

На правах рукописи



Гимазов Ильнур Илхамович

**Исследование короткоживущих возбуждений в купратных
и железосодержащих сверхпроводниках**

Специальность 1.3.12 —
«Физика магнитных явлений»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Казань — 2023

Работа выполнена в лаборатории проблем сверхпроводимости и спинтроники Казанского физико-технического института им. Е.К. Завойского - обособленного структурного подразделения Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук».

Научный руководитель: **Таланов Юрий Иванович**,
доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН

Официальные оппоненты: **Рязанов Валерий Владимирович**,
доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией сверхпроводниковой наноэлектроники в ФГАОУ ВО «Московский физико-технический институт»,

Глазков Василий Николаевич,
доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник ФГБУН Институт физических проблем им. П.Л.Капицы РАН,

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук»

Защита состоится «06» марта 2024 года в 11 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.1.111.01 (Д 002.231.01) при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте радиотехники и электроники имени В.А.Котельникова РАН по адресу: 125009, Москва, ул. Моховая, д. 11, корп. 7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИПЭ им. В.А. Котельникова РАН и на сайте <http://cplire.ru/rus/dissertations/Gimazov/>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 125009, Москва, ул. Моховая, д. 11, корп. 7, ученому секретарю диссертационного совета 24.1.111.01 (Д 002.231.01).

Автореферат разослан «__» _____ 20__ года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.1.111.01 (Д 002.231.01),
доктор физико-математических наук



Кузнецова Ирен Евгеньевна

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. Сверхпроводимость как макроскопическое квантовое явление представляет большой интерес для исследователей физики конденсированного состояния. В сверхпроводящем состоянии электроны объединяются в куперовские пары, образуют бозе-конденсат, в результате открывается щель в окрестности уровня Ферми, сопротивление становится нулевым и возникает идеальный диамагнетизм. В случае традиционных сверхпроводников за такое спаривание электронов отвечает электрон-фононный механизм, развитый в работах Бардина, Купера и Шриффера (БКШ).

Теория БКШ хорошо объяснила свойства традиционных сверхпроводников. Для них характерно образование куперовских пар с нулевым суммарным импульсом и наличие изотропных сил притяжения между электронами во всех пространственных направлениях (s -симметрия). В этих материалах когерентное состояние возникает из-за слабого взаимодействия между электронами. Посредниками между электронами в парах являются фононы. Данная теория хорошо описывала сверхпроводящее состояние в сверхпроводниках-металлах, открытых после ртути, пока научное сообщество не столкнулось с проявлением сверхпроводимости в купратных материалах. В отличие от традиционных сверхпроводников купратные соединения представляют собой слоистые материалы с проводящими слоями CuO_2 . Кроме того, у этих материалов критические температуры существенно выше по сравнению с металлическими сверхпроводниками. Их поведение не поддается описанию теорией БКШ.

Позднее были открыты новые классы высокотемпературных сверхпроводящих (ВТСП) материалов: железосодержащие (пниктиды, халькогениды), органические сверхпроводники и системы с тяжелыми фермионами. Общей особенностью высокотемпературных сверхпроводников является богатая фазовая диаграмма, на которой существуют и конкурируют параметры порядка разной природы.

Наличие большого количества фаз на фазовой диаграмме ВТСП материалов объясняется наличием нескольких конкурирующих взаимодействий. Например, в купратных сверхпроводниках это: кулоновское отталкивание, обменное взаимодействие и взаимодействие электрона с решеткой. С изменением концентрации носителей тока путем легирования или с изменением давления, соотношение этих взаимодействий изменяется, что приводит к возникновению новых фаз, в том числе — сверхпроводимости. Также надо отметить, для большинства ВТСП материалов на фазовой плоскости антиферромагнитное состояние располагается в непосредственной близости от сверхпроводящего состояния, а иногда они даже перекрываются. Неудивительно, что магнитные корреляции считаются причастными к образованию куперовских пар.

Для объяснения сверхпроводимости в ВТСП материалах было предложено множество теоретических моделей. Одной из первых наиболее популярных

моделей, основанных на магнитных эффектах, считается модель спинового мешка [1]. В соответствии с этой моделью, один носитель заряда со своим спином создает локальное возмущение антиферромагнитного порядка, то есть магнитный полярон. Второй носитель, под влиянием этого полярона, притягивается к первому носителю и формирует пару. Как и в теории БКШ, в этой модели рассматривается спаривание носителей с образованием синглетных пар.

Другая модель была предложена для ферромагнитных металлов, в которых косвенное взаимодействие электронов через спиновые флуктуации имеет характер притяжения в триплетном состоянии [2]. В соответствии с антисимметрией волновой функции фермионов, суммарный угловой момент в триплетной куперовской паре должен быть нечетным, что позволяет установить когерентное взаимодействие между электронами на большом расстоянии. Спин-флуктуационный механизм также можно использовать для купратных и железосодержащих сверхпроводников со знакопеременными параметрами порядка, что компенсирует отталкивающий характер взаимодействия [3].

Механизм спаривания посредством спиновых флуктуаций рассматривается в пределе слабой связи. Для описания магнитных корреляций в пределе сильной связи более подходящей является модель резонирующих валентных связей [4]. В соответствии с этой моделью, в антиферромагнитном состоянии все узлы объединены валентными связями в синглетные (бесспиновые) пары. Эти пары локализованы и не участвуют в переносе заряда. С появлением элементарных возбуждений — магнонов — возникают неспаренные спины, движение которых вызывает возмущение валентных связей. Такая флуктуация валентных связей приводит к образованию квазичастиц — спинов — соответствующих переносу спина при локализованном заряде. В результате легирования материнского соединения в проводящие слои попадают дополнительные носители заряда со спином $\frac{1}{2}$, которые со спинами формируют новые квазичастицы — холоны — подчиняющиеся статистике бозе эйнштейна и обеспечивающие образование куперовской пары.

Следует отметить, что магнитные корреляции наблюдаются только в недопированных сверхпроводниках вблизи границы с антиферромагнитной фазой, тогда как в оптимально допированных соединениях важную роль играют коллективные возбуждения зарядовой и спиновой плотности. Известно, что сильно коррелированные системы подвержены фазовому расслоению для слабо допированных соединений. При этом возникают области с повышенной и пониженной плотностью носителей. В соответствии с некоторыми моделями [5], эти области преобразуются в страйпы — самоорганизованные проводящие одномерные каналы. Наличие таких каналов было экспериментально подтверждено для системы $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ [6]. В этих каналах элементарные возбуждения параметра порядка неелевской антиферромагнитной решетки способствуют образованию парных корреляций между носителями заряда. Ниже определенной температуры, при наличии нестинга, возникают волны зарядовой и спиновой плотности в пределе слабой связи, которые устанавливают фазовую когерентность между

скоррелированными парами. Таким образом, система переходит из одномерного нормального состояния в трехмерное когерентное сверхпроводящее состояние [7].

