

УДК 538.97

НЕЙТРОННАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ: НАЧАЛЬНЫЙ ЭТАП СТАНОВЛЕНИЯ В НАШЕЙ СТРАНЕ И НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

© 2021 г. П. А. Алексеев^{1,*}, А. С. Иванов^{2,**}

¹ Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, Россия

² Институт Лауэ–Ланжевена, Гренобль, Франция

*E-mail: pavel_alekseev-r@mail.ru, Alekseev_PA@nrcki.ru

**E-mail: aivanov@ill.fr

Поступила в редакцию 01.06.2020 г.

После доработки 01.06.2020 г.

Принята к публикации 18.08.2020 г.

Представлен краткий обзор вопросов, касающихся становления, развития и перспектив физических исследований методом неупругого рассеяния тепловых нейтронов. Направления этих исследований определяются уникальными возможностями нейтронной методики для изучения атомно-колебательных и магнитных возбуждений в конденсированных средах.

DOI: 10.31857/S0023476121020028

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение

1. Исторические вехи становления нейтронной спектроскопии в нашей стране
 2. Развитие нейтронной спектроскопии в ИАЭ им. И.В. Курчатова
 3. Основные результаты некоторых комплексных спектроскопических исследований
 - 3.1. Магнитные и фоновые спектры систем с сильными электронными корреляциями
 - 3.2. Возбуждения кристаллической решетки и магнитная динамика некоторых ВТСП
- Заключение. Перспективы развития нейтронных исследований

ВВЕДЕНИЕ

Для начала определим различие между научными результатами, получаемыми в ходе дифракционных и спектроскопических экспериментов, независимо от вида используемого излучения. Из экспериментов по дифракции получают данные о структуре вещества, т.е. узнаем, как устроено вещество, а из спектроскопических — т.е. данных о динамике — получаем информацию о природе и характере сил и взаимодействий, определяющих основные свойства, в том числе строение вещества. Это относится в полной мере и к нейтронным методам исследования конденсированных сред: нейтронной дифракции и нейтронной спек-

троскопии, иными словами — упругому и неупругому рассеянию нейтронов.

Неупругое рассеяние тепловых нейтронов в настоящее время служит основным универсальным методом для исследования атомной и магнитной динамики самых разнообразных материалов. Метод был предложен в середине прошлого столетия и продолжает совершенствоваться по настоящее время. Его конкурентоспособность основывается на совокупности присущих тепловым нейтронам особенностей, важных с точки зрения приложения к задачам физики конденсированного состояния. В чем же заключаются столь приятные достоинства нейтронных методов?

Их несколько:

— нейтрон относительно легко проникает в глубь вещества в отличие от заряженных частиц и электромагнитного излучения (в том числе рентгеновского), т.е. это объемно-чувствительный метод;

— важной особенностью является соответствие энергии и импульса нейтронов характерным величинам энергии и импульса квазичастиц в твердом теле — фононов, магнонов, других возбуждений, необходимых для понимания законов формирования конденсированного состояния вещества;

— нейтрон взаимодействует не только с ядрами, но и с магнитными моментами в веществе, так как несет спин ($S = 1/2$), причем масштаб силы ядерного и магнитного взаимодействия (сече-

ний рассеяния) примерно одинаков, что делает нейтронное излучение эффективным и уникальным средством для изучения магнетиков;

– амплитуды ядерного рассеяния не имеют систематической зависимости от заряда или массы ядра. Это позволяет различать соседние элементы и даже изотопы одного элемента в многокомпонентных системах, а также исследовать системы с сильно различающимися атомными номерами;

– наконец, существенным обстоятельством оказалось то, что типичные параметры пучков тепловых нейтронов позволяют изучать возбуждения в твердом теле с характерными временами порядка 10^{-11} – 10^{-13} с. Это принципиально важно при исследовании систем с сильными электронными корреляциями (см. ниже), для которых характерны быстрые спиновые флуктуации.

Все приведенные особенности гарантируют методу рассеяния нейтронов востребованность еще на длительный период времени в будущем.

1. НЕКОТОРЫЕ ИСТОРИЧЕСКИЕ ВЕХИ СТАНОВЛЕНИЯ НЕЙТРОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ В НАШЕЙ СТРАНЕ

Для российского читателя несомненный интерес представляет то, каким образом происходило развитие экспериментов по нейтронной спектроскопии в Советском Союзе и в Российской Федерации. Рассмотрим здесь кратко основные “вехи” становления этого направления исследований, не претендуя на полноту и объективность, так как этот вопрос заслуживает более профессионального научно-исторического рассмотрения.

Нейтронная спектроскопия в нашей стране начала развиваться в конце 50-х–начале 60-х годов прошлого столетия, практически одновременно в ряде Институтов, где, очевидно, для этого была подготовлена определенная “почва”. Это Институт атомной энергии им. И.В. Курчатова (Москва), Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе (ФТИ) (Ленинград), Институт физики металлов АН СССР (ИФМ) (Свердловск) и Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ) (Дубна).

Можно считать, что предтеча нейтронной спектроскопии – это исследования спектров замедления нейтронов (осуществляемые, как правило, методом времени пролета) в интересах оптимизации ядерных реакторов, в которых в качестве замедлителя в основном использовались графит, вода (легкая и тяжелая), т.е. конденсированные среды, говоря современным языком. Очевидная мысль, что если нейтрон изменяет свою энергию, то это в той или иной степени отражает спектр возбуждений материала, на котором он рассеивается, привела к развитию в США и у нас

в стране идеи о возможности использования нейтронов для исследования атомной динамики твердых тел.

В Институте атомной энергии (ИАЭ) первыми, кто решил заняться экспериментальным развитием этой идеи, были М.И. Певзнер и В.И. Мостовой, соратники И.В. Курчатова. Они, опираясь на аспирантов М.Г. Землянова и Н.А. Черноплекова (первый), и молодых специалистов, высвободившихся с оборонной тематики, И.П. Садикова и А.А. Чернышова (второй), начали отработку прототипов времяпролетных спектрометров на запущенных к тому времени в ИАЭ реакторах МР и ИРТ-1000 соответственно. Последний был хотя и сравнительно маломощный (тепловая мощность реактора составляла 1 МВт), но зато специализированный под пучковые исследования. В начале 60-х годов этим группам, уже на пучках ИРТ-1000, удалось создать действующие прототипы однодетекторных, с использованием газовых пропорциональных счетчиков нейтронов на основе $^{10}\text{BF}_3$, спектрометров с механическими вращающимися прерывателями и вертикальной плоскостью рассеяния. В спектрометре группы Мостового использовался прерыватель с искривленными щелями, что позволяло осуществить одномоментно и временную модуляцию, и монохроматизацию пучка тепловых нейтронов, а спектрометр группы Певзнера использовал нейтроны с энергией меньше 5 мэВ за счет наличия бериллиевого фильтра. Именно на этом приборе в начале 60-х выполнены первые опубликованные измерения фононных спектров ванадия и никеля.

