

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Г - 687

14-84-749

УДК 539.21

ГОРЕМЫЧКИН
Евгений Анатольевич

**ИЗУЧЕНИЕ ЭФФЕКТОВ КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ПОЛЯ
В ИНТЕРМЕТАЛЛИДАХ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ
МЕТОДОМ НЕУПРУГОГО РАССЕЯНИЯ
ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ**

Специальность: 01.04.01 - экспериментальная физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 1984

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики
Объединенного института ядерных исследований.

Научные руководители: доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник К.М.Останевич;
кандидат физико-математических наук В.Матц

Официальные оппоненты:
доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник
Н.М.Плакида; кандидат физико-математических наук В.К.Долганов

Ведущее предприятие: Институт атомной энергии им.И.В.Курчатова,
Москва.

Защита состоится _____ 198 года в _____ час.
на заседании специализированного совета Д 047.01.05
при Лаборатории нейтронной физики и Лаборатории ядерных реакций
Объединенного института ядерных исследований (141980, Дубна,
Московская область).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан _____ 198 г.

Ученый секретарь
специализированного совета

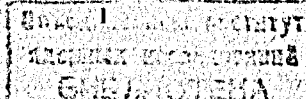
Д.В.Таран

Актуальность темы. Редкоземельные металлы (РЗМ) и их соединения в течение последних двадцати лет стали объектом активных исследований физиков, металлургов, химиков и исследователей целого ряда других специальностей. Столь большой интерес к этой группе веществ обусловлен в первую очередь перспективами их технического использования, а также тем, что они являются прекрасными модельными системами для изучения магнитных эффектов.

Взаимодействие пространственно-локализованных магнитоактивных $4f$ -электронов с другими подсистемами в твердом теле (соседние атомы, электроны проводимости, фононы и т.д.), в большинстве случаев сводится к частичному или полному снятию вырождения основного мультиплета иона РЗМ и возникновению системы уровней с конечной шириной, волновые функции и энергии которых в значительной степени определяют свойства соединений редкоземельных металлов. Именно по этой причине изучение кристаллического электрического поля (КЭП) и эффектов его взаимодействия с $4f$ -электронной оболочкой является одним из ключевых аспектов исследования соединений РЗМ.

Среди спектроскопических методов изучения соединений редкоземельных металлов важное место занимает неупругое магнитное рассеяние тепловых нейтронов (НМРТН). Этот метод дает детальную информацию о спектре магнитных возбуждений, который наиболее непосредственно определяется взаимодействием $4f$ -электронной оболочки с другими подсистемами в твердом теле, и, в отличие от оптических и радиочастотных методов, применим в случае металлических соединений.

В течение последнего десятилетия с помощью НМРТН в мире выполнено большое число исследований металлических соединений РЗМ. Тем не менее, целый ряд принципиальных вопросов в исследованиях РЗМ остается открытым. Например, проблема природы КЭП в металлах, несмотря на многочисленные, в основном экспериментальные, работы, весьма далека от своего разрешения. То же можно сказать и о природе ширин линий магнитных возбуждений, которые определяются в экспериментах по НМРТН, о взаимодействии элементарных возбуждений в металлических соединениях РЗМ. Поэтому изучение интерметаллических соединений редкоземельных металлов с помощью НМРТН является актуальной задачей современной физики твердого тела.



Цель работы. Настоящая диссертационная работа посвящена изучению эффектов кристаллического электрического поля в интерметаллических соединениях редкоземельных металлов с помощью неупругого магнитного рассеяния тепловых нейтронов. Были поставлены следующие основные задачи:

1) Разработать и реализовать в виде системы программ для ЭВМ методику извлечения количественной информации о характеристиках КЭП для интерметаллических соединений с гексагональной точечной симметрией иона РЗМ в кристалле из спектров неупругого рассеяния нейтронов на основе микроскопической феноменологической модели КЭП.

