

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

Новое поколение магнитных технологий хранения, передачи и обработки данных выдвигает особые требования к используемым магнитным материалам. Недавние открытия таких фундаментальных эффектов, как новые магнитные фазы, скирмионные решетки и спиральные состояния в материалах с нарушением инвариантности относительно пространственной инверсии на границе между пленками типа ферромагнитный металл – тяжелый металл (таких как CoV/Pt или CoFe/Ta), открывают новые горизонты для фундаментальных и прикладных исследований. Особый интерес вызывают спиновые системы с так называемым «скрытым порядком». В таких системах спонтанное нарушение вращательной симметрии обусловлено не намагниченностью, а средними значениями спиновых мультиполей. Теоретическому исследованию именно таких систем и посвящена диссертационная работа А.В. Кривцовой. Принципиальной особенностью таких магнетиков является то, что теоретическое описание их магнитных состояний требует выхода за рамки обычной феноменологической теории, в которой состояния спиновой системы определяется только вектором намагниченности (или, в случае антиферромагнетиков или ферримагнетиков, векторами намагниченностей подрешеток). Положения стандартной феноменологической теории нарушаются, если в магнетике достаточно сильны так называемые негейзенберговские взаимодействия, связанные с высшими спиновыми инвариантами типа $(\vec{S}_n \vec{S}_{n'})^{2S}$, где S – величина спина магнитного иона. Такого рода магнетики (их называют иногда, несколько условно, квантовыми, или негейзенберговскими магнетиками) обладают ярко выраженными квантовыми свойствами, в них квантовые флуктуации являются достаточно большими, что приводит к отклонениям от стандартного магнитного упорядочения, поскольку не сохраняется длина магнитного момента, и наблюдается эффект квантового сокращения спина. Примеры систем такого типа известны достаточно давно; они включают не только кристаллические магнетики, но Бозе-конденсаты ультрахолодных газов нейтральных атомов с ненулевыми спинами в оптических ловушках. Для таких систем найдены так называемые квадрупольные фазы, или фазы спинового нематика, которые

характеризуются нулевой намагниченностью даже при нулевой температуре, но в которых есть спонтанное нарушение симметрии за счет квадрупольных параметров порядка (средних значений операторов, билинейных по компонентам спина). Все это позволяет утверждать, что теоретическое изучение фундаментальных свойствах магнитоупорядоченных систем не только **актуально** для фундаментальной физики твердого тела, но может быть важным для практических применений.

Данная диссертационная работа посвящена исследованию двух больших классов негейзенберговских магнетиков: изотропные и изинговские негейзенберговские ферримагнетики и обменно-анизотропные одно- и двухподрешеточные негейзенберговские магнетики. Причем, эти две большие темы логически связаны между собой и описываются в рамках единого математического формализма. Причем, изюминкой и достоинством данной работы является то, что автор не ограничился рассмотрением простейшей задачи изотропного магнетика со спином магнитного иона с $S=1$, а продвинулся существенно дальше, исследуя свойства магнитоупорядоченных систем со сложными обменными взаимодействиями. Магнитные свойства такого сорта систем практически не изучены, или изучены для простейших моделей. Таким образом, **новизна и оригинальность** полученных в работе А.В.Кривцовой, результатов не вызывает сомнения.

Достоверность результатов работы определяется тем, что для теоретического исследования выбран подход, адекватность которого надежно апробирована ранее при анализе модельных систем. Исследования в этом направлении проводятся как группой теоретиков в Крымском федеральном университете, так и рядом других исследователей. Этот подход базируется на использовании так называемых $SU(3)$ - когерентных состояний. Достаточно адекватной их реализацией является подход с представлением указанных состояний с помощью операторов Хаббарда. Полученные результаты хорошо согласуются с результатами, полученными ранее в других работах, и известными экспериментальными данными.

Перейдем к обсуждению конкретных результатов, полученных в диссертационной работе. Диссертация состоит из хорошо написанного введения, трех разделов, содержащих оригинальные результаты автора, заключения и списка литературы.

Очень интересные результаты представлены в **первом и втором разделах** диссертации. В этих разделах изучено влияние сложной обменной анизотропии на фазовые состояния негейзенберговского одно- и двухподрешеточного магнетиков. Автором впервые показано, что влияние такой анизотропии в биквадратичном обменном взаимодействии приводит к реализации нематического состояния особого типа – угловой

нематической фазы. Кроме того, убедительно показано, при реализации только тензорных фаз, что фазовые переходы по тензорному параметру порядка по характеру близки к ориентационным фазовым переходам, причем изменяется ориентация вектор-директора.

Впервые показано, что в двухподрешеточном негейзенберговском обменно-анизотропном магнетике реализуется аналог ортогонально нематического состояния, реализуемого в изотропном негейзенберговском магнетике. Однако, в рассматриваемом в диссертации случае реализуется так называемое ортогонально нематическое угловое состояние, в котором векторы-директоры подрешеток ортогональны между собой, но образуют некоторый угол с осью квантования. Наличие этого состояния обусловлено влиянием обменной анизотропии биквадратичного обменного взаимодействия.

