

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт физических проблем им. П. Л. Капицы  
Российской академии наук

На правах рукописи  
УДК 538.941



Красникова Юлия Владимировна

**Экспериментальное исследование спиновой  
динамики магнетиков типа “спиновая  
лестница”**

Специальность 01.04.09 —  
физика низких температур

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Москва — 2020

Работа выполнена в Институте физических проблем им. П.Л. Капицы РАН.

Научный руководитель: к. ф.-м. н., старший научный сотрудник  
**Глазков Василий Николаевич**

Официальные оппоненты: **Мухин Александр Алексеевич**,  
к. ф.-м. н., ведущий научный сотрудник,  
Институт общей физики  
им. А. М. Прохорова РАН  
**Сыромятников Арсений Владиславович**,  
д. ф.-м. н., ведущий научный сотрудник,  
Федеральное государственное бюджетное  
учреждение «Петербургский институт  
ядерной физики им. Б.П. Константинова  
Национального исследовательского центра  
«Курчатовский институт»»

Ведущая организация: Казанский физико-технический институт им.  
Е. К. Завойского Казанского научного центра  
РАН

Защита состоится 15 февраля 2021 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 002.103.01 при Институте физических проблем им. П. Л. Капицы РАН по адресу: 119334, г. Москва, ул. Косыгина 2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института физических проблем им. П.Л. Капицы РАН и на сайте института: [www.kapitza.ras.ru](http://www.kapitza.ras.ru).

Автореферат разослан “\_\_” \_\_\_\_\_ 2020 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
к. ф.-м. н.



А. Н. Юдин

## Общая характеристика работы

**Актуальность работы.** Многочастичные квантовые системы давно вызывают интерес у специалистов в области физики конденсированного состояния вещества. Однако, решение задачи поиска основного состояния и спектра возбуждений для многочастичной системы является сложнейшей теоретической задачей. Эта задача может быть упрощена, если понизить пространственную размерность: вместо трёхмерных систем рассматривать двумерные или одномерные<sup>1</sup>. Одномерные задачи долго оставались лишь теоретическими моделями (например, широко изучалась модель спиновой цепочки). В 1925 году Изингом была решена одномерная анизотропная модель, которая на сегодняшний день в литературе известна под его именем [1], а в 1931 году Бете сформулировал способ построения волновой функции основного состояния и возбуждений для изотропной гейзенберговской спиновой цепочки [2]. В 1966 году Мермин и Вагнер доказали в своей работе отсутствие дальнего порядка в одномерных и двумерных гейзенберговских спиновых системах при конечной температуре [3]. К тому моменту было уже известно, что основное состояние гейзенберговской антиферромагнитной спиновой цепочки неупорядоченно (традиционного магнитного порядка нет), среднее значение проекции спина на узле равно нулю  $\langle S_j^\alpha \rangle = 0$ , а спин-спиновая корреляционная функция  $\langle S_j^\alpha S_{j+k}^\alpha \rangle \propto (-1)^k/k$  затухает степенным образом [2, 4, 5].

С начала 60-х годов XX века стали появляться экспериментальные работы (см., например, обзор [6]), посвященные изучению термодинамических и магнитных свойств обнаруженных в то время квазиодномерных магнетиков. И только в 1972 году, благодаря методу неупругого рассеяния нейтронов, был экспериментально впервые измерен спектр спиновых возбуждений квазиодномерной системы для спиновой цепочки ионов  $Mn^{2+}$  в  $(CD_3)_4NMnCl_3$  (ТММС) [7].

Помимо простых спиновых цепочек со временем стали изучать и одномерные системы с более сложной геометрией обменных связей, в том числе и системы, называемые “спиновыми лестницами”. Спиновыми лестницами называют системы из нескольких ( $n$ ) параллельных цепочек, в которых соседние цепочки связаны друг с другом. Мы остановимся на свойствах спиновой лестницы, состоящих из двух ( $n = 2$ ) цепочек. Изначально, интерес к спиновым лестницам возник в связи с исследованиями высокотемпературных сверхпроводников: в медьсодержащих ВТСП ионы меди формировали плоскости и лестничные структуры и обсуждалась возможная связь таких структур с формированием сверхпроводящего состояния [8, 9, 10, 11]. В дальнейшем оказалось, что эти структуры представляют отдельный интерес как пример квантовых магнетиков [12].

---

<sup>1</sup>В то же время, описание трехмерных задач иногда оказывается в чем-то проще, так как допускается применение квазиклассического решения.

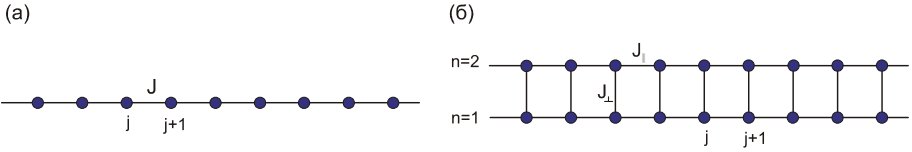


Рис. 1 — Модельные одномерные спиновые системы. (а) Модель однородной спиновой цепочки,  $J$  — обменный интеграл. (б) Модель спиновой лестницы,  $J_{\perp}$ ,  $J_{\parallel}$  — обменные интегралы на перекладинах и направляющих спиновой лестницы соответственно.

