

## ОТЗЫВ

официального оппонента Метлова Константина Леонидовича на диссертацию Ярыгиной Екатерины Александровны «Влияние температуры и одноионной анизотропии на динамику и статику негейзенберговских магнетиков», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 — физика конденсированного состояния.

Магнетизм — сугубо квантовое явление. Тем не менее, наиболее активно развивающиеся сегодня направления магнетизма, такие как спинтроника (хоть и не на все 100%), магноника, скирмионика описывают магнитные состояния используя классический микромагнетизм, опирающийся, в свою очередь, на феноменологические уравнения Ландау-Лифшица. Наличие локального магнитного момента вещества при этом постулируется, а квантовые взаимодействия приближаются феноменологическими членами в микромагнитном гамильтониане. В этом контексте, проведенное в диссертационной работе исследование магнитных состояний и фазовых переходов между ними, которое полностью учитывает квантовую природу магнетизма, *несомненно является актуальным*. Особенно эффекты, связанные с чётностью удвоенного спина, которые рассматриваются в данной работе.

Описанные в диссертации фазовые переходы первого рода могут быть потенциально использованы для хранения информации. Продольные же спинволновые моды, характерные для магнетика с целым спином, могут быть полезны как дополнительный канал передачи информации в магнонных устройствах. Таким образом, проведенные автором исследования, несомненно, имеют и *прикладное значение*. Результаты работы могут быть использованы в исследовательских организациях, занимающихся исследованиями в области магноники и спинтроники, а так же в ВУЗах при разработке учебных программ.

В сравнении с предыдущими исследованиями на эту тему, автор рассматривает влияние одноионной анизотропии и температуры на статику, динамику и фазовые переходы между различными фазами (коллинеарными и неколлинеарными) анизотропных квантовых магнетиков с биквадратичным обменом. По совокупности учтённых факторов, такие задачи были поставлены и решены *впервые, а новизна полученных результатов не вызывает сомнений*.

*Достоверность* результатов обусловлена корректным использованием современного квантовополевого описания, подходящего для рассмотрения многочастичных систем с сильными корреляциями, и приближения среднего поля. Многие из полученных автором выражений проверены предель-

ными переходами и, в частных случаях, сводятся к известным (либо полученным автором в данной работе ранее).

Диссертация изложена на 110 страницах текста, содержит 15 рисунков и построена традиционным образом. Она состоит из ВВЕДЕНИЯ, трех оригинальных РАЗДЕЛОВ, ЗАКЛЮЧЕНИЯ и СПИСКА ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ из 100 наименований.

Во ВВЕДЕНИИ сделан подробный анализ современного состояния вопросов, исследуемых в диссертации, сформулированы цели и задачи исследований.

Каждый из оригинальных РАЗДЕЛОВ построен по одинаковой схеме. Сначала записывается модельный гамильтониан в терминах спиновых операторов. Затем, используя приближение среднего поля, гамильтониан сводится к одноузельному. Одноузельный гамильтониан диагонализуется (используя  $u$ - $v$  преобразование Боголюбова с угловым параметром  $\theta$  в первом и втором разделе, вводя дополнительный угол вращения спинов во втором разделе). Для анализа элементарных возбуждений используется метод функции Грина для операторов Хаббарда. Энергия минимизируется по параметрам диагонализующих преобразований, разные минимумы при этом соответствуют различным фазам. Исследуются равновесие и стабильность этих фаз, переходы между ними. Строится фазовая диаграмма.

В первом РАЗДЕЛЕ исследована модель негејзенберговского магнетика с одноосной анизотропией (случаи анизотропии типа "лёгкая ось" и "лёгкая плоскость" рассмотрены в разных подразделах) и спином магнитного иона  $S = 1$  в отсутствие тепловых флуктуаций. В приближении среднего поля получено выражение для свободной энергии магнетика как функции параметров порядка, проанализированы стабильные состояния, спектры элементарных возбуждений. Построены фазовые диаграммы на плоскости констант билинейного и биквадратичного обмена, нормированных на константу одноионной анизотропии. Обсуждаются особенности фазовых переходов в анизотропном случае. Показано, что анизотропия типа "лёгкая ось" не влияет на фазовую диаграмму, а вот анизотропия типа "лёгкая плоскость" не просто отражается на фазовой диаграмме, но открывает возможность прямых фазовых переходов между нематическими фазами.

Во втором РАЗДЕЛЕ учитывается термическая активация состояний негејзенберговского магнетика с одноосной анизотропией. Проанализированы стабильные состояния, спектры возбуждений и фазовые переходы при конечной температуре. Построена фазовая диаграмма при различных значениях температуры и константы одноионной анизотропии. Установлено, что анизотропия препятствует разрушению магнитного упорядочения тепловыми флуктуациями. Интересно, что "распутывание" поперечных мод

в ферромагнитной фазе с увеличением температуры и анизотропии приводит к возникновению запрещённой зоны в спектре, которая может оказаться практически полезной для управляемой фильтрации высокочастотных сигналов. Удивительно, что линия перехода между ферромагнитной и немагнитной фазами негејзенберговского магнетика со спином  $S = 1$  не зависит от температуры и константы анизотропии, а определяется лишь взаимной величиной обменных констант (билинейной и квадратичной).

