

Взаимодействие магнитной подсистемы кристаллов с колебательными степенями свободы является классическим направлением исследований в физике конденсированного состояния. Фундамент магнитоакустики, заложенный в работах Ч. Киттеля, А.И. Ахиезера, В.Г. Барьяхтара и С.В. Пелетминского, сегодня находит новое развитие применительно к киральным магнетикам. Благодаря взаимодействию Дзялошинского-Мории, в таких средах формируются сложные неколлинеарные магнитные структуры, взаимодействие спиновых возбуждений и фононов в которых недостаточно исследовано. Особую научную значимость также имеет изучение взаимного влияния статических упругих напряжений и неколлинеарного магнитного порядка в таких системах. Кроме того, актуальность работы обусловлена необходимостью описания упругих свойств нецентросимметричных киральных кристаллов в рамках микрополярной теории (теории Коссера), что критически важно для проектирования современных акустических метаматериалов.



## **Структура и основное содержание работы.**

Диссертация А.А. Терещенко состоит из Введения, пяти глав, Заключения и списка литературы. Полный объём работы составляет 125 страниц, включая 29 рисунков и 196 наименований цитируемой литературы.

Во **Введении** обоснована актуальность и новизна диссертационной работы, определены её цель и задачи, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, приведён краткий обзор теоретических методов, использованных в работе, отражена её теоретическая и практическая значимость, приведены сведения о достоверности результатов диссертационного исследования, представлена информация о публикациях и личном вкладе автора.

**Первая глава** диссертации посвящена линейной теории магнитоакустического резонанса в одноосных киральных магнетиках с гексагональной симметрией, в частности, обсуждается задача о распространении магнитоупругих волн малой амплитуды вдоль киральной оси на примере соединения  $\text{CrNb}_3\text{S}_6$ . Рассматриваются две возможности взаимной ориентации внешнего магнитного поля и киральной оси системы, при которых реализуется различный тип магнитного упорядочения: коническая спираль и решётка киральных солитонов. Совместное решение уравнений движения для магнитной и упругой подсистем позволяет определить дисперсию магнитоупругих волн. Обсуждаются особенности полученных спектров, в частности, показано, что в конической фазе отсутствует щель в спектре при  $k=0$ , а вблизи резонансных точек наблюдается асимметрия относительно смены знака волнового числа при гибридизации поперечных акустических мод со спин-волновой модой. В фазе решётки киральных солитонов спектр демонстрирует мультirezонансное поведение, связанное с существенной нелинейностью равновесной конфигурации намагниченности.

Во **второй главе** обсуждаются особенности распространения упругих волн вдоль киральной оси в нецентросимметричных кристаллах. В рамках микрополярной теории упругости вычисляется дисперсия, причём, наравне с поступательными смещениями учитываются степени свободы, связанные с локальными микровращениями элементов сплошной среды. Учёт этих дополнительных степеней свободы позволяет, при определённом соотношении констант связи, обнаружить необычную для фононов особенность, а именно локальный ротонно-подобный минимум в одной из акустических ветвей спектра на отличном от нуля волновом векторе.

В **третьей главе** обсуждается проблема совместного действия внешнего магнитного поля и статических растягивающих механических напряжений, приложенных перпендикулярно геликоидальной оси в одноосных киральных магнетиках. Показывается, что учёт такого рода напряжений сводится к включению в свободную энергию системы слагаемого с эффективной магнитной анизотропией второго порядка. Полевое уравнение, описывающее равновесную конфигурацию намагниченности, оказывается в этом случае известным уравнением модели двойного синус-Гордона. Также обсуждается возможность идентификации несоизмеримых фаз этой модели с помощью просвечивающей лоренцевской электронной микроскопии. В частности, вычисленные теоретически профили



сигналов Френеля сравниваются с данными эксперимента, проведённого на тонких плёнках  $\text{CrNb}_3\text{S}_6$ . Подчёркивается, что разработанный в этой главе метод имеет важное прикладное значение, поскольку позволяет оценивать деформации в конкретной области образца.

