

ОТЗЫВ официального оппонента

на диссертацию на соискание ученой степени

**доктора физико-математических наук Вавиловой Евгении Леонидовны
на тему: «Взаимодействие низкоразмерности, магнитной фрустрации и
дефектов в квантовых спиновых магнетиках, исследованное методом
ядерного магнитного резонанса»**

по специальности 1.3.12. «физика магнитных явлений»

Представленная диссертационная работа посвящена экспериментальному исследованию квантовых магнетиков на основе сложных оксидов 3d – металлов методами ядерного магнитного резонанса (ЯМР) и ядерного квадрупольного резонанса (ЯКР). Это направление исследований вполне актуально, так как, с одной стороны, интенсивно развиваются новые технологии, использующие спиновые степени свободы для современной электроники, вычислительной техники, элементов линий связи и т.д., что представляет практический интерес, а с другой — значительный фундаментальный интерес, так как в новых магнитных материалах наряду с классическими типами дальнего магнитного порядка (антиферромагнетизмом и ферромагнетизмом) наблюдаются необычные фазы, такие как спиновые жидкости, спиновый лед, спиновые спирали, спиновые стекла и фрустрированные магнетики.

Диссертация Вавиловой Е.Л. состоит из введения, семи глав, заключения и списка цитируемой литературы из 378 наименований. Общий объем диссертации составляет 288 страниц.

Среди результатов, полученных в работе, наиболее интересными и значительными являются следующие.

Установлено сосуществование двух типов спиновых цепочек, отличающихся знаком обменного взаимодействия в одномерном квантовом магнетике $\text{BaAg}_2\text{Cu}[\text{VO}_4]_2$.

Получены экспериментальные доказательства существования пространственно-неоднородного основного состояния, сочетающего щелевые сегменты и АФМ-кластеры, в Ni-гибридном соединении $\text{NiCl}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_2\text{CH}_2\text{NH}_3$ с дефектами.

В соединении $\text{Li}_3\text{Cu}_2\text{SbO}_6$ с альтернированным обменом в спиновых цепочках методом ЯМР показано сосуществование фрагментов спиновой цепочки, формирующихся из-за частичной инверсии позиций ионов, со щелевым и бесщелевым поведением. Получена характерная величина спиновой щели для соответствующих участков цепи.

На основании исследований фрустрированного спин-цепочечного квантового магнетика LiCuSbO_4 экспериментально обнаружены признаки спин-нематической фазы в цепочках с конкурирующим взаимодействием между ближайшими и вторыми соседями.

Обнаружены и изучены эффекты взаимодействия подрешеток псевдоспиновых электрических диполей Li^+ и квантовых спинов Cu^{2+} в $\text{Li}_2\text{ZrCuO}_4$. Продемонстрирована зависимость формы линии ЯМР от типа замораживания лития в расщепленных позициях, образующих электрический диполь.

Установлена структура магнитной решетки в упорядоченном состоянии квази-двумерного магнетика $\text{Li}_3\text{Ni}_2\text{SbO}_6$ с магнитной решеткой типа пчелиных сот.

Построена полная фазовая диаграмма «магнитное поле-температура» квази-двумерного сотового магнетика $\text{Na}_3\text{Co}_2\text{SbO}_6$, определена величина и полевая зависимость энергетической щели Китаева-Гейзенберга.

Показано, что в квази-двумерном сотовом магнетике $\text{InCu}_{2/3}\text{V}_{1/3}\text{O}_3$, при понижении температуры установлению трехмерного дальнего порядка в системе XY спинов меди предшествует промежуточное состояние с двумерным статическим короткодействующим АФМ порядком. Также впервые в этом соединении обнаружено поведение типа БКТ.

Исследования кагоме-соединения $\text{YBaCo}_3\text{AlO}_7$ с частичной инверсией позиций Al/Co и квазидвумерного соединения $\text{Li}_{0,8}\text{Ni}_{0,6}\text{Sb}_{0,4}\text{O}_2$ с нарушенной сотовой структурой плоскостей и дефицитом лития показали, что основное состояние в них – не классическое, а кластерное спиновое стекло. Также показано, что установлению этого состояния предшествует возникновение коррелированных областей конечного размера с очень медленной спиновой динамикой.

ЯМР исследования LaCoO_3 с замещением La на Sr, Y и Ca в количестве долей процента показали, что наблюдающийся непропорционально большой магнитный отклик на допирование происходит не за счет изменения спинового состояния части ионов кобальта по причине локального искажения кристаллического поля, а за счет образования из-за дырочного допирования спинового полярона из 7 ионов кобальта.

ЯМР исследования ванадий-оксидных нанотрубок в сочетании с комплиментарными методами показали, что необычно большой магнитный отклик, возникающий в этой системе со смешенной валентностью ванадия при допировании литием, связан с образованием вблизи допанта локального магнитного кластера.

Методом ЯМР обнаружено, что низкий уровень инверсии позиций во фрустрированном магнетике CoAl_2O_4 не приводит к классическому спин-стеклольному состоянию, а порождает сосуществование фаз, разделенных критической точкой, и стимулирует одновременное проявление соответствующих обеим соседствующим фазам низкоэнергетических спиновых возбуждений.

