

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Космачева Олега Александровича «Спиновые нематики и сильно анизотропные магнетики», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Обнаружение и изучение новых состояний конденсированных сред постоянно привлекает внимание многих научных групп, как с точки зрения фундаментальной физики, так и в связи с возможностью практического использования необычных свойств материалов для элементной базы электронных устройств нового поколения. Расширение набора допустимых фаз конденсированных сред с магнитоактивными ионами представляет особый интерес для информационных технологий. Участие в формировании фундаментальных свойств материалов дополнительных физических характеристик, например, высших спиновых мультиполей, может привести к реализации необычных состояний. Поэтому всестороннее изучение магнетиков, в которых кроме дипольных степеней свободы существенными являются квадрупольные, октупольные и т. д. степени свободы, представляет актуальное направление исследований физики конденсированного состояния. Поскольку диссертация Космачева О.А. посвящена этой теме, то ее актуальность не вызывает сомнений.

Следует отметить, что изучение квантовых магнетиков со значительной интенсивностью тензорных взаимодействий требует выхода за рамки известных феноменологических методов рассмотрения традиционных магнитоупорядоченных материалов. Это определяет необходимость использования современного квантовополевого описания, применяемого при анализе многочастичных систем с сильными корреляциями. В диссертации продемонстрировано успешное применение новых методов, связанных с использованием атомного представления и унитарных преобразований группы $U(N)$, что также подтверждает тезис об актуальности проведенных диссертантом исследований.

В первом разделе диссертации в среднеполевом приближении проведено подробное изучение сильно анизотропных двухподрешеточных магнетиков. Особенность таких систем связана с проявлением квантовых эффектов на макроскопическом уровне. При этом сильные кристаллические поля индуцируют у магнитоактивных ионов высшие спиновые мультиполи. В результате адекватное описание сильно анизотропных квантовых магнетиков с $S=1$ требует учета не только дипольных степеней свободы, но и квадрупольных. Если для простых одноподрешеточных квантовых магнетиков фазовые диаграммы и спектр элементарных возбуждений были определены достаточно давно, то для обширного класса анизотропных двухподрешеточных материалов

структура основного состояния и энергетический спектр в широкой области параметров оставались мало исследованными.

Применение атомного представления позволило получить важные сведения о структуре фазовых диаграмм сильно анизотропных двухподрешеточных систем с квадрупольными степенями свободы и проанализировать характер фазовых переходов между различными квантовыми состояниями. Важный результат связан с предсказанием сверхтвердой фазы во фрустрированном изинговском антиферромагнетике. Полученные автором аналитические выражения для спектра коллективных возбуждений в различных фазах способствуют более глубокому пониманию свойств нетривиальных фаз. Проведенный анализ полученных спектров дал дополнительные сведения о характере фазовых переходов между допустимыми квантовыми состояниями.

Важное развитие теории двухподрешеточных материалов получено при изучении фрустрированных изинговских магнетиков со спином единица. Полезными для экспериментальных применений представляются построенные фазовые диаграммы при различных ориентациях внешнего магнитного поля.

Во втором разделе диссертации изучено влияние сильной одноионной анизотропией в коллинеарном двухподрешеточном магнетике. Значительное внимание уделено проявлению квантового сокращения спина в одной из подрешеток на состояние системы и спектр ее коллективных возбуждений. Теоретический анализ проведен на высоком уровне с применением современных методов сильно коррелированных систем. Применяя технику операторов Хаббарда, диссертант сумел преодолеть возникающие математические трудности и получить формулы для многих физических величин. Это позволило установить важные закономерности в поведении двухподрешеточного коллинеарного сильно анизотропного магнетика. Интересным представляется результат о компенсации магнитных моментов подрешеток, обусловленный чисто квантовым эффектом, индуцированным сильной одноионной анизотропией в одной из подрешеток. К достижениям автора относятся также и результаты по динамике легкоплоскостного ферромагнетика при конечных температурах. Им проанализировано поведение ветви, появляющейся только при конечных температурах благодаря заселенности возбужденных одноионных уровней.

Существенные результаты представлены в третьем разделе. Они отражают обнаруженные особенности в поведении изотропных негейзенберговских магнетиков. Автором проанализирована структура основного состояния систем с $S=3/2$ и определены области реализации немагнитических фаз. Особый интерес представляет найденное автором антимагнитическое состояние. Применение функций Грина в представлении операторов Хаббарда позволило найти спектр элементарных возбуждений в широкой области параметров рассматриваемой модели для всех допустимых состояний.

