

На правах рукописи

Терещенко Алексей Анатольевич

Исследование упругих и магнитоупругих взаимодействий в
магнетиках на основе 3d – переходных элементов

1.3.8. Физика конденсированного состояния

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Екатеринбург – 2026

Работа выполнена в ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина».

Научный руководитель: **Овчинников Александр Сергеевич**,
доктор физ.-мат. наук, доцент, профессор кафедры теоретической и математической физики
Института естественных наук и математики

Официальные оппоненты: **Пятаков Александр Павлович**,
доктор физ.-мат. наук, профессор РАН, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», профессор кафедры физики колебаний Физического факультета

Фридман Юрий Анатольевич,
доктор физ.-мат. наук, профессор, ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского», профессор кафедры теоретической физики Физико-технического института

Ведущая организация: ФГБУ Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»

Защита состоится «20» июня 2026 г. в 12:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.431.01 при ФГБОУ ВО «Челябинский государственный университет» по адресу: 454001 г. Челябинск, ул. Братьев Кашириных, 129, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Челябинского государственного университета и на сайте <https://www.csu.ru>.

Автореферат разослан «_____» _____ 2026 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.2.431.01,
кандидат физ.-мат. наук

Матюнина М.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследований

Первые исследования, в которых была рассмотрена связь магнитных и упругих степеней свободы, относятся к концу 50-х гг. [1]. Эти пионерские работы породили новое направление физики магнитоупорядоченных систем – магнитоакустику, которая продолжает бурно развиваться и в наши дни. Активные исследования свойств слоистых дихалькогенидов переходных металлов и интерметаллидов на основе сплавов $4f$ -атомов редкоземельных элементов и $3d$ -атомов переходных металлов делают крайне востребованным теоретический анализ магнитоупругих и упругих свойств данных соединений.

Среди большой группы дихалькогенидов переходных металлов особый интерес представляют интеркалаты с внедренными атомами хрома и железа. В частности, теоретические и экспериментальные исследования соединения CrNb_3S_6 с длиннопериодической геликоидальной магнитной структурой выявили целый ряд необычных явлений, таких как существование хиральной магнитной солитонной решетки, скачки намагниченности, спиновый резонанс на коллективных возбуждениях солитонной решетки [2]. Перечисленные свойства открывают широкие перспективы использования этого материала в твердотельных устройствах спинтроники. К уникальным свойствам CrNb_3S_6 можно отнести наблюдаемый при комнатных температурах эффект спиновой селективности индуцированной хиральностью [3], который был обнаружен и в других нецентросимметричных кристаллах дихалькогенидов переходных металлов без интеркалированных $3d$ -ионов. Не исключено, что такое поведение обусловлено структурной хиральностью указанных систем, поэтому развитие теории упругости для нецентросимметричных дихалькогенидов переходных металлов представляется крайне актуальной и востребованной задачей.

Дихалькогениды с общей формулой Fe_xTiS_2 , где x – концентрация ионов железа, интеркалированных в ван-дер-ваальсовы щели между слоями TiS_2 , проявляют различные типы магнитного порядка в основном состоянии, например спин-стекольный, антиферромагнитный или ферромагнитный, в зависимости от содержания железа. В частности, соединение $\text{Fe}_{0.5}\text{TiS}_2$ проявляет при низких температурах антиферромагнитное упорядочение, однако, при этом в процессах перемагничивания наблюдаются широкие петли гистерезиса, типичные для изинговского ферромагнетика, что можно связать с существованием метастабильных ферромагнитных состояний [4]. Коэрцитивные поля таких петель магнитного ги-

стерезиса могут достигать значений ~ 60 кЭ, что делает железосодержащие ди-халькогениды реальной альтернативой редкоземельным материалам для создания постоянных магнитов [A5].

Сосуществование $4f$ и $3d$ электронов в интерметаллидах «редкая земля (R) – переходный металл (T)» позволяет достичь хороших магнитотвердых свойств, необходимых для создания постоянных магнитов. Ферримагнитные R-T соединения представляют интерес для исследований в сильных магнитных полях, поскольку они претерпевают индуцированные полем магнитные фазовые переходы, когда приложенное поле начинает конкурировать с обменным взаимодействием и магнитокристаллической анизотропией. Аналогичные фазовые переходы в ферромагнетиках встречаются относительно редко и требуют отдельного рассмотрения. Например, интерметаллид LuCo_3 обнаруживает скачок полевой зависимости намагниченности в сверхсильных магнитных полях при температурах ниже критической как в направлении оси легкого намагничивания, так и в направлении оси трудного намагничивания [5]. Микроскопическая природа кроссовера «низкий спин – высокий спин» в LuCo_3 остается предметом научных дискуссий, однако, помимо этой фундаментальной проблемы, важным практическим вопросом является проявление такого метамагнитного перехода в различных физических процессах, в частности, при распространении ультразвука.

Степень разработанности темы исследований

Основополагающая теория магнитоупругих волн в ферромагнетиках, первоначально предложенная Киттелем, была расширена до класса гелимагнетиков с обменной связью Дзялошинского-Мории в 70-х гг. [6]. Однако, спонтанные упругие деформации в основном состоянии, отражающие эффект магнитострикции, не рассматривались в этих подходах. Последовательный учет равновесных деформаций при совместном решении уравнений Ландау-Лифшица и упругой динамики был выполнен в [1]. Объект настоящего исследования, соединение CrNb_3S_6 , принадлежит к кристаллическому классу гексагональной симметрии, для которого до сих пор рассматривался только случай обменной магнитной спирали [7]. Геликоидальный магнитный порядок, обусловленный взаимодействием Дзялошинского-Мории, ранее был проанализирован только для сред с изотропными упругими и магнитоупругими свойствами [8]. В рамках диссертационной работы обсуждаются особенности магнитоакустического резонанса в различных магнитных фазах соединения CrNb_3S_6 . Особое внимание уделяется фазе хиральной магнитной солитонной решетки, соответствующее рассмотрение которой до сих пор отсутствует в современной литературе.

Связь структурной хиральности со статическими и динамическими свойствами физических систем дает ключ к пониманию функциональности хиральных материалов. Однако, эффекты хиральности выходят за рамки традиционной теории упругости, которая хотя и рассматривает локальные смещения точек сплошной среды, но полностью игнорирует их локальные вращения. Последние можно учесть в рамках микрополярной теории упругости [9]. К сожалению, к настоящему времени предпринято лишь несколько попыток расчета дисперсии микрополярных упругих волн в кристаллах. Отметим в этой связи пионерское исследование центросимметричного соединения KNO_3 [10], в котором был получен спектр микрополярных упругих волн, симметричный в импульсном пространстве. Открытой проблемой остается вопрос – будет ли фононный спектр нецентросимметричных кристаллов проявлять эффекты невзаимности по волновому вектору?

Связь между механическими напряжениями и магнитными свойствами в твердых телах лежит в основе новой отрасли электроники, иногда называемой стрейнтроной [11]. Одной из важных идей этого направления является манипуляция намагниченностью с помощью магнитоупругого эффекта, формирующего дополнительную магнитную анизотропию. Хотя этот подход был реализован во многих магнитных системах, специальный интерес вызывает задача о влиянии упругих напряжений на основное состояние хиральных гелимагнетиков. В частности, было обнаружено, что форма как отдельных скирмионов, так и скирмионной решетки в соединении FeGe кубической симметрии крайне чувствительна к упругим деформациям образца [12]. Исследование таких пространственно неоднородных магнитных конфигураций посредством просвечивающей лоренцевской электронной микроскопии показало, что искажения топологически нетривиальной спиновой текстуры усиливаются на два порядка по сравнению с решеточными. В диссертационной работе анализируются искажения хиральной магнитной солитонной решетки под действием растягивающего упругого напряжения, приложенного перпендикулярно к геликоидальной оси. Оказывается, что эта задача эквивалентна поиску оптимальной магнитной конфигурации одноосного хирального гелимагнетика, формируемой совместно внешним магнитным полем и магнитокристаллической анизотропией второго порядка в базисной плоскости, что приводит к решениям стационарного уравнения двойного синус-Гордона. Такое уравнение также возникает при описании пространственно неоднородных структур в сегнетоэлектриках [13]. В диссертации представлен способ идентификации несоизмеримых магнитных фаз модели двойного синус-Гордона с помощью просвечивающей лоренцевской электронной микроскопии. Отметим, что первоначальный

подход к проблеме определения различных фаз этой модели был основан на использовании рассеяния нейтронов [14].