У спиновой лестницы с двумя направляющими основное состояние синглетное и отсутствует дальний магнитный порядок. Энергетический спектр спиновой лестницы с четным количеством цепочек щелевой, в нем присутствуют “массивные” триплетные возбуждения, эти свойства качественно отличают спиновую лестницу от спиновой цепочки [9, 13]. Щель можно подавить магнитным полем, получающееся бесщелевое состояние одномерной системы описывается в рамках универсальной парадигмы жидкости Томонаги-Латтинжера (TLL модель), применимой для одномерных электронных и спиновых систем [14, 15]. При этом параметры модели Томонаги-Латтинжера оказываются зависящими от соотношения обменных интегралов, что позволяет находить среди спиновых лестниц с различным соотношением обменных интегралов реализации модели Томонаги-Латтинжера с притяжением и отталкиванием квазичастиц [16].

Несмотря на то, что прямой связи между свойствами спиновых лестниц и сверхпроводимостью не обнаружилось, есть еще одна задача, вызывающая интерес: в чем-то аналогично сверхпроводникам, оказалось, что введение примесей существенно влияет на магнитные свойства спиновой лестницы. В случае альтернированных и халдейновских спиновых цепочек и спиновых лестниц внесение примесей может привести как к индуцированному дальнему антиферромагнитному порядку, так и к формированию новых спиновых объектов вокруг примеси [11, 17].

Еще один важный, изученный в данной работе, вопрос связан с отсутствием в природе идеальных гейзенберговских магнетиков. В реальных магнетиках всегда присутствует анизотропия спин-спиновых взаимодействий, связанная с дискретностью кристаллической решетки, анизотропия может существенно менять спектр возбуждений в спиновой системе [18, 19, 20, 21].

Физика одномерных систем является сравнительно молодой областью физики конденсированного состояния и по-прежнему вызывает как экспериментальный, так и теоретический интерес. Благодаря разнообразию физических эффектов и своим особенностям спиновые лестницы стали

отдельным классом одномерных спин-щелевых магнетиков, изучению физических свойств характерных представителей этого класса магнетиков и посвящена данная работа.

**Цель работы. Объекты и методы исследования.** Цель данной работы заключается в экспериментальном изучении спектра возбуждений и спиновой релаксации в магнетиках типа спиновая лестница с различным соотношением параметров обменного взаимодействия, а также в изучении влияния на спиновую динамику и спиновую релаксацию в этих системах анизотропных взаимодействий и контролируемого введения примесей.

Мы детально изучили два магнетика типа “спиновая лестница”. Изученные соединения являются недавно синтезированными металлоорганическими соединениями, в которых реализуется лестничная геометрия обменных связей:  $(C_7H_{10}N)_2CuBr_4$  (сокращенно DIMPY<sup>2</sup>) и  $(C_5H_{12}N)_2CuBr_4$  (сокращенно ВРСВ<sup>3</sup>). Это примеры спиновых лестниц с различными доминирующими обменными интегралами: у DIMPY доминирует взаимодействие вдоль направляющих (внутри цепочек,  $J_{\parallel} \gg J_{\perp}$ ), у ВРСВ, наоборот, доминирует взаимодействие на перекладинах (между цепочками,  $J_{\parallel} \ll J_{\perp}$ ) [24, 25]. Часть исследований относится к DIMPY с немагнитными примесями цинка  $(C_7H_{10}N)_2Cu_{(1-x)}Zn_xBr_4$ .

Методом изучения является спектроскопия электронного парамагнитного резонанса, эксперименты проводились в широком диапазоне частот (от 9 ГГц до 140 ГГц), температур (от 0.45 К до 300 К) и магнитных полей (до 12 Тл). ЭПР-спектроскопия обладает высоким энергетическим разрешением, что хорошо позволяет изучать влияние анизотропных спин-спиновых взаимодействий на спиновые возбуждения. Доступный уникальный диапазон частот и полей позволяет подробно изучать спиновую динамику низкоэнергетичных спиновых возбуждений, для которых становятся существенны различные тонкие эффекты.

#### **Научная новизна и выносимые на защиту положения.**

В данной работе получены следующие новые результаты:

- обнаружена тонкая структура низкотемпературного ЭПР-спектра коллективных триплетных возбуждений в спиновой лестнице с доминирующим взаимодействием вдоль направляющих  $(C_7H_{10}N)_2CuBr_4$
- показано по результатам анализа обнаруженной тонкой структуры спектра и высокотемпературной ширины линии ЭПР, что основной вклад в оба эти эффекта даёт однородное вдоль направляющих спиновой лестницы взаимодействие Дзялошинского-Мории

---

<sup>2</sup>Установившееся в англоязычной литературе сокращение от химического наименования bis(2-3dimethylpyridinium)tetrabromocuprate(II).

<sup>3</sup>Установившееся в англоязычной литературе сокращение от химического наименования bis(piperidinium)tetrabromocuprate(II).

