

«УТВЕРЖДАЮ»

Врио директора Института теоретической  
физики им. Л.Д. Ландау РАН  
д.ф.м.н. доц



Колоколов И.В.

## ВЫПИСКА

из протокола заседания Сектора квантовой мезоскопии  
Института теоретической физики им. Л.Д. Ландау РАН  
от 21 декабря 2018 г.

Заключение о диссертации Фомина Я.В.

«Взаимовлияние сверхпроводимости и магнетизма и особенности нечётных по частоте  
сверхпроводящих состояний» по месту ее выполнения.

СЛУШАЛИ: Доклад Фомина Я.В. по диссертации «Взаимовлияние сверхпроводимости и магнетизма и особенности нечётных по частоте сверхпроводящих состояний», представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02 — теоретическая физика.

ПОСТАНОВИЛИ: Принять следующее заключение о диссертации Фомина Я.В. «Взаимовлияние сверхпроводимости и магнетизма и особенности нечётных по частоте сверхпроводящих состояний».

В диссертационной работе Фомина Я.В. изучается ряд явлений, связанных с взаимовлиянием сверхпроводимости и магнетизма, в частности обусловленных нечётными по частоте сверхпроводящими состояниями.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка публикаций автора по теме диссертации, списка литературы и четырех приложений.

Во введении обоснована актуальность темы, сформулирована цель работы, обоснованы новизна и практическая ценность полученных результатов, раскрыто содержание диссертации по главам.

Первая глава посвящена изучению особенностей нечётной по частоте сверхпроводимости. В разделе 1.1 изучаются свойства SF и SFS контактов при наличии неелевской доменной структуры в F части. Показано, что вблизи доменных стенок происходит генерация нечётной по частоте сверхпроводящей компоненты, которая в диффузном случае оказывается s-волновой и спин-триплетной. Замечательной особенностью таких сверхпроводящих корреляций оказывается их «дальнодействующий» характер: в то время как характерная длина когерентности в монодоменном F определяется энергетическим

масштабом обменной энергии, триплетные корреляции в неоднородном обменном поле могут не испытывать разрушающего магнитного действия и распространяться на гораздо большую длину когерентности, определяемую энергетическим масштабom температуры. Вычислена поправка к плотности состояний в F слое благодаря дальнедействующей триплетной компоненте и обусловленный ею джозефсоновский ток в SFS контакте. В разделе 1.2 исследуется проводимость контакта между нормальным металлом и сверхпроводником, имеющим нечётную по частоте симметрию, предложенную Березинским. Андреевское отражение (связывающее положительные и отрицательные энергии) чувствительно к энергетической симметрии; в результате этого проводимость контакта со сверхпроводником Березинского качественно отличается от случая обычного сверхпроводника. В разделе 1.3 исследуются симметрии и магнитные свойства сверхпроводящих корреляций, возникающих как субдоминантные компоненты в неоднородных сверхпроводниках. Частотная симметрия, пространственная чётность и тип магнитного отклика этих субдоминантных сверхпроводящих компонент оказываются противоположны аналогичным характеристикам доминантных компонент в объёме. Этот вывод остаётся справедливым и при обобщении теории сверхпроводимости на случай недавно предложенных диамагнитных нечётных по частоте сверхпроводников. В результате сверхпроводящие корреляции можно разбить на восемь классов, учитывая их симметрии и магнитные свойства. При этом две группы состояний, содержащие парамагнитные и диамагнитные нечётные по частоте состояния соответственно, друг с другом не перемешиваются. В объёмном сверхпроводнике парамагнитное состояние было бы неустойчивым. Недавно несколькими группами была предложена возможность реализации объёмного однородного нечётного по частоте сверхпроводящего состояния с обычным диамагнитным мейснеровским откликом. В подразделах 1.3.3-1.3.5 показано, что в действительности не существует физически реализуемых возмущений, способных привести к спонтанному нарушению симметрии такого вида, который необходим для фактической реализации нечётного по частоте диамагнитного сверхпроводящего состояния. Это означает, что группа состояний, содержащих диамагнитные нечётные состояния, нереализуема, а реализуемые нечётные по частоте сверхпроводящие состояния должны иметь аномальный парамагнитный отклик (и реализуются в неоднородных системах). В разделе 1.4 рассматривается динамический отклик нечётной по частоте сверхпроводящей компоненты на электромагнитное поле. Конкретно, вычисляется поверхностный импеданс ( $Z = R - iX$ ) тонкой диффузной плёнки из нормального металла, покрывающей триплетный p-волновой сверхпроводник (эта плёнка моделирует неровную поверхность). В такой системе в результате эффекта близости также генерируются s-волновые триплетные нечётные по частоте сверхпроводящие корреляции. В противоположность обычному соотношению  $R < X$ , поверхностный импеданс за счёт таких корреляций может иметь аномальное поведение  $R > X$  при низких температурах. Это связано с аномальным эффектом Мейснера для нечётных состояний, который проявляется в противоположном обычному знаке связи между векторным потенциалом и сверхтоком. Особый интерес представляет случай кирального p-волнового сверхпроводника — именно такое состояние считается наиболее вероятным в рутенате стронция. Общий ход температурных зависимостей  $R(T)$  и  $X(T)$  в этом случае существенно отличается от обычного, в частности из-за наличия большого числа подщелевых квазичастиц в нормальном слое (поверхностные андреевские состояния). Эксперименты, проведённые на образцах рутената стронция  $Sr_2RuO_4$  группой из ИФТТ, качественно согласуются с теорией, что подтверждает предположение о киральном p-волновом состоянии в этом веществе.

