

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОПОНЕНТА

на диссертацию Сергейчевой Елены Геннадьевны «Магнитный резонанс в квазиодномерном слабо упорядоченном антиферромагнетике  $\text{Sr}_2\text{CuO}_3$ », представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (специальность 1.3.10 – Физика низких температур).

**Актуальность.** В диссертации экспериментально исследуются магнитные свойства антиферромагнетика  $\text{Sr}_2\text{CuO}_3$ . С помощью методов электронного спинового резонанса и ультразвукового метода изучен низкоэнергетический спектр магнитного резонанса этого вещества в упорядоченной и спин-жидкостной фазах, а также построена фазовая диаграмма, демонстрирующая различные магнитные фазы и границы между ними. Проводится сопоставление полученных результатов с имеющимися теориями.

Актуальность исследования подобных низкоразмерных магнитных систем связана с особенностями как основного состояния, так и спектра возбуждений в них. В результате сильных флуктуаций основное состояние может обладать или не обладать дальним порядком. В частности, на это может влиять слабое взаимодействие между низкоразмерными подсистемами. Спектр возбуждений может представлять собой непрерывный бесщелевой континуум, в результате того, что элементарными возбуждениями являются парные частицы, спионы. Согласно имеющимся данным, объект исследования диссертации,  $\text{Sr}_2\text{CuO}_3$ , можно описывать как квазиодномерную антиферромагнитную цепочку спинов  $1/2$  со слабым межцепочечным обменным взаимодействием.

В диссертации получены важные новые результаты, относящиеся к магнитным свойствам данной системы. В главе 1 дан обзор основных особенностей низкоразмерных антиферромагнетиков и приведены известные экспериментальные и теоретические результаты для слабосвязанных гейзенберговских цепочек спинов  $1/2$ . В главе 2 приводятся результаты экспериментов по электронному спиновому резонансу в  $\text{Sr}_2\text{CuO}_3$  в широком диапазоне магнитных полей, частот и температур. Проанализированы обнаруженные особенности и обсуждена природа обнаруженных мод колебаний. В главе 3 на основании измерений, выполненных ультразвуковым методом, строится магнитная фазовая диаграмма  $\text{Sr}_2\text{CuO}_3$ . В главе 4 исследуется влияние допирования кислородом на полученные результаты. Эти результаты помогают прояснить природу наблюдаемых мод. Изучение этих вопросов в диссертации делает ее безусловно актуальной.

**Новизна и достоверность.** Научная новизна диссертационной работы определяется рядом впервые полученных фундаментальных результатов.

В диссертации при помощи метода электронного спинового резонанса был впервые измерен низкоэнергетический спектр магнитного резонанса  $\text{Sr}_2\text{CuO}_3$  в упорядоченной и спин-жидкостной фазах в широком диапазоне температур, частот и магнитных полей. Из анализа наблюдаемых

резонансных свойств были оценены величины слабой анизотропии системы. В упорядоченной фазе были обнаружены и проанализированы моды антиферромагнитного резонанса. Также были обнаружены резонансные моды нового типа, существующие только в упорядоченной фазе и не поддающиеся описанию в рамках известных теоретических представлений. При помощи высокочувствительного ультразвукового метода была исследована магнитная фазовая диаграмма  $\text{Sr}_2\text{CuO}_3$ , измерены фазовые границы, связанные с антиферромагнитным упорядочением, включая спин-флоп переход, а также подтверждено существование нового индуцированного магнитным полем фазового перехода, соответствующего смягчению «продольной» резонансной моды нового типа. Наблюдавшиеся особенности удалось качественно описать путем рассмотрения предполагаемой связи основной системы с дефектами типа концов цепочек. Для проверки данного предположения было проведено дополнительное исследование образца  $\text{Sr}_2\text{CuO}_{3+\delta}$ , выращенного при избыточном давлении кислорода и проведен сравнительный анализ исследованных образцов.

Достоверность результатов обеспечена надежностью выбранных экспериментальных методов. Основным методом исследования являлся электронный спиновый резонанс, применяемый в широком диапазоне температур (от 0.45 К до 50 К), магнитных полей (до 12 Тл) и частот (от 9 ГГц до 140 ГГц). Для исследования магнитной фазовой диаграммы применялся высокочувствительный ультразвуковой метод исследования в широком диапазоне магнитных полей (до 16 Тл) и температур (от 1.6 К до 15 К). Также достоверность результатов обеспечена апробацией работы на российских и международных конференциях. Материалы диссертации опубликованы в 2 работах в высокорейтинговом рецензируемом научном журнале.

**Научная и практическая значимость.** Научная значимость диссертации состоит в ряде перечисленных выше фундаментальных результатов, полученных впервые. Результаты, полученные в диссертации, расширяют экспериментальные представления о свойствах низкоразмерных систем и представляют интерес для теоретических исследований.

