

Теплопроводность „умеренного“ тяжелофермионного соединения $\text{YbIn}_{0.2}\text{Ag}_{0.8}\text{Cu}_4$

© А.В. Голубков, Л.С. Парфеньева, И.А. Смирнов, Н. Misiorek*, J. Mucha*, A. Jezowski*

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

* Institute of Low Temperature and Structure Research, Polish Academy of Sciences,
50-950 Wroclaw, Poland

E-mail: igor.smirnov@mail.ioffe.ru

(Поступила в Редакцию 21 июля 2005 г.)

В интервале температур 5–300 К измерены теплопроводность и удельное электросопротивление (ρ) литого поликристаллического образца $\text{YbIn}_{0.2}\text{Ag}_{0.8}\text{Cu}_4$, относящегося к „умеренным“ тяжелофермионным соединениям. Показано, что его фононная теплопроводность во всем исследованном интервале температур имеет „аморфоподобный“ вид, обусловленный наличием гомогенной переменной валентности иона Yb в этом соединении. На температурной зависимости $\rho(T)$ выделено три участка: высокотемпературный, характерный для обычных металлов, среднетемпературный, типичный для Кондо-соединений, и низкотемпературный, относящийся к когерентной Кондо-решетке (режиму с тяжелыми фермионами). Оценена величина температуры Кондо.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 05-02-17775) и Польского государственного комитета по научным исследованиям (грант KBN № 3T 08A 05426) в рамках двустороннего научного соглашения между Польской и Российской академиями наук.

PACS: 72.15Qm, 65.40.-b

В последнее десятилетие ведущие лаборатории мира в США, Японии и Германии проявляют интерес к исследованию интерметаллических соединений YbInCu_4 , YbAgCu_4 и промежуточных составов $\text{YbIn}_{1-x}\text{Ag}_x\text{Cu}_4$, поскольку эти материалы обладают весьма необычными физическими свойствами. Они кристаллизуются в гранцентрированной кубической решетке типа AuBe_5 (структура $C15b$, пространственная группа $F\bar{4}3m (T_d^2)$) [1], относятся к „легким“ („light“) и умеренным („moderately“) тяжелофермионным системам (ТФС) и одновременно входят в группу материалов с гомогенной переменной валентностью¹ редкоземельных ионов (в данном случае иона Yb).

Уникальным соединением в системе $\text{Yb}M\text{Cu}_4$ ($M = \text{In}, \text{Ag}$) является $\text{YbIn}_{1-y}\text{Cu}_{4+y}$ (составы в области гомогенности YbInCu_4), у которого при $T_v \sim 40\text{--}80$ К (в зависимости от величины y) при атмосферном давлении наблюдается изоструктурный фазовый переход от состояния юри-вейссовского парамагнетика с локализованными магнитными моментами (при $T > T_v$) к паулевскому парамагнетизму с немагнитным состоянием Ферми-жидкости (при $T < T_v$). При этом валентность (V) иона Yb изменяется от 2.9 (при $T > T_v$) до ~ 2.8 (при $T < T_v$) [2,3]. Параметр γ (коэффициент при линейном по температуре члене в электронной теплоемкости) для низкотемпературной фазы YbInCu_4 равен $\sim 50 \text{ mJ/mol} \cdot \text{K}^2$ [2,4,5]. Данный факт указывает на то, что ее можно отнести к „легкой“ ТФС², имеющей од-

нако достаточно большую величину эффективной массы носителей тока [6].

В YbAgCu_4 наблюдается переход от однопримесного кондовского режима при высоких температурах ($T > T_K$, T_K — температура Кондо) к когерентной Кондо-решетке (режиму с тяжелыми фермионами) при низких температурах ($T < T_K$). Величина T_K , полученная из анализа различных физических эффектов, колеблется от 40 до 130 К [7]. Эффективная масса носителей тока в YbAgCu_4 при $T < T_K$ равна $\sim 60m_0$ (m_0 — масса электрона) [7,8], валентность иона Yb при температурах ниже и выше T_K близка к 2.9 [3]. Величина параметра γ при $T < T_K$ равна $\sim 200\text{--}250 \text{ mJ/mol} \cdot \text{K}^2$ [2,5,9], поэтому YbAgCu_4 относится к „умеренным“ ТФС.