В конце 60-х годов оба методических направления получили логическое развитие. На реакторе ВВР-М в Киеве, одном из наиболее мощных (10 МВт) среди исследовательских реакторов того времени, по инициативе сотрудников ИАЭ (И.П. Садиков, А.А. Чернышов, И.П. Еремеев) был создан спектрометр тепловых нейтронов. Он был сконструирован по комбинированной схеме (прерыватель + кристалл-монохроматор) в многодетекторном варианте (диапазон углов рассеяния более 90°) на основе ^3He -счетчиков. В ИАЭ на модернизированном реакторе ИРТ-М (Н.А. Черноплеков, М.Г. Землянов, А.Е. Головин, С.П. Миронов, Ю.Л. Шитиков, Г.Ф. Сырых) был создан прибор с пропановым ($T \sim 80$ К) источником холодных нейтронов, охлаждаемым Ве-фильтром и прерывателем (частота вращения до 200 Гц) с искривленными щелями, что позволило получить достаточно высокое разрешение (~ 0.5 мэВ по упругой линии с $E = 5$ мэВ) в сочетании с большим размером пучка. Спектрометр был достаточно светосильным, имел диапазон углов регистрации от 15° до 90° в вертикальной

плоскости рассеяния и отличался низким уровнем фона. Оба эти прибора соответствовали мировому уровню своего времени, спектрометр в ИАЭ эффективно работал до 90-х годов, что позволило получить интересные и значимые физические результаты, часть из которых кратко представлена ниже. Отметим, что к этому периоду относятся и основополагающие работы Ю.М. Кагана по теории неупругого рассеяния нейтронов в твердых телах.

В конце 60-х—начале 70-х годов в ИАЭ получили развитие и другие типы спектрометров, такие как трехосный спектрометр на ИРТ-М (в дальнейшем — реактор ИР-8) и времяпролетный спектрометр обратной геометрии на импульсном источнике нейтронов на основе ускорителя электронов “Факел”.

Трехосный спектрометр АТОС (М.Г. Землянов, Н.А. Черноплеков, П.П. Паршин, А.Ю. Румянцев) проектировался в ИАЭ в конструкторском бюро под руководством И.В. Наумова по классической консольной схеме с плоскими кристаллами монохроматора и анализатора и удовлетворял передовым техническим требованиям (точность позиционирования по углу 0.01° , возможность сканирования угла рассеяния и монохроматора, и анализатора). Отметим, что это был проект в рамках двустороннего сотрудничества с венгерскими физиками: “железо” проектировалось и изготавливалось в СССР, а система управления — в Венгрии. Изготовлено было два идентичных прибора, один для реактора ИР-8, другой для ВВР-М в Будапеште. Оба прибора были успешно запущены в первой половине 70-х и активно эксплуатировались по широкому спектру задач, перейдя в дальнейшем на цифровую систему управления.

В те же годы на базе импульсного источника нейтронов ускорителя электронов “Факел” (мощность 25 кВт) был создан спектрометрический комплекс (основные исполнители И.П. Садиков, А.А. Чернышов, С.Н. Ишмаев) в обратной геометрии с анализаторами на основе комбинации кристалла пиролитического графита и Ве-фильтра. Комплекс предназначался для изучения квантовых и неупорядоченных систем и исходно располагал установкой высокого давления в комбинации с гелиевым криостатом. Это позволило получить уникальные для своего времени результаты по влиянию высокого давления (до 11 кбар) на плотность фононных состояний молекулярного водорода в твердой фазе.

Практически так же, как и в Москве, импульс развития нейтронной тематике в Ленинграде был придан И.В. Курчатовым. В конце 1958 г. (за год до пуска реактора ВВР-М на Гатчинской площадке) И.В. Курчатов предложил А.Ф. Иоффе, быв-

шему в этот момент директором вновь созданного Института полупроводников, начать работы по использованию нейтронных пучков ядерных реакторов для исследования динамики твердых тел. А.Ф. Иоффе поручил эту работу лаборатории М.М. Бредова, который организовал группу по созданию нейтронного спектрометра под руководством Н.М. Окуновой. Она была командирована для стажировки к М.И. Певзнеру в ИАЭ и получила опыт работы с нейтронами в сотрудничестве с М.Г. Земляновым и Н.А. Черноплековым.

Создание времяпролетного спектрометра “Нейтрон-1” на ВВР-М было завершено в конце 60-х, и он успешно эксплуатировался в течение более 10 лет. Работы на нем послужили успешному развитию исследований плотности фононных состояний в металлах и сплавах, в том числе выявлению роли ближнего порядка в формировании фононного спектра. В 1975 г. группой (позднее лаборатория) Н.М. Окуновой в конструкторском бюро ФТИ им. А.Ф. Иоффе был создан трехосный нейтронный спектрометр “Нейтрон-3” (исполнители С.Б. Вахрушев, Я.Г. Гросс, Н.М. Окунова, Э.Л. Плаченова, В.И. Погребной, Р.Ф. Сураманов). Основным направлением исследований на этом спектрометре явилось изучение мягких мод в сегнетоэлектриках, в первую очередь релаксорах.

В Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ (Дубна) в 60-е и 70-е годы получила развитие времяпролетная спектроскопия по схеме обратной геометрии, сначала на импульсном реакторе ИБР-30, а в дальнейшем и на новом, гораздо более мощном реакторе ИБР-2 (мощность в импульсе 1600 МВт, длина импульса 300 мкс, частота 5 Гц, средняя мощность — 2 МВт). Группой, которую многие годы возглавлял польский профессор И. Натканец, был разработан спектрометр-дифрактометр KD-SOG (Краковско-Дубненский спектрометр обратной геометрии), установленный на 100-метровой пролетной базе ИБР-2. Это обеспечило неплохое разрешение и широкий диапазон передач энергии, что важно для исследований по динамике высокомолекулярных соединений и других исследований по физике конденсированного состояния, проводящихся на этом приборе. На том же реакторе группой физиков из Физико-энергетического института им. А.И. Лейпунского (Обнинск, Калужская область) под руководством В.П. Парфенова был создан спектрометр прямой геометрии DIN-2PI с многодетекторной системой регистрации. Он использовался в основном для исследований динамики сплавов металлов и изучения сверхтекучего гелия.

Важную роль в развитии нейтронных исследований в стране сыграло решение Правительства о создании исследовательского Центра на базе построенного в 1966 г. реактора ИВВ-2 (мощность 10 МВт) в Свердловской области (г. Заречный). Научные исследования, в основном по магнетизму и радиационным дефектам, проводились на нейтронных пучках силами ИФМ АН СССР под руководством С.К. Сидорова в коллективах, возглавляемых Б.Н. Гощицким (эксперимент) и Ю.А. Изюмовым (теория). Идея развития исследований по нейтронной спектроскопии реализовалась в начале 70-х, когда на реакторе был запущен трехосный спектрометр (Б.Н. Гощицкий, Ю.Н. Поносов, Ю.С. Михайлов) с обеспечением охлаждения монокристаллического образца до гелиевых температур, что было уникальным оборудованием для спектрометров страны того времени. Это позволило, например, выполнить измерения фононов монокристалла свинца в сверхпроводящем состоянии.

Позднее, начиная с 1977 г., на реакторе ИВВ-2 вступил в работу второй экземпляр спектрометра “Нейтрон-3”, разработанного в ФТИ им. А.Ф. Иоффе. Из конструктивных особенностей этих приборов отметим двухкристальную схему монохроматора, которая, несмотря на определенные технические преимущества, не получила в дальнейшем большого распространения в конструкциях трехосных инструментов.

Надо отметить еще одно немаловажное обстоятельство. В 70-х годах XX века в СССР сложилось “нейтронное сообщество”, объединившее ученых ряда научных центров страны, где выполнялись эксперименты по рассеянию нейтронов. Особую роль в неформальном становлении нейтронного сообщества сыграли (Всесоюзные) Совещания по использованию рассеяния нейтронов в физике твердого тела. Больше половины их общего числа в течение почти 40 лет проводилась именно в г. Заречном, несмотря на сложности конца 80-х и периода 90-х годов прошлого века.

2. РАЗВИТИЕ НЕЙТРОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ В ИАЭ ИМ. И.В. КУРЧАТОВА

Становление и развитие нейтронной спектроскопии в мире и стране создали возможности исследований в области атомной и магнитной динамики. Это привело к появлению новых направлений экспериментальных исследований. Их полный обзор — отдельная задача, выходящая далеко за рамки журнальной статьи. Ниже приведем в качестве примеров, весьма кратко и не вникая во многие детали, ряд интересных и важных, на наш (субъективный) взгляд, результатов, полу-

ченных при активном участии сотрудников Курчатовского института.

Влияние легких и тяжелых примесей на фононный спектр металлов. Формирование фононного спектра металла с примесями (как легкими, так и тяжелыми) рассматривалось в качестве интересной физической задачи как с точки зрения теории твердого тела, так и с научно-практической точки зрения, поскольку фононный спектр определял термодинамические и кинетические свойства металлов. Деформация фононного спектра могла влиять и на сверхпроводящие свойства, а в 60-е годы, когда эта задача была сформулирована и решалась, каждый градус увеличения критической температуры в вопросах, связанных со сверхпроводимостью, был важен. Нейтронные исследования спектров колебаний выполнялись на время-пролетном спектрометре реактора ИРТ-М. Изучались системы на основе V с тяжелыми примесями Ta, W, U и на основе Cu с примесью Вe. Эти исследования в полной мере показали справедливость представления о связи закона рассеяния с фононным спектром и позволили установить основные эффекты в динамике решетки, обусловленные примесными атомами [1–6]. Легкие и тяжелые примеси приводят соответственно к появлению локальных (выше граничной энергии спектра колебаний матрицы) и квазилокальных (в области акустических колебаний) колебательных мод, отражающих особенности связи примесного атома с матрицей, а также деформируют спектр матрицы вблизи энергии этих (квазилокальных) мод. Соответствующие эффекты наблюдаются в термодинамике и других свойствах. Все эти явления получили объяснение в рамках теоретических работ коллектива Ю.М. Кагана.

Атомная динамика водорода в гидридах металлов и в твердом состоянии под давлением. Метод неупругого некогерентного рассеяния нейтронов открывает уникальную возможность получить ответы на вопросы, связанные с локализацией и упорядочением водорода в металлах и другими аспектами физики гидридов. Рассеивающая способность атома при некогерентном неупругом рассеянии нейтронов пропорциональна отношению σ/M . Типичное значение σ для большинства химических элементов составляет несколько барн, в то время как для водорода (протия) эта величина ~ 80 барн. Учитывая минимальную массу водорода, его рассеивающая способность более чем на порядок превосходит рассеивающую способность любого металла. Это означает, что из экспериментальных данных сразу извлекается парциальный спектр тепловых колебаний атомов водорода. Эти соображения стимулировали проведение исследований гидридов переходных и

редкоземельных металлов в середине 70-х годов прошлого века на времяпролетном нейтронном спектрометре в ИАЭ.

На основе анализа полученных экспериментальных данных было установлено, что основными факторами, влияющими на формирование спектра колебаний атомов водорода в гидридах металлов и интерметаллических соединений и связанными со взаимодействием атомов металла и водорода, являются количество различных по размерам междоузлий, доступных для внедрения водорода, и симметрия этих междоузлий. Показано, что изотопическое приближение, согласно которому энергия колебаний атомов дейтерия в дейтеридах металлов $E_D = E_H/\sqrt{2}$, где E_H — энергия колебаний водорода в соответствующем гидриде, хорошо работает в исследованных материалах [7–13].

