

Особенности электронной структуры Yb, In, Ag и Cu в тяжелофермионной системе $\text{YbIn}_{1-x}\text{Ag}_x\text{Cu}_4$

© В.А. Шабуров, А.Е. Совестьнов, Ю.П. Смирнов, А.В. Тюнис, А.В. Голубков*

Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Российской академии наук, 188350 Гатчина, Ленинградская обл., Россия

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

E-mail: asovest@hep486.pnpi.spb.ru

(Поступила в Редакцию 23 декабря 1999 г.)

Методом смещений рентгеновских линий исследована электронная структура — заселенности $4f$ -оболочки Yb, $5s$ -оболочек In, Ag и $4s$ -оболочки Cu — в системе с тяжелыми фермионами $\text{YbIn}_{1-x}\text{Ag}_x\text{Cu}_4$ ($0 \leq x \leq 1$, $T = 300$ К; для $\text{YbIn}_{0.7}\text{Ag}_{0.3}\text{Cu}_4$ — $T = 77, 300, 1000$ К). Показано, что во всей области составов Yb находится в состоянии нецелочисленной валентности, величина которой не зависит от x (от типа партнера — In или Ag) и равна при $T = 300$ К $\bar{m} = 2.91 \pm 0.01$. Обнаружено увеличение заселенностей s -состояний In, Ag и Cu (по сравнению с металлами): $\overline{\Delta n_s}(\text{In}) = 0.65 \pm 0.05$ el/at, $\overline{\Delta n_s}(\text{Ag}) = 0.71 \pm 0.09$ el/at; $\overline{\Delta n_s}(\text{Cu}) = 0.08 \pm 0.02$ el/at. В $\text{YbIn}_{0.7}\text{Ag}_{0.3}\text{Cu}_4$ при повышении температуры в области $T = 77-1000$ К наблюдалось практически линейное уменьшение валентности Yb до значения $m(T = 1000 \text{ К}) = 2.81 \pm 0.02$.

Работа выполнена в рамках проекта № 99-02-16633, поддержанного Российским фондом фундаментальных исследований. Один из авторов (А.В. Голубков) проводил синтез исследованных в работе образцов при финансовой поддержке РФФИ (грант № 99-02-18078).

Из анализа микро- и макроскопических свойств следует, что $\text{YbIn}_{1-x}\text{Ag}_x\text{Cu}_4$ является системой с промежуточной (флуктуирующей) валентностью, и соответственно "утяжеление" электронов в ней может быть связано с выходом $4f$ -электрона на уровень Ферми (делокализация). Эффект увеличения заселенности s -состояний партнеров Yb объясняется тем, что при переходе в состояние ПВ $4f$ -электрон Yb гибридизируется (в основном) с $5s$ -электронами соседних атомов In, Ag и в меньшей степени Cu, но не с электронами Yb. Суммарное увеличение заселенности этих состояний $\overline{\Delta n_\Sigma}(\text{In, Ag, Cu}) = 1.0 \pm 0.1$ практически совпадает с наблюдаемым уменьшением заселенности $4f$ -оболочки Yb при переходе в состояние ПВ: $\Delta n_{4f} = 0.91 \pm 0.01$.

Системы с "тяжелыми" фермионами (СТФ) относятся к специфическому классу интерметаллических соединений на основе редкоземельных и актинидных элементов [1]. Основным признаком принадлежности к СТФ является аномально большое значение коэффициента электронной теплоемкости γ , что позволяет предположить наличие в таких системах вблизи уровня Ферми очень узкой зоны с большой плотностью состояний. Тот факт, что все известные СТФ образуются на основе лантаноидов и актинидов, f -уровни которых, как и в системах с промежуточной (флуктуирующей) валентностью (см., например, [2]), находятся достаточно близко к уровню Ферми, указывает на существенную роль атомарных свойств f -оболочек этих элементов при формировании состояния ТФ.

