

ОТЗЫВ

Официального оппонента на диссертационную работу Мартынова Александра Сергеевича
«Влияние квантовых эффектов на фазовую диаграмму и температуру упорядочения
магнетиков с треугольной решёткой» представленную на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук по специальности

1.3.8. Физика конденсированного состояния

Современная элементная база микроэлектроники, по всей видимости, достигла своего физического предела, когда соотношение «цена – качество» электронных устройств перестает быть экономически выгодным. Такое состояние микроэлектроники требует создания новых материалов со специфическими свойствами, а также построения новых теоретических моделей, позволяющих не только описать эти свойства, но и предсказать новые. Одним из таких направлений является развитие элементной базы не на основе переноса электрического заряда, а на основе так называемого «спинового тока». Это направление получило название спинтроники, и в последние десятилетия активно развивается.

До недавнего времени ферромагнетики рассматривались как основной материал для элементной базы спинтроники. Однако, частота ферромагнитного резонанса недостаточно высока для практического использования ферромагнетиков в спинтронных устройствах. При этом, растет потребность в освоении диапазона терагерцовых волн. Эта проблема может быть решена, если в качестве магнитного носителя использовать не ферромагнитный материал, а антиферромагнитный, поскольку они обладают интересным свойством – обменным усилением динамических характеристик. Однако, при всей привлекательности идеи использования антиферромагнетики в спинтронных устройствах, эти материалы имеют один существенный недостаток – их магнитные свойства крайне чувствительны к качеству кристаллической структуры. Однако, ферримагнетики, в которых также наблюдается эффект обменного усиления динамических свойств, менее чувствительны к наличию дефектов решетки. Следовательно, ферримагнетики в окрестности точки компенсации подрешеток можно использовать как материал для устройств спинтроники.

Кроме того, активно развиваются исследования магнитных материалов, в которых одновременно учитываются сразу нескольких механизмов, обуславливающих или модифицирующих квантовые флуктуации. Последние, как известно, существенно изменяют физические свойства материалов, такие как, магнитная структура основного состояния, спектр спиновых возбуждений, поведение магнитных параметров порядка. Так, например, одновременное присутствие в системе анизотропии, фрустрации обменных связей и внешнего магнитного поля приводит к существенному увеличению многообразия фаз основного состояния, усилению (или ослаблению) эффекта квантового сокращения спина, а также к возникновению дополнительных ветвей спектра спиновых возбуждений. Особый интерес представляет изучение моделей с конкурирующим типом симметрии подрешеток, за счёт которого в системе могут образовываться дополнительные квантовые эффекты. Отдельной проблемой в квантовом магнетизме является теоретическое исследование магнитных свойств систем с большой величиной спина ($S \gg 1/2$), характерной для многих магнито-активных элементов.

Объединение этих двух важных задач физики магнитных явлений лежит в основе данной диссертационной работы. Конкретизируя данное утверждение можно сказать, что диссертация Мартынова А.С., посвященная исследованию $SU(3)$ ферримагнетика на треугольной решётке с анизотропией типа лёгкая плоскость, а также квазидвумерного антиферромагнетика на треугольной решётке с произвольной величиной спина, является актуальной и своевременной.

Диссертационная работа Мартынова А.С. построена стандартным образом, и состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка используемой литературы.

Во **Введении** автор формулирует актуальность рассматриваемых задач, формулирует основные цели и основные положения диссертационной работы.

В **первой главе** представлен краткий обзор теоретических работ, в которых изложены методы и подходы, используемые далее при исследовании моделей с одноионной анизотропией, геометрической фрустрацией, и моделей с большим значением спина. Также приведён ряд экспериментальных работ, в которых исследовались квантовые эффекты в различных соединениях с треугольной решёткой.

Вторая глава посвящена исследованию квантового ферримагнетика на треугольной решётке со смешанными спинами $S=(1/2, 1/2, 1)$ и одноионной анизотропией типа лёгкая плоскость в отсутствие внешнего магнитного поля. Численно рассчитаны графики эволюции магнитной структуры, параметров порядка и спектра возбуждений от параметра одноионной анизотропии. Показано, что при некотором значении параметра анизотропии в системе реализуется квадрупольно антиферромагнитная фаза: среднее значение спина в подрешетке с $S=1$ равно нулю, а в двух других подрешётках с $S=1/2$ спины антипараллельны. Определены значения параметров модели, при которых в ферримагнетике происходит компенсация суммарного магнитного момента. Проведена классификация четырёх ветвей коллективных спиновых возбуждений.