Вторая глава посвящена изучению сверхпроводящих спиновых клапанов. В разделе 2.1 исследуется критическая температура  $T_c$  трёхслойной SFF структуры, в которой при неколлинеарных намагниченностях F слоёв возникает дальнедействующая триплетная сверхпроводящая компонента. Показано, что  $T_c$  может быть немонотонной функцией угла  $\alpha$  между намагниченностями двух F слоёв. Минимум достигается при промежуточном значении  $\alpha$ , лежащем между параллельным ( $P$ ,  $\alpha = 0$ ) и

антипараллельным (AP,  $\alpha = \pi$ ) случаями. Это означает возможность «триплетного» эффекта спинового клапана: при температурах выше минимума  $T_c^{\text{Tr}}$ , но ниже  $T_c^{\text{P}}$  и  $T_c^{\text{AP}}$ , система будет в сверхпроводящем состоянии только при ориентациях, близких к коллинеарным. Если же рассматривать только P и AP конфигурации, то оказывается, что в зависимости от параметров системы возможен как «обычный» ( $T_c^{\text{P}} < T_c^{\text{AP}}$ ), так и «обратный» ( $T_c^{\text{P}} > T_c^{\text{AP}}$ ) эффект переключения. Предсказанный теоретически эффект триплетного спинового клапана был подтверждён экспериментально совместной группой из Казани и Дрездена. Также экспериментально была продемонстрирована возможность как обычного, так и обратного эффекта спинового клапана при сравнении двух коллинеарных конфигураций. Проведённая серия экспериментов потребовала дальнейшего развития теории этого эффекта. Развитая теория и анализ экспериментальных данных представлены в разделе 2.2. В разделе 2.3 рассматривается сверхпроводящий спиновый клапан, представляющий собой СКВИД, в котором в качестве джозефсоновских переходов выступают SFS структуры с полуметаллическими ферромагнетиками. Так как синглетная куперовская пара не может пройти через такой переход, весь транспорт заряда происходит через расщеплённые пары, когда два электрона идут по разным рукавам. Изучена зависимость характеристик СКВИДа (андреевских уровней, ток-фазового соотношения и критического тока) от двух управляющих параметров — угла между намагниченностями и магнитного потока. В зависимости от геометрических параметров системы ток-фазовая характеристика может менять амплитуду и форму, а также менять знак (что соответствует  $\pi$ -состоянию контакта) и иметь дополнительные пересечения нуля. Также зависимость критического тока от управляющих параметров может быть немонотонной. Периодичность по магнитному потоку удвоена по сравнению с обычным СКВИДом.

