

"УТВЕРЖДАЮ"

Проректор по научной работе  
Федерального  
государственного бюджетного  
образовательного учреждения  
высшего образования

«Челябинский  
государственный университет»  
д.ф.-м.н., профессор

И.В. Бычков

« 26 СЕН 2023 » 2023 г.

### ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Ярыгиной Е.А. «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.

Диссертационная работа Ярыгиной Е.А. посвящена теоретическому исследованию статических и динамических свойств магнитоупорядоченных систем, свойства которых не удастся описать в рамках модели Гейзенберга и уравнения Ландау-Лифшица. Важность такого рода исследований связана с тем, что развитие современной электроники в значительной мере базируется на исследовании новых магнитных материалов, зачастую с необычными свойствами. Достаточно отметить недавнее открытие новых магнитных фаз, скирмионных решеток и спиральных состояний в материалах с нарушением инвариантности относительно пространственной инверсии на границе между пленками типа ферромагнитный металл – тяжелый металл (таких как CoV/Pt или CoFe/Ta). Обсуждается применение таких состояний для систем записи и обработки информации, сходных с устройствами на ЦМД, но с масштабами до десятков нанометров. Интенсивно исследуются фазы спиновых систем с так называемым «скрытым порядком» (термин впервые использован для URu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>), в которых спонтанное нарушение симметрии обусловлено не ненулевым средним значением спина на узле, то есть намагниченностью, а средними значениями спиновых мультиполей. Все это позволяет утверждать, что теоретическое изучение фундаментальных свойств таких магнитоупорядоченных систем не только актуально для фундаментальной физики, но может быть важным для практических применений.

Основной элемент новизны работы Е.А.Ярыгиной определяется тем, что в ней состояния магнитных материалов исследуются с выходом за рамки обычной феноменологической теории, в которой состояния спиновой системы определяется только вектором намагниченности (или, для антиферромагнетиков или

ферримагнетиков, векторами намагниченностей подрешеток). Положения стандартной феноменологической теории нарушаются, если в магнетике достаточно сильны так называемые негејзенберговские взаимодействия. Примеры модельных систем такого типа известны достаточно давно; они включают не только кристаллические магнетики, но бозе-конденсаты ультрахолодных газов нейтральных атомов с ненулевыми спинами в оптических ловушках. Для всех таких систем найдены состояния спинового нематика, которые характеризуются нулевой намагниченностью даже при нулевой температуре, но в которых есть спонтанное нарушение симметрии за счет квадрупольных параметров порядка (средних значений операторов, билинейных по компонентам спина). Интерес к такого рода магнетикам прежде всего обусловлен тем, что этих системах квантовые свойства отдельных спинов в эффективном магнитном поле играют решающую роль в формировании динамических и термодинамических свойств. Это обстоятельство, в свою очередь, является важным в такой бурно развивающейся области физики конденсированного состояния как спинтроника. Изменение фазовых состояний, типов фазовых переходов, возникновение так называемых продольных спиновых волн – все эти эффекты наблюдаются в негејзенберговских магнетиках. Таким образом, **актуальность** диссертационной работы Ярыгиной Е.А. не вызывает сомнений.

#### **Научная и практическая ценность полученных результатов.**

Исследованные магнитоупорядоченные системы в представленной диссертационной работе получили наиболее полное и универсальное описание свойств при различных параметрах обменных интегралов и анизотропии, а также при произвольной температуре (в рамках приближения среднего поля), и внешнем магнитном поле. Описаны все фазовые состояния, реализуемые для каждой из систем. Этот факт дает возможность утверждать, что представленные результаты можно использовать при создании магнитных материалов с заранее заданными свойствами. Поскольку результаты исследования хорошо коррелируют с результатами экспериментов, их можно использовать для обоснования и интерпретации экспериментальных данных.

В работе впервые исследована зависимость динамических и статических свойств нематического состояния от температуры, что позволит экспериментально идентифицировать такие фазовые состояния.

**Научная новизна полученных результатов.** В диссертации поставлены основные задачи исследования. Решение этих задач привело к новым результатам, которые можно сформулировать следующим образом:

1. Впервые показано, что в анизотропном спиновом нематике со спином магнитного иона  $S = 1$  учет одноионной анизотропии типа «легкая ось», или «легкая плоскость» не изменяют стабильные фазовые состояния, аналогичные изотропной системе. В обоих случаях в системе реализуются две фазы, характеризующиеся векторными параметрами порядка (ферро- и антиферромагнитная) и две фазы, характеризующиеся тензорными параметрами порядка (нематическая и ортогонально нематическая).
2. Впервые показано, что учет одноионной анизотропии типа «легкая плоскость» в негејзенберговском магнетике со спином  $S = 1$  приводит к тому, что фазовые переходы перестают быть вырожденными. Наблюдаемые фазовые переходы являются фазовым

переходам первого рода, протекающим через область сосуществования фаз. Кроме того, показано, что в рассматриваемом случае возможен прямой фазовый переход между нематической и ортогонально нематической фазами, в то время как в легкоосном и изотропном случаях данный фазовый переход не существовал, а ему соответствовала  $SU(3)$ - точка.

