

Сидоров Кирилл Александрович

**ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ НИЗКОРАЗМЕРНЫХ
СИСТЕМ С СИЛЬНЫМИ ЭЛЕКТРОННЫМИ КОРРЕЛЯЦИЯМИ**

01.04.07 – физика конденсированного состояния

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Красноярск – 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики им. Л. В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук (ИФ СО РАН) и Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования Сибирском федеральном университете (СФУ)

Научный руководитель

Овчинников Сергей Геннадьевич, профессор, зам. директора ИФ СО РАН, доктор физико-математических наук

Официальные оппоненты:

Плакида Николай Максимилианович, профессор, главный научный сотрудник Лаборатории теоретической физики им. Н. Н. Боголюбова Международной межправительственной организации «Объединенный институт ядерных исследований», доктор физико-математических наук

Михеенков Андрей Витальевич, доцент, заведующий отделом теоретической физики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики высоких давлений им. Л. Ф. Верещагина Российской академии наук, доктор физико-математических наук

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук

Защита состоится «___» _____ 2016 г. в ___ час. на заседании диссертационного совета Д 003.055.02 при ИФ СО РАН по адресу: 660036, г. Красноярск, Академгородок 50, строение 38, ИФ СО РАН

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ИФ СО РАН

Автореферат разослан «___» _____ 2016 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук

Втюрин Александр Николаевич



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Любому физикам прекрасно известно, что точные решения любой сколь-нибудь сложной физической задачи представляют особый интерес. Такие решения выявляют множество конкретных особенностей физических моделей, которые не всегда видны при любом мыслимом способе их приближенного решения. Вниманию аудитории представляется точное решение основной задачи статистической физики одномерной модели Хаббарда в магнитном поле в пределе бесконечных корреляций. Оказывается, для такой модели возможно построение непertурбативного точного решения, которое не опирается на анзац Бете [1] и результаты Либа и Ву [2]. Более того, это решение использует лишь основы статистической физики, т. е. те ее результаты, которые не опираются на методы, заимствованные из квантовой теории поля.

Полученное решение, естественно, позволяет получить численно точные зависимости основных термодинамических характеристик (свободной энергии, энтропии, теплоемкости, внутренней энергии и химического потенциала) от концентрации дырок, температуры и индукции магнитного поля в веществе. Полученные зависимости, как и следовало ожидать, правильно воспроизводят все основные свойства систем с сильными электронными корреляциями: слабая зависимость положения и величины максимума в температурной зависимости теплоемкости от величины кулоновского отталкивания двух электронов, находящихся на одном узле [3, 4], два пика в зависимости теплоемкости от температуры, обусловленные спиновыми и зарядовыми возбуждениями, и т. д. Получены также интересные асимптотические особенности при больших и малых температурах и полях. Для магнитной восприимчивости же оказывается возможным получить точное выражение в виде закона Кюри. При этом паулиевская восприимчивость не возникает при любой концентрации электронов в системе. Это происходит благодаря точной факторизации статистической суммы в виде произведения холонной и спинонной статистических сумм.

Вторая группа вопросов, обсуждаемых в диссертационной работе, связана с исследованием влияния давления на нормальные и сверхпроводящие свойства двумерных сильно коррелированных систем – высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) – на примере соединения $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ – хорошо изученного представителя р-типа купратов. Здесь, во-первых, исследуется влияние давлений различной симметрии на форму поверхности Ферми, площадь экстремальных сечений которой, как известно, определяет частоту осцилляций намагниченности в магнитном поле (эффект де Гааза – ван Альфена). Во-вторых, рассматривается, как давления различной симметрии влияют на зависимость температуры сверхпроводящего перехода от концентрации дырок в системе. При этом для барической производной $d \ln T_c / dp$ получаются значения, находящиеся в хорошем согласии с экспериментальными данными.

Цели работы.

1. Доказать точную интегрируемость и численно точно вычислить термодинамические функции одномерной модели Хаббарда с бесконечным отталкиванием в магнитном поле.
2. Исследовать влияние деформаций различной симметрии CuO_6 -октаэдра на нормальные и сверхпроводящие свойства ВТСП купратов на примере соединения $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$.

Задачи, решаемые для достижения целей работы.

