

Лаборатория №1 - теоретической электродинамики конденсированного состояния  
Заведующий лабораторией д.ф.-м.н., Рахманов Александр Львович



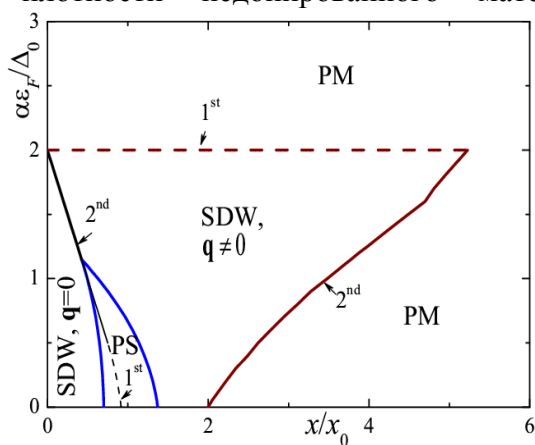
### Задачи

- Проведение фундаментальных исследований в области электрофизики и электродинамики композитных материалов, в том числе метаматериалов с новыми электрофизическими, оптическими и радиотехническими свойствами.
- Проведение фундаментальных исследований распространения энергии электромагнитных волн в гетерогенных средах, в том числе в упорядоченных и неупорядоченных композитных структурах.
- Проведение фундаментальных исследований в области прикладной сверхпроводимости и электродинамики магнитоактивных сред.

### Основные достижения и важнейшие публикации

1. Высокотемпературные сверхпроводники на основе железа были открыты в 2008 году. В настоящее время это один из самых исследуемых объектов физики конденсированного состояния. Огромный интерес к этим системам обусловлен в первую очередь надеждой, что они послужат ключом к разгадке природы высокотемпературной сверхпроводимости. Однако, сверхпроводники на основе железа интересны и сами по себе. Они обладают целым рядом необычных свойств. Например, в них сосуществует сверхпроводимость и антиферромагнитный порядок. Кроме того, в сверхпроводниках на основе железа могут течь токи гигантской плотности слабо зависящие от величины магнитного поля вплоть до десятка тесла, что важно для возможных приложений.

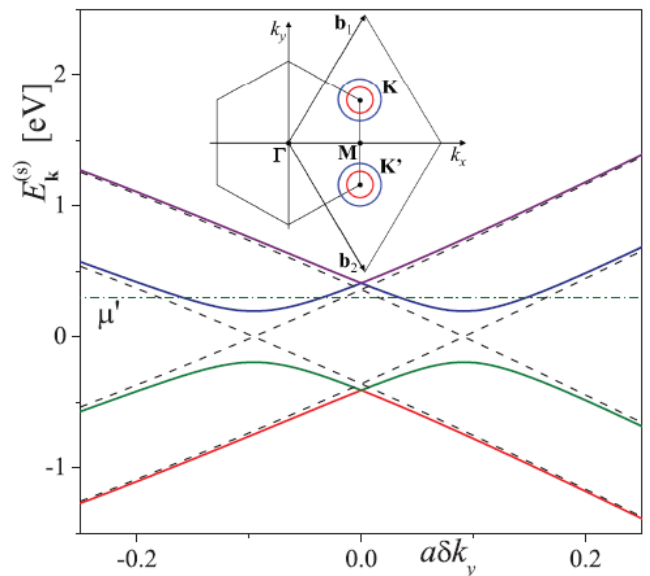
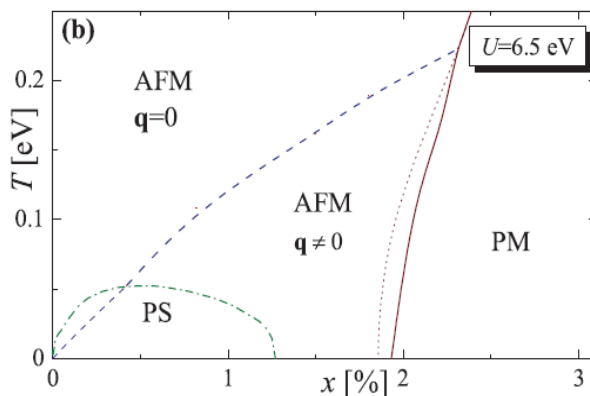
Нами предложен физический механизм, ответственный за электронное фазовое расслоение в сверхпроводниках на основе железа (пниктидах) [13] (здесь и далее ссылки на список основных публикаций, приведенный в конце раздела). Он основан на конкуренции фаз типа волн спиновой плотности с периодом соизмеримым и несоизмеримым с параметром кристаллической решетки. Соизмеримая волна спиновой плотности недопированного материала при допировании трансформируется в несоизмеримую. Показано, что при определённых значениях параметров однородное состояние системы неустойчиво относительно электронного фазового расслоения. Возникающее неоднородное состояние образовано областями с соизмеримыми и несоизмеримыми волнами спиновой плотности. Полученные результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными.



Характерный вид фазовой диаграммы пниктидов железа в координатах уровень допирования - степень несферичности Ферми-поверхности. PM - парамагнитная фаза, SDW  $q = 0$  и SDW  $q \neq 0$  - соизмеримая и несоизмеримая волны спиновой плотности, соответственно, PS - область фазового расслоения.