2) Провести эксперименты по неупругому рассеянию нейтронов на семействе изоструктурных соединений с гексагональной точечной симметрией иона РЗМ (структура CaCu_5) RNi_5 ($R = \text{Ce}, \text{Pr}, \text{Nd}, \text{Tb}, \text{Ho}, \text{Er}$) и RCu_5 ($R = \text{Ce}, \text{Pr}, \text{Nd}$), дать количественную интерпретацию измеренных спектров, определить параметры гамильтониана КЭП.

3) Провести анализ макроскопических свойств исследуемых соединений на основе параметров гамильтониана КЭП, определенных с помощью рассеяния нейтронов с привлечением моделей соответствующих свойств.

4) Оценить влияние электронов проводимости на формирование КЭП в металлах.

5) Выполнить экспериментальную проверку предсказания теории о гибридизации квадрупольных экситонов и фононов в области пересечения соответствующих мод.

6) Объяснить механизм возникновения anomalно больших ширин переходов между уровнями КЭП и их температурную зависимость, наблюдаемую в экспериментах по НМРТН в соединениях со структурой кубической фазы Лавеса PrAl_2 и PrNi_2 .

Научная новизна результатов исследований, содержащихся в диссертации, заключается в следующем:

1. Развита методика извлечения количественной информации о взаимодействии иона РЗМ с КЭП в случае гексагональной точечной симметрии иона редкой земли /1-4/.

2. Впервые проведен цикл систематических исследований кристаллического поля в ряду изоструктурных соединений RNi_5 ($R = \text{Ce}, \text{Pr}, \text{Nd}, \text{Tb}, \text{Ho}, \text{Er}$) и RCu_5 ($R = \text{Ce}, \text{Pr}, \text{Nd}$) с гексагональной точечной симметрией иона РЗМ в кристалле с помощью неупругого рассеяния нейтронов /3,5-13/, в результате чего было установлено следующее:

а) приближение самосогласованного молекулярного поля (ПСМП) оказывается достаточным для описания ряда магнитных макроскопических свойств в случае большинства исследованных соединений RNi_5 и RCu_5

с использованием только значений параметров КЭП, определенных в экспериментах с нейтронами;

б) на примере расчета теплопроводности и термоэдс с использованием собственных значений и волновых функций уровней КЭП, определенных с помощью НМРТН, для соединения PrCu_5 показана неадекватность существующих, одноионных моделей транспортных свойств;

в) получено указание на близость валентности иона церия к + 4 в экспериментах по неупругому рассеянию с образцом CeNi_5 . Найден, что CeCu_5 претерпевает антиферромагнитное упорядочение при $T_N = 3\text{K}$ и является системой с конкуренцией кондовского рассеяния электронов проводимости на $4f$ -моментах и тенденцией к антиферромагнитному упорядочению в присутствии КЭП.

3. Впервые с помощью метода возмущенных угловых корреляций (ВУК) на примере большого числа непроводящих соединений RE_3 ($R = \text{La}, \text{Ce}, \text{Pr}, \text{Nd}, \text{Sm}, \text{Eu}, \text{Gd}$) показано, что градиент КЭП на месте ядра иона РЗМ и его $4f$ -оболочки одинаков /14/.

4. Впервые показано, что сопоставление результатов измерения электростатической части сверхтонкого взаимодействия и НМРТН позволяет определить обменный вклад от электронов проводимости в градиент КЭП. Проведено его определение для соединений RNi_5 ($R = \text{Pr}, \text{Nd}, \text{Tb}, \text{Dy}, \text{Er}, \text{Tm}$) /15/.

5. Проведены эксперименты по неупругому рассеянию нейтронов на монокристаллическом образце PrNi_5 с помощью трехосного спектрометра в области пересечения возбуждения $\Gamma_4 - \Gamma_{SA}$ (вырождено с квадрупольным переходом) и поперечной акустической фононной ветви, при этом в результате проведенного анализа получено указание на существование гибридизации фононных и квадрупольных возбуждений $4f$ -оболочки /16,17/.

