

КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

**Первая Международная конференция  
"Фундаментальные проблемы  
высокотемпературной сверхпроводимости"**

В.И. Белявский, Ю.В. Копаев

PACS numbers: 74.20.-z, 74.72.-h

18–22 октября 2004 г. в Москве состоялась первая Международная конференция "Фундаментальные проблемы высокотемпературной сверхпроводимости" (ФПС-04). Более 250 участников представили 82 доклада, отражающих широкий спектр теоретических, экспериментальных и прикладных исследований в области физики сверхпроводников. Русский язык, как официальный язык конференции, объединил физиков, продолжающих работать в России, и тех наших соотечественников, кто в разные годы и по разным причинам покинул свою историческую родину.

Проведение представительной конференции по фундаментальным проблемам высокотемпературной сверхпроводимости в России может рассматриваться как дань уважения выдающимся достижениям наших соотечественников именно в этой области науки. Достаточно вспомнить пионерские экспериментальные исследования сверхпроводящих сплавов, выполненные Л.В. Шубниковым, и создание В.Л. Гinzбургом и Л.Д. Ландау феноменологической теории, определившей многие перспективные направления в физике конденсированного состояния. Теория нормальной ферми-жидкости Ландау, формализм микроскопической теории сверхпроводимости, созданный Н.Н. Боголюбовым, уравнения Г.М. Элиашберга, позволяющие исследовать сверхпроводимость при реалистическом электрон-фононном взаимодействии (ЭФВ), теория сверхпроводимости второго рода, созданная А.А. Абрикосовым на основе уравнений Гинзбурга – Ландау, уравнения теории сверхпроводимости Л.П. Горькова, позволившие, в частности, вывести уравнения Гинзбурга – Ландау из микроскопической теории, пионерские работы А.Ф. Андреева

и А.И. Ларкина, наряду с вкладом многих других наших соотечественников, являются достоянием мировой науки.

Задолго до открытия высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП) купратов [1] были высказаны идеи о возможности повышения температуры сверхпроводящего перехода в системах пониженной размерности [2, 3], при этом предполагалось, что механизм образования электронных пар может быть отличным от ЭФВ. Тогда же в Физическом институте им. П.Н. Лебедева АН СССР сложилась группа теоретиков, которая впервые целенаправленно занялась исследованием проблемы повышения критической температуры, несмотря на явный пессимизм, проявляемый в то время некоторыми ведущими специалистами в этой области [4].

Основные результаты исследований, выполненных этой группой, опубликованы в известной книге [5], и многие из них спустя десятилетия оказались востребованными в связи с проблемой сверхпроводимости купратов и других недавно открытых сверхпроводников. Было установлено, что при значениях параметров кристалла, необходимых для достижения высокой критической температуры, подвергавшаяся сомнению устойчивость кристаллической решетки не нарушается. Были рассмотрены особенности ЭФВ как в квазизотропных, так и в сильно анизотропных системах. Были выполнены детальные исследования конкуренции и существования диэлектрических и сверхпроводящих (SC) фаз — вопрос, ставший особенно актуальным именно в последние годы, благодаря тому, что SC состояние в купратах оказывается близким по энергии диэлектрическому антиферромагнитному (AF) состоянию и при допировании система легко переходит из одного состояния в другое.

Спиновый антиферромагнетизм, присущий квазидвумерным (2D) слоистым системам, к которым относятся купратные соединения, при допировании может смениться орбитальным антиферромагнетизмом ("тороидное" состояние вещества [6]) и, вместо волны спиновой плотности (SDW), привести к волне плотности орбитальных токов, обладающих, в частности, d-волновой симметрией (DDW), следствием чего может явиться особое SC состояние, сохраняющее память о своем AF происхождении.

**В.И. Белявский.** Воронежский государственный педагогический университет, 394043 Воронеж, ул. Ленина 86, Российская Федерация  
Тел. (0732) 55-47-22

E-mail: vib@box.vsi.ru

**Ю.В. Копаев.** Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН,  
119991 Москва, Ленинский просп. 53, Российская Федерация  
Тел./Факс (095) 135-74-41  
E-mail: kopaev@sci.lebedev.ru

Статья поступила 3 декабря 2004 г.,  
после доработки 28 декабря 2004 г.

