МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. М. В. ЛОМОНОСОВА

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

На правах рукописи
УДК 537.61+537.622

СИДОРЕНКО АНДРЕЙ АНАТОЛЬЕВИЧ

ЭФФЕКТЫ КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ПОЛЯ И КВАДРУПОЛЬНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ В РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЦИРКОНАХ

Специальность 01. 04. 11 - физика магнитных явлений

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

Москва – 2000

Работа выполнена на кафедре общей физики Брянского государственного технического университета

Научные руководители:	доктор физико-математических наук, профессор Колмакова Н. П. доктор физико-математических наук Казей З.А.
Официальные оппоненты:	доктор физико-математических наук, профессор Попов А.И. доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник Ганьшина Е.А.
Ведущая организация:	Институт химической физики им. Н.Н.Семенова РАН

Защита состоится “20” апреля 2000 г. в 15^{30} час. на заседании специализированного совета N 3 ОФТТ (К.053.05.77) в МГУ им. М.В. Ломоносова по адресу: 119899, Москва, Воробьевы горы, ГСП, МГУ, физический факультет, аудитория ЮФА.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова.

Автореферат разослан “_16_” марта 2000 г.

Ученый секретарь
специализированного совета
кандидат физико-математических наук,
доцент О.А. Котельникова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Окисные соединения на основе редкоземельных (РЗ) элементов характеризуются большим разнообразием магнитных, магнитоупругих, магнитооптических, резонансных, оптических и других физических свойств. Это обстоятельство обуславливает их широкое использование в качестве рабочих материалов в лазерной и вычислительной технике, прикладной магнитооптике, в различных устройствах микроэлектроники, магнитоакустики и т.д.

Исследование РЗ соединений важно не только с точки зрения их практического применения. Поскольку в формировании их физических свойств важнейшую роль играют кристаллическое поле (КП) и магнитоупругое (МУ) взаимодействие, а для некоторых РЗ соединений также значительное ян-теллеровское (ЯТ) взаимодействие, такие исследования позволяют решать проблемы, имеющие фундаментальное значение для физики твердого тела. В частности, они способствуют выяснению фундаментальных вопросов магнетизма: природы КП, МУ и квадрупольного взаимодействий, магнитной анизотропии, проявлений сверхтонкого взаимодействия и механизмов спин-решеточной релаксации.

В качестве объектов исследований были выбраны РЗ окисные соединения со структурой циркона RXO_4, X=P, V. РЗ ионы в парамагнитных соединениях с тетрагональной структурой циркона характеризуются богатым слабо вырожденным энергетическим спектром, который благоприятен для эффектов пересечения или взаимодействия энергетических уровней. Отсутствие неэквивалентных позиций для РЗ ионов позволяет наблюдать яркие магнитные и МУ аномалии в этих соединениях, которые связаны с взаимодействием энергетических уровней. Соединения RXO_4 характеризуются значительными одноионным МУ и парным квадрупольным взаимодействиями, которые приводят к существенным МУ эффектам и в ряде случаев ($TbVO_4$, $DyVO_4$, $TmVO_4$) к

спонтанному упорядочению квадрупольных моментов РЗ ионов [1]. Это упорядочение сопровождается ромбической деформацией кристаллической решетки и составляет суть структурных фазовых переходов ЯТ природы – кооперативный эффект Яна-Теллера.

К настоящему времени накоплен большой объем спектроскопической информации, которая позволяет количественно решать задачи о влиянии РЗ ионов на формирование свойств РЗ соединений с использованием адекватных методов расчета на основе гамильтонианов, определяемых на соответствующем решаемой задаче базисе.

Целью работы являлось теоретическое исследование магнитных и МУ свойств РЗ соединений со структурой циркона, обусловленных КП и квадрупольным взаимодействием.

Выполненные в работе исследования были направлены на решение следующих конкретных задач:

- изучение теплового расширения РЗ соединений в области структурного фазового перехода ЯТ природы;
- расчет аномалий магнитных (намагниченность, дифференциальная магнитная восприимчивость (ДМВ), магнитокалорический эффект (МКЭ) в импульсных полях) и МУ (магнитострикция) свойств РЗ цирконов, связанных с взаимодействием энергетических уровней РЗ иона в сильных и сверхсильных полях;
- интерпретация соответствующих экспериментальных данных и определение параметров соединений.

Научная новизна и защищаемые результаты. Получены и выносятся на защиту следующие научные результаты:

– Теоретически исследовано тепловое расширение кристаллов $DyVO_4$ и $TbVO_4$ в области структурного фазового перехода ЯТ природы и впервые на примере структуры циркона продемонстрировано проявление полносимметричных МУ взаимодействий при этом переходе. Показано,

что обнаруженные экспериментально на температурных зависимостях параметров элементарной ромбической ячейки, а также теплового расширения вдоль неактивного ян-теллеровского направления при $T<T_C$ характерные МУ аномалии обусловлены упорядочением квадрупольных моментов $\langle O_2^2 \rangle$ для $DyVO_4$ и $\langle P_{xy} \rangle$ для $TbVO_4$.

– Для структуры циркона обнаружены эффекты взаимодействия энергетических уровней (кроссовер) в сильных и сверхсильных полях ($YbPO_4$, $DyPO_4$, $PrVO_4$, $HoVO_4$). Исследованы особенности их проявления на магнитных и МУ свойствах в изотермическом и адиабатическом режимах при расчетах эффекта Зеемана, намагниченности, ДМВ, квадрупольных моментов и магнитострикции для произвольных ориентаций поля.
– Установлено, что наблюдаемый на эксперименте в $YbPO_4$ широкий максимум ДМВ вблизи 280 Тл для поля вдоль тетрагональной оси связан с пересечением нижних энергетических уровней иона Yb^{3+}. Рассчитанный в предположении адиабатичности процесса намагничивания в импульсных полях МКЭ имеет немонотонную зависимость от поля и сопровождается значительным охлаждением кристалла вблизи кроссовера.
– Показан аномальный характер МКЭ при адиабатическом намагничивании ван-флековских парамагнетиков $PrVO_4$ и $HoVO_4$ вдоль направлений поля с кроссовером, при котором отсутствует первоначальное нагревание образца при вводе поля и происходит существенное его охлаждение при приближении к полю кроссовера. Продемонстрирована чрезвычайно важная роль сверхтонкого взаимодействия для магнитных аномалий вблизи кроссовера в $PrVO_4$ и $HoVO_4$, которые являются усиленными ядерными магнетиками.
– Впервые предсказаны наличие и характер аномалий МУ свойств при кроссовере на примере магнитострикции $DyPO_4$. Показано, что в этом

соединении для направлений поля в базисной плоскости как в изотермическом, так и в адиабатическом режимах имеются ярко выраженные аномалии и намагниченности, и магнитострикции. МКЭ в адиабатическом режиме характеризуется отсутствием охлаждения образца вблизи поля кроссовера, что связано со сложным характером взаимодействия энергетических уровней иона Dy^{3+}.

