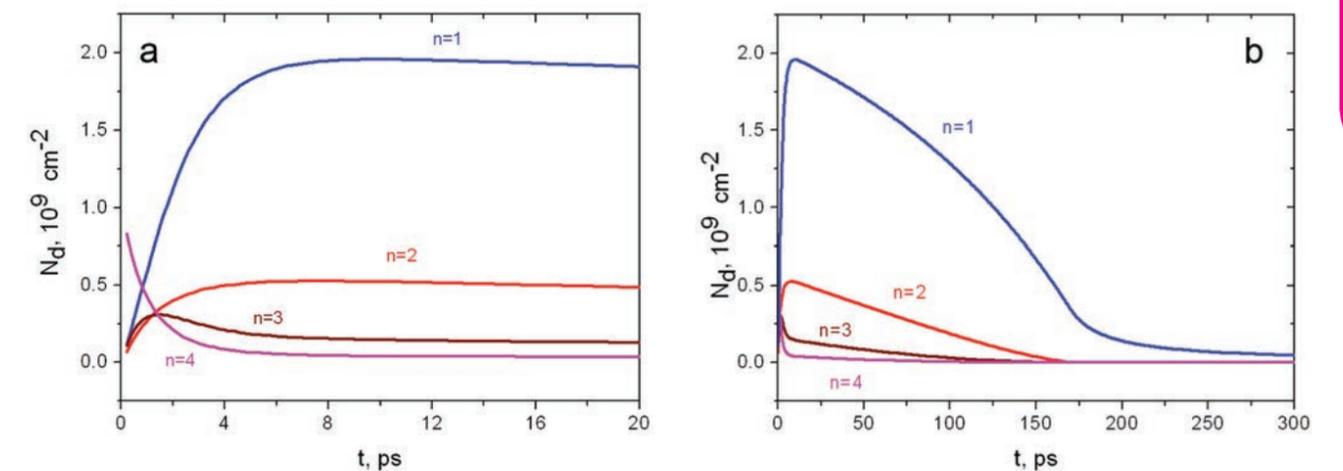


Рис. 1. Рассчитанная кинетика населенностей уровней Ландау первой подзоны в квантовой яме GaAs/Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As шириной 25 нм и уровнем легирования  $N_d = 10^{10} \text{ см}^{-2}$  в магнитном поле  $B = 3.5 \text{ Тл}$  в различных временных масштабах: а) времени термализации; б) полной релаксации.

### Результаты опубликованы:

1. М.П.Теленков, Ю.А.Митягин, В.В.Агафонов, К.К.Нагараджа, Письма в ЖЭТФ, том 102, вып.10, с.770–774 (2015).

## Магнетотранспортные эффекты в топологическом изоляторе $\text{Bi}_2\text{Se}_3$

*В работе исследовалась магнетопроводимость тонких пленок  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  с защитным слоем  $\text{Se}$ , выращенных на подложках (111)  $\text{BaF}_2$ . На основании полученных данных было показано наличие топологически нетривиальных двумерных состояний в исследуемых пленках чистого  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ . Также в работе исследуется влияние легирования атомами  $\text{Eu}$  на свойства данных состояний и всей пленки в целом.*

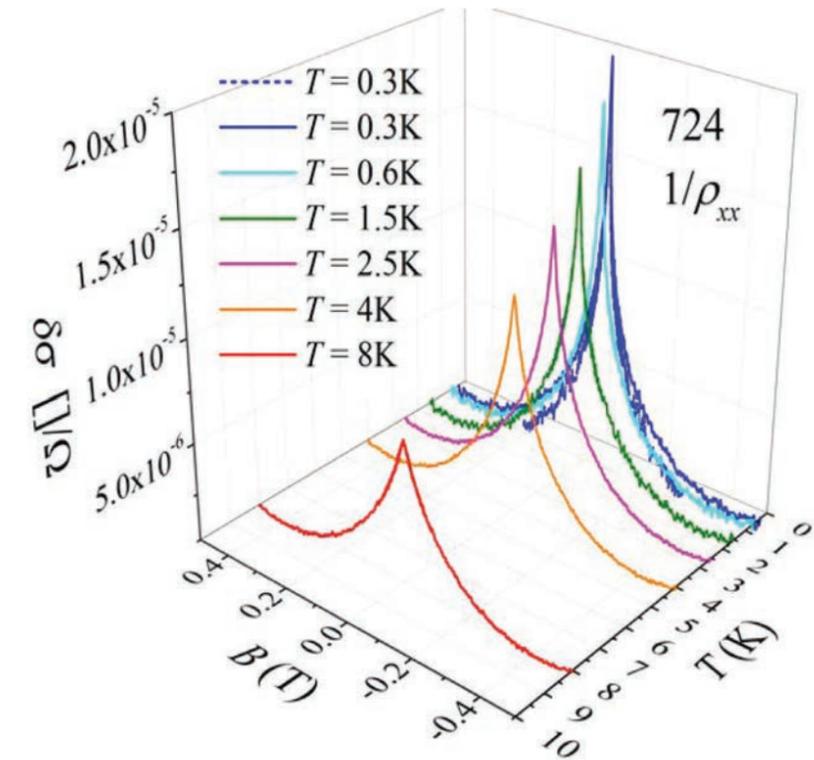
Топологические изоляторы являются одним из самых перспективных новых классов соединений, который в настоящее время представляет огромный интерес для физиков, занимающихся исследованиями конденсированного состояния вещества. Большая часть топологических изоляторов представляет собой узкозонные полупроводники с сильным спин-орбитальным взаимодействием. Это взаимодействие приводит к тому, что щель в спектре в объеме топологического изолятора является инвертированной, а на границе с любым обычным изолятором, включая воздух, образуются топологически защищенные состояния, спин которых жестко связан с направлением импульса, и потому рассеяние в отсутствие магнитных примесей, когда спин электрона сохраняется подавлено. Среди трехмерных топологических изоляторов наиболее перспективным считается  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ . В нашем институте научились методом молекулярно-лучевой эпитаксии создавать совершенные пленки этого материала. Поскольку для создания приборов на основе топологических поверхностных состояний, требуется, чтобы именно эти состояния, а не объемная проводимость, определяли свойства системы, для исследований наибольший интерес представляют тонкие пленки.

В исследованиях электронного транспорта указанием на топологическую природу может служить наблюдение квантового ин-

терференционного эффекта – слабой антилокализационной поправки к проводимости в отсутствие эффектов слабой локализации, и появление аномальной фазы осцилляций Шубникова – де Гааза.

В настоящем исследовании с помощью простой классической модели оценен относительный вклад в проводимость поверхностных топологически защищенных состояний, и были исследованы как эффекты антилокализации, так и осцилляции Шубникова-де Гааза. Наблюдаемая отрицательная магнетопроводимость в малых полях, обусловленная эффектом слабой антилокализации (см. рис.), так же как и осцилляции Шубникова-де Гааза в больших полях, определяется только перпендикулярной к плоскости пленки компонентой магнитного поля, что свидетельствует о наличии двумерных электронных состояний в исследованных пленках чистого  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ .

Полученные экспериментальные результаты (наличие слабой антилокализации в отсутствие слабой локализации и аномальная фаза осцилляций Шубникова-де Гааза, связанная с наличием фазы Берри) могут быть разумно объяснены наличием в исследуемых пленках двумерных топологически защищенных электронных состояний. При этом вклад этих состояний в полную проводимость системы оказывается определяющим.



*Зависимость амплитуды поправки к проводимости чистой пленки  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ , обусловленной эффектом слабой антилокализации, от температуры и магнитного поля в области слабых магнитных полей. Отсутствие видимых признаков эффекта слабой локализации (участка положительной магнетопроводимости) указывает на наличие топологически нетривиальных состояний в данном образце.*

В образцах, легированных атомами  $\text{Eu}$ , наблюдается ряд дополнительных эффектов, в том числе необычный участок линейного магнетосопротивления, природа которого в настоящее время остается неясной и активно исследуется в нашей группе.

### Результаты опубликованы:

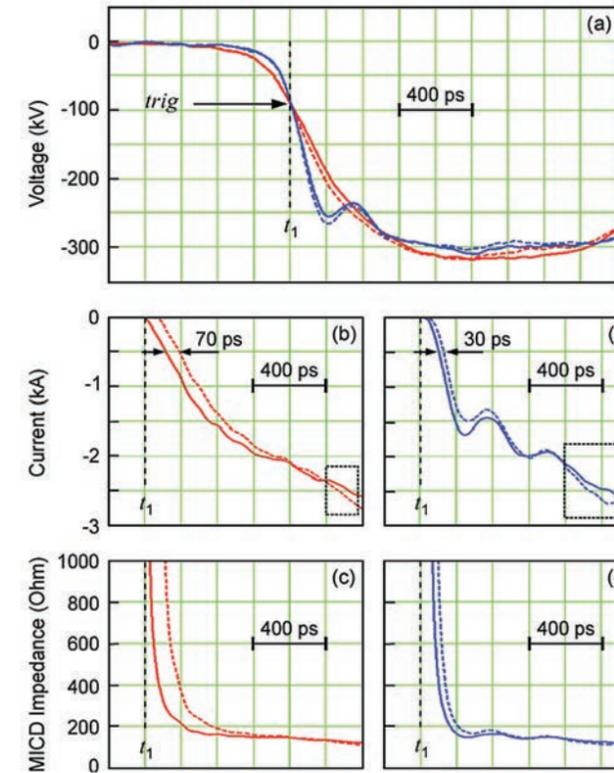
1. Л.Н. Овешников, В.А. Прудкогляд, Е.И. Нехаева, А.Ю. Кунцевич, Ю.Г. Селиванов, Е.Г. Чижевский, Б.А. Аронзон, Магнетотранспорт в тонких эпитаксиальных пленках  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ , Письма в ЖЭТФ 104 (9), 651-657 (2016).

## Динамика пучков взрывной электронной эмиссии в мощных импульсных ускорителях

Развита теория вакуумных диодов со взрывоэмиссионными катодами и магнитной изоляцией с учетом объемного заряда интенсивного слаборелятивистского электронного пучка. Получено согласие с результатами цикла исследований, проведенного на уникальном оборудовании – компактных субнаносекундных ускорителях (на основе генератора РАДАН) и новейших осциллографов Tektronix и Agilent с временным разрешением  $\sim 10$  ps. Совместный результат Института сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭ СО РАН), Института электрофизики Уральского отделения Российской академии наук (ИЭФ УрО РАН) и Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН).

Теоретически и экспериментально исследован магнитоизолированный коаксиальный вакуумный диод (КДМИ), работающий в режиме частичного ограничения взрывной электронной эмиссии пространственным зарядом пучка, эмитируемого с кромочного катода. Предложена универсальная аппроксимация для соотношения реального тока к току, достигаемому в режиме неограниченной эмиссионной способности, которая согласуется с экспериментом, где для сильноточного вакуумного диода впервые получены зависимости напряжения на катоде и эмитируемого тока, синхронизированные с точностью в единицы пикосекунд. В частности, стал возможным анализ процессов эмиссии сильноточного пучка в увязке с точной величиной макроскопического электрического поля на катоде. Получены данные об изменении момента эмиссии при изменении профиля эмитирующей кромки катода, а также структуры

используемого графита и её модификации в процессе тренировки. Нелинейные зависимости импеданса КДМИ от времени дают важную информацию о динамике проявлений эффекта экранировки эмиссионных центров в конечном магнитном поле пространственным зарядом потоков частиц от центров-лидеров. Прецизионно синхронизированные огибающие напряжения на катоде и тока эмитируемого пучка являются корректными начальными данными для решения задачи нестационарного КДМИ численными методами. Показано, что в диапазоне менее наносекунды имеется соответствие параметров фронта электронного пучка и эмиссионного тока катода для эксперимента и численной модели (метод крупных частиц). На этой основе продемонстрировано совпадение расчёта и эксперимента по генерации микроволновых импульсов в нестационарной релятивистской ЛОВ миллиметрового диапазона.



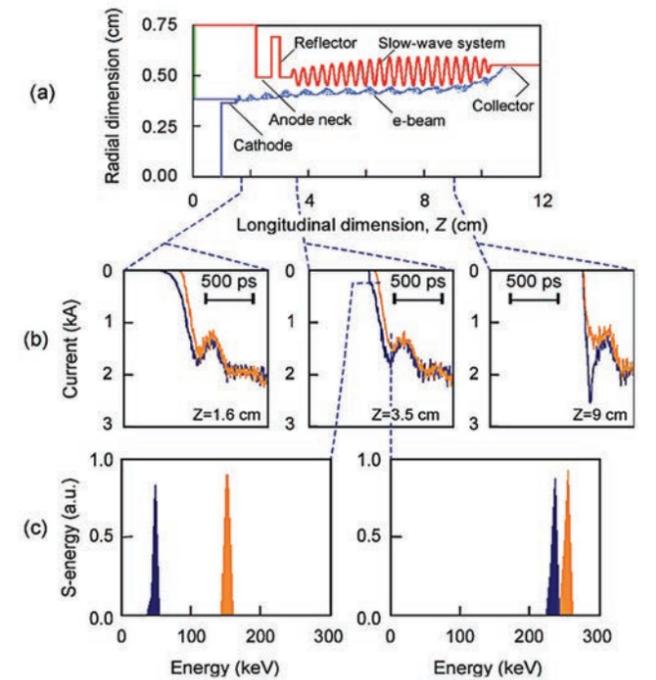
Формы импульсов напряжения, полученные методом динамической рефлектометрии во временной области, а также тока и импеданса в КДМИ.

Импульс напряжения формировался нелинейной передающей линией с ферритами. Более резкие фронты соответствуют схемам с приложенным магнитным полем к нелинейной обостряющей линии.

Геометрия диода – трубчатый катод толщиной кромки 0.1 мм (сплошные линии) и 0.5 мм (прерывистые линии). Магнитное поле в КДМИ 2Т. Размер диодного промежутка 5.5 мм.

### Результаты опубликованы:

1. S. Ya. Belomyttsev, V. V. Rostov, I. V. Romanchenko, S. A. Shunailov, M. D. Kolomiets, G. A. Mesyats, K. A. Sharypov, V. G. Shpak, M. R. Ulmaskulov, and M. I. Yalandin 2016 Magnetically Insulated Coaxial Vacuum Diode with Partial Space-Charge-Limited Explosive Emission from Edge-Type Cathode, Journal of Applied Physics 119 023304.



Результаты численного PIC-моделирования субнаносекундной релятивистской лампы обратной волны (а). Продольное магнитное поле 2 Т. (б) – расчетные зависимости тока в различных сечениях для случая неограниченной эмиссии (темные кривые) и для результатов, следующих из измерений эмиссионных характеристик методом динамической рефлектометрии во временной области (светлые кривые). (с) – энергетические спектры электронов в сечении 3.5 см во время достижения 0.1 от пика тока и во время пика тока.

## Изучение временной структуры и энергетических спектров высокоэнергичных излучений во время гроз

На установке "Гроза", расположенной на Тянь-Шаньской высокогорной научной станции ФИАН, проведены измерения проникающих излучений различной природы в периоды грозовой активности.

Установка "Гроза", расположенная на Тянь-Шаньской высокогорной научной станции ФИАН на высоте 3400 м над уровнем моря, включает в себя систему регистрации широких атмосферных ливней, систему сцинтилляционных детекторов гамма-излучения на основе кристаллов NaI, систему спектрометров для регистрации быстрых электронов, систему регистрации радиоизлучения, датчики электрического поля, нейтронный супермонитор, детекторы тепловых нейтронов. Весь комплекс детекторов под-

ключен к единой системе регистрации, позволяющей проводить независимые измерения всех видов проникающих излучений, сопровождающих атмосферный разряд. На установке измерялись потоки электронов и нейтронов, радио и гамма-излучения, а также электрическое поле и его вариации.

Детально измерена временная структура всех видов излучений в режиме мониторинга с временным интервалом записи 10 секунд (рис. 1а), а также в триггерном режиме с временным разрешением 160 микросе-

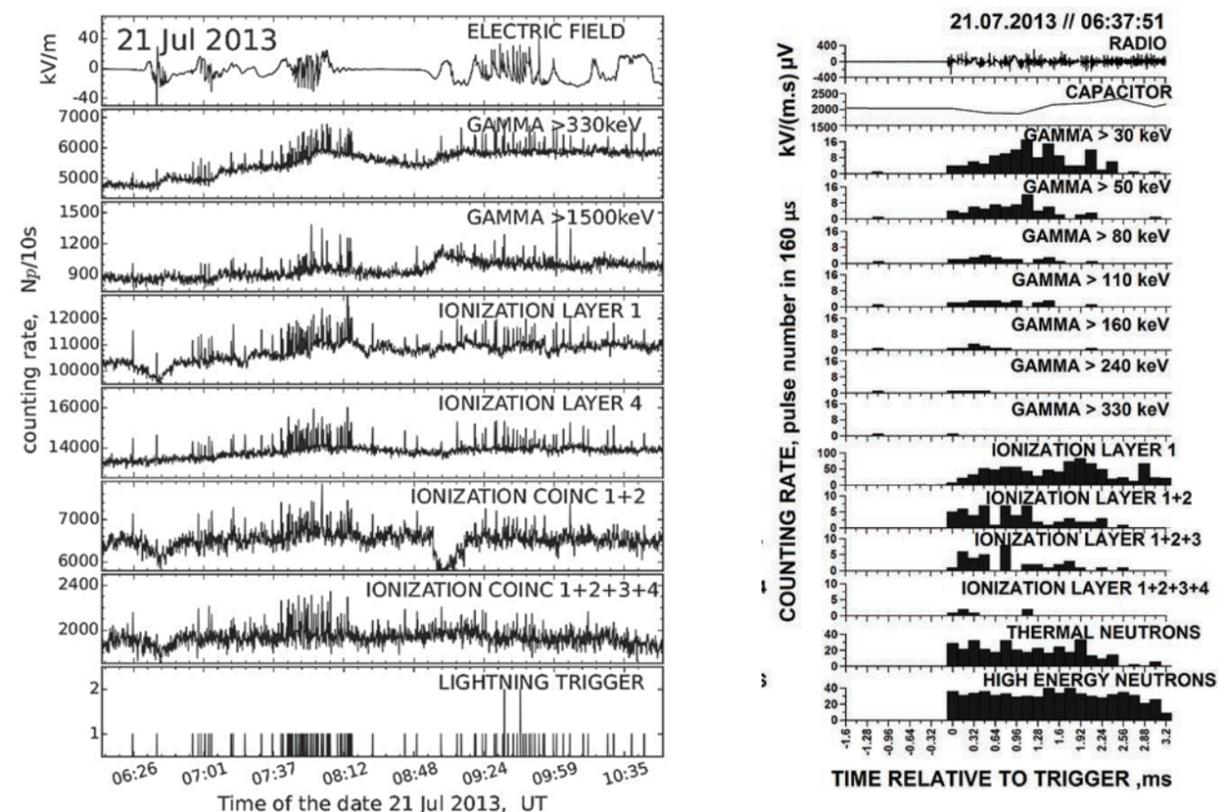


Рис. 1. Временные записи различных видов излучений в периоды грозовой активности: слева (а) – в режиме мониторинга с временным разрешением 10 сек, справа (б) – в триггерном режиме с временным разрешением 160 мкс.

кунд (рисунк 16). Определены энергетические спектры электронов и гамма-квантов на различных стадиях развития грозового разряда (рис. 2). Показана значительная разница в величинах относительных потоков излучений в зависимости от временного

разрешения регистрирующей аппаратуры. Новый комплексный подход к измерениям проникающих излучений открывает новые возможности в исследованиях грозовых разрядов, особенно на начальной стадии его развития.

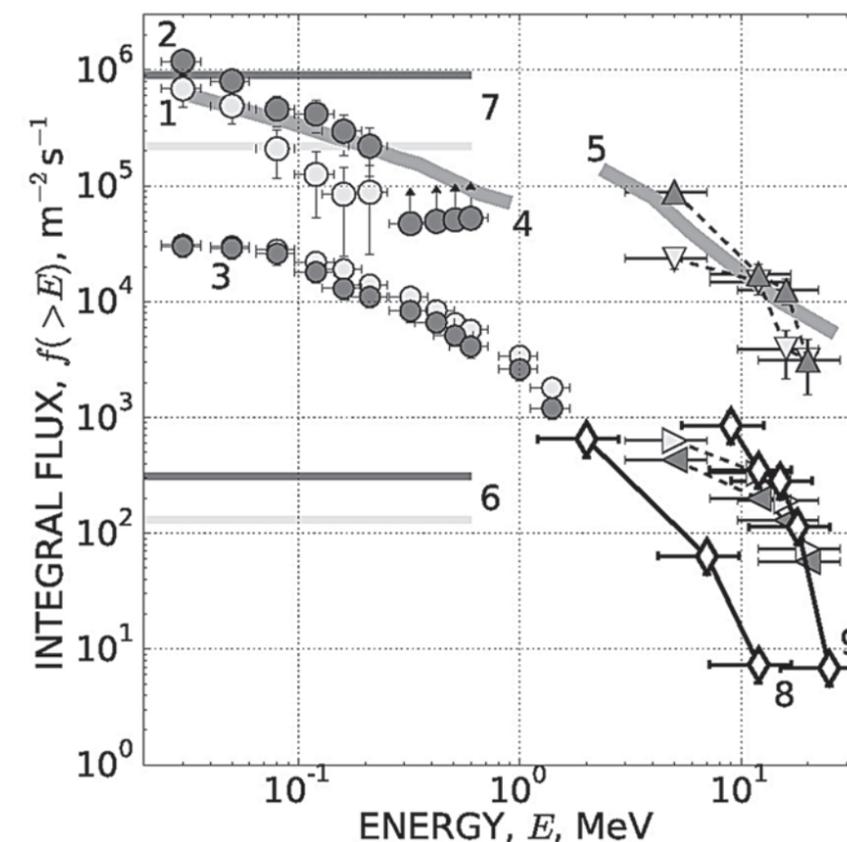


Рис. 2. Энергетические спектры гамма-излучения (кружки) и ускоренных электронов (треугольники). 1 и 2 – спектры гамма-излучения вблизи двухмолниевых триггера, 3 – спектр гамма излучения в режиме мониторинга моде, 4 и 5 – соответственно спектры гамма-излучения и электронов, рассчитанные по программе GEANT-4 в режиме убегания электронов в электрическом поле грозового облака, 6 – предельные значения потока фоновых нейтронов, 7 – верхний предел на поток нейтронов вблизи двухмолниевых триггеров, 8 и 9 – спектры быстрых электронов, измеренных группой А. Чилингаряна (Alikhaniyan Physics Institute, Армения) в эксперименте на горе Арагац.

