

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ



119991, Москва, ГСП-1
Ленинский проспект, 53, ФИАН
Телефоны: (499) 132 6554
(499) 135 1429
Телефакс: (499) 135 7880
<http://www.lebedev.ru>
office@sci.lebedev.ru

“УТВЕРЖДАЮ”

Заместитель директора
Физического института
им. П.Н. Лебедева РАН
доктор физ.-мат. наук


В.А. Рябов



ОТЗЫВ

Ведущей организации

на диссертационную работу Кешарпу Каушала Кумара
«Зарождение сверхпроводимости в сильно анизотропных гетерогенных материалах»,
представленную на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук по специальности
1.3.8 – «Физика конденсированного состояния»

Исследование сверхпроводимости в низкоразмерных и слоистых соединениях является одним из важных и развивающихся направлений в современной физике конденсированного состояния. Это направление актуально и имеет большую практическую значимость, т.к. все применяемые на практике купратные ВТСП материалы являются слоистыми, а класс перспективных квазидвумерных сверхпроводников на основе железа непрерывно пополняется новыми материалами, например, семейств 1144, 12442 и др. В диссертации рассматривается ряд материалов, принадлежащих к купратам ($YBa_2Cu_4O_8$), органическим сверхпроводникам [$\beta - (BEDT - TTF)_2I_3$, $(TMTSF)_2PF_6$, $(TMTSF)_2ClO_4$] и сверхпроводникам на основе железа ($FeSe$). На фазовой диаграмме всех этих материалов сверхпроводимость либо сосуществует, либо находится рядом с другими фазами (металлической, волной спиновой плотности, волной зарядовой плотности, антиферромагнитной). Конкуренция двух соседствующих типов упорядочения приводит к зарождению сверхпроводящих доменов в фоновой фазе. В диссертации используется эта физическая картина для развития теоретической модели и ее применение к вышеупомянутым материалам.

Задачи диссертационной работы Кешарпу К. К. заключались в: (i) нахождении способа расчета объема сверхпроводящей фазы в сильно анизотропных и неоднородных материалах, (ii) объяснении наблюдаемой анизотропии температуры перехода в состояние с нулевым сопротивлением в $(TMTSF)_2PF_6$, (iii) объяснении анизотропного падения сопротивления в $YBa_2Cu_4O_8$, и (iv) объяснении повышения температуры перехода в сверхпроводящее состояние в $FeSe$ в более тонких образцах.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и двух приложений. Она изложена на 129 страницах, включая 30 рисунков.

Во введении к диссертации обосновывается актуальность темы диссертационной работы, формулируются ее цели, научная новизна и практическая значимость, перечислены результаты, выносимые на защиту.

Первая глава относится к математической части обзора. Здесь автор ввел математическую модель эффективной проводимости гетерогенной среды, содержащей нескольких фаз и подробно объяснил приближение Максвелла-Гарнетта и его известные решения. Автор воспроизвел вывод уравнения для эффективной проводимости, когда в фоновой (мажоритарной) изотропной среде имеются одно (или более) сферическое или эллипсоидное включение.

Во второй главе автор обобщил приближение Максвелла-Гарнетта для анизотропных сред. Раздел 2.1 объясняет процессы перехода в сверхпроводящее состояние в неоднородных материалах и переноса электронов в присутствии сверхпроводящих доменов. В разделах 2.2 и 2.3 выведены уравнения проводимости и расчета объемной доли сверхпроводящих доменов в сильно анизотропных неоднородных материалах. Далее в разделе 2.4 автор обсуждает пределы применимости предложенного метода. Этот метод применяется только в макроскопическом пределе ($l \gg d \gg \xi$), то есть когда размер сверхпроводящих доменов (d) больше, чем длина когерентности сверхпроводника (ξ), и расстояние между доменами (l) гораздо больше, чем их размеры. В этой же главе автор показал, почему можно пренебречь в этих пределах рядом квантовых эффектов: Андреевским отражением, эффектом близости и Джозефсоновской связью между сверхпроводящими доменами.