В диссертационной работе рассматривается теория магнитного гистерезиса в антиферромагнитной системе $\text{Fe}_{0.5}\text{TiS}_2$, в которой при низких температурах наблюдаются широкие петли гистерезиса, типичные для изинговского ферромагнетика [4]. Объяснить такое необычное поведение только с помощью модели Изинга представляется крайне проблематичным, так как учет одних лишь обменных взаимодействий и одноионной магнитной анизотропии не может привести к необратимым эффектам в процессах перемагничивания. Поскольку необратимый метамагнитный переход, индуцированный магнитным полем, из антиферромагнитного состояния в ферромагнитное может сопровождаться заметной магнитострикцией, разумно связать появление метастабильного ферромагнитного состояния при низких температурах с влиянием двухионного магнитоупругого взаимодействия. Сравнение результатов соответствующего теоретического описания с экспериментальными данными по температурной эволюции формы петель гистерезиса позволило бы сделать вывод о релевантности такого подхода.

Недавнее исследование намагниченности LuCo_3 в импульсных магнитных полях до 58 Тл обнаружило существование кроссовера «низкий спин – высокий спин» чуть ниже 50 Тл [5]. Хорошо известно, что ценная информация о магнитных фазовых переходах может быть получена с помощью ультразвуковых измерений, поскольку скорость и коэффициент ослабления ультразвуковых волн зависят от магнитных свойств твердого тела. Спецификой кроссовера «низкий спин – высокий спин», наблюдаемого в LuCo_3 , является то, что он происходит значительно ниже точки Кюри ($T_C = 376$ К). В этих условиях теоретические подходы, разработанные для изучения аномалий затухания звуковых волн и изменения их дисперсии в критической области, становятся неэффективными. Другой важной особенностью проблемы является тот факт, что диапазон частот ультразвука (~ 100 МГц) оказывается значительно ниже характерных частот спин-волновых возбуждений в присутствии сверхсильного магнитного поля ($\sim 1 - 10$ ТГц) [A2]. Это исключает резонансный механизм магнитоупругой связи акустических и спиновых волн [15]. Таким образом, несмотря на обширный накопленный опыт, возникает потребность в теоретическом анализе деталей распространения ультразвука вблизи кроссовера «низкий спин – высокий спин», наблюдаемого в LuCo_3 .

Цель работы и задачи

Целью диссертационной работы являлся анализ влияния магнитоупругих взаимодействий (одноионных и двухионных) на гистерезисные, магнитные и ре-

зонансные свойства магнетиков на основе $3d$ -ионов переходных металлов, а также изучение особенностей упругой динамики в соединениях с нарушенной инверсионной симметрией.

Для реализации этой цели были поставлены следующие задачи:

1. Сформулировать теорию распространения магнитоупругих волн вдоль геликоидальной оси хирального гелимагнетика CrNb_3S_6 при различных ориентациях внешнего магнитного поля. Выявить особенности спектра таких волн для различных магнитных фаз этого соединения.

2. В рамках микрополярной теории упругости рассмотреть решеточную динамику хирального кристалла на примере соединения CrNb_3S_6 , имеющего гексагональную симметрию, и выяснить, приводит ли структурная хиральность к невзаимному фононному спектру без привлечения взаимодействий с другими подсистемами.

3. Проанализировать, какие неоднородные магнитные структуры возникают в одноосном хиральном гелимагнетике CrNb_3S_6 при совместном действии внешнего магнитного поля и упругого растягивающего напряжения, приложенных перпендикулярно к геликоидальной оси. Проверить возможность идентификации таких структур посредством просвечивающей лоренцевской электронной микроскопии с помощью расчетов контрастов Френеля.

4. Разработать теорию магнитного гистерезиса для антиферромагнитного соединения $\text{Fe}_{0.5}\text{TiS}_2$, обнаруживающего гистерезисное ферромагнитное поведение при низких температурах, и определить роль магнитоупругих взаимодействий в этом явлении.

5. Проанализировать процесс распространения ультразвука в сплаве LuCo_3 вблизи кроссовера «низкий спин – высокий спин» с помощью теории линейного отклика и определить полевою зависимость коэффициента ослабления ультразвука в сверхсильных магнитных полях для различных температур.

Научная новизна работы

Построена теория магнитоакустического резонанса для фазы магнитной солитонной решетки одноосного хирального гелимагнетика. Показано, что такой резонанс характеризуется мультирезонансным поведением, что ставит этот эффект в один ряд с мультирезонансным поведением спинового резонанса и магнитосопротивления в этой фазе [2].

Впервые в рамках микрополярной теории упругости была рассмотрена динамика нецентросимметричного кристалла на примере слоистого соединения CrNb_3S_6 . Показано, что закон дисперсии фононов, полученный на основе такого

подхода, обнаруживает ряд особенностей. Во-первых, для поперечных фононных мод наблюдается эффект Рашбы – поляризационно-зависимое расщепление фононных зон, аналогичное расщеплению электронных состояний спин-орбитальным взаимодействием. Во-вторых показано, что гибридизация акустических (поступательных) и оптических (вращательных) поперечных фононных мод может приводить к локальному минимуму в дисперсионной зависимости, аналогичному ротонному минимуму в ^4He .

Впервые получены дифрактограммы просвечивающей лоренцевской электронной микроскопии для конфигураций, описываемых решениями модели двойного синус-Гордона, что позволило определить неоднородную магнитную структуру, наблюдаемую экспериментально в тонких пленках CrNb_3S_6 при совместном действии внешнего магнитного поля и растягивающего упругого напряжения, взаимно перпендикулярных геликоидальной оси [A4]. Предложен метод количественной оценки упругих деформаций, вызванных указанными внешними силами.

На основе механизма двухионного магнитоупругого взаимодействия была предложена теория, объясняющая возникновение петель магнитного гистерезиса, типичных для изинговского ферромагнетика, в антиферромагнитном соединении $\text{Fe}_{0.5}\text{TiS}_2$ при низких температурах. Показано, что появление таких петель гистерезиса связано с существованием метастабильного ферромагнитного состояния, возникновение которого объясняется существенным влиянием двухионного магнитоупругого взаимодействия, определяющего баланс внутрислоистого ферромагнитного и межслоистого антиферромагнитного обменных взаимодействий. Дано объяснение температурной эволюции магнитного гистерезиса с ростом температуры от петель ферромагнитного типа к антиферромагнитному, учитывающее различную температурную зависимость вкладов в молекулярные поля от обменных и магнитоупругих взаимодействий.

Впервые рассмотрено распространение ультразвука в сверхсильных магнитных полях в интерметаллическом соединении LuCo_3 вблизи кроссовера «низкий спин – высокий спин». Предсказано аномальное поведение коэффициента ослабления ультразвука в области кроссовера, подтверждаемое экспериментальными наблюдениями.