### Результаты опубликованы:

1. A.V. Gurevich, A.M. Almenova, V.P. Antonova, A.P. Chubenko, A.N. Karashtin, O.N. Kryakunova, V. Yu. Lutsenko, G.G. Mitko, M.O. Ptitsyn, V.V. Piscal, V.A. Ryabov, N.M. Salikhov, T.Kh. Sadykov, A. L. Shepetov, Yu.V. Shlyugaev, W.M. Thu, L.I. Vil'danova, N.N. Zastrozhnova, K.P. Zybin, Observations of high-energy radiation during thunderstorms at Tien-Shan, Physical Review D 94, 023003 (2016).

## Первые результаты, полученные на новом высокогорном комплексе Тянь-Шаньской научной станции ФИАН по изучению космического излучения

На Тянь-Шаньской высокогорной научной станции ФИАН создан новый комплекс детекторов для изучения состава и спектра различных компонент космического излучения в широком диапазоне энергий, а также поиска экзотических явлений во взаимодействиях космических лучей.

В настоящее время комплекс включает в себя две разнесенные ливневые установки, систему детекторов для определения направления прихода широкого атмосферного ливня (ШАЛ), подземные системы мюонных и адронных детекторов для регистрации глубокопроникающей компоненты космического излучения, гибридный ионизационно-нейтронный калориметр, нейтронный супермонитор, а также детекторы тепловых нейтронов. Весь комплекс детекторов подключен к единой системе регистрации, созданной на базе современной электроники, позволяющей про-

водить независимые измерения электромагнитной, мюонной и адронной компонент ШАЛ. Особое внимание уделено детальному изучению стволов ШАЛ и их тонкой структуры с целью исследования характеристик адронных взаимодействий в кинематической области фрагментации налетающей частицы. На ливневых установках комплекса с хорошей статистической обеспеченностью измерен спектр первичного космического излучения с энергиями до  $10^{17}$  эВ (рис.1). Отчетливо виден излом спектра космического излучения при энергии выше  $5 \cdot 10^{15}$  эВ.

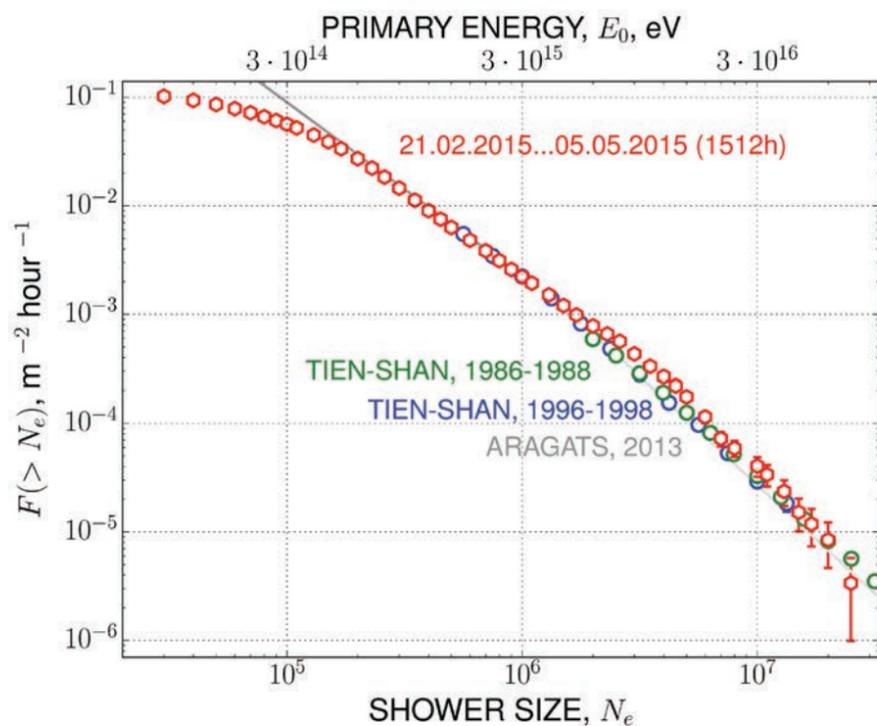


Рис. 1. Спектр космического излучения в области энергий  $10^{14} - 10^{17}$  эВ, измеренный на новой ливневой установке на ТШВНС ФИАН.

Интересный результат был получен на гибридной системе детекторов, включающих наземную ливневую установку и подземный нейтронный монитор, расположенный на глубине  $2000 \text{ г/см}^2$  (что эквивалентно пороговой энергии вертикального мюона 5 ГэВ), непосредственно под ливневой установкой. На рис. 2 показаны спектры кратности нейтронов, регистрируемых верхней и нижней секциями нейтронного монитора в условиях внутреннего и внешнего триггера.

Очевидно, что наблюдается значительная разница в абсолютных интенсивностях нейтронных потоков. Эта разница может быть связана с присутствием глубокопроникающей компоненты космического излучения неизвестного происхождения или с прохождением мюонных ливней с аномально высокой множественностью. С увеличением статистики можно будет более детально исследовать природу таких нестандартных нейтронных событий.

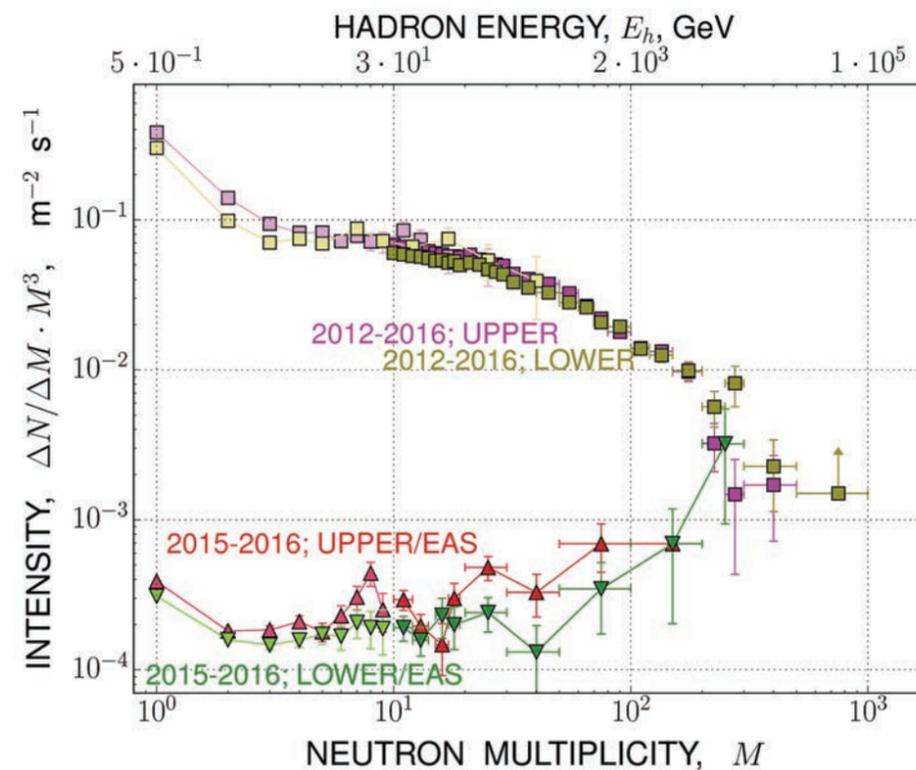


Рис. 2. Спектры кратности нейтронов, регистрируемых верхней и нижней секциями нейтронного монитора. Верхние кривые соответствуют внутреннему нейтронному триггеру, генерируемому в моменты времени, соответствующие быстрому увеличению множественности нейтронов внутри секции. Нижние кривые соответствуют событиям, регистрируемым по триггеру ШАЛ, выработанному ливневой установкой.

### Результаты опубликованы:

1. A.P. Chubenko, A.L. Shepetov, V.P. Antonova, R.U. Beisembayev, A.S. Borisov, O.D. Dalkarov, O.N. Kryakunova, K.M. Mukashev, R.A. Mukhamedshin, R.A. Nam, N.F. Nikolaevsky, V.P. Pavlyuchenko, V.V. Piscal, V.S. Puchkov, V.A. Ryabov, T.Kh. Sadykov, N.O. Saduev, N.M. Salikhov, S.B. Shaulov, A.V. Stepanov, N.G. Vildanov, L.I. Vildanova, M.I. Vildanova, N.N. Zastrozhnova, V.V. Zhukov, New complex EAS installation of the Tien Shan mountain cosmic ray station. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 832 (2016), 158–178.

## Теоретическое и экспериментальное исследование физики гравитационного взаимодействия ультрахолодного антиводорода

*В рамках проекта GBAR по исследованию гравитационных свойств анти-вещества разработан метод прецизионного измерения гравитационной массы антиводорода с использованием квантовых состояний антиводорода в гравитационном поле Земли вблизи материальной поверхности.*

Метод состоит в предварительном формировании квантовых состояний антиводорода за счет эффекта квантового отражения от поверхности и исследовании интерференционных эффектов во временной зависимости количества аннигиляционных событий от времени падения с заданной высоты. Указанный подход позволяет достичь квантового предела в минимизации неопределенности в определении гравитационной массы.

Установленная связь между импульсным распределением в квантовом состоянии и временным распределением событий падения на детектор позволяет определить гравитационную массу антиводорода с точностью до  $10^{-4}$  при статистике в 1000 антиатомов.

Дополнительно исследовались эффекты влияния поверхности на точность определения гравитационной массы при спектро-

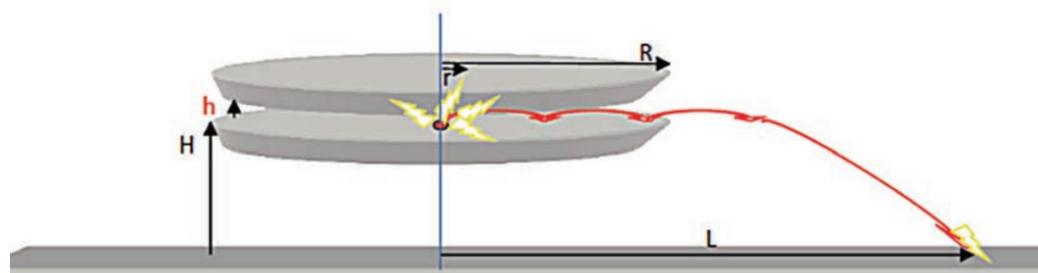


Рис. 1. Принципиальная схема устройства для формирования квантовых состояний антиводорода.

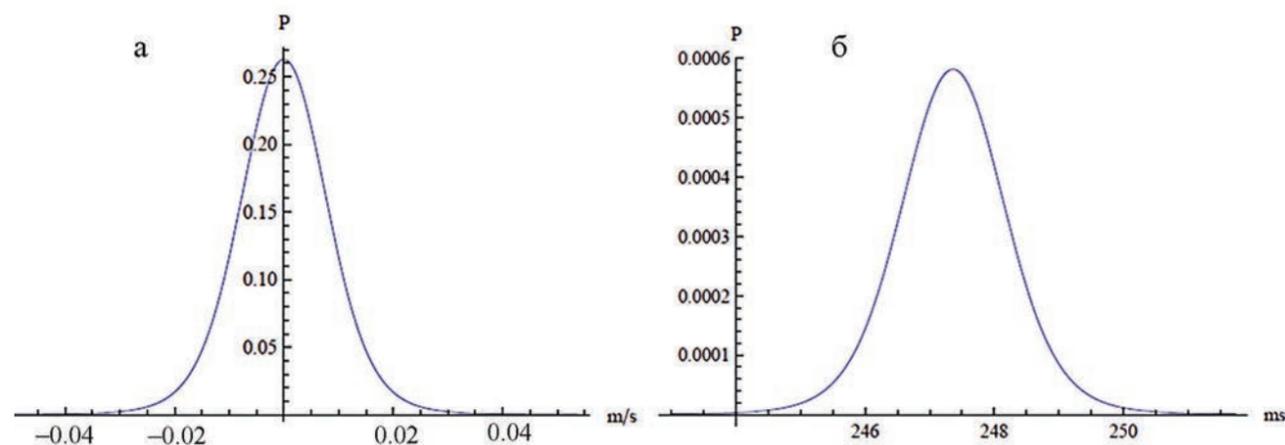


Рис. 2. График плотности распределения по скоростям в основном гравитационном состоянии антиводорода (а) и соответствующее ему распределение по времени детектирования событий падения атомов антиводорода с заданной высоты (б).

скопии и интерферометрии квантовых приповерхностных гравитационных состояний антиводорода. В частности, теоретически исследовались эффекты уширения и вынужденных переходов между гравитационными состояниями за счет остаточных и наведенных зарядов на поверхности зеркала [2]. Разработан формализм, описывающий механизм квенчинга гравитационных состояний антиводорода случайно распределенными точечными зарядами на поверхности. Установлены критические значения плотностей свободных зарядов на поверхности, при которых дополнительное уширение гравитационных состояний за счет взаимодей-

ствий с зарядами сравнивается с собственной шириной гравитационных состояний над идеально проводящей поверхностью.

Представлено активное волокно, обеспечивающее высокое качество коррекции антипараллельных Гауссовых лазерных пучков для прецизионной спектроскопии переходов, чувствительных к доплеровскому смещению. Эффективность предложенного метода иллюстрируется на примере 2S–4P перехода. Данный дизайн чрезвычайно эффективен для определения с высокой точностью постоянной Ридберга и радиуса протона и сравнения полученных величин с аналогичными значениями для атома антиводорода [4].

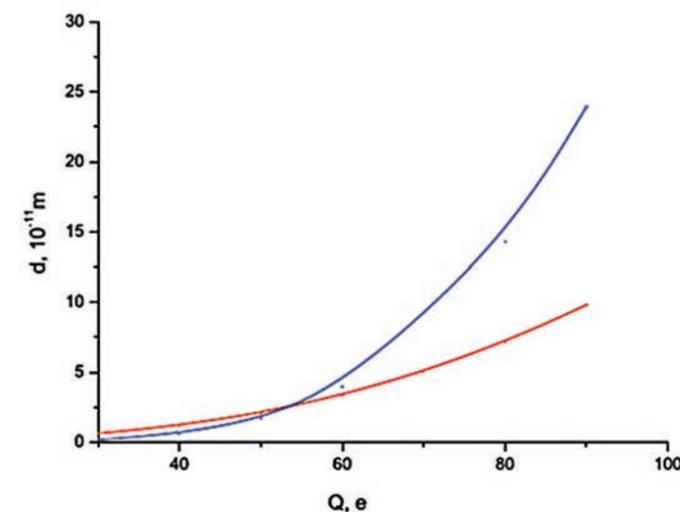


Рис. 3. График зависимости эффективной длины поглощения  $d$  при пролете антиводорода вдоль зеркала со скоростью 1 м/с в зависимости от величины свободного заряда  $Q$ .

### Результаты опубликованы:

1. A. Yu. Voronin, V. V. Nesvizhevsky, G. Dufour and S. Reynaud, Quantum ballistic experiment on antihydrogen fall. J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 49 054001 (2016).
2. Banerjee, D., Biraben F., Charlton M., Dalkarov O.D., Voronin A.Yu. Towards a test of the Weak Equivalence Principle of gravity using anti-hydrogen at CERN. 2016 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (Cpem 2016) Published: 2016.
3. A. Yu. Voronin, E. A. Kupriyanova, A. Lambrecht, V. V. Nesvizhevsky and S. Reynaud, Quenching of antihydrogen gravitational states by surface charges. J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 49 205003 (2016).
4. A. Beyer, L. Maisenbacher, A. Matveev, R. Pohl, K. Khabarova, T. W. Hänsch and N. Kolachevsky, Active fiber-based retroreflector providing phase-retracing anti-parallel laser beams for precision spectroscopy. Optics Express. 17470. Vol. 24, No. 15 /25 Jul 2016/.

## Измерение кинетических констант скоростей процессов с участием активных форм кислорода

Методами эмиссионной спектроскопии исследована кинетика колебательной релаксации молекул синглетного кислорода молекулами  $\text{CO}_2$  и диссоциации молекул йода в синглетном кислороде.

Методом эмиссионной спектроскопии исследован процесс диссоциации йода в синглетном кислороде в активной среде кислородно-йодного лазера. Показано, что инициализация процесса диссоциации начинается с реакции  $\text{O}_2(^1\Sigma) + \text{I}_2 \Rightarrow \text{O}_2(^3\Sigma) + 2\text{I}$ , константа скорости которой равна  $8.7 \times 10^{-11} \text{ см}^3/\text{с}$ . Никаких других механизмов инициирования диссоциации не обнаружено. На рис. 1 показана зависимость скорости диссоциации йода от концентрации молекул  $\text{O}_2(^1\Sigma)$ .

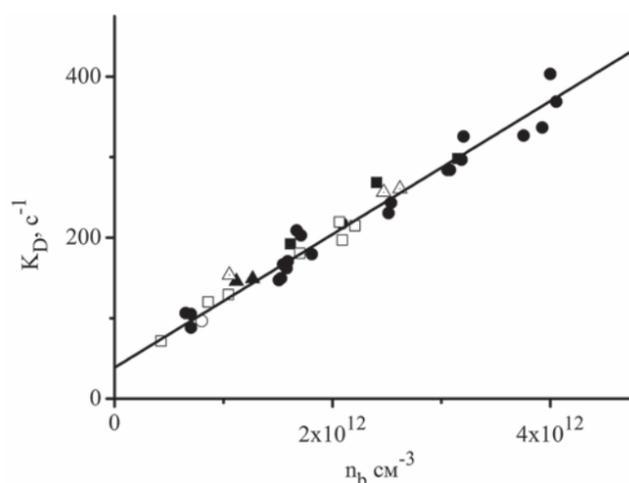


Рис. 1. Скорость диссоциации йода как функция концентрации кислорода  $\text{O}_2(^1\Sigma)$ . Темные знаки для среды  $\text{O}_2\text{-Ar-H}_2\text{O}$ , светлые знаки для среды  $\text{O}_2\text{-Ar-CO}_2$ . Концентрация молекул  $\text{O}_2(a)$ : • –  $10^{16} \text{ см}^{-3}$ , □ –  $2 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , Δ –  $3 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ .

Проведенные эксперименты показывают и подтверждают ранее высказанные предположения о том, что цепная стадия диссоциации йода происходит по двум каналам. В первом происходит цепочка реак-

ций  $\text{O}_2(^1\Delta) + \text{I}^* \Rightarrow \text{O}_2(^1\Sigma) + \text{I}$ ,  $\text{O}_2(^1\Sigma) + \text{I}_2 \Rightarrow \text{O}_2(^3\Sigma) + 2\text{I}$  и  $\text{O}_2(^1\Delta) + \text{I} \Rightarrow \text{O}_2(^3\Sigma) + \text{I}^*$ , где  $\text{I}^*$  – атом йода в состоянии  $^2P_{1/2}$ . По второму каналу происходит цепочка реакций с участием колебательно возбужденных молекул йода:  $\text{I}^* + \text{I}_2 \Rightarrow \text{I} + \text{I}_2(v > 20)$ ,  $\text{I}_2(v > 20) + \text{O}_2(^1\Delta) \Rightarrow 2\text{I} + \text{O}_2(^3\Sigma)$ . Показано, что колебательно возбужденные молекулы кислорода не играют роли в диссоциации йода на иницирующей и цепной стадиях диссоциации. Не обнаружено влияние тримолекулярных процессов  $\text{O}_2(^1\Delta) + \text{I}^* + \text{I}_2$  и  $\text{O}_2(^1\Delta) + \text{O}_2(^1\Delta) + \text{I}_2$  на диссоциацию йода.

Методом время-разрешенной эмиссионной спектроскопии с использованием импульсного лазерного фотолиза озона в смеси  $\text{O}_3\text{-N}_2\text{-CO}_2$  на длине волны 266 нм измерены значения констант скоростей V–T релаксации колебательно возбужденного молекулярного синглетного кислорода  $\text{O}_2(a^1\Delta, u)$  на диоксиде углерода  $\text{CO}_2$  для  $u = 1$ .

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 2. Излучение  $\lambda = 266 \text{ нм}$  обеспечивалось четвертой гармоникой Nd:YAG лазера (Solar Systems LQ829, длительность импульса 10 нс, частота 10 Гц). Молекулы озона  $\text{O}_3$  нарабатывались озонатором и накапливались на силикагеле. Молекулы кислорода предварительно выкачивались из системы, чтобы избежать протекания реакций с их участием. Требуемая длина волны отсекалась монохроматором МДР 12 с разрешением 2 нм.