Третья глава посвящена применению разработанного метода к органическим материалам. Здесь автор рассмотрел наиболее экспериментально изученные квазиодномерные соединения $(\text{TMTSF})_2\text{PF}_6$ и $(\text{TMTSF})_2\text{ClO}_4$. Сначала находится объем сверхпроводящей фазы в $(\text{TMTSF})_2\text{PF}_6$. Затем автор анализирует экспериментальные наблюдения анизотропии установления сверхпроводящей фазы: состояние нулевого сопротивления сначала возникает вдоль оси z , самой короткой и с самым большим сопротивлением, затем вдоль оси y , и только в конце - вдоль оси x , самой длинной и с самым низким сопротивлением. Показана неприменимость модели сверхпроводящих флуктуаций для объяснения этого явления. В развитой автором теории предполагается, что такое поведение происходит из-за высокой вероятности перколяции сверхпроводящих доменов вдоль кратчайшей оси. Действительно, как известно, образцы кристаллов $(\text{TMTSF})_2\text{PF}_6$ имеют, как правил, игольчатую форму. Поэтому сверхпроводящие домены, которые существуют в $(\text{TMTSF})_2\text{PF}_6$, быстрее всего соединяются вдоль самой короткой оси (ось z). Чтобы подтвердить это предположение, автор провел численный расчет методом Монте-Карло и нашел зависимость вероятности перколяции от объема сверхпроводящей фазы вдоль разных осей.

С использованием разработанного метода автор получил теоретическое объяснение влиянию скорости охлаждения на форму сверхпроводящих доменов в квазиодномерном $(\text{TMTSF})_2\text{ClO}_4$. Для $\beta\text{-(BEDT-TTF)}_2\text{I}_3$ автор с помощью экспериментальных данных по магнитной восприимчивости рассчитал объем сверхпроводящих доменов, а затем сравнил его с результатами объема сверхпроводящей фазы, полученными с помощью разработанного метода. Хорошая согласованность этих данных с экспериментами показывает, что разработанный автором диссертации метод действительно хорошо работает в макроскопическом пределе.

В четвертой главе разработанный автором метод применяется к $\text{YBa}_2\text{Cu}_4\text{O}_8$ и FeSe . В купрате $\text{YBa}_2\text{Cu}_4\text{O}_8$ скорость падения сопротивления вдоль оси z выше, чем вдоль осей x и y . Автор подробно показывает, что такое поведение невозможно полностью объяснить, используя стандартную теорию сверхпроводящих флуктуаций. В диссертации показано,

что этот эффект можно объяснить присутствием сверхпроводящих доменов анизотропной формы. Также показано, что из-за более высокой вероятности перколяции сверхпроводящих доменов в тонких образцах температура сверхпроводящего перехода в них выше, чем в толстых образцах.

В заключении диссертации суммированы главные полученные автором результаты работы. В двух приложениях изложены детали подгонки для нахождения формы сверхпроводящих доменов и расчеты Монте-Карло для $(\text{TMTSF})_2\text{PF}_6$. Там же обсуждается решение эллиптических интегралов, использованных в диссертации.

Из основных результатов диссертации следует отметить разработку метода для нахождения объема сверхпроводящей фазы и формы сверхпроводящих доменов путем обобщения приближения Максвелла-Гарнетта для анизотропных неоднородных материалов. В диссертации дано объяснение анизотропной температуры перехода в сверхпроводящее состояние, которая наблюдается в $(\text{TMTSF})_2\text{PF}_6$. Оно происходит из-за перколяции сверхпроводящих доменов вдоль самой короткой оси. Возрастание температуры перехода в сверхпроводящее состояние с уменьшением толщины образцов в FeSe тоже можно объяснить на основе этой идеи. В диссертации предложено возможное объяснение анизотропного убывания сопротивлений в $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$. Эти результаты доказывают, что размер и форма образцов играют большую роль в переходе в сверхпроводящее состояние в сильно анизотропных сверхпроводниках.

Полученные автором в диссертационной работе результаты являются новыми. Это относится к

- разработке теории и математической модели для расчета объемной доли сверхпроводящей фазы,
- применению разработанной модели к различным сильно анизотропным сверхпроводящим материалам (к купратам, органическим сверхпроводникам и сверхпроводникам на основе железа) и к
- объяснению явления наблюдаемой анизотропии перехода и анизотропного падения сопротивления в слоистых сверхпроводниках.

