

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу
ЯРЫГИНОЙ ЕКАТЕРИНЫ АЛЕКСАНДРОВНЫ
**«ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И ОДНОИОННОЙ АНИЗОТРОПИИ НА ДИНАМИКУ
И СТАТИКУ НЕГЕЙЗЕНБЕРГОВСКИХ МАГНЕТИКОВ»**,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по
специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния

Одной из самых «горячих» тем физики конденсированного состояния (и, в частности, физики магнетизма) является поиск новых фазовых состояний с нестандартными магнитными свойствами. Такого рода задачи тесно связаны с прикладными вопросами записи, обработки и передачи информации. Зачастую новые принципы работы с информацией основаны на необычных свойствах используемых магнитных материалов. Здесь можно отметить недавнее открытие новых магнитных фаз, магнитные вихри и другие солитонные структуры, а также скирмионы и скирмионные решетки в материалах с нарушением инвариантности относительно пространственной инверсии на границе между пленками типа ферромагнитный металл – материал с гигантским спин-орбитальным взаимодействием (тяжелые металлы, топологические изоляторы). Особый интерес вызывает исследование спиновых систем с так называемым «скрытым порядком» (термин впервые использован для URu_2Si_2). В таких системах спонтанное нарушение симметрии обусловлено не намагниченностью, а средними значениями спиновых мультиполей. Теоретическому исследованию именно таких систем посвящена диссертационная работа Е.А. Ярыгиной.

Принципиальной особенностью таких систем является то, что состояния магнитных материалов исследуются с выходом за рамки обычной феноменологической теории, в которой состояния спиновой системы определяется вектором намагниченности (или, для антиферромагнетиков или ферримагнетиков, векторами намагниченностей подрешеток). Положения стандартной феноменологической теории нарушаются, если в магнетике достаточно сильны так называемые негейзенберговские взаимодействия, например, одноионная анизотропия или обменное взаимодействие, связанное с высшими спиновыми инвариантами. Такого рода магнетики (их называют иногда, несколько условно, квантовыми, или негейзенберговскими магнетиками) обладают ярко выраженными квантовыми свойствами, в них квантовые флуктуации проявляются достаточно сильно, что приводит к отклонениям от стандартного магнитного упорядочения, поскольку не сохраняется длина магнитного момента (наблюдается эффект квантового сокращения спина). Примеры систем такого типа известны достаточно давно; они включают не только

кристаллические магнетики, но Бозе-конденсаты ультрахолодных газов нейтральных атомов с ненулевыми спинами в оптических ловушках. Для всех таких систем найдены фазы спинового нематика, которые характеризуются нулевой намагниченностью даже при нулевой температуре, но в которых есть спонтанное нарушение симметрии за счет тензорных параметров порядка. Все это позволяет утверждать, что теоретическое изучение фундаментальных свойств магнитоупорядоченных систем не только **актуально** для фундаментальной физики твердого тела, но может быть важным и для приложений в области квантовой спинтроники.

Диссертационная работа посвящена исследованию двух классов негеЙзенберговских магнетиков, а именно анизотропные одно- и двухподрешеточные спиновые нематики и сильно анизотропные изингоподобные антиферромагнетики. Причем, эти две задачи логически связаны между собой и описываются в рамках единого математического формализма. Причем, одним из основных достоинств работы является то, что автор не ограничивается рассмотрением только случая низких температур. Магнитные свойства систем такого сорта изучены для простейших моделей, или изучены недостаточно. Таким образом, **новизна и оригинальность** полученных в работе Е.А. Ярыгиной результатов не вызывает сомнения.

Достоверность результатов работы определяется тем, что для теоретического исследования выбран подход, адекватность которого надежно апробирована ранее при анализе модельных систем. Исследования в этом направлении проводятся как группой теоретиков в Крымском федеральном университете, так и рядом других исследователей. Этот подход базируется на использовании так называемых $SU(3)$ - когерентных состояний. Достаточно адекватной их реализацией является подход с представлением указанных состояний с помощью операторов Хаббарда. Полученные результаты хорошо согласуются с результатами, полученными ранее в других работах, и предельными переходами к известным результатам, полученным при нулевых температурах, или же в отсутствие внешнего магнитного поля. Также, результаты, полученные в диссертации, согласуются с известными экспериментальными данными.

Перейдем к обсуждению конкретных результатов, полученных в диссертационной работе. Диссертация состоит из хорошо написанного введения, трех разделов, содержащих оригинальные результаты автора, и заключения.

Во **введении** проведен анализ проблемы, раскрыта ее важность; сформулированы и поставлены цели и задачи исследований; уточнены достоверность и область применения полученных результатов.

В первом разделе исследуется модель негейзенберговского магнетика с одноосной анизотропией и спином магнитного иона $S = 1$. Рассматриваются возможные фазовые состояния и условия реализации в зависимости от соотношений между материальными параметрами системы. Показывается возможность реализации нематических состояний для данной магнитной системы. Определены соотношения материальных параметров, при которых реализуются нематические фазы. Определены спектры элементарных возбуждений для каждого из фазовых состояний. Определен тип фазовых переходов в случае анизотропии типа «легкая ось» и анизотропии типа «легкая плоскость». Показано, что учет влияния легкоосной анизотропии сохраняет картину фазовых переходов в сравнении с изотропным случаем, а учет влияния легкоплоскостной анизотропии приводит к снятию вырождения фазовых переходов первого рода между стабильными фазами и реализации прямого фазового перехода между нематическими фазами.