В отличие от обычных сверхпроводников, в которых SC состояние возникает в результате неустойчивости нормальной ферми-жидкости по отношению к образованию куперовских пар, фазовая диаграмма купратов (в координатах допирирование – температура) оказывается достаточно сложной; наряду с AF и SC упорядоченными состояниями, она допускает существование иных близких по энергии фаз. Выбор между этими фазами может быть сделан на основе анализа микроскопических моделей, отражающих основные свойства купрятых соединений как коррелированных 2D систем, в которых синглетное SC состояние возникает в результате допирирования родительского AF диэлектрика. Для описания сильных внутрицентровых электронных корреляций хорошо приспособлена модель Хаббарда и родственные ей (например,  $t-J$ ) модели. Однако в купратах энергия внутрицентровой корреляции оказывается одного порядка с шириной энергетической зоны, поэтому для качественного исследования умеренных электронных корреляций может быть использовано зонное описание, так что модель Хаббарда и зонная модель могут рассматриваться как дополняющие друг друга подходы к описанию электронных состояний в купратах со стороны предельно сильных и слабых корреляций, соответственно.

Беспрецедентная активность в экспериментальных и теоретических исследованиях высокотемпературной сверхпроводимости, которая наблюдается в последние два десятилетия, позволила получить ответы на многие вопросы, связанные с природой этого явления. Едва ли можно ожидать, что теория, описывающая весь комплекс весьма необычных свойств купрятов как в нормальном, так и в SC состояниях, будет иметь столь же универсальный и элегантный вид, как теория Бардина, Купера и Шриффера, но уже сейчас можно с известной долей уверенности утверждать, что ключевые положения физики купрятов осознаны и обобщены в ряде недавних обзорных статей [7–11]. На конференции были представлены результаты исследований по всем основным направлениям, на которых в последнее время сконцентрировано внимание научного сообщества. В статье [10] представлен тематический обзор последнего крупного международного симпозиума — *The Seventh International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity and High Temperature Superconductors (M2S-HTSC-VII)*, Rio de Janeiro, Brazil, May 25–30, 2003.

Особым свойством недодопированных купрятов является *псевдоцелевое состояние*, наблюдаемое в достаточно широком интервале температур выше температуры SC перехода  $T_C$  и характеризующееся малой величиной сверхтекучей плотности и развитыми тепловыми и квантовыми флуктуациями фазы параметра порядка в виде возбуждений пар вихрь – антивихрь. Поэтому значительное число докладов было посвящено исследованию свойств как отдельных вихревых возбуждений, так и их ансамблей.

В докладе В.К. Власко-Власова (Argonne National Laboratory, USA) было представлено подробное изложение возможностей новой техники получения магнитооптических изображений, основанной на эффекте Фарадея и развитой ранее в Институте физики твердого тела РАН. С помощью этой техники оказывается возможным наблюдать и регистрировать пространственное распределение магнитного поля, течение магнитного потока в

критическом состоянии, вихревую решетку и ее плавление, а также движение отдельных абрикосовских вихрей. Методом магнитооптических изображений обнаружена и исследована макротурбулентность вихревой материи в ВТСП-моноокристаллах (Л.М. Фишер, Всероссийский электротехнический институт, Москва).

Нейтронографические исследования вихревых структур в тонких ВТСП-пленках в скользящей геометрии, когда изучается отражение и рассеяние нейтронов вблизи критического угла, привели к обнаружению нового типа перехода в виде дискретной перестройки вихревых рядов в магнитном поле (В.Л. Аксенов, Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Московская обл.). Динамика и взаимодействие вихрей различного типа исследована по измерениям ВЧ поглощения на частотах 500–1000 МГц (В.А. Тулин, Институт проблем технологий микроэлектроники и особочистых материалов РАН, Черноголовка, Московская обл.).

В докладе Л.Н. Булаевского (Los Alamos National Laboratory, USA) было показано, что решение задачи о движении вихрей в слоистых системах при перпендикулярном слоям транспортном токе приводит к выводу о возникновении нерегулярной вихревой структуры в направлении (сильного) тока. На конференции были представлены исследования механизма образования плотных цепочек вихрей из-за притяжения между ними и рассмотрение пересечения решеток абрикосовских и джозефсоновских вихрей (А.И. Буздин, Université Bordeaux, France), а также исследования квантового транспорта в андреевских проводах, в частности, когерентного транспорта квазичастиц вдоль вихревых нитей в сверхпроводниках второго рода (В.М. Винокур, Argonne National Laboratory, USA).