6. Показано, что наблюдаемая в экспериментах по НМРТН anomalно большая ширина переходов между уровнями КЭП и ее температурная зависимость в случае соединения PrAl_2 удовлетворительно объясняется механизмом распада магнитных возбуждений на пару электрон-дырка в море свободных электронов. В случае PrNi_2 эта модель не дает объяснения экспериментально наблюдаемым ширинам при низких температурах /17-20/.

Научная и практическая ценность. Развита в диссертации методика количественной обработки спектров неупругого рассеяния нейтронов для спектрометров обратной геометрии на импульсных реакторах ИБР-30 и ИБР-2 и спектрометра прямой геометрии на стационарном реакторе, создание соответствующего программного обеспечения позволили с высокой степенью надежности определять значения параметров

гамильтониана гексагонального КЭП. С ее помощью проведено исследование КЭП для изоструктурного ряда соединений с гексагональной структурой RNi_5 и RCu_5 , что в некоторой мере восполнило пробел в нейтрон-спектроскопических исследованиях КЭП интерметаллических соединений, где ранее исследования проводились главным образом в значительно более простом случае, на системах с кубической точечной симметрией иона РЗМ. Методика передана в ИЯИ АН УССР.

Результаты экспериментов по НМРТН на семействах соединений RNi_5 и RCu_5 были использованы для предсказания ряда макроскопических свойств с помощью существующих моделей и сделаны выводы относительно их применимости.

Как показано в диссертации, изучение соединений с гексагональной симметрией позволяет экспериментально определить вклад от электронов проводимости в КЭП. Это имеет существенное значение для создания модельных представлений о роли электронов проводимости в формировании КЭП, что является центральным моментом в проблеме природы КЭП в металлах. Понимание факторов, обуславливающих кристаллическое поле в соединениях со структурой $CaCu_5$, может иметь значение при создании постоянных магнитов, так как КЭП по существу обуславливает магнитную жесткость и, как показали результаты исследований, изложенные в диссертации, соединения RNi_5 и RCu_5 обладают высокой магнитокристаллической анизотропией.

Часто наблюдаемое аномальное поведение соединений, содержащих церий, в том числе $CeNi_5$ $CeCu_5$, связано с $s-f$ гибридизацией, поэтому исследование таких систем имеет значение для понимания природы состояния электронов в твердом теле, промежуточного между зонным и локализованным пределами.

Эксперименты по неупругому рассеянию нейтронов на монокристаллическом образце $PrNi_5$ имеют важное значение для развития адекватной теории спектра элементарных возбуждений в металлических соединениях РЗМ.

Исследование природы ширин, линий магнитных возбуждений и их температурной зависимости позволяет проверить различные модели механизмов релаксации возбуждений "Переходы между уровнями КЭП", что, в свою очередь, дает информацию о взаимодействии $4f$ -электронов с другими подсистемами в металле.

Апробация диссертации. Основные результаты работы были доложены на XIУ и XVI Всесоюзных конференциях по физике магнитных явлений (Харьков, 1979 г., Тула, 1983 г.), на IV Всесоюзном совещании "Сплавы редких металлов с особыми физическими свойствами" (Москва, 1980 г.), на УП Всесоюзном совещании по использованию рассеяния нейтронов в исследованиях по физике твердого тела (Свердловск,

1981 г.), на IV Международной конференции по кристаллическому электрическому полю и структурным эффектам в f -электронных системах (Вроцлав, ПНР, 1981 г.), на IV Международной школе по нейтронной физике (Дубна, 1982 г.), на Международной конференции по рассеянию нейтронов конденсированными средами (Хаконе, Япония, 1982 г.), на Международной конференции "Магнетизм редких земель и актинидов" (Бухарест, СРР, 1983 г.), на Научной сессии отделения ядерной физики АН СССР (Москва, 1984 г.).

Объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 155 страницах машинописного текста, включая 61 рисунок, 8 таблиц, 150 наименований литературы.

Краткое содержание работы

Во введении обосновывается актуальность темы исследования, дан краткий исторический обзор изучения соединений РЗМ, сформулированы основные новые результаты, выносимые автором на защиту.

В первой главе излагается микроскопическая феноменологическая теория кристаллического электрического поля, используемая для описания взаимодействия $4f$ -электронов иона РЗМ с КЭП. Показано, как эмпирические параметры гамильтониана КЭП, подлежащие определению из спектров НМРТН, связаны с дважды дифференциальным сечением рассеяния на переходах между уровнями расщепленного в КЭП основного мультиплета иона РЗМ.

Во второй главе приведен обзор исследований других авторов по изучению интерметаллидов РЗМ. При этом главное внимание уделяется работам, выполненным с помощью НМРТН. Описаны результаты экспериментальных исследований различных групп изоструктурных семейств соединений РЗМ и рассмотрены полученные при этом результаты и подходы к учету влияния электронов проводимости на КЭП. Коротко обсуждены теоретические модели, разработанные для интерпретации результатов, получаемых в экспериментах по неупругому рассеянию нейтронов. Рассмотрены возможности альтернативных методов исследования КЭП в металлах. В конце главы сформулированы задачи, решаемые в диссертации.

В третьей главе описаны спектрометры неупругого рассеяния нейтронов, на которых проводились эксперименты: спектрометры обратной геометрии с бериллиевым фильтром перед детектором на импульсных реакторах ИБР-30, ИБР-2 и спектрометр прямой геометрии на стационарном исследовательском реакторе ВВР-М ИЯИ АН УССР. Излагается развитая в работе методика извлечения характеристик КЭП из спектров неупругого рассеяния нейтронов.

Суть этого метода состоит в том, что обработка проводится в два этапа. На первом этапе используются только положения пиков в спектрах НМРТН и отбираются соответствующие им возможные комбинации параметров КЭП, а на втором этапе лучший набор параметров определяется из числа найденных на первом этапе, сравнением рассчитанных с учетом функции разрешения спектров с экспериментально измеренными. При этом была решена задача учета вклада фононов в спектр. Метод был реализован в виде системы фортрановских программы для ЭВМ.

Описаны условия изготовления, обработки и аттестации используемых в экспериментах интерметаллических соединений, приведены определенные по рентгеновским данным параметры решетки исследованных соединений.

Приводятся результаты систематических исследований интерметаллидов RNi_5 ($R = Ce, Pr, Nd, Tb, Ho, Er$) RCu_5 ($R = Ce, Pr, Nd$) с помощью НМРТН. В качестве примера на рис.1 представлены спектры неупругого рассеяния нейтронов на образце $HoNi_5$ (точки) для трех температур. Сплошная линия - расчетный спектр с набором параметров КЭП, определенным в качестве наилучшего. На рис.2 показана схема уровней расщепленного в КЭП основного мультиплета 5I_8 иона Ho^{+3} в $HoNi_5$.

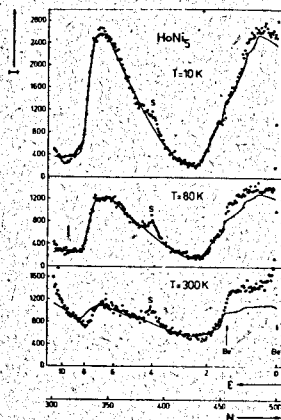


Рис.1. Спектры неупругого рассеяния нейтронов от образца $HoNi_5$ (точки). Сплошная линия - расчетные спектры. Ве' и Ве - положение бериллиевой предграницы и границы. S - пик, обусловленный спецификой работы реактора ИБР-30, ϵ - передача энергии в мэВ, N - номер канала шириной 64 мкс, I - полное число отсчетов на канал.

