

КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

Сильно коррелированные электронные системы и квантовые критические явления

П.И. Арсеев, С.В. Демишев, В.Н. Рыжов, С.М. Стишов

PACS numbers: 71.10. - w, 71.10.Hf, 71.27. + a, 71.30. + h

Содержание

1. Введение (1125).
2. Сильно коррелированные электроны и сверхпроводимость (1125).
3. Квантовые критические явления и магнитные свойства (1128).
4. Сильно коррелированные системы различной природы (1131).
5. Постерная секция (1133).

1. Введение

В последние годы наблюдается все возрастающий интерес к изучению так называемых квантовых фазовых переходов или квантовых критических явлений. В чистом виде квантовые фазовые переходы наблюдаются только при $T = 0$, хотя их влияние на свойства вещества может распространяться и на область конечных температур. При этом основное квантовое состояние системы изменяется фундаментальным образом. Вследствие неотъемлемой связи статических и динамических свойств квантовой системы ее временные характеристики существенно влияют на ее поведение в критической области при $T = 0$, приводя к повышению эффективной размерности системы. В отличие от классического случая переход происходит не при изменении температуры, а при изменении параметров гамильтониана. В качестве примеров можно привести магнитное поле в случае квантового эффекта Холла, допирование в случае высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП), степень беспорядка в проводнике в окрестности перехода металл – изолятор. Интерес к квантовым фазовым пере-

ходам в значительной степени диктуется тем, что многие необычные свойства сильно коррелированных электронных систем при низких температурах, а также высокотемпературных сверхпроводников могут быть объяснены близостью к квантовой критической точке.

Первый семинар "Сильно коррелированные электронные системы и квантовые критические явления" прошел 11 апреля 2003 г. в Институте физики высоких давлений РАН в г. Троицк. Это событие представляется значительным, поскольку специальных конференций и семинаров, посвященных исключительно физике сильно коррелированных систем в России ранее не проводилось, а соответствующие вопросы до сих пор рассматривались на более общих научных мероприятиях, например на совещаниях по физике низких температур. Отчет о семинаре можно прочесть в *УФН* 174 (4) 449 (2004). При поддержке Президиума РАН 11 июня 2004 г. в Институте физики высоких давлений РАН был проведен второй семинар "Сильно коррелированные электронные системы и квантовые критические явления". Следует отметить, что по сравнению с семинаром 2003 г. число докладов возросло более чем вдвое: было представлено 23 устных и 19 постерных докладов. В Программный комитет семинара вошли: Л.В. Келдыш, председатель (ФИАН), П.И. Арсеев (ФИАН), С.В. Демишев (ИОФ РАН), С.М. Стишов (ИФВД РАН), В.Б. Тимофеев (ИФТТ РАН), Л.А. Фальковский (ИТФ РАН). Оргкомитет: С.М. Стишов, председатель (ИФВД РАН), П.И. Арсеев (ФИАН), В.В. Бражкин (ИФВД РАН), Т.В. Валянская (ИФВД РАН), С.В. Демишев (ИОФ РАН), В.А. Заяц (ОФН РАН), В.Н. Рыжов (ИФВД РАН), Л.Б. Солодухина (ИФВД РАН).

Работа семинара была организована по трем секциям: "Сильно коррелированные электроны и сверхпроводимость", "Квантовые критические явления и магнитные свойства" и "Сильно коррелированные системы различной природы". Кроме того, была организована постерная секция.

2. Сильно коррелированные электроны и сверхпроводимость

В этой секции были объединены доклады, посвященные в основном различным корреляционным эффектам в сверхпроводниках, а также конкуренции разных типов

П.И. Арсеев. Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, 119991 Москва, Ленинский просп. 53, Российская Федерация
Тел. (095) 132-62-71
E-mail: ars@lpi.ru

С.В. Демишев. Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, 119991 Москва, ул. Вавилова 38, Российская Федерация
Тел./Факс (095) 135-81-29
E-mail: demis@lt.gpi.ru

В.Н. Рыжов, С.М. Стишов. Институт физики высоких давлений РАН, 142190 г. Троицк, Московская обл., Российская Федерация
Тел. (095) 334-00-13, (095) 334-00-10. Факс (095) 334-00-12
E-mail: ryzhov@hppi.troitsk.ru, sergei@hppi.troitsk.ru

Статья поступила 2 марта 2005 г.

упорядочения, обусловленных межэлектронным взаимодействием.

В докладе Ю.Н. Овчинникова и А.А. Варламова (ИТФ РАН) "Сильные вихрь – антивихрь-флуктуации в пленках сверхпроводников II типа" было продемонстрировано, что корреляции в сверхпроводниках важно учитывать не только на микроскопическом уровне. Для такой, казалось бы, хорошо изученной системы, как сверхпроводящие пленки, было найдено, что корреляции вихрь – антивихрь могут играть значительную роль. Этот результат интересен тем, что отличается от обычных представлений, согласно которым в окрестности точки сверхпроводящего перехода существенными являются лишь длинноволновые флуктуации с малым отклонением параметра порядка от среднего значения. В докладе было показано, что имеется широкая область температур вблизи точки фазового перехода, в которой доминирующий флуктуационный вклад связан с образованием пар вихрь – антивихрь малого размера. Были определены параметры сверхпроводящей пленки и температурный интервал, в котором вклад в теплоемкость за счет флуктуационного рождения таких вихревых пар значительно превосходит вклад от длинноволновых мод.

Близкое по тематике сообщение было сделано В.Л. Аксеновым (ОИЯИ). В его докладе "Дифракция нейтронов на вихревых решетках в тонких пленках ВТСП" рассказывалось о результатах исследования переходов в вихревых структурах в тонких сверхпроводящих пленках. Достаточно хорошо изучен случай, когда поле приложено перпендикулярно пленке. Ситуация оказывается более сложной в параллельном поле, когда значение первого критического поля значительно выше, чем в случае пленки в перпендикулярном поле, и методы прямой визуализации становятся неприменимыми. В связи с этим метод дифракции нейтронов приобретает особое значение как прямой метод наблюдения конфигурации вихрей и измерения межвихревого расстояния. В рассматриваемой работе впервые было проведено экспериментальное исследование тонких (2000, 2500 и 3000 Å) и ультратонких (800 Å) пленок ВТСП $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ с использованием рефлектометрии и дифракции поляризованных нейтронов в параллельном магнитном поле напряженностью до 1,5 Тл. Было обнаружено, что при определенных значениях магнитного поля в вихревой структуре происходят переходы в новое состояние, с изменением числа вихревых рядов на единицу, дискретные перестройки вихревых рядов. Показано, что ряды вихрей имеют структуру практически параллельных линий. Установлена предсказанная теоретически дискретная перестройка вихревых рядов, измерено расстояние a между вихрями. Так, при $H = 1$ и 1,5 Тл расстояние $a = 445$ и 480 Å, а число вихрей в рядах равно соответственно 4 и 5.

Общая проблема взаимодействия магнитных корреляций и сверхпроводимости на макроскопическом уровне обсуждалась в сообщении В.В. Рязанова, В.А. Обознова, В.В. Больгинова и А.К. Феофанова (ИФТТ РАН) "Электронные корреляции в джозефсоновских переходах с ферромагнетиком". В этом докладе было рассказано об исследовании структур сверхпроводник – ферромагнетик – сверхпроводник (SFS), в которых за счет эффекта близости возникают нетривиальные явления. В области порядка длины когерентности вблизи границы раздела сверхпроводник – ферромагне-

тик (SF) суммарный импульс пар в ферромагнетике не равен нулю в основном состоянии, что приводит к возникновению неоднородного, знакопеременного сверхпроводящего параметра порядка. Физическая причина пространственных осцилляций параметра порядка связана с обменным расщеплением электронных подзон с разными направлениями спинов. В структуре SFS с толщиной ферромагнитной прослойки d_F , близкой к половине длины волны пространственных осцилляций, знаки параметра порядка на сверхпроводящих обкладках "сэндвича" противоположны, т.е. разность фаз сверхпроводящей волновой функции на SFS-переходе в отсутствие внешнего поля и тока равна π . Экспериментально переход в π -состояние может быть идентифицирован по аномальной возвратной температурной зависимости критического тока. В обсуждаемой работе была подробно исследована зависимость критического тока джозефсоновского SFS-сэндвича от толщины ферромагнитного слоя. Критический ток ведет себя немонотонно, обнуляясь в точках перехода в π -состояние и из π -состояния. Фазовые полупериодные сдвиги в области перехода в π -состояние были непосредственно обнаружены в различных интерференционных экспериментах. Таким образом, на зависимости критического тока от толщины слоя обнаружены две точки переходов: при толщинах близких к половине периода пространственных осцилляций и к целому периоду. Основным результатом проведенных исследований систем SF является надежное подтверждение особого сверхпроводящего состояния, наводимого в ферромагнетике вблизи границы со сверхпроводником в многослойных SF-структурах.

В работе "Псевдощелевой режим и динамическое фазовое расслоение в высокотемпературных сверхпроводниках", представленной Г.Б. Тейтельбаумом (Казанский физико-технический институт) и Л.П. Горьковым (ИТФ РАН), вопрос о взаимном влиянии магнитного упорядочения и сверхпроводимости, напротив, был рассмотрен на микроскопическом уровне. Существуют экспериментальные данные, свидетельствующие о тенденции к фазовому расслоению в сверхпроводящих металлооксидах. В докладе было показано, что псевдощелевое поведение ядерной спиновой релаксации в купратах может быть связано с динамическим фазовым расслоением на металлические и магнитные области. Такое расслоение обусловлено начинающимся при температурах, значительно превосходящих T_c , фазовым переходом 1-го рода, распространение которого на большие масштабы срывается из-за нарушения условий электронейтральности CuO_2 -плоскостей. Изменение относительных объемов сосуществующих фаз с разными частотами флуктуаций, уводящее спектр флуктуаций из окрестности частоты ядерного магнитного резонанса (ЯМР), внешне проявляется как псевдощелевое подавление скорости релаксации. Авторами доклада обнаружено, что в температурном интервале выше T_c и ниже некоторой температуры T^* для широкого круга купратов скорость релаксации ядер меди, $1/^{63}\text{T}_1$, обусловлена двумя независимыми механизмами: релаксацией на несоразмерных "страйп"-возбуждениях, приводящей к температурно независимому вкладу, и хаотическим движением металлических и магнитных подфаз, которое приводит к "универсальному" температурно зависящему члену. Сделан вывод о том, что "страйп"-возбуж-

дения связаны с внешним допированием и что они могут пиннингговаться структурными дефектами. В случае LaSrCuO полученные оценки находятся в количественном согласии с данными по неупругому рассеянию нейтронов для этого соединения.

Дискуссия о том, какой механизм спаривания является определяющим в ВТСП и насколько свойства ВТСП объясняются известными теориями, далека от завершения. Если в докладе Г.Б. Тейтельбаума была предпринята попытка найти нестандартное объяснение некоторых свойств ВТСП, то Е.Г. Максимов (ФИАН) в своем сообщении "Сколько сильны электронные корреляции в ВТСП системах?", напротив, подверг скептическому анализу необходимость объяснения свойств ВТСП какими-либо экзотическими механизмами. На основе обобщения большого числа экспериментов им было показано, что очень многие свойства сверхпроводящих купратов близки к свойствам обычных металлов. Были приведены экспериментальные данные об эволюции электронной структуры в ВТСП-системах — от антиферромагнитного моттовского диэлектрика до передопированного сверхпроводника — и обсуждены возможные теоретические объяснения наблюдающихся изменений. Показано, что в этих системах переход металл — диэлектрик происходит при достаточно низком уровне легирования, так что сверхпроводящая фаза не может рассматриваться как легированный диэлектрик. Концентрация носителей в ней существенно превышает уровень формального легирования, а поверхность Ферми совпадает с вычисленной из "первых принципов". Подобное совпадение маловероятно для систем с сильными обменно-корреляционными эффектами. Кроме того, расчеты, проведенные в рамках теории Элиашберга с реальным спектром фононов, свидетельствуют о том, что электрон-фононное взаимодействие играет в ВТСП если и не определяющую, то весьма существенную роль в формировании наблюдаемых свойств этих соединений.

