

УДК 538.662

## ЗАВИСИМОСТЬ ТОЧКИ КЮРИ ОТ ЭФФЕКТИВНОГО ПАРАМЕТРА де ЖЕНА В ФЕРРОМАГНЕТИКАХ С ФРУСТРИРОВАННЫМИ ОБМЕННЫМИ СВЯЗЯМИ

Э.Г. ШАРОЯН

Институт физических исследований НАН Армении, Аштарак

(Поступила в редакцию 15 июня 2007 г.)

На примере магнитноразбавленных гадолиний-содержащих адамяновских сплавов показано, что зависимость температуры Кюри  $T_C$  от параметра де Жена  $\zeta = c(g-1)^2/J+1$ ) может быть распространена на ферромагнетики с фрустрированными обменными связями. Показано, что в этом случае необходимо заменить  $J$  на  $S_{\text{eff}}$  и что линейная зависимость  $T_C$  от  $\zeta_{\text{eff}}$  сохраняется вплоть до чисто спин-стекольного состояния с  $S_{\text{eff}} = 0$ .

Температуры магнитных переходов в магнитноупорядоченное ферро- или антиферромагнитное состояние ( $T_{\text{Кюри}} \equiv T_C$  и  $T_{\text{Нееля}} \equiv T_N$ ) в редкоземельных металлах (Re) и их сплавах пропорциональны атомной концентрации магнитных ионов  $c$  и хорошо описываются параметром де Жена  $\zeta = c(g-1)^2/J+1$ ), где  $g$  – фактор Ланде,  $J$  – полный момент количества движения [1]. Некоторые экспериментально наблюдаемые отклонения  $T_C$  и  $T_N$  от линейной зависимости могут быть объяснены изменениями параметра решетки [2], а также вариацией зонной структуры редкоземельных сплавов [3]. Несомненно, оба механизма влияют на  $T_C$ . Нам представляется более существенной зависимость  $T_C$  от параметра решетки, так как обменные взаимодействия между локализованными редкоземельными ионами, которые осуществляются электронами проводимости (механизм Рудермана–Киттеля–Касуи–Иосида [4]) непосредственно зависят от расстояния между ними.

В работе [5] В.Адамяном предложен метод получения интерметаллических твердых растворов с кристаллической структурой CsCl, в которых константа кубической решетки  $a_0$  остается неизменной при изменении состава сплава. Через  $a_0$  определяются все расстояния между магнитными ионами. В.Адамяном с сотрудниками был синтезирован и исследован ряд систем псевдобинарных гадолиний-содержащих сплавов  $[\text{Gd}_{1-x}\text{Re}_x][\text{M}_{1-y}\text{M}_2_y]$  со стехиометрией 1:1, которые имеют кристаллическую структуру типа CsCl с неизменным значением параметра решетки  $a_0$  (здесь M1 и M2 – немагнитные ионы металлов первых трех групп периодической таблицы) [2]. В настоящей работе нами будут анализироваться нижеследующие адамяновские системы сплавов:

$$\begin{aligned} \text{система A} &\equiv [\text{Gd}_{0.22}(\text{La}_{1-x}\text{Y}_x)_{0.78}][\text{Zn}_{1-x}\text{Cd}_x], \quad 0 \leq x \leq 1, \\ \text{система E} &\equiv [\text{Gd}_{0.22}(\text{La}_{1-x}\text{Y}_x)_{0.78}][\text{Zn}_{1-x}(\text{In}_{0.5}\text{Cu}_{0.5})_x], \quad 0 \leq x \leq 0.5, \\ \text{система D} &\equiv [\text{Gd}_x(\text{La/Y})_{1-x}][\text{Zn}_{0.15}\text{Cd}_{0.85}], \quad 0.22 \leq x \leq 1. \end{aligned}$$

