

## 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.

Развитие современной спинтроники в значительной мере базируется на исследовании новых магнитных материалов, зачастую с достаточно необычными свойствами. Достаточно отметить недавнее открытие новых магнитных фаз, сверхбыстрой динамики намагниченности в ферромагнитных материалах с точкой компенсации, скирмионных решеток и спиральных состояний в материалах с нарушением инвариантности относительно пространственной инверсии на границе между пленками типа ферромагнитный металл – тяжелый металл (таких как CoV/Pt или CoFe/Ta), богатую физику в гетероструктурах типа ферромагнетик/топологический изолятор. Обсуждается применение этих новых эффектов и структур для систем записи и обработки информации нового поколения, сходных с устройствами на цилиндрических магнитных доменах, но с масштабами до десятков нанометров. Интенсивно исследуются фазы спиновых систем с так называемым «скрытым порядком» (термин впервые использован для  $URu_2S_2$ ), в которых спонтанное нарушение вращательной симметрии обусловлено не средним значением спина на узле, то есть намагниченностью, а средними значениями спиновых мультиполей. Все это позволяет утверждать, что теоретическое изучение фундаментальных свойствах магнитоупорядоченных систем не только актуально для фундаментальной физики магнетиков, но принципиально важно для разработки элементной базы информационных и коммуникационных технологий.

Основной элемент новизны диссертационной работы А.Г.Мелешко определяется тем, что в ней состояния магнитных материалов исследуются с выходом за рамки обычной феноменологической теории, в которой состояния спиновой системы определяется только вектором намагниченности (или, для антиферромагнетиков или ферромагнетиков,

векторами намагниченностей подрешеток). Положения стандартной феноменологической теории нарушаются, если в магнетике достаточно сильны так называемые негејзенберговские взаимодействия, например, одноионная анизотропия. Примеры модельных 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 всех 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). Новизна данной работы состоит в том, что фазы такого типа впервые исследованы в реальной геометрии, типа пленок на подложке, и с учетом реальных взаимодействий, включая магнито-дипольное и магнитоупругое взаимодействия, «наклонную» магнитную анизотропию. Впервые для магнетиков с учетом квадрупольных степеней свободы исследованы пространственно-неоднородные состояния типа доменных структур.

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 и их последующего представления через бозонные операторы (автор пишет: «метод бозонизации операторов Хаббарда»).

Перейдем к обсуждению конкретных результатов, полученных в диссертационной работе. Работа состоит из раздела «Введение», четырех разделов, содержащих оригинальные результаты соискателя, заключения и списка цитируемых источников.

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.



**Первый раздел** диссертации посвящен исследованию динамических и статических свойств трехмерного магнетика обладающего легкоплоскостной и «наклонной» одноионными анизотропиями при произвольных соотношениях между материальными параметрами. Определены фазовые состояния такой системы при различных соотношениях констант одноионной анизотропии и обменного взаимодействия. 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 размер этой промежуточной фазы коррелирует с величиной константы «наклонной» анизотропии.

Необходимо отметить, что учет «наклонной» анизотропии характерен, например, для эпитаксиальных пленок феррит-гранатов. То есть, фактически, в данном разделе достаточно подробно описана достаточно общая модель магнетиков со сложной симметрией.

Во **втором и третьем разделах** диссертации подробно изучено влияние механических граничных условий на магнитные состояния магнетиков со сложной одноионной анизотропией, включающей конкуренцию как наклонной анизотропии (о которой шла речь в первом разделе), так и легкоплоскостной. Автор не ограничивается рассмотрением только трехмерной системы, но исследует также влияние механических граничных условий на фазовые состояния и динамические свойства ультратонких магнитных пленок. Важность таких исследований состоит, прежде всего, в том, что такие системы позволяют смоделировать либо конкретные экспериментальные условия крепления образца, либо магнитную пленку на подложке, что является крайне важным для экспериментаторов, работающих в данной области. Полученные в данном разделе результаты показывают влияние граничных условий на смену типа фазового перехода, а также на изменение динамических свойств системы, т.е. квазиакустическая ветвь возбуждений в окрестности фазового перехода перестает быть «мягкой» - переход не является переориентационным, а связан с изменением модуля магнитного момента. Это достаточно интересный результат.

Кроме того, учет магнитодипольного взаимодействия в магнитной пленке, проведенный **в третьем разделе**, позволяет утверждать о возникновении доменной структуры в области сосуществования ферромагнитной и квадрупольной фазовых состояний при любых соотношениях между конкурирующими одноионными анизотропиями. Показано, что в случае большой легкоплоскостной анизотропии,

превосходящей константу наклонной анизотропии, возможны три состояния: два однородных, а именно, угловая ферромагнитная фаза и квадрупольная фаза, и фаза с неоднородным распределением намагниченности. Переход между однородными фазами идет через неоднородную (доменную) фазу.