На спектрометре обратной геометрии импульсного источника нейтронов “Факел” измерены энергия пара-орто-перехода и плотность фононных состояний поликристаллического пара-водорода при давлениях до 11 кбар (при этом плотность кристалла водорода увеличивается в 2 раза). Обнаружено, что средний квадрат амплитуды нулевых колебаний, определенный по возбуждению для пара-орто-перехода, связан с параметром кристаллической решетки обычным коэффициентом Грюнайзена порядка 2 ± 0.1 . В то же время под давлением существенно возрастает энергия оптических фононов твердого водорода, что может быть указанием на значительные ангармонические эффекты [14] в этой квантовой системе.

Электрон-фононное взаимодействие и особенности поверхности Ферми в непереходных металлах и сплавах. После запуска трехосного спектрометра АТОС в фокусе исследований оказалось электрон-фононное взаимодействие в металлах, ярче всего проявляющееся в аномалиях на кривых дисперсии фононов, связанных с особенностями экранировки электронами проводимости ионных колебаний (в частности, эффект Кона). Волновые векторы, на которых наблюдаются такие аномалии, связаны с размерами и топологией двумерной границы между занятыми и свободными состояниями электронов проводимости в обратном пространстве — поверхности Ферми. Особое значение имело экспериментальное обнаружение новых, теоретически предсказанных Ю.М. Каганом и Е.Г. Бровманом “трехчастичных” аномалий в фононном спектре алюминия [15], что стало экспериментальным подтверждением разработанной теоретиками теории простых металлов. Изучение влияния электронов проводимости на формирование тонкой структуры фононных спектров было продолжено на группе непереход-

ных металлов Mg, Zn, Cd с гексагональными кристаллическими решетками [16–18]. Для исследований последнего в ИАЭ был выращен большой (даже по тем временам) монокристалл из непоглощающего нейтроны изотопа ^{110}Cd , на котором впервые были измерены кривые дисперсии фононов и детально изучены аномалии в групповой скорости фононов. Эти работы проводились в сотрудничестве с теоретиками отдела Ю.М. Кагана, создававшими адекватную теорию этих явлений, и показали возможность исследования топологии поверхности Ферми таким способом.

В дальнейшем это направление развивалось с учетом накопленных знаний в применении к неупорядоченным сплавам металлов. Время жизни свободных электронов в таких системах оказывается слишком коротким по сравнению с чистыми упорядоченными металлами. Поэтому обычные “электронные” методы изучения поверхности Ферми оказываются неприменимыми. В то же время аномалии спектров колебаний кристаллической решетки остаются достаточно выраженными. Эти работы получили развитие и стали основой нового подхода к исследованию поверхности Ферми в металлических сплавах через анализ аномалий Коновского типа на фононных дисперсионных кривых [19].

Эффекты кристаллического электрического поля в редкоземельных интерметаллических соединениях. В начале 70-х годов по инициативе И.П. Садикова были развернуты работы по исследованию магнитных возбуждений в редкоземельных интерметаллидах — расщепления состояний f -электронов в кристаллическом электрическом поле (КЭП). Это была новая тематика, ориентированная на спектроскопическое изучение природы низкотемпературных особенностей физических свойств сильно-коррелированных электронных систем [20–22], потребовавшая внедрения техники низких (гелиевых) температур в нейтронный эксперимент. Надо сказать, что это были пионерские работы не только в стране, но и в мире. В частности, было показано, что расщепление уровней f -электронов под действием КЭП в металле однозначно связано с локальной симметрией кристаллического окружения редкоземельного иона и количественно определяется как зарядами ионов ближайшего окружения, так и электронами проводимости. В дальнейшем эти работы активно развивались как в ИАЭ [23], так и в ОИЯИ [24] и ИФМ [25], и заложили основу для последующего развития нейтронных исследований тяжело-фермионных и промежуточно-валентных соединений.

Современное состояние и перспективы. Отметим, что в 60–70-е годы имело место сотрудничество между коллективами исследователей как в

нашей стране, так и в зарубежных центрах. Выше отмечалось, что физики ИАЭ сотрудничали с физиками ленинградского ФТИ и физиками из Венгрии по методическим вопросам. Начало физических исследований на нейтронных пучках также вылилось в сотрудничество, уже научное. Так, по инициативе ИФМ совместно изучалось влияние сверхпроводящей щели на время жизни фононов. Эффекты кристаллического поля стали темой совместных работ ИАЭ с ОИЯИ и ИФМ.

Во второй половине 70-х стало ясно, что международный Институт Лауэ–Ланжевена (ИЛЛ) в Гренобле (Франция) на базе высокопоточного ядерного реактора мощностью 57 МВт становится лучшим в мире нейтронным центром по методическим возможностям. Это инициировало сотрудничество ряда отечественных институтов с физиками ИЛЛ. Для ИАЭ это сотрудничество началось с исследований электрон-фононного взаимодействия в непереходных металлах и их сплавах. Затем сотрудничество расширилось на изучение магнитных и фононных спектров в сильно-коррелированных редкоземельных соединениях. В дальнейшем, уже во второй половине 80-х и в 90-е годы, сотрудничество получило быстрое развитие, стало многосторонним и многоплановым, в него были вовлечены сотрудники французского Центра исследований в Сакле. Были получены результаты мирового уровня по линии квазикристаллов и аморфных систем, а затем и по тематике новых высокотемпературных сверхпроводников и физике различных сильно-коррелированных систем, при участии всех перечисленных выше российских центров и совместно с учеными из ведущих Европейских нейтронных центров (Великобритания, Швейцария, Франция, Германия). Остановимся на некоторых результатах этого этапа.

3. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ НЕКОТОРЫХ КОМПЛЕКСНЫХ СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Кратко представим основные научные результаты ряда нейтроно-спектроскопических исследований, для которых характерен комплексный подход (магнитная и решеточная динамика) и направленность на решение актуальных физических задач.

3.1. Магнитные и фононные спектры систем с сильными электронными корреляциями

Наиболее известные и яркие проявления сильных электронных корреляций — это тяжело-фермионные (ТФ) системы, системы с промежуточной валентностью (ПВ), кондо-изоляторы (КИ) (последние — это, пожалуй, самый яркий эффект

в этом ряду), к этой же категории относятся купратные высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП). Методом нейтронной спектроскопии получено много важных и уникальных сведений об этих системах. Фактически результаты исследований спектров f -электронных возбуждений позволили установить границы между ТФ-, ПВ- и КИ-типами свойств. Это связано с близостью масштаба характерного времени взаимодействия нейтронов с атомами (10^{-11} – 10^{-13} с) к характерным временам спиновых флуктуаций в этом классе систем. Благодаря нейтронной спектроскопии были изучены основные взаимодействия, ответственные за формирование того или иного типа основного состояния. Изучены проявления спиновых и зарядовых флуктуаций в магнитных свойствах, в динамике решетки (в частности, проявления резонансной неадиабатичности в электрон-фононном взаимодействии в ПВ-системах [26–29]) в системах на основе Ce, Sm, Eu и Yb, в том числе в высших боридах. Результаты представлены в ряде обзоров [30–36].