Теоретическая и практическая значимость полученных результатов. Полученная в работе информация о магнитных и МУ свойствах и их аномалиях, обусловленных кроссовером и квадрупольным взаимодействием, РЗ цирконов может быть использована для разработки физических основ получения новых магнитных материалов с заданными свойствами.

Апробация работы. Основные результаты, представленные в диссертации, докладывались и обсуждались на следующих конференциях: 5th International Symposium on Research in High Magnetic Fields (Sydney, Australia, 1997); 7th European Magnetic Materials and Applications Conference (Zaragoza, Spain, 1998); 8th International Conference on Megagauss Magnetic Fields Generation and Related Phenomena (Tallahassi, USA, 1998); European Conference “Physics of Magnetism’99” (Poznan, Poland, 1999); 22nd International Conference on Low Temperature Physics (Espoo and Helsinki, Finland, 1999); VI Международная конференция аспирантов и студентов по фундаментальным наукам “ЛОМОНОСОВ-99” (МГУ, Москва, 1999); 54я, 55я научные конференции профессорско-преподавательского состава (БГТУ, Брянск, 1998, 1999).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 12 печатных работ и одна работа принята к печати.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 157 страницах машинописного текста и содержит: рисунков – 43, таблиц - 4, список литературы из 125 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, сформулированы ее основные цели и конкретные задачи. Показана ее научная новизна и практическая ценность. Кратко изложено содержание работы по главам.

Первая глава диссертации является литературным обзором. В ней рассмотрены основные виды эффектов КП и квадрупольного взаимодействия в РЗ соединениях: МУ вклад в тепловое расширение, магнитострикция, структурные фазовые переходы ян-теллеровской природы и взаимодействие (пересечение) энергетических уровней РЗ иона во внешнем магнитном поле. Охарактеризованы объекты исследований – РЗ парамагнитные соединения с тетрагональной структурой циркона и химической формулой RXO_4, где X=P или V. Обсуждаются кристаллическая структура, иерархия величин параметров взаимодействий, схема нижних энергетических уровней РЗ ионов и типы деформаций, которые могут снять вырождение спектра РЗ иона.

Описаны методы расчета МУ и квадрупольных эффектов в РЗ соединениях тетрагональной симметрии. Показана ограниченность псевдоспинового формализма и преимущества формализма обобщенных восприимчивостей [2]. Приведен гамильтониан, а также формулы для расчета МУ вклада в тепловое расширение и магнитострикции [3].

Вторая глава посвящена методам расчета электронной структуры РЗ ионов и термодинамических характеристик РЗ соединений в сильном магнитном поле. Обсуждаются и сформулированы приближения в расчетах, допустимые при адекватном описании исследуемых явлений и сопоставлении теоретических результатов с конкретными экспериментальными данными.

Для расчетов использовался гамильтониан, включающий гамильтониан КП H_{CF}, электронного H_Z и ядерного H_I зеемановского взаимодействия, магнитного сверхтонкого H_{HPS} и ядерного электрического квадрупольного H_Q взаимодействий:

$$H = H_{CF} + H_Z + H_I + H_{HPS} + H_Q. \quad (1)$$

H_{CF} записан через неприводимые тензорные операторы $C_q^{(k)}$ [4] и расчеты КП производились с учетом смешивания состояний между мультиплетами внутри терма и примешивания возбужденных термов к основному, поскольку известно, что такие эффекты существенны, особенно в случае легких РЗ ионов. Значения сверхтонких параметров обычно определяются в экспериментальных работах в терминах спин-гамильтониана. Чтобы использовать эти параметры для проведения численных расчетов, для гамильтониана сверхтонких магнитного и квадрупольного взаимодействий продемонстрировано преобразование его в эффективный спин-гамильтониан с использованием стационарной теории возмущений при проецировании на основной электронный уровень, который при достаточно низких температурах повторяет структуру ядерного мультиплета. Проанализировано явление усиленного ядерного магнетизма в РЗ парамагнетиках с синглетным основным электронным состоянием [5]. Обсуждается проблема вкладов от электронной и ядерной подсистем в суммарную намагниченность этих соединений.

Описан МКЭ, природа его возникновения и методы расчета изменения температуры образца и теплоемкостей решетки, электронной и ядерной подсистем. В связи с тем, что сравнение с экспериментом рассчитанных в предположении адиабатичности процесса намагничивания ван-флековского парамагнетика $PrVO_4$ пиков ДМВ требует дискуссии о временах спин-решеточной релаксации, в диссертации изложены основные механизмы релаксационных процессов в магнитных системах. Это механизмы Ван-Флека, Валлера и другие; также рассматривается эффект узкой фононной

горловины. Обсуждается проблема температурных зависимостей времен спин-решеточной релаксации в электронной и ядерной системах ван-флековских парамагнетиков.

В третьей главе приведены результаты теоретического исследования теплового расширения РЗ ванадатов в области структурного фазового перехода ЯТ природы, обусловленные квадрупольным упорядочением. В ранних работах, посвященных исследованию орторомбической фазы в РЗ цирконах, вклад в тепловое расширение в связи с кооперативным эффектом Яна-Теллера рассматривался только от доминирующей ЯТ моды на основе псевдоспинового формализма. Вклад полносимметричных мод в тепловое расширение не учитывался. Впервые для структуры циркона изучено проявление полносимметричных МУ взаимодействий в области структурного перехода. При этом использована более общая модель КП и показано, что тепловое расширение как в тетрагональной, так и в ромбической фазах описывается в рамках общего подхода на основе единого для обеих фаз набора параметров взаимодействий.

В первом параграфе описаны особенности теплового расширения при квадрупольном упорядочении $TbVO_4$. Рассчитана зависимость параметра порядка фазового перехода $<P_{xy}>$ от температуры, которая позволила описать температурную зависимость ромбического искажения ε^{δ} и, исходя из экспериментальной величины деформации $\varepsilon^{\delta}=1.62\cdot10^{-2}$ при 0 К, определить МУ коэффициент $B^{\delta}=18.1\cdot10^{3}$ К. Получена критическая температура $T_C=36$ К, близкая к наблюдаемой на эксперименте. Рассчитаные аномалии теплового расширения (рис.1) достаточно хорошо описывают эксперимент.

