

ОТЗЫВ

члена диссертационного совета Тупицына Ильи Игоревича на диссертацию Тимофеева Виктора Евгеньевича на тему «Динамика скирмионных кристаллов в подходе стереографической проекции», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3. Теоретическая физика.

Диссертация В.Е. Тимофеева посвящена разработке и применению оригинального метода исследования динамики решёток магнитных скирмионов Магнетики с неколлинеарным упорядочением спинов вызывает большой интерес научного сообщества из-за широких возможностей технологического применения. Не так давно были получены первые экспериментальные подтверждения реализации магнитных скирмионов в реальных соединениях.

Наряду с обменным взаимодействием, в магнитных кристаллах без центров инверсии между локализованными магнитными моментами возникает взаимодействие Дзялошинского-Мории. Поскольку взаимодействие Дзялошинского-Мории является следствием спин-орбитального взаимодействия электронов, как правило, по величине оно существенно меньше обменного взаимодействия, однако, в отличие от обменного, оно стремится развернуть моменты перпендикулярно друг другу. Из-за конкуренции двух этих взаимодействий в системе может возникать дальний порядок с неколлинеарной ориентацией магнитных моментов, в частности сверхрешётки магнитных скирмионов. Поскольку элементарная ячейка такой сверхрешётки включает в себя от нескольких сотен до несколько десятков тысяч спинов, применение стандартных спин-волновых методов в такой ситуации не представляется возможным. Наравне с традиционными методами в работе используется численный метод Монте-Карло, в результате чего динамика магнитных моментов описывается уравнением Ландау-Лифшица-Гильберта. В этом контексте построение аналитической или хотя бы квазианалитической теории спиновых волн на фоне решёток магнитных скирмионов безусловно востребовано, поэтому *актуальность диссертации В.Е. Тимофеева никаких сомнений не вызывает.*

Диссертация В.Е. Тимофеева содержит введение, две главы и заключение.

В первой главе автор обсуждает магнитные взаимодействия входящие в исследуемую модель, а также вопросы, связанные с топологией исследуемых в дальнейшем скирмионных конфигураций. В работе используется представление стереографической проекции, согласно которому единичный вектор намагниченности выражается через функцию комплексного переменного. Известно, что этот приём позволяет найти точное решение в задаче о двумерном обменном ферромагнетике, где любая голоморфная или антиголоморфная функция отвечает локальному минимуму энергии; это было показано в классической работе Белавина и Полякова. Автор модифицирует решение Белавина и Полякова на случай присутствия в системе взаимодействия Дзялошинского-Мории и магнитного поля, рассматривая вполне обоснованный анзац для уединённого скирмиона. Для случая нескольких скирмионов автор предлагает рассматривать сумму стереографических функций отдельных скирмионов, такой подход работает, пока расстояние между отдельными скирмионами больше размера отдельных скирмионов.

33-06-1320 от 28.11.2022

Такая процедура позволяет автору оценить энергию взаимодействия отдельных скирмионов, причем оказывается, что в системе наряду с парным отталкиванием в тройках скирмионов возникает небольшое притяжение. С учётом парного и тройного взаимодействия минимизируется плотность энергии, приходящаяся на одну элементарную ячейку скирмионной решётки.

Во второй главе обсуждаются вопросы динамики вектора локальной намагниченности через призму представления стереографической проекции. Автором предлагается в какой-то мере известный подход к квантованию топологических солитонов, когда на фоне солитонного решения классической полевой модели рассматриваются небольшие флуктуации, однако, в данном случае рассматриваются флуктуации не самой намагниченности, а стереографической функции. Лагранжиан модели переписанный в терминах стереографической проекции раскладывается до квадратичных членов по флуктуациям, а далее исследуются нормальные моды получившейся задачи. После того как они найдены, флуктуации раскладываются по ним и проводится процедура канонического квантования: амплитуды в разложении заменяются операторами рождения и уничтожения бозонов. Также автором выписываются формальные выражения для функции Грина в базисе нормальных мод задачи.

