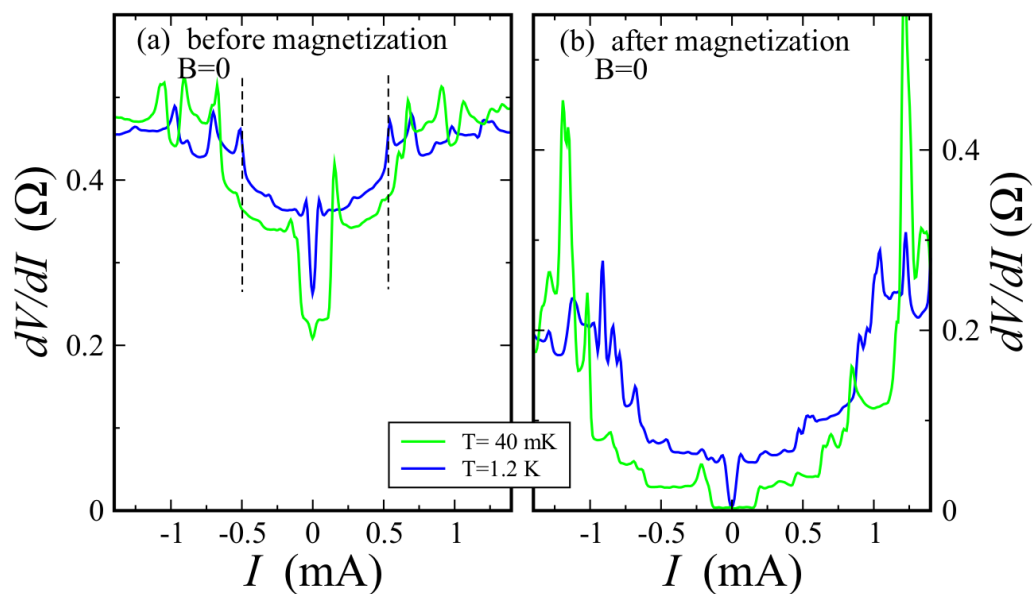


### Латеральный эффект Джозефсона на поверхности магнитного вейлевского полуметалла $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$

Подобно топологическим изоляторам и режиму квантового эффекта Холла, вейлевские полуметаллы характеризуются наличием топологически защищённых поверхностных состояний. В таких системах они возникают в силу нарушения симметрии по отношению к центру инверсии или симметрии по обращению времени (в магнитных вейлевских полуметаллах). Для магнитных топологических полуметаллов эффект близости со сверхпроводником является новым и быстро развивающимся направлением исследований в силу взаимного влияния сверхпроводимости и магнетизма в условиях нетривиальной топологии.

Мы экспериментально исследовали транспорт на поверхности магнитного вейлевского полуметалла  $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$  между двумя сверхпроводящими дорожками, разделёнными 5 мкм промежутком. Для разупорядоченного магнитного состояния  $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$  мы наблюдаем только обычное андреевское отражение на каждом из контактов, что указывает на высокую прозрачность интерфейсов сверхпроводник -  $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ . При однородном намагничивании образца, он демонстрирует хорошо выраженный аномальный Холл-эффект. В этом режиме мы наблюдаем появление джозефсоновского тока по поверхности вейлевского полуметалла между сверхпроводящими контактами. Обнаруженный эффект Джозефсона хорошо выражен даже при больших (5 мкм) расстояниях между сверхпроводящими берегами, критическое значение тока демонстрирует необычное для длинных диффузных SNS-контактов поведение в зависимости от магнитного поля и температуры, что указывает на триплетный характер джозефсоновского тока в такой системе. В работе обсуждается перенос джозефсоновского тока топологическими поверхностными состояниями типа Ферми-арок в вейлевском полуметалле  $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ .



### Измерение термодинамической плотности состояний тяжелых дырок и магнитной восприимчивости в квантовых ямах HgTe

В двумерных системах с малым количеством электронов термодинамические эффекты, обусловленные этими электронами, малы. В данной экспериментальной работе удалось применить разработанные в ФИАН модуляционные методики, основанные на измерении тока перезарядки емкостных структур, к исследованию уникальных образцов квантовых ям HgTe, полученных в ИФП СО РАН. Из результатов измерений энтропии впервые определена плотность состояний тяжелых дырок, которую невозможно было измерить другими способами, а из измерений намагниченности установлено, что как тяжелые дырки, так и дираковские носители в квантовых ямах HgTe являются парамагнитными. Данные измерения послужат развитию теории магнетизма свободных электронов в системах с сильным спин-орбитальным взаимодействием

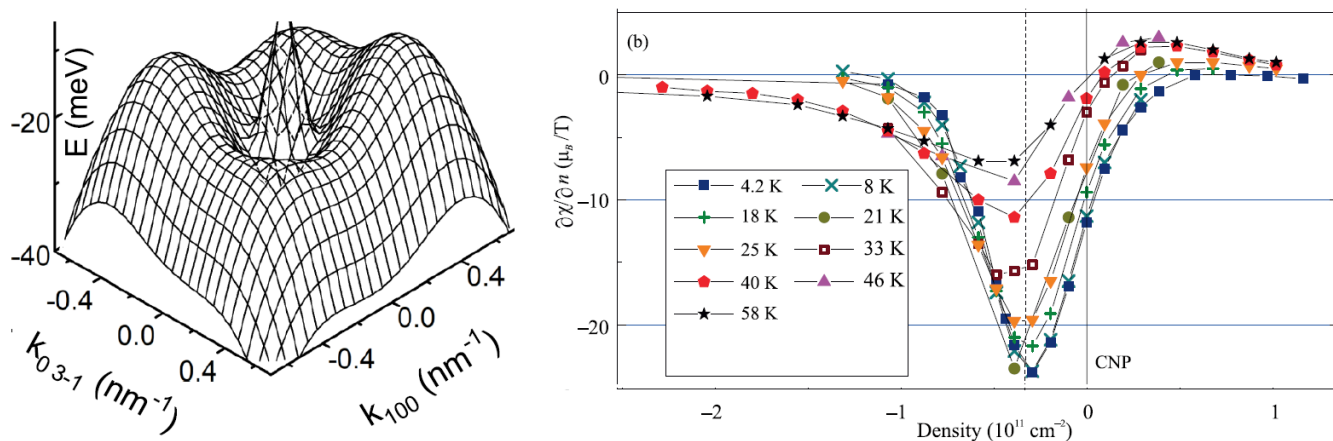


Рис. 1 Слева — спектр в квантовых ямах HgTe толщиной 6 нм, справа — производная магнитной восприимчивости по концентрации

A.Yu. Kuntsevich, G.M. Minkov, A.A. Sherstobitov, Y.V. Tupikov, N.N. Mikhailov, and S.A. Dvoretzky, “Density of states measurements for the heavy subband of holes in HgTe quantum wells”, Phys. Rev. B 101, 085301 (2020).

A.Yu. Kuntsevich, et al., “Magnetic Susceptibility Measurements in HgTe Quantum Wells in a Perpendicular Magnetic Field”, JETP Letters, 111, 633-638 (2020).

ФИАН, ИФП СО РАН, УрФУ, Технион (Израиль)

## Электронная структура и слабое взаимодействие сверхпроводящего конденсата с магнетизмом в $\text{EuRbFe}_4\text{As}_4$

Синтезирован и исследован новый сверхпроводящий ферропниктид  $\text{EuRbFe}_4\text{As}_4$  с магнитным ионом Eu. Показано, что магнитное упорядочение сосуществует со сверхпроводящим спариванием электронов. Измерение электронной структуры (ARPES и туннельная спектроскопия) позволило исследовать характер сверхпроводимости, определить положение зоны 4f-электронов Eu, ответственных за магнитное упорядочение в  $\text{EuRbFe}_4\text{As}_4$ . Сделан вывод о слабом взаимодействии сверхпроводящего конденсата с магнитоупорядоченными слоями европия в  $\text{EuRbFe}_4\text{As}_4$ .