Несмотря на большое количество механизмов спаривания, они все сводятся к концепции образования бозе-конденсата. Более того, в этих механизмах в качестве посредника между электронами рассматривают флуктуации различных параметров порядка: спиновые флуктуации, флуктуации валентных связей, возбуждения зарядовой или спиновой плотности.

Таким образом, ситуация в данной области наук о высокотемпературной сверхпроводимости такова, что пока невозможно сделать однозначный вывод о механизме спаривания носителей тока в этих материалах. На пути к достижению этого понимания необходимо провести дополнительные исследования, чтобы получить более детальную информацию о взаимовлиянии различных параметров порядка, включая сверхпроводящий, об их общих особенностях и о границах между различными фазами, то есть о фазовой диаграмме (ФД).

Целью диссертационной работы являлось получение сведений о характере зарядовых и магнитных флуктуаций в купратных и железосодержащих сверхпроводниках и о границах области существования этих возбуждений на фазовой диаграмме высокотемпературных сверхпроводников.

Для достижения поставленной цели потребовалось решить следующие **задачи**:

1. Определить границы области существования флуктуаций сверхпроводящего параметра порядка (ФСПП) и выявить связь с псевдощелевой фазой в кристаллах $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{1-x}\text{Y}_x\text{Cu}_2\text{O}_{8+y}$.
2. Проследить за эволюцией волн зарядовой плотности (ВЗП) с изменением концентрации носителей в кристаллах $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ и определить границу их существования на ФД.
3. Оценить обменное поле и поле анизотропии в плоскости в кристаллах EuFe_2As_2 , определить вид магнитной анизотропии и установить тип симметрии доменов.
4. Определить область существования магнитных корреляций вблизи магнитного перехода в кристаллах EuFe_2As_2 . Оценить критические индексы для описания поведения физических величин вблизи фазового перехода. Установить размерность взаимодействий между ионами европия.
5. Определить область существования спиновых флуктуаций в халькогенидах железа $\text{Fe}_{1+y}\text{Te}_{1-x}\text{Se}_x$. Установить тип флуктуаций вблизи сверхпроводящего перехода и при температурах структурного перехода.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Впервые методом микроволнового поглощения (МВП) на частоте 9.3 ГГц установлена граница области существования ФСПП на фазовой диаграмме «температура–концентрация носителей заряда» в кристаллах $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{1-x}\text{Y}_x\text{Cu}_2\text{O}_{8+y}$.

2. Сравнением микроволнового поглощения в купратных и железосодержащих сверхпроводниках показана возможная корреляция между псевдощелевым состоянием и сверхпроводящими флуктуациями в купратных материалах.
3. Установлено, что область существования ВЗП на фазовой диаграмме «температура — концентрация носителей заряда» соединения $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ намного шире той, что была получена с помощью структурных и нейтронных исследований.
4. Впервые с помощью электронного спинового резонанса (ЭСР) сделана оценка обменного поля и поля анизотропии в плоскости ab кристаллов EuFe_2As_2 . Установлено наличие магнитных доменов и определен тип магнитной анизотропии в базисной плоскости ab этих кристаллов.
5. Впервые установлена размерность магнитных корреляций в кристаллах EuFe_2As_2 вблизи перехода в магнитоупорядоченное состояние. Определены параметры критического поведения магнитной системы ионов европия.
6. Впервые методом сравнительного анализа данных, полученных на низких и высоких частотах, установлены границы области существования изотропных и анизотропных спиновых флуктуаций для халькогенидов железа $\text{Fe}_{1+y}\text{Te}_{1-x}\text{Se}_x$.

Научная и практическая значимость работы. Сведения о фазовой диаграмме «температура-концентрация носителей заряда» имеет существенное значение при подборе сверхпроводников для практического применения. В частности, фазовая диаграмма ВТСП материала позволяет выбрать оптимальный уровень допирования для получения максимальной критической температуры. Полученные в настоящей работе сведения об области существования ФСПП на ФД помогают выбрать направление поиска путей улучшения свойств ВТСП материалов. Дополнение ФД купратных сверхпроводников данными о ВЗП позволяет выявить области конкуренции сверхпроводимости и ВЗП, а также определить концентрацию носителей заряда с максимально возможной температурой существования ВЗП, что может быть полезно при создании устройств, основанных на купратных сверхпроводниках.

Полученные результаты являются значимыми также для развития теоретического описания фундаментальных свойств высокотемпературных сверхпроводников. Наличие сведений о параметре порядка короткоживущих возбуждений может быть полезным в определении взаимосвязи между сверхпроводимостью и другими упорядоченными фазами.

Методы исследования. В настоящей диссертационной работе для исследования короткоживущих возбуждений применяются высокочастотные методы: метод нерезонансного микроволнового поглощения (МВП) и электронного спинового резонанса (ЭСР). Для характеристики исследуемых материалов были использованы измерения сопротивления и магнитной восприимчивости. Необходимо отметить, метод МВП чувствителен как к флуктуирующим, так

и к установившимся процессам. Для выделения вклада флуктуаций использовался сравнительный анализ данных, полученных на высоких и низких частотах.

Положения, выносимые на защиту:

1. В слабодопированных образцах $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{1-x}\text{Y}_x\text{Cu}_2\text{O}_{8+y}$ верхняя граница области сверхпроводящих флуктуаций, определенная с помощью измерений микроволнового поглощения, вдвое превышает критическую температуру. Область флуктуаций сверхпроводящего параметра порядка сужается с повышением концентрации носителей и становится нулевой в передопированных образцах. Такое поведение верхней границы области флуктуаций коррелирует с верхней границей псевдощелевого состояния.
2. Область существования волн зарядовой плотности в кристаллах $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ значительно шире диапазона, определенного ранее с помощью структурных исследований, и располагается в интервале концентраций носителей от 0.077 до 0.16. Расширение области ВЗП в сторону малых концентраций подтверждает идею об определяющем вкладе динамических ВЗП в проводимость этих материалов.
3. Каждый магнитный домен в кристалле EuFe_2As_2 имеет свою ось легкого намагничивания второго порядка, направленную вдоль кристаллографической оси a . Наличие и направление легкой оси определяется полем анизотропии, величина которого составляет 2.3 кЭ при температуре 4.8 К. Легкие оси соседних доменов взаимоперпендикулярны.
4. Критические магнитные флуктуации в кристаллах EuFe_2As_2 имеют двумерный АФМ характер вблизи фазового перехода, который описывается моделью 2D-Изинга и соответствует классу универсальности А. Слабое влияние ферромагнитно-упорядоченных слоев европия друг на друга происходит через суперобменное биквадратное взаимодействие с участием слоев FeAs .
5. Изотропные спиновые флуктуации в халькогенидах железа $\text{Fe}_{1+y}\text{Te}_{1-x}\text{Se}_x$ наблюдаются в узком диапазоне температур ($\sim 5 \div 10$ К) вблизи сверхпроводящего перехода. Анизотропные спиновые флуктуации, способствующие образованию нематического порядка, проявляются в широкой области температур ($\sim 80 \div 150$ К) в районе 90 К. С заменой части селена на теллур, анизотропные спиновые флуктуации не исчезают, несмотря на то, что структурный переход не происходит.

