

## ОТЗЫВ

официального оппонента 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

Главными критериями оценки диссертационной работы являются наличие актуальности, достоверности, практической важности и новизны результатов, выносимых на защиту.

Начну с актуальности. Гейзенберговская модель обменного взаимодействия господствует в магнетизме с начала прошлого века. Решено множество практически важных задач, разработано множество ключевых для технического прогресса приложений. Таких, например, как накопители на жестких магнитных дисках. Тем не менее, в связи с прогрессом в понимании и численном моделировании квантовых свойств конденсированных сред, всё чаще мы сталкиваемся с тем, что простой гейзенберговской картины для описания ферромагнитного обмена (ключевого в магнетизме взаимодействия) становится недостаточно. Ярким примером здесь является возросший в последние десятилетия интерес к хиральным магнетикам со взаимодействием Дзялошинского-Мория. Но и этим, более широким классом магнитных материалов, не исчерпывается спектр проявлений негейзенберговского обменного взаимодействия в магнетизме. Современные методы вычислительной химии позволяют найти и параметризовать его энергию из первых принципов для любых типов кристаллов и даже для неупорядоченных конденсированных сред. Установление связи между этими параметрами и магнитными свойствами материала в целом (в том числе и путём решения задач, рассмотренных в данной диссертационной работе) несомненно является *актуальным* в контексте современного магнетизма и физики конденсированного состояния.

Другим краеугольным камнем традиционного магнетизма, проистекающего из модели динамики магнитной среды Ландау и Лифшица, является сохранение модуля локального вектора намагниченности. Это предположение хорошо работает вдали от точек фазовых переходов. Однако, новые принципы магнитной записи, основанные на оптическом переключении направления локального магнитного момента и сочетающие неограниченное количество циклов перезаписи магнитных носителей со скоростью доступа и плотностью информации, достижимыми при помощи сфокусированного лазерного луча, требуют отказа от данного предположения. Быстрый и сильный локальный нагрев 10-100 фемтосекундным лазерным импульсом провоцирует каскад фазовых переходов, завершающихся переключением

направления локального магнитного момента, в процессе которых его модуль не сохраняется. Таким образом, исследование фазовых переходов в квантовых магнетиках с негейзенберговским обменом и несохраняющимся модулем локального магнитного момента очень важно не только с фундаментальной, но и с *практической* точки зрения.

*Достоверность* полученных автором результатов обусловлена корректным использованием современного квантовополевого описания, подходящего для рассмотрения многочастичных систем с сильными корреляциями, и приближения среднего поля. Многие из полученных автором выражений проверены предельными переходами и, в частных случаях, сводятся к известным (либо полученным автором в данной работе ранее) результатам.

Работа построена традиционным образом. Она состоит из ВВЕДЕНИЯ, трех оригинальных РАЗДЕЛОВ, ЗАКЛЮЧЕНИЯ и СПИСКА ЛИТЕРАТУРЫ.

Во ВВЕДЕНИИ сделан подробный анализ современного состояния вопросов, исследуемых в диссертации, сформулированы цели и задачи исследований.

В первом и втором РАЗДЕЛАХ диссертации получены очень интересные результаты. Изучено влияние обменной анизотропии на фазовые состояния и динамические свойства негейзенберговского магнетика со спином магнитного иона  $S = 1$ . Необходимо отметить, что в этой части диссертации рассмотрены как одно-, так и двухподрешеточные квантовые магнетики. Показано, что в присутствии меж-ионной анизотропии (в дополнение к традиционно исследуемой одно-ионной) физические свойства магнетиков в существенной степени определяются вкладами высших спиновых мультиполей. Это значительно усложняет математическое описание статических и динамических свойств обменно-анизотропных магнетиков, но позволяет моделировать сугубо квантовые эффекты — такие, как квантовое сокращение спина. Эти особенности определяют необходимость выхода за рамки стандартного феноменологического описания в рамках уравнения Ландау-Лифшица. На основе единого математического подхода, автором получены и решены уравнения, описывающие структуру фазовых диаграмм исследуемых систем. Впервые показано, что влияние меж-ионной анизотропии в биквадратичном обменном взаимодействии приводит к реализации немагнитического состояния особого типа — угловой немагнитической фазы. Кроме того, убедительно показано, при реализации только тензорных фаз, что магнитные фазовые переходы по тензорному параметру порядка с изменением ориентации вектор-директора подобны ориентационным фазовым переходам.

Большой интерес представляют результаты, полученные в третьем РАЗДЕЛЕ. В нём рассматриваются статические и динамические свойства изотропного ферримагнетика, две подрешетки которого содержат ионы со спинами  $S = 1$  и  $\sigma = 1/2$ , соответственно. Причем, в первой подрешетке,

