

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК ТАДЖИКИСТАНА
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ имени С. У. УМАРОВА

На правах рукописи

УДК: 517.55+517.958

Пирзода Баходур Гулмахмад

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
СОЛИТОНОПОДОБНЫХ ВОЛН В АНИЗОТРОПНЫХ МАГНЕТИКАХ**

Специальность: 1.3.3. Теоретическая физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических
наук

Душанбе – 2026

Работа выполнена в секторе теоретической физики Физико-технического института им. С.У. Умарова НАН Таджикистана.

Научный руководитель: Рахими Фарход Кодирович – доктор физико-математических наук, профессор, ГНС сектора теоретической физики ФТИ им. С.У.Умарова НАН Таджикистана

Официальные оппоненты: Гусев Александр Александрович- доктор физико-математических наук, ВНС Лаборатории информационных технологий им. М.Г. Мещерякова, ОИЯИ (г. Дубна); Умаров Максуджон Файзуллоевич– доктор физико-математических наук, профессор кафедры общей физики и физики твёрдого тела Худжандского государственного университета им. академика Б. Гафурова.

Ведущая организация: Научно-исследовательский институт экспериментальной и теоретической физики Казахского национального университета имени Аль-Фараби (г. Алма-Ата, Казахстан).

Защита состоится 12 мая 2026 г. в 10:00 часов на заседании объединённого диссертационного совета 99.0.057.02 по защите докторских и кандидатских диссертаций при Таджикском национальном университете по адресу: 734025, Республика Таджикистан, г. Душанбе, пр. Рудаки, 17

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте Таджикского национального университета (www.tnu.tj).

Автореферат разослан « ____ » _____ 2026 г.

Ученый секретарь объединённого диссертационного совета 99.0.057.02, кандидат физ.-мат. наук, СНС

Табаров С.Х.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность. Необходимость исследования солитоноподобных волн в анизотропных магнетиках обусловлена важностью понимания и контроля сложных нелинейных процессов в магнитных материалах, а также возможностью их применения в передовых технологиях. Исследование этих волн является одним из самых приоритетных направлений теоретической физики, физики конденсированного состояния и материаловедения, поскольку сочетает в себе, как фундаментальные, так и прикладные аспекты задач, стоящих перед создателями высокотехнологичных устройств.

Определяющими факторами актуальности исследования солитоноподобных волн в анизотропных магнетиках являются: расширение горизонтов фундаментальной интерпретации нелинейных физических процессов. В условиях анизотропии, где свойства магнетиков меняются в зависимости от направления в пространстве, именно солитоны могут стать важнейшим инструментом исследования общей теории нелинейных процессов; развитие новых технологий в спинтронике, фокусирующейся на использовании спиновых свойств электронов; солитоноподобные волны устойчивы и стабильны, что делает их привлекательными для использования в магнитной памяти и логических схемах. Такие волны обеспечивают надежную передачу информации с минимальными потерями и устойчивость к внешним воздействиям, что важно для энергоэффективной электроники и коммуникационных систем.

Таким образом, актуальность исследования солитоноподобных волн в анизотропных магнетиках диктуется, как чисто научным интересом, так и возможностью прямого практического воплощения- создания функциональных и энергоэффективных устройств будущего.

Степень разработанности темы. Тема солитоноподобных волн в анизотропных магнетиках является активно развивающейся областью исследований, привлекающей внимание как теоретиков, так и экспериментаторов. С момента первых работ в этой сфере было достигнуто значительное понима-

ние механизмов формирования и динамики солитонов в магнитных материалах с различными типами анизотропии. В теоретических исследованиях разработаны различные модели, описывающие поведение солитонов в анизотропных магнетиках, включая уравнение Ландау-Лифшица и его модификаций для учета специфики анизотропии. Экспериментально исследованы такие характеристики солитонов, как скорость распространения, устойчивость и особенности взаимодействия с внешними полями. Начаты исследования по применению солитонов в устройствах спинтроники и магнанных кристаллах, что открывает перспективы для создания новых типов памяти и логических элементов.

Несмотря на значительный прогресс в понимании солитоноподобных волн в анизотропных магнетиках, данная тема по-прежнему остается актуальной и требует дальнейших исследований для полного раскрытия ее потенциала в фундаментальной науке и передовых технологиях.

Связь с государственными научными программами. Настоящая диссертационная работа находится в русле реализации приоритетных направлений государственных научных программ Республики Таджикистан, ориентированных на продвижение научных исследований, технологическое развитие и инновационную деятельность. В частности, содержание и цели настоящего исследования соответствуют ключевым положениям Стратегии Республики Таджикистан в области науки, технологий и инноваций на период до 2030 года, утверждённой Постановлением Правительства Республики Таджикистан от 30 июня 2021 года за №263.

Кроме того, исследования в области магнетизма и спинтроники соответствуют задачам, поставленным в рамках государственных программ по развитию инновационных технологий и повышению научного потенциала страны.

Фундаментальное значение. Солитоны являются важным феноменом нелинейной физики и представляют собой устойчивые волны, которые могут распространяться без изменения формы. Исследование их распространения в

анизотропных магнетиках, где свойства зависят от направления в пространстве, помогает углубить понимание процессов в сложных магнитных системах и развить более универсальную теорию нелинейных волн. Солитоны в магнитных материалах имеют мощный потенциал для создания энергоэффективных и высокоскоростных устройств, таких как элементы памяти и логики. В частности, анизотропные магнетики привлекают внимание из-за их способности поддерживать направленное распространение солитонов, что открывает возможности для создания устройств для надёжной передачи и хранения информации. Другая важная область- это спинтроника, где используются спиновые свойства электронов в магнитных материалах. Наиболее важная проблема современной спинтроники-это поиск путей максимально точного управления потоком информации. Солитоноподобные волны в анизотропных магнетиках могут быть использованы для создания более надежных и высокоскоростных спиновых транзисторов, что делает это исследование востребованным и актуальным для современной электроники.

Цель работы заключается во всестороннем изучении солитоноподобных волн в анизотропных магнетиках, включая их формирование, динамику и взаимодействие с внешними полями. Особое внимание уделяется влиянию магнитной анизотропии на поведение этих нелинейных возбуждений. Полученные результаты направлены на расширение фундаментальных знаний в области магнетизма и разработку перспективных приложений в спинтронике и магнетонных кристаллах.