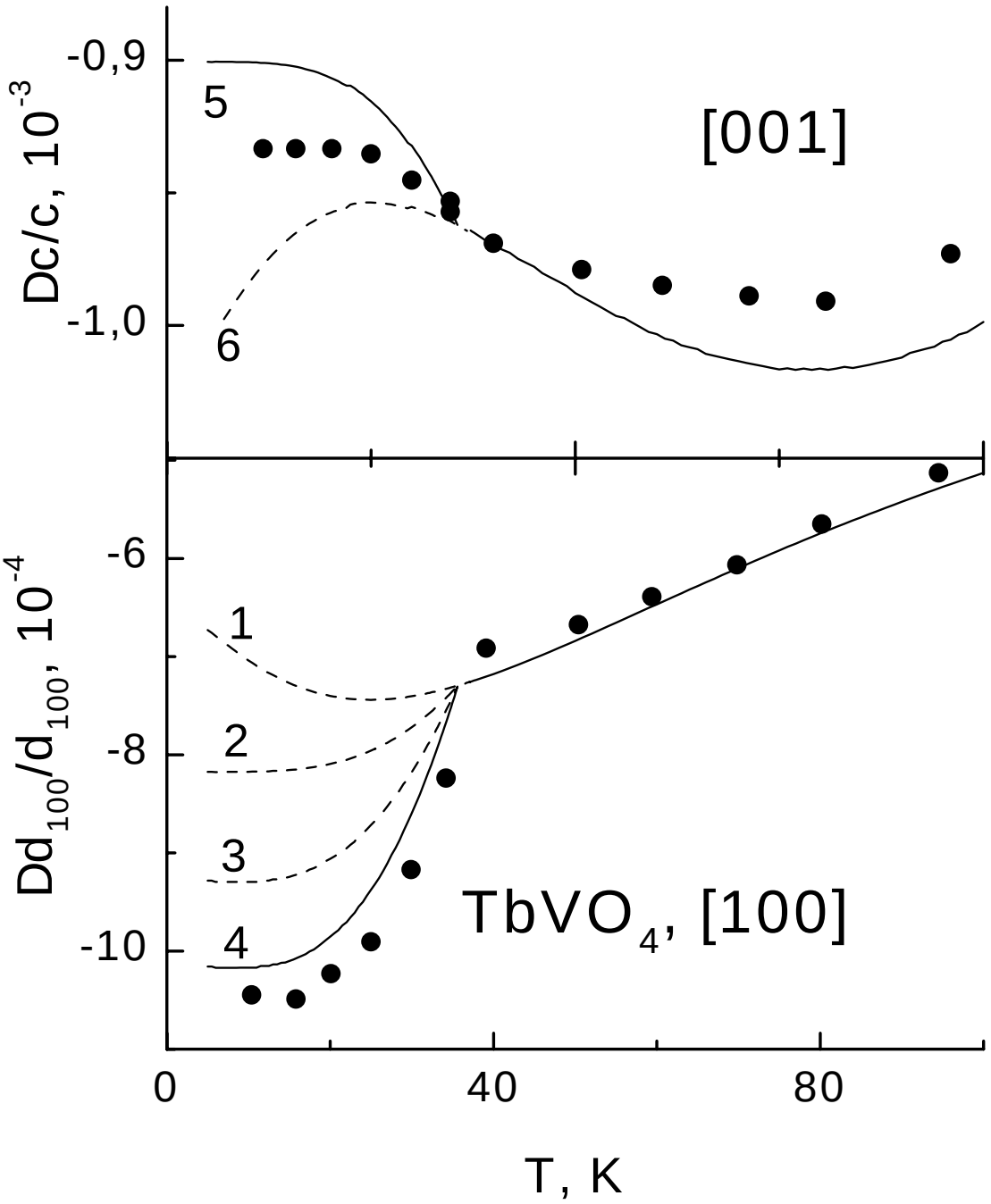

Рис.1. Экспериментальные (точки) и рассчитанные (кривые 4, 5) относительные изменения с температурой межплоскостного расстояния $\Delta d_{100}/d_{100}$ (внизу) и параметра $\Delta c/c$ (вверху) элементарной ячейки $TbVO_4$ в области структурного фазового перехода. Линиями показаны рассчитанные вклады в зависимости $\Delta d_{100}/d_{100}$ и $\Delta c/c$ от ромбической ε^{δ} (кривая 3) и полносимметричных $\varepsilon^{\alpha 1}$, $\varepsilon^{\alpha 2}$ деформаций в отсутствие (кривые 1, 6) и при наличии (кривые 2, 5) структурного перехода.

Во втором параграфе приведены результаты исследования аномалий теплового расширения $DyVO_4$. На основе имеющихся экспериментальных данных определены параметры КП в тетрагональной фазе ($B_2^0 = -158$ см$^{-1}$, $B_4^0 = 283$ см$^{-1}$, $B_6^0 = -653$ см$^{-1}$, $B_4^4 = 646$ см$^{-1}$, $B_6^4 = 180$ см$^{-1}$). Для описания наблюдаемого на эксперименте изменения спектра в квадрупольно упорядоченной фазе подобран ромбический параметр КП B_2^2=32.8 см$^{-1}$, который оказался хорошо согласующимся с соответствующим МУ коэффициентом, определенным через величину спонтанной деформации при 0 К. С полученными параметрами рассчитана температурная зависимость параметра порядка $< O_2^2 >$. Определено, что для $DyVO_4$ вклад парного квадрупольного взаимодействия K^γ близок к нулю и теоретическое соотношение $K^\gamma / G_{ME}^\gamma = -1/3$ не выполняется, что может свидетельствовать о заметном вкладе оптических фононов в магнитоупругость этого соединения.

Рассчитанные зависимости квадрупольных моментов позволили разделить различные вклады в тепловое расширение $DyVO_4$ вдоль неактивного ЯТ направления Δa′/a′, качественно описать экспериментальные данные вдоль оси *c* и для $T \gtrsim T_C$ и получить достаточно хорошее описание эксперимента в базисной плоскости для осей [100] и [110] для однодоменного образца.

<u>В главе 4</u> приведены результаты исследования эффекта пересечения энергетических уровней во внешнем магнитном поле на магнитных характеристиках в $YbPO_4$, $PrVO_4$, $HoVO_4$.

Если нижний уровень мультиплета РЗ иона, расщепленного КП, слабо зависит от магнитного поля, в достаточно сильных полях какой-либо из возбужденных уровней может приблизиться к основному, а затем поменяться местами (кроссовер). Поскольку при этом основным становится более “магнитный” уровень, кроссовер сопровождается скачкообразным увеличением намагниченности *M* и максимумом ДМВ *dM/dH*. Характер

магнитных аномалий и МКЭ в импульсных полях определяется спецификой взаимодействия энергетических уровней.