Теоретическая и практическая значимость работы

Развитие экспериментальной техники часто приводит к открытию новых эффектов в хорошо известных физических системах. Это вызывает необходимость совершенствования современного теоретического аппарата для объяснения этих явлений. В частности, в настоящей работе показано, что распространение ульт-

тразвука вблизи кроссовера «низкий спин – высокий спин» допускает описание с помощью мацубаровских функций Грина. Другим аспектом теоретической значимости работы является возможность описания ферромагнитных гистерезисных свойств антиферромагнетиков на основе механизма двухионного магнитоупругого взаимодействия. Развитая теория позволяет глубже понять процессы намагничивания в дихалькогенидах железа, рассматриваемых как реальная альтернатива постоянным магнитам на основе редкоземельных элементов. Полученные теоретические дифрактограммы спиновых конфигураций, описываемых решениями модели двойного синус-Гордона, могут быть использованы для дальнейшего совершенствования техники Френеля просвечивающей лоренцевской электронной микроскопии. Также решения модели двойного синус-Гордона позволяют вычислить константу эмерджентной упругости хиральной магнитной солитонной решетки и объяснить кроссовер «слабо нелинейный режим – сильно нелинейный режим», обнаруженный экспериментально в этой магнитной фазе [A1]. Мультирезонансный характер спектра магнитоупругих волн в случае фазы магнитной солитонной решетки одноосного хирального гелимагнетика дает возможность для исследования такой магнитной конфигурации при помощи ультразвуковых измерений. «Фононный» эффект Рашбы, порождаемый исключительно структурной хиральностью, расширяет функциональные возможности использования хиральных материалов.

Полученные в данной работе результаты представляют интерес и с практической точки зрения. Например, аномальное поведение коэффициента ослабления ультразвука в области кроссовера может быть использовано для создания устройств с акустическими свойствами, управляемыми внешним магнитным полем. Понимание природы ферромагнитного поведения гистерезиса в антиферромагнетике $\text{Fe}_{0.5}\text{TiS}_2$ позволяет определить диапазон применимости таких соединений в качестве постоянных магнитов. Управление неоднородными магнитными конфигурациями внешним магнитным полем и упругими напряжениями представляет интерес для разработки устройств спинтроники. Предсказание ротонного минимума в микрополярных упругих средах уже привело к созданию упругих метаматериалов, где наблюдался данный эффект [16].

Положения, выносимые на защиту

1. Спектр магнитоупругих волн, распространяющихся вдоль геликоидальной оси хирального гелимагнетика CrNb_3S_6 , магнитное состояние которого контролируется внешним магнитным полем. Выявлены особенности магнитоакустического резонанса для различных магнитных фаз этого соединения, в частности, невзаимный характер спектра в случае конической фазы и мультирезонансное поведение

в фазе магнитной солитонной решетки.

2. Закон дисперсии длинноволновых возбуждений микрополярной упругой среды для нецентросимметричного соединения CrNb_3S_6 . Показано появление «фононного» эффекта Рашбы для поперечных упругих мод, обусловленного исключительно структурной хиральностью. Обнаружено существование ротонно-подобного минимума в спектре акустических фононов с поперечной поляризацией, вызванного гибридизацией поступательных и вращательных степеней свободы микрополярной среды.

3. Построены теоретические дифрактограммы просвечивающей лоренцевской электронной микроскопии с помощью решений модели двойного синус-Гордона, позволяющие экспериментально идентифицировать типы неоднородных магнитных структур, возникающих в одноосном хиральном гелимагнетике CrNb_3S_6 при совместном действии внешнего магнитного поля и растягивающего упругого напряжения, приложенных перпендикулярно к геликоидальной оси.

4. Сформулирована теория магнитного гистерезиса в антиферромагнетике $\text{Fe}_{0.5}\text{TiS}_2$, объясняющая необычную температурную эволюцию формы петель гистерезиса с ростом температуры на основе механизма двухионного магнитоупругого взаимодействия.

5. Построена микроскопическая теория распространения ультразвука в интерметаллическом соединении LuCo_3 в сверхсильных магнитных полях, предсказывающая аномальное поведение коэффициента ослабления ультразвука вблизи кроссовера «низкий спин – высокий спин».

Апробация и степень достоверности результатов

Ключевые результаты диссертационной работы были представлены в качестве устных и стендовых докладов на следующих конференциях международного и всероссийского уровней:

1. XIV Международная школа-конференция «Фундаментальная математика и ее приложения в естествознании», 8 - 11 октября 2023, Уфа, Россия.

2. Samarkand International Symposium on Magnetism, 2 - 6 июля 2023, Самарканд, Узбекистан.

3. VIII Euro-Asian Symposium «Trends in MAGnetism», 20 - 26 августа 2022, Казань, Россия.

4. VI International Workshop Dzyaloshinskii-Moriya Interaction and Exotic Spin Structures, 6 - 10 сентября 2021, Выборг, Россия.

5. XXI Всероссийская школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества, 18 - 25 марта 2021, Екатеринбург, Россия.

6. LIV Школа ПИЯФ по Физике Конденсированного Состояния, 16 - 21 марта 2020, Санкт-Петербург, Россия.
7. XX Всероссийская школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества, 21 - 28 ноября 2019, Екатеринбург, Россия.
8. V International Workshop Dzyaloshinskii-Moriya Interaction and Exotic Spin Structures, 8 - 12 июля 2019, Петрозаводск, Россия.
9. LIII Школа ПИЯФ по Физике Конденсированного Состояния, 11 - 16 марта 2019, Санкт-Петербург, Россия.
10. XIX Всероссийская школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества, 15 - 22 ноября 2018, Екатеринбург, Россия.
11. VIII Baical International Conference. Magnetic materials. New technologies, 24 - 28 августа 2018, Иркутск, Россия.
12. XXIII Международная конференция «Новое в магнетизме и магнитных материалах», 30 июня - 5 июля 2018, Москва, Россия.

По материалам диссертационной работы в соавторстве опубликовано 6 статей в рецензируемых научных изданиях, индексируемых Web of Science и Scopus, а также получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023669066.

Достоверность результатов диссертационного исследования обеспечивается использованием общеизвестных теоретических методов и подходов, а также согласием с экспериментальными наблюдениями и с известными литературными данными. Публикации в высокорейтинговых научных изданиях и доклады на престижных научных конференциях тоже свидетельствуют в пользу достоверности результатов.

Личный вклад автора

Все представленные в диссертации результаты получены автором лично или при его активном участии: определена дисперсия магнитоупругих волн в одноосном хиральном гелимагнетике для нескольких ориентаций внешнего магнитного поля [A6], вычислен фононный спектр нецентросимметричного кристалла в рамках микрополярной теории упругости [A3], рассчитан контраст Френеля просвечивающей лоренцевской электронной микроскопии для магнитных несоизмеримых фаз модели двойного синус-Гордона [A4], дано объяснение необычного температурного поведения формы петель магнитного гистерезиса для железо-содержащих диалькогенидов переходных металлов [A5], обнаружено изменение характера рассеяния фононов на магнонах с нерезонансного на резонансный в области кроссовера «низкий спин – высокий спин» [A2]. Также автор принимал

непосредственное участие в обсуждении и подготовке всех публикаций по теме диссертации.

Работа выполнена при финансовой поддержке фонда BASIS (руководитель гранта №21-1-5-149-1), РФФ (исполнитель гранта №22-13-00158) и системы целевой аспирантуры для сотрудников УрФУ, а также проекта госзадания №FEUZ-2020-0054 (исполнитель).

