

Важнейшие результаты исследований в области физики низких температур в 2021 году

Высокотемпературная сверхпроводимость в гидридах при температуре -20°C

И. А. Троян, И.С. Любутин, А.Г. Иванова (Институт кристаллографии РАН)

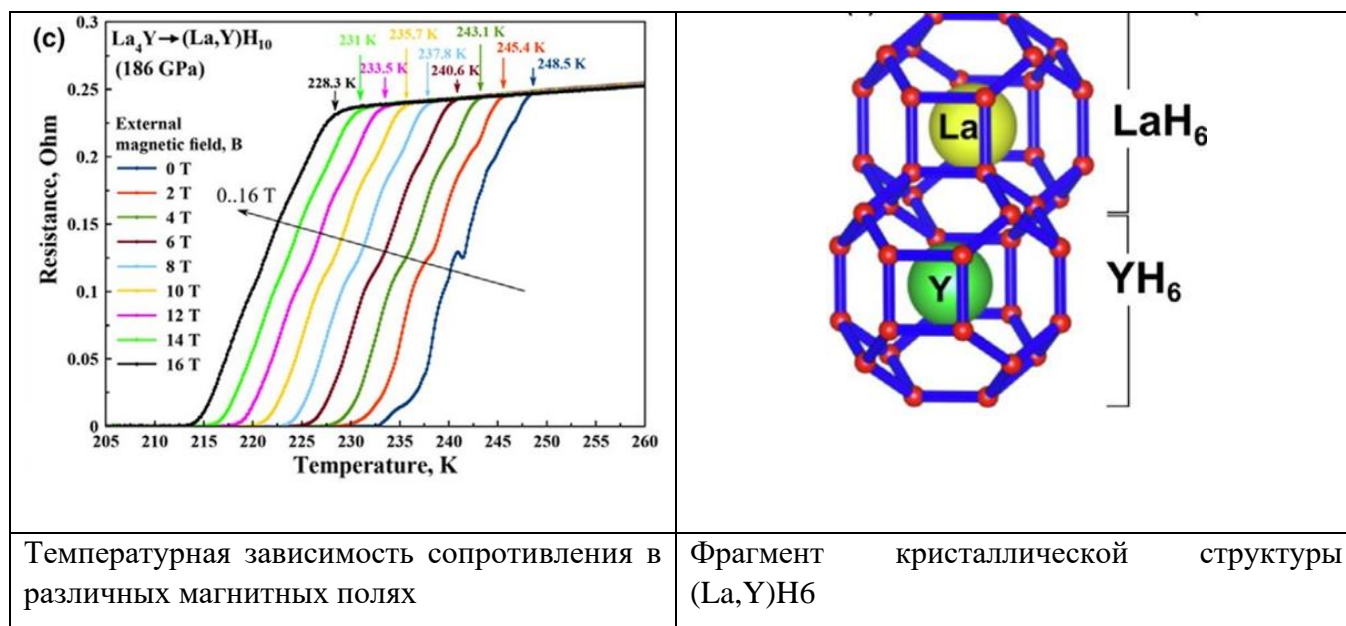
А. В. Садаков, О. А. Соболевский, В. М. Пудалов (ЦВСиКМ ФИАН)

А. Р. Оганов, Д. В. Семенов (Сколтех)

При давлениях МБ-диапазона методом лазерного синтеза созданы и изучены новые полигидриды. В них обнаружена и исследована сверхпроводимость с критическими температурами вблизи комнатной: LaH_6 ($T_c=224\text{K}$) и LaYH_{10} ($T_c=253\text{K}$). Измерены критические магнитные поля: 115-168Т (LaH_6), 135Т (LaYH_{10}) и критические токи: $\sim 3.5\text{kA/mm}^2$ (LaH_6) и $\sim 20\text{kA/mm}^2$ (LaYH_{10}).

1. D. V. Semenov, I. A. Troyan, A. G. Kvashnin, M. Hanfland, A. V. Sadakov, O. A. Sobolevskiy, S. Pervakov, V. M. Pudalov, D. Karimov, A. Vasiliev, A. G. Ivanova, A.G. Gavriiliuk, I. S. Lyubutin, R. Akashi, A. R. Oganov, "Superconductivity at 253 K in lanthanum-yttrium ternary hydrides", *Materials Today*, **48**, 18-24 (2021), <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2021.03.025>.

2. I. A. Troyan, D.V. Semenov, A.G. Kvashnin, A.V. Sadakov, O.A. Sobolevskiy, V.M. Pudalov, A.G. Ivanova, V.B. Prakapenka, E. Greenberg, A.G. Gavriiliuk, I.S. Lyubutin, V.V. Struzhkin, A. Bergara, I. Errea, R. Bianco, M. Calandra, F. Mauri, L. Monacelli, R. Akashi, A.R. Oganov, "Anomalous high-temperature superconductivity in YH_6 ", *Adv. Mater.* 2021, **33**, 2006832 (2021), DOI: 10.1002/adma.202006832