В.Ф. Гантмахер (Институт физики твердого тела РАН, Черноголовка, Московская обл.) в своем докладе показал, что подробный анализ парных электронных корреляций в диэлектрической фазе при переходе диэлектрик – сверхпроводник и исследование магнитотранспорта в аморфных пленках InO указывают на разрушение таких корреляций магнитным полем.

Микроскопический подход к проблеме сверхпроводимости купрятов как к задаче многих сильно взаимодействующих частиц, не допускающей решения методами теории возмущений, так или иначе связан с необходимостью угадать волновую функцию основного состояния, наилучшим образом описывающую существенные свойства системы. Известно несколько отличающихся друг от друга подходов [10, 11] к построению основного состояния, в основе которых лежат предположения об особых, иногда достаточно экзотических, свойствах основного состояния несверхпроводящей фазы, а также о разделении зарядовых и спиновых степеней свободы, т.е. о существовании особых элементарных возбуждений — бесспиновых холонов, переносящих заряд, и электрически нейтральных спинонов, переносящих спин. На этом пути получен ряд важных результатов, однако в последнее время в теории сверхпроводимости купрятов наблюдается постепенный возврат к ортодоксальным принципам теории среднего поля.

Отсутствие истинного разделения (своебразный *конфайнмент* спинонов и холонов), несмотря на изобилие схем разделения заряда и спина, может рассматриваться как один из аргументов в пользу обычного

сценария среднего поля для качественного объяснения сверхпроводимости купратов. Холоны и спиноны можно рассматривать как взаимодействующие квазичастицы и использовать для их описания приближение среднего поля. Исследование условий возникновения композитных фермионов (фермион + бозон) и более сложных комплексов (троек и четверок) в смеси притягивающихся бозонов и фермионов, представленное в докладе М.Ю. Кагана (Институт физических проблем им. П.Л. Капицы РАН, Москва), показывает, что именно сильное притяжение между спиноном и холоном приводит к конфайнменту зарядовых и спиновых степеней свободы дырки, которая при энергиях  $\lesssim T_C$  представляется как практически точечная бесструктурная частица.

Простейшие модели, учитывающие сильные электронные корреляции (модель Хаббарда и  $t-J$ -модель), очевидно, недостаточны для детального описания зонной структуры ВТСП-купратов, в частности, для расчетов их поверхности Ферми. Как показал в своем докладе С.Г. Овчинников (Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, Красноярск), схема расчета зонной структуры сильно коррелированных систем, учитывающая трехцентровые взаимодействия в эффективном гамильтониане, полученном из гамильтониана многозонной  $p-d$ -модели, приводит к разумному согласию результатов расчета с данными фотоэмиссионной спектроскопии с угловым разрешением (ARPES) [12, 13] для электроннодопированных купратов и указывает на необходимость включения в рассмотрение эффектов ЭФВ при дырочном допировании. Метод допускает выход за рамки одноэлектронной зонной схемы, указывая на существование зоны возбуждений, обусловленной многочастичными эффектами (такая зона может быть истолкована как зона спаренных состояний).

Подходы разных авторов к решению задачи о SC состоянии в рамках модели Хаббарда и  $t-J$ -модели, как правило, приводят к результатам, противоречащим друг другу, поэтому возникают сомнения относительно применимости этих моделей к ВТСП-купратам. Как показал В.В. Вальков (Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, Красноярск), можно утверждать, что без учета трехцентровых взаимодействий модель Хаббарда и  $t-J$ -модель неэквивалентны: действительно, тогда как  $t-J$ -модель с неизбежностью приводит к связанному состоянию, в модели Хаббарда тенденция к возникновению связанного состояния отсутствует. При включении в рассмотрение трехцентровых взаимодействий ( $t-J^*$ -модель) связанные состояния исчезают в случае, когда энергия внутрицентровой корреляции превышает ширину зоны, что может быть истолковано как восстановление эквивалентности между моделью Хаббарда и  $t-J^*$ -моделью. Трехцентровые корреляции, в том числе, с учетом магнитных флуктуаций, могут играть существенную роль в формировании SC фазы с d-волновой симметрией параметра порядка.