Механизм появления на уровне Ферми зоны "тяжелых" электронов до конца не ясен. Неясно, связано ли это с выходом f -уровня на уровень Ферми (в этом случае f -электроны становятся делокализованными и

ширина зоны определяется непосредственно f - sd -гибридизацией [3]), либо с коллективными процессами, когда f -уровень лежит еще относительно глубоко и свойства электронов вблизи уровня Ферми могут определяться коллективными эффектами типа эффекта Кондо, т.е. резонансного рассеяния электронов проводимости на локализованных моментах f -центров [4]. Если "утяжеление" электронов проводимости происходит в результате "всплывания" f -уровня к уровню Ферми, состояния с конфигурациями f^n и $f^{n-1} + e$ (e — электрон проводимости) становятся вырожденными и реализуется состояние с нецелочисленной валентностью. В случае возникновения СТФ за счет рассеяния электронов проводимости на локализованных моментах f -центров f -электроны лежат ниже уровня Ферми и реализуется состояние с целочисленной валентностью. Таким образом, дробность или целочисленность валентности f -атомов можно рассматривать как проявление одного из двух механизмов формирования СТФ.

В последние 3–5 лет интенсивно исследуется интерметаллическое соединение $\text{YbIn}(\text{Ag})\text{Cu}_4$, обладающее уникальными физическими свойствами (кристаллографическими, электрическими, магнитными, тепловыми, спектральными и др.), см., например, [5–9].

В $\text{YbIn}_{1-x}\text{Ag}_x\text{Cu}_4$ ($x \approx 0-0.3$) при атмосферном давлении и $T \approx 40-80$ К¹ наблюдается изоструктурный переход I рода — параметр кристаллической решетки меняется скачком на $\approx 0.13\%$, при этом сохраняется симметрия решетки (тип AuBe_5 до и после перехода) [5]. Аналогом такого перехода является изоморф-

¹ Температура перехода зависит от технологии изготовления (поли(моно)-кристаллы, избыток (недостаток) компонент соединения и др.).

ный фазовый переход $\text{Ce}_\gamma\text{-Ce}_\alpha$ в металлическом цери. Коэффициент электронной теплоемкости YbInCu_4 $\gamma \approx 50 \text{ mJ/mol} \cdot \text{K}^2$ [6] характерен для систем с промежуточной валентностью и ТФ-систем (так называемых "light-fermion systems" [10]). При допировании серебром симметрия кристаллической решетки сохраняется, γ растет и для чистого YbAgCu_4 достигает величины $\approx 200\text{--}250 \text{ mJ/mol} \cdot \text{K}^2$ [8,9] ("moderately heavy fermion system"). При комнатной температуре валентность Yb в $\text{YbIn}_{1-x}\text{Ag}_x\text{Cu}_4$, по разным литературным данным, меняется в диапазоне от ~ 3 до ~ 2.9 [5,7,9].

В данной работе методом смещений рентгеновских линий (СРЛ) (см., например, [11,12]) исследованы заселенности 4*f*-оболочки Yb, 5*s*-оболочек In, Ag и 4*s*-оболочки Cu в $\text{YbIn}_{1-x}\text{Ag}_x\text{Cu}_4$ ($0 \leq x \leq 1$, $T = 300 \text{ K}$; для $\text{YbIn}_{0.7}\text{Ag}_{0.3}\text{Cu}_4$ $T = 77, 300$ и 1000 K). Если роль *f*-атомов в механизме СТФ более или менее определена, то электронная структура *s*(*p*)-, *d*-партнеров и вклад их в этот механизм, насколько нам известно, на микроскопическом уровне не исследовались.

1. Экспериментальные результаты. Обсуждение

Исследованные поликристаллические образцы $\text{YbIn}_{1-x}\text{Ag}_x\text{Cu}_4$ синтезировались из YbInCu_4 и YbAgCu_4 , полученных в свою очередь из стехиометрических смесей чистых металлов. Плавка проводилась в индукционной печи в танталовых тиглях в вакууме с последующим отжигом при $T \approx 700^\circ\text{C}$. Полученные образцы были монофазны, имели кубическую решетку типа AuBe_5 (структура *C15b*). Параметр решетки и его концентрационная зависимость $a(x)$ при комнатной температуре хорошо совпадали с литературными данными [5,9]. Состав (x) контролировался флуоресцентным анализом.

Смещения $K_{\alpha 1}$ -линий Yb, In, Ag и Cu измерялись на специальном кристалл-дифракционном спектрометре по Кошуа. Флуоресцентное излучение в образцах возбуждается рентгеновской трубкой ($I = 10 \text{ mA}$, $U = 140 \text{ kV}$). Схема опыта и процедура измерений подробно описаны в предыдущих работах (см., например, [11,13]).