2. Одной из наиболее «горячих» областей физики конденсированного состояния является изучение недавно созданных двумерных систем, таких как однослойный и двухслойный графен, графан, силицен, нитрид бора и т.п. Изучение свойств графена может привести к практической отдаче уже в недалекой временной перспективе. Для приложений в электронике весьма важно создать графеноподобный материал с управляемой целью в электронном спектре [2]. Одним из перспективных материалов для этого является двухслойный графен типа АА.

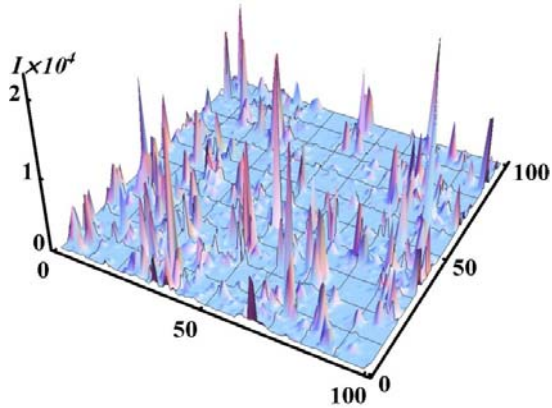
Исследованы электронные свойства двухслойного графена с упаковкой типа АА [8,11,12]. В отличие от обычной для графитов фазы Бернала (структуры АВ) в новом материале все атомы верхней плоскости располагаются непосредственно над атомами нижней плоскости. В результате эквивалентности плоскостей появляется дополнительное вырождение носителей заряда: электронная и дырочная зоны проводимости совпадают и пересекаются на поверхности Ферми. Такая зонная структура неустойчива относительно целого набора спонтанных нарушений симметрии. В частности, сильное одноцентровое кулоновское отталкивание электронов стабилизирует антиферромагнитное упорядочение. При слабом допировании и низких температурах однородное состояние оказывается неустойчивым и происходит фазовое расслоение на области антиферромагнитного диэлектрика и металла. Металлическая фаза может быть либо антиферромагнитной (с периодом соизмеримым или несоизмеримым с периодом решетки), либо парамагнитной. Богатство фазовой диаграммы АА-графена интересно для приложений, поскольку может быть создана устойчивая двумерная система с управляемыми свойствами.



На рисунках показаны: (1) Фазовая диаграмма АА-графена на плоскости температура – допирование ( $x$ ,  $T$ ): AFM  $q=0$  – антиферромагнетизм G-типа, AFM  $q \neq 0$  – несоизмеримая антиферромагнитная фаза, PS – неоднородное состояние, PM – парамагнитная фаза ( $U$  – величина локального электрон-электронного взаимодействия) [12]. (2) Зонная структура и зона Бриллюэна двухслойного АА графена [8].

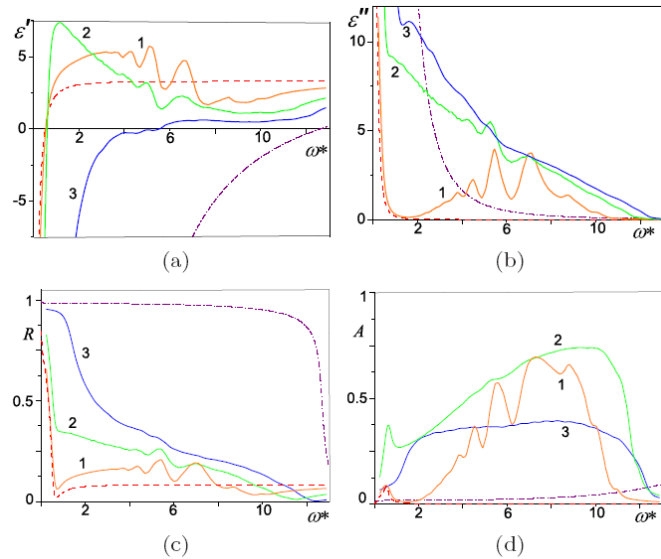
3. Двухслойный АА графен и сверхпроводники на основе железа обладают одной общей особенностью – неидеальным нестигмом Ферми поверхности. К подобным системам также относятся сплавы некоторых ферромагнитных металлов, например, хрома. Нами проведен общий анализ свойств основного состояния таких систем [10]. Показано, что фазовое расслоение на две антиферромагнитные фазы, соизмеримую и несоизмеримую, является их общим свойством. Отметим, что несоизмеримая антиферромагнитная фаза во многих отношениях схожа с состоянием Ларкина-Овчинникова-Фульде-Ферреля в сверхпроводниках.

4. Исследованы оптические характеристики манганитов с электронным фазовым расслоением [6]. Показано, что распределение локального электрического поля оказывается крайне неоднородным в инфракрасной области спектра (см. рисунок). Флуктуации электрического поля могут на несколько порядков превышать величину поля

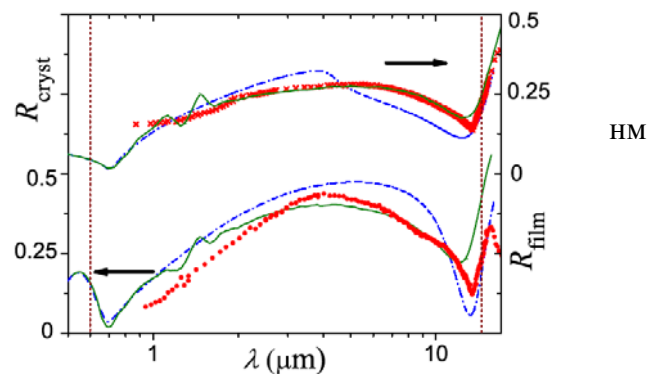


падающей электромагнитной волны, что должно приводить к гигантскому усилению рамановского рассеяния. Характерный пространственный масштаб флуктуаций указывает на коллективный характер плазмонных мод. Результаты численных расчетов объясняют экспериментально наблюдаемые особенности поведения оптических спектров манганитов. Рассматриваемые материалы в оптической (инфракрасной) области являются естественными метаматериалами со свойствами управляемыми температурой и магнитным полем, что может быть интересно для приложений.

