

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию Глазкова Василия Николаевича

«Электронный спиновый резонанс в низкотемпературных парамагнетиках»

представленную на соискание учёной степени доктора физико-математических наук  
(специальность 1.3.10 — физика низких температур)

Резонансные методы исследования спиновой динамики в прошлом веке доказали свою исключительную эффективность в исследовании магнитных систем, обладающих магнитным порядком при достаточно низких температурах. Высокие чувствительность и энергетическое разрешение методов спинового резонанса позволяют изучать тонкие эффекты спиновой динамики, связанные с беспорядком и слабыми взаимодействиями. Эта методика обогатила физику твердого тела новыми знаниями и потребовала создания теории для описания таких экспериментов.

Развитие науки в наши дни, в особенности большие успехи в синтезе соединений с заданными свойствами, вывело на передний план совершенно новые материалы. В области магнетизма это, прежде всего, сильно коррелированные спиновые системы, в которых квантовые эффекты препятствуют установлению магнитного упорядочения вплоть до самых низких температур, из-за чего их называют спиновыми жидкостями или низкотемпературными парамагнетиками. За последние три десятка лет класс таких магнетиков необычайно расширился. Это потребовало развития как теоретических, так и экспериментальных методов их исследования. Метод спинового резонанса оказался очень полезным и для изучения соединений нового типа. Он дал возможность проверить теоретические предсказания для простых моделей и исследовать влияние разнообразных слабых взаимодействий и замороженного беспорядка, всегда присутствующих в реальных материалах и делающих их физику более богатой.

Диссертация В.Н. Глазкова посвящена развитию метода электронного спинового резонанса для изучения систем с синглетным основным состоянием и щелевым спектром (квантовых низкотемпературных парамагнетиков) и систематизирует научный опыт автора по исследованию таких соединений за последние два десятка лет. За это время В.Н. Глазков принял деятельное участие не только в экспериментальной работе, но и в теоретическом осмыслении экспериментальных результатов, полученных им в большом числе соединениях из указанного класса. В диссертации отражены результаты диссертанта по трехмерным,

квази-двумерным и квази-одномерным димеризованным магнетикам со спином  $1/2$  и  $1$ . Изучены соединения, магнитные свойства которых описываются моделями слабо связанных спиновых лестниц и спиновых трубок со спином  $1/2$ . Исследовано влияние замороженного беспорядка на свойства квази-двумерных и квази-одномерных димеризованных систем. Все рассмотренные магнетики помимо большого внимания к ним научного сообщества объединяет то, что они обладают синглетным основным состоянием, не имеющим дальнего магнитного порядка, и целевым спектром хорошо определенных триплетных спиновых возбуждений. Различная пространственная размерность магнитных подсистем этих соединений, разная величина спина и соотношения между параметрами спин-спинового взаимодействия позволили автору изучить различные аспекты динамики и получить важные данные, некоторые из которых еще ждут своего теоретического описания. Таким образом, актуальность диссертационной работы совершенно очевидна.

В диссертации получен ряд **новых результатов**, имеющих большое значение для физики магнитных явлений. Экспериментально обнаружена тонкая структура спектра триплетных возбуждений и регулярный эффект «инверсии» анизотропии для триплетных возбуждений. Продемонстрировано появление низкочастотных мод магнитного резонанса в индуцированной полем упорядоченной фазе низкотемпературных парамагнетиков рассмотренного типа. Выявлены различные режимы спиновой релаксации. При самых низких температурах исследованные материалы продемонстрировали механизмы спиновой релаксации, связанные с взаимодействием нескольких триплетных возбуждений и со слабым структурным беспорядком. Развита методика описания возбуждений низкотемпературных парамагнетиков: 1) показана эффективность гидродинамического подхода для описания спектров возбуждений и частот магнитного резонанса, 2) для квазиодномерной системы единичных спинов с доминирующей одноионной анизотропией предложена простая аналитическая модель описания частот антиферромагнитного резонанса в индуцированной полем упорядоченной фазе. Изучено два примера влияния немагнитных примесей на свойства спин-целевых парамагнетиков. При частичной замене немагнитных ионов в квазидвумерной системе связанных димеров  $\text{PHCC:Br}$  экспериментально обнаружено формирование парамагнитных центров со спином  $1$  и обнаружен эффект уменьшения времени спиновой релаксации в разбавленных бромом образцах. При диамагнитном разбавлении квазиодномерной системы типа «спиновая лестница»  $\text{DIMPY:Zn}$

экспериментально обнаружено формирование взаимодействующих друг с другом парамагнитных центров со спином  $1/2$ .

