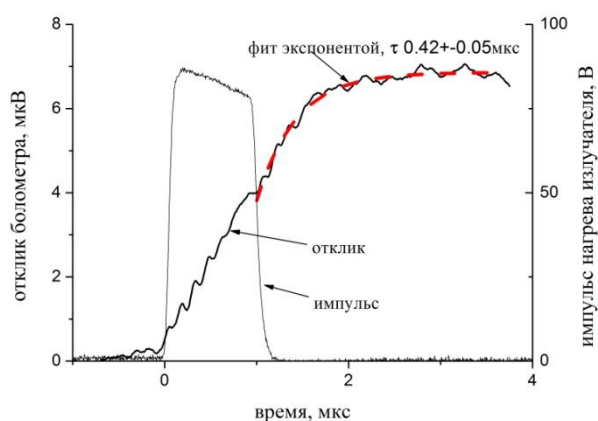


Важнейшие результаты исследований  
в области физики низких температур в 2018 году

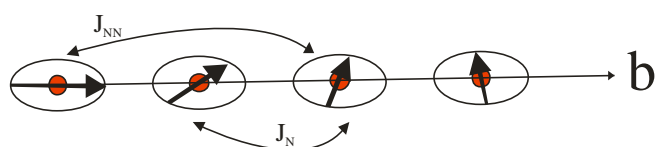
Разработана оригинальная методика измерения быстроты отклика низкотемпературных болометров на основе туннельных переходов сверхпроводник–изолятор–нормальный металл–изолятор–сверхпроводник (СИНИС). При температуре болометров 0.1–0.3 К измерено время нарастания сигнала болометра при облучении на частоте 350 ГГц, генерируемым при нагреве черного тела мощным коротким импульсом тока. Впервые экспериментально показано, что время реакции СИНИС болометров составляет 0.5–2 мкс (см. рисунок), что позволяет создавать приемники излучения с чувствительностью, сравнимой с лучшими известными аналогами, но с временем отклика на три порядка более коротким.



С.А. Лемзяков, М.А. Тарасов, В.С. Эдельман, «Исследование быстродействия СИНИС-болометра на частоте 350 ГГц», ЖЭТФ, **153**, 992 (2018)

ИФП РАН, ИРЭ РАН

Обнаружены методом ЯМР и теоретически исследованы фазы с эллиптическим магнитным упорядочением в цепочечном антиферромагнетике с фрустрацией  $\text{LiCu}_2\text{O}_2$ . 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  $\text{LiCu}_2\text{O}_2$  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.



На рисунке приведены ориентации магнитных моментов ионов меди на узлах одной из цепочек магнитных ионов с фрустрацией обменных связей. Спиновая плоскость совпадает с плоскостью рисунка.

A. A. Bush, N. Büttgen, A. A. Gippius, M. Horvatić, M. Jeong, W. Kraetschmer, V. I. Marchenko, Yu. A. Sakhratov, L. E. Svistov, “Exotic phases of frustrated antiferromagnet  $\text{LiCu}_2\text{O}_2$ ”, *Phys. Rev. B* **97**, 054428 (2018)

