

Новые топологические объекты в полярно-искаженной фазе сверхтекучего гелия-3

Одним из теоретически предсказанных экзотических объектов в квантовых жидкостях и газах являются вихри с полуквантовой циркуляцией, причем выгодной средой для их существования является полярная фаза гелия-3, экспериментально обнаруженная в ИФП РАН в 2015 г. при температурах вблизи абсолютного нуля. Данная фаза не реализуется в объемном гелии-3, и для ее стабилизации гелий-3 помещался в высокопористый нематический аэрогель, состоящей из параллельных нитей диаметром несколько нанометров. Эксперименты на вращающемся криостате университета Аальто позволили в дальнейшем наблюдать и исследовать полуквантовые вихри в полярной фазе. При еще более низких температурах происходит фазовый переход в полярно-искаженную В-фазу, где такие вихри должны быть топологически нестабильны. Однако оказалось, что полуквантовые вихри при этом переходе выживают. При этом между полуквантовыми вихрями возникает доменная стенка (Рис.1) – аналог космической стенки Киббла-Лазаридеса-Шафи, которая ограничена струнами. Результаты этих исследований открывают новые возможности для использования сверхтекучего ^3He , помещенного в наноструктурированное пространство, в качестве модельной топологической среды для широкого ряда исследований, начиная от топологических квантовых вычислений и заканчивая космологией и сценариями Великого объединения.

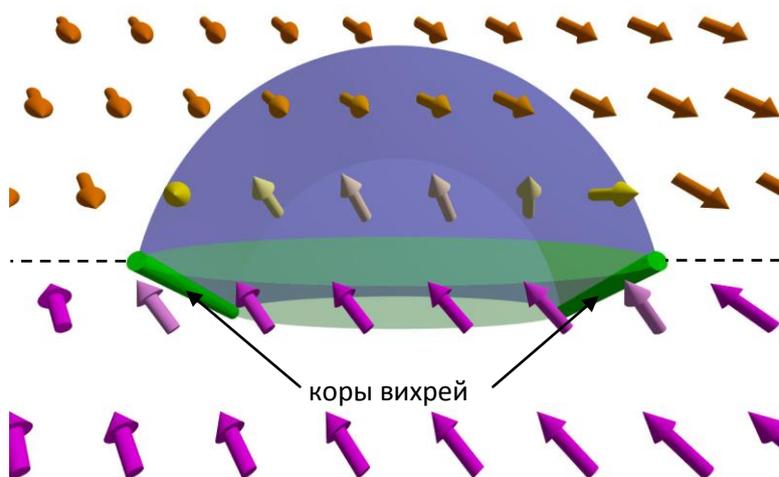


Рис.1 Вариант стенки Киббла-Лазаридеса-Шафи (КЛШ) ограниченной двумя полуквантовыми вихрями в полярно-искаженной В фазе. Каждый полуквантовый вихрь замыкает на себе солитон (показан синим цветом), переориентирующий спиновый вектор параметра порядка (стрелки), и стенку КЛШ (показана зеленым цветом), на которой один из компонентов параметра порядка меняет знак.

Makinen J.T., Dmitriev V.V., Nissinen J., Rysti J., Volovik G.E., Yudin A.N., Zhang K., and Eltsov V.B., “Half-quantum vortices and walls bounded by strings in the polar-distorted phases of topological superfluid ^3He ”, *Nature Communications* **10**, 237 (2019).