Третья глава посвящена изучению влияния неоднородного и неупорядоченного магнетизма на сверхпроводимость. В разделе 3.1 изучается минищель в SF и SFS контактах со спиральной намагниченностью. Показано, что обменное поле эффективно усредняется из-за неоднородности, и щель в плотности состояний в магнитной области сохраняется до значений много больших, чем в случае однородного обменного поля. В разделе 3.2 рассматривается задача об эффекте близости в диффузной системе, составленной из сверхпроводящих и нормальных (или ферромагнитных) областей с магнитным беспорядком. В случае слабого магнитного беспорядка показано, что на масштабах много больше его корреляционной длины эффект магнитного беспорядка может быть описан локальным членом в уравнениях Узаделя, соответствующим процессам рассеяния электронов с переворотом спина (спин-флип). Это позволяет легко найти различные физические характеристики системы, например, минищель в ферромагнетике. Спин-флип член в уравнении Узаделя и соответствующая интенсивность спин-флип рассеяния выведены в общем случае трёхмерного зеемановского поля с произвольной корреляционной длиной. В данной задаче можно выделить три основных режима: точечные примеси (корреляционная длина меньше фермиевской длины волны), среднемасштабный беспорядок (корреляционная длина больше фермиевской длины волны, но меньше длины свободного пробега) и крупномасштабный беспорядок (корреляционная длина больше длины свободного пробега). Эти три режима исследованы с помощью трёх дополняющих друг друга подходов: уравнений Узаделя, нелинейной сигма-модели и диаграммного разложения. В разделе 3.3 исследуется отклик диффузного сверхпроводника со слабыми неборновскими магнитными примесями на внешнее электромагнитное поле. Магнитные примеси изменяют спектр возбуждений в сверхпроводнике и поэтому влияют на проводимость и импеданс. Исследована зависимость проводимости и импеданса от частоты, концентрации магнитных примесей и их силы, и от концентрации квазичастиц (температуры). Учтена сложная структура спектра квазичастичных состояний, связанная с наличием подщелевой примесной зоны, обусловленной неборновостью магнитных примесей. В разделе 3.4 исследуется плотность состояний в диффузных сверхпроводниках с сильными магнитными примесями, подчиняющимися статистике Пуассона. Таким образом могут

быть описаны примеси произвольной силы, а известный случай борновских магнитных примесей с гауссовой статистикой является предельным случаем представленного полного рассмотрения. Теория среднего поля предсказывает нетривиальную структуру плотности состояний, содержащую континуум квазичастичных состояний, а также, возможно, примесную зону. В приближении среднего поля все края спектра являются жёсткими и обозначают чёткие границы между областями конечной и нулевой плотности состояний. С помощью инстантонов в технике репличной сигма-модели вычислена средняя плотность состояний за рамками среднеполевого приближения. Таким образом найдены подщелевые состояния («хвосты» плотности состояний), которые размывают края спектра за счёт флуктуаций потенциального (обычные примеси) и непотенциального (магнитные примеси) беспорядка.

Четвертая глава посвящена изучению кулоновских эффектов в гранулированных сверхпроводниках в магнитном поле. В разделе 4.1 исследуется возможность перехода двумерного гранулированного сверхпроводника с относительно большой межгранульной проводимостью в диэлектрическое состояние под действием магнитного поля. Показано, что такое состояние возникает в модели с пространственными вариациями критического магнитного поля отдельной гранулы (за счёт разброса в размерах гранул) в предположении чередования сверхпроводящих и нормальных (со сверхпроводимостью, подавленной полем) гранул. В разделе 4.2 изучается влияние магнитного поля и кулоновского взаимодействия на эффект близости в контакте между сверхпроводником и гранулой из нормального металла в пределе хорошей проводимости границы. Изучено подавление наведённой сверхпроводимости в грануле магнитным полем в зависимости от силы кулоновского взаимодействия. Построена фазовая диаграмма в координатах кулоновская энергия-магнитное поле. Возможны три фазы нормальной гранулы: сильное (S) и слабое (S') сверхпроводящее (т.е. щелевое), а также нормальное (т.е. бесщелевое) состояние (N). Переход из S фазы в S' и N является фазовым переходом первого рода, а переход между S' и N состояниями — переходом второго рода. Кроме того, исследована туннельная плотность состояний в нормальной грануле. В туннельной плотности состояний можно различить две щели, соответствующие эффекту близости (минищель) и кулоновской блокаде (кулоновская щель). Такое различие становится возможным благодаря магнитному полю, которое смещает положение минищели за счёт эффекта Зеемана.

Приложения содержат технические подробности вычислений и вспомогательные результаты. В заключении сформулированы основные итоги выполненного исследования.

Основные результаты диссертации опубликованы в 20 работах:

1. A. F. Volkov, Ya. V. Fominov, K. B. Efetov, *Long-range odd triplet superconductivity in superconductor-ferromagnet structures with Néel walls*, Phys. Rev. B **72**, 184504 (2005).
2. D. A. Ivanov, Ya. V. Fominov, *Minigap in superconductor-ferromagnet junctions with inhomogeneous magnetization*, Phys. Rev. B **73**, 214524 (2006).
3. I. S. Beloborodov, Ya. V. Fominov, A. V. Lopatin, V. M. Vinokur, *Insulating state of granular superconductors in a strong-coupling regime*, Phys. Rev. B **74**, 014502 (2006).
4. P. M. Ostrovsky, Ya. V. Fominov, M. V. Feigel'man, *Proximity effect in the presence of Coulomb interaction and magnetic field*, Phys. Rev. B **74**, 104505 (2006).
5. Ya. V. Fominov, A. F. Volkov, K. B. Efetov, *Josephson effect due to the long-range odd-frequency triplet superconductivity in SFS junctions with Néel domain walls*, Phys. Rev. B **75**, 104509 (2007).
6. Ya. V. Fominov, *Conductance of a junction between a normal metal and a Berezinskii superconductor*, Письма в ЖЭТФ **86**, 842 (2007).
7. D. A. Ivanov, Ya. V. Fominov, M. A. Skvortsov, P. M. Ostrovsky, *Effective spin-flip scattering in*