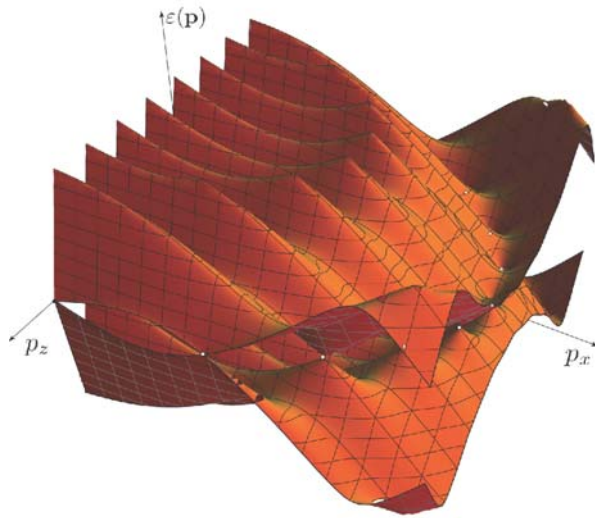
На рисунках показаны действительная (а) и мнимая (б) части диэлектрической проницаемости  $\epsilon = \epsilon' + i\epsilon''$ ; коэффициент отражения  $R$  (с) и поглощения  $A$  (д) как функции безразмерной частоты  $\omega^* = \omega/\omega_d$ ; красный пунктир  $p = 0$  и пурпурный штрих-пунктир  $p = 1$ ; кривые 1; 2; 3 соответствуют  $p = 0; 1; 0.25$  ( $p = p_c$ ); 0.40; панель (с) показывает тотражение от полупространства, (д) соответствует поглощению пленки манганита толщиной  $d = 180$  нм,  $(\omega_d/c)d = 0.144$ .



Коэффициент отражения  $R$  как функция длины волны  $\lambda$ . Эксперимент для манганита  $\text{La}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3$ ; монокристалл (красные точки) и пленка толщиной 180 (красные косые крестики),  $T = 295$  К. Сплошные кривые – численные расчеты; монокристалл  $p = 0.21 < p_c$ ; пленка  $p = 0.28 > p_c$ ; штрих-пунктир – вычисления методом эффективной среды. Вертикальные линии показывают область, где  $\epsilon'_m \epsilon'_d < 0$ .



5. Исследовано влияние электромагнитной волны большой амплитуды на энергетическую зонную структуру графена и связанные с этим особенности его транспортных характеристик [20]. Графен под воздействием электромагнитной волны оказывается интересным примером интерферометра Ландау-Зинера, активно обсуждаемого в связи с проблемой квантовых вычислений. Нами рассчитан спектр квазиэнергий рассматриваемой системы, в котором появляется целый ряд дополнительных точек Дирака. Существование таких точек подразумевает возможность тонкой подстройки коэффициентов пропускания и поглощения графенового листа. Рассмотрено квантовое кинетическое уравнение,

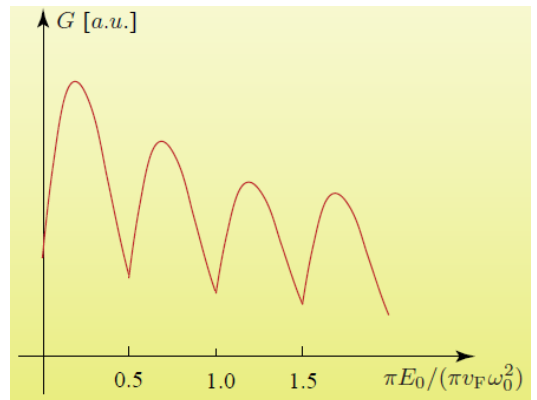


позволившее проанализировать характерные особенности электрического тока, возбуждаемого в графене электромагнитной волной.

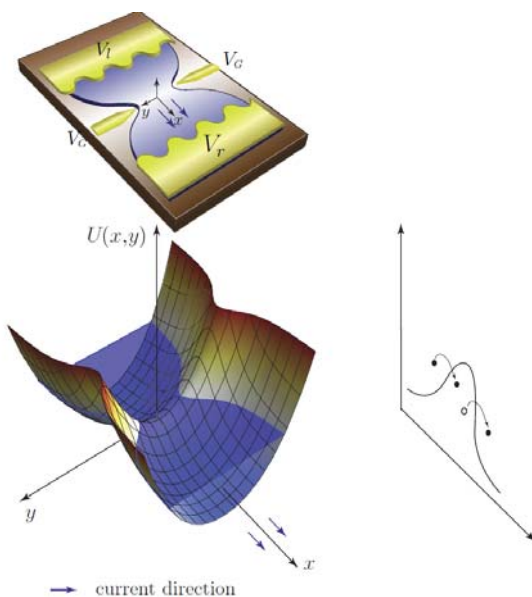
На рисунке показан электронный спектр графена с дополнительными точками Дирака

Исследован спектр и динамика квазичастичных возбуждений в графене и в  $p$ - $n$ -переходе на основе графена под действием линейно поляризованной электромагнитной волны большой амплитуды. Показано, что кондактанс такого

$p$ -перехода зависит от поляризации волны, как  $|\sin\theta|^{3/2}$ , где  $\theta$  - угол между направлением поляризации и  $p$ - $n$  границей, и испытывает колебания в зависимости от амплитуды волны.

