

О Т З Ы В

официального оппонента на диссертационную работу Шустина Максима Сергеевича «Влияние эффектов кристаллического поля и фотоиндуцированных состояний на низкотемпературные свойства молекулярных магнетиков», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Исследования статических и динамических свойств низкоразмерных магнитных систем – одно из актуальных направлений физики конденсированного состояния. Пристальное внимание к физическим процессами, сопровождающим эволюцию магнитного момента в таких системах, объясняется прежде всего необходимостью создания приборов и устройств, которые по своим функциональным возможностям, размерам и стоимости могли бы стать конкурентами современным устройствам магнитной записи. Прогресс в технологиях синтеза органических магнетиков позволяет сегодня тщательно исследовать соединения, магнитные свойства которых практически полностью определяются характеристиками исходных наноразмерных молекулярных компонентов. Изучение магнитного поведения таких структур сопряжено с необходимостью анализа квантовых эффектов, с учетом неравновесных процессов, необходимо также понимание роли взаимодействия с внешним оптическим облучением. В последнем случае особенность задачи в том, что возникающие фотоиндуцированные состояния могут изменять свойства самой структуры и потому влиять на ее магнитные характеристики. Исследованию этой проблемы на примере квазиодномерных органических магнетиков и посвящена диссертация Шустина М.С. Имея это в виду, можно с уверенностью говорить об актуальности диссертационного исследования. Здесь необходимо упомянуть, что к настоящему времени синтезировано уже несколько десятков органических одноцепочечных магнетиков, демонстрирующих большое разнообразие физических свойств.

Диссертация состоит из введения, обзорной главы, трех глав, содержащих оригинальные результаты, заключения и списка литературы.

Во введении отражена актуальность темы исследования и отмечена ее практическая значимость. Кроме того, на основе краткого обзора формулируются проблемы, которым далее посвящены оригинальные главы диссертационного исследования, а также приводятся положения, выносимые на защиту.

В обзорной главе рассмотрены эффекты, возникающие при учете сильной одноионной анизотропии в квазиодномерных магнетиках (основное внимание уделяется рассмотрению сильной легкоосной анизотропии). В частности, приведены важнейшие результаты, относящиеся к цепочечным магнетикам с резкой доменной стенкой, рассмотрены особенности температурной зависимости времени магнитной релаксации в таких системах. Продемонстрировано, что для последовательного анализа магнитной динамики в одноцепочечных магнетиках необходимо совместно рассматривать как их динамические, так и статические магнитные свойства. Подробно рассматривается модель Глаубера – базовая модель

для описания магнитной динамики легкоосных спиновых цепочек. В ее рамках на полуколичественном уровне показано, как наличие фотоиндуцированных магнитных состояний может сказываться на особенностях температурной зависимости времени магнитной релаксации.

При анализе квантовых эффектов, обусловленных некоммутативностью оператора проекции спинового момента на ось квантования и оператора одноионной анизотропии, диссертант обоснованно делает акцент на необходимости учитывать спиновые флуктуации – для более корректного описания динамических характеристик одноцепочечных магнетиков.

Цепочки с сильно развитыми спиновыми флуктуациями уже не могут быть описаны в рамках модели Глаубера. В качестве примера подробно анализируются экспериментальные данные об одноцепочечном магнетике с одноионной анизотропией типа «легкая плоскость», свойства которого исследуются в диссертации в дальнейшем. Также описан синтезированный совсем недавно (в 2013 году) спин-димерный одноцепочечный магнетик. В целом первая, обзорная глава представляет собой написанный на высоком уровне, но абсолютно прозрачным языком широкий обзор современного состояния проблемы.

Во второй главе – для оценки роли межузельного отталкивания в термодинамических характеристиках подверженных влиянию облучения одноцепочечных магнетиках – формулируется и точно решается модель ансамбля изинговских цепочек с равновесно распределенными немагнитными примесями и межузельными отталкиванием кулоновского типа между магнитными центрами. Показано, что совместное влияние отожженного магнитного беспорядка и межузельного отталкивания приводит к реализации в такой модели квантовых фазовых переходов, в малой окрестности которой существенно изменяется магнитная восприимчивость. Важное заключение диссертанта состоит в том, что при прохождении системой квантовой критической точки существенно изменяется магнетокалорический эффект. Последнее может служить косвенным указанием на возможность использования одноцепочечных магнетиков в качестве элементной базы криогенных устройств.

