

## О Т З Ы В

официального оппонента д.ф.-м.н. Рахманова А.Л. на диссертацию Иванцова Ильи Дмитриевича “Сильные электронные корреляции в нормальной фазе слабодорованных ВТСП купратов”, представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика

Открытие высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП) в купратах стало одним из важнейших событий физики конца двадцатого века. Трудно переоценить важность данного открытия для фундаментальной физики конденсированного состояния и приложений. Неудивительно, что изучению ВТСП в купратах посвящено огромное число экспериментальных и теоретических работ. Однако, несмотря на большие усилия и отдельные успехи, мы до сих пор не имеем ясной картины данного явления. Общепризнано, что трудности описания явления ВТСП в купратах во многом связаны с сильными электрон - электронными корреляциями в этих системах. Наличие сильного электрон - электронного взаимодействия и сложность кристаллической структуры ВТСП купратов приводят к весьма нетривиальным свойствам этих соединений не только в сверхпроводящем, но и в нормальном состоянии. Более того, адекватное описание свойств купратов в нормальном состоянии является необходимым, а возможно и ключевым, для понимания механизма ВТСП. Диссертация И.Д. Иванцова посвящена теоретическому исследованию свойств ВТСП купратов в нормальном состоянии. В этой связи ее актуальность не вызывает сомнений.

В диссертации автор последовательно и корректно использовал известные методы теоретической физики конденсированного состояния, а также модифицировал ряд из них для приложения к своим конкретным задачам. Следует отметить, что И.Д. Иванцов в своей работе использует, как аналитические, так и современные численные методы, демонстрируя высокую квалификацию физика-теоретика.

В первой главе диссертации приведено краткое введение в проблему и довольно подробно обсуждается модельный гамильтониан Кондо-Гейзенберга, использованный для описания купратов. Методом квантового Монте-Карло вычислены спиновые корреляционные функции. С помощью кластерной теории возмущений рассчитаны поверхности Ферми при различных уровнях дипирования. Во второй главе диссертации с помощью методов квантового Монте-Карло и точной диагонализации малых кластеров исследовано

ферромагнитное основное состояние допированной фазы Нагаока (предел бесконечно сильных электрон - электронных корреляций). В третьей главе подробно проанализировано влияние волн зарядовой плотности на вид поверхности Ферми и объяснена причина возникновения квантовых осцилляций плотности электронных состояний малой частоты, наблюдавшихся в слабо допированных купратах. В приложении А описан использованный в работе алгоритм квантового метода Монте-Карло, а в приложении Б изложен метод кластерной теории возмущений, использованный для вычисления спектральных функций и поверхностей Ферми. Отмечу, что, на мой взгляд, материал, содержащийся в приложениях, представляется весьма полезным для читателя.

Среди результатов, полученных в диссертации, наиболее интересными мне представляются следующие:

1. Была проведена реконструкция поверхности Ферми ВТСП купрата с помощью микроскопической модели не требующей введения дополнительных феноменологических параметров, учитывающей сильные электрон - электронные корреляции, а также существование волн зарядовой плотности. Полученный результат позволяет ряд экспериментально обнаруженных особенностей свойств ВТСП купратов (например, смену знаков коэффициентов Холла и Зеебека в определенном диапазоне допирования).
2. Предложен механизм, объясняющий возникновение квантовых осцилляций плотности электронных состояний в присутствии сильного магнитного поля в фазе волны зарядовой плотности.
3. Показано, что используемый в диссертации подход позволяет описать поверхности Ферми как в псевдощелевой фазе, так и в фазе волны зарядовой плотности.

К важным достоинствам диссертации относится и то, что во всех возможных случаях диссертант сопоставляет полученные теоретические результаты с результатами экспериментов, имеющихся в литературе.

В диссертации получен целый ряд новых физических результатов, углубляющих наше понимание электронных процессов в изучаемых системах. Необходимо отметить, что автором выполнен большой объем теоретических исследований, а совокупность этих результатов по качеству и объему вполне соответствует уровню диссертации на соискание степени кандидата физико-математических наук.

**Новизна** полученных результатов подтверждается литературным анализом работ других авторов, предваряющих каждую главу диссертации, а также публикацией основных результатов диссертации в рецензируемых журналах.

**Достоверность результатов и обоснованность выводов**, представленных в диссертации И.Д. Иванцова, подтверждается анализом применимости используемых теоретических подходов и методов, а также сопоставлением полученных в работе результатов с экспериментом и результатами других авторов, там, где такое сопоставление возможно.

Диссертация содержит значительный объем как аналитической, так и численной работы. При этом за громоздкими выражениями и вычислительными схемами автор не теряет физического смысла результатов, что особенно важно в исследуемой области. В целом диссертация производит весьма благоприятное впечатление. В качестве замечаний к работе я бы высказал следующее.

1. В диссертации нет отдельного раздела с обзором литературы. Литературный обзор разнесен по главам. Это затрудняет оценку новизны результатов диссертации при чтении.
2. Автор никак не упоминает железосодержащие сверхпроводники. Было бы интересно хотя бы кратко обсудить, различия между ВТСП купратами и железосодержащими ВТСП в свете подходов и результатов диссертации.
3. Выводы о смене знака коэффициентов Холла и Зеебека делаются на основании изменения знака носителей заряда, однако сами значения коэффициентов в диссертации не рассчитываются. Было бы интересно сравнить численные значения таких коэффициентов с полученными в эксперименте.
4. Диссертация написана достаточно хорошоим языком. Однако, в тексте имеется некоторое количество опечаток, стилистических погрешностей, и жаргонизмов (например, таких как «констрайнт»).

Сделанные замечания носят скорее методический характер и не изменяют общей оценки диссертации, представляющей собой важное теоретическое исследование электронного строения и сверхпроводящих свойств сильно коррелированных материалов.

Результаты диссертации своевременно опубликованы в научных журналах из перечня ВАК. Они докладывались на научных конференциях в России и за рубежом. Авто-реферат правильно и полностью отражает содержание диссертации.

Считаю, что диссертация “Сильные электронные корреляции в нормальной фазе слабодопированных ВТСП купратов” удовлетворяет всем требованиям Положения о по-

рядке присуждения ученых степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Иванцов Илья Дмитриевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика.

Официальный оппонент:

Заведующий лабораторией №1

Института теоретической и прикладной

электродинамики РАН,

доктор физико-математических наук (01.04.13)

Рахманов Александр Львович

10.06.2019

125412, г. Москва, ул. Ижорская, д.13

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной электродинамики Российской академии наук (ИТПЭ РАН), лаборатория теоретической электродинамики конденсированного состояния

Телефон: +7 (499) 269-51-20, E-mail: alrakhmanov@mail.ru

Подпись Рахманова А.Л. заверяю:

Ученый секретарь ИТПЭ РАН

к.ф.-м.н.

А.Т. Кунавин