Достоверность результатов обеспечивается использованием надежного сертифицированного оборудования, применением независимых методов сбора и обработки экспериментальных данных, сравнительным анализом экспериментальных данных, полученных разными методами, включая литературные данные, и хорошей воспроизводимостью полученных результатов.

Апробация результатов работы. Основные результаты и положения диссертационной работы были представлены научному сообществу на следующих научных конференциях: International Conference «Modern development of magnetic resonance» (г. Казань, Россия, 2018, 2021 гг.), Международный симпозиум «Нанозлектроника и нанозлектроника» (г. Нижний Новгород, Россия, 2017, 2018,

2020, 2021, 2022, 2023 гг.), International Youth Scientific School «Actual problems of magnetic resonance and its application» (г. Казань, Россия, 2015, 2016, 2018 гг.), International Workshop «Phase transitions and inhomogeneous states in oxides» (г. Казань, Россия, 2017, 2022 гг.), Всероссийский форум «Наука будущего – наука молодых» (г. Нижний Новгород, Россия, 2017 г.).

Личный вклад соискателя состоял в конструировании и сборке экспериментального оборудования (2 гелиевых криостата, устройства для измерения сопротивления и восприимчивости, резонатор и система модуляции и регистрации сигнала ЭСР), планировании и проведении экспериментов, включая измерения ЭСР, нерезонансного МВП, высокочастотной магнитной восприимчивости, сопротивления постоянному току, анализе и интерпретации полученных результатов, сопоставлении с ранее полученными данными. Кроме того, соискатель занимался подготовкой статей и научных докладов, представлял эти доклады на конференциях. Автором написана компьютерная программа для сбора и анализа экспериментальных данных.

Публикации. Результаты данной работы были изложены в 28 печатных работах, 8 статей из которых опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК РФ и индексируемых базами данных Web of Science и Scopus, и 20 тезисов докладов. В рамках выполнения этой работы был получен 1 патент.

Структура и содержание диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав (в первой дано описание методов исследования и техники, в 3-х последующих представлены оригинальные результаты), заключения, а также библиографического списка работ, на которые опирался автор при анализе своих экспериментальных результатов. Работа изложена на 147 страницах, включает в себя 53 рисунка и 6 таблиц. Список цитируемой литературы состоит из 126 наименований.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели, задачи и научная новизна работы, аргументирована практическая и научная значимость исследования, а также приведены выносимые на защиту основные положения, апробация и личный вклад автора.

В первой главе описаны физические основы методов исследования и экспериментальная техника для изучения короткоживущих возбуждений в ВТСП материалах: измерения нерезонансного МВП, ЭСР в X диапазоне (9.2÷9.8 ГГц), измерения сопротивления и магнитной восприимчивости. Короткоживущие возбуждения проявляют себя вблизи температуры фазового перехода (из нормального состояния - в сверхпроводящее, из парамагнитного - в антиферромагнитное), который, в исследуемых в данной работе образцах, обнаруживается при температурах ниже кипения азота. Поэтому для достижения этих температур сконструированы измерительные комплексы на низкие и высокие частоты, включающие две криогенные системы, зонды для измерения

сопротивления, магнитной восприимчивости и резонатор для измерения МВП и ЭСР. Для управления процессом эксперимента и для одновременной регистрации большого количества физических величин написана универсальная программа «LAMPh», отображающая измеряемые данные в режиме реального времени.

Во второй главе представлены оригинальные результаты исследования флуктуаций сверхпроводящего параметра порядка (ФСПП) в купратных сверхпроводниках $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{1-x}\text{Y}_x\text{Cu}_2\text{O}_{8+y}$. В этом соединении изменением концентрации иттрия можно получить образцы с разной плотностью носителей тока. Для целей этой главы выбраны: один передопированный образец (OD), оптимально допированный (OP) и два недодопированных образца (UD1, UD2).

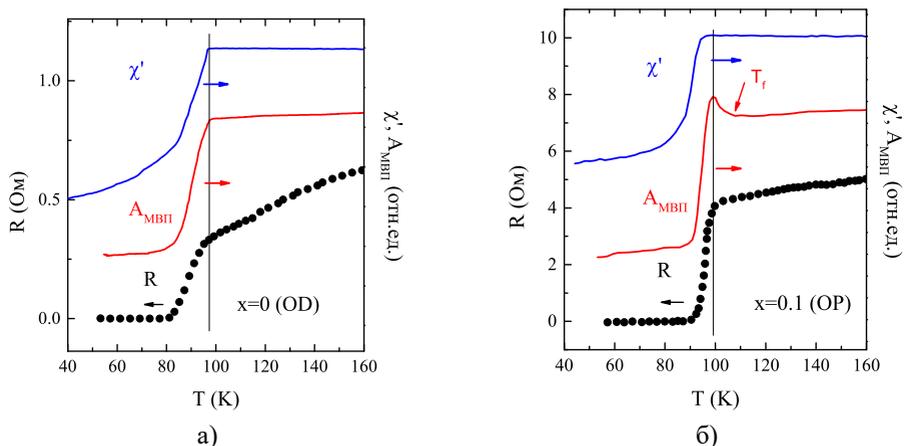


Рис. 1 — Сверху вниз: температурные зависимости магнитной восприимчивости, амплитуды МВП, удельного сопротивления. Данные для передопированного образца (а) представлены слева, для оптимально допированного (б) — справа

В этой главе показано, что для передопированного образца (рис. 1а) все три метода исследования — магнитной восприимчивости, сопротивления и МВП — дают одинаковую температуру перехода в сверхпроводящее состояние, что свидетельствует об однородности этого соединения.