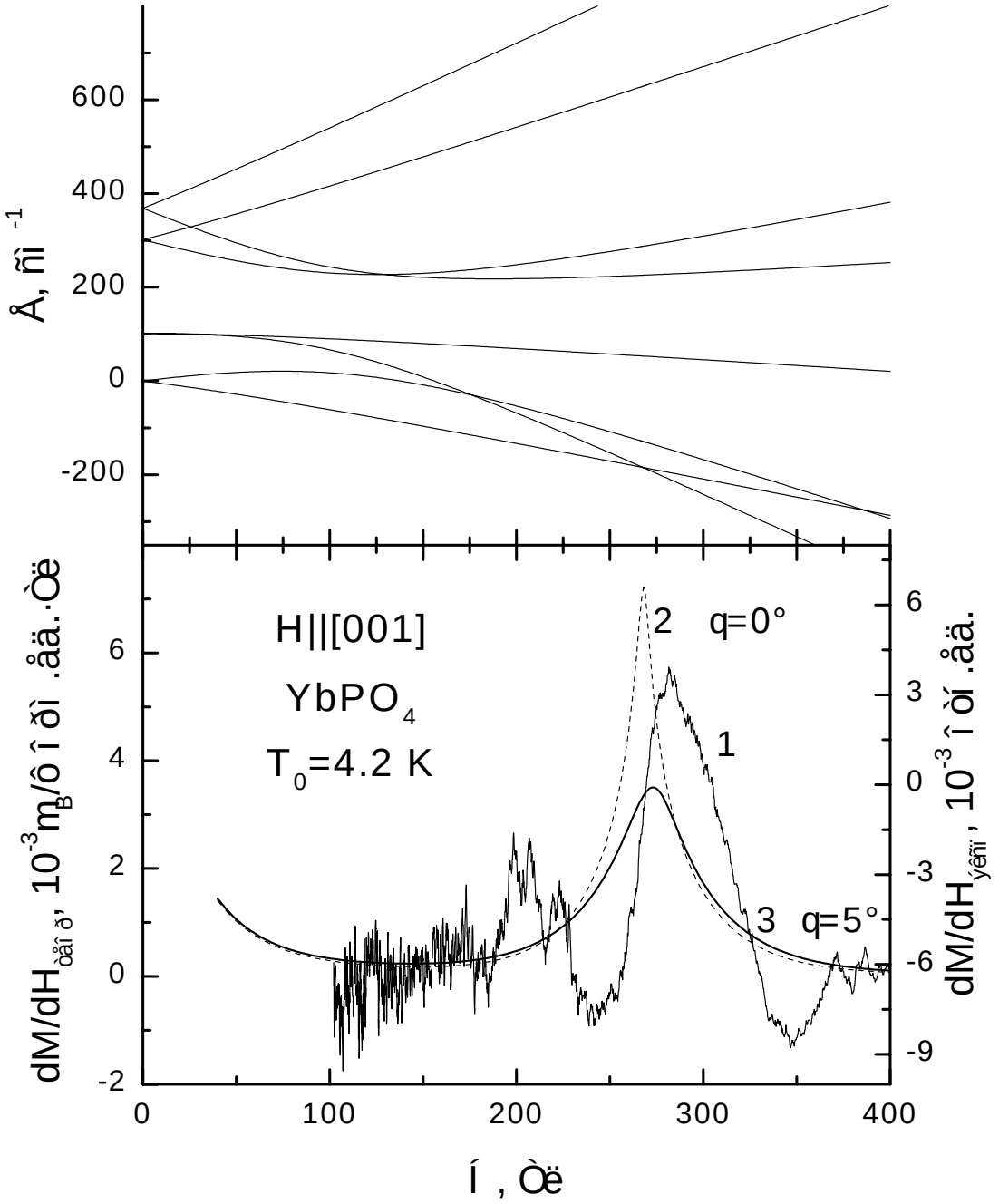

Рис.2. Эффект Зеемана и кривые дифференциальной восприимчивости *dM/dH* монокристалла $YbPO_4$ (1-эксперимент, 2 и 3 - расчет).

В первом параграфе рассчитаны магнитные аномалии в парамагнетике с крамерсовским ионом $YbPO_4$. Для H||[001] теоретически предсказано наличие кроссовера в сверхсильных полях (см. эффект Зеемана на рис.2) и

рассчитано его проявление на изотермических и адиабатических магнитных характеристиках. В Российском Федеральном Ядерном Центре был обнаружен широкий максимум ДМВ в поле $H_C \approx 280$ Тл, обусловленный кроссовером (рис.2). Значительная ширина максимума связана с изменением температуры образца вследствие МКЭ, который в предположении адиабатичности намагничивания в импульсном поле имеет немонотонный характер: от T=4.2 К образец сначала нагревается примерно на 25 К, а затем вблизи кроссовера охлаждается примерно на 20 К. Для направления поля [100] также имеет место кроссовер и, соответственно, скачок намагниченности и пик ДМВ, выраженные значительно слабее, чем для H||[001].

