

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор
Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
«Институт радиотехники и
электроники им. В.А. Котельникова
Российской академии наук»

член-корреспондент РАН,
профессор,



 С.А. Никитов

« 14 » августа 2019 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Мелешко А.Г. «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.

Диссертационная работа Мелешко Александра Геннадиевича посвящена актуальной теме физики конденсированного состояния - теоретическому анализу фазовых состояний и спектров элементарных возбуждений магнитоупорядоченных систем (как ферро-, так и антиферромагнетиков), обладающих целым рядом специфических свойств, таких как, например, эффект квантового сокращения спина.

Как было впервые показано Мория при $\frac{\beta}{2J_0} > 1$, даже при абсолютном нуле

температур ($T = 0$) в отсутствие внешнего поля реализуется немагнитное, квадрупольно - упорядоченное (КУ) основное состояние. Такого рода магнитоупорядоченные системы получили название негейзенберговских, поскольку в этом случае модуль магнитного момента не сохраняется, и, следовательно, динамику магнитного момента невозможно описывать в рамках уравнения Ландау-Лифшица. Интерес к магнетикам с большой одноионной анизотропией прежде всего обусловлен тем, что в таких системах квантовые свойства отдельных спинов в эффективном магнитном поле играют решающую роль в формировании динамических и термодинамических свойств магнетиков. Это обстоятельство, в свою очередь, является важным в такой прорывной области физики конденсированного состояния и компьютерных технологий как спинтроника. Изменение фазовых состояний, типов фазовых переходов, возникновение так называемых продольных спиновых волн – все эти эффекты наблюдаются в негейзенберговских магнетиках. Кроме того, учет

надеясь на приближение теоретических моделей двух- и трехмерных магнетиков к реальным системам. Учет механических граничных условий, который проведен в рассматриваемой диссертационной работе позволяет более адекватно интерпретировать экспериментальные результаты. Таким образом, **актуальность** диссертационной работы Мелешко А.Г. не вызывает сомнений.

Рецензируемая диссертация имеет традиционную структуру и включает введение, четыре раздела, представляющие оригинальные результаты, заключения и списка используемых источников из 208 наименований. Общий объем диссертации составляет 142 страниц текста с 16 рисунками.

Результаты, вошедшие в диссертационную работу, были опубликованы в 1 коллективной монографии, в 5 статьях в журналах, входящих в список ВАК Российской Федерации, а также входящие в наукометрическую базу SCOPUS, и в 6 докладах, опубликованных в материалах конференций. Материалы диссертации докладывались на научных конференциях разного уровня, включая международные, и хорошо известны специалистам.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи работы, аргументированы научная новизна и практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

В первом разделе исследуются свойства трехмерного ферромагнетика со спином магнитного иона равным единице ($S=1$) и конкурирующими легкоплоскостной и наклонной одноионными анизотропиями. Исследования проводятся в области низких температур, много меньших температуры Кюри, где рассматриваемые эффекты проявляются наиболее сильно. Особое внимание уделяется исследованию сильно анизотропных магнетиков, т.е. магнитной системы, в которой энергия одноионной анизотропии сравнима, или даже превосходит энергию обменного взаимодействия. В этом случае в магнетике реализуется так называемое квадрупольное упорядочение, которое характеризуется компонентами тензора квадрупольных моментов, а среднее значение магнитного момента (на узле) равно нулю. При этом, автор аргументированно доказывает, что такое состояние магнетика не является парамагнитным. В случае, если энергия анизотропии много меньше энергии обменного взаимодействия, в системе реализуется ферромагнитное состояние, которое автор назвал угловой ферромагнитной фазой. Такая терминология обусловлена тем, что учет влияния наклонной анизотропии приводит к тому что вектор магнитного момента ориентирован под некоторым углом к оси квантования. Причем, величина этого угла определяется соотношением констант угловой и легкоплоскостной одноионных анизотропий.

Анализ спектров элементарных возбуждений, основанный на методе функций Грина для операторов Хаббарда, позволил определить спектры элементарных возбуждений как в угловой ферромагнитной фазе, так и в квадрупольной, что, в свою очередь, дает возможность найти линии фазового перехода и определить его тип. Проведенный анализ задачи позволил автору построить фазовую диаграмму исследуемой системы, и показать, что фазовый переход между устойчивыми состояниями является переходом первого рода, а сама фазовая диаграмма существенно зависит от соотношения между константами наклонной и легкоплоскостной анизотропий.