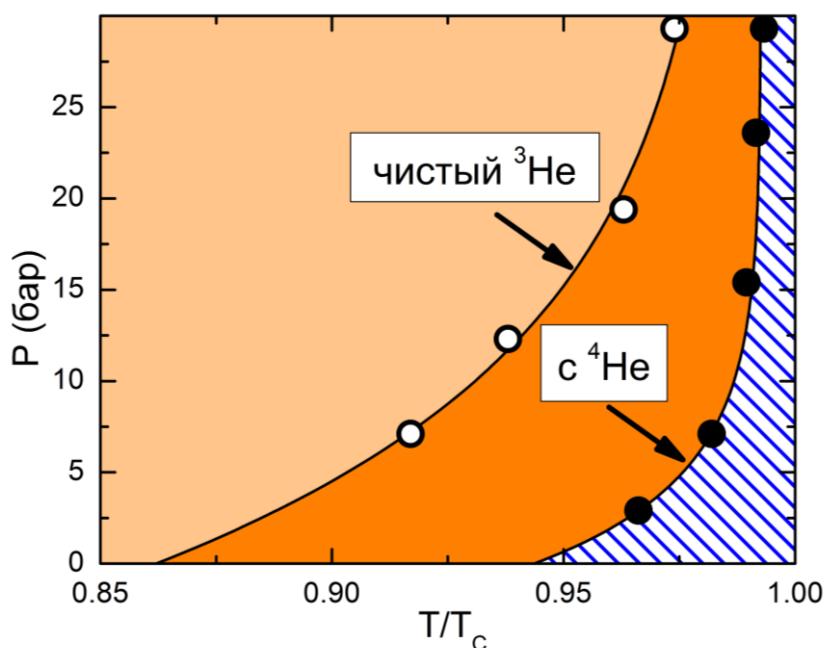
ИФП РАН, ФИАН, МИРЭА, МГУ, КЭУ, Center for Electronic Correlations and Magnetism EKM, Experimentalphysik V, Universität Augsburg, Germany; Laboratoire National des Champs Magnétiques Intenses, LNCMI-CNRS (UPR3228), EMFL, UGA, UPS, and INSA, Grenoble Cedex, France

Для квазиодномерного антиферромагнетика  $\text{K}_2\text{CuSO}_4\text{Cl}_2$  обнаружена и исследована особая модификация спектра спинов, специфических элементарных возбуждений одномерного антиферромагнетика. В нулевом внешнем поле обнаружена энергетическая щель в спектре двухспионного континуума, возникающая в результате действия однородного взаимодействия Дзялошинского-Мории. В то же время, из ожидаемого дублета тонкой структуры, порождаемого этим взаимодействием, видна только одна компонента, а в области частот ниже щели, в магнитном поле, наблюдаются не отдельные резонансы, а широкая зона поглощения, перекрывающая ларморовскую моду и область тонкой структуры. Наблюдаемые особенности спектра спиновых возбуждений объясняются совместным действием взаимодействия Дзялошинского-Мории и слабого межцепочечного обмена, в результате чего общий вид спектра соответствует кроссоверу от спионного дублета к ларморовскому резонансу гейзенберговской системы. Эти результаты, вместе с полученными ранее данными, определяют модификацию спионного континуума вблизи центра зоны Бриллюэна как в идеальных условиях малости межцепочечного обмена по сравнению с энергией взаимодействия Дзялошинского-Мории, так и в условиях, когда указанные слабые взаимодействия сравнимы друг с другом, но все еще значительно меньше основного внутрицепочечного обмена.

T.A. Soldatov, A.I. Smirnov, K.Yu. Povarov, M. Hälg, W.E. A. Lorenz, and A. Zheludev, “Spin gap in the quasi-one-dimensional  $S=1/2$  antiferromagnet  $\text{K}_2\text{CuSO}_4\text{Cl}_2$ ”, *Phys. Rev. B* **98**, 144440 (2018)

ИФП РАН, Швейцарская федеральная высшая техническая школа

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. Анализ результатов показывает, что наблюдаемые явления не объясняются только изменением диффузности рассеяния, и выдвинуто предположение о важности магнитного канала. Полученные данные стимулировали теоретические исследования и важны для исследований не только сверхтекучести  $^3\text{He}$ , но и сверхпроводимости с триплетным спариванием.

