

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу КОСМАЧЕВА ОЛЕГА АЛЕКСАНДРОВИЧА «СПИНОВЫЕ НЕМАТИКИ И СИЛЬНОАНИЗОТРОПНЫЕ МАГНЕТИКИ», представленную на соискание ученой степени доктора физико-

математических наук по специальности

01.04.07 – Физика конденсированного состояния

Современные технологии коммуникации, хранения и записи информации выдвигают особые требования к элементной базе. При этом большую, а зачастую и основную роль, играют магнитоупорядоченные среды. Особый интерес представляют материалы, обладающие новыми магнитными фазами, скирмионными решетками и спиральными состояниями, а также материалы с нарушением инвариантности относительно пространственной инверсии на границе между пленками типа ферромагнитный металл – тяжелый металл (таких как CoV/Pt или CoFe/Ta). Новые перспективы открывают спиновые системы с так называемым «скрытым порядком» (термин впервые использован для URu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>). В таких системах спонтанное нарушение вращательной симметрии обусловлено не намагниченностью, а средними значениями спиновых мультиполей. Теоретическому исследованию именно таких систем посвящена диссертационная работа О.А. Космачева. Причем, в отличие от традиционных модельных задач, в работе Космачева О.А. исследуются свойства магнитоупорядоченных систем со спином магнитного иона  $S \geq 1$ . Принципиальной особенностью таких магнетиков является то, что состояния магнитных материалов исследуются с выходом за рамки обычной феноменологической теории, в которой состояния спиновой системы определяется только 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 типа  $(\vec{S}_n \vec{S}_{n'})^{2S}$ , где  $S$  – величина спина магнитного иона. Такого рода магнетики (их называют иногда, несколько условно, квантовыми, или негейзенберговскими магнетиками) обладают ярко выраженными квантовыми свойствами, в них квантовые флуктуации являются достаточно большими, 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 так называемые квадрупольные фазы, или фазы спинового нематика, которые характеризуются нулевой намагниченностью даже при нулевой температуре, но в которых есть спонтанное нарушение симметрии за счет квадрупольных параметров порядка (средних значений операторов, билинейных по компонентам спина). Все это позволяет утверждать, что теоретическое изучение фундаментальных свойств магнитоупорядоченных систем не только **актуально** для фундаментальной физики твердого тела, но может быть важным для практических применений.

Данная диссертационная работа посвящена исследованию двух больших классов негејзенберговских магнетиков: изотропные спиновые нематики и анизотропные магнетики. Причем, эти две большие темы логически связаны между собой и описываются в рамках единого математического формализма. Причем, изюминкой и огромным достоинством данной работы является то, что автор не ограничился рассмотрением простейшей задачи магнетика со спином магнитного иона с  $S=1$ , а продвинулся существенно дальше, исследуя свойства магнитоупорядоченных систем со спином магнитного иона  $S=3/2$  и 2. Магнитные свойства такого сорта систем практически не изучены, или изучены для простейших моделей. Таким образом, **новизна и оригинальность** полученных в работе О.А.Космачева, результатов не вызывает сомнения, а сама работа представляет собой существенное развитие такого **направления** теории магнетизма как **негејзенберговский магнетизм**.

**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 известными экспериментальными данными.

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

В **первом разделе** рассматривается вопрос о возможности реализации сверхтвердой магнитной фазы в антиферромагнетике с  $S=1$  и большой одноионной анизотропией. Анализ

плотности свободной энергии показывает, что в зависимости от соотношения материальных параметров в системе могут реализовываться различные фазовые состояния. Так, в области больших магнитных полей антиферромагнетик находится в ферромагнитной фазе, в которой намагниченности подрешеток направлены по полю. В области полей, меньших поля анизотропии, система ведет себя принципиально иначе: при малых полях намагниченность подрешеток (на один узел) становится равной нулю и магнетик находится в квадрупольной фазе. При промежуточных значениях поля реализуется неколлинеарная фаза, в которой намагниченности подрешеток изменяются по модулю и направлению при изменении внешнего магнитного поля. По сути, эта фаза является магнитным аналогом сверхтвердой фазы.

Исследование возможности реализации сверхтвердой магнитной фазы в легкоплоскостном изингоподобном антиферромагнетике в продольном поле позволило установить ряд интересных особенностей в отличие от предыдущей модели.

Также в этом разделе исследованы фазовые состояния и спектры элементарных возбуждений ультратонкой сильно анизотропной пленки со спином единица и фрустрированным изингоподобным обменным взаимодействием в продольном внешнем поле.

Во **втором разделе** изучается роль квантовых эффектов анизотропного ферримагнетика и легкоплоскостного ферромагнетика со спином  $S=1$  при температуре отличной от нуля. Исследуется двухподрешеточный коллинеарный магнетик с нескомпенсированными магнитными моментами подрешеток: спин магнитного иона одной подрешетки  $S_1 = 1$ , а другой –  $s_2=1/2$ . Кроме того, первая подрешетка является анизотропной с одноионной анизотропией типа „легкая плоскость“. Анализ зависимости намагниченности подрешеток (при низких температурах) от соотношений материальных констант показал, что в случае, когда константа одноионной анизотропии превосходит значения констант обменных взаимодействий намагниченность первой подрешетки становится существенно меньше максимально возможного значения, т. е. происходит квантовое сокращение спина. Наличие этого эффекта приводит к реализации в ферримагнетике точки компенсации. Определены условия ее реализации.

