

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Терещенко Алексея Анатольевича «Исследование упругих и магнитоупругих взаимодействий в магнетиках на основе 3d – переходных элементов», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния.

Магнитоупругие возбуждения в магнетиках представляют собой исторически первый пример связанных волн или гибридизированных квазичастиц. Более того, в этом случае магнетик представляет собой систему из двух взаимодействующих полей – намагниченности и деформаций, в которой имеет место *спонтанное нарушение симметрии* ферро- или антиферромагнитного упорядочения. И в этом смысле такая система является аналогом модели Хиггса в квантовой теории поля.

В большинстве магнитоупорядоченных систем константа магнитоупругого взаимодействия является самой слабой по сравнению с другими параметрами системы. Однако, несмотря на это магнитоупругая связь является определяющей, например, в окрестности переориентационных фазовых переходов («смягчение» квазифононной ветви возбуждений), или в окрестности магнитоакустического резонанса («расталкивание» квазимагнонной и квазифононной ветвей возбуждений). Исследования магнитоупругого взаимодействия имеют не только академический интерес, но и большие прикладные перспективы. Так, связь между механическими напряжениями и магнитными свойствами в твердых телах лежит в основе новой отрасли электроники, иногда называемой стрейнэлектроникой. Так, за счет управления упругими деформациями можно создавать устройства спинтроники со сверхнизким энергопотреблением. Еще одной важной прикладной задачей является изменение намагниченности при помощи магнитоупругого взаимодействия, формирующего дополнительную магнитную анизотропию.

Представленная на рассмотрение диссертационная работа Терещенко Алексея Анатольевича посвящена исследованию эффектов, связанных с учетом магнитоупругого взаимодействия в магнитоупорядоченных системах. Особенностью этой работы, отличающей ее от многих других исследований, является то, что автор рассматривает эффекты магнитоупругой связи в магнетиках с геликоидальной магнитной структурой. Причем, наличие геликоидальной структуры обусловлено взаимодействием Дзялошинского, а не фрустрацией обменного взаимодействия, как это обычно и рассматривается.

Хотя данная диссертационная работа является сугубо теоретическим исследованием, тем не менее автор применяет полученные результаты к исследованию конкретного класса магнитоупорядоченных систем, а именно, к изучению свойств дихалькогенидов переходных металлов с длиннопериодической геликоидальной магнитной структурой. Эти материалы обладают целым рядом

необычных, и я бы даже сказал, уникальных свойств, таких как существование хиральной магнитной солитонной решетки, скачки намагниченности и магнитосопротивления, спиновый резонанс на коллективных возбуждениях солитонной решетки и стоячих спиновых волнах. Эти и другие свойства открывают широкие перспективы использования этого материала в твердотельных устройствах спинтроники, но и требуют глубокого теоретического изучения.

Таким образом, все вышесказанное позволяет сделать вывод, что проведенные автором в данной работе **исследования несомненно являются актуальными**, и могут иметь важное значение как с точки зрения фундаментальной физики, так и для решения прикладных задач.

Диссертация Терещенко А.А. посвящена решению нескольких интересных задач, связанных одной общей идеей – учетом влияния магнитоупругого взаимодействия в геликоидальных магнетиках. Так, в рамках этой парадигмы впервые построена теория магнитоакустического резонанса для фазы магнитной солитонной решетки одноосного хирального гелимагнетика, впервые исследованы динамические свойства нецентросимметричного кристалла на примере слоистого соединения CrNb_3S_6 , предложена теория возникновения петель магнитного гистерезиса для изинговского ферромагнетика, и ряд других интересных теоретических моделей. Таким образом, **новизна и оригинальность впервые** полученных в данной работе результатов не вызывает никаких сомнений.

Достоверность результатов работы обусловлена корректным использованием разнообразного аппарата теоретической физики. Причем, при рассмотрении конкретной задачи используется математический аппарат, наиболее адекватный данной проблеме. Так, например, при исследовании распространения ультразвука вблизи кроссовера «низкий спин – высокий спин» используется метод функций Грина; при определении дифрактограммы спиновых конфигураций используются решения модели двойного синус-Гордона, и т.д. Такое разнообразие математических методов лишь подтверждает высокую квалификацию автора диссертации.

Диссертация представлена стандартным образом: состоит из хорошо и подробно написанного введения, пяти глав, содержащих оригинальные результаты, заключения и списка литературы.

Во **введении** проведен анализ проблемы, раскрыта ее важность; сформулированы цели и поставлены задачи исследований; указаны достоверность, актуальность и область применимости полученных в диссертации результатов.

В **первой главе** рассматривается задача о распространении квазимагнитной и квазиакустической волн вдоль геликоидальной оси хирального гелимагнетика гексагональной симметрии. Расчет спектра магнитоупругих волн для двух ориентаций внешнего магнитного поля (параллельно геликоидальной оси и

перпендикулярно к ней) позволил определить специфику спектров для различных магнитных фаз одноосного хирального гелимагнетика.