**В четвертом разделе** рассмотрена возможность реализации сверхтвердой магнитной фазы в ультратонкой пленке двухподрешеточного изингоподобного антиферромагнетика с большой одноионной анизотропией типа легкая плоскость. Проблема изучения условий реализации сверхтвердой магнитной фазы, является актуальной проблемой физики магнитных явлений, что обуславливается принципиальными отличиями от стандартной спин-флоп фазы. Существует довольно много экспериментальных работ, в которых исследовалось сверхтвердое состояние, однако теоретических моделей на сегодняшний день недостаточно. Автором показано, что в двумерной модели двухподрешеточного сильноанизотропного антиферромагнетика возможна реализация «сверхтвердой» магнитной фазы. Более того впервые исследовано влияние магнитодипольного взаимодействия на условия реализации «сверхтвердого» состояния. Показано, что учет магнитодипольного взаимодействия приводит к реализации доменной структуры в при определенных условиях.

Уместно отметить некоторое общее следствие результатов, полученных в работе. В теории фазовых состояний негејзенберговских магнетиков давно существует проблема. Для достаточно широкого класса таких систем, не только для спина  $S=1$ , но и для спина  $S=3/2$ , переходы между квадрупольными и магнитными фазами являются вырожденными, то есть различие фаз в точке перехода не мало, параметры порядка изменяются скачком, но область сосуществования фаз отсутствует. Фактически, мы имеем дело с вырожденными переходами первого рода. Полученные в диссертационной работе результаты впервые решили эту давнюю проблему, указав различные типы промежуточных фаз или продемонстрировав конечную область сосуществования фаз. Таким образом, в диссертационной работе исследован широкий класс моделей негејзенберговских магнетиков с различными типами как обменных, так и релятивистских взаимодействий.

Данная диссертационная работа представляет собой полное и последовательное теоретическое исследование совокупности важных проблем теории конденсированных сред. Формулировка моделей и проведение их исследований потребовало от автора глубокого знания физики и использования достаточно сложного математического аппарата,

применения техники операторов Хаббарда для спиновых систем и продемонстрировало его высокую квалификацию как исследователя. Личный вклад А.Г. Мелешко в разработку данной научной проблемы, как и в ряд других исследований, проводимых в последние годы в Крымском федеральном университете можно оценить как высокий.

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

- В первых трех разделах работы исследуется магнетик с конкурирующими легкоплоскостной и «наклонной» одноионными анизотропиями, однако обе эти анизотропии – проявление одного и того же взаимодействия. Как в этом случае они могут конкурировать? На мой взгляд использование понятия «конкуренция» не уместно для ситуации, когда в системе рассматривается просто различное соотношение между константами анизотропий.

-Автор несколько вольно обращается с терминологией, зачастую используя «физический сленг». Так, например, термин “бездисперсионное возбуждение” никак не синоним для понятия “локализованное возбуждение”

-Все диссертационные задачи рассматриваются для случая низких температур. Что же будет происходить в рассматриваемых моделях, если температура не мала? Это очень важно для оценки возможности использования рассматриваемых эффектов при создании реальных спинтронных устройств.

Приведенные выше замечания не ставят под сомнение основные выводы диссертационной работы и не влияют на оценку достоверности, важности и новизны представленных в ней результатов. Основные результаты диссертации своевременно опубликованы в ведущих журналах. Материалы диссертации были представлены на престижных конференциях и семинарах. Автореферат полностью и правильно отражает содержание диссертации. Учитывая актуальность избранной темы исследований, научную новизну, практическую ценность, важность и завершенность результатов, считаю, что диссертация **«Влияние сильных релятивистских взаимодействий на динамические и статические свойства магнитоупорядоченных систем»** выполнена на высоком уровне и является законченной научно-квалификационной работой, которая соответствует требованиям "Положения

о порядке присуждения ученых степеней", а ее автор, **Мелешко Александр Геннадиевич**, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния».

Официальный оппонент

Кандидат физико-математических наук по специальности 01.04.02  
Теоретическая физика

Старший научный сотрудник ИОФ РАН



Звездин Константин Анатольевич

Адрес:

119991, Москва, ул. Вавилова, 38

Телефон: +7 (499) 135-4148

e-mail: [zvezdin.ka@phystech.edu](mailto: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.