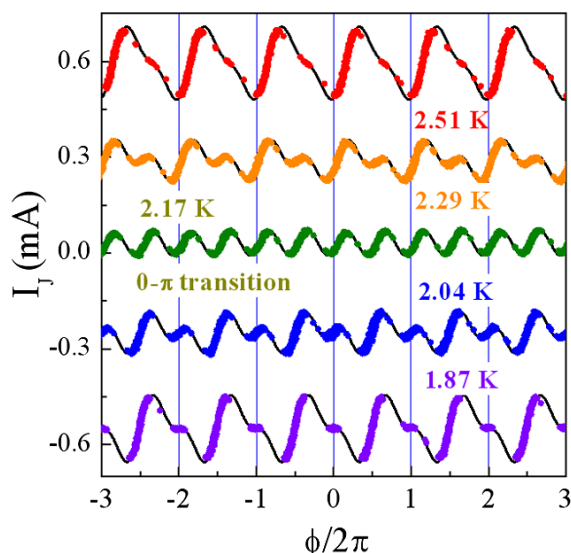


Температура сверхтекучего перехода  $^3\text{He}$  в нафене в чистом  $^3\text{He}$  и при достаточном покрытии нитей гелием-4. Температурная шкала нормирована на температуры сверхтекучего перехода ( $T_c$ ) в объемном  $^3\text{He}$  при соответствующих давлениях (от 0.93 мК при  $P=0$  бар до 2.44 мК при  $P=30$  бар).

Dmitriev V.V., Soldatov A.A., Yudin A.N., “Effect of Magnetic Boundary Conditions on Superfluid  $^3\text{He}$  in Nematic Aerogel”, Phys. Rev. Lett. **120**, 075301 (2018)

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 anomalous « $\pi$ -периодическое» соотношение между сверхпроводящим током и разностью фаз на джозефсоновском контакте [1]. 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. Наблюдение нового состояния стало возможным в результате существенного развития технологии приготовления джозефсоновских SFS-контактов в ИФТТ РАН [2].

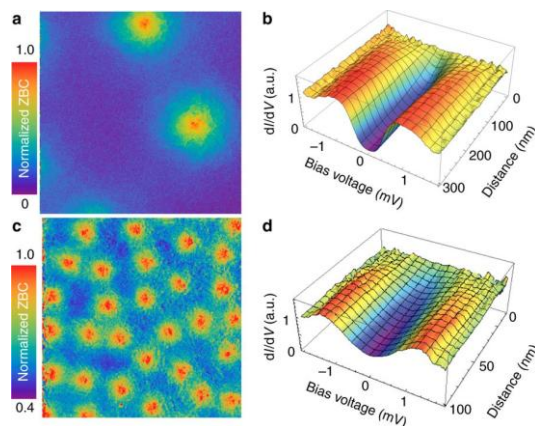


Изменение с температурой периода зависимости сверхпроводящего тока  $I_J$  через джозефсоновский SFS контакт от разности фаз  $\phi$  на нем. При температуре 2,17 К перехода в состояние с инверсией сверхпроводящих фаз ( $\pi$ -состояние) период становится вдвое меньше, что соответствует «чистому» переносу сверхпроводящего тока парами куперовских пар, то есть зарядом  $4e$  (где  $e$  - заряд электрона).

1. M.J.A. Stoumou, A.N. Rossolenko, V.V. Bolginov, V.A. Oboznov, A.Y. Rusanov, D.S. Baranov, N. Pugach, S.M. Frolov, V.V. Ryazanov, and D.J. Van Harlingen, “Second-Harmonic Current-Phase Relation in Josephson Junctions with Ferromagnetic Barriers”, Phys. Rev. Lett. 121, 177702 (2018)
2. V.V. Bolginov, A.N. Rossolenko, A.B. Shkarin, V.A. Oboznov, V.V. Ryazanov, “Fabrication of Optimized Superconducting Phase Inverters Based on Superconductor-Ferromagnet-Superconductor Junction”, Journ. Low Temp. Phys. 190 (5-6), 302 (2018)

ИТФФ РАН, МФТИ, МИСИС, ВШЭ, МГУ, Department of Physics, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, USA, <sup>7</sup>Department of Physics and Astronomy, University of Pittsburgh, USA

