

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке ФГАОУ ВО  
«Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б.Н.  
Ельцина»



А.В. Германенко

12 » июля 2024 г.

## ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» на диссертационную работу Матюнина Яна Юрьевна «Динамические и статические свойства негейзенберговских двухподрешеточных магнетиков», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. «Физика конденсированного состояния».

Задачи, связанные с исследованием магнетиков со скомпенсированным магнитным моментом подрешеток, или же систем, близких к подобным, является актуальной задачей как с точки зрения их практического применения, так и с точки зрения фундаментальных задач физики твердого тела. Это связано с тем обстоятельством, что частота спинового резонанса ферромагнитных материалов недостаточно высока для практического использования в спинтронных устройствах, тогда как создание новой приборной базы влечет за собой необходимость в освоении диапазона терагерцовых волн. Эта проблема может быть решена, если в качестве магнитного носителя использовать неферромагнитный материал, а антиферромагнитный или ферримагнитный, в котором возможно обменное усиление динамических характеристик. Однако, при всей привлекательности идеи использования антиферромагнетиков в спинтронных устройствах, эти системы оказываются крайне чувствительными к дефектам кристаллической структуры, что создает большие проблемы для их практического использования. Наоборот, качество решетки меньше влияет на поведение ферримагнетиков по сравнению с антиферромагнетиками, но при этом поведение ферримагнетиков в окрестности точки компенсации магнитных

моментов подрешеток очень напоминает по своим свойствам поведение антиферромагнетиков. Следовательно, ферримагнетики могут служить материальной базой для создания устройств спинтроники.

При этом, следует помнить, что среди многообразия магнитоупорядоченных соединений существует достаточно большое множество систем, свойства которых не укладываются в рамки стандартных моделей, например, модели Гейзенберга, и магнитные особенности этих материалов, получивших название негейзенберговских магнетиков, объясняются только в рамках модели, учитывающей вклады высших спиновых инвариантов в обменный гамильтониан системы. Характерной особенностью такого рода магнетиков является возможность реализации состояний, в которых намагниченность равна нулю, но отличны от нуля мультипольные средние. Такого рода магнетики получили название спиновые нематики по аналогии с жидкими кристаллами. Такая аналогия связана с тем, что образом таких состояний в спиновом пространстве является одноосный эллипсоид. В спиновом нематике возможны особые динамические возбуждения – продольные магноны, которые обусловлены изменением длины вектора магнитного момента. Такого рода возбуждения в принципе невозможны в феноменологической модели уравнения Ландау-Лифшица. Благодаря этим возбуждениям в негейзенберговском магнетике возможна существенная редукция спина на одном узле даже при низких температурах, что приводит к появлению необычных статических и динамических свойств. Хотя эти системы известны уже более тридцати лет, интерес к их специфическим свойствам не ослабеваает и сегодня.

Исследование ферримагнетиков, в обменном гамильтониане которых существенную роль играет биквадратичное (негейзенберговское) обменное взаимодействие, представляет большой интерес для спинтроники. Обменное усиление динамических параметров, характерное для антиферромагнетиков, также присуще и для ферромагнетиков, для которых этот эффект наиболее интересен и важен в окрестности точки компенсации подрешеток. Можно надеяться, что ферримагнетики, находящиеся вблизи точки компенсации, удастся успешно использовать в качестве материала для создания приборов сверхбыстрой спинтроники. Однако, для решения такой задачи необходимо детальное изучение всех аспектов как спиновой динамики ферримагнетиков, так и их фазовых состояний. Теоретические исследования как динамических, так и статических свойств ферримагнетиков становятся **практически важными и актуальными**. Поэтому тема данной диссертационной работы

представляет интерес как для решения ряда общих вопросов физики конденсированного состояния, так и для решения некоторых прикладных задач спинтроники, что и определяет актуальность данной работы. Отметим, что исследования, определяющие содержание диссертации, были выполнены в рамках проекта РФФИ № 20-42-910003 р-а Республика Крым «Динамические и статические свойства сильно анизотропных антиферроферритмагнетиков», и проекта РНФ 23-22-00054 «Продольная динамика негејзенберговских и сильно анизотропных магнетиков».

**Структура и содержание работы.** Диссертационная работа изложена на 104 страницах и состоит из введения, трех глав, заключения, а также списка публикаций автора и списка цитируемой литературы из 132 наименований.

Во **введении** аргументирована актуальность диссертационной работы, сформулированы цели и задачи, отмечена научная новизна и практическая ценность работы, представлены положения и результаты, выносимые на защиту, приведены сведения о публикациях и об апробации результатов работы на научных конференциях.

В **первой главе**, исследуется негејзенберговского антиферромагнетик с одноосной анизотропией типа «легкая плоскость» и спином магнитного иона  $S=1$ . Исследуются фазовые состояния системы и условия их устойчивости в зависимости от соотношений между параметрами модельного гамильтониана. Формулируются условия реализации как традиционных состояний с дипольными параметрами порядка, так нематических состояний. Определены спектры элементарных возбуждений для каждого из этих состояний и типы фазовых переходов между ними. Показано, что учет влияния легкоплоскостной одноионной анизотропии приводит к снятию вырождения фазовых переходов первого рода между устойчивыми фазами. Показывается возможность прямого фазового перехода между нематическими фазами без появления  $SU(3)$  точки, наличие которой характерно для изотропной модели и модели с анизотропией типа легкая ось.