В **третьей главе** исследуется влияние внешнего магнитного поля на структуру рассматриваемого трёхподрешёточного ферримагнетика. Используя метод унитарных преобразований для операторов Хаббарда, были построены фазовые диаграммы основного состояния в координатах внешнее магнитное поле – анизотропия. Рассчитаны графики зависимости параметров порядка как от величины анизотропии при фиксированном значении магнитного поля, так и от внешнего магнитного поля при фиксированном значении анизотропии. Проведен анализ спектра спин-волновых возбуждений для нескольких значений внешнего магнитного поля. **Хотелось бы отметить**, что важной особенностью, полученных фазовых диаграмм является существенное их отличие при разных соотношениях обменного интеграла, описывающего взаимодействие между спинами из подрешёток с $S=1$ и $S=1/2$ (I), и обменного интеграла, описывающего взаимодействие между спинами $S=1/2$ (J). Так в случае $I < J$ реализуются три фазы: 1) Λ -фаза; 2) W -фаза; 3) ферромагнитная фаза, а в случае $I > J$ реализуются четыре фазы: 1) Y -фаза; 2) uud -фаза; 3) V -фаза; 4) ферромагнитная фаза. Получено аналитическое выражение линии фазового перехода между Λ -фазой и W -фазой, а также было показано, что на этой линии система распадается на две эффективно независимые подсистемы. Последний результат подтверждается графиками зависимости параметров порядка и графиками спектра возбуждений. Проведён анализ основного состояния при $I=J$, которое в рамках использованного метода в классическом пределе оказывается бесконечно вырожденным.

В **четвёртой главе**, используя метод функций Грина для операторов Хаббарда, исследовался квазидвумерный антиферромагнетик на треугольной решётке с произвольной величиной спина в случае антиферромагнитного обменного взаимодействия между ближайшими спинами из разных подрешёток находящихся в одном слое и ферромагнитного взаимодействия между спинами из одной подрешётки и соседних слоёв. Получены аналитические выражения для параметра порядка системы, записанное через функцию Бриллюэна, а также для температуры Нееля, содержащее в знаменателе обобщённый интеграл Ватсона. Построены зависимости обобщённого интеграла Ватсона от соотношения внутри- и межплоскостного обменных интегралов, зависимости параметра порядка системы от температуры для нескольких соотношений обменных интегралов в случае $S=1/2$ и зависимости параметра порядка от температуры. Важным

является тот факт, что для равных по модулю значений внутри- и межплоскостного обменов, обобщённый интеграл Ватсона равен единице, что означает отсутствие квантовых флуктуационных ренормировок температуры Нееля. Кроме того, проведено сравнение величин параметра порядка и квантового сокращения спина, рассчитанных методом комбинированных функций Грина и методом спиновых волн при нулевой температуре для нескольких соотношений между внутри- и межплоскостного обменных интегралов. Получено хорошее согласие этих величин в случае большой величины спина и сильного межплоскостного обмена.

В **заключении** диссертационной работы сформулированы основные результаты, которые конкретизируют новые данные по модели ферримагнетика на треугольной решётке и модели квазидвумерного антиферромагнетика на треугольной решётке с произвольным значением спина.

По результатам диссертационного исследования опубликованы статьи в трех изданиях, входящих в перечень ВАК Минобрнауки РФ и индексируемых международными базами данных Scopus и Web of Science. Полученные результаты были представлены А.С. Мартыновым на четырех всероссийских и международных конференциях и опубликованы в материалах этих конференций.

Однако, как и любом серьезном исследовании, в данной диссертации можно отметить ряд недостатков и неточностей, которые вызывают некоторые вопросы и замечания:

1) В подразделе 1.2 приведены публикации, в которых рассматриваются только соединения, имеющие один тип магнито-активных ионов, обладающих одинаковой величиной спина в каждой подрешётке. Однако не представлены публикации по ферримагнитным соединениям, что не даёт возможности полностью оценить большой практический интерес к такого рода магнитоупорядоченным системам.

