

АННОТАЦИЯ

диссертации на соискание степени доктора философии PhD по специальности
«6D060400 – Физика»

БЕКОВА ГҮЛДАНА ТАҢБАЙҚЫЗЫ

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ СОЛИТОННЫХ МОДЕЛЕЙ ФЕРРОМАГНЕТИКОВ

Диссертация посвящена теоретическому исследованию некоторых нелинейных моделей типа модели ферромагнетиков Гейзенберга, описывающей распространение спиновых волн в нелинейной среде.

Актуальность темы.

Последнее время возрос интерес ученых к теоретическому и экспериментальному изучению нелинейных явлений в магнитных средах. Этот интерес в основном связан с тем, что магнитные кристаллы широко используются во многих областях, где применяются нелинейные свойства магнетиков. Например, скорость некоторых компонентов современных компьютеров зависит от динамики цилиндрических магнитных доменов, которые по сути являются нелинейными структурами из ферромагнитных материалов. Возможно также нелинейное возбуждение магнитных кристаллов.

Важным примером солитонов в магнетиках, то есть магнитных солитонов является доменная граница, разделяющая однородно намагниченные домены с различными направлениями намагниченности. Особый интерес представляют цилиндрические магнитные домены, которые могут использоваться для передачи и записи информации в современных компьютерах.

Нелинейные явления могут быть описаны в терминах взаимодействия элементарных возбуждений систем взаимодействующих спинов – магнонов. Процессы взаимодействия магнонов не только играют важную роль в формировании отклика магнетика на внешнее поле, но и существенно влияют на кинетические и релаксационные свойства магнитных систем. В теоретическом описании нелинейных явлений в магнетиках до недавнего времени использовалась концепция слабой нелинейности, означающая, что энергия взаимодействия магнонов мала по сравнению с энергией «свободного» магнона. Однако, в случае с магнетиками получаем совершенно обратную картину, если сравнивать энергию взаимодействия магнонов с энергией «свободного» магнона. В таких случаях использование концепции слабо нелинейного описания уже не подходит для изучаемого эффекта, и необходимо введение новых представлений и разработки методов описания сильно нелинейных явлений в магнетиках.

В последнее тридцатилетие началось активное исследование нелинейных свойств спиновых волн в ферромагнетиках. Одним из направлений фундаментальных наук, сыгравших важную роль в теоретическом изучении других нелинейных волновых процессов, является теория солитонов. Солитоны в магнетиках представляют собой локализованные в пространстве волны

магнитного момента и теоретически рассматриваются как частные решения уравнений Ландау-Лифшица, Гейзенберга, нелинейных уравнений Шредингера, удовлетворяющие определенным граничным условиям. Эти исследования имеют значительный прикладной интерес, например для создания нелинейных устройств обработки и передачи данных в телекоммуникационных системах, в лазерных системах, нелинейных линиях передачи, оптических переключателях и линиях связи.

Существуют два типа солитонов – статические и динамические. Динамические солитоны, представляющие собой солитоны огибающей волны, могут возникать в магнитоупорядоченных средах и оптических волокнах. Для изучения солитонов огибающих волн при сверхвысокочастотных излучениях наиболее удобны ферромагнитные пленки и структуры на их основе. В таких средах могут распространяться спиновые волны. Солитон огибающей спиновой волны можно описать с помощью нелинейного уравнения Шредингера (НУШ). Некоторые исследования показывают, что для более точного описания солитонных процессов необходимо модифицировать классическое НУШ путем добавления в него дополнительных членов, описывающих линейное и нелинейное затухание, возбуждение и дисперсию. Следовательно, в настоящее время все больше исследователей занимаются разработкой новых теоретических моделей, описывающих наблюдаемые в экспериментах солитонные явления. Результаты, представленные в данной диссертации, являются актуальными.

Солитонные модели ферромагнетиков стали интенсивно развиваться после того, как ученые начали изучение особенностей распространения спиновых волн в нелинейных средах. Основные аспекты изучения теории солитонов в магнетиках обусловлены следующими причинами:

Во-первых, все больше исследователей направляют свое внимание на разработку новых теоретических моделей, описывающих наблюдаемые в экспериментах солитонные явления.

Во-вторых, поскольку многие работы посвящены исследованиям в рамках бездиссипативных моделей, возникает еще много интересных (с физической точки зрения) вопросов: как изменяются солитоны при магнитных дипольных взаимодействиях.