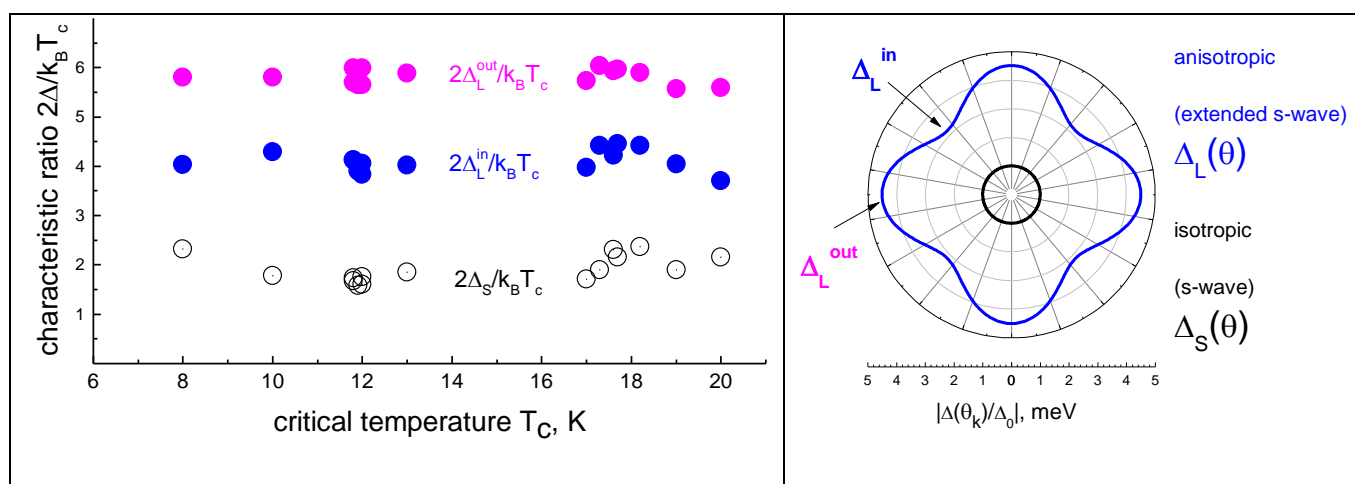
Эволюция сверхпроводящего параметра порядка передопированных пниктидов $\text{Ba}(\text{Fe,Ni})_2\text{As}_2$

Т.Е. Кузьмичева, С.А. Кузьмичев

Центр ВТСП и квантовых материалов им. В.Л. Гинзбурга ФИАН

Впервые напрямую определено важнейшее свойство сверхпроводящей (СП) подсистемы передопированных $\text{BaFe}_{2-x}\text{Ni}_x\text{As}_2$ – структура СП параметра порядка и ее эволюция вдоль фазовой диаграммы допирования. С помощью спектроскопии многократных андреевских отражений показано сосуществование двух СП конденсатов с анизотропной большой СП щелью и изотропной малой щелью, величины которых пропорциональны критической температуре T_c в диапазоне $T_c = 7\text{-}20$ К. Обнаружено умеренное межзонное взаимодействие двух СП конденсатов, а также существование ниже T_c характерной бозонной моды с энергией $\varepsilon_0 < \Delta_L + \Delta_S$ при $T \rightarrow 0$.

T.E. Kuzmicheva, S.A. Kuzmichev, K.S. Pervakov, V.A. Vlasenko, “Superconducting Order Parameters in overdoped $\text{BaFe}_{1.86}\text{Ni}_{0.14}\text{As}_2$ Revealed by Multiple Andreev Reflection Effect Spectroscopy” Phys. Rev. B (2021).



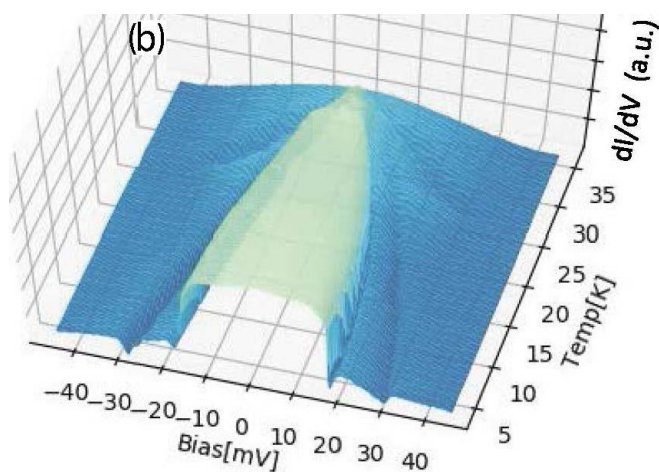
Зависимости характеристических отношений $2\Delta/k_B T_c$ для передопированных монокристаллов $\text{BaFe}_{2-x}\text{Ni}_x\text{As}_2$ в диапазоне $T_c = 7\text{-}20$ К. Максимальная и минимальная энергии связи куперовских пар в СП конденсате с анизотропной большой СП щелью обозначены Δ_L^{out} и Δ_L^{in} . Схематически приведено установленное нами угловое распределение СП параметров порядка Δ_L и Δ_S в импульсном пространстве.

Новый магнитный сверхпроводник стехиометрического состава $\text{EuRbFe}_4\text{As}_4$

К.С. Перваков, В.А. Власенко, А.В. Садаков, А.С. Усольцев, В.М. Пудалов (ФИАН)
В.С. Столяров (МФТИ)
С.В. Еремеев (Институт физики прочности и материаловедения РАН, Томск)
Т. Kim (Diamond Light source, Didcot, UK),
Д.В. Евтушинский (Ecole Polytechnique F'ed'erale de Lausanne, Switzerland)
Д.Родичев (Sorbonne Universite, CNRS, Paris),
V. Borisov, R. Valentí, (Institut fur Theoretische Physik, Goethe-Universitat Frankfurt, Germany)
A. Ernst (Institut fur Theoretische Physik, JKU, Linz Austria),
D.V. Vyalikh, E.V. Chulkov (Donostia Intern. Physics Center, San Sebasti'an, Basque Country, Spain)

В недавно открытом стехиометрическом сверхпроводнике $\text{EuRbFe}_4\text{As}_4$ магнитное упорядочение Eu сосуществует со сверхпроводящим спариванием электронов Fe, что представляет загадку. Из наших результатов измерений ARPES, ResPES, XMCD, сканирующей туннельной спектроскопии, спектроскопии андреевского отражения, термодинамических, транспортных свойств, а также теоретических DFT-расчетов определена зонная структура, энергии Eu-4f и Fe-3d электронов, ответственных за магнитное упорядочение и сверхпроводимость, соответственно. Определено магнитное состояние Eu^{2+} , найдено, что геликоидальное упорядочение спинов Eu с шагом $\pi/2$ обладает наименьшей энергией. Выявлено полностью щелевое сверхпроводящее состояние с незначительной анизотропией щели в k_x - k_y плоскости. Установлено, что амплитуда сверхпроводящего параметра порядка не испытывает каких-либо особенностей при температуре магнитного упорядочения.