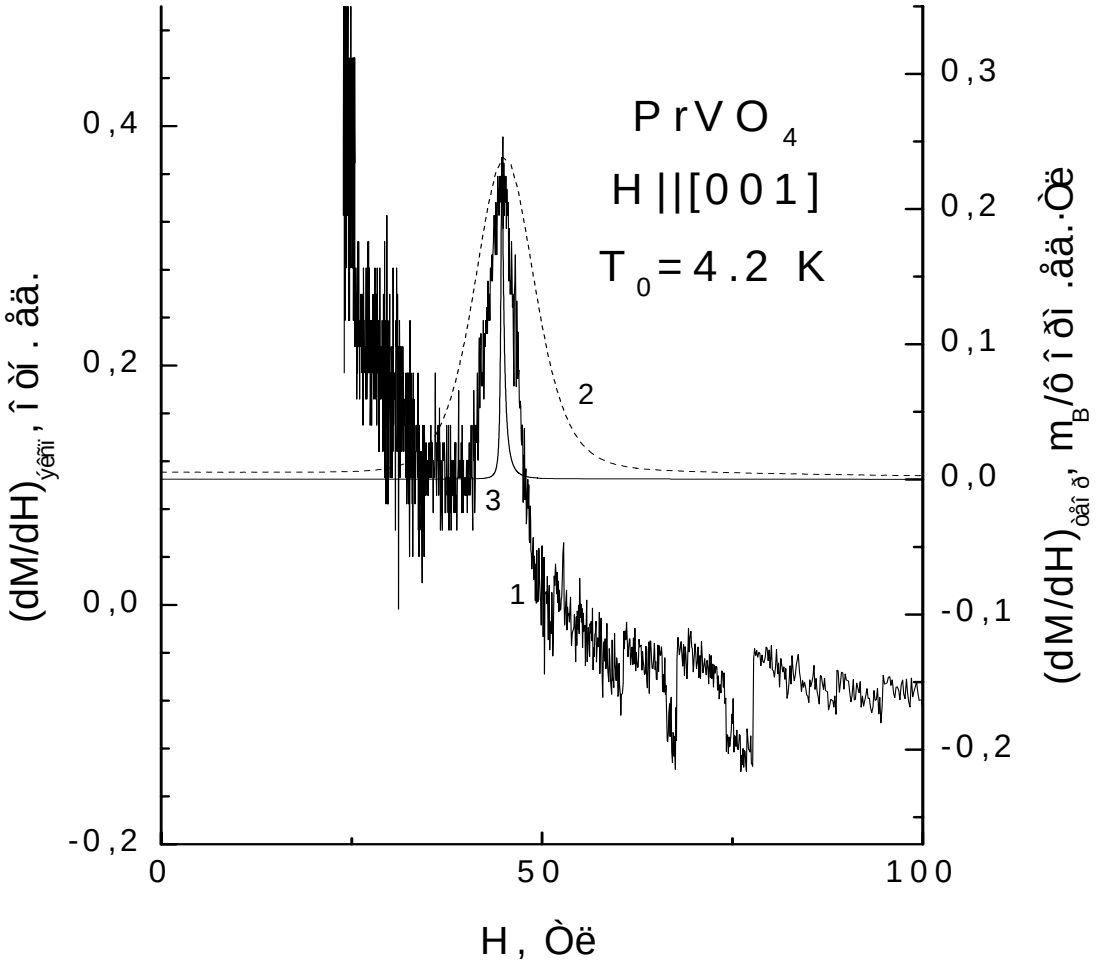

Рис.3. Экспериментальная (1) и теоретические изотермическая (2) и адиабатическая (3, деленная на 22) дифференциальные восприимчивости dM/dH монокристалла $PrVO_4$.

Второй параграф посвящен теоретическому исследованию магнитных аномалий, являющихся следствием пересечения нижних энергетических уровней иона Pr^{3+} в ван-флековском парамагнетике $PrVO_4$, и сравнению расчетов с имеющимся экспериментом.

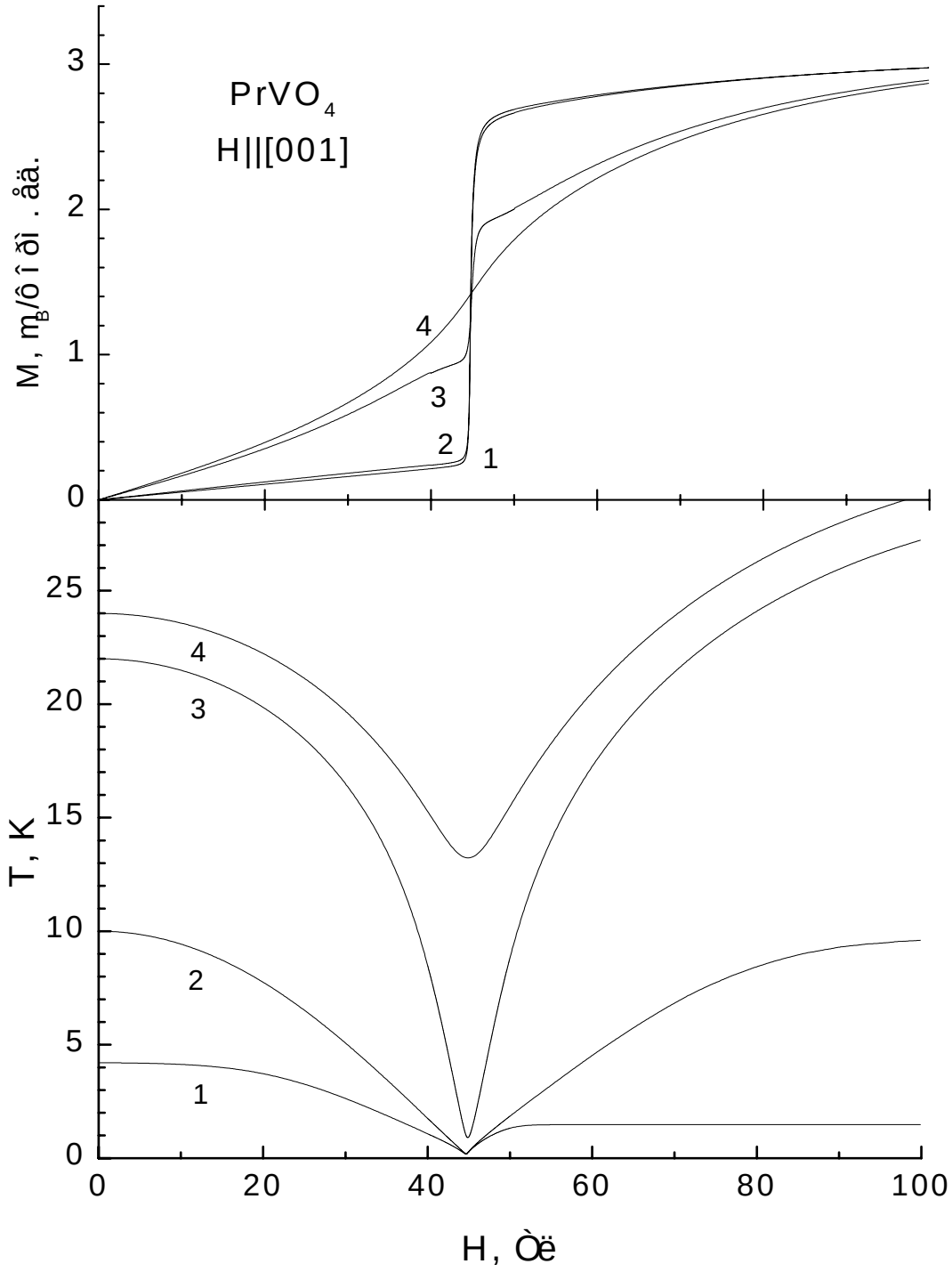

Рис.4. Адиабатические кривые намагничивания и магнитокалорический эффект $PrVO_4$ при H||[001] для разных начальных температур T_0.