На рис. 3 показаны временные профили интенсивностей излучения перехода  $\text{O}_2$

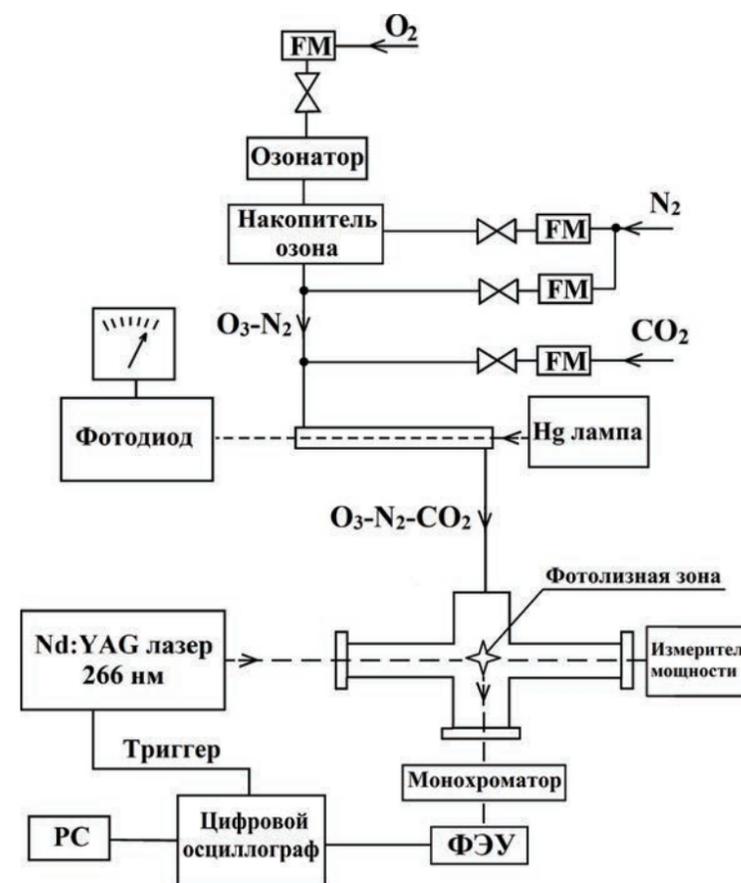


Рис. 2. Схема экспериментальной установки.

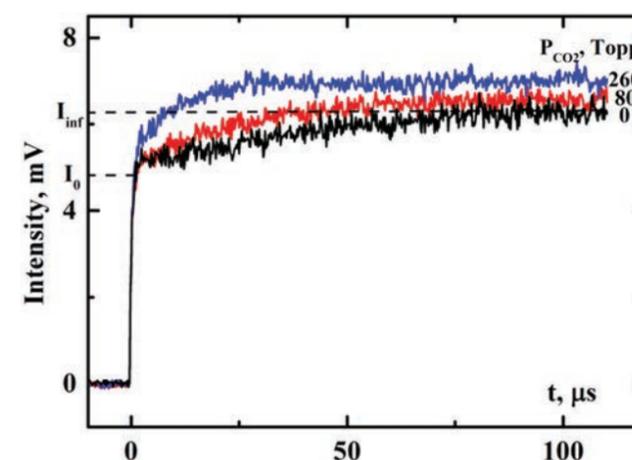


Рис. 3. Интенсивность излучения молекулярного кислорода на переходе  $\text{O}_2 a^1\Delta, v''=0 \rightarrow X^3\Sigma, v'=0$  после импульсного лазерного фотолиза озона на длине волны 266 нм

### Результаты опубликованы:

1. М.В. Загидуллин, Н.А. Хватов, М.С. Малышев, М.И. Свистун, Результаты экспериментов по диссоциации молекулярного йода в присутствии молекул синглетного кислорода, Квантовая электроника, 46 (8), 706 (2016).
2. A.P. Torbin, P.A. Mikheyev, M.C. Heaven, V.N. Azyazov, Vibrational kinetics of molecular singlet oxygen, Laser Optics (LO), 2016 International Conference, IEEE, R2-9-R2-9 (2016).

## Экспериментальные исследования кинетики активной среды лазера с оптической накачкой метастабильных атомов инертных газов

Продemonстрировано увеличение наработки атомарного йода в плазме ВЧ разряда в смесях  $\text{Ar}:\text{CH}_3\text{I}$  на 25%, а в смесях  $\text{He}:\text{CH}_3\text{I}$  на 50% при добавлении небольших количеств кислорода. Методом диодной лазерной спектроскопии измерены коэффициенты ударного уширения линии криптона 811.3 нм аргоном и неоном в естественной смеси изотопов Kr, и линии аргона 811.5 нм неоном. Показано, что в смеси  $\text{O}_2-\text{I}_2$  происходит диссоциация йода и образование молекул синглетного кислорода индуцированные лазерным излучением на длине волны 1315 нм.

Экспериментально продемонстрировано увеличение наработки атомарного йода в плазме безэлектродного ВЧ разряда (рис. 1)



Рис. 1. ВЧ разряд в кварцевых трубках между плоскими электродами. Изменение цвета вдоль потока справа налево обусловлено изменением химического состава смеси.

в смесях  $\text{Ar}:\text{CH}_3\text{I}$  на 25%, а в смесях  $\text{He}:\text{CH}_3\text{I}$  на 50% при добавлении небольших количеств кислорода, соизмеримых с расходом  $\text{CH}_3\text{I}$ , при постоянной мощности разряда. Доля мощности разряда в смесях  $\text{Ar}:\text{O}_2:\text{CH}_3\text{I}$ , затрачиваемая на диссоциацию метилйодида, достигала 16%. При плотности мощности в разряде  $6.5 \text{ Вт см}^{-3}$  и концентрациях атомов йода меньше  $4 \pm 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , атомы O, нарабатанные в разряде, разрушали  $\text{I}_2$  в послеразрядной области, препятствуя рекомбинации атомов йода и обеспечивая их эффективную транспортировку.

С помощью диодной лазерной спектро-

скопии высокого разрешения определены профили линии поглощения в природной смеси изотопов криптона с неоном (рис.2).

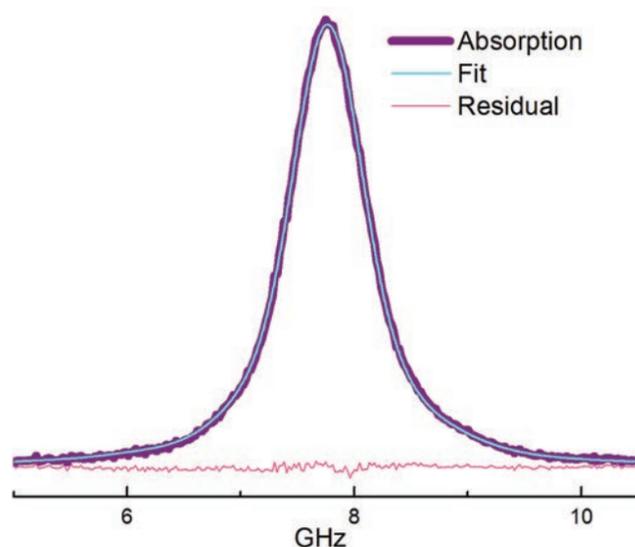


Рис. 2. Профиль линии поглощения в природной смеси изотопов криптона с гелием.

Измерены коэффициенты столкновительного уширения линий Kr 811.3 нм в естественной смеси изотопов и аргона 811.5 нм, используемых для оптической накачки перспективного лазера на метастабильных атомах инертных газов в аргоне и неооне. Их значения составили для криптона  $\xi_{\text{Kr-Ar}} = (3.5 \pm 0.3) \times 10^{-10} \text{ с}^{-1} \text{ см}^3$  и  $\xi_{\text{Kr-Ne}} = (1.5 \pm 0.05) \times 10^{-10} \text{ с}^{-1} \text{ см}^3$  и для аргона:  $\xi_{\text{Ar-Ne}} = (1.1 \pm 0.2) \times 10^{-10} \text{ с}^{-1} \text{ см}^3$ .

Показано, что в среде  $\text{O}_2-\text{I}_2-\text{He}$  под действием лазерного излучения на длине волны 1315 нм индуцируются процессы диссоциации йода и генерации синглетного кислорода.

В фотоячейке приготавливалась смесь  $\text{O}_2-\text{I}_2$  при давлении 17 торр и комнатной температуре. При воздействии на смесь  $\text{O}_2-\text{I}_2$  излучениями YAG-лазера на длине волны 532 нм и сфокусированным излучением кислородно-йодного лазера на длине волны 1315 нм индуцировалась диссоциация йода и образование молекул  $\text{O}_2(b^1\Sigma)$ . После выключения YAG-лазера лазерное излучение на длине волны 1315 нм непрерывно и устойчиво индуцировало люминесценцию на полосах  $\text{O}_2(b^1\Sigma \rightarrow X^3\Sigma)$  и  $\text{I}_2(B^3\Pi_u \rightarrow X^1\Sigma)$  в смеси  $\text{O}_2-\text{I}_2$ , спектр которой показан на рис. 3. Таким образом, после частичной диссоциации йода, генерация атомов йода и возбужденных молекул  $\text{O}_2(a^1\Delta)$ ,  $\text{O}_2(b^1\Sigma)$ ,  $\text{I}_2(B^3\Pi_u)$  в смеси  $\text{O}_2-\text{I}_2$  происходит только под действием излучения на длине волны 1315 нм. При

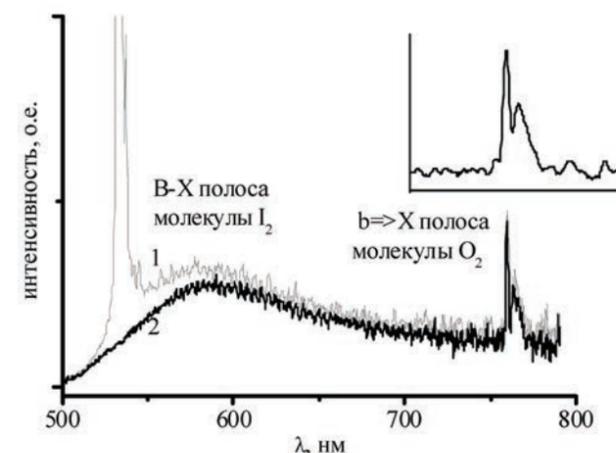


Рис. 3. Спектр люминесценции в смеси  $\text{O}_2-\text{I}_2$  при давлении 24 торр. 1– индуцированной излучениями на длинах волн 532 нм и 1315 нм, 2– только излучением на длине волны 1315 нм.

начальном давлении кислорода 17 торр в области светового воздействия получена концентрация  $10^{14} \text{ см}^{-3}$  молекул  $\text{O}_2(^1\Sigma)$ . Оптическая накачка кислородно-йодной среды может быть использована для создания кислородного лазера (762 нм) или сверхзвукового кислородно-йодного лазера.

### Результаты опубликованы:

1. P.A. Mikheyev, N.I. Ufimtsev, A.V. Demyanov, I.V. Kochetov, V.N. Azyazov, A.P. Napartovich, Influence of molecular oxygen on iodine atoms production in an RF discharge, Plasma Sources Science and Technology 25 (3) 035027 (2016).
2. P.A. Mikheyev, A.K. Chernyshov, N.I. Ufimtsev, A.R. Ghildina, V.N. Azyazov, M.C. Heaven, Measurement of pressure broadening of the Kr 811.3 nm absorption line using a diode laser, Proceedings of SPIE, 9729, P. 97290E (2016).
3. A.R. Ghildina, P.A. Mikheyev, A.K. Chernyshov, N.I. Ufimtsev, V.N. Azyazov, M.C. Heaven, Pressure broadening of Ar (811.5 nm) by neon, Laser Optics, 2016 International Conference. IEEE, P. R2-8-R2-8 (2016).
4. M.V. Zagidullin, M.S. Malyshev, V. N. Azyazov, M.C. Heaven, Optical pumping of the oxygen-iodine laser medium, Proceedings of SPIE, 9729, 97290G-1 (2016).

## Численное моделирование структуры МГД волн в тепловыделяющем ионизованном газе

Показано, что в изоэнтропически неустойчивой тепловыделяющей плазме в постоянном магнитном поле магнитогазодинамические (МГД) волны являются неустойчивыми. Слабые магнитоакустические ударные волны и локализованные возмущения распадаются на последовательность медленных и быстрых МГД автоимпульсов. Теоретически найдены параметры автоимпульсов.

Проведено теоретическое исследование особенностей распространения магнитогазодинамических (МГД) волн в тепловыделяющей полностью ионизованной среде, примером которой является солнечная корона.

В магнитоакустических волнах наряду с поперечными компонентами магнитного поля и скорости изменение претерпевают также плотность, давление и продольная компонента скорости. Продоль-

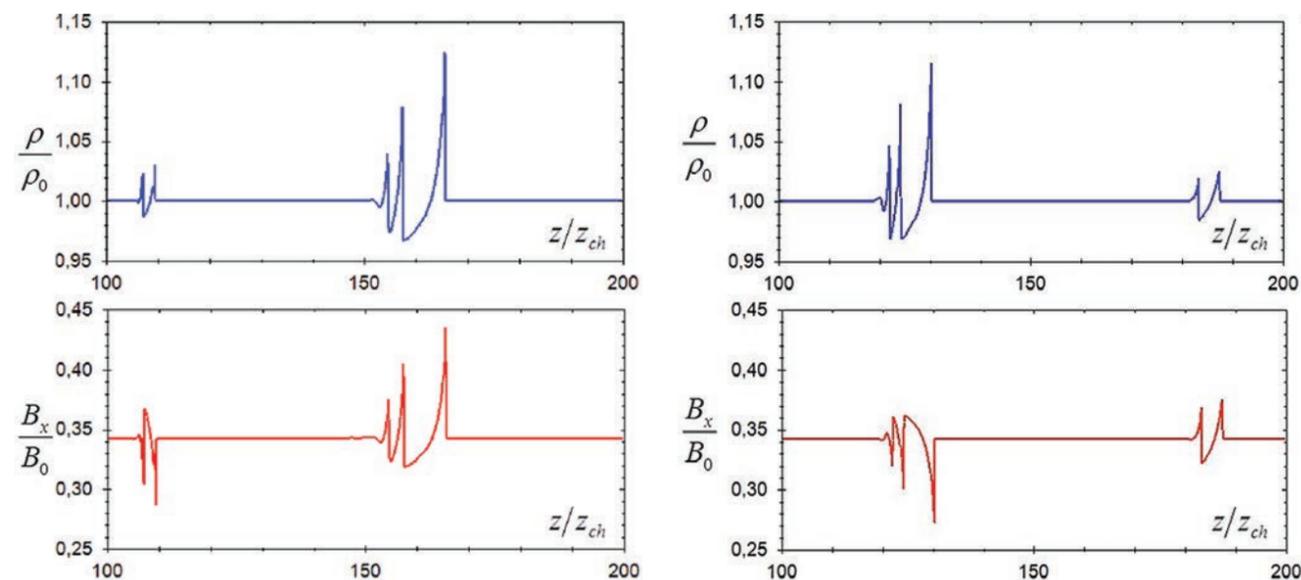


Рис. 1. Синфазные и противофазные возмущения плотности и магнитного поля в быстрой и медленной МГД автоволнах, соответственно, в плазме с доминирующим газодинамическим давлением (слева) и с доминирующим магнитным полем (справа)

ная же составляющая вектора напряженности магнитного поля остаётся постоянной. Известно, что в тепловыделяющей полностью ионизованной плазме альфвеновские волны устойчивы, а магнитоакустические волны могут стать неустойчивыми при реализации условий изоэнтропической (акустической) неустойчивости.

В плазме с доминирующим газодинамическим давлением, где величина бета параметра плазмы больше единицы, амплитуда импульсов быстрой МГД волны больше амплитуды импульсов медленной МГД волны. В плазме с доминирующим магнитным давлением, наоборот, амплитуда импульсов медленной волны больше амплитуды импульсов быстрой МГД волны.

На основе данных базы CHIANTI v7 и пяти наиболее часто предполагаемых сценариев нагрева солнечной короны были определены изоэнтропически неустойчивые температурные области в солнечной короне и найдены инкременты нарастания магнитоакустических волн.

Показано, что в изоэнтропически неустойчивой тепловыделяющей плазме в постоянном магнитном поле слабые магнитогазодинамические ударные волны распадаются на цуги импульсов быстрых и медленных МГД волн. В быстрых МГД волнах колебания плотности и магнитного поля происходит синфазно. В медленных МГД волнах колебания плотности и магнитного поля происходит противофазно.

Теоретически найдены параметры формирующихся автоимпульсов. Амплитуда и скорость автоимпульсов определяются свойствами источника тепловыделения, типом волн и величиной бета параметра плазмы (отношения газодинамического давления к

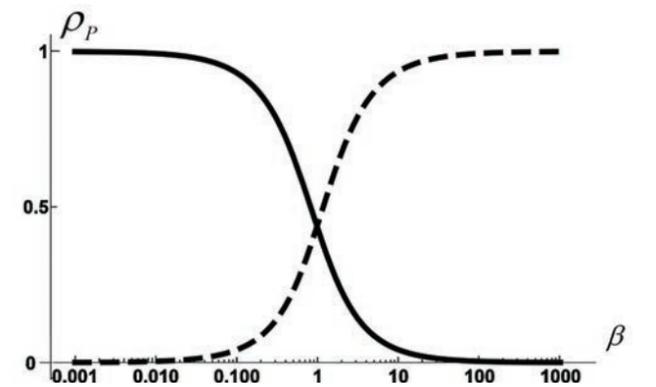


Рис. 2. Зависимость амплитуды медленных (сплошная линия) и быстрых (пунктирная линия) магнитогазодинамических автоволновых импульсов от параметра бета.

магнитному). В плазме с доминирующим газодинамическим давлением, где величина бета параметра плазмы больше единицы, амплитуда импульсов быстрой МГД волны больше амплитуды импульсов медленной МГД волны. В плазме с доминирующим магнитным давлением, наоборот, амплитуда импульсов медленной волны больше амплитуды импульсов быстрой МГД волны.

### Результаты опубликованы:

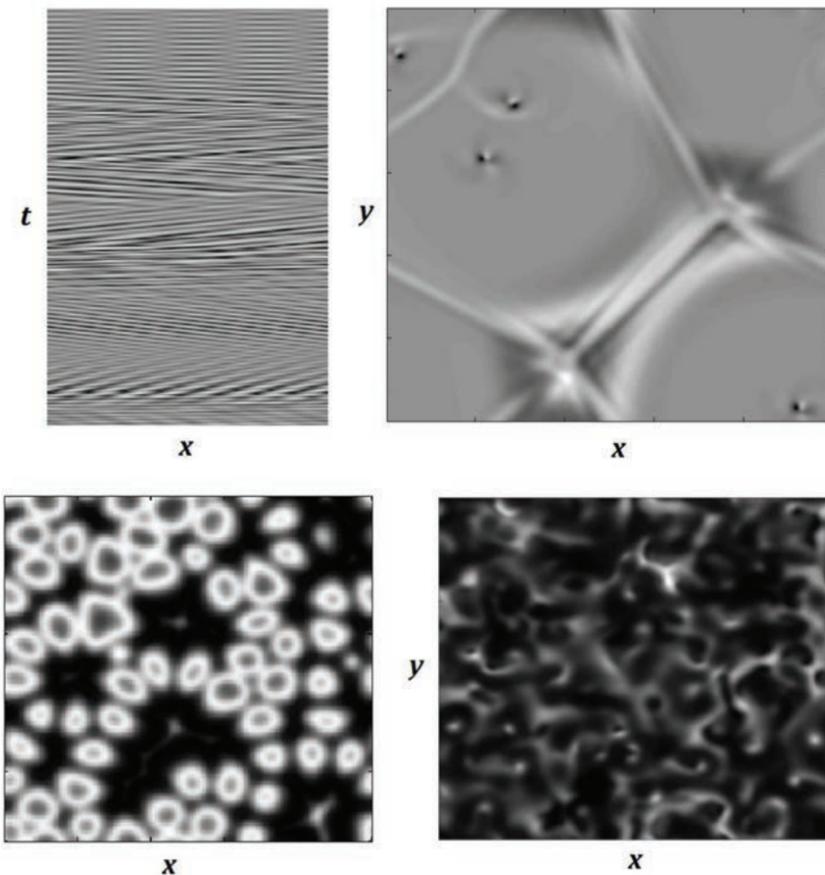
1. Molevich N.E., Ryashchikov D.S., Zavershinskii D.I. Influence of thermal conduction on properties of MHD waves in thermally unstable plasma, *Magnetohydrodynamics*, V. 52. PP.199–208 (2016)
2. Molevich N.E., Zavershinskii D.I., Ryashchikov D.S. Investigation of the MHD-wave dynamics in thermally unstable plasma, *Magnetohydrodynamics*, V. 52. PP.191–198 (2016).
3. Zavershinskii D.I., Molevich N.E., Zavershinskii I.P., Pichugin S.Y., Ryashchikov D.S. Evolution modelling of fast and slow magnetoacoustic waves in thermally unstable plasma, *Proceedings of the 22th International Congress on Acoustics ICA 2016*, Buenos Aires, Argentina. 5–9.09.2016.
4. Dmitrii Zavershinskii, Nonna Molevich, and Dmitrii Ryashchikov Nonlinear three-wave interactions of acoustic and Alfvén waves in thermally unstable plasma with finite electric conduction, *Proceedings of the 23rd International Congress on Sound and Vibration. From Ancient to Modern Acoustic*, Athens, Greece.10–14 July 2016.

