

**Сведения о результатах по направлениям исследований в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы, в 2018 году**  
(в части Российской академии наук)

Номер и наименование направления фундаментальных исследований (по Программе)	Полученные результаты (в привязке к ожидаемым результатам по Программе)
<b>II. ФИЗИЧЕСКИЕ НАУКИ</b>	
<p>8.Актуальные проблемы физики конденсированных сред, в том числе квантовой макрофизики, мезоскопии, физики наноструктур, спинтроники, сверхпроводимости</p>	<p>Построена теория экспериментально обнаруженного сверхбыстрого переключения намагниченности в ферромагнитных металлических гетероструктурах фемтосекундным лазерным импульсом на основе обменного рассеяния свободных электронов на магнитных подсистемах ферромагнетика в неравновесном состоянии. Теория предсказывает возможность создания триггеров нанометровых размеров с пикосекундными временами переключения для разработки новых элементов спинтроники (ФТИ РАН)</p> <p>В рамках единой многопереходной полупроводниковой гетероструктуры интегрированы функции эффективного мощного лазерного излучателя и быстрого сильноточного ключа. Продемонстрировано, что пиковые мощности для многомодового одиночного импульсного излучателя H50Вт и микролинейки – 210Вт ограничены эффектом пространственной локализации тока, характеризующимся скоростью распространения в плоскости гетероструктуры от 3 до 20 мкм/нс. В квазидвухсекционной конструкции с насыщающимся поглотителем реализованы условия для генерации лазерных импульсов с суб-нс пиком длительностью 100 пс и мощностью ~10 Вт. Источники будут использоваться для решения широкого спектра практических задач, связанных с мониторингом и дальнометрией, а также в специальных приложениях, требующих минимальных массогабаритов и максимальной устойчивости к динамическим перегрузкам и специальных факторов (ФТИ РАН).</p> <p>Впервые в оптических спектрах наблюдались антипересечения сверхтонких подуровней (иона <math>\text{Ho}^{3+}</math>). Моделирование спектров позволило получить информацию о сверхтонкой структуре электронных синглетов, ядерных квадрупольных взаимодействиях и</p>

случайных деформациях кристаллической решетки. Показано, что антипересечения сверхтонких подуровней могут быть использованы для построения эффективных схем оптической квантовой памяти (ИСАН).

Проведено обобщение теории сверхпроводимости Элиашберга – МакМиллана за пределы адиабатического приближения. Для случая взаимодействия с одним оптическим фоном получена единая формула для ТС, справедливая как в адиабатическом, так и в антиадиабатическом режимах (ИЭФ УРО РАН).

Предсказан и экспериментально исследован «гигантский» магнитокалорический эффект в многослойной системе ферромагнетик (NiFe) – парамагнетик (NiCu) – ферромагнетик (CoFe) с обменным взаимодействием. Достигнута эффективность охлаждения при комнатной температуре 3К/Тл во внешнем магнитном поле с индукцией ~ 10 гаусс (ИФМ РАН – филиал ФИЦ ИПФ РАН).

Обнаружено, что при высоких давлениях спектр релаксации стеклюющихся жидкостей приобретает сложную двухпиковую структуру - для глицерина при давлениях свыше 2.5 ГПа, для пропиленгликоля – свыше 4.5 ГПа. Причина этого заключается в том, что при сближении молекул при сжатии начинают сказываться состав и форма молекул, а также взаимодействие между индивидуальными атомами из соседних молекул (ИФВД РАН).

Развита полуколичественная теория низкотемпературного поведения очень сильно неупорядоченных сверхпроводников в сильных магнитных полях и при низких температурах. Дано объяснение экспериментально обнаруженному поведению критического тока как функции близости магнитного поля  $B$  к критическому значению  $B_{c2}$ . Теория объяснила давно известную из экспериментов аномалию – ненулевой наклон кривой  $B_{c2}(T)$  при температуре, стремящейся к нулю. (ИТФ им. Ландау РАН.)

Разработан новый механизм магнитоэлектрического эффекта в редкоземельных (РЗ) ферритах – гранатах, обусловленный наличием магнитных неоднородностей. Неоднородное распределение намагниченности является источником эффективного неоднородного магнитного поля, которое воздействует на РЗ и  $Fe^{3+}$  ионы и приводит к появлению электрического дипольного момента в элементарной ячейке, и результирующей электрической поляризации, распределенной по образцу. Рассчитано распределение поляризации в неоднородно намагниченной пленке ферритов гранатов с учетом электродипольных вкладов 'f' и 'd' ионов европиевых ферритов гранатов (EuIG) (ИФМК Уфимского ФИЦ РАН, ИОХ РАН, ИОФ РАН).

Методами компьютерного моделирования впервые проведено исследование фазовой диаграммы двумерной системы, взаимодействие в которой описывается потенциалом Герца (энергия взаимодействия упругих сфер). Впервые все три возможных сценария плавления двумерных систем (2 непрерывных перехода Березинского-Костерлица-Таулеса (БКТ) с промежуточной гексатической фазой; переход первого рода; комбинация перехода БКТ и перехода первого рода с промежуточной гексатической фазой) наблюдались на различных участках единой фазовой диаграммы. Найдены трикритические точки, в которых меняются сценарии переходов (ИФВД РАН).

Предложены и экспериментально апробированы методы многочастотного ВЧ- и СВЧ-возбуждения оптически детектируемого магнитного резонанса в азотно-вакансионных центрах окраски в кристалле алмаза. Экспериментально в полосе  $0 \div 100$  Гц продемонстрирована чувствительность  $1.5 \text{ нТл}/\sqrt{\text{Гц}}$  при объеме сенсора всего  $0.01 \text{ мм}^3$ . Ранее такие характеристики были реализованы только в импульсных схемах, работоспособных исключительно в узкой выделенной полосе частот и неспособных измерять постоянные и медленно меняющиеся поля. В слабых и нулевых полях обнаружен и исследован ряд оптически детектируемых спиновых резонансов с уникальными свойствами, в частности, рекордно узкие ( $\sim 7$  кГц) ВЧ-резонансы в ядерной энергетической структуре входящего в состав NV центра атома  $^{14}\text{N}$  (ФТИ РАН).

Предложен, протестирован и применен новый спектроскопический метод прецизионного измерения расщеплений оптических линий в магнитном или электрическом полях. Этот метод заключается в том, что приложение импульса слабого магнитного или электрического поля во время излучения фотонного эха вызывает расщепление частот оптических переходов активных ионов, что приводит к биению излучаемого ими света. Как следствие, временная форма импульса фотонного эха изменяется: модулируется. Частота модуляции равна расщеплению оптической линии в поле магнитного (электрического) импульса, если импульс прямоугольный. Таким способом была впервые измерена скорость изменения псевдо-Штарковского расщепления с ростом электрического поля линии  $4I_{15/2} \rightarrow 4F_{9/2}$  иона  $\text{Er}^{3+}$  в  $\text{Y}_2\text{SiO}_5$ , измерены магнитные моменты оптически активных ионов в основном и возбужденном состояниях с точностью, сравнимой с ЭПР. Впервые измерен магнитный момент иона  $\text{Er}^{3+}$  в  $\text{LuLiF}_4$  в возбужденном состоянии  $4F_{9/2}$  (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН).

Показано, что в вейлевских полуметаллах (ВП) с неэквивалентными точками Вейля в

скрещенных магнитном и электрическом полях возможно сосуществование спектров двух типов вейлевских фермионов, отличающихся друг от друга по своим топологическим и инвариантным свойствам. Такая гибридная фаза, контролируемая электромагнитным полем, является принципиально новой для физики топологической материи. В этом режиме появляются новые особенности электронного транспорта. В частности, возможен киральный ток нового типа: в скрещенных полях  $E \perp H$  возникает ток, направленный вдоль магнитного поля, что отличает его как от эффекта Холла ( $\sim E \times H$ ), так и от киральной аномалии ( $\sim E \cdot H$ ). Эти эффекты могут быть индуцированы также и упругими деформациями, которые создают в ВП калибровочные псевдо-электромагнитные поля. Последнее чрезвычайно интересно в связи с возрастающей актуальностью новой области – стрейнтроники (ДНЦ РАН).

При исследовании транспортного отклика топологических нанопроволок, изготовленных на основе тонких пленок HgTe, обнаружено, что при температурах ниже 100 мК изменение величины магнитного поля или затворного напряжения приводит к воспроизводимым осцилляциям проводимости амплитудой порядка  $0.5 e^2/h$ , природа которых связана с эффектом Ааронова-Бома, а характерный период осцилляций совпадает с квантом магнитного потока  $h/e$ , пронизывающим сечение проволоки. В топологической поверхностной зоне  $Bi_2Te_3$  обнаружены дираковские токи, индуцированные электромагнитной волной. Ускоренные электромагнитной волной фермионы Дирака баллистически распространяются в бездисперсионных волновых пакетах на расстояния более 100 нм, что значительно превышает ширину затвора современных транзисторов, делая перспективным создание устройств на трехмерных топологических изоляторах с использованием полностью когерентного переноса электронов с частотой электромагнитной волны. Благодаря жесткой связи состояний спина и импульса электрона в топологическом изоляторе баллистические электроны Дирака переносят спиновый ток, что может позволить развивать спинтронику до оптических частот (ИФП СО РАН).

Обнаружены методом ЯМР и теоретически исследованы фазы с эллиптическим магнитным упорядочением в цепочечном антиферромагнетике с фрустрацией  $LiCu_2O_2$ . Симметричный анализ в рамках теории Дзялошинского–Ландау позволил определить возможные магнитные фазы, обладающие известным волновым вектором. Для всех полученных фаз были смоделированы ожидаемые ЯМР-спектры ядер немагнитных ионов лития. Сравнение модельных и экспериментальных спектров позволило установить магнитные структуры, реализующиеся в  $LiCu_2O_2$  в упорядоченной фазе в полях до 17 Тл. В этих фазах магнитная структура представляет собой геликоид с

пространственной модуляцией упорядоченной компоненты спина. Формирование этих эллиптических структур обусловлено фрустрацией обменных взаимодействий (ИФП РАН, ФИАН, МИРЭА, МГУ, КЭУ, Center for Electronic Correlations and Magnetism EKM, Experimentalphysik V, Universität Augsburg, Germany; Laboratoire National des Champs Magnétiques Intenses, LNCMI-CNRS (UPR3228), EMFL, UGA, UPS, and INSA, Grenoble Cedex, France).

Экспериментально исследовано влияние условий для рассеяния фермиевских квазичастиц анизотропными примесями на сверхтекучесть  $^3\text{He}$ . В качестве примесей использовался анизотропный аэрогель (нафен), состоящий из параллельных нанонитей. Если нафен заполнен жидким  $^3\text{He}$ , то на нитях образуется несколько парамагнитных атомных слоев твердого  $^3\text{He}$ , что должно приводить к повышению степени диффузности рассеяния квазичастиц  $^3\text{He}$  и к дополнительному магнитному каналу рассеяния. Добавление немагнитного  $^4\text{He}$ , вытесняющего  $^3\text{He}$  с поверхности, уменьшает парамагнитный слой, и, при достаточном количестве  $^4\text{He}$ , полностью его убирает. Обнаружено, что в отличие от  $^3\text{He}$  в изотропных аэрогелях, даже небольшое количество парамагнитного  $^3\text{He}$  существенно меняет сверхтекучую фазовую диаграмму: температура перехода понижается, сам переход происходит в А фазу, либо в А фазу с полярным искажением, в то время как в отсутствие парамагнитного слоя – в полярную фазу. Полученные результаты стимулировали теоретические исследования и важны также для исследований сверхпроводимости с триплетным спариванием (ИФП РАН, МФТИ).