Расчеты эффекта Зеемана, намагниченности, восприимчивости, теплоемкости и МКЭ в импульсных полях были произведены на основе гамильтониана (1) с использованием параметров сверхтонкого взаимодействия из [6]. Параметры КП были определены из спектроскопической информации [6] с данными для начальной магнитной

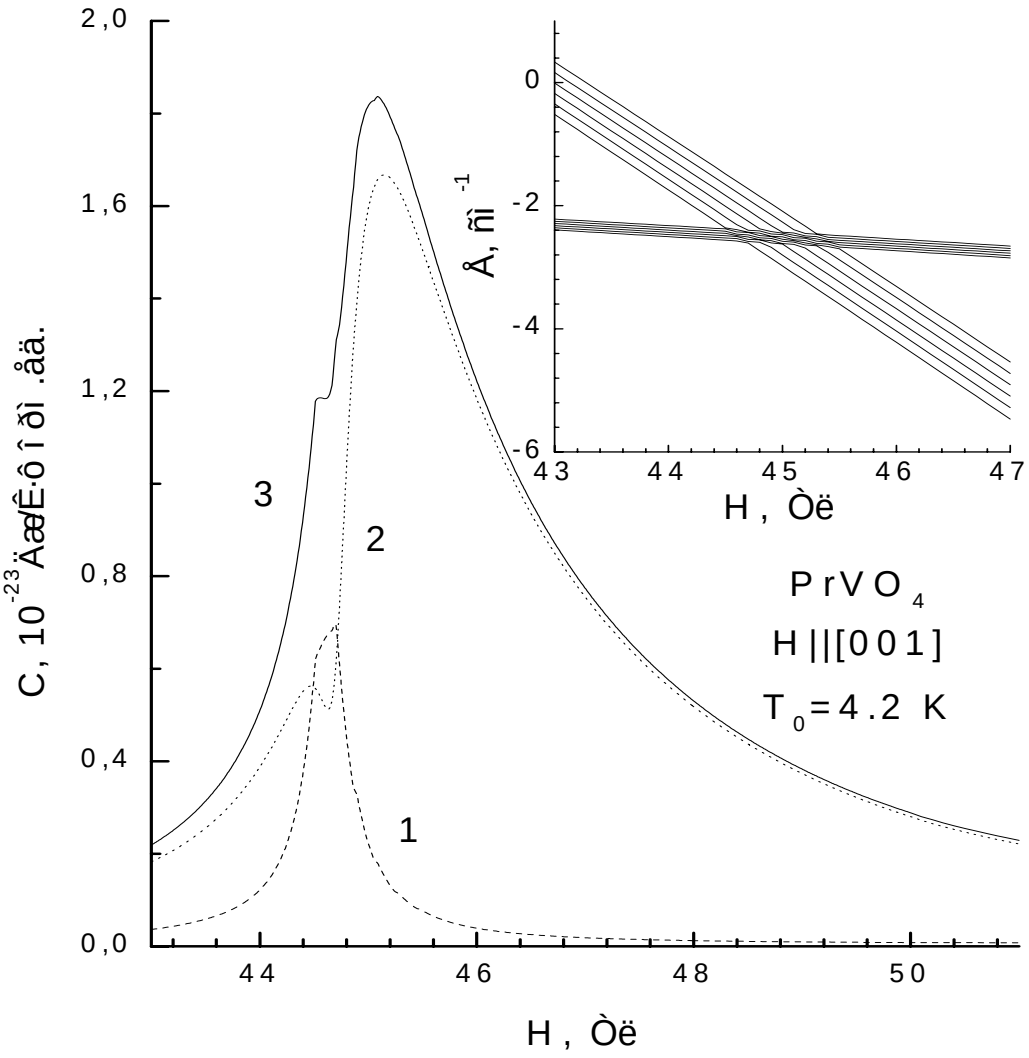

Рис.5. Полевые зависимости ядерной (1), электронной (2) и полной (3) теплоемкостей $PrVO_4$ при адиабатическом намагничивании вдоль тетрагональной оси, T_0=4.2 К. На вставке показан фрагмент эффекта Зеемана для двух нижних уровней с учетом сверхтонкого взаимодействия.

восприимчивости [6, 7] и уточненным значением поля кроссовера. На рис.3 приведена экспериментальная, измеренная в Российском Федеральном Ядерном Центре, и теоретическая зависимости ДМВ монокристалла $PrVO_4$

для H||[001]. Видно, что пик изотермической кривой, рассчитанной при T=4.2 K, шире экспериментального – это свидетельствует об охлаждении образца. Пик, вычисленный в предположении адиабатичности намагничивания, уже экспериментального. Из рис.4 видно, что МКЭ в $PrVO_4$ аномален, отсутствует нагревание образца при вводе поля, образец сильно охлаждается при приближении к H_C. Характер МКЭ меняется при изменении T_0 в корреляции с изменением кривой намагничивания (рис.4). Рассчитанные при T_0=4.2 K полевые зависимости теплоемкостей (рис.5) показывают существенную роль ядерной теплоемкости вблизи кроссовера и несимметричность $C_{ЭЛ}(H)$ относительно H_C. Природа этой несимметричности связана с разными величинами сверхтонкого расщепления нижних пересекающихся уровней иона Pr^{3+} и понятна из вставки к рис.5.

Измерения ДМВ при разных начальных температурах, проведенные в Берлинском университете им. Гумбольдта в импульсных полях, позволили уточнить значение H_C, которое оказалось равным 50 Тл, и обсудить известную в литературе [8] проблему увеличения времен спин-решеточной релаксации в ван-флековских парамагнетиках при понижении температуры ниже 1 K. Отличие экспериментальной и теоретической адиабатической кривых *dM/dH*, например, при T_0=21 K заметно меньше, чем при T_0=7.5 K. Это свидетельствует о меньшем охлаждении образца вблизи H_C при T_0=21 K, чем при более низких T_0 (см. кривые при разных T_0 на рис.4).

В третьем параграфе обсуждаются магнитные аномалии при кроссовере в $HoVO_4$ в связи с МКЭ. Показано сходство эффектов Зеемана и всех магнитных аномалий для синглетных парамагнетиков $HoVO_4$ и $PrVO_4$, рассчитанных с учетом сверхтонкого взаимодействия. Обнаружен второй кроссовер в поле ~310 Тл для H||[001], при котором намагниченность соединения возрастает до номинальной в 10 μ_B/форм.ед.

<u>В пятой главе</u> на примере тетрагонального парамагнетика со структурой циркона $DyPO_4$ показано, что наряду с магнитными

аномалиями при взаимодействии энергетических уровней имеют место и особенности поведения магнитострикции, которые никогда ранее не исследовались.