В $\text{YbIn}_{1-x}\text{Ag}_x\text{Cu}_4$ наблюдается постепенный переход от свойств, присущих YbInCu_4 , к свойствам, характерным для YbAgCu_4 . Граничная критическая концентрация (x_{cr}), до которой в исследованных эффектах происходит достаточно резкий фазовый переход, аналогичный переходу в YbInCu_4 , равна $x_{cr} \sim 0.2\text{--}0.25$ [2,5,10–13]. В интервале значений $x = (0.2\text{--}0.25)\text{--}0.5$ происходит постепенный фазовый переход от паулевского парамагнетика с немагнитным состоянием Ферми-жидкости и переменной валентностью иона Yb (~ 2.8) при низких температурах к юри-вейссовскому парамагнетизму с локализованными магнитными моментами (и валентностью иона Yb ~ 2.90) при высоких температурах [2,5,10–12]. При этом в интервале температур 4.2–300 К резких изменений в свойствах не наблюдается. Величина γ в интервале значений $x = 0\text{--}0.5$ остается постоянной и приблизительно равной $50 \text{ mJ/mol} \cdot \text{K}^2$ [2,5], так что эти составы относятся к классу „легких“ ТФС. При $x > 0.5$

¹ В англоязычной литературе такие материалы называют mixed-valent compounds или intermediate valent compounds.

² Параметр γ равен $\sim 50\text{--}60, 100\text{--}400$ и $> 400 \text{ mJ/mol} \cdot \text{K}^2$ соответственно у „легких“, „умеренных“ и классических ТФС.

в $\text{YbIn}_{1-x}\text{Ag}_x\text{Cu}_4$ происходит достаточно быстрый переход к свойствам, характерным для тяжелофермионного соединения YbAgCu_4 .

За последние годы в различных лабораториях мира было осуществлено достаточно подробное изучение физических свойств $\text{YbIn}_{1-x}\text{Ag}_x\text{Cu}_4$. Проводились структурные исследования, измерялись удельное электросопротивление, магнитная восприимчивость, теплоемкость, ЯМР, исследовались магнитные фазовые диаграммы, проводились ультразвуковые, оптические исследования, эксперименты по рассеянию нейтронов и определению валентного состояния ионов Yb .³ Теплопроводность κ $\text{YbIn}_{1-x}\text{Ag}_x\text{Cu}_4$ исследовалась недостаточно широко. Имеются две работы, в которых измерялась κ YbInCu_4 и YbAgCu_4 [15,16], и цикл исследований, выполненный авторами настоящей статьи. Была измерена κ у $\text{YbIn}_{1-y}\text{Cu}_{4+y}$ [17–19], YbAgCu_4 [20], $\text{YbIn}_{0.7}\text{Ag}_{0.3}\text{Cu}_4$ [14] и реперных материалов LuInCu_4 [21] и LuAgCu_4 [22]. Анализ данных по фоновой (κ_{ph}) и электронной (κ_{e}) составляющим теплопроводности, проведенный в работах [14,17–22], показал, что измерения κ могут дать очень полезные сведения для понимания процессов рассеяния и переноса тепла фононами и электронами в этих материалах.

В качестве объекта исследования в настоящей работе в системе $\text{YbIn}_{1-x}\text{Ag}_x\text{Cu}_4$ выбран состав с $x = 0.8$, близкий к соединению YbAgCu_4 .

$\text{YbIn}_{0.2}\text{Ag}_{0.8}\text{Cu}_4$ имеет $T_K \approx 100$ К [2], параметр $\gamma = 265$ мДж/моль·К², валентность иона Yb 2.91 (при 300 К) [3] и 2.875 (при 15 К) [2], значение для постоянной Холла $R_H = -1.4 \cdot 10^{-9}$ м³/С (при 4.2 К) и $-0.1 \cdot 10^{-9}$ м³/С (при 300 К) [2] и постоянную решетки $a = 7.11$ Å [10].

Из приведенных параметров следует, что $\text{YbIn}_{0.2}\text{Ag}_{0.8}\text{Cu}_4$ относится к разряду „умеренных“, ТФС. Теплопроводность $\text{YbIn}_{0.2}\text{Ag}_{0.8}\text{Cu}_4$ ранее не измерялась.

