



УТВЕРЖДАЮ

И.о. директора ИФМ УрО РАН

академик РАН

Н.В.Мушников

« 16 » октября 2023 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу
Скоробогатова Станислава Алексеевича «**Экспериментальное
исследование низкотемпературной спиновой динамики
редкоземельных ортоферритов $R\text{FeO}_3$ ($R = \text{Tb}$, Tm и Yb) методом
неупругого рассеяния нейтронов**»,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук по специальности 1.3.8 – физика
конденсированного состояния

Актуальность темы диссертации

Актуальность диссертационной работы С.А. Скоробогатова не вызывает сомнений. Исследованные в ней магнитные системы относятся к классу соединений, содержащих одновременно атомы редкоземельных и переходных металлов. Как следствие, в них возникают сложные конкурирующие взаимодействия, обуславливающие богатство проявляемых ими магнитных свойств, которые открывают возможности их широкого практического применения, например, в электронике. Однако осознанный поиск соединений с заданными свойствами требует глубокого понимания тонких механизмов существующих в них взаимодействий, для чего необходимо комплексное и достаточно полное использование арсенала современных экспериментальных методик. Удачный выбор линейки редкоземельных ортоферритов в качестве конкретных объектов исследования в сочетании с самыми современными методами исследований и обеспечил актуальность полученных результатов.

Структура и основное содержание работы

Диссертация С.А. Скоробогатова состоит из Введения, пяти глав и Заключения.

Во Введении описаны актуальность данной области исследований, подбор линейки образцов (монокристаллы ортоферритов $R\text{FeO}_3$ ($R = \text{Tb}$, Tm , Yb)). Кратко охарактеризована картина наблюдающихся в данных системах магнитных состояний и проблемы их описания. Сформулированы конкретные цели работы с перечислением использованных для их достижения экспериментальных методик и теоретических методов анализа результатов.

Первая глава диссертации посвящена обзору научных работ по магнитным и структурным свойствам ортоферритов и перовскитов, включая как экспериментальные, так и теоретические аспекты их изучения. Перечень вошедших в него работ вполне представительен. Он обеспечил хорошую основу для выбора конкретных задач исследований.

Во второй главе дано описание использованных процессов получения и кристаллографической аттестации монокристаллических образцов изучавшихся ортоферритов, а также измерений их магнитных свойств. Особое внимание уделено описанию методик

ФИЦ КНЦ СО РАН Обособленное подразделение
Институт физики им. Л.В. Киренского
Сибирского отделения
Российской академии наук (ИФ СО РАН)
24 10 2023 г.
Вход. № 287-03/6224/105

нейтронной спектроскопии, составивших основное ядро диссертации, с помощью которых удалось получить как спектры магнонов, так и определить строение уровней редкоземельных ионов, обусловленное их расщеплением в кристаллических полях. Здесь следует особо подчеркнуть, что в настоящее время в России нет ни одной действующей установки неупругого рассеяния нейтронов. Это делает результаты, полученные при участии автора в рамках международного сотрудничества на двух спектрометрах Ок-Риджской Национальной Лаборатории (ORNL), уникальными для российской науки и значимыми для мировой с учетом лидерства ORNL в данной области. В главе дано также изложение и обсуждение границ применимости использованных для анализа экспериментальных результатов модели точечных зарядов с гамильтонианом Стивенса, линейной спин-волновой теории и теории среднего поля.

В последующих трех главах систематически описаны результаты исследований трех составов ортоферритов. В третьей главе описываются результаты магнитометрических исследований монокристаллического образца TbFeO_3 , позволившие подтвердить антиферромагнитное упорядочение подсистемы ионов Fe^{3+} , уточнить температуры спин-ориентационного перехода в подсистеме этого иона, и температуры Нееля подсистемы Tb^{3+} иона. Выполненный автором с использованием эффективного программного обеспечения анализ спектров неупругого рассеяния нейтронов, полученных на этом соединении, позволил определить параметры его магнитной подсистемы: констант обменного взаимодействия, эффективной анизотропии и коэффициентов гамильтониана Стивенса.