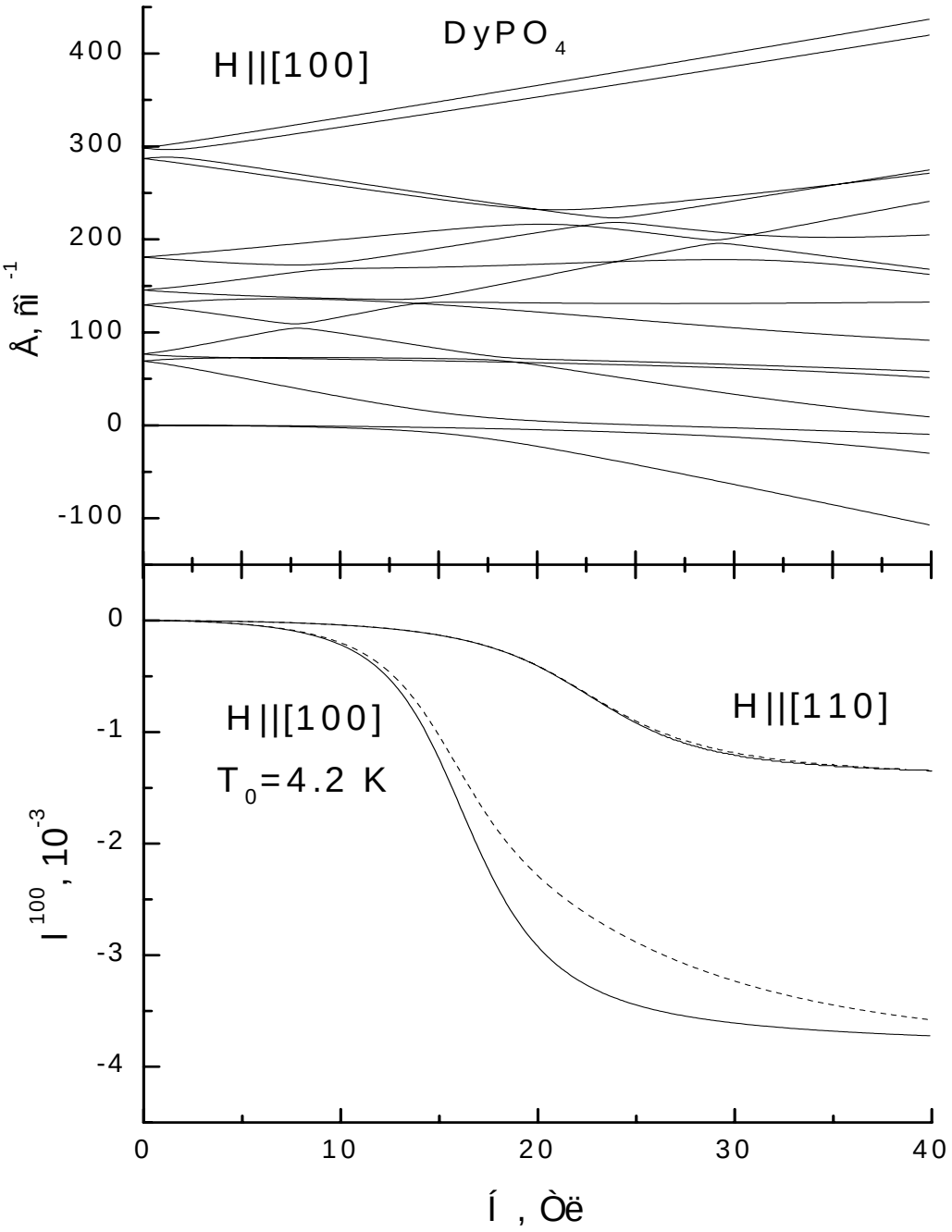

Рис.6. Эффект Зеемана для H||[100] (вверху) и изотермические (сплошные) и адиабатические (штриховые) кривые продольной магнитострикции (внизу) для H||[100] и H||[110] $DyPO_4$.

Показано, что для любого направления поля в базисной плоскости происходит приближение возбужденных уровней к основному с

последующим расталкиванием. Максимальное сближение имеет место вблизи 16 Тл для H||[100] с параметрами КП, взятыми из работы [9] (рис.6). Для H||[110] сближение уровней происходит вблизи 22 Тл и второй раз – в полях ~300 Тл. На магнитных характеристиках взаимодействие проявляется в виде скачка на изотермической кривой намагничивания и пика ДМВ. При намагничивании в импульсных магнитных полях, когда процесс близок к адиабатическому, с учетом МКЭ эти аномалии остаются ярко выраженными.

Рассчитаны полевые зависимости магнитострикции вдоль различных направлений через вычисленные квадрупольные моменты $\langle O_2^0 \rangle, \langle P_{xy} \rangle$ и $\langle O_2^2 \rangle$ иона Dy^{3+} в изотермических и адиабатических условиях. МУ коэффициенты были также взяты из работы [9]. На рис.6 хорошо видны аномалии продольной магнитострикции $DyPO_4$, которые лишь незначительно сглаживаются в адиабатическом режиме.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Главный результат диссертации – это предсказание и расчет эффектов, связанных с пересечением энергетических уровней РЗ ионов в магнитном поле и квадрупольными взаимодействиями, в РЗ цирконах, а также количественная интерпретация имеющихся экспериментальных данных и определение параметров исследованных соединений.

Теоретическое исследование аномалий теплового расширения кристаллов $DyVO_4$ и $TbVO_4$, обусловленных упорядочением квадрупольных моментов РЗ ионов, впервые на примере структуры циркона продемонстрировало проявление полносимметричных МУ взаимодействий в области структурного перехода. В рамках общего формализма КП проведены расчеты МУ вкладов в параметры элементарной ромбической ячейки от полносимметричных и

низкосимметричных мод. Хотя вклад от полносимметричных мод и заметно меньше вклада от доминирующей ЯТ моды в силу иерархии МУ и упругих коэффициентов в структуре циркона, обнаружено, что он приводит к наблюдаемым МУ эффектам. Из сравнения с экспериментом найдены МУ коэффициенты B^{δ} и B^{γ}.

Рассчитан эффект Зеемана для РЗ ионов в тетрагональном КП структуры циркона, который предсказывает многочисленные пересечения уровней в сильном и сверхсильном магнитном поле. Для $YbPO_4$ сопоставление рассчитанных в предположении адиабатичности намагничивания в импульсных полях кривых ДМВ с экспериментом позволило выявить магнитные аномалии, причиной которых является кроссовер при H||[001] вблизи 280 Тл, и установить характер МКЭ.

Показано, что для синглетных ван-флековских парамагнетиков $PrVO_4$ и $HoVO_4$ вблизи поля кроссовера очень важную роль играет сверхтонкое взаимодействие, которое модифицирует электронную теплоемкость и формирует ядерную через сверхтонкое расщепление электронного и ядерного спектров. Выявлен существенно разный вид всех аномалий, связанных с кроссовером, в синглетных парамагнетиках и в парамагнетиках с крамерсовскими ионами, что обусловлено разным характером начального намагничивания этих соединений. В синглетных парамагнетиках все особенности вблизи кроссовера в адиабатическом режиме более ярко выражены, чем в изотермическом. МКЭ в них аномален – отсутствует первоначальное нагревание образца при вводе поля и происходит его существенное охлаждение вблизи кроссовера. Сравнение экспериментальных и рассчитанных для адиабатического режима ДМВ при разных начальных температурах позволяет предположить увеличение времен спин-решеточной релаксации при понижении температуры образца ниже 1 К вблизи кроссовера.