Иттербий. Валентные превращения в редкоземельных элементах связаны с изменением числа 4*f*-электронов. Такие изменения, как показано ранее (см., например, [11,12]), приводят к аномально большим (по сравнению с эффектами от 6*s*(*p*)-, 5*d*-электронов) изменениям энергии (смещениям) эмиссионных *K*-линий исследуемого редкоземельного элемента ($|\Delta E_{K_{\alpha 1,2}}^{4f}| \approx 500\text{--}600$, $|\Delta E_{K_{\beta 1,3}}^{4f}| \approx 1500\text{--}1700$ и $|\Delta E_{K_{\alpha,\beta}}^{6s(p),5d}| \approx 20\text{--}80 \text{ meV}$). Это делает метод СРЛ достаточно чувствительным при исследовании механизмов, связанных с перестройкой 4*f*-оболочки (изменением валентности).

Экспериментальные величины смещений $K_{\alpha 1}$ -линии иттербия в $\text{YbIn}_{1-x}\text{Ag}_x\text{Cu}_4$ относительно двухвалентного репера (Yb-металл) приведены в таблице. Знак и аномально большая величина эффекта однозначно

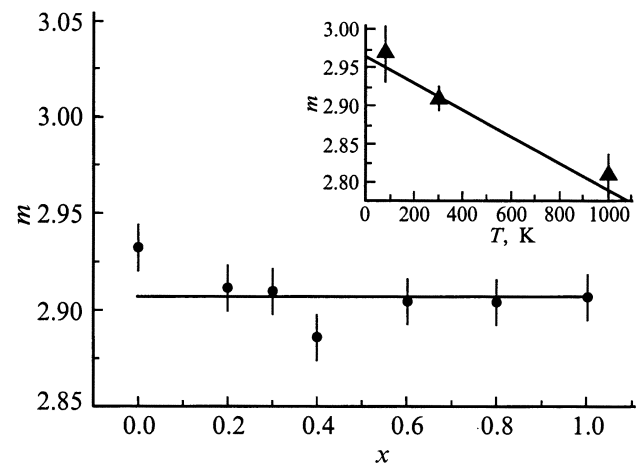


Рис. 1. Концентрационная зависимость валентности Yb (m) в $\text{YbIn}_{1-x}\text{Ag}_x\text{Cu}_4$ при комнатной температуре. На вставке — зависимость m для $\text{YbIn}_{0.7}\text{Ag}_{0.3}\text{Cu}_4$ от температуры.

свидетельствуют об уменьшении числа 4*f*-электронов (увеличении валентности) Yb. Разность числа 4*f*-электронов Yb в соединении и репере определялась как $\Delta n_{4f}(x) = \Delta E(x) / \Delta E(\text{Yb}^{3+} - \text{Yb}^{2+})$, где $\Delta E(x)$ — экспериментальное смещение, $\Delta E(\text{Yb}^{3+} - \text{Yb}^{2+})$ — калибровочное смещение, соответствующее смещению $K_{\alpha 1}$ -линии Yb при уменьшении заселенности 4*f*-оболочки на единицу. Очевидно, что валентность Yb в исследуемом образце $m = m_{\text{реп}} + \Delta n_{4f} = 2 + \Delta n_{4f}$. Калибровочное смещение измерено для пары $\text{Yb}_2\text{O}_3\text{-Yb}_{\text{мет}}$ и равно $\Delta E(\text{Yb}^{3+} - \text{Yb}^{2+}) = -583 \pm 5 \text{ meV}$. Концентрационная зависимость валентности Yb $m(x)$ при комнатной температуре² показана на рис. 1, из которого следует, что во всей области составов валентность Yb практически постоянна и имеет нецелочисленное значение $\bar{m}(0 \leq x \leq 1) = 2.91 \pm 0.01$.

Нецелочисленность валентности *f*-атома характерна для специфического класса редкоземельных и актинидных соединений с так называемой промежуточной (флуктуирующей) валентностью (ПВ). Характерные для ПВ-соединений макроскопические особенности: изоструктурность перехода, температурные зависимости магнитной восприимчивости, электросопротивления, теплоемкости и др. — наблюдаются и в $\text{Yb}(\text{In, Ag})\text{Cu}_4$ [5,8,9].