1. В приближении ближайших соседей доказать точное соотношение между статистическими суммами одномерных холонной t -модели и электронной t -модели в магнитном поле.

2. Получить численно точные зависимости основных термодинамических характеристик одномерной t -модели от концентрации дырочного допирования, температуры и индукции магнитного поля в веществе.
3. Выявить наиболее важные особенности в поведении термодинамических характеристик в зависимости от дырочной концентрации, температуры и индукции магнитного поля.
4. Исследовать эволюцию топологии поверхности Ферми в соединении $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ при деформациях различной симметрии (гидростатического, в плоскости a - b , вдоль оси c). Выявить диапазоны концентрации дырочного допирования, в которых наблюдается большая величина относительного изменения площади экстремальных сечений поверхности Ферми относительно случая без давления.
5. Рассчитать зависимости $T_c(x)$ для всех изучаемых типов симметрий давления и сравнить величины логарифмических производных $d \ln T_c / dp$ с приводимыми в экспериментальных работах.

Научная новизна.

1. Впервые непerturbативными методами доказано точное соотношение между статистическими суммами одномерных холонной t -модели и электронной t -модели в магнитном поле.
2. Впервые получены точные концентрационные, температурные и полевые зависимости термодинамических параметров одномерной t -модели и выявлены их наиболее общие особенности.
3. В рамках LDA+GTB-метода изучена эволюция топологии поверхности Ферми с ростом величины концентрации дырочного допирования. Выявлено, что существенные отличия в топологии по сравнению со случаем недеформированной системы имеют место только в узких окрестностях точек квантовых фазовых переходов Лифшица.

4. В рамках LDA+GTB-метода исследовано влияние давлений различной симметрии на температуру сверхпроводящего перехода. Полученные результаты для барической производной $d \ln T_c / dp$ для всех симметрий давления находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными.

Достоверность результатов. Поскольку в первой части диссертационной работы представлено именно точное решение, его проверка может быть осуществлена любым специалистом-физиком в рассматриваемой области. Достоверность результатов второй части работы достигнута применением LDA+GTB –метода и реалистичной модели низкоэнергетической физики – t - J^* -модели. В пользу достоверности результатов говорит также качественное согласие рассчитанных изменений критической температуры при приложении к системе давления с экспериментальными данными для всех рассмотренных типов симметрий нагрузки.

Положения, выносимые на защиту.

1. В приближении ближайших соседей непertурбативными методами доказано точное соотношение между статистическими суммами холонной t -модели и электронной t -модели в магнитном поле.
2. Получены точные концентрационные, температурные и полевые зависимости термодинамических параметров в ненулевом магнитном поле, ранее не приводившиеся в литературе.
3. На примере соединения $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ в рамках t - J^* -модели, параметры которой вычислены методом LDA+GTB, изучено влияние давлений различной симметрии (гидростатическое, в плоскости a - b , вдоль оси c) давлений на эволюцию топологии поверхности Ферми. Выявлено, что существенные отличия в топологии по сравнению со случаем недеформированной системы

имеют место только в узких окрестностях точек квантовых фазовых переходов Лифшица.

4. Теоретически исследовано влияние давлений различной симметрии на температуру сверхпроводящего перехода. Полученные результаты для барической производной $\frac{d \ln T_c}{dp}$ в случае гидростатического давления находятся в хорошем согласии с экспериментом в окрестности оптимального допирования. Для давления в плоскости a - b существует качественное согласие с результатами экспериментов по химическому сжатию в монослойных пленках $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$. В случае давления вдоль оси c результаты проведенных расчетов согласуются с экспериментально наблюдаемым сильным убыванием температуры сверхпроводящего перехода при росте величины внешнего давления.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы обсуждались на Международных конференциях: “XXXIII Международная зимняя школа физиков-теоретиков «Коуровка – 2010»”, “XXXIV Международная зимняя школа физиков-теоретиков «Коуровка – 2012»”, “V Международная конференция «Фундаментальные проблемы высокотемпературной сверхпроводимости»” (Москва, 2015), Сибирских семинарах по высокотемпературной сверхпроводимости ОКНО (Новосибирск – 2009, Красноярск – 2010, Омск – 2012).

