

УТВЕРЖДАЮ



Директор Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
«Федеральный исследовательский центр
«Казанский научный центр

Российской академии наук»

Академик РАН

Синяшин О.Г.
« 05 » июня 2019 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу

Солдатова Тимофея Александровича «**Электронный спиновый резонанс в спин-цепочечных антиферромагнетиках с однородным взаимодействием Дзялошинского-Мории**», представленную на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук по специальности

01.04.09 – Физика низких температур.

Актуальность темы

Диссертационная работа Т. А. Солдатова посвящена экспериментальному изучению элементарных возбуждений в квантовых антиферромагнетиках цепочечного типа методом магнитного резонанса. В квантовых магнетиках, которые не упорядочиваются при температурах много меньше θ_{CW} , но находятся в сильно коррелиированном состоянии, отсутствие классического порядка обусловлено квантовыми спиновыми флуктуациями. Изучение квантовых магнетиков является одним из ключевых направлений в физике конденсированного состояния. Сильно коррелированное, но неупорядоченное основное состояние системы называется спиновой жидкостью или коллективным парамагнетиком. Для квазинизкоразмерных магнетиков имеется обширная область температур $T_N < T \ll \theta_{CW}$, в которой система сильно коррелирована при отсутствии дальнего

порядка, то есть находится в слабо возмущенном спин-жидкостном состоянии.

В последние годы возрос интерес научного сообщества к кристаллическим квантовым магнетикам, которые демонстрируют неожиданные с классической точки зрения фазы и элементарные возбуждения, поэтому поиск новых квантовых магнетиков и изучение их их физических свойств является актуальной задачей.

В связи с этим, проведенные Т. А. Солдатовым исследования низкоразмерных антиферромагнетиков Cs_2CuCl_4 , $K_2CuSO_4Cl_2$ и $K_2CuSO_4Br_2$ являются значительными в фундаментальном аспекте.

Структура диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, выводов и списка литературы и изложена на 159 страницах машинописного текста, включает в себя 77 рисунка, список литературы из 84 наименований. Во введении обсуждается актуальность выбранной тематики, научная значимость и практическая ценность проведенных исследований.

Первая глава представляет собой обзор литературы по основным магнитным свойствам гейзенберговской антиферромагнитной цепочки и треугольной решетки спинов $S = 1/2$. Элементарными возбуждениями в одномерной цепочке являются спиноны – квазичастицы со спином $S = 1/2$. Подробно рассматривается вопрос об изменении спинонного континуума в спиновой цепочке в магнитном поле под действием однородного взаимодействия Дзялошинского-Мории, для которого векторный параметр, характеризующий данное взаимодействие, сонаправлен для каждой пары соседних спинов внутри цепочек в исследуемых веществах. Кроме того, вводится понятие спинонного резонанса и спинонного дублета.

Во второй главе обсуждаются теоретические основы магнитного резонанса и методика эксперимента, представляются описания экспериментальных установок и спектрометрических вставок для исследования ЭСР, а также приводятся условия экспериментов.

Оригинальные результаты изложены в 3 и 4 главах диссертации.

В **третьей** главе приводятся результаты магнитного резонанса в сильных полях в квазидвумерном антиферромагнетике Cs_2CuCl_4 наискаженной треугольной решетке спинов $S = 1/2$ при температурах около 0.5 К, а также производится их интерпретация. Главным достоинством этой главы является экспериментальное обнаружение коллапса наблюдаемого в ориентации $\mathbf{H} \parallel a$ дублета резонансных линий вблизи половины поля насыщения $H_{\text{col}} \simeq 0.5H_{\text{sat}} = 4.2$ Т. Сделаны логичные предположения о том, что подобное поведение может быть связано как с подавлением магнитным полем квантовых спиновых флюктуаций и сужением континуума спинонных возбуждений, так и с исчезновением фruстрации или же нарушением условия малости зеемановской энергии по сравнению с энергией однородного взаимодействия Дзялошинского-Мории. Кроме того, в полях выше поля насыщения экспериментально обнаружена дополнительная к лармировской слабая резонансная мода, которая находит свое объяснение в рамках гармонической спин-волновой теории как мода обменной природы. Получено, что при повышении температуры резонансное поле слабой моды сдвигается в область высоких частот, что согласуется с расчетами по ангармонической спин-волновой теории. Анализ спектров магнитного резонанса в полях выше поля насыщения позволил произвести вычисления главных обменных интегралов в Cs_2CuCl_4 .