Для оптимально допированного образца (рис. 1б) такого совпадения критических температур не происходит. Температура перехода, наблюдаемая на температурной зависимости амплитуды МВП и сопротивления смещена в сторону более высокой температуры, по сравнению с T_c , полученной в измерениях восприимчивости. Такое смещение возникает из-за формирования объемной мейснерской фазы при более низких температурах.

Еще одним отличием в температурной зависимости МВП для оптимально допированного образца по сравнению с передопированным образцом является наличие максимума вблизи критической температуры. Происхождение этого

так называемого «пика потерь» обсуждается в [8] на основе теоретической работы [9]. В соответствии с моделью [8] появление пика потерь регулируется сверхпроводящими флуктуациями, которые возникают в образце вблизи температуры T_c . Для недодопированных образцов пик потерь также наблюдается, но в более широком интервале температур.

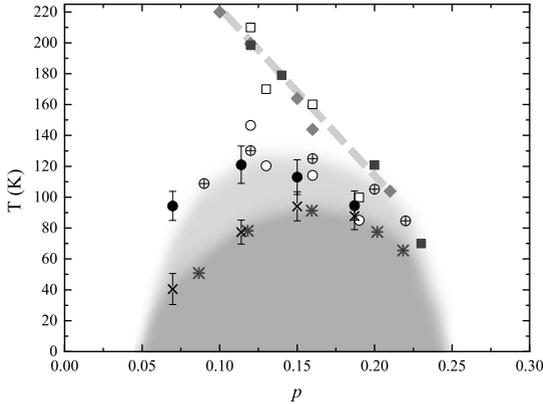


Рис. 2 — Фазовая диаграмма $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{1-x}\text{Y}_x\text{Cu}_2\text{O}_{8+y}$. Точки верхней границы сверхпроводящей фазы $T_c(p)$ (темно-серая область) получены с помощью измерений восприимчивости на переменном токе (кресты — эта работа, звездочки — [10]). Граница области флуктуаций (светло-серая область) показана черными окружностями (MWA, эта работа), окружности с крестом (эффект Нернста [10]), белыми окружностями (ARPES [11]). Верхняя граница псевдощелевого состояния обозначена толстой пунктирной линией, которая усредняет измерения сопротивления (серые квадраты) [12], данные ARPES (белые квадраты) [11] и данные STS (серые ромбы) [13]

В этой главе сделано предположение, что появление пика потерь вызвано дополнительным увеличением сопротивления в перпендикулярном направлении ρ_c , так как с появлением сверхпроводящих флуктуаций уменьшается число нормальных носителей. Для проверки этой гипотезы был проведен эксперимент по возбуждению микроволнового тока только в плоскости ab , исключая любую перпендикулярную составляющую. Для этого микроволновое поле было направлено перпендикулярно к проводящим слоям CuO_2 . Измерения МВП в такой ориентации показывают металлический ход и отсутствию пика потерь. Этот результат указывает на определяющую роль перпендикулярной проводимости в микроволновом поглощении.

Полученные значения верхней границы сверхпроводящих флуктуаций вместе с аналогичными данными из работ [11–13] отмечены на общей фазовой диаграмме (рис. 2). Согласно данным МВП, ARPES [11] и STS [13] область флуктуации, отмеченная светло-серым цветом, сужается с увеличением концентрации

дырок. Область псевдощелевого состояния проявляет аналогичное поведение, что предполагает корреляцию между сверхпроводящими флуктуациями и псевдощелевым состоянием. Для проверки этой гипотезы был проведен дополнительный эксперимент. Температурные зависимости МВП были получены для двух различных образцов: один представляет собой оптимально допированный купратный сверхпроводник, а другой — пниктид железа $\text{Ba}(\text{Fe}_{0.9}\text{Co}_{0.1})_2\text{As}_2$. На кривой МВП для $\text{Ba}(\text{Fe}_{0.9}\text{Co}_{0.1})_2\text{As}_2$ пик потерь отсутствует, что, вероятно, обусловлено отсутствием псевдощелевой фазы в пниктидах железа. Этот результат свидетельствует в пользу наличия корреляций между областью флуктуаций и псевдощелевой фазой.

В третьей главе приведены оригинальные результаты исследования динамических волн зарядовой плотности в кристаллах $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$. Обнаружение ВЗП посредством измерений транспортных свойств становится возможным при наличии центров пиннинга. Обычно пиннинг ВЗП происходит из-за структурного перехода с изменением орторомбической элементарной решетки (LTO) на тетрагональную (LTT). Ранее пиннинг из-за структурного перехода был обнаружен в измерениях рентгеновской дифракции и в нейтронных измерениях в кристаллах $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ с дополнительной примесью редкоземельных элементов Eu и Nd.

В отсутствие примесей редкоземельных элементов в составе $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ структурный переход LTO-LTT не происходит, что исключает пиннинг ВЗП. Тем не менее существование ВЗП в недопированных образцах $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ подтверждено многочисленными экспериментальными исследованиями. Однако определение границ ВЗП на ФД остаются непростой задачей.

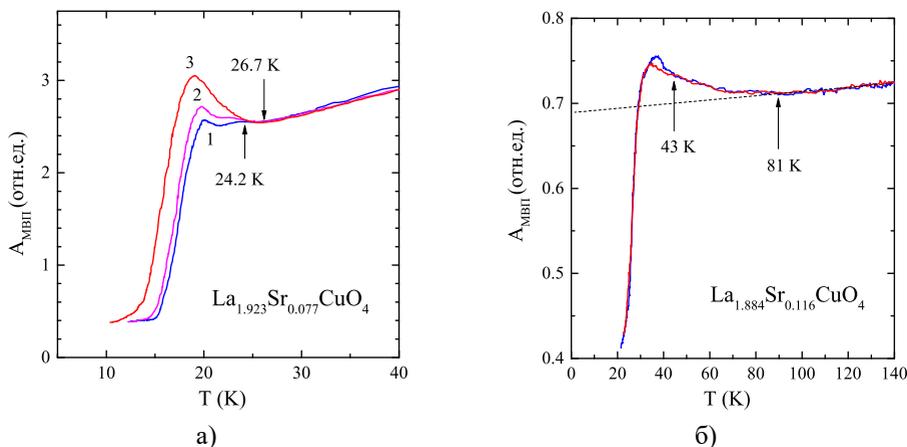


Рис. 3 — Температурные зависимости амплитуды МВП образца $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ с концентрацией стронция $x = 0.077$ (а) и $x = 0.116$ (б). Данные получены для разных значений внешнего магнитного поля

В этой главе для получения сведений об области существования ВЗП используется метод МВП, который чувствителен к короткоживущим возбуждениям. Увеличение амплитуды микроволнового поглощения с понижением температуры связано с появлением дополнительного канала рассеяния. Значит ВЗП, влияющие на рассеяние носителей, могут проявляться в измерениях МВП. Однако к такому же эффекту могут привести и флуктуации сверхпроводящего параметра порядка вблизи критической температуры, как это было показано ранее.