Публикации. Основные результаты настоящей работы изложены в 7 печатных трудах, из них 3 статьи в центральных рецензируемых журналах, 1 – в «Ученых записках Таврического национального университета им. В. И. Вернадского», 2 – в Тезисах докладов Международной зимней школы физиков-

теоретиков «Коуровка – 2010» и «Коуровка – 2012», 1 – в «Вестнике Омского университета».

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, изложена на 126 страницах, содержит 25 рисунков, 2 таблицы и список литературы из 105 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава диссертационной работы имеет целью ввести читателя в проблематику предпринятого исследования. Первый ее параграф посвящен обзору основных уже достигнутых результатов по одномерной модели Хаббарда при любом (в том числе, и бесконечном) значении кулоновского отталкивания двух электронов, находящихся на одном узле. В первую очередь излагаются сведения об анзаце Бете [1], который впервые позволил точно вычислить свойства основного состояния и спектр элементарных возбуждений одномерной изотропной гейзенберговской модели. Далее говорится о концепции так называемого вложенного анзаца Бете, разработанного Янгом [5] и Гаудином [6], который, как известно, признается специалистами как самый систематический подход для изучения свойств одномерной модели Хаббарда. Именно используя концепцию вложенного анзаца Бете, Либ и Ву получили свои знаменитые уравнения (уравнения Либа-Ву) [2]. В дальнейшем говорится об имеющих большое концептуальное значение результатах Такахаши. Наконец, излагаются основные достигнутые на сегодняшний день результаты по одномерной модели Хаббарда в пределе $U \rightarrow \infty$, а также кратко обсуждается основная идея предлагаемого в настоящей работе точного решения.

Второй, третий и четвертый параграфы первой главы вводят читателя во вторую группу вопросов, обсуждаемых в диссертационной работе. Во втором

параграфе приведены основные сведения по электронной структуре ВТСП купратов в режиме СЭК. В третьем параграфе обсуждается трехзонная p-d-модель Эмери и вопрос о ее сводимости к модели Хаббарда и t - J^* -модели. В этом параграфе рассматриваются также основные свойства эволюции топологии поверхности Ферми с ростом концентрации дырочного допирования при отсутствии внешнего давления. Наконец, в четвертом параграфе обсуждаются вопросы сверхпроводимости в модели Хаббарда и t - J^* -модели. В пятом параграфе формулируются цели и задачи данной работы.

Вторая глава полностью посвящена выводу точного решения одномерной модели Хаббарда с бесконечным отталкиванием (иначе, t -модели) в магнитном поле. В первом параграфе приводится точное решение в отсутствие перескоков (атомный предел в магнитном поле). Уже здесь закладываются основные идеи, проясняющие стратегию решения в общем случае. Во втором параграфе вводится представление о холонах как бесспиновых фермионах, подчиняющихся статистике Ферми-Дирака. Стратегия решения задачи о вычислении термодинамических характеристик холонов полностью совпадает со стратегией решения такой же задачи для идеального ферми-газа. В третьем параграфе доказывается важная теорема о взаимосвязи матриц операторов $H_t = \sum_{f,m,\sigma} t_{fm} X_f^{\sigma 0} X_m^{0\sigma}$ и $H_t^{(h)} = \sum_{f,m} t_{fm} X_f^{10} X_m^{01}$ в конкретно обозначенных для каждого из указанных операторов базисах. Наконец, в четвертом параграфе суммируется изложенный материал и доказывается точное соотношение между статистическими суммами электронов и холонов

$$Z = \left(2 \operatorname{ch} \left(\frac{h}{k_B T} \right) \right)^{N_e} Z^{(h)}, \quad (1)$$

где Z – статистическая сумма электронов, $Z^{(h)}$ – статистическая сумма холонов, $h = \frac{g_s \mu_B B}{2}$, g_s – спиновый фактор Ланде, μ_B – магнетон Бора, B – индукция

магнитного поля в веществе, k_B – постоянная Больцмана, T – температура. Соотношение (1) позволяет выразить термодинамические характеристики электронов через термодинамические характеристики холонов. Применяя хорошо известные тождества статистической физики и термодинамики, получаем

$$f = f^{(h)} - k_B T (1-x) \ln \left(2 \operatorname{ch} \left(\frac{h}{k_B T} \right) \right) - \quad (2)$$