## Численное моделирование оптических паттернов, формируемых в поперечном профиле внеосевого излучения широкоапертурного лазера

*Исследованы процессы образования структур оптического поля в поперечном профиле излучения широкоапертурных лазеров в рамках модели, описываемой системой уравнений Максвелла–Блоха. Рассмотрены основные типы вторичных неустойчивостей и соответствующие им механизмы, определяющие динамику лазера при отрицательной отстройке частоты. Установлены характерные режимы генерации и условия спонтанного формирования поперечных оптических структур.*

Аналитически и численно исследованы структуры, образующиеся в широкоапертурных лазерах различных динамических классов при отрицательной частотной отстройке. Информационные оптические технологии нуждаются в создании мощных миниатюрных источников высококогерентного излучения. В кванторазмерных структурах достигаются большие коэффициенты усиления, что позволяет делать лазеры с микронной длиной активной среды. Увеличение мощности таких лазеров достигается увеличением их апертуры, которая может достигать сотен микрон. В результате подобные лазеры (твердотельные на микроципах, лазеры с вертикальным резонатором, на квантовых точках) соответствуют типу широкоапертурных лазеров с большими числами Френеля. Именно для этого класса лазеров проведенные теоретические исследования предсказывают появление сложных нелинейно-оптических структур.

Показано, что в широкоапертурном лазере при отрицательной частотной отстройке реализуются следующие режимы генерации (рисунок): однородная приосевая генерация, автоволновой профиль интенсивности



*Автоволны, спиральные волны, модулированные стоячие волны, филаменты, формируемые в оптическом поле широкоапертурных лазеров с отрицательной отстройкой частоты в области параметров волновой и Андронова–Хопфа неустойчивостей.*

в ближней зоне и кольцеобразная область генерации с центральным пятном в дальней зоне, фазовые спиральные волны с кольцеобразной областью генерации в дальней зоне, модулированные стоячие волны, хаотические филаментарные режимы.

Составлены алгоритмы численного счета и проведено численное моделирование возникновения этих режимов генерации на основе решений двумерной системы уравнений Максвелла–Блоха.

Построены параметрические карты режимов генерации. В ходе проведенных исследований было выявлено, что второй режим возникает при реализации волновой неустойчивости, а также при развитии вторичных волновых неустойчивостей.

Он возможен в лазерах любого динамического класса, особенно в лазерах класса В. Получена аналитическая формула, определяющая размер кольцеобразной области генерации в дальней зоне. Спиральные и модулированные стоячие волны образуются в области неустойчивости Андронова–Хопфа.

Показано также, что пространственно-временные характеристики профиля интенсивности в ближней и дальней зонах могут быть предсказаны на основе анализа каскада переключений вследствие вторичных неустойчивостей в области волновой неустойчивости и анализа показателей Флоке автоколебательного режима в области неустойчивости Андронова–Хопфа.

### Результаты опубликованы:

1. Pakhomov A.V., Molevich N.E., Krents A.A., Anchikov D.A. Intrinsic performance-limiting instabilities in two-level class-B broad-area lasers, *Optics Communications*, V. 372, pp. 14–21 (2016).
2. Anchikov D.A., Shakirov A.P., Krents A.A., Molevich N.E. et al. Multi-frequency tori in wide-aperture lasers, *Physics of Wave Phenomena*, V. 24, № 2, pp. 108–113 (2016).
3. Пахомов А.В., Кренц А.А., Молевич Н.Е., Анчиков Д.А. Подавление пространственно-временных неустойчивостей излучения широкоапертурных лазеров класса В, *Компьютерная оптика*, Т. 40, №1, с. 31–35 (2016).
4. Anchikov D.A., Krents A.A., Molevich N.E., Pakhomov A.V. Temperature-induced laser dynamics in wide-aperture VCSELs, *Proc. SPIE 9892, Semiconductor Lasers and Laser Dynamics VII*, 989229 (2016).

## Лазерная 3D печать изделий с памятью формы

Изучены условия лазерного синтеза интерметаллидных фаз и 3D образцов с эффектом памяти формы при селективном лазерном плавлении (СЛП) в Cu–Al–Ni порошковой системе, в том числе при подогреве смеси до 300 °С. Показаны перспективы создания био МЭМС на основе данной методики послойного синтеза.

Впервые методом совмещения процессов СЛП и самораспространяющегося высокотемпературного синтеза получены 3D образцы интерметаллидной фазы  $Al_7Cu_4Ni$  при двухзонном СЛП. Определены оптимальные режимы реализации данного способа. Методами РФА и EDX микроанализа было показано, что СЛП в газообразном аргоне и нагреве интерметаллидного порошка в камере синтеза до температуры 300 °С приводит к образованию гетерогенной ромбоэдрической интерметаллидной фазы  $Al_7Cu_4Ni$  типа.

На дифрактограммах с поверхности образцов (рис. 1) после контролируемого лазером процесса СЛП в системе Cu–Al–Ni видно,

что дополнительный подогрев порошковой смеси существенно изменяет систему пиков интенсивности. При комнатной температуре имел место синтез нескольких основных фаз –  $Al_7Cu_4Ni$  и  $Cu_{0.25}Ni_{0.75}Al_2O_4$ . При повышении температуры в реакционной камере для послойного синтеза мы фиксируем интерметаллидную фазу  $Al_7Cu_4Ni$  (28–0016, PDF2) с пространственной группой симметрии R–3m. В частности, линии интенсивности (1013) имеют дуплексный характер, что отмечалось ранее, но только после дополнительной термической обработки в системе Cu–Al–Ni.

Изучен характер поведения удельного электрического сопротивления (УЭС) от тем-

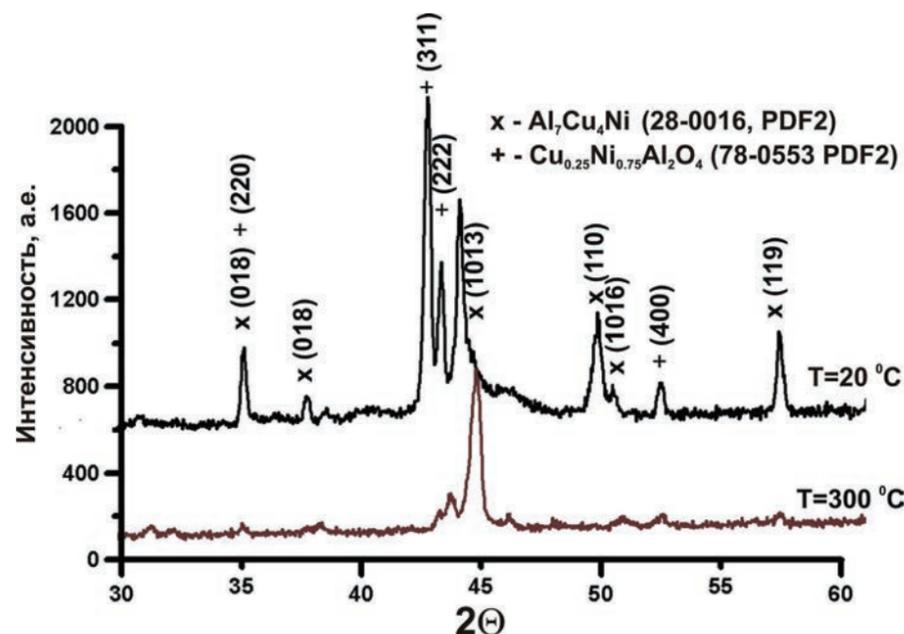


Рис. 1. Дифрактограммы с поверхности синтезированных структур после СЛП/П при  $T = 20^\circ C$  и  $T = 300^\circ C$ .

пературы в пористых  $Cu_xAl_yNi_z$  образцах после СЛП в зависимости от параметров ЛИ и дополнительного подогрева исходной смеси. Показано, что метод изучения температурной зависимости УЭС является хорошей



Рис. 2. Внешний вид синтезированного методом СЛП образца. Диск 10 мм диаметром.

альтернативой для традиционных подходов исследования эффекта памяти формы (ЭПФ) в пористых  $Cu_xAl_yNi_z$  образцах и позволяет оценить температурный интервал проявления ЭПФ. Показано, что пористость синтезируемых интерметаллидных  $Cu_xAl_yNi_z$  фаз приводит к сдвигу интервала  $A_s-A_f$  аустенитного превращения по сравнению с литыми образцами, который в нашем случае составил  $50 \div 80^\circ C$ . При этом интервал  $M_s-M_f$  мартенситных превращений оказался смещен в область отрицательных температур и был равен  $+25 \div -40^\circ C$ .

Наличие ЭПФ в 3D изделиях из интерметаллидов  $Cu_xAl_yNi_z$  и создание методом СЛП объемных изделий любой наперед заданной формы внутренней и/или внешней поверхности может служить основой для

будущих приложений таких материалов и синтез таким способом био – 3D прототипа микро-электро-механических систем (МЭМС) – имплантов, сенсоров, систем доставки лекарств и т.п., что выводит на новый качественный уровень производство интеллектуальных самоиницируемых, самофиксируемых медицинских устройств.

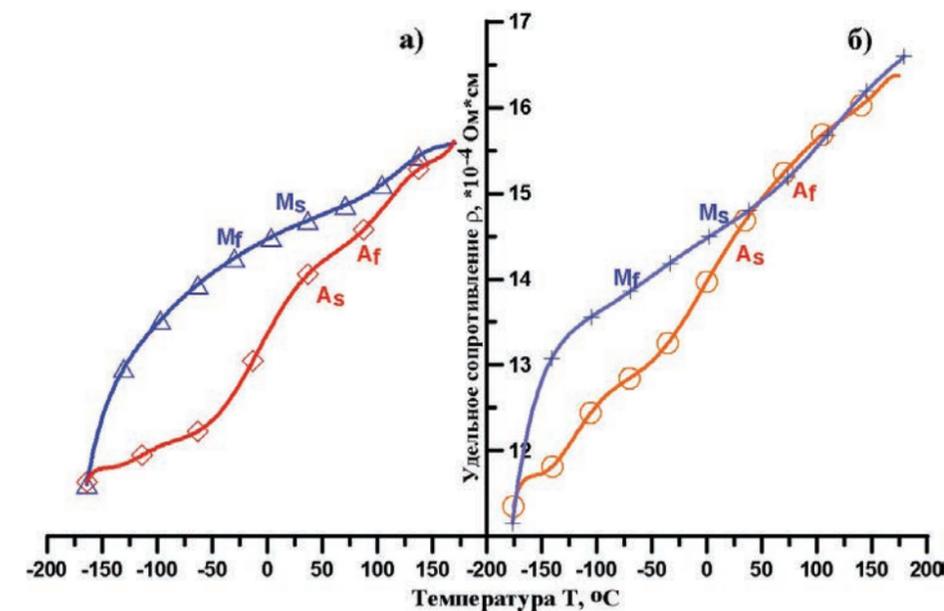


Рис. 3. Зависимость УЭС от температуры в образцах полученных методом СЛП + СВС для системы Cu–Al–Ni. Влияние температуры дополнительного подогрева  $T, ^\circ C$ : а) 20, б) 300.

### Результаты опубликованы:

1. I. Volynski, I. Shishkovskiy, I. Yadtoritsev, V. Щербаков, Ю. Морозов, Послойный лазерный синтез интерметаллидов в системе Cu – Al – Ni и эффект памяти формы, Неорганические материалы 52(6) 617 (2016).
2. I. Shishkovskiy, I. Yadtoritsev, Yu. Morozov, Laser assisted synthesis in Cu–Al–Ni system and some their properties, Journal of Alloys and Compounds 658 875 (2016).

## Конструирование сплавов методами лазерных аддитивных технологий

Впервые предложено использование аддитивных технологий (3D лазерная наплавка, селективное лазерное плавление) для конструирования (*in situ*, т.е. на месте) микроструктуры и свойств функциональных и градиентных сплавов и металл-матричных композитов (ММК).

В 2016 году получила развитие предложенная нами впервые в мире концепция использования аддитивных технологий (3D лазерная наплавка (DMD, LENS processes), и/или селективное лазерное плавление (СЛП–SLM process)) для конструирования (*in situ*, т.е. непосредственно на месте синтеза) микроструктур, функциональных и/или градиентных сплавов с заданными свойствами, а также изделий на их основе. Ранее комбинаторным методом моделирования были уже изготовлены многослойные 3D изделия на основе интерметаллидных порошковых систем Ti–Al, Ni–Al, Ti–Fe, Fe–Al.

Сделан вывод о том, что для уменьшения градиентов температур в объеме изделия, снижения термических напряжений и склонности к расслоению необходимо дополнительно прогревать исходную смесь и/или подложку до температур ~500–700 °С. Методами оптической, сканирующей электронной микроскопии с микроэлементным анализом и рентгеновским фазовым анализом в каждой группе из указанных порошковых систем в наплавленных слоях была изучена макро- и микроструктура, структурный, элементный и фазовый состав. Определены механические свойства гради-

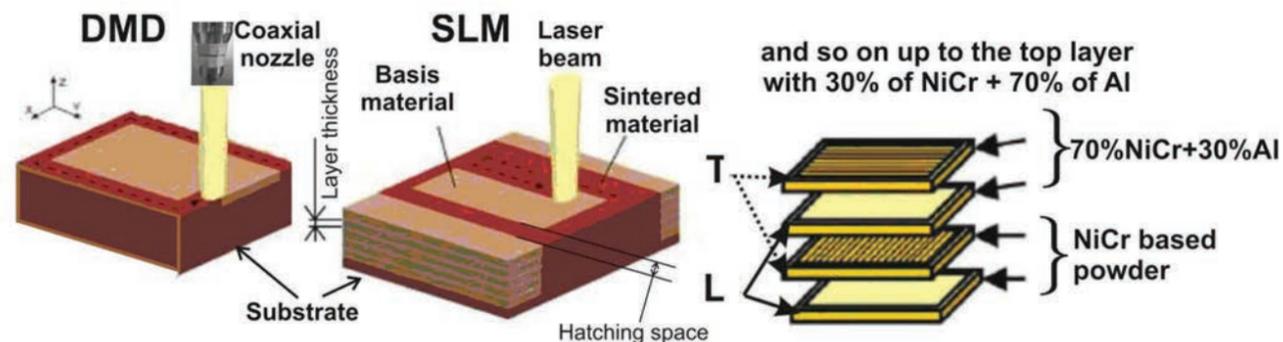


Рис. 1. Схема создания функционально-градиентных структур и изделий.

В 2016 г. показана возможность работы не только с бинарными, но и тройными порошковыми системами – NiCr–Ti, NiCr–Al, TiNi–Al. Слои представляли собой многокомпонентные смеси материалов с изменением состава исходной (матричной) порошковой композиции (NiCr или NiTi) от слоя к слою за счет добавки алюминия или титана в пропорции (90:10, 80:20, 70:30 и т.д. по объему).

ентных интерметаллидных слоев путем измерения микротвердости.

Предложенный оригинальный комбинаторный метод является эффективным инструментом по обнаружению и конструированию новых сплавов для целей аддитивного производства (АП), изучения структуро- и фазообразования в неравновесных условиях 3D лазерного синтеза и предсказания других

перспективных интерметаллидных и жаропрочных сплавов, ММК для аэрокосмической и военной техники; тяжелого и легкого машиностроения; ядерной, нефтяной и газо-

вой энергетики. Это является абсолютно новым и принципиальным результатом наших работ не только для промышленности РФ, но и в целом для мировой индустрии АП.

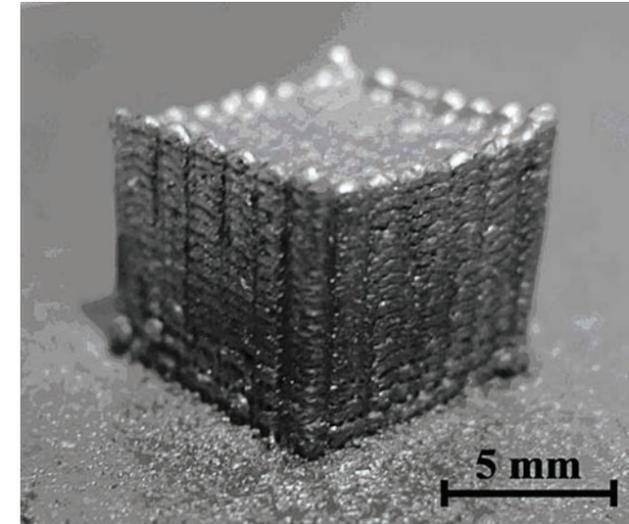


Рис. 2. 3D объемная лазерная наплавка (Direct Metal Deposition) в системе NiCr–Al.

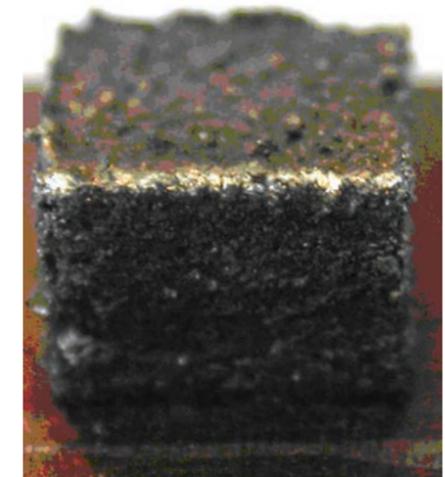


Рис. 3. 3D SLM в системе Ti+ nano TiC.

### Результаты опубликованы:

1. Д.В. Котобан, И.В. Шишковский, Экспериментальное исследование условий объемной лазерной наплавки алюминида никеля, Известия Российской академии наук. Серия физическая 80(8) 1093 (2016).
2. I.Shishkovsky, N. Kakovkina, F. Missemer, Direct Metal Deposition by Laser in TiNi–Al System for Graded Structure Fabrication, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 140 012016 (2016).
3. V. Saphronov, I. Shishkovsky, Peculiarities of selective laser melting process for permalloy powder, Materials Letters 171 208 (2016).
4. I. Shishkovsky, N. Kakovkina, F. Missemer, Three-dimensional (3-D) laser cladding of functionally graded structures in Ni–Cr–Al system, Laser in Engineering 33 (1–3) 1 (2016).

## Открытие второго российского центра протонной терапии в Обнинске

*В ноябре 2016 года в Обнинске открылся второй российский центр протонной терапии. «Сердцем» этого центра стал протонный комплекс «Прометеус» – разработка директора Физико-технического центра ФИАН в г. Протвино В.Е. Балакина.*

Разработка В.Е. Балакина обладает рядом преимуществ по сравнению с подобными мировыми устройствами.

Во-первых, российский аппарат очень компактен (весит около 30 тонн и помещается в одной комнате) и экономичен (потребляет в среднем в 7–10 раз меньше электроэнергии, чем другие ускорители). Это помогло удешевить получение ускоренных протонов. В итоге установка стоит чуть дороже электронного ускорителя, при этом по производительности она одна сравнима с четырьмя электронными ускорителями.

Во-вторых, технологию облучения изменили так, чтобы преимущества были очень ярко выражены, то есть чтобы опухоль получала дозу больше, чем при сегодняшних технологиях, а здоровые ткани – меньше. По словам разработчиков, российский аппарат отличается тем, что при работе с ним соотношение дозы лучей в опухоли к дозе в здоровой ткани в несколько раз лучше, чем у его американских, японских и других конкурентов. При этом протоны направляются точно в место опухоли и именно там начинают разрушать клетки, не задевая



*Протонно-лучевая установка, созданная группой В.Е. Балакина  
(фото предоставлено разработчиком)*

здоровые ткани и органы. Такого результата специалисты ФИАН и компании «Протом» добились, проработав каждый элемент ускорителя. В процессе работы они получили более 30 патентов.

Эта терапия особенно показана пациентам, у которых обнаружили рак в области головы и шеи, головном мозге. Расчеты показывают, что в российском ускорителе заложена возможность излечивать рак в 90 % случаев.

Разработка В.Е. Балакина известна не только в России, но и за рубежом. Как отмечает «Российская газета»,

*Медицинские ускорители протонов, созданные в подмосковном наукограде Протвино в Физико-техническом центре ФИАН им. Лебедева, уже установлены в одной из американских клиник и исследовательском центре знаменитого Массачусетского технологического института. Скоро в Бостоне должен появиться еще один российский ускоритель, который выиграл тендер, победив таких известных конкурентов как Hitachi, Siemens, бель-*

*гийская компания IBA и т.д. (А. Васянин. Киллер для убийцы. «Российская газета», №6889 (21) от 02.02.2016)*

Кроме США в настоящее время ведется сборка протонного комплекса для клиники в Израиле.

Второй ускоритель является точной копией первого, который, после получения разрешения на клинические испытания, уже на протяжении года успешно работает в Физико-техническом центре ФИАН в г. Протвино. Прошедшие испытания показали высокую эффективность, экономичность и безопасность лечения по сравнению с другими устройствами подобной направленности.

Помимо упомянутой выше публикации запуску второго протонного комплекса посвящена также статья «Атакуют без промаха» (А. Васянин. «Российская газета», №7136 (268) от 24.11.2016), а также – множество публикаций в интернет-изданиях различного уровня.

Кроме этого на сайте ФИАН представлен видеосюжет «Самая миниатюрная протонно-лучевая установка для лечения рака»

## Выборы в РАН

В 2016 году состоялись выборы членов Российской академии наук, в результате которых четверо сотрудников ФИАН стали членами-корреспондентами и четверо действительными членами Российской академии наук.