В джозефсоновских SFS контактах с ферромагнитным барьером в точке перехода в состояние с инверсной разностью сверхпроводящих фаз ( $\pi$ -состояние) в четырех различных экспериментах наблюдалось аномальное «?-периодическое» соотношение между сверхпроводящим током и разностью фаз на джозефсоновском контакте. Обнаруженное состояние соответствует парному ( $4e$ ) переносу сверхпроводящих (куперовских) электронных пар через джозефсоновский барьер. Это фундаментально новое топологически защищенное сверхпроводящее состояние может быть использовано, например, в топологически защищенных квантовых вычислительных системах (ИФТТ РАН).

На основе теории резонансов и антирезонансов в открытых квантовых системах предложена модель молекулярного транзистора, переключение которого осуществляется в результате взаимодействия двух физических механизмов: резонанса Фано-Фешбаха и спонтанного нарушения РТ-симметрии, связанного с коллапсом

	<p>резонансов в особой точке молекулы, соединенной с электродами. Такой транзистор может быть реализован, например, на основе дирадикалов – органических молекулах с вырожденными орбиталями. Показано, что на базе РТ-симметричного интерференционного молекулярного транзистора возможно создать логические вентили с теоретически сколь угодно малыми рабочими напряжениями даже при комнатной температуре (ФИАН).</p> <p>Представлена экспериментальная реализация квантового генератора случайных чисел. Первичным источником случайности являются последовательности фотоотчетов от квазиоднофотонного излучателя, которые регистрируется матрицей кремниевых лавинных детекторов -- SiPM (Silicon Photo Multiplier). Использование SiPM позволяет надежно контролировать квантовый характер пуассоновской статистики фототчетов. Специальный алгоритм неэкспоненциальной сложности позволяет извлекать из пуассоновского процесса всю случайность, содержащуюся в нем, а именно, случайную равномерную последовательность 0 и 1 (ИФТТ).</p>
<p><b>9.Физическое материаловедение:</b> новые материалы и структуры, в том числе фуллерены, нанотрубки, графены, другие наноматериалы, а также метаматериалы</p>	<p>Теоретически показано, что двумерные топологические изоляторы обеспечивают бездиссипативный транспорт спин-поляризованных электронов. Впервые синтезировано соединение InSb атомной толщины на поверхности Si (111) и продемонстрировано наличие у него свойств двумерного топологического изолятора (ИАПУ ДВО РАН).</p> <p>Разработана концепция фазового перехода в кристалле <math>URu_2Si_2</math>, для которого не удаётся определить параметр порядка. Показано, что он является редким случаем в физике твёрдого тела, когда фазовое превращение проходит без изменения пространственной симметрии кристалла, но с нарушением симметрии относительно обращения времени. Разрешённая симметрией магнитная конфигурация имеет вид антитороидных вихрей с нулевыми дипольным, квадрупольным, октупольным и тороидным моментами, приводя к трудности экспериментального наблюдения подобного скрытого магнитного порядка в <math>URu_2Si_2</math>. Предложен экспериментальный подход для его обнаружения и детального исследования. ИКАН (ФНИЦ «Кристаллография и фотоника»).</p> <p>Исследованы механизмы деградации элементов сегнетоэлектрической памяти на основе тонких плёнок оксида гафния при циклическом переключении на примере структур <math>TiN/Hf_{0,5}Zr_{0,5}O_2/TiN</math> с диэлектрической плёнкой толщиной 10 нм. Показано, что деградация характеризуется медленным и быстрым процессами. Последний сопровождается резким уменьшением поляризации плёнки и экспоненциальным во времени ростом</p>

концентрации дефектов - вакансий кислорода. Аналогичные результаты получены для структур TiN/HfO<sub>2</sub>:La/TiN на основе оксида гафния, легированного лантаном. Для подавления деградации предлагается использовать для синтеза плёнок HfO<sub>2</sub> прекурсоры без гидроксильных групп (ЗАО «НИИМЭ»).

Разработаны перспективные для практического использования магнитные металлические наноструктуры (сверхрешетки и спиновые клапаны) с эффектом гигантского магнитосопротивления, функциональные характеристики которых - большая величина магнитосопротивления и магнитной чувствительности, а также малое значение магнитного гистерезиса - превосходят параметры зарубежных аналогов: по магнитосопротивлению - на 30%, по чувствительности - в 7 раз, по величине гистерезиса - в 5 раз меньше (ИФМ УРО РАН).

Методом синтеза в СВЧ-плазме выращены монокристаллы особо чистого алмаза и измерена их теплопроводность в диапазоне температур 5 – 410К. При комнатной температуре получена теплопроводность 24 Вт/мК, на уровне рекордной для синтетического алмаза. Максимум теплопроводности достигается при низких температурах (около 70К) и составляет 235 Вт/смК, что на 34% превосходит ранее известные величины, как для природных, так и искусственных монокристаллов с природным составом изотопов (ИОФ РАН).

При давлении 9.4 ГПа и температурах 1250–1330°C впервые осуществлен массовый синтез наноалмазов высокого структурного качества из молекулярного аналога алмаза – адамантана (C<sub>10</sub>H<sub>16</sub>). Для полученных кристаллов размером менее 10 нм характерно отсутствие дефектов упаковки и двойников; минимальный размер синтезированных алмазных кристаллов – 3 нм. Продемонстрирована возможность легирования наноалмазов оптически-активными примесями, в частности азотом (из смесей адамантана и адамантанокarbonитрила C<sub>11</sub>H<sub>15</sub>N), что открывает перспективы их применения в биомедицине и в квантовых приложениях (ИФВД РАН).

В монокристаллах селенида ртути в широком интервале электронных концентраций обнаружены особенности, свидетельствующие о сосуществовании тривиальной бесцелевой фазы с топологической фазой полуметалла Вейля при концентрациях носителей тока  $\leq 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . К ним относятся: отрицательное продольное магнитосопротивление, нетривиальная (близкая к  $\pi$ ) фаза Берри, электронный топологический переход Лифшица, квантовый спиновый эффект Холла с полуцелым фактором заполнения. Следствием наличия фазы полуметалла Вейля в HgSe является

значительная величина спинового угла Холла, что открывает перспективы для применения этого материала в области спинтроники. (ИФМ УрО РАН)

Изучены люминесцентные свойства координационных соединений  $Tb^{3+}$  и  $Gd^{3+}$  на основе нового типа  $\pi$ -лигандов – полифенилциклопентадиенов. Установлена важная роль низкоэнергетических состояний с переносом заряда, индуцированных слабыми внешними взаимодействиями ( $K^+.. \pi, \pi.. \pi$ ), а также f-d переходов внутри иона  $Tb^{3+}$ . Синтезированы и исследованы два новых люминесцентных комплекса на основе координационных соединений неодима с лигандным окружением на основе 1,3-дикетонатов. Получено низкое положение триплетного уровня вплоть до 18200 см<sup>-1</sup>, что обеспечило высокую эффективность люминесценции иона  $Nd^{3+}$  в ближнем ИК диапазоне. Синтезированы комплексные соединения  $Eu^{3+}$ , обладающие рекордным квантовым выходом фотолюминесценции – до 90%. В качестве лигандов использованы 1,10-фенантролин и батофенантролин, которые препятствуют безызлучательной дезактивации иона европия, снижая симметрию координационного окружения лантаноида, а также увеличивают поглощение света комплексами. Данные комплексы были успешно использованы в качестве биолюминесцентных меток и активного слоя органических электролюминесцентных диодов для получения спектрально чистого излучения на длине волны 612 нм (ФИАН).

Создана технология получения лазерных керамик высокого качества. Технология внедрена на предприятии ФКП «ГЛП «Радуга» (Р). Показано, что первые образцы российских лазерных керамик, полученные в промышленных условиях, не уступают качеству керамики Konoshima Chem. Corp., Ltd. (К), принимаемой в лазерном сообществе в качестве эталона. Дифференциальная эффективность преобразования излучения накачки 808 нм в излучение генерации 1064 нм составила 64% и 70% для продольной и поперечной накачки соответственно (ФИАН совместно с ИРЭ).

Разработана технология получения сферических композитных частиц субмикронного размера, обладающих структурой сферическое ядро-нанопористая оболочка. В качестве формирующих ядро материалов выбраны полиметилметакрилат и оксид железа. Синтезированы монодисперсные сферические частицы непористое ядро-нанопористая оболочка диаметром 200–400 нм. Разработана методика покрытия частиц полиметилметакрилата и оксида железа ( $Fe_3O_4$ ) оболочкой нанопористого кремнезема. Разработанная методика покрытия позволяет контролируемо варьировать толщину оболочки в диапазоне 20–100% от диаметра ядра. Для получения полых частиц разработаны методы селективного удаления материала ядра посредством жидкостного

	<p>химического травления. Синтезированные сферические частицы типа ядро-нанопористая кремнеземная оболочка с органическим, неорганическим и полым ядром могут быть использованы для формирования структурно-совершенных трехмерных опалоподобных фотонных кристаллов с управляемым диэлектрическим контрастом и для биомедицинских применений (ФТИ РАН).</p> <p>Для диапазона длин волн фотонов 3–5 мкм разработаны и созданы гибридные ИК-фотодетекторы на основе наногетероструктур Ge/Si с квантовыми точками Ge, сопряженные с субволновыми золотыми решетками. Двумерные периодические решетки круглых отверстий в золотых пленках выступали в качестве метаповерхностей, позволяющих преобразовать внешнее электромагнитное излучение в поверхностные плазмон-поляритонные волны. В результате плазмонного усиления в оптимальных структурах токовая чувствительность возросла более чем на 2 порядка и составила 200–400 мА/Вт, фотовольтаическая обнаружительная способность - <math>4.5 \cdot 10^{12}</math> смГц<sup>1/2</sup>/Вт на длине волны 4 мкм при T=78 К. Измерения поляризационных и угловых зависимостей фототока в диапазоне 3–5 мкм обеспечили возможность определить закон дисперсии поверхностных плазмонных мод. Полученные результаты могут быть использованы в задаче монолитной интеграции с высокоинтегрированной кремниевой электроникой для увеличения быстродействия микросхем в оптических схемах передачи данных (ИФП СО РАН).</p> <p>Разработан лазерно-плазменный источник рентгеновского излучения на основе ионов ксенона для литографии следующего поколения с длиной волны короче 13,5 нм. Окружение струи Хе концентрическим потоком Не позволяет сохранять высокую плотность Хе до области взаимодействия с излучением лазера. Получены высокие значения конверсии энергии лазерного излучения в рентгеновское, излученное в полупространство: 2,1 %/нм в области длин волн 5–9 нм и 10,5%/нм на длине волны 10,8 нм (ИПФ РАН).</p>
<p><b>10.</b> Актуальные проблемы оптики и лазерной физики, в том числе достижение предельных концентраций мощности и энергии во времени, пространстве и спектральном диапазоне, освоение новых диапазонов спектра, спектроскопия сверхвысокого разрешения и стандарты частоты, прецизионные оптические измерения, проблемы квантовой и атомной оптики,</p>	<p>Создан твердотельный Fe:ZnSe лазер среднего ИК-диапазона (4,38 мкм) с диодной накачкой, работающий при комнатной температуре. Продемонстрировано наличие остаточных потерь в кристалле, как при низкой, так комнатной температуре (ФИАН, ИОФ РАН).</p> <p>Созданы технологии получения оксидных (на основе Nd:YAG и Cr:YAG) и фторидных (CaF<sub>2</sub>-YF<sub>3</sub>, CaF<sub>2</sub>-SrF<sub>2</sub>-RF<sub>3</sub>) керамик для устройств лазерной техники. Для керамики на основе YAG технология позволяет в едином керамическом процессе создавать</p>

взаимодействие излучения с веществом

композитные керамические элементы, включающие активную среду и пассивный затвор. Апробирован метод оценки пористости керамик Nd:YAG с высокой (не хуже чем 0.0001 об.%) чувствительностью. Достигнуты КПД лазеров приближающиеся к теоретически возможным (ИОФ РАН, ФИАН).