Методика ARPES играет уникальную роль в физике ВТСП-соединений, позволяя получать детальную информацию о размерах, форме и эволюции поверхности Ферми в зависимости от дипирования и температуры, а также о спектрах квазичастиц как в SC, так и в нормальном состояниях. Понимание природы высокотемпературной сверхпроводимости в значительной степени связано с применением и развитием ARPES-исследований,

подробный обзор которых был представлен на конференции А.А. Кордюком (Institute for Solid State Research, Dresden, Germany). Показано, что в соединении Bi-2212 в нодальных направлениях хорошо определенные квазичастицы существуют даже в псевдощелевом состоянии (которое, таким образом, достаточно адекватно нормальному ферми-жидкости).

Методика рентгеновской эмиссионной и абсорбционной спектроскопии, представленная Э.З. Курмаевым (Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург), в некотором смысле решает те же задачи, что и методика ARPES, но, в отличие от ARPES, которая хорошо приспособлена для зондирования приповерхностных слоев, рентгеновские методы позволяют исследовать электронные состояния в объеме образца. Эти методы, однако, не дают возможности независимого определения импульса электрона и должны быть тесно связаны с расчетами энергетических зон.

Детальный обзор экспериментальных исследований ВТСП-купратов методами джозефсоновской, туннельной и андреевской спектроскопии был представлен Я.Г. Пономаревым (Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва). В его докладе было показано, что объяснение результатов экспериментов в ряде случаев может быть дано с помощью ЭФВ-механизма, дополненного учетом сильного кулоновского отталкивания [8, 14], тогда как в некоторых экспериментах проявляются черты спаривания на спиновых флуктуациях.

Вопрос о механизме SC спаривания, т.е. об определении того взаимодействия в системе электронов, которое в конечном итоге является причиной возникновения связанных состояний (электронных пар), является одним из принципиальных вопросов теории сверхпроводимости, хотя, по-видимому, нет прямых экспериментов, из которых с определенностью следовал бы вывод о том, какое конкретное взаимодействие приводит к образованию пар. Поэтому вопрос, скорее, заключается в том, какие следствия вытекают из предположения о конкретном механизме спаривания, а значит, какие эксперименты непротиворечиво им объясняются. Существенное значение имеет согласующийся со здравым смыслом выбор параметров, описывающих спаривающее взаимодействие. Так, уже отмечалось, что предельно большой хаббардовской внутрицентровой энергии (случай, к описанию которого наилучшим образом применимы как модель Хаббарда, так и  $t-J$ -модель) соответствует тенденция к диэлектризации системы, т.е. переход в состояние моттовского диэлектрика, так что простейшее предположение об абсолютном запрете двукратного заполнения узла оказывается излишне жестким. Такая же проблема, связанная, например, с вопросом об устойчивости кристаллической решетки, возникает и при попытке рассмотрения предельно больших значений эффективной константы связи в ЭФВ-механизме.

В реальной системе, разумеется, имеет место как экранированное кулоновское отталкивание (с достаточно сильными внутрицентровыми корреляциями в таких системах, как купраты), так и ЭФВ, способное приводить к эффективному притяжению электронов в узком слое (с энергетической шириной порядка дебаевской энергии), охватывающем поверхность Ферми. Поэтому необходим учет обоих этих взаимодействий, а также, несомненно имеющего место в купратах, взаимо-

действия через спиновые флуктуации (обусловленного обменом AF магнонами), которое в схеме  $t-t'-J$ , учитывающей пересеки частиц в двух ближайших координационных сферах, неизбежно приводит к d-волновому сверхпроводящему спариванию (Н.М. Плакида, Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Московская обл.).

Многие теоретические исследования фактически основываются на постулате о том, что энергетическая щель в купратах имеет d-волновую симметрию. Такое утверждение вытекает из рассмотрения спаривающего взаимодействия через спиновые флуктуации и косвенно подтверждается экспериментальными данными. Однако вопрос о симметрии SC параметра порядка, по-видимому, не может считаться решенным однозначно и окончательно. Анализ разнообразных экспериментов, в которых проявляется симметрия энергетической щели, несомненно свидетельствует о наличии нулей параметра порядка на поверхности Ферми, которые могут соответствовать как "расширенной" s-волновой (или  $s+g$ ) симметрии, так и d-волновой симметрии. Такой вывод, в частности, может рассматриваться как свидетельство существенной роли кулоновского и электрон-фононного взаимодействий в формировании SC упорядоченного состояния.