### Действительные члены РАН



#### Михаил Владимирович ДАНИЛОВ

*Специалист в области физики элементарных частиц, автор более 700 научных работ, в том числе после избрания членом-корреспондентом РАН в 1997 г. 456 научных работ и 31 доклад. Индекс Хирша – 69.*

#### Основные научные результаты.

Данилов М.В. участвовал в измерении  $t$ - $p$ -рассеяния на Серпуховском ускорителе. В международном проекте АРГУС под его руководством и при активном участии проведен обширный цикл исследований свойств прелестных и очарованных частиц,  $t$ -лептона, осуществлен поиск новых частиц и явлений. Эти исследования позволили впервые определить элементы СКМ-матрицы  $|V_{td}|$  и  $|V_{ub}|$  и с наименьшей модельной зависимостью определить элемент  $|V_{cb}|$ . Таким образом, были измерены 3 фундаментальных параметра Стандартной Модели и обосновано создание В-фабрик. Михаил Владимирович продолжает эти исследования в экспериментах BELLE и BELLE2. В эксперименте H1 внес большой вклад в создание жидкоаргонного калориметра, в исследование  $e$ - $p$ -взаимодействий. При его активном участии получены результаты по изучению механизмов рождения  $b$ - и  $c$ -кварков на установке HERA-B, измерен период  $2\beta$ -распада и получено лучшее в мире ограничение на период безнейтринного  $2\beta$ -распада  $^{136}\text{Xe}$  в эксперименте ECHO. Внес

существенный вклад в развитие проволочных газовых детекторов и в разработку нового типа детектора – кварцевого черенковского калориметра, участвует в модернизации калориметра CMS и поиске экзотических адронов в эксперименте CMS. Координировал участие России в подготовке детекторов для будущего  $e$ - $e$ -линейного коллайдера ILS. Под его руководством активно развивается калориметрия на основе кремниевых фотоумножителей, в том числе и для поиска стерильного нейтрино на Калининской АЭС.

#### Иные достижения.

Михаил Владимирович заведует кафедрами МФТИ и МИФИ. Под его руководством было успешно защищено 19 диссертаций на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

Член бюро Отделения физических наук РАН, был членом Комитета Научной Политики ЦЕРН, Научного Совета DESY (ФРГ), ICFA и других международных научных организаций.

Лауреат премий М. Планка (ФРГ) и А.П. Карпинского (ФРГ-РАН).



#### Евгений Александрович КУЗНЕЦОВ

*Специалист в области физики нелинейных явлений и ее приложений, автор 174 научных работ, в том числе после избрания членом-корреспондентом РАН в 1997 г. 75 научных работ, из них 2 монографии и 2 учебника. Индекс Хирша – 25.*

#### Основные научные результаты.

Кузнецов Е.А. – один из создателей теории волновых коллапсов: коллапс электромагнитных волн в плазме; коллапс звуковых волн и его влияние на структуру бесстолкновительных ударных волн в плазме; квазиклассическая теория волновых коллапсов; метод нахождения критериев коллапсов на основе мажорирующих интегральных неравенств. Им был решен ряд проблем устойчивости нелинейных волн и вихрей, зарождения и развития турбулентности, создана теория двумерных слабонадкритических структур, объяснившая эксперименты Бена-ра по наблюдению гексагональных конвективных ячеек, описаны топологически нетривиальные течения, открыт коллапс волн в пограничных слоях. Построена нелинейная теория неустойчивости Кельвина–Гельмгольца. Его работы по зарождению развитой турбулентности за счет опрокидывания вихревых линий кардинальным образом изменяют представления о природе колмогоровского спектра гидродинамической

турбулентности. При его активном участии создана теория возникновения особенностей на поверхности жидкости и их влияния на спектры турбулентности волн на воде. Построена теория трехмерных ионно-звуковых солитонов, впервые найдены анизотропные колмогоровские спектры МГД турбулентности, изучена кинетика и поляризационные аномалии индуцированного рассеяния электромагнитных волн в плазме, построена нелинейная теория зеркальной неустойчивости плазмы, найдена серия универсальных моделей нелинейной математической физики, включая трехмерную интегрируемую гидродинамику. Важнейшим результатом является открытый им фазово-градиентный механизм образования спайков, имеющий важные приложения в задачах конвекции и генерации коротких импульсов в лазерах. При активном участии Евгения Александровича развита теория бифуркаций солитонов. Он со своими учениками существенно усовершенствовал теорию солитонов в оптических волокнах.



### **Николай Александрович РАТАХИН**

*Специалист в области мощной импульсной энергетики и физики пучков, z-пинчей, рентгеновского излучения; автор и соавтор 166 научных работ, авторского свидетельства на изобретение; после избрания членом-корреспондентом РАН в 2006 году – более 70 научных работ. Индекс Хирша – 11.*

#### **Основные научные результаты.**

Основное направление научной деятельности Николая Александровича – исследование эффективных методов компрессии электрической энергии и ее преобразования в мощные потоки заряженных частиц и рентгеновское излучение в различных диапазонах спектра.

Разработан ряд оригинальных импульсных генераторов тераваттного уровня мощности и серия компактных генераторов для рентгенографии на специально созданной элементной базе, поставленных за рубеж и в учреждения России.

В экспериментах по наносекундным z-пинчам продемонстрировано получение мультимегагауссных полей; рентгеновских импульсов с мощностью большей, чем мощность генератора.

За последние 5 лет получены новые результаты по наносекундному электровзрыву в режиме скин-слоя при мегабарных давле-

ниях, достигнута рекордная эффективность рентгеновского излучения K-линий и нейтронов из плазмы z-пинчей использованием многокаскадных лайнеров.

#### **Иные достижения.**

Ратахин Н.А. принимает участие в подготовке научных кадров: среди его учеников один доктор и пять кандидатов наук; является заведующим кафедрой «Высоковольтная физика и сильноточная электроника» Томского политехнического университета, руководит двумя аспирантами.

Николай Александрович имеет опыт научно-организационной работы: является членом Президиума СО РАН, бюро Совета директоров СО РАН, Совета ректоров, заместителем председателя Объединенного ученого совета СО РАН по физическим наукам, председателем ученого и докторского диссертационного советов при ИСЭ СО РАН.



### **Михаил Иванович ЯЛАНДИН**

*Специалист по электрофизике и физической электронике, автор 235 работ, включая обзоры и 7 патентов. После избрания членом-корреспондентом РАН в 2003 г. имеет 132 работы и 2 патента. В базе WoS: 152 работы; 1600 цитирований. Индекс Хирша – 25.*

#### **Основные научные результаты.**

Направления работы: высоковольтная аппаратура, быстропротекающие эмиссионные и электроразрядные процессы, индуцированное излучение сильноточных электронных пучков.

Ранние работы посвящены созданию компактных сильноточных генераторов и ускорителей. Эти уникальные установки применяются в десятке стран для генерации излучений (рентгеновского, оптического и радиочастотного) и в практических задачах.

Текущие интересы Михаила Ивановича – исследования коротковолновых релятивистских СВЧ-генераторов, мощность которых он увеличил на три порядка – до гигаватта, а частоту повторения – более килогерца. В приоритетных экспериментах подтвердил идеи теоретиков о классическом аналоге эффекта свержизлучения Дике для ансамблей релятивистских электронов в волноводах. Впервые получил компрессию импульса свержизлуче-

ния при усилении электронным потоком.

Уникальны работы Яландина М. И. по пикосекундной стабилизации взрывоэмиссионных катодов и пучков, позволившие реализовать фазовую синхронизацию независимых релятивистских СВЧ-генераторов. Кроме того, он с пикосекундным разрешением исследовал эффект убегания электронов в газах, решил ряд дискуссионных вопросов по возникновению этого эффекта, а также пробоя воздуха на убегающих электронах.

#### **Иные достижения.**

Член Американского физического общества и Института инженеров по электротехнике и электронике. Преподаёт в ЮУрГУ и УрФУ. Координатор экспертного совета РФФИ, председатель НС ОФН РАН по релятивистской и сильноточной электронике.

Лауреат премии Ленинского комсомола, Государственной премии РФ, премии РАН им. П.Н. Яблочкова.

## Члены-корреспонденты РАН



### Николай Михайлович ЗУБАРЕВ

Специалист в области физики электрических разрядов, а также физики нелинейных явлений в жидкостях в электрическом и магнитном полях; автор 80 научных работ в рецензируемых журналах и главы в монографии. Индекс Хирша – 11.

#### Основные научные результаты.

- 1) решена (в плоской двумерной постановке) классическая задача электростатики о равновесных конфигурациях поверхности проводящей жидкости в электрическом поле;
- 2) предложен механизм формирования жидкометаллических струй в катодном пятне вакуумной дуги, объясняющий пороговый характер функционирования разряда;
- 3) получены точные двух- и трехмерные решения уравнений движения диэлектрической жидкости со свободной поверхностью в вертикальном, а также горизонтальном электрическом поле; описано формирование точек заострения на границе за конечное время;
- 4) найдены автомодельные решения уравнений электрогидродинамики, ответ-

ственные за образование конусов Тейлора на поверхности жидкого металла в электрическом поле; построены аналитические модели коронного разряда, а также полевого испарения ионов с остриёв конической формы с учетом влияния объемного электрического заряда.

#### Иные достижения.

Зубарев Н.М. – профессор кафедры общей и молекулярной физики Уральского федерального университета; читает спецкурсы по физике плазмы и газового разряда; научный руководитель 1 кандидатской и научный консультант 1 докторской диссертации.

Лауреат премии Европейской Академии и конкурсов молодых докторов наук Совета по грантам при Президенте РФ, Государственной премии РФЮ Фонда Династия и Фонда содействия отечественной науке.



### Юрий Юрьевич КОВАЛЕВ

Специалист в области астрофизики активных галактик, межзвездной среды и радиоастрономии, автор более 120 рецензируемых научных работ (более 5000 цитирований) и 1 монографии (автор главы). Индекс Хирша по базе данных WoS – 37.

#### Основные научные результаты.

Юрий Юрьевич является сопредседателем и активным участником российского научного проекта с международным участием «РадиоАстрон», в рамках которого были получены результаты, многие из которых являются уникальными. А именно:

- 1) открытие экстремальной яркости ядер квазаров, что меняет существовавшее понимание природы их излучения;
- 2) открытие нового эффекта распространения радиоволн в межзвездной плазме (субструктуры рассеяния), что дало возможность оценить параметры турбулентных облаков межзвездной среды и предоставило новый метод восстановления изображений объектов, размытых рассеянием;
- 3) обнаружение и интерпретация тесной связи между синхротронным излучением и Комптоновским рассеянием в компактных джетах квазаров в радио- и  $\gamma$ -диапазонах электромагнитного спектра, локализация области  $\gamma$ -излучения квазаров в начале их струй;
- 4) обнаружение более 1000 новых ультра-

компактных ядер активных галактик, которые составили основу современной наиболее точной инерциальной системы отсчета ICRF2;

- 5) массовые измерения эффекта сдвига ядер квазаров с длиной волны наблюдений из-за синхротронного самопоглощения, важных для прикладных задач координатного обеспечения, оценка геометрии и физики релятивистских джетов.

#### Иные достижения.

Ковалев Ю.Ю. руководит студентами и аспирантами МГУ, МФТИ, ФИАН, является организатором регулярного научно-учебного семинара по наблюдательной астрофизике, читает соответствующий курс лекций на научных школах в России и за рубежом, активно участвует в различных общественных проектах, направленных на популяризацию науки.

Ковалев Ю.Ю. – сопредседатель международного научного совета проекта РадиоАстрон, член Совета по космосу и Совета по астрономии РАН, член Координационного совета профессоров РАН, член Совета по науке Минобрнауки, эксперт РФФИ и рецензент ведущих журналов по астрономии.



### Роман Владимирович МИЗЮК

Специалист в области физики элементарных частиц, автор 330 научных работ, из них 2 монографии. Индекс Хирша – 57.

#### Основные научные результаты.

- 1) обнаружены экзотические многокварковые состояния  $Z_b(10610)$  и  $Z_b(10650)$ , изучены их свойства, показано, что их структура – это слабо связанные пары  $B - \bar{B}^*$  и  $B^* - \bar{B}$  мезонов соответственно, тем самым впервые надежно установлено существование экзотических адронов;
- 2) обнаружены 2S, 1P и 2P спин-синглетные состояния в системе связанных b-анти-b кварков (уровни боттомония  $\eta_b(2S)$ ,  $h_b(1P)$  и  $h_b(2P)$ ), заметно улучшена точность в массе состояния 1S ( $\eta_b(1S)$ ), впервые измерена его ширина, измерены соответствующие сверхтонкие расщепления;
- 3) обнаружены состояния  $Z_c(4050)$ ,  $Z_c(4200)$ ,  $Z_c(4250)$  с экзотическим кварковым составом  $c - \bar{c} - u - \bar{d}$  с использованием амплитудного анализа трехчастичных распа-

дов В мезонов, для состояний  $Z_c(4200)$  и  $Z_c(4430)$  измерены спин и четность;

- 4) обнаружен изотриплет очарованных барионов  $\Sigma_c(2800)$ , измерены спин и четность очарованного бариона  $\Lambda_c(2880)$ , «закрит» кандидат в пентакварки  $\Theta(1540)$ .

#### Иные достижения.

Роман Владимирович ведет преподавательскую работу на кафедре физики элементарных частиц МФТИ и кафедре экспериментальной ядерной физики и космофизики МИФИ. Руководитель одной кандидатской диссертации.

Является координатором группы по изучению боттомоние-подобных состояний в эксперименте BELLE, координатором по спектроскопии международной рабочей группы Quarkonium Working Group, координатором по кварконию группы «Belle II - Theory Interface Platform».



### Владимир Моисеевич ПУДАЛОВ

Специалист в области физики конденсированного состояния, автор 230 научных работ, из них 5 коллективных монографий и 2 авторских свидетельства. Индекс Хирша – 29.

**Основные научные результаты** связаны с изучением сильнокоррелированных электронных систем; им с соавторами обнаружены и исследованы отрицательная сжимаемость двумерной электронной жидкости, чередующиеся переходы между фазами квантованного холловского проводника и изолятора, коллективное состояние двумерной электронной системы, новые фазы в одномерных органических кристаллах, в т.ч. гетерофазное состояние сверхпроводника и антиферромагнетика. Обнаруженный им переход металл-изолятор в двумерной сильно коррелированной системе электронов радикально изменяет сложившееся представление о невозможности металлического состояния в двумерных системах.

В последние годы Пудалов В.М. с соавторами обнаружили спонтанное возникновение спин-поляризованных «капель» в двумерной ферми-жидкости, трансформацию ферми-жидкости в сильнокоррелированную плазму с ростом межэлектронных взаимодействий, синтезировали ряд но-

вых сверхпроводников на основе железа и впервые измерили значения энергетических щелей в их спектре. Им разработано множество новых экспериментальных методов, в т.ч. метод исследования химического потенциала электронов, электронной спиновой восприимчивости, спиновой намагниченности и энтропии.

#### Иные достижения.

Владимир Моисеевич преподает студентам МФТИ, руководит студентами и аспирантами; с 2007 г. под его руководством успешно защищено 6 диссертаций на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук; ряд его учеников стали известными учеными. Организовал и провел более 10 международных конференций.

Пудалов В.М. – заместитель главного редактора журнала «Письма в ЖЭТФ», член Ученого совета по проблеме Физика низких температур ОФН РАН, руководитель Центра коллективного пользования ФИАН, член экспертных комитетов Роснано, РКНФ.

Лауреат Премии имени А.Ф. Иоффе РАН.

## Награды сотрудников ФИАН

### Почетное звание профессора РАН

В 2016 году почетного звания профессора РАН удостоились трое сотрудников ФИАН:



**Юрий Юрьевич КОВАЛЕВ**  
заведующий Лабораторией  
внегалактической радиоастрономии  
АКЦ ФИАН



**Дмитрий Игоревич НОВИКОВ**  
старший научный сотрудник  
Лаборатории физики ранней  
Вселенной АКЦ ФИАН

Звание «Профессор РАН» введено постановлением Президиума РАН от 29 сентября 2015 года № 204. Профессором РАН может стать признанный в научном сообществе ученый, имеющий: ученую степень доктора наук либо ученую степень, полученную в иностранном государстве, признаваемую в Российской Федерации; научные достижения национального или международного уровня; награды, почетные звания, включая членство в академиях, научных обществах и т.д. Присваивается российским учёным не старше 50 лет, осуществляющим научно-исследовательскую или научно-образовательную деятельность в различных областях знания и не являющимся членами РАН.



**Алексей Борисович ПУШКАРЕВ**  
научный сотрудник Лаборатории внегалактической радиоастрономии ПРАО ФИАН

### Региональные премии

Постановлением Московской областной Думы от 07.04.2016 № 16/161-П «О награждении Почетным знаком Московской областной Думы «За трудовую доблесть» заместитель директора по научной работе ПРАО АКЦ ФИАН

**Чашей Игорь Владимирович**  
награжден

Почетным знаком Московской областной Думы  
«За трудовую доблесть»

Почетным знаком Московской областной Думы «За трудовую доблесть» награждаются «граждане за добросовестный и безупречный труд, достижения в сфере ... науки и образования, культуры ...» (из «Положения о Почетном знаке...»).



Постановлением губернатора Самарской области от 29.01.2016 №16 «О награждении» главный научный сотрудник СФ ФИАН д.ф.-м.н., профессор

**Волостников Владимир Геннадьевич**  
удостоен

Почетного звания

**Заслуженный деятель науки Самарской области**

Распоряжением губернатора Самарской области от 13.02.2017 № 70-р «О предоставлении Губернских премий в области науки и техники за 2016 год» ведущий научный сотрудник СФ ФИАН д.ф.-м.н. **Шишковский И.В.** за цикл научных исследований Создание имплантатов и тканево-клеточных каркасов методами аддитивных технологий объявлен

**Лауреатом Губернской премии**  
**в области науки, техники, культуры и искусства**

Губернская премия Самарской области присуждается ежегодно деятелям науки, культуры и искусства, имеющим достижения, значимые для социально-экономического и социокультурного развития Самарской области, на основании экспертной оценки работ и проектов, номинируемых на премию.



## Международное сотрудничество

ФИАН активно развивает научные связи с ведущими международными центрами, участвует в международных научных конференциях. Сотрудники ФИАН также непрерывно работают в международных научных проектах ЦЕРНа (проекты LHC, CLOUD, COMPASS, SHIP и др.) и отдельных научно-исследовательских институтов Европы (Институт М. Планка, INFN и проч.) и США. Помимо этого ФИАН является базой для таких крупных международных проек-

тов, как «ГАММА-400», «РАДИОАСТРОН», МНИЦ «ПАМИР-ЧАКАЛТАЯ», КОРОНА, «XUV СПЕКТРОСКОПИЯ СОЛНЦА», «МИЛЛИМЕТРОН».

ФИАН проводит множество разнообразных научных мероприятий, в которых принимают участие не только российские ученые из различных регионов, но и специалисты из различных стран мира. Остановимся только на нескольких наиболее представительных мероприятиях ФИАН, прошедших в 2016 году.

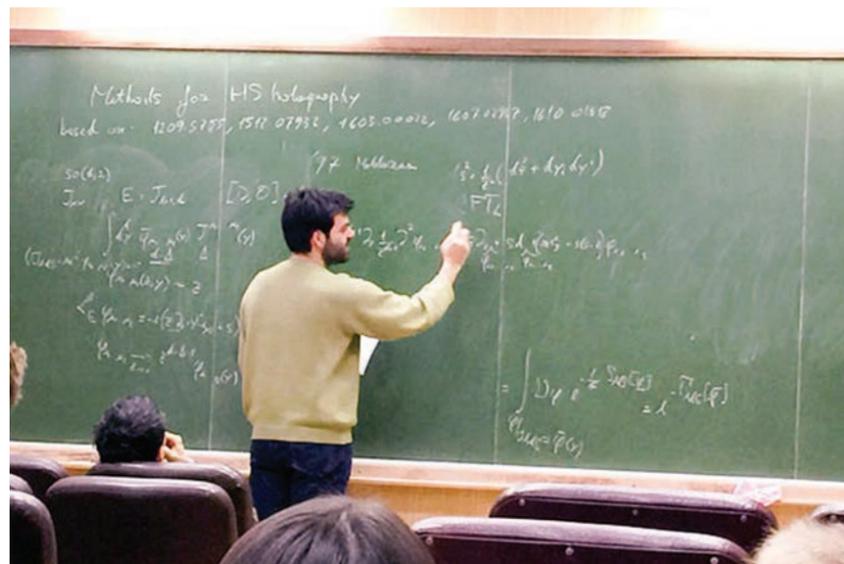
### Higher Spin Theory and Holography IV & V

Время проведения IV конференции – с 30 мая по 1 июня 2016 г.

Время проведения V конференции – с 30 ноября по 2 декабря 2016 г.

Цикл международных конференций организован Отделением теоретической физики им. И.Е. Тамма ФИАН. Конференции проходили при поддержке РФ (грант 14-42-00047 «Квантовая теория гравитации высших спинов, теория струн и ассоциированные дуальности»).

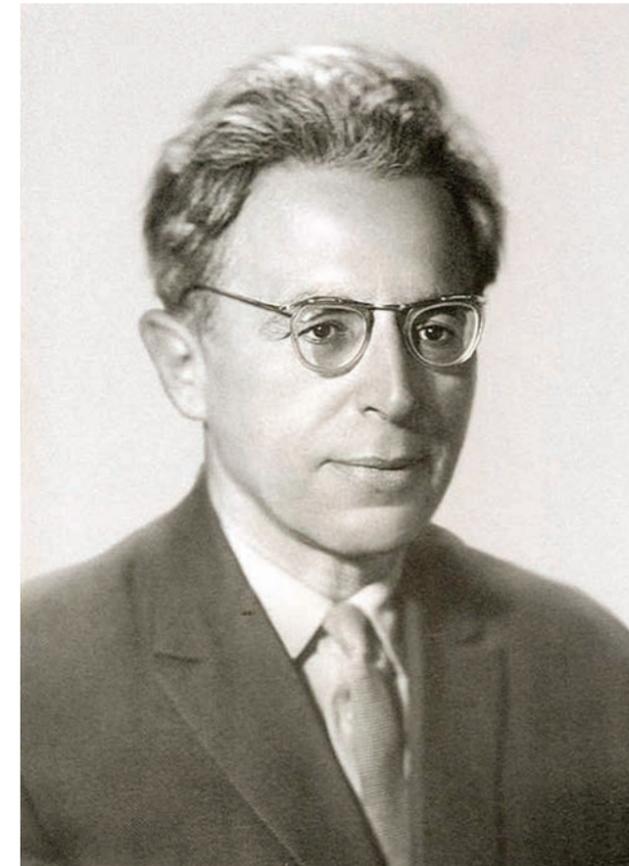
В рамках данных мероприятий обсуждаются актуальные вопросы высшей теории спинов, AdS/CFT – соответствия, теории струн. Кроме заявленных в рамках конференций проводятся обзорные и обучающие лекции для молодых ученых и аспирантов.