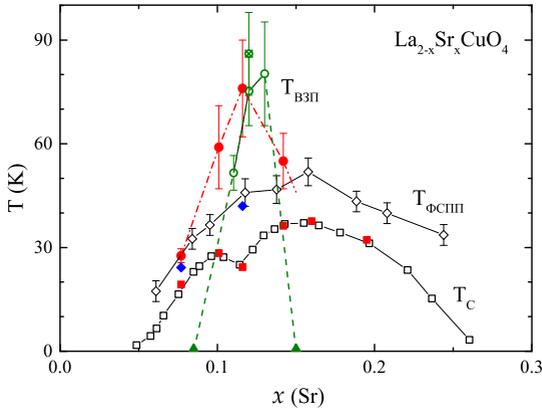


Рис. 4 — Фазовая диаграмма $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ в зависимости от температуры и концентрации стронция (плотности дырок). Сверхпроводящие флуктуации возникают в области между T_C и граничной температурой $T_{\text{ФСПП}}$, определяемой из терагерцовой спектроскопии (открытые ромбы) и из наших МВП измерений (заполненные ромбы). Область ВЗП ограничена температурой $T_{\text{ВЗП}}$, отмеченная окружностями: пустые окружности – это данные XRD из [14], заполненные кружки наши данные МВП

В целях разделения этих двух вкладов в этой главе изучено влияние магнитного поля на амплитуду МВП в зависимости от температуры. Известно, что пик потерь МВП, вызванный ФСПП, расширяется и смещается в сторону низких температур с увеличением поля [9], в то время как вклад ВЗП не подвергается влиянию магнитного поля. Как показано на рисунке 3а для недодопированного образца отклонение от линейного хода в сторону увеличения амплитуды происходит ниже 27 К, в то время как полевая зависимость возникает ниже 24 К. Для других образцов это температурное различие намного больше. Например, для образца с концентрацией стронция $x = 0.116$ это различие составляет примерно 40 К (рис. 3б). Таким образом, благодаря отслеживанию поведения кривой $A_{\text{МВП}}(T)$ в различных магнитных полях получены граничные точки областей с ВЗП, сверхпроводящими флуктуациями и объемной сверхпроводящей фазой. Данные, полученные описанным выше способом, и литературные данные нанесены на общую фазовую диаграмму соединения $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ (рис. 4).

Четвертая глава посвящена изучению магнитного состояния и спиновых флуктуаций в железосодержащих сверхпроводниках.

В первом параграфе представлены кристаллические структуры и свойства исследуемых образцов.

Во втором параграфе приведен обзор современного положения в области исследований магнитного состояния пниктидов и халькогенидов железа.

Третий параграф посвящен исследованию магнитного состояния EuFe_2As_2 с помощью электронного спинового резонанса.

Предполагается, что ниже температуры упорядочения европия $T_m^{Eu} = 19$ К положение сигнала будет определяться не только внешним магнитным полем, но и обменным взаимодействием между ионами европия внутри слоя, биквадратным взаимодействием между ионами железа и европия [15] и симметричным анизотропным косвенным обменом между ионами европия, относящимся к разным слоям [16]. Для проверки этого предположения и определения ориентации осей анизотропии внутри каждого домена проведены измерения угловой зависимости резонансных полей при температурах ниже T_m .

Угловая зависимость, полученная при вращении кристалла вокруг оси c , изображена на рисунке 5, где окружности и треугольники соответствуют двум сигналам. При анализе становится очевидным, что эти сигналы демонстрируют плавные сдвиги с пересекающимися путями. При этом угловая зависимость резонансного поля для двух сигналов следует периодичности 180° , и угловая зависимость второго сигнала смещена на $\pi/2$ относительно первого сигнала. Разумно предположить, что каждый из двух сигналов соответствует магнитным доменам с различной ориентацией осей легкого намагничивания.

Для описания поведения резонансного поля одного из доменов воспользуемся формулой из книги А.Г. Гуревича [17], которая приводится в разделе: «Колебания в антиферромагнетике со слабым моментом, обусловленным взаимодействием между подрешетками».

$$H_r = \sqrt{H_0^2 + 4H_E H_\perp^A \cos 2\psi + \left(\frac{H_D}{2}\right)^2} + \left(\frac{H_D}{2}\right) \quad (1)$$

где $H_0 = \left(\frac{\omega_0}{\gamma}\right)^2$ – магнитное поле, которое создает зееманское расщепление, H_D – поле, ответственное за взаимодействием между подрешетками, H_E – обменное поле, H_r – приложенное поле, в котором наблюдается сигнал ЭСР, H_\perp^A – поле анизотропии в плоскости и ψ – угол между приложенным полем и легкой осью.

По формуле (1) видно, что для угла 45° градусов слагаемое $4H_E H_\perp^A \cos 2\psi$ исчезает, что позволяет найти H_D при известных H_0 и H_r . Подгоняя кривую зависимости резонансного поля от угла (уравнение (1)) к экспериментальным данным, удалось получить значения произведения обменного поля и поля анизотропии внутри плоскости. Для разделения величин H_E и H_\perp^A использовались значения поля насыщения намагниченности $H_{sat} = 2H_E$ для $H||ab$ [16]. Зная

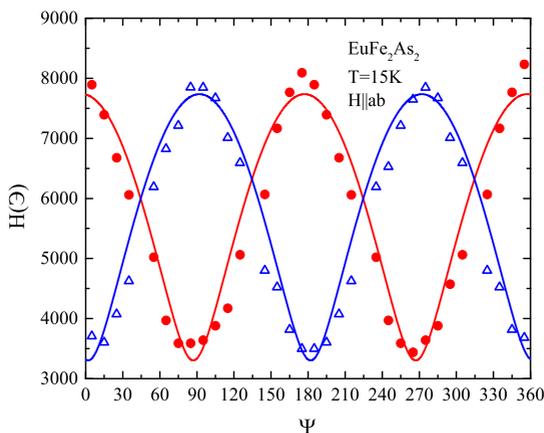


Рис. 5 — Угловые зависимости резонансных полей, полученные при температуре 15 К, $H \parallel ab$. Красные, синие линии — результаты аппроксимации формулой (1)

Таблица 1 — Значения обменного поля, поля анизотропии в плоскости и их произведение, а также значение поля, связанного с взаимодействием между подрешетками европия, для двух температур.