Во **второй главе** подробно исследовано влияние биквадратичного спинового взаимодействия в подрешетке спина  $S=1$  на статические и динамические свойства ферритмагнетика с изотропными подрешетками  $S=1$  и  $\sigma=1/2$  с изинговским межподрешеточным обменным взаимодействием. Наличие биквадратичного обменного взаимодействия в обменном гамильтониане подрешетки с  $S=1$  приводит к тому, что в зависимости от соотношения обменных интегралов, в системе возможна реализация как

ферромагнитной фазы, характеризуемая дипольными параметрами порядка, так и нематического состояния с тензорным параметром порядка, причем средний магнитный момент в этой фазе может быть отличен от нуля. Несмотря на такое нехарактерное для нематика поведение среднего спина, это состояние является нематическим, что подтверждается анализом квадратичных корреляторов спиновых операторов. Показано, что величина среднего магнитного момента в нематической фазе существенно зависит от соотношения обменных интегралов, что определяет в пространстве материальных констант линию, на которой спины подрешеток компенсируют друг друга. Показано, что фазовый переход между ферромагнитной и нематической фазами является фазовым переходом второго рода. Построена фазовая диаграмма негейзенберговского ферромагнетика  $(1,1/2)$  с изинговским межподрешеточным обменом. Определены спектры возбуждений во всех фазах, а также исследовано их поведение в окрестности линии фазового перехода и линии компенсации.

В третьей главе определено влияние одноионной легкоплоскостной анизотропии на фазовые состояния и спектры возбуждений негейзенберговского ферромагнетика  $(1,1/2)$ . Показано, что в случае малой одноионной анизотропии в подрешетке спинов  $S=1$ , т.е. существенно меньшей констант обменных взаимодействий, реализуются классическая ферромагнитная фаза и нематическое состояние. Особенностью нематической фазы является то, что среднее значение намагниченности на узле отлично от нуля, но существенно меньше номинального значения, из-за влияния «подмагничивающего» поля подрешетки с  $\sigma=1/2$ . Определена точка компенсации спинов подрешеток, а также получены спектры элементарных возбуждений в окрестности точки компенсации. Установлено, что в отличие от изотропного случая, фазовый переход между ферромагнитной и нематической фазами в слабо анизотропном негейзенберговском ферромагнетике является переходом первого рода. Анализ спектров спиновых возбуждений как в ферромагнитной, так и в нематической фазах позволил определить линии потери устойчивости соответствующих фаз. В этой же главе проанализированы свойства сильно анизотропного легкоплоскостного негейзенберговского ферромагнетика  $(1,1/2)$ . Продемонстрировано, что влияние большой одноионной анизотропии, сравнимой или превосходящей обменные взаимодействия, приводит к стабилизации только нематической фазы, когда ферромагнитное состояние становится энергетически невыгодным. Показано, что в нематической фазе

существует точка компенсации спинов подрешеток и выполнены вычисления спектров возбуждений в окрестности точки компенсации.

**В заключении** сформулированы основные результаты и выводы проведенного исследования. Все поставленные в диссертационной работе задачи решены.

**Личное участие соискателя** ученой степени в получении результатов, изложенных в диссертации, представляется несомненным, так как в ней содержатся результаты, полученные лично автором или с его прямым участием. Автор принимал участие в постановке задач, в выполнении аналитических и численных расчётов, в проведении анализа полученных результатов и формулировке окончательных выводов и заключений.

**Научная новизна и ценность** диссертационной работы заключается в том, что в ней впервые показано, что наличие одноионной анизотропии типа «легкая плоскость» в негейзенберговском антиферромагнетике со спином  $S=1$  не меняет фазовые состояния системы, но существенно меняет ее динамические свойства и меняет тип фазовых переходов в сравнении с изотропным негейзенберговским антиферромагнетиком. Показано, что учет влияния биквадратичного обменного взаимодействия в подрешетке с  $S=1$ , приводит возникновению в ферримагнетике  $(1,1/2)$  как ферримагнитной фазы с векторным параметром порядка, так и немагнитической фазы с тензорным параметром порядка, и фазовый переход между этими состояниями является переходом второго рода. Впервые исследовано влияние одноионной анизотропии на фазовые состояния и спектры элементарных возбуждений негейзенберговского ферримагнетика  $(1,1/2)$ . Показано, что оно меняет тип фазовых переходов по сравнению с изотропным случаем. Впервые установлено, что в случае большой одноионной анизотропии превосходящей обменные взаимодействия в негейзенберговском ферримагнетике  $(1,1/2)$  система находится только в немагнитическом состоянии.

Полученные автором результаты, несомненно, удовлетворяют критерию **новизны** и позволяют дать непротиворечивую физическую картину рассматриваемых процессов.

