

УТВЕРЖДАЮ

Проект по научной
деятельности ФГАОУ ВО КФУ,
профессор

Д.К. Нургалиев

17 апреля 2019 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации о диссертационной работе

Смольникова Алексея Геннадьевича «**Сверхтонкие взаимодействия и магнитный порядок в мультиферроике CuCrO₂ по данным ядерного магнитного резонанса**», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.11 – Физика магнитных явлений.

Следует сразу отметить, что данная работа экспериментальная, и выполнена она в прекрасно зарекомендовавшей себя в исследованиях методами ядерного магнитного резонанса (ЯМР) группе из Института физики металлов им. М.Н. Михеева Уральского отделения РАН в г. Екатеринбург. Диссертационная работа выполнена на актуальную тему. Сегнетомагнетики (мультиферроики) привлекают к себе повышенное внимание как с точки зрения получения фундаментальных знаний о магнитоэлектрических явлениях, так и в прикладном аспекте: микроэлектронике, сенсорной технике, увеличении скорости и плотности записи информации. Исследуемое в диссертационной работе соединение CuCrO₂ является хорошим модельным объектом, поскольку в нем формирование спиновых спиралей происходит в плоской треугольной решетке из магнитных ионов Cr³⁺ с антиферромагнитным взаимодействием между ними. Треугольная антиферромагнитная решетка является одним из наиболее типичных примеров спиновой фruстрации. Исследование электронных и магнитных свойств этого соединения несомненно актуально.

Глава 1 является обзорной. В ней представлены литературные данные о структуре, электронных и магнитных свойствах исследуемого соединения. Сделан обзор современных моделей сегнетомагнетизма в спиральных магнитных системах и обозначены проблемы применимости этих моделей к соединению CuCrO₂. Приведены данные по дифракции нейтронов, фазовая диаграмма и имеющиеся в литературе данные по ЯМР меди.

В Главе 2 описаны синтез и способ обогащения изотопом ¹⁷O используемых образцов, а также методика измерений. Представлены температурные зависимости магнитной восприимчивости и электрической поляризации.

Глава 3 посвящена исследованию методом ЯМР на ядрах ¹⁷O и ^{63,65}Cu парамагнитной фазы CuCrO₂. Приводятся и анализируются спектры ЯМР и ЯКР, а также, температурные зависимости сдвигов линий ЯМР. Основываясь на данных ЯМР ^{63,65}Cu, ¹⁷O в CuCrO₂ и данных ЯМР ^{63,65}Cu изоструктурного CuFeO₂, в работе предложена модель спинового обмена по цепочкам Cr – O – Cu и произведены оценки степеней ковалентности между ионами. Определены градиенты электрических полей (ГЭП) и константы

сверхтонкого взаимодействия, которые позже используются для моделирования спектров ЯМР/ЯКР в магнитоупорядоченном состоянии. Успех в расшифровке спектров – несомненное свидетельство высокой квалификации диссертанта.

В главе 4 приводятся зарегистрированные спектры ЯМР/ЯКР ^{17}O , ^{53}Cr и $^{63,65}\text{Cu}$ в магнитоупорядоченной фазе, а также зависимости спин-спиновой релаксации ядер ^{17}O и ^{53}Cr . Достоинством диссертационной работы является согласованный анализ данных ЯМР от ядер всех трех структурных элементов, входящих в состав CuCrO_2 . В результате получены **новые важные** сведения об обменных взаимодействиях и упорядочении спинов в этом соединении.