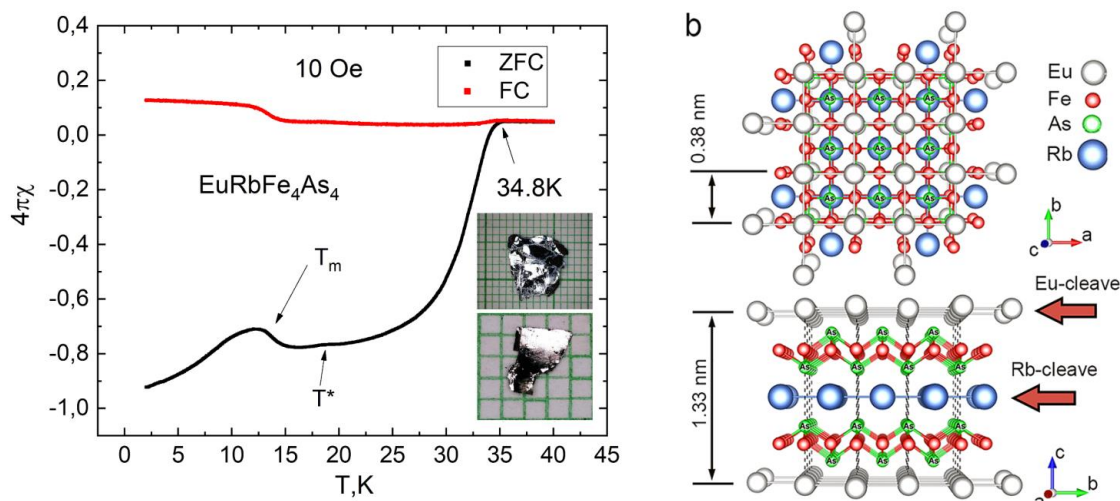


Рис. 1 Магнитная восприимчивость и структура синтезированного  $\text{EuRbFe}_4\text{As}_4$ .

V. S. Stolyarov, K. S. Pervakov, A. S. Astrakhantseva, I.A. Golovchanskiy, D.V. Vyalikh, T.K. Kim, S.V. Ereemeev, V.A. Vlasenko, V.M. Pudalov, A.A. Golubov, E.V. Chulkov, and D.Roditchev, “Electronic Structures and Surface Reconstructions in Magnetic Superconductor  $\text{RbEuFe}_4\text{As}_4$ ”, *Phys. Chem. Lett.* 11, 21, 9393–9399 (2020), <https://dx.doi.org/10.1021/acs.jpcllett.0c02711>

V. Vlasenko, K. Pervakov and S. Gavrilkin, “Vortex pinning and magnetic phase diagram of  $\text{EuRbFe}_4\text{As}_4$  iron-based superconductor”, *Supercond. Sci. Technol.* 33 084009 (2020), [doi.org/10.1088/1361-6668/AB9AA5](https://doi.org/10.1088/1361-6668/AB9AA5)

ФИАН, МФТИ, Diamond Light Source (UK)

## Электронная структура и сверхпроводимость арсенидов олова $\text{SnAs}$ и $\text{Sn}_4\text{As}_3$

Синтезированы и исследованы сверхпроводящие арсениды олова  $\text{SnAs}$  и  $\text{Sn}_4\text{As}_3$ . Измерены электронные структуры (методом ARPES) и реконструированы поверхности Ферми данных соединений. В сверхпроводниках 1 рода  $\text{SnAs}$  (кубич.  $Fm\bar{3}m$ ) и в нецентросимметричном  $\text{Sn}_4\text{As}_3$  (тригон.  $R\bar{3}m$ ) не обнаружены признаки неклассической сверхпроводимости, ожидавшиеся вследствие спин-орбитального взаимодействия.

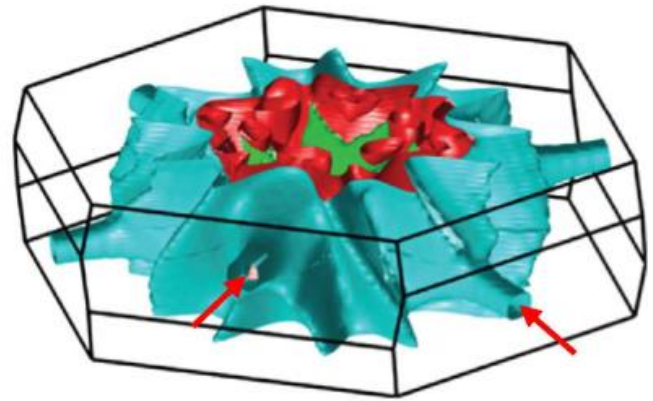
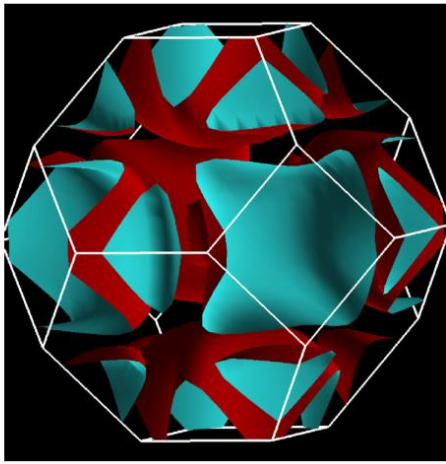