2) Во второй главе на рисунках 2.6а, 2.7а и 2.8а в правом верхнем углу приведены пиктограммы, описывающие магнитную структуру ферримагнетика. Однако, данные пиктограммы не были описаны в тексте диссертации или в подписях к рисункам.

3) При определении спектров элементарных возбуждений используется представление Голстейна- Примакова для подрешеток F и G, а для подрешетки L – представление атомных операторов (операторов Хаббарда). Но в подрешетках F и G величина спина магнитного иона $\frac{1}{2}$, а как известно, представление Голстейна- Примакова – квазиклассическое представление, т.е. для систем с достаточно большим спином. Почему нельзя использовать операторы Хаббарда, построенные на собственных векторах одноузельных гамильтонианов подрешеток F и G, и, далее, перейти по известной схеме к операторам рождения магнонов в этих подрешетках?

4) В третьей главе делается утверждение о масштабировании фазовой диаграммы при изменении g-фактора Ланде для подрешётки с $S=1$. Как мне кажется, это утверждение стоило бы подкрепить фазовой диаграммой с увеличенным (например, в 2 раза) фактором Ланде.

5) Во введении в пунктах «Научная новизна полученных результатов» и «Научные положения, выносимые на защиту», а также в «Заключении» допущена смысловая неточность. Утверждается, что полученное аналитическое выражение для температуры Нееля зависит только от отношения обменных интегралов, в то время как из формулы (4.33) следует, что температура Нееля явно зависит от величины внутриплоскостного обмена. Данный факт представлен в тексте четвёртой главы, но не отмечен в указанных пунктах.

6) В тексте диссертационной работы присутствует несколько опечаток и синтаксических ошибок, а также автор иногда допускает некорректное использование некоторых терминов. Так, например, на стр. 43 автор пишет «...ионы L-подрешетки

находятся в «нематическом» состоянии...». Но в данной модели нематическое состояние в принципе не реализуется.

Представленные выше замечания не изменяют положительного впечатления о диссертационной работе и носят скорее рекомендательный характер. Диссертационная работа А.С. Мартынова является завершённой научно-исследовательской работой, в которой получены новые результаты по квантовым эффектам в магнетиках с треугольной решёткой. Достоверность полученных результатов подтверждается выбором теоретических методов, ранее успешно использованных для описания более простых систем. Результаты диссертационного исследования прошли необходимую апробацию в форме докладов на всероссийских и международных конференциях, публикаций в высокорейтинговых изданиях, индексируемых международными базами Scopus и Web of Science.

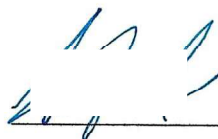
Учитывая актуальность темы диссертационного исследования, научную новизну и практическую ценность, считаю, что диссертация **Мартынова Александра Сергеевича «Влияние квантовых эффектов на фазовую диаграмму и температуру упорядочения магнетиков с треугольной решёткой»** выполнена на высоком уровне и является законченной научной работой, соответствует всем требованиям Положения ВАК РФ в соответствии с постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 №842 «О порядке присвоения учёной степени» предъявляемым к кандидатским диссертациям. "Положения о порядке присуждения ученых степеней", а ее автор, заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 Физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент:

профессор кафедры теоретической физики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского» (ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского»), Физико-технический институт, доктор физико-математических наук (01.04.07 – Физика твёрдого тела), профессор

Адрес: 295007, Республика Крым, г. Симферополь, проспект Академика Вернадского 4; +7(978)755-84-13; e-mail: yurifridman@gmail.com;

«10» ноября 2025г.



Фридман Ю.А.

Подпись Ю.А. Фридмана заверена

Учёный секретарь

ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского»

кандидат филологических наук,

доцент



(подпись)

Митрохина Л.М.