Первые измерения спектров магнитного рассеяния нейтронов в ВТСП, как “2–1–4” (La_2CuO_4), так и “1–2–3” ($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$) типов, позволили сделать вывод, что эффекты КЭП в них достаточно сильны, расщепление достигает величин порядка 100 мэВ. Эффекты обменного взаимодействия приводят к дисперсии соответствующих возбуждений, а температурная зависимость ширины одноузельных возбуждений КЭП отражает изменение плотности электронных состояний при формировании щели в их спектре (позднее эта особенность была исследована детально [37]).

Изучение свойств ВТСП систем привело к заключению о возможности существования в них локальных зарядовых неоднородностей из-за сильного электрон-электронного и электрон-фононного взаимодействия. Высокая чувствительность эффектов КЭП к локальному распределению заряда, установленная в первых нейтронных работах (например, [38]), позволяет рассматривать нейтронные спектры расщепления в КЭП как хороший “тестер” наличия таких неоднородностей в материалах. В соединениях типа $R\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ редкоземельный ион R занимает позицию между двумя плоскостями CuO_2 , что позволяет использовать спектроскопию КЭП как инструмент изучения процессов допирования и соответствующего зарядового перераспределения на микроскопическом (кластерном) уровне.

Техника нейтронной спектроскопии сделала возможными непосредственное наблюдение и количественное описание механизма переноса заряда из CuO -цепочек в CuO_2 -плоскости и получение уникальной информации о формировании класте-

ров, связанных с возникновением “фрустрированного фазового разделения”. Эта идея была использована интернациональным коллективом российских и швейцарских физиков для исследования проблемы локальных зарядовых неоднородностей при различном характере допирования ВТСП на примере систем типа “1–2–3” (при изменении концентрации кислорода [39, 40] или замещении по редкоземельной позиции [41, 42]).

3.2. Возбуждения кристаллической решетки и магнитная динамика некоторых ВТСП

Представление о том, что многие необычные свойства ВТСП купратов связаны с особенностями как их кристаллического строения, так и динамики их кристаллической решетки и магнитных моментов, возникшее практически сразу после обнаружения сверхпроводимости в легированном купрате лантана, стимулировало интенсивные исследования этих соединений с помощью неупругого рассеяния нейтронов. Практически сразу после открытия ВТСП в исследованиях, развернутых в ИАЭ, были получены первые данные о смягчении частот определенных фононов при структурном фазовом переходе в $(\text{LaSr})_2\text{CuO}_4$ [43]. В рамках уже сложившихся традиций был проведен поиск аномалий Кона в этом новом соединении [44]. В дальнейшем основные работы выполнялись в сотрудничестве с Европейскими нейтронными центрами на высокопоточных источниках нейтронов [45–47].

В частности, было установлено, что кривые дисперсии фононов группы новых сверхпроводящих соединений со сложными кристаллическими решетками $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$, $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}$, Nd_2CuO_4 , Pr_2CuO_4 [48–50] в значительной мере соответствуют представлениям об ионном типе связи с экранировкой полярных колебаний при введении подвижных зарядов. Были обнаружены определенные аномалии в спектрах колебаний, связанные с электрон-фононным взаимодействием при введении свободных зарядов как в купратных, так и в других новых сверхпроводниках [51–53]. В то же время совокупность данных и сравнение с другими сверхпроводящими или аналогичными несверхпроводящими материалами в семействах “обычных” и “необычных” сверхпроводников свидетельствовали о недостаточности традиционного электрон-фононного механизма спаривания для объяснения высоких температур сверхпроводящего перехода.

При изучении атомной динамики ВТСП купратов на уровне функции плотности фононных состояний особое внимание уделялось колебаниям атомов меди и кислорода, составляющих плос-

кости CuO_2 , ответственные за явление ВТСП. Пионерскими в этом направлении стали работы [54, 55]. Для экспериментального восстановления парциальных спектров колебаний атомов меди и кислорода реализован метод изотопического контраста [56, 57]. Подробно исследованы эффекты электрон-фононного взаимодействия в системе $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ [57–59]. Для гомологического ряда ВТСП купратов на основе висмута $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_{2n+4}$ ($n = 1, 2, 3$) на уровне силового межатомного взаимодействия подтверждено распространенное представление о блочном строении этих соединений и получены свидетельства о слабости межблочного взаимодействия в купратах по сравнению с внутривблочным [60–62].

Низкочастотная динамика подсистемы магнитных моментов на ионах меди изучена на примере стехиометрических купратов Nd_2CuO_4 и Pr_2CuO_4 [63–68]. Показано, что наличие магнитных фазовых переходов в Nd_2CuO_4 и различие спектров низкоэнергетических магнитных возбуждений в этих двух соединениях определяются особенностями магнитного поведения редкоземельных ионов, которые учитываются в развитой С.В. Малеевым модели магнитной динамики этого класса соединений на основе обменных взаимодействий псевдодипольного типа [69, 70]. Установлено наличие предсказанного в этой модели фазового перехода при нулевой температуре в Pr_2CuO_4 в зависимости от магнитного поля (квантовая критическая точка) и определены критические индексы для спектрального веса и корреляционной длины квантовых критических флуктуаций [71–73]. Позднее работы по магнитной динамике купратных сверхпроводников были продолжены в рамках изучения специфического магнитного возбуждения (резонансной моды), обнаруженного в этих соединениях [74].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

НЕКОТОРЫЕ ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ НЕЙТРОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Предпринята попытка сформулировать характерные особенности и преимущества метода нейтронной спектроскопии, показать, как этот метод развивается и применяется в реальных исследованиях, проследить основные этапы становления данного научного направления в Курчатовском институте как значимом партнере в формировании Российского сегмента этой технически уникальной и содержательной платформы для изучения вещества. Не вызывает сомнений востребованность технологий нейтронного рассеяния в ближайшие десятилетия как минимального обо-

зримого срока. Каковы же видимые перспективы этого процесса?