**Научная и практическая ценность полученных результатов.** Представленные в диссертационной работе исследования негейзенберговских двухподрешеточных магнетиков позволили дать достаточно полное описание свойств рассматриваемых систем при различных соотношениях параметров модельных гамильтонианов. Подробно

описаны возможные фазовые состояния для каждой из рассматриваемых систем, что является необходимым фактором для создания магнитных материалов с прогнозируемыми магнитными свойствами. Результаты, представленные в диссертации, хорошо коррелируют экспериментальными фактами, и согласуются с результатами ранее проведенных исследований.

**Обоснованность и достоверность** полученных в диссертации результатов обусловлена использованием хорошо апробированных методов расчета, корректностью математической постановки задачи, а также сравнением с результатами, полученными другими авторами. Это позволило получить достоверные, не вызывающие сомнений результаты и сформулировать на их основе строго доказанные положения и выводы.

Тематика исследования диссертационной работы соответствует паспорту **научной специальности 1.3.8. «Физика конденсированного состояния»**.

**Публикации и апробирование результатов.** По материалам диссертации опубликовано 10 статей в журналах, рекомендованных ВАК РФ для публикации результатов диссертационных работ, а также в докладах, опубликованных в материалах конференций.

По диссертации Матюниной Я.Ю. имеются следующие **вопросы и замечания**:

1. В диссертации часто используется термин «метод бозонизации», под которым автор подразумевает переход от хаббардовских операторов экситонного типа к бозе-операторам. Хотя формально это допустимо, термин «бозонизация» уже «зарезервирован» в теории низкоразмерных спиновых систем под процедуру отождествления фермионных токов с производными бозонного поля, поэтому следовало бы избегать такого употребления термина.

2. В первой главе полностью отсутствуют графики спектров элементарных возбуждений, хотя во второй главе они приводятся (случай ферримагнетика). То же относится к графическому пояснению тензорного параметра порядка. Это сильно затрудняет восприятие результатов. Было бы также полезно привести наглядную иллюстрацию магнитного порядка в фазе спинового нематика.

3. На Рис. 1.3.2 используются, но не поясняются обозначения осей  $J/D$  и  $K/D$ .

4. На стр. 45 приводятся доводы в пользу важности учета биквадратичного обменного взаимодействия на примере соединения  $\text{EuSe}$ .

Существует ли какой-либо критерий, позволяющий заранее сказать, что такое взаимодействие будет играть существенную роль, или приходится полагаться только на несоответствие экспериментальных данных модели традиционного гайзенберговского взаимодействия?

5. Преобразования (2.3.1) для операторов  $Y$  напоминают неунитарное преобразование Дайсона-Малеева для спиновых операторов. Действительно ли имеется такое соответствие или эта схожесть носит случайный характер?

6. На Рис. 3.2 обе фазы обозначены как SN.

Сформулированные по диссертации замечания не снижают ценности выполненной работы и не влияют на ее положительную оценку. Представленная диссертация выполнена на высоком научном уровне, и обоснованность сформулированных в ней положений и выводов не вызывает сомнений.

Результаты диссертации могут быть использованы в теоретических и экспериментальных исследованиях, проводимых в ведущих университетах и научно-исследовательских учреждениях РАН, специализирующихся в области магнетизма.

**Заключение по диссертационной работе.** Резюмируя вышеизложенное, диссертационная работа Матюниной Я. Ю. «Динамические и статические свойства негейзенберговских двухподрешеточных магнетиков» является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задач, имеющих существенное значение для развития раздела физики конденсированного состояния, связанного с исследованием специфических свойств магнетиков с негайзенберговским обменным взаимодействием. Диссертационная работа соответствует всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, изложенным в «Положении о присуждении ученых степеней» (пп. 9-14), утвержденным Постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г. (в редакции от 18.03.2023 г.), а ее автор, Матюнина Яна Юрьевна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. «Физика конденсированного состояния»:

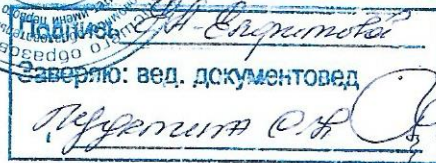
Диссертационная работа Матюниной Я.Ю. «Динамические и статические свойства негейзенберговских двухподрешеточных магнетиков» была обсуждена на научном семинаре кафедры теоретической и математической физики Института естественных наук и математики Уральского федерального университета университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, протокол № 100.089-06/06 от «22» июня 2024 г.

Отзыв был одобрен по результатам голосования участников семинара за – 24, против - 0, воздержавшихся – 0.

Елфимова Екатерина Александровна,  
доктор физ.-мат. наук,  
заведующий кафедрой теоретической  
и математической физики ИЕНиМ  
ФГАОУ ВО «Уральский  
федеральный университет  
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»,  
специальность 01.04.02 – Теоретическая физика  
620000, Екатеринбург, пр. Ленина, 51  
Тел.: +7 343 389 9477,  
e-mail: [ekaterina.elfimova@urfu.ru](mailto:ekaterina.elfimova@urfu.ru)

Е.А. Елфимова

«12» июля 2024 г.



Адрес ведущей организации:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», 620002, Свердловская область, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19