Из следующего за этим докладом Л.А. Фальковского (ИТФ РАН) "Связанные фонон-плазменные моды и проблема электрон-фононного взаимодействия" стало ясно, что в проблеме описания электрон-фононного взаимодействия остаются спорные моменты не только относительно ВТСП, но и относительно обычных металлов и легированных полупроводников. Л.А. Фальковским обсуждалось, насколько электрон-фононное взаимодействие влияет на фононный спектр металлов и легированных полупроводников. По мнению автора доклада, перенормировка скорости звука в металлах в результате электрон-фононного взаимодействия рассчитывалась в ряде подходов неправильно, что приводило к слишком сильной дисперсии фононов. В предложенном подходе использовалась техника кинетического уравнения с одновременным учетом уравнений Максвелла, поскольку при продольных оптических колебаниях возникает электрическое поле. Анализ показал, что наиболее существенным является кулоновское взаимодействие носителей с продольными оптическими колебаниями, тогда как деформационное взаимодействие в достаточно малой (в силу адиабатичности электрон-фононной системы) и одинаковой степени влияет как на продольные, так и поперечные моды. Недавно в рамановском рассеянии на арсениде галлия в сильном магнитном поле были наблюдаены связанные фонон-плазмон-

ные моды. В области значений магнитной индукции до 28 Тл в рамановском спектре GaAs видны три пика: два соответствуют связанным модам и один — резонансу на двойной циклотронной частоте. На основе развитой теории были рассчитаны рамановские спектры для разных магнитных полей. В докладе было объяснено, что одновременное наблюдение поперечных и продольных мод позволяет разделять эффекты экранирования и электрон-фононного взаимодействия. Благодаря этому становится возможной экспериментальная оценка влияния электрон-фононного взаимодействия на фононные спектры.

Если в обычных трехмерных (и даже двумерных) системах электрон-электронное взаимодействие может не всегда проявляться в полную силу, то в одномерных и квазиодномерных проводниках межэлектронное взаимодействие приводит к кардинальному изменению их свойств по сравнению со свойствами обычных металлов. Этой интересной теме был посвящен доклад С.В. Зайцева-Зотова и В.Е. Минаковой (ИРЭ РАН) "Управляемые светом коллективные явления в пайерловском проводнике TaS_3 ". Квазиодномерные проводники (q-1D) с волной зарядовой плотности (ВЗП), такие как TaS_3 , являются одной из физических систем с коллективным переносом тока. Взаимодействие между электронами, сконденсированными в ВЗП, вносит основной вклад в упругие свойства электронного кристалла — ВЗП, — которые определяют такие характеристики q-1D-проводников, как величина порогового поля начала скольжения ВЗП E_T , длина фазовой корреляции, диэлектрическая проницаемость и т.д. В свою очередь, упругие свойства ВЗП зависят от концентрации носителей тока (электронов и дырок) n , термически возбуждаемых через пайерловскую щель в энергетическом спектре и экранирующих электрические поля, которые возникают при деформации ВЗП. Таким образом, изменение n может послужить инструментом, позволяющим управлять свойствами q-1D-проводников с ВЗП. В представленной работе сообщалось об обнаружении фотопроводимости в TaS_3 и о возможности использования света для управления рядом эффектов, обусловленных наличием электронного кристалла — ВЗП. Было обнаружено, что освещение тонких кристаллов квазиодномерного проводника TaS_3 приводит к значительным изменениям линейной и нелинейной проводимости (фотопроводимости). Увеличение линейной проводимости G при освещении сопровождается подавлением нелинейной проводимости, ростом порогового поля E_T , возникновением переключений и гистерезиса в нелинейной проводимости. Эффекты, наблюдающиеся в нелинейной проводимости, могут объясняться уменьшением модуля упругости ВЗП при освещении, что приводит, в частности, к возникновению зависимости $E_T \sim G^{1/3}$, ожидаемой для случая одномерного пиннинга. Обнаружена долговременная релаксация фотопроводимости с широким спектром времен вплоть до 10^3 с, тогда как оцененное по величине фотопроводимости время жизни возбужденных светом носителей тока составляет только $10^{-8} - 10^{-10}$ с. Аналогичная долговременная релаксация возникает и после приложения к образцу электрического поля, превышающего пороговое. Авторы считают, что это свидетельствует о существовании вклада в фотопроводимость от ВЗП, деформирующейся при появлении неравновесных носителей тока в случае освещения

образца. Фотопроводимость q-1D-проводников является значительно более сложным явлением, чем фотопроводимость обычных полупроводников из-за наличия сильной взаимосвязи между квазичастицами и ВЗП. В настоящее время остается до конца неясным происхождение фотопроводимости: нельзя исключить, что она обусловлена коллективными возбуждениями ВЗП (например солитонами). По мнению авторов доклада, возможность управления квазичастичной проводимостью открывает широкие перспективы для исследований различных статических и динамических свойств q-1D-проводников с ВЗП.

Одним из наиболее ярких достижений в экспериментальной физике сверхпроводимости последних лет явилось открытие сверхпроводимости в алмазе, легированном бором. Этому вопросу были посвящены доклад Е.А. Екимова (ИФВД РАН) "Синтез металлических легированных бором алмазов с рекордной концентрацией носителей" и сообщение в постерной секции В.А. Сидорова, Е.А. Екимова, А.В. Рахманиной, М.В. Кондрина, Р.А. Садыкова (ИФВД РАН) и Е.Д. Бауэра (Лос-Аламосская национальная лаборатория, США) "Новые данные о сверхпроводимости борсодержащего алмаза". В докладе Е.А. Екимова было отмечено, что бор наряду с фосфором, азотом и серой являются основными легирующими алмаз примесями. При этом бор — единственный элемент, способный встроиться в решетку алмаза в значительной концентрации. При концентрации бора, превышающей 0,1–0,3 ат.%, происходит переход полупроводник–металл. Целью докладывавшейся работы было получение металлического алмаза с рекордно высокой концентрацией атомов бора и соответственно с рекордно большой концентрацией носителей. Образцы металлического алмаза были получены синтезом алмаза из графита в присутствии карбида бора B_4C при давлениях 8 ГПа и температурах выше 2500 К. При этом был достигнут уровень растворимости бора в алмазе более 3%. В образцах алмаза с высоким содержанием бора была открыта сверхпроводимость с $T_c > 5$ К и высоким значением верхнего критического поля (более 3,5 Тл). Полученный материал является первым примером сверхпроводника с алмазной кристаллической решеткой. Во втором сообщении, посвященном данной тематике, были приведены новые данные о сверхпроводимости алмаза, легированного бором. В частности, обнаружена сверхпроводимость в образцах, полученных из смеси графита и аморфного бора и из смеси борсодержащих углеводородов при высоких давлениях. Проведены измерения эффекта Холла, теплоемкости и параметров решетки некоторых образцов. Обнаруженная аномалия теплоемкости свидетельствует об объемном характере сверхпроводимости алмаза, что представляет собой большой теоретический интерес и позволяет рассматривать алмаз как перспективный материал для электроники будущего.

3. Квантовые критические явления и магнитные свойства

На секции было представлено восемь докладов, посвященных различным аспектам современной физики магнитных явлений, причем преобладали экспериментальные работы (6 сообщений). Возникновение квантовой критичности в низкоразмерных магнетиках было рас-

смотрено в докладе С.В. Демишева (ИОФ РАН) "Квантовая критичность и ЭПР в низкоразмерных магнетиках". На примере $CuGeO_3$, легированного 1% Fe, квантовый критический режим исследовался методом высокочастотной (60–350 ГГц) спектроскопии в рекордно широком диапазоне температур — 0,35–300 К. Известно, что магнитная примесь железа полностью подавляет спин-пайерлсовский и неелевский переходы, по крайней мере вплоть до 1,8 К, и индуцирует квантовое критическое поведение. В квантовом критическом режиме основным состоянием оказывается фаза Гриффитса (ФГ), и при $T < T_G$ возникает расходимость магнитной восприимчивости существенно некури-вейсовского вида: $\chi(T) \sim 1/T^\alpha$, где $\alpha < 1$. В докладе были приведены данные исследования магнитных свойств образцов при ориентации магнитного поля вдоль различных кристаллографических осей и результаты количественного анализа формы линии электронного парамагнитного резонанса (ЭПР). Для абсолютной калибровки интегральной интенсивности использовался сквид-магнитометр. Обнаружено, что степенная расходимость $\chi(T)$ с показателем степени $\alpha \approx 0,34$ имеет универсальный характер и может быть прослежена вплоть до температуры 1 К, в то время как переход в ФГ происходит при $T_G \approx 30$ К. В диапазоне $T < 1$ К кривая $\chi(T)$ имеет тенденцию к насыщению, однако при этом никаких признаков установления дальнего магнитного порядка обнаружено не было. В заключение доклада был рассмотрен вопрос о применимости теории Ошикавы–Аффлека, в которой ЭПР в квантовых спиновых цепочках трактуется как существенно коллективный эффект. Подробное сравнение результатов теории и эксперимента позволяет прийти к заключению о том, что легирование магнитными примесями индуцирует появление "вмороженного" поля у $CuGeO_3$ и этот эффект, по-видимому, конкурирует с антиферромагнитными корреляциями, обусловленными взаимодействием между спиновыми цепочками в кристаллографической плоскости bc .

Для магнитных систем с сильными электронными корреляциями существуют теоретические предсказания, согласно которым давление может индуцировать фазовый переход диэлектрик–металл, сопровождающийся коллапсом локализованного магнитного момента и структурным фазовым переходом. В докладе И.С. Любутина, А.Г. Гаврилюка, И.А. Трояна, В.А. Саркисяна (ИКАН, ИФВД РАН) "Подавление сильных электронных корреляций в некоторых оксидах 3D-металлов при высоких давлениях" были суммированы последние результаты экспериментальных исследований монокристаллов иттриевого феррита граната $Y_3Fe_5O_{12}$ и редкоземельных ортоферритов $RFeO_3$, содержащих изотоп Fe-57, а также монокристаллов бората железа $^{57}FeBO_3$. Использование методов рентгеновской дифракции, мессбауэровской спектроскопии поглощения, ядерного резонансного рассеяния вперед (NFS), синхротронного излучения, оптической спектроскопии поглощения и рамановского рассеяния, а также прямое измерение электросопротивления в диапазоне давлений до 140 ГПа позволило подробно исследовать магнитную и кристаллическую структуры, электронные и транспортные свойства указанных материалов.