В третьем РАЗДЕЛЕ рассматривается сильно анизотропный (изинговский) антиферромагнетик, но уже только с билинейным (не биквадратичным) обменом. В рамках методологии первых двух разделов и так же в приближении среднего поля исследованы равновесные фазы, динамические возбуждения, построена фазовая диаграмма. Показано, что сильная (критерий указан в работе) анизотропия подавляет неколлинеарные фазы, а фазовые переходы при изменении поля становятся переходами первого рода.

Перечисленные выше, а также другие результаты, составляющие основу диссертационной работы, новы, актуальны и вносят вклад в физику квантовых негејзенберговских магнетиков. Автореферат правильно и достаточно полно отражает содержание работы и положения, выносимые на защиту. Результаты диссертационной работы опубликованы в *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* (3 статьи) и *Журнале Экспериментальной и Теоретической Физики* (1 статья), входящих в базу данных Scopus, Web of Science и список ВАК. Они прошли апробацию на престижных научных конференциях среди специалистов по вопросам физики конденсированного состояния и магнитных явлений, опубликовано 6 тезисов докладов. Все исследования проведены на высоком уровне с использованием современного (и весьма сложного!) математического аппарата, что, несомненно, демонстрирует квалификацию соискателя.

Существенным *достоинством* диссертации является единство подхода и методологии, использованное при рассмотрении различных модельных гамильтонианов. Эта техника, которой автор владеет в совершенстве, является мощной, универсальной и может быть полезна при решении многих других интересных задач современного квантового магнетизма.

Однако, как и в любом серьезном исследовании, в диссертации можно отметить ряд недостатков, которые вызывают следующие вопросы:

1. Раздел 1.1.1: Не совсем понятно – зачем говорить о трёх параметрах порядка в рассматриваемой модели ( $\langle S^z \rangle$ ,  $q_2^0$ ,  $q_2^2$ ), когда параметр порядка один –  $\theta$ , а упомянутые три параметра через него однозначно выражаются формулой (1.6) ?

2. Раздел 1.2: Зачем требуется отдельное рассмотрение для анизотропии типа “лёгкая плоскость”, если от ранее рассмотренной анизотропии типа “лёгкая ось” она отличается лишь знаком параметра  $\beta$ ? Не лучше ли было эти два рассмотрения объединить? Тем более, что и выражения для свободной энергии получаются очень похожими. Интересно так же, что выражение для  $B_2^2$  в Разделе 1.2.1 переходит в  $B_2^2$  Раздела 1.1.1 при  $\varphi = 0$ , но выражение для  $B_2^0$  не переходит и отличается числовым коэффициентом. В чем физический смысл отсутствия такого предельного перехода?
3. Раздел 2.5: Рис 9 изображает серию прямых линий  $J_0 = K_0$  (иллюстрирующих независимость линии перехода ферромагнетик-спиновый немагнетик от температуры). Такой же вывод делается в этом Разделе и под номером 4. С другой стороны, при достаточно высокой температуре обе эти упорядоченные фазы перестают существовать. Это происходит при одной и той-же температуре? Не противоречит ли это выводу о независимости линии перехода от температуры?
4. Все расчёты в работе проведены в приближении среднего поля. Насколько это ограничивает применимость полученных в работе выводов?
5. В работе часто встречаются утверждения о подобии тех или иных конкретных материалов рассмотренным в ней моделям. Однако, нет ни одной попытки сравнить многочисленные предсказания теории с экспериментально измеряемыми свойствами этих материалов. Такое сравнение значительно бы улучшило работу!
6. Присутствуют опечатки и нестандартная терминология: “кодировки информации” → “кодирования информации”, “энергетически не выгодным” → “энергетически невыгодным”, “третьей ветви” → “третьей ветви”, “Геометрическим представить данного тензор можно используя эллипсоид” → “Этот тензор соответствует эллипсоиду”, “АНИТФЕРРОМАГНЕТИКА” → “АНТИФЕРРОМАГНЕТИКА”. Ссылка [56] содержит неверные библиографические данные. Во введении имеются ссылки на константы биквадратичного обмена  $K$ , которые, вообще говоря, на тот момент в тексте диссертации не определены. Не унифицированы обозначения. Например, в первых двух разделах константа одноионной анизотропии обозначена символом  $\beta$ , а в третьем символом  $D$ .

Приведенные выше замечания носят рекомендательный и редакционных характер, но ни в коем случае не ставят под сомнение основные выводы диссертационной работы. Не влияют они и на оценку достоверности, важности и новизны представленных в работе результатов.

Учитывая актуальность темы диссертационного исследования, научную новизну и практическую ценность, считаю, что диссертация Ярыгиной Екатерины Александровны «Влияние температуры и одноионной анизотропии на динамику и статику негейзенберговских магнетиков» выполнена на высоком уровне и является законченной научной работой, удовлетворяющей всем критериям Положения о присуждении ученых степеней, а Ярыгина Екатерина Александровна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 — физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент,

доктор физ.-мат. наук,  
в.н.с. ФГБНУ ДонФТИ,



Метлов К. Л.

Дата: 24 сентября 2023 г.

Адрес: ФГБНУ «Донецкий Физико-Технический Институт им. А.А. Галкина», 283048, г. Донецк, ул. Розы Люксембург, д. 72.

Телефон: +7 (949) 305-28-00. E-mail: metlov@donfti.ru .

Подпись заверяю:  
Учёный секретарь  
ФГБНУ «Донецкий физико-технический  
институт им. А.А. Галкина»  
О.В. Прокофьева