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Диссертация содержит 125 страниц и 29 рисунков. Список литературы включает в себя 196 источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

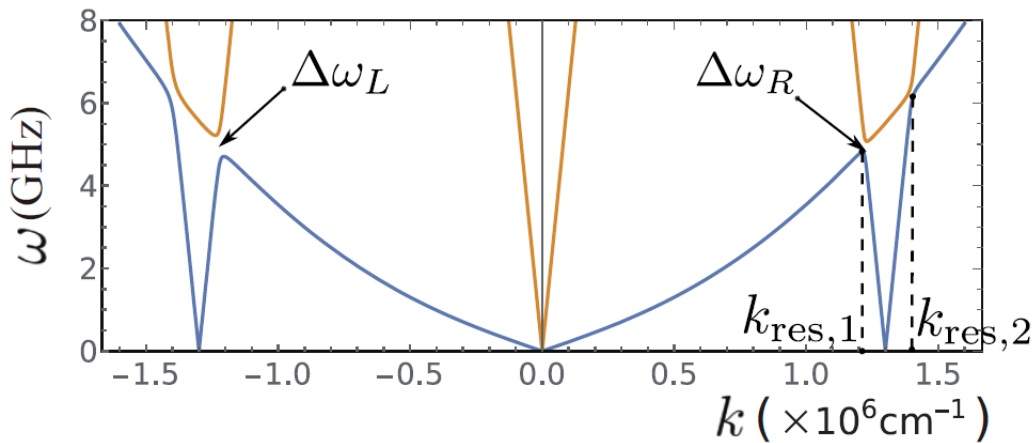


Рисунок 1 – Низкоэнергетическая часть спектра магнитоупругих волн при значении конического угла $\pi/5$, демонстрирующая основную особенность магнитоакустического резонанса в конической фазе одноосного хирального гелимагнетика, а именно асимметрию запрещенных зон $\Delta\omega_L$ и $\Delta\omega_R$ при волновых векторах резонанса $-k_{res,1}$ и $k_{res,1}$, соответственно.

В первой главе обсуждается задача о распространении связанных спиновых и акустических волн малой амплитуды вдоль геликоидальной оси хирального гелимагнетика гексагональной симметрии [А6]. Решение магнитострикционной

задачи, необходимое для корректной линеаризации уравнений движения упругой и магнитной подсистем, демонстрирует существование как однородных, так и неоднородных деформаций в основном состоянии рассматриваемой системы. Расчет спектра магнитоупругих волн для двух ориентаций внешнего магнитного поля (вдоль геликоидальной оси и перпендикулярно к ней) позволяет выявить особенности спектра для различных магнитных фаз одноосного хирального гелимагнетика.

В конической фазе закон дисперсии проявляет существенную невзаимность относительно смены знака волнового вектора (см. рисунок 1). 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.

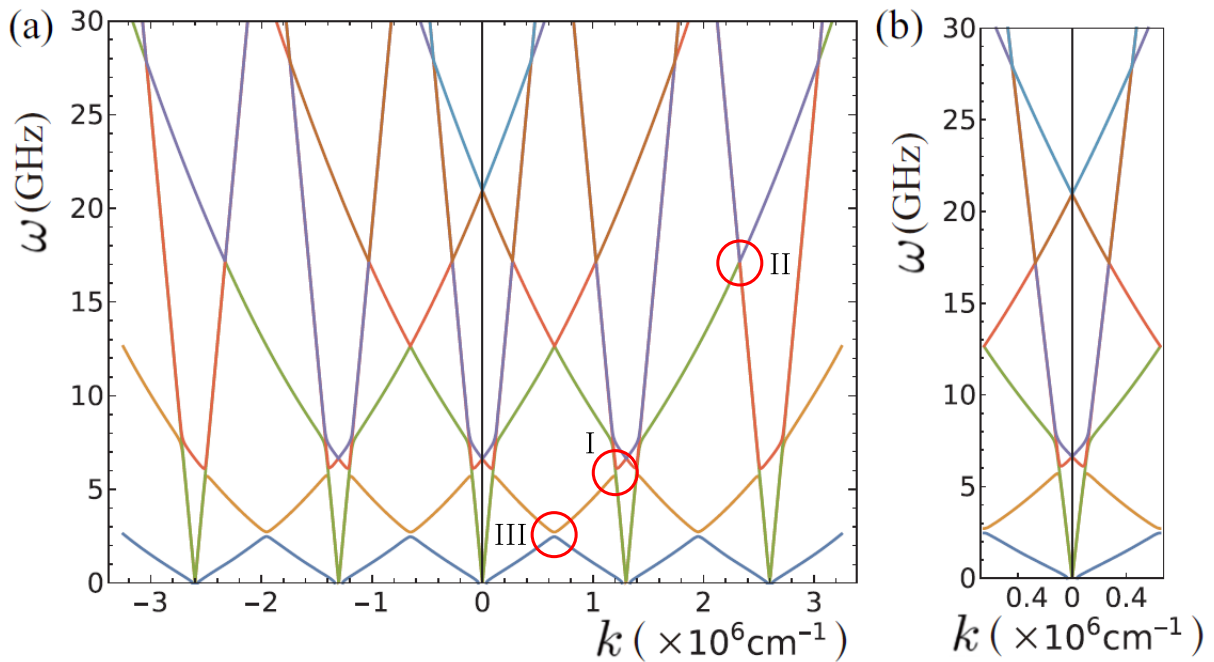


Рисунок 2 – Расширенная (a) и приведенная (b) зонные схемы спектра магнитоупругих волн в фазе магнитной солитонной решетки. Цвета обозначают различные энергетические зоны магнитоупругих возбуждений, разделенные друг от друга щелями, возникающими в результате гибридизации соответствующих мод. (I) Область первого резонанса. (II) Область второго резонанса. (III) Чисто магнитная запрещенная зона.

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 волновыми векторами кратными q_0 . С каждой из этих гармоник связано появление дополнительных акустических

ветвей в спектре магнитоупругих волн, в частности, вблизи $\pm 2q_0$. Тогда оказывается возможным пересечение симметричной относительно $k = 0$ квазиспиновой и акустических квазиупругих ветвей спектра магнитоупругих волн вблизи $\pm 2q_0$ (см. рисунок 2(II)), что означает появление второго магнитоакустического резонанса (первый резонанс возникает аналогично конической фазе вблизи $\pm q_0$ (см. рисунок 2(I))). Можно показать, что первая и вторая запрещенные зоны в области резонансов связаны друг с другом соотношением $\Delta\omega|_{k \approx \pm 2q_0} \sim \kappa^2 \Delta\omega|_{k \approx \pm q_0}$ (где κ – эллиптический модуль, характеризующий солитонную решетку при заданном значении внешнего магнитного поля), то есть величина второй магнитоупругой щели оказывается малой по сравнению с первой. Учет следующих гармоник будет приводить к появлению магнитоакустических резонансов более высоких порядков, сопровождающихся все меньшими запрещенными зонами. Такое поведение согласуется с мультirezонансным характером других явлений, связанных с солитонной решеткой, наблюдаемых в дифракции нейтронов, в магнитосопротивлении и в спиновом резонансе.

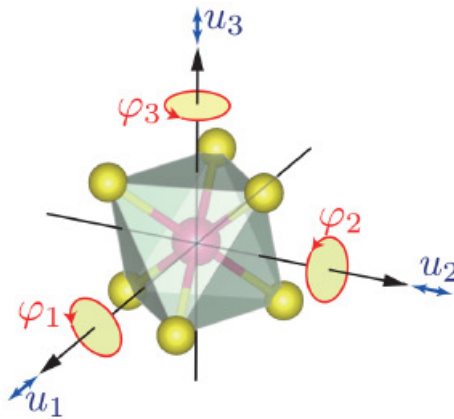


Рисунок 3 – Схематичное изображение вращательных и поступательных степеней свободы жесткой структурной единицы CrS_6 , которая представляет собой микроэлемент сплошной среды.

Во второй главе обсуждается задача о распространении микрополярных упругих волн вдоль хиральной оси в нецентросимметричном кристалле на примере соединения CrNb_3S_6 [A3]. В рамках микрополярной теории упругости [9] поле поступательных смещений $u_k(\mathbf{r}, t)$ дополняется полем микровращений $\varphi_m(\mathbf{r}, t)$ ($k, m = x, y, z$), которые вместе описывают положение микроэлемента сплошной среды (см. рисунок 3). При этом предполагается, что октаэдры CrS_6 слабо связаны друг с другом и каждый из них представляет собой жесткую структурную единицу, то есть в процессе распространения микрополярных упругих волн моды относительных внутренних смещений ионов Cr и S не возбуждаются. Дефор-

мации, возникающие при этом, определяются двумя независимыми линейными микрополярными тензорами.

