

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Глазкова Василий Николаевича "Электронный спиновый резонанс в низкотемпературных парамагнетиках", представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.10 Физика низких температур

Актуальность темы выполненной работы

Спиновые системы, в которых реализуется состояние спиновой жидкости, активно изучаются последние десятилетия. Интерес представляет как само спин-жидкостное состояние, так и возникающие в таких системах новые фазы. Описание свойств спин-жидкостных состояний перекликается с другими задачами физики конденсированного состояния: задачами сверхпроводимости, бозе-конденсации, описанием одномерной латтинжеровской жидкости. При этом разнообразие микроскопических параметров взаимодействий, реализующееся в различных спиновых системах, позволяет получать реализации различных теоретических моделей, и экспериментально их верифицировать. В диссертационной работе исследуется один из типов спиновых систем спин-жидкостного типа: низкотемпературные парамагнетики с щелевым спектром возбуждений, многие аспекты поведения которых были изучены крайне недостаточно. Таким образом, тема работы Глазкова В.Н. актуальна, а появление статей, на которых основана его диссертация, было весьма важным и своевременным.

Общая характеристика работы

В работе при помощи методики спектроскопии магнитного резонанса изучен представительный ряд низкотемпературных парамагнетиков с щелевым спектром возбуждений (всего 9 соединений). Ключевым для получения новых результатов высокого качества является использование высокочувствительной методики многочастотной спектроскопии магнитного резонанса в очень широком диапазоне частот (от 5 до 300 ГГц), полей (до 14 Тл) и температур (от 0.4 до 300 К). Причем автор принимал участие в разработке установок и методик. Используя преимущества высокой чувствительности и энергетического разрешения методики спектроскопии магнитного резонанса, Глазков В.Н. обнаружил и исследовал общие физические свойства систем данного типа: возникновение тонкой структуры спектра коллективных возбуждений, возникновение сигнала антиферромагнитного резонанса в индуцированной полем упорядоченной фазе, различные режимы спиновой релаксации. Эти исследования и определяют новизну работы и ее значимость. Единство подходов к описанию различных систем данного класса позволило систематически проверить несколько теоретических моделей, используемых

для описания таких систем. В то же время, индивидуальные особенности исследованных систем также выявлены в экспериментальных исследованиях, некоторые из них остаются не объясненными теоретически. Одна из теоретических моделей, используемых в диссертационной работе для описания различных низкотемпературных парамагнетиков, теоретическая модель Фарутина-Марченко, была разработана после появления экспериментальных результатов автора.

Помимо экспериментальных результатов в работе содержатся новые теоретические результаты для описания антиферромагнитного резонанса в индуцированной полем антиферромагнитной фазе системы спинов $S=1/2$ с доминирующей одноионной анизотропией.

Полученный набор новых экспериментальных и теоретических результатов является существенным вкладом в развитие фундаментальных знаний о физических свойствах спиновых систем со спин-жидкостным состоянием.

Содержание диссертационной работы

Диссертационная работа состоит из шести частей, включая введение и заключение, и списка используемой литературы, содержит 302 страницы текста и 155 рисунков.

В первой части обосновывается актуальность выбранной темы исследования, приводится общая характеристика работы, приводится список публикаций автора по теме диссертационной работы. Также в первой части дается краткий обзор известных низкотемпературных парамагнетиков с щелевым спектром возбуждений и обсуждаются общие для различных низкотемпературных парамагнетиков особенности их физических свойств.

Во второй части описывается используемая в работе экспериментальная методика электронного спинового резонанса. Описывается устройство используемых экспериментальных установок, позволяющих проводить измерения в уникальном наборе частот СВЧ (от 5 до 300 ГГц), полей (до 12 Тл) и температур (от 0.4 до 300К). В этой части рассмотрены особенности применения методики электронного спинового резонанса к изучению низкотемпературных парамагнетиков, в том числе: специфика применения правил отбора для различных наблюдаемых переходов между спиновыми подуровнями и возможность наблюдения антиферромагнитного резонанса в индуцированной полем антиферромагнитно-упорядоченной фазе.