При исследовании $\kappa(T)$ $\text{YbIn}_{1-y}\text{Cu}_{4+y}$, YbAgCu_4 и $\text{YbIn}_{0.7}\text{Ag}_{0.3}\text{Cu}_4$ [14,17] был обнаружен интересный эффект: κ_{ph} при $T \geq 100$ К не уменьшалась с ростом температуры, как этого можно было ожидать для стандартных твердых тел, а наоборот возрастала по закону $\kappa_{\text{ph}} \sim T^n$ (где n изменялось в пределах от 0.3 до 0.8). Такое поведение κ_{ph} было отмечено ранее у „легких“ ТФС $\text{Sm}_{1-x}\text{Gd}_x\text{S}$ (при $x > 0.16$) [23], у „умеренной“ ТФС YbUCu_5 [24] и даже у классической ТФС CeAl_3 [25], т.е. у этих материалов имело место „аморфоподобное“ поведение $\kappa_{\text{ph}}(T)$. Общим для всех приведенных выше соединений было наличие в них ионов с переменной гомогенной валентностью (Yb , U , Ce), которые, по нашему мнению, и несут ответственность за „аморфоподобное“ поведение $\kappa_{\text{ph}}(T)$ этих материалов. Основная цель настоящей работы — выяснить, будут ли выполняться при высоких температурах отмеченная выше зависимость $\kappa_{\text{ph}} \sim T^n$ у $\text{YbIn}_{1-x}\text{Ag}_x\text{Cu}_4$ — ТФС с гомогенной переменной валентностью иона Yb , не имеющего в

³ Литературные ссылки на работы, в которых проводились указанные выше исследования, можно найти в [14].

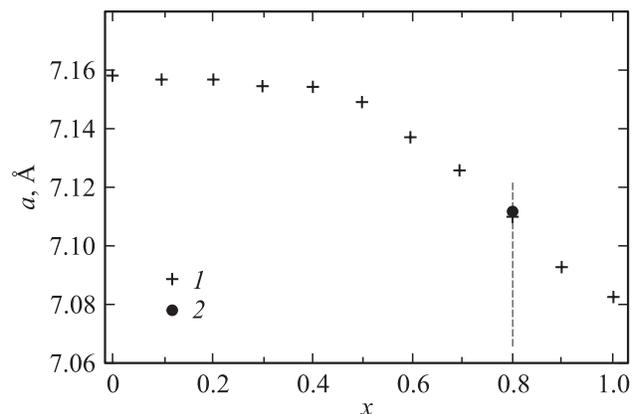


Рис. 1. Зависимости постоянной кристаллической решетки $\text{YbIn}_{1-x}\text{Ag}_x\text{Cu}_4$ от x . 1 — данные [10,12]; 2 — значение для исследованного образца $\text{YbIn}_{0.2}\text{Ag}_{0.8}\text{Cu}_4$.

исследованном интервале температур (5–300 К) никаких фазовых переходов, но испытывающего, как и YbAgCu_4 , плавный переход от однопримесного кондовского режима при высоких температурах к когерентной Кондорешетке при низких температурах. Было интересно также получить (с привлечением наших предыдущих исследований [14,17–20]) общую картину поведения κ_{ph} в пределах состава $\text{YbIn}_{1-x}\text{Ag}_x\text{Cu}_4$.

1. Приготовление образцов, методики исследования

Литые поликристаллические образцы для исследования готовились по методике, описанной в [3,26]. $\text{YbIn}_{0.2}\text{Ag}_{0.8}\text{Cu}_4$ синтезировался из YbInCu_4 и YbAgCu_4 , полученных из стехиометрических смесей чистых металлов. Использовались дважды возогнанный и переплавленный в танталовом тигле (для очистки от окисла) Yb , а также Ag и In с содержанием основного вещества 99.99 и Cu чистоты 99.998. Плавка $\text{YbIn}_{0.2}\text{Ag}_{0.8}\text{Cu}_4$ осуществлялась в индукционной печи в танталовом тигле в вакууме $\sim 10^{-4}$ мм рт.ст. с последующим отжигом при $T \sim 700^\circ\text{C}$. Рентгеноструктурный анализ образца проводился на установке ДРОН-2 в $\text{CuK}\alpha$ -излучении. Образец был монофазным, имел кубическую решетку типа AuBe_5 (структура $C15b$) с постоянной кристаллической решетки, равной 7.112 Å при 300 К, что хорошо совпало с данными [10,12] (рис. 1).

Теплопроводность κ и удельное электросопротивление ρ измерялись в интервале температур 5–300 К на установке, аналогичной [27], в вакууме $\sim 10^{-5}$ мм рт.ст.

2. Полученные результаты и их обсуждение

На рис. 2 приведены полученные экспериментальные результаты для полной теплопроводности $\kappa_{\text{tot}}(T)$, а на рис. 3 для $\rho(T)$ исследованного образца $\text{YbIn}_{0.2}\text{Ag}_{0.8}\text{Cu}_4$.

