

## ОТЗЫВ

официального оппонента Метлова Константина Леонидовича на диссертацию Матюниной Яны Юрьевны «динамические и статические свойства негейзенберговских двухподрешеточных магнетиков», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – физика конденсированного состояния.

Современная феноменология магнетизма широко используется при моделировании магнитных фаз и их свойств в различных материалах, проектировании устройств спинтроники. В качестве примеров здесь можно отметить магнитные вихри и другие солитонные фазы, скирмионы и их решётки в материалах с нарушенной хиральной симметрией. Активно развивается сейчас и антиферромагнитная спинтроника, открывающая доступ к созданию устройств, работающих в терагерцовом диапазоне.

С другой стороны, в основе феноменологической теории магнетизма, для моделирования обменного взаимодействия используется гамильтониан Гейзенберга. Причём в форме, которая, вообще говоря, справедлива лишь для спинов  $\sigma = 1/2$ . Для другой величины спина в обменном гамильтониане появляются дополнительные слагаемые (в случае спина  $S = 1$  биквадратичные по спиновым операторам). Их влияние на фазовую диаграмму такого негейзенберговского магнетика подробно исследуется в данной работе.

Другой важной особенностью систем со спином  $S = 1$  является наличие состояний с нулевой проекцией спина на выделенную ось. За счёт них, динамика спина больше не сводится к вращению вектора фиксированной длины, но включает в себя и возможность изменения длины этого вектора. Квантовый эффект сокращения спина оказывается полезным для реализации сверхбыстрого продольного переключения спинов.

Наконец, третьим важным элементом рассматриваемых в работе моделей, является наличие в них двух независимых спиновых подрешёток. Это открывает возможность для моделирования (с учётом описанных квантовых эффектов) ферримагнетиков, которые, в случае компенсации магнитных моментов подрешёток, подобны антиферромагнетикам. При этом нужно отметить, что компенсация магнитных моментов не соответствует компенсации спиновых моментов подрешёток, а значит такие материалы ведут себя как альтермагнетики – ещё один новый активно развивающийся в последнее время класс магнитных материалов.

Вышесказанное позволяет сделать вывод, что проведенные автором в данной работе **исследование несомненно является актуальным** и может иметь важное прикладное значение.

Диссертационная работа посвящена исследованию двух классов негейзенберговских магнетиков, а именно анизотропного двухподрешёточного спинового нематика и негейзенберговского ферримагнетика, в одной из подрешеток которого учитывается биквадратичное обменное взаимодействие. Эти две задачи логически связаны между собой, описываются в рамках единого формализма и никогда не были рассмотрены ранее. Таким образом, **новизна и оригинальность**, полученных в работе Матюниной Я.Ю., результатов не вызывает сомнения.

**Достоверность результатов работы** обусловлена корректным использованием классического математического аппарата для представления исследуемых спиновых состояний – операторов Хаббарда. Кроме того, поскольку основной темой проведенного исследования является учёт магнитной анизотропии, практически все основные результаты проверены предельными переходами к изотропному случаю.

Диссертация состоит из хорошо написанного введения, трех разделов, содержащих оригинальные результаты автора, и заключения.

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

В **первом разделе** рассмотрена модель одноподрешёточного магнетика со спинами  $S = 1$  и анизотропией типа лёгкая плоскость. Построена фазовая диаграмма. Показано, что анизотропия приводит к появлению областей сосуществования различных, характерных для данной модели, фаз – ферромагнитной, антиферромагнитной, нематической и ортогональной нематической.

Во **втором и третьем разделах** диссертации рассмотрены статика и динамика негейзенберговского ферримагнетика с подрешетками  $S = 1$  и  $\sigma = 1/2$ . Эти разделы отличаются тем, что в первом из них между (изотропными) подрешётками устанавливается анизотропная изинг-подобная обменная связь, а во втором  $S = 1$  подрешётка имеет одноосную одноионную анизотропию, тогда как обменная связь между подрешётками и вторая  $\sigma = 1/2$  подрешётка изотропны. При этом выбор знака межподрешёточной обменной константы в обоих случаях обеспечивает антиферромагнитное спаривание между подрешётками. В такой системе возникают нематическая и ферримагнитная фазы, когда  $S = 1$  подрешётка находится в нематическом и ферримагнитном состояниях соответственно. Нематическая фаза при этом оказывается “подмагниченной” обменным полем второй  $\sigma = 1/2$  подрешётки, что приводит к появлению в ней среднего магнитного момента. Подробно исследуется явление компенсации спиновых моментов подрешёток, которое (из-за “подмагничивания”) существует как в ферримагнитной, так и в нематической фазах. Построена фазовая диаграмма и

показано, что все переходы в системе при наличии анизотропии становятся переходами первого рода. Все расчёты в первом, втором и третьем разделах выполнены в рамках приближения среднего поля.

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

Автореферат достаточно полно отражает содержание работы и результаты, выносимые на защиту. Результаты диссертационной работы и выводы хорошо представлены в таких журналах как *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, *Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики*, *Физика Твёрдого Тела* и *Физика Металлов и Металловедение* входящих в базу данных Scopus, Web of Science и список ВАК. Результаты диссертационной работы Я.Ю. Матюниной 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.