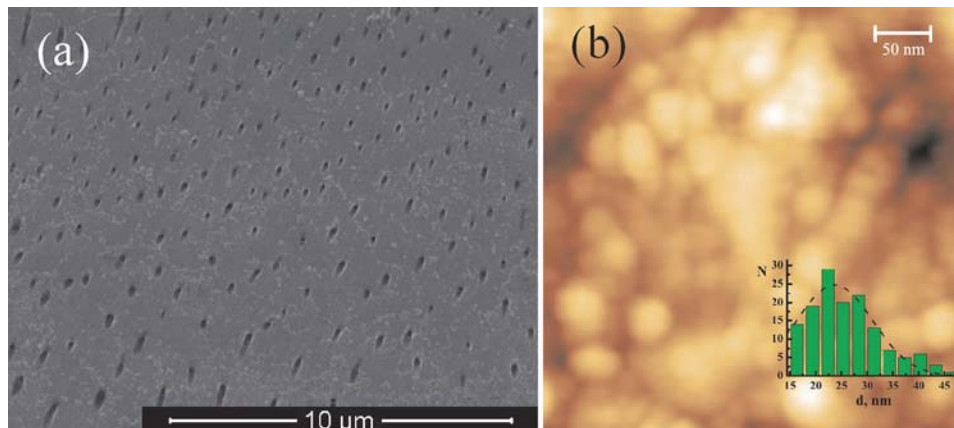


Зависимость осциллирующей части кондактанса  $p$ - $n$ -перехода на основе графена от нормированной амплитуды падающей электромагнитной волны большой интенсивности



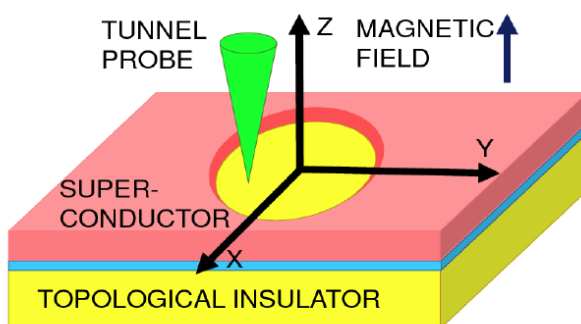
Проанализирован вклад котуннелирования в зарядовую релаксацию квантовых точек при низких температурах в режиме сильной кулоновской блокады. Продемонстрировано существенно нефермижидкостное поведение транспортных характеристик квантовых точек в таких условиях. Данные результаты должны найти непосредственное приложение в наноэлектронике.

8. Исследованы структурные и магнитные свойства разбавленных магнитных полупроводников, в частности,  $\text{In}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Sb}$  с  $x = 0.005-0.06$ , проведены измерения ядерного магнитного резонанса, изучена их структура с помощью рентгеновской дифрактометрии, атомно-силового микроскопа и сканирующей электронной микрокопии [18,19,26,27,30]. Структурные исследования показали наличие наногранул  $\text{MnSb}$  со средним размером около 24 нм, при большой концентрации марганца часть из них образовывала кластеры размером 100 – 600 нм. Магнитный гистерезис наблюдался до температур 510 К и связан с наличием ферромагнитных гранул  $\text{MnSb}$ . Кроме этого, был обнаружен суперпарамагнитный вклад, связанный с наличием марганцевых комплексов, преимущественно димеров. При низких температурах (менее 10 К) наблюдался переход в ферромагнитное состояние в матрице. Полученные результаты открывают новое направление исследований в области спинтроники.



Изображение (a), полученное на сканирующем электронном микроскопе, иллюстрирует наличие включений  $\text{MnSb}$ , (b) – увеличенное изображение включения  $\text{MnSb}$ , полученное с помощью атомно-силового микроскопа. Включение представляет собой кластер наногранул различных размеров. На вставке показано распределение наногранул по размерам, аппроксимированное гауссовой функцией.

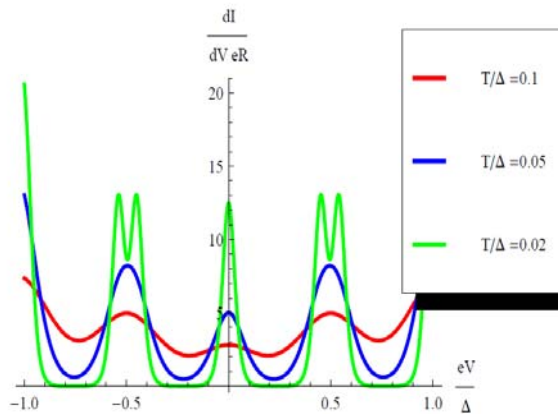
9. В 1937 году итальянский физик Этторе Майорана вывел уравнение Майорана, описывающее массивные релятивистские частицы со спином  $1/2$ . Это уравнение эквивалентно уравнению Дирака, за одним лишь исключением. Оно предсказывает существование фермиона, который является своей собственной античастицей, что невозможно для обычных дираковских фермионов. В силу коммутационных соотношений Ферми-Дирака подобная частица должна подчиняться неабелевой статистике. Такая гипотетическая частица и получила название фермион Майораны. Среди элементарных частиц на роль майорановского фермиона претендует нейтрино. В последние годы,



благодаря достижениям технологии, появилась возможность реализовать квазичастицу типа фермионы Майораны в наноразмерных гетероструктурах. Интерес к фермиону Майораны связан не только с проблемами фундаментальной физики. Частица с неабелевой статистикой может быть использована для квантовых вычислений.