свободную энергию,

$$s = s^{(h)} + k_B (1-x) \ln \left(2 \operatorname{ch} \left(\frac{h}{k_B T} \right) \right) - (1-x) \frac{h}{T} \operatorname{th} \left(\frac{h}{k_B T} \right) - \quad (3)$$

энтропию,

$$u = u^{(h)} - (1-x) h \operatorname{th} \left(\frac{h}{k_B T} \right) - \quad (4)$$

внутреннюю энергию,

$$c = c^{(h)} + (1-x) \frac{h^2}{k_B T^2} \frac{1}{\operatorname{ch}^2 \left(\frac{h}{k_B T} \right)} - \quad (5)$$

теплоемкость,

$$\mu = \mu^{(h)} - k_B T \ln \left(2 \operatorname{ch} \left(\frac{h}{k_B T} \right) \right) - \quad (6)$$

химический потенциал,

$$\chi = \frac{1}{V} \frac{g_s^2 \mu_B^2 N_e}{4 k_B T} - \quad (7)$$

магнитную восприимчивость (закон Кюри).

Третья глава посвящена обсуждению полученных точных концентрационных, температурных и полевых зависимостей термодинамических

величин, а также исследованию свойств основного состояния и низкотемпературных асимптотик. Всего в работе представлено 27 зависимостей. Здесь мы имеем возможность ограничиться только несколькими из них, которые представляют наибольший физический интерес. Они изображены на рис. 1. Вкратце обсудим их. На рис. 1а изображены графики зависимости химического потенциала от концентрации дырок в нулевом магнитном поле при различных значениях температуры. При $T=0$ химический потенциал попросту совпадает с энергией Ферми. Однако даже при сколь угодно малой температуре химический потенциал обращается при $x=0$ и $x=1$ соответственно в $+\infty$ и $-\infty$. Действительно, при $x=0$ в левой части уравнения на холонный химический потенциал

$$\sum_{\mathbf{k}} \frac{1}{\exp\left(\frac{\xi(\mathbf{k}) - \mu^{(h)}}{k_B T}\right) + 1} = N_h, \quad (8)$$

стоит сумма N слагаемых, каждое из которых не превосходит единицы. Такая сумма может быть равна N (правая часть) тогда и только тогда, когда каждое слагаемое в отдельности в точности равно единице. При $T \neq 0$ это возможно лишь при условии $\mu^{(h)} = +\infty$. Аналогично, при $x=1$ правая часть уравнения (8) обращается, очевидно, в нуль. Для суммы неотрицательных слагаемых (левая часть) это возможно тогда и только тогда, когда равно нулю каждое отдельное

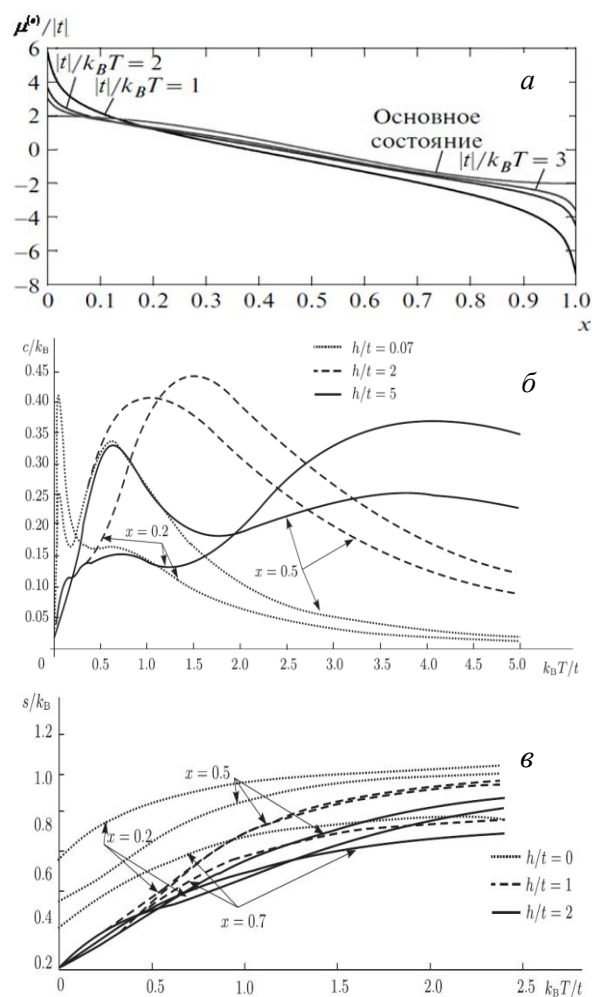


Рис. 1. а) химический потенциал как функция концентрации дырок при $h=0$; б) теплоемкость как функция температуры при различных значениях x и h ; в) энтропия как функция температуры при различных значениях x и h .

