

УТВЕРЖДАЮ

Директор Федерального
государственного бюджетного учреждения науки

«Федеральный исследовательский центр

«Казанский научный центр

Российской академии наук»

420111, Российская Федерация, Татарстан,

г. Казань, ул. Лобачевского, 2/31.

Профессор РАН, д.ф.-м.н.  Калачев А.А.

« 10 » сентября 2021 г.



ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу

Сергейчевой Елены Геннадьевны

«Магнитный резонанс в квазиодномерном слабо упорядоченном антиферромагнетике Sr_2CuO_3 », представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.10 – Физика низких температур.

Актуальность темы

Диссертационная работа Е.Г. Сергейчевой посвящена экспериментальному изучению практически идеальной одномерной (1D) квантовой спиновой системы Sr_2CuO_3 , в которой обменное взаимодействие между спинами ионов меди в цепочке составляет $J \approx 190 \text{ meV}$, а обменное взаимодействие между соседними цепочками $J_{\perp} \approx 1.5 \text{ K}$. Из-за рекордно малого отношения $J/J_{\perp} \approx 5 \cdot 10^{-4}$ данное соединение называют суперзвездой среди класса квазиодномерных веществ, которые демонстрируют много интересных магнитных свойств, возникающих из-за низкой размерности и квантовых

флуктуаций. Для такого соединения квантовые флуктуации должны проявляться при высоких температурах и влиять на границы фазовой диаграммы температура перехода – магнитное поле. Необходимо отметить, что изменение концентрации кислорода может привести к формированию сверхпроводимости в Sr_2CuO_3 . При этом, несмотря на огромное количество работ, посвященных изучению свойств Sr_2CuO_3 , методом магнитного резонанса исследований не проводилось. Поэтому изучение физических свойств является актуальной задачей с научной точки зрения, а практическое использование возможно для создания элементной базы спинтроники.

В связи с этим, проведенные Е.Г. Сергейчевой исследования монокристаллов Sr_2CuO_3 являются значительными как в фундаментальном, так и в прикладном аспектах.

Структура диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, выводов и списка литературы, изложена на 103 страницах машинописного текста и включает в себя 37 рисунков, две таблицы, список литературы из 90 наименований.

Во введении обсуждается актуальность выбранной тематики, кратко рассказано о структуре диссертации и содержании о приведен перечень конференций, на которых докладывались результаты.

В первой главе рассмотрены особенности магнитных свойств гейзенберговской антиферромагнитной квазиодномерной цепочки спинов с $S = 1/2$. Приведены значения энергии основного состояния, особенности магнитной восприимчивости квазиодномерной цепочки, её спектр возбуждений, рассмотрены особенности расщепление спионного спектра магнитным полем. Приведен краткий обзор литературы, где рассматривались магнитные свойства Sr_2CuO_3 , в котором комплексы CuO_4 с общими вершинами лежат в плоскости (ab) кристалла таким образом, что цепочки Cu-O-Cu ориентированы вдоль оси b , а величина J , определенная в экспериментах по неупругому рассеянию нейтронов, составляет $2790 \pm 130\text{K}$. Показано, что магнитные дефекты и примеси оказывают влияние и на температуру перехода в упорядоченное состояние.

Во второй главе обсуждаются особенности электронного спинового резонанса в квазиодномерном антиферромагнетике, приведены резонансные условия, выражения для частоты антиферромагнитного резонанса двухосного коллинеарного антиферромагнетика. Также подробно рассмотрена схема ЭПР спектрометра, особенности конструкции резонатора с нагревателем, рассмотрены детали регистрации спектров магнитного

резонанса на спектрометре. Изложены характеристика образцов и детали эксперимента. Рассмотрены особенности спектра магнитного резонанса при $T > T_N$ в Sr_2CuO_3 , состоящего из трех линий в парамагнитной фазе, которую в диссертации называют спин-жидкостной. Спектр поглощения состоит из парамагнитной моды с температурно-независимым положением резонансного поля, а также двух относительно слабых примесных сателлитов $S1$ и $S2$. Мода $S2$ относится к парамагнитным дефектам, образующимся на концах разорванных цепочек, обладающих эффективным спином $S = 1/2$. Проведены оценки концентрации дефектов, совпадающие с литературными данными. Рассмотрена температурная зависимость резонансного положения основной моды, характерной для двухосного коллинеарного антиферромагнетика в упорядоченном состоянии. **Впервые**, экспериментально получены частотно-полевые зависимости мод антиферромагнитного резонанса для трех основных направлений магнитного поля, их анализ позволил получить значения щелей, равные $\Delta_1 = 23.0$ ГГц и $\Delta_2 = 13.3$ ГГц, и величину поля спин-флоп перехода. **Впервые** наблюдаются моды нового типа, существующие только в упорядоченной фазе с сильно анизотропным эффективным g -фактором, $g_a^{\text{eff}} = 2.60(5)$, $g_b^{\text{eff}} = 4.7(1)$, $g_c^{\text{eff}} = 1.6(1)$. Установлено, что ширина линии основной моды меняется от образца к образцу 0.025 и 0.04Тл, как и температура Нееля $T_N \approx 5.5$ или 6.1К, а также величины щелей, $\Delta(I)1 = 23$ ГГц, $\Delta(I)2 = 13$ ГГц и $\Delta(II)1 = 30$ ГГц, $\Delta(II)2 = 12$ ГГц, соответственно. При этом видно, что положения и формы линий новых мод практически идентичны, а их интенсивности отличаются в $\approx k$ раз.