Во всех разделах и в разных рассмотренных там модельных системах автор обнаруживает появление фазовых переходов первого рода при “включении” магнитной анизотропии. Эта, по всей видимости универсальная, связь магнитной анизотропии и необратимости (гистерезиса) наблюдается и во многих других случаях, таких, например как гистерезис доменных границ и однодоменных магнитных зерен. Более того, в совокупности с (тоже довольно типичной) сильной температурной зависимостью константы анизотропии, служит основой для новых технологий магнитной записи, таких как Heat Assisted Magnetic Recording (HAMR). Таким образом, этот общий качественный результат работы несомненно является правильным.

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

1. В разделе 1 на с. 22: вместо температуры Нееля лучше говорить о температуре магнитного упорядочения, поскольку гамильтониан (1.1.1) допускает как антиферромагнитный, так и ферромагнитный порядок.
2. Приближение среднего поля обосновывается а работе (на стр. 24, например) малостью тепловых флуктуаций из-за близости температуры к абсолютному нулю. А как же квантовые флуктуации ? Они тоже малы ? Что тогда остаётся от “квантовости” в полученных автором решениях ?
3. В разделе 1 при анализе решетки спинов с  $S = 1$  в случае  $J_0 < K_0$

на странице 27 сказано, что «в нематической фазе энергия одноионной анизотропии, существенно меньше энергии обменных взаимодействий, т.е.  $\beta < J_0, K_0$ ». Смысл этого утверждения не вполне понятен, поскольку величина константы анизотропии является исходным параметром задачи. Нужно ли понимать, что (как можно ожидать из общих соображений) нематическая фаза существует при дополнительных ограничениях на знак и величину константы анизотропии? Но тогда нужно учесть, что данный анализ предполагает  $J_0 < K_0$ , а значит условие на константу анизотропии будет просто  $0 < \beta < J_0$ . Это верно? Тогда почему «анизотропия практически не изменяет квадрупольный эллипсоид», насколько «практически»? Эллипсоид лежит в плоскости  $ZOX$ , а лёгкой плоскостью анизотропии является  $ZOY$ . Можно было бы ожидать его сжатия вдоль оси  $OX$  с увеличением  $\beta$ .

4. В начале раздела 1.2.1 утверждается, что «энергетический масштаб материальных параметров важен» но далее производится перенормировка, исключаяющая этот масштаб из рассмотрения. Логично как раз, что, в пренебрежении тепловыми флуктуациями, общий масштаб энергии становится *не* важным.
5. В Разделе 2 на стр. 48 утверждается, что основным состоянием подрешёток являются  $e_1$  и  $e_{1/2}$ . Но в отсутствии магнитного поля направления вдоль оси  $OZ$  равноправны в рассматриваемой модели, поэтому с тем же успехом на роль основного состояния может претендовать и  $e_{-1}$ ,  $e_{-1/2}$ . Разница между этими двумя парами состояний сводится к выбору ветви решения уравнения для параметра  $u$ - $v$  преобразования (последнее уравнение на стр. 48). Чем обусловлен этот выбор?
6. Для рассмотренных во втором и третьем разделах двухподрешёточных моделей роль подрешётки со спином  $\sigma = 1/2$  в среднем поле состоит лишь в том, чтобы создать для подрешётки со спином  $S = 1$  некоторое эффективное подмагничивающее поле. Почему такое рассмотрение не сводится к задаче о единственной решётке  $S = 1$  во внешнем поле и какие возникают особенности, которые такое сведение не допускают?
7. Пусть это и методологическая разница, но всё-же должен отметить, что точка компенсации ферримагнетика (обычно определяемая в эксперименте на оси температур) соответствует нулевой намагниченности насыщения образца (т.е. нулевому полному магнитному моменту на единицу его объема), а не нулевому суммарному спину.

8. В работе так же присутствует небольшое количество опечаток: «оно-ионной» → «одноионной», «исследуется негейзенберговского антиферромагнетик» → «исследуется негейзенберговский антиферромагнетик», «так нематических состояний» → «так и нематических состояний», «негейзенберговского ферримагнетика изинговским межподрешеточным обменом» → «негейзенберговского ферримагнетика с изинговским межподрешеточным обменом», «таки образом» → «таким образом», «Так ка» → «Так как», «равны по модуль» → «равны по модулю», «прицессию» → «прецессию», «неометрическим» → «геометрическим», «уранение» → «уравнение»

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 Матюниной Яны Юрьевны **«динамические и статические свойства негейзенберговских двухподрешеточных магнетиков»** выполнена на высоком уровне и является законченной научной работой, которая соответствует требованиям “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,

доктор физ.-мат. наук,  
в.н.с. ФГБНУ ДонФТИ,

 Метлов К. Л.

Дата: 22 августа 2024 г.

Адрес: ФГБНУ «Донецкий Физико-Технический Институт им. А.А. Галкина», 283048, г. Донецк, ул. Розы Люксембург, д. 72.

Телефон: +7 (949) 305-28-00. E-mail: metlov@donfti.ru .

*Подпись К. Л. Метлова заверено!*

*И.О. директора  
ФГБНУ ДОНФТИ*



*г.н.о. Решинкова*