Рис. 1 Реконструкция Ферми поверхности согласно экспериментальным данным ARPES для монокристаллов SnAs и Sn<sub>4</sub>As<sub>3</sub>.

C. A. Marques, M. J. Neat, C. M. Yim, M. D. Watson, L. C. Rhodes, C. Heil, K. S. Pervakov, V. A. Vlasenko, V. M. Pudalov, A. V. Muratov, T. K. Kim and P. Wahl, “Electronic structure and superconductivity of the non-centrosymmetric Sn<sub>4</sub>As<sub>3</sub>”, *New J. Phys.* 22 063049 (2020), <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1367-2630/ab890a>

P. I. Bezotosnyi et al., “Electronic band structure and superconducting properties of SnAs”, *Phys. Rev. B* 100, 184514 (2019).

ФИАН, ИФ СО РАН, ИЭФ УрО РАН, University of St. Andrews (UK), Diamond Light Source (UK), Graz University of Technology (Austria)

### **Динамический диамагнетизм цепочечного анизотропного антиферромагнетика NiCl<sub>2</sub>-4SC(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>.**

В цепочечном магнетике со спином магнитного иона  $S = 1$  и сильной одноионной анизотропией, NiCl<sub>2</sub>-4SC(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub> (сокращенное наименование DTN), наблюдался сильный нерезонансный динамический диамагнетизм в широкой полосе частот. Эффект связан с двухмагнонным поглощением, обусловленным нижней квазиголдстоуновской модой спиновых волн в индуцированной сильным полем антиферромагнитной фазе спинжидкостного магнетика. В этом соединении энергия антиферромагнитного обмена магнитных ионов в цепочках меньше энергии одноионной анизотропии легкоплоскостного типа и данный кристалл представляет собой редкий пример спиновой системы, в которой стабилизация неупорядоченного основного состояния обусловлена не обменным взаимодействием в низкоразмерном магнетике, а анизотропией. Это отличает DTN от классических магнетиков, в которых анизотропия, наоборот, способствует упорядочению. В специфической индуцированной полем антиферромагнитной фазе, которая существует при температуре ниже 1 К в интервале полей от 2 до 12 Т, спектр состоит из двух ветвей необычного антиферромагнитного резонанса. Одна из ветвей имеет минимальную частоту 80 ГГц в середине интервала существования упорядоченной фазы, а вторая является голдстоуновской модой с нулевой частотой. Голдстоуновская мода, тем не менее, приобретает конечную частоту при слабом отклонении направления магнитного поля от оси симметрии четвертого порядка. В упорядоченной

фазе наблюдается эффект нерезонансного динамического диамагнетизма в широкой полосе частот, схематически представленной на рисунке. Величина этой широкополосной диамагнитной восприимчивости достигает величины резонансной динамической восприимчивости парамагнитного резонанса. Этот сильный диамагнитный отклик отличается от обычно наблюдаемого в условиях магнитного резонанса тем, что существует в широкой полосе частот, расположенной выше квазиголдстоуновской моды, и имеет резкую нижнюю границу, что указывает на связь наблюдаемого эффекта с двухмагنونным поглощением на магнонах низкочастотной ветви, имеющих дисперсию в диапазоне наблюдения динамического диамагнетизма.