- обнаружен сигнал резонансного поглощения от парамагнитных кластеров, формирующихся в магнетике  $(C_7H_{10}N)_2CuBr_4$  при частичном замещении меди цинком
- обнаружен эффект подавления канала спиновой релаксации, связанного с взаимодействием Дзялошинского-Мории, при немагнитном разбавлении магнетика  $(C_7H_{10}N)_2CuBr_4$
- обнаружена щелевая ветвь возбуждений в высокополевой фазе спиновой лестницы с доминирующим взаимодействием на перекладинах  $(C_5H_{12}N)_2CuBr_4$
- показано, что обнаруженная мода в магнетике  $(C_5H_{12}N)_2CuBr_4$  соответствует солитонным возбуждениям в модели жидкости Томонаги-Латтинжера.

Эти результаты выносятся на защиту. Все перечисленные выше результаты получены в экспериментах, проведенных автором или при существенном личном участии автора. Автор внес основной вклад в обработку и анализ полученных результатов.

**Значимость.** Изучено влияние анизотропных спин-спиновых взаимодействий (в первую очередь – взаимодействия Дзялошинского-Мории) на спиновую релаксацию и спектр энергетических возбуждений в магнетиках типа “спиновая лестница”. Обнаружен новый вид возбуждений в высоких магнитных полях. Обнаружено нестандартное поведение спиновой релаксации при введении немагнитных примесей в спиновую систему.

Результаты работы показывают важность анизотропных спин-спиновых взаимодействий для точного понимания свойств спиновых систем и демонстрируют применимость модели жидкости Томонаги-Латтинжера к спиновым лестницам. Полученные данные расширяют представление о магнитных низкоразмерных системах и границах применимости одномерных моделей.

**Апробация работы.** Результаты, изложенные в диссертации, были представлены на следующих конференциях, семинарах, симпозиумах:

- 57-ая научная конференция МФТИ (Москва, ноябрь 2014)
- XVIII Международная молодежная научная школа “Актуальные проблемы магнитного резонанса и его применение” (Казань, октябрь 2015)
- 51-ая школа ПИЯФ по физике конденсированного состояния (Санкт-Петербург, март, 2017)
- Московский международный симпозиум по магнетизму MISM 2017 (Москва, июль 2017)
- 28-ая Международная конференция по физике низких температур LT 28 (Гётеборг, Швеция, август 2017)
- 60-ая научная конференция МФТИ (Москва, ноябрь 2017)
- Международный симпозиум по спиновым волнам Spin Waves 2018 (Санкт-Петербург, июнь 2018)

- 10-ая объединённая европейская конференция по магнетизму JEMS 2019 (Упсала, Швеция, август 2019)
- Европейская школа по магнетизму ESM 2019 (Брно, Чехия, 2019)
- Московский межинститутский семинар по магнетизму, ИФП им. П. Л. Капицы РАН

Изложенные в диссертационной работе результаты опубликованы в следующих рецензируемых научных журналах:

- V.N. Glazkov, M. Fayzullin, Yu.V. Krasnikova, G. Skoblin, D. Schmidiger, S. Muhlbauer, A. Zheludev, *ESR study of the spin ladder with uniform Dzyaloshinskii-Moria interaction*, Phys. Rev. B. **92**, 184403 (2015)
- Yu.V. Krasnikova, V.N. Glazkov, M.A. Fayzullin, D. Schmidiger, K.Yu. Povarov, S. Galeski and A. Zheludev, *Low temperature ESR in spin ladder  $(C_7H_{10}N)_2Cu_{(1-x)}Zn_xBr_4$* , J. Phys. CS **969**, 012113 (2018)
- Yu.V. Krasnikova, V.N. Glazkov, A. Ponomaryov, S.A. Zvyagin, K.Y. Povarov, S. Galeski, A. Zheludev, *Electron spin resonance study of spin relaxation in the strong-leg spin ladder with nonmagnetic dilution*, Phys. Rev. B. **100**, 144446 (2019)
- Yu. V. Krasnikova, S. C. Furuya, V. N. Glazkov, K. Yu. Povarov, D. Blosser, and A. Zheludev, *Anisotropy-induced soliton excitation in magnetized strong-rung spin ladders*, Phys. Rev. Lett. **125**, 027204 (2020)

**Структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и одного приложения. Полный объём диссертации составляет 118 страниц, включая 62 рисунка и 5 таблиц. Список литературы содержит 105 источников.

## Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, формулируется цель, ставятся задачи работы, излагается научная новизна, значимость данной работы и представляется апробация работы.

**Первая глава** посвящена обзору ключевых понятий. В ней представлены основные теоретические модели и задачи. С опорой на эти модели построено обсуждение результатов экспериментов в последующих главах. В первой главе также описаны характерные особенности магнетиков типа спиновая лестница с учетом анизотропных спин-спиновых взаимодействий и внесения примесей.