В этих сплавах магнитны только ионы  $Gd^{3+}$  ( $L = 0$ ,  $S = 7/2$ ), а остальные ионы ( $La^{3+}$ ,  $Y^{3+}$ ,  $In^{3+}$ ,  $Zn^{2+}$ ,  $Cd^{2+}$  и  $Cu^{1+}$ ) диамагнитны. Неизменность  $a_0$  в системах сплавов А и Е достигается одновременными замещениями ионов в редкоземельной и металлической подрешетках ( $Zn^{2+}$  на  $Cd^{2+}$  или на  $(In^{3+} + Cu^{1+})$  совместно с  $La^{3+}$  на  $Y^{3+}$ ). Неизменность параметра решетки в системе сплавов D достигалась вариацией соотношения  $Y/La$  при изменении концентрации гадолиния. Для всех трех систем сплавов измеренная константа кубической решетки  $a_0 = (3.741 \pm 0.001) \text{ \AA}$ . В системах сплавов А и Е концентрация магнитных ионов  $Gd^{3+}$  постоянна ( $c = 0.22$ ), в системе сплавов D она менялась в интервале  $0.22 \leq c \leq 1$  ( $c \equiv x$ ).

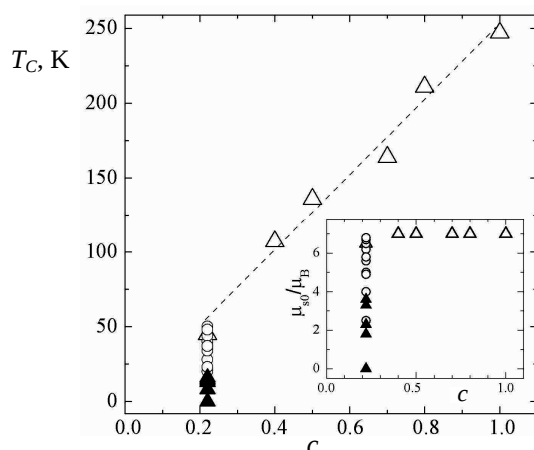


Рис.1. Температура Кюри  $T_C$  и спонтанная намагниченность  $\mu_{so}$  в зависимости от концентрации ионов  $Gd^{3+}$   $c$ :  $\Delta$  – D  $\equiv [Gd_c(La/Y)_{1-c}][Zn_{0.15}Cd_{0.85}]$ ,  $0.22 \leq c \leq 1$ ;  $\circ$  – А  $\equiv [Gd_{0.22}(La_{1-x}Y_x)_{0.78}][Zn_{1-x}Cd_x]$ ,  $0 \leq x \leq 1$ ;  $\blacktriangle$  – Е  $\equiv [Gd_{0.22}(La_{1-x}Y_x)_{0.78}][Zn_{1-x}(In_{0.5}Cu_{0.5})_x]$ ,  $0 \leq x \leq 0.5$ .

На рис.1 приведена зависимость  $T_C$  от  $c$  для всех трех систем. Для сплавов системы D хорошо соблюдается линейная зависимость  $T_C$  от  $c$  (зависимость де Жена). Однако в случае сплавов А и Е, для которых  $c = 0.22$ , наблюдаются разные  $T_C$  в зависимости от композиционного состава диамагнитных ионов  $x$ . В системе А  $T_C$  меняется от 13 до 50 К, а в системе Е от 13 до 0 К. На рис.1 показана также зависимость спонтанной намагниченности  $\mu_{so}$  от  $c$  при  $T = 0$  (вставка). Зависимости  $T_C$  и  $\mu_{so}$  от  $x$  при  $c = 0.22$  представлены на рис.2. В работах [6-8] нами показано, что “магнитные аномалии” в системах А и Е обусловлены сплавными эффектами (alloying effects) – зависимостью средней длины свободного пробега электронов и эффективной массы электронов от  $x$ . Следует также отметить, что концентрация ионов  $Gd^{3+}$  в сплавах А и Е, равная 0.22, близка к порогу перколяции и что существенно разные зависимости  $T_C$  и  $\mu_{so}$  в районе  $x \sim 0.5$  (коллинеарный ферромагнетик с  $\mu_{so} \sim 7 \mu_B$  и  $T_C = 50$  К в случае А и спиновое стекло с  $\mu_{so} = 0$  и  $T_C = 0$  К в случае Е) обусловлены композиционным беспорядком немагнитных ионов при изоэлектронных замещениях в первом случае и зарядовым беспорядком при неизоэлектронных замещениях во втором [7,8]. В сплавах обеих систем А и Е мы фактически наблюдаем ферромагнетизм, который частично подавлен из-за фрустраций обменных взаимодействий – ферромагнетизм с фрустрированными обменными

СВЯЗЯМИ.