Разработан и создан новый компактный планарный импульсно-периодический HF-DF-Xe лазер, возбуждаемый СВЧ (2,45 ГГц) разрядом при одновременной генерации химического HF-DF и атомарного Xe лазеров, обеспечивающих широкополосное излучение в диапазоне 2–4 мкм (ИОФ РАН).

Создан волоконный лазер на базе многокомпонентного эрбиевого волокна с сердцевиной из фосфатного стекла и кварцевой оболочкой, генерирующий импульсы с длительностью ~570 фс, частотой повторения 23,9 МГц и энергией импульса 60 пДж (ИОФ РАН).

В двухмикронном гольмиевом волоконном лазере экспериментально реализован режим гибридной синхронизации мод с использованием насыщающего поглотителя на базе одностенных углеродных нанотрубок и эффекта нелинейного вращения плоскости поляризации. Длительность импульсов составила 1,8 пс при энергии генерации 0,3 нДж и частоте повторения импульсов 10,36 МГц (ИОФ РАН).

На основе напряженно-компенсированной гетеропары  $\text{Ga}_{0,4}\text{In}_{0,6}\text{As}/\text{Al}_{0,58}\text{In}_{0,42}\text{As}$  создан квантовый каскадный лазер, работающий в области длин волн 5,5–5,6 мкм в импульсном режиме при температуре до 350К. Максимальная мощность излучения лазера с размерами 20 мкм×3 мм составляет 1,1 Вт при 80К и 130 мВт при 300К (ФИАН).

Осуществлена эффективная накачка мощными многомодовыми зелеными полупроводниковыми лазерами ряда красителей, относящихся к классам родаминов и пиррометенов. При такой накачке получена перестройка длины волны генерации лазера на красителе в диапазоне 537–672 нм. Достигнута эффективность более 20% перестраиваемого лазера на красителях при накачке полупроводниковыми лазерами (ФИАН).

Обнаружен новый эффект взаимодействия лазерного излучения (ближний ИК-диапазон:  $\lambda=0.97$  и  $\lambda=1.47$  мкм) с биологическими тканями. При проведении лазерных хирургических манипуляций при кипении вспенивается раствор денатурированных

	<p>белков крови, и пена, возникшая в просвете сосуда, вызывает окклюзию (закрытие) вены и ведет к остановке кровотока – гемостазу. На основе эффекта создан новый метод лазер-индуцированного кипения для модификации и удаления патологических образований (вены, кисты) (ИАПУ ДВО РАН, ТОИ ДВО РАН, ДФУ, ФИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН).</p> <p>На основе теллуридных световодов, легированных ионами тулия, впервые продемонстрированы двухдиапазонный широкополосный усилитель и непрерывный двухцветный лазер на длинах волн <math>\lambda=1,9</math> мкм и <math>\lambda=2,3</math> мкм (максимальные коэффициенты усиления 30 дБ и 7 дБ) (ИПФ РАН, ИХВВ РАН).</p> <p>Впервые создан рамановский волоконный газовый лазер среднего ИК-диапазона на длине волны <math>\lambda=4.4</math> мкм с рекордной средней выходной мощностью 1.4 Вт в основной моде и квантовым КПД преобразования 53%. В основе конструкции лазера – револьверный волоконный световод из кварцевого стекла с полый сердцевинной, заполненной водородом под давлением около 50 атм (источник накачки наносекундный эрбиевый также волоконный лазер <math>\lambda=1.56</math> мкм) (ИЦВО РАН).</p> <p>Создан принципиально новый волоконно-оптический датчик деформации топливных каналов атомного реактора на основе волоконных брэгговских решеток. Ключевая особенность датчика – возможность проведения измерений в активной зоне реактора. Волоконные световоды с сердцевинной, легированной азотом, демонстрируют высокую устойчивость к повышенным температурам и высокую радиационную стойкость. Уникальная запись брэгговских решеток излучением ArF эксимерного лазера с применением фазовой маски осуществляется непосредственно в сердцевинах сборки (ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН, ООО «Пролог»).</p> <p>Экспериментально обоснована возможность создания мощных нетоксичных эксимерных лазеров (длина волны лазерного излучения 282, 308 и 354 нм) с прямой ядерной накачкой: Для получения эксимерных молекул XeBr*, XeCl* и XeF* использовалось химически малоактивное соединение C<sub>2</sub>HBrClF<sub>3</sub> (фторотан), ранее не применявшееся в качестве мультигалоидного донора, а используемое в медицинской практике как анестетик (ФЭИ им. А.И. Лейпунского, НИЯУ МИФИ).</p>
<p><b>11.</b> Фундаментальные основы лазерных технологий, включая обработку и модификацию материалов, оптическую информатику, связь, навигацию и</p>	<p>Разработан и создан прототип бортового дистанционного газоанализатора метана для размещения на легком БПЛА с детектирующей способностью 100 ppm на дальности 100 м методом дифференциальной диодной лазерной спектроскопии на основе диодного</p>

медицину

перестраиваемого узкополосного лазера и рамановского волоконного усилителя общей мощностью зондирующего излучения 500 мВт на длине волны 1,65 мкм. Такой прибор открывает новые перспективы для оперативного и экономичного способа контроля за техническим и экологическим состоянием магистральных газопроводов, предприятий переработки и транспортировки в топливно-энергетическом комплексе (ИОФ РАН).

Разработана и апробирована для мелководного района арктического шельфа (Карское море) оригинальная методика расчета низкочастотного звукового поля при неоднородном по трассе и глубине морском дне на расстояниях порядка 1–10 глубин водного слоя, что упрощает локализацию источника звука и дистанционное зондирование неоднородностей в подводном канале (ИОФ РАН, ИПФ РАН).

Создана уникальная база данных концентраций приземного озона на территории РФ с помощью технологии лазерного дистанционного мониторинга приземного озона. Анализ данных многолетних непрерывных наблюдений (в течение десяти лет с 2008 по 2018 гг.) позволил впервые на территории РФ продемонстрировать рост содержания озона, обусловленный изменениями глобального климата. Данные используются для исследования временных и пространственных вариаций тропосферного озона и его прекурсоров, а также для изучения воздействия повышенных концентраций тропосферного озона на человека и экосистемы. (ИОФ РАН)

Установлено, что процесс лазерного пробоя коллоидных растворов наночастиц сопровождается диссоциацией молекул воды, продуктами которой являются  $H_2$ ,  $O_2$  и  $H_2O_2$ . Экспериментально показано, что многоступенчатое лазерное облучение коллоидных растворов наночастиц с солями изотопа европия-152 уменьшает концентрацию этого нуклида (ИОФ РАН).

Предложена новая концепция применения лазерно-электронных источников рентгеновского излучения в медицинской диагностике (для интервенционной коронарной ангиографии), дающая возможность улучшить точность и безопасность диагностической процедуры. В частности, в разы уменьшатся такие количественные показатели, как радиационная доза, контрастное отношение, расход контрастного вещества и наблюдаемый диаметр сосудов. Подана заявка на изобретение (ФИАН).

Разработан лазерный метод создания антибактериальных кремниевых наноматериалов. Лазерно-генерируемые нанокристаллические поверхностные структуры и коллоидные

частицы кремния инактивируют самые различные патогенные бактерии путем повреждения мембраны своими нанолезвиями (наномеханический эффект) и вырабатываемыми ими активными формами кислорода. Созданный материал будет служить как средство преодоления резистентности бактерий к антибиотикам (ФИАН).

Получены спектры возбуждения бесфононных линий флуоресценции и спектральные траектории одиночных молекул металл-порфирина в аморфном полиизобутилене при криогенных температурах ( $T=6K$ ). Показана сверхбыстрая оптическая дефазировка и электрон-фононное взаимодействие в нанокompозитах с полупроводниковыми квантовыми точками CdSe/CdS/ZnS (ИСАН).

Предложен метод селективного резонансного усиления интенсивности сигнала на колебаниях отдельных молекул нуклеотидов содержащих квантовые точки (на основе кремния), позволяющий исследовать структурную организацию и дизайн важных для биофотоники нанобиометаматериалов. Метод был отмечен премией центра квантовой инженерии Университета Аалто (Финляндия) (ФТИ им. А.Ф. Иоффе ).

Реализован режим лазерного воздействия, формирующий на поверхности пленок сложного халькогенида  $Ge[2]Sb[2]Te[5]$  субмикронные решетки показателя преломления. Причиной наблюдаемой периодичности является неравномерный нагрев поверхности в области образования периодической структуры (ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН).

Синтезированы монодисперсные полимерные (на основе St/MAA сополимера) частицы типа ядро-оболочка. С использованием таких частиц изготовлены тонкопленочные фотонно-кристаллические структуры, демонстрирующие интенсивные полосы брэгговского отражения света (ФТИ им. А.Ф.Иоффе РАН).

Для генерации электронных сгустков создан одномерный формирователь распределения интенсивности спектра линейно chirпированных лазерных импульсов инфракрасного диапазона. В экспериментах получены пикосекундные лазерные импульсы с цилиндрическим распределением интенсивности в пространстве, а также лазерные импульсы с распределением интенсивности во времени в форме прямоугольного треугольника. Создан объемный оптический компрессор на дифракционной решетке. Компрессор был размещен на выходе диагностического канала и с его использованием было реализовано временное сжатие импульсов диагностического канала до