- diffusive superconducting proximity systems with magnetic disorder*, Phys. Rev. B **80**, 134501 (2009).
8. Ya. V. Fominov, A. A. Golubov, T. Yu. Karminskaya, M. Yu. Kupriyanov, R. G. Deminov, L. R. Tagirov, *Superconducting triplet spin valve*, Письма в ЖЭТФ **91**, 329 (2010).
  9. Yasuhiro Asano, Alexander A. Golubov, Yakov V. Fominov, Yukio Tanaka, *Unconventional Surface Impedance of a Normal-Metal Film Covering a Spin-Triplet Super-conductor Due to Odd-Frequency Cooper Pairs*, Phys. Rev. Lett. **107**, 087001 (2011).
  10. Ya. V. Fominov, M. Houzet, L. I. Glazman, *Surface impedance of superconductors with weak magnetic impurities*, Phys. Rev. B **84**, 224517 (2011).
  11. P. V. Leksin, N. N. Garif'yanov, I. A. Garifullin, Ya. V. Fominov, J. Schumann, Y. Krupskaya, V. Kataev, O. G. Schmidt, B. Büchner, *Evidence for Triplet Superconductivity in a Superconductor-Ferromagnet Spin Valve*, Phys. Rev. Lett. **109**, 057005 (2012).
  12. P. V. Leksin, A. A. Kamashev, N. N. Garif'yanov, I. A. Garifullin, Ya. V. Fominov, J. Schumann, C. Hess, V. Kataev, B. Büchner, *Peculiarities of performance of the spin valve for the superconducting current*, Письма в ЖЭТФ **97**, 549 (2013).
  13. Yasuhiro Asano, Yakov V. Fominov, Yukio Tanaka, *Consequences of bulk odd-frequency superconducting states for the classification of Cooper pairs*, Phys. Rev. B **90**, 094512 (2014).
  14. Ya. V. Fominov, Y. Tanaka, Y. Asano, M. Eschrig, *Odd-frequency superconducting states with different types of Meissner response: Problem of coexistence*, Phys. Rev. B **91**, 144514 (2015).
  15. P. V. Leksin, N. N. Garif'yanov, A. A. Kamashev, Ya. V. Fominov, J. Schumann, C. Hess, V. Kataev, B. Büchner, I. A. Garifullin, *Superconducting spin-valve effect and triplet superconductivity in CoO<sub>x</sub>/Fe1/Cu/Fe2/Cu/Pb multilayer*, Phys. Rev. B **91**, 214508 (2015).
  16. P. V. Leksin, N. N. Garif'yanov, A. A. Kamashev, A. A. Validov, Ya. V. Fominov, J. Schumann, V. Kataev, J. Thomas, B. Büchner, I. A. Garifullin, *Isolation of proximity-induced triplet pairing channel in a superconductor/ferromagnet spin valve*, Phys. Rev. B **93**, 100502(R) (2016).
  17. Yakov V. Fominov, Mikhail A. Skvortsov, *Subgap states in disordered superconductors with strong magnetic impurities*, Phys. Rev. B **93**, 144511 (2016).
  18. P. L. Stroganov, Ya. V. Fominov, *Cooper pair splitting in ballistic ferromagnetic SQUIDs*, Phys. Rev. B **96**, 174508 (2017).
  19. Andrey A. Kamashev, Aidar A. Validov, Joachim Schumann, Vladislav Kataev, Bernd Büchner, Yakov V. Fominov, Ilgiz A. Garifullin, *Increasing the performance of a superconducting spin valve using a Heusler alloy*, Beilstein J. Nanotechnol. **9**, 1764 (2018).
  20. S. V. Bakurskiy, Ya. V. Fominov, A. F. Shevchun, Y. Asano, Y. Tanaka, M. Yu. Kupriyanov, A. A. Golubov, M. R. Trunin, H. Kashiwaya, S. Kashiwaya, Y. Maeno, *Local impedance on a rough surface of a chiral p-wave superconductor*, Phys. Rev. B **98**, 134508 (2018).

