

ОТЗЫВ

официального оппонента Метлова Константина Леонидовича на диссертацию 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.

Магнетизм известен человечеству с незапамятных времён и традиционно неплохо описывается классической физикой. С другой стороны, это сугубо квантовое явление, природу которого можно понять лишь в терминах спина, принципа Паули и квантовомеханического обменного взаимодействия, которые в классической физике отсутствуют. Квантовая теория магнетизма позволяет использовать это, более глубокое, понимание для поиска новых эффектов и описания свойств магнитных материалов из первых принципов. Среди этих эффектов — проявляющееся в данной работе, квантовое сокращение спина и, непосредственно вытекающее из дискретности спиновых состояний, многообразие различных магнитоупорядоченных фаз исследуемых в работе физических систем.

Кроме квантовых свойств самого спина, классическая теория не в полной мере способна учесть и дискретность магнитного материала. Да, хорошо работают макроскопические подходы для описания свойств кристаллов, отражающие их микроскопическую симметрию, но симметрия даёт лишь грубое понимание того какие взаимодействия могут, а какие не могут быть реализованы. И лишь прямой квантовомеханический расчёт позволяет определить величину этих взаимодействий.

Среди множества кристаллических структур, особое место занимает, рассматриваемая в работе, треугольная решётка спинов — простая система, где может быть реализована фрустрация. Долгое время считалось (а некоторые современные идеи в области квантовых вычислений неявно базируются на этом до сих пор), что при (плавном и бесконечно долгом) уменьшении температуры до абсолютного нуля любая термодинамическая система стремится к своему единственному основному состоянию — глобальному минимуму энергии. Это утверждение носит название “теорема Нернста” (или “третье начало термодинамики”) и, в формулировке Планка, сводится к тому, что энтропия $S \rightarrow 0$ при температуре $T \rightarrow 0$. Фрустрированные системы нарушают эту “теорему”, поскольку их основное состояние сильно вырождено, а значит энтропия, пропорциональная логарифму степени вырождения, не равна нулю. Треугольная решётка изинговских спинов с *антиферромагнитным* взаимодействием, представляет собой яркий пример такой фрустрированной системы (и заодно демонстрирует богатую магнитную фазовую диаграмму),

а вот степень вырождения основного состояния такой же решётки с *ферромагнитным* обменным взаимодействием в присутствии сколь угодно малого магнитного поля в точности равна 1, а значит $S \propto \log 1 = 0$. Но модель Изинга — лишь частный предельный случай сильной анизотропии, квантовое рассмотрение треугольной решётки в данной работе выходит за рамки этого предположения.

В целом, это значит, что проведенные в данной работе теоретические и численные **исследования несомненно являются актуальными** и имеют существенное фундаментальное значение.

Научная **новизна и оригинальность** результатов обусловлена рассмотрением $SU(3)$ ферромагнитной системы со смешанными спинами подрешёток $(1/2, 1/2, 1)$. Детальное исследование квантовых флуктуаций и фазовой диаграммы такой системы было проведено впервые. В контексте активно развивающейся сейчас антиферромагнитной спинтроники, наличие у рассматриваемой системы точки компенсации спинового момента и плато намагниченности позволяет говорить и о **практической ценности** работы, поскольку других теоретических результатов в окрестности подобных особенностей фазовой диаграммы не так уж много.

Достоверность результатов обусловлена корректным использованием классического математического аппарата для представления исследуемых спиновых состояний — операторов Хаббарда. В предельном случае результаты четвёртой главы согласуются с теоремой Мермина-Вагнера. Построенные фазовые диаграммы находятся в качественном согласии с исследованными в литературе численными фазовыми диаграммами для подобных систем.

Диссертация состоит из введения, литературного обзора, трех глав, содержащих оригинальные результаты автора, и заключения.

Во **введении** проведен анализ проблемы, раскрыта ее важность; сформулированы цели и задачи исследований; уточнены достоверность и область применения полученных результатов.

В **первой главе** дан подробный литературный обзор основных работ по магнитным свойствам фрустрированных трёхподрешёточных систем. Обзор делится на две части: первая (более обширная) посвящена теоретическим методам исследования таких систем, во второй собраны экспериментальные результаты подтверждающие существование плато намагниченности в различных квантовых магнетиках.

Во **второй главе** рассматривается квантовый $SU(3)$ ферромагнетик на треугольной решётке. Дано формальное определение рассматриваемой теоретической модели. Построено унитарное преобразование, диагонализующее одноионный гамильтониан, проанализирована (в приближении среднего поля) зависимость параметров порядка и фазовые переходы в зависимости от константы (легкоплоскостной) анизотропии. Очерчена область существования

коллинеарной ферримагнитной *uid* фазы, ответственной за формирование плато намагниченности. Рассчитан спектр спин-волновых возбуждений и проведен анализ голдстоуновских мод, показывающих изменение симметрии в различных фазах.