	<p>длительности <math>\sim 250</math> фс, что близко к Фурье пределу (ИПФ РАН).</p> <p>Создан широкополосный волоконный висмутовый усилитель для увеличения дальности и скорости передачи сигнала на <math>\lambda=1,3</math> мкм в современных и перспективных волоконно-оптических сетях связи. Впервые продемонстрирована одновременная передача оптических сигналов с общей скоростью передачи 425 Гб/с (8 каналов в диапазоне 1272–1310 нм, замодулированных на скорости 53 Гб/с каждый в формате PAM4) по волоконному световоду длиной 55 км, а так же 212 Гб/с (4 канала в диапазоне 1295–1310 нм, замодулированных на скорости 53 Гб/с каждый в формате PAM4) по волоконному световоду длиной 85 км (уровень ошибок (BER) в пределах лимита коррекции ошибок при использовании кодировки KP4-FEC) (ИЦВО РАН, ИХВВ РАН и компания OFS Lab, США-Япония).</p> <p>Разработан высокоточный позиционно-чувствительный датчик нового типа для систем целеуказания. Принцип его работы основан на свойствах вольтамперной характеристики встречновключенных фотодиодов. В отличие от известных сенсоров латерального типа и ПЗС-линеек датчик работает в режиме самосканирования. Достигнута рекордная для данного типа датчика разрешающая способность (до <math>2.5 \cdot 10^{-6}</math> от поля зрения датчика) (ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН).</p>
<p><b>12.</b> Современные проблемы радиофизики и акустики, в том числе фундаментальные основы радиофизических и акустических методов связи, локации и диагностики, изучение нелинейных волновых явлений</p>	<p>Разработан и реализован новый численный метод решения задачи шумоизлучения тела движущегося в жидкости. Метод конечно-элементного моделирования акустического излучения упругих тел в турбулентном потоке жидкости базируется на представлении шумоизлучения как процесса рассеяния короткозамкнутых псевдозвуковых волн, созданных турбулентностью, на неоднородностях поверхности, обтекаемой потоком. Доказана сеточная сходимость метода и определены требования к параметрам численной расчетной области. Выполнена верификация метода на основе известных решений задач шумоизлучения при двумерном и трехмерном обтекании малых тел классической геометрии: задней кромки пластины, цилиндра и сферы. Показано, что излученное акустическое поле определяется областью пространства вокруг неоднородности на поверхности тела с размерами не более двух длин псевдозвуковой волны. Метод обеспечивает расчет акустического излучения в ряде актуальных задач гидроакустики: шумности корабельных движительных комплексов, гидродинамических шумов обтекания тел и потоков в трубопроводах (ИПФ РАН).</p> <p>Разработан универсальный метод улучшения разрешения в изображениях по глубине в</p>

спектральном и корреляционном ОКТ-методе. Универсальный метод преодоления влияния некомпенсированной дисперсии на продольное разрешение в изображениях, получаемых в оптической когерентной томографии (ОКТ). Метод позволяет преодолеть эффект критического уширения аппаратной функции при использовании зондирующего ИК излучения с относительной шириной спектра более 10% вне зависимости от индивидуальных особенностей исследуемого органа. Коррекция производится на основе вычисления дисперсионной функции объекта, определяемой по величинам относительных задержек спектральных компонент сигнала. При пробном зондировании сетчатки глаза спектральным ОКТ прибором с относительной шириной спектра излучения 23% и коррекции влияния дисперсии получено уменьшение исходной, стократно увеличенной ширины аппаратной функции, до минимального спектрально обусловленного значения в 2 микрона (ИПФ РАН).

Найдены новые возможности неэквилидистантных разреженных линейных антенных решеток (АР) в задачах обнаружения и оценки параметров источников. Предложен эффективный способ синтеза неэквилидистантных антенн на основе метода Монте-Карло, который, при незначительном увеличении требований к отношению «сигнал-шум», обеспечивает характеристики обнаружения эквивалентные стандартной заполненной АР. Для синтезированных неэквилидистантных АР точность пеленгации растет пропорционально размеру разреженной решетки, что может быть использовано для расширения диапазона частот приемных систем в аэро- и гидроакустике. Показано, что диапазон работы неэквилидистантных антенн в режиме обнаружения ограничивается лишь геометрическими характеристиками и диапазоном частот отдельных элементов и общей пропускной способностью системы сбора сигналов (ИПФ РАН).

Разработан метод определения абсолютного значения потока солнечного излучения на Иркутском радаре некогерентного рассеяния. Метод, позволяющий на Иркутском радаре некогерентного рассеяния (ИРНР) получать плотность потока в абсолютных единицах solar flux units, s.f.u. [ $10^{-22}$  Вт м<sup>-2</sup> Гц<sup>-1</sup>] с учетом конструктивных особенностей радара. Оригинальность метода заключается в использовании хорошо калиброванного радиисточника Лебедь-А для определенного диапазона частот радара и карт космического радишума GSM, позволяющих распространить результаты калибровки на весь частотный диапазон ИРНР. Апробация метода на данных ИРНР в пассивном режиме показала хорошее согласие с результатами наблюдений на других инструментах для значений солнечного потока во время спокойного Солнца и оценить возрастание потока во время радиобури (ИСЗФ СО РАН).

Теория возбуждения искусственных неоднородностей в F-слое ионосферы под воздействием мощных ВЧ-радиоволн X-поляризации дала объяснение экспериментальным данным, полученным на нагревном стенде в Тромсе, по возбуждению искусственных мелкомасштабных неоднородностей при воздействии на авроральную ионосферу мощных ВЧ-радиоволн X-поляризации. Рассмотрены физические механизмы формирования неоднородностей, связанные с плазменными неустойчивостями нескольких типов: температурной дрейфовой, градиентно-дрейфовой и токово-конвективной. Показано, что в спокойных условиях неоднородности возникают за счет двухступенчатого процесса – первоначально развивается крупномасштабная тепловая самофокусирующая неустойчивость, а затем на ее фоне мелкомасштабная температурно-дрейфовая. В возмущенных условиях роль двух других дрейфовых неустойчивостей заметно возрастает. Численные оценки характерных времен развития в спокойных условиях соответствуют средним значениям, полученным в эксперименте (ИЗМИРАН).

Структура Экспериментально исследовано формирование когерентного вихря двумерной турбулентности. когерентного вихря в турбулентном течении, возбуждаемом пространственно-периодической электромагнитной силой в тонком слое проводящей жидкости. Благодаря обратному каскаду двумерной турбулентности энергия течения накапливается на масштабе сравнимом с размерами экспериментальной ячейки, формируется крупномасштабный когерентный вихрь, занимающий большую часть площади ячейки. Впервые был установлен радиальный профиль азимутальной скорости когерентного вихря в системе его дрейфующего центра после выключения накачки: в сердцевине вихря азимутальная скорость возрастает по линейному закону и выходит на постоянное значение вне сердцевины вихря. Экспериментально полученные параметры когерентного вихря хорошо согласуются с теоретическими предсказаниями (ИФТТ РАН).

Разработан Спутниковый СВЧ-радиометрический метод исследования быстроразвивающихся атмосферных синоптических процессов. **В основе** метода лежит динамический анализ больших массивов спутниковых радиотепловых измерений. Совокупность реализованных алгоритмов оценки и компенсации движения, морфологического анализа и расчета потоков в восстановленных по спутниковым данным полях интегрального влагосодержания позволяет выявить нитевидную структуру глобальной атмосферной циркуляции скрытого тепла, автоматически детектировать оси так называемых «атмосферных рек» и рассчитать реализующиеся в них (экстремальные) мощности потоков меридионального переноса скрытого тепла.

Результаты обработки многолетних рядов данных глобальных наблюдений представлены на геопортале спутникового радиотепловидения: <http://fire.fryazino.net/tpw/>. На основе анализа возможностей существующих спутниковых СВЧ-радиометрических сканеров Земли выявлены ограничения современных реализаций спутникового радиотеплового мониторинга атмосферы и предложена новая схема, дополняющая традиционное коническое сканирование многолучевыми измерениями. Показано, что такая комплексная многолучевая схема, за счет улучшения пространственного разрешения, наиболее актуальна при детальном исследовании динамики быстроразвивающихся атмосферных процессов синоптического и мезо- масштабов, характеризующихся высокими радиояркостными контрастами (ИРЭ РАН).

Предложены способы построения точных решений для динамики квантовых и классических жидкостей со свободной поверхностью. Описаны нелинейные стадии развития квантовой неустойчивости Кельвина-Гельмгольца, которой подвержена свободная поверхность гелия-II при относительном движении сверхтекучей и нормальной компонент. Описано также формирование различного рода особенностей (пузырей, капель, точек заострения) на поверхности классической жидкости при ее инерционном движении, т.е. в отсутствие внешних сил (ИЭФ УрО РАН, ИТФ им. Л.Д. Ландау РАН, ИГ им. Лаврентьева СО РАН).

Исследования излучений грозových разрядов на Тянь-Шаньской высокогорной станции в широком диапазоне электромагнитного спектра позволило обнаружить новые эффекты. На Тянь-Шаньской высокогорной научной станции проводилась одновременная регистрация электромагнитного излучения, генерируемого атмосферными разрядами на радиочастоте (0.1 – 30 МГц), в ИК- (610–800 нм) и УФ- (240–380 нм) диапазонах оптического спектра, а также в мягком диапазоне гамма излучения (0.1–4 МэВ). Как правило, временное поведение вспышки как в УФ-, так и в ИК-канале оптического детектора повторяет с высокой степенью точности развитие радиосигнала, но в структуре таких вспышек могут наблюдаться различные особенности. Наиболее примечательны «темные» электрические разряды, которые проходят без сильного оптического излучения. "Темная" стадия разряда продолжается вплоть до ~300 мс, и только после этого момента в оптическом диапазоне начинают наблюдаться короткие вспышки излучения, временная структура последних хорошо коррелирует с кратковременными выбросами в интенсивности радиосигнала. При этом интенсивность сигнала в УФ-диапазоне заметно превышает интенсивность ИК-излучения (ФИАН).

	<p>Активно разрабатывается теория аномальных волн в нелинейных средах. Аномальные волны характеризуются неожиданным появлением и неожиданным исчезновением. В качестве базисного механизма рассматривается модуляционная неустойчивость, причем для ее описания часто используется фокусирующее Нелинейное уравнение Шредингера (НУШ). Поскольку это уравнение является вполне интегрируемым, естественно ожидать, что для него имеет место повторяемость Ферми-Паста-Улама, т.е. аномальные волны возникают, через некоторое время исчезают, и позже снова появляются. Недавно было показано, что благодаря наличию малого параметра в задаче об аномальных волнах, в НУШ в периодическом случае можно построить простые приближенные формулы. Экспериментальная проверка применимости найденных формул для описания генерации аномальных волн в оптическом эксперименте с калий-литий-тантал-ниобий фоторефрактивным кристаллом, когда наблюдалось трехкратное возвращение аномальной волны, показала очень хорошее согласие параметров первого появления (включая пространственное распределение интенсивности света) и возвращения с теоретическими предсказаниям (ИТФ им. Л.Д.Ландау).</p> <p>Разработаны методы калибровки по полю гидроакустического приемника (ГП) на частотах от десятков герц до частоты ниже 1 кГц. Предложены способы определения энергетической чувствительности ГП, предназначенного для стандартизованных измерений подводного шума: окружающего шума, шума неподвижного локализованного источника, шума при перемещении источника в заданном угловом секторе. Корректность методов подтверждена результатами низкочастотных калибровок гидрофонов на ключевых сличениях МКМВ ССАUV/W K2, результатами измерений коэффициента отражения звука от границ раздела вода-воздух и вода-железобетон, сопоставимостью результатов, полученных при исследованиях акустических свойств носителя разработанной приемной системы, результатов теоретических исследований, выполненных разработчиком носителя, и результатов натуральных измерений, выполненных независимо 8-ю приемными системами в Белом море (ФГУП «ВНИИФТРИ»).</p>
<p><b>13.</b> Фундаментальные проблемы физической электроники, в том числе разработка методов генерации, приема и преобразования электромагнитных волн с помощью твердотельных и вакуумных устройств, акустоэлектроника, релятивистская СВЧ-электроника больших мощностей, физика мощных пучков заряженных</p>	<p>Построена теоретическая модель фазо-индуцированной генерации релятивистской лампы обратной волны с учетом длительности и шумовых флуктуаций плотности тока фронта пучка. Экспериментально продемонстрирована корреляция фазы затравочного и генерируемого радиоимпульсов диапазона 37 ГГц с разбросом до 0.5 радиан при соотношении мощностей -35 дБ. Подтверждена возможность создания фазированных решеток из релятивистских СВЧ-генераторов без жестких требований к стабильности и форме ускоряющего напряжения (ФИЦ ИПФ РАН; ИЭФ УрО РАН; ИСЭ СО РАН).</p>

частиц

Продемонстрирована эффективность использования двумерно-периодических гофрированных систем для стабилизации азимутальной структуры излучения в мощных пространственно-развитых релятивистских черенковских генераторах поверхностной волны. При диаметре пространства взаимодействия около 5 длин волн получена узкополосная мультимегаваттная генерация на частоте 32,5 ГГц (ФИЦ ИПФ РАН).