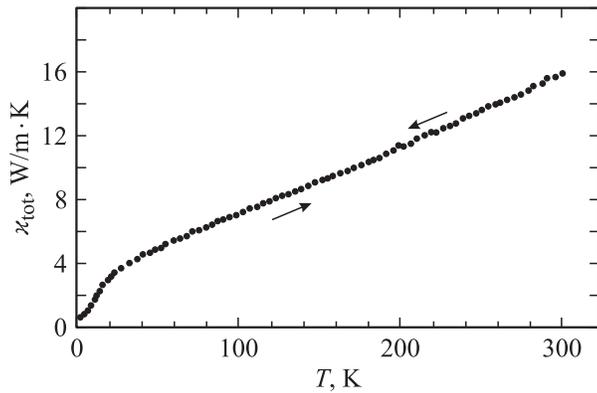


Рис. 2. Зависимость κ_{tot} от температуры для образца $\text{YbIn}_{0.2}\text{Ag}_{0.8}\text{Cu}_4$.

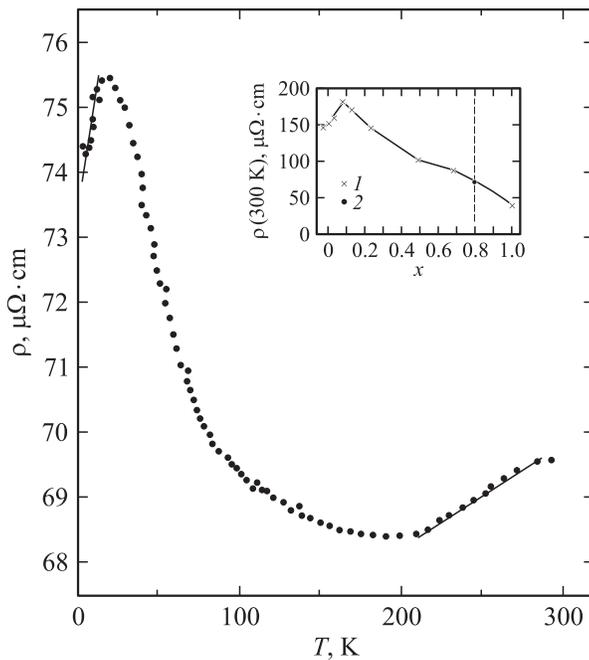


Рис. 3. Зависимость ρ от температуры для образца $\text{YbIn}_{0.2}\text{Ag}_{0.8}\text{Cu}_4$. На вставке зависимость ρ при 300 К от x для $\text{YbIn}_{1-x}\text{Ag}_x\text{Cu}_4$. 1 — данные из [12]; 2 — значение для исследованного образца $\text{YbIn}_{0.2}\text{Ag}_{0.8}\text{Cu}_4$.

При измерении $\kappa_{\text{tot}}(T)$ прямой ($300 \rightarrow 5$ К) и обратный ход ($5 \rightarrow 300$ К) совпали.

2.1. $\rho(T)$ $\text{YbIn}_{0.2}\text{Ag}_{0.8}\text{Cu}_4$. На вставке к рис. 3 приведено сравнение данных для $\rho(x)$ системы $\text{YbIn}_{1-x}\text{Ag}_x\text{Cu}_4$ из [12] и полученных в настоящей работе для $\text{YbIn}_{0.2}\text{Ag}_{0.8}\text{Cu}_4$. Наши данные достаточно хорошо совпали с литературными. Как видно из рис. 3, на температурной зависимости $\rho(T)$ $\text{YbIn}_{0.2}\text{Ag}_{0.8}\text{Cu}_4$ можно выделить три участка: высокотемпературный ($T > 200$ К), низкотемпературный ($T \leq 30$ К) и расположенный между ними среднетемпературный.

В высокотемпературном участке $\rho(T)$ имеет зависимость, характерную для обычных металлов. Поведение

$\rho(T)$ на среднетемпературном участке можно оценить из данных рис. 4, а, на котором приведена зависимость $\rho = f(\ln T)$ для всего исследованного интервала температур. В области 30–95 К ρ подчиняется зависимости $\rho \sim \ln T$, что типично для Кондо-соединений (Кондо-решеток). Для области низких температур (рис. 4, b) поведение $\rho(T)$ можно представить в виде

$$\rho = \rho_0 + AT^2, \quad (1)$$

что уже типично для когерентной Кондо-решетки (режима с тяжелыми фермионами для $T < T_K$) [20,28,29].