**Замечания.** По диссертации можно сформулировать ряд вопросов и замечаний:

1. В вводной части главы 1 обсуждается теоретическое описание системы спинов  $1/2$  и приводится формула (1.4), в которой фигурирует  $g$ -фактор электрона и магнетон Бора. Из текста остается неясным, откуда возникают электронные параметры. Имеется ли в виду, что магнетизм спинов  $1/2$  обусловлен магнетизмом отдельных электронов (по одному на атом)?
2. В главе 1 на стр. 14 упоминаются возможные переходы с переворотом спина при наличии в системе дополнительного однородного поля Дзялошинского. Что имеется в виду под однородным полем Дзялошинского?
3. В разделе 1.2 обсуждается соответствие реального вещества  $\text{Sr}_2\text{CuO}_3$  теоретической модели со слабым межцепочечным обменом. При этом межцепочечный обмен описывается одним параметром  $J_{\perp}$ . В то же время, соседние цепочки, расположенные в разных направлениях, в

реальном веществе очевидно неэквивалентны. Поэтому более аккуратно было бы использование двух различных параметров,  $J_{La}$  и  $J_{Lc}$ . Этот вопрос в диссертации не обсуждается. Хотелось бы понять, почему следует ожидать адекватного описания от модели с одним параметром.

4. В том же разделе 1.2 обсуждаются различные оценки для величины межцепочечного обмена  $J$ , которые имеют значительный разброс. Связан ли этот разброс с различными методами определения  $J$  или же с тем, что эта величина различна в разных образцах?
5. В главе 2 формулы (2.2) и (2.3) могут запутать читателя, т.к. у восприимчивости всегда пишутся два аргумента, но в разных формулах подразумеваются разные аргументы.
6. В разделе 2.4 обсуждается разделение линий поглощения на спектральные компоненты (основную и две примесные моды) с помощью подгонки лоренцевой и двумя гауссовыми линиями соответственно. Есть ли какое-либо обоснование именно такой подгонки? Почему основная мода должна иметь лоренцеву форму, а примесные моды – гауссову?
7. В том же разделе 2.4 обсуждаются примесные моды  $S1$  и  $S2$ , для которых температурные зависимости интегральных интенсивностей описываются законами Кюри и Кюри-Вейса соответственно. В тексте сказано, что это является характерным для парамагнитных дефектов или мод примесного типа. Остается неясным, какой из двух законов все-таки характерен для парамагнитных дефектов или мод примесного типа. Казалось бы, это должен быть закон Кюри. Почему тогда закон Кюри-Вейса может соответствовать парамагнитным дефектам?
8. На стр. 38 обсуждается интерпретация моды  $S2$  и говорится, что вблизи перехода в слабо упорядоченную фазу, возможно, возникают какие-либо новые связанные колебания. Какие именно колебания имеются в виду?
9. Поскольку примесные моды интерпретируются как происходящие от парамагнитных дефектов, естественно возникает вопрос о проверке такой интерпретации с помощью воздействия на образец, меняющего число дефектов в нем. По-видимому, в диссертации такая проверка не делалась. В таком случае это может быть одним из способов дальнейшего развития представленных результатов.
10. На стр. 56 обсуждается дополнительная слабая мода в образце PS, по-видимому, связанная с наличием нескольких кристаллитов. Что при этом известно про кристаллическую структуру других образцов? Можно ли их считать монокристаллами?
11. В главе 3 проводятся измерения и строится фазовая диаграмма для направлений магнитного поля вдоль осей  $b$  и  $c$ . К сожалению, при этом нет данных для направления поля вдоль оси  $a$ . Пожелание на будущее – дополнить фазовую диаграмму такими измерениями.
12. На стр. 73 (последний абзац) сказано: «На основании приведенных рассуждений, можно сделать вывод о возможном существовании дополнительного масштаба энергии, определяющего свойства системы в магнитном поле, отличном от энергии основного

обменного взаимодействия...». Идет ли здесь речь о масштабе энергии  $J_{\perp}$  или о каком-то другом?

Перечисленные замечания не влияют на общую высокую оценку работы. Часть из них связана с тем, что представленные результаты могут иметь дальнейшее развитие. Все поставленные в диссертационной работе цели достигнуты и соответствуют положениям, выносимым на защиту. Работа выполнена на научном уровне, достаточном для кандидата наук. Основные результаты диссертации опубликованы в двух статьях в рецензируемом журнале высокого уровня Physical Review B (причем обе — в разделе Rapid Communications, предназначенном для ускоренной публикации наиболее важных результатов) и доложены на российских и международных конференциях. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая удовлетворяет требованиям, установленным «Положением о порядке присуждения ученых степеней» № 842 от 24.09.2013 г. и предъявляемым к кандидатским диссертациям. Е.Г. Сергейчева заслуживает присвоения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.10 – Физика низких температур.

Фоминов Яков Викторович,  
доктор физико-математических наук,  
специальность 01.04.02 – теоретическая физика,  
зам. директора  
Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау Российской академии наук.

6 августа 2021 г.

142432, Московская обл., г. Черноголовка, просп. Академика Семёнова, д. 1А  
тел. 8 495 7029317  
e-mail: fominov@itp.ac.ru

Подпись Я.В. Фоминова заверяю.  
Ученый секретарь  
ИТФ им. Л.Д. Ландау РАН  
к.х.н. С.А. Крашаков