слагаемое. Указанная же ситуация при $T \neq 0$ реализуется в том и только в том случае, когда $\mu^{(h)} = -\infty$. Остается лишь заметить, что в соответствии с формулой (6) электронный химический потенциал отличается от холонного лишь на конечную величину $k_B T \ln 2$ (предполагается, что $h = 0$). Таким образом, при малых x газ дырок является невырожденным, а при малых значениях $(1-x)$ невырожденным является газ электронов.

На рис. 1б представлены графики зависимости теплоемкости от температуры при различных значениях дырочной концентрации и индукции магнитного поля. Как видно из выражения (5), теплоемкость определяется суммой вкладов от зарядовых и спиновых возбуждений. Каждый из вкладов представляет собой кривую, имеющую одну точку максимума. Максимум зарядовых (холонных) возбуждений достигается при температуре $T_h \approx t/k_B$, спиновых (спинонных) – при температуре $T_s \approx h/k_B$, причем в точках максимума эти вклады имеют одинаковый порядок величины. В связи с этим в области полей $0.1 < h/t < 4$ на кривой $c/k_B (k_B T/t)$ различается лишь один максимум. Но в малых ($h/t < 0.1$) и больших ($h/t > 4$) полях на этой кривой отчетливо различаются два максимума – спинонный и холонный.

На рис. 1в представлены графики зависимости энтропии от температуры при постоянной дырочной концентрации и индукции магнитного поля. Цель этого рисунка – проиллюстрировать, что при включении (даже сколь угодно малого) магнитного поля энтропия при $T = 0$ скачкообразно уменьшается на $k_B(1-x)\ln 2$. Причина такого скачка понятна: при $T = 0$ включение поля приводит к тому, что электроны занимают только нижнюю энергетическую зону. Верхняя зона пустует, и по существу мы имеем систему холонов.

Четвертая глава работы посвящена двум основным вопросам. Первый вопрос – как давления различной симметрии влияют на эволюцию топологии поверхности Ферми в ВТСП купратах с ростом величины концентрации дырочного допирования? В работе рассмотрены следующие типы симметрий давления: гидростатическое, в плоскости a - b CuO_6 -октаэдра (за счет 1%-ного

