

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. Низкотемпературные свойства спиновых цепочек (основное состояние, низколежащий спектр возбуждений) привлекают интерес как теоретиков так и экспериментаторов в течение всего развития современной квантовой статистической физики. Несмотря на относительную простоту формулировки теоретической задачи о спиновых цепочках, их поведение является не тривиальным. Напомним о том, что Д. Холдейну была присуждена нобелевская премия по физике за 2017 г. в том числе за результат о поведении спиновых цепочек. С точки зрения эксперимента удивительным фактом является наличие реальных материалов, в которых магнитные свойства могут быть с достаточно хорошей точностью описаны идеализированной моделью спиновых цепочек. Одним из наиболее интересных вопросов в данной области является изучение магнитных свойств веществ, в которых из-за сильных квантовых флуктуаций отсутствует магнитное упорядочение при низких температурах — это, так называемые, квантовые магнетики. Среди них наиболее интересными являются квантовые антиферромагнетики, в которых магнитные атомы расположены в виде цепочек. Для таких цепочек в литературе имеется ряд теоретических предсказаний про основное состояние и спектр магнитных возбуждений. Экспериментально магнитные возбуждения в таких системах можно изучать методом магнитного резонанса. Именно этому и посвящена диссертационная работа. Таким образом, **актуальность** работы не вызывает сомнения.

Новизна и достоверность. В диссертационной работе впервые получен ряд принципиально важных новых экспериментальных результатов, имеющих фундаментальное значение для современной физики низких температур.

В третьей главе диссертации представлены исследования спектра магнитного резонанса в квазидвумерном антиферромагнетике Cs_2CuCl_4 в сильных магнитных полях при

низких температурах. В дополнение к стандартному резонансу на ларморовской частоте измерена дополнительная слабая резонансная мода. Наличие этой моды, которая отсутствует в обменном приближении, наиболее естественно объясняется наличием взаимодействия Дзялошинского-Мории между спинами в соседних цепочках. Экспериментально исследована температурная зависимость сдвига резонанса. Эта зависимость согласуется с предсказанием взаимного отталкивания магнонов в рамках ангармонической спин-волновой теории.

В четвертой главе диссертации представлены результаты исследования спектра магнитного резонанса в квазиодномерных антиферромагнетиках $K_2CuSO_4Br_2$ и $K_2CuSO_4Cl_2$. В антиферромагнетике $K_2CuSO_4Br_2$ измерена энергетическая щель в нулевом магнитном поле. В магнитном поле измерены тонкая структура в виде дублета резонансных линий и мягкая мода. Экспериментально установлено исчезновение спионного дублета в поле, составляющем 13% от поля насыщения. Полученные частотно-полевые диаграммы в слабых полях находятся в хорошем согласии с теорией, в которой учитывается модификация спектра возбуждений однородным взаимодействием Дзялошинского-Мории. Для антиферромагнетика $K_2CuSO_4Cl_2$ также обнаружена энергетическая щель в нулевом поле. В то же время, спин-щелевая мода и спионный дублет в $K_2CuSO_4Cl_2$ существенно подавлены по сравнению с $K_2CuSO_4Br_2$. Наиболее вероятно, это связано с конкуренцией межцепочечного обмена и взаимодействия Дзялошинского-Мории. Наблюдаемый экспериментально спектр может быть представлен как смесь щелевого спектра изолированной цепочки спинов $\frac{1}{2}$ с однородным взаимодействием Дзялошинского-Мории и спектром ларморовского типа гейзенберговского антиферромагнетика.

Представленные в главах 3 и 4 экспериментальные результаты получены впервые. Этим определяется научная новизна работы.

Достоверность представленных экспериментальных данных гарантируется правильной методикой эксперимента по измерению магнитного резонанса, детально описанной в главе 2. Также достоверность экспериментальных результатов подтверждается согласием с теоретическими предсказаниями. Поэтому не возникает сомнений в достоверности представленных в диссертации результатов.