**Четвёртая глава** посвящена построению феноменологической модели антиферромагнетика  $\text{Fe}_{0.5}\text{TiS}_2$ , позволяющей в рамках приближения среднего поля объяснить необычное поведение петель гистерезиса, экспериментально наблюдаемых в этом соединении. При низких температурах данный материал демонстрирует широкие петли гистерезиса, характерные для изинговского ферромагнетика, при этом с ростом температуры петля становится двойной. В рамках приближения среднего поля автор демонстрирует, что учёт двухионного магнитоупругого взаимодействия позволяет объяснить наблюдаемое явление, поскольку вклады в эффективное молекулярное поле обменного и двухионного магнитоупругого взаимодействий ведут себя по-разному с изменением температуры.

В **пятой главе** обсуждаются особенности распространения ультразвука в интерметаллическом ферромагнитном соединении  $\text{LuCo}_3$ . Отмечается, что в сверхсильных магнитных полях в этом соединении наблюдается метамагнитный переход (кроссовер) «низкий спин – высокий спин», микроскопическая природа которого до сих пор остаётся предметом научных дискуссий. При этом ожидается, что вблизи такого кроссовера могут значительно меняться характеристики распространения ультразвука в образце, поскольку с ростом магнитного поля у фононов появляется дополнительный канал рассеяния на магнонах. Магнон-фононное взаимодействие рассматривается в рамках механизма Уоллера, в основе которого лежит предположение о том, что динамические смещения ионов вызывают изменение констант обменного взаимодействия.

Далее, в мацубаровской технике, производится вычисление поляризационного оператора и решается уравнение Дайсона. Таким образом, учитывается поправка к фононной функции Грина во втором порядке по константе магнон-фононного взаимодействия. Автор показывает, что с ростом температуры в полевой зависимости коэффициента ослабления продольной акустической волны возникает скачок. Полученные зависимости качественно совпадают с экспериментальными кривыми.

В **Заключении** сформулированы основные результаты работы.

### **Научная новизна результатов диссертационной работы.**

Можно выделить следующие и наиболее важные результаты диссертационной работы:

1. Установлено, что спектр магнитоупругих волн, распространяющихся вдоль киральной оси одноосного кирального гелимагнетика во внешнем магнитном поле, критически зависит от типа его магнитного основного состояния. Выявлено, что в конической фазе возникает выраженная асимметрия запрещенных зон в области магнитоакустического резонанса. В то же время для фазы киральной магнитной солитонной решётки впервые обнаружен и описан мультирезонансный характер



магнитоупругого спектра. Обоснована возможность контролируемого управления дисперсионными характеристиками магнитоупругих волн посредством изменения внешнего магнитного поля.

2. В рамках микрополярной теории упругости обосновано существование поляризационно-зависимого расщепления фононного спектра нецентросимметричного кристалла. Выявлена и детально описана область физических параметров, при которых гибридизация поступательных и вращательных степеней свободы микрополярной среды обуславливает формирование ротонно-подобного минимума акустической ветви спектра. Доказана возможность классической природы ротонных состояний и их стабильного существования при комнатных температурах, что подтверждено экспериментальным данным для киральных метаматериалов.

3. Рассчитаны контрасты Френеля просвечивающей лоренцевской электронной микроскопии для всего набора пространственно неоднородных фаз модели двойного синус-Гордона. С их помощью проведена идентификация несоизмеримого магнитного порядка, наблюдаемого в тонких плёнках  $\text{CrNb}_3\text{S}_6$  при одновременном воздействии внешнего магнитного поля и одноосных растягивающих упругих напряжений.

4. Доказана возможность стабилизации ферромагнитного состояния в антиферромагнетике  $\text{Fe}_{0.5}\text{TiS}_2$  в нулевом внешнем магнитном поле при низких температурах за счёт двухионного магнитоупругого взаимодействия. Теоретически описан механизм температурной эволюции петли магнитного гистерезиса, обусловленный термическим разрушением указанного метастабильного состояния. Установлено, что этот процесс сопровождается трансформацией формы петли гистерезиса из однопетлевой в двухпетлевую.