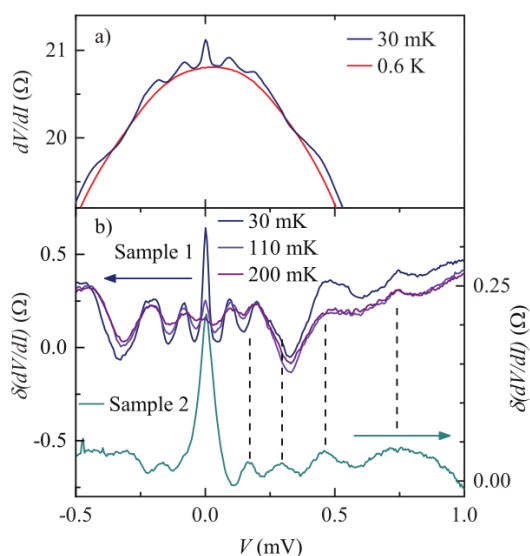
Как экспериментально, так и теоретически показано, что квантованный вихрь с четко определенным ядром (нормальным кором) может существовать в довольно толстом слое нормального металла, находящемся в контакте со сверхпроводником. С помощью сканирующей туннельной спектроскопии обнаружена вихревая решетка на поверхности медного слоя толщиной 50 нм, нанесенного на сверхпроводящий ниобий. Вихри имеют регулярные нормальные коры в центрах, в которых исчезает наведенная в нормальном металле сверхпроводящая «минищель». Коры в нормальном слое значительно больше, чем коры абрикосовских вихрей в ниобиевом слое, что связано с большей длиной когерентности сверхпроводящих пар в нормальной меди. Представлен также теоретический подход, который обеспечивает полностью самосогласованную картину эволюции вихря с удалением от интерфейса Cu/Nb с учетом сопротивления интерфейса, величины приложенного магнитного поля и температуры. Данная работа открывает путь для точной настройки свойств сверхпроводящих вихрей в гибридных структурах.



(a, c) STM изображения коров вихрей на поле сканирования  $800 \text{ нм} \times 800 \text{ нм}$ , полученные при 300 мК в магнитных полях 5 и 55 мТл, соответственно; (b, d) радиальная эволюция спектров туннельной проводимости вблизи коров вихрей. Приложенные магнитные поля такие же, как в (a, c).

ИФТТ, МФТИ

В топологических полуметаллах зона проводимости касается валентной зоны в особых точках зоны Бриллюэна (узлах). В вейлевском полуметалле каждый вейлевский узел характеризуется определённой киральностью. В  $k$ -пространстве на поверхности вейлевского полуметалла Ферми-контуры представляют собой незамкнутые дуги, соединяющие проекции вейлевских на поверхностную зону. Такие экзотические поверхностные состояния получили название «Ферми-арок». Мы экспериментально исследовали транспорт через интерфейс между Вейлевским полуметаллом  $WTe_2$  и сверхпроводящим ниобием. В спектрах дифференциального сопротивления  $dV/dI(V)$  на фоне стандартного андреевского отражения были обнаружены неперриодические резонансы внутри сверхпроводящей щели Nb (см рисунок), которые возникают как Томашевские геометрические осцилляции для транспорта вдоль топологического поверхностного состояния с наведенной сверхпроводимостью вблизи интерфейса Nb- $WTe_2$ . Наблюдение отчетливых геометрических резонансов предполагает наличие выделенного направления движения заряда в поверхностном состоянии, что было теоретически предсказано для Ферми-арок в вейлевских полуметаллах.



A. Kononov, O.O. Shvetsov, S.V. Egorov, A.V. Timonina, N. N. Kolesnikov and E.V. Deviatov, “Signature of Fermi arc surface states in Andreev reflection at the  $WTe_2$  Weyl semimetal surface”, EPL (Europhysics Letters), **122**, 27004 (2018)

ИФТТ РАН

Теоретически исследовано влияние сильных примесей на теплоперенос в связанной системе электронов и фононов в неупорядоченном графене. Проведен подробный анализ теплообмена между электронами и фононами, усиленного посредством механизма «резонансных суперстолкновений». Рассчитана локальная модификация теплопереноса в слабо неупорядоченном графене, определены пространственные профили фононной и электронной температур в окрестности рассеивателя под действием электрического тока.

