

На правах рукописи

Петрова Алла Евгеньевна

**Исследование фазовой диаграммы геликоидального магнетика
MnSi при высоких гидростатических давлениях**

01.04.07 — физика конденсированного состояния

Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата
физико-математических наук

Троицк – 2007 г.

Работа выполнена в Институте физики высоких давлений
им. Л.Ф. Верещагина Российской Академии Наук

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук,
член-корреспондент РАН, профессор

Стишов Сергей Михайлович

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,
доцент

Алексеев Павел Александрович

доктор физико-математических наук,
профессор

Барабанов Александр Федорович

Ведущая организация—Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН

Защита состоится "6" ноября 2007 г. в 11⁰⁰ на заседании диссертационно-
го совета Д.002.097.01 при Институте физики высоких давлений им. Л.Ф.
Верещагина РАН , 142190, г. Троицк, Московской обл.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФВД РАН.

Автореферат разослан " _____ " _____ 2007 г.

Учёный секретарь

диссертационного совета

к.ф.-м.н.

Магницкая М.В.

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Теория ферми-жидкости, развитая Л.Д. Ландау, сводит описание системы сильно взаимодействующих электронов к разбавленной системе фермионных возбуждений - квазичастиц. Эта концепция оказалась весьма плодотворной при описании множества явлений в металлах, в том числе эффектов, обусловленных электрон-электронной корреляцией (магнетизм, сверхпроводимость). Сомнения в универсальной справедливости теории ферми-жидкости возникли в восьмидесятых годах прошлого столетия в результате открытия тяжелофермионных соединений и высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП), представляющих класс сильнокоррелированных электронных систем.

Исследования последних лет в области сильнокоррелированных электронных систем в значительной мере концентрируются на изучении так называемых квантовых фазовых переходов или квантовых критических явлений, являющихся результатом нетепловых квантовых флуктуаций, существование которых обусловлено принципом неопределенности. В чистом виде квантовые фазовые переходы наблюдаются только при $T = 0$, хотя их влияние на свойства вещества может простираться и на область конечных температур. В частности предполагается, что высокотемпературная сверхпроводимость связана со спецификой поведения вещества в квантовой критической области, где наблюдаются сильные отклонения от фермижидкостного поведения. Именно последнее и определяет интерес к этой особой области пространства, контролируемой температурой, давлением,

электрическими и магнитными полями.

Материальными представителями веществ с квантовым критическим поведением, как правило, являются соединения, содержащие элементы с незаполненной d-оболочкой и проявляющие антиферромагнитные или, что реже, ферромагнитные свойства при низких температурах. Соответствующие температуры Кюри и Нееля обычно понижаются при сжатии, что делает давление удобным контролирующим параметром, сдвигающим фазовый переход в квантовую критическую область. На этом пути получено множество интересных результатов. Достаточно в этой связи упомянуть открытие сверхпроводимости в квантовой критической области при высоких давлениях в антиферромагнетиках $CeIn_3$ и $CePd_2Si_2$ [1] и магнетике UGe_2 [2].

Это обстоятельство стимулировало интерес к исследованиям слабых зонных магнетиков $ZrZn_2$ и $MnSi$ при высоких давлениях. Соответствующие эксперименты, хотя и не обнаружили сверхпроводимости, привели к ряду весьма интересных результатов (трикритическая точка, нефермижидкостное поведение). Более того, в итоге указанных исследований возникло убеждение, что фазовый переход в зонных ферромагнетиках и геликомагнетиках при низких температурах генетически является фазовым переходом первого рода, что фактически исключает существование сколько нибудь обширной квантовой критической области.

Однако общепринятая техника высоких давлений при низких температурах с использованием для передачи давления жидкостей, затвердевающих при относительно высоких температурах не обеспечивает истинной гидростатичности эксперимента. Возникающие в передающей давлении среде

неоднородные напряжения могут привести к некорректным результатам, что ставит под вопрос справедливость выполненных наблюдений и следующих из них выводов. Таким образом, проблему фазовых переходов в зонных ферромагнетиках при низких температурах нельзя считать решенной.

Все изложенное выше определило актуальность настоящей работы, целью которой явилось исследование слабого зонного геликоидального магнетика $MnSi$ при атмосферном и высоком давлениях.

Цель работы

- Исследование фазовой диаграммы слабого зонного геликоидального магнетика $MnSi$ при атмосферном и высоком давлениях при низких температурах и в магнитном поле.
- Разработка элементов и устройств, обеспечивающих проведение физического эксперимента при низких температурах в среде сжатого гелия.
- Создание автоматизированного комплекса, позволяющего проводить измерения физических свойств материалов в широком диапазоне температур 1.8 – 300 К и давлений (до ~ 1.1 ГПа при низких температурах).

Положения, выносимые на защиту

1. При атмосферном давлении магнитный фазовый переход в $MnSi$ является слабым переходом первого рода со скачками объема $\Delta V/V_0 \sim 3 \times 10^{-6}$ и энтропии $\Delta S/R \sim 5 \times 10^{-4}$.

2. В результате измерений магнитной восприимчивости монокристалла $MnSi$ в области магнитного фазового перехода в среде сжатого гелия, обнаружено существование трикритической точки на кривой фазового перехода при давлении ≈ 0.355 ГПа и температуре ≈ 25.2 К.
3. При температурах несколько выше (~ 0.5 К) температуры фазового перехода $MnSi$ на температурных зависимостях теплоемкости, теплового расширения и температурной производной электрического сопротивления имеет место отчетливое плечо, имеющее вид пологого экстремума. При исследовании электрического сопротивления обнаружено, что эта особенность фазового перехода исчезает при давлении ~ 0.35 ГПа, соответствующем координате трикритической точки.