5. В рамках теории линейного отклика предсказано резонансное поглощение фононов магнитной подсистемой в сильноанизотропном ферромагнетике  $\text{LuCo}_2$  за счёт переходов между различными спин-волновыми состояниями при распространении ультразвука. Выявлен механизм изменения характера рассеяния фононов на магнонах с нерезонансного на резонансный, за счёт резкого уширения магнитной зоны в области кроссовера «низкий спин – высокий спин». Доказано, что данный процесс сопровождается значительным увеличением коэффициента ослабления ультразвука.

**Достоверность результатов и обоснованность выводов** диссертационного исследования обеспечивается использованием общеизвестных теоретических методов и подходов, а также согласием с экспериментальными наблюдениями и с известными литературными данными. Публикации в ведущих мировых журналах и доклады на специализированных российских и международных конференциях, научных совещаниях и школах тоже свидетельствуют в пользу достоверности результатов.

#### **Теоретическая и практическая значимость полученных результатов.**

Теоретическая значимость работы заключается в разработке микроскопических и континуальных моделей, описывающих физические эффекты, связанные с взаимодействием магнитной и упругой подсистем в широком классе



магнетиков на основе  $3d$  – переходных элементов. В частности, эти результаты углубляют понимание процессов распространения ультразвука вблизи спинового кроссовера в сильноанизотропных магнетиках, намагничивания в диалектогенах железа, позволяют ввести понятие эмерджентной упругости киральной магнитной солитонной решётки, обосновать концепцию «фононного» эффекта Рашбы, порождаемого исключительно структурной киральностью нецентросимметричных кристаллов. Практическая ценность полученных результатов заключается в возможности их использования для разработки перспективных функциональных материалов твердотельной электроники и для проектирования устройств акустоэлектроники, управляемых внешним магнитным полем. Установленные механизмы стабилизации метастабильных состояний позволяют определить границы использования интеркалированных соединений железа в качестве постоянных магнитов, альтернативных редкоземельным аналогам. Возможность прецизионного контроля неоднородных магнитных фаз с помощью комбинации магнитных полей и механических напряжений ориентирована на внедрение в технологиях спинтроники и магноники. Предсказанный роторный минимум в спектре волн киральных микрополярных сред открывает новые подходы к целенаправленному конструированию акустических и механических метаматериалов с контролируемыми дисперсионными свойствами.

#### **Замечания по диссертационной работе.**

1. При моделировании линейного магнитоакустического резонанса в конической фазе и фазе солитонной решётки соединения  $\text{CrNb}_3\text{S}_6$  расчёты выполнены для случая распространения волн строго вдоль геликоидальной (киральной) оси. Из текста работы не вполне ясно, сохраняются ли симметрия спектра запрещённых зон и мультирезонансный характер поглощения ультразвука при возникновении даже незначительных угловых отклонений волнового вектора от выделенной кристаллографической оси  $Oz$ .

2. Предсказание механического аналога эффекта Рашбы и роторно-подобного минимума для поперечных фононных мод проведено автором в рамках континуального приближения микрополярной теории упругости. Эта часть могла бы быть дополнена обсуждением микроскопических критериев выбора безразмерных феноменологических параметров среды на атомном уровне, которые физически гарантируют стабильность роторных возбуждений в реальном кристалле при комнатных температурах.

3. Объясняя аномальное перемещение интеркалированного антиферромагнетика  $\text{Fe}_{0.5}\text{TiS}_2$  через метастабильные ферромагнитные состояния, соискатель использует приближение среднего поля. Представляется, что учёт пространственных спиновых флуктуаций вне рамок молекулярного поля мог бы скорректировать температурные границы существования однопетлевого и двухпетлевого режимов гистерезиса.

4. Переход кобальта из низкоспинового в высокоспиновое состояние в интерметаллиде  $\text{LuCo}_2$  под действием сверхсильного магнитного поля сопровождается скачкообразным изменением атомного объёма кристаллической



решётки. При расчёте коэффициента ослабления ультразвука соискатель учитывает магнон-фононное взаимодействие, обусловленное тепловыми смещениями ионов (механизм Уоллера). Однако в работе не оценивается вклад крупномасштабных статических деформаций объёмной магнитострикции, возникающих непосредственно в точке спинового кроссовера.

