

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ

**Физический
ИНСТИТУТ**



*имени
П.Н.Лебедева*

Российской академии наук

Ф И А Н

119991, ГСП-1, Москва,
Ленинский проспект, 53, ФИАН
Телефоны: (499) 135 1429
(499) 135 4264
Телефакс: (499) 135 7880
<http://www.lebedev.ru>
postmaster@lebedev.ru

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель директора Федерального
государственного бюджетного учреждения
науки Физического института
им. П. Н. Лебедева РАН, к.ф.-м.н.



/О.В. Иванов/

«07» *июль* 2025 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

о диссертации **Кочева Владислава Дмитриевича** «Неоднородная зарождающаяся сверхпроводимость в органических металлах и селениде железа», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния».

Актуальность темы исследования обусловлена следующим: фазовые диаграммы многих сильно-коррелированных низкоразмерных материалов содержат области различных фаз электронного упорядочения, например, в состоянии волны спиновой плотности (SDW), индуцированной полем волны спиновой плотности (FISDW), антиферромагнитного упорядочения (AFM), волны зарядовой плотности (CDW), или сверхпроводимости (SC). Вблизи границ между различными фазами сильно-коррелированные системы испытывают тенденцию к фазовому расслоению и образованию фазово-неоднородного состояния. Такие эффекты наблюдаются в органических квазиодномерных (Q1D) кристаллах, в манганитах, в сверхпроводящих оксидах меди. Несмотря на общую тенденцию к фазовому расслоению, конкретный переход между фазами проходит различно в разных системах, и сопровождается анизотропной перестройкой электронного спектра.

Сосуществование двух конкурирующих фаз и фазовое расслоение, например, вблизи границы сверхпроводящей фазы и фазы SDW, может происходить как в импульсном, так и в координатном пространстве. Во втором случае возникает пространственное разделение SC-фазы и фазы волны плотности (DW) на микроскопическом или макроскопическом масштабе, зависящем от соотношения размера сверхпроводящих доменов и длины когерентности в сверхпроводящем

состоянии. Эффекты анизотропного зарождением сверхпроводимости в фазово-неоднородном состоянии были экспериментально обнаружены в начале 2000 годов в органических квазиодномерных соединениях $(\text{TMTSF})_2\text{PF}_6$, $(\text{TMTSF})_2\text{ClO}_4$ и активно изучаются вплоть до настоящего времени. В самое последнее время эффекты нематической сверхпроводимости и формирование доменов были обнаружены в железосодержащих сверхпроводниках FeSe , BaFe_2As_2 и др. Учитывая постоянно высокий интерес к неоднородной сверхпроводимости и отсутствие адекватного теоретического описания экспериментальных результатов, актуальность данной диссертационной работы не вызывает сомнений.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка работ, опубликованных по теме диссертации и списка использованной литературы. Работа представлена на 78 страницах и включает в себя 4 приложения, список литературы из 123 наименований и 13 рисунков.

Первая глава диссертации посвящена краткому описанию модели органических квазиодномерных метадлов $(\text{TMTSF})_2\text{PF}_6$ и $(\text{TMTSF})_2\text{ClO}_4$, гофрировке их ферми-поверхностей, роли упорядочения анионов ClO_4 и роли давления в установлении фазовых состояний для анионов PF_6 .

Во **второй главе** описывается вывод гамильтониана волны зарядовой/спиновой плотности в приближении среднего поля. Далее автор анализирует разложение функционала свободной энергии и роль знака коэффициентов разложения.

В **третьей главе** автор вычисляет первые коэффициенты разложения Гинзбурга-Ландау свободной энергии для состояния волны плотности и строит границы состояния по температуре для $(\text{TMTSF})_2\text{ClO}_4$ в зависимости от анионной щели. На построенных диаграммах состояний аналитически выявлены точки смены рода фазового перехода со второго на первый. Построенные диаграммы объясняют пространственную сегрегацию фаз и сосуществование фазы волны спиновой плотности и металла. Пространственная сегрегация фаз происходит на больших масштабах длины ≥ 1 мкм, что объясняет существование таких эффектов как угловые осцилляции магнитосопротивления в соединениях $(\text{TMTSF})_2\text{PF}_6$ и $(\text{TMTSF})_2\text{ClO}_4$, а также каскад индуцированных полем состояний FISDW в $(\text{TMTSF})_2\text{PF}_6$. Следует отметить, что большинство других ранее предложенных теорий сегрегации фаз SC — DW не объясняют такой большой размер доменов и, таким образом, не согласуются с экспериментальными данными.