Одной из перспективных систем для наблюдения фермиона Майораны является гетероструктура сверхпроводник-топологический диэлектрик (см. рисунок) с

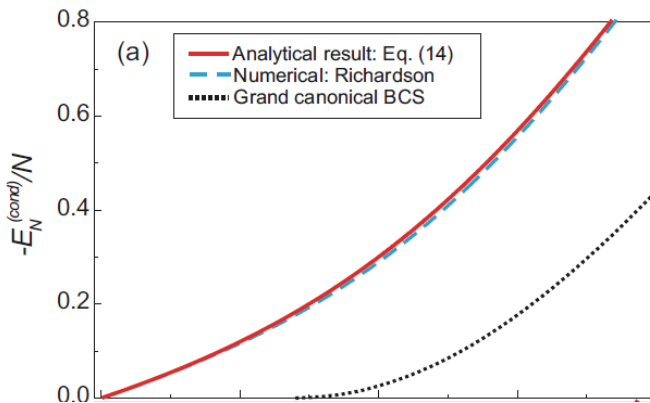
запиннигованным на специально созданном диэлектрическом дефекте вихрем Абрикосова [16,31]. Была проведена численная оптимизация такой гетероструктуры и найдена область параметров, в которой квантовый уровень, соответствующий фермиону Майораны, может быть уверенно обнаружен в туннельном эксперименте. Фермион Майораны возникает на поверхности топологического диэлектрика за счет наведенной сверхпроводимости. При наличии дефекта в коре вихря пропадают состояния Кароли-де Жена-Матрикона. Если размер дефекта порядка глубины когерентности, то его наличие не приводит к возникновению близкорасположенных возбужденных состояний на поверхности топологического диэлектрика.



Фермион Майораны проявляет себя как пик туннельной проводимости при нулевом напряжении между туннельным электродом и системой ( $V=0$ ). Амплитуда данного пика должна зависеть от магнитного поля. Кроме состояния, соответствующего фермиону Майораны, в коре вихря локализованы немайорановские возбужденные состояния. На туннельном спектре такие состояния соответствуют пикам при конечных напряжениях  $V$ .

10. Изучение электродинамики, термодинамики и кинетики, а также флуктуаций в сверхпроводящих наноструктурах интересно с фундаментальной и прикладной точек зрения. Отметим, что уже сейчас сверхпроводящие nanoостровки используются в высокочувствительных фотодетекторах.

Проведено обобщение вероятностного подхода к решению уравнений Ричардсона для описания электродинамики ультрамалых сверхпроводящих гранул и сверхпроводников с низкой концентрацией носителей [15]. Показано, что теория Бардина-Купера-Шриффера перестает давать точные результаты для энергии основного состояния системы, когда расстояние между уровнями оказывается сопоставимым с энергией связи единичной пары. Проведено сравнение многочастичных функций Ричардсона и вариационной функции теории Бардина-Купера-Шриффера. Рассмотрены температурные флуктуации вихревых кластеров в ультратонких островках из свинца. Объяснено наблюдавшееся в экспериментах размытие сердцевин вихрей. Данные результаты важны для развития сверхпроводниковой наноэлектроники.

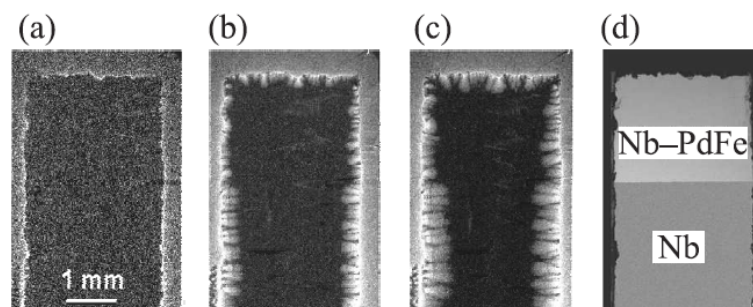


Зависимость средней энергии куперовской пары в сверхпроводящей наночастице от энергии связи (численный расчёт и аналитическая теория). Чёрная пунктирная линия отвечает БКШ пределу.

Нами также проанализирована возможность квантового туннелирования вихрей Абрикосова через поверхностный барьер в ультратонких сверхпроводящих наноструктурах [28]. Построена фазовая диаграмма и оценены вероятности квантового туннелирования и термической активации. Предсказано, что поверхностный барьер на выход вихря из системы подавляется преимущественно за счет температурных флуктуаций, тогда как квантовые флуктуации подавляют барьер на вход вихря [37].

11. Свойства контактов сверхпроводник-ферромагнетик в настоящее время являются объектом интенсивного изучения. С помощью таких гетероструктур можно эффективно управлять током в джозефсоновских переходах с помощью внешнего магнитного поля.

