

ПАРАМАГНИТНАЯ ТЕМПЕРАТУРА КЮРИ И ОБМЕННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ В СИСТЕМЕ Но-ЭГЖ (ЭГЖ = Fe, Co) В КОНДЕНСИРОВАННОМ СОСТОЯНИИ

О.Каримов, М.К.Салахитдинова
Самаркандский государственный университет

В данной статье раскрывается парамагнитная температура Кюри и обменное взаимодействие в системе Но-ЭГЖ (ЭГЖ = Fe, Co) в конденсированном состоянии

В переходных металлах, в том числе в редкоземельных металлах (РЗМ), элементах группы железа (ЭГЖ) и их соединениях приобретает особенно важное значение вопрос о происхождении атомного магнитного порядка. В изолированных атомах РЗМ 4f-слоя электронной оболочки заполняется с опозданием, они лежат глубоко и экранированы от внешних влияний слоем $5s^25p^6$, даже в конденсированном состоянии. Поэтому, существование прямого обменного взаимодействия между электронами 4f-слоя, ответственное за магнитные свойства РЗМ, почти невозможно. Однако, исследования показывают, что РЗМ и даже соединения на их основе, обладают магнитным упорядочением, обусловленным обменным взаимодействием электронов 4f-слоя, локализованных в узлах кристаллической решётки, через электроны проводимости, называемое косвенным обменным взаимодействием Рудермана – Киттеля – Касуя и Иосиды (РККИ) [f-s-f (или коротко f-s) взаимодействия] [1-4].

Известно, что парамагнитная температура Кюри (θ_p) РЗМ, ЭГЖ и их соединений связано с энергетическим параметром $A \approx k_B \theta_p$, характеризующего энергию обменного взаимодействия электронов 3d и 4f-слоя. Температурная зависимость парамагнитной восприимчивости этих объектов непосредственно отражает θ_p через закона Кюри-Вейсса [$\chi = C/(T - \theta_p)$].

Цель настоящей работы – изучение влияния магнитных металлов ЭГЖ (ЭГЖ=Fe, Co) на характер взаимодействия типа РККИ в Но и оценка значения параметра А для всех возможных типов обменных взаимодействий в интерметаллидах бинарных систем Но-(Fe,Co), с использованием экспериментальных значений θ_p этих объектов.

В рамках теории РККИ, используя представления молекулярного поля, для объяснения экспериментальных значений θ_p РЗМ получено следующее выражение [1, 5]:

$$\theta_p = \frac{3\pi n^2}{k_B \Omega^2 E_F} A_{sf}^2(0) G \sum_{n \neq m} F(2\vec{k}_F |\vec{R}_n - \vec{R}_m|), \quad (1)$$

где n – число электронов проводимости на атом (ион); Ω - атомный объём; $A_{sf}(0)$ – интеграл s-f- обменного взаимодействия, не зависящая от \vec{k}_F ; E_F и \vec{k}_F – энергия и волновой вектор на поверхности Ферми; $|\vec{R}_n - \vec{R}_m|$ – расстояния между магнитными ионами, находящимися в узлах кристаллической решётки n и m; $F(2\vec{k}_F |\vec{R}_n - \vec{R}_m|) = F(y)$ – функция Рудермана-Киттеля, определяемая выражением

$$F(y) = (y \cos y - \sin y) / y^4; \quad (2)$$

$$G = (g_J - 1)^2 J(J + 1) - \quad (3)$$

– фактор де Жена, для РЗМ. В (3) g_J – фактор Ланде определяется следующим выражением:

$$g_J = 1 + [J(J + 1) + S(S + 1) - L(L + 1)] / 2J(J + 1), \quad (4)$$

где S , L и J – соответственно, суммарные значения квантовые числа спинового, орбитального и полного механических моментов электронов 4f-слоя.

В рамках теории РККИ для вычисления интеграла (параметра) косвенного обменного взаимодействия в РЗМ получено следующее выражение [1,5]:

$$A = \frac{9\pi^2}{\Omega^2 E_F} A_{sf}^2(0) \sum_{n \neq m} F(y). \quad (5)$$

Учитывая этого, для полуэмпирическое оценки значения A для f-s взаимодействие в гольмия, из выражения (1) находим:

$$\frac{A}{k_B} = \frac{3\theta_P}{G_{Ho}} \quad (6)$$

С помощью этой формулы можно тоже оценить значения A для взаимодействий типа f-d и d-s в изучаемых соединениях основываясь на следующих соображении: 1) Тейлорам [5] сделана попытка описать f-d взаимодействие с помощью модели РККИ. При этом он в место члена $A_{sf}^2(0)$ в (1) и (5) приписывает произведение интегралов f-d и s-d взаимодействия, т.е. $A_{fd}(0) \cdot A_{sd}(0)$; 2) фактор де Жена для изучаемых соединений можно определить, по правилу аддитивности, следующим выражением:

$$G = (1-x)G_{Ho} + xG_{ЭГЖ}, \quad (7)$$

где x – содержания ЭГЖ в атомных долях; G_{Ho} и $G_{ЭГЖ}$ – факторы де Жена гадолия и ЭГЖ, определяются по (3) следующими выражением [с учетом правила Хунда для Ho и явление “замораживание” орбитальных моментов для ЭГЖ ($L=0, J=S, g_J=g_S=2$)]:

$$G_{Ho} = (g_J - 1)^2 J(J + 1), \quad G_{ЭГЖ} = (g_S - 1)^2 S(S + 1). \quad (8)$$