Обнаружено, что в области давлений 38–50 ГПа в $FeBO_3$, $RFeO_3$ и $Y_3Fe_5O_{12}$ возникают резкие переходы из

магнитного состояния в немагнитное, являющиеся следствием структурного фазового перехода со скачком объема элементарной ячейки и преобразования электронной структуры ионов железа. В результате перехода типа Мотта–Хаббарда с сильным подавлением $d-d$ электронных корреляций высокоспиновые состояния $3d^5$ ($S = 5/2$, $^6A_{1g}$) ионов Fe^{3+} переходят в низкоспиновые $S = 1/2$, $^2T_{2g}$. Обнаружено, что такой спиновый кроссовер сопровождается скачкообразным уменьшением оптической щели и энергии термической активации электронов, что указывает на переход диэлектрик–полупроводник. Однако полная металлизация, по-видимому, будет происходить только при более высоком давлении, значение которого определяется особенностями кристаллической структуры. Авторы доклада отмечают, что в фазе высокого давления в кристаллах $FeVO_3$ наблюдаются магнитные корреляции, связанные с магнитным упорядочением ионов Fe^{3+} в низкоспиновом состоянии.

Вопросы нейтронных исследований аномального магнетизма в сильно коррелированных электронных системах были рассмотрены в докладе П.А. Алексеева, Ж.-М. Миньо, Е.В. Нефедовой, К.С. Немковского, В.Н. Лазукова, И.П. Садикова, А.В. Голубкова, А. Очий (РНЦ "Курчатовский институт", LLB, CEA-CNRS, ФТИ РАН, Tohoku University) "Sm(Y)S: нестабильная валентность и магнетизм". Сульфид самария SmS представляет собой хорошо известное соединение полупроводникового типа, в котором при приложении внешнего давления ($\geq 0,6$ ГПа) или за счет замещения самария иттрием (так называемое "химическое давление") происходит частичная делокализация f -электрона, в результате которой система переходит из целочисленно-валентного (Sm^{2+}) в промежуточно-валентное (ПВ) состояние. Кроме того, в SmS имеет место сильное обменное взаимодействие магнитных моментов ионов Sm через незаполненную d -зону.

Цель работы заключалась в изучении взаимосвязи делокализации f -электронов и обменного взаимодействия ионов Sm, для чего авторами доклада были проведены измерения спектров неупругого рассеяния нейтронов для монокристаллов $Sm_{1-x}Y_xS$ ($x = 0; 0,17; 0,25; 0,33$) при $P = 0$, а также для стехиометрического SmS при давлении 0,4 ГПа.

В спектре магнитных возбуждений монокристаллического образца SmS при нормальном давлении и низкой температуре существует одна дисперсионная магнитная мода, связанная с межмультиплетным спин-орбитальным (СО) переходом $J = 0 \rightarrow J = 1$ для Sm^{2+} . Найдено, что, несмотря на спиновые и зарядовые флуктуации при переходе самария в состояние ПВ за счет "химического давления", сохраняется обменное взаимодействие между ионами Sm. При этом для случая, когда Sm находится в ПВ-состоянии, в спектре $Sm_{1-x}Y_xS$ были обнаружены два возбуждения магнитной природы. Оба возбуждения имеют сходный характер дисперсии, отвечающий ферромагнитному типу корреляций, и демонстрируют достаточно сильное межмодовое взаимодействие. По мере роста валентности иона Sm (или концентрации Y) наблюдается перенормировка интенсивностей магнитных мод и существенное изменение их дисперсий, связанное, по-видимому, с усилением антиферромагнитной составляющей обменного взаимодействия. Напротив, приложение внешнего давления приводит к усилению

корреляций ферромагнитного типа. К такому эффекту могут приводить как существенное различие между гидростатическим и "химическим" давлениями, так и особенности взаимодействия между ионами в нормальном и ПВ-состояниях.

Из анализа спектров $Sm_{1-x}Y_xS$ следует, что дополнительная мода при более низкой энергии обусловлена переходом самария в валентно-нестабильное состояние. Эта мода может быть связана с магнитным возбуждением, характерным для нового экситоноподобного основного ПВ-состояния, которое сохраняет симметрию "бывшего" основного состояния типа 7F_0 для Sm^{2+} в SmS. В то же время можно утверждать, что значительное влияние на формирование спектра f -электронных возбуждений в соединениях на основе SmS оказывает косвенное обменное взаимодействие между ионами самария через d -зону, поэтому новое ПВ-состояние может рассматриваться как коллективная экситонная мода.

Различные неустойчивости, определяющие низкотемпературные свойства низкоразмерных магнетиков, были рассмотрены в докладе А.Н. Васильева (МГУ) "О некоторых механизмах достижения основного состояния в квазиодномерных металлооксидных $s = 1/2$ -магнетиках". Автор отмечает, что основное спин-синглетное состояние в квазиодномерных магнетиках с полувалентным спином может достигаться за счет деформации кристаллической решетки. Возникающее вследствие деформации альтернирование обменных взаимодействий в спиновой цепочке приводит к формированию спиновой щели, отделяющей синглетное состояние от возбужденных триплетных состояний.

Классическим примером проявления магнитоупругих механизмов достижения основного состояния в квазиодномерных металлооксидных $s = 1/2$ -магнетиках является спин-пайерлсовский переход, наблюдавшийся при $T_c = 14$ К в $CuGeO_3$. Параметры этого перехода в $CuGeO_3$, в том числе отношение удвоенной величины энергетической щели в спектре магнитных возбуждений 2Δ к температуре фазового перехода T_c , близки к значению $\sim 3,5$ следующему из теории Бардина–Купера–Шрифферфа (БКШ).

Однако не только магнито-упругая нестабильность, являющаяся движущей силой фазового перехода в спин-пайерлсовских магнетиках, но и другие физические процессы могут вызывать упругую деформацию и альтернирование магнитного обмена в $s = 1/2$ -цепочках. Так, в металлооксиде со смешанной валентностью магнитоактивных ионов NaV_2O_5 перераспределение заряда между позициями $V^{4.5+} \leftrightarrow V^{4+}$, V^{5+} приводит к структурному фазовому переходу при $T_c = 34$ К; в этом соединении соотношение $2\Delta/T_c \sim 6$.

В металлооксиде со структурой пироксена $NaTiSi_2O_6$ октаэдры TiO_6 образуют удаленные друг от друга спиральные цепочки. В силу особенностей структуры этого соединения обмен между магнито-активными ионами в цепочках осуществляется через вырожденные t_{2g} -орбитали Ti^{3+} . Снятие этого вырождения за счет ян-теллеровской неустойчивости при $T_c = 210$ К сопровождается формированием магнитных димеров, в которых отношение $2\Delta/T_c \sim 4,8$. Таким образом, отношение $2\Delta/T_c$ может быть, по-видимому, использовано для оценки различных механизмов достижения основного состояния, обусловленных многообразием кристалличе-

ских структур, допускающих сильную анизотропию обменных внутри- и междоузельных взаимодействий.

Из представленных на секции докладов, отражающих экспериментальные работы, два были посвящены синтезу и исследованию физических свойств новых перспективных материалов для изучения сильно коррелированных электронных систем. С сообщением "Высокочистые металлические вещества для исследования сильно коррелированных электронных систем" выступил Г.С. Бурханов (ИМЕТ РАН).

Роль высокочистых металлических веществ исключительно велика при исследовании сильно коррелированных электронных систем. Микропримеси и дефекты кристаллической структуры оказывают значительное влияние на электро- и теплопроводность, теплоемкость, оптические, магнитные, гальваномагнитные, сверхпроводящие и другие свойства. Автором доклада было проанализировано индивидуальное влияние примесей, дислокаций, вакансий на тепло- и электрофизические свойства как чистых металлов, так и интерметаллидов и металлоподобных соединений — боридов и карбидов переходных металлов.

Интересно, что только высокочистые TiB_2 , ZrB_2 и Nb_2 являются сверхпроводниками, тогда как те же технически чистые дибориды сверхпроводимости не проявляют. Исследование сверхпроводящих свойств на высокочистых боридах позволило выявить ряд новых эффектов, которые до сих пор маскировались примесями. В частности, у соединения YNi_2B были обнаружены аномалии температурной зависимости верхнего критического поля и полевой зависимости намагниченности от поля, а также сосуществование сверхпроводимости и ферромагнетизма. В другом высокочистом бориде $\text{Dy}_{0.6}\text{Y}_{0.4}\text{Rh}_4\text{B}_4$ была выявлена последовательность фазовых переходов парамагнетик — сверхпроводник — ферромагнетик, обусловленная понижением температуры. Обнаружено, что газообразующие примеси в значительной степени определяют низкотемпературную теплоемкость высокочистых редкоземельных металлов и оказывают влияние как на ее фоновую, так и на электронную составляющую. В случае моноизотопных редкоземельных металлов, которые характеризуются нечетным массовым числом и большим ядерным магнитным моментом, установлен значительный вклад ядерной составляющей теплоемкости.

В докладе В.В. Бражкина, М.В. Кондрина, О.А. Сазановой, А.Г. Ляпина, С.В. Поповой (ИФВД РАН) "Новые магнитные полупроводники и полуметаллы — фазы высокого давления Ga-Sb-Mn " сообщалось об успешном синтезе под давлением 6 ГПа в диапазоне температур 300–900 К новых полупроводниковых и полуметаллических фаз в системе Ga-Sb-Mn , включая пересыщенные кристаллические и аморфные твердые растворы GaSb:Mn , новые метастабильные соединения Ga-Sb-Mn со структурой типа CuAl_2 и простой кубической структурой. Предварительные исследования показали, что ряд новых фаз высокого давления в системе Ga-Sb-Mn являются ферромагнетиками с температурой Кюри выше комнатной. Следует подчеркнуть, что "разбавленные" тетраэдрические полупроводники с примесью Mn, Co, Fe, Cr хотя и считаются наиболее перспективными материалами для спинтроники, но их потенциальные применения до сих пор ограничивались низкими (менее 100 К) температурами Кюри. Новые

материалы из системы Ga-Sb-Mn , по-видимому, позволяют преодолеть указанный недостаток.

В "теоретическом разделе" секции были представлены результаты исследований магнетиков, находящихся вблизи квантового критического перехода, и новое объяснение генезиса аномальных физических свойств URu_2Si_2 .

Зонные кубические магнетики со взаимодействием Дзялошинского–Мория (MnSi , FeGe и др.) интересны по двум причинам. Во-первых, они находятся вблизи границы квантового перехода в немагнитное состояние, который может быть инициирован приложением внешнего давления. Во-вторых, взаимодействие Дзялошинского–Мория разрушает ферромагнетизм и приводит к спиральной магнитной структуре. Оба эти явления тесно связаны между собой, в частности, критические магнитные поля, при которых перестраивается магнитная структура, сильно зависят от давления.

В докладе С.В. Малеева (ПИЯФ) "Кубические зонные магнетики со взаимодействием Дзялошинского–Мория" отмечается, что последние экспериментальные результаты по изменению магнитной структуры MnSi и FeGe в поле и критическому рассеянию нейтронов не находят полного объяснения в рамках известной теоретической модели, которая наряду с обычным обменом включает в себя взаимодействие Дзялошинского–Мория и анизотропный обмен, которые определяют ориентацию спирали по отношению к кубическим осям кристалла. Это последнее взаимодействие является самым слабым.

Более детальное теоретическое исследование показало, что в силу высокой кубической симметрии вектор Дзялошинского направлен вдоль импульса критической флуктуации. В результате область малоуглового рассеяния имеет вид окружности, описанной около направления $(0,0,0)$, а тензор магнитной восприимчивости приобретает структуру, принципиально отличную от стандартного выражения Орнштейна–Зернике. Вследствие взаимодействия Дзялошинского–Мория у тензора магнитной восприимчивости появляется антисимметричная часть, приводящая к сильной зависимости рассеяния от поляризации нейтронов. В результате только в малой окрестности температуры перехода "включается" анизотропный обмен, появляются предвестники брэгговских пиков и рассеяние становится сильно зависящим от направления. Такая теоретическая картина прекрасно согласуется с экспериментом.