Рис.2. Схема уровней расщепленного в КЭП основного 5I_8 мультиплета иона Ho^{+3} в соединении $HoNi_5$. E - энергия уровней в мэВ, Г-теоретико-групповые обозначения уровней, $\sum a_m |m_D\rangle$ - волновые функции уровней.

21,34	Γ_4	0,9991(±0) - 0,0441(±2) + 0,0091(±4)
18,37	Γ_4	0,0341(±5) - 0,1151(±1) + 0,9931(±7)
13,89	Γ_4	0,6671(±6) - 0,3331(0) + 0,6671(6)
12,71	Γ_2	0,707(1-6) + 1(6)
9,60	Γ_2	0,674(±5) - 0,478(±1) + 0,065(±7)
7,99	Γ_2	0,035(±8) + 0,645(±2) - 0,762(±4)
7,55	Γ_4	0,707(1-3) - 1(3)
3,22	Γ_4	0,2251(±6) + 0,9421(0) - 0,2251(6)
2,32	Γ_4	0,4841(±5) + 0,6711(±1) - 0,084(±7)
0,70	Γ_2	0,0271(±8) + 0,762(±2) - 0,647(±4)
0,00	Γ_4	0,707(1-3) - 1(3)

соответствующая найденному набору параметров КЭП. Аналогичные результаты были получены и для других соединений RNi_5 и RCu_5 . В $CeNi_5$ не наблюдалось магнитного рассеяния нейтронов, а для $NdCu_5$ в рамках существующей модели не удалось подобрать параметры КЭП, которые описывали бы спектры как в пара-, так и в феррофазе.

Поскольку структура основного мультиплета в КЭП существенно определяет некоторые макроскопические свойства, в диссертации приведены результаты вычислений магнитной части удельной теплоемкости, магнитной восприимчивости, полевой зависимости намагниченности ниже точки Кюри и других на основе параметров КЭП, определенных в экспериментах по НМРТН с привлечением соответствующих моделей. Из сравнения расчетов с экспериментально измеренными значениями делается вывод о достаточности используемых моделей для описания макросвойств. На рис.3 показана зависимость обратной магнитной восприимчивости от температуры в случае соединения $ErNi_5$. Сплошная линия - расчет с набором параметров КЭП, определенным с помощью неупругого рассеяния нейтронов, точки - экспериментальные результаты*/. На рис.4 приведена зависимость намагниченности $HoNi_5$ от внешнего поля ниже

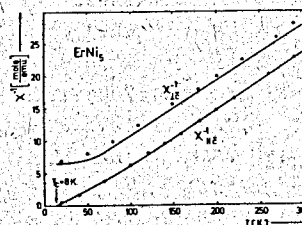


Рис.3. Зависимость обратной восприимчивости $ErNi_5$ от температуры параллельно $\chi_{||}^{-1}$ и перпендикулярно χ_{\perp}^{-1} оси \vec{c} . Точки - экспериментальные значения из работы */ , сплошная линия - расчет.

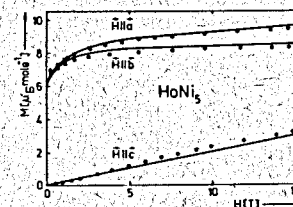


Рис.4. Полевая зависимость намагниченности для трех направлений в кристалле $HoNi_5$ при температуре $T = 1,5K$. Точки - экспериментальные значения из работы */ , сплошная линия - расчет.

точки Кюри. Так же, как на рис.3, сплошная линия - расчет, точки - результат эксперимента */.

*) Nait-Saada A. Contribution a l'etude du magnetisme 3d et 4f dans les composés hexagonaux RNi_5 entre les terres rares et le nickel. - These, Grenoble University, 1980, 137 p.

В случае соединения $CeAl_5$ проведено подробное обсуждение результатов измерений НМРТН и удельной теплоемкости в области температур от 0,3К до 9К и сделаны выводы о природе наблюдаемых аномалий в теплоемкости.