Еще один интересный результат относится к роли квантовых эффектов анизотропного ферримагнетика исследованного выше, допускающего сокращение спина при ненулевых температурах. Исследование спектров возбуждения анизотропного ферримагнетика, в частности высокочастотных мод показало, что эффекты квантового сокращения спина могут быть существенны даже при относительно малых (порядка 5-10 % от обменного интеграла) значениях константы одноионной анизотропии.

В этом же разделе исследуется влияние одноионной анизотропии на температурную зависимость намагниченности и спектров элементарных возбуждений ферромагнетика с  $S=1$ . Так, при произвольных температурах (исключая флуктуационную область) возникают три ветви элементарных возбуждений. Этот результат является неожиданным, поскольку стандартным результатом является  $2S$  ветвей элементарных возбуждений, и поскольку в данном случае  $S=1$ , то число ветвей должно быть равно двум. Возникновение третьей ветви связано с тем, что при температурах отличных от нуля возникает ненулевая вероятность перехода между энергетическими уровнями лежащими над основным. Таким образом, показано, что в рассматриваемом случае в системе, помимо известных двух стандартных мод поперечной и продольной, возникает дополнительная ветвь возбуждений, наличие которой связано с ненулевой вероятностью переходов между возбужденными уровнями магнитного иона при конечных температурах. Эта мода дает немалый вклад в поглощение энергии и обладает существенной дисперсией.

На мой взгляд, результаты по продольной динамике магнитного момента являются весьма любопытными, и могут быть использованы при исследовании сверхбыстрого перемагничивания ферромагнетиков фемтосекундными лазерными импульсами.

Очень интересные результаты получены в **третьем** и **пятом** разделах диссертации, посвященных исследованию фазовых состояний и спектров элементарных возбуждений изотропного негеизенберговского магнетика с  $S=1$ ,  $3/2$  и  $2$  с учетом всех спиновых инвариантов. В работе показано, что учет высших спиновых инвариантов является существенным, и приводит к возникновению магнитоупорядоченных состояний с более сложной структурой, нежели ферро- или антиферромагнитная. Наиболее существенные проявления квантовых эффектов, связанных с учетом высших спиновых инвариантов в обменном гамильтониане, проявляются в появлении дополнительных ветвей спиновых возбуждений, для которых характерны осцилляции длины вектора намагниченности и возникновение устойчивого упорядоченного состояния с нулевым средним значением спина на узле – состояние спинового нематика, характеризуемого тензорными параметрами порядка для магнетиков со спином магнитного иона  $S=1$  и  $S=3/2$ ). В магнетике с  $S=1$  кроме дипольных фаз реализуются нематическая и двухподрешеточная ортогонально нематическая фазы. В системе с  $S=3/2$  также в реализуется нематическая нематическая фаза и двухподрешеточная антинематическая. Эти фазовые состояния, в отличие от спинового нематика с  $S=1$ , связаны с высшими мультипольными средними. В магнетике с  $S=2$  кроме одноподрешеточных фаз (с средним значением намагниченности равным нулю) возможно существование большого разнообразия двухподрешеточных фаз различной симметрии в зависимости от соотношений материальных констант. Эти состояния также

характеризуются высшими мультипольными моментами, так как средняя намагниченность на один узел равна нулю, а эллипсоид тензора квадрупольного момента вырождается в шар: тетраэдрическое и антитетраэдрическое состояния. Показано, что в этих состояниях возникает дополнительный параметр – псевдоспин, который при преобразованиях времени  $t \rightarrow -t$  ведет как вектор спинового момента. Кроме того, в магнетике с  $S=2$  могут реализовываться двухподрешеточные структуры с неэквивалентными подрешетками. Эти фазы характеризуются насыщенным значением среднего спина одной из подрешеток и ненасыщенностью среднего спина второй подрешетки. Причем, направления магнитных моментов подрешеток либо коллинеарны, либо антиколлинеарны.

Для магнетиков со спином  $S=1$  и  $S=3/2$ , в которых реализуется состояние спинового нематика, впервые показана возможность существования двумерных топологических солитонов – вихрей. Обнаружены несколько типов таких вихрей, с сингулярностью в центре и с несингулярным ядром, в котором разрушен нематический порядок. Ядро характеризуется восстановлением магнитного порядка, который может быть ферромагнитным или антиферромагнитным.

Эти результаты представляют большой интерес для анализа свойств бозе-конденсата нейтральных атомов в оптических ловушках.