Наиболее важным результатом диссертационного исследования является определение спиновой структуры CuCrO_2 . Установлено, что магнитные моменты хрома лежат в плоскостях, включающих кристаллографическую ось **c**. Эти плоскости перпендикулярны плоскости треугольной решетки (**ab**) и развернуты друг относительно друга на угол 60° . Одна из плоскостей перпендикулярна кристаллографической оси **a**. Внутри треугольной решетки спины развернуты друг к другу на угол, близкий к 120° . Небольшое отклонение от 120 -градусной конфигурации спинов приводит к формированию несоизмеримой с периодом решетки структуры спиновой геликоиды. Обнаружено, что при магнитном фазовом переходе происходит изменение градиента электрического поля (ГЭП) на позициях ядер ионов O^{2-} , при этом ГЭП на позициях ядер ионов Cu^+ сохраняется. Основываясь на этих данных, автор приходит к выводу о наличии локальных искажений в треугольной решетке при сохранении линейной конфигурации цепочек $\text{O} - \text{Cu} - \text{O}$. Полученная информация, несомненно, поможет лучше понять природу магнитоэлектрической связи, возникающей как в исследуемом соединении, так и других магнетиках с геликоидальным магнитным порядком.

В целом диссертация написана хорошо и легко читается, почти не содержит опечаток и грамматических ошибок.

Замечания:

1. При описании измерений температурной зависимости магнитной восприимчивости на СКВИД-магнитометре (Рис. 2.1.2) на стр. 44 не описано каким образом контролировалась и обеспечивалась линейность изменений.
2. На стр. 48 нет сведений о времени парализации.
3. Имеются опечатки. На стр. 40 в названии вертикальной шкала рис. 1.6.2. На стр. 52, в формуле (2.4.1) под знаком экспоненты пропущен знак минус.
4. В автореферате (стр. 9) и диссертации (стр. 62) написано «Пропорциональность магнитных сдвигов и восприимчивости свидетельствует в пользу слабой температурной зависимости как внутри плоскостного, так и межплоскостного суперобменного взаимодействия». Обычно при обсуждении температурной зависимости обменного взаимодействия пишут и говорят о зависимости параметра связи спинов (обменного интеграла) от температуры. Корреляция между сдвигом частоты ЯМР и магнитной восприимчивостью, которую отмечает Смольников, обусловлена зависимостью средних значений спинов от температуры.
5. Диссертант квалифицирует сигнал, наблюдаемый от изотопов $^{63,65}\text{Cu}$ меди в локальном поле, в качестве спектра ядерного квадрупольного резонанса. Однако данный спектр записан в упорядоченной фазе, и логичнее было бы использовать термин ядерного магнитного резонанса в локальном поле, как и в случае ЯМР ^{53}Cr .

Приведенные замечания не влияют на высокую оценку основных результатов экспериментального исследования. Результаты **новы и достоверны**. Результаты диссертации опубликованы в ведущих журналах и прошли апробацию на конференциях. Автореферат правильно отражает содержание диссертации. Диссертация обсуждена на заседании кафедры квантовой электроники и радиоспектроскопии Казанского (Приволжского) федерального университета 29 марта 2019 года, протокол № 10

По общему мнению членов кафедры, диссертационная работа Смольникова Алексея Геннадьевича «**Сверхтонкие взаимодействия и магнитный порядок в мультиферроике CuCrO₂ по данным ядерного магнитного резонанса**» удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.11 – Физика магнитных явлений.

Отзыв составили:

д.ф.м.н., проф. Еремин М. В.
meremin@kpfu.ru

Еремин Михаил Васильевич

к.ф.м.н., доц. Дуглав А.В.
Alexander.Dooglav@kpfu.ru

Дуглав Александр Васильевич

Заведующий кафедрой
квантовой электроники и
радиоспектроскопии,
д.ф.м.н., проф. Тагиров М.С.
Murat.Tagirov@gmail.com

Тагиров Мурат Салихович

Казань 420008, ул. Кремлевская 18. Тел.: (843) 2-31-51-16

02.04.2019

С отзывом ознакомлен

 | Согласовано А.Г. /

25.04.2019

Сведения о ведущей организации

Полное наименование: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Казанский (Приволжский) федеральный университет"

Краткое наименование: ФГОУ ВО "Казанский (Приволжский) федеральный университет"

Почтовый адрес: 420008, Россия, РТ, г. Казань, ул. Кремлевская, д.18.

