

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Сидорова Кирилла Александровича
«Термодинамические особенности низкоразмерных систем с сильными
электронными корреляциями», представленную к защите на соискание
ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности
01.04.07 — «Физика конденсированного состояния».

Теория систем с сильными электронными корреляциями безусловно находится в центре внимания современной физики конденсированного состояния. Особое внимание привлекает физика сильнокоррелированных систем с пониженной размерностью. Причин для этого две: во-первых, в одномерном случае имеется точное решение модели Хаббарда; во-вторых, к квазидвумерным сильнокоррелированным системам относятся купраты, природа высокотемпературной сверхпроводимости в которых до сих пор остается до конца не выясненной.

Исследование Сидорова К.А. посвящено обоим указанным проблемам, где автору удалось получить ряд новых и важных результатов. Существуют различные подходы к точному решению одномерной модели Хаббарда, и все они используют очень сложный математический аппарат, так что простых выражений для физических величин нет в литературе. Основные результаты относятся к основному состоянию, а термодинамические свойства исследованы намного меньше. Поэтому полученные Сидоровым К.А. простые выражения для статистической суммы при бесконечном отталкивании и для основных термодинамических характеристик представляются исключительно важными с точки зрения фундаментальной науки. Также представляет интерес и исследование влияния внешнего давления на электронную структуру и критическую температуру сверхпроводимости купратов в двумерной t - J модели. Эти результаты показывают согласие с экспериментом для изотропного сжатия и подтверждают выводы о важной роли магнитного механизма спаривания в купратах, разрабатываемого многими авторами в теории сильных электронных корреляций.

Диссертационная работа Сидорова К.А. изложена на 126 страницах текста, содержит 25 рисунков, 2 таблицы и включает в себя четыре главы, заключение, выводы и список цитированной литературы из 105 наименований.

В первой главе содержится обзор литературы, где приводятся сведения об основных уже достигнутых результатах по одномерной модели Хаббарда при любом (в том числе, и бесконечном) значении кулоновского отталкивания двух электронов на одном узле. В первую очередь излагается метод решения, основанный на анзаце Бете. В рамках этого метода впервые удалось точно вычислить свойства основного состояния и

спектр элементарных возбуждений одномерной изотропной гейзенберговской модели. Далее рассматриваются уравнения Либа и Ву. Обсуждаются также имеющие большое концептуальное значение для термодинамики результаты Такахаша. 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.

Во втором параграфе обзорной главы приведены основные сведения по электронной структуре ВТСП купратов в режиме сильных корреляций. В третьем параграфе обсуждается трехзонная p-d-модель Эмери и ее редукция 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 диссертационной работы.

Глава 2 содержит обоснование связи между статистическими суммами холонов и электронов и описывает процедуру получения точного и компактного аналитического выражения для статистической суммы одномерной модели Хаббарда в пределе бесконечного отталкивания. Замечательным достижением Сидорова К.А. является простота метода, основанного на стандартной матричной алгебре и комбинаторике. Другое его достижение связано с обобщением точного выражения для статистической суммы на случай постоянного внешнего поля.

В главе 3 обсуждаются полученные точные концентрационные, полевые и температурные зависимости основных термодинамических характеристик: свободной энергии, энтропии, внутренней энергии, теплоемкости, химического потенциала и магнитной восприимчивости. Получены интересные выводы о двух пиках в температурной зависимости магнитной восприимчивости в магнитном поле - один обусловлен спиновыми, а другой - зарядовыми возбуждениями, которые при больших значениях кулоновской энергии хорошо согласуются с опубликованными данными других авторов.

Глава 4 посвящена исследованию влияния внешних давлений различной симметрии на электронную структуру и критическую температуру сверхпроводимости в купратах в рамках реалистичной t-J модели с трехцентровыми перескоками. Здесь рассмотрение ограничивается приближением среднего поля в технике операторов Хаббарда. В работе предсказывается возможность больших изменений площадей сечений поверхности Ферми при приложении внешнего давления в окрестности критических концентраций дырочного

легирования, в которых происходят квантовые переходы Лифшица с изменением топологии поверхности Ферми. Также рассчитаны зависимости критической температуры от давления. Сами величины критической температуры в приближении среднего поля как всегда завышены, достижением же Сидорова К.А. является вычисление изменение относительной температуры перехода от давления, которое оказалось близко к экспериментальному значению при оптимальном легировании.