Важная роль ЭФВ в купратах сверхпроводниках, продемонстрированная в докладе Е.Г. Максимова (Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва), несмотря на то, что само по себе ЭФВ, без учета, например, кулоновского взаимодействия [8], не в состоянии объяснить наблюдаемую симметрию энергетической щели, приводит к необходимости совместного рассмотрения (в рамках модели "Fröhlich–Coulomb") сильных внутрицентровых корреляций и дальнодействующих кулоновского отталкивания и ЭФВ (А.С. Александров, Loughborough University, UK). Биполярная версия общей схемы теории среднего поля в режиме сильной связи с дальнодействующим неэкранированным ЭФВ качественно объясняет необычное проявление изотопического эффекта и возникновение псевдощелевого состояния в купратах, а также особенности термо-магнитных явлений переноса. Кроме того, показано, что тунNELьная плотность состояний в купратах не константа (что неизбежно, если спариваются частицы с нулевым суммарным импульсом), а промодулирована в шахматном порядке, благодаря тому, что минимум зоны, соответствующей движению центра масс пары (биполярона), приходится на ненулевой суммарный импульс.

Как показал Александров, эффективная масса биполярона в модели "Fröhlich–Coulomb" может быть сравнительно небольшой как из-за дальнодействующего фрёлиховского взаимодействия, так и благодаря тому, что движение сильно локализованного биполярона по квадратной решетке в купратной плоскости может происходить с изменением его пространственной ориентации в результате скачка одной из частиц, составляющих пару, вдоль диагонали квадрата. Вероятность такого скачка определяется первой (а не второй, как при одновременном прыжке двух частиц пары) степенью тунNELьного интеграла  $t$ . Такое представление о движении пар частиц в купратной плоскости позволяет рассматривать пары дырок в сильно передодированной области фазовой диаграммы как уже готовые пары в реальном пространстве для сверхпроводящего состоя-

ния (А.Ф. Андреев, Институт физических проблем им. П.Л. Капицы РАН, Москва). Бозе-конденсация таких пар при уменьшении допиривания начинается, когда уровень Ферми достигает дна зоны парных состояний. Температура бозе-конденсации пар в 2D электронной системе купрятного соединения определяется некоторой энергией обрезания, связанной с прыжком пары в соседнюю купрятную плоскость и пропорциональную  $t^2$ .

Э.А. Пашицкий (Институт физики НАН Украины, Киев) показал, что запаздывающее экранированное кулоновское взаимодействие способствует повышению температуры SC перехода и, благодаря нестингу почти плоских участков поверхности Ферми, когда она располагается в основном в протяженных окрестностях седловых точек, допускает появление псевдощели выше  $T_C$ . "Протяженные" седловые точки соответствуют сильной анизотропии продольной и поперечной (по отношению к изоэнергетической поверхности) компонент эффективной массы и в 2D системе приводят к логарифмической сингулярности Ван Хова в плотности состояний с большой амплитудой, зависящей от отношения компонент эффективной массы. В случае предельно сильной анизотропии такая сингулярность фактически вырождается в обратную корневую особенность, характерную для одномерных систем [15]. Наблюдаемые в купратах проявления изотопического эффекта достаточно разнообразны, вплоть до изменения знака, и, по-видимому, не могут найти объяснение исключительно в рамках ЭФВ-механизма спаривания.

Доклад О.В. Долгова (Max-Planck-Institut für Festkörperforschung, Stuttgart, Germany) был посвящен анализу особенностей ЭФВ в кристаллах  $MgB_2$  в рамках двухзонной модели и сравнению результатов расчета с данными тунNELьных экспериментов, что позволило установить ветви фононного спектра, дающие основной вклад в SC спаривание.