наряду с билинейным обменным взаимодействием, учитывается биквадратичное. Модель вполне применима для качественного описания свойств некоторых магнитоупорядоченных материалов, таких, например, как  $\text{EuSe}$ . Интерес к такого рода системам связан с упомянутыми ранее приложениями в области магнитной записи. В сплавах, содержащих редкоземельные ионы, а именно  $\text{GdFeCo}$  и  $\text{TeFeCo}$ , которые проявляют ферримагнитные свойства, наблюдается эффект сверхбыстрого перемагничивания при воздействии лазерного импульса длительностью порядка нескольких пикосекунд. В его формировании существенную роль играет обусловленное обменным взаимодействием изменение модулей магнитных моментов подрешеток и соответствующая продольная динамика магнитного момента. В данном РАЗДЕЛЕ диссертации предложен один из возможных механизмов такой спиновой переориентации в негейзенберговском ферримагнетике, связанный с квантовым эффектом сокращения спина. Показано, что при различных соотношениях материальных параметров в системе могут реализоваться два состояния: стандартное ферримагнитное (при доминировании билинейных обменных взаимодействий) и так называемое квадрупольно-ферримагнитное состояние (характеризующееся как дипольными параметрами порядка, так и квадрупольными). Последнее реализуется, если биквадратичное обменное взаимодействие в  $S = 1$  подрешетке становится сильнее билинейного. Причем, дипольные параметры порядка в квадрупольной фазе не достигают насыщенных значений, характерных для ферримагнитного состояния. Необходимо отметить, что все это относится к подрешетке со спином единица, подрешетка же с полуцелым спином магнитного иона играет роль “подмагничивающего поля”. Её наличие приводит к тому, что немагнитное состояние с нулевым значением магнитного момента в первой подрешетке не реализуется. Автором убедительно показано, что переход между ферримагнитной и квадрупольно-ферримагнитной фазами в негейзенберговском ферримагнетике является переходом второго рода. Причем, в квадрупольной фазе возможна компенсация спиновых моментов, обусловленная квантовым эффектом сокращения спина, а в её динамике определяющую роль играет продольная ветвь элементарных возбуждений, связанная с колебаниями модуля магнитного момента.

Перечисленные выше, а также другие результаты, составляющие основу диссертационной работы, новы, актуальны и вносят вклад в физику негейзенберговских магнетиков. Автореферат правильно и достаточно полно отражает содержание работы и результаты, выносимые на защиту. Результаты диссертационной работы и выводы широко представлены в таких журналах как *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, *Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики*, *Физика Твёрдого Тела*, входящих в базу данных Scopus, Web of Science и список ВАК. Результаты диссертационной работы А.В. Кривцовой неоднократно докладывались на престижных научных конференциях. Все исследования проведены на вы-

соком уровне, что, несомненно, демонстрирует квалификацию соискателя.

Еще одной положительной особенностью диссертации является то, что текст не “склеен” из работ, как это нередко бывает, а каждый раздел написан с нуля как отдельный обобщающий текст. Хотя автор иногда допускает несколько вольное обращение с пунктуацией, в целом работа понятно написана и достаточно хорошо оформлена.

Однако, как и любое серьезное исследование, диссертация не свободна от недостатков. Перечислю основные:

1. В работе упоминается уравнение Ландау-Лифшица (как пример классического подхода, не работающего в отношении рассматриваемых систем), но *ничего не сказано* об уравнении Ландау-Лифшица-Блоха (ЛЛБ), которое на макроскопическом уровне неплохо описывает как поперечную, так и продольную динамику (и кинетику) спина. Более того, коэффициенты уравнения ЛЛБ могут быть получены в рамках приближения среднего поля из спинового гамильтониана [Atxitia U., Nieves P., Chubykalo-Fesenko O. Landau-Lifshitz-Bloch equation for ferrimagnetic materials // Phys. Rev. B. — 2012. — Vol. 86. — P. 104414; Menarini M., Lomakin V. Landau-Lifshitz-Bloch equation for ferrimagnets with higher-order interaction, ArXiv:2104.02198].
2. В работе широко используется приближение среднего поля. Но известно, что оно хорошо работает только в случае, когда размерность системы больше некоторой критической. В спиновых цепочках, например, квантовые флуктуации могут разрушить нематический (квадрупольный) порядок [Ivanov B. A., Kolezhuk A. K. Effective field theory for  $S = 1$  quantum nematic // Phys. Rev. B — 2003. — Vol 68. — P. 052401]. *Насколько применимо это приближение* в рассматриваемых случаях ?
3. Во втором выводе главы 2 я бы уточнил, что речь идёт о *магнитных* фазовых переходах. Иначе утверждение этого пункта очень далеко выходит за рамки проделанной работы.
4. В первом выводе главы 3 следовало бы уточнить, что речь идёт о *квантовом* ферримагнетике, поскольку биквадратичное обменное взаимодействие в ферримагнетике с *классическими* спинами было исследовано (как минимум) Баркером и Чантреллом [Barker J., Chantrell R. W. Higher-order exchange interactions leading to metamagnetism in FeRh // Phys. Rev. B. — 2015. — Vol. 92. — P. 094402.]
5. Формулы в третьем разделе приведены неаккуратно, во многих местах пропущены или присутствуют лишние индексы. Особенно это касается параметров  $J$ ,  $J_1$  и  $J_2$ .

6. Присутствуют опечатки: “связаанной” → “связанной”, “алогичные” → “аналогичные”, “сдедующее” → “следующее”, “ветви возбуждений (3.16) и (3.18)” → “ветви возбуждений (3.17) и (3.19)”, “однодрешеточных” → “одноподрешеточных”. Не указаны значения параметра  $\alpha$  в первом абзаце на стр. 65:  $S_z = 0$  для  $\alpha = \pm\pi/4, \pm 3\pi/4$ , такое впечатление, что часть текста в конце этого абзаца пропущена. Есть ошибка и в ссылках, статья Haldane F.D.M. [88] опубликована в Physics Letters A, а не в “Physical review letters”.

Приведенные выше 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 Кривцовой Анастасии Владимировны “Фазовые состояния и спектры элементарных возбуждений негеизенберговских изотропных и обменно-анизотропных магнетиков” выполнена на высоком уровне и является законченной научной работой, которая соответствует требованиям “Положения о порядке присуждения ученых степеней”, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 — Физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент:

Доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник отдела теории электронных и кинетических свойств нелинейных систем ГУ «Донецкий Физико-Технический Институт им. А.А. Галкина»



Метлов К.Л.

Адрес: ГУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», ул. Розы Люксембург, 72, г. Донецк, Украина 83114.

Подпись заверяю:  
Учёный секретарь  
ГУ «Донецкий физико-технический  
институт им. А.А. Галкина»  
О.В. Прокофьева

