

**ОТЗЫВ**  
**официального оппонента**  
**на диссертационную работу Иванцова Ильи Дмитриевича**  
**«Сильные электронные корреляции**  
**в нормальной фазе слабодопированных ВТСП купратов»,**  
**представленную на соискание учёной степени**  
**кандидата физико-математических наук**  
**по специальности 01.04.02 — «Теоретическая физика»**

Основной целью диссертации является теоретической исследование влияния сильных электронных корреляций на свойства двумерных электронных систем. Важнейший частный таких систем – купратные высокотемпературные сверхпроводники. Основной проблемой теоретического описания этого класса соединений является неприменимость стандартных одноэлектронных приближений, поскольку сильное электрон-электронное взаимодействие здесь является определяющим. Актуальность диссертационной работы очевидна и обусловлена как острым запросом на адекватное объяснение свойств ВТСП, так и широким спектром их практического применения.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, двух приложений и списка использованной литературы из 99 наименований. Результаты работы опубликованы в 4 статьях в журналах, входящих в список ВАК, и представлены на 6 международных и российских конференциях.

Во **введении** к диссертации обосновывается актуальность темы диссертационной работы, формулируются ее цели, научная новизна и практическая значимость, перечислены положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** поведение сильно коррелированных электронов рассматривается в рамках так называемой модели Кондо-Гейзенберга. С помощью квантового метода Монте-Карло рассчитываются спиновые корреляционные функции при конечной температуре. Показано разрушение квазидальнего АФМ упорядочения с ростом допирования, и наоборот, усиливающее влияние Кондо-взаимодействия на АФМ упорядочение. В другом подходе – с помощью кластерной теории возмущений вычисляются поверхности Ферми при нулевой температуре и их эволюция с ростом допирования. В этом случае исследован вопрос об адекватности примененного численного метода, оценено влияние конечного размера кластера и неоднородности пространственного распределения заряда. Исследуется зависимость структуры поверхности Ферми от величин АФМ и Кондо-взаимодействия. На основании полученных данных сделан вывод о том, что основной вклад в реконструкцию поверхности Ферми вносит обусловленный сильным хаббардовским взаимодействием запрет двойного заполнения.

Во **второй главе** рассмотрена модель Хаббарда в пределе бесконечного кулоновского отталкивания при малом отклонении от половинного заполнения. В частности, исследуется известная «проблема Нагаоки» – появление ферромагнитного мешка вокруг одной или более дырок. В рамках квантового метода Монте-Карло рассчитаны спиновые корреляционные функции, причем в случаях двух разных представлений входящих в исходный гамильтониан операторов. Далее с помощью точной диагонализации малых кластеров вычисляется спин основного состояния и корреляционные функции системы

бесконечно отталкивающихся электронов на конечной решетке с периодическими граничными условиями. Показано, что при допировании более чем одной дыркой спин основного состояния не является максимально допустимым, а это указание на отсутствие насыщенного ферромагнетизма. Кроме того, с помощью точной диагонализации вычисляются энергии основного состояния системы с двумя дырками для двух возможных спиновых конфигураций. Результаты показывают, что возможность существования полностью насыщенного основного состояния зависит от типа граничных условий и размера решетки.

В третьей главе исследуется реконструкция поверхности Ферми в слабодопированных купратах в фазе волны зарядовой плотности. В этой главе используется модель  $t$ - $J$ , но не каноническая, а в кластерном представлении. Показано существование анизотропной щели в электронном спектре, обусловленной сильным кулоновским отталкиванием. Щель приводит к изменению топологии поверхности Ферми при допировании порядка 9%, что соответствует эксперименту. Воспроизведенная в рамках модели эволюция поверхности Ферми объясняет экспериментально показанное изменение знака коэффициентов Холла и Зеебека в фазе волны зарядовой плотности (если трактовать их в рамках  $t$ -приближения). Кроме того, предложен возможный механизм возникновения квантовых осцилляций плотности электронных состояний в сильном магнитном поле.

К недостаткам работы можно отнести следующее:

1. В диссертации фактически нет литературного обзора. Здесь остается посочувствовать автору – литература по ВТСП бесконечна. Но можно было попытаться хотя бы отобрать самое важное для конкретных задач диссертации.
2. Модели, рассматриваемые в работе, вводятся, можно сказать, «слишком резко». Это касается гамильтонианов (1.3) и (1.10) в первой главе, а также некоторых других. В теории ВТСП используется десяток различных моделей, некоторые далеки друг от друга некоторые тесно связаны, у них разные области применения. Было бы полезно более детально очертить место эксплуатируемых в работе моделей в общей картине допированного 2D антиферромагнетика.
3. Претензии к языку. При всем почтении по отношению к Уильяму Гамильтону и Вернеру Гейзенбергу – «гамильтониан» и «гейзенберговский» пишутся со строчной буквы. Многочисленные ошибки такого рода режут глаз.
4. Использующийся во второй главе метод точной диагонализации позволяет оценить возможность существования ФМ основного состояния для больших, но конечных решеток. Выводы о «мешке Нагаоки» в термодинамическом пределе поэтому должны быть более осторожными.

Разумеется, приведённые замечания не умаляют научной ценности диссертации, которая по актуальности, объёму выполненных исследований и оригинальности удовлетворяет требованиям Положения ВАК РФ «О порядке присуждения учёных степеней». Материалы диссертации опубликованы в ведущих научных изданиях.

Автореферат улучшает понимание использованных и развитых в диссертации методов, а также полученных теоретических и численных результатов и проясняет вопросы, которые следует изучить в возможных дальнейших исследованиях с использованием рассмотренных в диссертации моделей.

Считаю, что Илья Дмитриевич Иванцов заслуживает присвоения степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 — «Теоретическая физика».

Официальный оппонент:  
доктор физ.-мат. наук,  
руководитель отдела теоретической физики  
Института физики высоких давлений им. Л. Ф. Верещагина  
Российской академии наук

А. В. Михеенков  
Михеенков 2019 г.

Адрес: 108840, г. Москва,  
г. Троицк, Калужское шоссе, стр. 14  
Института физики высоких давлений им. Л. Ф. Ве  
Телефон: +7 (495) 851 05 82  
Электронная почта: mikheen@bk.ru

Подпись А. В. Михеенкова заверяю.  
Ученый секретарь ИФВД им. Л. Ф. Верещагина Р  
к.ф.-м.н.

Т. В. Валянская  
Т. В. Валянская 2019 г.