1. T. K. Kim, K. S. Pervakov, D. V. Evtushinsky, S. W. Jung, G. Poelchen, K. Kummer, V. A. Vlasenko, A. V. Sadakov, A. S. Usoltsev, V. M. Pudalov, D. Roditchev, V. S. Stolyarov, D. V. Vyalikh, V. Borisov, R. Valentí, A. Ernst, S. V. Eremeev, E. V. Chulkov, "Electronic structure and coexistence of superconductivity with magnetism in $\text{RbEuFe}_4\text{As}_4$ ", Phys. Rev. **103**, 174517 (2021).
2. T. K. Kim et al., «Новый магнитный сверхпроводник стехиометрического состава $\text{EuRbFe}_4\text{As}_4$ », УФН, Doi:10.3367/UFNr.2021.05.039018



3D-график температурной зависимости 2-х сверхпроводящих щелей

Наблюдение новой сверхтекучей фазы гелия-3

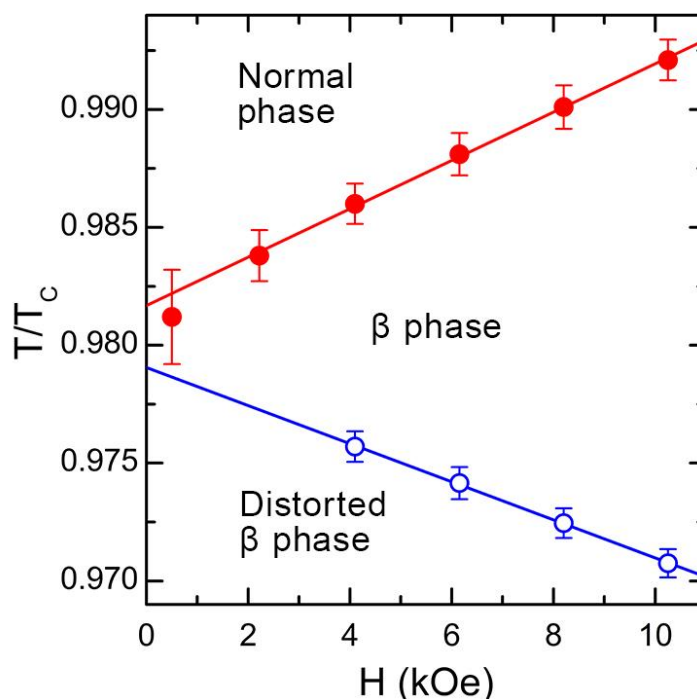
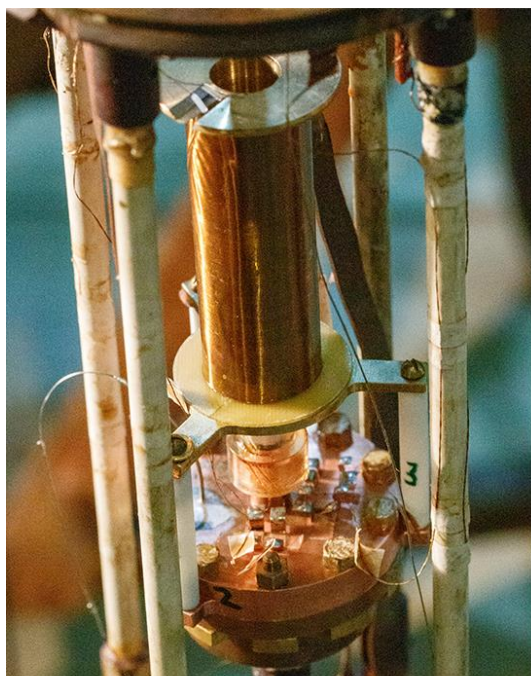
В.В.Дмитриев¹, М.С.Кутузов², А.А.Солдатов¹, А.Н.Юдин¹

¹Институт физических проблем им. П.Л. Капицы РАН, Москва

²Metallurg Engineering Ltd., Tallinn, Estonia

В сильных магнитных полях и при температурах порядка 1 мК проведены эксперименты с жидким ^3He в высокопористом анизотропном аэрогеле, состоящем из нитей (диаметром ~ 10 нм), ориентированных вдоль одного направления. Рассеяние квазичастиц ^3He в такой структуре анизотропно, что в нулевом магнитном поле приводит к стабилизации полярной сверхтекучей фазы ^3He , которая в объемном ^3He невыгодна. Обнаружено, что в сильных магнитных полях сверхтекучий переход в полярную фазу расщепляется на два перехода: при охлаждении из нормальной фазы переход происходит сначала в другую новую сверхтекучую фазу (в так называемую β -фазу), а затем в полярно искаженную β -фазу, которая при охлаждении непрерывно переходит в полярную фазу. В β -фазе, как и в полярной фазе, энергетическая щель равна нулю на «экваторе» ферми поверхности, но присутствуют только куперовские пары с проекцией спина +1 на выделенное направление. Показано, что область существования β -фазы растет пропорционально полю и при 10 кЭ достигает 0.02 от величины температуры перехода, что согласуется с предсказаниями теории. Полученные результаты могут быть полезны при исследованиях других систем с куперовским спариванием, таких как нестандартные сверхпроводники, некоторые квантовые газы и, возможно, нейтронные звезды.