Спиновая лестница (рис. 1) является одной из модельных систем в низкоразмерной физике. В такой магнетике основным состоянием является синглетное состояние с  $S = 0$ . Возбуждениями являются триплеты с  $S = 1$ . В энергетическом спектре присутствует щель, величина которой связана с

величинами обменных интегралов в системе. Спин-щелевая природа такого магнетика приводит к вымерзанию восприимчивости и намагниченности при низкой температуре. При приложении магнитного поля триплетные подуровни расщепляются и энергия одного из подуровней уменьшается. В некотором поле энергия этого возбужденного подуровня сравнивается с энергией основного состояния и щель в спектре пропадает. В поле выше поля закрытия спиновой щели на плоскости параметров  $(H, T)$  существует область, в которой свойства спиновой лестницы можно описать в модели жидкости Томонаги-Латтинжера. Наличие анизотропных спин-спиновых взаимодействий может привести к расщеплению в нулевом поле (снятию вырождения триплетных подуровней). Эта и другие задачи обсуждаются на примере системы слабосвязанных димеров.

Во **второй главе** приведено описание экспериментального метода и дано описание используемой в эксперименте схемы установки. Приведены элементы теории ЭПР, необходимые для интерпретации полученных в работе результатов.

**Третья глава** посвящена исследованию магнетика  $(\text{C}_7\text{H}_{10}\text{N})_2\text{CuBr}_4$  с доминирующим взаимодействием вдоль направляющих спиновой лестницы. Сначала описывается кристаллическая структура и приводится обзор работ других авторов по этому магнетику. Затем приводятся полученные нами экспериментальные данные и их обсуждение.

Пример измеренных спектров резонансного поглощения показан на рис. 2. В структуре DIMPY (группа симметрии  $C_{2h}^2$ ) присутствует два типа спиновых лестниц, совмещаемых при помощи винтовой оси второго порядка. Представленные здесь измерения выполнены в двух ориентациях образца: для поля  $H \parallel b$ , когда спиновые лестницы двух типов магнитно эквивалентны, и для поля, приложенного в плоскости  $(ab)$  под углом  $45^\circ$  к оси  $b$ . Для обозначения направлений на рисунках используется ортонормированный базис с  $X \parallel a$  и  $Y \parallel b$ .

Две компоненты сигнала ЭПР-поглощения на рис. 2 отвечают сигналам от лестниц двух типов. При охлаждении ниже 3 К интенсивность сигнала ЭПР-поглощения уменьшается в соответствии с уменьшением количества термоактивированных триплетных возбуждений.

Дополнительно к этому при температуре ниже 1 К нами обнаружено возникновение тонкой структуры спектров ЭПР. Ее появление связано со снятием вырождения триплетных подуровней в нулевом поле. Это снятие вырождения в  $(\text{C}_7\text{H}_{10}\text{N})_2\text{CuBr}_4$  возникает из-за присутствия разрешенного симметрией взаимодействия Дзялошинского-Мории однородного вдоль направляющих спиновой лестницы. Наблюдаемая величина расщепления тонкой структуры 150 Э дает оценку величины вектора Дзялошинского:  $D \approx 0.3$  К.

Анализ угловых зависимостей полуширины линии ЭПР-поглощения, измеренной при температуре кипения жидкого азота, показал, что



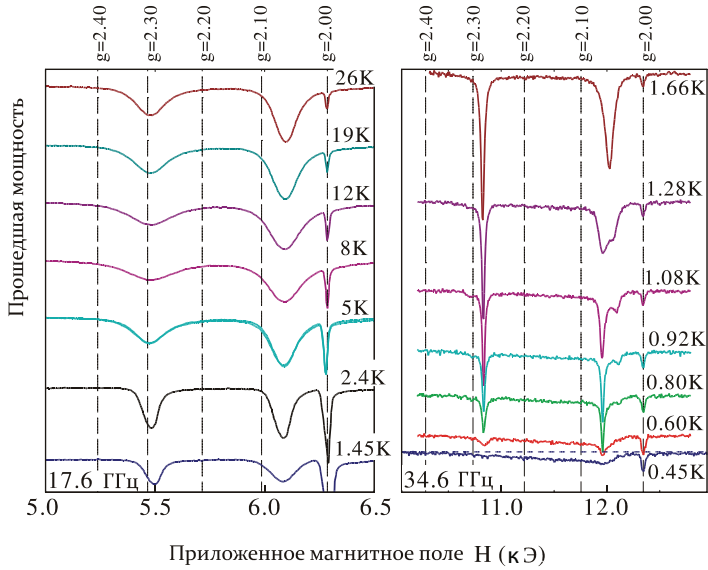


Рис. 2 — Температурная зависимость ЭПР-поглощения в DIMPU в диапазоне температур 450 мК – 26 К в ориентации образца относительно магнитного поля  $H \parallel (X + Y)$ . Левая панель для частоты измерений  $f = 17.6$  ГГц, правая –  $f = 34.6$  ГГц. Вертикальными пунктирными линиями отмечены положения полей резонансного поглощения, соответствующие указанным значениям  $g$ -фактора. Узкая линия поглощения с  $g = 2.00$  – метка ДФПГ.

взаимодействие Дзялошинского-Мория является одним из основных участвующих в процессе спиновой релаксации взаимодействием. Этот анализ дает информацию о величине компонент вектора Дзялошинского, его направлении и о величине дополнительного вклада симметричного анизотропного взаимодействия. Более точный результат совпадает с оценкой, сделанной по величине расщепления.