Исходя из перечисленных выше современных проблем теоретической физики диссертационная работа: «**Исследование нелинейных солитонных моделей ферромагнетиков**» посвящена теоретическому исследованию некоторых нелинейных моделей, таких как модель ферромагнетиков Гейзенберга, описывающая распространение спиновых волн в нелинейной среде.

Цель работы: Теоретическое исследование некоторых нелинейных моделей ферромагнетиков типа Гейзенберга и исследование солитонных решений уравнений, описывающих взаимодействие спиновых волн.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи:**

1. Нахождение нелинейных эволюционных уравнений, геометрически и калибровочно эквивалентных обобщенному ферромагнитному уравнению Гейзенберга.

2. Исследование дифференциальной геометрии уравнений, являющихся обобщенными ферромагнитными моделями Гейзенберга с самосогласованными источниками.

3. Получение солитонных решений нелинейных уравнений типа Шрёдингера и исследование динамики их изменения.

Объект исследования. Нелинейные модели спиновых систем.

Предмет исследования. Поиск солитонных решений нелинейного уравнения Шрёдингера и уравнения ферромагнетика Гейзенберга.

Метод исследования. Для получения солитонных решений, описывающих динамику нелинейных волн, был использован метод преобразования Дарбу, который активно применяется для изучения эволюции динамики солитонов.

Научная новизна. Новизна и оригинальность диссертационной работы заключаются в том, что в ней **впервые**:

1. Установлена геометрическая и калибровочная связь между обобщенным уравнением ферромагнетика Гейзенберга и уравнением Конно-Ооно. Построены солитонные решения уравнения Конно-Ооно.

2. Изучена дифференциальная геометрия обобщенной модели ферромагнетика Гейзенберга с самосогласованными источниками и обобщенного комплексного уравнения короткого импульса.

3. Построены одно- и двухсолитонные решения нелинейных уравнений типа уравнений Шрёдингера, описывающих спонтанное взаимодействие оптических импульсов, и найдены их законы сохранения.

Положения, выносимые на защиту:

1. Обобщенная модель ферромагнетика Гейзенберга с согласованными источниками при тождестве вектора спина \mathbf{A} и базисного вектора \mathbf{e}_1 ($\mathbf{A} \equiv \mathbf{e}_1$) геометрически и калибровочно эквивалентна уравнению, которое является обобщенной формой комплексного уравнения короткого импульса.

2. Обобщенная модель ферромагнетика Гейзенберга с согласованными источниками при отсутствии потенциала ($\mathbf{W}=0$) является частным случаем обобщенной модели ферромагнетика Гейзенберга, которая геометрически и калибровочно эквивалентна комплексно связанному бездисперсионному уравнению Конно-Ооно, и ее решение соответствует солитону.

3. Двумерное нелинейное уравнение Шрёдингера с «притяжением» ($\delta = 1$), описывающее спиновые волны в ферромагнетиках, имеет одно- и двухсолитонные решения, а его двухсолитонные столкновения являются упругими, то есть сохраняют свою форму и скорость после взаимодействия.

Теоретическая и практическая значимость работы. Диссертационная работа носит теоретический характер. Полученные результаты могут быть использованы в теории солитонов, например при изучении динамики нелинейных уравнений ферромагнетика Гейзенберга. Также могут быть использованы при получении солитонных, солитоноподобных решений в области нелинейных сред, электромагнитных волн в оптических линиях передачи и т.д. Некоторые результаты диссертации могут быть использованы в

учебном процессе при чтении элективных курсов в ВУЗах (лекционные курсы «Теория солитонов» и «Теория гидродинамических систем»).

Личный вклад автора. В процессе исследования автор принимал участие во всех этапах работы, выполняя все расчеты под руководством научного консультанта, построил графики найденных решений, лично подготовил публикации.

Достоверность и обоснованность результатов. Достоверность научных результатов подтверждается ссылками зарубежных ученых на работы, опубликованные в зарубежных журналах с высоким импакт-фактором и сборниках материалов международных зарубежных конференций.

Апробация работы. Результаты, полученные в диссертационной работе, докладывались и обсуждались на:

1. 5th International conference Modern problems of applied mathematics and information technology - Al-Khorezmiy (Bukhara, 2016. –November 9-10).

2. 3rd International Conference “Astrophysics, Gravity and Cosmology” (Astana 2016. –November 30 – December 2).

3. 22th international conference Geometry, Integrability and Quantization (Varna, 2019. – June 8-13).