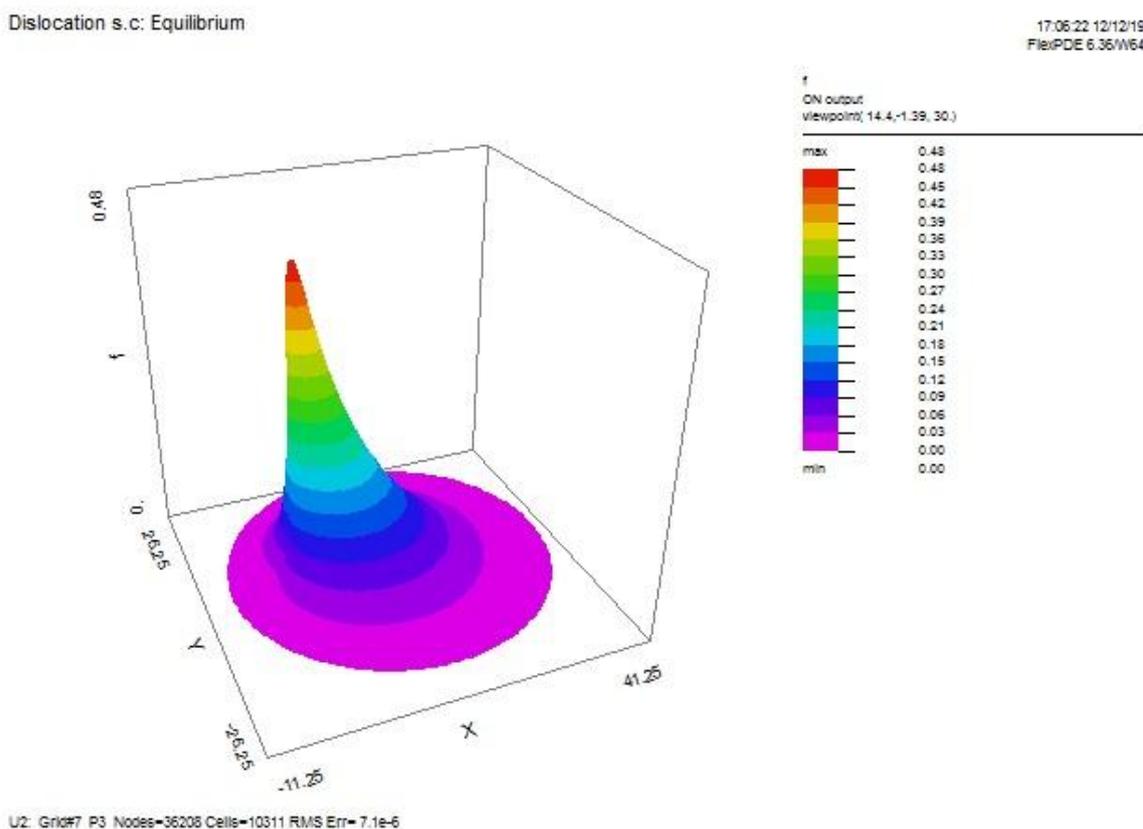
ИФП РАН, ИТФ РАН, Лаборатория низких температур Университета Аальто, Финляндия, Университет Хельсинки, Финляндия

Теоретически показано, что и при необычном куперовском спаривании может реализоваться ситуация, когда потенциальные примеси не понижают температуру

перехода Ферми-жидкости в сверхтекучее состояние, то есть выполняется утверждение, известное как теорема Андерсона. В частности, это происходит в сверхтекучей полярной фазе ^3He , стабилизированной нематическим аэрогелем – нафеном, если нити, образующие нафен, зеркально отражают фермиевские квазичастицы.

И.А. Фомин, “Аналог теоремы Андерсона для полярной фазы жидкого ^3He в нематическом аэрогеле”, ЖЭТФ **154**(5), 1034 (2018).
ИФП РАН

Показано, что при температуре несколько выше температуры перехода металла в сверхпроводящую фазу в окрестности краевой дислокации должен возникать предвестник объёмного перехода в виде макроскопического шнура сверхпроводящего состояния. Эффект обусловлен зависимостью критической температуры от давления, и существует при любом её знаке. В сверхпроводящей фазе должен также наблюдаться пиннинг абрикосовских вихрей на краевых дислокациях в сверхпроводниках первого и второго рода.