Обычно считается, что кулоновское отталкивание препятствует возникновению SC состояния. При экситонном механизме сверхпроводимости возрастание предэкспоненциального множителя в существенной мере погашается жесткой конкуренцией между кулоновским отталкиванием и "наведенным" экситонами притяжением. В купратах соединениях, помимо куперовского спаривания с нулевым импульсом пары, важную роль может играть канал SC спаривания с большим импульсом. В этом случае малость области кинематического ограничения импульсного пространства позволяет описать экранированное кулоновское взаимодействие вырожденным ядром, которое определяется эффективной константой связи и радиусом экранирования. Такое ядро учитывает как умеренные внутрицентровые корреляции, так и взаимодействие электронов на разных узлах кристаллической решетки. В спектре этого ядра имеется одно отрицательное собственное значение, что является одним из необходимых условий SC спаривания при отталкивании, аналогичным условию спаривания с ненулевым орбитальным моментом. Двухкомпонентный параметр порядка в пределах области кинематического ограничения имеет линию нулей, пересекающую контур Ферми (сечение поверхности Ферми плоскостью  $CuO_2$ ), и может соответствовать как s+g-волновой симметрии, так и d-симметрии с дополнительными нулями, обусловленными отталкивательным взаимодействием (В.И. Беляевский, Государственный педагогиче-

ский университет, Воронеж). Таким образом, при отталкивании число пар нулей параметра порядка может рассматриваться как достаточно большая величина; кроме того, линия нулей параметра порядка располагается в основном вблизи контура Ферми. Спаривание с большим импульсом в купратах связано с каналами диэлектрического AF (спинового триплетного или орбитального синглетного) спаривания. ЭФВ, как и дипиорование, способствует подавлению спинового и развитию орбитального антиферромагнетизма. Зеркальный нестинг контура Ферми [10] обеспечивает асимптотически точное (в пределе малой эффективной константы связи) решение при кулоновском отталкивании, которое, независимо от механизмов взаимодействия через бозонные поля (фононы, AF магноны, экситоны), приводит к SC упорядочению. Пары с большим импульсом при отталкивании, в отличие от спаривающего притяжения, могут существовать в псевдощелевом состоянии выше  $T_c$  в виде некогерентных долгоживущих квазистационарных состояний относительного движения.

Рассмотренное в докладе В.Ф. Елесина (Московский инженерно-физический институт, Москва) распространение условия зеркального нестинга на спиновые подзоны электронного закона дисперсии — *магнитный нестинг* — показывает, что существование ферромагнетизма и неоднородного куперовского SC состояния (вопрос о существовании этих состояний был исследован Гинзбургом [16] еще до появления микроскопической теории сверхпроводимости) возможно (в случае идеального магнитного нестинга) при сколь угодно большой намагниченности. Таким образом, объясняется существование ферромагнетизма и сверхпроводимости в некоторых слоистых купратах соединениях, в которых, из-за приближенного выполнения условия магнитного нестинга, существует конечная, но достаточно большая критическая величина намагниченности.

SC фазы с пространственно-неоднородным параметром порядка в ферромагнитно намагниченной электронной системе с квадратичным законом дисперсии, предсказанные в 1964 г. П. Фулде и Р.А. Феррелом, а также А.И. Ларкиным и Ю.Н. Овчинниковым, соответствуют конденсату куперовских пар с отличным от нуля, но сравнительно малым импульсом (FFLO-состояние). При спаривании с большим импульсом в купратах также возникает пространственно-неоднородное состояние с несоизмеримым периодом (порядка обратной величины импульса пары), аналогичное FFLO-состоянию и отражающее кристаллическую симметрию купратной плоскости (шахматный порядок в распределении знака параметра порядка).

Наблюдаемая в купратах псевдощель может рассматриваться как истинная щель в спектре одночастичных возбуждений, связанная с орбитальным антиферромагнетизмом [6]. Соответствующая волна плотности с d-волновой симметрией (DDW) приводит к шахматному порядку в распределении знака циркуляций орбитальных токов в элементарных ячейках. В рамках  $t-J$ -модели псевдощелевое состояние может описываться как флуктуации между d-волновыми SC и орбитальным AF состояниями, приводящие к медленно спадающим с расстоянием корреляциям токов, имеющих противоположные знаки циркуляции в соседних элементарных ячейках [10, 11].

6\*

При спаривании с большим импульсом структура параметра порядка соответствует делению купратной плоскости в шахматном порядке на ячейки (обобщенное FFLO-состояние) таким образом, что в соседних ячейках циркуляции тока имеют разные знаки. Таким образом, в результате длинноволновых флуктуаций фазы параметра порядка возникает несоизмеримая упорядоченная (на масштабе флуктуации фазы) AF структура в виде циркуляций орбитальных токов, подобная DDW.