Наблюдаемая нами нецелочисленная величина валентности Yb в $\text{Yb}(\text{In, Ag})\text{Cu}_4$ $m = 2.91$ мало отличается от обычного "нормального" для Yb значения 3. Однако такое небольшое отличие m приводит к существенно разным выводам при выборе механизма перехода в состояние ТФ (*f*-*sd*-гибридизация либо коллективные процессы типа эффекта Кондо). Количественно ожидаемую валентность Yb при переходе в состояние ПВ

² Валентность Yb практически постоянна и при $T = 77 \text{ K}$ равна $\bar{m}(x = 0, 0.3, 1) = 2.93 \pm 0.02$.

можно оценить из простой феноменологической модели межконфигурационных флуктуаций [14,15]. Состояние ПВ рассматривается как резонанс (флуктуации) между энергетически близкими начальным $4f^n$ и конечным $4f^{n-1} + e$ состояниями $4f$ -электрона и реализуется при выполнении условия $|E_{ex}| = |E_n - E_{n-1}| \leq \Gamma$, где E_n и E_{n-1} — энергии этих конфигураций, Γ — энергия андерсоновской гибридизации $4f$ -электрона с электронами зоны проводимости (ширина $4f$ -уровня). Вероятность нахождения РЗ-атома в состоянии $4f^{n-1}$ определяется распределением типа Больцмана с учетом перемешивающего взаимодействия

$$P(E_{n-1}) = \left[1 + \frac{M_n}{M_{n-1}} \exp\left(\frac{E_{ex}}{T + \Gamma}\right) \right]^{-1}, \quad (1)$$

где M_n и M_{n-1} — статистические веса состояний f^n и f^{n-1} . Предполагая, что флуктуации $4f$ -электрона Yb в Yb(In,Ag)Cu₄ с узла на узел происходят только между совпадающими (вырожденными) энергетическими уровнями ($E_{ex} \approx 0$) — переход типа перехода Андерсона [16], можно определить вероятность состояния Yb³⁺, которая в этом случае определяется только статвесами Yb²⁺ ($J = 0$, $M_n = 1$) и Yb³⁺ ($J = 7/2$, $M_{n-1} = 8$) состояний и равна $P(\text{Yb}^{3+}) = M_{n-1}/(M_{n-1} + M_n) = 8/9$, что соответствует величине $m = 2.89$, хорошо совпадающей (для такой достаточно простой модели) с нашим экспериментальным значением 2.91 ± 0.01 .

Отождествление состояния ПВ только по признаку m целое или не целое недостаточно. Нецелочисленность валентности имеет место и в соединениях со смешанной валентностью, когда разные по валентности f -атомы сосуществуют в кристаллической решетке, но занимают неэквивалентные положения. Флуктуационный характер ПВ-состояния (E_{ex} , Γ , время флуктуаций) может быть однозначно отождествлен по изомерному сдвигу в эффекте Мессбауэра. К сожалению, этот метод мало чувствителен в случае Yb, так как изомерный сдвиг здесь на порядок меньше ширины линии [10].

Как косвенное подтверждение ПВ-состояния иттербия в системе Yb(In,Ag)Cu₄ можно рассматривать эксперимент при высокой температуре. На вставке рис. 1 приведена температурная зависимость валентности Yb в YbIn_{0.7}Ag_{0.3}Cu₄. Наблюдается уменьшение m с увеличением температуры. Такое поведение можно объяснить в предположении зависимости E_{ex} от T (теория в принципе допускает такую возможность [17]). Ранее эффект уменьшения валентности редкоземельных атомов при высокой температуре в "классических" системах с промежуточной валентностью мы наблюдали в широком классе интерметаллических соединений церия [18,19] и европия в EuRh₂ и EuCu₂Si₂ [20] методом СРЛ, а также авторы работ [21,22] в EuCu₂Si₂ — ЯГР методом. Температурные зависимости $m(T)$ демонстрируют хорошее согласие СРЛ- и ЯГР-спектроскопий.