Теоретическое исследование спин-волнового спектра при низких температурах позволило прояснить природу двух критических полей, при которых происходит перестройка магнитной структуры. Нижнее магнитное поле, при котором ось спирали поворачивается вдоль поля, соответствует щели в спектре спиновых волн, появляющейся благодаря взаимодействию с электрон-дырочными парами. В верхнем поле $g\mu H_c = Ak^2$, где A — коэффициент жесткости спиновых волн и k — величина волнового вектора спирали, система приобретает ферромагнитный порядок. Этот результат также хорошо согласуется с экспериментом.

И.А. Фомин (ИФП РАН) представил доклад "«Скрытый порядок» и коллективная мода в антиферромагнитной фазе URu_2Si_2 ", в котором было предложено объяснение наблюдаемого несоответствия между нормальной величиной скачка теплоемкости при переходе

URu_2Si_2 в антиферромагнитную фазу и аномально малым магнитным моментом подрешеток. Теоретическая модель не использует предположение о существовании, помимо антиферромагнитного, другого, "скрытого" порядка, представление о котором часто привлекается для описания указанной аномалии. Вместо этого предполагается, что антиферромагнитный переход в рассматриваемом соединении является пайерлсовским переходом с удвоением периода и открытием щели в спектре электронов проводимости, которая и отвечает за большую величину скачка. Аргументами в пользу такого объяснения могут служить свойства наблюдаемого в спектре неупругого рассеяния нейтронов пика, который появляется одновременно с антиферромагнитным упорядочением. В предложенной модели интенсивность пика и его положение как функции приложенного магнитного поля хорошо описываются зависимостями, ожидаемыми для коллективной моды, возникающей при переходе с удвоением периода.

4. Сильно коррелированные системы различной природы

В рамках данной секции были представлены шесть докладов, посвященных как теоретическому, так и экспериментальному изучению различных сильно коррелированных систем.

Следует заметить, что в последнее время все больший интерес вызывает исследование возможности бозе-эйнштейновской конденсации в различных системах, отличных от традиционного гелия-4. В докладе Ю.Е. Лозовика (ИС РАН) "Квантовый фазовый переход и когерентные свойства двухслойной системы композитных фермионов" рассматривались электронные свойства связанных квантовых ям. Существование сверхтекучести не прямых экситонов в такой системе впервые было предсказано в 1976 г. в работе Лозовика и Юдсона. В последнее десятилетие эта система активно изучалась как теоретически, так и экспериментально. Система связанных квантовых ям в принципе достаточно проста: электроны и дырки заключены в параллельных двумерных плоскостях, реализуемых на полупроводниковых структурах. При этом не прямые экситоны представляют собой связанные состояния электронов из зоны проводимости одной плоскости и дырок из валентной зоны соседней плоскости. Волновые функции электронов и дырок лишь незначительно пересекаются, тем самым резко уменьшая рекомбинацию экситонов. В этом случае время жизни экситонов становится настолько большим, что их можно рассматривать как метастабильные частицы, к которым применима равновесная статистическая механика. Благодаря тому, что электроны и дырки разнесены в пространстве, экситоны взаимодействуют посредством отталкивающего диполь-дипольного потенциала, что препятствует коллапсу системы. В докладе была рассмотрена проблема бозе-конденсации экситонов и сильно коррелированных состояний электронно-дырочной системы, обсуждены фазы и когерентные свойства электронно-дырочной системы в низкоразмерных системах — квантовых ямах и связанных квантовых ямах. Также было проанализировано поведение системы в сильных магнитных полях, представление композитных фермионов, спаривание в двухкомпонентной системе композитных фермионов, в частности, его специфика,

связанная с отклонением свойств системы от свойств обычной ферми-жидкости.

Сейчас стала очень популярной модель ферми-бозе-смеси, которая имеет отношение к разным проблемам физики конденсированного состояния и, в первую очередь, к проблеме высокотемпературной сверхпроводимости, сверхтекучести в системе ^3He – ^4He , к свойствам систем ультрахолодных атомов в магнитных ловушках. Изучению свойств ферми-бозе-смесей были посвящены два следующих выступления. В докладе М.Ю. Кагана, И.В. Бродского, Д.В. Ефремова и А.В. Клапцова (ИФП РАН) "Композитные фермионы, тройки и четверки в ферми-бозе-смеси с притяжением" были рассмотрены двумерная и трехмерная модели ферми-бозе-смеси с сильным короткодействующим отталкиванием между частицами одного сорта и притяжением между частицами разных сортов. В этом случае кроме стандартных аномальных средних типа $\langle b \rangle$, $\langle bb \rangle$ и $\langle ff \rangle$ в системе может возникнуть также спаривание типа $\langle fb \rangle$. Это спаривание соответствует образованию в системе композитных фермионов. При низких температурах и равных плотностях фермионов и бозонов, композитные фермионы спариваются с образованием четверок. При более высоких температурах в системе также присутствуют тройки, состоящие из композитного фермиона и элементарного бозона. Полученные результаты важны как для ВТСП-систем, так и в связи с недавним экспериментальным обнаружением резонансных димеров в магнитных и оптических ловушках при сверхнизких температурах. Они также важны для объяснения явления коллапса ферми-газа в притягательной ферми-бозе-смеси нейтральных частиц в магнитных ловушках. Изучению устойчивости этой системы был посвящен доклад В.Н. Рыжова, Е.Е. Тареевой (ИФВД РАН) и S.-T. Chui (Bartol Research Institute, University of Delaware) "Коллапс бозе-компоненты в бозе-ферми-смеси с притяжением между компонентами". Следует заметить, что после реализации бозе-эйнштейновской конденсации в парах ультрахолодных атомов щелочных металлов в опто-магнитных ловушках изучение поведения смесей разреженных газов привлекает все больший интерес исследователей. Это обусловлено, в первую очередь, стремлением получить вырожденные ферми-системы с целью обнаружить в них сверхпроводимость. Однако теоретическое изучение поведения смеси бозонов и фермионов представляет и самостоятельный интерес. Например, в силу принципа Паули взаимодействие спин-поляризованных фермионов в s-волновом приближении отсутствует, поэтому эффективное охлаждение ферми-систем за счет испарения возможно или при наличии опосредованного взаимодействия с фермионной подсистемой в другом спиновом состоянии, или за счет взаимодействия с бозонной подсистемой в ферми-бозе-смеси. В докладе был представлен эффективный гамилтониан, описывающий поведение бозе-компоненты в смеси фермионов и бозонов, и проанализирована устойчивость системы для случая притяжения между бозонами и фермионами. Используя тот факт, что ввиду отсутствия взаимодействия между фермионами в s-волновом приближении действие квадратично по фермионным операторам, можно формально точно провести интегрирование по ферми-полям, получив эффективное действие, зависящее от числа фермионов и температуры, в которое входят только бозонные поля. В

квазиклассическом приближении Томаса–Ферми авторами доклада получен явный вид эффективного действия, которое может быть разложено в ряд по бозонному полю. Показано, что взаимодействие с фермионами уменьшает эффективное взаимодействие между бозонами, соответствующее четвертому порядку разложения. В случае притяжения между бозонами и фермионами поведение системы определяется отрицательным членом шестого порядка по бозонному полю. В этом случае, по аналогии с системой бозонов с притяжением, для оценки энергии системы можно использовать вариационный принцип с гауссовой волновой функцией бозонов. Поведение системы определяется конкуренцией между положительной кинетической энергией нулевых колебаний, обусловленной существованием ловушки, положительной энергией межбозонного отталкивания и отрицательной энергией за счет члена шестого порядка по бозонному полю. Последний член возрастет по абсолютной величине с ростом числа фермионов и приводит к увеличению плотности бозонов в центре ловушки. При некотором критическом значении числа бозонов суммы положительной кинетической энергии и энергии межбозонного отталкивания недостаточно, чтобы стабилизировать систему, что в конечном итоге приводит к коллапсу бозонной компоненты. Критическое число бозонов зависит от числа фермионов и температуры. Результаты вычислений были применены для описания системы, состоящей из атомов ^{40}K (фермионы) и ^{87}Rb (бозоны), при этом было получено хорошее согласие с экспериментом. С качественной точки зрения микроскопический механизм коллапса системы может быть понят, в частности, в свете результатов предыдущего доклада.

Многообразие проявлений эффектов сильных корреляций в физических системах и сложность теоретического описания сильно взаимодействующих систем заставляют искать новые теоретические методы, адекватно описывающие такие системы. Одному из таких методов был посвящен доклад П.И. Арсеева (ФИАН) и Н.С. Масловой (МГУ) "Основы «псевдочастичного» метода описания сильно коррелированных систем". Первый вариант этого метода был предложен еще в середине 1960-х годов А.А. Абрикосовым, однако долгое время "псевдочастичный" метод практически не развивался. В последние 10–15 лет возник новый интерес к этому направлению, но последовательное построение диаграммной техники в рамках метода псевдочастиц до недавнего времени отсутствовало. Данный метод основан на том, что заранее выделяется наиболее существенная часть межэлектронного взаимодействия и вводятся операторы, соответствующие точному состоянию взаимодействующей системы. Введение таких операторов псевдочастиц позволяет упростить гамильтониан задачи, однако при этом приходится вводить дополнительные ограничения на возможные состояния и конфигурации псевдочастиц таким образом, чтобы не появлялись состояния, не имеющие физического смысла. Например, описание парамагнитных примесей на языке спинов означает, что мы допускаем на примесном узле только состояния с одним электроном, имеющим то или иное направление спина, и запрещаем появление состояний с двумя электронами и состояний, не содержащих электронов. В докладе было объяснено, как строится диаграммная техника для описания квантовых систем,

основанная на подобном исключении части возможных состояний из рассмотрения. Оказывается, что точный учет ограничения на число псевдочастиц приводит к специфическому виду графического ряда, не похожему на обычную диаграммную технику. В своем сообщении авторы обсуждают и недостатки данного метода. Так, значительным усложнением теории является то, что несвязанные части диаграмм не сокращаются и уравнение Дайсона, вообще говоря, не может быть записано в стандартной форме.

Два доклада данной секции были посвящены экспериментальному изучению соединений с сильными электронными корреляциями и полупроводниковых наноструктур.