Нами и нашими коллегами-экспериментаторами из ИТФ РАН (Черноголовка) были изучены магнитные свойства гибридных тонкопленочных структур  $\text{Pd}_{0.99}\text{Fe}_{0.01}\text{-Nb}$ . Показано, что при температуре ниже 14 К в образцах возникает ферромагнитное упорядочение с образованием слабо взаимодействующих ферромагнитных нанокластеров. Близость ферромагнитного слоя не подавляет сверхпроводимости в ниобии, не изменяет критической температуры перехода в сверхпроводящее состояние, но усиливает пиннинг и увеличивает критический ток примерно на 30%, что согласуется с представлениями о нанокластерной магнитной структуре ферромагнитной пленки [17]. Полученные результаты принципиально важны для понимания физических процессов в гетероструктурах нанокластерный ферромагнетик-сверхпроводник и для создания приборов, основанных на использовании уникальных характеристик таких наноструктур.



Магнитооптическое изображение проникновение поперечного магнитного потока в тонкую гибридную плёнку  $\text{PdFe-Nb}$  при  $T = 6\text{K}$ . Приложенное поле равно 3 Э (a), 8 Э (b) и 12 Э (c). На рис. (d) показана поверхность образца.

12. Переход сверхпроводников в нормальное состояние подробно изучен в литературе (В. А. Альтов, В. Б. Зенкевич, М. Г. Кремлев, В. В. Сычев, Стабилизация сверхпроводящих магнитных систем, М: 1981 (2008), А.В Гуревич, Р.Г. Минц, А.Л. Рахманов, Физика композитных сверхпроводников, М: Наука (1984)). Изучение такого перехода – это центральная задача прикладной сверхпроводимости, поскольку именно тепловая неустойчивость сверхпроводника, несущего ток, является основной причиной ограничивающей величину транспортного тока в электротехнических сверхпроводящих устройствах. Кажется, сценарии перехода для ВТСП и традиционных сверхпроводников отличаются лишь количественно. Однако, различия в картине их перегрева более существенны, чем разница в численных оценках (V. S. Vysotsky, V. E. Sytnikov, A. L. Rakhmanov, Y. Ilyin, Fusion Eng. and Design, 81, 2417 (2006)). Одним из новых сценариев развития перехода в ВТСП может быть так называемый переход с обострением, который



характерен для систем с нелинейным тепловыделением (Samaraskii A.A., Galaktionov V.A., Kurdyumov S.P., Mikhailov A.P., Grinfeld M., Blow-Up in Quasilinear Parabolic Equations, Walter De Gruyter Inc, Berlin, 1995 ).

При развитии режима с обострением горячая область локализована, а температура обращается в бесконечность за конечное время. Было показано, что режим с обострением реализуется не только при



тепловом разрушении сверхпроводимости, но и при индуцируемом током переходе металл-диэлектрик. Такой эффект обнаружен, например, в пленках оксида ванадия. Две совершенно разные системы ведут себя схожим образом при развитии перегрева: тепло локализуется. В одном случае (левый снимок) – это исходно сверхпроводник, разогрев на сотни градусов, ток огромный плотности течет поперек области разогрева. Во втором случае (правый снимок) – это исходно диэлектрик, разогрев на 3-5 градусов, слабый ток течет вдоль разогретой области [3,32].

### **Сотрудничество**

Ученые лаборатории сотрудничают со многими своими коллегами, как теоретиками, так и экспериментаторами, из России и других стран. Это сотрудничество происходит в рамках многочисленных совместных российских и международных проектов, по программам Visiting scientist, а также на неформальной основе. Обширность контактов иллюстрируется, в частности, составом автором публикаций.

#### **РФ**

- Объединенный институт высоких температур РАН,
- Институт физики твердого тела РАН,
- Институт физических проблем РАН им. П.Л. Капицы,
- Институт теоретической физики РАН им Л.Д. Ландау,
- Институт физики металлов Уро РАН,
- РИЦ ИАЭ им. И.В. Курчатова.

#### **Зарубежное**

- Институт физических и химических проблем, г. Вакоши, Япония (RIKEN),
- Университет Лафборо (Великобритания),
- Университет Атверпена (Бельгия),
- Университет Пьера и Марии Кюри (Париж, Франция),
- Университет Кельна,
- Университет Рима.

В рамках совместных проектов имеется сотрудничество с учеными из Израиля, Индии и США.

### **Важнейшие публикации**

1. V.A. Yampol'skii, S.E. Savel'ev, A.L. Rakhmanov, and Franco Nori, Terahertz Josephson plasma waves in layered superconductors: spectrum, generation, nonlinear and quantum phenomena, Reports on Progress in Physics, **73**, id 026501 (2010).
2. A.V. Rozhkov, G. Giavaras, Yury P. Bliokh, Valentin Freilikher, Franco Nori, Electronic properties of mesoscopic graphene structures: Charge confinement and control of spin and charge transport, Physics Reports **503**, pp. 77-114 (2011).
3. Л.С. Успенская, А.Л. Рахманов, Динамические магнитные структуры в сверхпроводниках II рода и ферромагнетиках, Успехи физических наук, **182**, с. 681-699 (2012).
4. [A.O. Sboychakov](#), [Sergey Savel'ev](#), [A.L. Rakhmanov](#), and [F. Nori](#), Asymmetric Long Josephson Junction Acting as a Ratchet for a Quantum Field, Physical Review Letters, **104**, id 190602 (2010).
5. V.A. Golick, D.V. Kadygrob, V.A. Yampol'skii, A.L. Rakhmanov, B.A. Ivanov, F. Nori, [Surface Josephson Plasma Waves in Layered Superconductors above the Plasma Frequency: Evidence for a Negative Index of Refraction](#), Physical Review Letters, **104**, id 187003 (2010).