Научная новизна и ценность работы

Впервые с помощью специально развитой техники высоких давлений при низких температурах исследована фазовая диаграмма $MnSi$ при давлениях до 1.1 ГПа. Получены существенно новые результаты о виде фазовой диаграммы $MnSi$ при высоких давлениях. Показано, что трикритическая точка на фазовой диаграмме $MnSi$ расположена при значительно более низком давлении и более высокой температуре ($P_{tr} \cong 0.355$ ГПа, $T_{tr} \cong 25.2$ К), чем это считалось ранее на основании экспериментов [3, 4] с использованием негидростатичной среды для передачи давления (~ 1.2 ГПа, ~ 12 К).

Систематическое исследование $MnSi$ при атмосферном давлении показало наличие скачкообразного перехода, что наряду с существованием трикритической точки при высоком давлении дает основание полагать на-

личие истинной квантовой критической точки при высоких давлениях и $T \rightarrow 0$.

Полученные результаты являются новыми и вносят существенный вклад в физику сильнокоррелированных систем.

Практическая ценность работы

Развитая техника низкотемпературных исследований может найти применение в ряде технических приложений, связанных с использованием низких и сверхнизких температур при высоких давлениях.

Апробация работы

Результаты данной работы были доложены на трех международных конференциях по сильнокоррелированным электронным системам (SCES'04, Карлсруе, Германия, 2004; SCES'05, Вена, Австрия, 2005; SCES'07, Хьюстон, США, 2007), на международной школе по сильно коррелированным электронным системам (Каргез, Франция, 2005), на Гордоновской конференции по высоким давлениям (Биддефорд, США, 2006), на международной конференции "Novel Pressure-induced Phenomena in Condensed Matter Systems" (Фукуока, Япония, 2006), на семинаре по сильно коррелированным электронным системам и квантовым критическим явлениям (ИФВД РАН, 2004, 2005, 2006, 2007).

Публикации

По результатам данной работы опубликовано 10 статей в реферируемых научных журналах.

Объем работы

Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Общий объем диссертации составляет _____ страниц, в том числе _____ рисунков. Список

литературы содержит _____ наименований.

II. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована постановка задачи, кратко описана структура диссертации.

В первой главе представлен обзор литературы по исследованию физических свойств $MnSi$. Кратко описана специфика геликоидальных структур, даны сведения о магнитной и кристаллической структуре $MnSi$, описаны электронные и термодинамические свойства, представлены фазовая диаграмма в магнитном поле и фазовая диаграмма при высоких давлениях. В обзоре также приводятся результаты измерений электросопротивления при высоких давлениях, главным итогом которых стало открытие неферми-жидкостного поведения $MnSi$ в очень широком диапазоне температур, давлений и магнитных полей.

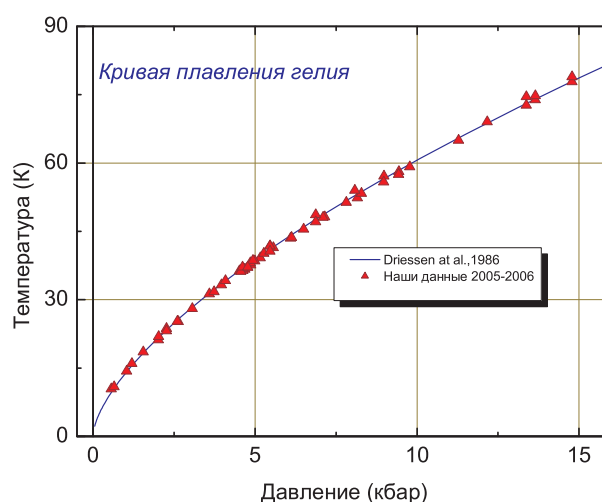


Рис. 1: Кривая плавления гелия [5] и наши экспериментальные данные.

Во второй главе описаны техника и методика проведения эксперимента. Сформулированы основные проблемы экспериментальных исследова-

ний при высоких давлениях и низких температурах. Особое внимание уделено технике эксперимента при высоких давлениях и низких температурах в среде сжатого гелия. Описана методика измерения давления в сжатом гелии при низких температурах. Представлена конструкция криостата, специально разработанного для работы при низких температурах в камере высокого давления, соединенной с генератором высокого давления посредством стального капилляра. Кратко описана система сбора данных и измерительное оборудование, используемое при проведении эксперимента.

Одной из главных экспериментальных проблем техники высоких давлений при низких температурах является гидростатичность передающей давление среды. Гелий является наилучшей средой для передачи давления, поскольку он обладает высокой пластичностью даже в кристаллическом состоянии. Однако использование гелия сопряжено со значительными проблемами, связанными с легкостью утечки гелия через малейшие несовершенства уплотнений подвижных и неподвижных частей аппаратуры.

Нами была разработана специальная техника введения электрических проводников через эпоксидное уплотнение в камеру высокого давления, позволяющая работать при высоких давлениях и низких температурах без утечки гелия. Решением проблемы оказалась ступенчатая форма отверстия для размещения проводов в электропроводе. Наилучшие результаты были получены с использованием в уплотнении дополнительного слоя "пластичной" эпоксидной смолы, содержащей около 50% порошкообразного индия по объему, что повышает надежность работы электропровода при низких температурах. Конструкция электропровода, разработанного нами, использовалась при давлениях гелия до 15 кбар в диапазоне температур

1.8 – 300 К.