В третьей главе в рамках спин-волновой теории исследуются спектральные свойства (а также обусловленные квантовыми флуктуациями перенормировки) легкоплоскостного четырехподрешеточного цепочечного магнетика. Существенно, что задача решается с использованием диаграммной техники для операторов Хаббарда, позволяющей корректно учитывать сильную одноионную анизотропию. Диссертант провел ряд трудоемких аналитических и численных расчетов, в результате получено уравнение, определяющее спектр возбуждений, а также выражения для функций Грина рассматриваемого магнетика. Показано, что, при значениях параметров, извлекаемых из эксперимента, квазимпульсная зависимость спектра возбуждений характеризуется наличием щели порядка обменного интеграла и малой относительно такой щели дисперсией. Этот результат существенен для дальнейшего – он позволил при исследовании термодинамических свойств соединения использовать эффективную двухподрешеточную модель Изинга.

В заключительной главе диссертации основное внимание уделено описанию модификации температурной зависимости магнитной восприимчивости рассматриваемого в предыдущей главе магнетика при его оптическом облучении. Особенностью соединения является то, что возникновение фотоиндуцированных состояний сопровождается переносом электронов между оболочками высокоспиновых и низкоспиновых ионов железа. В результате после облучения система демонстрирует сильную модификацию температурной зависимости магнитной восприимчивости. Стоит отдельно отметить эффективный подход к решению задачи об описании упомянутой модификации. Для учета многократных процессов переноса электронов между электронными оболочками введен специальный статистический ансамбль изинговских цепочек, а для восстановления правильной магнитной структуры и особенностей переноса электронов – эффективные взаимодействия типа межузельного отталкивания и два множителя Лагранжа. При таком подходе статистическая сумма для сформулированной модели может быть вычислена (и вычислена в диссертации) точно методом трансфер-матрицы, и, при совместном решении уравнений на множители Лагранжа, описана модификация температурной зависимости магнитной восприимчивости, хорошо согласующаяся с экспериментальными данными.

В заключении содержатся основные результаты и выводы диссертационных исследований.

Полученные в диссертационной работе результаты важны для развития представлений о роли одноионной анизотропии и фотоиндуцированных состояний в одноцепочных магнетиках. Автор продемонстрировал не только владение математическими методами, но и понимание физических процессов. Все основные результаты работы новы и достоверны. Последнее обеспечивается использованием адекватного теоретического языка и методов, а также совпадением с известными результатами в ряде рассмотренных предельных случаях.

Однако в работе имеется и ряд недостатков:

1. Значительную часть обзорной главы занимает детальное рассмотрение модели Глаубера, дающей обоснование особенностей медленной магнитной динамики в одноцепочных магнетиках. Однако в трех последующих главах рассматривается влияние облучения и анизотропии на статические магнитные свойства спиновых цепочек. Без соответствующих обоснований не кажется очевидным, что влияние немагнитных центров, квантовых перенормировок и межузельного отталкивания будет сказываться на характеристиках магнитной динамики столь же сильно, как на статической магнитной восприимчивости.

2. Во второй главе довольно размыто определяется физический смысл межузельного отталкивания между магнитными центрами, и, соответственно, диапазон значений, которые этот параметр может принимать в реальной физической системе.

3. Из предыдущего замечания как следствие вытекает относительная скучность прогнозов и рекомендаций по экспериментальному наблюдению полученных эффектов.

Высказанные замечания, разумеется, не влияют на высокую оценку диссертационной работы, в которой проведен большой объем аналитических и численных расчетов и получен ряд важных и достоверных результатов. В целом, диссертационные выводы вносят заметный вклад в исследования науки одноцепочечных магнетиков. Результаты своевременно опубликованы в научной печати. Автореферат полно и правильно отражает содержание диссертации.