Имеется много свидетельств того, что в купратах соединениях, особенно в псевдощелевом режиме, проявляется неоднородность либо в реальном, либо в импульсном пространстве [7], например, страйповая структура, о которой можно судить по дифракции нейтронов и косвенно по одномерному характеру проводимости в эффекте Холла, или неоднородность электронного рассеяния ("горячие" и "холодные" пятна на поверхности Ферми). Как продемонстрировал Г.Б. Тейтельбаум (Физико-технический институт им. Е.К. Завойского, Казань), псевдощелевое поведение ядерной спиновой релаксации в купратах может быть связано с динамическим фазовым расслоением на металлические и AF области, и скорость спиновой релаксации ядер меди обусловлена двумя механизмами: температурно-независящей релаксацией на несоизмеримых страйп-возбуждениях и температурно-зависящими хаотическими перемещениями металлических и магнитных включений.

Выполненные М.Р. Труниным (Институт физики твердого тела РАН, Черноголовка, Московская обл.) измерения микроволновой проводимости и удельного сопротивления вдоль и поперек купрата плоскостей ВТСП-соединения при варьировании дипиорования показывают, что переход в псевдощелевое состояние приводит к существенному изменению проводимости вдоль слоя  $\text{CuO}_2$ , практически не влияя на поперечную проводимость.

М.В. Садовский (Институт электрофизики РАН, Екатеринбург), принимая в качестве характеристик псевдощелевого состояния параметры флуктуаций диэлектрического ближнего порядка и используя представление о сильном рассеянии электронов, обусловленном наличием "горячих" точек на поверхности Ферми (иначе говоря, особой зависимостью энергии взаимодействия электронов от импульса), выполнил подробный анализ известных аномалий SC состояния и при s-, и при d-спаривании. Микроскопический вывод функционала Гинзбурга–Ландау в рамках концепции "горячих" точек с учетом наличия псевдощелевого состояния позволяет описать SC переход при понижении температуры, а также вычислить температуру перехода и основные характеристики сверхпроводника.

В модели SC спаривания с большим импульсом при отталкивании двухкомпонентный параметр порядка описывается *системой* уравнений Гинзбурга–Ландау, которой может соответствовать более чем одно нетривиальное решение (более одной фазы в SC области). Система уравнений Гинзбурга–Ландау для компонент параметра порядка, как в случае двух противоположно заряженных конденсаторов, связанных друг с другом через электромагнитное поле, может приводить к разнообразным (отличным от абрикосового вихря) возбуждениям фазы параметра порядка. Двухкомпонентная калиброчно-инвариантная модель приводит к пространственно-неоднородному (тороидному) токовому состоя-

нию и нетривиальной топологической классификации решений соответствующей системы уравнений Гинзбурга – Ландау в случае допированного AF диэлектрика (А.П. Протогенов, Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород).

Прогресс экспериментальных и теоретических исследований в области физики сверхпроводимости тесно связан с достижениями последних двух десятилетий в химии и технологии, позволившими получать совершенные кристаллы и уникальные твердотельные структуры для физических исследований, а также создавать новые SC материалы, в том числе, с высокими значениями критических параметров.

Доклад Е.В. Антипова (Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва) был посвящен прецизионному структурному анализу ртутьсодержащих купратных соединений при нормальных условиях и под высоким давлением с использованием высокоразрешающей нейтронографии. Выявлены структурные параметры, оказывающие основное влияние на температуру SC перехода. Установленная взаимосвязь между  $T_c$  и структурными параметрами позволяет предсказывать возможные пути модификации структур слоистых купратов для достижения высоких температур перехода в SC состояния. В частности, при синтезе слоистых оксифторидов определены условия, при которых оказывается возможным осуществить внедрение атомов фтора в структуры слоистых купратов, сопровождающееся структурными трансформациями с образованием новых фаз и позволяющее варьировать концентрацию дырок с соответствующим изменением  $T_c$ .

В.В. Мошалков (Katholieke Universiteit Leuven, Belgium) рассказал о подробных исследованиях наноструктурированных сверхпроводников, в ходе которых было обнаружено влияние периодически расположенных центров пиннинга на критические токи как одна из возможных причин их существенного повышения.