Как известно, природа основного состояния узкозонного полупроводника FeSi ($E_g \approx 60$ мэВ) в течение последних десятилетий является предметом активных дискуссий. Общепринятая классификация моносилцида железа как кондо-изолятора противоречит результатам зонных расчетов и не может объяснить ряд аномалий физических свойств, наблюдаемых в этом соединении с простой кубической структурой. Альтернативный подход к описанию основного состояния FeSi в рамках модели Мотта–Хаббарда показывает, что низкотемпературные аномалии магнитных и транспортных свойств можно связать с переходом из полупроводникового состояния ($T > 100$ К) с термически активированными из e_g -зоны в t_{2g} -зону спиновыми возбуждениями ($S = 1$) к сильно коррелированному металлу ($T < 100$ К) с зонными носителями заряда. При этом существенная перестройка зонного спектра FeSi в режиме сильных хаббардовских корреляций определяется формированием узкого многочастичного резонанса ($E_p \approx 6$ мэВ), отвечающего образованию спиновых поляронов с малым радиусом (< 10 Å), концентрацией $\sim 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и эффективной массой $m^* \sim 100 m_0$, где m_0 — масса свободного электрона. В докладе В.В. Глушкова, С.В. Демишева, И.В. Кривицкого, Н.А. Самарина, Н.Е. Случанко (ИОФ РАН), А. Меновски (Van der Waals-Zeeman Laboratory, University of Amsterdam, Netherlands) и В.В. Мошалькова (Laboratorium voor Vaste-Stoffysica en Magnetisme, Leuven, Belgium) "Зарядовый транспорт в соединении с сильными электронными корреляциями FeSi " были представлены результаты изучения особенностей переноса заряда в низкотемпературном сильно коррелированном состоянии FeSi . Авторами доклада были исследованы гальваномагнитные свойства монокристаллических образцов моносилцида железа в широком диапазоне значений температур (1,8–40 К) и магнитных полей (до 70 кЭ). В результате разделения нормального (спин-поляронного) и аномального магнитного вкладов в эффект Холла было установлено, что низкотемпературная инверсия знака коэффициента Холла определяется значительным изменением аномальной компоненты холловского сопротивления, увеличивающейся более чем в 10^5 раз при понижении температуры в интервале 1,8–20 К. Возникновение аномального вклада в эффект Холла связывается с переходом к когерентному режиму флуктуаций электронной плотности в окрестности Fe-центров с формированием ферромагнитных наноразмерных (~ 10 Å) областей — ферронов — в матрице FeSi при $T < T_c = 15$ К. В окрестности температуры инверсии знака холловского сопротивления был обнаружен дополнительный вклад в

эффект Холла, проявляющийся в виде второй гармоники на угловых зависимостях холловского сопротивления и не имеющий объяснения в рамках традиционно используемых феноменологических моделей. Исследования магнитосопротивления моносиллицида железа в области температур, отвечающих спин-поляронному и когерентному режимам спиновых флуктуаций, выявили сложное немонотонное поведение $\Delta\rho(H)/\rho$ с инверсией знака непосредственно вблизи границы микромагнитной фазы при $T_m = 7$ К. На основе анализа экспериментальных данных установлено, что линейная асимптотика отрицательного магнитосопротивления $\Delta\rho/\rho \sim -H$, наблюдаемая в малых магнитных полях (≤ 10 кЭ), является результатом формирования магнитных нанокластеров из взаимодействующих ферронов при $T < T_m$ в микромагнитной фазе FeSi. На основе полученных результатов авторами доклада впервые была построена низкотемпературная магнитная фазовая H – T -диаграмма FeSi, а также получены количественные оценки эффектов обменного усиления, определены эффективные параметры, характеризующие электронную подсистему в парамагнитной ($T > T_c$), ферромагнитной ($T_m < T < T_c$) и микромагнитной ($T < T_m$) фазах этого соединения с сильными электронными корреляциями. В результате анализа совокупности аномалий транспортных, магнитных и магнито-оптических характеристик, наблюдаемых в окрестности $H_m \sim 35$ кЭ при $T < T_m$, ими был сделан вывод о существовании новой коллинеарной магнитной фазы **M**||**H** на низкотемпературной фазовой диаграмме моносиллицида железа.

Следующий доклад "Излучение полупроводниковых микрорезонаторов с квантовыми точками: режим сильного взаимодействия экситона в одиночной квантовой точке с фотонной модой" его авторы В.Д. Кулаковский, М.Н. Махонин, Д.Н. Крижановский (ИФТТ РАН), G. Sek, C. Hofmann, R. Krebs, A. Loeffler, J.P. Reithmaier, A. Forchel (Wuerzburg University, Wuerzburg) и Л.В. Келдыш (ФИАН) посвятили одному из основных направлений оптических исследований полупроводниковых наноструктур — проблеме достижения сильного взаимодействия между квазиульмерными экситонной и фотонной модами. Как известно, экситоны локализованы в квантовых точках (КТ), а фотоны локализуются модуляцией показателя преломления в полупроводниковой наноструктуре, например в плоском полупроводниковом микрорезонаторе (МР) с ограниченными латеральным размером (столбиковый МР). Такая система должна демонстрировать специфические характеристики, свойственные двухуровневому атому, взаимодействующему с оптической модой МР, а именно: сильное увеличение или подавление скорости спонтанного излучения в режиме слабого взаимодействия (эффект Парселла), расщепление Раби в вакуумном электромагнитном поле и формирование смешанных состояний в режиме сильного взаимодействия и т.д. В первом приближении, энергии двух взаимодействующих мод — экситона в КТ (X) и МР (C) — в условиях резонанса ($E_X = E_C = E_0$) могут быть записаны как

$$E_{1,2} = E_0 - \frac{i(\gamma_C + \gamma_X)}{2} \mp \left[g^2 - \frac{(\gamma_C - \gamma_X)^2}{4} \right]^{1/2},$$

где $\gamma_{C(X)}$ — полуширина МР (экситонной) моды на подвысоте (в реализуемых МР $\gamma_C \gg \gamma_X$), $2\gamma_C = E_C/Q \gg \gamma_X$,

$g \sim (f/V_m)^{1/2}$ — константа взаимодействия экситонной и МР-мод, f — сила осциллятора экситона в КТ, V_m — эффективный объем моды. Согласно этой формуле режим сильного взаимодействия в МР реализуется при $g > (\gamma_C - \gamma_X)/2 \sim \gamma_C/2$. При значениях $g < \gamma_C/2$ реализуется режим слабого взаимодействия, в котором экситон-фотонное взаимодействие приводит к ускорению радиационного затухания экситонов. Такой режим достигнут в МР с самоорганизованными КТ. Для того чтобы реализовать режим сильного взаимодействия, необходимо увеличить добротность МР и (или) силу осциллятора экситона в КТ (увеличив латеральный размер КТ). В докладе были представлены результаты исследования излучения высокодобротных столбиковых МР с квантовыми точками различного размера в диапазоне температур 10–45 К. В структурах с малыми размерами КТ был реализован режим слабого взаимодействия, а в структурах с увеличенным размером КТ — режим сильного взаимодействия. Найдено, что в обоих режимах спектр излучения МР определяется механизмом первичного возбуждения, а именно, зависит от того, осуществляется ли возбуждение через экситонную моду или через моду резонатора. В частности, расчеты показывают, что в последнем случае провал в линии излучения появляется уже в режиме слабого взаимодействия. Несмотря на то, что при межзонном возбуждении МР-структур возбуждение происходит в основном через экситонную моду, даже частичное возбуждение МР-моды приводит к сильному изменению относительных интенсивностей линий МР и КТ вдали от резонанса и расщеплению линии излучения в резонансе вблизи порога для режима сильного взаимодействия. Режим сильного взаимодействия был достигнут для МР с диаметром 1,5 мкм и добротностью 7500. Максимальное расщепление линии излучения в резонансе мод МР и КТ оказалось равным 0,14 мЭВ.

5. Постерная секция

Ряд докладов в постерной секции был посвящен экспериментальному исследованию транспортных и магнитных свойств сильно коррелированных электронных систем и систем с тяжелыми фермионами. В докладе М.И. Игнатьева, А.В. Богача, Г.С. Бурханова, В.В. Глушкова, С.В. Демишева, Н.Е. Случанко, О.Д. Чистякова (ИОФ РАН, МФТИ, ИМЕТ РАН) "Режимы низкотемпературного транспорта в соединениях с тяжелыми фермионами CeM_2 " отмечается, что сложности интерпретации транспортных свойств соединений с тяжелыми фермионами и концентрированных кондо-систем на основе Ce, Sm и Yb, а также других соединений с сильными электронными корреляциями оказываются непосредственно связанными с проблемой адекватного учета быстрых зарядовых и спиновых флуктуаций, инициирующих существенную перенормировку спектра квазичастичных возбуждений в указанных системах. Для выяснения природы аномалий транспортных свойств, обусловленных локальными флуктуациями электронной плотности, авторами доклада были выполнены исследования проводимости σ и коэффициентов термоэдс (S) и Холла (R_H) интерметаллидов со структурой фаз Лавеса CeM_2 ($M = \text{Al, Ni, Co, Ru, Rh, Ir}$) в широком диапазоне температур, 10–300 К. Изменение структурообразующего элемента в ряду CeM_2 позволяет варьировать

валентность Се в широких пределах — от почти целочисленных значений $\nu \approx 3,04$ (CeAl_2) до промежуточных величин $\nu = 3,35-3,36$ (CeCo_2 , CeRu_2). Анализ экспериментальных данных показал, что согласованное описание транспортных характеристик соединений CeM_2 может быть получено в рамках феноменологического подхода, учитывающего качественную перестройку электронной структуры и базирующегося на анализе нескольких аддитивных вкладов в параметры σ , $S\sigma$, $R_H\sigma^2$. В случае CeAl_2 показано, что высокотемпературный транспорт ($T > 50$ К) определяется процессами неупругого рассеяния носителей заряда, сопровождающихся переходами между дублетами расщепленного в кристаллическом поле состояния $^2F_{5/2}$ церия. Понижение температуры приводит к значительному изменению поведения транспортных коэффициентов CeAl_2 , для которых наблюдаются активационные асимптотики $S \sim \exp(E_a^S/k_B T)$ и $R_H \sim \exp(E_a^H/k_B T)$ с параметрами $E_a^S \approx 3,6$ К и $E_a^H \approx 7$ К. Аномальное поведение S и R_H в тяжелофермионной системе можно связать с формированием узкой полосы многочастичных состояний в окрестности ϵ_F и далее с образованием ферромагнитных нанокластеров из спин-поляронных состояний при $T < 20$ К.

В соединениях CeM_2 на основе переходных элементов ($M = \text{Ni}$, Co , Ru , Rh , Ir) низкотемпературный вклад в проводимость определяется зависимостью, отвечающей фермижидкостному поведению: $\sigma^{-1} \sim T^2$, и позволяет корректно описать аномалии температурных зависимостей параметров $S\sigma$ и $R_H\sigma^2$. Увеличение температуры приводит к изменению характера рассеяния носителей заряда, при этом оценки микроскопических параметров носителей заряда указывают на переход между различными режимами транспорта в интервале $T \sim 50-199$ К. Аномальное поведение транспортных характеристик в соединениях CeM_2 объясняется авторами доклада анизотропной f-d-гибридизацией и формированием многочастичных состояний в окрестности Се-центров.

Детальному исследованию коллективных эффектов в некоторых твердых растворах замещения на основе CeAl_2 был посвящен доклад А.В. Богача, Г.С. Бурханова, В.В. Глушкова, С.В. Демишева, Н.Е. Случанко, О.Д. Чистякова (ИОФ РАН, МФТИ, ИМЕТ РАН) "Многочастичные состояния в системах с тяжелыми фермионами $\text{Ce}(\text{Al}_{1-x}\text{Ni}_x)_2$ и $\text{Ce}(\text{Al}_{1-x}\text{Co}_x)_2$ ". Выполненные недавно исследования транспортных свойств так называемой магнитной кондо-решетки CeAl_2 позволили установить активационный характер поведения коэффициента Холла в этом интерметаллиде с тяжелыми фермионами. С целью выяснения степени влияния беспорядка замещения на возникновение аномалий коэффициента Холла в цериевых системах с тяжелыми фермионами и металлической проводимостью авторами доклада были исследованы транспортные характеристики твердых растворов замещения $\text{Ce}(\text{Al}_{1-x}\text{Ni}_x)_2$ и $\text{Ce}(\text{Al}_{1-x}\text{Co}_x)_2$ с $x = 0,05$. Полученные результаты позволили сделать следующие выводы.