$T, \text{ К}$	$H_E H_{\perp}^A, \text{ кЭ}^2$	$H_D, \text{ кЭ}$	$H_E, \text{ кЭ}$	$H_{\perp}^A, \text{ кЭ}$
15	3.6 ± 0.2	4.1 ± 0.2	5 ± 0.2	0.7 ± 0.05
4.8	13.8 ± 0.32	5.7 ± 0.23	6 ± 0.25	2.3 ± 0.1

значение обменного поля, из произведения $H_E H_{\perp}^A$ можно оценить поле анизотропии в плоскости H_{\perp}^A . Полученные значения поля анизотропии в плоскости и обменного поля для двух температур представлены в таблице 1.

Четвертый параграф посвящен исследованию критического поведения системы EuFe_2As_2 с помощью МВП.

Сведения о взаимосвязи между магнетизмом и сверхпроводимостью могут быть получены путем сравнения симметрий, присущих их параметрам порядка. Такую возможность дают статические и динамические критические индексы, которые не зависят от микроскопических деталей системы.

В этой главе статические критические индексы α и γ получены из анализа температурной зависимости сопротивления и магнитной восприимчивости вблизи температуры упорядочения магнитных моментов европия.

Полученная величина критического индекса $\gamma = 1.7 \pm 0.05$ хорошо согласуется с теоретическим значением модели 2D-Изинга. Критический индекс α , полученный из измерений сопротивления, не противоречит этому предположению. Следовательно, на основании данных измерений удельного сопротивления и магнитной восприимчивости поведение магнитной системы EuFe_2As_2 можно

описать двумерной моделью Изинга. Эти предварительные результаты согласуются с данными ЭСР, полученными в предыдущем разделе этой главы.

В этом параграфе для получения сведений о динамических характеристиках используется метод МВП. Для извлечения информации, касающиеся критического замедления, используется формула:

$$A_{\text{МВП}}(T) = \sqrt{\frac{\mu_0 \omega_0}{2}} \sqrt{\rho(T)} \left(1 + \frac{1}{2} \chi_0 \frac{1 - \omega_0 \tau_0 t^{-z\nu}}{1 + (\omega_0 \tau_0 t^{-z\nu})^2} \right) \quad (2)$$

здесь $A_{\text{МВП}}$ – амплитуда МВП, μ_0 – магнитная постоянная, ω_0 – рабочая частота, $t = (T - T_c)/T_c$ – приведенная температура.

Моделирование экспериментальных данных МВП (рис. 6) с помощью формулы (2) вблизи критической температуры дает значение $z\nu = 1.74 \pm 0.01$ и масштаб времени $\tau_0 = 2.1 \pm 0.5 \times 10^{-10}$ сек.

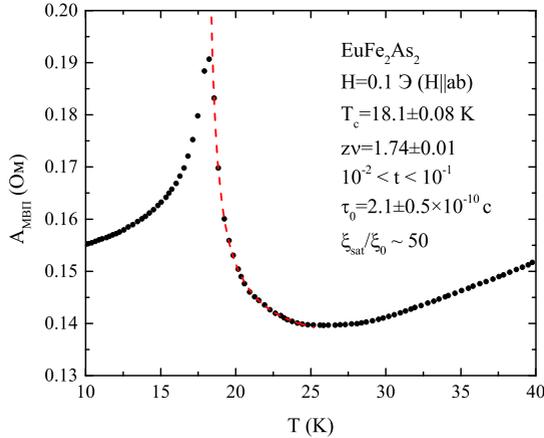


Рис. 6 — Температурная зависимость амплитуды МВП. $H||ab$. Красная линия — расчет по Формуле (2)

Скейлинговое соотношение при известных значениях $\eta = 0.25$ и $\gamma = 1.7$ позволяет определить критический индекс корреляционной длины $\nu = 0.97 \pm 0.05$. Таким образом всестороннее описание критического поведения с помощью измерений удельного сопротивления, магнитной восприимчивости и нерезонансного МВП для соединения EuFe_2As_2 дает значение динамического критического индекса $z = 1.79 \pm 0.03$.

На основе этих рассуждений можно предположить, что магнитные корреляции, регистрируемые методом МВП, имеют антиферромагнитный характер. Более того, полученное в нашей работе значение динамического критического индекса $z = 1.79 \pm 0.03$ демонстрирует хорошее согласие с литературными данными для слоистых антиферромагнетиков, описываемые двумерной моделью Изинга и относящиеся к классу универсальности A: $z = 1.77 \pm 0.05$ для KFeF_4 , $z = 1.69 \pm 0.05$ для Rb_2CoF_4 [18].

Антиферромагнитный характер магнитных корреляций указывает на вероятное влияние магнитных корреляций на транспортные свойства исследуемого соединения. Поскольку сверхпроводимость возникает в проводящих плоскостях FeAs, то вполне вероятно наблюдать влияние этих магнитных корреляций на сверхпроводящие свойства.

Пятый параграф посвящен исследованию спиновых флуктуаций в халькогенидах железа $\text{Fe}_{1+y}\text{Te}_{1-x}\text{Se}_x$.

Халькогениды железа в отличие от других железосодержащих сверхпроводников имеют ряд отличий: у них нет промежуточных слоев, для соединений с относительно большим содержанием селена ($x > 0.1$) не возникает дальнедействующего антиферромагнитного состояния. Наиболее интенсивно исследуемым из них является селенид железа FeSe, который в сверхпроводящее состояние переходит в области $T_c = 9$ К при атмосферном давлении. Кроме сверхпроводящего перехода это соединение при 90 К претерпевает структурный переход с изменением тетрагональной кристаллической решетки на орторомбическую. Структурный переход сопровождается установлением нематического порядка и приводит к понижению вращательной симметрии всех физических свойств [19].