В третьем параграфе второй главы автор применяет построенный формализм к расчёту дисперсии возбуждений в треугольной решётке блоховских скирмионов, при этом стоит отметить, что разработанный подход с минимальными изменениями может быть обобщён и на решётки других симметрий, построенные из других топологических объектов (возникающие в системах с иными формами магнитных взаимодействий), например, антискирмионов, а также и на нерегулярные конфигурации скирмионов. Расчёт спектра возбуждений производится в базисе плоских волн. *Большой интерес представляет полученная в работе зонная структура возбуждений.* Автор анализирует ветки спектра с точки зрения угловой симметрии волновых функций, что особенно интересно в контексте деформаций формы отдельных скирмионов в решётке, оказывается, что полученные волновые функции в реальном пространстве отвечают различным деформациям скирмионов: дилатации, смещению, эллиптической, треугольной деформациям и т.д. В работе показывается, что все низколежащие ветви спектра с неплохой точностью описываются двухпараметрической кривой. Также в этом параграфе автор возвращается к вопросу справедливости использования анзаца из первой главы: показано, что возникающие поправки являются незначительными.

В последнем параграфе второй главы автор обсуждает топологические характеристики вычисленной зонной структуры, такие как кривизна Берри и числа Черна. Известно, что в двумерных электронных системах, нетривиальная топология зонной структуры может приводить к экзотическим транспортным свойствам и эффектам. Автор показывает, что ряд зон обладает отличными от нуля числами Черна, что может представлять интерес в контексте существования краевых магнетонных состояний.

Существенных замечаний по содержанию диссертации у меня не имеется. Отмечу лишь некоторые неточности и вопросы, которые возникли у меня при чтении диссертационной работы.

1) В формуле (1.2) на стр. 18 индекс μ нумерует две пространственные координаты ($\mu=1,2$), но не указаны какие. Предположительно это координаты x и y . Кроме того, в начале текста диссертации я не обнаружил указания о том, что рассматривается плоская решетка скирмионов, хотя это становится ясным из дальнейшего чтения текста диссертации.

2) Формула (1.6) на стр. 20 описывает зеемановское взаимодействие спинов с магнитным полем. Однако величина магнитного поля и g -фактор электрона в этой формуле отсутствуют.

3) Мне непонятно, почему диполь-дипольное взаимодействие спинов в формуле (1.10) на стр.21 спадает с расстоянием. Может быть в знаменателе формулы (1.10) должно быть расстояние R в пятой степени вместо первой, как это имеет место для классической формулы для взаимодействия магнитных дипольных моментов?

4) На стр. 61 отмечается, что блоховская функция (2.47) является периодической. Это не совсем точно, функция (2.47) не является периодической, она удовлетворяет теореме Блоха.

5) Я не понял смысл термина: «спин-орбитальное взаимодействия между соседними спинами». Может быть, это так называемое взаимодействие Брейта «спин-чужая орбита»?

Отмеченные мелкие замечания и возникшие вопросы не влияют на общую положительную оценку диссертации. Диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне и содержит целый ряд новых интересных результатов. *Достоверность и новизна* полученных В.Е.Тимофеевым результатов не вызывает сомнений, поскольку они были опубликованы в высокорейтинговых международных журналах и неоднократно докладывались на российских и международных конференциях и научных семинарах.

Диссертация Тимофеева Виктора Евгеньевича на тему: «Динамика скирмионных кристаллов в подходе стереографической проекции» соответствует основным требованиям, установленным Приказом от 19.11.2021 № 11181/1 «О порядке присуждения ученых степеней в Санкт-Петербургском государственном университете», соискатель Тимофеев Виктор Евгеньевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3. Теоретическая физика. Нарушения пунктов 9 и 11 указанного Порядка в диссертации не обнаружены.

Член диссертационного совета

Доктор ф.-м. н.,

Профессор, кафедры квантовой механики СПбГУ

/Тупицын И.И./

Дата 22.11.2022



22.11.2022