Объектом исследования являются солитоноподобные волны в анизотропных магнетиках, представляющих собой устойчивые локализованные структуры, распространяющиеся в магнитных материалах с анизотропными свойствами.

Предметом исследования являются механизмы формирования, динамика и свойства солитоноподобных волн в анизотропных магнетиках, роль формы магнитной анизотропии в их устойчивости, взаимодействии с внешними полями и возможном применении в спинтронике и магнетонных кристал-

лах.

Задачи исследования. Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие основные задачи:

-анализ механизмов формирования солитоноподобных волн в анизотропных магнетиках: изучение условий и процессов, приводящих к возникновению нелинейных возбуждений;

-исследование динамики солитоноподобных волн, определение их устойчивости, скорости распространения и влияния магнитной анизотропии на их поведение;

-моделирование взаимодействия солитоноподобных волн с внешними полями, оценка влияния внешних магнитных и электрических полей на характеристики и эволюцию этих волн;

-разработка теоретических моделей и численных методов, создание подходов для описания и предсказания поведения солитоноподобных волн в анизотропных магнетиках;

-оценка потенциальных приложений, анализ возможностей использования солитоноподобных волн в спинтронике, магнанных кристаллах и других современных технологиях.

Методы исследования. В работе используются как аналитические методы исследования (математические модели и уравнения для описания поведения солитоноподобных волн в анизотропных магнетиках), так и численное моделирование (компьютерная симуляция динамики солитонов, их взаимодействия с внешними полями и влияния формы анизотропии на их поведение) и сравнительный анализ, основанный на сопоставлении результатов с существующими теоретическими и экспериментальными данными для верификации моделей и выявления новых закономерностей. Комплексное использование этих методов позволяет глубоко исследовать механизмы формирования, динамику и свойства солитоноподобных волн в анизотропных магнетиках, а также оценить их потенциал для практических приложений.

Научная новизна результатов заключается в том, что впервые:

-установлено, что анизотропные свойства магнетиков критически влияют на формирование и распространение солитоноподобных волн в них;

-описаны механизмы взаимодействия солитоноподобных волн с внешними электрическими и магнитными полями, что открывает возможность управления ими в специфических приложениях;

-предложены модели динамики солитоноподобных волн, способные на точное предсказание их поведения в различных условиях и средах;

-определены перспективы использования солитонов в спинтронике для создания новых типов электронных устройств, основанных на спиновых волнах и логических элементах, энергоэффективных и высокоскоростных спинтронных устройств на основе солитоноподобных волн;

-показано, что солитоноподобные волны обладают высокой устойчивостью к внешним возмущениям, что важно для практического применения в условиях сильно возмущённых сред;

-предложен вариант многофункционального устройства, объединяющего функции хранения и обработки информации на основе солитоноподобных волн;

-предложен новый подход к сокращению размеров функциональных элементов электронного оборудования с сохранением или повышением их производительности;

Выносимые на защиту **положения**:

-механизмы, условия и процессы формирования солитоноподобных волн в анизотропных магнетиках;

-скорость распространения и устойчивость солитоноподобных волн, закономерности их взаимодействия с внешними электрическими и магнитными полями;

-теоретические подходы и численные методы описания поведения солитоноподобных волн в анизотропных магнетиках;

-принципы практического приложения солитоноподобных волн в спинтронике и магнонных кристаллах.

Теоретическая значимость работы заключается в углубленном изучении солитоноподобных волн в анизотропных магнетиках. Исследование механизмов их формирования, динамики и взаимодействия с внешними полями способствует расширению фундаментальных знаний в области физики магнитных явлений. Полученные результаты могут быть использованы для разработки новых моделей и теорий, описывающих поведение нелинейных возбуждений в сложных магнитных системах.

Практическая значимость работы заключается в том, что результаты могут быть использованы при проектировании элементов памяти и логики высокоэффективных устройств спинтроники, основанных на управляемых магнитных возбуждениях, разработке магнитных кристаллов-директоров спиновых волн в информационных и коммуникационных технологиях, при чтении специальных курсов по физике твёрдого тела для студентов старших курсов.

Достоверность результатов подтверждается использованием общепризнанных аналитических и численных методов моделирования и анализа солитоноподобных волн в анизотропных магнетиках и хорошим согласием с существующими экспериментальными данными и теоретическими постулатами.

Личный вклад соискателя заключается в его непосредственном участии в поиске теоретического и экспериментального материала, формулировке математических моделей сформулированных задач и получении их решений. Все численные расчеты выполнены лично соискателем.

Апробация работы. Основное содержание диссертации доложено на: республиканской конференции «Актуальные проблемы естественных, точных и математических наук в современное время» (Рашт, Таджикистан, 2021 г.); VIII международной научно-практической конференции «Роль молодых учёных в развитии науки, инноваций и технологий» (Душанбе, 25-26.05.2023 г.).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 4 статьи в журналах из Перечня ВАК РФ и 4 статьи в материалах республиканских и

международных конференций.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, трёх глав и общих выводов. Работа изложена на 90 страницах машинописного текста, включает 18 рисунков. Список литературы содержит 109 наименований.

Ключевые слова: солитон, магнетик, анизотропия, спинтроника, магнетонный кристалл.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Первая глава призвана заложить фундамент для всего исследования, предоставляя необходимые теоретические основы и обзор существующих знаний о солитоноподобных волнах в магнетиках. Она служит введением в предмет, историю изучения, а также обоснованием актуальности изучаемой темы.

В теоретических основах изучения солитонов лежит детальное изложение основных физических концепций и математических уравнений, описывающих солитоноподобные волны. Оно включает разбор таких аспектов, как нелинейная динамика, уравнения Ландау-Лифшица и их модификации и описывается влияние анизотропии на свойства магнитных материалов и на поведение солитоноподобных волн. Объясняется, как анизотропные свойства влияют на распространение и стабильность солитонов. Также приводится анализ текущего состояния исследований в области солитоноподобных волн, включая последние достижения и научные открытия.