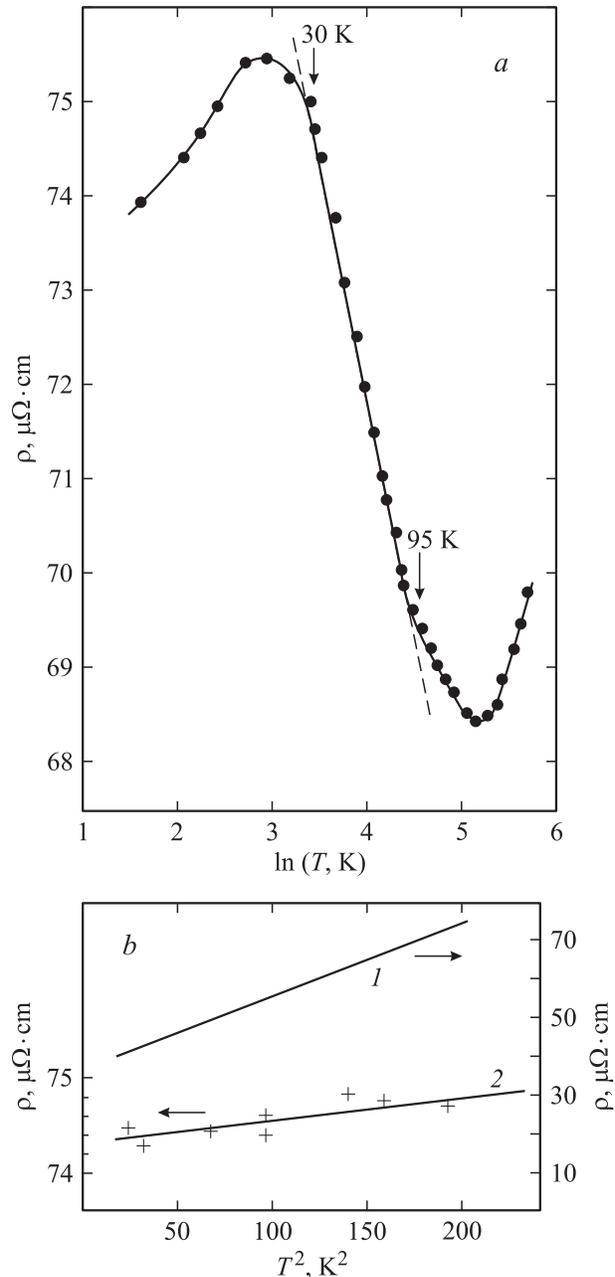


Рис. 4. Зависимости ρ от $\ln T$ (a) и T^2 (b) для $\text{YbIn}_{0.2}\text{Ag}_{0.8}\text{Cu}_4$. 1 — данные для YbAgCu_4 из [20], 2 — результаты настоящего эксперимента для $\text{YbIn}_{0.2}\text{Ag}_{0.8}\text{Cu}_4$.

В (1) ρ_0 — остаточное сопротивление. Коэффициент A является мерой электронной плотности на уровне Ферми: $A \sim N(E_F)$ и, кроме того, $A \sim 1/T_K^2$ [28,29]. Для сравнения на рис. 4, *b* приведена зависимость $\rho = f(T^2)$ для типичной ТФС YbAgCu_4 [20].

Из данных рис. 3 и 4, *a* можно оценить величину T_K . Она оказалась равной ~ 30 К, что однако расходится с данными работы [2], согласно которой T_K $\text{YbIn}_{0.2}\text{Ag}_{0.8}\text{Cu}_4$ составляет ~ 100 К. Разброс данных для значений T_K наблюдался и у YbAgCu_4 , близкому по составу к $\text{YbIn}_{0.2}\text{Ag}_{0.8}\text{Cu}_4$. Для YbAgCu_4 величина T_K , полученная из данных для различных физических эффектов, как отмечалось во введении, колеблется от 40 до 130 К.