Для описания поперечных мод, не взаимодействующих с продольными, оказывается удобным ввести циркулярные компоненты смещений $u_{\pm} \equiv u_x \pm iu_y$ и вращений $\varphi_{\pm} \equiv \varphi_x \pm i\varphi_y$, где $+$ и $-$ соответствуют левой или правой циркулярной поляризации, в результате чего уравнения движения для поперечных мод расщепляются. Гибридизация циркулярно поляризованных мод u_{\pm} и φ_{\pm} приводит к появлению акустической и оптической ветвей спектра поперечных волн (см. рисунок 4). Закон дисперсии таких волн обнаруживает поляризационно-зависимое расщепление фононных зон (эффект Рашибы) без привлечения взаимодействий с другими подсистемами. В длинноволновом пределе частоты акустических ветвей спектра пропорциональны волновому вектору, в то время как частоты оптических ветвей стремятся к конечным значениям.

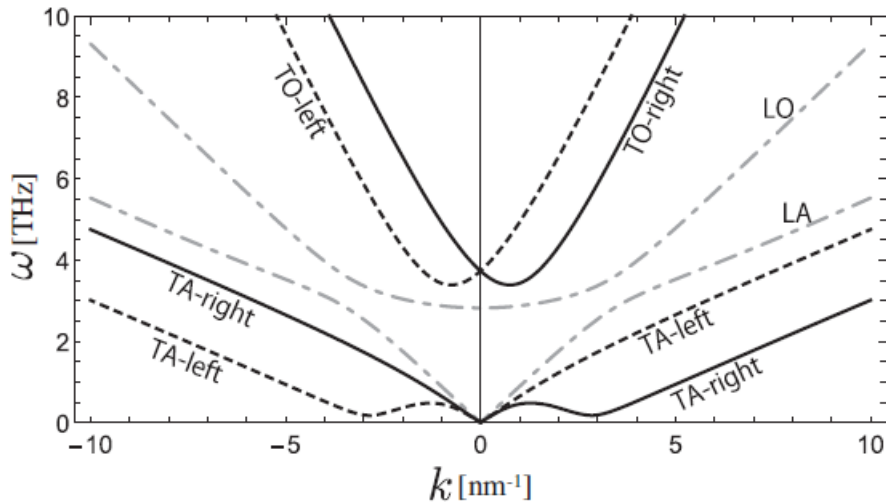


Рисунок 4 – Дисперсионные кривые хиральных фононов в микрополярном нецентросимметричном кристалле: акустическая (LA) и оптическая (LO) ветви продольных мод (штрихпунктирная линия), акустическая (TA-left) и оптическая (TO-left) ветви поперечных левополяризованных мод (пунктирная линия), акустическая (TA-right) и оптическая (TO-right) ветви поперечных правополяризованных мод (сплошная линия).

При этом оказывается, что при определенном выборе параметров модели акустическая ветвь спектра циркулярно поляризованных поперечных мод (TA-right) или (TA-left) демонстрирует минимум, отражающий гибридизацию вращательных и поступательных степеней свободы, который напоминает ротонный минимум в спектре сверхтекучего гелия. В диссертации показано, что выражение для спектра хиральных фононов имеет вид, аналогичный спектру квазичастичных возбуждений в сверхтекучем ^4He в сценарии Нозьера [17]. Согласно его точке

зрения, ротонны следует рассматривать как зарождение мягкой моды, связанной с кристаллической неустойчивостью. При этом конденсат бозонов стремится уменьшить значение ротонного минимума, который тем не менее остается конечным из-за эффекта истощения конденсата. В нашей модели конечность ротонно-подобного минимума (он никогда не достигает нуля) следует из требования устойчивости кристалла при распространении микрополярных упругих волн. Таким образом, можно сформулировать следующий механизм возникновения ротонно-подобного минимума – в результате гибридизации при распространении акустической поперечной волны возбуждаются вращательные моды, которые стремятся разрушить дальний кристаллический порядок. Отметим, что в нашем случае ротонно-подобный минимум наблюдается в классической системе, а значит такой вид дисперсии не является уникальной особенностью квантовых систем.

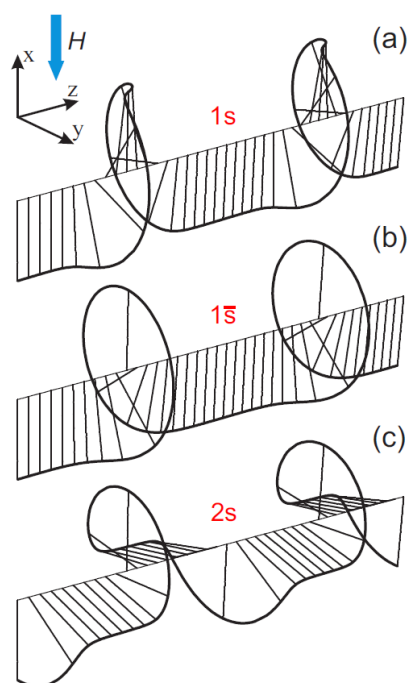


Рисунок 5 – Пространственное распределение намагниченности в несоизмеримых фазах модели двойного синус-Гордона.

Третья глава посвящена объяснению результатов исследования с помощью просвечивающей лоренцевской электронной микроскопии магнитного порядка в тонкой пленке CrNb_3S_6 , помещенной во внешнее магнитное поле и подвергнутой растягивающему механическому напряжению [A4]. Деформации, вызванные механическим растяжением, приводят к появлению дополнительной магнитной анизотропии, ось которой может быть ориентирована либо вдоль внешнего магнитного поля, либо перпендикулярно к нему в зависимости от значений соответствующих одноионных магнитоупругих постоянных. Хиральная магнитная солитонная решетка искажается в присутствии дополнительной магнитной анизотропии,

что соответствует трем различным решениям стационарного уравнения двойного синус-Гордона (см. рисунок 5).

Профили контраста Френеля просвечивающей лоренцевской электронной микроскопии, вычисленные для этих решений на основе теории эффекта Ааронова-Бома, обнаруживают ряд особенностей, которые можно использовать для идентификации неоднородных магнитных конфигураций в реальных соединениях. В диссертации показано, что в тонкой пленке CrNb_3S_6 при указанных выше внешних воздействиях реализуется несоизмеримая 1S-фаза модели двойного синус-Гордона. Этот вывод основан на непосредственном сравнении теоретических профилей с экспериментальными данными (см. рисунок 6).