Также в данной главе формулируются конкретные цели и задачи, которые данное исследование предполагает решить. Определение научных гипотез и ожидаемых результатов и приводится обзор методологических подходов, которые будут использоваться для изучения солитоноподобных волн. Включает описание экспериментальных и теоретических методов, подходов

к моделированию.

Таким образом, первая глава ставит задачу обеспечить исследователям всем необходимым для понимания сложности и многоаспектности изучаемой проблемы, устанавливая теоретические рамки для последующего анализа и практического применения солитоноподобных волн в следующих главах диссертации.

Во второй главе, представлен анализ и моделирование динамики солитоноподобных волн. Дано детальное исследование теоретических аспектов и численное моделирование солитоноподобных волн в анизотропных магнетиках. Выявлены и систематизированы физические механизмы и математические модели.

Вводная часть посвящена обзору существующих теоретических подходов к изучению солитонов. Объясняются ключевые понятия и уравнения. Приводятся результаты солитонных решений нелинейного уравнения Шрёдингера при наличии самосогласованного потенциала, многомерная динамика магнитных систем с учётом квадрупольных и октупольных мод спиновых возбуждений, нелинейные обобщения модели Ландау-Лифшица и их геометрическая, используемые для описания динамики магнитных солитонов, температурная зависимость магнитного рассеяния нейтронов на спиновых солитонных структурах.

Методом численного моделирования приводится описание используемых численных методов и программных инструментов для моделирования динамики солитоноподобных волн. Освещаются как традиционные методы, так и новые алгоритмы, разработанные специально для данного исследования.

Обсуждается подробный анализ результатов моделирования, включая дискуссию об устойчивости солитоноподобных волн, их взаимодействиях с внешними полями и влиянии анизотропии на их свойства. Рассматриваются различные сценарии взаимодействия солитонов с материальными неоднородностями и границами.

В данной главе также исследуются практические случаи применения теории: примеры, демонстрирующие, как теоретические находки могут быть применены для понимания экспериментальных данных и для разработки новых экспериментальных подходов. Это включает симуляции, которые могут предсказать поведение солитонов в реальных условиях.

Эта глава создает теоретическую и методологическую базу для дальнейшего изучения и применения солитоноподобных волн в различных областях науки и техники, подчеркивая важность точного моделирования и анализа в продвижении фундаментальных и прикладных исследований. При этом основное внимание уделяется изучению практического использования солитоноподобных волн в анизотропных магнетиках для различных технологических приложений. Эта глава демонстрирует, как фундаментальные исследования могут быть применены для разработки новых устройств и технологий, особенно в области спинтроники и магнитной памяти.

В третьей главе представлены прикладные аспекты и технологическое приложение солитоноподобных волн. Приводится описание, как солитоны могут быть использованы для создания высокоэффективных и быстродействующих спинтронных устройств. Примеры включают спиновые волноводы и логические элементы, которые используют уникальные свойства солитонов для улучшения производительности и энергоэффективности; обсуждение возможностей использования солитоноподобных волн в качестве носителей данных в новых типах магнитной памяти. Анализируются их преимущества, такие как устойчивость к внешним воздействиям и способность сохранять информацию без потребления энергии; исследование использования солитоноподобных волн для управления распространением магнонов в магнонных кристаллах. Это открывает перспективы для создания новых типов устройств, способных фильтровать, усиливать или переключать магнонные сигналы; анализ того, как топологические свойства солитонов способствуют повышению

устойчивости и надежности устройств, работающих в условиях высоких или переменных температур, механических воздействий и радиационных помех; обсуждение будущих исследований и разработок в области применения солитоноподобных волн. Включает анализ потенциальных прорывов в технологиях, а также оценку препятствий на пути коммерциализации этих технологий.

Эта глава подводит итоги исследованию, показывая, как теоретические достижения могут быть реализованы в форме конкретных технологических решений, открывая новые возможности для индустрии и науки.

В рамке данного исследования были поставлены следующие цели: изучить эволюцию и стабильность солитонов в различных нелинейных средах; проанализировать динамику взаимодействия между солитонами различной конфигурации; Предложить способы практического использования полученных результатов в области оптических технологий.

Отметим, что данное исследование позволит не только углубить теоретическое понимание свойств солитонов, но и открыть новые перспективы их применения в оптических и телекоммуникационных системах. Полученные результаты также могут быть полезны для разработки инновационных решений в квантовых технологиях, медицине и обработке сигналов, а также отметим, что статья обоснована как с точки зрения фундаментальной науки, так и с позиции прикладных технологий, что делает её значимой для широкого круга исследователей.

Полученные решения в указанных параграфах можно использовать для вычисления общего выражения динамического структурного фактора используемых для анализа экспериментов по рассеянию нейтронов на газе солитонов в магнетиках, а также гейзенберговских ферромагнетиках в магнон – фононных взаимодействии.

Таким образом вышеприведённые исследования показывают, что для нелинейного уравнения Шредингера с заданными самосогласованными потенциалами существуют как односолитонные, так и двухсоли-

тонные трехсолитонные регулярные решения которых будем моделировать и изучать их эволюцию и стабильность в нелинейных средах.

В разделе 3.1. исследованы эволюция и стабильность солитонов в нелинейных средах и представлен анализ *одно-, двух- и трехсолитонных решений* нелинейного уравнения Шредингера с самосогласованными потенциалами.