Superfluid β phase of ^3He , Dmitriev V.V., Kutuzov M.S., Soldatov A.A., Yudin A.N., Phys. Rev. Lett. **127**, 265301 (2021)



Фотография экспериментальной ячейки и измеренная зависимость расщепления температуры сверхтекучего перехода от магнитного поля при давлении 15.4 бар. T_c – температура сверхтекучего перехода в объемном ^3He ($T_c=2.08$ мК).

Исследование предкритической термоакустики в гелии

К.О. Кешишев, В.И. Марченко, Е.Р. Подоляк
Институт физических проблем им. П.Л. Капицы РАН

Как известно, в низкотемпературных установках, где имеется газообразный гелий в замкнутом объёме со значительным перепадом температур, зачастую возникают нежелательные спонтанные звуковые колебания большой амплитуды. В настоящей работе впервые было проведено экспериментальное наблюдение особенностей поведения такой системы при приближении к условиям зарождения спонтанных колебаний. А именно, исследованы вынужденные звуковые колебания в газообразном гелии, заключённом в U-образной трубке с закрытыми концами. Трубка погружалась в горловину транспортного дьюара, так что на её концах температура оставалась комнатной, а в её нижней точке температура достигала почти 4-х градусов Кельвина при приближении к критическим условиям. На рис. 1 представлены резонансные кривые на основной звуковой моде (половина длины волны) в трубке. Числа, приведенные возле каждой кривой, указывают высоту нижней части трубки над дном дьюара. На рис. 2 представлены результаты обработки этих резонансных кривых согласно стандартной теории вынужденных колебаний с тремя параметрами: резонансной частотой, параметром затухания и амплитудой резонансной кривой. Линейный ход частоты, линейное обращение в ноль параметра затухания и аномальный рост амплитуды полностью согласуется с общим сценарием возникновения неустойчивости с конечной частотой в гидродинамике, предсказанным Ландау в 1944 году.

К.О. Кешишев, В.И. Марченко, Е.Р. Подоляк, «Предкритическая термоакустика в гелии» ЖЭТФ **160(6)**, 922 (2021)