2.2. κ $\text{YbIn}_{0.2}\text{Ag}_{0.8}\text{Cu}_4$. Согласно данным по эффекту Холла [2], $\text{YbIn}_{0.2}\text{Ag}_{0.8}\text{Cu}_4$ во всем измеренном интервале температур (5–300 К) можно отнести к металлам, для которых κ_{tot} выражается в виде суммы решеточной κ_{ph} и электронной κ_e составляющих теплопроводности [30]

$$\kappa_{\text{tot}} = \kappa_{\text{ph}} + \kappa_e \quad (2)$$

κ_e подчиняется закону Видемана-Франца и записывается в виде

$$\kappa_e = L_0 T / \rho, \quad (3)$$

где L_0 — зоммерфельдовское значение числа Лоренца ($L_0 = 2.45 \cdot 10^{-8} \text{ W}\Omega/\text{K}^2$).

На рис. 5 приведены результаты расчета $\kappa_{\text{ph}}(T)$ по (2), (3). Как видно из этого рисунка, $\text{YbIn}_{0.2}\text{Ag}_{0.8}\text{Cu}_4$ имеет аморфоподобную температурную зависимость $\kappa_{\text{ph}}(T)$. Ее вид похож на поведение $\kappa_{\text{ph}}(T)$ классических аморфных твердых тел, относящихся к 1, 2 и 3 участкам кривой, представленной на вставке к рис. 5. Она согласуется также с полученными нами ранее данными об аморфоподобном поведении $\kappa_{\text{ph}}(T)$ (при ≥ 100 К) у $\text{YbIn}_{1-y}\text{Cu}_{4+y}$, YbAgCu_4 и $\text{YbIn}_{0.7}\text{Ag}_{0.3}\text{Cu}_4$ [14,17–20]. С большой вероятностью обнаруженный эффект, по-видимому, связан с наличием в этих материалах иона Yb с гомогенной переменной валентностью. Подтвердить

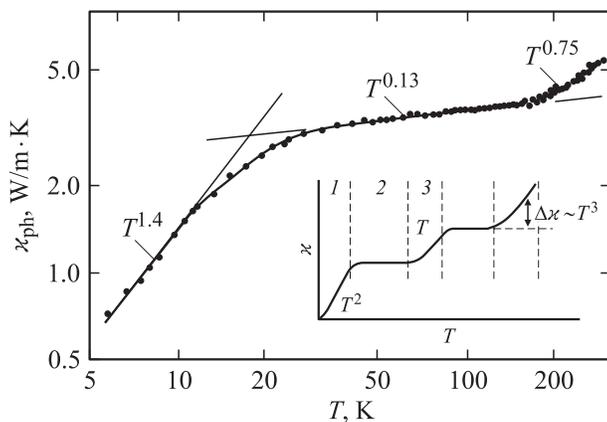


Рис. 5. Зависимость κ_{ph} от температуры для $\text{YbIn}_{0.2}\text{Ag}_{0.8}\text{Cu}_4$. На вставке схематическое изображение температурной зависимости κ для аморфных материалов.

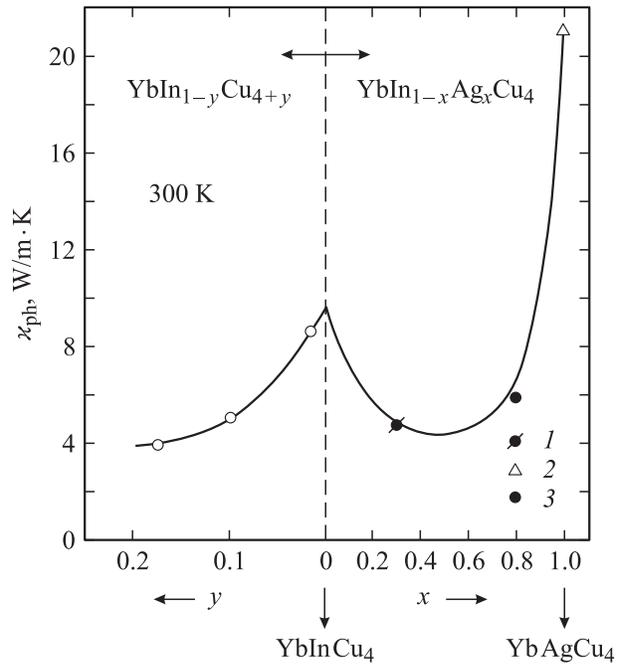


Рис. 6. Полученные в наших работах зависимости величины κ_{ph} от состава при 300 К для $\text{YbIn}_{1-y}\text{Cu}_{4+y}$ (в области гомогенности YbInCu_4) [17–19] и $\text{YbIn}_{1-x}\text{Ag}_x\text{Cu}_4$ (1 — [14], 2 — [20], 3 — настоящий эксперимент).