Точное измерение давления при низких температурах также представляет собой сложную задачу. В нашем случае, до тех пор, пока гелий находится в газовой-плотном состоянии, давление определяется с помощью калиброванного манганинового манометра, после того, как гелий закристаллизуется давление вычисляется из уравнения состояния гелия [5] на основе полученных координат его кривой плавления. На рис. 1 приведены кривая плавления гелия, построенная на основании расчетов [5] и аккуратных экспериментов по определению уравнения состояния гелия [6, 7, 8, 9, 10, 11], а также наши данные, полученные в различных экспериментах.

Сконструирован криостат, предназначенный для охлаждения исследовательской камеры высокого давления, связанной с генератором давления тонким капилляром из нержавеющей стали. Криостат позволяет регулировать температуру в широком диапазоне температур (1.8 – 300 К). Конструкция криостата обеспечивает легкий доступ к камере высокого давления и возможность ее извлечения без полного размораживания криостата.

Для управления измерительным оборудованием и сбором данных разработано программное обеспечение в среде графического программирования *LabView*. Подготовленный пакет программ позволяет проводить измерения в автоматическом режиме и регулировать температуру, изменяя положение камеры в криостате с помощью шагового двигателя.

Третья глава посвящена описанию и анализу результатов экспериментальных исследований слабых зонных магнетиков $ZrZn_2$ и $MnSi$. В ней рассмотрены результаты измерений магнитной восприимчивости $ZrZn_2$ при высоких давлениях, магнитной восприимчивости и электрического

сопротивления $MnSi$ при высоких давлениях, а также проведено систематическое исследование термодинамических, транспортных и магнитных свойств $MnSi$ при атмосферном давлении. Дано описание метода получения монокристалла $MnSi$ и его основные характеристики.

В заключении третьей главы проведено обсуждение полученных нами результатов эксперимента. Одним из важнейших результатов исследованных нами свойств слабого зонного геликоидального магнетика $MnSi$ является обнаружение дублетной структуры температурных зависимостей теплоемкости, линейного коэффициента теплового расширения и температурного коэффициента электрического сопротивления в области магнитного фазового перехода. Характерный для всех величин острый пик в точке фазового перехода дает основание рассматривать его, как слегка размытую дельта-функцию, что находит свое отражение в практически скачкообразном поведении теплового расширения, энтропии и электрического сопротивления. Все это позволяет идентифицировать фазовый переход в $MnSi$ при атмосферном давлении, как слабый переход первого рода. Анализ полученных данных показывает, что $MnSi$ переходит в магнитное состояние с весьма малым скачком объема (3×10^{-6}), поэтому ранее его не удавалось обнаружить из-за недостаточной точности эксперимента. Характер поведения магнитной восприимчивости при высоком давлении позволяет предполагать существование трикритической точки на кривой фазового перехода с координатами $P_{tr} \cong 0.355$ ГПа, $T_{tr} \cong 25.2$ К. Из последнего следует, что при давлении $P > 0.355$ ГПа в $MnSi$ происходит непрерывный фазовый переход.

Магнитная восприимчивость при высоких давлениях. Перейдем

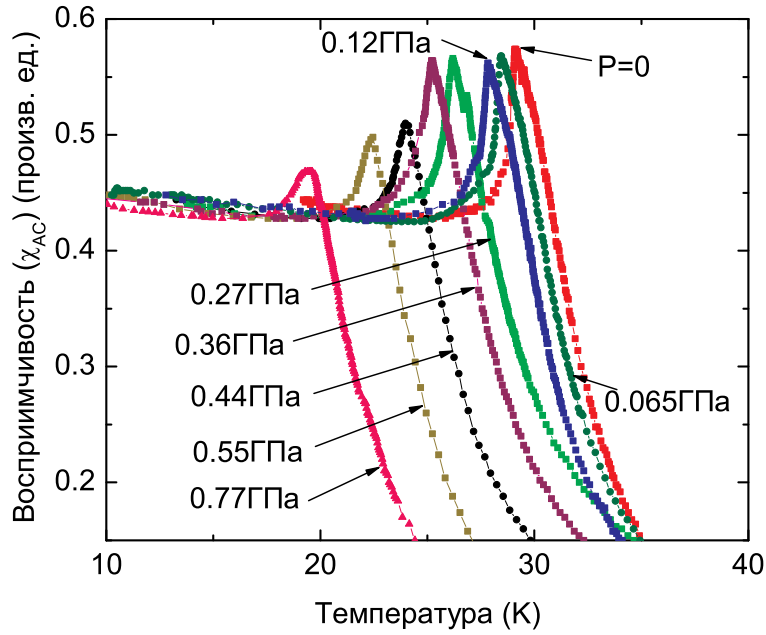


Рис. 2: Влияние давления на поведение χ_{AC} $MnSi$ при фазовом переходе.