Проведен анализ полученных параметров КЭП с точки зрения учета влияния электронов проводимости на формирование кристаллического электрического потенциала. Изложены результаты экспериментального определения градиентов КЭП в случае ионных соединений RF_3 ($R = La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd$) методом возмущенных угловых γ - γ корреляций и проводится их сравнение с результатами экспериментов по оптической спектроскопии на этих же соединениях.

Сравнение значений параметров A_2^0 , определенных методом нейтронной спектроскопии и с помощью γ - γ угловых корреляций ⁴³, позволило сделать выводы о величине различных вкладов в A_2^0 от электронов проводимости в случае соединений RN_5 (A_2^0 - имеет смысл усредненного по радиальной части волновой функции градиента КЭП).

В четвертой главе приводятся результаты экспериментального и теоретического изучения взаимодействия возбуждений "Переходы между уровнями КЭП" с фононами и электронами проводимости.

Первая часть главы посвящена экспериментальному поиску связанных квадруполь-фононных возбуждений в ван-флековском парамагнетике $PrNi_5$ с помощью неупругого рассеяния нейтронов на монокристаллическом образце. Дано описание теоретической модели ⁴⁴, предсказывающей появление взаимодействия квадрупольных и фононных возбуждений в области пересечения соответствующих мод, и выполнены расчеты для случая соединения $PrNi_5$. Проведенный анализ экспериментальных результатов, полученных с помощью трехосного спектрометра, дал указание на существование предсказанного эффекта.

Во второй части главы рассматриваются причины возникновения аномально больших ширин переходов между уровнями КЭП и их температурная зависимость, наблюдаемая с помощью НМРТН в соединениях $PrAl_2$ и $PrNi_2$. Для этого с гамильтонианом, где наряду с взаимодействием 4 f-электронов с КЭП учитывалось их взаимодействие с электронами

⁴³ Devare S.H., Dillay R.G., Malik S.K., Dhar S.K., Devare H.G. Study of the quadrupole interaction of ^{111}Cd in RM_5 compounds. Phys.Int., 1981, v.10, p.949-952.

⁴⁴ Aksenov V.L., Fraunhaim Th., Flakida N.M., Schreiber J. Magneto-vibrational excitations in $PrAl_2$. J.Phys. F, 1981, v.11, p. 905-913.

проводимости, проведено вычисление ширин линий магнитных возбуждений. Получены аналитические выражения для зависимости ширин переходов КЭП от температуры и схемы уровней, в случае соединений $PrAl_2$ и $PrNi_2$. На рис.5 сплошной линией показана вычисленная зависимость ширины перехода между уровнями КЭП в зависимости от температуры для соединения $PrAl_2$. Точки - значения ширины, определенные в экспериментах по НМРТН. Сравнение результатов расчета и эксперимента позволило сделать выводы о природе наблюдаемых аномалий в ширинах линий соединений $PrAl_2$ и $PrNi_2$. В частности, предлагаемая модель объяснила резкое уменьшение ширины при переходе в ферромагнитное состояние $PrAl_2$.

В заключении изложены основные результаты работы и коротко рассмотрены возможные пути дальнейшего исследования затронутых в диссертации вопросов. К основным результатам работы относятся:

1. Создание методики обработки экспериментальных спектров НМРТН с целью определения характеристик взаимодействия 4f электронной

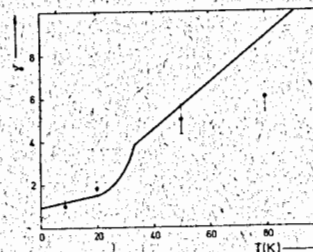


Рис.5. Зависимость ширины линии магнитных возбуждений в $PrAl_2$ от температуры (сплошная линия). Точки - экспериментальные значения ширин (мэВ).

оболочки с КЭП в соединениях с гексагональной точечной симметрией иона редкой земли.