Параметр порядка Гинзбурга-Ландау в окрестности краевой дислокации при температуре выше критической.

Е.Р. Подоляк, “Сверхпроводимость, локализованная на краевой дислокации”, ЖЭТФ **156**(1), 118 (2019).
ИФП РАН

Обнаружение сверхпроводимости в тонких пленках Cd_3As_2

Cd_3As_2 – один из первых материалов, который был отнесен к классу дираковских полуметаллов. Особый интерес в исследовании таких материалов связан с возможностью существования в них сверхпроводимости, которая в этом случае может иметь топологическую природу и характеризоваться триплетным спариванием электронов. На данный момент существует лишь несколько работ, сообщающих о наблюдении в Cd_3As_2 сверхпроводимости в специальных внешних условиях: высоком гидростатическом давлении, при точечном воздействии иглы и пр. Нашей группой впервые обнаружена сверхпроводимость в тонких пленках Cd_3As_2 с тетрагональной кристаллической решеткой без внешних воздействий. Анализ зависимостей критических параметров сверхпроводящего состояния в исследуемых пленках выявил особенности, указывающие на возможную топологическую природу обнаруженной сверхпроводимости.

A.V. Suslov, A.B. Davydov, L.N. Oveshnikov, L.A. Morgun, K.I. Kugel, V.S. Zakhvalinskii, E.A. Pilyuk, A.V. Kochura, A.P. Kuzmenko, V.M. Pudalov, and B. A. Aronzon, “Observation of subkelvin superconductivity in Cd_3As_2 thin films”, *Phys. Rev. B* **99**, 094512 (2019).

ФИАН, National High Magnetic Field Laboratory, Tallahassee, Florida, USA, НИЦ «Курчатовский институт», ВШЭ, ИТПЭ РАН, БелГУ, ЮЗГУ

Проведены экспериментальные исследования квазиодномерных магнетиков со спином $S=1/2$ с фрустрированными внутрицепочечными обменными взаимодействиями: ферромагнитным между ближайшими спинами цепочки ($J_{\text{NN}} < 0$) и антиферромагнитным между следующими за ближайшими спинами ($J_{\text{NNN}} > 0$), в частности, монокристаллических образцов линарита $\text{PbCuSO}_4(\text{OH})_2$ и ванадата LiCuVO_4 [1,2]. Определены границы циклоидной, спин-модулированной, планарной веерной, киральной и нематической магнитных фаз. Анализ фазовых диаграмм и соответствующих ветвей спиновых колебаний этих магнетиков указывает на то, что реализующиеся магнитные фазы в цепочечных фрустрированных магнетиках во многом определяются малыми (по сравнению с обменными) взаимодействиями.

1. S. K. Gotovko, L. E. Svistov, A. M. Kuzmenko A. Pimenov, M. E. Zhitomirsky, “Electron spin resonance in spiral antiferromagnet linarite: Theory and experiment”, *Phys. Rev. B* **100**, 174412 (2019).

2. Alexander Ruff, Peter Lunkenheimer, Hans-Albrecht Krug von Nidda, Sebastian Widmann, Andrey Prokofiev, Leonid Svistov, Alois Loidl and Stephan Krohns, “Chirality-driven ferroelectricity in LiCuVO_4 ”, *NPJ Quantum Materials* (**4**), 24 (2019).