С самого начала применения рассеяние нейтронов заняло особое, привилегированное положение как способ прямого доступа к силам межатомного сцепления в веществе. В первую очередь это позволяет понять фундаментальные основы устройства окружающей нас материи. На следующем этапе накопленные знания помогают созданию новых, не существующих в природе материалов с уникальными и нужными свойствами для развития промышленности в соответствии с требованиями общества. Неслучаен, например, тот факт, что создание основ атомных технологий в разных странах осуществлялось в научных центрах, объединявших профильные подразделения с аналогичными отделами для изучения физики твердого тела. Распространение в таких центрах исследовательских ядерных реакторов как источников интенсивных пучков нейтронов было естественным следствием этих процессов.

Массированное изучение на начальном этапе развития нейтронной спектроскопии спектров решеточных колебаний и чуть позже магнитной динамики сыграло важную роль, например, для изучения такого уникального явления, как сверхпроводимость, изначально полученная при сверхнизких температурах. Исключительно важным для его понимания стало представление о взаимодействии различных ветвей спектров возбуждений — электронов и фононов. Более высокие температуры сверхпроводящего перехода найдены в особом классе соединений, в которых электронные степени свободы связаны в необычные магнитные возбуждения. Нейтронная спектроскопия играет здесь важнейшую роль в наращивании массива знаний об этих возбуждениях, давая надежду на то, что накопленные знания вскоре приведут к качественному пониманию этого явления и откроют дорогу за счет изменения, например, магнитных свойств к созданию материалов для “комнатной” сверхпроводимости, при обычных температурах окружающей среды.

В настоящее время основные исследования различными методами рассеяния нейтронов проводятся с новыми веществами с целью изучения и понимания фундаментальных законов, которые связывают компоненты этих веществ в одно целое, и того, каким образом строение материалов связано с их свойствами и полезными функциями. Основную часть — более половины всех работ — составляют фундаментальные исследования по физике конденсированного состояния вещества, включая как упорядоченные и неупорядоченные кристаллические, так и другие материалы — аморфные, квазикристаллы, некоторые жидко-

сти и др. Оставшаяся часть примерно поровну поделена между изучением химических свойств материалов, а также биологических объектов и так называемой “мягкой материей” (*soft matter*). Последняя включает в себя легко деформируемые объекты, такие как полимеры, гели, коллоиды, эмульсии и т.п., которые играют все более значительную роль в промышленности и повседневной жизни.

Очевидно, что общая структура нейтронных исследований в основном сохранится. Что меняется и наверняка приведет к смещению центра тяжести с одних исследований на другие — это увеличивающийся запрос на общественно значимые исследования и результаты. Одним из факторов, влияющих на это смещение, являются значительные бюджетные затраты на создание новых источников нейтронов и приборного парка с очевидным желанием получить ясный и понятный ответ — зачем, и что в ответ? С другой стороны, общество сталкивается с вызовами, связанными с поисками возобновляемых источников энергии, загрязнением окружающей среды и т.п., определяющими само существование человечества. Рассеяние нейтронов, сочетающее в себе уникальность метода и универсальность приложения к самым разным объектам от атомарного до микроскопического уровня и в широком диапазоне временного реагирования на воздействие, призвано сыграть свою роль в этих глобальных задачах, важных для поддержания экономического роста. Отметим некоторые из них.

Современные технологии нуждаются в новых материалах с заданными электронными и магнитными свойствами — полупроводники и сверхпроводники, металлы и сплавы, магнитные материалы для накопления и хранения информации будут изучаться с помощью неупругого рассеяния нейтронов и проверяться на соответствие их свойств современным теоретическим представлениям об устройстве материи. В этом видим традиционное и наиболее продуктивное использование нейтронной спектроскопии, которое обогащается применением современных компьютерных возможностей. С одной стороны, это связано с развитием нейтронного эксперимента, который предоставляет все более подробные сведения о динамике вещества за счет увеличения детекторных систем и их “пикселизации”, особенно в современных TOF-спектрометрах. Поэтому, в частности, требуется стандартизация компьютерных способов накопления, хранения и обработки больших массивов экспериментальных данных. С другой стороны, способы расчета физических свойств вещества постоянно развиваются, их точность и надежность повышаются, так что буду-

щий нейтронный эксперимент трудно представить без детальных теоретических и модельных расчетов.

Увеличивается значение новых конструктивных и инженерных материалов с улучшенными функциональными параметрами, требующих характеристики их свойств (наряду с мультиферритами, релаксорами и углеродными материалами, в том числе таких, как зубной цемент). Для изучения геологических объектов и процессов в земной коре потребуется создание условий, близких к экстремальным природным (высокие температура и давление). Здесь роль нейтронного рассеяния имеет несомненный потенциал, хотя в настоящее время он использован не в полной мере.

Особое внимание будет отдано изучению материалов, способных накапливать большое количество водорода для создания эффективных незагрязняющих внешнюю среду двигателей. В этом же направлении проводятся исследования различных накопительных устройств как гидридного типа, так и накопителей энергии (батарей), которые можно будет “просматривать” во время их работы (“*in situ*” и “*in operando*”) за счет проникающей способности нейтронного излучения. К этому можно отнести ожидаемый и отчасти уже реализуемый вклад нейтронных неразрушающих методов получения информации об уникальных объектах культурного и исторического наследия (например, археологических артефактов и др.).

Изучение жизненно важных объектов и процессов (*life sciences*) несомненно займет более важное место в будущих нейтронно-спектроскопических исследованиях, учитывая особую чувствительность нейтронов к основному биологически активному элементу – водороду. Здесь нейтронная спектроскопия призвана решать, казалось бы, не свойственные ей задачи. Дело в том, что основой для понимания функционирования биоматерии является информация о положении биологически активных центров или молекул. В то же время исключительно сложная многоатомная структура этих веществ создает большие трудности для их выявления и локализации. Спектроскопические данные как раз предоставляют такую возможность при сопоставлении данных нейтронного эксперимента и расчетов атомной динамики. Детальные сведения о биологических процессах требуются на уровнях от атомного до клеточного, включая как небольшие молекулы липидов и пептидов, так и макромолекулярные комплексы. Необходимо детально понять роль воды в биологических ферментах и биологических макромолекул в проницаемости клеточных мембран. Иссле-

дования лекарственных средств, их активных центров, взаимодействие с оболочками в зависимости от способа доставки к больному органу – уже сейчас могут быть осуществлены методами рассеяния нейтронов, и значение этих данных не может не возрасти в ближайшем будущем.