Впервые предсказаны МУ аномалии, связанные с взаимодействием энергетических уровней РЗ иона в магнитном поле. На примере $DyPO_4$

показано, что взаимодействие двух нижних крамерсовых дублетов иона Dy^{3+} для произвольной ориентации магнитного поля в базисной плоскости должно проявиться в особенностях магнитострикции. Рассчитанные в предположении адиабатичности намагничивания в импульсных полях аномалии намагниченности, ДМВ, магнитострикции и квадрупольных моментов, а также МКЭ представляют богатую возможность для экспериментатора выбрать оптимальную ситуацию для измерений в импульсных полях.

Цитированная литература.

1. Gehring G. A., Gehring K. A.//Rep. Prog. Phys. - 1975. - V.38. - P.1-89.
2. Morin P., Rouchy J., Schmitt D.//Phys. Rev. B. - 1988. - V.37. - P.5401-5413.
3. Казей З.А., Колмакова Н.П.//ЖЭТФ. - 1996. - Т.109. - С.1687-1703.
4. Wybourne B.G. Spectroscopic Properties of Rare-Earths. - N.Y.: Interscience, 1965. - 236 p.
5. Aminov L.K., Malkin B.Z., Teplov M.A. Magnetic properties of nonmetallic lanthanide compounds//Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths, ed. Gschneidner K.A. Jr., Eyring L. - Amsterdam: Elsevier Science. - 1996, V.22. - P.295-506.
6. Bleaney B., Harley R.T., Ryan J.F., Wells M.R., Wiltshire M.C.K.//J. Phys. C: Solid State Phys. - 1978. - V.11. - P.3059-3069.
7. Андроненко Р.Р., Андроненко С.И., Бажан А.Н.//ФТТ. - 1994. - Т.36. - С.2396-2401.
8. Альтшулер С.А., Козырев Б.М. Электронный парамагнитный резонанс соединений элементов промежуточных групп. - М.: Наука, 1972. - 672 с.
9. Morin P., Kazei Z.//J.Phys.: Condens. Matter. - 1999. - V.11. - P.1289-1304.

Основные публикации по теме диссертации

1. Казей З.А., Колмакова Н.П., Левитин Р.З., Платонов В.В., Сидоренко А.А., Таценко О.М. Исследование эффектов пересечения уровней в тетрагональном парамагнетике $YbPO_4$ в сверхсильном магнитном поле до 400 Т//Письма в ЖЭТФ. - 1997- Т.65. - N9. - С.691-694.
2. Казей З.А., Колмакова Н.П., Сидоренко А.А., Такунов Л.В. Аномалии теплового расширения $TbVO_4$, обусловленные кооперативным эффектом Яна-Теллера//ФТТ. - 1998. - Т.40. - N9. - С.1663-1666.
3. Kazei Z.A., Kolmakova N.P., Levitin R.Z., Platonov V.V., Sidorenko A.A., Tatsenko O.M. Energy level crossing and magnetocaloric effect in $YbPO_4$ in ultrahigh pulsed fields//Physica B. - 1998. - V.246-247. - P.483-486.
4. Казей З.А., Колмакова Н.П., Крынецкий И.Б., Сидоренко А.А., Такунов Л.В. Аномалии теплового расширения $DyVO_4$, обусловленные квадрупольным упорядочением//ФТТ. - 2000. - Т.42 - N2. - С.278-283.
5. Kazei Z.A., Levitin R.Z., Kolmakova N.P., Sidorenko A.A., Platonov V.V., Tatsenko O.M. Energy level crossing and magnetocaloric effect in $YbPO_4$ in ultrahigh pulsed fields//Abstr. of 5th Int. Symp. on Res. In High Magn. Fields, Sydney, Australia, 1997, P.WP24.
6. Kazei Z.A., Kolmakova N.P., Krynetskii I.B., Sidorenko A.A., Takunov L.V. Thermal expansion anomalies in rare-earth vanadates RVO_4, R=Tb, Dy, due to cooperative Jahn-Teller effect//Abstr. of 7th Europ. Magn. Mater. and Appl. Conf., Zaragoza, Spain, 1998, p.215.
7. Kazei Z.A., Kolmakova N.P., Sidorenko A.A., Snegirev V.V. Magnetostriction peculiarities caused by an energy level interaction at high magnetic fields in $DyPO_4$//Abstr. of 7th Europ. Magn. Mater. and Appl. Conf., Zaragoza, Spain, 1998, p.214.

8. Kazei Z.A., Levitin R.Z., Kolmakova N.P., Sidorenko A.A., Platonov V.V., Tatsenko O.M. Investigation of level crossing effect in rare-earth paramagnetics in ultra-high magnetic fields up to 500 T//Abstr. of 8th Int. Conf. on Megagauss Magn. Fields Gen. and Rel. Phen., Tallahassi, USA, 1998, p.103.
9. Казей З.А., Колмакова Н.П., Платонов В.В., Сидоренко А.А., Таценко О.М. Взаимодействие энергетических уровней и магнитокалорический эффект в сильных импульсных полях в редкоземельных цирконах//Тез. докл. VI Междунар. конф. асп. и студ. по фунд. Наукам “ЛОМОНОСОВ-99”, Москва, 1999.
10. Kazei Z.A., Kolmakova N.P., Platonov V.V., Sidorenko A.A., Tatsenko O.M. Energy level interaction and magnetocaloric effect at ultrahigh pulsed fields in rare earth zircons//Abstr. of Eur. Conf. “Phys. of Magn.’99”, Poznan, Poland, 1999, p. 135.
11. Kazei Z.A., Kolmakova N.P., Krynetskii I.B., Sidorenko A.A., Takunov L.V. Thermal expansion anomalies at a quadrupolar ordering in $DyVO_4$.//Abstr. of Eur. Conf. “Phys. of Magn.’99”, Poznan, Poland, 1999, p. 155.
12. Kazei Z.A., Kolmakova N.P., Platonov V.V., Sidorenko A.A., Tatsenko O.M. Cooling in rare-earth paramagnets at ultrahigh pulsed magnetic fields due to energy level crossing//Abstr. of 22nd Int. Conf. on Low Temp. Phys., Espoo and Helsinki, Finland, 1999, p.321.
13. Kazei Z.A., Kolmakova N.P., Platonov V.V., Sidorenko A.A., Tatsenko O.M. Cooling in rare-earth paramagnets at ultrahigh pulsed magnetic fields due to energy level crossing//Physica B. - 2000 (in print).