Доклад во время заседания.

## Всеволоновая астрономия. Шкловский – 100 Международная конференция, посвященная 100-летию И. С. Шкловского

Время проведения — 20–22 июня 2016 г.



Организаторами конференции выступили АКЦ ФИАН, ИКИ РАН, ГАИШ МГУ, РАН, Евразийское Астрономическое Общество.

Финансовую поддержку оказали ФАНО и РФФИ.

На конференции были представлены результаты современных исследований во всеволновой астрономии, связанных с вопросами:

- ранней Вселенной и реликтового излучения;
- сверхмассивных черных дыр, активных ядер галактик;
- источников генерации космических лучей;
- сверхновых звезд и их остатков, гамма-всплесков, пульсаров;
- физики межзвездной среды;
- эволюции звезд, планетных систем;
- проблем SETI.

Конференция была посвящена 100-летию со дня рождения выдающегося отечественного астрофизика Иосифа Самуиловича Шкловского, члена-корреспондента Академии наук СССР, лауреата Ленинской премии, члена Национальной академии наук США, Королевского астрономического общества и многих других академий.

### 19th International Symposium on Very High Energy Cosmic Ray Interactions

Время проведения – с 22 по 27 августа 2016 года.

Симпозиум проводился под эгидой Международного союза теоретической и прикладной физики (International Union of Pure and Applied Physics – IUPAP), при поддержке ФАНО и РФФИ, при активном участии в подготовке и проведении таких крупнейших научных учреждений, как

- Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ);

- Институт ядерных исследований (ИЯИ) РАН;
- Национальный исследовательский ядерный университет «Московский инженерно-физический институт» (НИЯУ МИФИ);
- Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (НИИЯФ МГУ).



Участники ISVHECRI-2016.

Принимая во внимание возрастающую взаимосвязь между астрофизикой и физикой высоких энергий, данный симпозиум, проводящийся каждые два года, предоставляет ученым-физикам, работающим в области астрофизики и физики высоких энергий, в частности, изучающим взаимодействия частиц высоких энергий как в космических лу-

чах, так и в ускорительных экспериментах, возможность обмениваться результатами своей работы. В связи с этим, главными темами ISVHECRI-2016 являлись результаты исследований космических лучей высоких энергий, связанных с адронными взаимодействиями, а также результаты ускорительных экспериментов, имеющих отношение к астрофизике.

### Charm and Beauty in Physics

Международная конференция, посвященная 70-летию проф. М. Данилова

Время проведения – с 10 по 11 ноября 2016 г.



Конференция проводилась при поддержке РФФИ (грант 16-02-20833) и РНФ (грант 15-12-30014).

Целью конференции являлось обсуждение последних достижений, новых результатов и открытых вопросов физики элементарных частиц. В рамках конференции рассматривались такие темы как Стандартная модель и то, что происходит за ее пределами, тяжелые ароматы и нейтрино, адронная структура, космология и астрофизика.

Конференция была посвящена 70-летию со дня рождения профессора Михаила Данилова – видного российского ученого в области физики элементарных частиц.

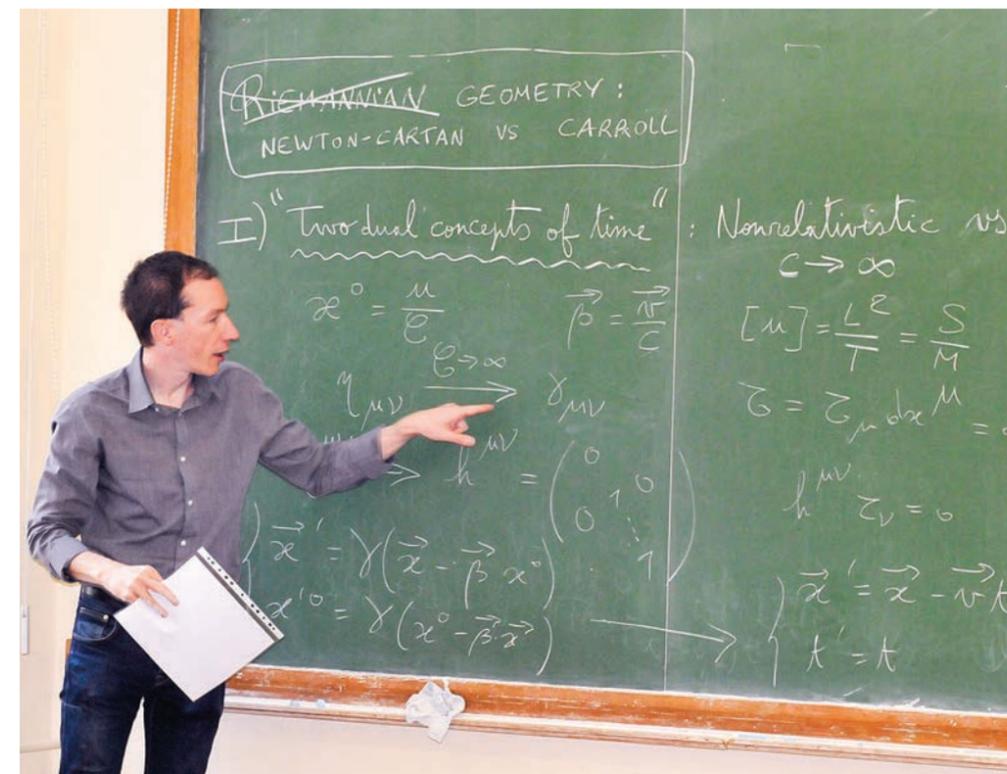
### Лекции приглашенных иностранных ученых

Ежегодно в ФИАН проводятся лекции приглашенных ученых из ведущих научно-исследовательских центров мира, целью которых является ознакомление научных сотрудников, молодых ученых и аспирантов с работами международных научных групп и ведущих ученых, поддержание, усиление и/или установление рабочих контактов.

Семинары проходят не реже 1 раза в месяц. Так в 2016 г. было проведено около 20 научных семинаров по различным направлениям физики, на которых выступили такие приглашенные ученые, как:

- **Пьетро Фре** (Pietro Fre) – профессор в области теоретической физики (Full Professor of Theoretical Physics) Университета в г. Турин, Италия (University of Torino, Italy), представитель по науке посольства Италии в РФ;

- **Леонардо Росси** (Leonardo Rossi) – профессор (Full Professor) Женевского отделения Итальянского Национального института ядерной физики (Istituto Nazionale Fisica Nucleare (INFN), Sezione Di Genova), ЦЕРН.
- **Ксавье Бекар** (Xavier Bekaert) – доцент (Associate Professor) Лаборатории математической и теоретической физики Университета г. Тур, Франция (University of Tours, France). Область научных интересов – квантовая физика.
- **Альберт Де Роэк** (Albert De Roeck) – старший научный сотрудник (senior research scientist) эксперимента LHC, ЦЕРН, профессор Университета в г. Антверпен, Бельгия (University of Antwerp, Belgium). Область научных интересов – физика элементарных частиц.
- и другие.



Ксавье Бекар читает лекцию на научном семинаре в ФИАН.

© Фото Е. Любченко (ФИАН).

## Визиты иностранных делегаций

Научная деятельность ФИАН, его самобытность, привлекают внимание множества иностранных ученых и общественных деятелей, которые стремятся посетить Институт, чтобы познакомиться с его деятельностью,

а также установить дружеские, научные и деловые контакты как с Институтом в целом, так и с отдельными научными группами. Здесь представлены только наиболее знаковые события.

### Визит иностранных ученых – участников научного семинара AARP

*8 июня 2016 г. Физический институт им. П.Н. Лебедева посетила делегация иностранных ученых. Визит состоялся в рамках международного научного семинара Advanced Accelerator & Radiation Physics (AARP), организованного совместно ФИАН и НИЯУ МИФИ.*

Международный научный семинар Advanced Accelerator & Radiation Physics (AARP) с момента своего создания задумывался как научный форум, на который вы-

носятся самые свежие идеи и результаты по актуальным проблемам физики. Каждый семинар AARP – это цикл полноценных лекций по разным исследованиям в рамках ка-



*С.Б. Дабагов показывает гостям портреты отечественных ученых-физиков – лауреатов Нобелевской премии, в разные годы работавших в ФИАН.*



*Дабагов С.Б.*

кой-либо объединяющей тематики, сопровождающийся широким обсуждением как представленных результатов, так и в целом всей проблемы, которой посвящена конкретная лекция. Одной из целей семинара является вовлечение студентов, аспирантов и молодых ученых в научную дискуссию. Особенностью семинара является отсутствие «привязки» места его проведения к

какому-либо одному месту: его сессии могут проводиться в различных научных и образовательных центрах как в России, так и за рубежом. К тому же он выгодно отличается от других мероприятий подобного формата, например, конференций, возможностью живого диалога участников. Бесспорным организатором семинаров является ведущий научный сотрудник Лаборатории электронов высоких энергий ФИАН Дабагов С.Б.

В 2016 г. в рамках семинара состоялся визит иностранных ученых в ФИАН с целью ознакомления с деятельностью Института и его научным коллективом. Среди гостей ФИАН были исследователи из Франции, Италии, Чехии, Германии, Китая, Польши, Индии.

Гости познакомились с историей Института, а также посетили отдельные лаборатории, где имели возможность пообщаться с молодыми учеными ФИАН. В ходе визита иностранные гости озвучили, что большие надежды возлагаются на развитие новых направлений исследований и получение прорывных результатов в уже хорошо развитых областях. И всё это, конечно, требует создания и укрепления международных связей, чему способствуют такие мероприятия, как прошедшая сессия международного семинара AARP.

## Визит постоянного секретаря Французской академии наук профессора Катрин Брешиньяк

14 ноября 2016 г. Физический институт им. П.Н. Лебедева посетила постоянный секретарь Академии наук Франции, профессор Катрин Брешиньяк. Целью визита было знакомство с молодыми учеными ФИАНа и их научными исследованиями, а также – оценка возможности налаживания контактов для дальнейшего сотрудничества.

Визит проф. К. Брешиньяк в ФИАН являлся частью большой программы, в ходе которой французская гостья общалась с молодыми учеными ведущих академических институтов и ВУЗов Москвы и Петербурга, а также делала доклад на Президиуме РАН о развитии мирового научного сообщества. В ходе визита в ФИАН г-жа К. Брешиньяк посетила лаборатории, расположенные в Троицком технопарке и на «московской площадке» ФИАН.



Директор ФИАН, член-корр. РАН  
Н.Н. Колачевский и проф. К. Брешиньяк.  
Фото: © Н. Соловьева, ФИАН.

В Отделе оптики низкотемпературной плазмы рассказали об экспериментах по взаимодействию светового поля с системами нематических жидких кристаллов (НЖК). В последнее время в этой области особый интерес представляют исследования по влиянию на поведение светового пучка в НЖК различных низко- и высокомолекулярных поглощающих добавок.



Проф. К. Брешиньяк и младший научный сотрудник Отдела оптики низкотемпературной плазмы С.А. Швецов.  
Фото: © Н. Малахин, Научная Россия.

Большой интерес вызвали работы Отделения квантовой радиофизики им. Н.Г. Басова, где К. Брешиньяк посетила помещения Лаборатории газовых лазеров и Лаборатории фотохимических процессов. Здесь иностранной гостье были представлены эксперименты в области лазерных импульсов инфракрасного и ультрафиолетового диапазонов,



В Лаборатории газовых лазеров ФИАН.  
Фото: © Н. Малахин, Научная Россия.

а также продемонстрированы некоторые возможности практического применения разработок. Рассказывая о своих исследованиях, ученые отметили, в том числе, и тесные рабочие контакты, которые в течение долгих лет связывали ученых России и Франции.

Не менее интересным было и посещение ЦКП ФИАН, где иностранной гостье продемонстрировали уникальное оборудование, в частности – новейшая криомагнитная установка, работающая с магнитными полями до 21 Тл, а также рассказали о достигнутых результатах, многие из которых признаются выдающимися и незаурядными мировым научным сообществом.



Руководитель ЦКП ФИАН, член-корр. РАН  
В.М. Пудалов и проф. К. Брешиньяк.  
Фото: © Н. Соловьева, ФИАН

Весьма впечатляющими выглядели и результаты исследований молодых ученых Лаборатории физики низкоразмер-

ных систем и структур, посвященные оптической спектроскопии комплексных дефектов в кристаллах, исследованиям микрофотолюминесценции в квантовых ямах и многому другому.

В заключение знакомства с лабораториями и исследовательскими группами ФИАНа К. Брешиньяк посетила Лабораторию оптики активных сред, где была продемонстрирована экспериментальная лазерная установка для получения охлажденных атомов тулия и исследования их свойств. Следует отметить, что ученым ФИАНа несколько лет назад впервые в мире удалось осуществить лазерное охлаждение атомов тулия и их захват в магнитооптическую ловушку. В настоящее время ученые проводят исследования свойств охлажденных атомов и возможности их практического применения. Одним из таких направлений является разработка оптических стандартов частоты в области вакуумного ультрафиолета.

Описывая свои впечатления от посещения ФИАНа, проф. К. Брешиньяк заметила, что, несмотря на трудности, которые возникают перед российскими учеными, уровень их работ невероятно высок и сравним с уровнем ведущих европейских научно-исследовательских центров. Также она подчеркнула важность для Франции и России поиска путей развития международных научных проектов, которые могли бы вывести науку обоих государств на еще более высокий уровень.

## Молодежь ФИАН

### Конкурс научных работ молодых ученых ФИАН

Конкурс научных работ молодых ученых ФИАН проводится один раз в год. При этом рассматриваются следующие «номинации»:

**Премия им. П. Н. Лебедева** присуждается за работы по направлениям общая и теоретическая физика,

**Премия им. С. И. Вавилова** – за работы по направлениям оптика, атомная физика, физика твердого тела,

**Премия им. Н. Г. Басова** – за работы по направлениям лазерная физика, радиофизика, физика плазмы,

**Премия им. Д. В. Скобельцына** – за работы по направлениям физика высоких энергий, ядерная физика, астрофизика.

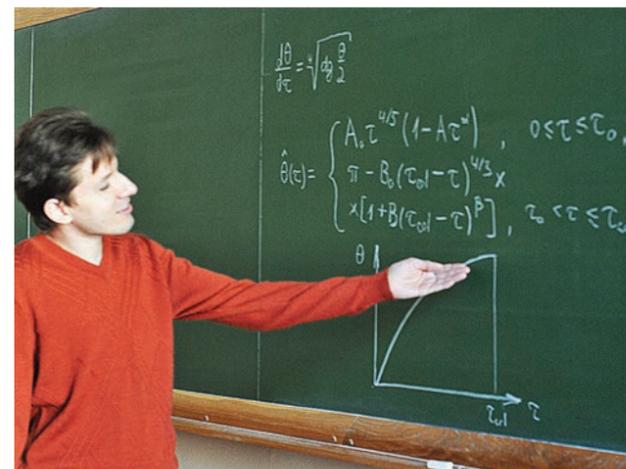
Согласно «Положению о конкурсе научных работ», участие в конкурсе могут принять сотрудники, аспиранты и студенты организаций-участников в возрасте не старше 33 лет. К рассмотрению принимаются отдельные работы или циклы оригинальных работ, существенный вклад в выполнение которых внесен конкурсантами.

При создании конкурса перед ним ставились следующие **задачи**:

1. Стимулирование творческой инициативы и научной активности молодых ученых, аспирантов и студентов организаций-участников проектов, проводимых Учебно-научным комплексом (УНК) ФИАН,
2. Развитие интеграционных связей научных и учебных учреждений, совершенствование форм совместного участия в научных исследованиях и образовательном процессе,
3. Ознакомление научной общественности с достижениями молодых ученых и учебно-научной деятельностью УНК ФИАН.

Для реализации последней задачи работы-победители представляются на Всероссийских конференциях молодых ученых, в дальнейшем публикуются в сборнике, посвященном конкурсу, на информационном ресурсе «ФИАН-информ», в научных журналах.

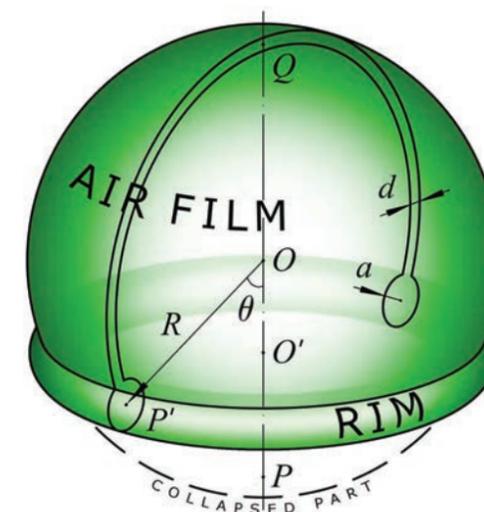
## Премия имени П. Н. Лебедева



В 2016 году присуждена цикла работ **Дениса Николаевича СОБЬЯНИНА** "Теория коллапса антипузырька".

Денисом Николаевичем была построена теория коллапса антипузырька – необычного микрогидродинамического объекта, представляющего собой тонкую сферическую воздушную оболочку в жидкости. Антипузырек – своеобразный антипод обыч-

ного мыльного пузырька. Показано, что после прокола антипузырька в нем образуется и постепенно расширяется круглое отверстие, на границе которого возникает тороидальный воздушный ободок, а сам антипузырек начинает коллапсировать. Исследован характер возникающего течения и природа сил, вызывающих коллапс. Детально изучено развитие коллапса во времени, вычислено время полуколлапса и полного коллапса. Движение ободка не описывается потенциальным течением и характеризуется большими числами Рейнольдса. Скорость движения ободка не постоянна и постепенно падает с течением времени, а ее величина определяется балансом сил поверхностного натяжения и гидродинамического сопротивления. Выведено и решено уравнение коллапса. Показано согласие теоретических результатов с современными экспериментальными данными.



Коллапсирующий антипузырь. После прокола антипузырька в точке  $P$  в первоначально сферической воздушной пленке (**air film**), находящейся в жидкости, возникает и постепенно расширяется круглое отверстие. На краю воздушной пленки образуется тороидальный воздушный ободок (**rim**), радиус которого увеличивается с течением времени из-за перехода воздуха из пленки. Сам антипузырек постепенно исчезает за счет стягивания воздушной пленки силами поверхностного натяжения, что соответствует увеличению полярного угла  $\vartheta$ .

Результаты опубликованы:

1. D. N. Sob'yanin, Theory of the antibubble collapse, Phys. Rev. Lett. 114, 104501 (2015)

## Премия имени С. И. Вавилова



В 2016 году присуждена циклу работ **Александра Юрьевича Кунцевича "Измерения энтропии двумерных систем"**.

В ходе работы Александром Юрьевичем был предложен и реализован оригинальный способ измерения термодинамических характеристик двумерного слоя электронов (2D-систем) без вклада подложки. Способ позволил исследовать магнитоосцилляции энтропии (определение квантовых времен, эффективных масс, обменного увеличения  $g$ -фактора), эффекты межэлектронных корреляций в сильно взаимодействующей системе, независимо проверить третье начало термодинамики. Полученные результаты являются принципиально новыми, они допускают сравнение с результатами измерений сжимаемости, магнитоосцилляции энтропии могут быть сравнены с магнитоосцилляциями намагниченности. Наиболее перспективным представляется использование подхода по измерению энтропии

1. A.Yu. Kuntsevich, Y. Tupikov, V.M. Pudalov, I.S. Burmistrov, Strongly correlated two-dimensional plasma explored from entropy measurements, *Nature Communications* 6, 7298 (2015)
2. Y. Tupikov, A.Yu. Kuntsevich, V.M. Pudalov, I.S. Burmistrov, Temperature derivative of the chemical potential and its magnetooscillations in two-dimensional system, *JETP Letters*, 101, 131-135 (2015).

На разработанную схему измерений подана заявка на патент:

3. А.Ю. Кунцевич, Г.В. Рыбальченко, В.М. Пудалов, Патентная заявка (Роспатент) 2015112418 от 06.04.2015, Способ электрометрического измерения производной химического потенциала по температуре и устройство для его осуществления. Имеется положительный результат экспертизы по существу.

на электрон в двумерной системе вблизи фазового перехода: магнитного, сверхпроводящего, топологического, перехода металл–изолятор.

Основные полученные результаты:

1. Квантовые осцилляции магнитоэнтропии находятся в прекрасном количественном согласии с формулой типа Лифшица–Косевича. Чувствительность предложенного метода при наименьшей температуре почти на четыре порядка превосходит прямое измерение теплоемкости в стопках двумерных систем.

2. В режиме целочисленного квантового эффекта Холла наблюдается провал энтропии системы до нуля, увеличение спиновых щелей и открытие долинных щелей в двумерном газе в инверсионном канале на поверхности (100) кремния.

3. В нулевом магнитном поле впервые независимо продемонстрировано выполнение третьего начала термодинамики в режиме ферми-жидкости.

4. Показано, что система электронов при низкой плотности и конечной температуре (невыврожденная и сильно взаимодействующая) обладает повышенной энтропией в результате межэлектронных корреляций. Повышенная энтропия параметризована эффективной массой, зависящей универсальным образом от плотности и температуры. Показано, что такая масса не зависит от степени спиновой поляризации системы. Из скейлинга эффективной массы предположено, что её перенормировка связана с обменом плазмонами.