Научная и практическая значимость Научная значимость диссертации состоит в ряде новых экспериментальных результатов, полученных впервые. Практическая значимость диссертации заключается в реализации Т.А. Солдатовым экспериментальной установки, содержащей самодельные широкополосные спектрометры, совмещенные с криостатом с

рабочей температурой 0.4 К. Исходя из вышесказанного, можно с уверенностью сказать, что научная и практическая значимость всех результатов диссертации высока и несомненна.

Развитая в диссертации методика и используемые экспериментальные подходы могут быть рекомендованы к использованию в организациях, проводящих исследования в области физики низких температур, в том числе, в области изучения магнитного резонанса (КФУ, БФУ, СПбГУ, МГУ, ИПХФ РАН и др.)

Диссертация Т. А. Солдатована написана понятным языком и содержит достаточное количество иллюстраций. Экспериментальные данные чётко представлены в иллюстрациях. В диссертации четко сформулированы цели исследования, достаточно полно описаны использованные экспериментальные методы, и подробно обсуждены полученные результаты.

Замечания. По диссертации следует высказать несколько вопросов и замечаний, не имеющих принципиального характера:

- 1) В 3-й главе определяются значения главных обменных интегралов J и J' . Из текста диссертации не ясно, как определяется точность, которая указана. Указанная точность достаточно мала: 5% для J' и 4% для J . При этом, теоретический анализ делался на основе гармонической теории. Почему не требуется учитывать ангармонизм, хотя спин равен $\frac{1}{2}$. Какая погрешность определения параметра D' ?
- 2) В четвертой главе анализ взаимодействия Дзялошинского-Мории в веществе $K_2CuSO_4Br_2$ основан на том факте, что в линейном по D порядке взаимодействие Дзялошинского-Мории можно исключить унитарным преобразованием. Не ясно, остается ли этот факт справедливым при конечном значении межцепочечного обмена? Наивно казалось бы, что должен возникнуть параметр $J_{\perp\text{perp}}/D$ по малости которого и можно пренебречь неоднородностью цепочек. Если это так, то тогда для $K_2CuSO_4Br_2$ относительная погрешность определения D будет 30% а не 3% как указано.
- 3) В четвертой главе, имея в виду, что для $K_2CuSO_4Cl_2$ ожидается $J_{\perp\text{perp}} > D$, не ясно какой смысл имеет значение D , извлеченное из формулы для щели, выведенной при $J_{\perp\text{perp}} = 0$.
- 4) Для кристаллов с орторомбической решеткой (с пространственной группой $R\bar{3}m$) симметрия разрешает существование магнито-упругой связи. Что известно про величину этой связи для $K_2CuSO_4Br_2$ и $K_2CuSO_4Cl_2$? Как магнито-упругие эффекты повлияют на магнитный резонанс?

Эти замечания не влияют на общую высокую оценку работы, которая выполнена на достаточно высоком научном уровне.

Научные положения и результаты диссертации достаточно обоснованы. Основные результаты диссертации опубликованы в 4 научных работах в высоко рейтинговых международных рецензируемых журналах (Physical Review Letters, Physical Review B), докладывались на российских и международных конференциях. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа Т. А. Солдатов является законченным исследованием и содержит принципиально новые важные результаты. Диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям. Т. А. Солдатов, безусловно, заслуживает присвоения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности **01.04.09 – физика низких температур**.

доктор физико-математических наук,
исполняющий обязанности заместителя директора
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау
Российской академии наук
Бурмистров Игорь Сергеевич
21 мая 2019 г.

Почтовый адрес: 142432, Московская обл., г. Черноголовка, просп. акад. Семенова, 1а
Тел. +74957029317
e-mail: burmi@itp.ac.ru

Подпись Бурмистрова И.С. подтверждаю:
ученый секретарь
ИТФ им. Л.Д. Ландау РАН
к.х.н. С.А. Крашаков
24 мая 2019 г.

