

О ВОЗМОЖНОСТИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ФЕРРОМАГНЕТИЗМА В ОГРАНИЧЕННОМ ТЕМПЕРАТУРНОМ ИНТЕРВАЛЕ В ПАРАМАГНЕТИКАХ С МАКСИМУМОМ $\chi(T)$

Ю. П. Ирхин

Предсказывается возможность фазового перехода в ферромагнитное состояние в парамагнетике, имеющем максимум в температурной зависимости парамагнитной восприимчивости $\chi(T)$. Ферромагнетизм возникает в интервале температур ΔT_c вблизи максимума $\chi(T)$. Конкретно рассмотрен случай промежуточной валентности.

С общей точки зрения, довольно очевидно¹⁾, что существование максимума в $\chi(T)$ при $T = 0$ создает наиболее благоприятные условия для ферромагнитного упорядочения в области наибольших значений $\chi(T)$, т.е. вблизи максимума. Так, например, для парамагнетиков с обменным усилением α

$$\chi_{\alpha}(T) = \frac{\chi(T)}{1 - \alpha \chi(T)} \quad (1)$$

критерий ферромагнетизма $\alpha \chi(T) = 1$ при данном значении α может оказаться выполненным при двух значениях $T = T_c^{\pm}$ (см. рис.1), так что ферромагнетизм возникает в интервале $\Delta T_c = T_c^+ - T_c^-$. Вне этого интервала (т.е. при $T < T_c^-$ и $T > T_c^+$) $\alpha \chi(T)$ все еще < 1 , в силу чего в отличие от обычных случаев здесь имеется область низкотемпературного парамагнетизма $0 < T < T_c^-$.

Изменяя параметр α , мы можем осуществить фазовый переход системы из чисто парамагнитной фазы ($\alpha \chi < 1$ при всех T) в ферромагнитную $\alpha \chi > 1$ при $T_c^- < T < T_c^+$). В реальных условиях при изменении α будет, вообще говоря, меняться и $\chi(T)$. Если при этом относительная величина максимума $\chi(T)$ будет убывать (кривая 3 на рис.1), то это может привести к исчезновению низкотемпературной парамагнитной фазы.

¹⁾ Но, насколько нам известно, не отмечалось ранее.

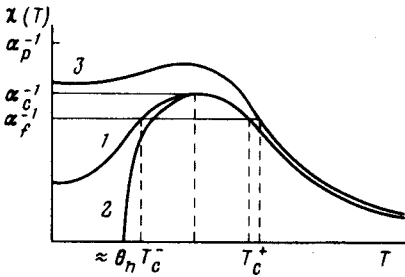


Рис.1. Графическое определение области возможного ферромагнетизма $\Delta T_c = T_c^+ - T_c^-$: кривая 1 - $\chi(T) = \chi_\alpha / (1 + \alpha \chi_\alpha)$ (χ_α - экспериментально измеряемая величина), кривая 2 - теоретическая кривая по формуле (2), кривая 3 соответствует случаю сильного уменьшения гибридизации в сплаве с исчезновением T_c^- . По оси ординат отмечены значения α_c^{-1} , соответствующие пара- и ферромагнитной фазам

Среди конкретных веществ максимум $\chi(T)$ довольно часто имеет место для случая промежуточной валентности (см., например, [1]). В работе [2] была рассмотрена гибридизация электронов проводимости с магнитными локализованными электронами и вычислена парамагнитная восприимчивость $\chi(T)$ такой системы, моделирующей кристалл с промежуточной валентностью. При этом в результате подавления парамагнетизма Кюри при $T \lesssim \Theta_h$ (Θ_h - температура гибридизации) $\chi(T)$ действительно обнаруживает максимум. Аналитическое выражение¹⁾ для случая высоких $T \gg \Theta_h$ состоит из вкладов типа Кюри, Паули и гибридизационного

$$\chi(T) = \chi_c(T) + \chi_p^s(T) + \chi_h(T), \quad (T \gg \Theta_h = \frac{aV^2}{k\epsilon_l}), \quad (2)$$

