

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию Красниковой Юлии Владимировны

«Экспериментальное исследование спиновой динамики магнетиков типа спиновая лестница»

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

Актуальность Низкоразмерные квантовые магнетики являются одной из активно изучаемых тем в современной физике конденсированного состояния. Низкая размерность решетки значительно усиливает роль квантовых флуктуаций и замороженного беспорядка в таких системах, что может приводить к экзотическим упорядоченным и неупорядоченным состояниям, а также к нетривиальным фазовым переходам между ними. Возможность получать реальные, доступные к экспериментальному исследованию материалы, позволяет проверять теоретические предсказания для простых моделей, а также изучать влияние разнообразных слабых взаимодействий, всегда присутствующих в реальных системах и делающих физику таких соединений более богатой и интересной.

Антиферромагнетики типа «спиновая лестница» со спином $1/2$ являются одной из модельных одномерных систем и представляют из себя пару спиновых цепочек, связанных межцепочечными взаимодействиями. Свойства такой пары цепочек принципиально отличаются от свойств изолированной спиновой цепочки: в спектре возбуждений спиновой лестницы присутствует щель, отделяющая синглетное основное состояние от триплетных возбуждений. Существование такой щели в модели, учитывающей только изотропное обменное взаимодействие, хорошо установлено в различных теоретических исследованиях, численных моделированиях и экспериментальных работах. Однако остаётся не полностью изученным вопрос о влиянии слабых межлестничных взаимодействий, слабых анизотропных взаимодействий и случайного беспорядка на поведение спиновой лестницы.

Для исследования, представленного в диссертации, было использовано несколько серий образцов: два соединения типа «спиновая лестница» с различным соотношением обменных интегралов вдоль направляющих спиновой лестницы и между составляющими спиновую лестницу цепочками, а также лестница с различной концентрацией случайно распределённых немагнитных примесей, замещающих



магнитные атомы. Спектроскопия электронного магнитного резонанса, позволяющая изучать однородные магнитные возбуждения с высоким энергетическим разрешением, является подходящим инструментом для изучения тонких эффектов, связанных с беспорядком и слабыми взаимодействиями.

Таким образом, выбранная тема исследования является безусловно актуальной, а выбранный экспериментальный метод полностью соответствует поставленным задачам.

Новизна и достоверность В диссертационной работе получен ряд результатов, имеющих фундаментальное значение для физики низкоразмерных магнетиков.

В главе 3 обнаружена тонкая структура спектра элементарных возбуждений в магнетике типа спиновая лестница $(C_7H_{10}N)_2CuBr_4$ (DIMPY) и изучена релаксация спиновых возбуждений в интервале температур от 450 мК до 300 К. Анализ этих результатов позволяет выдвинуть правдоподобную гипотезу об определяющей роли однородного вдоль направляющих спиновой лестницы взаимодействия Дзялошинского-Мория на тонкую структуру спектра возбуждений и поведение спин-спиновой релаксации в этом магнетике. Предложенная простая микроскопическая модель, включающая всего три параметра (обменные интегралы и величину взаимодействия Дзялошинского-Мория), не была полностью решена теоретически, и полученные экспериментальные данные формируют прочный базис для проверки выводов теории.

В главе 4 изучено влияние немагнитных примесей на свойства магнетика типа спиновая лестница DIMPY. Результаты экспериментов указывают на формирование при немагнитном разбавлении новых парамагнитных объектов с полным спином 1/2, которые взаимодействуют друг с другом. Изучение спин-спиновой релаксации в образцах $(C_7H_{10}N)_2(Cu_{1-x}Zn_x)Br_4$ с концентрацией немагнитных примесей цинка до 6% позволило выделить два интервала температур с принципиально разными механизмами релаксации: в «низкотемпературном» режиме при $T < 4K$ магнитный отклик разбавленных образцов определяется в основном сигналом ЭПР от формирующихся вокруг примеси новых парамагнитных центров, а при «высоких» температурах $T > 6K$ сигнал магнитного резонанса связан в основном с возбуждениями в невозмущенной матрице вдали от примесей. Был обнаружен необычный эффект подавления связанного с взаимодействием Дзялошинского-Мория канала спин-спиновой релаксации в «высокотемпературном» режиме и предложена простая качественная модель для его объяснения.

В главе 5 представлены результаты, демонстрирующие появление нового типа сигнала магнитного резонанса в магнетике типа спиновая лестница с доминирующим межлестничным взаимодействием $(C_5H_{12}N)_2CuBr_4$ (ВРСВ) в высоких магнитных полях. Был обнаружен сигнал магнитного резонанса с щелевым спектром и аномальным значением эффективного g-фактора. Область существования этого сигнала оказалась близка к области, в которой свойства магнетика ВРСВ хорошо описываются моделью жидкости Томонаги-Латтинжера. На основании этих данных была предложена модель, развитая Т.Фуруя (РИКЕН, Япония), связывающая наблюдаемый сигнал магнитного резонанса с возбуждениями солитонного типа.