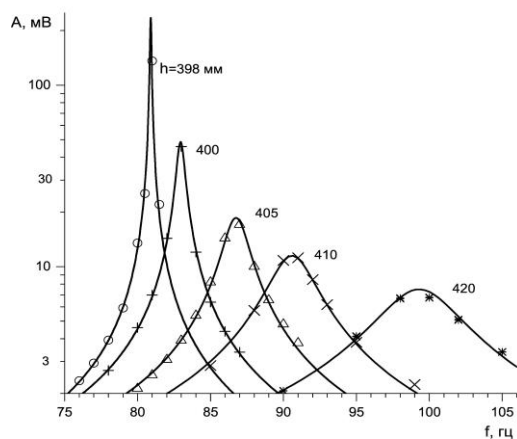


Рис. 1

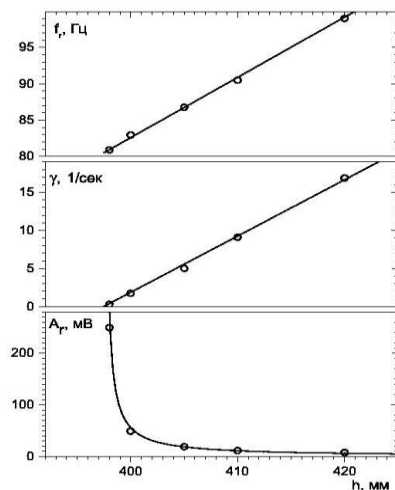


Рис.2

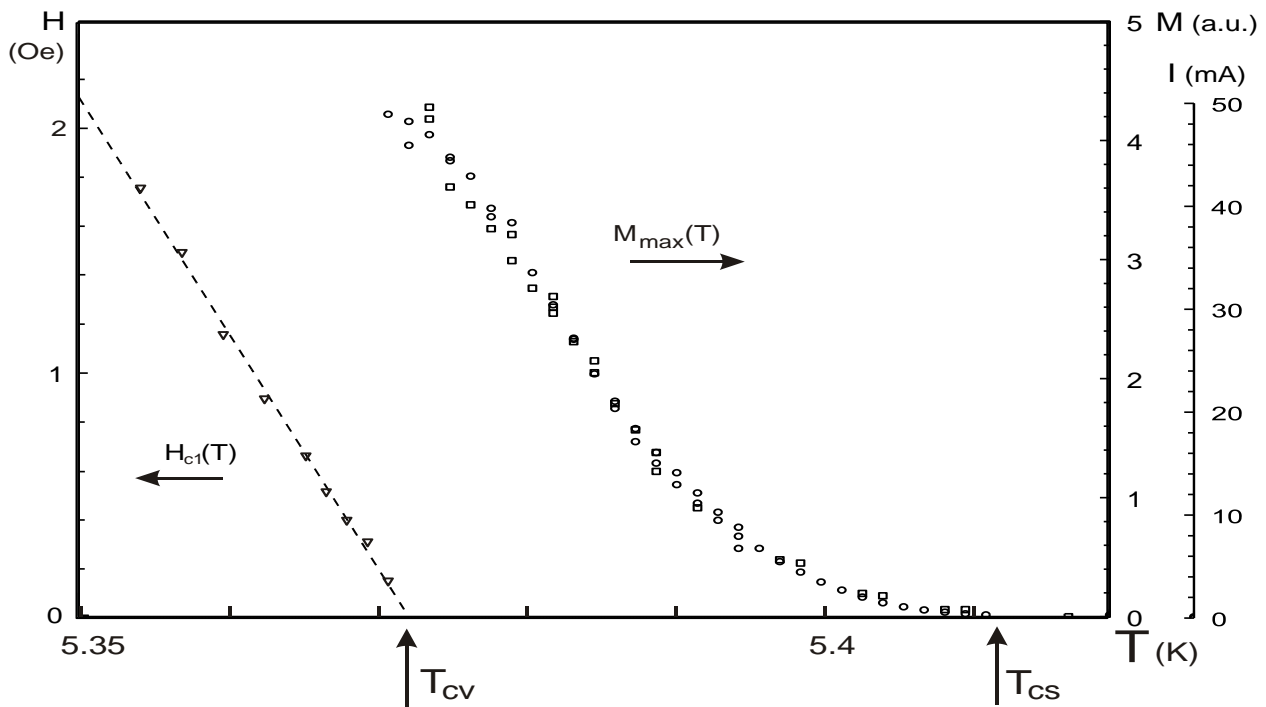
Поверхностная сверхпроводимость ванадия

И. Н. Хлюстикова

Институт физических проблем им. П. Л. Капицы

Обнаружено, что в ванадии критическая температура поверхностной сверхпроводимости T_{cs} превышает температуру перехода в сверхпроводящее состояние объема образца T_{cv} . Критическая температура объема определялась по измеренной зависимости $H_{c1}(T)$ (левая часть рисунка) и по эффекту Мейсснера, температура поверхности определялась по отсутствию захвата магнитного потока при развертке внешнего поля. На рисунке показана температурная зависимость максимального измеренного захваченного магнитного потока. Разность температур $T_{cs} - T_{cv}$ составила 0.04К. Захват магнитного потока происходит благодаря незатухающим токам, текущим по поверхности образца (справа на рисунке показана шкала в единицах тока). Оценка критической величины плотности сверхпроводящего тока дает значение $j_c = 5 \cdot 10^6$ А/см² при $T = T_{cv}$. Такая величина плотности тока, превосходящая параметры технических сверхпроводников при самых низких температурах, достигается всего на 1% ниже критической температуры перехода поверхности образца в сверхпроводящее состояние.

ЖЭТФ, 2021, том 159, вып. 3, стр. 1–5



Влияние электрического поля на динамику в LiCuVO_4

С. К. Готовко, В. И. Марченко, А. Прокофьев, Л. Е. Свистов

Институт физических проблем им. П.Л. Капицы РАН

Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»

Institute of Solid State Physics, Vienna University of Technology, Austria

Было проведено изучение влияния электрического поля на магнитную спиральную структуру в мультиферроике LiCuVO_4 методом электронного спинового резонанса. Установлено, что ориентацией плоскости магнитной структуры можно управлять с помощью магнитного поля, а направлением вращения спинов – с помощью электрического. Приложение электрического поля влияет на низкочастотную динамику LiCuVO_4 . Экспериментально обнаружен сдвиг резонансного поля при приложении электрического поля. Теоретическое рассмотрение позволило описать полученные результаты и установить связь между магнитным параметром порядка и возникающей в кристалле электрической поляризацией. Теория и экспериментальные результаты находятся в согласии.

S. K. Gotovko, V. I. Marchenko, A. Prokofiev, and L. E. Svistov, “Dynamics of multiferroic LiCuVO_4 influenced by electric field”, *Physical Review B* 104, 214415 (2021)

DOI:<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.104.214415>

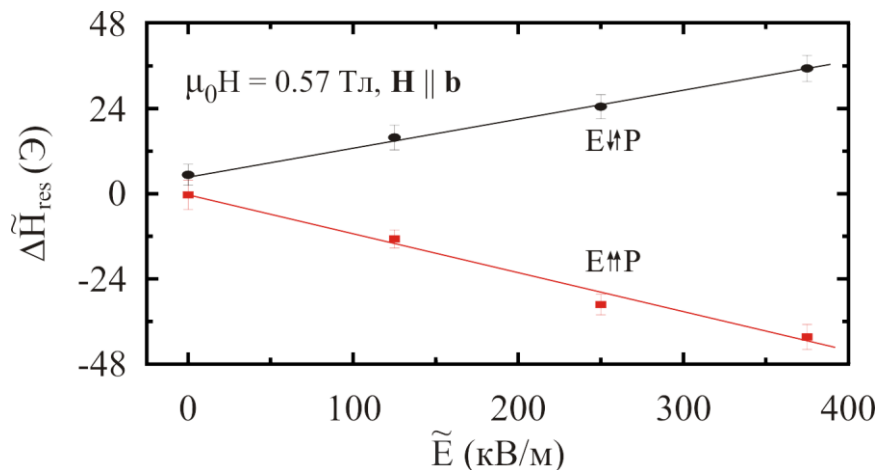


Рис. 1. Величина сдвига резонансного поля в зависимости от величины и направления внешнего электрического поля на частоте $f = 36.2$ ГГц. $H \parallel b$, $E \parallel a$, $T = 1.3$ К.

Прямое наблюдение топологического эффекта Холла в наноструктурированных пленках Co/Pt

М.В. Сапожников¹, Н.С. Гусев¹, С.А. Гусев¹, А.А. Фраерман¹, Ю.В. Петров², А.Г. Темирязов³
¹Институт Физики Микроструктур РАН, Нижний Новгород, Россия ²Санкт-Петербургский
государственный университет, Россия ³Фрязинский филиал Института радиотехники и
электроники РАН, Россия

В работе исследуется топологический эффект Холла (ТЭХ) возникающий в плотных искусственных решетках магнитных скирмионов. Решетки скирмионов формируются в процессе перемангничивания наноструктурированных многослойных пленок Co/Pt с перпендикулярной магнитной анизотропией. Для непосредственного наблюдения ТЭХ разработан метод одновременного измерения в образцах эффекта Холла и магнитооптического эффекта Керра (МОЭК). Метод основан на идее разной величины топологических эффектов на нулевой и оптической частотах, которая обоснована сделанными аналитическими оценками величины топологических магнитооптических эффектов.