где

$$\chi_c(T) = \frac{N \mu_{\text{эфф}}^2}{kT}, \quad \chi_p^s = \frac{6 N_1 \mu_{\text{эфф}}^2}{\epsilon_l}, \quad \chi_h = -\chi_c \frac{\Theta_h}{T}. \quad (3)$$

В формулах (2) и (3) V - параметр гибридизации, $\mu_{\text{эфф}}$ - эффективный магнитный момент на атом, $N_1 = N(\epsilon_l / \Delta)^{3/2}$, ϵ_l - энергия локализованного магнитного уровня, отсчитываемая от дна полосы проводимости ширины Δ , $a \approx 1, 2N$ - полное число электронов.

Записывая в соответствии с (1) критерий ферромагнетизма $\alpha \chi(T) = 1$, получаем из (2) и (3) уравнение для критической температуры T_c

$$\alpha \chi_c(T_c) \left(1 - \frac{\Theta_h}{T_c}\right) = 1 - \alpha \chi_p^s. \quad (4)$$

Несмотря на то, что формула (2) (ей соответствует кривая 2 на рис.1) получена для $T \gg \Theta_h$, мы можем использовать ее для качественного анализа в более широком интервале температур. Хотя при этом в области $T \sim \Theta_h$ конкретный вид температурной зависимости будет иным (низкотемпературное разложение при $T - \Theta_h \ll \Theta_h$ дает согласно [2]

$$\chi(T) \sim \chi_c(T) \left(\frac{T - \Theta_h}{\Theta_h}\right)^{3/2}, \quad \text{качественный характер, } \chi(T) \quad (\text{наличие}$$

¹⁾Численные расчеты в аналогичной модели проводились также другими авторами (см., например, [3]).

максимума и обращение в нуль при $T < \Theta_h$) не изменяется.

Вводя парамагнитную температуру Кюри $\Theta_p = \frac{\alpha}{k} N \mu_{\text{эфф}}^2$, получаем из (4)

$$\frac{\Theta_p}{T_c} - \frac{\Theta_p \Theta_h}{T_c^2} = 1 - \alpha \chi_p^s \quad (5)$$

откуда

$$T_c^{\pm} = \frac{1}{2} \Theta_p' \left[1 \pm \left(1 - 4 \frac{\Theta_h}{\Theta_p'} \right)^{1/2} \right], \quad \Theta_p' = \frac{\Theta_p}{1 - \alpha \chi_p^s} \quad (6)$$

При $\Theta_h = 0$ формула (6) дает правильный предел $T_c = \Theta_p'$. При $\Theta_h > \frac{1}{4} \Theta_p' T_c$ — мнимо, что означает отсутствие ферромагнетизма. Наконец, при $\Theta_h < \frac{1}{4} \Theta_p'$ мы получаем два значения $T_c = T_c^{\pm}$, при которых выполняется критерий ферромагнетизма. Эти значения соответствуют верхней и нижней границам температурного интервала, внутри которого ферромагнетизм оказывается возможным.

Таким образом, отношение Θ_h / Θ_p' может служить параметром для классификации магнетиков: 1) $\Theta_h = 0$ — нормальные ферромагнетики, 2) $0 < \Theta_h < \frac{1}{4} \Theta_p'$ — ферромагнетизм возможен в интервале $\Delta T_c = T_c^+ - T_c^- = \Theta_p' \left(1 - 4 \frac{\Theta_h}{\Theta_p'} \right)^{1/2}$, 3) $\Theta_h > \frac{1}{4} \Theta_p'$ — парамагнетики, в которых ферромагнетизм подавлен гибридизацией во всей области температур. Очевидно, что, изменяя, каким-либо способом (давлением или добавлением примесей) величину Θ_h / Θ_p' , можно перевести кристалл из одной фазы в другую.