Экспериментальные смещения $K_{\alpha 1}$ -линий Yb, In, Ag и Cu в YbIn_{1-x}Ag_xCu₄ и ионных соединениях при комнатной температуре

Соединение	Смещения $K_{\alpha 1}$ -линий, meV			
	Yb	In	Ag	Cu
YbIn _{1-x} Ag _x Cu ₄				
$x = 0$	-544 ± 5	-28 ± 5	-	-1 ± 4
$x = 0.2$	-531 ± 6	-28 ± 5	-34 ± 9	-8 ± 3
$x = 0.3$	-530 ± 5	-25 ± 6	-54 ± 12	-10 ± 3
$x = 0.4$	-516 ± 6	-32 ± 5	-39 ± 10	-4 ± 2
$x = 0.6$	-527 ± 6	-49 ± 4	-45 ± 9	-13 ± 3
$x = 0.8$	-527 ± 5	-31 ± 7	-32 ± 9	-1 ± 4
$x = 1$	-528 ± 6	-	-53 ± 12	-2 ± 3
Yb ₂ O ₃	-583 ± 5	-	-	-
InCl ₃	-	133 ± 8	-	-
AgCl	-	-	122 ± 5 [24]	-
CuCl	-	-	-	164 ± 5

Примечание. Реперы — металлические Yb, In, Ag и Cu.

Таким образом, совокупность рассмотренных выше микро- и макроскопических свойств YbIn_{1-x}Ag_xCu₄, а также эквивалентность положения атомов Yb в кристаллической решетке позволяет рассматривать эту систему как систему с промежуточной (флуктуирующей) валентностью и соответственно "утяжеление" электронов в ней — как результат f - sd -гибридизации при переходе $4f$ -электрона Yb в состояние ПВ.

Индий, серебро, медь. Одним из ключевых вопросов в проблеме ПВ (и соответственно СТФ) является вопрос о том, на каких центрах происходит гибридизация. В случае Yb(In,Ag)Cu₄ $4f$ -электрон Yb может гибридизоваться как с $s(p)d$ -электронами соседнего атома Yb,³ так и с $s(p)$ -электронами In, Ag, Cu. В последнем случае должно наблюдаться увеличение заселенности $s(p)$ -оболочек партнеров иттербия.

В таблице приведены смещения $K_{\alpha 1}$ -линий In, Ag, Cu. Для всех исследованных составов YbIn_{1-x}Ag_xCu₄ наблюдаются отрицательные смещения относительно соответствующих металлов. Как показано нами ранее [24], удаление из атома валентных $s(p)$ -электронов⁴ в тяжелых элементах приводит к положительным смещениям $K_{\alpha 1}$ -линий (масштаб эффекта для ионных соединений In, Ag и Cu иллюстрируется в таблице). Ненулевые значения смещений свидетельствуют о том, что заселенности внешних $s(p)$ -состояний In, Ag и Cu отличаются от заселенности в металлах, а отрицательные величины эффектов означают увеличение $s(p)$ -заселенности при переходе от металлического состояния к состоянию ПВ.

Электронная структура (заселенность $5s$ -состояний In и Ag и $4s$ -состояний Cu) определялась из экспериментальных смещений $K_{\alpha 1}$ -линий с использованием атомар-

³ Этот канал гибридизации ($\text{Sm} \leftrightarrow \text{Sm}$) наблюдался нами в ПВ-системе Sm_{1-x}Gd_xS [23].

⁴ Количественно эффекты от s - и p -электронов практически равны.

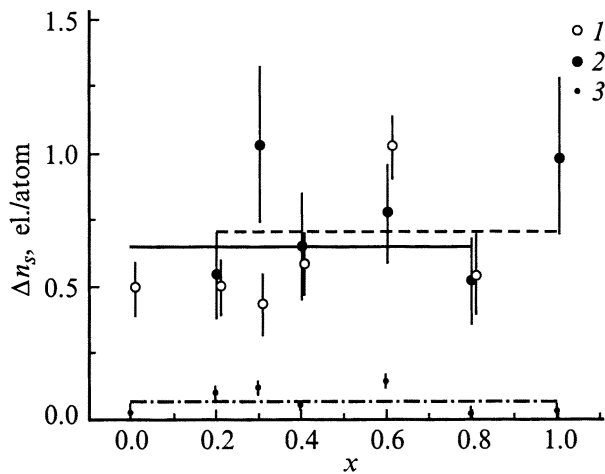


Рис. 2. Заселенность 5s-состояний In и Ag и 4s-состояний Cu в зависимости от состава (T — комнатная); 1 (сплошная линия), 2 (штриховая линия), 3 (штрих-пунктирная линия) — данные для In, Ag, Cu соответственно.