В **четвертой главе** диссертации автор оценивает размер сверхпроводящих доменов вблизи границы состояний сверхпроводника с волной спиновой плотности. Причем, оценка сделана независимо, как вычислением длины когерентности из разложения Гинзбурга-Ландау, так и путем численных расчетов вероятности перколяции.

В **пятой главе** автор вычисляет тензор эффективной проводимости двухфазной среды с вытянутыми сверхпроводящими островками, для геометрии, соответствующей типичной нематической доменной структуре в железосодержащих сверхпроводниках, включая FeSe. Особо стоит отметить, что автор сопоставляет вычисления с результатами измерений проводимости в микромостиках FeSe конечного размера.

В **заключении** приводятся основные результаты диссертационной работы (в кратком изложении):

1. Для квазиодномерных металлов автором показано, что фазовый переход DW — металл при низких температурах, вдали от критической точки, обычно является переходом первого рода. Это даёт микроскопическое обоснование пространственной сегрегации фаз DW-SC на масштабах более 1 мкм, что подтверждается угловыми осцилляциями магнитосопротивления (AMRO) или индуцированной полем волной спиновой плотности, наблюдаемыми в $(\text{TMTSF})_2\text{PF}_6$. Автором построена фазовая диаграмма в координатах температура - управляющий параметр для двух органических сверхпроводников, PF_6 и ClO_4 .

2. Автором показано, что фазовый переход первого рода приводит к пространственному разделению фаз DW и SC в органических сверхпроводниках, в согласии с экспериментальными данными. Двумя различными способами оценен размер сверхпроводящих доменов $(\text{TMTSF})_2\text{PF}_6$ - более 1 мкм, который согласуется с различными транспортными измерениями, включая анизотропное возникновение нулевого сопротивления в тонких образцах, а также с AMRO и FISDW.

3. Автором предложен новый метод оценки размеров сверхпроводящих доменов в объёме образца из комбинации данных по диамагнитному отклику и данных по анизотропии падения сопротивления выше температуры сверхпроводящего перехода

4. Для FeSe, исследование которого продолжает быть весьма актуальным, автором сделаны оценки размеров сверхпроводящих доменов, при помощи предложенного им метода. При этом использовались как имеющиеся в литературе экспериментальные данные по диамагнитному отклику и сопротивлению, так и с результаты специально поставленных измерений, с участием автора, в тонких образцах-мостиках FeSe.

5. В рамках метода эффективной среды автором выведены аналитические формулы для проводимости в гетерогенных анизотропных сверхпроводниках с удлинёнными SC доменами, в конфигурации, которая соответствует нематической доменной структуре в различных железосодержащих сверхпроводниках.

Новизна и практическая значимость диссертационной работы заключается в том, что впервые теоретически обосновано наличие пространственного разделения состояний волны спиновой плотности со сверхпроводимостью в органических металлах, причем фазовый переход между ними при низкой температуре меняет свой род со второго на первый.

Практическая значимость полученных результатов состоит в том, что они применимы к широкому кругу объектов – от слоистых сверхпроводников на основе органических металлов, пниктидов железа, до купратных оксидов.

Публикации по теме диссертации. Обсуждаемые в диссертации результаты опубликованы в трёх статьях в рецензируемых журналах из списка ВАК и девяти сборниках тезисов и материалов конференций.

Соответствие автореферата основным положениям диссертации. Автореферат диссертации в полном объеме отражает ее содержание.

По содержанию диссертационной работы имеются следующие замечания:

1) Гамильтониан (формула (2.1) и далее) написан в общем виде, но далее рассматриваются только компоненты взаимодействия между различными листами поверхности Ферми, и не обосновано, почему не учитывается взаимодействие внутри одного листа.

2) Основным экспериментальным фактом, мотивирующим развитие теории в данной работе, является анизотропия сверхпроводящих свойств, указывающая на анизотропию сверхпроводящих доменов. В результатах по селениду железа наблюдение этой анизотропии потребовало очень кропотливой обработки кристаллов фокусированным пучком ионов галлия. Одновременных измерений проводимости вдоль слоев не проводилось, что ставит большой вопрос к данным: являются ли они проявлением флуктуационной физики, или просто результатом воздействия ионного пучка? Если домены действительно такого размера, как утверждает автор, то можно было бы ожидать флуктуаций типа мезоскопических в сверхпроводящем переходе. Экспериментально же наблюдается достаточно плавный широкий переход.

3) В ряде случаев автор обсуждает довольно сложные экспериментальные результаты, не иллюстрируя их на рисунке, что создает неудобства для читателей (например, фазовые диаграммы на стр. 16, или данные по избыточной проводимости выше T_c и диамагнитному отклику в объемных образцах на стр. 51).