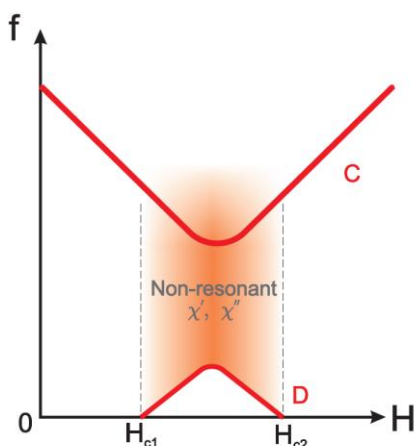


Рис.1 Схема частотно-полевого диапазона динамической диамагнитной нерезонансной восприимчивости, обусловленной двухмагنونным поглощением. Линия C обозначает частоту верхней моды антиферромагнитного резонанса, линия D - частоту квазиголдстоуновской моды.  $H_{c1}$  и  $H_{c2}$  – магнитные поля, ограничивающие область антиферромагнитной фазы.

T.A.Soldatov, A.I.Smirnov, K.Yu.Povarov, A. Paduan-Filho, A. Zheludev, “Microwave dynamics of the stoichiometric and bond-disordered anisotropic  $S=1$  chain antiferromagnet  $NiCl_2-4SC(NH_2)_2$ ”, Phys.Rev.B 101, 104410 (2020).

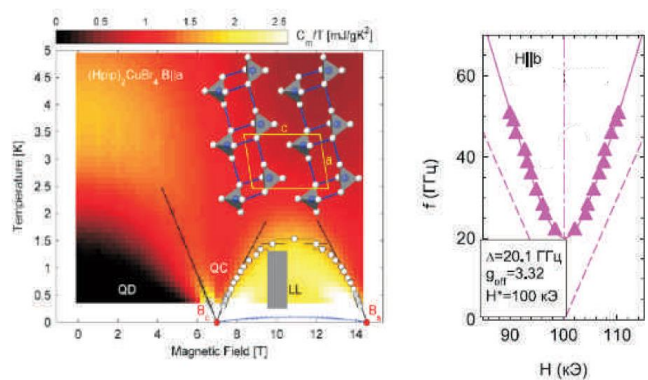
ИФП РАН, ETH Zurich (Switzerland), University of São Paulo (Brazil)

### **Солитонная мода магнитного резонанса в высокополевой фазе магнетика типа «спиновая лестница»**

Обнаружен и изучен сигнал магнитного резонанса нового типа в магнетике «спиновая лестница»  $(C_5H_{12}N)_2CuBr_4$  в высокополевой фазе с захлопнутой щелью. Этот сигнал магнитного резонанса характеризуется аномальным значением g-фактора около 3.5, имеет экзотическую зависимость частоты от поля с минимумом в середине области фазы с подавленной щелью. Получено детальное количественное объяснение этого спектра на основе теоретической модели, предсказывающей образование солитонов специального спинового коррелятора в спиновой жидкости Томонаги-Латтинжера. Это первое наблюдение сигналов магнитного резонанса в режиме, когда система типа «спиновая лестница» в области сильных полей находится в состоянии с захлопнутой энергетической щелью.



В поле выше поля закрытия спиновой щели  $V_{c1}$  магнетик типа «спиновая лестница» описывается универсальной моделью жидкости Томонаги-Латтинжера с бесщелевым спектром возбуждений. Наблюдаемая перестройка спектра связана с присутствием взаимодействия Дзялошинского-Мория. При  $V_{c1} < V < V_{sat}$  гамильтониан спиновой лестницы может быть спроецирован на цепочку псевдоспинов  $1/2$  с  $XXZ$  взаимодействием. При переходе от одномерной  $XXZ$  модели к её описанию на языке непрерывных полей модели Томонаги-Латтинжера взаимодействие Дзялошинского-Мории приводит к уравнениям типа синус-Гордона с солитонным решением. Нам удалось показать, что полученная солитонная конфигурация эквивалентных псевдоспинов является ЭПР-активным возбуждением, в то время как обычные колебания псевдоспиновой цепочки (соответствующие обычным бесщелевым возбуждениям модели Томонаги-Латтинжера) не возбуждаются в условиях ЭПР-эксперимента. Аномальный  $g$ -фактор определяется параметром взаимодействия квазичастиц  $K$  модели Томонаги-Латтинжера, который находится из известных значений обменных констант.