Диссертация имеет характер законченной научно-исследовательской работы, содержит решение важной научной задачи – о влиянии эффектов кристаллического поля и фотоиндированных состояний на низкотемпературные свойства одноцепочечных магнетиков. Считаю, что диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Шустин Максим Сергеевич, несомненно, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Руководитель теоретического отдела
ФГБУН Институт физики высоких давлений
им. Л.Ф. Верещагина РАН,
доктор физ.-мат. наук (01.04.07)



Михеенков А.В.

Ученый секретарь
ФГБУН Институт физики высоких давлений
им. Л.Ф. Верещагина РАН,
кандидат физ.-мат. наук,



Валянская Т. В.

28 марта 2017 г.

Сведения об оппоненте

Фамилия, имя, отчество оппонента	Михеенков Андрей Витальевич
Учёная степень	доктор физико-математических наук
Учёное звание	доцент
Шифр и наименование специальности, по которой защищена диссертация	01.04.07 – физика конденсированного состояния
Полное наименование организации места работы	Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики высоких давлений им. Л.Ф. Верещагина Российской академии наук
Структурное подразделение и должность	заведующий теоретическим отделом
Индекс, почтовый адрес организации места работы	108840, г. Москва, г. Троицк, Калужское шоссе, стр. 14,
Телефон	8 (495) 851-0582
Адрес электронной почты	mikheen@bk.ru
Список основных публикаций работников структурного подразделения, составляющего отзыв, за последние пять лет по теме диссертации (не более 15 публикаций).	<p>1. А. В. Михеенков, А. В. Шварцберг, Н. А. Козлов, А. Ф. Барабанов, <u>Фазовая диаграмма фрустрированного $J_1-J_2-J_3$ квантового двумерного антиферромагнетика в рамках сферически симметричных функций Грина</u>, Письма в ЖЭТФ, 93 (7), (2011);</p> <p>2. А. В. Михеенков, А. В. Шварцберг, А. Ф. Барабанов, <u>Фазовые переходы в двумерной J_1-J_2-модели Гейзенберга при произвольных знаках обменных взаимодействий</u>, Письма в ЖЭТФ, 98(3), 178–182 (2013);</p> <p>3. М. Ю. Каган, К. И. Кугель, А. В. Михеенков, А. Ф. Барабанов, <u>Элементарные возбуждения в симметричной спин-орбитальной модели</u>, Письма в ЖЭТФ, 100(3), 207–212 (2014);</p> <p>4. А. Ф. Барабанов, Ю. М. Каган, Л. А. Максимов, А. В. Михеенков, Т. В. Хабарова, <u>Эффект Холла и его аналоги</u>, УФН, 185 (5), 479–488 (2015);</p>

5. А. Ф. Барабанов, А. В. Михеенков, Н. А. Козлов, Квантовый фазовый переход в двумерном фruстрированном магнетике в матричном проекционном подходе, Письма в ЖЭТФ, **102** (5), 333–338, (2015),
6. Михеенков А.В., Валиулин В.Э., Шварцберг А.В., Барабанов А.Ф., Спин-спиновая корреляционная длина в двумерном фruстрированном магнетике и ее связь с допированием, ЖЭТФ, **148** (3), 514-525 (2015).
7. A.M. Belemuk, N.M. Chtchelkatchev, A.V. Mikheyenkov. Effective orbital ordering in multiwell optical lattices with fermionic atoms, Phys. Rev. A, **90**, 023625 (2015).
8. I. A.V. Mikheyenkov, A.V. Shvartsberg, V.E. Valiulin, A.F. Barabanov. Thermodynamic properties of the 2D frustrated Heisenberg model for the entire J1-J2 circle, J. Magn. Magn. Mater., **419**, 131–139 (2016).

Руководитель теоретического отдела
ФГБУН Институт физики высоких давлений
им. Л.Ф. Верещагина РАН,
доктор физ.-мат. наук (01.04.07)



Михеенков А.В.

Ученый секретарь
ФГБУН Институт физики высоких давлений
им. Л.Ф. Верещагина РАН,
кандидат физ.-мат. наук,



Валянская Т. В.

28 марта 2017 г.