Во-первых, энергия связи многочастичных состояний, формирующихся при $T \geq 70$ К, значительно изменяется (от $E_{a1}(\text{CeAl}_2) \approx 12$ К до $E_{a1}(\text{Ce}(\text{Al}_{0,95}\text{Co}_{0,05})_2) \approx 42$ К) при замещении алюминия кобальтом. При этом практически неизменной, в пределах значений $E_{a2} \approx 6-8$ К, остается энергия связи тяжелофермионных состояний, определяющих характеристики низкотемпературного

($T < 70$ К) транспорта. Во-вторых, беспорядок замещения приводит к подавлению когерентного режима, наблюдающегося в CeAl_2 при температурах жидкого гелия. В результате температурная зависимость коэффициента Холла с наличием максимума сменяется зависимостью с тенденцией к насыщению. Полученные экспериментальные результаты могут быть последовательно интерпретированы в рамках моделей спин-поляронного транспорта носителей заряда в сильно коррелированных электронных системах.

Как следует из сообщения А.В. Богача, Г.С. Бурханова, В.В. Глушкова, С.В. Демишева, Д.Н. Случанко, Н.Е. Случанко, О.Д. Чистякова (ИОФ РАН, МФТИ, ИМЕТ РАН, МГУ) "Магнитосопротивление в соединениях с тяжелыми фермионами $\text{CeCu}_{6-x}\text{Au}_x$ и CeAl_2 " данная транспортная характеристика может оказаться весьма информативной при изучении тяжелофермионных систем и систем, находящихся в окрестности квантовой критической точки. В частности, среди интерметаллидов на основе Се в последнее время особый интерес для исследователей представляют соединения $\text{CeCu}_{6-x}\text{Au}_x$, в которых при x в окрестности $x \approx 0,1$ обнаружено квантовое критическое (нефермижидкостное) поведение физических параметров. При этом в непосредственной близости к квантовой критической точке располагаются как соединения с тяжелыми фермионами CeCu_6 , характеризующееся рекордно большими значениями эффективной массы носителей заряда, так и магнитная кондо-решетка $\text{CeCu}_{5,8}\text{Au}_{0,2}$, для которой основное магнитоупорядоченное состояние формируется в условиях заметного влияния многочастичных эффектов.

Изучение магнитосопротивления цериевых интерметаллидов $\text{CeCu}_{6-x}\text{Au}_x$, а также твердых растворов $\text{Ce}(\text{Al}_{1-x}\text{Ni}_x)_2$ и $\text{Ce}(\text{Al}_{1-x}\text{Co}_x)_2$ с $x = 0$ и $0,05$, располагающихся в широкой окрестности квантовой критической точки, показало, что данные по температурным и полевым зависимостям магнитосопротивления $\Delta\rho(T, H)$ указанных соединений с тяжелыми фермионами и квантовым критическим поведением могут быть последовательно интерпретированы в рамках модели Иосиды рассеяния носителей заряда на локализованных магнитных моментах редкоземельных центров. При этом найденная из измерений магнитосопротивления эффективная локальная восприимчивость на тяжелых носителях заряда $\chi_{\text{loc}}(H, T) \sim (1/H d\rho/dH)^{-1/2}$ может быть применена для оценок перенормировки плотности электронных состояний в окрестности энергии Ферми.

В работе А.В. Семено (ИОФ РАН) "Локализованные магнитные моменты в CePd_2Si_2 : исследование в импульсных магнитных полях до 50 Тл" были представлены результаты исследования магнитной восприимчивости монокристалла тяжелофермионного соединения CePd_2Si_2 , выполненные в сильных импульсных магнитных полях (до 50 Тл) для двух направлений магнитного поля в диапазоне температур 4,2–15 К. Автору работы удалось показать, что для направления поля вдоль оси (100) зависимость намагниченности от магнитного поля описывается суммой двух вкладов: намагниченности локализованных магнитных моментов, которая стремится к насыщению в сильных полях, и линейного по полю вклада зонных электронов. Ниже температуры Нееля ($T_N \sim 8,5$ К) полевая зависимость намагниченности локализованных моментов хорошо описывается в

рамках модели антиферромагнетика с легкой осью анизотропии, причем наблюдаются магнитные переходы, обусловленные переворотом и схлопыванием магнитных моментов. По намагниченности насыщения локализованных электронов был определен средний магнитный момент, приходящийся на один атом Се, равный $0,35\mu_B$ при $T \sim 5$ К. При повышении температуры величина магнитного момента M уменьшается, причем экстраполяция экспериментальной зависимости $M(T)$ в область высоких температур предсказывает исчезновение локализованных моментов при $T \sim 30$ К. При приложении магнитного поля вдоль оси (001) полевая зависимость намагниченности слабо отклоняется от линейной при значениях поля вплоть до максимального во всем диапазоне температур, не претерпевая качественного изменения в окрестности T_N . Указанное поведение объясняется делокализацией 4f-электронов с направлением магнитного момента вдоль (001) и, как следствие, зонным характером магнетизма.

Доклад Н.Н. Тидена, П.А. Алексеева, В.Н. Лазукова, И.П. Садикова (РНИИ КИ), Р. Кана и Ж.-М. Миньо (Лаборатория Леона Бриллюэна, Франция) "Эффекты динамических магнитных корреляций в спектрах неупругого рассеяния нейтронов CeAl_3 " был посвящен изучению особенностей основного состояния тяжелофермионной системы CeAl_3 при низкой температуре с помощью магнитного рассеяния нейтронов. Недавние исследования показали, что происходит сильное увеличение энергии и уменьшение интенсивности перехода между основным и первым возбужденным состоянием f-электрона в кристаллическом электрическом поле (КЭП) при $T < E_{\text{КЭП}}$. При температуре $T \sim T_K$ (T_K — температура Кондо) все наблюдаемые эффекты значительно усиливаются. По-видимому, наблюдаемые особенности при $T < E_{\text{КЭП}}$ можно объяснить сильным обменным взаимодействием и наличием магнито-упругих эффектов, а при $T \sim T_K$ — возникновением сильно коррелированного состояния спинов основного дублета — спиновой жидкости. Формирование состояния спиновой жидкости должно приводить к появлению осцилляторной зависимости интенсивности квазиупругого магнитного рассеяния от переданного импульса в спектрах неупругого магнитного рассеяния нейтронов. Авторы доклада предприняли попытку найти экспериментальное подтверждение описанной выше картины. Для этого ими были проведены измерения спектров неупругого рассеяния нейтронов на поликристаллическом образце CeAl_3 при температурах 2, 7, 40 и 80 К и интервале переданного импульса $0,5 \text{ \AA}^{-1} < Q < 2,5 \text{ \AA}^{-1}$, при этом начальная энергия нейтронов составляла 3,27 мэВ, что обеспечило необходимое энергетическое и импульсное разрешение. Измерения проводились на спектрометре по времени пролета MIBEMOL (LLB, Франция). Для оценки фоновой и фононных составляющих были выполнены измерения пустого контейнера при температурах 2 и 80 К и образца LaAl_3 при $T = 80$ К. Полученная ширина квазиупругой составляющей магнитного рассеяния достаточно хорошо совпадает с уже известными результатами. При температуре $T = 2$ и 7 К была обнаружена осцилляторная зависимость интенсивности квазиупругого рассеяния, а при $T = 40$ и 80 К осцилляций обнаружено не было. По мнению авторов, полученные результаты в целом подтверждают предположение о возможности

описания состояния с тяжелыми фермионами при $T \sim T_K$ как состояния спиновой жидкости с резонирующими валентными связями.

В докладе В.А. Волкова (ИРЭ РАН), Ю.В. Дубровского и Е.Е. Вдовина (ИПТМ РАН) "Эффект типа Кондо в туннельной двойной 2D электронной системе" было рассмотрено поведение туннельной проводимости в связанных квантовых ямах. При исследовании туннелирования между разупорядоченными двумерными электронными системами, когда межслоевое кулоновское взаимодействие превышает внутрислоевое, была обнаружена аномально высокая равновесная туннельная проводимость. Двумерные электронные системы были сформированы с помощью дельта-легирования квантовых ям, разделенных туннельным барьером толщиной 5 нм. Концентрация электронов в слоях была одинаковой, $N_e = 2,6 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$ с точностью 5 %. Аномальная проводимость проявляется при $T = 0,3$ К в виде узкого пика на зависимости дифференциальной туннельной проводимости от внешнего смещения на туннельной структуре. Максимум пика находится точно при нулевом внешнем напряжении. Полуширина пика составляет 0,5 мэВ, а его амплитуда — 50 % от фоновой проводимости. На контрольных образцах с толщиной барьера 15 нм и более пик аномальной проводимости отсутствует. Были проведены тщательные измерения магнитопольевых и температурных зависимостей аномальной проводимости. Оказалось, что в магнитном поле как параллельном, так и перпендикулярном туннельному току аномальный пик подавляется. Он исчезает также при повышении температуры до 3 К. Наибольший интерес представляют собой температурные характеристики в магнитном поле. Оказалось, что подавленный магнитным полем аномальный пик в определенном диапазоне температур и магнитных полей восстанавливается при увеличении температуры. Авторы доклада предполагают, что наблюдаемую аномалию можно объяснить в рамках физики кондо-систем.

Свойства кондо-систем рассматривались также в докладе К.С. Немковского, П.А. Алексеева, В.Н. Лазукова, Е.В. Нефедовой, И.П. Садикова, Н.Н. Тидена (ИСФТТ РНИИ КИ), Ж.-М. Миньо (Laboratoire Leon Brillouin, Saclay, France), Ф. Ига (ADSM, Hiroshima University, Hiroshima, Japan) и Л.-П. Реньо (DRFMC/SPSMS, CEA, Grenoble, France) "Спиновая щель и дисперсия магнитных возбуждений в кондо-изоляторе YbB_{12} ". Соединение YbB_{12} — типичный представитель особого класса редкоземельных (РЗ) соединений — так называемых кондо-изоляторов. Ранее в экспериментах по неупругому рассеянию нейтронов (НРН) на поликристаллических образцах $\text{Yb}(\text{Lu})\text{B}_{12}$ был обнаружен необычный спектр магнитных возбуждений, демонстрирующий при $T \sim 10$ К спиновую щель ~ 10 мэВ и тонкую структуру, образованную тремя пиками с энергиями $E_1 \approx 15$ мэВ, $E_2 \approx 20$ мэВ и $E_3 \approx 40$ мэВ. При введении в YbB_{12} немагнитных дефектов (ионов Lu) спиновая щель сохраняется, но при этом происходит сильное размытие низкоэнергетических пиков E_1 и E_2 в спектре YbB_{12} , что указывает на существенную роль когерентных эффектов в редкоземельной подрешетке при формировании этой части спектра возбуждений. С целью детального изучения коллективных магнитных возбуждений в YbB_{12} авторами доклада были проведены измерения спектров НРН на монокристаллическом образце YbB_{12} . Установлено,

что два "когерентных" пика в спектре YbV_{12} при низких температурах соответствуют двум дисперсионным модам M_1 и M_2 с нетривиальной зависимостью интенсивности от приведенного волнового вектора $\mathbf{q}$ и температуры. При приближении к центру зоны Бриллюэна интенсивности обеих мод заметно уменьшаются, по-видимому, вплоть до нуля. При этом нижняя по энергии мода M_1 в наибольшей степени локализована в импульсном пространстве и имеет максимальную интенсивность в направлении $(\xi\xi\xi)$ вблизи границы зоны Бриллюэна, что может быть связано с наличием антиферромагнитных корреляций с волновым вектором $\mathbf{k} = (1/2, 1/2, 1/2)$. Незначительное (по сравнению с энергией этих обеих мод) повышение температуры приводит к подавлению моды M_1 и появлению широкого (с полушириной $\Gamma/2 \sim 15$ мэВ) квазиупругого сигнала.