В конической фазе закон дисперсии проявляет существенную невязанность относительно смены знака волнового вектора. Для численных расчетов использовались параметры соединения CrNb_3S_6 . Соответствующая асимметрия запрещенных зон магнитоупругих волн оказывается зависящей от внешнего магнитного поля, что позволяет говорить о возможности управления магнитоакустическим резонансом с помощью магнитного поля. В фазе магнитной солитонной решетки спектр демонстрирует мультирезонансное поведение. В отличие от конической фазы солитонная решетка описывается нелинейной магнитной конфигурацией, которая при малом внешнем магнитном поле характеризуется набором гармоник. С каждой из этих гармоник связано появление дополнительных акустических ветвей в спектре магнитоупругих волн.

Во **второй главе**, в рамках микрополярной теории упругости, учитывающей как поле поступательных смещений, так и поле микровращений, исследовано распространение микрополярных упругих волн вдоль хиральной оси в нецентросимметричном кристалле на примере соединения CrNb_3S_6 . В работе установлено, что при определенном выборе параметров модели акустическая ветвь спектра циркулярно-поляризованных поперечных мод демонстрирует минимум, связанный с гибридизацией вращательных и поступательных степеней свободы. Причем, этот минимум напоминает ротонный минимум в спектре сверхтекучего гелия. В рассматриваемой в диссертации модели конечность ротонно-подобного минимума определяется условием устойчивости кристалла при распространении микрополярных упругих волн. Исходя из этого автор формулирует механизм возникновения ротонно-подобного минимума – в результате гибридизации при распространении акустической поперечной волны возбуждаются вращательные моды, которые стремятся разрушить дальний кристаллический порядок.

В **третьей главе** диссертации дано объяснение результатов исследования магнитного порядка в тонкой пленке CrNb_3S_6 , помещенной во внешнее магнитное поле и подвергнутой растягивающему механическому напряжению, с помощью просвечивающей лоренцевой электронной микроскопии. Деформации, вызванные механическим растяжением, приводят к появлению эффективной магнитной анизотропии, ось которой может быть ориентирована либо вдоль внешнего магнитного поля, либо перпендикулярно к нему в зависимости от значений соответствующих одноионных магнитоупругих постоянных. При этом хиральная магнитная солитонная решетка искажается в присутствии дополнительной магнитной анизотропии, что соответствует трем различным решениям стационарного уравнения двойного синус-Гордона. Сравнением теоретических профилей лоренцевой электронной микроскопии с экспериментальными данными

показало, что в тонкой пленке CrNb_3S_6 при указанных внешних воздействиях реализуется несоизмеримая 1S-фаза модели двойного синус-Гордона.

В **четвертой главе** рассматривается теория магнитного гистерезиса, обнаруженного экспериментально в соединении $\text{Fe}_{0.5}\text{TiS}_2$. Этот материал, в отсутствие внешнего поля представляет собой антиферромагнетик, однако, в процессе перемагничивания при низких температурах наблюдаются широкие петли гистерезиса, типичные для изинговского ферромагнетика. Для объяснения этого явления автором предложена модель, учитывающая поправки к молекулярным полям двухподрешеточной модели Изинга, вносимые обменным магнитоупругим взаимодействием. Соответствующие уравнения среднего поля для намагниченностей подрешеток ионов железа позволяют на качественном уровне воспроизвести температурное поведение формы петель магнитного гистерезиса.

Пятая глава диссертации посвящена исследованию распространения ультразвуковых волн вдоль направления $[100]$ в сильноанизотропном ферромагнетике LuCo_2 вблизи кроссовера «низкий спин – высокий спин», индуцированного сверхсильным внешним магнитным полем. Используя формализм мацубаровских функций Грина, показано, что магнон-фононное взаимодействие в форме так называемого механизма Уоллера обеспечивает канал рассеяния фононов на магнонах. Этот канал активируется при достижении некоторого критического значения намагниченности в процессе кроссовера, что приводит к резонансному поглощению фононов за счет переходов между магнонными состояниями при распространении ультразвука. Показано, что вероятность процессов рассеяния фононов на магнонах пропорциональна температурной заселенности магнонной зоны, что приводит к эффективному усилению магнон-фононного взаимодействия с ростом температуры.

В **заключении** автор формулирует основные результаты диссертационной работы.

Приведенные в моем кратком обзоре результаты, полученные автором диссертации, и составляющие ее основу, являются **новыми, актуальными**, и приносят вклад в исследования магнетиков. Но некоторые результаты этой работы я бы хотел выделить особо.