СВЕДЕНИЯ

об официальном оппоненте по диссертации Мартынова Александра Сергеевича «Влияние квантовых эффектов на фазовую диаграмму и температуру упорядочения магнетиков с треугольной решеткой», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния

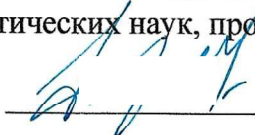
Фамилия Имя Отчество	Фридман Юрий Анатольевич
Гражданство	Российская Федерация
Ученая степень, обладателем которой является официальный оппонент, и наименование отрасли науки, научных специальностей, по которым из защищена диссертация	Доктор физико-математических наук, специальность: 01.04.07 – Физика твердого тела
Ученое звание	Профессор
Место работы	
Полное наименование организации в соответствии с уставом	Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского»
Ведомственная принадлежность	Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Наименование структурного подразделения	Физико-технический институт, кафедра теоретической физики
Должность	Профессор
Почтовый адрес	295007, г. Симферополь, проспект Академика Вернадского, 4
Официальный сайт	https://cfuv.ru
Контактный телефон	Моб.: +7(978) 755-84-13
e-mail:	yuriiifridman@gmail.com
Список основных публикаций официального оппонента по теме диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет (не менее 5, но не более 15)	
1. Космачев О.А. Динамические и статические свойства негеизенберговского ферримагнетика с одноионной анизотропией типа «легкая плоскость» / О.А. Космачев, Я.Ю. Матюнина, Ю.А. Фридман // Журнал экспериментальной и теоретической физики. - 2022, - Т. 162. - №. 3. - С. 406-416.	

2. Matyunina Y.Y. Singular points of the isotropic non-heisenberg magnet / Y.Y. Matyunina, O.A. Kosmachev, Y.A. Fridman // Journal of magnetism and magnetic materials. - 2023. - Vol. 588. - P. 171451.
3. Матюнина Я.Ю. Спиновый нематик в сильном магнитном поле / Я.Ю. Матюнина, О.А. Космачев, Ю.А. Фридман // Физика Металлов и Металловедение. - 2024. - Т. 125. - №. 5. - С. 463-469.
4. Yarygina E.A. Effects of temperature on the dynamic and static properties of a non-heisenberg anisotropic ferromagnet / E.A. Yarygina, V.V. Kozachek, O.A. Kosmachev, Yu.A. Fridman // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. - 2024. - Vol. 596. - P. 171971.
5. Yarygina E.A. Effect of an external magnetic field on the phase states and dynamic properties of the strongly anisotropic / E.A. Yarygina, Ph.N. Klevets, O.A. Kosmachev, Yu.A. Fridman, V.V. Khovailo // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. - 2023. - Vol. 565. - P. 170238.
6. Kosmachev O.A. Orientational phase transition by magnetic field in anisotropic non-heisenberg magnet with $S=1$ / O.A. Kosmachev, Yu.A. Fridman, E.A. Yarygina // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. - 2025. - Vol. 622. - P. 172958.
7. Космачев О.А. Негайзенберговский ферримагнетик с одноионной анизотропией / О.А. Космачев, Е.А. Ярыгина, Я.Ю. Матюнина, Ю.А. Фридман // Физика твердого тела. - 2022. - Т. 64. - №. 3. - С. 337-344.
8. Космачев О.А. Влияние большой одноионной анизотропии на динамические и статические свойства негайзенберговского ферримагнетика / О.А. Космачев, Я.Ю. Матюнина, Ю.А. Фридман // Физика твердого тела. - 2023. - Т. 65. - №. 5. - С. 810-816.
9. Ярыгина Е.А. Динамические и статические свойства негайзенберговского анизотропного антиферромагнетика при ненулевой температуре / Е.А. Ярыгина, В.В. Козачек, Я.Ю. Матюнина, О.А. Космачев, Ю.А. Фридман // Журнал экспериментальной и теоретической физики. - 2024. - Т. 165. - №. 1. - С. 98-113.
10. Космачев О.А. Особенности формирования нематических состояний в магнетике с $S=2$ / О.А. Космачев, Ю.А. Фридман // Журнал экспериментальной и теоретической физики. - 2025. - Т. 167. - №. 3. - С. 397-411.
11. Космачев О.А. Динамика спинового нематика с $S=3/2$ на треугольной решетке / О.А. Космачев, Я.Ю. Матюнина, Ю.А. Фридман // Физика твердого тела. - 2024. - Т. 66, - №. 12. - С. 2263-2267.

Официальный оппонент:

профессор кафедры теоретической физики ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского»,
Физико-технический институт, доктор физико-математических наук, профессор

«10» ноября 2025г.

 Фридман Ю.А.

Подпись Ю.А. Фридмана заверена

Учёный секретарь

ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского»

кандидат филологических наук,

доцент



 Митрохина Л.М.
(подпись)