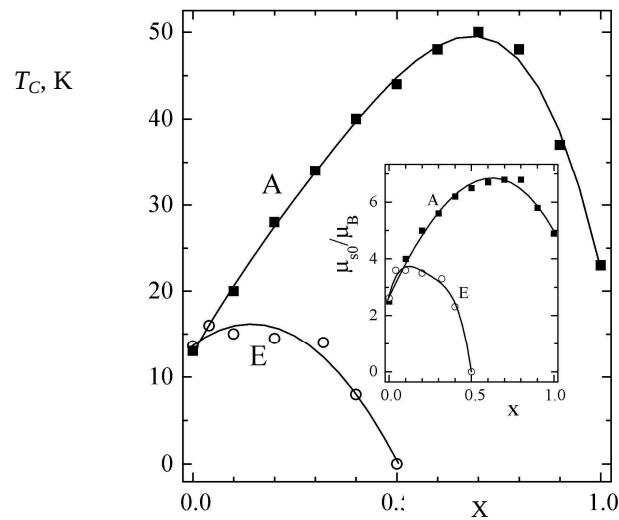


Рис.2. Зависимости  $T_C$  и  $\mu_{30}$  от  $x$  в системах сплавов А и Е при  $c = 0.22$ .

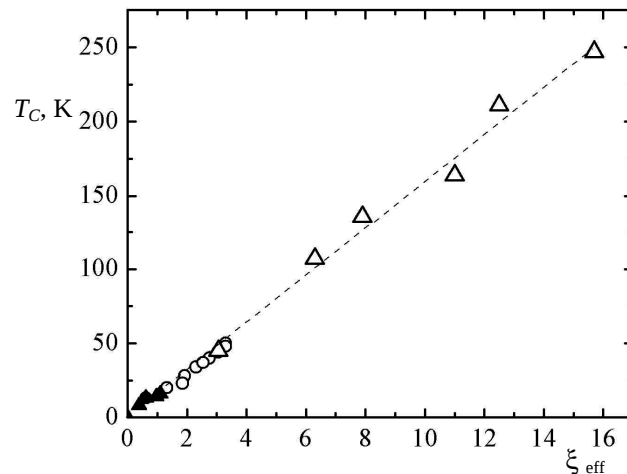


Рис.3. Зависимость  $T_C$  от эффективного параметра де Жена  $\zeta_{\text{eff}} = cS_{\text{eff}}(S_{\text{eff}} + 1)$ :  
 $\Delta$  – D  $\equiv [\text{Gd}_c(\text{La/Y})_{1-c}][\text{Zn}_{0.15}\text{Cd}_{0.85}]$ ,  $0.22 \leq c \leq 1$ ;  $\circ$  – A  $\equiv [\text{Gd}_{0.22}(\text{La}_{1-x}\text{Y}_x)_{0.78}][\text{Zn}_{1-x}\text{Cd}_x]$ ,  
 $0 \leq x \leq 1$ ;  $\blacktriangle$  – E  $\equiv [\text{Gd}_{0.22}(\text{La}_{1-x}\text{Y}_x)_{0.78}][\text{Zn}_{1-x}(\text{In}_{0.5}\text{Cu}_{0.5})_x]$ ,  $0 \leq x \leq 0.5$ .