1. M.V. Sapozhnikov, Y.V. Petrov, N.S. Gusev, A.G. Temiryazev, O.L. Ermolaeva, V.L. Mironov, O.G. Udalov, "Artificial Dense Lattices of Magnetic Skyrmions", *Materials*, 2020, Vol.13, P. 99
2. M.V. Sapozhnikov, N.S. Gusev, S.A. Gusev, D.A. Tatarskiy, Yu.V. Petrov, A.G. Temiryazev, A. A. Fraerman, "Direct observation of topological Hall effect in Co/Pt nanostructured films", *Phys. Rev. B*, 2021, Vol. 103, P. 054429
3. Гусев Н.С., Дудин Ю.А., Садовников А.В., Сапожников М.В., «Модификация поверхностного взаимодействия Дзялошинского-Мория в пленках Co/тяжелый металл при облучении ионами гелия», *ФТТ*, 2021, Т.63, С.1263

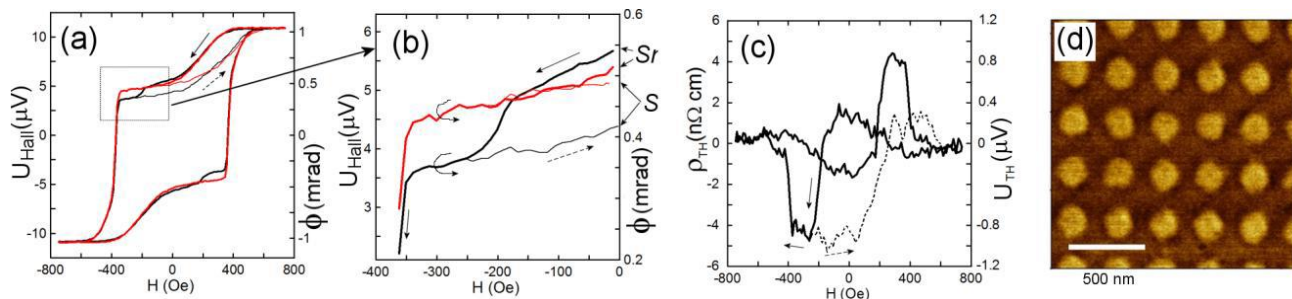


Рис. 1. Экспериментальные данные для образца 1 (период решетки 300 nm, диаметр облученного пятна 200 nm) (а) петли гистерезиса МОКЭ (красная линия) и эффекта Холла (черная линия), построенные в одном масштабе. Минорные петли проведены более тонкими линиями. (б) Подробный вид ступеньки на кривой Холла. (в) Кривая гистерезиса топологического эффекта Холла. Пунктирная линия - минорная петля гистерезиса. (д) МСМ изображение системы.

Влияние спиновой диффузии и спиновой инжекции на характеристики джозефсоновских переходов сверхпроводник-нормальный металл-сверхпроводник

В.В. Рязанов*, Т.Е. Голикова*, М.Дж. Вольф**, Д. Бекманн**, Г.А. Пензяков*,
И.Е. Батов*, И.В. Бобкова*, А.М. Бобков*.

* ИФТТ РАН, **Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe, Germany

Исследовано влияние квазичастичной и спиновой инжекции из ферромагнетика (F) в джозефсоновский N/F-барьер субмикронной структуры сверхпроводник–нормальный металл/ферромагнетик–сверхпроводник (S-N/F-S структуры, Рис.1а) на критический ток, инверсию разности фаз, появление нелокальных эффектов. Наблюдалось спиновое расщепление сверхпроводящей энергетической щели и наведенной в N-барьере минищели. Спиновая диффузия из F-подслоя в N-барьер и неравновесное электронное распределение, вызванное квазичастичной инжекцией, обеспечили наблюдение двойного (0- π -0) перехода с инверсией разности сверхпроводящей фазы (Рис.1б), связанного с двукратным изменением направления когерентного транспорта в реализованной череде состояний (зон), переносящих сверхпроводящий ток через джозефсоновский барьер. Полученные экспериментальные результаты [1] сравниваются с выполненными модельными расчетами, которые учитывают изменение сверхпроводящей токонесущей плотности состояний и функции распределения в S-N/F-S переходах под действием эффекта близости нормального барьера с ферромагнетиком и сверхпроводником, а также спиновой диффузии и неравновесной квазичастичной инжекции.

[1].Т.Е. Golikova, M.J. Wolf, D. Beckmann, G.A. Penzyakov, I.E. Batov, I.V. Bobkova, A.M. Bobkov, V.V. Ryazanov, "Controllable supercurrent in mesoscopic superconductor-normal metal-ferromagnet crosslike Josephson structures", *Superconductor Science and Technology* **34**, 095001 (9pp), (2021) <https://doi.org/10.1088/1361-6668/abfd0d>