Во втором разделе определено влияние механических граничных условий на динамические и статические свойства сильноанизотропного ферромагнетика с

конкурирующими легкоплоскостной и наклонной анизотропиями. В качестве исследуемой системы рассмотрен магнетик со спином магнитного иона равным единице ($S=1$), зафиксированный по плоскости ZOY. Выбор механических граничных условий обусловлен тем, что в плоскостях ZOX и XOY действует одноионная анизотропия приводящая к возникновению магнитоупорядоченных состояний с нулевой намагниченностью. Поэтому в этих плоскостях механические граничные условия не накладываются, чтобы влияние легкоплоскостной и наклонной анизотропий было максимальным. Учет механических граничных условий проводится путем включения в гамильтониан системы упругой и магнитоупругой энергий, с учетом наложенных ограничений.

Как и в ранее рассмотренном случае, в магнетике возможна реализация двух устойчивых состояний: угловой ферромагнитной фазы, характеризуемой векторным параметром порядка, и квадрупольного состояния, характеризуемого компонентами тензора квадрупольных моментов. При этом, равновесная ориентация магнитного момента в ферромагнитном состоянии характеризуется не только соотношением констант анизотропии, но и компонентами тензора спонтанных деформаций.

Учет магнитоупругого взаимодействия приводит к тому, что элементарные возбуждения в обеих устойчивых фазах представляют собой связанную магнитоупругую волну. Использование модифицированной техники для функций Грина позволило автору определить спектры квазимагнонов и квазифононов, исходя из анализа которых были получены линии фазового перехода, а также показать, что данный фазовый переход первого рода не является переориентационным.

В третьем разделе рассматриваются статические и динамические свойства ультратонкой ферромагнитной пленки с конкурирующими легкоплоскостной и наклонной одноионными анизотропиями с учетом механических граничных условий. Описана исследуемая модель двумерной ферромагнитной пленки, жестко закрепленной по плоскости ZOY, обладающая легкоплоскостной анизотропией, действующей в базисной плоскости пленки (плоскость XOY) и наклонной анизотропией, действующей в плоскости ZOX. Поскольку рассматриваемая система является практически двумерной, то для нее существенным будет учет влияния магнитодипольного взаимодействия. Анализ спектров квазимагнонов показал, что учет влияния магнитодипольного взаимодействия приводит не только к статической перенормировке спектров, но и к возникновению линейного по волновому вектору слагаемого. Причем это слагаемое имеет отличный знак от стандартного закона дисперсии. Последнее обстоятельство означает, что потеря устойчивости спектра квазимагнонов будет наблюдаться не при нулевом значении волнового вектора, а при некотором критическом значении, отличным от нуля. В результате такого поведения спектра квазимагнонов, одному значению энергии возбуждения может соответствовать два различных значения волнового вектора, что свидетельствует о том, что в системе реализуется пространственно неоднородное («доменное») состояние. Период неоднородности зависит не только от ориентации волнового вектора в базисной плоскости пленки, но и от равновесного угла ориентации вектора намагниченности. На основе исследований фазовых состояний и спектров элементарных возбуждений была построена фазовая диаграмма жестко закрепленной ультратонкой ферромагнитной пленки с конкурирующими легкоплоскостной и наклонной анизотропиями.

В четвертом разделе рассмотрена возможность реализации сверхтвердой магнитной фазы в ультратонкой пленке двухподрешеточного изингоподобного антиферромагнетика с большой одноионной анизотропией типа легкая плоскость. В случае, когда внешнее магнитное поле принимает промежуточное значение между полями перехода в ферромагнитной (ФМ) и квадрупольноупорядоченной (КУ) фазы, то при таком соотношении параметров системы, конкуренция внешнего магнитного поля, обменных взаимодействий между узлами одной подрешетки и между узлами разных подрешеток, а также одноионная анизотропия усиленная магнитодипольным взаимодействием приводит к ориентации магнитных моментов не параллельно внешнему полю, а под некоторым углом к нему. При этом важным является тот факт, что антиферромагнитное упорядочение в системе обуславливает различное отклонение магнитных моментов от оси квантования для узлов разных подрешеток. Такое состояние принято называть сверхтвердым состоянием. На основе полученных результатов построена качественная фазовая диаграмма сильноанизотропной двухподрешеточной ультратонкой пленки с изингоподобным обменным взаимодействием.

К наиболее интересным новым результатам работы следует отнести следующие.