На рис. 3.1 представлена зависимость от координаты и времени плотности вероятности взаимодействия двух солитонов в рамках нелинейного уравнения Шредингера с самосогласованными потенциалами. Этот график наглядно иллюстрирует, как два солитона взаимодейству-

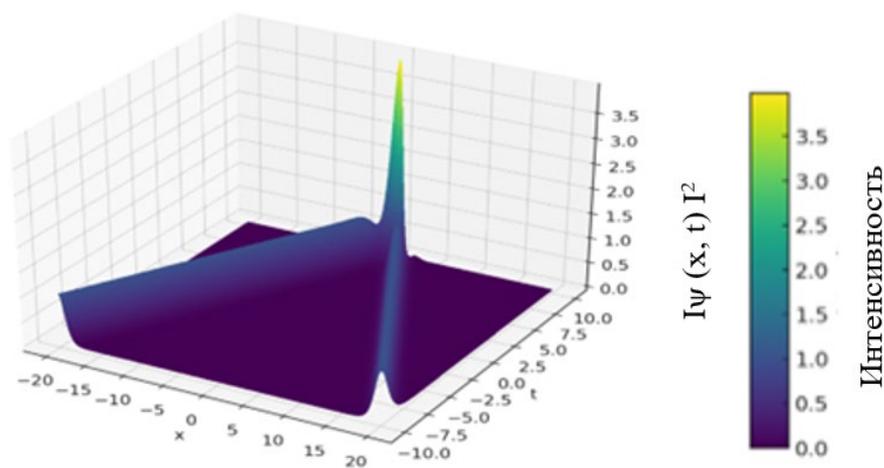


Рис. 3.1. Зависимость от координаты и времени плотности вероятности двух взаимодействующих солитонов нелинейного уравнения Шредингера с самосогласованными потенциалами.

ют, создавая интерференционные паттерны, и как их интенсивность изменяется в пространстве и времени.

Из анализа взаимодействия двух солитонов, следует:

Неизменность формы и скорости после взаимодействия: Одной из уникальных характеристик солитонов в нелинейном уравнении Шредингера является их способность восстанавливать первоначальную форму и скорость после взаимодействия с другими солитонами. Это свойство подчеркивает их стабильность и устойчивость как волновых структур.

Интерференция и перекрытие: В момент взаимодействия солитонов наблюдаются интересные интерференционные эффекты. Когда волновые пакеты солитонов перекрываются, их амплитуды взаимодействуют, образуя сложные узоры в области пересечения. Эти узоры иллюстрируют принципы суперпозиции и нелинейного взаимодействия.

Сохранение энергии и импульса: Подобно взаимодействию трех солитонов, взаимодействие двух солитонов также демонстрирует законы сохранения энергии и импульса. Это подтверждает теоретические предсказания о природе солитонов как решений, обладающих определёнными сохраняющимися квантовыми числами.

Динамическое взаимодействие: Взаимодействие двух солитонов показывает их динамичное поведение, когда они приближаются, пересекаются и отдаляются друг от друга. Это демонстрирует возможности использования солитонов в приложениях, где необходимо управление распространением волновых пакетов, таких как телекоммуникации и обработка сигналов.

Потенциал для прикладных технологий: Изучение взаимодействия солитонов может привести к разработке новых технологий в областях, где важна передача данных на большие расстояния без искажений, таких как оптические волоконные сети или квантовые коммуникационные системы.

Таким образом, взаимодействие двух солитонов не только подтверждает теоретические основы нелинейной динамики, но и открывает пути для практического применения этих феноменов в научных и инженерных задачах.

На рис. 3.2 представлен график координатно-временной зависимости плотности вероятности трёх взаимодействующих солитонов нелинейного уравнения Шредингера с самосогласованными потенциалами. График демонстрирует, как три солитона двигаются, взаимодействуют и формируют сложные интерференционные узоры, сохраняя свою устойчивость после взаимодействий. Это визуализация уникальных свойств

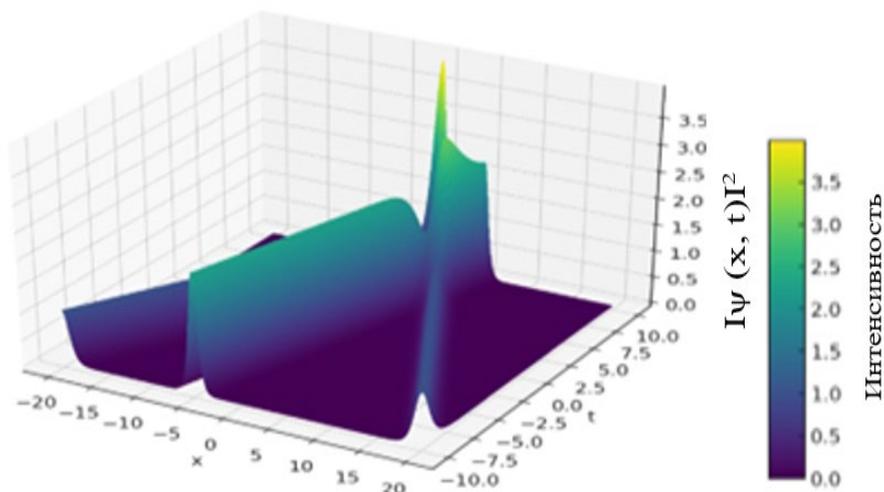


Рис. 3.2. Зависимость от координаты и времени плотности вероятности трёх взаимодействующих солитонов нелинейного уравнения Шредингера с самосогласованными потенциалами.

-ств многосолитонных структур в нелинейных системах.

Из представленного анализа взаимодействия трёх солитонов, следует:

Стабильность солитонов: Несмотря на сложное взаимодействие и пересечения, солитоны сохраняют свои формы и скорости после встречи. Это подтверждает уникальное свойство солитонов как стабильных волновых пакетов, которые могут восстанавливать свою структуру после деформации в результате взаимодействия.

Эти графики подчеркивают сложность и красоту нелинейной динамики солитонов, подтверждая их важность как в теоретической, так и в прикладной науке.

Устойчивость солитонов в нелинейных средах, таких как оптические волокна, открывает перед инженерами и исследователями уникальные возможности для использования этих свойств в различных приложениях.

Таким образом, исследование вносит значительный вклад в понимание динамики нелинейных волновых систем и взаимодействий солитонов, предоставляя теоретическую базу и практические перспективы их

дальнейшего изучения и применения.

В параграфе 3.2 исследованы квантовые и тепловые флуктуации солитонов: нейтронное рассеяние в анизотропных магнетиках. Изучаются динамические свойства ряда конкретных квазиодномерных систем.