В настоящем сообщении мы хотим указать на то, что зависимость  $T_C$  от фактора де Жена можно распространить и на ферромагнетики с фрустрированными обменными связями, заменяя в выражении параметра де Жена  $J$  на  $J_{\text{eff}}$ . В этом случае параметр де Жена для ионов  $\text{Gd}^{3+}$  имеет вид  $\zeta_{\text{eff}} = cS_{\text{eff}}(S_{\text{eff}} + 1)$ , т.к.  $g = 2$  и  $J = S$ . На рис.3 приведена зависимость  $T_C$  от  $\zeta_{\text{eff}}$ . Значения  $S_{\text{eff}}$  нами определялись из соотношения  $\mu_{30} = gS_{\text{eff}} \mu_B$ . Как видно из рис.3, линейная зависимость  $T_C$  от эффективного параметра де Жена  $\zeta_{\text{eff}}$  имеет место для всех образцов: и для сплавов системы D – для колли-

неарных ферромагнетиков с  $S = 7/2$ , в которых концентрация магнитных ионов  $c$  меняется от 0.22 до 1, и для сплавов систем А и Е – для фрустрированных ферромагнетиков с  $S = S_{\text{eff}}$  при значениях  $c$ , близких к порогу перколяции ( $c = 0.22$ ). Эта линейная зависимость имеет место и при малых  $S_{\text{eff}}$ , вплоть до чисто спин-стекольного состояния с  $S_{\text{eff}} = 0$ .

## ЛИТЕРАТУРА

1. С.Тикадзуми. Физика ферромагнетизма. М., Мир, 1983.
2. V.E.Adamian, A.A.Artsruni, A.Benaissa, A.N.Kocharian, M.A.Melikian. a) Proc. of 24-th Ampere Congress. Poznan, 1988, p.983; b) Phys. Stat. Sol. (b), **156**, 633 (1989).
3. P.Lindgard. Phys. Rev. B, **16**, 2168 (1977).
4. M.A.Ruderman, C.Kittel. Phys. Rev., **96**, 99 (1954); T.Kasuya. Prog. Theor. Phys., **16**, 45 (1956); K.Yosida. Phys. Rev., **106**, 893 (1957).
5. В.Е.Адамян. ДАН Арм. ССР, **84**, 35 (1987).
6. В.Е.Адамян, Э.Г.Шаполян. Изв. НАН Армении, Физика, **36**, 94 (2001).
7. E.G.Sharoyan, V.E.Adamian. Abstracts of 46<sup>th</sup> ANNUAL Conference on Magnetism & Magnetic Materials, Seattle, Washington, 2001, p.75.
8. E.G.Sharoyan, V.E.Adamian. Abstracts of 49<sup>th</sup> ANNUAL Conference on Magnetism & Magnetic Materials. Jacksonville, Florida, 2004, p.26.

ՖԵՐՈՄԱԳՆԵՏԻԶՄ ՓՈԽԱՆԱԿԱՅԻՆ ԿԱՊԵՐՈՎ ՖԵՌՈՄԱԳՆԵՏԻԿՆԵՐԻ  
ԿՅՈՒՐԻԻ ԶԵՐՄԱՍՏԻՃԱՆԻ ԿԱԽՈՒՄԸ ՊԵ ԺԵՆԻ ԷՖԵԿՏԻՎ ՊԱՐԱՄԵՏՐԻՑ

Է.Գ. ՇԱՐՈՅԱՆ

Աղայանական գադոլինիում պարունակող համաձուլվացքների հիման վրա ցույց է տրված, որ Կյուրիի ջերմաստիճանի կախումը դե Ժենի պարամետրից՝  $\zeta = c(g-1)2J(J+1)$ , կարելի է կիրառել նաև ֆրուստացված փոխանակային կապերով ֆեռոմագնիսների համար: Ցույց է տրված, որ այդ դեպքում անհրաժեշտ է  $J$ -ն փոխարինել  $S_{\text{eff}}$ -ով:

DEPENDENCE OF THE CURIE TEMPERATURE ON THE EFFECTIVE  
de GENNES FACTOR IN FERROMAGNETS WITH EXCHANGE FRUSTRATION

E.G. SHAROYAN

Considering the magneto-diluted gadolinium-containing Adamian alloys, it is shown that the dependence of the Curie temperature on the de Gennes factor  $\zeta = c(g-1)2J(J+1)$  can be expanded for ferromagnets with the exchange frustration. It is shown that in this case it is necessary to replace  $J$  by  $S_{\text{eff}}$  and that the linear dependence of  $T_C$  on  $\xi_{\text{eff}}$  remains up to the pure spin-glass state with  $S_{\text{eff}} = 0$ .