4) Вывод о пространственной сегрегации фаз (глава 3, на стр. 31 и в ряде других мест) требует анализа поверхностной энергии границы раздела фаз, по сути, вычисления градиентных членов в функционале Гинзбурга-Ландау, но такого анализа в диссертации нет.

5) При сопоставлении с экспериментальными результатами, к сожалению, автор не упоминает и не использует результаты исследований $(\text{TMTSF})_2\text{PF}_6$ сотрудниками ФИАН, непосредственно относящиеся к предмету диссертации. В т.ч.:

- не рассмотрена монотонная зависимость T_{SDW} от неквантующего магнитного поля [Phys. Rev. B 69, 224404 (2004); Phys. Rev. B 80, 184417 (2009)];
- не рассмотрены эффекты квантования вектора нестинга в магнитном поле [Phys. Rev. B 65, 060404 (2002)];
- не рассмотрены эффекты неидеального нестинга и свойства не полностью щелевого состояния с остаточными карманами ПФ в $(\text{TMTSF})_2\text{PF}_6$ [J. Low Temp. Phys. 142, 305 (2006); Письма в ЖЭТФ 84, 744 (2006)];
- не упоминается экспериментальное доказательство гистерезисного перехода SDW — металл в $(\text{TMTSF})_2\text{PF}_6$ [JETP Lett 78, 21 (2003); Phys. Rev. B 69, 224404 (2004)].

К сожалению, в диссертации также не обсуждается природа СП состояния в $(\text{TMTSF})_2\text{ClO}_4$, в частности, теоретическое предложение [Phys. Rev. B 85, 140502(R) (2012)] о его d-волновой симметрии.

Мелкие замечания по оформлению:

Русский язык – “слабже” на стр. 13.

Терминология: Соединения $(\text{TMTSF})_2\text{X}$ обычно называются в отечественной литературе солями Бечгаарда, так принято в уже защищенных диссертациях и опубликованных в отечественной периодике научных статьях.

Сокращения: Целесообразно унифицировать сокращения, чтобы они были единообразно, либо по-русски, либо по-английски. В частности, ARPES – ФЭСУР (фотоэлектронная спектроскопия с угловым разрешением), SQUID – СКВИД, AMRO – АОМС и т. д. Сейчас часть сокращений на английском, часть на русском, при этом не всегда приводятся их расшифровки.

Размерности величин: То же самое относится к размерностям величин — они все должны быть на русском, например эВ. На стр. 14 проводится сравнение двух энергий, но автор приводит их в разных системах единиц.

Отмеченные недостатки являются частными замечаниями по оформлению диссертации, а также имеют характер пожеланий по дальнейшему развитию работы и не меняют высокой оценки диссертационной работы, которая представляет собой завершённое исследование высокого научного уровня, по актуальной тематике.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертационной работы. Результаты работы представляются полезными для специалистов по физике магнитных явлений, физике сверхпроводимости. В частности, выводы о структуре смешанного состояния и параметрах СП доменов в FeSe важны для применений этого материала в токонесущих изделиях. Результаты

диссертации могут быть использованы в Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, ВНИИ неорганических материалов им. А.А. Бочвара, в Национальном исследовательском технологическом университете «МИСИС» (г. Москва), в Институте физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН (г. Екатеринбург), в Институте физики микроструктур РАН, в Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН.

Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней:

Диссертационное исследование Кочева В.Д. представляет собой научно-квалификационную работу, проведенную им самостоятельно и на высоком уровне, по актуальной тематике. Автореферат правильно и полностью отражает содержание диссертации. Результаты этой работы имеют практическое и теоретическое значение. Диссертационная работа соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении учёных степеней», предъявляемым к кандидатским/докторским диссертациям, а ее автор, Кочев Владислав Дмитриевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния».

Отзыв составил:

в.н.с., д.ф.-м.н. (специальность 01.04.07)



А.Ю. Кунцевич

Отзыв рассмотрен и утвержден на заседании Ученого Совета Центра Высокотемпературной сверхпроводимости и квантовых материалов им. В.Л. Гинзбурга, ФИАН 04.07.2025 (протокол № 07/25).

Состав Ученого Совета 20 чел.

Присутствовали на заседании 13 чел.

Председатель Ученого совета Центра
им. В.Л. Гинзбурга ФИАН
академик



В.М. Пудалов

Ученый секретарь Совета
к.ф.-м.н.



О.М. Иваненко