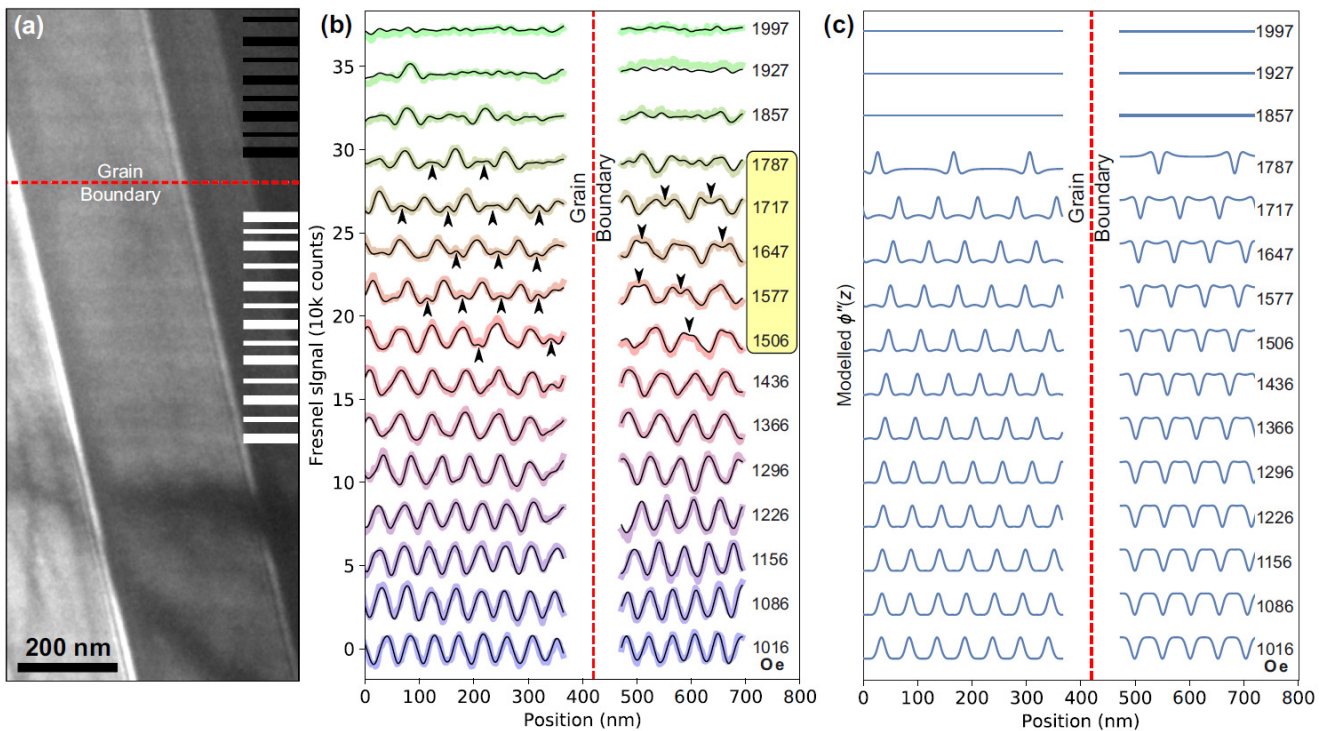


Рисунок 6 – (a) Изображение Френеля исследуемой области образца при $H_x = 1728 \text{ Э}$, где слабый магнитный контраст подчеркивается белым или черным цветом в зависимости от хиральности домена. Сравнение экспериментальных (b) и смоделированных (c) данных просвечивающей лоренцевской электронной микроскопии. Красная пунктирная линия разделяет домены с противоположной хиральностью. Черными стрелками отмечены дополнительные пики, возникающие в диапазоне полей от 1.5 кЭ до 1.8 кЭ.

В четвертой главе рассматривается теория магнитного гистерезиса, экспериментально обнаруженного в соединении $\text{Fe}_{0.5}\text{TiS}_2$ [A5]. Этот материал демонстрирует дальний антиферромагнитный порядок в нулевом магнитном поле, однако, в процессе перемагничивания при низких температурах наблюдаются широкие петли гистерезиса, типичные для изинговского ферромагнетика. Для объяснения этого явления предложена феноменологическая модель, учитывающая допускае-

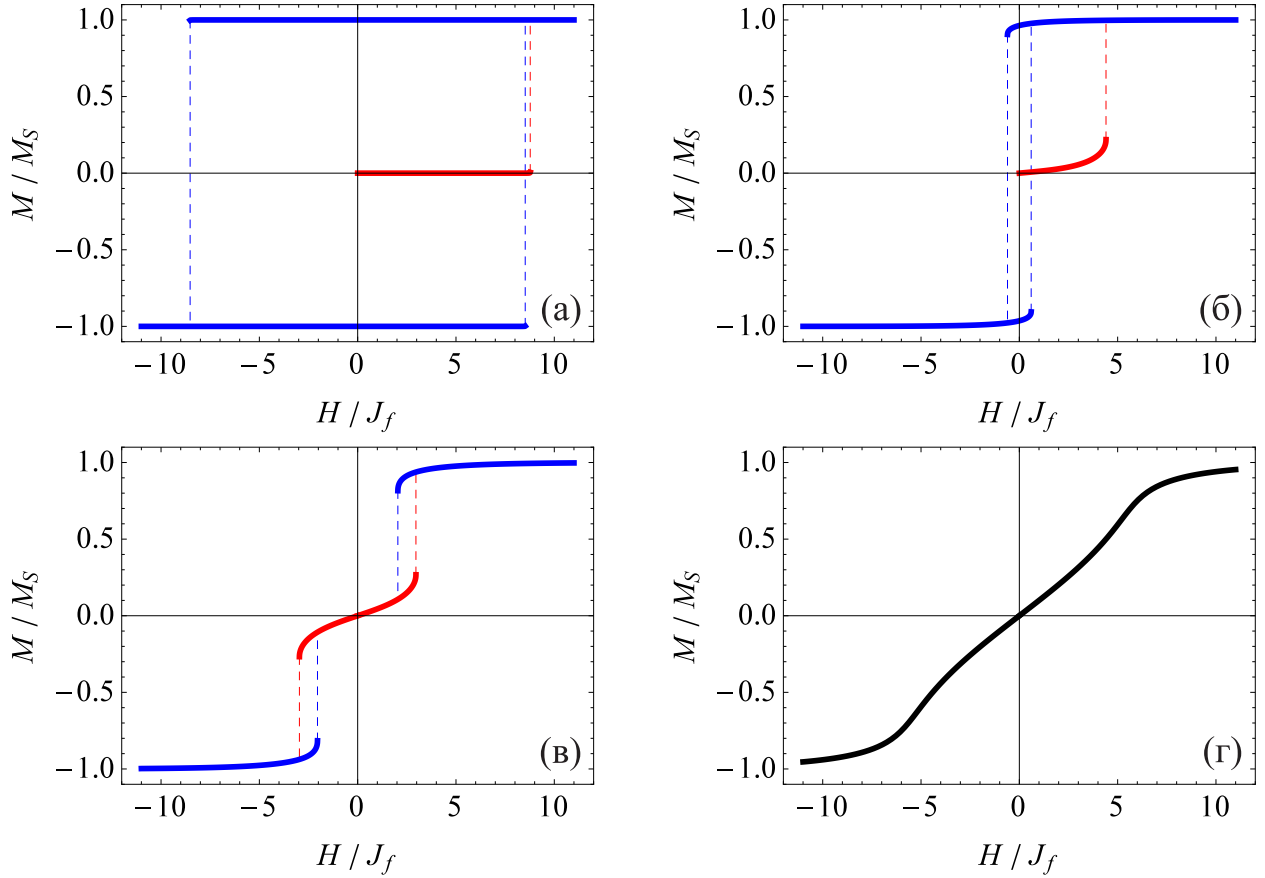


Рисунок 7 – Поведение модельного антиферромагнетика во внешнем магнитном поле при различных температурах: (а) высококоэрцитивное состояние в ферромагнитном режиме при $T = 0.1J_f$; (б) низкокоэрцитивное состояние в ферромагнитном режиме при $T = 4J_f$; (в) антиферромагнитный режим при $T = 6J_f$; (г) парамагнитная фаза при $T = 10J_f$. Отметим, что красная линия на рисунках (а) и (б) соответствует начальному процессу намагничивания; M – намагниченность при фиксированном значении магнитного поля, M_S – намагниченность насыщения, J_f – константа ферромагнитного обменного взаимодействия ионов Fe^{2+} в плоскости перпендикулярной к оси z .