ных расчетов типа Дирака–Фока. Для каждого образца YbIn_{1-x}Ag_xCu₄ определялась величина Δn из уравнения

$$\Delta E_{\text{calc}}(\Delta n) = \Delta E^M(x), \quad (2)$$

где $M = \text{In, Ag}$ или Cu , $\Delta E^M(x)$ — экспериментальные смещения $K_{\alpha 1}$ -линий, $\Delta E_{\text{calc}}(\Delta n)$ — расчетные смещения, Δn — разность числа 5(4)s-электронов в ТФ-системе и металлическом репере (электронные конфигурации $4d^{10}5p^25s^1$, $4d^{10}5s^1$ и $3d^{10}4s^1$ для In, Ag и Cu соответственно). Полученные описанным выше способом зависимости $\Delta n(x)$ приведены на рис. 2. Как видно из рисунка, величины $\Delta n(x)$ практически не зависят ни от состава (x), ни от типа замещающего партнера (In или Ag). Средневзвешенные величины для $0 \leq x \leq 1$ $\overline{\Delta n_s}(\text{In}) = 0.65 \pm 0.05$ el/at, $\overline{\Delta n_s}(\text{Ag}) = 0.71 \pm 0.09$ el/at; Δn_s для меди также постоянно по составу, но эффект здесь примерно на порядок меньше — $\overline{\Delta n_s}(\text{Cu}) = 0.08 \pm 0.02$ el/at.

Обнаруженное значительное увеличение заселенности внешних 5s-орбиталей In и Ag (в меньшей степени 4s-орбиталей Cu) может быть объяснено одним из приведенных выше механизмов f - sd -гибридизации, а именно гибрилизацией 4f-электрона Yb с электронами проводимости соседей (In, Ag, Cu). Вариант, когда 4f-электрон флуктуирует между состояниями соседних атомов иттербия (Yb ↔ Yb), в принципе, не должен приводить к изменению электронной структуры соседних (не иттербиевых) атомов. В то же время при гибрилизации 4f-электрона с электронами проводимости соседних атомов-партнеров появление в результате перехода в состояние ПВ ($4f^{14} - 4f^{13} + e$) дополнительного электрона e в зоне проводимости должно увеличивать заселенность внешних $s(p)$ -орбиталей партнеров Yb по соединению, что и наблюдается в эксперименте для In, Ag (и в меньшей степени Cu). Суммарное увеличение

заселенности s -состояний партнеров Yb практически не зависит от x (так как $\overline{\Delta n_s}(\text{In}) \approx \overline{\Delta n_s}(\text{Ag})$), равно $\overline{\Delta n_s}(\text{In, Ag, Cu}) = 1.0 \pm 0.1$ и близко к наблюдаемому уменьшению заселенности 4f-оболочки Yb при переходе в состояние ПВ: $\Delta n_{4f} = 0.91 \pm 0.01$.

Независимость величины Δn_s от типа соседа означает, что 4f-электрон с равной вероятностью гибрилизуется с 5s-электронами In либо Ag. Различие в величине эффектов (Δn_s) для In и Ag, с одной стороны, и Cu, с другой, в YbIn_{1-x}Ag_xCu₄ можно объяснить особенностями кристаллической структуры этого соединения. Элементарная ячейка YbIn_{1-x}Ag_xCu₄ состоит из двух подрешеток: подрешетки Yb, In(Ag) и подрешетки Cu. Предполагается, что атомы первой подрешетки сильно связаны между собой и слабо — с атомами второй подрешетки [25], поэтому в процессе гибрилизации обмен электронами (соответственно увеличение n_s) будет определяться в основном атомами первой подрешетки (In, Ag).

Авторы благодарят О.И. Сумбаева за обсуждение и полезные замечания, Е.Г. Андреева за помощь в проведении эксперимента и П.Л. Соколову за оформление статьи.