По содержанию работы имеется несколько критических замечаний.

1. В первую очередь отметим ряд неверных высказываний, сделанных во Введении. При обсуждении результатов работы [87] делается вывод о непоследовательном подходе в развитой теории, имеющей «спорный характер», ввиду не соответствующей эксперименту зависимости сверхпроводящей температуры T_c (Рис. 6) от концентрации дырок δ с максимумом T_c при $\delta \sim 0.33$. Это несоответствие связано с характерным для стандартной t - J модели зависимостью плотности электронных состояний от легирования, имеющей максимум при этой концентрации. Такой же результат получен и в работе [89] (Рис. 8), где максимум T_c достигается при концентрации электронов $n \sim 0.66$ ($\delta \sim 0.33$). Максимум T_c при $\delta \sim 0.14$ на Рис. 23 связан с близостью поверхности Ферми к первой критической точке Лифшица для спектра, полученного методом LDA в работе [80] (см. параграф 1.3). Существенную роль в теории электронного спектра и сверхпроводимости в системах с сильной электронной корреляцией играет вклад динамических спиновых флуктуаций за счет кинематического взаимодействия во втором порядке по перескоку, возникающий в рамках эффективной теории сильной связи типа Элиашберга как для t - J модели [87], так и для модели Хаббарда (см., например, N. M. Plakida, V. S. Oudovenko, EPJ B **86**, 115 (2013), JSNM **29**, 1037 (2016), и цитированную там литературу). При этом в рамках модели Хаббарда максимум T_c достигается при концентрации дырок $\delta \sim 0.12$, значении, близким к эксперименту при использовании той же модельной функции для динамических спиновых флуктуаций, что и в работе [87]. В этих же работах для модели Хаббарда, к сожалению не замеченных диссертантом, был вычислен также вклад и от антиферромагнитного обменного взаимодействия, который оказался на порядок меньше кинематического.
2. В главах 2 и 3 по точному решению модели Хаббарда в пределе бесконечного взаимодействия было бы интересно сравнить точные ответы с результатами теории возмущений по малому параметру $t/U \ll 1$. Такое сравнение помогло бы

прояснить пределы применимости теории возмущений.

3. При анализе точных температурных, концентрационных и полевых зависимостей для одномерной модели Хаббарда с бесконечным отталкиванием в главе 3 следовало бы сопоставить теоретические расчеты с результатами эксперимента для квазиодномерных сильнокоррелированных систем, отмеченных на стр. 14.
4. В главе 4 полезно было бы отдельно исследовать влияние давления на критическую температуру $T_c^{\max}$ при оптимальном легировании δ_{opt} , когда вклад в изменение T_c за счет переноса заряда отсутствует: $T_c = T_c^{\max} [1 - b(\delta - \delta_{\text{opt}})^2]$ и можно изучать влияние давления на параметры модели (механизм спаривания), и влияние давления на перенос заряда δ . На рис. 23 показаны 3 кривые для 4-х обозначений, а на Рис. 25, где отсутствуют обозначения (а), (б), (в), мелкие подписи трудно разобрать.

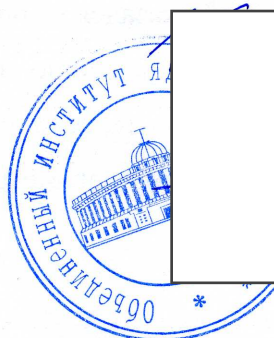
Сделанные замечания не снижают существенно общей положительной оценки диссертации, в частности, замечания 2, 3 имеют скорее характер пожелания на будущее.