ИФП РАН, ВШЭ, ИОФАН, Institute of Solid State Physics, Vienna University of Technology, Austria, Universit e Grenoble Alpes, CEA, IRIG, PHELIQS, France, Experimental Physics V, Center for Electronic Correlations and Magnetism, University of Augsburg, Germany

Впервые построена теория электрон-фононной передачи энергии в изоляторах Андерсона с большой длиной локализации. Показано, что температурная зависимость этой величины прямо связана с корреляционной функцией локальных плотностей состояний электронов в случайном потенциале. Эта корреляционная функция содержит степенной рост на малых энергиях вследствие фрактальной структуры волновых функций. На диэлектрической стороне переходов появляется еще дополнительный фактор усиления, связанный с моттовским механизмом резонансных пар локализованных состояний. Это приводит к значительному усилению теплопередачи (по сравнению с предсказаниями стандартной теории для грязных металлов). В частности, оценка величины эффекта усиления для аморфных пленок оксида индия при температурах порядка 50-150 мК приводит к фактору

порядка 300-500, что находится в согласии с экспериментами по нелинейным вольт-амперным характеристикам в слабо диэлектрическом состоянии InO_x .

M. V. Feigel'man and V. E. Kravtsov, "Electron-phonon cooling power in Anderson insulators", Phys. Rev. **B99**, 125415 (2019).

ИТФ РАН

Рассмотрено влияние сильных точечных примесей небольшой концентрации на свойства кирального р-волнового сверхпроводника. Найдено, что такие примеси создают связанные состояния, подобные состояниям Ю-Шибы-Русинова, образующие примесную зону под сверхпроводящей щелью. Вычислена плотность состояний в этой зоне, а также размытие пика в плотности состояний при энергиях близ сверхпроводящей щели. Также вычислена аномальная холловская проводимость, как функция частоты и температуры. Эта величина играет ключевую роль в оптическом эффекте Керра, наблюдаемом в таком сверхпроводнике.

P.A. Ioselevich, P.M. Ostrovsky, "Optical properties of p_x+ip_y superconductors with strong impurities", Письма в ЖЭТФ, **110**(12), 812 (2019).

ИТФ РАН

Установление роли атомов Sr в необычной сверхпроводимости $\text{Sr}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$

Сверхпроводимость (СП) в допированном Bi_2Se_3 открыта около 10 лет назад, но до сих пор остается загадочной: (i) она наблюдается при рекордно низкой плотности состояний на уровне Ферми, (ii) найдены, в том числе нами [1], доказательства ее топологической природы с нематическим векторным параметром порядка, (iii) на структурном уровне совершенно не понятно, где находится примесь (Cu, Sr, Nb) и как она приводит к сверхпроводимости. Группой ФИАН выполнены комплексные исследования – выращивались кристаллы $\text{Sr}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$, в т.ч. с добавками Cu[2] и Ba (чтобы заместить Sr), и эпитаксиальные пленки $\text{Sr}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$, что позволило реализовать обширную материаловедческую программу для данного соединения и показать, что доля атомов Sr в СП-фазе мала (<0.3 ат.%), они размещаются между пятислойными блоками Bi_2Se_3 , а малые перестройки Sr подсистемы разрушают сверхпроводимость, в то же время температура СП-перехода нечувствительна к легированию. Также Sr вызывает напряжения в кристалле, которые ориентируют СП-нематичность [1]. Все эти данные подтверждают топологический характер СП.

1. A.Yu. Kuntsevich, M.A. Bryzgalov, R.S. Akzyanov, V.P. Martovitskii, A.L. Rakhmanov, Yu. Selivanov, "Strain-driven nematicity of odd-parity superconductivity in $\text{Sr}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ ", Physical Review **B100**, 224509 (2019).