Многочисленные экспериментальные и теоретические исследования в области физики SC купратов, в том числе, представленные на конференции ФПС-04, позволяют сделать определенные выводы относительно природы явления сверхпроводимости этих сложных по химическому составу и структуре 2D систем с сильными электронными корреляциями (Ю.В. Копаев, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва). Необычное поведение таких систем как в низкотемпературном (SC), так и в высокотемпературном (псевдощелевом) состояниях имеет общее происхождение, обусловленное взаимным влиянием SC и диэлектрических корреляций. При описании этих корреляций должно учитываться как экранированное кулоновское отталкивание (не только внутрицентровое, но и межузельное), так и взаимодействия, обусловленные обменом фононами (ЭФВ в купратах не может считаться точечным и слабым) и AF магнонами. Отсутствие реального малого параметра приводит к необходимости рассматривать взаимодействия в электронной системе купратов с использованием двух дополняющих друг друга подходов, развитых для описания предельно сильных и предельно слабых элек-

тронных корреляций. Результаты, полученные в рамках этих двух подходов, трудно сравнивать между собой, и тем не менее они явно обнаруживают много общего, что позволяет воссоздать достаточно полное и непротиворечивое представление о характере SC и псевдощелевого состояний в купратах. SC состояние может быть представлено как бозе-конденсат локализованных бозонов (в хаббардовском пределе) или как когерентное состояние синглетных пар с большим импульсом (в зонной схеме). Псевдощелевому состоянию соответствует потеря когерентности в системе локализованных бозонов (разрыв связанных пар вихрь – антивихрь) или возникновение квазистационарных состояний пар с большими импульсами. Диэлектрическое и SC спаривания имеют общую структуру (два типа бозонов в схеме разделения заряда и спина или две компоненты параметра порядка в схеме спаривания с большим импульсом при отталкивании), соответствующую шахматному порядку в распределении знака (AF упорядочению) токовых циркуляций в псевдощелевом и SC состояниях.

Открытие высокотемпературных купратных (а затем и иных) сверхпроводящих соединений стало мощным стимулом для развития фундаментальных исследований в области физики конденсированного состояния. В результате этих исследований не только возникает новое знание, но и создаются новые технологии для получения SC соединений с высокими критическими параметрами, которые могут найти (и уже находят) применение как объекты физических исследований и как уникальные материалы для использования в энергетике и технике низких температур. Развитие исследований в области высокотемпературной сверхпроводимости дает пример влияния фундаментальных исследований на прикладные разработки и новые технологии.

## Список литературы

1. Bednorz J G, Müller K A *Z. Phys. B* **64** 189 (1986)
2. Little W A *Phys. Rev.* **134** A1416 (1964)
3. Ginzburg V L *Phys. Lett.* **13** 101 (1964)
4. Cohen M L, Anderson P W, in *Superconductivity in d- and f-Band Metals* (AIP Conf. Proc., Vol. 4, Ed. D H Douglass) (New York: AIP, 1972)
5. Проблема высокотемпературной сверхпроводимости (Под ред. В.Л. Гинзбурга, Д.А. Киржника) (М.: Наука, 1977)
6. Ginzburg V L et al. *Solid State Commun.* **50** 339 (1984)
7. Orenstein J, Millis A J *Science* **288** 468 (2000)
8. Максимов Е Г УФН **170** 1033 (2000)
9. Carlson E W et al., in *The Physics of Conventional and Unconventional Superconductors* (Eds K H Bennemann, J B Ketterson) (Berlin: Springer-Verlag, 2002)
10. Белянский В И, Копаев Ю В УФН **174** 457 (2004)
11. Lee P A, Nagaosa N, Wen X-G, cond-mat/0410445; submitted to *Rev. Mod. Phys.*
12. Campuzano J C, Norman M R, Randeria M, in *The Physics of Conventional and Unconventional Superconductors* (Eds K H Bennemann, J B Ketterson) (Berlin: Springer-Verlag, 2002)
13. Damascelli A, Hussain Z, Shen Z-X *Rev. Mod. Phys.* **75** 473 (2003)
14. Абрикосов А А УФН **174** 1234 (2004); Abrikosov A A *Rev. Mod. Phys.* **76** 975 (2004)
15. Abrikosov A A, Campuzano J C, Gofron K *Physica C* **214** 73 (1993)
16. Гинзбург В Л ЖЭТФ **31** 202 (1956)