Теоретическому изучению свойств низкоразмерных систем было посвящено несколько докладов. В работе А.В. Сыромятникова и С.В. Малеева (ПИЯФ РАН) "Киральные флуктуации в квантовом антиферромагнетике с треугольной решеткой CsCuCl_3 при $T = 0$ " рассматривалось поведение фрустрированных магнитных систем. Особое место среди них занимают антиферромагнетики с треугольной решеткой. Так, например, в работах Кавамуры был предложен новый класс универсальности для таких систем, а недавно С.В. Малеевым был указан способ проверки этой теории на основе экспериментов по изучению кирального рассеяния поляризованных нейтронов. Результаты первых экспериментов такого рода, проведенных на образце CsMnBr_3 , находятся в удовлетворительном согласии с теорией. Соединение CsCuCl_3 является еще одним объектом, представляющим интерес в связи с этим. Указанное вещество характеризуется тем, что вдоль оси c в нем существуют цепочки ферромагнитно взаимодействующих друг с другом атомов меди. В плоскости ab эти атомы образуют треугольную решетку, обмен в этой плоскости — антиферромагнитный, в шесть раз больший по величине, чем обмен вдоль цепочек. Важную роль в CsCuCl_3 играет взаимодействие Дзялошинского–Мория (ДМ), которое приводит к тому, что вдоль оси c образуются магнитные спирали. При этом угол отклонения соседних спинов вдоль спирали равен примерно $5,1^\circ$. При температуре $T_c \approx 10,7$ К происходит переход в упорядоченную фазу, при этом основным состоянием CsCuCl_3 является 120° -градусное упорядочение спинов в плоскости ab . В докладе рассматриваются киральные флуктуации в CsCuCl_3 при $T = 0$. В рамках линейной спин-волновой теории авторами доклада получены выражения для недиагональной компоненты тензора спиновой магнитной восприимчивости, описывающей киральные флуктуации. Показано, что вследствие фрустрации в данном случае возможно существование двух неэквивалентных основных состояний со 120° -градусной структурой. В этих состояниях реализуются спиновые конфигурации с различными значениями киральности троек соседних спинов. Показано также, что в одномерном образце эта компонента отлична от нуля даже в отсутствие взаимодействия ДМ и магнитного поля. Получены первые поправки по $1/S$ к этой величине. Оказалось, что в случае равной концентрации доменов в образце эти поправки велики, и необходим анализ всего $1/S$ -ряда. Поскольку киральный вклад в сечение рассеяния поляризованных нейтронов связан с

киральной компонентой тензора магнитной восприимчивости, в докладе обсуждается возможность экспериментального изучения обнаруженных особенностей.

В докладе С.Н. Артеменко (ИРЭ РАН) "Стабилизация жидкости Латтинджера примесями в квазиодномерных проводниках" обсуждались электронные свойства одномерных металлов, интерес к которым в значительной степени обусловлен бурным развитием физики углеродных нанотрубок и низкоразмерных полупроводниковых структур. Как известно, электронные свойства одномерных (1D) металлов кардинально отличаются от свойств обычных трехмерных (3D) металлов, которые хорошо описываются теорией ферми-жидкости Ландау. Элементарными возбуждениями в 3D-металле являются слабозатухающие одноэлектронные возбуждения, которые ведут себя как невзаимодействующие частицы. В отличие от 3D-случая, в чисто одномерной электронной системе теория ферми-жидкости неприменима при сколь угодно слабом межэлектронном взаимодействии — в 1D-металле квазичастицы отсутствуют, а единственными элементарными возбуждениями являются коллективные зарядовые и спиновые моды со звуковым спектром. Электронным жидкостям с такими свойствами присвоено общее наименование "жидкость Латтинджера" (ЖЛ). Вместе с тем применение концепции ЖЛ к описанию квазиодномерных проводников, т.е. сильно анизотропных проводников с цепочечной структурой, наталкивается на серьезные трудности, связанные с тем, что ЖЛ неустойчива при сколь угодно малой вероятности переходов электронов между проводящими цепочками. В докладе обсуждался возможный механизм стабилизации ЖЛ примесями, что в принципе позволяет привлекать этот подход для интерпретации экспериментов с квазиодномерными проводниками. Как известно, примеси в ЖЛ для низкоэнергетических возбуждений являются практически бесконечными барьерами, поэтому ЖЛ должна эффективно разбиваться на отдельные конечные отрезки. Это приведет к размерному квантованию коллективных мод и, следовательно, к появлению минимальной энергии возбуждений $E_{\min}$. В результате переходы между цепочками приводят к малым возмущениям и не разрушают ЖЛ при температурах $T < E_{\min}$. Для подтверждения описанной качественной картины автор доклада сначала исследовал бесщелевую 1D-модель Томонага–Латтинджера (ТЛ) с добавлением примесного потенциала и показал, что примеси действительно разбивают систему на совокупность практически независимых отрезков ЖЛ с дискретным энергетическим спектром. Затем были вычислены поправки к термодинамическому потенциалу и одночастичной функции Грина, возникающие из-за слабых межцепочечных переходов, и было показано, что эти поправки действительно оказываются малыми при низких температурах. В докладе обсуждалась возможность обобщения результатов модели ТЛ на более реалистичный случай кулоновского взаимодействия, рассматривалась возможность экспериментальной реализации ЖЛ в квазиодномерных материалах и было проведено сравнение с экспериментальными данными.

Общепринято, что ключом к пониманию необычных кинетических свойств нормального состояния высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) являются свойства носителей в плоскости CuO_2 , которые представляют собой почти идеальный аналог двумерного допи-

рованного антиферромагнетика (АФМ). В большинстве теоретических работ, претендующих на микроскопическое описание кинетических коэффициентов, обычно используется феноменологическая спиновая восприимчивость, отвечающая сильно затухающим парамагнетизмам, а спектр носителей выбирается на основании параметризации ферми-поверхности, наблюдаемой в экспериментах по фотоэмиссии с угловым разрешением (angle-resolved photoemission spectroscopy, ARPES). В докладе А.М. Белемука, А.Ф. Барабанова (ИФВД РАН) и Л.А. Максимова (РНЦ КИ) "К вопросу о температурной зависимости кинетических коэффициентов в ВТСП. Зависимость от спиновой восприимчивости" были исследованы температурные зависимости электросопротивления $\rho(T)$ и коэффициента Холла $R_H(T)$ для двумерного допированного антиферромагнетика в рамках модели решетки Кондо с учетом реального спектра зоны носителей, который отвечает ARPES и получен в спин-поляронном приближении для нижней квазичастичной зоны носителей тока. Считается, что рассеяние носителей происходит на АФМ-флуктуациях системы локализованных спинов, которая в отсутствие дальнего порядка рассматривается в сферически симметричном приближении с учетом спиновой фрустрации. При нахождении кинетических коэффициентов авторы доклада использовали многомоментный метод решения кинетического уравнения, который позволяет одновременно проанализировать зависимость неравновесных функций распределения от температуры в задачах электросопротивления и эффекта Холла. Было показано, что рассеяние носителей в основном обусловлено низколежащими спиновыми возбуждениями (с энергиями порядка 100–500 К) с импульсами близкими к АФМ-вектору $\mathbf{Q} = (\pi, \pi)$, при котором в спектре спиновых возбуждений имеется щель с величиной, определяемой температурой и параметром спиновой фрустрации. Это приводит к сильной анизотропии рассеяния, существенно изменяющейся с температурой и обусловленной также характером магнонов с импульсами, близкими к АФМ-вектору $\mathbf{Q}$. Исследована зависимость этой анизотропии от спиновой восприимчивости, при этом оказалось, что для спиновой восприимчивости в рамках антиферромагнитной жидкости, которая отвечает сильно затухающим парамагнетизмам, анизотропия рассеяния существенно подавляется большим затуханием магнонов. Показано, что для различных степеней допирования такой механизм рассеяния объясняет как линейную зависимость $\rho(T)$ (вплоть до достаточно низких температур), так и нетривиальное сильное возрастание константы Холла $R_H(T)$ при понижении температуры, которые экспериментально наблюдаются в ВТСП в нормальном состоянии. Также была исследована зависимость неравновесной добавки к функции распределения от числа моментов и показано, что необходим учет нескольких моментов для корректного описания низкотемпературного поведения коэффициента Холла. В целом, развитый многомоментный подход при решении кинетического уравнения позволяет корректно описать анизотропию рассеяния и температурную перестройку неравновесной функции распределения носителей.

Методы, описанные в предыдущем докладе при рассмотрении двумерных магнетиков, были нетривиальным образом применены для разработки модели жидкого состояния. В последнее время большой интерес у

исследователей, изучающих поведение жидкостей, вызывает проблема существования в жидкостях фазовых переходов между фазами с одинаковой симметрией, подобных переходу жидкость–газ. Такие фазовые переходы экспериментально наблюдаются в ряде плотных жидкостей. Предполагается, что необычные свойства воды (например отрицательный коэффициент теплового расширения) можно объяснить существованием перехода между более плотной и менее плотной модификациями в переохлажденной области. Вместе с тем теория подобных переходов еще далека от завершения. Существование переходов жидкость–жидкость определяется видом межмолекулярного потенциала. В настоящее время можно считать установленным, что такие переходы наблюдаются в системах с отрицательной кривизной потенциала, такого, например, как потенциал твердых сфер, к которому добавлена отталкивательная ступенька.

В докладе А.В. Михеенкова, А.Ф. Барабанова (ИФВД РАН) и Л.А. Максимова (РНЦ КИ) "Спин-жидкостной подход в теории классической жидкости" предложена простейшая решеточная модель двумерной жидкости, основанная на 2D-фрустрированной модели Гейзенберга, которая позволяет качественно описать поведение парной корреляционной функции в случае двухступенчатых потенциалов. Рассматривается двумерная жидкость со средним значением плотности ρ_0 . Для простейшего учета флуктуаций оператор локальной плотности представляется в виде $\rho = \rho_0 + \alpha S^z$, где S^z — оператор проекции спина 1/2. В первую очередь представляет интерес корреляционная функция плотности — плотность $c_{ij} = \langle S_i^z S_j^z \rangle$. Решеточность модели состоит в том, что плоскость разбивается на квадратные клетки с подходящим образом подобранной постоянной a ; внутри каждой из клеток все параметры считаются постоянными. Учитывается взаимодействие между первыми и вторыми соседними клетками (т.е. двухступенчатый потенциал). Если теперь разрешить движение флуктуаций плотности по системе, то поведение системы будет описываться фрустрированным гамильтоном Гейзенберга (ниже рассматривается лишь частный случай, когда коэффициенты перед продольными и соответствующими поперечными членами одинаковы): $H = J_1 \sum_{ig} S_i S_{i+g} + J_2 \sum_{id} S_i S_{i+d}$, где J_1 и J_2 — высота (глубина) первой и второй ступенек потенциала, g, d — соответственно первые и вторые ближайшие соседи. В модели, сформулированной на языке спиновых операторов, внутриузловое отталкивание флуктуаций автоматически оказывается бесконечным. Существенно, что для описания жидкости спиновую задачу для 2D-фрустрированного гейзенберговского АФМ следует рассматривать, полагая, что в каждом узле средние значения и продольной, и поперечных компонент спина равны нулю, т.е. применяя подход спиновой жидкости. Задача решается методом расщепления на втором шаге уравнений движения для двухвременных температурных функций Грина, что позволяет построить полную картину корреляторов. По мнению авторов доклада, предложенный подход позволяет продемонстрировать качественное поведение парных корреляторов при изменении параметров потенциала. В частности, выявлена тенденция к образованию молекулы при возникновении локального минимума на отталкивательной части потенциала. Кроме того, обнаружена немонотонность температурного хода корреляторов в случае двухсту-

пенчатого потенциала, т.е. возможность перехода жидкость – жидкость.