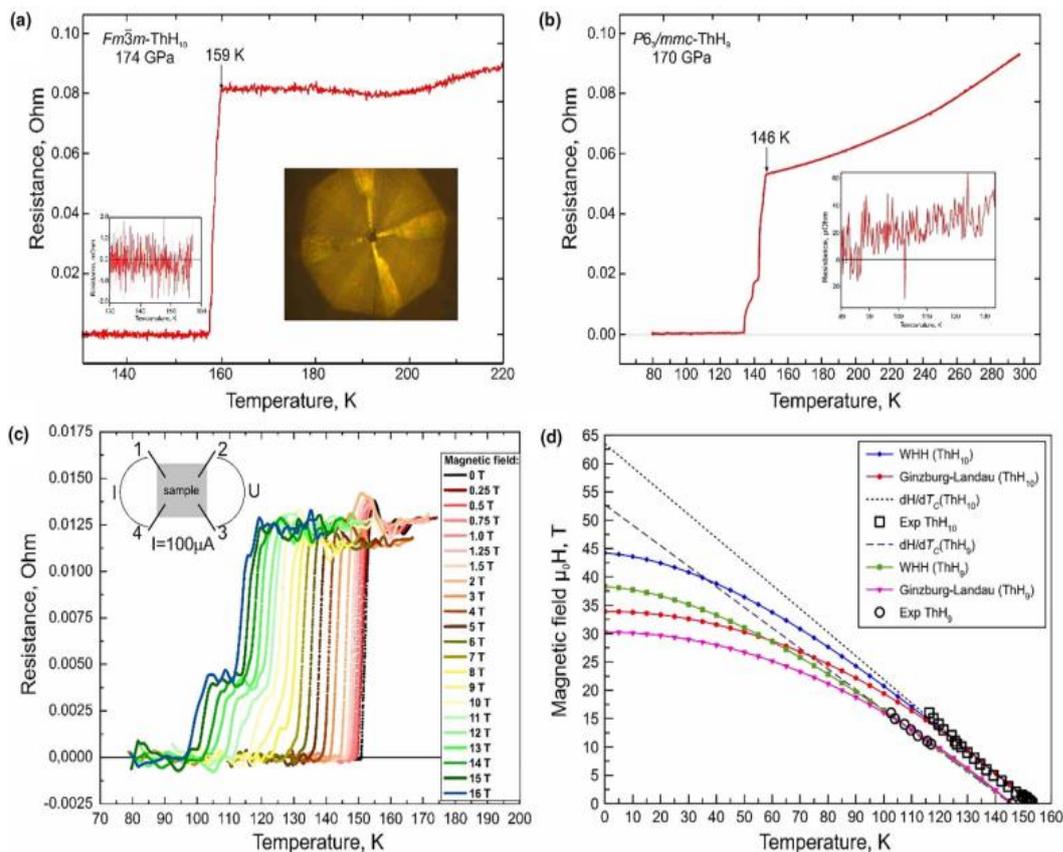
2. A.Yu. Kuntsevich, V.P. Martovitskii, G.V. Rybalchenko, Yu.G. Selivanov, M.I. Bannikov, O.A. Sobolevskiy, E.G. Chigevskii, "Superconductivity in Cu co-doped $\text{Sr}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ single crystals", Materials **12**, 3899, 2019.

3. S. Volosheniuk, Yu. Selivanov, M. Bryzgalov, V. Martovitskii, A. Kuntsevich, "Effect of Sr doping on structure, morphology, and transport properties of Bi_2Se_3 epitaxial thin films", Journ. of Applied Physics **125**, 095103, 2019.

ФИАН, ИТПЭ РАН, МФТИ

Гидрид тория ThH_{10} – новый высокотемпературный сверхпроводник с критической температурой $T_c=161\text{K}$.

При давлениях (170-175 ГПа) синтезированы два новых гидридных сверхпроводника, ThH_9 и ThH_{10} , с температурами сверхпроводящего перехода, 146 К и 159-161 К соответственно. Сверхпроводимость в этих соединениях предсказана теоретически и подтверждена наблюдением нулевого сопротивления и уменьшением T_c в магнитном поле. Исследованы сверхпроводящие свойства двух фаз, ThH_9 и ThH_{10} , в магнитных полях до 16 Т и определены верхние критические магнитные поля, 38 Т и 45 Т соответственно.