## Премия имени Н. Г. Басова



В 2016 году присуждена циклу работ **"Преобразование частоты излучения лазера на окиси углерода в спектральный интервал от 2.5 до 16.6 мкм"**.

Исследования, представленные в данном цикле работ, проводились в Лаборатории газовых лазеров Отделения квантовой радиофизики ФИАН при непосредственном активном участии **Игоря Олеговича Киняевского** и являются продолжением работ, проводимых научным коллективом Лаборатории на протяжении ряда лет.

В настоящее время активно разрабатываются лазеры среднего ИК-диапазона (длина волны излучения от 2 до 20 мкм), поскольку в этой спектральной области большое количество молекул имеют сильные полосы поглощения, а также расположены три важных спектральных интервала: 3–5 мкм, 8–14 мкм и 16–24 мкм, в которых земная атмосфера относительно прозрачна (так называемые окна прозрачности атмосферы). В Лаборатории газовых лазеров ФИАН ведется разработка мощных лазерных систем среднего ИК-диапазона на базе газовых лазеров на молекулах монооксида и диоксида углерода с преобразованием их частоты излучения в нелинейных кристаллах. Например, ранее на базе СО-лазера и кристалла  $ZnGeP_2$  была разработана широкополосная лазерная система, излучающая одновременно на ~670 линиях в интервале длин волн от 2.5 мкм до 8.3 мкм [1].

Среди последних достижений Лаборатории газовых лазеров ФИАН следует отметить разработку мощной наносекундной СО лазерной системы «задающий генератор – лазерный усилитель» [2]. Такая система излучает «короткий» (длительностью ~1

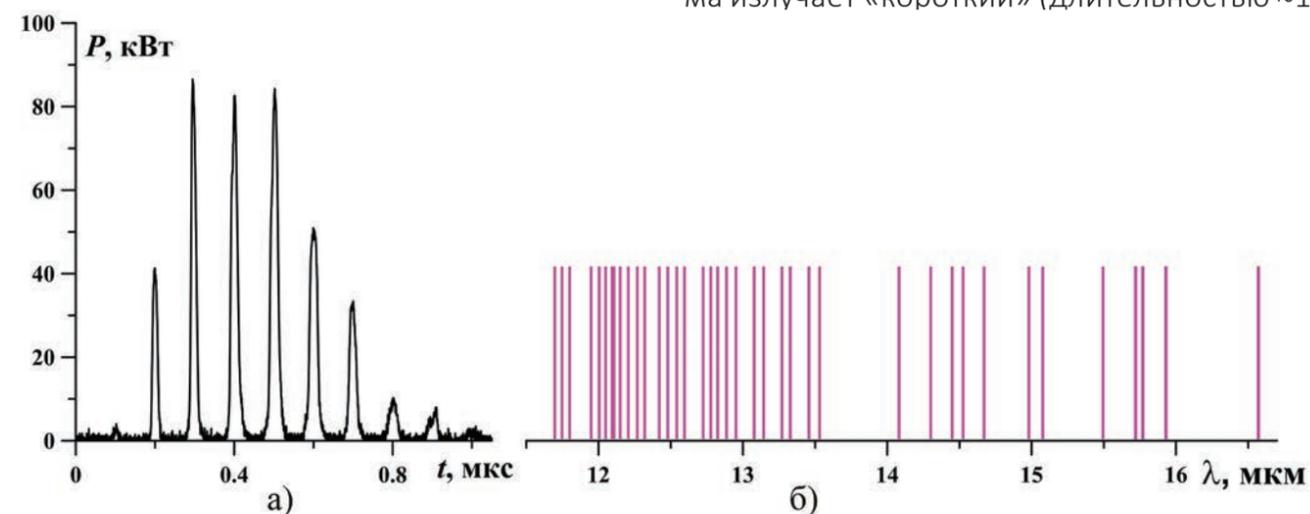


Рис. 1. «Короткий» цуг наносекундных импульсов СО-лазера (а) и спектр излучения разностных частот СО- и СО<sub>2</sub>-лазеров (б), полученный в кристалле  $AgGaSe_2$

мкс) цуг импульсов длительностью  $\sim 10$  нс (Рис. 1а) с пиковой мощностью излучения до 0.8 МВт. Эффективность преобразования частоты излучения этой лазерной системы в кристалле  $ZnGeP_2$  достигала рекордно высокого значения 37% [3].

Разработана гибридная лазерная система на базе  $CO$ - и  $CO_2$ -лазеров, действующих в режиме синхронной модуляции добротности, с преобразованием частоты их излучения в нелинейных кристаллах [4, 5]. Проведено исследование генерации суммарных и разностных частот излучения в

кристаллах  $GaSe$  и  $AgGaSe_2$  [4], а также в кристалле  $PbIn_6Te_{10}$  [5]. Наиболее перспективным кристаллом для преобразования частоты гибридной лазерной системы в широком диапазоне длин волн от 2.5 мкм [6] до 17 мкм [4] оказался кристалл  $AgGaSe_2$ . Экспериментально реализовано широкополосное двухкаскадное преобразование частоты излучения  $CO$ -лазера в интервал длин волн от 2.5 до 6.2 мкм [6], а также получена генерация разностных частот излучения  $CO$ - и  $CO_2$ -лазеров в интервале длин волн от 11.5 до 16.6 мкм [4].

#### Результаты опубликованы:

- [1] Андреев Ю.М., Ионин А.А., Киняевский И.О. и др. Широкополосная лазерная система на монооксиде углерода, действующая в интервале длин волн 2.5 – 8.3 мкм. Квантовая электроника, т. 43(2), с. 139-143 (2013)

#### в т.ч. конкурсные работы:

- [2] O.V. Budilova, A.A. Ionin, I.O. Kinyaevskiy, Yu.M. Klimachev, A.A. Kotkov, A.Yu. Kozlov, Mode-locked and Q-switched carbon monoxide laser system, Optics Communications, 2015, 345, p.163–167
- [3] Yu.M. Andreev, O.V. Budilova, A.A. Ionin, I.O. Kinyaevskiy, Yu.M. Klimachev, A.A. Kotkov, A.Yu. Kozlov, Frequency conversion of mode-locked and Q-switched CO laser radiation with efficiency up to 37%, Optics Letters, 2015, 40, (13), p.2997-3000
- [4] O.V. Budilova, A.A. Ionin, I.O. Kinyaevskiy, Yu.M. Klimachev, A.A. Kotkov, A.Yu. Kozlov, Ultra-broadband hybrid infrared laser system, Optics Communications, 2016, 363, pp. 26-30
- [5] O.V. Budilova, A.A. Ionin, I.O. Kinyaevskiy, Yu.M. Klimachev, A.A. Kotkov, A.Yu. Kozlov, G.V. Lanskiy, Broadband two-stage frequency conversion of CO laser in  $AgGaSe_2$  crystal, Optics Letters, 2016, 41, (4), p.777-780
- [6] A.A. Ionin, I.O. Kinyaevskiy, Yu.M. Klimachev, A.A. Kotkov, V.V. Badikov, K.V. Mitin, Frequency conversion of molecular gas lasers in  $PbIn_6Te_{10}$  crystal within mid-IR range, Optics Letters, 2016, 41, (10), pp.2390-2393

### Премия имени Д. В. Скобелевича в 2016 году была поделена между двумя циклами работ



#### Свойства молекулярного лазерного излучения в газо-пылевых комплексах Млечного Пути.

Цикл работ выполнен научной группой Лаборатории "Изучение быстропеременных процессов и спектроскопии" Отдела космической радиоастрономии АКЦ ФИАН при непосредственном активном участии **Ольги Сергеевны Баяндиной**.

Представленные на конкурс работы затрагивают разнообразные подходы к изучению процессов, происходящих в межзвездной среде. В трех были использованы архивные наблюдательные данные с космических телескопов инфракрасного диапазона MSX (англ. Midcourse Space eXperiment) и Spitzer (англ. NASA Spitzer Space Telescope), а также радиотелескопа NRT (Nancay Radio Telescope, Франция); остальные выполнены в рамках собственных заявок:

- на радиотелескопе РТ-70 Центра дальней космической связи (Евпатория, Крым);



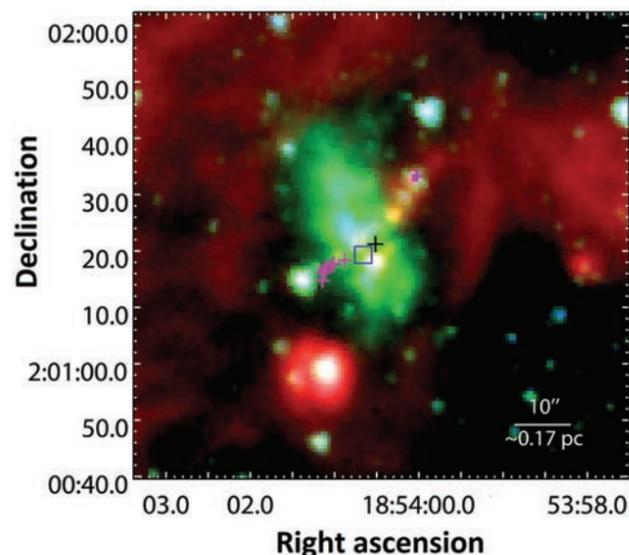
#### Исследование свойств струйных выбросов активных ядер галактик радиоастрономическими наблюдениями.

Цикл работ выполнен научной группой Лаборатории внегалактической радиоастрономии Отдела космической радиоастрономии АКЦ ФИАН при непосредственном активном участии **Евгении Васильевны Кравченко**.

Представляемый на конкурс цикл оригинальных работ, состоящий из 5 статей, посвящен исследованию релятивистских струйных выбросов активных ядер галактик (АЯГ), а именно: свойств и структуры вещества выбросов, окружающей их плазмы, а также природы и геометрии магнитных полей. Методика исследований основана на анализе радиоастрономических наблюдений большого количества компактных внегалактических источников, выполненных на радиоинтерферометрах VLA и VLBA в широкой полосе частот. Уникальность про-

- на радиотелескопе РТ-22 Пушинской обсерватории;
- на интерферометрической решетке VLA Национальной радиоастрономической обсерватории США;
- на наземно-космическом интерферометре РадиоАстрон.

G35.03+0.35

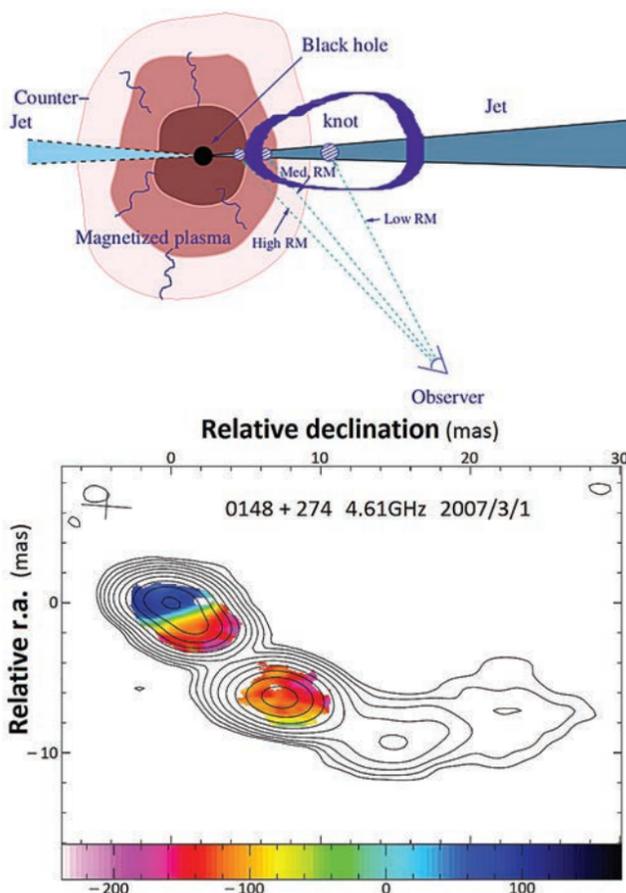


Позиции мазеров ОН, полученные в обзоре на VLA [3], наложены на трехцветные изображения из каталога GLIMPSE. Красный цвет обозначает эмиссию на длине волны 8.0 мкм, голубой – на длине волны 3.6 мкм и зеленый – эмиссию исследуемых в работе [3] EGOs, ярких на волне 4.5 мкм.

Обозначение маркеров: + – положение главного компонента мазера OH(1665/1667), □ – положение мазера sIMM на частоте 6.7 ГГц, \* – положение мазера sIMM на частоте 44 ГГц.

Масштаб (в парсеках) предполагает расстояние до источника 3.35 кпк.

В результате этих исследований подготовлен обновленный каталог метанольных мазеров I класса и сделан вывод о том, что ориентиром при поиске новых мазеров этого типа являются темные облака SDC; сделан вывод о том, что за активацию мазерного излучения могут отвечать крупномасштабные движения, связанные с коллапсом гравита-



Сверху: Схематическое представление модели активного ядра галактики. Выделенная область, наблюдаемая в радиодиапазоне, представлена на рисунке внизу.

Внизу: распределение фарадеевской меры вращения в активном ядре галактики 0148+274 в диапазоне 4.6–15.4 ГГц. Цветом показано фарадеево вращение в рад/м<sup>2</sup>, контуры соответствуют потоку в Стоксе I на частоте 4.6 ГГц.

Веденных исследований состоит в анализе тонкой структуры источников по данным, полученным в необычайно широком диапазоне радиочастот. Использование интерферометров позволило провести детальный анализ областей струй, имеющих разные физические характеристики, в отличие от других подобных работ. В результате, нами была выдвинута идея, что двухкомпонентная структура струйных выбросов является универсальной для всех АЯГ, в отличие от существовавшего ранее мнения, что такая

ционно-неустойчивых сгустков; проделана значительная работа по определению параметров магнитного поля в областях звездообразования; получен целый ряд новых результатов о так называемых «протяжённых зелёных объектах» (EGO); выполнено исследование структуры скопления мазерных конденсаций H<sub>2</sub>O и динамики мазерных пятен в кометарной глобуле IC 1396 N.

Результаты опубликованы:

1. О. С. Баяндина, И. Е. Вальтц, Г. М. Ларионов. Метанольное мазерное свечение I класса в инфракрасных облаках и третья версия каталога sIMM/SFR. 2012, *Астрономический журнал*, 89, с. 611-623 (DOI: 10.1134/S1063772912060042).
2. О. С. Баяндина, А. В. Алакоз, И. Е. Вальтц. Магнитные поля в метанольных мазерных конденсациях по данным исследования сопряженных областей. *Астрофизические параметры*. 2014, *Астрономический журнал*, 91, с. 540-549 (DOI:10.7868/S0004629914070020).
3. О. С. Баяндина, И. Е. Вальтц, С. Куртц. Наблюдения «протяжённых зелёных объектов» в линиях мазеров ОН с высоким пространственным разрешением. 2015, *Астрономический журнал*, 92, с. 883–901 (DOI: 10.7868/S000462991511002X).
4. Г. М. Рудницкий, Е. Е. Лехт, О. С. Баяндина, И. Е. Вальтц, Э. Р. Хан. Наблюдения «протяжённых зелёных объектов» в линии H<sub>2</sub>O на волне 1.35 см на радиотелескопе РТ-22 в Пушино. 2016, *Астрономический журнал*, 93, с. 121-136 (DOI: 10.7868/S0004629916010023).
5. Н. С. Кардашев, А. В. Алакоз, А. С. Андрианов, М. И. Артюхов, В. Баан, В. Е. Бабышкин, Н. Бартель, О. С. Баяндина и др. «РАДИОАСТРОН»: Итоги выполнения научной программы исследований за 5 лет полёта. 2016, *Вестник «НПО им. С.А. Лавочкина»*, 3, с.4-24.

структура характерна только для отдельных источников. В рамках двухкомпонентной модели проведенный анализ показал, что тепловая плазма, окружающая струю, в которой генерируется синхротронное излучение, может содержать магнитное поле любой конфигурации (полоидальное, спиралевидное, турбулентное), в то время как магнитное поле самой струи структурировано и сохраняет свое направление на очень больших расстояниях от центра АЯГ.

Результаты опубликованы:

1. E. V. Kravchenko, Y. Y. Kovalev and K. V. Sokolovsky (2013). Faraday rotation measures in 20 AGN jets at parsec scales. *EPJ Web of Conferences*, 61, 07006.
2. E.V. Kravchenko, W. Cotton and Y.Y. Kovalev (2015). Rotation measures in AGN jets seen by VLA at 21 cm to 6 mm. *Proceedings of the International Astronomical Union, IAU Symposium 313*, 128.
3. W. Cotton et al. (2016) Search for Extreme Rotation Measures in CSS Sources. *Astronomische Nachrichten*, 337, 87.
4. E.V. Kravchenko et al. (2016). Rotation Measure synthesis study and polarized properties of PSR J1745-2900 at 7 mm. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 458, 4456.
5. E. V. Kravchenko et al. (2016). Multiwavelength observations of the gamma-ray flaring quasar S4 1030+61 in 2009-2014. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 462, 2747.

## Проект «Истории успеха»

С целью популяризации науки среди молодежи в ФИАН осуществляется проект «Истории успеха», в рамках которого публикуются интервью с молодыми учеными (до 35 лет), уже добившимися определенного уровня признания в научной деятельности, а также – научно-популярная статья об их актуальных научных исследованиях. Публикации производятся на информационных интернет-ресурсах ФИАН – основном сайте и сайте «ФИАН-информ» и его аккаунтах в популярных социальных сетях.

В качестве критериев отбора кандидатов для интервьюирования служат такие показатели успешности научной деятельности, как получение Премии Президента РФ, Правительства РФ или Правительства г. Москвы, участие в крупных международных научных проектах (например, в ЦЕРН) и грантовых программах.

Основная задача «Историй успеха»: показать молодежи, что ученые-физики – люди, интересы которых не ограничиваются лишь научной сферой, которые совсем недавно были такими же, как и многие их сверстники, избравшие иные направления деятельности. «Истории успеха» направлены на формирование у молодежи образа ученого как успешного, благодаря своей целеустремленности и работоспособности,

человека; показывают доступность карьеры ученого для каждого, кто выберет это направление. С другой стороны, открытые интервью – возможность показать сложность научной деятельности, без прикрас и ложных иллюзий. Этим достигается другая задача – сделать выбор для будущих ученых осознанным.

Одним из последних респондентов данного проекта являлся Андрей Александрович Ващенко: в настоящее время – старший научный сотрудник Отдела люминесценции им. С.И. Вавилова ФИАН. В 2015 г. научная работа в области OLED-люминесценции, выполненная им с соавторами, была удостоена Премии Правительства г. Москвы.

Ниже приведен пример публикации его интервью в рамках проекта «Истории успеха».



*«Надо сказать, в моем «пути в науку» нет ничего необыкновенного, примечательного. Я рос самым обыкновенным пацаном, проводящим свободное время в дворовых играх, и, если честно признаться, был отменным сорвиголовой, – рассказывает о себе Андрей. – Наверное, в моем развитии и становлении как ученого-физика есть определенная доля случая, счастливого стечения обстоятельств. Хотя и свои собственные усилия я бы тоже не стал сбрасывать со счетов».*

Интерес к естественно-научной области знаний появился еще в школе: «первой любовью» стала математика. Однако поворотным моментом, по признаниям самого Андрея – уроженца г. Брянска – стала смена места учебы. В 7 классе он выдержал вступительные экзамены и поступил в Брянский городской лицей №1 – учебное заведение, куда «отбирались лучшие ученики со всех школ города и привлекались лучшие учителя». Именно здесь и проявился интерес к физике.

## Андрей Александрович Ващенко: дуализм обыкновенной науки

Андрей Ващенко – представитель плеяды молодых талантливых ученых ФИАНа, кандидат наук, человек, глубоко увлеченный исследованиями электролюминесценции квантовых точек и поиска новых материалов для светоизлучающих диодов. В жизни это – скромный, обаятельный парень, готовый больше рассказывать о науке и достижениях своих друзей-ученых, нежели о себе.

*«В математике была слишком серьезная конкуренция со стороны остальных учащихся, – смеется Андрей. – А если серьезно, то физика меня привлекла гораздо больше, поскольку, в отличие от абстрактной и теоретической математики, здесь можно было реально или мысленно ставить эксперименты, которые помогли в решении той или иной конкретной задачи. Образно говоря, в физике все можно было «потрогать». А для меня эта сторона – реальная применимость тех или иных решений – всегда была важна.»*

Это увлечение привело на олимпиады по физике: от городского уровня до всероссийского. Как выразился Андрей, «здесь я неожиданно «выстрелил»»: на всероссийской олимпиаде по физике он попал в пятерку сильнейших участников. А это уже, в определенной мере, предопределило дальнейшее развитие событий. По результатам всероссийской олимпиады сильнейшим участником, среди которых был и Андрей, пришло

приглашение в Московский физико-технический институт (МФТИ) на сборы по подготовке к международной олимпиаде по физике. Здесь юному физики представилась возможность познакомиться как со своими сверстниками из различных регионов страны, так и прослушать интереснейшие лекции ведущих преподавателей, профессоров МФТИ. Большое значение имело и общение с уже состоявшимися студентами и аспирантами – участниками олимпиад прошлых лет. И хотя на международную олимпиаду Андрей так и не попал, этот новый опыт был весьма полезен: он позволил окончательно определиться со своими предпочтениями.