Надеемся, что участие в подобных исследованиях на основе методов рассеяния нейтронов окажется привлекательным для молодого поколения ученых, и представленное описание всего того, что можно сделать с помощью нейтронов, сможет их заинтересовать и привлечь к развитию этих работ. Вопросы техники и методики эксперимента будут рассмотрены в следующей публикации [75].

Авторы выражают благодарность П.П. Паршину, А.В. Мирмельштейну, С.Б. Вахрушеву, подготовившим ценные материалы по этапу становления спектроскопической методики исследований в стране. Особая благодарность И.П. Садикову, непосредственному участнику, с самых первых шагов, развития нейтронной спектроскопии, за внимание к работе и уникальные исторические свидетельства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каган Ю., Иосилевский Я.А. // ЖЭТФ. 1963. Т. 44. С. 1375.
2. Землянов М.Г., Соменков В.А., Черноплеков Н.А. // ЖЭТФ. 1967. Т. 52. № 3. С. 665.
3. Сырых Г.Ф., Жернов А.П., Землянов М.Г. и др. // ЖЭТФ. 1976. Т. 70. С. 353.
4. Сырых Г.Ф., Землянов М.Г., Черноплеков Н.А., Колтыгин В.М. // ЖЭТФ. 1977. Т. 73. С. 313.
5. Syrykh G.F., Zhernov A.P., Zemlyanov M.G. et al. // Phys. Status Solidi. B. 1977. V. 79. № 1. P. 105.
6. Шитиков Ю.Л., Виндряевский Б.А., Землянов М.Г., Черноплеков Н.А. // ЖЭТФ. 1981. Т. 80. № 2. С. 729.
7. Землянов М.Г., Бровман Е.Г., Черноплеков Н.А., Шитиков Ю.Л. // Inelastic scattering of neutrons. Vienna: IAEA, 1965. V. 2. P. 431.
8. Паршин П.П., Землянов М.Г., Кост М.Е. и др. // Изв. АН СССР. Сер. Неорган. материалы. 1978. Т. 14. № 9. С. 1653.
9. Петрунин В.Ф., Долуханян С.К., Землянов М.Г. и др. // ФТТ. 1981. Т. 23. № 7. С. 1926.
10. Паршин П.П., Землянов М.Г., Иванов А.С. и др. // ФТТ. 1981. Т. 23. № 9. С. 2634.
11. Паршин П.П., Землянов М.Г., Иродова А.В. и др. // ФТТ. 1984. Т. 26. № 3. С. 672.
12. Паршин П.П., Землянов М.Г., Шитиков Ю.Л. // ФТТ. 1985. Т. 27. № 9. С. 2766.
13. Parshin P.P., Zemlyanov M.G. // Z. Phys. Chem. Neue Folge. 1989. B. 64. S. 1095.