4. The 26th international conference on Integrable Systems and Quantum symmetries (Prague, 2019. – July 8 - 12).

Кроме того, полученные результаты докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедры общей и теоретической физики ЕНУ им. Л.Н. Гумилева и на семинарах Евразийского международного центра теоретической физики.

Публикации по теме диссертации. По результатам диссертационной работы опубликовано 12 работ в казахстанских и зарубежных журналах, из них 2 статьи в зарубежных журналах с высоким импакт-фактором, входящих в базу данных Web of Science (Q2, IF= 1,783 және IF=3,1) и Scopus (Percentile 56 и 73, категория Physics and Astronomy); 3 статьи в периодических изданиях Республики Казахстан, рекомендованных КОКСНВО РК; 7 статей в материалах конференций индексируемых журналах в базах Web of Science, Scopus. Основные публикации:

1. Zhassybayeva M., Bekova G., Yesmakhanova K., Myrzakulov R. Integrable motions of curves of the induced Fokas–Lenells equation // *Optik*. -2023. –Vol. 286. – P.170979. Impact Factor 2022 – 3.1. Q2, Процентиль 73.

2. Yesmakhanova K., Nugmanova G., Shaikhova G., Bekova G., Myrzakulov R. Coupled Dispersionless and Generalized Heisenberg Ferromagnet Equations with Self-Consistent Sources: Geometry and Equivalence // *International Journal Geometrical Methods in Modern Physics*. – 2020. – Vol. 17, No 7. – P. 2050104. Impact Factor 2019 – 1.287. Q2, Процентиль 47.

3. Yesmahanova, K.R., Shaikhova, G.N., Bekova, G.T., Myrzakulova, Z.R. Determinant representation of dardoux transformation for the (2+1)-dimensional Schrodinger-Maxwell-Bloch equation // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. – 2016. – Vol. 441. – P. 183-198.

4. Yesmakhanova K., Shaikhova G., Bekova G. Soliton solutions of the Hirota's system // AIP Conf. Proc. –2016. – Vol. 1759. –P. 020147. Процентиль 15.

5. Shaikhova G., Yesmakhanova K., Bekova G., Ybyraiyмова S. Conservation laws of the Hirota-Maxwell-Bloch system and its reductions // Journal of Physics: Conference Series. – 2017.–Vol. 936, N1. –P. 012098. Процентиль 22.

6. Bekova G., Shaikhova G., Yesmakhanova K. Travelling wave solutions for the two-dimensional Hirota system of equations // AIP Conference Proceedings. – 2018.–Vol. 1997, –P. 020039. Процентиль 15.

7. Bekova G., Shaikhova G., Yesmakhanova K., Myrzakulov R. Conservation Laws for Two Dimensional Nonlinear Schrodinger Equation // AIP Conference Proceedings. –2019.–vol. 2159, –P.030003. Процентиль 15.

8. Bekova G., Shaikhova G., Yesmakhanova K., Myrzakulov R. Darboux transformation and soliton solution for generalized Konno-Oono Equation // Journal of Physics: Conference Series. –2019. –vol.1416. –P. 012003. Процентиль 22.

9. Ismailova F.Ye., Bekova G., Shaikhova G.N. Traveling wave solutions for the two-dimensional generalized nonlinear Schrodinger equation // Вестник КазНУ. – 2019. – №4 (134). - стр. 534-540.

10. Бекова Г.Т., Мусатай С.С., Абыканова Б.Т. Решения типа разрушительных волн двумерного нелинейного уравнения Шредингера // Вестник КазНУ. -2020. №2 (138). стр.-715-721.

Н-индекс и цитируемость работ. Докторант Бекова Г.Т. имеет следующие наукометрические показатели по базам данных Web of Science h-index-7 (Цитируемость 114) и Scopus h-index-9 (Цитируемость 124).

Связь темы диссертации с планами научных работ. Работа выполнялась в соответствии с планами научно-исследовательских работ по следующим проектам:

1) «Исследование обобщенных нелинейных уравнений Шредингера и их интегральных редукций», (2015-2017 гг.), № гос. регистрации 0115PK01346. Договор №268 от 04.02.2015 г. Руководитель К.Р.Есмаханова.

2) «Моделирование волновых процессов в ферромагнетиках на основе теории солитонов», (2022-2024 гг.), ИРН проекта AP 14972426. Руководитель проекта Г.Т.Бекова.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 3 разделов, заключения и списка использованных источников из 195 наименований, содержит 101 страниц основного компьютерного текста, включая 12 рисунков.