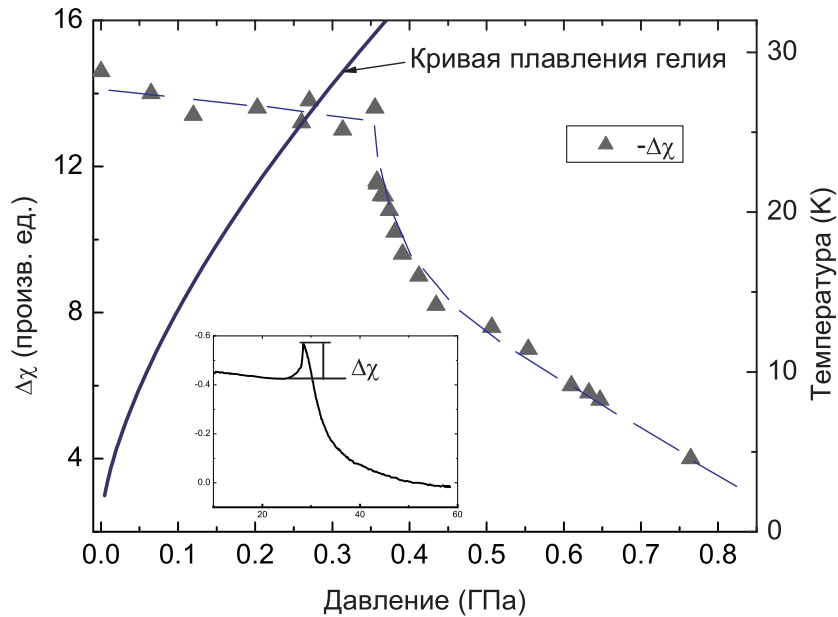


Рис. 3: Эволюция формы сингулярности χ_{AC} при фазовом переходе в $MnSi$. (Шкала температуры по оси ординат справа относится к кривой плавления гелия).

к изложению основных экспериментальных результатов. Первоначально проведены измерения магнитной восприимчивости монокристалла $MnSi$ в области ферромагнитного фазового перехода до давлений 0.8 ГПа в среде сжатого гелия. Измерения проводились стандартным модуляционным ме-

тодом на переменном токе частотой 19 Гц. На рис. 2 изображено несколько избранных кривых, демонстрирующих влияние давления на положение и форму псевдосингулярности χ_{AC} в области магнитного фазового перехода в *MnSi*. В гидростатических условиях, реализованных в нашем эксперименте, сингулярная форма восприимчивости χ_{AC} при фазовом переходе в *MnSi* практически не меняется до давления 0.355 ГПа (рис. 3), несмотря на то, что часть соответствующих экспериментальных точек находится внутри области стабильности твердого гелия. Такая эволюция формы восприимчивости χ_{AC} с ростом давления соответствует тому, что можно было бы ожидать на основе физики трикритических явлений. Таким образом, из нашего эксперимента следует, что трикритическая точка на фазовой диаграмме *MnSi* расположена при значительно более низком давлении и более высокой температуре ($P_{tr} \cong 0.355$ ГПа, $T_{tr} \cong 25.2$ К), чем это считалось ранее на основании экспериментов [3, 4] с использованием изопентана в качестве среды, передающей давление (~ 1.2 ГПа, ~ 12 К). Причины такого различия, возможно, связаны с возникновением неоднородных деформаций, возникающих при сжатии в негидростатической среде.

Электрическое сопротивление при высоких давлениях. Далее был проведен ряд прецизионных измерений электрического сопротивления монокристалла *MnSi* при атмосферном и высоком давлении в среде сжатого гелия с целью определения поведения производной $d\rho/dT$ в области фазового перехода. Электрическое сопротивление измерялось стандартным четырехконтактным методом на постоянном токе. Всего было проведено 24 серии измерений электрического сопротивления монокристалла *MnSi* вдоль квазиизобар при температурах от 2 до 100 К и давлениях до 1.1 ГПа.

Экспериментальные данные частично представлены на рис. 4.

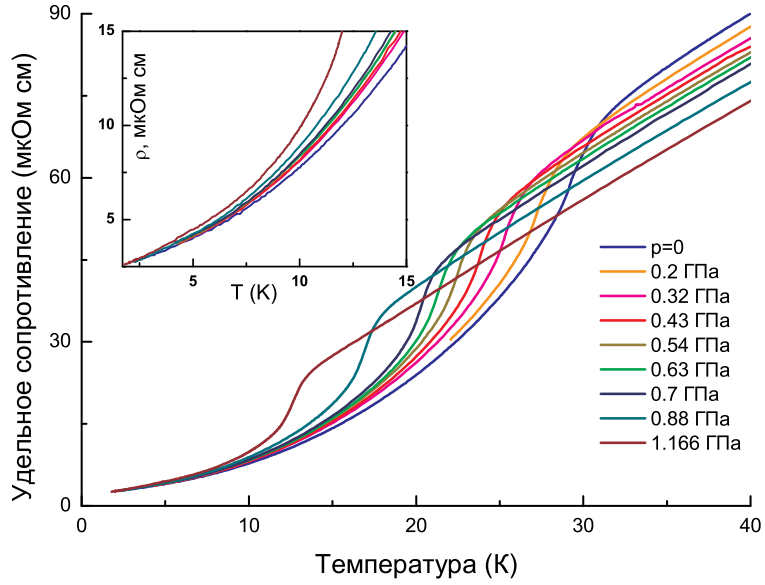


Рис. 4: Температурная зависимость удельного электрического сопротивления $\rho(T)$ $MnSi$ вдоль различных квазиизобар.

Как видно из рис. 4, производная электрического сопротивления $MnSi$ по давлению положительна при $T < T_c$ и отрицательна при $T > T_c$. Это, по-видимому, означает, что флуктуации параметра порядка, играющие доминирующую роль при рассеянии электронов в критической области, продолжают давать существенный вклад в электрическое сопротивление $MnSi$ при значительном удалении от линии фазового перехода.