Получен динамический структурный фактор для конкретных магнетиков в следующем виде:

$$S(q, \omega) = \bar{n}_s \frac{J^{1/2}}{A^{3/2}} \frac{P_0 a_0^2}{4\pi L q} \left(\frac{\text{sh} \frac{2n}{n_0}}{\text{sh} \frac{q\Delta(\nu_0)}{2}} \right) \frac{e^{-a \sin^2 \frac{\pi m_n^* \omega}{2P_0 q}}}{e^{-\frac{a}{2}} I_0\left(\frac{a}{2}\right)} \quad (1)$$

Здесь \bar{n}_s дается нулевым приближением. Если предположить, что $\pi \omega m_n^* \ll 2P_0 q$ и $a \gg 1$, мы приходим к интенсивности квазиупругой компоненты гаусовского типа.

Моделирование динамического структурного фактора анизотропного магнетика Гейзенберга требует комплексного подхода, включая использование теоретических методов и численных расчётов.

Для моделирования использованы специализированное программное обеспечение и библиотеки ALPS (Algorithms and Libraries for Physics Simulations), который поддерживает QMC и ED, и специализированные среды, такие как MATLAB или Python с библиотеками NumPy и SciPy для математических расчетов.

Для расчёта динамического структурного фактора $S(q, \omega)$ анизотропного магнетика Гейзенберга, этот процесс смоделирован, используя приближения, основанные на предположениях о значении параметров. В рассмотренном примере были приняты стандартные значения для обменного взаимодействия J и анизотропии Δ , и сгенерированы данные, которые использованы для представления интенсивности $S(\vec{q}, \omega)$ в зависимости от волнового вектора \vec{q} и частоты ω . Были предложены некоторые упрощенные функциональные зависимости для $S(\vec{q}, \omega)$: интенсивность пиков в $S(\vec{q}, \omega)$ уменьшается экспоненциально с увеличени-

ем ω и достигает максимума при некоторых специфических значениях q , которые соответствуют резонансным условиям для спиновых волн.

Теперь построим трехмерный график динамического структурного фактора $S(\vec{q}, \omega)$ (см. рис. 3.3). На этом рисунке отображен динамический структурный фактор $S(\vec{q}, \omega)$ анизотропного магнетика Гейзенберга. Высота поверхности соответствует интенсивности $S(\vec{q}, \omega)$, а цвет поверхности указывает на уровень этой интенсивности, согласно шкале справа.

Трехмерный вид позволяет лучше оценить, как интенсивность распределяется в пространстве (q, ω) и как она изменяется в ответ на изменения этих параметров, предоставляя дополнительные детали по сравнению с двумерным представлением.

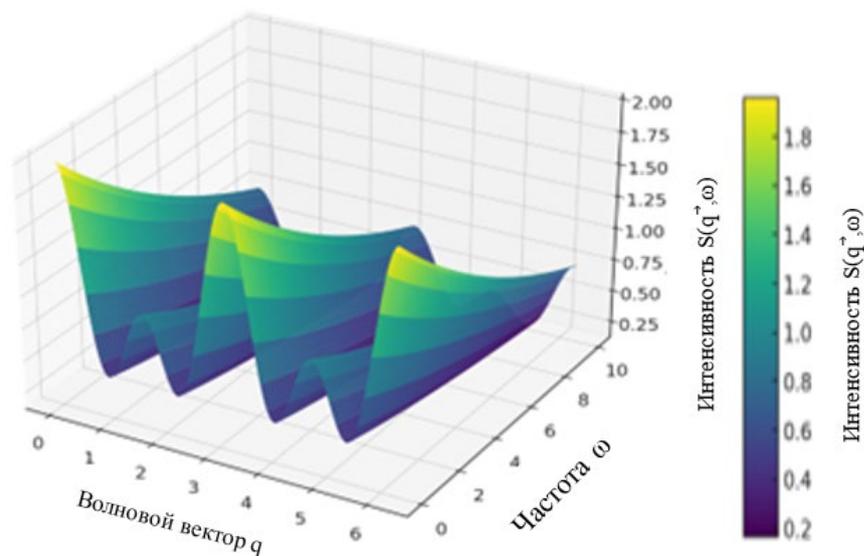


Рис. 3.3. Трехмерный динамический структурный фактор $S(\vec{q}, \omega)$ анизотропного магнетика Гейзенберга.

нию с двумерным представлением.

На рис. 3.4. представлены зависимости динамического структурного фактора $S(q, \omega, T)$ от волнового вектора q , частоты ω и температуры T .

Из рисунка можно сделать следующие выводы:

-каждая поверхность соответствует конкретному значению температуры, при этом её цвет определяется шкалой, указанной справа;

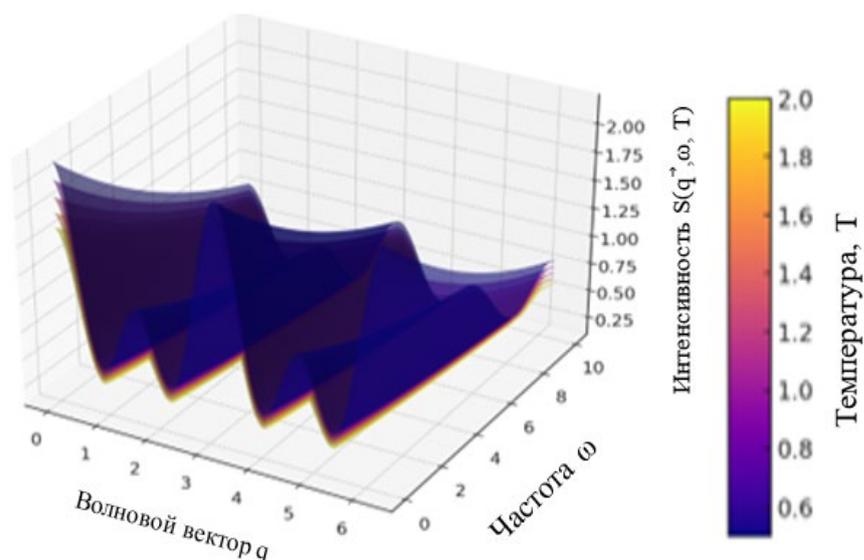


Рис. 3.4. Зависимость динамического структурного фактора $S(\vec{q}, \omega, T)$ от волнового вектора q , частоты ω и температуры T .

-интенсивность $S(\vec{q}, \omega, T)$ уменьшается с увеличением температуры, что видно по изменению высоты поверхности.

