

Механизм формирования тяжелых фермионов в высших бориды редкоземельных элементов

А.В.Богач, М.А.Анисимов

Отдел низких температур и криогенной техники ИОФ РАН

Представляемый цикл работ направлен на решение задачи о выяснении механизма образования тяжелых фермионов и природе магнетизма в соединениях с сильными электронными корреляциями. На примере редкоземельных (РЗ) боридов предложен комплексный подход, основанный на сочетании набора экспериментальных методик, включающем измерения низкотемпературных гальваномагнитных, магнитных и тепловых характеристик в сильных магнитных полях до 9 Тл. В качестве объектов исследования выбраны соединения с каркасной структурой на основе атомных кластеров бора – гексабориды RB_6 (R-La, Ce, Pr, Nd, Gd), в том числе твердые растворы замещения на их основе $Ce_xLa_{1-x}B_6$, и додекабориды RB_{12} (R-No, Er, Tm, Lu). На основе сравнительного анализа экспериментальных данных получены следующие приоритетные результаты.

(i) Выполненные измерения транспортных свойств в парамагнитной (ПМ) фазе редкоземельных боридов позволили выделить доминирующий квадратичный отрицательный вклад в магнитосопротивление (ОМС). Показано, что эффект ОМС в высших бориды оказывается пропорциональным квадрату локальной намагниченности M_{loc}^2 , причем $M_{loc}(H)$ в пределах экспериментальной точности описывается функцией Ланжевена: $M_{loc} \sim L(H/T)$. Детальный анализ ОМС и магнитных характеристик приводит к заключению о формировании спин-поляронных многочастичных состояний (тяжелых фермионов) и возникновении кластеров с ближним магнитным порядком в парамагнитной матрице исследуемых боридов.

(ii) В магнитоупорядоченных фазах высших бориды RB_6 и RB_{12} обнаружено сложное знакопеременное поведение магнитосопротивления. Анализ выделенных вкладов в магнитосопротивление – (1) положительного линейного вклада (ПМС) и (2) знакопеременной компоненты, характеризующейся насыщением в сильных магнитных полях, – позволяет сделать заключение о характере рассеяния носителей заряда в состоянии с дальним магнитным порядком. Показано, что, аналогично металлическому хрому в антиферромагнитной (АФ) фазе с волной спиновой плотности (ВСП), линейный ПМС вклад, наблюдающийся в АФ состоянии РЗ бориды, отвечает рассеянию носителей заряда на ВСП ($5d$ -компонента в магнитной структуре). Установлено, что вклад (2) следует связать с рассеянием электронов на магнитных кластерах наноразмера. Полученные в (i)-(ii) результаты исследований магнитосопротивления и намагниченности указывают на формирование спин-поляронных состояний в $5d$ -полосе в окрестности редкоземельных ионов и их трансформации в пучности ВСП в магнитоупорядоченных фазах высших бориды. Данный результат позволяет устранить проблемы в описании магнетизма высших бориды в рамках традиционной парадигмы, например, объяснить магнитную анизотропию, наблюдаемую в большинстве магнитных систем RB_6 и RB_{12} .

(iii) Анализ экспериментальных данных теплоемкости систем $Ce_xLa_{1-x}B_6$, $La^N B_6$ и $Lu^N B_{12}$ ($N=10, 11, nat$) позволил применить процедуру разделения вкладов, учитывающую схожие особенности строения кристаллической структуры перечисленных высших бориды. В результате получены корректные оценки (*a*) электронной компоненты в условиях перенормировки электронной плотности состояний, (*b*) вклада квазилокальной колебательной моды редкоземельного иона, (*e*) дебаевской компоненты от жесткого каркаса из атомов бора и (*z*) низкотемпературного Шоттки вклада, связанного с присутствием 1-3% вакансий бора в монокристаллах высших бориды. Показано, что

наблюдаемые низкотемпературные аномалии теплоемкости могут быть интерпретированы в терминах формирования двухуровневых систем (ДУС), обусловленных смещением РЗ ионов из centrosymmetricного положения. На основе полученных в (i)-(iii) результатов заявителями предположен альтернативный кондовскому сценарий образования тяжелых фермионов (ТФ) в системе $\text{Ce}_x\text{La}_{1-x}\text{B}_6$. Показано, что появление ТФ оказывается непосредственно связанным с туннелированием тяжелой частицы между состояниями в двухмном потенциале, которое сопровождается быстрыми спиновыми флуктуациями в полостях кубооктаэдров B_{24} , содержащих Ce^{3+} ионы.

