

ОТЗЫВ

Официального оппонента на диссертацию СОЛДАТОВА Тимофея
Александровича

«ЭЛЕКТРОННЫЙ СПИНОВЫЙ РЕЗОНАНС В СПИН-ЦЕПОЧЕЧНЫХ
АНТИФЕРРОМАГНЕТИКАХ С ОДНОРОДНЫМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ
ДЗЯЛОШИНСКОГО-МОРИИ»,

представленной на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук (специальность 01.04.09 – физика низких температур)

Актуальность темы. Исследование низкоразмерных антиферромагнетиков является одним из приоритетных современных направлений в физике конденсированного состояния. В этих системах из-за низкой симметрии, квантовых флуктуаций и фрустрации обменных взаимодействий происходит заметное сокращение (редукция) среднего значения спина в упорядоченном состоянии или вместо традиционного дальнего магнитного порядка возникают новые состояния с сильными спиновыми корреляциями и получившие название спиновой жидкости. За последние десятилетия появляется все большее число новых магнитных кристаллов, которые интенсивно изучаются с помощью различных экспериментальных методик. Диссертация Т. А. Солдатова посвящена изучению трех низкоразмерных антиферромагнетиков со спином $S = 1/2$ - квазидвумерного антиферромагнетика на искаженной треугольной решетке Cs_2CuCl_4 и квазиодномерных антиферромагнетиков $K_2CuSO_4Br_2$ и $K_2CuSO_4Cl_2$ - методом электронного спинового резонанса (ЭСР). Автору удалось продемонстрировать высокую эффективность магнито-резонансных методов исследования и получить важную информацию об особенностях спиновых возбуждений и магнитных взаимодействиях в этих низкоразмерных модельных антиферромагнетиках. Хотелось бы отметить уникальность используемых автором условий использования магнитного резонанса, которые охватывают широкий диапазон частот (0.5 – 350 ГГц), магнитных полей (0 – 12 Т) и температур (0.45 – 80 К). Такими широкими возможностями использования экспериментальной техники обладают лишь несколько научно-исследовательских центров в мире, в том числе и лаборатория спиновой динамики в Институте физических проблем им. П. Л. Капицы РАН. Полученные результаты значимы и актуальны для физики конденсированного состояния, расширяя представления о низкоразмерных антиферромагнетиках.

Структура диссертации. Диссертация Т. А. Солдатова представляет собой комплексное исследование, включающее в себя обзор предшествующих экспериментальных и теоретических работ, многочисленные оригинальные экспериментальные данные, а также их теоретическую интерпретацию, выполненную самим автором. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, выводов и списка литературы и изложена на 159 страницах машинописного текста, включает в себя 77 рисунка и 84 наименования в списке литературы. Во **введении** дается общая характеристика диссертации.

Первая глава посвящена изложению основных представлений о низкоразмерных антиферромагнетиках - гейзенберговской антиферромагнитной цепочке и треугольной решетке спинов $S = 1/2$. Оказывается, в одномерной спиновой цепочке элементарными возбуждениями являются так называемые спионы, несущие дробный спин $S = 1/2$. В экспериментах по рассеянию нейтронов и поглощению фотонов спионы возбуждаются только парами, поэтому спектр возбуждений представляет собой континуум. Детально обсуждается спектр спионного континуума вблизи центра зоны Бриллюэна в спиновой цепочке в магнитном поле, формируемый под действием однородного взаимодействия Дзялошинского-Мории. Теоретически предсказывается необычный эффект, выражающийся в возникновении энергетической щели в спектре и превращении линии магнитного резонанса в дублет резонансных линий (так называемый спионный дублет) в отсутствие дальнего порядка. Такой тип резонанса автор называет спионным, подчеркивая его связь со спинонами. Обзор выполнен квалифицированно и свидетельствует о хорошем знании диссертантом предмета исследований.

Во второй главе обсуждаются теоретические основы магнитного резонанса, подробно описываются использованные в исследованиях приборы и конструкция экспериментальных установок, а также рентгено-дифракционная методика ориентации образцов по кристаллографическим осям.

Третья глава посвящена изучению спектров ЭСР антиферромагнетика Cs_2CuCl_4 в сильном магнитном поле. Несмотря на то, что данное соединение интенсивно исследуется различными методиками вот уже на протяжении последних двадцати лет, в работе обнаруживаются совершенно новые эффекты и наблюдения. Экспериментально показано, что наблюдаемый в ранних работах дублет резонансных линий коллапсирует в поле, составляющем приблизительно половину поля насыщения. Автор связывает такое поведение с тремя возможными причинами: 1) подавление магнитным полем квантовых флуктуаций и сужение континуума; 2) исчезновение фрустрации междоцепочечных обменных связей при увеличении поля; 3) нарушение условия малости зеемановской

энергии по сравнению с энергией однородного взаимодействия Дзялошинского-Мории. Кроме того, в полях выше поля насыщения автор обнаруживает слабую резонансную моду обменного происхождения. Теоретический анализ показывает, что данная мода возбуждается благодаря взаимодействию Дзялошинского-Мории между спинами в соседних цепочках.