2. Систематическое исследование кристаллического электрического поля в ряду изоструктурных соединений RN_5 ($R = Ce, Pr, Nd, Tb, Ho, Er$) и RCu_5 ($R = Ce, Pr, Nd$) с гексагональной точечной симметрией иона РЗМ в кристалле.

3. Изучение градиентов КЭП в ряду непроводящих соединений RF_3 ($R = La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd$)

методом возмущенных γ - γ угловых корреляций и их сравнение с данными оптической спектроскопии.

4. Обоснование возможности определения отдельных вкладов от электронов проводимости в градиент КЭП с помощью совместного анализа результатов измерений НМРТН и электростатической части сверхтонкого взаимодействия. Определение обменного вклада от электронов проводимости в градиент КЭП для соединений RN_5 ($R = Pr, Nd, Tb, Dy, Er, Tm$)

5. Эксперименты по неупругому рассеянию нейтронов на монокристалле $PrNi_5$, в результате анализа которых получено указание на существование гибридизации фононных и квадрупольных возбуждений.

6. Объяснение anomalно большой ширины переходов между уровнями КЭП и ее температурной зависимости для соединения PrAl_2 в рамках модели распада магнитного возбуждения на пару электрон-дырка в море свободных электронов.

Результаты, изложенные в диссертации, опубликованы в работах:

1. Andreef A., Goremychkin E.A., Griessmann H., Lippold B., Matz W., Chistyakov O.D., Savitskii E.M. Crystal Field Investigation on PrMg_3 . - Phys. Stat. Sol. (b), 1980, v.98, p.283-287.
2. Горемычкин Е.А., Мюле Э. Методы определения параметров кристаллического поля на основе экспериментальных данных по неупругому рассеянию тепловых нейтронов в редкоземельных соединениях. - Дубна, 1983. - 7с. (Сообщение /Объедин-т ядер.исслед.: P3-83-172).
3. Василькевич А.А., Горемычкин Е.А., Иваницкий П.Г., Кротенко В.Т., Мюле Э., Матц В., Пасечник М.В., Слисенко В.И. Изучение неупругого парамагнитного рассеяния нейтронов с помощью время-пролетного спектрометра. - Укр.физ.журнал, 1983, т.28, №2, с.272-275.
4. Alekseev P.A., Goremychkin E.A., Lippold B., Muhle E., Sadikov I.P. Crystal Field Splitting in NdAl_3 Studied by Inelastic Neutron Scattering. - Phys. Stat. Sol. (b), 1983, v.119, p.651-658.
5. Andreef A., Goremychkin E.A., Griessmann H., Kaun L.P., Lippold B., Matz W., Chistyakov O.D., Savitskii E.M., Ivanitskii P.G. The Crystal Field in the Hexagonal Compound PrCu_5 . - Phys. Stat. Sol. (b), 1981, v.108, p.261-267.
6. Matz W., Lippold B., Goremychkin E.A., Andreef A., Griessmann H., Frauenheim Th. Study of the Crystalline Electric Field in Praseodymium intermetallics. - In: Crystalline Electric Field Effects in f-Electron Magnetism, ed. R.P. Guertin, W. Suski, Z. Zolnierrek, New York and London: Plenum Press, 1982, p.69-82.
7. Goremychkin E.A., Muhle E., Ivanitskii P.G., Krotenko V.T., Pasечник M.V., Slisenko V.V., Vasilkevich A.A., Lippold B., Chistyakov O.D., Savitskii E.M. Crystal Electric Field Splitting in TbNi_5 and ErNi_5 Studied by Inelastic Neutron Scattering. - Phys. Stat. Sol. (b), 1984, v.121, p.623-631.
8. Горемычкин Е.А., Липпольд Б., Мюле Э. Изучение кристаллического поля в интерметаллическом соединении HoNi_5 с помощью неупругого рассеяния нейтронов. - Дубна, 1983. - 6с. (Сообщение/Объедин-т ядерных исслед.: P14-83-738).
9. Аксенов В.Л., Горемычкин Е.А., Фрауенхайм Т. Кристаллические поля в $4f$ -электронных системах. Рассеяние нейтронов. - В кн.: IV Международная школа по нейтронной физике. Дубна, 1982, ДЗ, 4-82-704, с.389-409.