В **четвертой** главе излагаются результаты экспериментов по магнитному резонансу в квазидвумерных антиферромагнетиках $\text{K}_2\text{CuSO}_4\text{Cl}_2$ и $\text{K}_2\text{CuSO}_4\text{Br}_2$ со спином $S = 1/2$ магнитных ионов Cu^{2+} . Сначала кратко обсуждается кристаллическая структура, затем приводится литературный обзор предыдущих работ по этим соединениям. Автором исследованы частотно-полевые зависимости спектров магнитного резонанса для $\text{K}_2\text{CuSO}_4\text{Br}_2$ в широком диапазоне частот и магнитных полей. Анализ спектров позволил определить величину энергетической щели в нулевом поле $\Delta = 8.7$ ГГц и параметр Дзялошинского-Мории $D = 0.27 \pm 0.01$ К.

Установлен экспериментальный факт, что с увеличением магнитного поля, приложенного вдоль оси b , происходит расхождение компонент спинонного дублета, верхняя компонента дублета исчезает в поле, составляющем 13 % от поля насыщения. Исследованное в сильных полях поведение спинонного дублета на данный момент не имеет теоретического объяснения. В спектре магнитного резонанса $K_2CuSO_4Br_2$ также наблюдалась линия от примесей и дефектов, поведение которой удалось описать в рамках теории обменного сужения спектра. В монокристалле $K_2CuSO_4Cl_2$ при понижении температуры ниже температуры Кюри-Вейсса дублет резонансных линий спинонного типа не наблюдается, однако, обнаруживается нижняя компонента дублета. Из аппроксимации температурных и частотных зависимостей резонансных полей автором произведена оценка параметра однородного взаимодействия Дзялошинского-Мории в $K_2CuSO_4Cl_2$.

Сформулированная в диссертации **научная новизна** из пяти научных положений выносится на защиту. Все выводы хорошо обоснованы и не вызывают возражений.

Научная новизна и достоверность защищаемых положений.

1. Впервые в квазидвумерном антиферромагнетике Cs_2CuCl_4 наблюдался коллапс дублета резонансных линий в сильных магнитных полях при увеличении поля до половины поля насыщения.
2. Впервые исследован спектр магнитного резонанса в квазидвумерном антиферромагнетике Cs_2CuCl_4 при низких температурах в полях выше поля насыщения, что позволило наблюдать слабую резонансную линию, возбуждение которой обуславливается наличием взаимодействия Дзялошинского-Мории между спинами ионов меди в соседних цепочках, а энергия данного возбуждения в первом приближении определяется величинами обменных взаимодействий.
3. Экспериментально исследован спектр магнитного резонанса в квазиодномерном антиферромагнетике $K_2CuSO_4Br_2$, частотно-полевые зависимости которого в слабых полях согласуются с теорией

спинонного континуума для цепочек с однородным взаимодействием Дзялошинского-Мории.

4. Экспериментально изучена частотно-полевая зависимость спектра в $K_2CuSO_4Cl_2$, которая качественно описывается теорией, рассматривающей однородное взаимодействие Дзялошинского-Мории.
5. Установлены эмпирические критерии, определяющие температуру формирования и поле исчезновения спинонного дублета в антиферромагнитных цепочках спинов $S = 1/2$ с однородным взаимодействием Дзялошинского-Мории.

Достоверность полученных данных подтверждается использованием современного аттестованного оборудования, согласием с экспериментальными результатами других авторов и непротиворечивостью известным физическим моделям.

Научная и практическая значимость работы.

Полученные в диссертации научные результаты являются качественно новыми и вносят существенный вклад в понимание физических свойств антиферромагнитных цепочек спинов $S = 1/2$ с однородным взаимодействием Дзялошинского-Мории.

Для проведения исследований спектров магнитного резонанса монокристаллов Cs_2CuCl_4 , $K_2CuSO_4Cl_2$ и $K_2CuSO_4Br_2$ Т. А. Солдатовым были изготовлены спектрометрические вставки в криостат с откачкой 4He (температуры до 1.3 K) и в криостат с откачкой 3He (температуры до 0.45 K), которые могут быть использованы для изучения новых соединений.

Полученные критерии могут быть использованы при анализе магнитного резонанса в других квазиодномерных антиферромагнетиках с однородным взаимодействием Дзялошинского-Мории внутри цепочек, если таковые в будущем обнаружат.

К важнейшим результатам диссертационной работы Т. А. Солдатова можно отнести установление эмпирических критериев, определяющих температуру формирования и величину магнитного поля, выше которых

спинонный дублет резонансных линий не наблюдается. Эти критерии получены из анализа проведенных полевых и температурных исследований спектров магнитного резонанса в монокристаллах Cs_2CuCl_4 , $\text{K}_2\text{CuSO}_4\text{Cl}_2$ и $\text{K}_2\text{CuSO}_4\text{Br}_2$.