Важные результаты представлены в **четвертом** разделе диссертации, где изучено влияние обменной и одноионной анизотропий на фазовые состояния негейзенберговского магнетика. Особый интерес вызывает исследование негейзенберговских магнетиков со сложной межионной анизотропией. Автором впервые показано, что влияние такой анизотропии в биквадратичном обменном взаимодействии приводит к реализации нематического состояния особого типа – угловой нематической фазы. Кроме того, убедительно показано, при реализации только тензорных фаз, что фазовые переходы по тензорному параметру порядка по характеру близки к ориентационным фазовым переходам, причем изменяется ориентация вектор-директора.

Перечисленные выше, а также другие результаты, составляющие основу диссертационной работы, принципиально *новы, актуальны* и вносят *существенный вклад* в физику магнетиков и могут претендовать на развитие *нового направления* физики магнетизма – *негейзенберговские магнетики*. Автореферат правильно и достаточно полно отражает содержание работы и результаты, выносимые на защиту. Результаты диссертационной работы и выводы широко представлены в таких журналах как Physical Review Letters, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, European Physical Journal B, Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики, Письма в Журнал

Экспериментальной и Теоретической Физики и целый ряд других журналов, входящих в базу данных Scopus b Web of Science и список ВАК. Результаты диссертационной работы О.А.Космачева неоднократно докладывались на престижных научных конференциях. Все исследования проведены на высоком уровне, что, несомненно, демонстрирует высокую квалификацию соискателя.

Еще одной положительной особенностью диссертации является то, что автор не «склеивает» текст из работ, как это нередко бывает, а пишет каждый раздел как отдельный обобщающий текст. Хотя в диссертации автор допускает несколько вольное обращение с пунктуацией, но в целом работа хорошо написана и оформлена. Также хотелось бы отметить, что математические результаты практически все проиллюстрированы графически, что тоже показывает хороший уровень работы.

Однако, как любое серьезное исследование, диссертация не свободна от **недостатков**. Перечислю основные:

1. Работа посвящена спиновым нематикам, однако в тексте отсутствует четкое определение такой разновидности магнитных материалов.

2. Во введении (стр.12-13) отмечается принципиальная связь между эффективными гамильтонианами взаимодействия при исследовании состояний бозе-эйнштейновского конденсата и гамильтонианами обменных взаимодействий негејзенберговских изотропных магнетиков. Было бы полезно при дальнейшем изложении привести эти преобразования в явном виде при исследовании различных магнетиков в соответствующих разделах работы.

3. При исследовании анизотропного ферримагнетика во втором разделе на рис. 2 (стр.101) приведена зависимость магнитных моментов подрешеток от температуры. При этом константы обменного взаимодействия анизотропной и изотропной подрешеток рассматриваются равными. Это несколько сужает общность полученных результатов.

4. В третьем разделе при рассмотрении изотропных негејзенберговских магнетиков со спином  $S=1$  и  $S=3/2$  исследуются нематические состояния. Автор подчеркивает, что нематические состояния для систем с целым и полуцелым значениями спина магнитного иона различаются. Стоило более четко сформулировать принципиальные отличия данных состояний.

5. В подразделе 4.4 при исследовании обменно-анизотропного негејзенберговского магнетика в случае, когда константа биквадратичного обмена существенно больше константы билинейного обменного взаимодействия (стр. 245) получена угловая нематическая фаза. Не приведены параметры порядка, характеризующие данное состояние, а также не указан геометрический образ данной фазы в спиновом пространстве.

6. Работа содержит ряд графиков, носящих иллюстративный характер, но, вместе с тем требующих конкретных числовых значений по осям (рис. 1.6, 1.7, 4.6). Например, на рис. 1.6 имело смысл привести числовую шкалу для внешнего магнитного поля в единицах магнитного поля перехода из спин-флоп фазы. Аналогично, на рис. 1.7. На рис. 4.6,

демонстрирующем фазовую диаграмму анизотропного магнетика, стоило привести числовую шкалу, как по оси абсцисс, так и по оси ординат.

7. В представленном научном труде использовано большое число обозначений и аббревиатур. Их полный список значительно упростил бы читателю работу с текстом.

8. К сожалению, автору не удалось избежать некоторого числа опечаток в тексте работы (например, на стр. 2, 37, 49, 88 и т.д.).

Теме не менее, приведенные выше 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 Космачева Олега Александровича «Спиновые нематики и сильно анизотропные магнетики» выполнена на высоком уровне и является законченной научной работой, которая соответствует требованиям "Положения о порядке присуждения ученых степеней", а ее автор, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

доктор физико-математических наук,  
профессор РАН,  
доцент физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова,  
Тел.: +79267337189  
E-mail: [belotelov@physics.msu.ru](mailto:belotelov@physics.msu.ru)

Белотелов В.И

Адрес места работы:  
119991, ГСП-1, Москва  
Ленинские горы, МГУ имени М.В.Ломоносова  
Дом 1, строение 2, Физический Факультет  
Тел.: +7 495 939-16-82; e-mail: [info@physics.msu.ru](mailto:info@physics.msu.ru)

Декан физического факультета  
МГУ имени М.В.Ломоносова  
д.ф-м.н., профессор