или опровергнуть эти предположения смогут лишь теоретические расчеты $\kappa_{\text{ph}}(T)$ для материалов с гомогенной переменной валентностью редкоземельных ионов.

Отметим возможную несколько иную интерпретацию возрастания $\kappa_{\text{ph}}(T)$ у $\text{YbIn}_{0.2}\text{Ag}_{0.8}\text{Cu}_4$ в области температур выше 180 К. Оно может быть связано с появлением при этих температурах биполярной теплопроводности, характерной для полуметаллов [30], при условии, что $\text{YbIn}_{0.2}\text{Ag}_{0.8}\text{Cu}_4$ является таковым. Однако „полуметалличность“ этого соединения не подтверждается данными по исследованию эффекта Холла [2].

На рис. 6 для $T = 300$ К суммированы полученные нами ранее значения для $\kappa_{\text{ph}}(T)$ $\text{YbIn}_{1-y}\text{Cu}_{4+y}$ (для области гомогенности YbInCu_4) [17–19], YbAgCu_4 [20], $\text{YbIn}_{0.7}\text{Ag}_{0.3}\text{Cu}_4$ [14], а также данные для $\kappa_{\text{ph}}(T)$ $\text{YbIn}_{0.2}\text{Ag}_{0.8}\text{Cu}_4$ из настоящей работы. Зависимость κ_{ph} от состава у $\text{YbIn}_{1-x}\text{Ag}_x\text{Cu}_4$ имеет классический для твердых растворов вид с минимумом κ_{ph} в районе $x \sim 0.5$.

В заключение отметим основные результаты, полученные в настоящей работе.

В интервале температур 5–300 К на литых поликристаллических образцах $\text{YbIn}_{0.2}\text{Ag}_{0.8}\text{Cu}_4$ измерены κ и ρ .

Обнаружено „аморфоподобное“ поведение $\kappa_{\text{ph}}(T)$ у исследованного образца, обусловленное наличием гомогенной переменной валентности иона Yb в этом соединении.

На температурной зависимости $\rho(T)$ выделено три участка: высокотемпературный при $T > 200$ К, характерный для обычных металлов, среднетемпературный

(95–30 К), типичный для Кондо-соединений ($\rho \sim \ln T$) и низкотемпературный ($T < 30$ К), относящийся к когерентной Кондо-решетке (режиму с тяжелыми фермионами).

Из данных по $\rho(T)$ оценена величина температуры Кондо ($T_K \sim 30$ К) для $\text{YbIn}_{0.2}\text{Ag}_{0.8}\text{Cu}_4$.

Авторы выражают благодарность Н.Ф. Картенко и Н.В. Шаренковой за проведение рентгеноструктурного анализа исследованных образцов.