*«Во время сборов мне очень понравилось на физтехе, и я пошел туда с удовольствием, – вспоминает Андрей. – Во время собеседования, которое является обязательным для всех поступающих в МФТИ, меня спросили, чем бы я хотел заниматься. На момент окончания школы для меня невероятно интересной и привлекательной была голография. Сейчас уже трудно сказать, но чем-то она меня впечатлила. Я так и сказал на собеседовании – голография. Так я был распределен в 26 группу, прикрепленную к одной из базовых кафедр ФИАНа. Спустя 6 лет, к концу обучения, про голографию я уже забыл. А вот ФИАН остался...»*

Когда пришло время выбора специализации, студентов МФТИ привели на экскурсию в лаборатории ФИАНа. Среди множества разнообразных, и весьма интересных, вариантов он выбрал отдел люминесценции им. С.И. Вавилова, под научным руководством А.Г. Витухновского. Дальше Андрея ждали диплом, учеба в аспирантуре и защита диссертации.

Конечно, признается он, научная реальность отличается от того, что представлял, будучи студентом и даже начинающим

аспирантом. Но привлекательность науки от этого ничуть не померкла.

*«Разочарование? Наверное, временами, со всеми бывают кризисы, когда задаешься вопросом, зачем ты всем этим занимаешься и чего достиг. Но это бывает столь редко и кратковременно, что и внимания обращать не стоит.*

*У нас в лаборатории нет времени разочаровываться: очень интенсивный график работы. Да и молодежи в последнее время пришло очень много. Так что здесь довольно-таки серьезная конкурентная среда. Пока будешь сидеть и рефлексировать, останешься на «задворках». Да и в целом, если честно, мне кажется, что состояние разочарования может возникать только на фоне безделья: когда ты чем-то занят, тебе просто некогда отвлекаться на подобные вещи.» – заметил Андрей.*

По мнению Андрея, современный ученый – человек весьма разносторонний, в высокой степени коммуникабельный. Большинство проводимых исследований, если они не носят сугубо теоретический характер, требуют постоянного взаимодействия ввиду сложности и многоплановости исследований. В качестве примера он приводит собственную сферу деятельности.

Группа ученых Отдела люминесценции под руководством А.Г. Витухновского, в которую входит и Андрей, занимается исследованием электролюминесценции квантовых точек, поиском новых материалов для органических и неорганических светодиодов<sup>1</sup>, вопросами их синтеза. И здесь уже

**1 Светодиод (LED) – полупроводниковый прибор с электронно-дырочным переходом, создающий оптическое излучение при пропускании через него электрического тока в прямом направлении. Чаще всего под аббревиатурой LED подразумевают именно неорганические светодиоды, поскольку для органи-**

трудно обойтись силами одной лаборатории. Объединенная группа физиков и химиков осуществляет синтез новых веществ на основе кадмия и селена для создания светоизлучающих диодов. А исследование свойств полученных образцов приходится проводить сразу в нескольких лабораториях – ФИАНа, МГУ и МФТИ.

Квантовая точка – это небольшой кристалл (около 4–6 нм в диаметре), состоящий из сложных молекул, каждая из которых, образно говоря, представляет конструкцию из «антенн», поглощающих подаваемую на них энергию, и светоизлучающего центра. Квантовая точка обладает способностью переизлучения энергии: поглотив фотон, она некоторую часть энергии забирает на релаксацию, а остальное идет на излучение фотона чуть меньшей частоты. Таков основной принцип люминесценции всех светодиодных материалов, органической и неорганической природы.

Собственно, ничего революционного в этих идеях нет: LED-дисплеи уже давно нашли коммерческое применение. Внедрение OLED-дисплеев могло бы вывести технику на новый уровень, поскольку они весьма экономичны в производстве, по сравнению с господствующими ныне ЖК-технологиями, а по своим характеристикам даже превосходят их. Однако болевой точкой OLED-материалов является их недолговечность и крайняя уязвимость к внешним воздействиям. На решение этих проблем и направлены исследования множества ученых по всему миру, в том числе и в ФИАНе.

В отличие от последних, структура неорганических светодиодов состоит полностью из неорганических соединений.

Органический светодиод (OLED) – полупроводниковый прибор, изготовленный из органических соединений, эффективно излучающих свет при прохождении через них электрического тока.

Другим направлением исследований ученых ФИАНа является синтез неорганических и органических материалов: в качестве излучающего центра в квантовые точки вводятся кристаллы неорганического вещества. Особая тонкость здесь состоит именно в том, как «подружить» органические и неорганические молекулы. Такие синтезированные материалы, как показывают исследования, обладают эффективностью люминесценции ненамного ниже чисто органических, но, в отличие от них, намного более стабильны и долговечны.

*«На сегодняшний день, согласно научно-исследовательским публикациям, уже получены органические светодиоды с эффективностью близкой к 100%. Но при этом они сильно нестабильны.*

*Долговечность современных OLED-дисплеев, например, у фирмы Самсунг, достигается путем тщательной многослойной упаковки, предотвращающей любой малейший контакт органических соединений с внешней средой. В противном случае дисплей выходит из строя в считанные минуты, без возможности восстановления.*

*Предлагаемые нами соединения обладают несколько меньшей эффективностью, порядка 90%. Но при этом они весьма стабильны: теоретически они могут работать даже в открытой среде. Скажем, на воздухе.» – рассказывает Андрей.*

Эти исследования в 2015 году были отмечены Премией Правительства г. Москвы молодым ученым за «Достижения в области разработки энергоэффективных источников света на основе коллоидных нанокристаллов халькогенидов кадмия». Вместе с Андреем эту премию разделили его коллеги, такие же молодые ученые Алексей Кацаба и Сергей Амброзевич.

Конечно, как и у любого другого человека, жизнь Андрея наполнена не только работой, даже если эта работа – наука, но и



На вручении Премии Правительства г. Москвы молодым ученым.  
Слева направо: Амброзевич С.А., Ващенко А.А., Собянин С.С., Кацаба А.В.

различными увлечениями, заботами. Для него такой жизнью «вне науки» стала его семья – жена и дочь. По словам Андрея, дочери он уделяет все свое свободное время, «как всякий нормальный человек». А потому и увлечения у них общие на троих – путешествия, прогулки, спорт – велосипеды, коньки, бальные танцы и многие другие.

«Трудно вывести формулу, каким он должен быть – человек науки. С одной стороны, я встречал ученых, которые были, что называется, «не от мира сего», им нужны только ручка, лист бумаги и спокойная атмосфера. Они сядут и будут что-то писать, выводить какие-то закономерности, возможно, даже делать открытия. Но есть и другие ученые – высоко коммуникабельные, общительные люди, которые отличаются от остального мира, пожалуй, лишь сферой своей деятельности.

В любом случае все зависит от человека. Конечно, мне очень сильно повезло сначала с учителями в школе, затем – в институте и здесь, в ФИАНе. Но вряд ли мою профессию можно назвать просто работой. Здесь своего рода дуализм: наука – это работа и увлечение одновременно. С одной стороны, раз есть какие-то определенные обязательства, требования, это – работа. Но с другой... Учитывая, что часто я занимаюсь исследованиями до тех пор, пока уже охрана не начнет выгонять, это увлечение. И – весьма сильное. А если такого увлечения нет, то это будет несчастный человек. Наука требует привязанности, если хотите, – любви. Впрочем, как и любая другая профессия, на мой взгляд.» – отметил в заключение Андрей.

## Научно-популярная деятельность ФИАН

Руководство ФИАН уделяет большое внимание научно-популярной деятельности Института. Здесь развиваются такие направления деятельности, как публикации в СМИ и интернет-изданиях, активное сотрудничество с российскими телеканалами, результатом чего являются программы и отдельные видеосюжеты о деятельности сотрудников Института и на общие научно-популярные темы.

Результаты деятельности ФИАН в области популяризации науки можно представить сводной таблицей:

Количество научно-популярных публикаций, выполненных сотрудниками Института в 2016 г.	53
Количество положительных и нейтральных упоминаний Института в СМИ	237
в том числе:	
– в федеральных печатных изданиях, теле- и радио-СМИ	19
– в интернет-изданиях	218

Говоря о конкретных областях научно-популярной деятельности, приведем лишь отдельные примеры, ввиду невозможности привести полный перечень из-за его обширности.

### Публикации в СМИ и интернет-изданиях

Следует отметить, что часто публикации в СМИ и интернет-изданиях о сотрудниках ФИАН идут в ключе совместных исследований с другими научными центрами (например, Российский квантовый центр, МИФИ, МФТИ и проч.), в связи с чем зачастую упоминаются лишь имена сотрудников Института".

Публикации в СМИ и интернет-изданиях можно разделить на 3 группы:

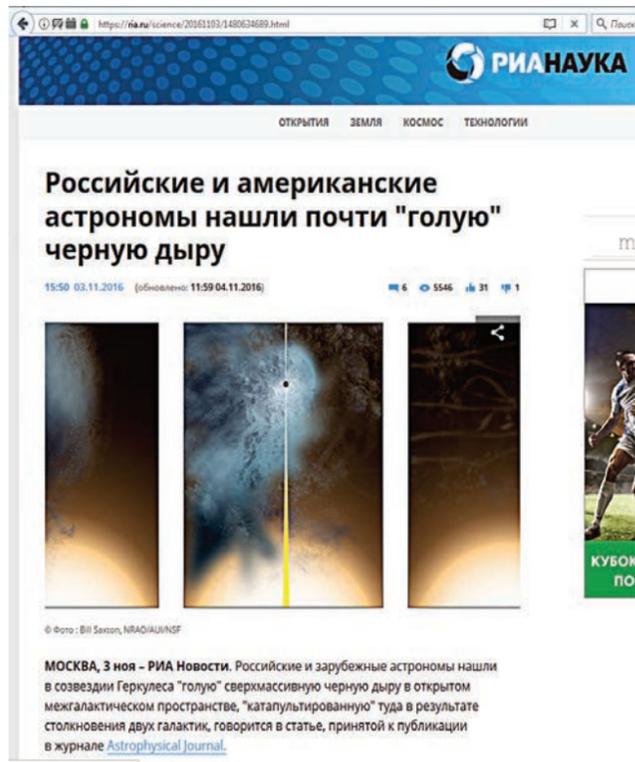
**1)** Публикации о научной деятельности сотрудников ФИАН.

Следует отметить, что эта область публикаций (как и других видов научно-популярной деятельности) – наиболее обширна.

Здесь можно говорить как о своеобразных медианарправлениях – например, публикации по астрофизическим исследованиям ФИАН, – так и об отдельных научных работах и технических разработках.

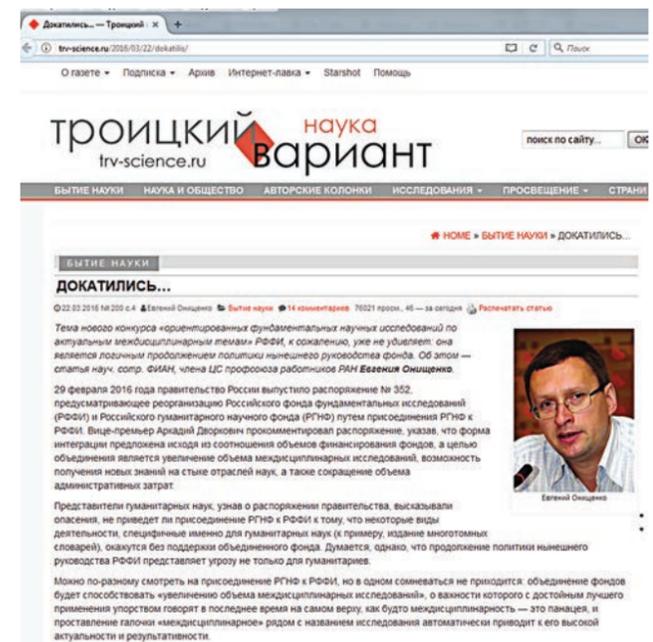
В качестве примера публикаций можно привести:

- «Шлюпка физиков в океане частиц» («В мире науки», № 10);
- «Создан оптический биосенсор для экспресс-диагностики инфекций» о совместных исследованиях ученых ФИАН, ИТМО, МИФИ (интернет-ресурс ИТМО);
- «Российские и американские астрономы нашли почти "голую" черную дыру» о совместных исследованиях ученых ФИАН и США (интернет-издание «МИА Сегодня»);
- «Российские учёные нашли причину раковой опасности наночастиц» о совместных исследованиях ученых ФИАН, МФТИ и «Сколтеха» (интернет-издание «Life.Ru»);
- «Атакуют без промаха» (интернет-издание «RG.Ru»; печатный аналог: «Российская газета», № 7136);
- и многие другие.



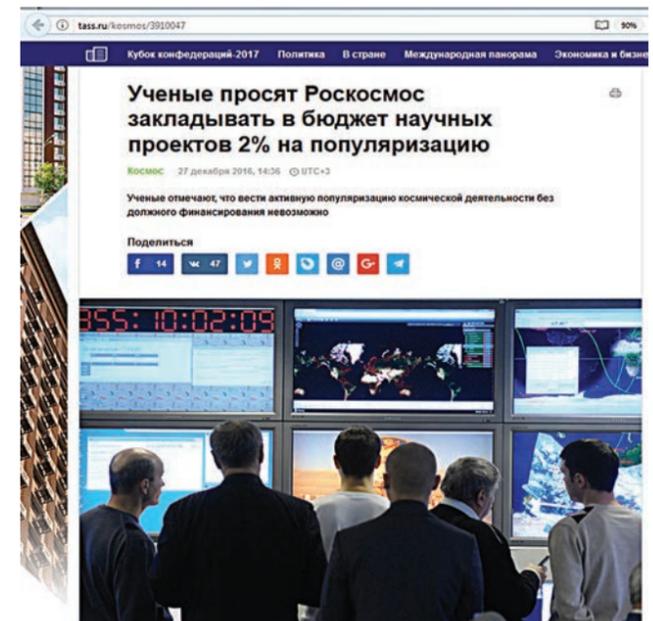
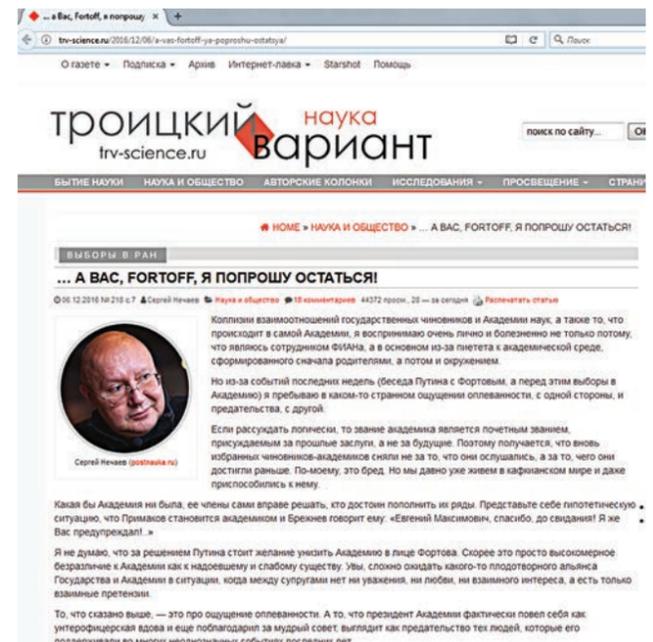
Скриншоты интернет-публикаций о деятельности ученых ФИАН

2) Выступления по общим вопросам, связанным с научной деятельностью в стране и за рубежом. Например, интервью научного сотрудника Лаборатории физики низкоразмерных систем и структур ФИАН Е.Е. Онищенко (март 2016 г.); ведуще-



Скриншоты интернет-варианта издания «Троицкий вариант – Наука»: слева – интервью Е.Е. Онищенко (печатный аналог: «ТрВ-Наука», № 200, с.4); справа – интервью С.К. Нечаева (печатный аналог: «ТрВ-Наука», № 218, с.7).

го научного сотрудника, заведующего Лабораторией внегалактической радиоастрономии Астрокосмического центра ФИАН Ковалева Ю.Ю. (декабрь 2016 г.); или ведущего научного сотрудника Сектора математической физики ФИАН С.К. Нечаева (декабрь 2016 г.)



Скриншот публикации ИТАР-ТАСС с участием Ю.Ю. Ковалева.

3) Публикации об истории ФИАН. Эта область публикаций – наименее активная. Это связано, в том числе и с невысокой популярностью данного направления у представителей СМИ. В большинстве своем публикации данного направления появляются на собственных ресурсах ФИАН.

В качестве примера публикации данного направления можно привести статью «Школа Гинзбурга» о юбилейном заседании Отделения физических наук РАН, посвященном 100-летию со дня рождения В.Л. Гинзбурга («Вестник РАН». 2017. Т. 87, № 3, с. 74–78).

Отдельным направлением публикационной активности ФИАН в области популяризации науки можно назвать

собственный интернет-ресурс «ФИАН-информ», а также – публикацию сообщений в аккаунтах популярных социальных сетей «ВКонтакте» и Twitter.

Помимо указанных направлений следует отметить собственные усилия научных сотрудников и отдельных подразделений ФИАН по популяризации научной деятельности. Так, например, Астрокосмический центр ФИАН на сайте подразделения вы-

пускает бюллетени об успехах международного научного проекта «РадиоАстрон». Другое подразделение ФИАН – Лаборатория рентгеновской астрономии Солнца Отделения оптики – на сайте научного проекта «ТЕСИС» рассказывает как о новостях в области физики Солнца, так и приводит регулярные прогнозы космической погоды, на которые в дальнейшем ссылаются внешние интернет-издания.

### Видеоматериалы на центральных телеканалах

Приведем только основные материалы о ФИАН и его сотрудниках, вышедшие в эфир в 2016 г.

#### Программы и сюжеты об Институте, его истории и науке в целом

- 1) «Физический институт Академии наук» // «5 канал», программа «Истории из будущего».
- 2) Исполняется 100 лет со дня рождения Гинзбурга // «Россия К», программа «Новости культуры».



Скриншот сюжета программы «Истории из будущего» (телеканал «5 канал»), посвященного ФИАН.

#### Программы и сюжеты об Институте, его истории и науке в целом

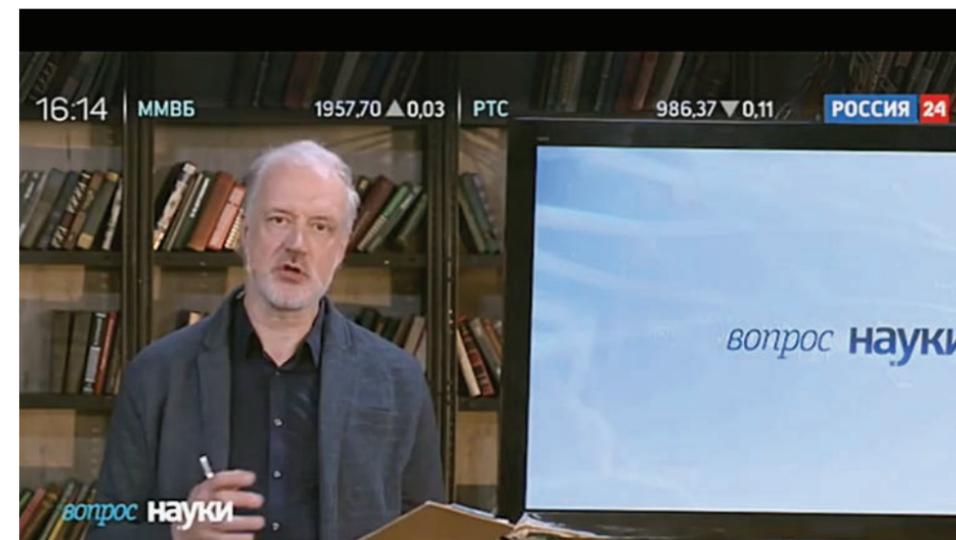
- 1) Российские ученые представят первый отечественный томограф // «НТВ», сюжет в программе «Сегодня».
- 2) Первый отечественный томограф представлен в Москве // «Первый канал», сюжет в выпуске утренних новостей.
- 3) Интервью главного научного сотрудника Отдела теоретической астрофизики ФИАН В.Н. Лукаша // «Россия 1», сюжет для программы «Утро России».
- 4) Новые оптические биосенсоры // «НТВ», сюжет для программы «Новое утро».



Скриншот сюжета программы «Сегодня» (телеканал «НТВ»), посвященного разработкам ученых ФИАН.

Отдельно следует упомянуть регулярно выходящие на телеканале «Россия К» выпуски научно-популярной программы «Вопрос науки», освещающей актуальные и наиболее интересные вопросы современной науки в различных областях. Ведущим этой про-

граммы является главный научный сотрудник Лаборатории теории фундаментальных взаимодействий Отделения теоретической физики им. И.Е. Тамма ФИАН Семихатов Алексей Михайлович.



Скриншот программы «Вопрос науки». На фото ведущий программы, главный научный сотрудник ФИАН А.М. Семихатов.

## Содержание

Астрокосмический центр . . . . .	3
Пушчинская радиоастрономическая обсерватория АКЦ ФИАН . . . . .	9
Долгопрудненская научная станция . . . . .	13
Криогенный отдел . . . . .	17
Лаборатория тяжелых кварков и лептонов . . . . .	19
Нейтронно-физический отдел . . . . .	21
Сектор теории плазменных явлений . . . . .	26
Отделение квантовой радиофизики им. Н. Г. Басова . . . . .	28
Отделение оптики . . . . .	54
Отделение теоретической физики им. И. Е. Тамма . . . . .	64
Отделение физики твердого тела . . . . .	75
Отдел физической электроники . . . . .	88
Отделение ядерной физики и астрофизики . . . . .	90
Самарский филиал ФИАН . . . . .	96
Физико-технический центр ФИАН, г. Протвино . . . . .	108
Выборы в РАН . . . . .	110
Награды сотрудников ФИАН . . . . .	118
Международное сотрудничество . . . . .	123
Молодежь ФИАН . . . . .	131
Научно-популярная деятельность ФИАН . . . . .	144