Полученные в этом разделе результаты представляют несомненный интерес, и показывают, как влияет тип одноосной анизотропии на динамические свойства и тип фазового перехода в негейзенберговских анизотропных антиферромагнетиках. Как показано в этом разделе диссертации фазовые состояния как в легкоосном, так и легкоплоскостном антиферромагнетиках сохраняются, однако, типы фазовых переходов принципиально различны.

Любопытные результаты получены во втором разделе диссертации. В этом разделе рассматривается как влияния температуры, так и одноионной анизотропии типа «легкая ось» на динамические и статические свойства негейзенберговского ферромагнетика спином магнитного иона $S = 1$. Определены зависимости параметров порядка от температуры и показано, что с ростом константы одноионной анизотропии увеличивается температура перехода в парамагнитную фазу из ферромагнитной и нематической фаз. Исследованы спектры элементарных возбуждений для ферромагнитной и нематической фаз с учетом влияния температуры. Показано, что учет влияния температуры приводит к появлению третьей, так называемой «поперечной», ветви элементарных возбуждений, связанной с возбужденными энергетическими уровнями магнитного иона. Причем, эта дополнительная ветвь возбуждений «гибридизируется» со стандартной «поперечной» ветвью возбуждений. Эта «гибридизация» тем существенней, чем меньше константа анизотропии. С ростом температуры эти «поперечные» ветви расцепляются. Одним из существенных результатов является нематического состояния во всем температурном интервале, исключая флуктуационную область.

В третьем разделе исследована модель изинговского сильно анизотропного легкоплоскостного антиферромагнетика со спином магнитного иона $S=1$ во внешнем магнитном поле. Были определены фазовые состояния, реализуемые в системе и условия протекания фазовых переходов между ними. Показано, что в данной системе возможна реализация только коллинеарных фазовых состояний. Кроме того, показано, что одно из них, фаза с «низким спином», реализуется, когда одна подрешетка характеризуется дипольными параметрами порядка, а другая – квадрупольными параметрами порядка. Показано, что все фазовые переходы, реализуемые в системе, являются фазовыми переходами первого рода.

Перечисленные выше, а также другие результаты, составляющие основу диссертационной работы, являются новыми и актуальными, и вносят определенный вклад в физику магнетиков.

Автореферат достаточно полно отражает содержание работы и результаты, выносимые на защиту. Результаты диссертационной работы и выводы хорошо представлены в таких журналах как Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики, входящих в базу данных Scopus, Web of Science и список ВАК. Результаты диссертационной работы Е.А. Ярыгиной неоднократно докладывались на престижных научных конференциях. Все исследования проведены на высоком уровне, что, несомненно, демонстрирует высокую квалификацию соискателя.

Хотелось бы отметить, что результаты, представленные в диссертации очень хорошо проиллюстрированы графически.

Любая законченная научная работа порождает новые вопросы. Так и в данном случае, у меня появились некоторые вопросы и замечания:

1. Необходимо более четко сформулировать область применимости, в частности по температуре, результатов, полученных во втором разделе диссертации?
2. Хотелось бы подробнее обсудить вопрос о реализации LS фазы в изинговском антиферромагнетике.
3. Как известно, в изинговском антиферромагнетике возможна реализация так называемой «сверхтвердой» фазы. Было бы полезно обсудить, почему это фазовое состояние не реализуется в случае, рассмотренном в третьем разделе?
4. Ну и в качестве пожелания: было бы полезно рассмотреть влияние температуры на динамику негейзенберговского антиферромагнетика, в том числе для оценки потенциала практических применений.

Приведенные выше вопросы и замечания не ставят под сомнение основные выводы диссертационной работы и не влияют на оценку достоверности, важности и новизны представленных в ней результатов. Учитывая актуальность темы диссертационного исследования, научную новизну и практическую ценность, считаю, что диссертация **Ярыгиной Екатерины Александровны «Влияние температуры и одноионной анизотропии на динамику и статику негейзенберговских магнетиков»** выполнена на высоком уровне и является законченной научной работой, которая соответствует требованиям "Положения о порядке присуждения ученых степеней", а ее автор, заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент:

Ведущий научный сотрудник

Лаборатории физики для нейроморфных вычислительных систем

Института перспективных технологий и индустриального программирования

кандидат физико-математических наук

Звездин Константин Анатольевич

Тел.: +7 915 059 8469

E-mail: zvezdin.ka@phystech.edu

Федеральное государственное бюджетное

образовательное учреждение высшего образования

«МИРЭА — Российский технологический университет»

119454, Москва, проспект Вернадского, 78

Подпись руки Звездина К.А.
УДОСТОВЕРЯЮ:
Начальник Управления кадров М.М. Буханова