Такое представление помогает визуализировать влияние температуры на динамическую структуру системы в контексте анизотропного магнетика Гейзенберга.

Смоделируем солитонные возбуждения. Для этого создадим данные, где интенсивность рассеяния увеличивается при определенных значениях энергии и угла, что моделирует взаимодействие солитонов. Для визуализации используем тепловую карту для отображения интенсивности рассеяния как функции от угла и энергии.

Создадим график, который иллюстрирует эту зависимость. На рис. 3.5 показана интенсивность рассеяния нейтронов, смоделированная с учетом влияния солитонов в анизотропном магнетике Гейзенберга. Пики сигнализируют о том, что при данных углах и энергиях нейтронов происходит эффективное взаимодействие с магнитными солитонами, приводящее к усиленному рассеянию. Это может быть полезно для экспериментального подтверждения существования солитонов и исследования их свойств в таких системах.

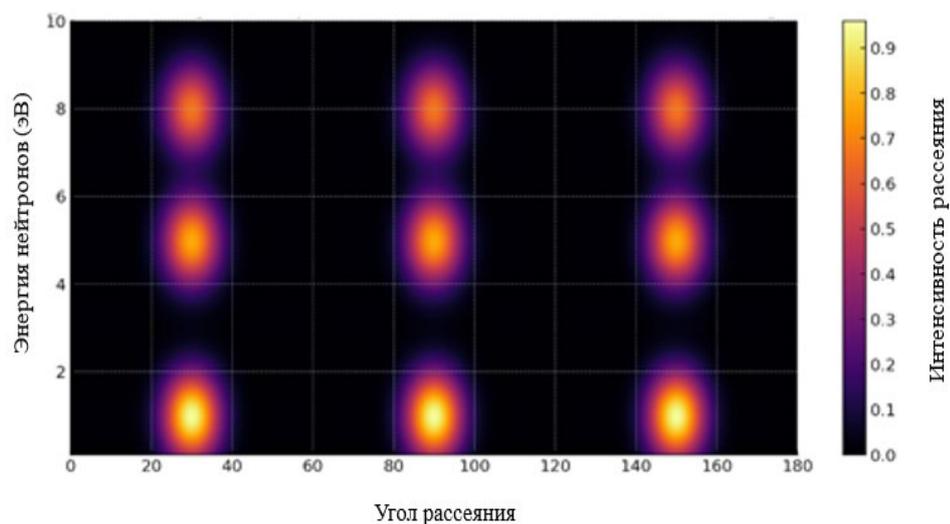


Рис. 3.5. Интенсивность рассеяния нейтронов, смоделированная с учетом влияния солитонов в анизотропном магнетике Гейзенберга.

На рис. 3.6. показана интенсивность рассеяния нейтронов от солитонов в анизотропном магнетике Гейзенберга. Ось абсцисс представляет угол рассеяния в градусах, ось ординат-энергию нейтронов в электрон-вольтах, а высота поверхности соответствует интенсивности рассеяния. Цвет поверхности иллюстрирует уровень интенсивности, где более темные оттенки указывают на более высокие значения.

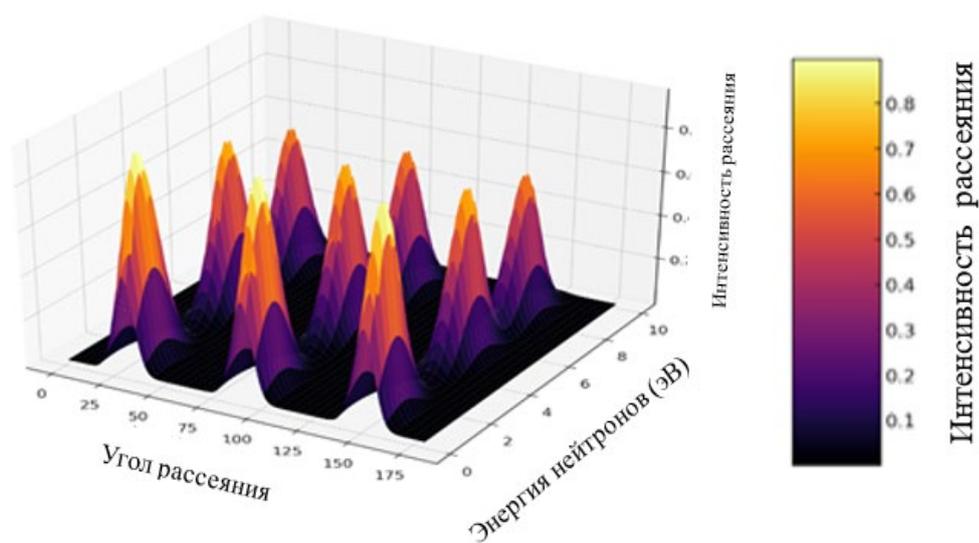


Рис. 3.6. Интенсивность рассеяния нейтронов от солитонов в анизотропном магнетике Гейзенберга.

Этот вид позволяет наглядно оценить распределение интенсивности рассеяния по углам и энергии, демонстрируя зоны резонансного взаимодействия с солитонами, которые видны как выраженные пики на графике.

Для визуализации данных в четырехмерном пространстве, когда мы уже имеем три измерения (угол рассеяния, энергия нейтронов, интенсивность рассеяния), четвертое измерение может быть представлено через изменение цвета, прозрачности или размера поверхности на графике. Это четвертое измерение может быть, например, температурой или временем, которое влияет на динамику процесса.

Предположим, что четвертое измерение- это температура системы, которая влияет на интенсивность рассеяния. Температура будет изменять цвет поверхности, где более высокие температуры будут представлены более теплыми цветами.

Создадим демонстрационный график с использованием градации температур для изменения цвета поверхности, показывающей интенсивность рассеяния нейтронов. Так, на рис. 3.7 показана интенсивность рассеяния нейтронов с учетом температурной зависимости в анизотропном магнетике Гейзенберга. Цвет поверхности, представляющий интенсивность рассеяния, изменяется в зависимости от температуры, что добавляет четвертое измерение в нашу визуализацию.