Все результаты, полученные в диссертационной работе, являются новыми и интересными. Статьи по теме диссертационной работы опубликованы в журналах, имеющих высокий импакт фактор и входящих в список ВАК.

Следует особо отметить, что подавляющее большинство из приведенных автором статей по материалам диссертации (17 из 24) опубликованы в

журналах 1 квартиля! Результаты исследований докладывались и обсуждались на многих авторитетных конференциях.

Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

По содержанию диссертационной работы имеется ряд замечаний и вопросов.

1. На странице 78 (первая строка снизу) написано «...значение константы Кюри-Вейса $\theta = 5 \text{ K}$...». Известно, однако, что θ – это константа Вейса.

2. На странице 80 на Рис. 3.1.2. приведены спектры ЭПР квантового магнетика $\text{BaAg}_2\text{Cu}(\text{VO}_4)_2$ для неориентированного порошка и ориентированного порошка. На рисунке (и в подписи) указана температура 50 К. Однако ниже, в тексте, при ссылке на этот рисунок указана температура 80 К. На какой температуре зарегистрированы эти спектры?

3. Одним из основных параметров, который автор извлекает из анализа спектров ЯМР – это спиновый сдвиг K ,. В большинстве случаев в этой диссертационной работе в парамагнитной области эта величина определяется по положению максимума линии ЯМР некоторым числом в процентах. Однако, известно [Jones W.H., et al. Phys. Rev. 1963. V.132. P.1898 –1909.], что это – тензор. Корректный анализ любого спектра ЯМР для поликристаллического образца должен привести к определению трех компонент этого тензора. Для монокристаллического образца эти компоненты получаются с меньшей погрешностью прямо из эксперимента. Вероятно то, что автор обозначает за « K » является изотропной компонентой тензора сдвига (K_{iso}). Не теряет ли автор полезную информацию при таком упрощенном анализе спектров ЯМР?

4. Другой важный параметр, который получается из анализа спектров ЯМР – ширина линии. Обычно (в большинстве работ) эта величина определяется как ширина линии ЯМР на половине высоты. В данной диссертационной работе такое определение я нашел только на странице 199 (строка 12 сверху). Однако на странице 208 (описание выражения 6.3.1) я нахожу другое определение: «..ширина линии..., принимаемая за 1/3 от

общей ширины линии...». Интересно, откуда взято это выражение (6.3.1.)? Автор получила его сама? Что же понимать под шириной линии в других главах диссертации?

5. На стр. 129 приведен Рис.4.2.3, на котором представлены температурные зависимости сдвига ЯМР (вероятно ${}^7\text{Li}$) и макроскопической восприимчивости соединения LiCuSbO_4 . В подписи к этому рисунку сдвиг называется сдвигом Найта, однако известно, что сдвиг Найта всегда характеризует спиновый вклад в сдвиг от электронов проводимости в металлах, а это соединение металлом не является. В тексте диссертации на странице 131 мы также встречаем это определение, что некорректно.

6. В разнообразных экспериментальных данных, представленных в этой диссертационной работе есть некоторые общие черты: в большинстве случаев температурные зависимости спинового сдвига ЯМР, статической магнитной восприимчивости, в некоторых случаях – резонансного поля ЭПР, иногда – теплоемкости характеризуются немонотонным поведением. Часто обнаруживаются экстремумы типа λ – пика. Каждый раз при анализе подобного поведения автор делает очень важные выводы о необычных магнитных фазах. Однако, возникает провокационный вопрос: нет ли более простого объяснения этому поведению. Известно, что подобное поведение можно связать также со структурным фазовым переходом (и/или с решеточной нестабильностью). Есть ли у автора доказательство того, что в низкотемпературной области для этих сложных многокомпонентных оксидов структура стабильна (низкотемпературный рентген, нейтронография, ..., надежные литературные данные)?

7. Небольшое замечание по оформлению диссертационной работы: некоторые рисунки настолько мелкого масштаба, что их сложно анализировать (например, в литературном обзоре Рис.1.1.1., Рис.1.2.7.,).

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 паспорту специальности 1.3.12 – «физика магнитных явлений» (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 приложениям № 5, 6 Положения о диссертационном совете Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Таким образом, соискатель Вавилова Евгения Леонидовна заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.12 – «физика магнитных явлений».

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,

старший научный сотрудник,

заведующий лабораторией кинетических явлений,

главный научный сотрудник

ФГБУН Институт физики

металлов имени М.Н.Михеева Уральского отделения Российской академии

наук

Михалев Константин Николаевич

22.04.2024

Контактные данные:

тел.: +7(343)378-35-05, e-mail: mikhalev@imp.uran.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом

защищена диссертация:

01.04.07 – физика твердого тела

Адрес места работы:

: 620108 г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, д. 18, ФГБУН Институт физики металлов им. М.Н. Михеева Уральского отделения РАН

Тел.: +7(343)378-35-05

e-mail: mikhalev@imp.uran.ru

Подпись д.ф.-м.н. К.Н.Михалева

заверяю

Ученый секретарь ИФМ УрО РАН,

к.ф.-м.н.

Арапова И.Ю. 22.04.2024