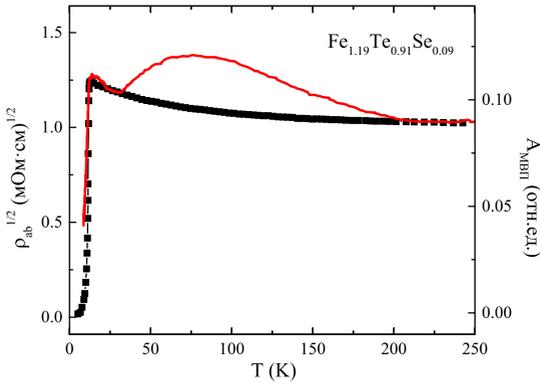


Рис. 7 — Температурные зависимости корня из удельного сопротивления (черные точки) и МВП (красная линия) для $\text{Fe}_{1.19}\text{Te}_{0.91}\text{Se}_{0.09}$

Данные измерения фотоэлектронной спектроскопии с угловым разрешением, нейтронного рассеяния и ядерного магнитного резонанса указывают на то, что в образовании как нематического, так и магнитного порядка ключевую роль играют спиновые флуктуаций [20]. В измерениях сопротивления на постоянном токе для наших образцов (рис. 7) эти флуктуации не наблюдаются, также нет перехода в дальнедействующее антиферромагнитно состояние, которое наблюдается для чистого FeTe. Однако в этих образцах не исключено наличие спиновых флуктуаций, так как для чистого селенида железа FeSe (без дальнедействующей магнитной фазы) нейтронные измерения выявили существование спиновых флуктуаций двух типов ниже 180 К: изотропные неелевские

флуктуации вблизи сверхпроводящего перехода и анизотропные (нематические) флуктуации страйпового типа при более высоких температурах [20].

Для исследования короткоживущих возбуждений в образцах с теллуром $\text{Fe}_{1+y}\text{Te}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x > 0$) обратимся к высокочастотным измерениям МВП. На рисунке 7 представлены кривые $\rho^{1/2}(T)$ и $A_{\text{МВП}}(T)$ для $\text{Fe}_{1.19}\text{Te}_{0.91}\text{Se}_{0.09}$. Поскольку в этих образцах нет дальнедействующего магнитного порядка, то амплитуда МВП будет определяться исключительно омическими потерями. Поэтому сравнение данных удельного сопротивления и МВП могут дать полезные сведения о короткоживущих возбуждениях. На рисунке 7 видно, что в области высоких температур кривые $\rho^{1/2}(T)$ и $A_{\text{МВП}}(T)$ совпадают. Ниже 180 К кривая $A_{\text{МВП}}(T)$ отклоняется от хода сопротивления и образует локальный широкий максимум, охватывающей диапазон 30–180 К. Также наблюдается небольшое отклонение перед переходом в сверхпроводящее состояние. С уменьшением концентрации теллура особенности на высоких и низких частотах продолжают наблюдаться.

В **заключении** приведены основные результаты работы:

1. Впервые методом микроволнового поглощения установлена граница области существования флуктуаций сверхпроводящего параметра порядка на фазовой диаграмме «температура — концентрация носителей заряда» в кристаллах $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{1-x}\text{Y}_x\text{Cu}_2\text{O}_{8+y}$. Из сравнения данных МВП, полученных для купратных сверхпроводников и железосодержащих сверхпроводников, сделано предположение о наличии корреляция между псевдощелевым состоянием и сверхпроводящими флуктуациями в купратных материалах.
2. Установлены границы области сверхпроводящих флуктуаций и области существования волн зарядовой плотности на фазовой диаграмме «концентрация носителей заряда — температура» в кристаллах $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$. Результаты показали, что волны зарядовой плотности существуют в широком диапазоне концентрации дырок (0.077 – 0.160). Эти результаты подтверждают гипотезу об определяющем вкладе динамических волн зарядовой плотности в проводимость материалов этого семейства ВТСП соединений.
3. Впервые с помощью ЭСР сделана оценка обменного поля и поля анизотропии в кристаллах EuFe_2As_2 . Установлено направление оси магнитной анизотропии в плоскости ab для каждого из двойников. Наличие оси легкого намагничивания второго порядка в легкой плоскости объясняется биквадратным обменным взаимодействием ионов европия с ионами железа, жестко связанными с кристаллографической осью a .
4. Впервые методом МВП установлен характер взаимодействия магнитных флуктуаций вблизи критической температуры в кристаллах EuFe_2As_2 . Анализ данных позволил определить критические параметры системы, которые показывают, что система описывается двумерной моделью Изинга и относится к классу универсальности А. Установлено возможное влияние магнитных корреляций на проводимость слоев FeAs.

5. В халькогенидах железа $\text{Fe}_{1+y}\text{Te}_{1-x}\text{Se}_x$ сравнение данных, полученных на высоких и низких частотах, позволило выделить две области температур со спиновыми флуктуациями двух типов. Вблизи сверхпроводящего перехода определены границы изотропных флуктуаций, а в области высоких температур (около 100 K) — анизотропных магнитных флуктуаций с симметрией параметра порядка страйпового типа. Последние способствуют установлению нематического порядка при изменении структуры кристаллической решетки из тетрагональной в орторомбическую в соединении FeSe.

Список авторских публикаций

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК:

- A1. *Gimazov, I. I.* Superconducting fluctuations above critical temperature in the $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{1-x}\text{Y}_x\text{Cu}_2\text{O}_{8+y}$ as revealed by microwave absorption [Text]/ I.I. Gimazov [et al.]// Appl. Magn. Reson. – 2017. – V.48. – Number 7.
- A2. *Gimazov, I. I.* Microwave Absorption by charge Density Waves in $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ [Text]/ I.I. Gimazov [et al.]// JETP Letters. – 2018. – Vol.108. – Issue 10.
- A3. *Gimazov, I. I.* Short-lived electron excitations in $\text{Fe}_{1+y}\text{Te}_{1-x}\text{Se}_x$ as revealed by microwave absorption [Text]/ I.I. Gimazov [et al.]// JETP. – 2019. – Vol.155. – Issue 6.
- A4. *Gimazov, I. I.* Fluctuations of various order parameters in cuprate and Fe-based superconductors as revealed by microwave absorption measurements [Text]/ I.I. Gimazov [et al.]// Magn. Reson. Solids. – 2019. – Vol.21. – 19305.
- A5. *Гимазов, И.И.* Изменение критической температуры халькогенидов железа под влиянием примесных фаз и сверхстехиометрического железа [Текст]/ И.И. Гимазов [и др.]// Письма в ЖЭТФ – 2021. – Том.113. – Вып. 7. – 450.
- A6. *Gimazov, I. I.* Temporal Spinodal Decomposition of the $\text{Fe}_{1+y}\text{Te}_{1-x}\text{Se}_x$ Crystals and its Impact on Superconducting Properties [Text]/ I.I. Gimazov [et al.]// Phys. Stat. Sol. B – 2022. – 2100646.
- A7. *Talanov Y.* Features of EuFe_2As_2 Magnetic Structure Revealed by ESR [Text]/ Y. Talanov, I. Gimazov, R. Zaripov [et al.]// Appl Magn Reson – 2023. – Vol.54. – 527.
- A8. *Таланов, Ю. И.* Исследование нематики антиферромагнитного состояния в EuFe_2As_2 с помощью магнитных и магниторезонансных измерений [Текст]/ Ю.И. Таланов, И.И. Гимазов, Р.Б. Зарипов [и др.]// Письма в ЖЭТФ – 2023. – Том.117. – Вып. 6. – 464.