В третьей части описываются результаты, полученные при исследовании низкотемпературных парамагнетиков на основе ионов со спином $S=1/2$. Представленные результаты получены при изучении четырёх систем с различным строением обменных

связей: трехмерный димерный парамагнетик TlCuCl_3 , квазидвумерный димерный парамагнетик $(\text{C}_4\text{H}_{12}\text{N}_2)\text{Cu}_2\text{Cl}_6$, сокращенно обозначаемый в литературе РНСС, квазиодномерный парамагнетик типа "спиновая лестница" $(\text{C}_7\text{H}_{10}\text{N}_2)_2\text{CuBr}_4$, сокращенно обозначаемый DIMPY, и квазиодномерный парамагнетик типа "спиновая трубка" $\text{Cu}_2\text{Cl}_4 \cdot \text{H}_8\text{C}_4\text{SO}_2$. Экспериментально показано, что, несмотря на различия в микроскопическом строении спиновых подсистем этих соединений, проявляется общность их физических свойств, связанная с наличием щелевого спектра коллективных возбуждений. Обнаружена тонкая структура спектра триплетных возбуждений, обнаружен сигнал антиферромагнитного резонанса в индуцированной полем упорядоченной фазе. Получены количественные характеристики тонкой структуры спектра элементарных возбуждений, обнаружен регулярный эффект "инверсии" анизотропии при переходе из парамагнитной низкополевой фазы в индуцированную полем антиферромагнитную фазу. Для описания результатов применены как полуфеноменологические подходы (модель эффективной анизотропии в парамагнитной фазе и аналогия с традиционным антиферромагнитным резонансом в индуцированной полем антиферромагнитной фазе), так и теоретический подход Фарутина-Марченко. Обнаружены и качественно описаны различные режимы спиновой релаксации.

В четвертой части описываются результаты, полученные при исследовании низкотемпературных парамагнетиков на основе ионов со спином $S=1$. Представлены результаты, относящиеся к трём системам с различными особенностями микроскопического устройства спиновой подсистемы: квазиодномерный халдейновский парамагнетик $\text{PbNi}_2\text{V}_2\text{O}_8$, квазиодномерное димерное соединение NTENP и квазиодномерное соединение с сильной одноионной анизотропией DTN. В микроскопическом гамильтониане системы ионов $S=1$ возникает слагаемое одноионной анизотропии, величина которого совершенно независима от параметров обменных взаимодействий. Одноионная анизотропия дает основной вклад в расщепление коллективных триплетных подуровней в $\text{PbNi}_2\text{V}_2\text{O}_8$ и NTENP, что позволяет экспериментально проверять предсказания различных теоретических моделей для связи между расщеплением триплетных подуровней в нулевом поле и анизотропией критического поля закрытия спиновой щели. Показано, что теоретический подход Фарутина-Марченко количественно точно описывает поведение триплетных подуровней в поле для халдейновского соединения $\text{PbNi}_2\text{V}_2\text{O}_8$, но не даёт удовлетворительного согласия с экспериментом для димерного соединения NTENP. В соединении DTN одноионная анизотропия типа "легкая плоскость" оказывается основным взаимодействием в микроскопическом гамильтониане, для описания магнитного резонанса в индуцированной

полем антиферромагнитной фазе этого соединения предложен новый теоретический подход, комбинирующий результаты приближения сильной связи и классической теории антиферромагнитного резонанса.

В пятой части приводятся результаты исследования немагнитного разбавления на свойства низкотемпературных парамагнетиков. Экспериментально показано, что контролируемое введение примеси может приводить к различным эффектам. Так в квазидвумерном магнетике на основе ионов со спином $S=1/2$ РНСС при замене части немагнитных ионов хлора на ионы брома наблюдалось возникновение при низких температурах парамагнитных центров со спином $S=1$ и возникновение дополнительных каналов спиновой релаксации при высоких температурах. В парамагнетике типа "спиновая лестница" DIMPY при замене части магнитных ионов меди немагнитными ионами цинка возникают взаимодействующие друг с другом парамагнитные центры со спином $S=1/2$ при низких температурах и подавление спиновой релаксации при высоких температурах.

В шестой части формулируются выводы диссертационной работы.

Основные результаты

В работе впервые получен целый ряд новых результатов, среди которых можно выделить следующие:

1. Экспериментально обнаружен сигнал антиферромагнитно резонанса в индуцированной полем упорядоченной фазе в ряде низкотемпературных парамагнетиков.
2. Экспериментально обнаружена тонкая структура спиновых уровней триплетных возбуждений, являющаяся прямым доказательством триплетной природы этих возбуждений.
3. Экспериментальное наблюдение различных режимов спиновой релаксации в исследованной серии низкотемпературных парамагнетиков.
4. Экспериментальное обнаружение возникновения парамагнитных центров со спином $S=1$ при немагнитном разбавлении квазидвумерного димерного парамагнетика на основе ионов со спином $S=1/2$ РНСС.
5. Создание теоретического описания мод магнитного резонанса в индуцированной полем упорядоченной фазе системы цепочек спинов $S=1$ с сильной анизотропией типа "лёгкая плоскость".

6. Описание с помощью теоретического подхода Фарутина-Марченко мод магнитного резонанса в представительном ряде низкотемпературных парамагнетиков как в низкополевой парамагнитной фазе, так и в индуцированной полем упорядоченной фазе.