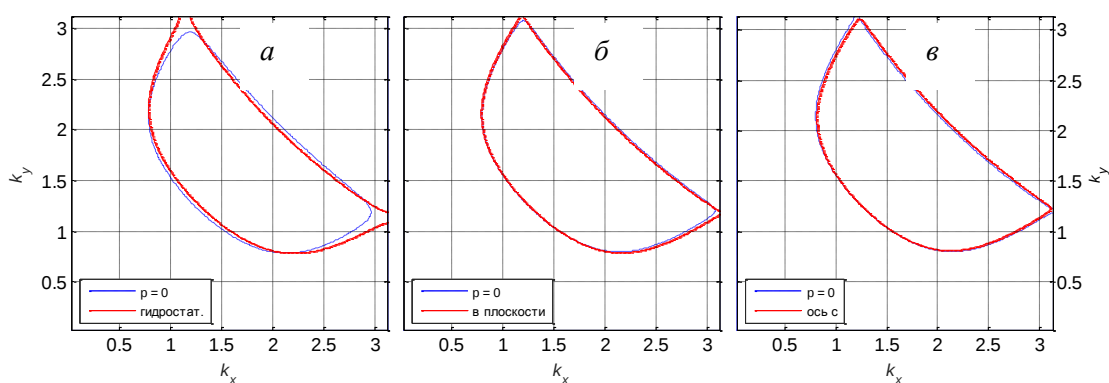


Рис.2. Первый квантовый фазовый переход Лифшица; а) – расщепление поверхности Ферми для гидростатического давления при $x=0.145$ (относительное изменение составляет $\delta_s = -0.71$ для малого кармана и $\delta_l = 0.93$ для большого кармана); б) – расщепление поверхности Ферми для давления в плоскости a - b при $x=0.15$ ($\delta_s = -0.14, \delta_l = 0.86$); в) – расщепление поверхности Ферми для недеформированного материала при $x=0.151$ ($\delta_s = -0.14, \delta_l = -0.83$). Обозначения: $\delta_{s(l)}^{(p)} = (S_{s(l)}^{(p)} - S_{s(l)}^{(0)}) / S_{s(l)}^{(0)}$, $\delta_{s(l)} = (S^{(p)} - S_{s(l)}^{(0)}) / S^{(p)}$, где верхние индексы (p) и (0) обозначают тип прикладываемого давления и случай, когда давление отсутствует, соответственно, нижний индекс s (l) обозначает малый (большой) карман.

уменьшения размеров a и b при неизменном объеме ячейки), вдоль оси c CuO_6 -октаэдра (за счет 3%-ного уменьшения размера c при неизменном объеме ячейки). Рассмотрение ведется на примере соединения $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ – хорошо изученного представителя p -типа купратов. Основным выявленным здесь эффектом являются гигантские скачкообразные изменения площади экстремальных сечений поверхности Ферми в узких окрестностях точек первого и второго квантовых фазовых переходов Лифшица. Действительно, как видно из рис. 2 и 3, в этих точках имеет место скачкообразное изменение топологии поверхности Ферми. Такое изменение топологии, в свою очередь, приводит к гигантскому скачкообразному изменению площади экстремальных сечений поверхности

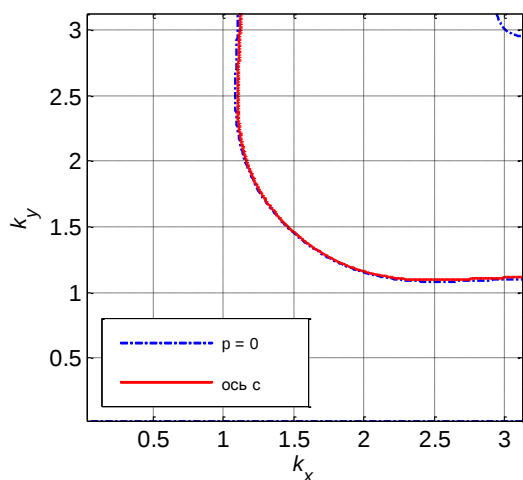


Рис. 3. Второй квантовый фазовый переход Лифшица (исчезновение малого внутреннего кармана поверхности Ферми при давлении вдоль оси c при $x=0.241$).

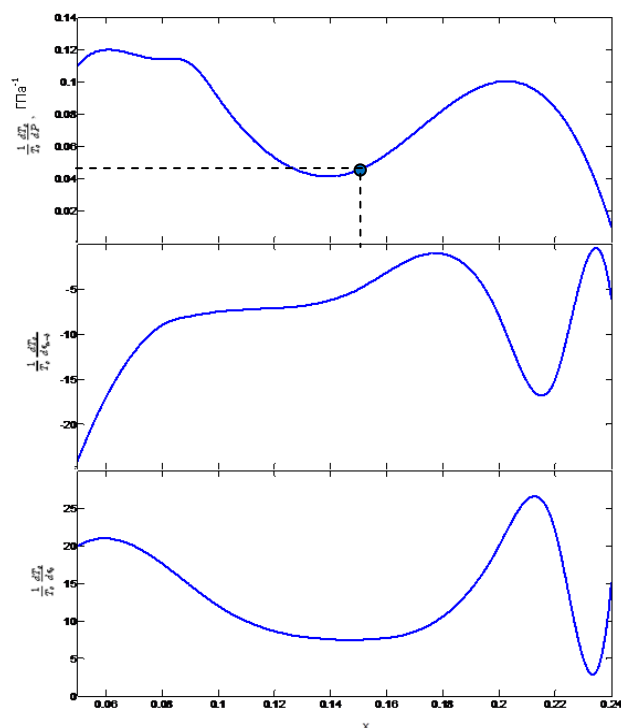


Рис. 4. Зависимости логарифмических производных $d \ln T_c / dp$ ($d \ln T_c / d \epsilon$) от концентрации дырочного допирования x для гидростатического давления (а), давления в плоскости $a-b$ (б) и давления вдоль оси c (в). Точка на рис. (а) соответствует экспериментальным данным [8].