Слева: цветовая карта зависимости  $C/T$  от поля и температуры и схематическое изображение лестничной структуры в кристалле  $BCuBr_2$ . Жёлтая область в правом нижнем углу соответствует области существования состояния жидкости Томонаги-Латтинжера. Серая заливка показывает область наблюдения солитонной моды магнитного резонанса. Справа: частотно-полевая диаграмма для солитонной моды при  $T=0.45$  К.

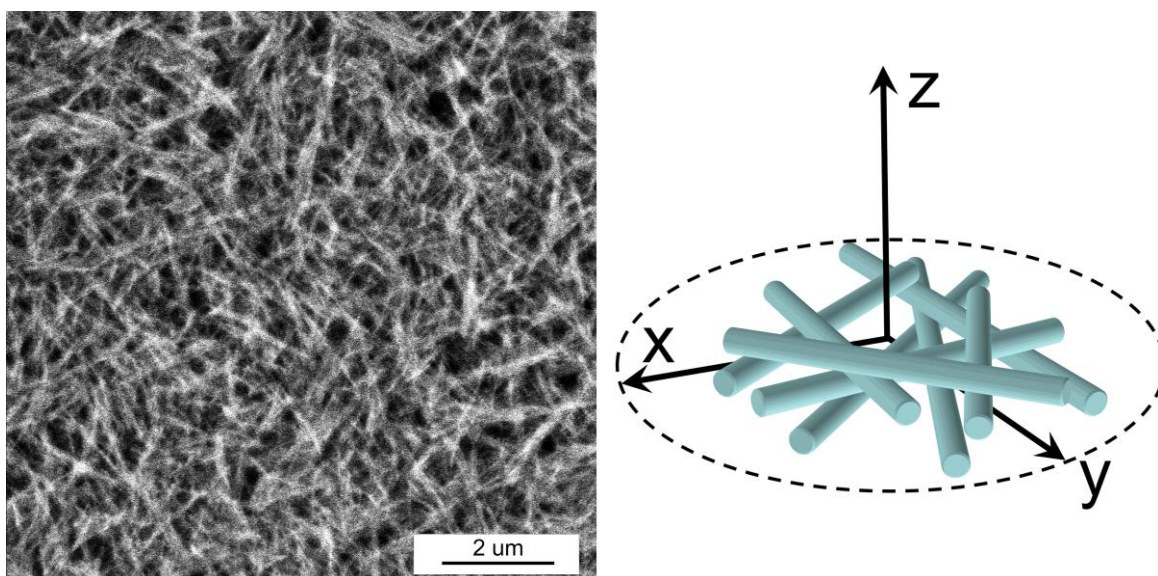
Yu. V. Krasnikova, S. C. Furuya, V. N. Glazkov, K. Yu. Povarov, D. Blosser, and A. Zheludev, “Anisotropy-Induced Soliton Excitation in Magnetized Strong-Rung Spin Ladders”, Phys. Rev. Lett. 125, 027204 (2020) .

ИФП РАН, Condensed Matter Theory Laboratory, RIKEN (Japan), ETH Zürich (Switzerland)

### Наблюдение нового состояния сверхтекучего гелия-3 в планарном аэрогеле

При температурах порядка 1 мК проведены эксперименты с жидким  $^3\text{He}$  в высокопористой анизотропной наноструктуре, названной планарным аэрогелем. Этот аэрогель состоит из нитей (диаметром  $\sim 10$  нм), случайным образом расположенных в плоскости, перпендикулярной выделенной оси. Рассеяние квазичастиц  $^3\text{He}$  в такой структуре анизотропно, что влияет на сверхтекучесть. Обнаружено, что при охлаждении из нормальной фазы сверхтекучий переход происходит в А фазу в состоянии Ларкина-Имри-

Ма. При этом орбитальный вектор параметра порядка в среднем ориентирован перпендикулярно нитям. Добавляя  $^4\text{He}$ , который замещает парамагнитный слой  $^3\text{He}$ , покрывающий поверхности нитей и приводящий к несохраняющему спин магнитному рассеянию, мы меняли граничные условия для рассеяния. Оказалось, что в чистом  $^3\text{He}$  температура сверхтекучего перехода заметно ниже, что указывает на важность магнитного рассеяния. В экспериментах в изотропных аэрогелях такого понижения не наблюдалось, но оно было велико в  $^3\text{He}$  в нематических аэрогелях, где нити параллельны друг другу. Наши эксперименты показывают, что влияние магнитного рассеяния на сверхтекучесть проявляется при наличии любого вида анизотропии рассеивающих примесей. Полученные результаты важны для теории сверхтекучих жидкостей и сверхпроводников с триплетным спариванием.