Пусть кристалл находится в парамагнитном состоянии с $\Theta_h > \frac{1}{4} \Theta_p'$. Добавляя подходящую "ферромагнитную" примесь замещения, мы можем увеличить Θ_p' за счет увеличения среднего молекулярного поля (т.е. за счет α). При этом будет изменяться также и Θ_h . Если уровень локализованного магнитного момента примесного электрона лежит вдали от энергии ферми, то он практически не будет участвовать в гибридизации.

В линейном приближении по концентрации примеси $x \ll 1$ можно записать

$$\Theta_p'(x) = \Theta_p' + x \Delta \Theta_p', \quad \Theta_h(x) = \Theta_h (1 - x). \quad (7)$$

Подставляя (7) в (6), получаем

$$T_c^{\pm}(x) = \frac{1}{2} \Theta_p'(x) \left\{ 1 \pm \left[1 - 4 \frac{\Theta_h}{\Theta_p'} \left(1 - x - x \frac{\Delta \Theta_p'}{\Theta_p'} \right) \right]^{1/2} \right\}, \quad (8)$$

откуда критическая концентрация перехода из пара- в ферромагнитное состояние есть

$$x_c = \frac{1 - \Theta_p' / 4 \Theta_h}{1 + \Delta \Theta_p' / \Theta_p'} \quad (9)$$

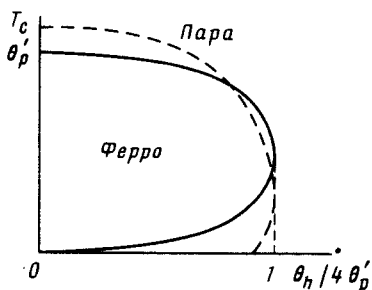


Рис.2 Фазовая диаграмма эффекта. Сплошная линия соответствует формуле (6) и кривой 2 рис.1. Пунктир — для кривых типа 1 на рис.1

Так как $\Theta_h > \frac{1}{4} \Theta_p'$, то T_c в (8) становится действительным только при $x > x_c$, когда ферромагнетизм становится возможным.

В случае реального хода $\chi(T)$ (типа кривой 1 на рис.1), нижняя граница T_c может сильно отличаться от значения (8) (см. пунктир на рис.2), однако качественные черты эффекта остаются такими же.

Среди конкретных веществ, в которых можно ожидать указанный эффект, следует назвать соединения и сплавы редких земель, содержащих элементы с промежуточной валентностью Ce, Sm, Eu, Tm, Yb (см. [1, 4]). Большинство из них, по-видимому, стремится к антиферромагнитному упорядочению. Не исключено, однако, что здесь особенно при добавлении ферромагнитных примесей) возможно и ферромагнитное состояние. Представляют интерес и так называемые почти ферромагнитные металлы. В частности, Pd обладает максимумом $\chi(T)$ при $T = 80$ К и становится ферромагнитным при добавлении всего 2,3% Ni [5]. Система Pd_{1-x}Ni_x исследована довольно много, однако однозначная картина ее магнитных свойств при малых x еще отсутствует. Ввиду небольшой величины максимума $\chi(T)$ в Pd наибольший интерес для рассматриваемого эффекта представляют детальные исследования $\chi(T)$ в области $x < 0,02$. Наконец, подходящим объектом могут оказаться и актиниды (см., например, данные для NpSb·[6]).

Институт физики металлов
Академии наук СССР
УНЦ

Поступила в редакцию
8 декабря 1980 г.

Литература

- [1] Д.И.Хомский. УФН, 129, 443, 1979.
- [2] Ю.П.Ирхин. Письма в ЖЭТФ, 32, 205, 1980.
- [3] H.J.Leder, B.Muhlschlegel. Z.Phys., 29, 341, 1978.
- [4] G.M.Varma. Rev. Mod. Phys., 48, 219, 1976.
- [5] A.P.Murani, A.Tari, B.R.Coles. J.Phys., F4, 1769, 1974.
- [6] D.J.Lam. AIP Conf. Proc., 5, 892, 1971.