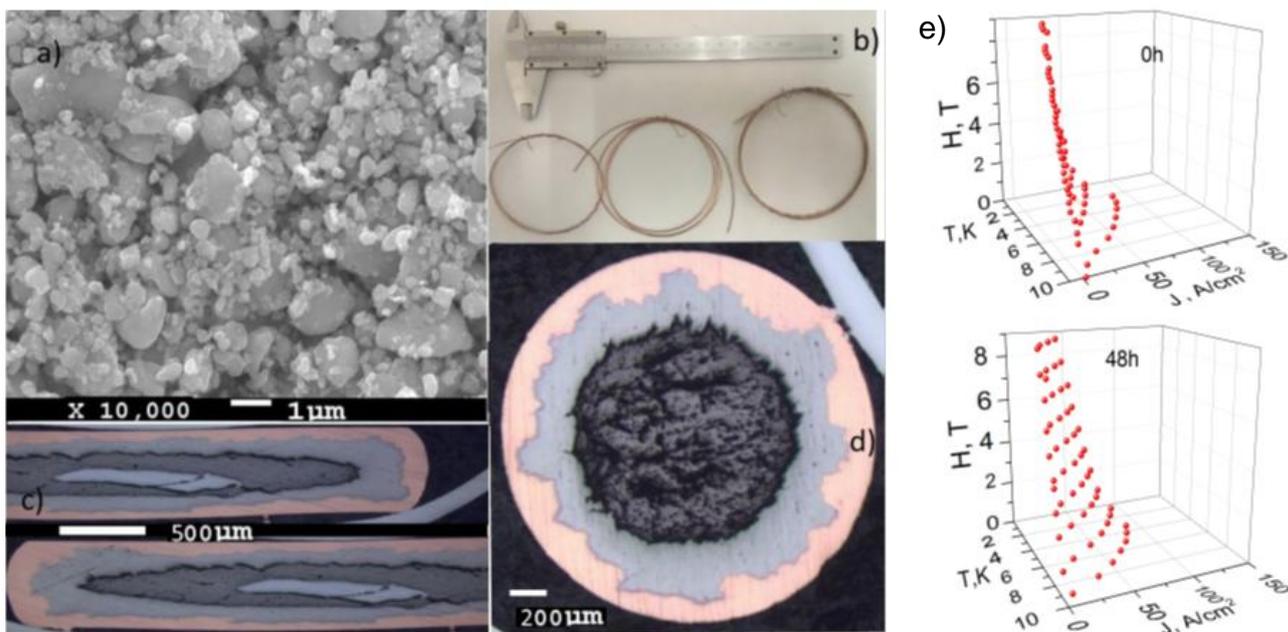
(a), (b) Сверхпроводящие переходы ThH_{10} и ThH_9 (на вставках – участок $R=0$), (c) Переходы в полях до 16 Т. (d) Зависимости $H_{c2}(T)$ в сравнении с моделями Гинзбурга-Ландау и WHH.

D.V.Semenok, A.G.Kvashnin, A.G.Ivanova, V.Svitlyk, V.Yu. Fominski, A.V.Sadakov, O.A.Sobolevskiy, V.M.Pudalov, I.A.Troyan, A.R.Oganov, “Superconductivity at 161 K in thorium hydride ThH_{10} : Synthesis and properties”, *Materials Today* (on-line), <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2019.10.005>.

ФИАН, ИК РАН, Сколтех, МИФИ, High Pressure Beamline, ESRF, BP220, Grenoble, France

Сверхпроводниковые провода на основе FeSe

Впервые в России изготовлены сверхпроводящие провода и ленты на основе сверхпроводника FeSe с помощью различных модификаций метода «порошок в трубе». Показано, что термообработка продолжительностью до 72 часов приводит к улучшению контакта между зёрнами и значительному увеличению плотности критического тока. Показано, что промышленная технология производства проводов и лент из Nb_3Sn может быть адаптирована для производства лент и проводов на основе железосодержащих сверхпроводников, преимуществом которых являются высокие критические поля.