Результаты находятся в согласии с недавними экспериментами по визуализации резонансного рассеяния на отдельных атомных дефектах при помощи наносквида.

K.S. Tikhonov, I.V. Gornyi, V.Y. Kachorovskii, A.D. Mirlin, "Resonant supercollisions and electron-phonon heat transfer in graphene", *Phys. Rev. B* **97**, 085415 (2018)

ИТФ РАН

Развита 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  $B_{c2}$ . Показано, что полученный результат приводит к объяснению давно известной из экспериментов аномалии - ненулевого наклона кривой  $B_{c2}(T)$  при температуре, стремящейся к нулю.

B. Sacépé, J. Seidemann, F. Gay, K. Davenport, A. Rogachev, M. Ovadia, K. Michaeli, M.V. Feigel'man, "Low-temperature anomaly in disordered superconductors near  $B_{c2}$  as a vortex-glass property", *Nature Physics*, **14**, No. 10 (October 8, 2018)

ИТФ РАН

Показано, что сложная зависимость от положения уровня Ферми проводимости квазиодномерных проводников (полосок, трубок) с малой концентрации примесей может являться следствием квантования поперечного движения электронов и неборновского характера рассеяния на примесях. В случае отталкивающих примесей структура особенности имеет форму "плато-минимум-максимум-плато", а в случае притяжения - "плато-максимум-минимум-максимум-плато"

A.S. Ioselevich, N.S. Peshcherenko, "Asymmetric features in the resistivity of clean quasi-one-dimensional systems: Fano resonances or non-Born effects?", *Письма в ЖЭТФ*, **108**, 825 (2018)

ИТФ РАН

Вычислена средняя плотность состояний и температура перехода в грязной сверхпроводящей пленке с редкими классическими магнитными примесями произвольной силы, имеющими пуассоновское распределение. Обнаружено, что мезоскопические флуктуации приводят к ненулевой средней плотности состояний для всех энергий в области фазовой диаграммы, где без этого эффекта средняя плотность состояний равна нулю в рамках стандартной теории среднего поля Абрикосова-Горькова. Предлагаемый механизм заполнения щели оказывается более эффективным, чем редкие флуктуации потенциального беспорядка (инстантоны).

I.S. Burmistrov, M.A. Skvortsov, "Magnetic disorder in superconductors: Enhancement by mesoscopic fluctuations", *Phys. Rev. B* **97**, 014515 (2018)