Изучение спин-поляризованных токовых состояний вызывает в последнее время большой интерес как теоретиков, так и экспериментаторов. Теоретическое исследование свойств "квантовых проволок" было представлено в докладе В.А. Сабликова и С.В. Полякова (ИРЭ РАН) "Зарядовая и спиновая структура квантового провода со спонтанно нарушенной спиновой симметрией". Как известно, в квантовых проволоках конечной длины происходит спонтанное нарушение спиновой симметрии, связанное с перераспределением электронной плотности между проводом и резервуарами, которые этот провод соединяют. В докладе проанализированы возможные спиновые состояния квантовых проводов в зависимости от вида контакта. Показано, что в проводе с резкими контактами к резервуарам состояние электронов характеризуется антиферромагнитным упорядочением по спину и зарядовым упорядочением, близким к вигнеровскому. В распределении спиновой плотности имеются осцилляции с волновым вектором по модулю близким к $2k_F$ (k_F — величина фермиевского волнового вектора), а зарядовая плотность содержит компоненту, осциллирующую с волновым вектором величиной, близкой к $4k_F$. Оказалось, что в зависимости от уровня химического потенциала возможны два типа состояний, различающихся значением полного спина и симметрией распределения спиновой плотности. В состоянии с полным спином, равным нулю, распределение спиновой плотности является нечетной функцией координаты. При этом возникает спонтанная поляризация спина у контактов, имеющая противоположные направления на концах провода. В поляризованном состоянии с ненулевым полным спином распределение спиновой плотности является четной функцией, причем одна из спиновых компонент спонтанно преобладает над другой, т.е. возникает состояние ферромагнитного типа. Поляризованное и неполяризованное состояния реализуются, когда уровень химического потенциала системы лежит в определенных полосах энергии относительно дна зоны проводимости в проводе. Наличие этих полос связано с резонансами волн заряда и спина на длине провода. Также рассмотрен механизм образования квазисвязанных состояний в квантовых проволоках с адиабатическими переходами к резервуарам и в квантовых контактах. Показано, что этот механизм обусловлен фриделевскими осцилляциями электронной плотности, возникающими вследствие отражения в них электронов высоких размерных подзон, не проходящих через провод. Взаимодействие с этими осцилляциями электронов открытых подзон приводит к рассеянию назад и образованию резонансов в проволоке. Результаты получены в приближении Хартри–Фока без ограничения по зависимости волновых функций от спиновой переменной. Используемый метод расчета позволяет определить амплитуду зарядовых осцилляций, существование которых следует и из теории ЖЛ, в которой, однако, их амплитуда остается неопределенной. Найдено, что амплитуда $2k_F$ -осцилляций спиновой плотности значительно превосходит амплитуду $4k_F$ -осцилляций заряда даже в случае кулоновского взаимодействия.

Проблема управления как отдельными спинами, так и потоками спинов (спиновым током) в наноструктурах представляет собой основную задачу недавно возникшей

и бурно развивающейся в последнее время науки — спинтроники. В докладе Н.М. Щелкачева (ИТФ РАН) "Спиновый транспорт в сверхпроводящих гибридных контактах" обсуждалась возможность использования андреевских квантовых ям (Andreev quantum dot, AQD) в качестве управляющего элемента для спиновых токов. Было показано, что AQD могут выполнять роль спинового фильтра, т.е. пространственно разделять спиновый и зарядовый токи; с другой стороны, с помощью AQD можно локализовать спин и управлять им; массивы AQD можно использовать для квантовых вычислений. В первом случае роль AQD играют гибридные контакты типа нормальный металл (ферромагнетик)–сверхпроводник–нормальный металл, при этом предполагается, что прозрачность границ между слоями много меньше единицы, например, благодаря наличию тонких слоев изолятора, а толщина сверхпроводника не превышает длины когерентности. Если предположить, что сверхпроводник и один из проводников заземлены, а из второго проводника на границу сверхпроводника направлен ток спин-поляризованных электронов (потенциал этого проводника меньше сверхпроводящей щели), то в сверхпроводнике уйдет почти весь зарядовый ток, а в первом проводнике будет присутствовать соответствующий спиновый ток. Этот эффект возникает благодаря тому, что сверхпроводник играет роль резонатора Фабри–Перо для боголюбовских квазичастиц, которые с вероятностью $1/2$ туннелируют из соответствующего квазистационарного состояния в сверхпроводнике в нормальный (первый) металл — в электронное или дырочное состояние. Вышеперечисленные эффекты играют важную роль для описания влияния доменной структуры ферромагнетика на электронный транспорт в системе сверхпроводник–ферромагнетик. Когда ферромагнетик почти полностью поляризован, то основной вклад в контактные контакты вносят доменные стенки. Хорошо известно, что в джозефсоновских контактах могут существовать связанные состояния боголюбовских квазичастиц, так называемые андреевские состояния, поэтому такую систему также можно назвать AQD. Можно показать, что спин — хорошее квантовое число таких состояний (например в контактах сверхпроводник–нормальный металл–сверхпроводник). Основное состояние такого контакта имеет спин равный нулю. В этом случае возбужденное состояние со спином $1/2$ имеет большое время жизни, что позволяет манипулировать этим состоянием. По величине джозефсоновского тока можно судить о состоянии спина в AQD, а получить такое возбужденное состояние можно, например, воздействуя на контакт микроволновым излучением. В докладе показано, как можно манипулировать квантовыми состояниями массивов AQD и производить квантовые вычисления.

В докладе С.М. Стишова, В.А. Сидорова, А.В. Цвященко, Л.Н. Фомичевой, А.Е. Петровой (ИФВД РАН), Е.Д. Бауэра и Дж. Томпсона (Лос-Аламосская национальная лаборатория, США) "Фазовая диаграмма зонного ферромагнетика $ZrZn_2$ " были приведены результаты измерения электрического сопротивления и магнитной восприимчивости зонного ферромагнетика $ZrZn_2$ при давлениях до 42 кбар и температурах до 0,4 К. Полученная фазовая диаграмма исследуемого вещества существенно отличалась от фазовой диаграммы, известной из предыдущих работ. В частности, оказалось, что сверхпроводящий фазовый переход не исчезает в кванто-

вой критической точке магнитного перехода. Результаты исследования позволяют сделать вывод о существовании на фазовой диаграмме $ZrZn_2$ тетракритической точки, что свидетельствует о слабости взаимодействия магнитного и сверхпроводящего параметров порядка.

Как известно, квантовые фазовые переходы происходят при температурах, близких к нулю, при этом основными параметрами, изменение которых приводит к переходу, являются давление, магнитное поле и структурный беспорядок. Как правило, именно давление используется для того, чтобы понизить температуру непрерывного фазового перехода (обычно между магнитной и немагнитной фазами) практически до нуля и приблизиться к квантовой критической точке. Несмотря на то, что значения давления, при которых наблюдаются квантовые критические явления в большинстве известных к настоящему времени веществ, по современным меркам не слишком высоки (порядка нескольких десятков килобар), экспериментальное изучение этих явлений оказывается довольно трудоемким и требует методических навыков в обращении с аппаратурой для создания высоких давлений. Методические вопросы, связанные с созданием аппаратуры, пригодной для экспериментального изучения квантовых фазовых переходов, обсуждались в докладе А.Е. Петровой, В.А. Сидорова и С.М. Стишова (ИФВД РАН) "Установка для сжатия гелия и гидростатическая камера типа «тороид» для исследований при низких температурах". В докладе было дано описание установки для получения давления в среде сжатого гелия, а также гидростатической камеры типа тороид для исследований при низких температурах. Аппаратура для экспериментов в среде сжатого гелия состоит из генератора высокого давления, камеры высокого давления и криостата. Генератор высокого давления включает в себя помимо стандартных элементов надежный обратный клапан, превращающий циклический режим мультипликатора в рутинную процедуру и сохраняющий давление в камере при выходе из строя отдельных узлов генератора. Камера высокого давления соединена с генератором тонким капилляром из нержавеющей стали, что уменьшает приток тепла в криостат. Камера помещается в герметичный держатель, который может перемещаться внутри дьюара, позволяя экономить гелий при исследованиях в области температур выше 4,2 К. Благодаря специальной конструкции соединения капилляра с генератором камера легко снимается с держателя для замены образца, уплотнений и т.п. Установка может быть использована для изучения электрических, магнитных и термодинамических свойств вещества при давлении гелия до 1,5 ГПа и температурах до 2 К и менее. В гидростатической камере типа тороид используются наковальни специального профиля. Образец помещается в миниатюрную тефлоновую капсулу диаметром $d = 2,2$ мм, высотой $h = 2$ мм, заполненную жидкостью. В камере проводятся исследования при давлениях до 6 ГПа в криостатах, позволяющих охла-

дить ячейку с $d = 53$ мм, $h = 135$ мм.

В докладе О.Б. Циока, Л.Г. Хвостанцева (ИФВД РАН), А.В. Голубкова и И.А. Смирнова (Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург) "Электронная и решеточная стадии валентного перехода в SmTe при высоком гидростатическом давлении" были представлены результаты прецизионных измерений электросопротивления, термоэдс, объема и теплопроводности SmTe в условиях истинно гидростатического давления при комнатной температуре. Исследовались стехиометрические и легированные (n -типа, $n \sim 8 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$) монокристаллические образцы высокого качества. Было установлено, что валентный переход происходит в виде последовательных этапов перестройки электронной подсистемы и кристаллической решетки, происходящих при различных давлениях. На начальном этапе перехода наблюдается металлизация, сопровождаемая аномалиями кинетических коэффициентов, при этом зависимость объема от давления лишь незначительно отклоняется от кривой, соответствующей исходной полупроводниковой фазе. Следующий этап сопровождается значительным изменением объема образца (коллапс решетки), но в этой области давлений электросопротивление и термоэдс перестают зависеть от давления. На завершающей стадии перехода сжимаемость образца уменьшается, электросопротивление и термоэдс снова начинают зависеть от давления, при этом в образце возникает состояние, которое по всем измеренным свойствам соответствует "золотой" фазе SmS. По мнению авторов доклада, полученные ими экспериментальные результаты допускают непротиворечивое описание на основе экситонной модели, включающей в себя два типа экситонных возбуждений — "обычные мелкие" экситоны, которые играют существенную роль в начале и в конце перехода, и "жесткие" экситоны, соответствующие высокотемпературной резонансной моде колебаний и определяющие поведение системы в области максимального ангармонизма (максимальной сжимаемости).

В целом, следует отметить, что, как показал второй семинар, интерес к данной тематике постоянно возрастает. Увеличившееся число докладов позволило охватить широкий круг проблем, связанных с различными аспектами физики сильно коррелированных систем и квантовых критических точек. По-прежнему были в равной мере представлены как экспериментальные, так и теоретические исследования, что способствовало широкому обмену информацией между теоретиками и экспериментаторами и повышению эффективности состоявшихся дискуссий. Успешное проведение двух первых семинаров позволяет надеяться на то, что семинар "Сильно коррелированные электронные системы и квантовые критические явления" станет регулярным.