В целом исследования, представленные в диссертации оригинальны, выполнены на высоком теоретическом уровне и проведены автором самостоятельно. Описанные в работе научные результаты позволяют классифицировать их как значительный вклад в фундаментальные исследования термодинамики низкомерных сильнокоррелированных систем. Достоверность полученных результатов обосновывается применением современных методов в теории конденсированного состояния. Основные результаты диссертации опубликованы в центральных рецензируемых журналах и обсуждались на Международных конференциях и школах. Работа хорошо изложена и в основном аккуратно оформлена. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации. Диссертационная работа Сидорова К.А. представляет собой законченное научное исследование, которое отвечает всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней» ВАК, а ее автор, Сидоров Кирилл Александрович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Главный научный сотрудник Лаборатории теоретической физики им.Н.Н.Боголюбова
Международной межправительственной организации «Объединенный институт ядерных исследований»,

д. ф.-м. н., профессор,

Подпись Н.М.Плакида заверяю:
Ученый секретарь ЛТФ ОИЯИ



Н.М.Плакида

С.Н. Неделько

Данные об оппоненте

Плакида Николай Максимилианович

Почтовый адрес: ЛТФ ОИЯИ, Жолио-Кюри 6,
141980 Дубна, Московской области, Россия

Телефон: (7-49621) 65-384

Telefax: (7-49621) 65-084

Telex: 911621 DUBNA SU

E-mail: plakida@theor.jinr.ru

Список основных публикаций по теме диссертации за последние 5 лет

1. A.A. Vladimirov, D. Ihle, and N. M. Plakida, Dynamic spin susceptibility of superconducting cuprates: A microscopic theory of the magnetic resonance mode, Phys. Rev. B **83**, 024411 (pp. 1--13) (2011).
2. N. M. Plakida, Comments on the paper "The pairing mechanism of high-temperature superconductivity: experimental constraints", Phys. Scr. **83**, 038303 (pp. 1--3) (2011).
3. N. M. Plakida, The two-time Green's function and the diagram technique. Theor. Math. Phys. **168**, (3), 1303--1317 (2011).
4. N. M. Plakida, Projection operator method, in: Theoretical Methods for Strongly Correlated Systems, Eds. A. Avella and F. Mancini, Springer Series in Solid-State Sciences Vol. 171, Springer, Heidelberg, 2011, Chap. 6, pp. 173--202.
5. A.A. Vladimirov, D. Ihle, and N. M. Plakida, Optical and dc conductivities of cuprates: Spin-fluctuation scattering in the t-J model, Phys. Rev. B **85**, 224536 (pp. 1--12) (2012).
6. N. M. Plakida and V. S. Oudovenko, On the theory of superconductivity in the extended Hubbard model: Spin-fluctuation pairing, Europ. Phys. Jour. B **86**, 115 (pp. 1--15) (2013).
7. N. M. Plakida, Strong-coupling theory for multiband superconductors. Theor. Math. Phys. **174**, (2), 273--283 (2013).
8. A.A. Vladimirov, D. Ihle, and N. M. Plakida, Spin excitations in an anisotropic $J_1 - J_2$ Heisenberg model, Theor. Math. Phys. **177**, (2), 1540--1554 (2013).
9. N.M. Plakida and V.S. Oudovenko, Kinematic spin-fluctuation mechanism of high-temperature superconductivity, ЖЭТФ **146**, 631 - 644 (2014).
10. N.M. Plakida and V.S. Oudovenko, Kinematic spin-fluctuation mechanism of high-temperature superconductivity in cuprates, in: Superconductivity properties, applications and new developments, Ed. P. Grant, Nova Science Publishes, 2016, Chap. 7, pp. 135 -167.
11. A.A. Vladimirov, D. Ihle, and N.M. Plakida, Magnetic susceptibility and short-range order in iron pnictides: Anisotropic $J_1 - J_2$ Heisenberg model, Europ. Phys. Jour. B **87**, 112 (pp. 1-5) (2014).
12. A.A. Vladimirov, D. Ihle, and N.M. Plakida, Magnetic order and spin excitations in layered Heisenberg antiferromagnets with compass-model anisotropies, JETP Letters, **100**, No. 12, 885-890 (2014).
13. A.A. Vladimirov, D. Ihle, and N.M. Plakida, Magnetic order in the two-dimensional compass-Heisenberg model, Europ. Phys. Jour. B **88**, 148 (pp. 1-4) (2015).
14. N. M. Plakida, V. S. Oudovenko, Theory of High-Temperature Superconductivity in Cuprates, J. Supercond. Nov. Magn. **29**, 1037--1042 (2016)
15. A.A. Vladimirov, D. Ihle, and N.M. Plakida, Magnetic order and spin excitations in the Kitaev—Heisenberg model on the honeycomb lattice, JETP **149**, № 6, (2016)