Ферми, которое можно зарегистрировать в экспериментах по осцилляциям намагниченности в магнитном поле, поскольку, как известно, частота осцилляций пропорциональна этой площади:

$$\left(\Delta \left(\frac{1}{H} \right) \right)^{-1} = \frac{cS}{2\pi e \hbar}. \quad (9)$$

Второй вопрос четвертой главы – как давления различной симметрии влияют на температуру сверхпроводящего перехода – также изучался на примере системы $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$. Уравнение на T_c получаем из уравнения на параметр порядка [7] при $\Delta = 0$:

$$\frac{1-x}{2} J_1 \frac{1}{N} \sum_{\mathbf{k}} \frac{(\cos(k_x a) - \cos(k_y a))^2}{\xi(\mathbf{k}) - \mu} \text{th} \left(\frac{\xi(\mathbf{k}) - \mu}{2k_B T_c} \right) = 1. \quad (10)$$

Полученные посредством решения уравнения (10) логарифмические производные $d \ln T_c / dp$ ($d \ln T_c / d\varepsilon$) представлены на рис. 4. Полученные результаты находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными [8-10].

В заключении сформулированы основные результаты и выводы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Непертурбативными методами доказано точное соотношение между статистическими суммами одномерных с перескоками только между ближайшими соседями холонной t -модели и электронной t -модели в магнитном поле.
2. Для магнитной восприимчивости получено точное выражение в виде закона Кюри и доказано, что восприимчивость при учете перескоков только между ближайшими соседями не зависит от величины параметра перескока.
3. В пределе бесконечного кулоновского отталкивания получены точные концентрационные, температурные и полевые зависимости термодинамических параметров (свободной энергии, энтропии, внутренней энергии, теплоемкости и химического потенциала) в ненулевом магнитном поле, ранее не приводившиеся в литературе. Температурные зависимости указанных термодинамических параметров в отсутствие магнитного поля совпадают с полученными ранее иными методами.

4. Показано, что температурная зависимость теплоемкости имеет широкий максимум при $T_h \approx \frac{t}{k_B}$, обусловленный зарядовыми возбуждениями.

Сравнение положения и величины этого максимума с литературными данными при конечных значениях кулоновского отталкивания U показывает, что они слабо зависят от величины U . При этом спинонный максимум при $T_s \approx \frac{J}{k_B}$ исчезает в пределе бесконечного кулоновского отталкивания ($U \rightarrow \infty$).

Включение магнитного поля приводит к ненулевой энергии спиновых возбуждений, что формирует спинонный максимум в температурной зависимости теплоемкости при $T_s \approx \frac{h}{k_B}$.

5. Магнитное поле приводит к изменению зависимости энтропии от температуры. В то время как в отсутствие магнитного поля спиноны дают конечный вклад в энтропию при нулевой температуре, наличие магнитного поля приводит к снятию вырождения по проекции спина и приводит к сильному подавлению этой величины при низких температурах.
6. На примере соединения $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ в рамках t - J^* -модели, параметры которой вычислены методом LDA+GTB, изучено влияние давлений различной симметрии (гидростатическое, в плоскости a - b , вдоль оси c) на эволюцию топологии поверхности Ферми. Выявлено, что существенные отличия в топологии по сравнению со случаем недеформированной системы имеют место только в узких окрестностях точек квантовых фазовых переходов Лифшица.
7. Теоретически исследовано влияние давлений различной симметрии на температуру сверхпроводящего перехода. Полученные результаты для барической производной $\frac{d \ln T_c}{dp}$ в случае гидростатического давления находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными в