Тел.: +7 (843) 233-71-09

E-mail: public.mail@kpfu.ru

<http://www.imp.uran.ru/>

Основные научные направления

1. Магнитные и спектроскопические характеристики многофункциональных материалов для приложений в биомедицине, наноиндустрии и инфокоммуникационных технологиях.
2. Анализ влияния локального атомного окружения на магнитные, транспортные свойства и фотопроводимость систем с наноразмерными неоднородностями методом мессбауэровской спектроскопии. Магнитные структуры, спиновый транспорт и методы направленной модификации физических свойств в функциональных магнитных материалах.
3. Необычные основные состояния и магнитные упорядочения в низкоразмерных сложных оксидах.
4. Новые микро- и наноустройства на основе низкоразмерных систем сильнокоррелированных электронов .
5. Структуры с распределенным параметром порядка

Публикации в сфере исследований, которым посвящена диссертация

Смольникова Алексея Геннадьевича «Сверхтонкие взаимодействия и магнитный порядок в мультиферроике CuCrO_2 по данным ядерного магнитного резонанса», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.11 – Физика магнитных явлений.

1. Mukhamedshin I.R. Evolution of Co charge disproportionation with Na order in Na_xCoO_2 [Text] / I. R. Mukhamedshin, A.V. Dooglav, S.A. Krivenko, H. Alloul // Phys. Rev. B –v.90. -2014. –p.115151.
2. Orlova A.Yu., Gainov R.R., Dooglav A.V., Pen'kov I.N. Electronic structure and indirect spin-spin interactions in bournonite (CuPbSbS_3) according to antimony nuclear quadrupole resonance // JETP Letters 2013, Vol. 97, No 7, 413-418.
3. Alloul H. ^{23}Na NMR study of sodium order in Na_xCoO_2 with 22 K Neel temperature [Text] / H. Alloul, I.R. Mukhamedshin, A.V. Dooglav, Ya.V. Dmitriev, V.-C.Ciomaga, L. Pinsard-Gaudart, and G. Collin // Phys. Rev. B –v.85. -2012. -p. 134433.
4. Alakshin E.M. The Calcium Carbonate Geological Samples Study by ^3He NMR/ E.M. Alakshin, R.R. Gazizulin, A.V. Klochkov, E.I. Kondratyeva, A. Laskin, M.S. Tagirov//Applied Magnetic Resonance. - 2017. - Vol.48, Is.7. - P.723-729.
5. Алакшин Е.М., Протонный ЯМР водных коллоидных растворов наноразмерных кристаллических частиц LaF_3 и $\text{LaF}_3:\text{Gd}^{3+}$ [текст] / Е.М. Алакшин, Б.И. Гизатуллин, М.Ю. Захаров, А.В. Клочков, Т.М. Салихов, В.Д. Скирда, М.С. Тагиров // ФНТ. - 2015. -Т.41.,N.1. - С.86-89.
6. Мамин Г.В. ЭПР исследование упорядоченного аэрогеля на основе Al_2O_3 / Г.В. Мамин, С.Б. Орлинский, А.А. Родионов, М.С. Тагиров // Письма в ЖЭТФ. - 2015.- Т. 102, Вып. 9.- С. 714-717
7. Еремин М.В. Энергетический спектр низколежащих состояний в $\text{Sr}_2\text{FeSi}_2\text{O}_7$ и природа магнитоэлектрического эффекта/ Еремин М.В./// Письма в ЖЭТФ. -2017. -Т. 105. -В. 11. -С. 664 – 667.
8. Еремин М.В. О коллективных спиновых возбуждениях в купратных ВТСП с электронным допированием/ М.В. Еремин, М.А. Малахов// Письма в ЖЭТФ. -2016.-Т. 104.- С. 13-17.
9. Schaile S., von Nidda H. -A. Krug, Deisenhofer J., Eremin M.V. et al. ESR evidence for partial melting of the orbital order in LaMnO_3 below the Jahn-Teller transition//Phys. Rev. B. - 2014. - Vol. 90, Is.5, Art. №054424.

Ученый секретарь Института физики К(П)ФУ

доктор физ.-мат. наук

02.04.2019 г.

Ю.Н. Прошин

Зарегистрировано в УФНС по г. Казани
02.04.2019 г. № 00000000000000000000