В третьей главе рассмотрен тот-же квантовый $SU(3)$ ферримагнетик на треугольной решётке, но уже в присутствии магнитного поля, приложенного в лёгкой плоскости анизотропии (то есть в плоскости плёнки). Как и во второй главе, диагонализирован одноионный гамильтониан в представлении Хаббарда и введено приближение среднего поля для вычисления основного состояния системы и параметров порядка. Построена фазовая диаграмма в координатах поле-анизотропия для случая сильной связи ($I < J$) между подрешётками со спином $1/2$ и для случая слабой связи ($I > J$). Отдельно проанализирован вырожденный случай ($I = J$). Все эти случаи демонстрируют многообразие коллинеарных и неколлинеарных фаз со взаимными фазовыми переходами между ними. Рассчитан магнонный спектр и, аналогично предыдущей главе, проведен анализ голдстоуновских мод.

Четвертая глава посвящена рассмотрению квазидвумерного антиферромагнетика на треугольной решётке с произвольным спином. Реально рассматриваемая автором модель является трёхмерной, состоящей из обменно-связанных двумерных листов. Это необходимо в силу теоремы Мермина-Вагнера о невозможности магнитного упорядочения в двух измерениях. В разделе автором вычислена температура Нееля для этой модели, которая стремится к нулю в пределе пренебрежимо слабой связи между листами, как требует вышеупомянутая теорема.

Перечисленные выше, а также другие результаты, составляющие основу диссертационной работы, являются новыми и актуальными, вносят важный вклад в физику квантовых фрустрированных магнитных систем.

Автореферат достаточно полно отражает содержание работы и результаты, выносимые на защиту. Результаты диссертационной работы и выводы представлены в известных международном (Journal of Magnetism and Magnetic Materials) и российских (Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики, Теоретическая и Математическая Физика) журналах, что удовлетворяет требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание степени кандидата физико-математических наук. Результаты диссертационной работы А.С. Мартынова неоднократно докладывались на престижных научных конференциях. Все исследования проведены на высоком уровне в рамках единого теоретического подхода, использующего алгебру операторов Хаббарда, что, несомненно, демонстрирует высокую квалификацию соискателя.

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

1. Хотя слово “сверхтвёрдый” относительно магнитных фаз уже употребляется в некотором (пока довольно небольшом) количестве научных работ на русском языке, этот дословный перевод слова “supersolid” мне кажется не очень удачным. Более точный перевод — “сверхтекучая твёрдая фаза”, а, если говорить конкретно о магнетизме, то речь, конечно, может идти лишь о магнитном “аналоге сверхтекучей твёрдой фазы” (в гелии или других сверххолодных квантовых газах). Хотя, несмотря на первые эксперименты [30] с ^4He , существование такой фазы до сих пор оспаривается, а проведенные в [30] измерения получили несколько других интерпретаций. Да и сама работа [30] называется “Вероятное наблюдение сверхтекучей твёрдой фазы ...”. Может быть не стоит проводить аналогии с чем-то, чего возможно не существует?
2. В экспериментальной части литературного обзора обсуждаются много-подрешёточные магнетики с треугольной решёткой (которым посвящена данная работа), где экспериментально обнаружены интересующие автора магнитные фазы. Прежде всего uid , ответственная за плато намагниченности, фаза W и фаза Y . Однако подобные фазы со спин-флоп переходом наблюдаются и в других магнетиках, решётка которых совсем даже не треугольная. Например в ферритах со структурой шпинели, MnCr_2S_4 , которые довольно неплохо описываются моделью Яфета-Киттеля. Дает ли рассматриваемая автором треугольная решётка какие-то принципиально новые качественные эффекты, не наблюдаемые, например, в шпинелях, относящихся к кубической сингонии?
3. На Рис. 2.14 показана эволюция щели одной из спин-волновых мод в зависимости от параметра анизотропии D . Действительно, при $D \in [D_*, D_c]$ присутствует непрерывная симметрия вращения магнитных моментов F и G подрешёток вокруг оси OZ . Но ведь и у ddu фазы при $D \in [0, D_*]$ такая симметрия тоже присутствует? Почему же там есть щель?
4. Уравнения (3.19), (3.25) для равновесных углов имеют вообще говоря множество решений. По своей структуре они представляют собой связанную систему уравнений, подобных модели Стонера–Вольфарта для магнитного гистерезиса, который в этой модели тоже наверное присутствует. Если так, то физический смысл имеют не только решения этой системы с минимальной энергией, но и другие, которые можно реализовать при помощи определённой истории приложения внешнего поля. Не было бы интересно исследовать эти решения тоже?
5. Изинговский антиферромагнетик на треугольной решётке — фруст-

рированная система. Как следствие, его основное состояние сильно вырождено, а энтропия при нулевой температуре не равна нулю. Но из Рис. 4.3 следует, что при понижении температуры в классическом случае ($S \gg 1$) подрешётки рассматриваемого антиферромагнетика полностью упорядочиваются. Как проявляет себя фрустрация в этом случае?