Результаты исследований обладают несомненной научной новизной и могут способствовать дальнейшему развитию теории о влиянии однородного взаимодействия Дзялошинского-Мории на спинонный континуум возбуждений в одномерной цепочке спинов $S = 1/2$ при рассмотрении сильных полей, конечных температур и взаимодействия спиновых цепочек. Результаты работы достаточно полно изложены в 4 рецензируемых статьях, индексируемых в базах данных Web of Science, а также неоднократно докладывались на международных конференциях. Автореферат диссертации отражает ее содержание.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации.

Результаты и выводы диссертационной работы Солдатова Т. А. могут быть **рекомендованы к использованию** многими организациями Российской Федерации: 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:

1. В диссертации и автореферате встречаются опечатки и неточности.
2. Автором приведены оценки величины антисимметричного обмена как из анализа угловой зависимости ширины линии магнитного резонанса в монокристалле $\text{K}_2\text{CuSO}_4\text{Cl}_2$ ($D = 0.16 \pm 0.01$ K), так и из аппроксимации частотной зависимости резонансных полей ($D = 0.06 \pm 0.01$ K). В диссертации не рассматривается, можно ли, используя значение $D = 0.16$ K, описать теоретическую зависимость для

низкочастотной компоненты дублета в магнитном поле параллельном оси *b* кристалла?

3. В диссертации приведены результаты измерений спектров магнитного резонанса монокристалла Cs_2CuCl_4 при температуре 0.5 К, что ниже температуры Нееля 0.67 К. Для описания проведенных исследований автор привлекает модель спинового резонанса, возможно ли описать полученные частотные зависимости с использованием выражений для трехмерного антиферромагнетика?

Сделанные замечания не снижают качества диссертации. В целом диссертационная работа Т.А. Солдатова представляет собой вполне добродотное экспериментальное исследование, анализ полученных в работе результатов и их интерпретация проведены на современном уровне. Работа обладает значительной научной и практической значимостью. Хотя личный вклад в диссертации не отмечен, но по ходу чтения диссертации становится ясно, что Тимофей Александрович провел огромную экспериментальную работу по созданию спектроскопических вставок в криостат, которая позволила провести кропотливые, продолжительные по времени измерения частотных зависимостей спектров при температурах ниже 1 К в монокристаллах Cs_2CuCl_4 , $K_2CuSO_4Cl_2$ и $K_2CuSO_4Br_2$. Им также проведены теоретические описания полученных экспериментальных результатов.

Диссертация Т.А. Солдатова «**Электронный спиновый резонанс в спин-цепочечных антиферромагнетиках с однородным взаимодействием Дзялошинского-Мории**» отвечает всем требованиям ВАК п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям физико-математического профиля, соответствует специальности 01.04.09 – “Физика низких температур”, а сам диссертант – Солдатов Тимофей Александрович – заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертационная работа была доложена и обсуждена на расширенном научном семинаре лаборатории радиоспектроскопии диэлектриков

Казанского физико-технического института им. Е.К. Завойского – обособленного структурного подразделения Федерального исследовательского центра «Казанский научный центр Российской академии наук» 14 мая 2019 года, протокол №2, отзыв заслушан и утвержден на за заседании Ученого Совета Казанского физико-технического института им. Е.К. Завойского – обособленного структурного подразделения Федерального исследовательского центра «Казанский научный центр Российской академии наук» протокол № 15 от 15 мая 2019 г.

Ведущий научный сотрудник
Лаборатории радиоспектроскопии диэлектриков,
КФТИ – обособленного структурного
подразделения ФИЦ КазНЦ РАН
телефон: 8 (843) 2319111
4200029, Российская Федерация, Татарстан,
г. Казань, Сибирский тракт 10/7
E-mail: RЕremina@yandex.ru
д. ф.-м. н., доцент

Еремина Рушана Михайловна

Руководитель
КФТИ – обособленного структурного
подразделения ФИЦ КазНЦ РАН
телефон: 8 (843) 2720503
420029, Российская Федерация, Татарстан,
г. Казань, Сибирский тракт 10/7
E-mail: a.a.kalachev@mail.ru
д. ф.-м. н. профессор РАН

Калачев Алексей Алексеевич

СВЕДЕНИЯ О ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук» »
Почтовый адрес: 420111, Российская Федерация, Татарстан, г. Казань, ул. Лобачевского, 2/31, а/я 261.
Телефон организации: +7(843) 292-75-97
Факс: +7(843) 292-77-45
Адрес электронной почты организации: presidium@knc.ru
Адрес официального сайта
организации в сети Интернет <http://knc.ru/>