Была измерена температурная зависимость полуширины линии ЭПР-поглощения в широком диапазоне температур от 450 мК до 300 К (рис. 3). Эти данные демонстрируют присутствие нескольких качественно различных режимов спиновой релаксации:

- при температурах  $T > 100$  К при нагреве наблюдается быстрый рост ширины линии, связанный с активацией спин-фонновых механизмов релаксации;
- в интервале температур от 15 К до 80 К температурная зависимость ширины линии описывается эмпирическим законом

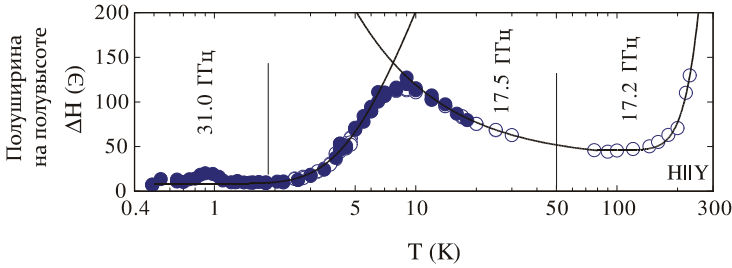


Рис. 3 — Температурная зависимость полуширины линии ЭПР в DIMPY при  $H||Y$ . Символы — экспериментальные данные. Закрашенные и пустые символы соответствуют данным, полученным на различных образцах.

Сплошные кривые — описанные в тексте эмпирические модели.

Вертикальные линии разделяют экспериментальные данные, полученные в экспериментах на различных частотах СВЧ-излучения.

$\Delta H(T) = \Delta H_{\infty}(1 + \theta/T)$ , где значение  $\theta$  близко к величине обменных интегралов в спиновой лестнице, что качественно соответствует ожидаемому результату высокотемпературного разложения, учитывающего установление спин-спиновых корреляций при охлаждении;

- при низких температурах  $T < 7$  К температурная зависимость ширины линии описывается эмпирическим термоактивационным законом  $\Delta H \propto \exp(-E_a/T)$ , этот закон указывает на важность триплет-триплетных взаимодействий для спиновой релаксации в низкотемпературном режиме, энергия активации оказывается в два-три раза больше величины щели.

**Четвертая глава** посвящена исследованию диамагнитно-разбавленного магнетика  $(C_7H_{10}N)_2Cu_{(1-x)}Zn_xBr_4$ . Замещение ионов меди цинком для  $x=0.01\dots 0.06$  не изменяет кристаллическую структуру, но ”выбивает“ спины из некоторых узлов лестничной структуры. Это приводит к формированию антиферромагнитно-скоррелированных кластеров в окрестности примеси, каждый из которых имеет полный спин  $S = 1/2$ . Такие кластеры могут взаимодействовать друг с другом за счет поляризации разделяющего их фрагмента спиновой лестницы, это взаимодействие наблюдалось в работе [26] и в наших ЭПР экспериментах.

Примеры низкотемпературных спектров ЭПР-поглощения показаны на рис. 4. В отличие от результатов для чистого DIMPY (рис. 2) наблюдалось невымерзающее ЭПР-поглощение вплоть до 450 мК (рис. 4), что подтверждает формирование парамагнитных центров при диамагнитном разбавлении спиновой лестницы. Из данных по интенсивности ЭПР-поглощения, с учетом нормировки на известные данные восприимчивости [26], была получена эффективная концентрация этих парамагнитных центров,

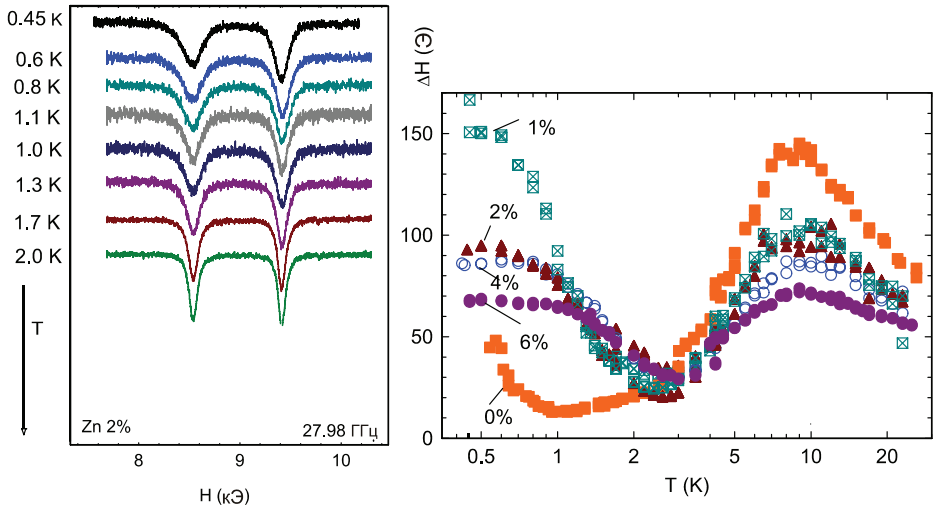


Рис. 4 — Левая панель: температурная зависимость ЭПР-поглощения в образце  $(\text{C}_7\text{H}_{10}\text{N})_2\text{Cu}_{(1-x)}\text{Zn}_x\text{Vg}_4$  с  $x = 0.02$  в диапазоне температур от 0.45 К до 2 К на частоте  $f = 27.98$  ГГц для  $H \parallel (X+Y)$ . Правая панель: температурная зависимость полуширины линии ЭПР-сигнала поглощения для всех изучаемых концентраций Zn (0%, 1%, 2%, 4%, 6%) в DIMPY. Данные при температурах  $T = 0.45 \text{ К} \dots 4.2 \text{ К}$  получены на частоте  $f = 29.7$  ГГц, данные на температурах  $4.2 \text{ К} \dots 25 \text{ К}$  получены на частоте  $f = 17.4$  ГГц. Различные символы соответствуют различным концентрациям цинка. Данные относятся к левой компоненте поглощения для  $H \parallel (X+Y)$ .