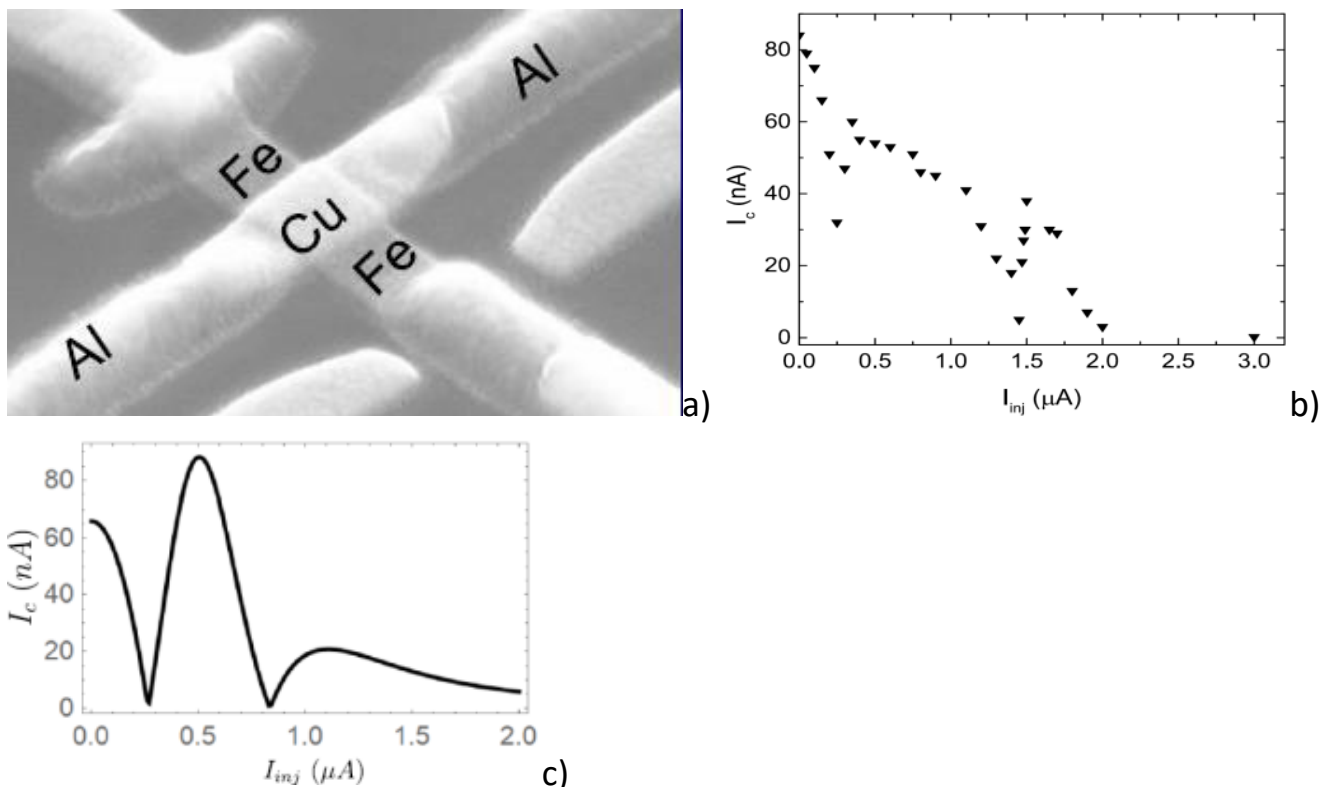


Рис.1. а) Микрофотография джозефсоновской S-N/F-S структуры Al-Cu/Fe-Al с ферромагнитным (Fe) подслоем – инжектором спин-поляризованных квазичастиц, б) Экспериментальная зависимость джозефсоновского критического тока I_c структуры Al-Cu/Fe-Al от тока инжекции I_{inj} с двумя (0- π -0) переходами с инверсией разности сверхпроводящей фазы, в) Результаты теоретической модели.

Конденсат лафлиновских энионных комплексов

Л. В. Кулик^{1,2}, А. С. Журавлев¹, Л. И. Мусина^{1,3}, Е. И. Белозеров^{1,2}, А. Б. Ваньков^{1,2}, О. В. Волков¹, А. А. Загитова¹, И. В. Кукушкин¹, В. Ю. Уманский⁴

1) Институт физики твердого тела имени Ю.А. Осипьяна РАН

2) Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»

3) Сколковский институт науки и технологий

4) Braun Center for Submicron Research, Weizmann Institute of Science, Israel

Двумерные электронные системы в квантующем магнитном поле представляют исключительный интерес, учитывая возможную роль энионов - квазичастиц с небозонной и нефермионной статистикой - в прикладной физике (в приложении к топологическим квантовым вычислениям). До сих пор ни одной экспериментальной реализации системы с энионной статистикой, кроме дробных состояний квантового эффекта Холла, не было представлено. При определении термодинамических свойств энионной материи в дробных состояниях важно исследовать физику ее нейтральных возбуждений. Нами впервые экспериментально сформирован макроскопический квазиравновесный ансамбль нейтральных возбуждений - энионных комплексов в лафлиновском состоянии $1/3$. Обнаружено, что ансамбль имеет столь долгое время жизни (более 10 с), что его можно рассматривать как новое квазистационарное состояние энионной материи. Физические свойства этого состояния материи исследовались оптическими методами, и было показано, что статистика энионных комплексов близка к бозевской. Таким образом, впервые реализована экспериментальная программа формирования из фермионов (электронов) квазичастиц с энионной статистикой посредством добавления в электронную систему квантов магнитного потока. В результате получилась материальная система, представляющая исключительный интерес для квантовых вычислений.

L. V. Kulik, A. S. Zhuravlev, L. I. Musina, E. I. Belozеров, A. B. Vankov, O. V. Volkov, A. A. Zagitova, I. V. Kukushkin, V. Y. Umansky, "Laughlin anyon complexes with Bose properties", Nature Communications, 12, Article number: 6477(2021).