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

**Научная значимость** работы заключается в том, что впервые получен ряд новых экспериментальных результатов, которые подтвердили ряд теоретических представлений о такого рода системах и которые могут использоваться и в дальнейшем для проверки предсказаний теории в соответствующих моделях.

**Практическая значимость** работы заключается в развитии методики магнитного резонанса применительно к магнетикам с синглетным основным состоянием и щелевым спектром возбуждений. 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 В.Н. Глазкова написана очень ясно и логично. Она имеет чёткую структуру и достаточно полные иллюстрации. Автор демонстрирует широкую научную эрудицию и высокий профессионализм при весьма основательном обсуждении цели исследований, теоретических основ экспериментальной методики, физики рассматриваемых явлений и полученных результатов. К положительным сторонам работы можно отнести также стремление автора объяснить не самую простую физику обсуждаемых явлений просто и наглядно с использованием большого количества иллюстраций. В каждой главе очень четко обозначен личный вклад автора. Поэтому не остается никаких сомнений в ведущей роли диссертанта в проведенных исследованиях. Особенно приятно подчеркнуть, что В.Н. Глазков, будучи экспериментатором, весьма детально разбирается в теории рассматриваемых явлений, а в главе 11 он даже предложил новый способ теоретического описания частот антиферромагнитного резонанса в системах с целым спином.

**Замечания.** Из незначительных шероховатостей диссертационной работы отмечу некоторое количество опечаток и языковых огрехов, свидетельствующих о приоритете четкости формулировок над изяществом стиля (например,

«количественное определение количества таких центров» (с. 62), «соединение кристаллизуется в кристалл...» (с. 184) и др.).

Из несколько более серьезных замечаний укажу следующие.

1. Досадным недочетом работы выглядит то, как объяснено в разделах 1.3.5 и главе 13 появление обменного взаимодействия между неспаренными спинами, возникающими из-за дефектов. Оно является очень близким аналогом взаимодействия РККИ в металлах и возникает в результате обмена примесными спинами магнитными возбуждениями системы. Такое обменное взаимодействие знакопеременное, как и РККИ-взаимодействие, но в отличие от последнего оно экспоненциально спадает с расстоянием между примесями (это следствие щелевого характера спектра системы) и не является фрустрирующим, если антиферромагнитные корреляции в системе соразмерны (именно поэтому в отличии от металлов с магнитными примесями в соединениях, рассмотренных автором, не возникает спин-стекольной фазы). Хорошо известно очень простое аналитическое выражение для такого взаимодействия, из которого ясно видно, в частности, что его корреляционная длина обратно пропорциональна щели в спектре. (Результаты теоретических исследований, использующих это аналитическое выражение, находятся в количественном согласии с экспериментальными данными, см., например, Phys. Rev. B **103**, 024420 (2021) и ссылки в ней). Все это важные сведения, составляющие суть рассматриваемого явления, его физический смысл. Удивительно, но ничего из выше сказанного не упомянуто в диссертации. Экспоненциальное спадание эффективного взаимодействия с расстоянием проиллюстрировано картинкой 1.30 с численными результатами (без объяснений, почему возникло именно экспоненциальное поведение), а корреляционная длина введена в главе 13 как чисто феноменологический параметр. Взаимодействие примесных спинов в главе 13 рассматривается в терминах взаимодействия спиновых кластеров, которые образуются вокруг этих спинов в результате подмагничивания ими немагнитной матрицы. К ошибкам это не приводит, но выглядит так же неудачно, как выглядело бы, например, рассмотрение магнитных свойств гольмия или спиновых стекол в терминах взаимодействия облаков спиновой плотности, образующихся вокруг магнитных атомов, вместо простого введения обменного РККИ-взаимодействия между ними (как это обычно и делается).