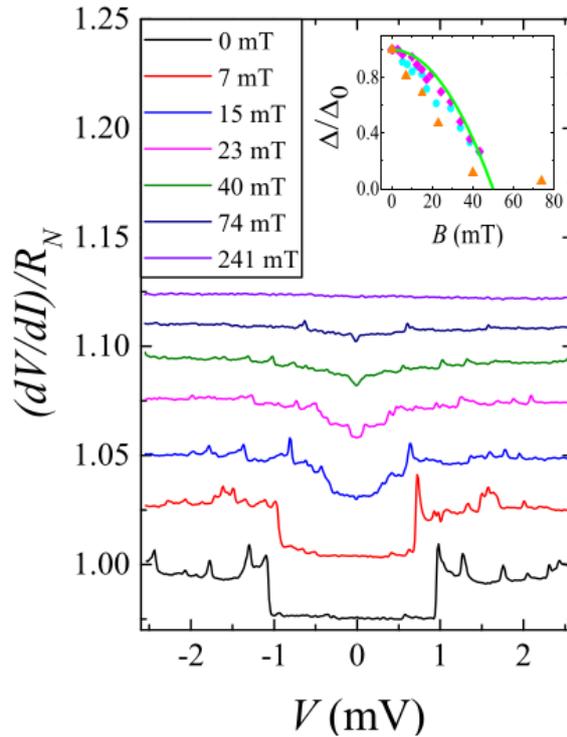


a) СЭМ-изображение порошка FeSe; b) образцы проводов и лент; c,d) сечение ленты и провода на основе FeSe; e) H - j - T диаграмма сверхпроводящего состояния в зависимости от времени отжига.

V.A. Vlasenko, K.S. Pervakov, Y.F. Eltsev, V.D. Berbentsev, A.S. Tsapleva, P.A. Lukyanov, I.M. Abdyukhanov, V.M. Pudalov, "Critical Current and Microstructure of FeSe Wires and Tapes Prepared by PIT Method", IEEE TRANS. APPLIED SUPERCOND. **29**(3), 6900505, (2019).