Впервые достигнут КПД преобразования мощности гигаваттного релятивистского электронного пучка в миллиметровое излучение на уровне 45%. На длине волны 8 мм получены импульсы с мощностью до 800 МВт при длительности 3 нс на длине волны 4 мм – с мощностью до 100 МВт при длительности 1.3 нс (ИСЭ СО РАН, ИЭФ УрО РАН).

В численного моделирование впервые продемонстрирована возможность высокоградиентного ускорения частиц с использованием релятивистских СВЧ генераторов на основе черенковского сверхизлучения сильноточных электронных сгустков, обеспечивающих гигаваттный уровень мощности в миллиметровом диапазоне длин волн. Темп набора энергии может достигать 550 МэВ/м, что в 5 раз превосходит величину, характерную для современных ускорителей с термокатодными клистродами диапазона 10 ГГц (ФИЦ ИПФ РАН).

Проведены эксперименты по взаимодействию мощного микроволнового импульса (0.5 ГВт, 1 нс, 9.6 ГГц) с разреженным газом и предварительно создаваемой плазмой. Впервые зафиксирован ранее предполагаемый теоретически эффект формирования плазменного волновода и самофокусировки волнового пучка, что представляет интерес для задач распространения мощных волновых пучков в ионосфере Земли (ИСЭ СО РАН в кооперации с «ТЕХНИОН», Израиль).

Показана возможность продвижения релятивистских гиротронов в область высоких частот при работе на высоких циклотронных гармониках: на основе термоэмиссионного ускорителя “Сатурн” с пучком 250 кэВ / 35 А / 1 мкс в гиротроне на второй циклотронной гармонике на моде TE<sub>11.2</sub> получено излучение на длине волны 5.5 мм с мощностью около 2,5 МВт и КПД около 30% (ФИЦ ИПФ РАН).

Разработана новая конструкция полупроводникового элемента реверсивно-включаемых диодисторов, имеющая существенно меньшее сопротивление каналов обратной проводимости по сравнению с обычной конструкцией и меньшее падение напряжения при протекании импульса обратного тока. Прибор перспективен для коммутации

мощных знакопеременных импульсов тока (ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН).

Реализован твердотельный двухкаскадный компрессор энергии высоковольтного импульса на гиромагнитных нелинейных линиях с насыщенным ферритом. На выходе достигнута пиковая мощность  $\sim 30$  ГВт при длительности импульса 0.65 нс и частоте следования до 1 кГц (ИЭФ УрО РАН). В трехкаскадном компрессоре сформирован импульс минус 860 кВ с длительностью 120 пс и с фронтом 100 пс мощностью 15 ГВт. Оба устройства имеют рекордные параметры для всего класса субнаносекундных высоковольтных генераторов (ИЭФ УрО РАН; ИСЭ СО РАН).

Получен пикосекундный пучок убегающих электронов в воздухе с энергией до 1.4 МэВ. Электрическое поле более 500 кВ/см создавалась при рекордном темпе нарастании напряжения до 10 МВ/нс за время, сравнимое с временем ускорения частиц от катода до анода (ФИАН, ИЭФ УрО РАН).

Определены универсальные закономерности формирования пучков убегающих электронов с учетом неоднородного распределения электрического поля в газоразрядном промежутке. Получены параметры критических лавин убегающих электронов в условиях атмосферных грозных разрядов. (ФИАН им. П.Н. Лебедева)

В экспериментах по импульсному сжатию дейтериевых лайнеров на тераваттном генераторе ГИТ-12 при токе  $\sim 3$  МА получено рекордное число нейтронов:  $(1.1 \pm 0.3) \cdot 10^{13}$  частиц за импульс, что соответствует эффективности генерации  $\sim 10^8$  нейтронов на один джоуль энергии, вложенной в плазму (ИСЭ СО РАН).

С помощью субмикросекундного эффекта двойных ускоряющих импульсов достигнута скорость нарастания тока электронного пучка до 55 кА/нс с графитового катода. Эффект связан с зарядовой нейтрализацией пучка в плазме, разлетающейся от катода в результате взрывной эмиссии и ударной ионизации остаточного газа (ФИАН им. П.Н. Лебедева; ИЭФ УрО РАН).

Исследовано усиление собственных шумов сильноточного релятивистского электронного пучка плазменным СВЧ усилителем вплоть до уровня 30 дБ. Полоса частот усилителя может перестраиваться от 2 до 3.5 ГГц за счёт изменения плотности плазмы. Энергия выходного СВЧ импульса с длительностью 200 – 300 нс достигаем 15 Дж (ИОФ РАН)

Для анализа вакуумных предпробойных процессов в условиях воздействия

	<p>радиочастотных электромагнитных полей разработана двухтемпературная (электроны и фононы) модель разогрева микроострия. Показано, что разогрев электронов в начальной стадии воздействия поля практически целиком определяется выделением тепла за счет эффекта Ноттингама. В дальнейшем рост температуры с течением времени усиливается уже за счет Джоулева разогрева. Время разогрева до критической температуры монотонно растет с уменьшением коэффициента усиления поля и слабо зависит от параметра, определяющего скорость релаксации электронной и фононной температур (ИОФ РАН; ФИАН).</p>
<p><b>14.</b> Современные проблемы физики плазмы, включая физику высокотемпературной плазмы и управляемого термоядерного синтеза, физику астрофизической плазмы, физику низкотемпературной плазмы и основы ее применения в технологических процессах</p>	<p>Испытания узлов Вертикальной нейтронной камеры Международного термоядерного реактора ИТЭР, показали устойчивость работы опытного образца блока детектирования быстрых нейтронов к термоциклированию, ударам и вибрациям, воздействию повышенной рабочей температуры и параметров окружающей среды. Вертикальная нейтронная камера станет важным элементом диагностики для определения параметров плазмы в токамаке ИТЭР (ГНЦ РФ «Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований»).</p> <p>Благодаря новой технологии облучения мягким рентгеновским излучением на установке «Ангара 5-1» получены экспериментальные данные о прозрачности индия в области, ранее доступной только для установок на порядок более мощных (например, термоядерная установка “Z”, Сандия, США). Эти данные будут в дальнейшем использоваться при создании мишеней для систем инерциального термоядерного синтеза (ГНЦ РФ «Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований»).</p> <p>Экспериментально исследована структура плазменного соленоида, образованного лазерным импульсом с орбитальным угловым моментом. Показано, что лазерный импульс, обладающий пространственной структурой, при распространении в разреженной плазме, в результате нелинейного взаимодействия с электронами способен образовать долгоживущие замагниченные соленоидальные структуры. В трехмерном численном моделировании было показано, что при интенсивности в <math>2 \times 10^{18}</math> Вт/см<sup>2</sup>, длине волны 800 нм, длительности 6-и оптических периодов, магнитное поле достигает 40 Тесла и может быть увеличено при увеличении длительности импульса. Анализ движения электронов в поле волны показал, что передача углового момента происходит вследствие одночастичного нелинейного взаимодействия (НИЯУ МИФИ).</p>
	<p>Предложен новый класс сдвинутых гомотопических операторов в калибровочной</p>

**15.** Современные проблемы ядерной физики, в том числе физики элементарных частиц и фундаментальных взаимодействий, включая физику нейтрино и астрофизические и космологические аспекты, а также физики атомного ядра, физики ускорителей заряженных частиц и детекторов, создание интенсивных источников нейтронов, мюонов, синхротронного излучения и их применения в науке, технологиях и медицине

теории высших спинов. Установлены ограничения на гомотопические параметры, понижающие степень нелокальности нелинейных уравнений высших спинов во всех порядках теории возмущений (ФИАН).

Впервые вычислены трёхпетлевые вклады в формфакторы массивных кварков, соответствующие взаимодействию с векторным, аксиальным, скалярным и псевдоскалярным токами. Эти формфакторы играют важную роль в описании различных процессов, включая рождение массивных кварков в электрон-позитронных столкновениях и распад хиггсовского бозона (ИЯФ СО РАН).

Предсказано новое явление образования Бозе-звезд из газа лёгких частиц темной материи за счет универсального гравитационного взаимодействия. Найдено, что в популярных моделях темной матери, состоящей из аксионов КХД или из струнных аксионов, Бозе-звезды формируются за время, меньшее времени жизни Вселенной, приводя к ряду потенциально наблюдаемых следствий (ИЯИ РАН).

Развит новый подход к теории неперенормируемых взаимодействий. Получено обобщение уравнений ренормгруппы, позволяющее суммировать ведущие асимптотики во всех порядках теории возмущений. Найдено ультрафиолетовое поведение ряда суперсимметричных калибровочных моделей квантовой теории поля (ОИЯИ).

Использование квантовой трехчастичной динамики для описания реакций на границе протонной стабильности позволило уменьшить на три порядка неопределённости в предсказываемой скорости двухпротонного радиационного захвата ядра  $^{15}\text{O}$  и скорости кулоновской диссоциации  $^{17}\text{Ne}$  в важном для астрофизики интервале температур от 0.1 до 1.0 гигакельвинов (НИЦ «Курчатовский институт»).

На созданной в ПИЯФ НИЦ КИ экспериментальной установке «Большая гравитационная ловушка», которая в настоящее время размещается на пучке ультрахолодных нейтронов реактора ИЛЛ (г. Гренобль, Франция), получено новое значение величины времени жизни нейтрона  $\tau_n = (881,5 \pm 0,7_{\text{stat}} \pm 0,6_{\text{syst}})$  с, находящееся в хорошем согласии со среднемировым значением  $880,2 \pm 1,0$  с, представленным в Particle Data Group. Показана принципиальная возможность развития эксперимента и уменьшения итоговой погрешности измерений при работе ловушки удержания нейтронов на низких температурах с охлаждением жидким гелием (НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ).

В эксперименте КЕДР на коллайдере ВЭПП-4М проведено прецизионное измерение отношения сечений электрон-позитронной аннигиляции в адроны и мюоны ( $R$ ) в двадцати двух точках в диапазоне энергий в системе центра масс от 1,84 до 3,72 ГэВ. В настоящее время это наиболее точное измерение величины  $R$  для данной области энергии. Величина  $R$  является одной из ключевых характеристик, используемых при проверке Стандартной модели (ИЯФ СО РАН, НГУ).

В международном эксперименте Belle на коллайдере КЕКВ в Японии с участием российских специалистов выполнено новое измерение эксклюзивных сечений  $e^+e^- \rightarrow D^{(*)+}D^{*-}$  в зависимости от энергии системы центра масс от порога рождения  $D^{(*)+}D^{*-}$ -пар до 6,0 ГэВ с помощью излучения в начальном состоянии. Точность измерения сечений улучшена в 2 раза. Впервые выполненный угловой анализ процесса  $e^+e^- \rightarrow D^{*+}D^{*-}$  позволил разложить соответствующее эксклюзивное сечение на три компонента, соответствующие поляризации  $D^*$ -мезонов (ФИАН, ИЯФ СО РАН, НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ, ИТЭФ, НИЯУ МИФИ, МФТИ, НГУ).