она оказалась меньше номинальной концентрации цинка. Наблюдаемое понижение эффективной концентрации можно связать с взаимодействием кластеров: в зависимости от четности расстояния между позициями примеси, вокруг которых образуются кластеры, эффективное взаимодействие между полными спинами кластеров оказывается ферромагнитным или антиферромагнитным, пары близко расположенных кластеров, связанные достаточно сильным антиферромагнитным взаимодействием не дают вклада в полную намагниченность образца.

Было обнаружено, что ширина линии ЭПР уменьшается с ростом концентрации диамагнитной примеси (рис. 4). Для анализа механизмов спиновой релаксации были измерены угловые зависимости полуширины линии ЭПР-поглощения для всех доступных концентраций цинка (в том числе для чистого DIMPY) для нескольких температур из интервала от 2 К до 150 К. Оказалось, что они масштабируются друг на друга в интервале температур от 10 К до 77 К для всех концентраций. Это означает, что в данном интервале температур присутствует один и тот же доминирующий

механизм спиновой релаксации, которым, как было показано для чистого DIMPY, является взаимодействие Дзялошинского-Мории.

Наблюдаемое уменьшение ширины линии в диамагнитно-разбавленных образцах указывает на подавление связанного с взаимодействием Дзялошинского-Мории канала спиновой релаксации при введении примеси. Этот эффект можно описать в простейшей модели с полным подавлением взаимодействия Дзялошинского-Мории в ближайшей окрестности примеси. Результаты анализа экспериментальных данных, показали, что такое подавление происходит на масштабе около трех межатомных расстояний.

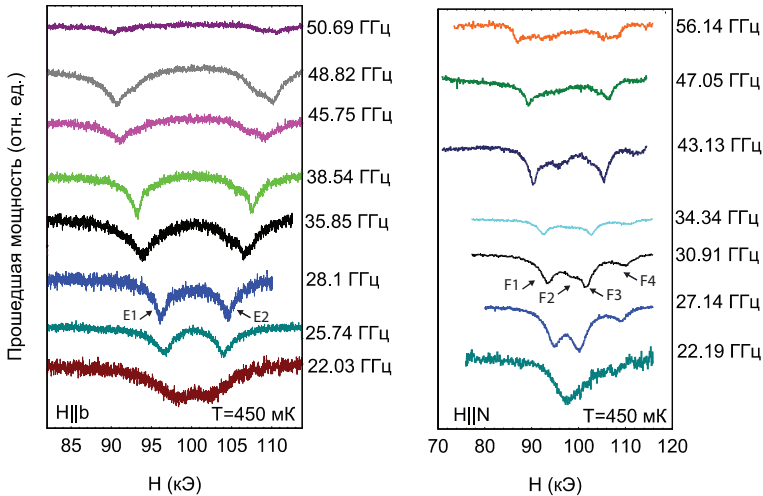


Рис. 5 — Резонансное поглощение в ВРСВ на различных частотах при температуре 450 мК в поле выше первого критического. Левая панель: образец в ориентации  $H \parallel b$ . Правая панель: образец в ориентации  $H \parallel N$ .

E1, E2, F1, F2, F3, F4 маркируют различные компоненты ЭПР-поглощения.

**Пятая глава** посвящена исследованию спиновой лестницы  $(C_5H_{12}N)_2CuBr_4$  с доминирующим взаимодействием вдоль перекладин. Сначала описывается кристаллическая структура и приводится обзор работ других авторов по этому магнетику. Затем приводятся полученные нами экспериментальные данные и их обсуждение.

В структуре ВРСВ (группа симметрии  $C_{2h}^5$ ) присутствует два типа спиновых лестниц. Для проведения экспериментов использовалось две ориентации магнитного поля:  $H \parallel b$  и поле, направленное в плоскости  $(bc)$  под углом  $45^\circ$  к оси  $b$ . Вторая ориентация на рисунках обозначена  $H \parallel N$ .