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием образцов высокого качества (образцы охарактеризованы термодинамическими измерениями теплоемкости и намагниченности, а в некоторых случаях, и в экспериментах по упругому и неупругому рассеянию нейтронов), проведению серий экспериментов при различных температурах, частотах СВЧ-излучения, ориентациях приложенного поля, а также сопоставлением результатов автора с известными результатами, полученными другими исследователями. Высокое качество и значимость полученных результатов подтверждается также публикациями в ведущих рецензируемых российских и международных научных журналах (всего 15 публикаций), а также многочисленными докладами на российских и международных научных конференциях.

Научная новизна и практическая значимость результатов

Научная и практическая значимость работы определяется совокупностью новых результатов, перечисленных выше. Их новизна обеспечивается в первую очередь уникальным сочетанием возможностей спектрометров магнитного резонанса, используемых в представленных в работе исследованиях. Возможность проведения исследований на частотах СВЧ от 5 до 300 ГГц в полях до 14 Тл и при температурах до 400 мК позволяет систематически проследить различные физические эффекты, наблюдать изменение спектров магнитного резонанса при переходе в низкотемпературные упорядоченные фазы. Комплексный анализ полученных результатов с использованием общих для исследуемых систем физических моделей обеспечивает новизну интерпретации результатов.

Полученные результаты важны для понимания фундаментальных свойств низкотемпературных парамагнетиков с целевым спектром возбуждений, в том числе для прояснения влияния анизотропных спин-спиновых взаимодействий на спектр элементарных возбуждений и структуру различных фаз таких систем. Эти результаты могут быть востребованы в российских и зарубежных научных группах, ведущих исследования в области систем со спин-жидкостным поведением.

Возможность управлять свойствами спектра возбуждений при помощи магнитного поля, проявляющаяся в низкотемпературных парамагнетиках, может быть востребована в задачах спинтроники. Исследования в области спинтроники в последнее время переключаются на использование антиферромагнитных материалов, в которых отсутствие полей рассеяния обеспечивает большее быстроедействие. Управляемые магнитным полем индуцированные антиферромагнитные фазы низкотемпературных парамагнетиков дают возможность подстраивать свойства антиферромагнетика и могут представлять интерес для таких исследований.

Замечания

Однако, работа не свободна от недостатков:

1. Неудачно сформулированы выносимые на защиту положения диссертационной работы. Используемые формулировки описывают, скорее, полученные результаты.
2. При описании результатов и их анализе мало внимания уделяется орбитальному магнетизму. Насколько оправдано в используемых системах использовать модель заморозки орбитального момента?
3. Известно, что спин-решёточная релаксация играет важную роль в описании релаксации спиновой прецессии. В работе при рассмотрении релаксационных процессов рассматриваются только спин-спиновые взаимодействия. Было бы желательно четко сформулировать, почему в интересующих автора случаях можно не учитывать спин-решёточные процессы релаксации?
4. Одним из неожиданных экспериментальных результатов работы является регулярное наблюдение эффекта "инверсии" анизотропии при переходе из низкополевой парамагнитной фазы в индуцированную полем антиферромагнитную фазу. Существует ли простое качественное объяснение этого эффекта?
5. Хотелось бы видеть более четкое описание, какими дополнительными методами характеризовались используемые в работе образцы.

Как следует из самого характера сделанных замечаний, они касаются некоторых частных моментов изложения, и ни в коей мере не затрагивают результаты работы.

Заключение

Представленная диссертация является самостоятельным законченным научным исследованием, выполненным на высоком уровне. Полученная совокупность новых

экспериментальных и теоретических результатов является крупным вкладом в развитие фундаментальных знаний о физических свойствах спиновых систем со спин-жидкостным состоянием. Достигнутый прогресс в понимании свойств низкотемпературных парамагнетиков является достижением физики низких температур.

Оформление диссертации отвечает всем требованиям ВАК, структура и объём диссертации адекватно отражают полученные результаты. Автореферат и публикации по теме диссертации достаточно полно отражают представленные к защите результаты и положения. Основные результаты представлены в 15 публикациях в высокорейтинговых журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК, и индексируемых в WOS.

Диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям, перечисленным в п. 9-14 "Положения о порядке присуждения ученых степеней", а В.Н. Глазков безусловно заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.10 "Физика низких температур"

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,
профессор физического факультета
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»

ГРАНОВСКИЙ Александр Борисович

01.02.2023

Контактные данные:

тел.: +7 (495) 939-4787, e-mail: granov@magn.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация:

01.04.11 – физика магнитных явлений

Адрес места работы:

119991, г. Москва, Ленинские горы, д.1, стр.2, МГУ им. М.В.Ломоносова, Физический факультет

Тел.: +7 495 939-1847; e-mail: info@physics.msu.ru

И.О. декана физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова,
Профессор

Белокуров В.В.



01.02.2023