окрестности оптимального допирования. Для давления в плоскости a - b есть качественное согласие с результатами экспериментов по химическому сжатию в монослойных пленках $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$. В случае давления вдоль оси c результаты проведенных расчетов согласуются с экспериментально наблюдаемым сильным убыванием температуры сверхпроводящего перехода при росте величины внешнего давления.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. К. А. Сидоров, С. Г. Овчинников, Н. В. Тихонов. Простой способ точного расчета термодинамических свойств модели Хаббарда с бесконечным отталкиванием. // ЖЭТФ, 2013, Т. **143**, В.2., С. 379-387.
2. К. А. Сидоров, Н. В. Тихонов, С. Г. Овчинников. Точный расчет термодинамики одномерной модели Хаббарда с бесконечным отталкиванием в магнитном поле. // ТМФ, 2014, Т. **180**, N 1, С. 94-111.
3. K. A. Sidorov, V. A. Gavrichkov, S. V. Nikolaev, Z. V. Pchelkina, and S. G. Ovchinnikov, Effect of external pressure on the normal and superconducting properties of high-Tc cuprates. // Phys. Status Solidi B, 2016, V. **253**, P. 486 - 493.
4. С. Г. Овчинников, К. А. Сидоров. Простой метод оценки критерия перехода металл-диэлектрик в модели Хаббарда. // Ученые записки Таврического национального университета им. В. И. Вернадского, 2009, Т. **22**, N 1, С. 57-60.
5. Овчинников С. Г., Сидоров К. А., Шнейдер Е. И. Аномальная термодинамика допированных диэлектриков Мотта-Хаббарда. // XXXIII Международная зимняя школа физиков-теоретиков «Коуровка», Тезисы докладов, 2010, С. 133.
6. Овчинников С. Г., Сидоров К. А.. Термодинамика одномерной t -модели. // XXXIV Международная зимняя школа физиков-теоретиков «Коуровка», Тезисы докладов, 2012, С. 127.

7. К. А. Сидоров, С. Г. Овчинников. Простой способ точного расчета термодинамических свойств одномерной модели Хаббарда с бесконечным отталкиванием. // Вестник Омского университета, 2013, С. 95-99.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. H. Bethe, Zur theorie der metalle. I. Eigenwerte und eigenfunktionen der linearen atomkette. // Z. Phys., 1931, V. **71**, P. 205.
2. E. H. Lieb and F. Y. Wu, Absence of Mott transition in an exact solution of the short-range, one-band model in one dimension. // Phys. Rev. Lett., 1968, V. **20**, P. 1445. Erratum: ibid. 1968, V. **21**, P. 192.
3. N. Kawakami, T. Usuki and A. Okiji, Thermodynamic properties of the onedimensional Hubbard model. // Phys. Lett. A, 1989, V. **137**, P. 287.
4. G. Jütter, A. Clümper, and J. Suzuki, The Hubbard chain at finite temperatures: ab initio calculations of Tomonaga-Luttinger liquid properties. // 1998, Nucl. Phys. B, V. **522**, P. 471 - 502.
5. C. N. Yang. Some exact results for the many-body problem in one dimension with repulsive delta-function interaction. // Phys. Rev. Lett., 1967, V. **19**, P. 1312.
6. M. Gaudin, Un systeme a une dimension de fermions en interaction. // Phys. Lett. A, 1967, V. **24**, P. 55.
7. В. В. Вальков, Т. А. Валькова, Д. М. Дзедзисашвили, С. Г. Овчинников. Сильное влияние трехцентровых взаимодействий на формирование сверхпроводимости $d_{x^2-y^2}$ -симметрии в t-J*-модели. // Письма в ЖЭТФ, 2002, Т. **75**, В. **8**, С. 450 - 454.
8. F. Hardy, N. J. Hillier, C. Meingast, D. Colson, Y. Li, N. Barisic, G. Yu, X. Zhao, M. Greven, and J. S. Schilling. Enhancement of the critical temperature of $\text{HgBa}_2\text{CuO}_{4+\delta}$ by applying uniaxial and hydrostatic pressure: implications for a

- universal trend in cuprate superconductors. // Phys. Rev. Lett., 2010, V. **105**, P. 167002.
9. I. Bozovic, G. Logvenov, I. Belca, B. Narimbetov, and I. Sveklo. Epitaxial strain and superconductivity in $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ thin films. // Phys. Rev. Lett., 2002, V. **89**, P. 107001.
10. F. Gugenberger et al., Uniaxial pressure dependence of T_c , from high-resolution dilatometry of untwined $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ single crystals. // Phys. Rev. B49, 1994, V. **49**, N 18, P. 13137.

Подписано в печать __.__.2016

Формат 60x85/ 16. у.-и. л. 1.

Усл. печ. л. 1. Тираж __. Заказ № _____

Отпечатано в типографии Института физики СО РАН

660036, Красноярск, Академгородок, ИФ СО РАН
