

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

МЕЛЕШКО АЛЕКСАНДРА ГЕННАДИЕВИЧА

«Влияние сильных релятивистских взаимодействий на динамические и статические свойства магнитоупорядоченных систем», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности

01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

Исследования в области физики конденсированного состояния традиционно являются основой для создания новых функциональных материалов и устройств с улучшенными или необычными физическими свойствами. Перспективным направлением, в этом отношении, является исследование фазовых состояний и спектров элементарных возбуждений двух- и трехмерных магнетиков с учетом влияния сильных релятивистских взаимодействий. Отметим, что магнитные наносистемы можно одновременно считать как микро-, так и макрообъектами, поскольку они обладают свойствами обоих. Поэтому исследования таких систем перспективны как с точки зрения прикладной, так и фундаментальной физики. Последнее обстоятельство объясняется тем, что экспериментальные данные возникающие при исследованиях всевозможных магнитных структур требуют теоретических обоснований, которые вносят вклад, как в теорию физики конденсированного состояния, так и в целом в теоретическую физику. В последние годы большое внимание уделяется исследованию магнетиков со сложной одноионной анизотропией. Поэтому диссертационная работа Мелешко А.Г., посвященная теоретическому исследованию фазовых состояний, условий их реализации и динамических особенностей гейзенберговских и негейзенберговских магнетиков, с учетом влияния релятивистских взаимодействий (одноионная анизотропия, магнитоупругое взаимодействие), является актуальной. Решение данных вопросов является важным и для практических приложений, т.к. позволяет описать физические свойства реальных магнитных материалов, используемых в современной твердотельной электронике.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, содержащих оригинальные результаты, и заключительной части, включающей основные результаты и выводы. Список использованных источников включает 208 наименований. Диссертация изложена на 142 страницах текста, содержит 16 рисунков.

В первом Разделе (Главе) диссертации исследованы динамические и статические свойства трехмерного магнетика, обладающего конкурирующими легкоплоскостной и «наклонной» одноионными анизотропиями, при произвольных соотношениях между материальными параметрами. Показано, что в такой системе возможна реализация двух фазовых состояний: ферромагнитного и квадрупольного. При этом, фазовый переход между ними является фазовым переходом первого рода и протекает через область сосуществования фаз. Причем, чем больше константа «наклонной» анизотропии, тем больше размер этой области. Наличие такой «наклонной» анизотропии является достаточно общим свойством многих магнитных систем, например эпитаксиальных пленок феррит-гранатов. То есть, фактически, в данном разделе достаточно подробно описана общая модель решения задачи о свойствах магнетиков с низкой моноклинной симметрией.

Во втором Разделе диссертации изучено влияние жестких механических граничных условий на свойства магнетика с конкурирующими одноионными анизотропиями, описанного в первом разделе. Показано, что фазовый переход между ферромагнитным и квадрупольным фазовыми состояниями не является переориентационным, вследствие чего размягчение квазиакустической ветви возбуждения в точке фазового перехода не наблюдается. Таким образом, динамическое проявление магнитоупругой связи отсутствует, что является интересным результатом, а влияние магнитоупругого взаимодействия приводит к статическим перенормировкам спектров квазимагнонов и квазифононов.

В третьем Разделе диссертационной работы исследовано влияние жестких механических граничных условий на свойства двумерной модели ферромагнетика с конкурирующими одноионными анизотропиями. В рассмотренной модели наблюдается изменение структуры спонтанных деформаций, в результате чего статические перенормировки спектров элементарных возбуждений существенно отличаются от случая трехмерной модели, рассмотренной во втором Разделе. Более того, учет магнитодипольного взаимодействия приводит к возникновению доменной структуры в области сосуществования ферромагнитной и квадрупольной фазовых состояний при любых соотношениях между конкурирующими одноионными анизотропиями. Необходимо отметить и важность исследований магнитоупорядоченных систем с учетом механических граничных условий, поскольку такой учет позволяет смоделировать конкретные экспериментальные условия (крепление образца в установке, магнитная пленка на подложке).