Выполненные исследования позволяют сделать вывод о том, что наиболее вероятный механизм, определяющий формирование многочастичных состояний – тяжелых фермионов в редкоземельных боридах, связан с эффектами спиновой поляризации носителей заряда в зоне проводимости, образованной 5d-электронными состояниями, в сочетании с квазилокальным колебанием РЗ иона, обуславливающим возникновение спиновых флуктуаций в исследуемых соединениях.

Список публикаций в рецензируемых журналах в период за 2008-2013г.

1. Н.Е. Случанко, А.В. Богач, В.В. Глушков, С.В. Демишев, В.Ю. Иванов, Н.Ю. Шицевалова, В.Б. Филипов
Анизотропия намагниченности в АФМ и ВСП фазах гексаборида церия
Письма в ЖЭТФ, т.88, стр. 366-369 (2008).
2. Н.Е.Случанко, М.А.Анисимов, В.В.Глушков, С.В.Демишев, В.Б.Филиппов, Н.Ю.Шицевалова, А.В.Кузнецов **Магнитосопротивление и магнитные фазовые переходы в антиферромагнетике Pr^{11}B_6**
Письма в ЖЭТФ, т. 90, в.2, стр. 163-166 (2009).
3. Н.Е.Случанко, А.В.Богач, В.В.Глушков, С.В.Демишев, Н.А.Самарин, Д.Н.Случанко, А.Б.Духненко, А.В.Левченко
Аномалии магнитосопротивления соединений с атомными кластерами RB_{12} (R-Но, Er, Tm, Lu)
ЖЭТФ, т. 135, в.4, стр. 766-787 (2009).
4. М.А.Анисимов, А.В.Богач, В.В.Глушков, С.В.Демишев, Н.А.Самарин, В.Б.Филиппов, Н.Ю.Шицевалова, А.В.Кузнецов, Н.Е.Случанко,
Магнитосопротивление и магнитное упорядочение в гексаборидах празеодима и неодима
ЖЭТФ, т. 136, стр. 943-962 (2009).
5. S.V.Demishev, A.V.Semeno, A.V.Bogach, N.A.Samarin, T.V.Ishchenko, V.B. Filipov, N.Yu.Shitsevalova, N.E.Sluchanko.
Magnetic spin resonance in CeB_6 .
Physical Review B, v.80, n.24, pp.245106 (2009).
6. N.E.Sluchanko, A.V.Bogach, V.V.Glushkov, S.V.Demishev, K.V.Gon'kov, A.V.Kuznetsov, N.A.Samarin, V.B.Filipov, N.Yu.Shitsevalova,
 $\text{La}_{1-x}\text{Ce}_x\text{B}_6$ ($x<0.1$): Spin-polaron regime in dilute magnetic system.
Journal of Physics: Conference Series, v.150, p.042187 (2009).
7. A.V.Bogach, S.V.Demishev, K.Flachbart, S.Gabani, V.V.Glushkov, A.V.Levchenko, N.Yu.Shitsevalova, D.N.Sluchanko, N.E.Sluchanko,
Magnetic phase diagram and charge transport in TmB_{12} .
Solid State Phenomena, v.152-153, pp.45-48 (2009).
8. М.А.Анисимов, А.В.Богач, V.V.Glushkov, S.V.Demishev, N.A.Samarin, N.Yu.Shitsevalova, N.E.Sluchanko.
Hall effect in LaB_6 and NdB_6
Solid State Phenomena, v.152-153, pp.525-528 (2009).
9. М.А.Анисимов, V.V.Glushkov, S.V.Demishev, N.A.Samarin, N.Yu.Shitsevalova,