6. Есть и несколько мелких погрешностей: 1) на стр. 4: в определении КАФМ “я фаза” → “”; стр. 16: “теории магнетизме” → “теории магнетизма”; стр. 46: “ситстемы” → “системы”; стр. 65: “оисывает” → “описывает”.

Приведенные выше вопросы и замечания не ставят под сомнение основные выводы диссертационной работы и не влияют на оценку достоверности, важности и новизны представленных в ней результатов. 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, которая соответствует требованиям пп. 9-11, 13-14 “Положения о порядке присуждения ученых степеней” (утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013), предъявляемых ВАК РФ к кандидатским диссертациям, а её автор, Мартынов Александр Сергеевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 — Физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент,

доктор физ.-мат. наук, 01.04.07 – физика
конденсированного состояния, ведущий
научный сотрудник отдела теории
электронных и кинетических свойств
нелинейных систем Федерального
государственного бюджетного научного
учреждения «Донецкий
физико-технический институт им. А.А.
Галкина».



Метлов Константин Леонидович
18 ноября 2025 г.

Адрес: 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»
Е.А. Пилипенко



СВЕДЕНИЯ

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

Фамилия Имя Отчество	Метлов Константин Леонидович
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 конденсированного состояния
Ученое звание	-
Место работы	
Полное наименование организации в соответствии с уставом	Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина»
Ведомственная принадлежность	Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Наименование структурного подразделения	отдел теории электронных и кинетических свойств нелинейных систем
Должность	ведущий научный сотрудник
Почтовый адрес	283048, г. Донецк, ул. Розы Люксембург, д. 72.
Официальный сайт	https://www.donfti.ru
Контактный телефон	Моб.: +7(949) 305-28-00
e-mail:	k.l.metlov@yandex.ru
Список основных публикаций официального оппонента по теме диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет (не менее 5, но не более 15)	
1. Metlov, K. L. Elliptical stability of hopfions in bulk helimagnets / K. L. Metlov // Phys. Rev. B. — 2025. — Vol. 111, no. 17. — P. 174450. — DOI: 10.1103/PhysRevB.111.174450. 2. Metlov, K. L. Magnetostatic bounds on stability of hopfions in bulk helimagnets / K. L. Metlov // Physica B. — 2024. — Vol. 695. — P. 416498. — DOI: 10.1016/j.physb.2024.416498. 3. Metlov, K. L. Small-angle neutron scattering signatures of magnetic hopfions / K. L. Metlov, A. Michels // Phys. Rev. B. — 2024. — Vol. 109, no. 22. — P. L220408. — DOI: 10.1103/PhysRevB.109.L220408.	

4. Fingerprint of vortexlike flux closure in an isotropic Nd-Fe-B bulk magnet / M. Bersweiler, Y. Oba, E. P. Sinaga, [et al.] // Phys. Rev. B. — 2023. — Vol. 108, no. 9. — P. 094434. — DOI: 10.1103/PhysRevB.108.094434.
5. Effect of annealing on the magnetic microstructure of high-pressure torsion iron: the relevance of higher-order contributions to the magnetic small-angle neutron scattering cross section / M. Bersweiler, H. Sato, N. Adachi, [et al.] // IUCrJ. — 2023. — Vol. 10, no. 4. — P. 411–419. — DOI: 10.1107/S2052252523003937.
6. Metlov, K. L. Two types of metastable hopfions in bulk magnets / K. L. Metlov // Physica D. — 2023. — Vol. 443. — P. 133561. — DOI: 10.1016/j.physd.2022.133561.
7. Small-angle neutron scattering by spatially inhomogeneous ferromagnets with a nonzero average uniaxial anisotropy / V. D. Zaporozhets, Y. Oba, A. Michels, K. L. Metlov // J. Appl. Crystallogr. — 2022. — Vol. 55, no. 3. — P. 592–600. — DOI: 10.1107/S160057672200437X.
8. Experimental observation of vortex rings in a bulk magnet / C. Donnelly, K. L. Metlov, V. Scagnoli, [et al.] // Nat. Phys. — 2021. — Vol. 17. — P. 316–321. — DOI: 10.1038/s41567-020-01057-3.

Официальный оппонент:

Доктор физико-математических наук (01.04.07 — физика конденсированного состояния), ведущий научный сотрудник отдела теории электронных и кинетических свойств нелинейных систем Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина»

«18» ноября 2025г.



Метлов К.Л.

Подпись заверяю:
Учёный секретарь
ФГБНУ «Донецкий физико-технический
институт им. А.А. Галкина»
Е.А. Пилипенко