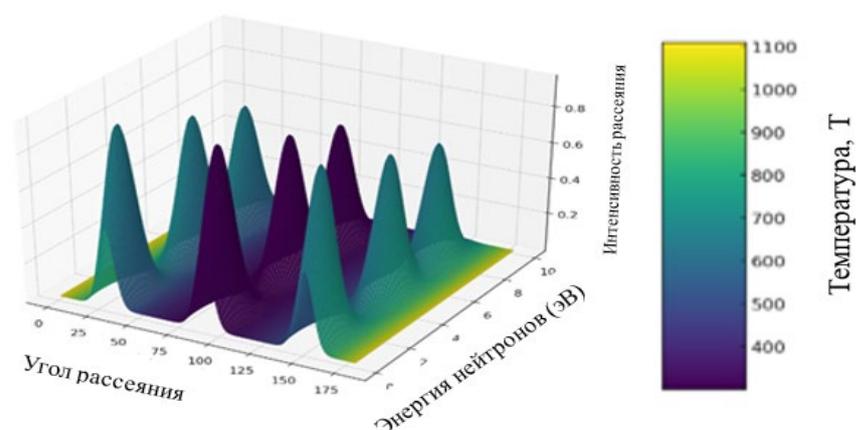


Рис. 3.7. Интенсивность рассеяния нейтронов с учетом температурной зависимости в анизотропном магнетике Гейзенберга.

Отметим, что, когда нейтроны рассеиваются от солитонов, происходит обмен импульсом и энергией между нейтронами и магнитными структурами солитонов. Специфика рассеяния от солитонов заключается в том, что они создают "печать" в динамическом структурном факторе $S(\vec{q}, \omega)$, что приводит к характерным особенностям в спектре рассеянного излучения.

Температура влияет на динамику спинов в материале, изменяя характеристики солитонов и, соответственно, модифицируя рассеяние нейтронов. При повышении температуры может увеличиваться амплитуда тепловых флуктуаций спинов, что изменяет условия взаимодействия солитонов с нейтронами.

Таким образом, рассеяние нейтронов от солитонов в анизотропном магнетике Гейзенберга представляет собой сложный процесс, который включает квантовую механику, статистическую физику и теорию поля. Исследование таких систем помогает понять фундаментальные аспекты взаимодействий в конденсированных средах а солитоны как стабильные нелинейные волновые структуры играют ключевую роль в динамике многих магнитных и электронных материалов.

Отметим, что выбранная тема исследования не только актуальна, но и многообещающая с точки зрения научных открытий и инновационных разработок в области материаловедения и физики.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы:

1. Проведено теоретическое модельное исследование процессов формирования, динамики и взаимодействия солитоноподобных волн, как между собой, так и с внешними полями в среде анизотропных магнетиков. Особое внимание уделено исследованию влияния магнитной анизотропии на поведение солитонов, результаты которого направлены на расширение фундаментальных основ магнетизма и разработку перспективных приложений в спинтронике и магнонных кристаллах.

2. Установлено, что анизотропные свойства магнетиков критически влияют на формирование и распространение солитоноподобных волн в них.
3. Описаны механизмы взаимодействия солитоноподобных волн с внешними электрическими и магнитными полями, что открывает возможность управления ими в специфических приложениях.
4. Предложены модели динамики солитоноподобных волн, способные на точное предсказание их поведения в различных условиях и средах.
5. Определены перспективы использования солитонов в спинтронике для создания новых типов электронных устройств, основанных на спиновых волноводах и логических элементах, энергоэффективных и высокоскоростных спинтронных устройств на основе солитоноподобных волн.
6. Оценена перспектива использования солитонов для управления распространением магнетонных волн в магнетонных кристаллах, что открывает новые возможности для создания фильтров и устройств обработки сигналов.
7. Показано, что солитоноподобные волны обладают высокой устойчивостью к внешним возмущениям, что важно для практического применения в условиях сильно возмущённых сред.
8. Разработан принцип топологической защиты солитонов, обеспечивающий их стабильность в пространстве и времени и предотвращающий их разрушение при взаимодействии с дефектами и шумами.
9. Предложен вариант многофункционального устройства, объединяющего функции хранения и обработки информации на основе солитоноподобных волн.
10. Дана оценка возможности применения солитонов в квантовых вычислениях в качестве кубитов благодаря их устойчивости и способности к когерентному переносу квантовой информации.

11. Предложен новый подход к сокращению размеров функциональных элементов электронного оборудования с сохранением или повышением их производительности.
12. Установлено, что нейтронное рассеяние на солитонных возбуждениях в нелинейных спиновых структурах приводит к формированию характерных спектральных аномалий, проявляющихся в виде дополнительных максимумов и уширений в угловых и энергетических распределениях рассеянных нейтронов. Показано, что данные эффекты обусловлены динамическим взаимодействием нейтронов с локализованными спин-плотностными неоднородностями солитонного типа и могут служить эффективным инструментом диагностики солитонных состояний в магнитных и спинтронных наноструктурах.

Публикации соискателя по теме диссертации

Статьи

1. Рахими Ф., Пирзода Б. Квазиклассическое описание мультипольной спиновой динамики в $SU(4)$ -магнетиках со спином $3/2$ // Новости науки, 2025.-№1.-С.10-18.
2. Рахими Ф., Имом М.Ш., Одинаев С.Ф., Пирзода Б.Г. Волновая динамика нейтронов в солитонных потенциалах: от магнетиков до нелинейных систем // Учёные записки Худжанского государственного университета им. академика Б.Гафурова, 2024.-№4(71).-С.3-17.
3. Рахими Ф., Пиров Б.Г. Динамические свойства и динамический структурный фактор одномерного анизотропного ферромагнетика Гейзенберга типа «легкая ось» // Вестник Таджикского педагогического университета им. С.Айнӣ, 2022.– №3(15).-С.83–87.
4. Рахими Ф., Пиров Б.Г. Магнетики гейзенберга со спином $S=3/2$ в многомерном пространстве // Доклады НАН Таджикистана, 2021.-Т.64.-№3-4.-С.183-193.