- N.E.Sluchanko.
High field magnetoresistance behavior in PrB₆ and NdB₆
 Solid State Phenomena, v.152-153, pp.541-544 (2009).
10. Н.Е.Случанко, А.Н.Азаревич, А.В.Богач, В.В.Глушков, С.В.Демисhev, А.В.Кузнецов, К.С.Любшов, В.Б.Филипов, Н.Ю.Шицевалова,
Изотоп-эффект в зарядовом транспорте LuB₁₂,
 ЖЭТФ, т.**138**, в.2, стр. 315-320 (2010).
 11. A.V.Bogach, V.V.Glushkov, S.V.Demishev, N.E.Sluchanko, N.Yu.Shitsevalova, V.B.Fillipov, K. Flachbart,
Magnetic field enhancement of the Hall effect in dilute magnetic system La_{1-x}Ce_xB₆
 Acta Phys. Polonica A, v.**118**, n.5, pp.931-932 (2010)
 12. N E Sluchanko , A V Bogach , V V Glushkov , S V Demishev , V Yu Ivanov, V B Filipov and N Yu Shitsevalova
Magnetic anisotropy in the AFM and SDW phases of CeB₆
 Journal of Physics: Conference Series, v.200, p.012189 (2010).
 13. M. Anisimov, A. Bogach, V. Glushkov, S. Demishev, N. Samarin, V. Filipov, N. Shitsevalova and N. Sluchanko,
Anisotropy of magnetoresistance in PrB₆ and NdB₆,
 Journal of Physics: Conference Series, (2010), v.200, p.032003
 14. Н.Е.Случанко, А.Н.Азаревич, А.В.Богач, И.И.Власов, В.В.Глушков, С.В.Демисhev, А.А.Максимов, И.И.Тартаковский, Е.В.Филатов, К.Флахбарт, С.Габани, В.Б.Филипов, Н.Ю.Шицевалова, В.В.Мошталков
LuB₁₂: эффекты беспорядка и изотопического замещения в теплоемкости и комбинационном рассеянии света
 ЖЭТФ, т.**140**, в.3, стр. 536-552 (2011).
 15. M.A.Anisimov, A.V.Bogach, V.V.Glushkov, S.V.Demishev, .A.Samarin, N.Yu.Shitsevalova, A.V.Levchenko, V.B.Filipov, A.V.Kuznetsov, N.E.Sluchanko
New magnetoresistance results for GdB₆
 Solid State Phenomena **190**, 77-80 (2012).
 16. M.A.Anisimov, A.V.Bogach, V.V.Glushkov, S.V.Demishev, N.A.Samarin, N.Yu.Shitsevalova, A.V.Levchenko, V.B.Filipov, A.V.Kuznetsov, N.E.Sluchanko
Suppression of Spin-Glass State in PrB₆
 Solid State Phenomena, **190**, 221-224 (2012).
 17. M.A.Anisimov, A.V.Bogach, V.V.Glushkov, S.V.Demishev, N.A.Samarin, V.B.Filipov, N.Yu.Shitsevalova, A.V.Levchenko, V.N.Gurin, N.E.Sluchanko
Hall effect study in antiferromagnets RB₆ (R-Pr, Nd)
 Solid State Science, **14**, 1601-1603 (2012).
 18. A.V.Bogach, V.V.Glushkov, S.V.Demishev, N.E.Sluchanko, N.Yu.Shitsevalova, V.B.Fillipov, K.Flachbart
Magnetic field enhancement of the Hall effect in diluted magnetic system La_{1-x}Ce_xB₆ (x≤0.1)
 Solid State Sciences, **14** 1629-1631 (2012).
 19. M.A.Anisimov, A.V.Bogach, V.V.Glushkov, S.V.Demishev, N.A.Samarin, N.Yu.Shitsevalova, A.V.Levchenko, V.B.Filipov, A.V.Kuznetsov, N.E.Sluchanko
Magnetoresistance of PrB₆ and GdB₆
 J. Phys. Conf. Ser. **400** 032003 (2012).
 20. М.А.Анисимов, В.В.Глушков, А.В.Богач, С.В.Демисhev, Н.А.Самарин, С.Ю.Гаврилкин, К.В.Мицен, Н.Ю.Шицевалова, А.В.Левченко, В.Б.Филипов, С.Габани, К.Флахбарт, Н.Е.Случанко
Теплоемкость Ce_xLa_{1-x}B₆ в пределе малой концентрации церия x≤0.03
 ЖЭТФ **143**(5), 877-884 (2013).