

ОТЗЫВ официального оппонента

**на диссертацию на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
Кошелева Анатолия Владимировича
на тему: «Квантовые основные состояния в синтетических аналогах
низкоразмерных медь-содержащих минералов»
по специальности 1.3.10. физика низких температур**

Диссертационная работа А.В. Кошелева посвящена исследованию термодинамических и магнитных характеристик ряда квантовых магнетиков на основе магнитного иона меди. Изучение таких спиновых систем находится в фокусе внимания специалистов по физике конденсированного состояния, магнетизма, физики низких температур и материаловедения вследствие возможности реализации необычных основных состояний и спиновых возбуждений в них. Богатое разнообразие спиновых структур, реализующееся в подобных соединениях, включающее двумерные, одномерные спиновые системы, конгломераты изолированных димеров и тримеров, создает почву для пониженной размерности и сильной конкуренции обменных взаимодействий, магнитной фрустрации. Эти факторы, а также квантовый характер спина меди $S = 1/2$ повышает роль спиновых флуктуаций, что порождает при низких температурах разнообразные экзотические явления. Яркими представителями этого класса являются, например, купратные высокотемпературные сверхпроводники, демонстрирующие сверхпроводимость при азотных температурах, однозначная теоретическая модель которой до сих пор не разработана. Примечательно, что магнетики на основе ионов меди не только создаются в кристаллохимических лабораториях, но и широко распространены среди природных минералов. *Актуальность* выбранной темы не вызывает сомнений: поиск кандидатов в квантовые магнетики среди природных объектов в последние десятилетия привлекает активное внимание исследователей, так как эти вещества и обладают большим разнообразием химического состава и высокой стабильностью. Наличие

природного источника материалов, обладающих квантовым магнетизмом, может быть важным в свете потенциального практического применения таких систем для изготовления микро- и наноразмерных компонентов для электроники и спинтроники, устройств хранения информации, элементов схем слаботочной сверхпроводниковой электроники, чувствительных сенсоров и так далее.

Автор сосредоточился на экспериментальном исследовании базовых физических свойств исследуемых объектов: теплоемкости, статической и динамической магнитной восприимчивости, диэлектрической проницаемости, зависимости этих характеристик от температуры и приложенного внешнего магнитного поля. Эти исследования удачно дополнены данными, полученными такими экспериментальными методами как электронный парамагнитный резонанс и мёссбауэровская спектроскопия, а также выполненными соавторами теоретическими расчетами. Автором проведен корректный анализ экспериментальных данных и предложены разумные модели основных состояний спиновых систем изучаемых соединений.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка авторской и цитируемой литературы. Общий объем работы составляет 86 страниц, включая 62 рисунка и 1 таблицу, а также библиографию из 60 наименований.

В первой главе автор делает обзор научных публикаций, рассматривая ряд моделей низкоразмерного магнетизма и иллюстрируя эти модели примерами спиновых систем минералов - сложных оксидов меди.

Во второй главе автор описывает синтез и/или характеристику кристаллической структуры экспериментальных образцов, в том числе и проведенный им лично. Также в этой главе кратко характеризуются выбранные методы исследования, рассматриваются детали экспериментальных установок.

Главы с третьей по пятую содержат оригинальные результаты.

В третьей главе изложены результаты исследования магнитных, тепловых и диэлектрических свойств говардэванситов $\text{LiCuFe}_2(\text{VO}_4)_3$ и $\text{NaCuFe}_2(\text{VO}_4)_3$.

Четвертая глава посвящена исследованию магнитных свойств, теплоемкости и ЭПР-спектроскопии минерала урусовита $\text{CuAl}(\text{AsO}_4)\text{O}$.

В пятой главе автор исследует низкоразмерный ферримагнетизм, наблюдаемый в шаттуките $\text{Cu}_5(\text{OH})_2(\text{SiO}_3)$.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы.

На защиту вынесено четыре научных положения. все выводы хорошо обоснованы и не вызывают возражений. в работе получен ряд *новых результатов*. Не останавливаясь на их полном перечислении, назову наиболее, с моей точки зрения, интересные из них.

1. Установлено отсутствие магнитного порядка вплоть до 2К в урусовите $\text{CuAl}(\text{AsO}_4)\text{O}$. Убедительно показано, что основой магнитной структуры этого соединения служат почти изолированные спиновые димеры. Объяснены особенности высокотемпературного поведения магнитной восприимчивости реального кристалла.