В **четвертой главе** представлены результаты исследования магнитного резонанса в антиферромагнетиках $K_2CuSO_4Cl_2$ и $K_2CuSO_4Br_2$. Следует подчеркнуть, что детальное изучение спектров ЭСР для данных кристаллов производится впервые. В кристалле $K_2CuSO_4Br_2$, являющемся гораздо более одномерным по сравнению с $K_2CuSO_4Cl_2$, обнаруживается спектр магнитного резонанса, который в слабых полях очень хорошо соответствует предсказаниям теории спионного резонанса, возникающего в присутствии однородного взаимодействия Дзялошинского-Мории – наблюдается открытие энергетической щели в нулевом поле и формирование дублета резонансных линий при низких температурах. Экспериментально полученные частотно-полевые зависимости позволили определить щель $\Delta = 8.7$ ГГц и параметр Дзялошинского-Мории $D = 0.27$ К. Спионный резонанс был исследован в широком диапазоне частот и полей, в результате исчезновение спионного дублета обнаружено в поле, сильно меньшем поля насыщения. Для антиферромагнетика $K_2CuSO_4Cl_2$ исследования спионного резонанса показывают формирование энергетической щели в нулевом поле, в то время как спионный дублет оказывается недоразвит – высокочастотная компонента дублета не обнаружена. Для объяснения полученных экспериментальных фактов автор приводит естественную причину, связанную с конкуренцией межцепочечного обмена и взаимодействия Дзялошинского-Мории.

Научная новизна в диссертации сформулирована в виде пяти пунктов, представляющие собой научные положения, выносимые на защиту.

Научная новизна и достоверность защищаемых положений. Все полученные Т. А. Солдатовым результаты являются новыми и хорошо обоснованными. Их достоверность обеспечивается применением эффективных методов исследования, высоким уровнем использованной экспериментальной техники, комплексным характером выполненных экспериментов, их многократной повторяемостью, аккуратной обработкой экспериментальных данных и тщательным анализом погрешностей. Обоснованность не вызывает сомнений и определяется глубоким и всесторонним анализом результатов на базе имеющихся теоретических моделей.

Научная и практическая значимость работы. Полученные в диссертации новые научные результаты представляют интерес для широкого круга исследователей (как

экспериментаторов, так и теоретиков), интересующихся спин-цепочечными магнетиками, углубляя понимание особенностей поведения спиновых возбуждений в одномерных спиновых цепочках под действием однородного взаимодействия Дзялошинского-Мории. Ключевым результатом является формулировка эмпирических критериев обнаружения спионного дублета по температуре и по полю, представляющая собой обобщение экспериментальных данных. Кроме того, за время работы автор изготовил новые спектрометрические вставки, расширяющие температурный и частотный диапазон, которые могут быть использованы для исследований других соединений.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации.

Результаты и выводы диссертационной работы Т. А. Солдатова могут быть использованы в ведущих научных центрах России, таких как ИФП им. П. Л. Капицы РАН, ИФТТ РАН, ИТФ им. Л. Д. Ландау РАН, ИОФ РАН, ФИ РАН, КФТИ РАН, Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, Институт физики микроструктур РАН, ведущими университетами, такими как МГУ, Санкт-Петербургский университет, МИЭТ, МИРЭА, Уральский федеральный университет и др.

Вопросы и замечания. По содержанию диссертации имеются следующие вопросы и замечания:

1. Поскольку магнитные ионы меди в исследуемых системах занимают четыре неэквивалентные низкосимметричные кристаллографические позиции в решетке, которые имеют различные g -тензоры и по-разному расщепляются в магнитном поле, вызывая дополнительное уширение, то этот вопрос следовало бы обсудить более детально в используемых моделях.
2. Обнаруженное диссертантом смягчение нижней компоненты дублета в $K_2CuSO_4Br_2$ в магнитном поле $H \parallel b$ при 0.25 Т (рис. 4.18) желательно было бы обсудить более детально с точки зрения возможной перестройки корреляционной спиновой функции системы и развития в ней специфической неустойчивости.

Указанные замечания не снижают научной и практической ценности результатов работы и не влияют на общее благоприятное впечатление. Результаты работы опубликованы в 4 рецензируемых статьях в ведущих физических журналах *Physical Review Letters* (одна публикация) и *Physical Review B* (три публикации), а также доложены на нескольких международных и российских конференциях. Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации.

Совокупность результатов, полученных в диссертации Т. А. Солдатов «Электронный спиновый резонанс в спин-цепочечных антиферромагнетиках с однородным взаимодействием Дзялошинского-Мории» представляет собой научное достижение в низкоразмерном магнетизме и удовлетворяет всем требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям физико-математического профиля. Диссертант Т. А. Солдатов безусловно заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.09 – физика низких температур.

кандидат физико-математических наук,
зав. лабораторией диэлектрической спектроскопии
магнитных материалов ФГБУН ИОФ
им. А. М. Прохорова РАН

Мухин Александр Алексеевич
7 июня 2019 г.

Почтовый адрес: 119991, г. Москва, ул. Вавилова,
д. 38, ИОФ им. А. М. Прохорова РАН
телефон: +7916-018-31-70 (моб.)
E-mail: mukhin@ran.gpi.ru

Подпись А. А. Мухина подтверждает:
Зам. директора ИОФ РАН, д. ф.-м. н.



В. В. Глушков
7 июня 2019 г.