Значительный интерес вызывают результаты, связанные с описанием двумерных топологических солитонов – вихрей, которые реализуются в состоянии спинового нематика. В работе показано, что имеется несколько типов вихревого состояния. Высокий уровень теоретического анализа автор продемонстрировал при получении решения, соответствующего вихревому состоянию, при котором реализуется несингулярное ядро с разрушенным нематическим порядком. При этом в ядре реализуется ферромагнитное, или антиферромагнитное упорядочение. Такого типа результаты, несомненно, украшают диссертационную работу и вносят важный вклад в физику конденсированного состояния.

Результаты обширных исследований анизотропных негейзенберговских магнетиков с большими значениями спина представлены в четвертом разделе диссертации. Необходимо отметить, что при наличии в системе сильных анизотропных взаимодействий физические свойства магнетиков в существенной степени определяются вкладами высших спиновых мультиполей. При этом увеличение спина сопровождается нарастанием числа таких мультиполей, определяющих характеристики основного состояния и спектральные особенности элементарных возбуждений. Это приводит к существенному усложнению математического описания статических и динамических свойств сильно анизотропных негейзенберговских магнетиков. Кроме того, как отмечено в диссертации, существенными становятся квантовые эффекты. В совокупности эти особенности определяют необходимость выхода за рамки обычных феноменологических подходов. В четвертом разделе на основе единого математического подхода автором получены и решены уравнения, описывающие структуру фазовых диаграмм анизотропных негейзенберговских магнетиков с высоким значением спина. Рассмотрены различные фазы и для них вычислены ветви элементарных возбуждений. При выполнении такой работы от автора потребовалось не только хорошее знание современных квантовополевых методов анализа многочастичных систем, но и умение справляться со значительными математическими трудностями.

Большое значение для практического использования имеют полученные автором результаты по свойствам отмеченных систем во внешнем магнитном поле. Найденные закономерности особенно важны для экспериментальных исследований, поскольку позволяют расшифровывать данные по отклику системы на изменение магнитного поля, как по величине, так и по направлению.

Такой же высокой оценки заслуживает проведенный автором анализ свойств одно- и двухподрешеточных негейзенберговских магнетиков с анизотропным обменным взаимодействием. Полученные результаты о реализации угловых ферромагнитных и нематических фаз, а также результаты о возможных типах фазовых переходов и их характере

заметно расширяют наши представления о свойствах таких нетривиальных квантовых магнетиков, каковыми являются системы магнитоактивных ионов с анизотропными негејзенберговскими взаимодействиями.

Большой объем качественно новых результатов представлен в пятом разделе диссертации. Новые сведения получены при анализе влияния взаимодействий между спиновыми мультиполями высокого ранга (третьего и четвертого) на свойства изотропных негејзенберговских магнетиков. Следует подчеркнуть, что если в принципиальном плане идеология применения методов атомного представления для решения подобных задач представляется достаточно прозрачной, то практическая реализация соответствующих подходов потребовала известного математического мастерства и хорошего физического понимания квантовых магнетиков с высшими тензорными взаимодействиями.

В диссертации приведены решения одноионных задач как в одно-, так и в двухподрешеточном случаях. Этот шаг является необходимым для перехода к атомному представлению, позволяющему, как известно, в одном ключе описывать негејзенберговские квантовые магнетики. Существенно, что автору удалось найти ряд качественно новых фаз, индуцированных учетом межузельного тензорного взаимодействия высокого ранга. Тем самым было наглядно продемонстрировано, что включение в игру таких взаимодействий приводит не просто к количественным поправкам, но может индуцировать новые магнитные и немагнитные состояния, обладающие нетривиальными характеристиками. Отмечено, что тензорные взаимодействия высокого ранга могут влиять на характеристики переходов между фазами. Особенно интересным представляется результат, связанный с предсказанием возможности реализации в рассматриваемых квантовых магнетиках двухподрешеточного состояния с неэквивалентными подрешетками.

В заключении сформулированы основные научные результаты диссертации, показывающие высокую результативность и актуальность проведенных исследований.

Научная новизна диссертационной работы Космачева О.А. связана с получением принципиальных и приоритетных результатов, которые существенно расширяют представления о свойствах изотропных и анизотропных негејзенберговских квантовых магнетиков с межузельным тензорным взаимодействием высокого ранга.

