

"УТВЕРЖДАЮ"

Проректор по научной работе
Федерального государственного
бюджетного образовательного
учреждения высшего
образования «Челябинский
государственный университет»
д.ф.-м.н., профессор

И.В. Бычков

«22» сентября 2021 г.



ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Кривцовой Анастасии Владимировны «Фазовые состояния и спектры элементарных возбуждений негейзенберговских изотропных и обменно-анизотропных магнетиков», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния.

Как следует из названия, диссертационная работа Кривцовой А.В. 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 достаточно 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 URu₂Si₂), в которых спонтанное нарушение вращательной 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 также важным для практических применений.

Основной элемент новизны работы А.Н. Кривцовой 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 так называемые квадрупольные фазы, или фазы 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 в такого рода системах квантовые свойства отдельных спинов в эффективном магнитном поле играют решающую роль в формировании динамических и термодинамических свойств системы. 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 Кривцовой А.В. 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 обменного взаимодействия. Описаны все фазовые состояния, реализуемые для каждой из систем. Этот факт дает возможность утверждать, что представленные результаты можно использовать при создании магнитных материалов специфических заранее заданных свойств. Поскольку результаты исследования хорошо коррелируют с результатами экспериментов, их можно использовать для обоснования и интерпретации экспериментальных данных.

В работе предложен один из возможных механизмов сверхбыстрого перемагничивания ферромагнетиков. Этот механизм связан с продольной динамикой элементарных возбуждений, реализуемых либо в магнетиках с негејзенберговским обменным взаимодействием, либо в сильно анизотропных магнитных системах. Исследование динамических свойств негејзенберговских ферромагнетиков может быть использовано для описания сверхбыстрого переворота намагниченностей подрешеток, обнаруженного в сплавах редкоземельных и переходных металлов.

Научная новизна полученных результатов. Поставленные задачи сформулированы и решены впервые. В работе получены новые результаты:

1. Впервые показано, что в негејзенберговском ферромагнетике со сложной межионной анизотропией возможна реализация нематического состояния особого типа – угловой нематической фазы.

2. Впервые показано, что в модели негејзенберговского антиферромагнетика со сложной межионной анизотропией возможна реализация углового ортогонально-нематического состояния (ON_{\angle}) со специфическим геометрическим образом. Реализация его невозможна в изотропном негејзенберговском магнетике с $S=1$. Возможно существование еще двух ортогонально-нематических фаз (ON_1 и ON_2), вырожденных в случае изотропного спинового нематика.

3. Впервые показано, что понятие ориентационного фазового перехода справедливо для двухподрешеточных систем с тензорными компонентами параметра

порядка. Из анализа динамических и статических свойств системы в случае реализации лишь ортогонально-нематических фаз следует, что фазовые переходы между ортогонально-нематическими фазами по материальным параметрам магнетика по характеру близки к ориентационным фазовым переходам.

4. Впервые исследованы статические и динамические свойства ферромагнетика с учетом влияния высших спиновых инвариантов в одной из подрешеток. Из-за учета влияния биквадратичного обменного взаимодействия в ферромагнетике возможна реализация фаз с дипольными параметрами порядка и тензорных фаз, характеризующихся дипольными и квадрупольными параметрами порядка. Динамические свойства негейзенберговского ферромагнетика определяются продольной динамикой магнонов. Состояние спинового нематика в рассматриваемой системе не реализуется, т. к. подрешетка с билинейным обменным взаимодействием выступает «подмагничивающим» полем, не дающим «сократить» средний магнитный момент первой подрешетки до нуля.

Достоверность полученных результатов обусловлена адекватностью выбора методов анализа магнитоупорядоченных систем и с позиции корректности математических вычислений, и с позиции 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 117 наименований. Общий объем диссертации составляет 121 страницу текста с 15 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** исследуется модель негейзенберговского ферромагнетика со сложной межионной анизотропией и спином магнитного иона $S=1$. Рассматриваются возможные фазовые состояния и условия их реализации в зависимости от соотношения между параметрами системы. В частности, показывается возможность существования нематических состояний для негейзенберговского ферромагнетика со сложной межионной анизотропией. Определены соотношения материальных параметров, при которых возможна реализация особого фазового состояния - угловой нематической фазы. Показано, что учет анизотропии обменного взаимодействия приводит к снятию вырождения нематических состояний, которые при переходе к изотропному случаю становятся неразличимы. Определены спектры элементарных возбуждений для каждого из реализуемых состояний. Также определяется тип каждого из возможных в системе фазовых переходов. В зависимости от соотношений между параметрами анизотропии и величинами обменных интегралов строятся сечения фазовой диаграммы системы.