Рассмотрим поведение температурного коэффициента сопротивления $d\rho/dT$ в окрестности фазового перехода. При атмосферном давлении кривая $d\rho/dT$ (рис. 5) имеет ясно различимое плечо выше T_c , исчезающее с давлением. Плечо на кривой становится неразличимым при давлении ~ 0.35 ГПа, соответствующем координате трикритической точки, определенной из измерений магнитной восприимчивости. Сравнение экспериментальных данных показывает, что фазовому магнитному переходу соответ-

ствует резкий пик со стороны низкотемпературной части $d\rho/dT$.

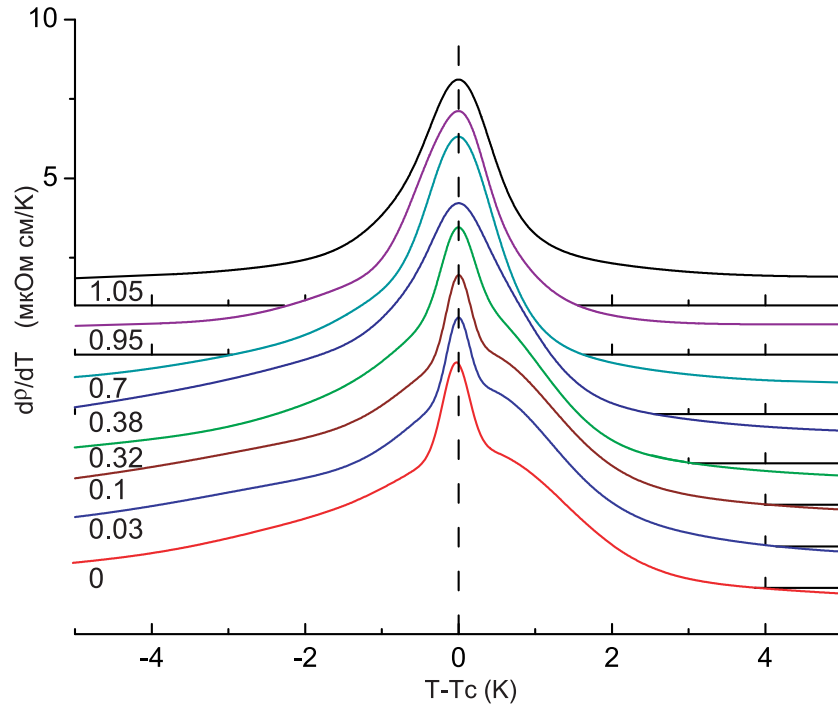


Рис. 5: Поведение $d\rho/dT$ в окрестности T_c при различных давлениях. Цифры в левой стороне рисунка соответствуют значениям давления в ГПа.

Поведение $\chi(T)$, $d\rho(T)/dT$, $\alpha(T) = (1/L_0)dL/dT$, $C_p(T)$ при атмосферном давлении. С целью прояснить природу дублетной структуры, обнаруженной на кривой зависимости температурного коэффициента электросопротивления, было проведено систематическое исследование термодинамических, транспортных и магнитных свойств $MnSi$ при атмосферном давлении на образце высокого качества. На этом монокристалле со степенью мозаичности не больше 0.1° были измерены магнитная восприимчивость на переменном и постоянном токах $\chi(T)$, электрическое сопротивление ($\rho(T)$), линейный коэффициент теплового расширения $\alpha(T)$ и теплоемкость (C_p) при атмосферном давлении с особым вниманием к области фазового магнитного перехода.

Зависимость магнитной восприимчивости от температуры выглядит, на

первый взгляд, как обычная λ -особенность, характерная для фазовых переходов второго рода, однако хорошее разрешение позволяет видеть, что $\chi(T)$ в точке фазового перехода меняется практически скачкообразно.

Обратимся к рассмотрению поведения других физических величин в области фазового перехода в *MnSi*. C_p/T (рис. 6 (а)) выглядит, как слегка размытая дельта-функция на вершине максимума. Аналогичное поведение ("резкий пик на вершине пологой горы") проявляется и в поведении $d\rho(T)/dT$ и $\alpha(T)$ вблизи фазового магнитного перехода (рис. 6 (б), 7 (а)). В области фазового перехода производная электросопротивления, коэффициент линейного теплового расширения и теплоемкость ведут себя подобным образом. Этот факт замечательно согласуется с выводами работ [12, 13, 14], в которых предсказана пропорциональность между $d\rho(T)/dT$ и $C(T)$ вблизи фазового перехода для магнитных металлов. Резкий пик, характерный для всех вышеупомянутых величин, при интегрировании, очевидно, приводит к скачкообразному изменению энтропии, объема и электрического сопротивления в точке фазового перехода. Это позволяет идентифицировать фазовый переход в *MnSi*, как слабый переход первого рода. Как видно из рис. 7 б, в точке перехода на кривой $\Delta L/L_0$, полученной интегрированием $\alpha(T)$, видна слабая аномалия, которая представляет собой скачок величиной всего $\sim 1 \times 10^{-6}$ (рис. 7 б). Таким образом, фазовый переход в *MnSi* происходит со скачком объема $\Delta V/V \sim 3 \times 10^{-6}$.