5. Объём полученных результатов превышает стандартный объём для кандидатской диссертации, что закономерно влечёт за собой краткость изложения материала. Формат кандидатской диссертации предполагает разумные ограничения по объёму, поэтому для прояснения некоторых моментов читателю, скорее всего, придётся обращаться к оригинальному тексту журнальных публикаций, чтобы проследить за деталями вычислений и рассуждений. Справедливости ради, отметим, что в тексте диссертации приводится множество важных физических соображений и выводов, облегчающих общее понимание картины рассматриваемых явлений.

Приведенные замечания не снижают общую оценку работы. Диссертация содержит значимые результаты, изложенные на высоком уровне, и может быть рекомендована к защите.

### **Заключение (выводы о работе).**

Диссертация А.А. Терещенко представляет собой завершённую научную работу, посвящённую эффектам, связанным с взаимодействием магнитной и упругой подсистем в широком классе магнетиков на основе 3d – переходных элементов. В каждой главе автор уделяет подробное внимание корректной постановке задачи, а в конце детально обсуждает полученные результаты как с теоретической, так и практической точек зрения. Большая часть полученных результатов ориентирована на объяснение уже проведённых экспериментов или допускает практически реализуемую экспериментальную проверку. При этом развитые в работе методы и техники могут быть в дальнейшем применены и к другим соединениям. Вошедшие в диссертацию материалы опубликованы в 6 статьях в международных журналах, индексируемых базами данных Web of Science и Scopus, причем одна из них в журнале Physical Review Letters. Результаты диссертации прошли соответствующую апробацию на всероссийских и международных конференциях.

Диссертация соответствует научной специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния и удовлетворяет требованиям следующих пунктов паспорта специальности (отрасль науки – физико-математические):

п. 3 «Теоретическое и экспериментальное изучение свойств конденсированных веществ в экстремальном состоянии (сильное сжатие, ударные воздействия, сильные магнитные поля, изменение гравитационных полей, низкие и высокие температуры), фазовых переходов в них и их фазовых диаграмм состояния»;

п. 5 «Разработка математических моделей построения фазовых диаграмм состояния прогнозирование изменения физических свойств конденсированных веществ в зависимости от внешних условий их нахождения»;



п. 7 «Теоретические расчеты и экспериментальные измерения электронной зонной структуры, динамики решётки и кристаллической структуры твердых тел».

Диссертация «Исследование упругих и магнитоупругих взаимодействий в магнетиках на основе 3d – переходных элементов», представленная на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния, является завершённой научно-квалификационной работой, полностью соответствует всем требованиям ВАК, предъявляемых к кандидатским диссертациям, а её автор Терещенко Алексей Анатольевич, безусловно, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния.

Отзыв обсужден и утвержден на Проблемном ученом совете по физике конденсированного состояния НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ (протокол № 02-2026 от 14 мая 2026 года).

**Отзыв подготовили:**

Научный сотрудник  
отделения теоретической физики  
НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ,  
кандидат физико-математических наук



В.Е. Тимофеев  
Victor.Timofeev@thd.pnpi.spb.ru

Руководитель  
отделения теоретической физики  
НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ,  
доктор физико-математических наук



Д.Н. Аристов  
aristov\_dn@pnpi.nrcki.ru

Подписи Тимофеева В.Е. и Аристова Д.Н. заверяю

Учёный секретарь  
НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ,  
кандидат физико-математических наук



С.И. Воробьев  
Vorobyev\_SI@pnpi.nrcki.ru

**Контакты ведущей организации:**

ФГБУ «Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»  
(НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ).

188300, Россия, Ленинградская область, г. Гатчина, мкр. Орлова роща, д. 1.  
Тел.: +7 (81371) 460-25, E-mail: dir@pnpi.nrcki.ru, <https://www.pnpi.nrcki.ru>