ИТФ РАН

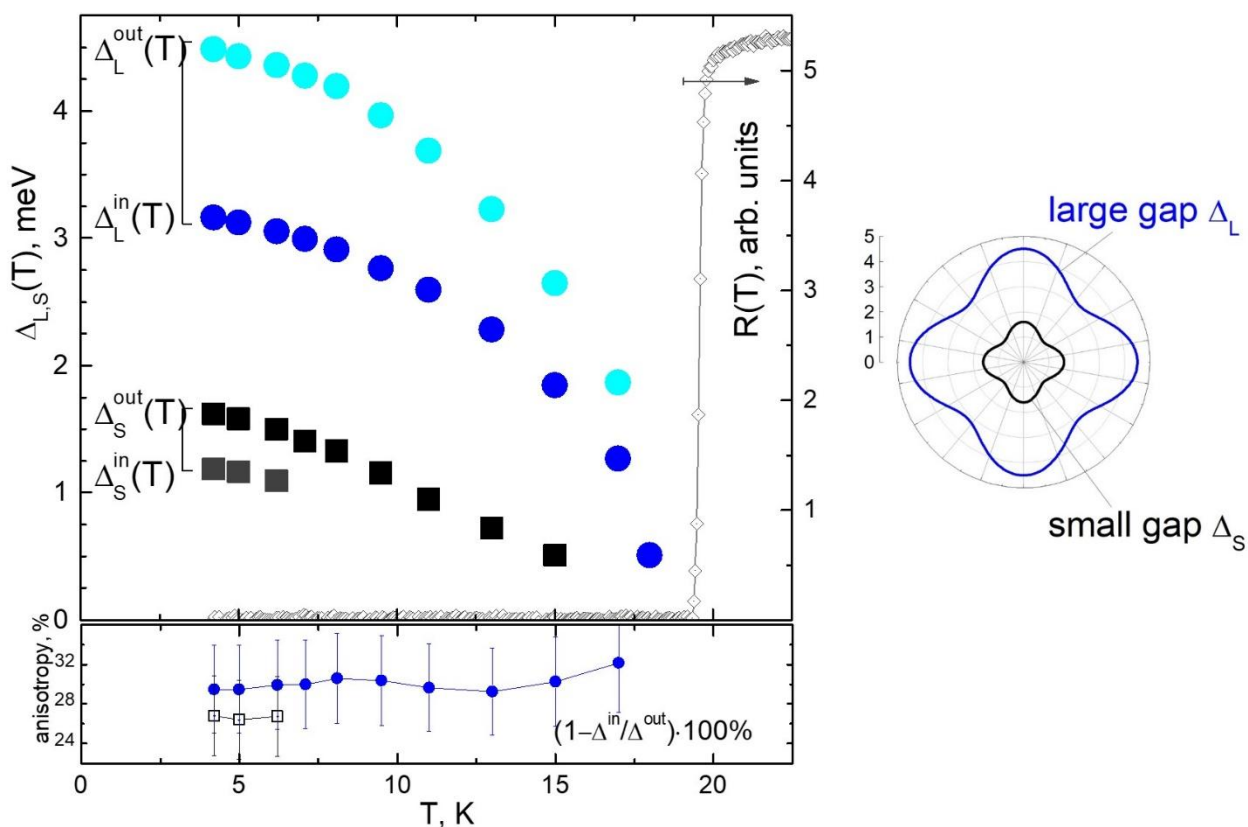
Исследованы свойства двумерного топологического изолятора - квантовой ямы в HgTe при перестройке электронного спектра гидростатическим давлением до 15.1 кБар. Установлено, что при нормальном давлении транспорт хорошо описывается двухзонной

квазиклассической моделью. Однако при повышении давления свойства структуры изменяются немонотонно, а выше 14 кБар сопротивление и магнитосопротивление резко изменяются, указывая на образование новой электронной фазы.

V.A. Prudkoglyad, E.B. Olshanetsky, Z.D. Kvon, V.M. Pudalov, N.N. Mikhailov, S.A. Dvoretzky, "Two-dimensional semimetal in HgTe quantum well under hydrostatic pressure", Phys. Rev. B **98**, 155437 (2018)

ФИАН, ИФП СО РАН, НГУ

Методами спектроскопии многократных андреевских отражений исследована структура сверхпроводящего параметра порядка в железосодержащих пниктидах  $\text{Ba}(\text{Fe},\text{Ni})_2\text{As}_2$  и  $(\text{Ba},\text{K})\text{Fe}_2\text{As}_2$  с критическими температурами  $T_c=17-38$  К. Напрямую установлена значительная анизотропия параметров порядка в базальной плоскости и отсутствие точек нулей, измерены температурные зависимости большой и малой сверхпроводящей щели. Показано, что основную роль в механизме сверхпроводимости играет сильное внутризонное взаимодействие.



Температурная зависимость экстремумов большой щели (кружки) и малой щели (квадраты), а также резистивный сверхпроводящий переход монокристалла  $\text{Ba}(\text{Fe},\text{Ni})_2\text{As}_2$ . Внизу: температурная зависимость степени анизотропии обеих щелей. Справа схематически показано угловое распределение параметров порядка в базальной плоскости.