Заключение о природе фазового перехода в *MnSi*, как перехода первого рода, подтверждается измерениями теплоемкости и линейного коэффициента теплового расширения (C_p и α) в магнитном поле, из которых следу-

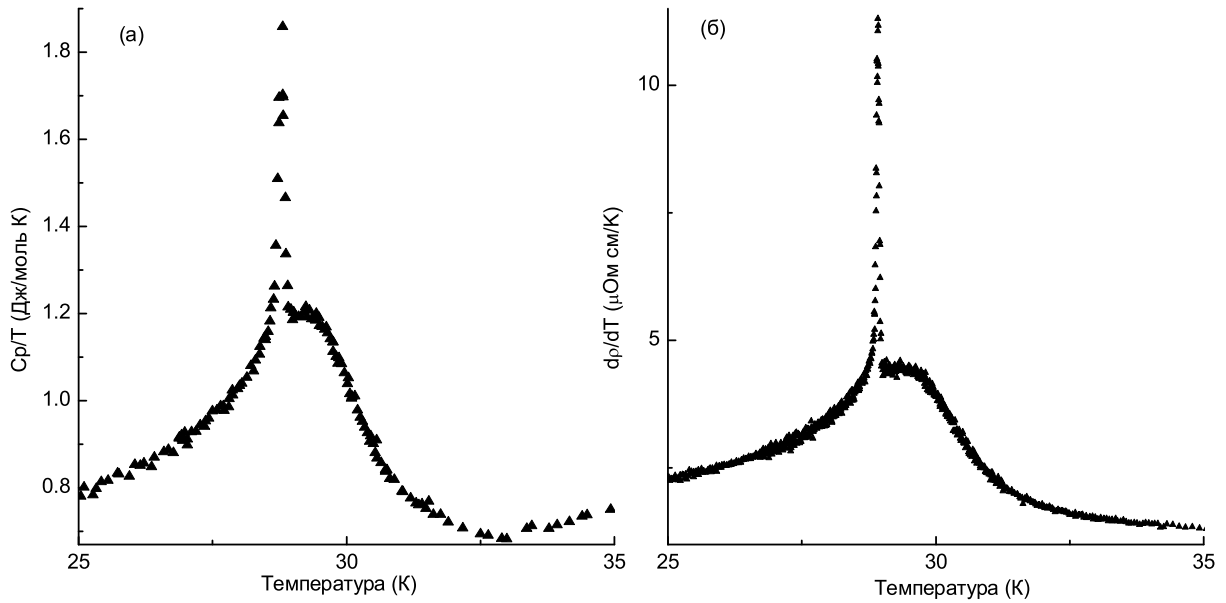


Рис. 6: Зависимости теплоемкости (а) и температурного коэффициента электрического сопротивления (б) от температуры.

ет, что до 0.4 Т геликоидальная фаза практически не чувствует магнитное поле. Это, по-видимому, означает, что параметр порядка имеет конечное значение в точке перехода, и, следовательно, фазовый переход в $MnSi$ является переходом первого рода. Последнее прекрасно согласуется с результатом работы [15], в которой показано, что переход из конической в ферромагнитную спиновую структуру при температуре близкой к T_c происходит при конечном значении критического магнитного поля.

При повышении давления меняется характер поведения магнитной восприимчивости и температурного коэффициента сопротивления (см. рис. 3,5). До давления 0.355 ГПа амплитуда пика восприимчивости практически не меняется, но при дальнейшем увеличении давления начинает быстро уменьшаться (рис. 3). Такая эволюция формы восприимчивости χ_{AC} с ростом давления соответствует поведению, соответствующему трикритическим явлениям. При атмосферном давлении кривая $d\rho/dT$

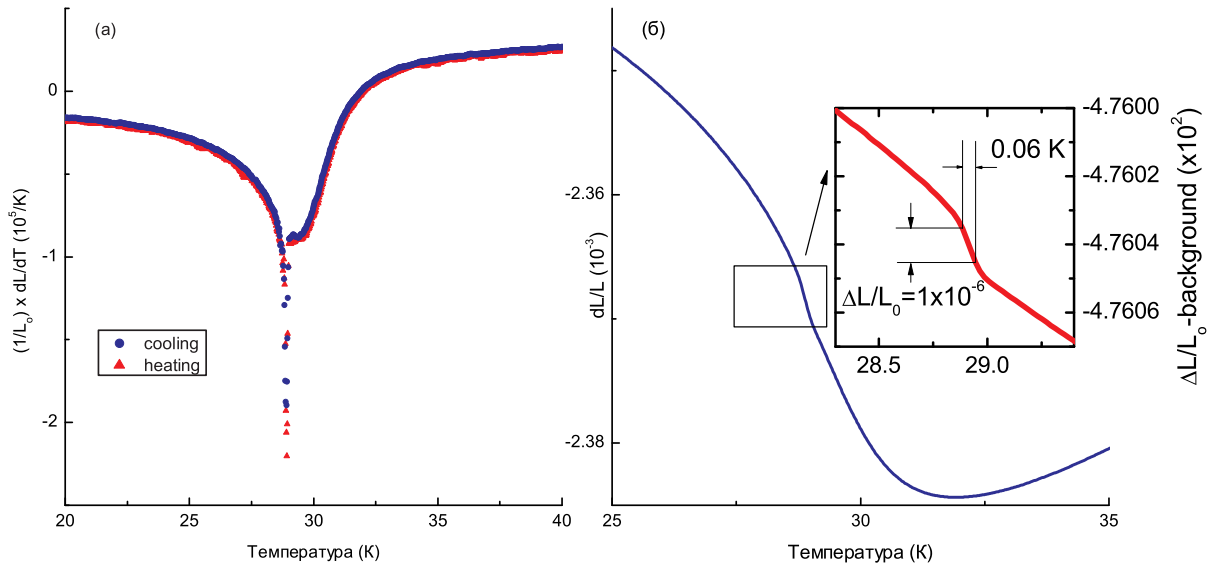


Рис. 7: Зависимости линейного коэффициента теплового расширения (а) и линейного теплового расширения (б) от температуры.