В **третьей** главе приведены результаты изучения методом магнитной фазовой диаграммы Sr_2CuO_3 при помощи высоко чувствительного ультразвукового метода, описывается принцип работы и устройство ультразвуковой установки. **Впервые** экспериментально установлено, что, определенная из эксперимента величина T_N имеет сильную зависимость от магнитного поля, а именно, T_N увеличивается на $\approx 30\%$ в поле ≈ 15 Тл. Рассмотрено влияние дефектов в квазиодномерной цепочке спинов системы на повышение температуры магнитного упорядочения. Главным достоинством этой главы является экспериментальное обнаружение индуцированного магнитным полем фазового перехода, критическое поле которого практически не зависит от температуры, в магнитном поле выше 9Тл, приложенном вдоль оси c во всей области температур упорядоченной фазы. Елена Геннадьевна предполагает, что индуцированный магнитным полем фазовый переход при $\mu_0 H_c \approx 9$ Тл, является переходом в состояние с продольной полую волной спиновой плотности.

В **четвертой** главе рассмотрены результаты экспериментального изучения магнетика $\text{Sr}_2\text{CuO}_{3+\delta}$ методом магнитного резонанса. Автором был зарегистрирован в парамагнитной фазе спектр подобный высокотемпературной части спектра для Sr_2CuO_3 , но ширина линии поглощения основной моды в образце $\text{Sr}_2\text{CuO}_{3+\delta}$ в 2.5-3 раза меньше, чем в образце Sr_2CuO_3 . Частотно-полевая зависимость антиферромагнитного спектра в магнитном поле параллельном оси b для $\text{Sr}_2\text{CuO}_{3+\delta}$ хорошо описывается теорией во всем измеренном диапазоне полей, в отличие от Sr_2CuO_3 . Важным экспериментальным фактом является полное отсутствие дополнительных мод, существующих в упорядоченной фазе Sr_2CuO_3 . В главе приводится сравнение параметров спектров ЭСР всех изученных образцов. Показано, что значения g -фактора основной моды одинаковы, но ширины значительно отличаются.

Сформулированные в автореферате диссертации **три** научных положения выносятся на защиту. Все выводы хорошо обоснованы и не вызывают возражений.

Научная новизна и достоверность защищаемых положений

- Впервые изучены спектры магнитного резонанса в парамагнитной и упорядоченной фазах в монокристаллах Sr_2CuO_3 . Доказано, что частотно-полевые зависимости мод антиферромагнитного резонанса хорошо описывается моделью двухосного коллинеарного антиферромагнетика, определены величины щелей, обнаружены новые моды магнитного резонанса в упорядоченной фазе;
- Впервые построена фазовая диаграмма магнитное поле – температура из анализа скорости распространения ультразвука. Обнаружено, что температура упорядочения увеличивается при наложении внешнего магнитного поля, наблюдается фазовый переход, обусловленный внешним магнитным полем;
- Впервые показано, что новые моды магнитного резонанса в упорядоченной фазе не наблюдаются в монокристаллах $\text{Sr}_2\text{CuO}_{3+\delta}$, следовательно, их наличие обусловлено содержанием кислорода и дефектами в образце.

Достоверность полученных данных подтверждается использованием современного 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 спиновых цепочек, образованных ионами меди со спином $S=1/2$. Наиболее существенными результатами с нашей точки зрения являются: построение фазовой диаграммы магнитное поле – температура и наблюдение новой моды в упорядоченной фазе для монокристаллов Sr_2CuO_3 ; определение параметров спектра антиферромагнитного резонанса.