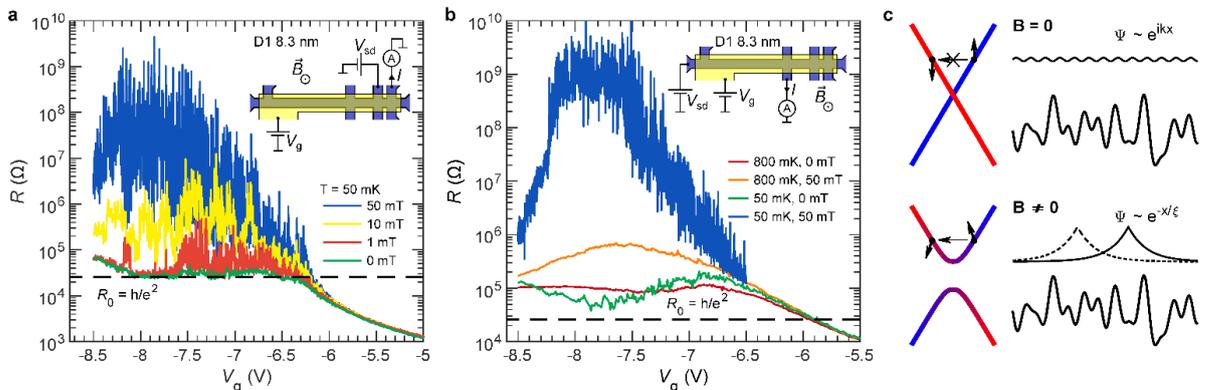
ФИАН, ИФВД РАН, ВНИИН

Специфический энергетический спектр топологических полуметаллов может приводить к формированию поверхностных плоских зон. Эта тематика привлекает повышенное внимание, так как, например, предсказано, что формирование плоской зоны должно приводить к резкому повышению температуры сверхпроводящего перехода в силу высокой плотности состояний в плоской зоне. Экспериментально исследован транспорт через интерфейс между дираковским топологическим полуметаллом Cd_3As_2 и нормальным металлом (золото). Для такого интерфейса полученные спектры дифференциального сопротивления $dV/dI(V)$ демонстрируют особенности стандартного Андреевского отражения с чётко определённой сверхпроводящей щелью, что крайне неожиданно для системы из двух несверхпроводящих в объёме материалов и приводит к заключению о поверхностной (интерфейсной) сверхпроводимости. Появление поверхностной сверхпроводимости оказалось устойчивым к качеству поверхности Cd_3As_2 и связано с образованием плоской зоны на интерфейсе, что было предсказано теоретически для топологических полуметаллов. Данное заключение подтверждается температурной и магнетопольевой зависимостями кривых $dV/dI(V)$. Возникновение плоской зоны на поверхности Cd_3As_2 также подтверждается результатами ARPES.



O.O. Shvetsov, V.D. Esin, A.V. Timonina, N.N. Kolesnikov, E.V. Deviatov, “Surface superconductivity in a three-dimensional Cd₃As₂ semimetal at the interface with a gold contact”, Phys. Review **B99**, 125305 (2019)
ИФТТ РАН

Экспериментально обнаружен эффект гигантского магнитосопротивления в краевой проводимости квантовых ям HgTe/CdHgTe с инверсной зонной структурой в режиме спинового квантового эффекта Холла. Рост сопротивления на несколько порядков величины в магнитных полях масштаба 10 мТл сопровождается переходом к экспоненциальной температурной зависимости и проявлением сильнейших мезоскопических флуктуаций проводимости. Эти наблюдения свидетельствуют о переходе в состояние одномерного андерсоновского изолятора и являются первой надежной демонстрацией топологической защиты краевых состояний от рассеяния в нулевом магнитном поле.



Двухтерминальные измерения образца в режиме квантового спинового эффекта Холла. (а) Двухтерминальное сопротивление в линейном отклике для края длиной 6 мкм в образце D1 (8.3 нм квантовая яма) в зависимости от затворного напряжения при температуре

$T=50$ мК и при различных значениях перпендикулярного магнитного поля B_{\perp} . (b) Двухтерминальное сопротивление в линейном отклике для края длиной 38 мкм в образце D1 в зависимости от затворного напряжения, измеренное при $T = 50$ мК и при $T = 800$ мК с и без магнитного поля $B_{\perp}=50$ мТ. На вставках панелей (a) и (b) показана структура образца и соответствующая измерительная схема. (c) Влияние магнитного поля на электронные состояния в квантовом спиновом эффекте Холла. Для $B = 0$ предсказан бесщелевой спектр со связанными импульсом и спином электрона (слева вверху), при этом влияние случайного потенциала на движущиеся электроны отсутствует по причине топологической защиты (справа вверху). Волновая функция электрона Ψ в этом случае соответствует свободному распространению вдоль края, $\Psi \sim e^{ikx}$. При ненулевом B в спектре открывается земановская щель и распространяющиеся навстречу ветви спектра более не состоят из электронных состояний с противоположным спином, гибридизуясь вблизи точки Дирака (слева внизу). Как следствие топологическая защита нарушается и беспорядок приводит к рассеянию электронов назад и локализует их (справа внизу), огибающие волновых функций электронов затухают экспоненциально на длине локализации ξ , $\Psi \sim e^{-x/\xi}$.

S.U. Piatrusha, E.S. Tikhonov, Z.D. Kvon, N.N. Mikhailov, S.A. Dvoretzky, V.S. Khrapai, "Topological Protection Brought to Light by the Time-Reversal Symmetry Breaking", *Phys. Rev. Lett.* **123**, 56801 (2019).

ИФТТ РАН, ВШЭ, ИФП СО РАН, НГУ, МФТИ