Автором подробно изучены как термодинамические, так и спектральные свойства рассматриваемых моделей. При этом автор диссертации продемонстрировал хорошее владение современным математическим аппаратом теоретической физики.

В **третьем разделе** изучается роль квантовых эффектов изотропного ферромагнетика. Исследуется двухподрешеточный коллинеарный магнетик с нескомпенсированными магнитными моментами подрешеток: спин магнитного иона одной подрешетки $S_1 = 1$, а другой $-\sigma = 1/2$. Кроме того, в подрешетке со спином $S=1$ кроме билинейного обменного взаимодействия учитывается и биквадратичное обменное взаимодействие. Анализ зависимости намагниченности подрешеток (при низких температурах) от соотношений материальных констант показал, что в случае, когда константа билинейного обменного взаимодействия превосходит значение константы биквадратичного взаимодействия в системе реализуется ферромагнитное упорядочение. Если же биквадратичное обменное взаимодействие превосходит гейзенберговский обмен, намагниченность первой подрешетки становится существенно меньше максимально возможного значения за счет эффекта квантового сокращения спина, обусловленного влиянием большого биквадратичного обменного взаимодействия. Таким образом, в этом случае реализуется так называемое квадрупольно ферромагнитное состояние, для которого характерно наличие как дипольного параметра порядка, так тензорного. При этом, дипольный параметр порядка никогда не обращается в ноль ($\langle S^z \rangle < 1$, $\langle S^z \rangle \neq 0$), поскольку подрешетка со спином магнитного иона $1/2$ играет роль «подмагничивающего» поля, и разрушает чисто нематическое упорядочение. Кроме того, наличие эффекта квантового сокращения спина в подрешетке с $S=1$ приводит к реализации в квадрупольно ферромагнитной фазе линии компенсации, т.е. при определенных соотношениях материальных параметров спины обеих подрешеток компенсируют друг друга. На этой

линии (при данных параметрах магнетика) система ведет себя «антиферромагнитным» образом.

Автором убедительно показано, что фазовый переход между ферромагнитной и квадрупольно-ферромагнитной фазами является переходом второго рода.

Также очень интересные результаты получены при исследовании динамических свойств изотропного негеизенберговского ферромагнетика. Как показано в диссертации, в системе реализуются три ветви элементарных возбуждений, две из которых являются прецессионными (первой и второй подрешеток), а третья связана с продольными колебаниями магнитного момента подрешетки с $S=1$. Наличие этой ветви возбуждений связано с тензорными параметрами порядка. Кроме того, по этой продольной ветви протекает фазовый переход между ферромагнитной и квадрупольно-ферромагнитной фазами. Автору удалось определить спектры магнонов не только в ферромагнитной, но и в квадрупольно-ферромагнитной фазах, что является достаточно нетривиальной задачей.

На мой взгляд, результаты по продольной динамике магнитного момента являются весьма любопытными, и могут быть использованы при исследовании сверхбыстрого перемагничивания ферромагнетиков фемтосекундными лазерными импульсами.

Перечисленные результаты, составляющие основу диссертационной работы, являются новыми и актуальными и представляют интерес как для теоретиков, так и экспериментаторов, работающих в области физики магнетизма. Автореферат диссертации правильно и достаточно полно отражает содержание работы и результаты, выносимые на защиту. Результаты диссертационной работы и выводы представлены в таких журналах как Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики, и других, входящих в базу данных Scopus, Web of Science и список ВАК. Результаты диссертационной работы А.В. Кривцовой неоднократно докладывались на научных конференциях. Все исследования проведены на высоком уровне, что, несомненно, демонстрирует высокую квалификацию соискателя.

Еще одной положительной особенностью диссертации является то, что автор не «склеивает» текст из работ, как это нередко бывает, а пишет каждый раздел как отдельный обобщающий текст. Хотя в диссертации автор допускает несколько вольное обращение с пунктуацией, но в целом работа хорошо написана и оформлена.

Как любое серьезное исследование, диссертация не свободна от **недостатков**. Перечислю основные:

1. В третьем разделе автор пишет о компенсации магнитных моментов подрешеток. На мой взгляд это утверждение не совсем корректно, поскольку в точке компенсации происходит компенсация спинов.
2. Хотелось бы, чтобы утверждение о том «...что фазовые переходы по тензорному параметру порядка по характеру близки к ориентационным фазовым переходам.» было более подробно расшифровано.
3. Было бы полезно более подробно обсудить перспективы изучаемых материалов в контексте современных экспериментальных исследований в области сверхбыстрого магнетизма.
4. В работе присутствуют опечатки и грамматические ошибки, хотя и не много.

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 ей ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент

Кандидат физико-математических наук по специальности 01.04.02 Теоретическая физика, старший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук»

Звездин Константин Анатольевич

Адрес:

119991, Москва, ул. Вавилова, 38

Телефон: +7 (499) 135-4148

e-mail: zvezdin.ka@phystech.edu

Подпись К.А. Звездина заверяю
врио ученого секретаря, зам. директора по науке
ИОФ РАН,
д.ф.-м.н. Глушков В.В.