Эти результаты показывают, что слабые анизотропные спин-спиновые взаимодействия (и в том числе взаимодействие Дзялошинского-Мория) могут существенным образом влиять на спектр возбуждений и спиновую релаксацию в магнетиках типа спиновая лестница, что позволяет формулировать новые задачи для дальнейших исследований.

Достоверность полученных результатов обеспечивается тем, что исследования, выполненные на различных образцах, в нескольких ориентациях магнитного поля и на разных экспериментальных установках, хорошо соотносятся друг с другом, с известными теоретическими предсказаниями, а также с исследованиями других авторов, проведенными другими методами.

Научная и практическая значимость Научная значимость работы заключается в том, что впервые получен ряд новых экспериментальных результатов, которые могут использоваться для проверки предсказаний теории в предложенных новых моделях. Практическая значимость работы заключается в развитии методики магнитного резонанса в применении к низкоразмерным магнетикам со щелевым спектром возбуждений. В частности, продемонстрирована возможность измерения скорости спиновой релаксации (ширины линии магнитного резонанса) в интервале температур шириной почти в три декады (от 450 мК до 300К).

Полученные результаты могут быть использованы в организациях, ведущих исследования в области квантового магнетизма, низкоразмерных магнетиков, физики низких температур и спектроскопии магнитного резонанса (МГУ, КазГУ, КФТИ, ФИАН, ИОФАН и др.)

Диссертация Ю.В. Красниковой написана понятным языком с небольшим количеством языковых огрехов и опечаток, имеет чёткую структуру и достаточно полные иллюстрации. Цели исследования, используемые методы и полученные результаты описаны достаточно полно и подробно. Отдельно отмечу очень

основательное обсуждение теоретических основ экспериментальной методики и рассматриваемых явлений. К положительным сторонам работы можно отнести также стремление автора объяснить не самую простую физику обсуждаемых явлений просто и наглядно, на простых моделях в простых приближениях с использованием большого количества иллюстраций.

Замечания По диссертации можно высказать следующие замечания, не имеющие принципиального характера.

1. Из объяснений автора в главах 1 и 5 не совсем понятно, чем отличается магнон от солитона (см., например, рисунок 1.3), и почему в изученных системах наблюдаются именно солитоны.
2. Очень забавно объяснена терминология в главе 1: «поскольку синглетные (триплетные) состояния нечетны (четны) по отношению к перестановке ног лестницы, то это симметричный (несимметричный) канал возбуждений». Представляется более правдоподобным, что названия каналов связаны с симметрией состояний в спиновом пространстве (синглетные – симметричны относительно любых поворотов в спиновом пространстве, триплетные – несимметричны относительно некоторых поворотов).
3. Нигде не отмечено, что формула (1.16) является точной, хотя и получена в диссертации в первом порядке теории возмущений.
4. Несколько более существенным недостатком является отсутствие вывода в главах 1 и 4 эффективного обменного взаимодействия между спинами, возникающими из-за дефектов, которое является аналогом взаимодействия РККИ в металлах. Это легко было бы сделать во втором порядке теории возмущений, и такой вывод оказался бы не сложнее вычислений, проведенных автором по теории возмущений в главе 1. В частности, такое рассмотрение прояснило бы физический смысл корреляционной длины в формулах (4.1), (4.4) и (4.5) и показало, что она напрямую связана с величиной щели (о чем в диссертации не сказано).

Отмечу, что ввиду очень высокого уровня группы спиновой динамики ИФП им. П.Л. Капицы, в которой была выполнена диссертационная работа, само наличие указанных замечаний может свидетельствовать о преимущественно самостоятельной работе диссертантки над текстом. Указанные замечания не влияют на общую оценку работы: работа выполнена на высоком научном уровне и соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

Научные положения диссертации достаточно обоснованы. Результаты, представленные в диссертационной работе, опубликованы в 4 научных работах в ведущих международных физических журналах (Physical Review Letters, Physical Review B, Journal of Physics: Conference Series) и докладывались на российских и международных конференциях. Автореферат содержит основные результаты диссертации и правильно отражает содержание диссертации.

Таким образом, диссертационная работа Ю.В. Красниковой является законченным, самостоятельно выполненным научным исследованием и содержит принципиально важные новые результаты. Диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям «Положения о присуждении учёных степеней», предъявляемых ВАК к кандидатским диссертациям. Ю.В. Красникова, безусловно, заслуживает присвоения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.09 — физика низких температур.

доктор физико-математических наук
ведущий научный сотрудник, Петербургский институт
ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального
исследовательского центра «Курчатовский институт»

Сыромятников Арсений Владиславович

24 декабря 2020 г.

Почтовый адрес: 188300 Ленинградская область, г. Гатчина, Орлова роща 1, ПИЯФ
e-mail: asyromyatnikov@yandex.ru

Подпись Сыромятникова А.В. удостоверяю

24 декабря 2020 г.

**ЗАМ. НАЧАЛЬНИКА
ОТДЕЛА КАДРОВ
УСТИРОВА С.Ю.**