Учитывая (7) и (8) по (6) можно полуэмпирическое оценить интеграла A (параметра A/k_B) тоже f-d и d-s взаимодействия, в изученных соединениях с помощью следующих выражении:

для d-s взаимодействие ($G_{Ho}=0$)

$$A/k_B = \frac{3\theta_P}{xG_{ЭГЖ}}, \quad (9)$$

для f-d взаимодействие ($G_{Ho} \neq 0, G_{ЭГЖ} \neq 0$)

$$A/k_B = \frac{3\theta_P}{(1-x)G_{Ho} + xG_{ЭГЖ}} \quad (10)$$

При расчете фактор де Жена по (8) использовали значения J и g_J для основного состояния иона Ho^{3+} ($J=8, g_J=5/4$) и значения S и g_S для основных состояний ионов Fe^{3+} и Co^{2+} ($S=7/2$ и $3/2, g_S=2$).

Результаты расчетов приведены в таблице. Из таблицы видно, что значения параметра A/k_B в твердом состоянии больше, чем в жидком состоянии. Анализ таблицы показывает, что в системе Ho-Fe самое сильным является взаимодействие f-s и она усиливается с увеличением содержания атомов Fe. Взаимодействие d-s лежит между взаимодействиями f-d и f-s. В системе Ho-Co, хотя магнитный момент Co меньше магнитного момента Ho, тем не менее взаимодействие d-s превосходит по сравнению с взаимодействием f-s в соединениях, содержащих до 50 ат.% Co (Ho_3Co, Ho_4Co_3). В соединениях, содержащих более 50 ат.% Co, взаимодействие f-s играет доминирующую роль в происхождении их магнитного порядка. В этих соединениях взаимодействия d-s лежит между взаимодействиями f-d и f-s.

Таблица

Значения A/k_B различных типов взаимодействия с системах Ho-ЭГЖ (ЭГЖ=Fe, Co)

Образцы	$A/k_B, 10^2 K$					
	f-s-связь		d-s-связь		f-d-связь	
	твердое сост.	жидкое сост.	твердое сост.	жидкое сост.	твердое сост.	жидкое сост.
Ho	0,60	3,33	-	-	-	-
HoFe ₂	17,879	-3,979	4,528	-1,008	3,615	-0,804
HoFe ₃	26,08	-7,73	4,471	-1,326	3,816	-1,132
Ho ₆ Fe ₂₃	31,82	-7,61	4,272	1,037	3,776	-0,215
Ho ₂ Fe ₁₇	58,730	-20,83	3,54	-1,25	3,342	-1,185
α -Fe	-	-	3,610	-	-	-
δ -Fe	-	-	3,771	1,44	-	-
Ho ₃ Co	0,889	2,693	3,200	9,696	0,696	2,108
Ho ₄ Co ₃	7,117	7,012	11,386	11,218	3,534	3,482
HoCo ₂	25,454	18,081	15,045	10,086	9,456	6,717
HoCo ₃	34,40	25,547	17,760	10,218	9,828	7,299
Ho ₂ Co ₇	40,757	29,061	13,795	9,836	10,306	7,349
HoCo ₅	53,020	55,216	13,031	13,571	10,460	10,894
Ho ₂ Co ₁₇	86,921	87,809	12,237	12,362	10,727	10,836
Co	-	-	11,264	12,384	-	-

Выводы: 1. Впервые полуэмпирическое исследовано различных типов косвенного обменного взаимодействия в бинарных системах Ho-ЭГЖ (ЭГЖ=Fe,Co), с использованием экспериментальных значения парамагнитных температур Кюри исследуемых образцов в конденсированном состоянии.

2. Установлено, что во всех исследуемых соединениях системы Ho-Fe и в соединениях системы Ho-Co, содержащих более 50 ат.% Co, f-s взаимодействие, а в соединениях Ho₃Co и Ho₄Co₃, d-s взаимодействие являются самыми сильными и эти взаимодействия играют доминирующую роль в механизме происхождения магнитного порядка в этих соединениях.

Литература

1. С. В. Вонсовский. Магнетизм. М.: Наука, 1971. - 1031 с.
2. M. A. Ruderman, C. Kittel. Indirect exchange coupling of nuclear magnetic moments of conduction electrons.//Phys. Rev.-1954. – v.96.-№1.-P.99-102.
3. T. A. Kasuya. Theory of metallic ferro and antiferromagnetism on Zener's model.// Prog. Theor. Phys. (Kyoto). -1956.-V.16.-№1. –P.45-55.
4. K.Iosida. Magnetic properties of Cu-Mn alloys.// Phys. Rev. -1957.-V.106-№.5.-P.893-898
5. К.Тейлор. Интерметаллические соединения редкоземельных металлов. М.: Мир, 1974. – 221 с.