6. A.K. Sarychev, S.O. Boyarintsev, A.L. Rakhmanov, K.I. Kugel, Yu.P. Sukhorukov, Collective volume plasmons in manganites with nanoscale phase separation: Simulation of the measured infrared spectra of  $\text{La}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3$ , *Physical Review Letters*, **107**, 267401 (2011).
7. A. O'Hare, F.V. Kusmartsev, K.I. Kugel, A stable "flat" form of two-dimensional crystals: could graphene, silicene, germanene be minigap semiconductors?, *Nano Letters*, **12**, pp. 1045–1052 (2012).
8. [A. L. Rakhmanov](#), [A. V. Rozhkov](#), [A. O. Sboychakov](#), [Franco Nori](#), Instabilities of the AA-stacked graphene bilayer, *Physical Review Letters*, **109**, id. 206801 (2012).
9. A.V. Rozhkov, Non-Fermi, non-Luttinger liquid behavior of one-dimensional fermions, *Physical Review Letters*, **112**, id. 106403 (2014).
10. A.L. Rakhmanov, A.V. Rozhkov, A.O. Sboychakov, Franco Nori, Phase separation of antiferromagnetic ground states in systems with imperfect nesting, *Physical Review B* **87**, id. 075128 (2013).
11. A.O. Sboychakov, A.L. Rakhmanov, A.V. Rozhkov, Franco Nori, Metal-insulator transition and phase separation in doped AA-stacked graphene bilayer, *Physical Review B* **87**, id. 121401(Rapid communications) (2013).
12. A.O. Sboychakov, A.V. Rozhkov, A.L. Rakhmanov, Franco Nori, Antiferromagnetic states and phase separation in doped AA-stacked graphene bilayers, *Physical Review B* **88**, id. 045409 (2013).
13. A.O. Sboychakov, A.V. Rozhkov, K.I. Kugel, A.L. Rakhmanov, Franco Nori, Electronic phase separation in iron pnictides, *Physical Review B* **88**, id. 195142 (2013).
14. P.A. Maksimov, A.V. Rozhkov, A.O. Sboychakov, Localized electron states near the armchair edge of graphene, *Physical Review B*, **88**, id. 245421 (2013).
15. Walter V. Pogosov, Nansheng Lin, Vyacheslav R. Misko, Electron-hole symmetry and solutions of Richardson pairing model, *European Physical Journal B* **86**, id. 235 (2013).
16. R.S. Akzyanov, A.V. Rozhkov, A.L. Rakhmanov, Franco Nori, Tunneling spectrum of a pinned vortex with a robust Majorana state, *Physical Review B* **89**, id 085409 (2014).
17. Л.С. Успенская, А.Л. Рахманов, Л.А. Доросинский, А.А. Чугунов, В.С. Столяров, О.В. Скрыбина, С.В. Егоров, Магнитные свойства и пиннинг вихрей в гибридных структурах  $\text{Pd}_{99}\text{Fe}_{01}\text{-Nb}$ , *Письма в ЖЭТФ*, **97**, с. 176-179 (2013).
18. A.V. Kochura, B.A. Aronzon, K.G. Lisunov, A.V. Lashkul, A.A. Sidorenko, R. De Renzi, S.F. Marenkin, M. Alam, A.P. Kuzmenko, E. Lähderanta, Structural and magnetic properties of  $\text{In}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Sb}$ : Effect of Mn complexes and MnSb nanoprecipitates, *Journal of Applied Physics* **113**, id. 083905 (2013).
19. V.V. Rylkov, E.A. Gan'shina, O.A. Novodvorskii, S.N. Nikolaev, A.I. Novikov, E.T. Kulatov, V.V. Tugushev, A.B. Granovskii, V.Ya. Panchenko, Defect-induced high-temperature ferromagnetism in  $\text{Si}_{1-x}\text{Mn}_x$  ( $x \approx 0.52\text{--}0.55$ ) alloys, *Europhysics Letters* **103**, id. 57014 (2013).
20. S.V. Syzranov, Ya.A. Rodionov, K.I. Kugel, Franco Nori, Strongly anisotropic Dirac quasiparticles in irradiated graphene, *Physical Review B* **88**, id. 241112 (Rapid communications) (2013).
21. Vikram Tripathi, Kusum Dhochak, B.A. Aronzon, Bertrand Raquet, V.V. Tugushev, K.I. Kugel, Noise studies of magnetization dynamics in dilute magnetic semiconductor heterostructures, *Physical Review B* **85**, id. 214401 (2012).