Представленный анализ может быть использован при изучении квазиодномерных магнетиков, расширяет возможности методики ультразвукового исследования. С практической точки зрения данные результаты работы могут найти применение в элементной базе спинтроники, работающей на квантовых принципах.

К важнейшим результатам диссертационной работы Е.Г. Сергейчевой можно отнести:

- Линейное смягчение новой моды возбуждений с полем смягчения $\mu_0 H_c \approx 9.4$ Тл, которое связано с наличием индуцированного магнитным полем фазового перехода;
- построенная по результатам, проведенных ультразвуковых измерений и регистрации существенных аномалий относительного изменения скорости и затухания звука от температуры и магнитного поля, фазовая диаграмма магнитное поле- температура упорядочения в монокристалле Sr_2CuO_3 .

Каждый из этих результатов обладает несомненной научной новизной и является практически значимым. Результаты работы достаточно полно изложены в 2 статьях, опубликованных в высокорейтинговых, рецензируемых научных журналах с квартилем Q1, 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 Сергейчевой Е.Г. могут быть **рекомендованы к использованию** многими организациями Российской Федерации: ИОФ РАН, ФИ РАН, ФИЦ казНЦ 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, КФУ и др.

Вопросы и замечания

1. В работе встречаются опечатки, например стр. 3. Станочится, жаргон «также наличие частотной модуляции оказывалось полезным для развертки *линии резонатора*» стр 29, «наивная интерпретация» стр. 48;
2. В работе проведена оценка анизотропных обменных взаимодействий из анализа температурной зависимости ширины линии ЭПР (рисунок 2.9 диссертации), при этом из анализа одной кривой получены два параметра $\delta J_{\perp} \sim 0.5\text{К}$; $\delta J \sim 40\text{К}$; поэтому однозначность определения параметров вызывает сомнения. Также, необходимо отметить, что природа столь большой анизотропии $\delta J \sim 40\text{К}$, которая раньше нигде не наблюдалась, не обсуждается.
3. Автором получены резонансные положения мод нового типа в спин-опрокинутой фазе для кристалла Sr_2CuO_3 , с сильно анизотропным эффективным g-фактором: $g_{\text{effa}} = 2.60(5)$, $g_{\text{effb}} = 4.7(1)$; $g_{\text{effc}} = 1.6(1)$. Угловые зависимости положения линии рис.2.15 и интенсивность рис. 2.16 можно аппроксимировать в рамках ферромагнитного резонанса. Проводился ли такой анализ для угловой и частотно-полевой зависимостей?
4. В четвертой главе рассмотрены спектры магнитного резонанса для монокристалла с избыточным содержанием кислорода $\text{Sr}_2\text{CuO}_{3+\delta}$, автор отмечает, что ширина линии поглощения основной моды в образце $\text{Sr}_2\text{CuO}_{3+\delta}$ в 2.5-3 раза меньше, чем в кристалле Sr_2CuO_3 . Установлено, что ширина линии основной моды меняется от образца к образцу 0.025 и 0.04Тл, как и температура Нееля $T_N \simeq 5.5$ или 6.1К, соответственно, что сложно объяснить наличием нескольких кристаллитов с близкой взаимной ориентацией кристаллических осей. Параметр δ в образцах не был определен экспериментально, что не позволило однозначно определить физическую природу сужения линии.

Сделанные замечания не снижают качества диссертации. Диссертационная работа Е.Г. Сергейчевой представляет собой экспериментальное исследование, проведенное на самом высоком научном уровне. Работа обладает значительной научной и практической значимостью.

Диссертация Сергейчевой Елены Геннадьевны **«Магнитный резонанс в квазиодномерном слабо упорядоченном антиферромагнетике Sr_2CuO_3 »** отвечает всем требованиям ВАК и «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям физико-математического профиля, соответствует специальности 1.3.10 – Физика низких температур, а сам диссертант – Сергейчева Елена Геннадьевна – 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», протокол № 3 от 31 августа 2021 г, отзыв на диссертацию заслушан и одобрен на заседании Ученого совета КФТИ - обособленного структурного подразделения ФИЦ КазНЦ РАН, протокол № 21 от 08 сентября 2021 г.

Ведущий научный сотрудник
Лаборатории радиоспектроскопии диэлектриков,
КФТИ – обособленного структурного
подразделения ФИЦ КазНЦ РАН
телефон: +7 (843) 2720503
E-mail: RRemina@yandex.ru
д. ф.-м. н., доцент

Еремина Рушана Михайловна

Руководитель КФТИ – ОСП
ФИЦ КазНЦ РАН
телефон: +7(843) 2720503
E-mail: khantim@mail.ru
к. ф.-м. н.

Хантимеров Сергей Мансурович