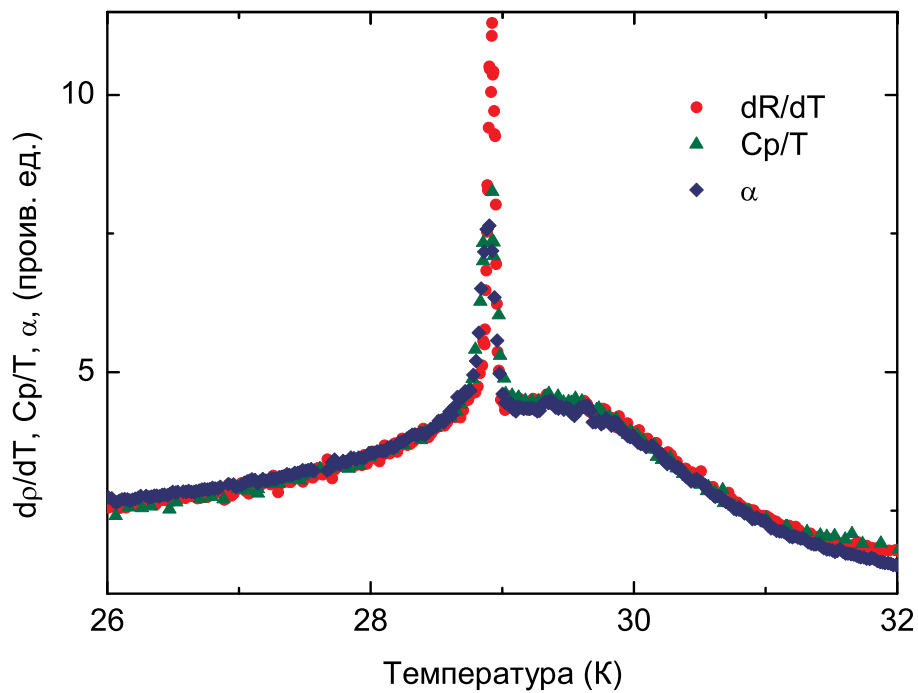


Рис. 8: Зависимости C_p/T , $d\rho/dT$ и α , полученные линейным масштабированием. Данные для α приведены с отрицательным знаком.

имеет ясно различимое плечо выше T_c , исчезающее с давлением. Последнее происходит при давлении ~ 0.35 ГПа, соответствующем координате трикритической точки, установленной по измерениям магнитной восприимчи-

вности. Таким образом, если при атмосферном давлении $MnSi$ испытывает фазовый переход первого рода, и при повышении давления существует трикритическая точка, то естественно считать, что при высоком давлении фазовый переход в $MnSi$ становится переходом второго рода. И, следовательно, при критическом давлении и нулевой температуре $MnSi$, скорее всего, обладает квантовым критическим поведением.

В **Заключении** сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы:

1. Создан автоматизированный комплекс для проведения измерений физических свойств материалов в широком диапазоне температур 1.8 – 300 К и давлений (до ~ 1.5 ГПа). Отличительная особенность комплекса состоит в использовании гелия в качестве среды, передающей давление.
2. Разработан способ введения многоканальных электрических вводов в камеру высокого давления, работающую при низких температурах в среде сжатого гелия.
3. Сконструирован криостат, предназначенный для охлаждения исследовательской камеры высокого давления, связанной с генератором давления тонким капилляром из нержавеющей стали.
4. Проведены измерения магнитной восприимчивости монокристалла $MnSi$ в области ферромагнитного фазового перехода при давлениях до 0.8 ГПа в среде сжатого гелия. Обнаружено, что форма функции $\chi(T)$ в точке перехода радикально меняется при $P \approx 0.355$ ГПа,

$T \approx 25.2$ К. Характер поведения $\chi(T)$ позволяет предполагать существование трикритической точки на кривой фазового перехода с вышеуказанными координатами, что существенно корректирует ранее опубликованные данные.

5. Исследовано поведение электрического сопротивления монокристалла *MnSi* в области магнитного фазового перехода при температурах от 2 до 100 К и давлениях до > 1.1 ГПа. Температурная производная электрического сопротивления имеет вид острого максимума на линии фазового перехода. Обнаружена дублетная структура на кривой $d\rho/dT$ в окрестности фазового перехода. Симптоматично, что эта структура исчезает при давлении ~ 0.35 ГПа, соответствующем координате трикритической точки.
6. Проведены измерения магнитной восприимчивости, электрического сопротивления, линейного коэффициента теплового расширения и теплоемкости монокристалла *MnSi* при атмосферном давлении и низких температурах. Резкие пики, обнаруживаемые соответствующими величинами в точке фазового перехода, дают основание для их отождествления со слегка размытыми дельта-функциями, что отражается в практически скачкообразном поведении теплового расширения, энтропии и электрического сопротивления. Все это позволяет идентифицировать фазовый переход в *MnSi* при атмосферном давлении, как слабый переход первого рода.
7. Показано, что теплоемкость и коэффициент теплового расширения геликоидальной фазы *MnSi* в окрестности точки Кюри практически не

реагируют на магнитное поле вплоть до 0.4 Т, что означает определенную жесткость геликоидальной магнитной структуры и, следовательно, конечное значение параметра порядка в точке фазового перехода.