Список литературы

- [1] G.R. Stewart. Rev. Mod. Phys. **56**, 6, 755 (1984).
- [2] Д.И. Хомский. УФН **129**, 3, 443 (1979).
- [3] A.W. Overhauser. J. Appl. Phys. Rev. **B31**, 1, 193 (1985).
- [4] A.M. Tsvetick, P.B. Wiegmann. Adv. Phys. **32**, 4, 453 (1983).
- [5] J.L. Sarrao, C.D. Immer, C.L. Benton, Z. Fisk, J.M. Lawrence, D. Mandrus, J.D. Thompson. Phys. Rev. **B54**, 17, 12207 (1996).
- [6] J.L. Sarrao, A.P. Ramirez, T.W. Darling, F. Freiber, A. Migliori, C.D. Immer, Z. Fisk, Y. Uwatoko. Phys. Rev. **B58**, 1, 408 (1998).
- [7] 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. **B56**, 13, 7993 (1997).
- [8] S. Zherlitsyn, B. Lüthi, B. Wolf, J.L. Sarrao, Z. Fisk, V. Zlatic. Phys. Rev. **B60**, 6, 3148 (1999).
- [9] J.L. Sarrao, C.D. Immer, Z. Fisk, C.H. Booth, E. Figueroa, J.M. Lawrence, R. Modler, A.L. Cornelius, M.F. Hundley, G.H. Kwei, J.D. Thompson, F. Bridges. Phys. Rev. **B59**, 10, 6855 (1999).
- [10] I. Felner, I. Nowik, D. Vaknin, Ulrike Potzel, J. Moser, G.M. Kalvius, G. Wortmann, G. Schmiester, G. Hilscher, E. Oratz, G. Schmitzer, N. Pillmayr, K.G. Prasad, H. de Waard, H. Pino. Phys. Rev. **B35**, 13, 6956 (1987).
- [11] O.I. Sumbaev. In: Modern Physics in Chemistry **1**, 33, Academic Press, N.Y. (1977).
- [12] О.И. Сумбаев. УФН **124**, 2, 281 (1978).
- [13] В.А. Шабуров, И.М. Банд, А.И. Грушко, Т.Б. Мезенцева, Е.В. Петрович, А.Е. Совестьнов, Ю.П. Смирнов, О.И. Сумбаев, М.Б. Тржасковская, И.А. Маркова. ЖЭТФ **65**, 3(9), 1157 (1973).
- [14] L.L. Hirst. Phys. Rev. **B15**, 1, 1 (1977).
- [15] B.C. Sales, D.K. Wohlleben. Phys. Rev. Lett. **35**, 18, 1240 (1975).
- [16] P.W. Anderson. Phys. Rev. **109**, 5, 1492 (1958).

- [17] D.K. Wohlleben. *J. de Phys.* **37**, C4–321 (1976).
- [18] В.А. Шабуров, Ю.П. Смирнов, А.Е. Совестьнов, А.В. Тюнис. Письма в ЖЭТФ **41**, 5, 213 (1985).
- [19] Ю.П. Смирнов, А.Е. Совестьнов, А.В. Тюнис, В.А. Шабуров. ФТТ **40**, 8, 1397 (1998).
- [20] М.Н. Грошев, В.И. Петрова, Ю.П. Смирнов, А.Е. Совестьнов, А.В. Тюнис, В.А. Шабуров, И.А. Сергеева. ФТТ **29**, 4, 1035 (1997).
- [21] A. Scherzberg, Ch. Sauer, U. Köbler, W. Zinn. *Solid State Commun.* **49**, 11, 1027 (1984).
- [22] E.R. Bauminger, D. Froindlich, I. Nowik, S. Ofer. *Phys. Rev. Lett.* **30**, 21, 1053 (1973).
- [23] А.Е. Совестьнов, Ю.П. Смирнов, А.В. Тюнис, В.А. Шабуров, А.В. Голубков, И.А. Смирнов. ФТТ **39**, 6, 1017 (1997).
- [24] Е.В. Петрович, Ю.П. Смирнов, А.И. Грушко, О.И. Сумбаев, И.М. Банд, М.Б. Тржасковская. ЖЭТФ **61**, 5(11), 1756 (1971).
- [25] Х.Р. Кирхмайер, К.А. Полди. Физика и химия редкоземельных элементов (справочник) / Под ред. К. Гшнайнднер, Л. Айринг. Металлургия, М. (1982). С. 88.