Зарегистрированные патенты:

- A9. *Гимазов, И.И.* Установка для регистрации магнитных свойств высокотемпературных сверхпроводников в широких диапазонах температур и магнитных полей в непрерывном режиме [Текст]: заявка 208875 Рос. федерация: МПК G01 R 33/16 / И. И. Гимазов// № 2021105330/28(011533); заявл. 02.03.2021; опубл. 19.01.2022 Бюл. № 2.

Список литературы

1. *Schrieffer, J. R.* Dynamic spin fluctuations and the bag mechanism of high- T_c superconductivity [Text] / J. R. Schrieffer, X. G. Wen, S. C. Zhang // Phys. Rev. B. — 1989. — June. — Vol. 39, no. 16. — P. 11663—11679. — DOI: 10.1103/PhysRevB.39.11663.
2. *Layzer.* The superconducting pairing tendency in nearly-ferromagnetic systems [Text] / Layzer, D. Fay // Int J Magn. — 1971. — Vol. 1, no. 2. — P. 135—141.
3. *Scalapino, D.* Random Magnetism, High Temperature Superconductivity [Text] / D. Scalapino // Singapore: World Scientific. — 1994. — P. 155.
4. *Anderson, P. W.* The Resonating Valence Bond State in La_2CuO_4 and Superconductivity [Text] / P. W. Anderson // Science. — 1987. — Mar. — Vol. 235, no. 4793. — P. 1196—1198. — DOI: 10.1126/science.235.4793.1196.
5. *Berg, E.* Theory of the striped superconductor [Text] / E. Berg, E. Fradkin, S. A. Kivelson // Phys. Rev. B. — 2009. — Feb. — Vol. 79, no. 6. — P. 064515. — DOI: 10.1103/PhysRevB.79.064515.
6. Incommensurate magnetic fluctuations in $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ [Text] / S.-W. Cheong [et al.] // Phys. Rev. Lett. — 1991. — Sept. — Vol. 67, no. 13. — P. 1791—1794. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.67.1791.
7. Evidence for stripe correlations of spins and holes in copper oxide superconductors [Text] / J. M. Tranquada [et al.] // Nature. — 1995. — June. — Vol. 375, no. 6532. — P. 561—563. — DOI: 10.1038/375561a0.
8. Microwave measurements of the in-plane and c -axis conductivity in $\text{HgBa}_2\text{CuO}_{4+\delta}$: Discriminating between superconducting fluctuations and pseudogap effects [Text] / M. S. Grbić [et al.] // Physical Review B. — 2009. — Sept. — Vol. 80, no. 9. — P. 094511. — DOI: 10.1103/physrevb.80.094511.
9. *Gough, C. E.* Microwave response of anisotropic high-temperature-superconductor crystals [Text] / C. E. Gough, N. J. Exon // Physical Review B. — 1994. — July. — Vol. 50, no. 1. — P. 488—495. — DOI: 10.1103/PhysRevB.50.488.
10. *Wang, Y.* Nernst effect in high- T_c superconductors [Text] / Y. Wang, L. Li, N. P. Ong // Physical Review B. — 2006. — Jan. — Vol. 73, no. 2. — P. 024510. — DOI: 10.1103/PhysRevB.73.024510.
11. Signatures of superconductivity and pseudogap formation in nonequilibrium nodal quasiparticles revealed by ultrafast angle-resolved photoemission [Text] / W. Zhang [et al.] // Physical Review B. — 2013. — Dec. — Vol. 88, no. 24. — P. 245132. — DOI: 10.1103/PhysRevB.88.245132.
12. Strong pairing interactions in the underdoped region of $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\sigma}$ [Text] / M. Oda [et al.] // Physica C: Superconductivity. — 1997. — Aug. — Vol. 281, no. 2/3. — P. 135—142. — DOI: 10.1016/S0921-4534(97)00505-4.

13. Visualizing pair formation on the atomic scale in the high- T_c superconductor $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ [Text] / K. K. Gomes [et al.] // *Nature*. — 2007. — May. — Vol. 447, no. 7144. — P. 569–572. — DOI: 10.1038/nature05881.
14. Charge density wave fluctuations in $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ and their competition with superconductivity [Text] / T. P. Croft [et al.] // *Physical Review B*. — 2014. — June. — Vol. 89, no. 22. — P. 224513. — DOI: 10.1103/PhysRevB.89.224513.
15. *Maiwald, J.* Microscopic Theory of Magnetic Detwinning in Iron-Based Superconductors with Large-Spin Rare Earths [Text] / J. Maiwald, I. Mazin, P. Gegenwart // *Physical Review X*. — 2018. — Jan. — Vol. 8, no. 1. — P. 011011. — DOI: 10.1103/PhysRevX.8.011011.
16. Strongly anisotropic antiferromagnetic coupling in EuFe_2As_2 [Text] / J. J. Sanchez [et al.] // *Physical Review B*. — 2021. — Sept. — Vol. 104, no. 10. — P. 104413. — DOI: 10.1103/PhysRevB.104.104413.
17. *Гуревич, А.* Магнитный резонанс в ферритах и антиферромагнетиках [Текст] / А. Гуревич. — Москва : Наука, 1973. — 590 с.
18. Critical spin fluctuations in the two-dimensional antiferromagnet KFeF_4 : A Mössbauer study [Text] / J. Slivka [et al.] // *Physical Review B*. — 1984. — Oct. — Vol. 30, no. 7. — P. 3649–3654. — DOI: 10.1103/PhysRevB.30.3649.
19. Unveiling the hidden nematicity and spin subsystem in FeSe [Text] / C.-W. Luo [et al.] // *npj Quantum Materials*. — 2017. — June. — Vol. 2, no. 1. — DOI: 10.1038/s41535-017-0036-5.
20. Magnetic ground state of FeSe [Text] / Q. Wang [et al.] // *Nature Communications*. — 2016. — July. — Vol. 7, no. 1. — DOI: 10.1038/ncomms12182.