3. Впервые проведен численный анализ векторных и тензорных параметров порядка в ферромагнитной и нематической фазах негејзенберговского анизотропного ферромагнетика со спином магнитного иона  $S=1$  и одноионной анизотропией типа «легкая ось» с учетом влияния тепловых флуктуаций. Определены температуры фазовых переходов «ферромагнетик – парамагнитная фаза» и «спиновый нематик – парамагнитная фаза». Показано, что с возрастанием величины легкоосной одноионной анизотропии критические температуры также возрастают, поскольку наличие легкоосной анизотропии препятствует разрушению магнитного упорядочения тепловыми флуктуациями. Кроме того, показано, что критическая температура существенно зависит от тензорных параметров порядка и величины биквадратичного обменного взаимодействия.
4. Впервые исследованы динамические свойства негејзенберговского анизотропного ферромагнетика со спином магнитного иона  $S=1$  и одноионной анизотропией типа «легкая ось» при  $T \neq 0$ . Показано, что в данной системе реализуется дополнительная ветвь элементарных возбуждений, связанная с переходом магнитного иона из основного состояния в наиболее возбужденное. Кроме того, показано, что в ферромагнитной фазе при низких значениях температуры и малых значениях константы одноионной анизотропии «поперечные» ветви являются «запутанными» между собой, а с ростом температуры и анизотропии начинают «расталкиваться». В нематической фазе «поперечные» ветви возбуждений не являются запутанными.
5. Впервые построена фазовая диаграмма для легкоосного анизотропного негејзенберговского ферромагнетика со спином магнитного иона  $S=1$  при произвольных значениях температуры и константы одноионной анизотропии. Показано, что линия фазового перехода не зависит от температуры и величины константы одноионной анизотропии и в точности совпадает с линией фазового перехода при  $T=0$ . Кроме того, показано, что фазовый переход между ферромагнитной и нематической фазами является вырожденным фазовым переходом первого рода.
6. Впервые показано, что в изинговском сильно анизотропном антиферромагнетике со спином магнитного иона  $S=1$  находящемся во внешнем магнитном поле возможна реализация только «коллинеарных» фазовых состояний (ферромагнитного, квадрупольного и фазы с «пониженным» спином), а реализация неколлинеарных фаз энергетически не выгодна. Реализация фазы с «пониженным» спином примечательна тем, что в этой фазе одна из подрешеток характеризуется векторными параметрами порядка, а вторая подрешетка – тензорными. Кроме того, показано, что все фазовые переходы между устойчивыми фазами являются фазовыми переходами первого рода.

**Достоверность полученных результатов** обусловлена адекватностью выбора методов анализа магнитоупорядоченных систем и с позиции корректности

математических вычислений, численного анализа и применимости физических законов. Эти результаты коррелируют с данными экспериментов.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, 3 разделов, заключения и списка используемых источников из 100 наименований. Общий объем диссертации составляет 110 страниц текста с 33 рисунками.

Во **введении** проведен анализ проблемы, раскрывается ее значимость на сегодняшний день; сформулированы и поставлены цели и задачи исследований; уточняется достоверность и область применения полученных результатов.

В **первом разделе** исследована модель негејзенберговского магнетика с одноосной анизотропией и спином магнитного иона  $S=1$ . Рассматриваются возможные фазовые состояния и условия их устойчивости в зависимости от соотношений между материальными параметрами системы. Показано, что в данной магнитной системе возможна реализация нематических состояний. Определены соотношения материальных параметров, при которых реализуются нематические фазы. Определены спектры элементарных возбуждений для каждого из фазовых состояний. Определен тип фазовых переходов в случае анизотропии типа «легкая ось» и анизотропии типа «легкая плоскость». Показано, что учет легкоосной анизотропии сохраняет картину фазовых переходов в сравнении с изотропным случаем, а учет легкоплоскостной анизотропии приводит к снятию вырождения фазовых переходов первого рода между стабильными фазами и реализации прямого фазового перехода между нематическими фазами.

Во **втором разделе** рассматривается модель негејзенберговского магнетика с легкоосной анизотропией и спином магнитного иона  $S=1$  и учетом влияния температуры ( $T \neq 0$ ). Определены зависимости параметров порядка от температуры и показано, что с ростом константы одноионной анизотропии увеличивается температура перехода в парамагнитную фазу из ферромагнитной и нематической фаз. Определены спектры элементарных возбуждений для ферромагнитной и нематической фаз с учетом влияния температуры. Показано, что учет влияния температуры приводит к появлению третьей ветви элементарных возбуждений.