1. Впервые исследован ферромагнетик с конкурирующими легкоплоскостной и наклонной одноионными анизотропиями для произвольных соотношений между материальными параметрами. Показано, что в системе возможно существование угловой ферромагнитной фазы, с углом ориентации вектора намагниченности, определяемым соотношением между константами анизотропий. При больших значениях одноионных анизотропий в системе реализуется квадрупольное состояние с нулевым значением намагниченности на узле, описываемое тензорным параметром порядка. Получены аналитические выражения для спектров магнонов и линий потери устойчивости каждой фазы. Показано, что фазовый переход между ферромагнитным и квадрупольным состояниями является фазовым переходом первого рода и протекает через промежуточное квадрупольно-ферромагнитное состояние, описываемое как векторным, так и тензорным параметром порядка.
2. Впервые исследовано влияние механических граничных условий на свойства ферромагнетика с конкурирующими легкоплоскостной и наклонной одноионными анизотропиями. Показано, что в системе возможна реализация как ферромагнитного, так и квадрупольного фазовых состояний. При этом влияние магнитоупругого взаимодействия на магнитную подсистему сводится лишь к статическим перенормировкам спектров квазимагнонов, приводя к возникновению аддитивной добавки в энергетической щели. Влияние магнитной подсистемы на упругую приводит к изменению скоростей звука в системе в угловой ферромагнитной фазе. В квадрупольной фазе скорости звука не перенормируются магнитоупругим взаимодействием, что связано с равенством нулю вектора намагниченности на узле. Показано, что фазовый переход между угловым ферромагнитным и квадрупольным фазовыми состояниями ферромагнетике с конкурирующими легкоплоскостной и наклонной одноионными анизотропиями при учете механических граничных условий является фазовым переходом первого рода и протекает через

промежуточное квадрупольно-ферромагнитное состояние. В точке фазового перехода квазиакустические возбуждения не размягчаются, и фазовый переход протекает по квазимагнитной ветви возбуждения. Последнее обстоятельство связано с тем, что рассматриваемый фазовый переход не является переориентационным.

3. Впервые исследованы динамические и статические свойства ультратонкой ферромагнитной пленки с конкурирующими легкоплоскостной и наклонной одноионными анизотропиями с учетом механических граничных условий. Показано, что в такой системе возможна реализация углового ферромагнитного и квадрупольного состояний. Более того, в исследуемой ультратонкой пленке существенное влияние оказывает магнитодипольное взаимодействие, учет которого приводит к усилению легкоплоскостной анизотропии. Фазовый переход между угловой ферромагнитной и квадрупольной фазами является переходом первого рода и не является переориентационным. Динамическое проявление магнитодипольного взаимодействия заключается в возникновении в спектре квазимагнонов линейного по волновому вектору слагаемого, в результате чего, одному значению энергии возбуждений может соответствовать различные значения волнового вектора, что свидетельствует о реализации пространственно неоднородного состояния с периодом неоднородности, значение которого существенно зависит от материальных параметров системы и от ориентации волнового вектора в базисной плоскости пленки.
4. Впервые исследована возможность существования сверхтвердой магнитной фазы в двумерной модели сильноанизотропного двухподрешеточного магнетика с фрустрированным изингоподобным обменным взаимодействием. В случае сильного внешнего магнитного поля в системе реализуется ферромагнитное состояние, а в случае слабого внешнего магнитного поля – квадрупольное состояние. Показано, что при промежуточных значениях внешнего магнитного поля между линиями устойчивости ферромагнитного и квадрупольного состояний антиферромагнитное упорядочение в системе приводит к тому, что магнитные моменты узлов различных подрешеток отклоняются от направления магнитного поля по-разному. При этом учет магнитодипольного взаимодействия приводит к возникновению пространственно-неоднородного состояния при определенной ориентации волнового вектора в базисной плоскости пленки.

Практическая значимость В работе исследуются свойства различных магнитоупорядоченных систем, проводится анализ возможных фазовых состояний, фазовых переходов и динамических особенностей, а также влияние на них разных магнитных взаимодействий. В итоге автором исследован ряд теоретических моделей. Результат исследований хорошо согласуются с экспериментальными данными, что может быть использовано при подготовке и проведении экспериментов, а также для интерпретации и анализа экспериментальных результатов. Описанные в работе модели могут быть использованы при моделировании и создании магнитных материалов с заранее заданными свойствами для применений в устройствах микроэлектроники и спинтроники. Также, результаты диссертации могут быть использованы в учебных целях при подготовки специализированных курсов по физике твердого тела и теории магнетизма.