2. В диссертации очень подробно объяснена гидродинамическая теория, использованная автором для описания спектров во многих рассмотренных соединениях. Между тем в главе 5 при обсуждении экспериментов в  $\text{TlCuCl}_3$  были приведены результаты еще одной теории, которая основана на бозонном представлении спиновых операторов в димерах и которая в отличие от феноменологического гидродинамического подхода исходит из микроскопической модели рассматриваемой системы. Результаты этой теории, приведенные на Рис. 5.19, в целом лучше описывают экспериментальные результаты в  $\text{TlCuCl}_3$ , чем гидродинамическая теория (см. Рис. 5.16). В связи с этим осталось непонятным, почему более успешной теории, к тому же основанной на микроскопической модели, уделено так мало внимания (ей посвящен лишь один небольшой абзац в конце главы 5), и почему она не использовалась для описания экспериментальных результатов в других димерных системах, изученных автором.
3. На странице 42 автор со ссылкой на работы [3] и [5] утверждает, что формула (1.13) верна не только для трехмерных систем, но и для квази-двумерных и квази-одномерных. Между тем формула (1.13) не применима к квази-одномерным системам. В работе [5] рассмотрены только трехмерные магнетики, а в работе [3] весьма определенно сказано, что формула (1.13) верна для размерности системы большей или равной 2. Приближение, в котором получена формула (1.13), оказывается верным для квази-одномерных моделей только в случае ферромагнитных цепочек, слабо связанных между собой антиферромагнитными взаимодействиями. Но в этом случае показатель степени в (1.13) будет равен не  $1/2$ , а 1 (см. Phys. Rev. B **75**, 134421 (2007) и Phys. Rev. B **100**, 054442 (2019)). Это замечание не носит принципиального характера, поскольку формула (1.13) не использовалась для описания полученных диссертантом данных.
4. В главе 12, которая посвящена димерной системе  $\text{RNiCl}_2$  с примесями, изменяющими величину обменного взаимодействия между спинами матрицы, магнитные возбуждения вблизи дна зоны трактуются как распространяющиеся (делокализованные). Между тем это не так, по крайней мере, при достаточно низкой температуре. То, что возбуждения внутри зоны вблизи ее дна должны быть локализованы при нулевой температуре следует хотя бы из того простого соображения, что при закрытии магнитным полем щели в спектре триплетов происходит переход в фазу бозе-стекла (в которой нет когерентного дальнего

магнитного порядка во всем образце) даже если внутри щели не образуются примесные уровни (о чем правильно пишет автор в главе 1, и о чем доказана общая теорема Phys. Rev. Lett. **103**, 140402 (2009)). С другой стороны, «конденсация» делокализованных возбуждений приводит к когерентному магнитному порядку во всей системе и не может дать состояние бозе-стекла. Теоретическое рассмотрение работы Phys. Rev. B **90**, 155121 (2014) показывает, что в системах с беспорядком в магнитных связях при нулевой температуре возбуждения в зоне вблизи ее дна и потолка действительно локализованы. Конечно, экспериментальные исследования проводятся при конечных температурах, а температурные флуктуации играют против локализации (см., например, EPL **89**, 10009 (2010)). Однако вопрос о характере возбуждений в системах с беспорядком является важным, и его, безусловно, стоило бы обсудить в диссертации более подробно.

Указанные замечания не влияют на общую оценку работы: диссертация выполнена на очень высоком научном уровне и соответствует всем самым строгим требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям. Научные положения диссертации достаточно обоснованы. Из довольно внушительного числа своих работ автор отобрал для диссертации восемнадцать. Все они опубликованы в ведущих международных физических журналах (Physical Review B, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Journal of Physics: Conference Series, Письма в ЖЭТФ и ЖЭТФ) и докладывались на многочисленных российских и международных конференциях. Автореферат содержит основные результаты диссертации и правильно отражает ее содержание.

Думаю, что диссертация может послужить хорошим учебным пособием для молодых специалистов в области резонансных методов исследования твердого тела.

Таким образом, диссертационная работа В.Н. Глазкова является законченным, самостоятельно выполненным научным исследованием, содержит принципиально важные новые результаты и вносит весомый вклад в развитие физики низкотемпературных парамагнетиков и методов их экспериментального исследования. Диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям «Положения о присуждении учёных степеней», предъявляемых ВАК к докторским диссертациям. Ее автор является очень известным в мире специалистом в области спинового резонанса. Он успешно сотрудничает с коллегами из ведущих мировых центров, ведет активную преподавательскую деятельность в нашей стране, под его

научным руководством защищаются кандидатские диссертации. Я совершенно уверен, что В.Н. Глазков заслуживает присвоения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.10 — физика низких температур.

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

7 февраля 2023 г.

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

Подпись руки Сыромятников А.В.  
**ЗАВЕРЯЮ**  
НАЧАЛЬНИК ОТДЕЛА КАДРОВ **ЗИНОВЬЕВА А.Н.**

07.02.2023