С использованием данных, набранных в международном эксперименте CMS с участием российских специалистов на Большом адронном коллайдере в столкновениях протонов с энергией 8 ТэВ в системе центра масс, осуществлен поиск экзотического состояния  $X(5568)$ , распадающегося на  $V_s^0 \pi^\pm$ , обнаруженного ранее D0 коллаборацией. При анализе набора данных с числом сигнальных событий, почти на порядок превышающем статистику D0 коллаборации, не обнаружено значимого сигнала, соответствующего экзотическому состоянию  $X(5568)$  (НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ, ИФВЭ, ИТЭФ, НИЦ «Курчатовский институт», ИЯИ РАН, НГУ, НИЯФ МГУ, ФИАН, ОИЯИ, МФТИ, НИЯУ МИФИ, ТПУ, ТГУ).

На установке ОКА на 18 ГэВ/с вторичном сепарированном пучке каонов протонного синхротрона У-70 выполнено детальное исследование распада заряженного каона  $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+ \gamma$ . Благодаря большому интегральному потоку каонов, высокой энергии пучка и хорошей герметичности установки удалось надежно выделить и исследовать искомый распад. Полученное значение относительной вероятности распада и спектр  $\gamma$ -квантов согласуются с результатами расчетов в рамках киральной теории возмущений. Впервые исследован вклад в этот распад  $P$  и  $T$  – нечетных взаимодействий. В пределах точности эксперимента таких вкладов не обнаружено. (НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ). В ЦЕРН на пучке электронов с энергией 100 ГэВ при определяющем участии российских специалистов проведены поиски легких векторных бозонов с массой  $M < 1$  ГэВ, распадающихся на нейтральные невидимые частицы, а также гипотетических

бозонов с массой 16.7 МэВ, распадающихся на электрон-позитронную пару. В результате обработки данных искомые аномальные эффекты не обнаружены. Полученные ограничения на константы связи таких частиц с электронами существенно улучшают имевшиеся ранее ограничения (ИЯИ РАН, НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ).

Выведен на проектную мощность комплекс по изучению радиоактивных изотопов, состоящий из ускорителя У-400М и нового фрагмент-сепаратора АКУЛИНА-2. Проведены первые физические эксперименты на полном токе. В частности, в одном из экспериментов получена интенсивность вторичного радиоактивного пучка  ${}^8\text{He} \sim 10^5$  частиц в секунду, что является рекордом для диапазона энергий 20-30 МэВ/нуклон (ОИЯИ).

Коллаборация детектора VM@N провела первый сеанс по физической программе эксперимента на ускорителе Нуклотрон в ЛФВЭ ОИЯИ. Было зарегистрировано более 2 миллионов событий во взаимодействии пучка ионов углерода с энергией 4 ГэВ/с на нуклон с жидководородной мишенью в рамках реализации программы исследований короткодействующих корреляций (ОИЯИ, НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ, ИЯИ РАН, НИЦ «Курчатовский институт»- ИТЭФ, НИИЯФ МГУ).

Международной коллаборацией SuperFRS (GSI, Дармштадт, Германия) с участием российских специалистов проведен пилотный эксперимент на установке EXPERT, создаваемой при доминирующем вкладе российских специалистов. В этом эксперименте были, в частности, открыты новые изотопы  ${}^{30,29,28}\text{Cl}$  и  ${}^{30,29}\text{Ag}$ , находящиеся за границей протонной стабильности. Нужно отметить, что изотоп  ${}^{28}\text{Cl}$  находится на рекордном удалении от границы протонной стабильности (три массовых единицы) ОИЯИ, НИЦ «Курчатовский институт», НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ, ФТИ им. А.Ф. Иоффе).

Международной коллаборацией R3B (GSI, Дармштадт, Германия) с участием российских специалистов проведен эксперимент по изучению ядерной и электромагнитной диссоциации ядра  ${}^{17}\text{Ne}$ . Получена важная информация о структуре этого ядра, для которого теоретически предсказана такая уникальная особенность, как двух-протонное гало, и о его вкладе в астрофизический гр-процесс (НИЦ «Курчатовский институт»).

Международная коллаборация «Borexino» (Гран-Сассо, Италия) с участием российских

специалистов представила результаты наиболее полного и точного на сегодняшний день анализа потоков солнечных нейтрино. Данные подтверждают наличие предсказываемого механизмом Михеева-Смирнова-Вольфенштейна перехода между «вакуумным» режимом осцилляций и осцилляциями в веществе. Представленные данные хорошо согласуются с моделью Солнца с высокой металличностью. Это первое указание подобного рода, особенно ценное в свете недостатка других экспериментальных данных для решения существующей проблемы химического состава Солнца (ОИЯИ, НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ, НИЦ «Курчатовский институт», НИИЯФ МГУ, НИЯУ МИФИ).

Развернут и введен в эксплуатацию на оз. Байкал третий кластер нейтринного телескопа Baikal-GVD. С его вводом эффективный объем телескопа Baikal-GVD достиг значения  $0.15 \text{ км}^3$ , что уже составляет около 0.4 от эффективного объема IceCube в задаче регистрации ливней от нейтрино высоких энергий астрофизической природы. Выполнен анализ данных 2017 года, позволивший получить верхние ограничения на поток нейтрино высоких энергий от события GW170817, зарегистрированного детекторами гравитационных волн (ИЯИ РАН, ОИЯИ).

Нейтринный детектор DANSS, установленный на Калининской АЭС, ежедневно регистрирует около 4000 реакторных антинейтрино при фоне, не превышающем 2–3% (на сегодня лучшее в мире значение среди экспериментов, ведущихся на реакторах). Завершен анализ первой части экспериментальных данных, на основе которого получено наиболее строгое модельно-независимое ограничение на существование стерильных нейтрино. Набор данных и их детальный анализ продолжаются (ОИЯИ, НИЦ «Курчатовский институт» - ИТЭФ, ФИАН).

В международном эксперименте T2K, выполняемом с участием российских специалистов, проведены исследования осцилляций мюонных нейтрино и антинейтрино в электронные нейтрино и антинейтрино, и впервые получено указание на нарушение CP симметрии в нейтринных осцилляциях с наиболее вероятной величиной CP нечетной фазы около  $\sim 90$  градусов. CP сохранение исключено на уровне статистической значимости более  $2\sigma$  (ИЯИ РАН).

По данным Баксанского подземного сцинтилляционного телескопа (БПСТ) проведен поиск электронных нейтрино и антинейтрино с энергией выше 21 МэВ в совпадении с гравитационно-волновыми событиями GW150914, GW151226, GW170104, GW170608, GW170814 и GW170817. В интервале  $\pm 500$  секунд от гравитационно-волновых событий

нейтринных сигналов на БПСТ обнаружено не было. Получены ограничения на потоки электронных нейтрино и антинейтрино с энергиями от 21 МэВ до 200 МэВ от астрофизических источников гравитационных всплесков (ИЯИ РАН).

В эксперименте по поиску стерильных нейтрино «Нейтрино-4», ведущемся на базе реактора СМ-3 (Дмитровград, Россия), получены указания (с достоверностью 2.8 $\sigma$ ) на существование эффекта осцилляций электронных нейтрино в стерильные в области значений  $\Delta m^2_{14}=(7.34\pm 0.1)\text{eV}^2$  и  $\sin^2\theta_{14}=(0.39\pm 0.12)$  (НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ, НИЦ «Курчатовский институт», ОАО ГНЦ НИИАР, НИЯУ МИФИ).

В эксперименте по поиску солнечных адронных аксионов, ведущемся на Баксанской нейтринной обсерватории, получено верхнее ограничение на произведение аксион-фотонной константы связи и массы аксиона  $|g_{A\gamma}\times m_A| \leq 6.3 \times 10^{-17}$ . В модели адронных аксионов это соответствует ограничению на массу аксионов:  $m_A \leq 12.7$  эВ (95% У.Д.), что является лучшим результатом среди аналогичных экспериментов по поиску адронных аксионов (ИЯИ РАН).

В космическом эксперименте НУКЛОН собран наиболее полный банк данных об энергетических спектрах и зарядовом составе галактических космических лучей высоких и сверхвысоких энергий, вплоть до энергий  $10^{15}$  эВ. Наиболее неожиданным результатом является наличие убедительных доказательств существования нового универсального «колена» в спектре космических лучей, которое наблюдается во всех группах ядер, включая тяжелые, вблизи магнитной жесткости около 10 ТВ. Положение колена в шкале магнитной жесткости одинаково для всех групп ядер, что требует, скорее всего, астрофизического объяснения (НИИЯФ МГУ, ОИЯИ, НИЯУ МИФИ).

В результате продолжительных исследований на комплексе НЕВОД-ДЕКОР впервые выявлен в мюонной компоненте второй излом энергетического спектра космических лучей при энергии около  $10^{17}$  эВ. Подтвержден также растущий с энергией избыток мюонов в широких атмосферных ливнях, который при энергиях порядка  $10^{18}$  эВ превышает расчетное значение даже в предположении о чисто железном составе первичных космических лучей (НИЯУ МИФИ).

Представлен энергетический спектр, объединенный по данным черенковских установок Тунка-133 и TAIGA-HiSCORE, который охватывает диапазон  $2 \cdot 10^{14} - 2 \cdot 10^{18}$  эВ и демонстрирует на нижнем пороге хорошее согласие с результатами прямых спутниковых и баллонных экспериментов, а на предельно высоких энергиях согласие в

пределах статистических ошибок с результатами крупномасштабных установок Telescope Array и PAO по изучению широких атмосферных ливней (НИИЯФ МГУ, ИрГУ, ОИЯИ, НИЯУ МИФИ).

В международном эксперименте Telescope Array (Юта, США), выполняемом с участием российских специалистов, измерен спектр космических лучей в диапазоне  $10^{15.3}$ - $10^{20}$  эВ. Спектр получен в результате совместного анализа черенковского и флуоресцентного излучения ШАЛ, зарегистрированного установками TA и TALE. В полученном спектре присутствует излом при энергии  $10^{17.04}$  эВ и особенность типа «лодыжка» при энергии  $10^{16.22}$  эВ (ИЯИ РАН).

Орбитальным магнитным спектрометром ПАМЕЛА измерены потоки протонов с энергиями от сотен до тысяч МэВ в 30 солнечных протонных событиях 2006–2014 гг. Тем самым заполнен пробел в энергетическом спектре солнечных протонов между результатами наблюдений на спутниках (<100 МэВ) и на наземных нейтронных мониторах (>1000 МэВ). Измеренные энергетические спектры согласуются с предсказаниями модели диффузионного ускорения ударной волной. Скорее всего, это означает, что солнечные протонные события, регистрируемые на Земле, не являются особым классом событий, а представляют собой продолжение в область высоких энергий солнечных протонных событий, наблюдаемых на спутниках (ФИАН, НИЯУ МИФИ, ФТИ РАН).

На основе сравнительного анализа спектров космических лучей сверхвысоких энергий, измеренных в эксперименте SUGAR (Австралия) по числу мюонов и в эксперименте PAO (Аргентина) по выходу флуоресцентного света, определена величина и энергетическая зависимость избытка мюонов в широких атмосферных ливнях, вызванных первичными частицами с энергиями в интервале от  $10^{17}$  эВ до  $10^{18.5}$  эВ. (ИЯИ РАН).