Так, хорошо известно, что учет магнитоупругого взаимодействия приводит к возникновению в спектре квазимагнонов магнитоупругой щели, а спектр квазифононов, при $k = 0$, сильно «деформируется», и становится квадратичным по волновому вектору, в собственно и проявляется спонтанное нарушение симметрии, о котором я упомянул в начале своего отзыва. Однако, как убедительно показал автор диссертации (см. стр. 31-32), в случае геликоидального магнетика симметрия упругой подсистемы спонтанно нарушена на уровне основного состояния из-за появления неоднородных равновесных деформаций $u_{xz}^{(0)}(z)$ и $u_{yz}^{(0)}(z)$, в результате чего на динамическом уровне взаимодействие упругой и магнитной подсистем не

сопровождается спонтанным нарушением симметрии, что объясняет отсутствие магнитоупругой щели в спектре магнитоупругих волн при $k = 0$. Таким образом, все моды связанных спиновых и ультразвуковых волн, распространяющихся вдоль геликоидальной оси, оказываются голдстоуновскими. Как мне кажется, это очень интересный и неожиданный результат, который сразу же формирует вопрос: а какая же мода в этом случае является «мягкой», т.е. **по какой ветви пойдет фазовый переход?**

Еще один любопытный результат, на который хотел бы обратить внимание — это магнитоакустический резонанс в фазе солитонной решетки. Как показано в работе, в фазе магнитной солитонной решетки, возможно, мультирезонансное поведение магнитоакустического резонанса, обусловленное нелинейностью азимутального угла. Такое поведение согласуется с мультирезонансным характером других явлений, связанных с солитонной решеткой, например, дифракции нейтронов, магнитосопротивления и спинового резонанса.

Автореферат диссертации написан ясно, хорошим языком, полно и правильно отражает основные результаты, представленные в диссертации. Очень хорошее впечатление оставляет и список публикаций, на основе которых построена диссертационная работа.

Однако, как любое серьезное исследование, данная работа обладает рядом недоговоренностей и неточностей, что вызывает вопросы. Один из таких вопросов я сформулировал выше. Что касается остальных вопросов, то они следующие:

1. Автор пишет, что рассматриваемые в работе магнетики обладают большой одноионной анизотропией «легкая плоскость». Относительно какого параметра системы анизотропия велика?
2. Этот вопрос также касается анизотропии. Как известно, учет одноионной анизотропии типа «легкая плоскость» приводит к редукции спина магнитного иона (см. Morija T. Phys.Rev.- 1960.- V.117, №3.- P.635-647.), т.е. величина среднего значения магнитного момента меньше номинального. Повлияет ли этот эффект на представленные в диссертации результаты?
3. Еще один вопрос также связан с большой анизотропией. Как известно, уравнение Ландау-Лифшица справедливо при постоянстве длины вектора магнитного момента. Но одноионная анизотропия «легкая плоскость» не сохраняет длину этого вектора. Насколько правомерно использование уравнения Ландау-Лифшица?
4. Во второй главе рассматривается распространение микрополярных упругих волн вдоль хиральной оси в рамках микрополярной теории упругости, в которой поле поступательных смещений дополняется полем микровращений, которые вместе описывают положение микроэлемента сплошной среды (см. стр. 39 и далее). Но обычно, учет как симметричной части, так и антисимметричной части (характеризующие бесконечно малые повороты элемента объема) тензора конечных деформаций принято рассматривать в рамках вращательно-инвариантной теории

магнитоупругих волн (В.Г. Барьяхтар, Е.А. Туров). Правильно ли я понимаю, что микрополярная теория и есть вращательно-инвариантная теория магнитоупругих волн?

5. Насколько изменятся ли результаты, если геликоидальная магнитная структура формируется не взаимодействием Дзялошинского, а фрустрацией обменного взаимодействия?

Тем не менее, приведенные выше вопросы и замечания не ставят под сомнение основные выводы диссертационной работы и не влияют на **высокую оценку достоверности, важности и новизны** представленных в ней результатов. Учитывая актуальность темы диссертационного исследования, научную новизну и практическую ценность, считаю, что диссертация **Терещенко Алексея Анатольевича «Исследование упругих и магнитоупругих взаимодействий в магнетиках на основе 3d – переходных элементов»** 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:

доктор физико-математических наук, профессор,
профессор кафедры теоретической физики
Физико-технического института
Крымского федерального университета
им.В.И.Вернадского



Фридман Ю. А.

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Крымский федеральный университет
имени В.И. Вернадского»,
295007, Республика Крым, г. Симферополь,
проспект Академика Вернадского, д.4,
т.: +7 (978) 755-84-13, e-mail: yurii Fridman@gmail.com

27.04.2026

Подпись Ю.А. Фридмана заверяю.

Проректор по цифровой трансформации
ФГАОУ ВО «Крымский Федеральный
Университет им. В.И.Вернадского»
К.ф.-м.н, доцент




Рыбас А.Ф