Материал четвертого Раздела посвящен исследованию так называемой «сверхтвердой» магнитной фазы, возникающей в процессе перемагничивания антиферромагнетика. Проблема изучения условий реализации сверхтвердой магнитной фазы, является актуальной проблемой физики магнитных явлений, что обуславливается ее принципиальными отличиями от стандартной спин-флоп фазы. Существует довольно много экспериментальных работ, в которых исследовалось сверхтвердое состояние, однако теоретических моделей на сегодняшний день недостаточно. Диссертантом показано, что в двумерной модели двухподрешеточного сильноанизотропного антиферромагнетика возможна реализация «сверхтвердой» магнитной фазы. Впервые исследовано влияние магнитодипольного взаимодействия на условия реализации этого состояния. Показано, что учет магнитодипольного взаимодействия приводит к реализации доменной структуры при определенных условиях.

Новизна результатов, представленных в данной диссертационной работе, заключается в том, что исследуются трех- и двумерные магнитоупорядоченные системы со спином магнитного иона  $S=1$ , обладающие сильной одноионной анизотропией. В таких системах квантовые флуктуации являются достаточно большими, что приводит к отклонениям от стандартного магнитного упорядочения, поскольку не сохраняется длина магнитного момента (эффект квантового сокращения спина). В результате этого, поведение магнитоупорядоченной системы выходит за рамки феноменологической теории. Для таких систем определены, так называемые, квадрупольные фазы, в которых даже при нулевой температуре намагниченность остается равной нулю. В данной работе так же впервые исследованы свойства таких магнетиков, с учетом реальных

взаимодействий (магнитодипольного и магнитоупругого) и реальных механических граничных условий.

Достоверность полученных результатов, основных выводов и научных положений диссертации не вызывает сомнения. Для проведения теоретических расчетов выбран основной метод, который надежно апробирован ранее при анализе модельных систем. Данный метод основывается на использовании когерентных состояний группы  $SU(3)$ , реализованных с представлением данных состояний с помощью операторов Хаббарда и их дальнейшего представления через Бозе-операторы. Проведено сравнение полученных результатов с аналогичными исследованиями других авторов. Полученные диссертантом результаты прошли широкую апробацию на профильных международных и российских конференциях, опубликованы в реферируемых журналах, признаны научным сообществом и цитируются, как российскими, так и зарубежными учеными.

Фундаментальная научная значимость результатов работы заключается в описании и исследовании фазовых состояний, области их существования и спектры элементарных возбуждений двух- и трехмерных гейзенберговских и негейзенберговских магнетиков с учетом влияния релятивистских взаимодействий (одноионная анизотропия, магнитоупругое взаимодействие). Впервые рассмотрена возможность реализации сверхтвердой магнитной фазы в ультратонкой сильноанизотропной пленке двухподрешеточного антиферромагнетика с фрустрированным изингоподобным взаимодействием. Модели, описанные в работе, обладают и практической ценностью, т.к. могут быть использованы при моделировании и создании магнитных материалов с заданными свойствами. Также, результаты диссертации могут быть использованы в учебных целях при подготовке специализированных курсов по физике конденсированного состояния и теории магнетизма. Значимость научных результатов диссертанта косвенно подтверждается финансовой поддержкой в виде грантов РФФИ, исполнителем которых он являлся.

Сделанные в диссертационной работе научные положения, выводы и заключения достаточно обоснованы и полностью отвечают задачам исследования и полученным результатам. Однако при ознакомлении с диссертацией, возникли некоторые вопросы и замечания, на которые хотелось бы получить пояснения:

1. Название диссертационной работы является излишне общим, т.к. в работе исследованы не все «магнитоупорядоченные системы», скорее некоторые и только ряд их свойств и возможных структур. Хотя это, конечно, не так просто, но в названии работы можно было попытаться более детализировать название решаемых задач.

2. В некоторых местах диссертации, ее текст страдает от излишней лаконичности, затрудняющей понимание представленного результата. Например, в разделе 2 на стр. 50 система алгебраических уравнений (2.8) не приведена после подстановки в нее выражения для свободной энергии системы (2.7), что не позволяет понять, можно или нельзя ее решить в общем виде. В разделе 3 на стр. 78 приводится выражение «Для определения спектров связанных магнитоупругих волн, построим функцию Грина, как было подробно описано в первом разделе. Тогда, решение дисперсионного уравнения, возникающее при определении полюсов функции Грина, позволяет определить спектры элементарных возбуждений в рассматриваемой нами УФМ фазе при ...». Далее в формуле (3.20) приводится вид спектра. Остается неясным из функции Грина какого вида он получен? В разделе 4 на стр.