Впервые произведена регистрация УФ треков в атмосфере Земли детекторами флуоресценции в баллонном и спутниковом экспериментах. Проведена предварительная обработка данных баллонного эксперимента EUSO-Balloon и детектора «ТУС» на борту спутника «Ломоносов», которые показывают возможность регистрации треков ШАЛ с борта ИСЗ, что позволяет перейти к проработке более сложных проектов, таких как «КЛПВЭ» (НИИЯФ МГУ, ОИЯИ).

Выполнена реконструкция скорости образования космогенного изотопа  $^{14}\text{C}$  в атмосфере

Земли от начала отступления последнего оледенения (~17000 до н.э.) до середины Голоцена и изучены вариации солнечной активности на основе радиоуглеродных данных. Установлено, что на временном интервале 17000–14400 лет до нашей эры, солнечная активность держалась на высоком уровне. Глобальный минимум отмечается в ~ 13370 году до н.э. Следующий чрезвычайно высокий уровень солнечной активности наблюдался в ~ 6755–6715 годах до н.э., при этом числа Вольфа могли достигать значения 200. В интервалы 9200–9000 лет до н.э., и 8300–8100 лет до н.э, солнечная активность была чрезвычайно низкой (ФТИ РАН).

Разработана теория механизма модуляции галактических космических лучей в гелиосфере, ответственный за возникновение тензорной анизотропии в их пространственном распределении. Механизм связан с экранировкой частиц регулярным межпланетным магнитным полем при условии существования наклона нейтрального токового слоя гелиосферы к югу от плоскости солнечного экватора в пределах  $10^\circ$ . Сопоставление теории с экспериментом показывает хорошее согласие (ИКФИА РАН).

Впервые, на основе базы данных межпланетных возмущений и Форбуш-эффектов, исследовано распределение по величине Форбуш-эффектов для космических лучей жесткостью 10 ГВ, наблюдавшихся в последних шести солнечных циклах. Показано, что для Форбуш-эффектов с величиной больше 1.4% распределение соответствует степенному закону с показателем  $2.31 \pm 0.11$ , что близко к показателям, полученным ранее для корональных выбросов массы (ИЗМИРАН).

Завершено создание первой очереди фабрики сверхтяжелых элементов (СТЭ), включая новый ускоритель тяжелых ионов — циклотрон ДЦ-280 (с интенсивностью ионов, на порядок превышающей достигнутые на действующих ускорителях в мире), экспериментальный корпус и высокоэффективный газонаполненный сепаратор продуктов реакции. Цель создания фабрики — синтез новых СТЭ с  $Z = 119$  и  $120$  и дальнейшее изучение свойств СТЭ, ранее открытых в ОИЯИ ( $_{114}\text{Fl}$ ,  $_{115}\text{Mc}$ ,  $_{116}\text{Lv}$ ,  $_{117}\text{Ts}$ ,  $_{118}\text{Og}$ ). Первые эксперименты запланированы на апрель–май 2019 года (ОИЯИ).

На электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-2000 достигнута рекордная светимость встречных столкновений встречных пучков в области низких энергий ( $2 \times 10^{31} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  при 390–400 МэВ (энергия рождения омега-мезона)). Увеличение интенсивности и светимости составляет 3–4 раза по сравнению с периодом 2013–2016 годов. Это увеличение достигнуто в результате разработки и внедрения метода контролируемой раскачки эффективного эмиттанта (ИЯФ СО РАН).

Успешно проведен сеанс работы на сверхпроводящем синхротроне НУКЛОТРОН (инжектор проекта НИКА) с выведенными пучками ионов  $^{12}\text{C}^{6+}$ ,  $^{40}\text{Ar}^{16+}$  и  $^{78}\text{Kr}^{26}$ . В ходе сеанса впервые реализован бесструктурный режим медленного вывода пучка из сверхпроводящего синхротрона с использованием ВЧ шума для повышения качества и равномерности вывода, впервые в России ускорены и выведены из кольца ионы криптона с энергией 3.1 ГэВ/нуклон (ОИЯИ).

Осуществлен запуск установки электронного охлаждения для комплекса NICA на энергии инжекции. Система электронного охлаждения предназначена для накопления пучка ионов и для его охлаждения после ускорения до промежуточной энергии (ИЯФ СО РАН, ОИЯИ).

Представлен экспериментальный результат по квазиизэнтропической сжимаемости сильно-неидеальной плазмы дейтерия, сжатой до рекордной плотности  $\rho \approx 14 \text{ г/см}^3$  экстремальным давлением  $P \sim 185$  млн. атмосфер в экспериментальном устройстве сферической геометрии. Впервые в научном эксперименте в качестве дополнительного источника использован линейный индукционный ускоритель с энергией электронов 12 МэВ. В результате, в лабораторном эксперименте достигнуто состояние с плотностью и давлением, превышающими предполагаемые параметры в планетах-гигантах Солнечной системы – Юпитере и Сатурне (РФЯЦ ВНИИЭФ).

Международной коллаборацией AWAKE в ЦЕРНе с участием российских специалистов продемонстрирована возможность ускорения электронов плазменной кильватерной волной, создаваемой самомодулирующимся протонным пучком. В качестве драйвера используется протонный пучок синхротрона SPS с энергией 400 ГэВ. При инжекции в кильватерную волну электронов с энергией 19 МэВ, на выходе из 10-метровой плазменной секции регистрируется сгусток ускоренных электронов с энергией до 2 ГэВ, что доказывает наличие в плазме сильного продольного электрического поля (ИЯФ СО РАН).

Завершена разработка радиохимической технологии выделения актиния-225, использующегося для терапии онкологических заболеваний, из облученной на линейном ускорителе ИЯИ РАН мишени металлического тория; разработана схема генератора  $^{225}\text{Ac}/^{213}\text{Bi}$  на основе неорганических сорбентов. Химический выход  $^{225}\text{Ac}$  из технологических мишеней составляет более 85%, а радионуклидная чистота – более 99,8% (ИЯИ РАН).

Разработан радиохимический детектор для измерения пространственного распределения плотности потока быстрых нейтронов в ядерном реакторе, основанный на опыте работы проточного газового монитора нейтронного потока. Устройство позволяет в реальном масштабе времени получать информацию о распределении нейтронных потоков по высоте активной зоны ядерного реактора. Преимуществами устройства является отсутствие механических элементов, радиационная стойкость и широкий температурный диапазон до 380°C. (ИЯИ РАН).

Разработан, изготовлен и поставлен «под ключ» комплект оборудования для радиационной модификации полимерной изоляции оболочки кабеля на базе ускорителей электронов ЭЛВ-4 и ЭЛВ-8, включающий в себя как ускорители, так и технологические линии. Комплекс позволяет производить облучение одножильных и многожильных проводов и кабелей в диапазоне сечений от 0,3 до 400 мм<sup>2</sup>, а также многожильных кабелей диаметром до 55 мм. Работа выполнена на заводе «Электрокабель «Кольчугинский завод» в г. Кольчугино Владимирской обл. (ИЯФ СО РАН).

Впервые в мире создан мощный нагревный перезарядный инжектор сфокусированного пучка быстрых атомов водорода для термоядерных приложений с быстрым переключением энергии. При постоянном токе ионов до 135 А энергия частиц пучка возрастает с 15 кэВ до 40 кэВ за время 0.3 мс. Быстрое повышение энергии ионов пучка достигается подключением дополнительного ускоряющего промежутка в многоапертурной ионно-оптической системе ионного источника. Для быстрого переключения напряжений на электродах ионно-оптической системы используется специализированный высоковольтный модулятор (ИЯФ СО РАН).

Создана новая электронная термокатодная ВЧ-пушка с большим средним током пучка. ВЧ пушка позволяет преодолеть ограничения на ток и энергию пучка, присущие статическим пушкам и связанное с высокой чувствительностью катодов к бомбардировке ионами. В конструкции термокатодной ВЧ-пушки применена сильная ВЧ фокусировка пучка непосредственно на катоде. Использование новой пушки в новосибирском лазере на свободных электронах позволит на порядок увеличить мощность излучения. В импульсном режиме работы напряжение на ВЧ-пушке можно поднять до 1000 кВ и, соответственно, еще больше повысить качество пучка, что актуально для применения ВЧ пушки в инжекторе синхротрона СКИФ – источника СИ нового поколения (ИЯФ СО РАН).

	<p>В процессе разработки ускорительного источника эпитепловых нейтронов для применения на установках бор-нейтроно-захватной терапии рака создан и испытан инжектор отрицательных ионов водорода с энергией ионов до 130 кэВ и током пучка до 10мА. Инжектор состоит из стационарного источника отрицательных ионов с током до 15 мА и энергией до 30 кэВ, поворотного фокусирующего магнита и ускорительной трубки для доускорения пучка до энергии 130 кэВ (ИЯФ СО РАН).</p> <p>Разработан принципиально новый метод повышения биологической эффективности пучков протонов медицинского назначения и гамма-терапевтических установок. Подход основан на применении официального препарата 1-β-D-арабинофуранозилцитозина, используемого в онкологической практике при лечении раковых заболеваний кроветворной системы. При введении препарата перед облучением клеток человека ионизирующими излучениями происходит трансформация одонитевых разрывов ДНК в летальные двунитевые разрывы, что обеспечивает существенное повышение биологической эффективности пучков протонов (ОИЯИ).</p>
<p>16. Современные проблемы астрономии, астрофизики и исследования космического пространства, в том числе происхождение, строение и эволюция Вселенной, природа темной материи и темной энергии, исследование Луны и планет, Солнца и солнечно-земных связей, исследование экзопланет и поиски внеземных цивилизаций, развитие методов и аппаратуры внеатмосферной астрономии и исследований космоса, координатно-временное обеспечение фундаментальных исследований и практических задач</p>	<p>Создание каталога близких пустот и населяющих их галактик. Наблюдаемые свойства войдов (элементов космической паутины, видимой в распределении материи как пустоты) и галактик, их населяющих, являются важной частью данных для сопоставления с предсказаниями формирования и эволюции структур в современных космологических моделях. В САО РАН создана выборка 1354 галактик, населяющих войды. Из них 1088 объектов являются “внутренними” галактиками войдов, с расстояниями до больших галактик более 2 Мпк. Эта выборка галактик войдов является базовой для более детального исследования как свойств галактик, так и структуры войдов. Описаны статистические свойства галактик близких войдов, включая морфологию и долю галактик ранних типов, скучивание, содержание газа. Показан потенциал новой выборки для поиска необычных, наиболее молодых галактик ближней Вселенной (САО РАН).</p> <p>Квазипериодические пульсации (КПП) в микровспышках на Солнце. По спектрально-поляризационным наблюдениям на РАТАН-600 25 января 2017 был обнаружен мощный “микровсплеск” с КПП, не отмеченный мировыми мониторингами Солнца разных диапазонов. Особенность спектра состоит в том, что плавное увеличение потока с длиной волны сменилось в диапазоне 3–4 ГГц резким взрывным уярчением в десятки раз превышающим яркость спокойного Солнца. Уникальность результата заключается в сочетании предельных параметров космических и наземных наблюдательных</p>

комплексов и регистрацией редкого вспышечного события с новым механизмом излучения (САО РАН).

“Холодные” солнечные вспышки. Анализ многолетних рядов наблюдений солнечных вспышек на спектрометре жесткого рентгеновского излучения “Конус” и микроволновых спектрометрах позволил выделить новый класс вспышек, отличающихся аномально низким вкладом вспышечного энерговыделения в нагрев плазмы. Изучены их спектральные и временные характеристики в жестком рентгеновском и микроволновом излучениях, обнаружены значимые статистические особенности в свойствах «холодных» вспышек: более жесткий спектр ускоренных электронов, сравнительно малая длительность всплесков нетеплового излучения и т.д. Полученные результаты важны для развития теории взрывных вспышечных процессов на Солнце, определяющих возмущения в околоземной плазме (ИСЗФ СО РАН, ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН).