Список литературы

- [1] R. Kojima, Y. Nakai, T. Susuki, H. Asano, F. Izumi, T. Fujita, T. Hihara. *J. Phys. Soc. Japan* **59**, 3, 792 (1990).
- [2] A.L. Cornelius, J.M. Lawrence, J.L. Sarrao, Z. Fisk, M.F. Hundley, G.H. Kwei, J.D. Thompson, C.H. Booth, F. Bridges. *Phys. Rev. B* **56**, 13, 7993 (1997).
- [3] В.А. Шабуров, А.Е. Совестнов, Ю.П. Смирнов, А.В. Тюнис, А.В. Голубков. *ФТТ* **42**, 7, 1164 (2000).
- [4] J.L. Sarrao, A.P. Ramirez, T.W. Darling, F. Freibert, A. Migliori, C.D. Immer, Z. Fisk, Y. Uwatoko. *Phys. Rev. B* **58**, 1, 409 (1998).
- [5] N. Pillmayr, E. Bauer, K. Yoshimura. *J. Magn. Magn. Mater.* **104–107**, 639 (1992).
- [6] I. Felner, I. Nowik, D. Vakin, U. Potzel, J. Moser, G.M. Kalvius, G. Wortmann, G. Schmiester, G. Hilscher, E. Gratz, C. Schmitzer, N. Pillmayr, K.G. Prasad, H. de Waard, H. Pinto. *Phys. Rev. B* **35**, 13, 6956 (1987).
- [7] T. Graf, J.M. Lawrence, M.F. Hundley, J.D. Thompson, A. Lacerda, E. Haanappel, M.S. Torikachvili, Z. Fisk, P.C. Canfield. *Phys. Rev. B* **51**, 21, 15053 (1995).
- [8] J.S. Kang, J.W. Allen, C. Rossel, C.L. Seamen, M.B. Maple. *Phys. Rev. B* **41**, 7, 4078 (1990).
- [9] C. Rossel, K.N. Yang, M.B. Maple, Z. Fisk, E. Zirngiebl, J.D. Thompson. *Phys. Rev. B* **35**, 4, 1914 (1987).
- [10] J.L. Sarrao, C.L. Benton, Z. Fisk, J.M. Lawrence, D. Mandrus, J.D. Thompson. *Physica B* **223/224**, 366 (1996).
- [11] K. Yoshimura, T. Nitta, T. Shimuzu, M. Mekata, H. Yosuka, K. Kosuge. *J. Magn. Magn. Mater.* **90/91**, 466 (1990).
- [12] J.L. Sarrao, C.D. Immer, C.L. Benton, Z. Fisk, J.M. Lawrence, D. Mandrus, J.D. Thompson. *Phys. Rev. B* **54**, 17, 12207 (1996).
- [13] S. Zherlitsyn, B. Lüthi, B. Wolf, J.L. Sarrao, Z. Fisk, V. Zlatic. *Phys. Rev. B* **60**, 6, 3148 (1999).
- [14] А.В. Голубков, Л.С. Парфеньева, И.А. Смирнов, Х. Мисиорек, Я. Муха, А. Ежовский. *ФТТ* **43**, 10, 1739 (2001).
- [15] E. Bauer, E. Gratz, G. Hutflesz, A.K. Bhattacharjee, B. Coqblin. *Physica B* **186/188**, 494 (1993).
- [16] E. Bauer. In *Transport and Thermal Properties of f-Electron Systems* / Eds G. Oomi, H. Fujii, T. Fujita. Plenum Press, N. Y. (1993). P. 133.
- [17] И.А. Смирнов, Л.С. Парфеньева, А. Ежовский, Х. Мисиорек, С. Кремפל-Хессе, Ф. Риттер, В. Ассмус. *ФТТ* **41**, 9, 1548 (1999).
- [18] А.В. Голубков, Л.С. Парфеньева, И.А. Смирнов, Х. Мисиорек, Я. Муха, А. Ежовский, Ф. Риттер, В. Ассмус. *ФТТ* **44**, 6, 973 (2002).
- [19] Л.С. Парфеньева, И.А. Смирнов, Х. Мисиорек, Я. Муха, А. Ежовский, Ф. Риттер, В. Ассмус. *ФТТ* **44**, 7, 1162 (2002).
- [20] А.В. Голубков, Л.С. Парфеньева, И.А. Смирнов, Х. Мисиорек, Я. Муха, А. Ежовский. *ФТТ* **43**, 2, 210 (2001).
- [21] А.В. Голубков, Л.С. Парфеньева, И.А. Смирнов, Х. Мисиорек, Я. Муха, А. Ежовский. *ФТТ* **42**, 8, 1357 (2000).
- [22] А.В. Голубков, Л.С. Парфеньева, И.А. Смирнов, Х. Мисиорек, Я. Муха, А. Ежовский. *ФТТ* **42**, 11, 1938 (2000).
- [23] А.В. Голубков, А.В. Гольцев, Л.С. Парфеньева, И.А. Смирнов, Х. Мисиорек, Я. Муха, А. Ежовский. *ФТТ* **42**, 6, 986 (2000).
- [24] D. Kaczorowski, R. Troc, A. Czopnik, J. Jezowski, Z. Henkie, V.I. Zeremba. *Phys. Rev. B* **63**, 144401 (2001).
- [25] H.R. Ott, O. Marti, F. Hulliger. *Solid State Commun.* **49**, 12, 1129 (1984).
- [26] А.С. Голубков, Т.Б. Жукова, В.М. Сергеева. *Изв. АН СССР. Неорган. материалы* **2**, 77 (1966).
- [27] A. Jezowski, J. Mucha, G. Pompe. *J. Phys. D: Appl. Phys.* **20**, 1500 (1987).
- [28] N. Tsujii, J. He, K. Yoshimura, K. Kosuge, H. Michor, K. Kreiner, G. Hilscher. *Phys. Rev. B* **55**, 2, 1032 (1997).
- [29] E. Bauer, R. Hauser, E. Gratz, K. Payer. *Phys. Rev. B* **48**, 21, 15873 (1993).
- [30] И.А. Смирнов, В.И. Тмарченко. *Электронная теплопроводность в металлах и полупроводниках*. Наука, Л. (1977). 151 с.