1. Т.Е. Кузьмичева, С.А. Кузьмичев, А.А. Кордюк, В.М. Пудалов, «Структура и анизотропия сверхпроводящего параметра порядка  $\text{Ba}_{0.65}\text{K}_{0.35}\text{Fe}_2\text{As}_2$  методом андреевской спектроскопии», Письма в ЖЭТФ **107**, 47 (2018)

2. T.E. Kuzmicheva, S.A. Kuzmichev, A.V. Sadakov, S.Yu. Gavrilkin, A.Yu. Tsvetkov, X. Lu, H. Luo, A.N. Vasiliev, V.M. Pudalov, X.-J. Chen, and M. Abdel-Hafiez, “Superconducting gap symmetry in the superconductor BaFe<sub>1.9</sub>Ni<sub>0.1</sub>As<sub>2</sub>”, Phys. Rev. B **97**, 235106 (2018)

ФИАН, МГУ

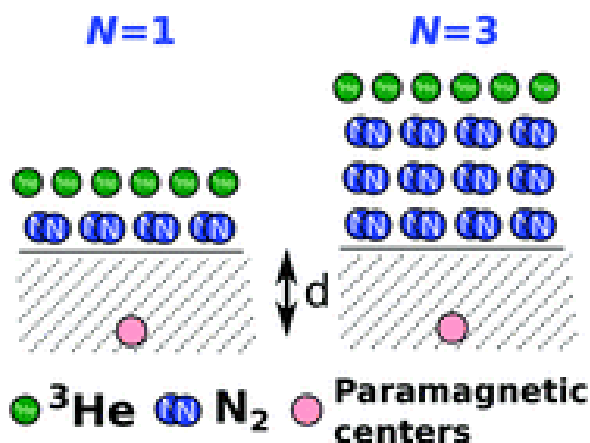
Показано, что в гибридных системах сверхпроводник-ферромагнетик (S/F) с эффектом близости проникновение куперовских пар в ферромагнетик вызывает обратный электромагнитный эффект близости – магнитное поле проникает из ферромагнетика в сверхпроводник на расстояние порядка лондоновской длины, что сопровождается появлением спонтанных экранирующих токов. Показано, что эффект близости в планарных S/F системах приводит к формированию неоднородных состояний Фульде-Феррелла-Ларкина-Овчинникова (ФФЛО) с модуляцией параметра порядка в плоскости слоев. Показана возможность перехода в состояние ФФЛО при температурах существенно ниже температуры сверхпроводящего фазового перехода. Низкотемпературный ФФЛО переход может быть инициирован изменением температуры и сопровождается подавлением мейсснеровского отклика. Температура перехода достигает нескольких кельвин для экспериментально реализуемых структур.

1. S. Mironov, A. Mel'nikov, A. Buzdin, Appl. Phys. Lett. 113, 022601 (2018).

2. S.V. Mironov, D.Yu. Vodolazov, Y. Yerin, A.V. Samokhvalov, A.S. Mel'nikov, A. Buzdin, Phys. Rev. Lett. 121, 077002 (2018).

ИФМ РАН (филиал ИПМ РАН); LOMA, University of Bordeaux, France

Предложен новый метод оценки расположения парамагнитных центров в нанодиамазах, основанный на измерении ядерной магнитной релаксации адсорбированного <sup>3</sup>He при низких температурах. Обнаружено сильное влияние парамагнитных центров образца на релаксацию продольной намагниченности ядер <sup>3</sup>He. Предварительная подготовка поверхности нанодиамазов адсорбированными слоями азота позволила изменять расстояние от ядер <sup>3</sup>He до парамагнитных центров контролируемым образом и определить их местоположение с использованием предложенной модели. Среднее расстояние, найденное от поверхности нанодиамаза до парамагнитных центров 0,5±0,1 нм, что подтверждает их расположение в углеродной оболочке нанодиамаза. Предлагаемый метод может быть применен для детальных исследований других наноматериалов при низких температурах.





Kuzmin V., Safiullin K., Dolgorukov G., Stanislavovas A., Alakshin E., Safin T., Yavkin B., Orlinskii S., Kiiamov A., Presnyakov M., Klochkov A., Tagirov M., “Angstrom-scale probing of paramagnetic centers location in nanodiamonds by  $^3\text{He}$  NMR at low temperatures”, *Phys. Chem. Chem. Phys.* **20**, 27694 (2018).

КТУ