Достоверность полученных результатов подтверждается выбором теоретических методов для решения поставленных задач диссертационной работы, обеспечивающий наиболее точный учет влияния исследуемых взаимодействий. Полученные результаты хорошо согласуются с уже известными результатами, полученными ранее в других работах, а также подтверждаются известными экспериментальными данными. Результаты, полученные из численных расчетов по аналитическим выражениям соответствуют известным данным прямого компьютерного моделирования.

По рецензируемой диссертационной работе можно указать на следующие замечания и вопросы:

1. В названии работы употребляется термин «сильное релятивистское взаимодействие». Это может дезориентировать читателя. Так как этот термин может быть воспринят как аналогия с одним из четырёх фундаментальных взаимодействий «сильное ядерное взаимодействие» в физике, при котором участвуют кварки и глюоны и составленные из них адроны (барионы и мезоны). Оно действует в масштабах порядка размера атомного ядра и менее, отвечая за связь между кварками в адронах и за притяжение между нуклонами.

2. В работе недостаточно четко сформулирована связь постановки задач и результатов с известными экспериментальными данными других авторов.

3. В третьем разделе диссертационной работе не четко сформулированы граничные условия, соответствующие фиксации магнитной системы ультратонкой магнитной пленки по плоскости, ортогональной ее плоскости.

4. Во втором и третьем разделах при формулировке граничных условий для упругой подсистемы объемного образца и пленки указано на фиксацию компонент вектора смещений по осям Oz и Oy , однако смещение по оси Ox не оговаривается. Почему?

5. Во втором и третьем разделах диссертации автор приводит фазовые диаграммы, на которых численно рассчитаны линии потери устойчивости фаз при некоторых значениях констант наклонной и легкоплоскостной анизотропий (рис. 2.4, рис. 3.3, и рис. 3.4). Однако в работе нигде не указано, каковы материальные параметры системы, для которых эти расчеты выполнялись, и насколько эти параметры реалистичны.

Все отмеченные замечания не снижают общую положительную оценку работы, ее научную и практическую значимость.

Диссертация логично построена, ее структура и содержание соответствуют цели и задачам исследования. Работа ясно изложена и достаточно хорошо оформлена за исключением небольшого числа опечаток и стилистических неточностей. Личный вклад автора в диссертационную работу не вызывает сомнения. Автореферат адекватно отражает содержание диссертации. Опубликованные работы автора хорошо известны научной общественности.

Результаты работы могут быть использованы в научно-исследовательских организациях и вузах, занимающихся исследованиями в области физики магнитных явлений, физики конденсированного состояния и проблем материаловедения, в частности в Крымском федеральном университете им. В.И. Вернадского, Донецком физико-техническом институте им. А.А. Галкина, Институте физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН и др.

На основании изложенного выше можно заключить, что диссертация Мелешко Александра Геннадиевича «Влияние сильных релятивистских взаимодействий на динамические и статические свойства магнитоупорядоченных систем» является законченной научно-квалификационной работой, в которой получены новые результаты, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение в области теоретических исследований магнетиков с сильными релятивистскими взаимодействиями. По актуальности темы исследования, научной новизне, практической значимости и достоверности полученных результатов, обоснованности выводов и положений представленная диссертационная работа удовлетворяет требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Мелешко Александр Геннадиевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 - физика конденсированных состояний.

Отзыв на диссертационную работу Мелешко Александра Геннадиевича обсужден и одобрен на научно-квалификационном семинаре «Физика твердого тела, магнитных и акустических явлений» ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН (протокол № «2/19» от 12 апреля 2019 г.)

Председатель семинара,
доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник,
ведущий научный сотрудник
ФГБУН «Институт радиотехники и
электроники имени В.А. Котельникова
Российской академии наук»
125009, г. Москва, ул. Моховая 11/7
Тел.: +7 (495) 629-35-06
E-mail: koledov@cplire.ru

Коледов Виктор Викторович

Секретарь семинара,
кандидат физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник лаборатории
магнитных явлений в микроэлектронике
ФГБУН «Институт радиотехники и
электроники имени В.А. Котельникова
Российской академии наук»
125009, г. Москва, ул. Моховая 11/7
Тел.: +7 (495) 629-35-06
E-mail: kotov.slava@gmail.com

Котов Вячеслав Алексеевич