Во **втором разделе** рассматривается модель негейзенберговского антиферромагнетика с учетом возможности разбиения на две эквивалентные магнитные подрешетки. Определены условия реализации углового ортогонально-нематического состояния (ON_{\angle}), реализация которого невозможна в изотропном негейзенберговском магнетике с $S=1$. Исследованы условия устойчивого существования двух ортогонально-нематических фаз (ON_1 и ON_2), которые в случае изотропного спинового нематика являются вырожденными. Определены спектры элементарных возбуждений в каждом из состояний и типы фазовых переходов. Также построена фазовая диаграмма справедливая для различных соотношений материальных параметров системы. В последнем подразделе

определяются типы фазовых переходов между ортогонально-нематическими фазами и между антиферромагнитными - ортогонально-нематическими фазами.

В третьем разделе исследовано влияния биквадратичного обменного взаимодействия в одной из подрешеток на статические и динамические свойства негејзенберговского изотропного, и изингоподобного ферримагнетика. Определены фазовые состояния, реализуемые в системе, и условия, при которых возможны фазовые переходы между ними. Показано, что учет биквадратичного обменного взаимодействия в одной из подрешеток приводит к тому, что в системе реализуется как ферримагнитная фаза, характеризующаяся дипольными параметрами порядка, так и квадрупольно-ферримагнитная фаза, которая характеризуется как дипольными, так и квадрупольными параметрами порядка. Также определена линия компенсации магнитных моментов подрешеток в квадрупольно ферримагнитной фазе. Показано, что фазовый переход между дипольной фазой и квадрупольно-ферримагнитной фазой является фазовым переходом второго рода. Построена фазовая диаграмма, как для изотропного ферримагнетика, так и для анизотропного.

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 первом разделе диссертации определены тензорные состояния N_1 и QU_2 в которых средний магнитный момент (на узле) равен нулю. При этом утверждается, что фаза N_1 является нематической, а фаза QU_2 не является нематической фазой. Чем отличаются эти фазы, и с чем это отличие связано?
2. Во втором разделе утверждается, что «В случае реализации только ортогонально-нематических фаз анализ статических и динамических свойств системы показал, что фазовые переходы по тензорному параметру порядка по характеру близки к ориентационным фазовым переходам». С чем связана переориентация?
3. В третьей главе автор пишет о компенсации намагниченностей подрешеток, хотя правильнее говорить о компенсации спинов. Именно поведение в точке компенсации спинов интересно для приложений в сверхбыстрой спинтронике.
4. В выражении для плотности свободной энергии (3.9) фигурируют слагаемые линейные относительно средних значений $\langle \sigma z \rangle$, $\langle Sz \rangle$. Эти средние пропорциональны магнитным моментам подрешеток. Однако они меняют знак при инверсии времени и поэтому в выражении для энергии системы таких слагаемых не должно быть.

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. Первого президента РФ Б.Н. Ельцина и др.

Диссертация Кривцовой Анастасии Владимировны «Фазовые состояния и спектры элементарных возбуждений негеизенберговских изотропных и обменно-анизотропных 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 требования п. 9 «Положения о присуждении степеней» ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор Кривцова Анастасия Владимировна заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния.

Диссертационная работа Кривцовой Анастасии Владимировны заслушана и обсуждена на заседании объединённого семинара кафедры физики конденсированного состояния Челябинского государственного университета (протокол № 2 от 20 сентября 2021 г.).

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

Заведующий кафедрой физики

конденсированного состояния ФГБОУ ВО «ЧелГУ»,

доктор физ.-мат. наук, профессор

В.Д. Бучельников

Профессор кафедры физики

конденсированного состояния ФГБОУ ВО «ЧелГУ»,

доктор физ.-мат. наук, доцент

В.В. Соколовский

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

Тел.: +7 (351) 799 71-17

E-mail: buche@csu.ru



Бучельников Василий Дмитриевич, Соколовский Владимир Владимирович
Судья