14. Виндряевский Б.А., Ишмаев С.Н., Кобелев Г.В. и др. // ФНТ. 1989. Т. 15. Вып. 5. С. 457.
15. Румянцев А.Ю., Пушкарев В.В., Землянов М.Г. и др. // ЖЭТФ. 1978. Т. 75. С. 712.
16. Chernyshov A.A., Pushkarev V.V., Rumyantsev A. Yu. et al. // J. Phys. F. 1979. V. 9. № 10. P. 1983.
17. Chernyshov A.A., Dorner B., Pushkarev V.V., Rumyantsev A. Yu. // J. Phys. F. 1983. V. 13. № 1. P. 33.
18. Иванов А.С., Митрофанов Н.Л., Пушкарев В.В. и др. // ФТТ. 1986. Т. 28. № 3. С. 767.
19. Ivanov A.S., Rumiantsev A. Yu., Dorner B. et al. // J. Phys. F. 1987. V. 17. № 9. P. 1925.
20. Алексеев П.А., Садиков И.П., Маркова И.А. и др. // ФТТ. 1976. Т. 18. С. 676.
21. Алексеев П.А., Садиков И.П., Маркова И.А. и др. // ФТТ. 1976. Т. 18. С. 2509.
22. Alekseev P.A., Andreeff A., Sadikov I.P. et al. // Phys. Status. Solidi. B. 1980. V. 97. P. 87.
23. Алексеев П.А., Лазуков В.Н., Садиков И.П., Румянцев А.Ю. // Письма в ЖЭТФ. 1986. Т. 43. С. 586.
24. Горемычкин Е.А., Мюле Э. // Письма в ЖЭТФ. 1984. Т. 39. № 10. С. 469.
25. Алексеев П.А., Садиков И.П., Колядин В.П., Мирмельштейн А.В. // Письма в ЖЭТФ. 1984. Т. 39. С. 477.
26. Mook H.A., Nicklow R.M., Penney T. et al. // Phys. Rev. B. 1978. V. 18. P. 2925.
27. Clementyev E.S., Alekseev P.A., Braden M. et al. // Phys. Rev. B. 1998. V. 57 № 14. P. R8099.
28. Lazukov V.N., Tiden N.N., Alekseev P.A. et al. // Phys. Status. Solidi. C. 2004. V. 1. № 11. P. 3174.
29. Alekseev P.A., Ivanov A.S., Dorner B. et al. // Europhys. Lett. 1989. V. 10. P. 457.
30. Fulde P. // Handbook of Physics and Chemistry of Rare Earths / Eds. Gschneidner K.A., Eyring L. North-Holland. Pub. Comp. (Amsterdam—New York—Oxford), 1978. Ch. 17. P. 295.
31. Fulde P., Loewenhaupt M. // Adv. Phys. 1985. V. 34. № 5. P. 589.
32. Newman D.J., Ng B. // Rep. Prog. Phys. 1989. V. 52. P. 699.
33. Holland-Moritz E., Lander G.H. // Handbook of Physics and Chemistry of Rare Earths / Eds. Gschneidner K.A. et al. Elsevier, 1994. V. 19. Ch. 130. P. 1.
34. Furrer A., Podlesnyak A. // Handbook of Applied Solid State Spectroscopy / Ed. Vij D.R. Springer-Verlag, 2006. Ch. 6. P. 259.
35. Алексеев П.А. // Успехи физ. наук. 2015. Т. 185. № 4. С. 353.
36. Алексеев П.А. // Успехи физ. наук. 2017. Т. 187. № 1. С. 65.
37. Furrer A. // J. Supercond.: Novel Magnetism. 2008. V. 21. P. 1.
38. Furrer A., Allenspach P., Mesot J. et al. // Europ. J. Solid. State. Inorg. Chem. 1991. V. 28. P. 627.
39. Staub U., Mesot J., Guillaume M. et al. // Phys. Rev. B. 1994. V. 50. P. 4068.
40. Mesot J., Furrer A. // J. Supercond. Novel Magnetism. 1997. V. 10. P. 623.
41. Mirmelstein A., Podlesnyak A., Bobrovskii V., Zhdashkin I. // J. Phys.: Condens. Mater. 1999. V. 11. P. 7155.
42. Mirmelstein A., Bobrovskii V., Golosova N. et al. // J. Supercond.: Novel Magnetism. 2002. V. 15. № 5. P. 2002.
43. Ivanov A.S., Mitrofanov N.L., Rumiantsev A. Yu. et al. // Physica B. 1989. V. 156—157. P. 910.
44. Иванов А.С., Митрофанов Н.Л., Румянцев А.Ю. и др. // Сверхпроводимость: физика, химия, техника. 1991. Т. 4. № 10. С. 1884.
45. Pintschovius L., Pyka N., Reichardt W. et al. // Progress in High Temperature Superconductivity. World Scientific. 1990. V. 21. P. 36.
46. Иванов А.С., Митрофанов Н.Л., Румянцев А.Ю. и др. // Физика низких температур. 1991. Т. 17. № 10. С. 693.
47. Pyka N., Pintschovius L., Rumiantsev A. Yu. // Z. Phys. B: Condens. Matter. 1991. B. 82. S. 177.
48. Pintschovius L., Pyka N., Reichardt W. et al. // Physica B. 1991. V. 174. P. 323; Physica. C. 1991. V. 185. P. 156.
49. Pyka N., Mitrofanov N.L., Bourges P. et al. // Europhys. Lett. 1992. V. 18. № 8. P. 711.
50. Reichardt W., Pintschovius L., Pyka N. et al. // J. Supercond. 1994. V. 7. № 2. P. 399.
51. Braden M., Reichardt W., Ivanov A.S., Rumiantsev A. Yu. // Physica C. 1994. V. 235—240. Pt II. P. 1167.
52. Braden M., Reichardt W., Schmidbauer W. et al. // J. Supercond. 1995. V. 8. № 5. P. 595.
53. Braden M., Reichardt W., Ivanov A.S., Rumiantsev A. Yu. // Europhys. Lett. 1996. V. 34. № 7. P. 531.
54. Chernoplekov N.A., Khlopkin M.N., Panova G.Kh. et al. // Physica C. 1988. V. 153—155. P. 1655.
55. Паршин П.П., Землянов М.Г., Черноплеков Н.А. и др. // Сверхпроводимость: физика, химия, техника. 1988. Т. 1. С. 30.
56. Parshin P.P., Zemlyanov M.G., Soldatov P.I. // Sov. Phys. JETP. 1992. V. 74 № 2. P. 400.
57. Parshin P.P., Zemlyanov M.G., Parfenov O.E., Chernyshov A.A. // Sov. Phys. JETP Lett. 1990. V. 51. № 7. P. 434.
58. Чумаченко А.В., Землянов М.Г., Музыка А.Ю. и др. // ЖЭТФ. 1996. Т. 109. № 1. С. 204.
59. Parshin P.P., Zemlyanov M.G., Parfenov O.E., Chernyshov A.A. // Proc. Third Int. Conf. on Phonon Physics “Phonons 89”. World Scientific. Singapore, 1989. V. 1. P. 310.
60. Parshin P.P., Zemlyanov M.G. // Appl. Phys. A. 2002. V. 74. P. S1619.
61. Паршин П.П., Землянов М.Г., Иродова А.В. и др. // ФТТ. 1996. Т. 38. № 6. С. 1665.

62. Паршин П.П., Землянов М.Г., Иродова А.В. // Физика низких температур. 1996. Т. 22. № 5. С. 564.
63. Ivanov A.S., Bourges Ph., Petitgrand D., Rossat-Mignod J. // Physica B. 1995. V. 213–214. P. 60.
64. Casalta H., Bourges Ph., Petitgrand D., Ivanov A. // Solid. State. Commun. 1996. V. 100. № 10. P. 683.
65. Ivanov A., Petitgrand D., Bourges Ph., Alekseev P. // Physica B. 1997. V. 234–236. P. 717.
66. Casalta H., Bourges Ph., Petitgrand D. et al. // Physica B. 1997. V. 234–236. P. 803.
67. Petitgrand D., Casalta H., Bourges P., Ivanov A. // Physica B. 1997. V. 234–236. P. 806.
68. Casalta H., Bourges Ph., d'Astuto M. et al. // Phys. Rev. B. 1998-I. V. 57. P. 471.
69. Petitgrand D., Maleyev S.V., Bourges Ph., Ivanov A.S. // Phys. Rev. B. 1999-II. V. 59. P. 1079.
70. Maleyev S.V., Petitgrand D., Bourges Ph., Ivanov A.S. // Physica B. 1999. V. 259–261. P. 870.
71. Ivanov A.S., Bourges Ph., Petitgrand D. // Physica B. 1999. V. 259–261. P. 879.
72. Petitgrand D., Ivanov A.S., Maleyev S.V. // Appl. Phys. A. 2002. V. 74. P. S853.
73. Ivanov A., Petitgrand D. // J. Magn. Magn. Mater. 2004. V. 272–276. P. 220.
74. Иванов А.С. Дис. “Спектры магнитных и решеточных возбуждений высокотемпературных сверхпроводников”... д-ра физ.-мат. наук. Санкт Петербург. СПбПУ, 2017.
75. Иванов А.С., Алексеев П.А. // Кристаллография. 2021. Т. 66. Принята к публикации.