В четвертой главе представлены результаты по монокристаллу ортоферрита TmFeO_3 , полученные из анализа данных магнитометрии и неупругого рассеяния нейтронов. Обнаружено, что спектр магнитных возбуждений TmFeO_3 состоит из антиферромагнитных магнонов в подсистеме Fe^{3+} со щелью порядка 8 meV при температуре 7 K, а также двух уровней, относящихся к подсистеме Tm^{3+} , расположенных ниже щели магнонов железа. Описание магнонных возбуждений в рамках линейной спин-волновой модели дало возможность выявить анизотропию обменных взаимодействий между компонентами внутри и вне плоскости. Наблюдавшийся спектр возбуждений ионов Tm^{3+} хорошо описывается в модели точечных зарядов. Однако в целом данная система оказалась значительно более сложной для описания, нежели YbFeO_3 , что обусловлено как близостью величин обмена и расщепления в кристаллическом поле, так и низкой симметрией данной системы, что усложняет построение соответствующего микроскопического гамильтониана. Окончательное решение этой задачи требует проведения дополнительных весьма сложных исследований.

Глава 5 посвящена результатам изучения ортоферрита YbFeO_3 . Они особо интересны, поскольку получены в нейтронографических экспериментах под давлением, в ходе которых удалось зафиксировать изменение в поведении ширины спин-ориентационного перехода в зависимости от давления, магнитного поля и температуры и связать его с изменением константы анизотропии четвертого порядка, фигурирующей в предложенной для описания системы модификации теории среднего поля. Построена диаграмма зависимости спин-ориентационного перехода, возникающего в YbFeO_3 , от поля и температуры.

Итоги работы подведены в Заключении, из которого ясно, что предпринято систематическое изучение строения магнитной системы редкоземельных ортоферритов, основанное, прежде всего, на использовании выполненного на самом высоком уровне метода неупругого рассеяния нейтронов, дополненного магнитными измерениями. С единых позиций на основе линейной спин-волновой модели и модели точечных зарядов проведено описание экспериментальных результатов, определены значения их параметров, что важно для понимания механизмов взаимодействий.

Научная новизна результатов диссертационной работы

Впервые получены спектры неупругого рассеяния нейтронов в ортоферритах TmFeO_3 , TbFeO_3 и YbFeO_3 , причем для последнего, в том числе, и при приложении высоких давлений. Этот результат является первоклассным даже на мировом уровне.

Спектры возбуждений и результаты магнитных измерений проанализированы с использованием линейной спин-волновой теории, модели точечных зарядов и модифицированной теории среднего поля, что позволило установить значения характеризующих систему констант обменного взаимодействия, анизотропии и параметров гамильтониана Стивенса.

Обсуждены проблемы, возникающие при применении перечисленных моделей для описания данных систем, в частности, для ортоферрита TmFeO_3 . Намечены пути преодоления возникших трудностей.

Достоверность результатов и обоснованность выводов

Достоверность полученных в работе результатов гарантируется, прежде всего, использованием в исследованиях самого передового высококачественного экспериментального оборудования (системы Quantum Design PPMS-6000 для магнитных измерений, а также нейтронных спектрометров ARCS и CNCS Ок-Риджской Национальной Лаборатории, являющейся безусловным мировым лидером в данной области). Анализ экспериментальных результатов велся с использованием современных и общепризнанных программных пакетов (Dave, Horace, SpinW, MatLab и др.).

Основные результаты диссертации опубликованы в ведущих мировых журналах (3 публикации в Phys Rev B) и доложены на отечественных и международных конференциях.

Практическая значимость полученных результатов

Соединения со сложными магнитными состояниями и, соответственно, с магнитными фазовыми переходами являются перспективными материалами для элементов спинтроники. Понимание тонких механизмов взаимодействий в них необходимо для осознанного поиска путей получения таких соединений с заранее заданными характеристиками. Можно надеяться, что развиваемые в процессе исследований методы описания систем на базе редкоземельных и переходных металлов, внесут важный вклад в этом направлении.

Замечания по диссертационной работе

Описание принципов методов магнитных измерений и неупругого рассеяния нейтронов, а также линейной спин-волновой модели и модели точечных зарядов, данные в главе 2, представляются грешащими излишними подробностями и носящими научно-популярный характер, не слишком подходящий для диссертационной работы.

Почему-то автор несколько раз называет операторы Стивенса структурными. Хотя общепринятое наименование для них - эквивалентные, поскольку они строятся из операторов углового момента с использованием теоремы Вигнера-Экарта для эффективного представления разложения электрического поля лигандов по мультиполям в пространстве магнитных состояний.