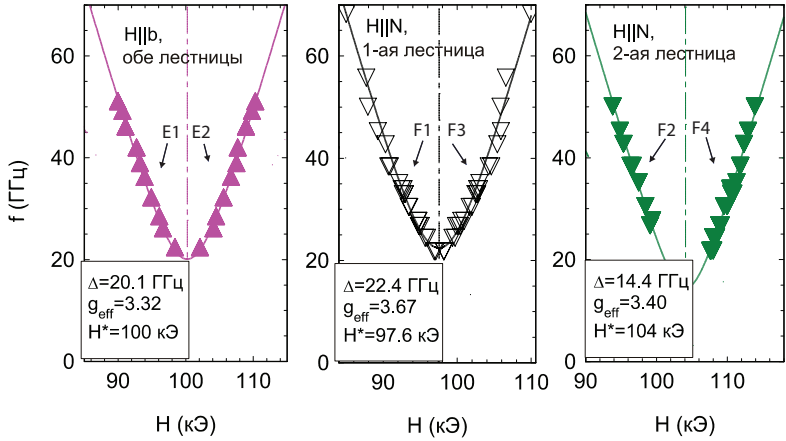


Рис. 6 — Частотно-полевые зависимости поля резонансного поглощения в ВРСВ для двух ориентаций  $H \parallel N$  и  $H \parallel b$  при  $T = 450$  мК. В рамках указаны подгоночные параметры. Точки — экспериментальные данные, сплошные кривые — результат подгонки. E1, E2, F1, F2, F3, F4 маркируют различные компоненты поглощения. Величина погрешности экспериментальных данных меньше размера символа.

Обнаружен новый сигнал магнитного резонанса в поле, большем по величине закрытия спиновой щели, наблюдаемый при низких температурах от 450 мК до 2 К (рис. 5). Частотно-полевые зависимости этого сигнала (рис. 6) демонстрируют щелевой характер для всех изучаемых ориентаций образца в магнитном поле и описываются уравнением:

$$2\pi\hbar f = \sqrt{\Delta^2 + (g_{\text{eff}}\mu_B(H - H^*))^2},$$

при этом величины щелей  $\Delta$  и эффективных  $g$ -факторов зависят от ориентации (см. рис. 6). Этот сигнал исчезает при нагреве и наблюдается в области полей и температур, в которой свойства ВРСВ описываются моделью жидкости Томонаги-Латтинжера [28].

Для описания этих результатов оказывается принципиальным, что в ВРСВ доминирует взаимодействие вдоль переключин спиновой лестницы, поэтому становится возможно отображение спиновой лестницы в интервале полей от первого критического  $H_{c1}$  до второго критического  $H_{c2}$  на ХХZ цепочку [27]. Учет связанной с взаимодействием Дзялошинского-Мории анизотропии показывает, что в этой эквивалентной ХХZ цепочке возникают ЭПР-активные возбуждения солитонного типа. При этом в рамках модели жидкости Томонаги-Латтинжера удастся описать наблюдаемые аномальные значения эффективного  $g$ -фактора без дополнительных

подгоночных параметров. Строгий вывод этого теоретического результата получен Ш. Фуруя, представлен в Supplemental Material к публикации PRL **125**, 027204 и не является выносимым к защите результатом.

В **заключении** приведены основные результаты работы, которые перечислены ниже.

Полученные результаты для  $(\text{C}_7\text{H}_{10}\text{N})_2\text{CuBr}_4$  :

- обнаружена тонкая структура низкотемпературного ЭПР спектра коллективных триплетных возбуждений в спиновой лестнице с доминирующим взаимодействием вдоль направляющих  $(\text{C}_7\text{H}_{10}\text{N})_2\text{CuBr}_4$
- показано по результатам анализа обнаруженной тонкой структуры спектра и высокотемпературной ширины линии ЭПР, что основной вклад в оба эти эффекта даёт однородное вдоль направляющих спиновой лестницы взаимодействие Дзялошинского-Мории
- определен  $g$ -тензор и его главные оси для обеих типов спиновых лестниц в  $(\text{C}_7\text{H}_{10}\text{N})_2\text{CuBr}_4$
- обнаружено и качественно объяснено присутствие нескольких режимов релаксации в спиновой системе

Полученные результаты для  $(\text{C}_7\text{H}_{10}\text{N})_2\text{Cu}_{(1-x)}\text{Zn}_x\text{Br}_4$  :

- изучена спиновая динамика и спиновая релаксация в серии образцов диамагнитно-разбавленного магнетика типа спиновая лестница  $(\text{C}_7\text{H}_{10}\text{N})_2\text{Cu}_{(1-x)}\text{Zn}_x\text{Br}_4$
- обнаружено формирование при немагнитном замещении ионов меди ионами цинка парамагнитных центров со спином  $1/2$ , определяющих низкотемпературные магнитные свойства изучаемого магнетика
- показано, что эти парамагнитные центры взаимодействуют друг с другом, эффективное взаимодействие парамагнитных центров может быть качественно описано в модели взаимодействующих спиновых кластеров
- обнаружен эффект подавления связанного с взаимодействием Дзялошинского-Мории канала спиновой релаксации в диамагнитно-разбавленных образцах в области температур от 10 до 77 К, наблюдаемый эффект может быть интерпретирован как подавление взаимодействия Дзялошинского-Мории в ближайшей окрестности примесного иона (на несколько межатомных расстояний)

Полученные результаты для  $(\text{C}_5\text{H}_{12}\text{N})_2\text{CuBr}_4$ :

- обнаружен новый сигнал резонансного поглощения в магнетике типа спиновая лестница в поле выше первого критического. Наблюдаемый сигнал демонстрирует целевую частотно-полевую зависимость с асимптотическими значениями  $g$ -фактора, аномально перенормированными по сравнению с  $g$ -фактором ионов меди