2. Обнаружен магнитоэлектрический эффект при формировании магнитоупорядоченного состояния говардэвансита $\text{LiCuFe}_2(\text{VO}_4)_3$.

3. Экспериментально показана важность слабых ферромагнитных обменных взаимодействий для магнитного поведения шаттукита $\text{Cu}_5(\text{OH})_2(\text{SiO}_3)$.

Эти результаты, несомненно, *значимы* для понимания природы магнетизма квантовых магнетиков на основе природных минералов, содержащих медь, важны для перспектив их практического применения и являются новыми. *Достоверность* полученных данных подтверждается использованием современного оборудования, согласием с

экспериментальными результатами других методов исследования, непротиворечивостью известным физическим моделям и верификацией результатов в процессе реферирования публикаций в известных научных журналах. Результаты, представленные в диссертации, доложены и обсуждены на международных и российских конференциях и опубликованы в 4 статьях в высокорейтинговых научных журналах. Автореферат и публикации полностью отражают содержание диссертации, которое соответствует специальности 1.3.10. физика низких температур, а именно следующим ее направлениям б) Исследование механических, электрических, магнитных, оптических, тепловых и других физических свойств вещества при низких температурах. 1) Разработка физико-технических и физико-технологических основ проектирования, создания и исследования элементной базы, устройств и приборов слаботочной сверхпроводниковой электроники (вместо «пунктов паспорта»).

Вопросы и замечания:

1. В параграфе 1 главы 3 в комментарии к данным, представленным на рис. 46, расхождение между низкотемпературным поведением ZFC и FC магнитной восприимчивости однозначно отнесено к состоянию спинового стекла. В то же время зависимость от термальной истории наблюдается и в некоторых других случаях, в том числе при наличии несоразмерных спиновых структур и в анизотропных ферро- и ферримагнетиках. Почему в $\text{NaCuFe}_2(\text{VO}_4)_3$ выбор был сделан в пользу спинового стекла? Проводились ли исследования частотной зависимости динамической восприимчивости? Есть ли различие в ZFC и FC магнитной восприимчивости $\text{LiCuFe}_2(\text{VO}_4)_3$ при низких температурах?

2. На этом же рисунке 46 стрелкой указана температура стеклования $T_{sg} = 8$ К. При этом положение этой стрелки соответствует расхождению кривых FC и ZFC, наблюдаемому при 5.5 К, хотя при $T \approx 8$ К, аналогичной температуре максимума теплоемкости, на кривой восприимчивости

действительно имеется излом. Как можно объяснить указанное на рисунке положение особенности?

3. В рассматриваемом в пятой главе шаттуките $\text{Cu}_5(\text{OH})_2(\text{SiO}_3)$ определен недостаток меди, превышающий 10%. При этом возможное влияние вакансий на позициях меди как в спиновых цепочках Cu_3 , так и в системе тримеров и димеров $\text{Cu}_1\text{-Cu}_2$ на свойства соединения никак не обсуждается.

4. В диссертации присутствует ряд опечаток, сбоев в нумерации рисунков и ссылок на используемую литературу.

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.3.10. физика низких температур (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова, а также оформлена согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Таким образом, соискатель Кошелев Анатолий Владимирович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.10. физика низких температур.

Официальный оппонент:

Кандидат физико-математических наук,
с.н.с. Лаборатории Физики Ферроиков и
Функциональных Материалов Казанского физико-
технического института им. Е.К. Завойского -
обособленного структурного подразделения

Федерального государственного бюджетного
учреждения науки «Федеральный исследовательский
центр «Казанский научный центр Российской академии
наук» »

ВАВИЛОВА Евгения Леонидовна

05.12.2023

Контактные данные:

тел.: 7 (843) 272 05 03, e-mail: e.vavilova@knc.ru.

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация:

01.04.07 – физика твердого тела (по новому кодификатору 1.3.8. – физика
конденсированного состояния)

Адрес места работы:

420029, г. Казань, ул. Сибирский Тракт, д.10/7,
КФТИ им. Е.К. Завойского - структурного подразделения Федерального
государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный
Исследовательский Центр «Казанский Научный Центр РАН»»
<<Тел.: 7 (843) 272 05 03; e-mail: e.vavilova@knc.ru

Подпись Е.Л. Вавиловой удостоверяю

Главный ученый секретарь

ФИЦ «Казанский Научный Центр РАН»

05.12.2023



 С.А. Зиганшина.