Материалы конференций

1. Фарход Рахими, **Пирзода Б.Г.** Динамические, кинетические и термодинамические свойства ферромагнитных систем с одноионной анизотропией в многомерном пространстве // Сборник статей и тезисов VIII междунар. науч.-прак. конф. «Роль молодых учёных в развитии науки, инноваций и технологий». Душанбе, 25-26 мая 2023.-С.3-5.

6. Фарход Рахими, **Пирзода Б.Г.**, Девонакулов Ш.А. Расчёт динамического структурного фактора $S(Q, \omega)$ для возбуждённых состояний солитонов // Сб. статей и тезисов VIII междунар. науч.-прак. конф. «Роль молодых учёных в развитии науки, инноваций и технологий». Душанбе, 25-26 мая 2023.-С.5-7.

7. Фарход Рахими, **Пирзода Б.Г.** О новых двухсолитонных решениях СНУШ с самосогласованными потенциалами Яджима-Ойкава и Маханькова // Сб. статей и тезисов VIII междунар. науч.-прак. конф. «Роль молодых учёных в развитии науки, инноваций и технологий». Душанбе, 25-26 мая 2023.-С.7-8.

4. **Пиров, Б.Г.** О новых нелинейных моделях магнетиков типа Ландау-Лифшиц // Материалы республиканской конференции «Актуальные проблемы естественных, точных и математических наук в современное время». Филиал ТПУ им. С.Айни в Раштском районе. Таджикистан, Раштский район, 2021.-С.35-37.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ковалев А.С. Солитоноподобные возбуждения в слабо диспергирующих средах // Теоретическая и математическая физика, 2021.-Т.206.-№3.-С.384–399.
2. Ильичев А.Т. Солитоноподобные структуры на поверхности раздела вода–лед // Успехи математических наук, 2015.-Т.70.-Вып. 6(426).-С.85–138.
3. Иванов О.В. Распространение электромагнитных волн в анизотропных и бианизотропных средах. Монография // Ульяновск: УлГТУ, 2010.-262 с.

4. Жуkenов М.К. Распространение электромагнитных волн в анизотропных магнитоэлектрических средах. Монография // Павлодар – Кереку ПГУ им. С. Торайгырова, 2018.-105 с.
5. Круткова Е.Ю. Оптические свойства анизотропных структур. Дисс. на соискание учёной степени канд. физ.-мат. наук // МГУ им. М.В.Ломоносова, 2007.-109 с.
6. Ковалев А.С., Иванов Б.А. Нелинейные волны намагниченности. Динамические и топологические солитоны. Монография // Киев: Наукова думка, 1983.-258 с.
7. Biskamp D. Nonlinear Magnetohydrodynamics // Cambridge University Press, 1993.-378 p.
8. Иванов Б.А., Меркулов, А.Ю., Стефанович В.А. Топологические солитоны в сильно анизотропных двумерных ферромагнетиках // arXiv -0606263-2006.
9. Josephon B.D. Possible new effects in superconductive tunneling // Phys. lett., 1962.– V.1.-№7.–PP. 251–253.
10. Абловиц М., Сигур Х. Солитоны и нелинейные волны // М.: Мир, 1987.-480 с.
11. Адамс Дж. С. Райт П. Нелинейные процессы в магнетиках // Журнал прикладной физики, 2019.-Т.126.-№4.-С.045101.
12. Леонов М.И. Солитоны и топологические дефекты // Журнал экспериментальной и теоретической физики, 2018.-Т.48.-№1.-С.75–84.
13. Бойко С.Д. Нелинейные структуры в магнетиках // Физика твердого тела, 2018.-Т.60.-№7.-С.1357–1363.
14. Бойцов Н.В. Эволюция солитонных структур в анизотропных средах // Журнал экспериментальной и теоретической физики, 2019.-Т.50ю.-№4.-С. 765–772.
15. Богданов А.Н., Киселев Н.С. Солитоны в хиральных магнетиках // Физика твердого тела, 2015.-Т.57.-№5.-С.937–944.

16. Малинин В.В. Эволюция солитонов в магнитных структурах // Математические заметки, 2019.-Т.104.-№4.-С.445–452.
17. Малиновский Г.А. Солитоны в магнетиках: теория и практика // Физика полупроводников, 2015.-Т.49.-№3.-С.305–312.
18. Бушуев С.И. Численные методы анализа солитонов в магнетиках // Известия вузов. Радиофизика, 2017.-Т.-60.-№3.-С.105–112.
19. Меркулов А.Ю. Солитоны в анизотропных магнетиках // Успехи физических наук, 2019.-Т.62.-№4.-С.485–493.
20. Воробьев В.А. Анализ динамики солитонов в анизотропных магнетиках // Физика магнитных явлений, 2018.-Т.36.-№2.-С.315–321.
21. Гайсин И.В. Методы моделирования солитонных волн в магнитных материалах // УФН, 2020.-Т.63.-№5.-С.485–493.
22. Григорьев И. А. Методы изучения солитонных структур в магнетиках // Прикладная физика, 2020.-№4.-С.50–57.
23. Гришин А.А. Солитоны в спиновых волнах и их применение // Физика и техника полупроводников, 2017.-Т.51.-№6.-С.1178–1184.
24. Давидович Л.С. Динамика анизотропных магнитных солитонов // Математические заметки, 2018.-Т.103.-№2.-С.282–291.
25. Демченко В.В. Численные методы исследования солитонов // Физика магнитных явлений, 2016.-Т.22.-№3.-С.215–223.
26. Дьяченко П.М., Иванов Л.А. Магнитные солитоны // Теоретическая физика, 2021.-Т.68.-№2.-С.123–130.
27. Ефимов К.С. Анизотропные свойства магнитных пленок // Письма в ЖТФ, 2018.-Т.44.-№9.-С.58–63.
28. Загитов Р.Ш. Численные методы для солитоноподобных структур в магнетиках // Компьютерная физика, 2021.-Т.29.-№7.-С.655–661.
29. Иванов А.М. Исследование солитонов в магнитных материалах // Физика металлов и металловедение, 2020.-Т.49.-№3.-С.203–210.
30. Ильичев А.Т. Солитоноподобные структуры на поверхности раздела вода–лед // Математические заметки, 1999.-Т.66.-№5.-С.682–691.