10. Андреев А., Горемычкин Е.А., Гриссманн Х., Каун Л.П., Липпольд Б., Матц В., Фрауенхайм Т. Определение кристаллических уровней иона Pr^{3+} в PrNi_5 и PrMg_3 методом неупругого рассеяния нейтронов. - Тез. докл. Всесоюзной конференции по физике магнитных явлений. Изд-во ФТИИТ АН УССР, Харьков, 1979, с.310.
11. Горемычкин Е.А., Мюле Э., Мюллер Х., Натканец И., Фрах П. Неупругое рассеяние нейтронов и удельная теплоемкость интерметаллического соединения CeCu_5 . Дубна, 1984. - 8с. (Сообщение /Объедин. ин-т ядер.исслед.: P14-84-367).
12. Goremychkin E.A., Muhle E., Popescu Mihaela. Crystal Field in TbNi_5 and ErNi_5 studied by neutron scattering. In: Proc. International Conference on "Magnetism of Rare Earth and Actinides", ed. E. Burzo, M. Rogalski, Bucharest: Central Institute of Phys., 1983, p.87-91.
13. Горемычкин Е.А., Мюле Э., Натканец И., Попеску М., Чистяков О.Д. Исследование кристаллического электрического поля в соединении NdNi_5 с помощью неупругого магнитного рассеяния тепловых нейтронов. - Дубна, 1984. - 12 с. (Препринт /Объедин-т ядер. исслед.: P14-84-632).
14. Budzynski M., Goremychkin E.A., Kochetov O.I., Latuszynski A., Mikolajczak P., Muhle E., Muminov A.I., Subotowicz M. Electric Field Gradient at Gd in Gadolinium and Rare Earth Trifluoride Single Crystals. - Phys. Stat. Sol. (b), 1984, v.123, p.355-362.
15. Горемычкин Е.А., Мюле Э. Вклад электронов проводимости во внутрикристаллический потенциал в интерметаллических соединениях редкоземельных металлов. - Письма в ЖЭТФ, 1984, т.39, вып.10, с.469-471.
16. Aksenov V.L., Goremychkin E.A., Muhle E., Frauenheim Th., Buhner W. Coupled quadrupole-phonon excitations inelastic neutron scattering on Van Vleck paramagnet PrNi_5 . - Physica, 1983, v.120B, p. 310-313.
17. Аксенов В.Л., Горемычкин Е.А. Влияние магнитоупругого взаимодействия и $s-f$ обмена на свойства магнитных экситонов в PrAl_2 . - Тез. докл. Всесоюзной конференции по физике магнитных явлений, Изд-во Тульского пединститута, Тула, 1983, с.157-158.
18. Andreef A., Frauenheim Th., Goremychkin E.A., Griessmann H., Lippold B., Matz W., Chistyakov O.D., Savitskii E.M. Crystal Field in the Laves Phase Compound PrNi_2 . - Phys. Stat. Sol. (b), 1982, v.111, p.507-512.

19. Аксенов В.Л., Горемычкин Е.А., Фрауенхайм Т. Ширины линий магнитных экситонов в кубических соединениях фазы Лавеса PrAl_2 , PrNi_2 . - ФММ, 1983, т.55, вып.3, с.496-502.
20. Aksenov V.L., Goremychkin E.A., Frauenheim Th. Line width of magnetic excitations in the cubic Laves phase compounds PrAl_2 , PrNi_2 . - Physica, 1983, v.120B, p.176-179.

Рукопись поступила в издательский отдел
22 ноября 1984 года.