101 приводится выражение «Решая стационарное уравнение Шредингера с гамильтонианом (4.3), получим, что энергетические уровни магнитного иона равны:...». В тексте диссертации не приведен вид полученного уравнения, не сказано о методе его решения. Если это уже простая, решенная ранее задача, надо было бы привести ссылку.

3. Во втором и третьем разделах на фазовых диаграммах указаны линии устойчивости ферромагнитной и квадрупольной фаз, определенные с помощью «численного анализа», но при этом нет пояснений - какие методы были использованы, при каких значениях параметров строилось численное решение.

4. В четвертом разделе приведена и описана фазовая диаграмма для случая ориентации волнового вектора, при котором реализуется пространственно неоднородное состояние, однако другой возможный случай магнитной фазы никак не оговаривается.

5. Результаты диссертационной работы, полученные с помощью теоретических расчетов, сильно бы выиграли, если бы в каждой оригинальной главе было проведено их сравнение с известными экспериментальными результатами, сделаны конкретные предложения по проведению новых экспериментов или прикладного использования полученных результатов.

6. Наконец, мелкие замечания по тексту и оформлению диссертации. Работа не лишена некоторого количества опечаток, орфографических ошибок и неточностей в изложении. Например, стр. 19 «В **реу**льтате вышесказанного...», стр. 22 «определяемым соотношением между константами анизотропий, и **квадур**польной фазы», стр. 44 «что приводит к гибридизации **упргу**их и ...». В разделе 1 присутствует рис.1.1, который повторяется под номерами 2.1 и 3.1. в разделах 2 и 3, хотя напрашивается просто ссылка на рис 1.1. На рис. 2.2. и 2.3 не приведены численные значения соотношения констант одноионных легкоплоскостной и наклонной анизотропий использованные для построения графиков. В списке литературы статьи №70 и №114 совпадают.

Сделанные замечания не снижают общего хорошего впечатления от диссертации, не затрагивают сущности проделанной работы и не влияют на общую положительную оценку работы в целом.

Результаты диссертационной работы представляют интерес для исследователей, специализирующихся в области изучения новых магнитных материалов и их свойств. В работе есть рекомендации для получения нужных свойств. Можно рекомендовать результаты диссертационной работы для использования в организациях, занимающихся исследованиями двумерных и трехмерных магнитных материалов. В частности, в их числе могут быть следующие научные организации: ИФМ имени М.Н. Михеева УрО РАН, ИФ им. Л.В. Киренского СО РАН - обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, ИОФ РАН, ФИ РАН, ИРЭ РАН, ИФМК УФИЦ РАН; образовательные: МГУ, СПбГУ, МФТИ (НИУ), УрФУ, СФУ, БашГУ и другие.

Представленные в диссертации материалы опубликованы в 5 статьях в научных журналах, входящих в Перечень ВАК, в БД Scopus, Web of Science и в 6 работах в сборниках тезисов научных конференций. Они прошли апробацию на всероссийских и международных научных конференциях, симпозиумах и семинарах, хорошо известны специалистам. Автореферат соответствует содержанию диссертации. Исходя из вышесказанного, считаю, что диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне. Актуальность и практическая значимость работы очевидны. Результаты могут быть востребованы как российскими, так и зарубежными исследователями в области

физики конденсированного состояния и наноматематизма. Представленная диссертация является самостоятельным и завершенным научным исследованием.

В заключение следует отметить, что диссертационная работа Мелешко А. Г. «Влияние сильных релятивистских взаимодействий на динамические и статические свойства магнитоупорядоченных систем» по актуальности, научной новизне и по совокупности результатов, полученных впервые, в полной мере соответствует профилю диссертационного совета, паспорту заявленной специальности и требованиям "Положения о порядке присуждения ученых степеней", а её автор, Мелешко Александр Геннадиевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент

Екомасов Евгений Григорьевич

профессор кафедры теоретической физики, Физико-технический институт,

ФГБОУ ВО «Башкирский государственный университет»,

доктор физико-математических наук, профессор

Адрес: ФГБОУ ВО «Башкирский государственный университет»,

450076, г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32

тел. +7(347)229-96-45,

e-mail: [ekomasoveg@gmail.com](mailto:ekomasoveg@gmail.com)

«28» августа 2019 г.

 Екомасов Е.Г.