мые моноклинной симметрией соединения $\text{Fe}_{0.5}\text{TiS}_2$ поправки к молекулярным полям двухподрешеточной модели Изинга, вносимые двухионным магнитоупругим взаимодействием. Соответствующие уравнения среднего поля для намагниченностей подрешеток ионов железа позволяют на качественном уровне воспроизвести температурное поведение формы петель магнитного гистерезиса в $\text{Fe}_{0.5}\text{TiS}_2$ или $\text{Fe}_{0.5}\text{TiS}_{2-y}\text{Se}_y$ при $y < 0.5$ (см. рисунок 7). В рамках предложенной модели удастся показать, что появление ферромагнитных петель гистерезиса при низких температурах обусловлено существованием метастабильного ферромагнитного состояния в нулевом магнитном поле, которое стабилизируется двухионным магнитоупругим взаимодействием в исходно антиферромагнитной системе. Поскольку магнитоупругий вклад в молекулярное поле, будучи кубическим по магнитному параметру порядка, уменьшается с ростом температуры более быстро по сравнению с

линейным обменным вкладом, то нагрев системы будет разрушать это метастабильное ферромагнитное состояние и приводить к возникновению двухпетлевой формы магнитного гистерезиса. Таким образом, представленная теория предлагает механизм температурной эволюции магнитного гистерезиса, основанный на разном температурном поведении обменных и магнитоупругих молекулярных полей.

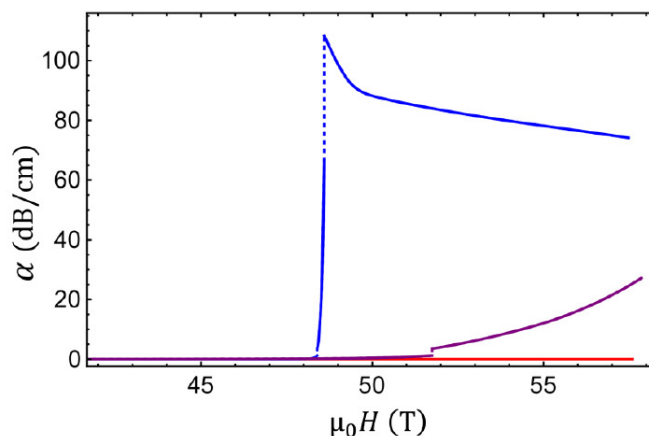


Рисунок 8 – Полевая зависимость коэффициента ослабления α продольной акустической волны, распространяющейся в LuCo_3 вдоль направления $[100]$ при температуре: 2 К (красный), 80 К (синий), 160 К (фиолетовый).

В пятой главе рассматривается задача о распространении ультразвуковых волн вдоль направления $[100]$ в сильноанизотропном ферромагнетике LuCo_3 вблизи кроссовера «низкий спин – высокий спин», индуцированного сверхсильным внешним магнитным полем, приложенным вдоль оси z [A2]. С помощью теории линейного отклика, использующей формализм мацубаровских функций Грина, показывается, 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 различными магнонными состояниями при распространении ультразвука. В низкоспиновом состоянии рассеяние носит нерезонансный характер. В диссертации показано, что вероятность процессов рассеяния фононов на магнонах пропорциональна температурной заселенности магнонной зоны, что приводит к эффективному усилению магнон-фононного взаимодействия при увеличении температуры. Смена характера рассеяния фононов на магнонах с нерезонансного на резонансный сопровождается резким ростом коэффициента ослабления ультразвука в области кроссовера «низкий спин – высокий спин», особенно заметным при температурах ~ 100 К (см. рисунок 8). Такое полевое поведение аку-

стических свойств сильноанизотропного ферромагнетика LuCo_3 , подтверждаемое экспериментальными наблюдениями, делает ультразвуковые методы перспективным инструментом исследования метамагнитных переходов в интерметаллидах редкоземельных металлов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей диссертационной работе рассматривается роль одноионного магнитоупругого взаимодействия в формировании магнитоупругих волн, распространяющихся вдоль хиральной оси гелимагнетика, и несоизмеримого магнитного порядка в одноосном хиральном гелимагнетике CrNb_3S_6 гексагональной симметрии в присутствии упругих напряжений; представлено описание структурно-хиральной среды в рамках микрополярной теории упругости. Также обсуждается влияние двухионного магнитоупругого взаимодействия на магнитный гистерезис в ряде интеркалированных дихалькогенидов переходных металлов и на процесс ослабления ультразвука в интерметаллиде LuCo_3 в области кроссовера «низкий спин – высокий спин», индуцированного сверхсильным внешним магнитным полем.

В качестве обобщающих результатов можно выделить следующее:

1. Установлено, что закон дисперсии магнитоупругих волн, распространяющихся вдоль хиральной оси, существенно зависит от основного состояния одноосного хирального гелимагнетика в присутствии внешнего магнитного поля. Конечная фаза характеризуется заметной асимметрией запрещенных зон в области магнитоакустического резонанса, в то время как фаза хиральной магнитной солитонной решетки демонстрирует мультрезонансное поведение. Следует отметить, что возможность контролируемого управления внешним магнитным полем дисперсии магнитоупругих волн в одноосных хиральных гелимагнетиках представляет собой крайне перспективное функциональное свойство этих материалов.

2. В рамках микрополярной теории упругости показано, что фононный спектр нецентросимметричного кристалла испытывает поляризационно-зависимое расщепление, аналогичное эффекту Рашбы. Определена область параметров, в которой гибридизация поступательных и вращательных степеней свободы микроэлемента сплошной среды приводит к появлению ротонно-подобного минимума у акустической ветви спектра микрополярных волн, распространяющихся вдоль хиральной оси. Таким образом, ротонны могут иметь классическую природу и существовать при комнатных температурах, что было подтверждено экспериментально в хиральных метаматериалах [16].

3. Вычислен контраст Френеля просвечивающей лоренцевской электронной микроскопии для каждого пространственно неоднородного решения стационарного уравнения двойного синус-Гордона. Характерные особенности такого контраста позволили идентифицировать в терминах модели двойного синус-Гордона несоизмеримый магнитный порядок, наблюдаемый экспериментально в тонкой пленке CrNb_3S_6 при совместном действии внешнего магнитного поля и растягивающих упругих напряжений, приложенных перпендикулярно к геликоидальной оси. На основе этого, предложен способ количественной оценки локальных упругих деформаций в образце с неоднородным магнитным упорядочением.

4. Показано, что при низких температурах двухионное магнитоупругое взаимодействие способно стабилизировать ферромагнитное состояние в антиферромагнетике $\text{Fe}_{0.5}\text{TiS}_2$ в отсутствие внешнего магнитного поля. Необычное температурное поведение формы магнитного гистерезиса вызвано разрушением такого метастабильного состояния с ростом температуры, что сопровождается изменением вида петли гистерезиса с однопетлевой формы в ферромагнитном режиме на двухпетлевую – в антиферромагнитном.

5. В рамках теории линейного отклика установлено, что распространение ультразвука в сильноанизотропном ферромагнетике может сопровождаться резонансным поглощением фононов магнонной подсистемой, вызывая переходы между различными спин-волновыми состояниями. Резкий рост ширины магнонной зоны в области кроссовера «низкий спин – высокий спин», индуцированного сверхсильным внешним магнитным полем, приводит к изменению характера рассеяния фононов на магнонах с нерезонансного на резонансный. Этот процесс сопровождается резким ростом коэффициента ослабления ультразвука, что согласуется с экспериментальными наблюдениями для направления распространения $[100]$ в интерметаллиде LuCo_3 при температурах ~ 100 К.

Перспективы дальнейшей разработки темы

Полученные результаты вносят существенный вклад в понимание магнитоупругих явлений в дихалькогенидах и интерметаллидах переходных металлов, а также эффектов структурной хиральности. Однако, ряд вопросов, не затронутых в данной диссертации, требует детального изучения. Среди таких открытых проблем можно отметить следующие:

1. Влияние основного состояния одноосного хирального гелимагнетика на ослабление ультразвука в присутствии внешних полей.