Снимок поверхности планарного аэрогеля и рисунок, демонстрирующий расположение нитей.

Dmitriev V.V., Kutuzov M.S., Mikheev A.Y., Morozov V.N., Soldatov A.A., Yudin A.N., “Superfluid  $^3\text{He}$  in Planar Aerogel”, *Phys. Rev. B* 102, 144507 (2020).

ИФП РАН, ИТЭБ РАН, Metallurg Engineering Ltd., (Estonia), University of Pennsylvania, (USA)

Экспериментально и теоретически показано наличие сильных пространственных флуктуаций между локальной величиной сопротивления тонкой пленки NbN (измеряемого показателем кулоновской аномалии туннельной проводимости  $dI/dV$  при больших напряжениях  $V$ ) и локальной величиной сверхпроводящей щели (измеряемой как расстояние между пиками дифференциальной проводимости при малых напряжениях). Такие корреляции количественно описываются локальным обобщением теории Финкельштейна для подавления сверхпроводимости беспорядком.

C. Carbillet, V. Cherkez, M.A. Skvortsov, M.V. Feigel'man, F. Debontridder, L.B. Ioffe, V.S. Stolyarov, K. Ilin, M. Siegel, C. Noûs, D. Roditchev, T. Cren, C. Brun, “Spectroscopic evidence for strong correlations between local superconducting gap and local Altshuler-

Aronov density of states suppression in ultrathin NbN films”, Phys. Rev. B 102, 024504 (2020); arXiv:1903.01802

ИТФ РАН, Сколковский институт науки и технологий, ВНИИА, Sorbonne Université, (France), Karlsruhe Institute of Technology, (Germany)

### **Проводимость сверхпроводников в режиме течения потока**

Развита теория проводимости смешанного состояния сверхпроводников 2-ого рода в режиме течения потока при наличии плавных пространственных флуктуаций параметров сверхпроводника (например, параметра порядка и коэффициента диффузии). Обнаружен вклад в проводимость, пропорциональный времени неупругой релаксации, которое при низких температурах значительно превышает упругое время рассеяния. Этот вклад связан с релаксацией дебаевского типа (он же - механизм релаксации Мандельштама-Леонтовича). Дебаевский вклад в проводимость может значительно превышать проводимость Бардина-Стефена в области низких температур  $T \ll T_C$  и магнитных полей  $B \ll H_{C2}$ .

M. Smith, A.V. Andreev, M.V. Feigel'man, B.Z. Spivak, “Conductivity of superconductors in the flux flow regime”, Phys.Rev.B 102, 180507(R) (2020); arXiv:[2008.03344](https://arxiv.org/abs/2008.03344)

ИТФ РАН, Сколковский институт науки и технологий, University of Washington, (USA)

Выведено обобщение действия Амбегаокар-Эккерн-Шона, которое описывает диссипативную динамику зарядовой и спиновой степеней свободы для квантовой точки, соединенной туннельным контактом с резервуаром. В отличие от предыдущих работ, это диссипативное действие выведено без следующих предположений: (i) абсолютное значение спина на квантовой точке не меняется при учете туннелирования (ii) спин медленно вращается так, что выполняется адиабатическое приближение. Полученное диссипативное действие использовано для анализа устойчивости мезоскопического явления Стонера относительно туннелирования электронов в резервуар. Мы пришли к выводу, что при конечной температуре электронное туннелирование подавляет мезоскопическую неустойчивость Стонера при туннельной проводимости, которая зависит от температуры. При нулевой температуре предсказывается существование квантового фазового перехода между мезоскопической фазой Стонера и парамагнитной фазой.

I. S. Burmistrov, Y. Gefen, D. S. Shapiro, and A. Shnirman, “Mesoscopic Stoner Instability in Open Quantum Dots: Suppression of Coleman-Weinberg Mechanism by Electron Tunneling”, Phys. Rev. Lett. 124, 196801 (2020).

ИТФ РАН, ВШЭ, Weizmann Institute of Science (Israel), Karlsruhe Institute of Technology, (Germany)