22. [A.L. Rakhmanov](#), [A.V. Rozhkov](#), [A.O. Sboychakov](#), [Franco Nori](#), Phase separation of hydrogen atoms adsorbed on graphene and the smoothness of the graphene-graphane interface, *Physical Review B* **85**, id. 035408 (2102).
23. S. Savel'ev, A.M. Zagoskin, A.L. Rakhmanov, A.N. Omelyanchouk, Z. Washington, Franco Nori, [Two-qubit parametric amplifier: Large amplification of weak signals](#), *Physical Review A*, **85**, id. 013811 (2102).
24. A.V. Rozhkov, Different types of dimensional crossover in quasi-one-dimensional spinless fermion systems, *Physical Review B*, **85**, id. 045106 (2012).
25. Yuimaru Kubo, A.O. Sboychakov, Franco Nori, Y. Takahide, S. Ueda, I. Tanaka, A.T.M.N. Islam, Y. Takano, Macroscopic quantum tunneling and phase diffusion in a  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  intrinsic Josephson junction stack, *Physical Review B* **86**, id.144532 (2012).
26. M.A. Pankov, B.A. Aronzon, V.V. Rylkov, A.B. Davydov, V.V. Tugushev, S. Caprara, I.A. Likhachev, E.M. Pashaev, M.A. Chuev, E. Lähderanta, A.S. Vedeneev, A.S. Bugaev, Peculiarities of Hall effect in  $\text{GaAs}/\text{Mn}/\text{GaAs}/\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$  ( $x = 0.2$ ) heterostructures with high Mn content, *European Physical Journal B*, **85**, pp. 206-207 (2012).
27. В.В. Рыльков, С.Н. Николаев, К.Ю. Черноглазов, Б.А. Аронзон, К.И. Маслаков, В.В. Тугушев, Э.Т. Кулатов, И.А. Лихачев, Э.М. Пашаев, А.С. Семисалова, Н.С. Перов, А.Б. Грановский, О.А. Новодворский, О.Д. Храмова, Е.В. Хайдуков, В.Я. Панченко, Высокотемпературный ферромагнетизм нестехиометрических сплавов  $\text{Si}_{1-x}\text{Mn}_x$  ( $x \approx 0.5$ ), Письма в ЖЭТФ, **96**, с. 272-280 (2012).
28. W.V. Pogosov, V.R. Misko, Vortex quantum tunnelling versus thermal activation in ultrathin superconducting nanoislands, *Physical Review B*, **85**, id. 224508 (2012).
29. A.O. Sboychakov, K.I. Kugel, A.L. Rakhmanov, and D.I. Khomskii, [Relationship between orbital structure and lattice distortions in Jahn-Teller systems](#), *Physical Review B* **83**, 205123 (2011).
30. Vikram Tripathi, Kusum Dhochak, B.A. Aronzon, V.V. Rylkov, A.B. Davydov, Bertrand Raquet, Michel Goiran, K.I. Kugel, Charge inhomogeneities and transport in semiconductor heterostructures with a Mn  $\delta$ -layer, *Physical Review B*, **84**, 075305 (2011).
31. A. L. Rakhmanov, A. V. Rozhkov, and Franco Nori, Majorana fermions in pinned vortices, *Physical Review B* **84**, 075141 (2011)
32. В.В. Костюк, А.Л. Рахманов, Электродинамика высокотемпературных сверхпроводников, глава в сборнике «Инновационные технологии в энергетике», стр. 73-100, Москва: Наука, ISBN 978-02-03746-3-8 (2010).
33. A.L. Rakhmanov, V.A. Yampol'skii, J.A. Fan, F. Capasso, and F. Nori, [Layered superconductors as negative-refractive-index metamaterials](#), *Physical Review B*, **81**, id 075101 (2010).
34. A.V. Kalinov, O.Yu. Gorbenko, A.N. Taldenkov, J. Rohrkamp, O. Heyer, S. Jodlauk, N.A. Babushkina, L.M. Fisher, A.R. Kaul, A.A. Kamenev, T.G. Kuzmova, D.I. Khomskii, K.I. Kugel, and T. Lorenz, Phase diagram and isotope effect in  $(\text{Pr}_{1-y}\text{Eu}_y)_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{CoO}_3$  cobaltites exhibiting spin-state transitions, *Physical Review B*, **81**, id. 134427 (2010).
35. Н.А. Бабушкина, А.Н. Талденков, А.В. Калинов, Л.М. Фишер, О.Ю. Горбенко, Т. Лоренц, Д.И. Хомский, К.И. Кугель, Изотопический эффект и особенности фазовой диаграммы кобальтитов, испытывающих переходы с изменением спинового состояния, ЖЭТФ, **138**, 215 (2010).
36. A.V. Rozhkov and F. Nori, Exact wave functions for an electron on a graphene triangular quantum dot, *Physical Review B*, **81**, id.155401 (2010)

37. W.V. Pogosov, Thermal suppression of surface barrier in ultrasmall superconducting structures, *Physical Review B*, **81**, id.184517 (2010).
38. W. V. Pogosov, V. R. Misko, and F. M. Peeters, Geometry-induced localization of thermal fluctuations in ultrathin superconducting structures, *Physical Review B*, **82**, id. 054523 (2010).
39. W. V. Pogosov, H. J. Zhao, V. R. Misko, and F. M. Peeters, Kink-antikink vortex transfer in periodic-plus-random pinning potential: Theoretical analysis and numerical experiments, *Physical Review B*, **81**, id. 024513 (2010).
40. W. V. Pogosov and M. Combescot, "Moth-eaten effect" driven by Pauli blocking, revealed for Cooper pairs, *Письма в ЖЭТФ*, **92**, стр. 534 (2010).
41. W. V. Pogosov, M. Combescot, and M. Crouzeix, Two-Cooper-pair problem and the Pauli exclusion principle, *Physical Review B*, **81**, id. 174514 (2010).