2. Роль локальных вращений микрополярной среды в процессах протекания тока в нецентросимметричных кристаллах. В частности, представляет особый ин-

терес объяснение с помощью таких вращений эффекта спиновой селективности индуцированной хиральностью, обнаруженного в соединениях CrNb_3S_6 , NbSi_2 и TaSi_2 .

3. Особенности распространения ультразвука вдоль направления $[001]$ монокристалла LuCo_3 в области кроссовера «низкий спин – высокий спин».

В заключение отметим, что результаты представленной диссертационной работы могут быть использованы для планирования новых экспериментов и для описания других соединений, родственных рассмотренным.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

A1. Tereshchenko, A.A. Emergent elasticity and wavelike to particle-like crossover in a magnetic chiral soliton lattice / **A.A. Tereshchenko**, V.I.E. Sinitsyn, I.G. Bostrem, P.V. Prudnikov, A.S. Ovchinnikov, J. Kishine // Physical Review B. – 2024. – Vol. 110. – P. 144426.

A2. Tereshchenko, A.A. Theory of ultrasound propagation in LuCo_3 near the low-spin-high-spin crossover / **A.A. Tereshchenko**, A.S. Ovchinnikov, D.I. Gorbunov, D.S. Neznakhin // Physical Review B. – 2022. – Vol. 106. – P. 054417.

A3. Kishine, J. Chirality-induced phonon dispersion in a noncentrosymmetric micropolar crystal / J. Kishine, A.S. Ovchinnikov, **A.A. Tereshchenko** // Physical Review Letters. – 2020. – Vol. 125. – P. 245302.

A4. Paterson, G.W. Tensile deformations of the magnetic chiral soliton lattice probed by Lorentz transmission electron microscopy / G.W. Paterson, **A.A. Tereshchenko**, S. Nakayama, Y. Kousaka, J. Kishine, S. McVitie, A.S. Ovchinnikov, I. Proskurin, Y. Togawa // Physical Review B. – 2020. – Vol. 101. – P. 184424.

A5. Baranov, N.V. Magnetic phase transitions, metastable states, and magnetic hysteresis in the antiferromagnetic compounds $\text{Fe}_{0.5}\text{TiS}_{2-y}\text{Se}_y$ / N.V. Baranov, N.V. Selezneva, E.M. Sherokalova, Y.A. Baglaeva, A.S. Ovchinnikov, **A.A. Tereshchenko**, D.I. Gorbunov, A.S. Volegov, A.A. Sherstobitov // Physical Review B. – 2019. – Vol. 100. – P. 024430.

A6. Tereshchenko, A.A. Theory of magnetoelastic resonance in a monoaxial chiral helimagnet / **A.A. Tereshchenko**, A.S. Ovchinnikov, I. Proskurin, E.V. Sinitsyn, J. Kishine // Physical Review B. – 2018. – Vol. 97. – P. 184303.

Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ:

A7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023669066 от 07 сентября 2023 г.: Программа для численного определения ко-

эффицента упругости магнитной киральной солитонной решетки: дата поступления 01 сентября 2023 г., дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 07 сентября 2023 г. / Вл.Е. Сеницын, **А.А. Терещенко**.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Turov, E.A. Broken symmetry and magnetoacoustic effects in ferro- and antiferromagnetics / E.A. Turov, V.G. Shavrov // *Advances in Physical Sciences*. – 1983. – Vol. 140. – P. 429-462.
2. Kishine, J. Chapter One – Theory of monoaxial chiral helimagnet / J. Kishine, A.S. Ovchinnikov // *Solid State Physics*. – 2015. – Vol. 66. – P. 1-130.
3. Inui, A. Chirality-induced spin-polarized state of a chiral crystal CrNb_3S_6 / A. Inui, R. Aoki, Y. Nishiue, K. Shiota, Y. Kousaka, H. Shishido, D. Hirobe, M. Suda, J. Ohe, J. Kishine, H.M. Yamamoto, Y. Togawa // *Physical Review Letters*. – 2020. – Vol. 124. – P. 166602.
4. Baranov, N.V. Magnetic order, field-induced phase transitions and magnetoresistance in the intercalated compound $\text{Fe}_{0.5}\text{TiS}_2$ / N.V. Baranov, E.M. Sherokalova, N.V. Selezneva, A.V. Proshkin, A.F. Gubkin, L. Keller, A.S. Volegov, E.P. Proskurina // *Journal of Physics: Condensed Matter*. – 2013. – Vol. 25. – P. 066004.
5. Neznakhin, D.S. Itinerant metamagnetic transition in the ferromagnet LuCo_3 induced by high field: Instability of the $3d$ -electron subsystem / D.S. Neznakhin, D.I. Radzivonchik, D.I. Gorbunov, A.V. Andreev, J. Sebek, A.V. Lukoyanov, M.I. Bartashevich // *Physical Review B*. – 2020. – Vol. 101. – P. 224432.
6. Bar'yakhtar, V. Spectrum of spin waves in antiferromagnets with a spiral magnetic structure / V. Bar'yakhtar, E. Stefanovskii // *Fizika Tverdogo Tela*. – 1969. – Vol. 11. – P. 1946-1952.
7. Бучельников, В.Д. Магнитоупругие волны в кристаллах с геликоидальной магнитной структурой / В.Д. Бучельников, В.Г. Шавров // *Физика твердого тела*. – 1989. – Т. 31. – С. 81-86.
8. Buchel'nikov, V.D. Coupled magnetoelastic and electromagnetic waves in uniaxial crystals having spiral magnetic structure / V.D. Buchel'nikov, I.V. Bychkov, V.G. Shavrov // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 1993. – Vol. 118. – P. 169-174.
9. Eringen, A.C. *Microcontinuum field theories* / A.C. Eringen. – New York: Springer-Verlag, 1999. – 325 p.
10. Pouget, J. Lattice model for elastic ferroelectric crystals: continuum approximation / J. Pouget, A. Askar, G.A. Maugin // *Physical Review B*. – 1986. – Vol. 33.

– P. 6320-6325.

11. Bukharaev, A.A. Straintronics: a new trend in micro- and nanoelectronics and materials science / A.A. Bukharaev, A.K. Zvezdin, A.P. Pyatakov, Y.K. Fetisov // *Advances in Physical Sciences*. – 2018. – Vol. 61. – P. 1175-1212.

12. Shibata, K. Large anisotropic deformation of skyrmions in strained crystal / K. Shibata, J. Iwasaki, N. Kanazawa, S. Aizawa, T. Tanigaki, M. Shirai, T. Nakajima, M. Kubota, M. Kawasaki, H.S. Park, D. Shindo, N. Nagaosa, Y. Tokura // *Nature Nanotechnology*. – 2015. – Vol. 10. – P. 589-593.

13. Tehranchi, M.-M. Spin-flop and incommensurate structures in magnetic ferroelectrics / M.-M. Tehranchi, N.F. Kubrakov, A.K. Zvezdin // *Ferroelectrics*. – 1997. – Vol. 204. – P. 181-188.

14. Izyumov, Y.A. Neutron diffraction by incommensurate magnetic structures / Y.A. Izyumov, V.M. Laptev // *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. – 1983. – Vol. 85. – P. 2185-2199.

15. Бучельников, В.Д. Релаксационные процессы в магнетиках вблизи ориентационных фазовых переходов / В.Д. Бучельников, В.В. Тарасенко, В.Г. Шавров // *Физика твердого тела*. – 1983. – Т. 25. – С. 3019-3024.

16. Martinez, J.A.I. Experimental observation of roton-like dispersion relations in metamaterials / J.A.I. Martinez, M.F. Grob, Y. Chen, T. Frenzel, V. Laude, M. Kadic, M. Wegener // *Science Advances*. – 2021. – Vol. 7. – P. eabm2189.

17. Nozieres, P. Is the roton in superfluid ^4He the ghost of a Bragg spot? / P. Nozieres // *Journal of Low Temperature Physics*. – 2004. – Vol. 137. – P. 45-67.