– в рамках модели жидкости Томонаги-Латтинжера описаны возбуждения в поле выше первого критического: они являются возбуждениями солитонного типа, их появление обусловлено присутствием анизотропного спин-спинового взаимодействия Дзялошинского-Мории

## Литература

- [1] E. ISING, *Zeitschrift für Physik* **31** (1925), 6
- [2] H. BETHE, *Zeitschrift für Physik* **71** (1931), 205
- [3] N. D. MERMIN, H. WAGNER, *Phys. Rev. Lett.* **17** (1966), 1133
- [4] L. HULTHEN, Über das Austauschproblem eines Kristalles, *Arkiv för matematik, astronomi och fysik* (1938)
- [5] Д. МАТТИС, *Теория магнетизма*, М.: Мир (1967)
- [6] L. J. DE JONGH, A. R. MIEDEMA, *Advances in Physics* **23** (1974), 1
- [7] M. T. HUTCHINGS, G. SHIRANE, R. J. BIRGENEAU, S. L. HOLT, *Phys. Rev. B* **5** (1972), 1999
- [8] S. SACHDEV, *Science* **288** (2000), 475
- [9] E. DAGOTTO, *Rep. Prog. Phys.* **62** (1999), 1525
- [10] E. DAGOTTO, T. M. RICE, *Science* **271** (1996), 618
- [11] S. MIYASHITA, S. YAMAMOTO, *Phys. Rev. B* **48** (1993), 913
- [12] H-J MIKESKA, A. K. KOLEZHUK, *Lecture Notes in Physics* (2004), 1–83
- [13] D. SCHMIDIGER, P. BOUILLOT, T. GUIDI, R. BEWLEY, C. KOLLATH, T. GIAMARCHI, A. ZHELUDEV, *Phys. Rev. Lett.* **111** (2013), 107202
- [14] T. GIAMARCHI, *Quantum physics in one dimension*, Clarendon, Oxford (2003)
- [15] T. GIAMARCHI, *Int. J. of Mod. Phys. B* **26** (2012), 1244004
- [16] K. YU. POVAROV, D. SCHMIDIGER, N. REYNOLDS, R. BEWLEY, A. ZHELUDEV, *Phys. Rev. B* **91** (2015), 020406
- [17] A. LAVARELO, G. ROUX, N. LAFLORENCIE, *Phys. Rev. B* **88** (2013), 134420

- [18] D. C. DENDER, P. R. HAMMAR, DANIEL H. REICH, C. BROHOLM, G. AEPPLI, Phys. Rev. Lett. **79** (1997), 1750
- [19] I. AFFLECK, Phys. Rev. B **46** (1992), 9002
- [20] K. YU. POVAROV, A. I. SMIRNOV, O. A. STARYKH, S. V. PETROV, A. YA. SHAPIRO, Phys. Rev. Lett. **107** (2011), 037204
- [21] E. ČIŽMAR, M. OZEROV, J. WOSNITZA, B. THIELEMANN, K. W. KRÄMER, CH. RÜEGG, O. PIOVESANA, M. KLANJŠEK, M. HORVATIC, C. BERTHIER, S. A. ZVYAGIN, Phys. Rev. B **82** (2010), 054431
- [22] F. MEIER, J. LEVY, D. LOSS, Phys. Rev. B **68** (2003), 134417
- [23] L. BALDRATI, O. GOMONAY, A. ROSS, M. FILIANINA, R. LEBRUN, R. RAMOS, C. LEVEILLE, F. FUHRMANN, T. R. FORREST, F. MACCHEROZZI, S. VALENCIA, F. KRONAST, E. SAITOH, J. SINOVA, M. KLAUI, Phys. Rev. Lett. **123** (2019), 177201
- [24] A. SHAPIRO, C. P. LANDEE, M. M. TURNBULL, J. JORNET, M. DEUMAL, J. J. NOVOA, M. A. ROBB, W. LEWIS, Journal of the American Chemical Society **129** (2007), 952
- [25] B. R. PATYAL, B. L. SCOTT, R. D. WILLETT, Phys. Rev. B **41** (1990), 1657
- [26] D. SCHMIDIGER, K. YU. POVAROV, S. GALESKI, N. REYNOLDS, R. BEWLEY, T. GUIDI, J. OLLIVIER, A. ZHELUDEV, Phys. Rev. Lett. **116** (2016), 257203
- [27] T. GIAMARCHI, A. M. TSVELIK, Phys. Rev. B **59** (1999), 11398
- [28] CH. RÜEGG, K. KIEFER, B. THIELEMANN, D. F. MCMORROW, V. ZAPF, B. NORMAND, M. B. ZVONAREV, P. BOUILLOT, C. KOLLATH, T. GIAMARCHI, S. CAPPONI, D. POILBLANC, D. BINER, K. W. KRÄMER, Phys. Rev. Lett. **101** (2008), 247202



*Красникова Юлия Владимировна*

Экспериментальное исследование спиновой динамики магнетиков типа  
“спиновая лестница”

Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук

Подписано в печать \_\_\_\_\_.\_\_\_\_.\_\_\_\_ г.

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.  
Типография ООО "ПринтСайдАп"