Эти результаты показывают, что диссертация Космачева О.А. обладает большой практической значимостью, полученные в ней конкретные результаты являются востребованными и полезными при обработке экспериментальных данных по свойствам негејзенберговских магнетиков и могут быть использованы во многих научных центрах, занимающихся изучением нетривиальных состояний соединений с магнитоактивными ионами.

Достоверность полученных результатов работы не вызывает сомнений и обеспечивается использованием современных, проверенных квантовополевых методов с привлечением атомного представления. Кроме того, представленные в диссертации результаты докладывались и обсуждались на многих профильных конференциях международного и российского уровня, хорошо известны специалистам и приняты научной общественностью.

В целом диссертация написано ясно с хорошей физической интерпретацией полученных результатов. Вместе с тем, имеются небольшие замечания и вопросы.

1. В первой части диссертации следовало бы подробнее остановиться на разъяснении физического содержания понятия «сверхтвердая» фаза. В чем проявляется эта «сверхтвердость»? Можно ли указать характеристику, которая становится аномально большой в этой фазе?

2. Имеются случаи «некорректного» цитирования литературных источников. В частности, на стр. 51 дается ссылка на работы [154,226], как на работы, в которых вводилось унитарное преобразование в атомном представлении. В действительности такого преобразования в отмеченных работах не было. Оно было предложено позднее в работе [232]. Замечу, что это опечатка, поскольку в других местах соответствующее цитирование правильное.

3. Проведенные соискателем исследования двухподрешеточных состояний квантового магнетика с $S=2$ при учете изотропных межузельных взаимодействий высших мультиполей потребовали решения весьма непростых в математическом отношении задач. Во многих случаях успех определяется удачным выбором параметризации при записи волновых функций одноионных состояний для каждой из подрешеток. Для $s=2$ в случае двух подрешеток общий вид таких состояний будет иметь вид суперпозиции с комплексными коэффициентами. Формула (5.14) показывает, что параметры выбирались в действительной форме. Это является некоторым удачным ограничением, либо, все-таки, записано наиболее общая структура одноионного состояния?

4. Автором проделана очень большая и необходимая работа по построению в приближении среднего поля фазовых диаграмм квантовых магнетиков с большими значениями спина при учете сильного взаимодействия высших мультиполей. Однако, как известно, такие системы часто характеризуются значительным вкладом квантовых флуктуаций при $T=0$. Поэтому полезно было бы рассчитать путем выхода за рамки отмеченного приближения сдвиг линий, разделяющих различные фазы. Может быть, это замечание следует расценивать как пожелание на будущее, однако без учета квантовых флуктуаций результаты о структуре фазовых диаграмм следует расценивать как важные, но, все-таки, предварительные.

5. В тексте диссертации имеются опечатки. Отметим лишь некоторые из них: стр.8, строка 4 снизу вместо «существование» должно быть

«существования»; на этой же странице вместо «...произведения средних значений проекций...» должно быть «...произведения проекций...»;

стр. 44 после формулы (1.16) следует привести в соответствие символы так, как это записано в (1.15);

стр. 88 следует исправить в стилистическом отношении последнее предложение пункта 3 основных результатов;

не везде присутствуют необходимые запятые.

Отмеченные недостатки не являются принципиальными, не снижают научной значимости диссертационной работы и не изменяют высокой оценки проведенных исследований и полученных результатов, которые хорошо изложены в диссертации.

Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Считаю, что диссертационная работа Космачева О. А. «Спиновые немагнетики и сильно анизотропные магнетики», по актуальности проведенных исследований, новизне полученных результатов и практической значимости соответствует требованиям пункта № 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013, а ее автор Космачев Олег Александрович заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент,
главный научный сотрудник
лаборатории теоретической физики
отдела теоретической физики
Института физики им. Л.В. Киренского СО РАН – обособленного
подразделения ФИЦ
д.ф.-м.н. (01.04.11 – физика магнитных явлений), профессор
Вальков Валерий Владимирович

07.07.2020

Телефон: 8-913-183-46-84

E-mail: vvv@iph.krasn.ru

Подпись официального оппонента В.В. Валькова заверяю:

Ученый секретарь ИФ СО РАН,

к.ф.-м.н. Злотников Антон Олегович