В **третьем разделе** исследована модель изинговского сильно анизотропного легкоплоскостного антиферромагнетика со спином магнитного иона  $S=1$  во внешнем магнитном поле. Определены фазовые состояния, реализуемые в системе и условия протекания фазовых переходов между ними. Показано, что в данной магнитной системе возможна реализация только коллинеарных фазовых состояний. Кроме того, показано, что одно из них, фаза с «низким спином», реализуется, когда одна подрешетка характеризуется дипольными параметрами порядка, а другая – квадрупольными параметрами порядка. Определено, что все фазовые переходы, реализуемые в системе, являются фазовыми переходами первого рода.

В каждой главе диссертации указаны основные работы, в которых опубликованы результаты исследования, и даны достаточно подробные выводы и заключения. В конце диссертации сформулированы общие выводы, которые отражают наиболее важные результаты работы в целом. В целом анализ материала, представленного в диссертации, не вызывает сомнений в его достоверности.

По диссертационной работе имеются следующие вопросы и замечания:

1. В работе рассматриваются различные фазовые состояния, такие как ферромагнитная, немагнитная и квадрупольная. Хотелось бы более подробного пояснения, чем эти фазы различаются, и какими параметрами характеризуются.

2. Где конкретно могут найти применение рассматриваемые в диссертации модели, и на каких материалах эти модели могут реализоваться.

3. Во втором разделе диссертации рассматривается влияние температуры на состояния негеизенберговского магнетика, причем значения температуры даются в относительных единицах ( $T/J$ ,  $T/K$ ). Было бы полезно привести реальные значения температур перехода в парамагнитное состояние для конкретных материалов.

4. В этом же разделе диссертации, при исследовании влияния температуры на свойства негеизенберговского магнетика не указана область достоверности результатов исследования температурной зависимости параметров порядка в упорядоченных фазах. Теория среднего поля не позволяет получить точные значения для температур в неупорядоченное состояние.

Ну и несколько технических замечаний:

1. На стр.22. предложение после формулы (1.7) не согласовано, хотя смысл не потерян.

2. Также на стр.30, третья строка снизу «...перехода в ферромагнитную фазу». По-видимому, автор имеет в виду всё-таки переход в ферромагнитную фазу.

Отмеченные замечания не снижают общую положительную оценку диссертационной работы и её научную и практическую значимость. Диссертация содержит большой и хорошо обсуждённый материал, она логично построена, её структура и содержание соответствуют цели и задачам исследования. Она достаточно хорошо оформлена, исключая относительно небольшое число опечаток и стилистических неточностей. Личный вклад автора не вызывает сомнения. Автореферат полностью отражает содержания диссертации.

Результаты работы могут быть использованы в научно-исследовательских организациях и вузах, занимающихся исследованиями в области физики магнитных явлений, физики конденсированного состояния и проблем материаловедения, в частности в Крымском федеральном университете им. В.И. Вернадского, Донецком физико-техническом институте им. А.А. Галкина, Институте физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, УрФУ им. Б.Н. Ельцина и др.

Диссертация Ярыгиной Екатерины Александровны «Влияние температуры и одноионной анизотропии на динамику и статику негеизенберговских магнетиков» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой получены новые результаты. По актуальности темы исследования, научной новизне, практической значимости и достоверности полученных результатов, обоснованности выводов и положений, представленная диссертационная работа удовлетворяет требованиям п.9 «Положения о присуждении степеней» ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор Ярыгина Екатерина Александровна заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния.

Диссертационная работа Ярыгиной Екатерины Александровны заслушана и обсуждена на заседании объединённого семинара кафедры физики конденсированного состояния Челябинского государственного университета (протокол № 5 от 22 сентября 2023 г.)

Отзыв подготовлен доктором физико-математических наук, профессором, заведующим кафедрой физики конденсированного состояния ФГБОУ ВО «Челябинский государственный университет» Бучельниковым Василием Дмитриевичем.

Заведующий кафедрой физики  
конденсированного состояния ФГБОУ ВО «ЧелГУ»,  
доктор физ.-мат. наук, профессор

В.Д. Бучельников

Почтовый адрес: 454001, г. Челябинск, ул. Братьев Кашириных, 129

Тел.: +7 (351) 799-71-17

E-mail: [buche@csu.ru](mailto:buche@csu.ru)

  
Подпись *Бучельникова В.Д.*  
удостоверяю *А.А. Андрикс*  
*специальным образом*  
26 СЕН 2023