Вторая планета в системе экзопланеты TrES-5b. В кооперации с международной группой наблюдателей на телескопе Цейсс-600 Саянской солнечной обсерватории получены новые измерения транзитов экзопланеты TrES-5b. Анализ вариаций моментов транзита по расширенному массиву данных позволил сделать вывод о существовании еще одной планеты в этой системе. Сделана оценка массы планеты и периода обращения (ИСЗФ СО РАН).

РСДБ-эксперимент для проверки общей теории относительности. В целях проверки общей теории относительности путем измерения отклонения лучей света в гравитационном поле Солнца спланирован и проведен специальный суточный сеанс РСДБ-наблюдений. На радиотелескопах семи обсерваторий (Светлое, Зеленчукская, Бадары, HartRAO, SHAO, Sejong, и Hobart) проводились наблюдения двух сильных радиоисточников 0229+131 и 0235+164 вблизи Солнца на угловых расстояниях от 1 до 3 градусов. Из обработки только одной суточной серии наблюдений исследуемых радиоисточников получена оценка параметра  $\gamma$  параметризованного постньютоновского (ПН) формализма с точностью  $0.9 \cdot 10^{-4}$ , что превышает точность предшествующих оценок  $\gamma$ , полученных из глобального уравнивания более 5 млн. РСДБ-наблюдений квазаров (ИПА РАН).

Первые результаты, полученные по данным российского прибора ФРЕНД на борту КА ЕКА Trace Gas Orbiter: Картографирование воды/водяного льда в приповерхностном слое марсианского грунта с высоким пространственным распределением и дозиметрия

на перелете к Марсу. В начале 2018 года КА ЕКА Trace Gas Orbiter (TGO) приступил к основной программе научных измерений на орбите вокруг Марса. В состав научной аппаратуры КА TGO входят два российских прибора, позволившие к настоящему моменту получить важные научные результаты. Один из них - российский нейтронный спектрометр ФРЕНД позволяющий измерять нейтронное альbedo Марса с ранее недоступным высоким пространственным разрешением (до 40 км) и, тем самым, оценивать содержание подповерхностной воды/водяного льда, сопоставляя его с геологическими особенностями поверхности. С его помощью построена глобальная карта нейтронного потока от Марса и отождествлены на умеренных широтах локальные районы с возможным наличием реликтового водяного льда, расположение которых хорошо коррелирует с геологическим контекстом местности. Кроме того, измерения радиационной обстановки за время перелета КА TGO от Земли к Марсу (при помощи болгарского дозиметра Люлин-МО, входящего в состав ФРЕНД) показали, что в течение перелета к Марсу и обратно космонавты будущей марсианской экспедиции могут получить дозу до примерно 60% от полной величины, допустимой для космонавта за всю его жизнь. Второй научный прибор – созданный в ИКИ РАН спектроскопический комплекс АЦС/ACS (Atmospheric Chemistry Suite) для исследования атмосферы, включающий три инфракрасных спектрометра (диапазон 0,7–17 микрон), позволил проводить мониторинг климата Марса и поиск малых газовых составляющих с высокой точностью. Получены первые данные по профилям атмосферы, водяного пара, изотопов, в том числе отношения  $\text{HDO}/\text{H}_2\text{O}$ , и их изменение по мере развития и затухания пылевой бури 2018г. Установлен очень низкий предел содержания метана  $\text{CH}_4$  ( $\leq 50$  частей на триллион), в 10 раз меньше фонового содержания метана, измеренного на марсоходе Curiosity (ИКИ РАН).

Новые массивные скопления галактик на высоких красных смещениях в обзоре обсерватории им.Планка. При помощи российских оптических телескопов – 6-м телескопа САО РАН (Большой телескоп азимутальный, БТА), 1.5-м Российско-Турецкого телескопа (РТТ-150), 1.6-м телескопа Саянской обсерватории, а также при помощи 3.5-м телескопа обсерватории Калар-Альто (Испания), среди источников Сюняева-Зельдовича из обзора всего неба обсерватории им. Планка обнаружены семь скоплений галактик на высоких красных смещениях,  $z \approx 0.8$ , для всех скоплений получены спектроскопические измерения красных смещений. В центральных областях двух скоплений обнаружены дуги сильного гравитационного линзирования далеких галактик, одна из которых находится на красном смещении  $z = 4.262$ . Эти скопления относятся к числу наиболее массивных скоплений галактик в наблюдаемой части Вселенной. Полученные данные удваивают число известных скоплений галактик в

обзоре обсерватории им. Планка на таких высоких красных смещениях, значительно увеличивается полнота каталога обзора всего неба для таких скоплений галактик (ИКИ РАН).

Обнаружение нового статистического семейства экзопланет на линии ледяной аккумуляции протопланетного диска. Построен новый алгоритм мультимасштабного мультикомпонентного анализа статистических распределений астрономических или иных объектов, который основан на непрерывном вейвлет-анализе функции плотности. С его помощью в выборке открытых экзопланет обнаружено новое семейство планет-гигантов, расположенное в зоне жизни средней звезды солнечного типа (интервал семейства 300–600 сут. по орбитальному периоду, 0.9–1.3 а.е. по большой полуоси). Наличие данного статистического семейства дает новое наблюдательное подтверждение эффекту «ледяной аккумуляции» в протопланетном диске, а также указывает на еще более значительное, чем считалось ранее, влияние этого эффекта на процессы планетообразования (ГАО РАН).

Исследование активных ядер галактик MCG+08-11-011 и NGC 2617. В рамках тесного международного сотрудничества сделаны оценки размеров аккреционного диска для ядер MCG+08-11-011 и NGC 2617. Результаты наблюдений согласуются со стандартной моделью геометрически тонкого аккреционного диска с зависимостью времени запаздывания от длины волны  $\tau \sim \lambda^{4/3}$ . Однако наблюдаемое запаздывание оказалось в 2–3 раза больше, чем предсказанное в рамках стандартной модели. Согласие наблюдений с моделью может быть достигнуто увеличением темпа аккреции газа по сравнению с тем, что ожидается исходя из оптической светимости ядра (КрАО РАН).

Химическое моделирование протопланетных дисков со вспышками светимости типа FU Ori. Для молодых звезд типа FU Ori, окруженных протопланетными дисками из газа и пыли, характерны внезапные вспышки, во время которых их светимость увеличивается до сотен светимостей Солнца вследствие усиленной аккреции на звезду. В работе промоделирован химический состав протопланетного диска, испытывающего вспышку светимости. Найдены соединения, содержание которых в диске чувствительно к вспышке ( $\text{NH}_3$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CH}_3\text{OH}$  и др.), а также выделены молекулы, для которых оно остается повышенным в течение десятков лет после окончания вспышки ( $\text{H}_2\text{CO}$ ,  $\text{NH}_2\text{OH}$  и др.). Проанализированы пути формирования этих молекул. Рассмотрена возможность наблюдения  $\text{H}_2\text{CO}$  на примере звезды V346 Nor (ИНАСАН).

Моделирование кинетическим методом Монте-Карло взаимодействия протонов и

атомов водорода с высокими энергиями с атмосферой Марса и сравнение с *in situ* измерениями. Впервые выполнено кинетическое моделирование протонной авроры на Марсе, открытой в наблюдениях КА MAVEN. Использована усовершенствованная кинетическая модель Монте-Карло для расчетов высыпания протонов и атомов водорода с высокими энергиями в атмосферу Марса. Сравнение расчетов с данными, собранными с помощью анализатора ионов солнечного ветра (MAVEN/SWIA), показывают, что модель Монте-Карло воспроизводит некоторые из измеренных потоков. Результаты сравнения расчетов и измерения потоков протонов на малых высотах позволяют сделать вывод об эффективности перезарядки между протонами солнечного ветра и протяженной водородной короной, если измеряется одновременно величина индуцированного магнитного поля. Также установлено, что индуцированное магнитное поле играет очень важную роль в формировании отраженного атмосферой потока протонов и в существенной степени контролирует его величину (ИНАСАН).

Впервые в мировой практике экспериментов по модулированному нагреву ионосферы КВ-волной продемонстрирована связь режимов генерации искусственных пульсаций герцового диапазона с динамикой аврорального электроджета (нагревный стенд SPEAR, Шпицберген) (ПГИ).

Предсказано новое явление образования Бозе-звезд из газа легких частиц темной материи за счет универсального гравитационного взаимодействия. Явление изучено в масштабном численном моделировании и продемонстрировано, что конденсация происходит в кинетическом режиме. Это дает аналитическое описание процесса и позволяет определить время конденсации параметрически. Показано, что в популярных космологических моделях, где темная материя состоит из аксионов КХД или из струнных аксионов, Бозе-звезды формируются за время, меньшее времени жизни Вселенной, что приводит к ряду потенциально наблюдаемых следствий (ИЯИ РАН).

Сверхточная карта выброса в галактике Персей А. Благодаря беспрецедентному разрешению российского наземно-космического интерферометра «РАДИОАСТРОН» построена сверхточная карта выброса в галактике Персей А, находящейся от нас на расстоянии 237 млн. световых лет, и выбран механизм формирования релятивистских струй в галактиках (ФИАН).

Открытие молекулы бензонитрила ( $c\text{-C}_6\text{H}_5\text{CN}$ ) в космосе. Используя результаты спектрального сканирования темного облака ТМС-1 (Kaifu et al., 2004), мы предприняли попытку искать новые молекулы в межзвездной среде. Для этого был использован

метод составных спектров (Johansson et al., 1984; Kalenskii & Johansson, 2010), который позволяет находить даже те молекулы, спектральные линии которых не видны. Получены следующие результаты: с помощью составных спектров обнаружено излучение бензонитрила ( $c\text{-C}_6\text{H}_5\text{CN}$ ) – это открытие было подтверждено в результате высокочувствительных наблюдений на 100-м радиотелескопе обсерватории Грин Бэнк (США); помимо бензонитрила, впервые был обнаружен дейтерированный цианотриацетилен ( $\text{DC}^7\text{N}$ ) и шесть  $^{13}\text{C}$  изотопологов этой молекулы. Бензонитрил является наиболее сложной молекулой, обнаруженной методами радиоастрономии и единственной известной 13-атомной молекулой в космосе. Для поиска других молекул в межзвездной среде был проведен высокочувствительный спектральный обзор областей образования звезд большой массы DR21OH и W51e1/e2. Данные обзора обрабатываются (ФИАН).

Резонансное свечение солнечной короны в линиях ионов  $\text{FeIX-XI}$  во время мощных вспышек в сентябре 2017 г. С помощью анализа изображений солнечной короны, полученных космическим телескопом PROBA 2/SWAP во время мощных вспышек 6 и 10 сентября 2017 г., впервые выявлено свечение нижней короны в диапазоне 171–180 Å на высотах 240–480 тысяч км над лимбом Солнца, вызванное резонансным рассеянием излучения вспышек на ионах  $\text{FeIX-XI}$  в плазме спокойной короны. Обнаруженный эффект резонансного рассеяния в линиях ионов  $\text{FeIX-XI}$  дает важную информацию для исследования источников солнечного ветра в корон (ФИАН).