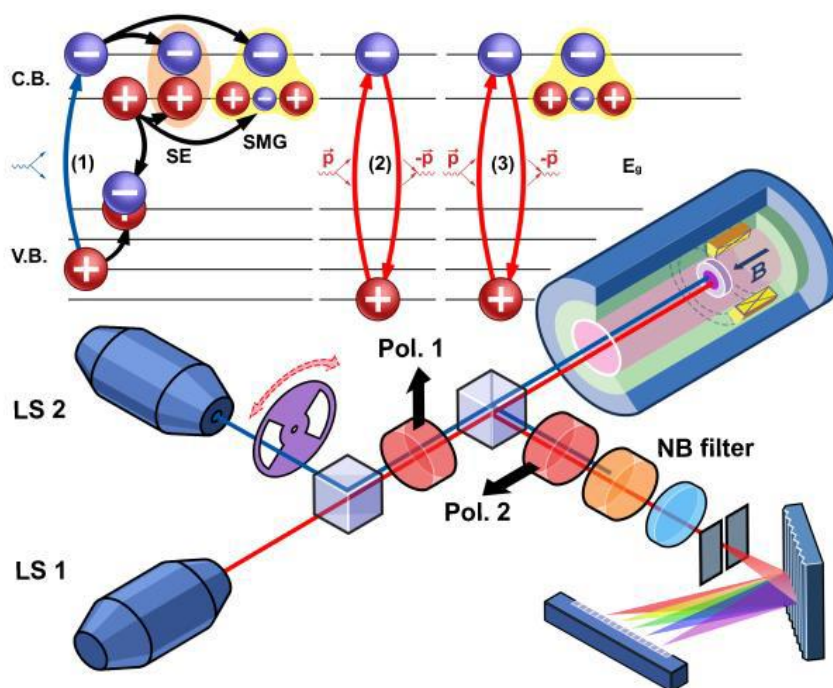


Схема оптических переходов и экспериментальной установки, использованной для получения конденсата энионных комплексов.

Физические свойства одноэлектронных устройств в режиме слабой кулоновской блокады существенно зависят от непертурбативных эффектов. Они возникают как инстантонные решения уравнений движения для соответствующего действия Амбегаокара-Эккерн-Шена. В равновесии эти решения известны как инстантоны Коршунова. В данной работе изучено неравновесное действие Амбегаокара-Эккерн-Шена с использованием техники Келдыша. Мы нашли инстантоны для наиболее общего стационарного неравновесного состояния. Мы также обнаружили, что значение седловой точки действия принимает универсальное значение независимо от стационарного неравновесного состояния.

A.S. Dotdaev, Ya.I. Rodionov, K.S. Tikhonov, "Instantons in the out-of-equilibrium Coulomb blockade", *Physics Letters A* 419, art.127736 (2021); arXiv:2012.04390

ИТФ РАН им. Л.Д. Ландау

Исследовано пространственное распределение параметра порядка $\Delta(r)$ в сильно неупорядоченном сверхпроводнике недалеко от перехода в изолятор. Использована модель сверхпроводника с псевдощелью на решетке без петель. Получены и решены уравнения для локальной функции распределения $P(\Delta)$ при нулевой температуре, применимые как в области относительно слабого беспорядка, где функция распределения гауссова, так и в области очень сильных флуктуаций. Аналитические результаты находятся в хорошем согласии с прямым численным решением уравнений самосогласования.

A.V. Khvalyuk, M.V. Feigel'man, "Distribution of the order parameter in strongly disordered superconductors: analytic theory", arXiv:2106.11848, *Phys Rev B*, принято в печать (декабрь 2021).

ИТФ РАН им. Л.Д. Ландау

Развита теория микроволнового поглощения в нецентросимметричных сверхпроводниках s-типа. Показано что в присутствие магнитного поля проводимость содержит вклад пропорциональный времени неупругой релаксации, которое при низких температурах значительно превышает упругое время рассеяния. В результате магнетопроводимость оказывается очень сильной. Механизм этого вклада - дебаевского типа. Он связан с движением уровней энергии квазичастиц в энергетическом пространстве под действием поля микроволнового излучения, и последующей энергетической релаксацией функции распределения квазичастиц.

M. Smith, A. V. Andreev, and B. Z. Spivak, "Giant magnetoconductivity in noncentrosymmetric superconductors", arXiv:2108.12480, accepted to *Physical Review B* as a Letter.

ИТФ РАН им. Л.Д. Ландау, Сколтех, Department of Physics, University of Washington, Seattle, USA

Исследован длинный диффузный контакт Джозефсона, слабой связью в котором является тонкий бислой нормальный металл (N)-ферромагнетик (F), так что N и F образуют параллельные связи между сверхпроводниками S. Показано, что сверхпроводимость в такой слабой связи описывается эффективным одномерным уравнением Узаделя, содержащим ослабленное обменное поле, а также распаривающий член. Механизм распаривания основан на неотъемлемой неоднородности бислоя и отличает его от обычного SFS контакта. Распаривание влияет на плотность состояний S(N/F)S системы и, в частности, приводит к подавлению минищели в плотности состояний, разрешенной по проекции спина. Сила распаривания выражается через геометрические параметры системы, энергию Таулесса и эффективное обменное поле. Построенная одномерная теория применима для разнообразных систем с тонкими многослойными связями и хорошо согласуется с численными результатами и имеющимся экспериментом.

П.А. Иоселевич и Д.А.Чукланов, «Подавление минищели в S(N/F)S контактах», *Письма в ЖЭТФ*, 113(10), 661-669 (2021)

ИТФ РАН им. Л.Д. Ландау

Развита теория сверхпроводящего спаривания в слабо допированном титанате стронция, основанная на механизме обмена двумя мягкими поперечными оптическими фононами, впервые предложенном Нгаем в 1974 г. Показано, что предсказание теории для величины критической температуры (для плотностей электронов порядка 10^{18} см⁻³ и менее) находятся в хорошем согласии с экспериментом. Также удается объяснить подавление сверхпроводимости с приложением гидростатического давления и аномальный изотопический эффект - усиление сверхпроводимости с частичной заменой кислорода ¹⁶O на тяжелый кислород ¹⁸O.

D.E.Kiseliov, M.V.Feigel'man, "Theory of superconductivity due to Ngai's mechanism in lightly doped SrTiO₃", arXiv:2106.09530, принято в печать в Phys. Rev. B, декабрь 2021

ИТФ РАН им. Л.Д. Ландау