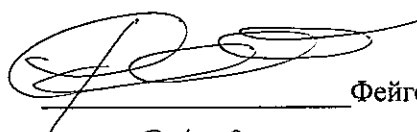
Основные результаты, представленные в диссертации, докладывались и обсуждались на международных конференциях Летняя школа по теоретической физике «Nanoscopic Quantum Transport» (Лезуш, Франция, 2004), «Single Molecule Magnets and Hybrid Magnetic Nanostructures» (Триест, Италия, 2005), «Strongly Correlated Phenomena in Quantum Field Theory, Nanophysics and Hydrodynamics» (Триест, Италия, 2005), «Нанозифика и нанозлектроника» (Нижний Новгород, 2006, 2007, 2008, 2009, 2012, 2016, 2018), «Mesoscopic and Strongly Correlated Electron Systems» (Черногоровка, 2006), «Physics of Nanoscale Superconducting Heterostructures» (Лейден, Нидерланды, 2007), Euro-Asian Symposium EASTMAG «Magnetism on a nanoscale» (Казань, 2007), «Spintronics with superconductors» (Бохум, Германия, 2007), «Nanoscale Superconductivity and Magnetism» (Хсинчу, Тайвань, 2007), «Landau-Weizmann Workshop on theoretical physics» (Реховот, Израиль, 2008), «Spin Helicity and Chirality in Superconductor and Semiconductor Nanostructures» (Карлсруэ, Германия, 2008),

I.F. Schegolev Memorial Conference' «Low-Dimensional Metallic and Superconducting Systems» (Черноголовка, 2009), «Landau Days» (Черноголовка, 2009, 2010, 2011, 2012), «International Conference on Superconductivity and Magnetism» (Турция: Анталия, 2010; Стамбул, 2012), «Dubna-Nano» (Дубна, 2010, 2012), Российско-украинский семинар «Физика сверхпроводниковых гетероструктур» (Черноголовка, 2011; Киев, Украина, 2012), «Superconductivity Centennial Conference EUCAS-ISEC-ICMS» (Гаага, Нидерланды, 2011), «Humboldt Kolleg: NANO-2011. Cooperation and Networking of Universities and Research Institutes, study by doing research» (Кишинёв, Молдова, 2011), «Superconducting Nanohybrids» (Сан Себастьян, Испания, 2012), Собрание по физике низких температур HT-36 (Санкт-Петербург, 2012), «Winter workshop/school on localization, interactions and superconductivity» (Черноголовка, 2014, 2015), «FFLO-Phase in Quantum Liquids, Quantum Gases, and Nuclear Matter» (Дрезден, Германия, 2016), «8th topology interactive meeting at Nagoya Univ.» (Нагоя, Япония, 2017), «Topological Materials Science» (Токио, Япония, 2017), «Moscow International Symposium on Magnetism (MISM)» (Москва, 2017), «Mesoscopic Structures: Fundamentals and Applications (MSFA)» (Листвянка, 2017), «A.A. Abrikosov Memorial Conference» (Черноголовка, 2018), на семинарах в ИТФ им. Л.Д. Ландау РАН (Черноголовка), ИФП им. П.Л. Капицы РАН (Москва), ИФТТ РАН (Черноголовка), ФИАН (Москва), МФТИ (Долгопрудный), НИТУ МИСиС (Москва), ИТФ им. Н.Н. Боголюбова НАНУ (Киев, Украина), в Швейцарской высшей технической школе Цюриха (Швейцария), в Центре статистической физики, магнетизма и сверхпроводимости (Гренобль, Франция), в университетах Нагоя (Япония), Хоккайдо (Саппоро, Япония), в Институте исследования твёрдого тела Общества Макса Планка (Штутгарт, Германия).

Опубликованные по теме диссертации работы в достаточной мере отражают ее содержание. Объем и уровень проведенного исследования, а также новизна и актуальность полученных результатов, свидетельствуют о том, что диссертация Фомина Я.В. удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК к докторским диссертациям, а ее автор заслуживает присвоения ему ученой степени доктора физико-математических наук.

На основании вышеизложенного Сектор квантовой мезоскопии ИТФ им. Л.Д. Ландау РАН рекомендует диссертацию Фомина Я.В. «Взаимовлияние сверхпроводимости и магнетизма и особенности нечётных по частоте сверхпроводящих состояний» к публичной защите по специальности 01.04.02 — теоретическая физика.

Зав. сектором квантовой мезоскопии  
ИТФ им. Л.Д. Ландау РАН  
д.ф.-м.н., проф.



Фейгельман М.В.

«21» декабря 2018 г.