Достоверность основных выводов, сформулированных диссертантом, обеспечивается адекватным выбором необходимых теоретических методов исследования, апробацией работы на многих российских и международных конференциях, а также публикацией результатов диссертационной работы в ведущих рецензируемых журналах. Практическая значимость полученных результатов заключается в усовершенствовании теории проводимости анизотропных гетерогенных материалов и в создании и апробации математической модели, которая может успешно применяться для описания экспериментальных данных.

Как и всякое исследование, диссертационная работа Кешарпу К. К., однако, обладает некоторыми недостатками, которые перечислены ниже в замечаниях:

- 1) В тексте имеются многочисленные опечатки, а английские термины не всегда точно переведены на русский язык: например, вместо “игла”, “остриё” или “зонд” туннельного микроскопа написано “наконечник”.
- 2) В диссертации теоретически рассмотрены эффекты, которые ранее были экспериментально обнаружены и исследованы, но не имели удовлетворительного теоретического объяснения. Было бы полезно применить разработанные автором подходы и модель для предсказания новых эффектов или свойств новых материалов, например в слоистых топологических сверхпроводниках. Этого, к сожалению, в диссертации не сделано.

3) При рассмотрении анизотропного установления сверхпроводящего состояния в $(\text{TMTSF})_2\text{ClO}_4$ не проведен теоретический анализ экспериментально наблюдаемого в $(\text{TMTSF})_2\text{ClO}_4$ и в $(\text{TMTSF})_2\text{PF}_6$ гистерезиса в температурной зависимости сопротивления вблизи границы с состоянием SDW. Не рассмотрена роль поверхностной энергии на границе сосуществующих фаз.

4) Не рассмотрена также резко немонотонная зависимость H_{c2} от беспорядка (разупорядочение анионов), экспериментально наблюдаемая в $(\text{TMTSF})_2\text{ClO}_4$.

5) При обсуждении природы анизотропного зарождения объемного сверхпроводящего состояния в $(\text{TMTSF})_2\text{ClO}_4$ не рассмотрены альтернативные модели – солитонной фазы и солитонной границы, а также возможного d -волнового сверхпроводящего состояния и влияния на него случайного потенциала анионов как механизма разрушения пар.

Опечатки, однако, не мешают пониманию диссертационной работы Кешарпу К. К., суть которой в диссертации и в реферате изложена достаточно ясно. Остальные отмеченные недостатки не снижают общей высокой оценки представленной диссертации и, в основном, являются пожеланием продолжения данных исследований и расширения круга рассматриваемых явлений. В целом следует отметить, что диссертационная работа Кешарпу К. К. является существенным вкладом в развитие физики конденсированного состояния. Автореферат полностью отражает содержание диссертации. Диссертация Кешарпу Каушалья Кумара «Зарождение сверхпроводимости в сильно анизотропных гетерогенных материалах» является перспективной научно-квалификационной работой, по своему объёму и научному уровню полностью удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук, установленным в «Положении о порядке присуждения ученых степеней» в НИТУ «МИСиС», а её автор, Кешарпу Каушал Кумар безусловно заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – физика конденсированного состояния.

Диссертация и автореферат заслушаны и обсуждены на заседании Ученого Совета Центра высокотемпературной сверхпроводимости и квантовых материалов им. В.Л. Гинзбурга (Центр ВСКМ) Физического института им. П.Н. Лебедева РАН 24 мая 2022 года, протокол № 03/22.

Отзыв составил

И.о. Руководителя Центра ВСКМ ФИАН,
главный научный сотрудник
Федерального государственного бюджетного
учреждения науки Физический институт
им. П.Н. Лебедева РАН
доктор физико-математических наук,
Член-корреспондент РАН



Пудалов Владимир Моисеевич

Ученый секретарь
Центра ВСКМ ФИАН
к.ф.-м. н.



О.М. Иваненко

27 мая 2022 г.