8. На основании экспериментальных данных получены следующие параметры фазового перехода в *MnSi* при атмосферном давлении: $\Delta V/V_0 \sim 3 \times 10^{-6}$, $\Delta S/R \sim 5 \times 10^{-4}$, $dT/dP = 1.1 \times 10^{-3}$ К/бар—наклон линии фазового перехода, ожидаемый термодинамический гистерезис $\delta \approx 5 \times 10^{-3}$ К. Удивительно низкие значения скачков объема и энтропии дают количественную характеристику понятию слабого перехода первого рода. Полное приращение магнитной энтропии от 0 до 30 К, составляет всего лишь величину порядка $5 \times 10^{-2} R$, что еще раз подтверждает зонную природу магнетизма в *MnSi*.
9. Установлено почти совершенное подобие (рис. 8) в поведении теплоемкости, коэффициента теплового расширения и температурного коэффициента электрического сопротивления в окрестности фазового перехода в *MnSi*, что указывает на спиновые флуктуации как основной фактор, определяющий поведение термодинамических и кинетических свойств *MnSi* вблизи точки Кюри.

Материалы диссертации отражены в следующих публикациях:

1. С.М. Стишов, А.Е. Петрова, "Способ герметичного соединения капилляра с узлами установок высокого газового давления", ПТЭ **5**, 149-151 (2003)
2. А.Е. Петрова, С.М. Стишов, "Криостат для низкотемпературных исследований при высоких давлениях", ПТЭ **1**, 152-155 (2004)

3. Alla E. Petrova, Vladimir A. Sidorov, Sergei M. Stishov, "High-pressure helium gas apparatus and hydrostatic toroid cell for low-temperatures applications", *Physica B* **359-361**, 1463-1465 (2005)
4. А.Е. Петрова, В.Н. Краснорусский, Джон Саррао, С.М. Стишов, "О трикритической точке в MnSi при высоких давлениях", *ЖЭТФ* **129**, 723-727 (2006)
5. Sergei M. Stishov, Vladimir A. Sidorov, Anatoly V. Tsvyashchenko, Eric D. Bauer, Alla E. Petrova, Tuson Park, Joe D. Thompson, "Phase diagram of $ZrZn_2$ at high pressure: low temperature features and elusive superconductivity", *Physica B* **378-380**, 411-412 (2006)
6. A.E. Petrova, V. Krasnorussky, J. Sarrao, S.M. Stishov, "Tricritical behavior in MnSi at nearly hydrostatic pressure", *Phys. Rev. B* **73**, 052409–1–052409–4 (2006)
7. А.Е. Петрова, С.М. Стишов, "Низкотемпературные электрические вводы высокого давления в среде сжатого гелия", *ПТЭ* **4**, 150-152 (2006)
8. Alla E. Petrova, E. D. Bauer, Vladimir Krasnorussky, Sergei M. Stishov, "Behavior of the electrical resistivity of MnSi at the ferromagnetic phase transition", *Phys. Rev. B* **74**, 092401–1–092401–4 (2006)
9. А.Е. Петрова, Е.Д. Бауэр, В.Н. Краснорусский, С.М. Стишов, "Аномальное поведение электрического сопротивления MnSi в области ферромагнитного фазового перехода", *ЖЭТФ* **131**, 54–58 (2007)

10. S. M. Stishov, A.E. Petrova, S. Khasanov, G. Kh. Panova, A.A.Shikov, J. C. Lashley, J. D. Thompson, D. Wu, T. A. Lograsso, "Magnetic phase transition in the itinerant helimagnet MnSi: Thermodynamic and transport properties", Phys. Rev. B **76**, 052405–1–052405–4 (2007)
-

- [1] N. D. Mathur, F. M. Grosche, S. R. Julian, I. R. Walker, D. M. Freye, R. K. W. Haselwimmer, G. G. Lonzarich, Nature **394**, 39 (1998)
- [2] S. S. Saxena, P. Agarwal, K. Ahilan, F. M. Grosche, R. K. W. Haselwimmer, M. J. Steiner, E. Pugh, I. R. Walker, S. R. Julian, P. Monthoux, G. G. Lonzarich, A. Huxley, I. Sheikin, D. Braithwaite, J. Flouquet Nature **406**, 587 (2000)
- [3] C. Thessieu, J. Flouquet, G. Lapertot, A.N. Stepanov, D. Jaccard, Solid State Communications **95**, 707 (1995)
- [4] C. Pfleiderer, G.J. McMullan, S.R. Julian, G.G. Lonzarich, Physical Review B **55**, 8330 (1997)
- [5] A. Driessen, E. van der Poll, I.F. Silvera, Phys.Rev. B **33**, 3269 (1986)
- [6] R.K. Crawford, W. B. Daniels, J. Chem. Phys. **55**, 5651 (1971)
- [7] E.R. Grilly, R.L. Mills, Ann. Phys. (N.Y.) **8**, 1 (1959)
- [8] C.A. Swensen, Phys. Rev. **89**, 538 (1953)
- [9] R.L. Mills, E.R. Grilly, Phys. Rev. **99**, 480, (1955)
- [10] D. W. J. Langer, J. Phys.Chem. Solids **21**, 122 (1961)
- [11] NIST, Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties – REFPROP, Version 7.0 (2002)
- [12] В.М.Набутовский, А.З. Паташингский, ФТТ **10**, 3121 (1968)
- [13] M.E. Fisher and J.S. Langer, Phys.Rev.Lett. **20**, 665 (1968)
- [14] T.G. Richard and D.J.W. Geldart, Phys.Rev.Lett. **30**, 290 (1973)
- [15] Y. Ishikawa, T. Komatsubara, D. Bloch, Physica B **86-88**, 401-403 (1977)