Личный вклад автора, отмеченный в тексте диссертации и в автореферате, описан чересчур лаконично и не отражает большой объем работы, проделанный С.А. Скоробогатовым при проведении исследований по диссертационной работе.

Заключение

Диссертационная работа Скоробогатова С.А. является завершенной научно-квалификационной работой, содержащей важные новые результаты о физических свойствах ортоферритов $R\text{FeO}_3$ ($R = \text{Tb}, \text{Tm}, \text{Yb}$), совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение, имеющее значение для понимания тонких механизмов взаимодействий, реализующихся в системах на базе редких земель и переходных металлов. Высказанные выше замечания не влияют на общую положительную оценку диссертации. Работа выполнена на высоком научном уровне, материал изложен логично, последовательно, хорошим литературным языком. Выводы и результаты обоснованы, доказательны и достоверны. Автореферат полностью отражает основное содержание диссертации. Содержание диссертационной работы соответствует Паспорту научной специальности 1.3.8. «Физика конденсированного состояния» (отрасль науки – физико-математические), по направлениям исследований «Теоретическое и экспериментальное изучение физической природы и свойств металлов и их сплавов, неорганических и органических соединений, диэлектриков и, в том числе, материалов световодов как в твердом (кристаллы, поликристаллы), так и в аморфном состоянии в зависимости от их химического, изотопного состава, температуры и давления», «Разработка математических моделей построения фазовых диаграмм состояния и прогнозирование изменения физических свойств конденсированных веществ в зависимости от внешних условий их нахождения». Полученные результаты соответствуют цели и задачам диссертационной работы и отражены в 3 публикациях соискателя в рецензируемых и включенных в Перечень ВАК журналах, индексируемых информационно-аналитическими системами РИНЦ, WOS и SCOPUS.

Диссертационная работа Скоробогатова Станислава Алексеевича на тему «Экспериментальное исследование низкотемпературной спиновой динамики редкоземельных ортоферритов $R\text{FeO}_3$ ($R = \text{Tb}, \text{Tm}$ и Yb) методом неупругого рассеяния нейтронов» отвечает требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-

математических наук, установленным п.п 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 N 842 (ред. от 18.03.2023) "О порядке присуждения ученых степеней". Указанные замечания не снижают общую положительную оценку диссертационной работы. Скоробогатов Станислав Алексеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния».

Основные результаты по диссертации были представлены С.А. Скоробогатовым на заседании Научного совета по магнетизму и магнитным методам диагностики материалов и изделий ИФМ УрО РАН (29.09.2023 г., протокол №4). Отзыв на диссертационную работу Скоробогатова Станислава Алексеевича «Экспериментальное исследование низкотемпературной спиновой динамики редкоземельных ортоферритов $RFeO_3$ ($R = Tb, Tm$ и Yb) методом неупругого рассеяния нейтронов» рассмотрен и одобрен Ученым советом ИФМ УрО РАН «18» октября 2023 года (протокол № 17).

Отзыв подготовили:

Заведующий лабораторией нейтронных исследований вещества ИФМ УрО РАН
кандидат физико-математических наук по специальности 01.04.11 – физика магнитных явлений



А.Ф. Губкин

Заведующий отделом радиационной физики и нейтронной спектроскопии ИФМ УрО РАН
Кандидат физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния



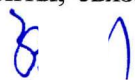
В.И. Бобровский

Почтовый адрес: 620108, г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18
+7(343) 374-44-94, agubkin@imp.uran.ru, bobrovskii@imp.uran.ru

Я, Губкин Андрей Федорович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.



Я, Бобровский Владимир Иванович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.



Подписи А.Ф. Губкина и В.И. Бобровского заверяю
ученый секретарь ИФМ УрО РАН
кандидат физико-математических наук



И.Ю. Арапова

18.10.23

Сведения о ведущей организации

по диссертации Скоробогатова Станислава Алексеевича тему
«Экспериментальное исследование низкотемпературной спиновой динамики
редкоземельных ортоферритов $R\text{FeO}_3$ ($R = \text{Tb}, \text{Tm}$ и Yb) методом неупругого рассеяния
нейтронов», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния

Полное наименование организации	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук
Почтовый индекс и адрес организации	620108, Свердловская обл., г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18
Телефон, факс	(343) 374-02-30, (343) 374-52-44
Адрес электронной почты	physics@imp.uran.ru
Адрес официального сайта в сети «Интернет»	www.imp.uran.ru
Список основных публикаций по теме диссертации в журналах из списка ВАК за последние 5 лет (не более 15 публикаций)	1. Relationship between magnetoresistance behavior and magnetic states in intercalated compounds FexTiS_2 [Текст] / N. V. Selezneva, E. M. Sherokalova, A. Podlesnyak, M. Frontzek, and N. V. Baranov // Phys. Rev. Materials. — 2023. — V. 7. — P. 014401 — DOI 0.1103/PhysRevMaterials.7.014401. 2. Easy-plane magnetic anisotropy in layered GdMn_2Si_2 compound with easy-axis magnetocrystalline anisotropy [Текст] / E.G. Gerasimov, P.B. Terentev, A.F. Gubkin, H.E. Fischer, D.I. Gorbunov, N.V. Mushnikov // Journal of Alloys and Compounds. — 2020. — V. 818. — P. 152902 — DOI 10.1016/j.jallcom.2019.152902 3. Спиновые возбуждения в неколлинеарной магнитной фазе соединения LaMn_2O_5 [Текст] / В.В. Меньшенин // Физика металлов и металловедение. — 2019. — V. 120. — P. 471 — DOI 10.1134/S0015323019050115 4. Magnetic glassiness and crystal field effects on thermal and electrical properties of Er_5Pd_2-type compounds [Текст] / A.A.Vaulin, A.M.Chirkova, E.A.Sherstobitova, D.A.Shishkin, E.M.Sherokalova, K.P.Skokov, N.V.Baranov, A.F.Gubkin // Intermetallics. — 2022. — V. 144. — P. 107519 — DOI 10.1016/j.intermet.2022.107519 5. Magnetic phase transitions in the $\text{LiNi}_{0.9}\text{M}_{0.1}\text{PO}_4$ ($\text{M} = \text{Mn}, \text{Co}$) single crystals [Текст] / M.A. Semkin, N.V. Urusova, A.I. Beskrovnyi, A.S. Volegov, A.P. Nosov, J.-G. Park, S. Lee, A.N. Pirogov // Physica Scripta. — 2022. — V. 97. — P. 25707 — DOI 10.1088/1402-4896/ac4b6e 6. Magnetic incommensurability, short-range correlations, and properties of Ho_7Rh_3 [Текст] / A. F. Gubkin, A. A. Vaulin, T. Tsutaoka, A. F. Prekul, K. P. Skokov, N. V. Baranov // Physical Review B. — 2022. — V. 106. — P. 134419 — DOI 10.1103/PhysRevB.106.134419

	7. Взаимодействие дзюлошинского и обменно-релятивистские эффекты в ортоферритах [Текст] / А.С. Москвин // Журнал экспериментальной и теоретической физики. — 2021. — V. 159. — P. 607–643 — DOI 10.31857/S0044451021040040 8. Магнитная нейтронография квазидвумерных магнетиков [Текст] / А.И. Курбаков, А.Н. Коршунов, А.Н. Пирогов, Е.Г. Герасимов, Н.В. Мушников // Кристаллография. — 2021. — V. 66. — P. 271 — DOI 10.31857/S0023476121020090 9. Magnetic and magneto-thermal properties of ferrimagnetic alloys (Er_{1-x}Y_x) (Co_{0.84}Fe_{0.16})₂ and their dependence on the orientations of resultant and sublattice magnetizations [Текст] / M. S. Anikin, E. N. Tarasov, N. V. Kudrevatykh, D. S. Neznakhin, M. A. Semkin, N. V. Selezneva, S. V. Andreev, A. V. Zinin // Journal of Physics: Condensed Matter. — 2021. — V. 33. — P. 275801 — DOI 10.1088/1361-648X/abfc17 10. Comprehensive study of the magnetic phase transitions in Tb₃Co combining thermal, magnetic and neutron diffraction measurements [Текст] / A. Herrero, A. Oleaga, A.F. Gubkin, M.D. Frontzek, A. Salazar, N.V. Baranov // Intermetallics. — 2019. — V. 111. — P. 106519 — DOI 10.1016/j.intermet.2019.106519
--	--

Ведущая организация подтверждает, что соискатель не является ее сотрудником и не имеет научных работ по теме диссертации, подготовленных на базе ведущей организации или в соавторстве с ее сотрудниками.

Ученый секретарь института
к.ф.-м.н.



[Handwritten signature]

И.Ю. Арапова

18.10.23