

Из экспериментальных данных по дифракции нейтронов на соединении $\text{Ho}(\text{Co}_{0.9}\text{Ga}_{0.1})_2$ в интервале температур 5 - 300 К, при давлении $p = 0$ и 5 кбар, определена температурная зависимость магнитных моментов кобальта и гольмия при указанных величинах давления. Получена температурная зависимость постоянной решетки этого соединения и определена величина спонтанной объёмной магнитострикции. На основе магнитострикционной модели ферримагнетика проведен расчет указанных выше величин и получено удовлетворительное согласие с экспериментом. Оценены численные значения параметров обменного взаимодействия между парами атомов этого соединения и величина постоянной магнитоупругого взаимодействия. Дана оригинальная интерпретация причины магнитного фазового перехода первого рода в HoCo_2 .

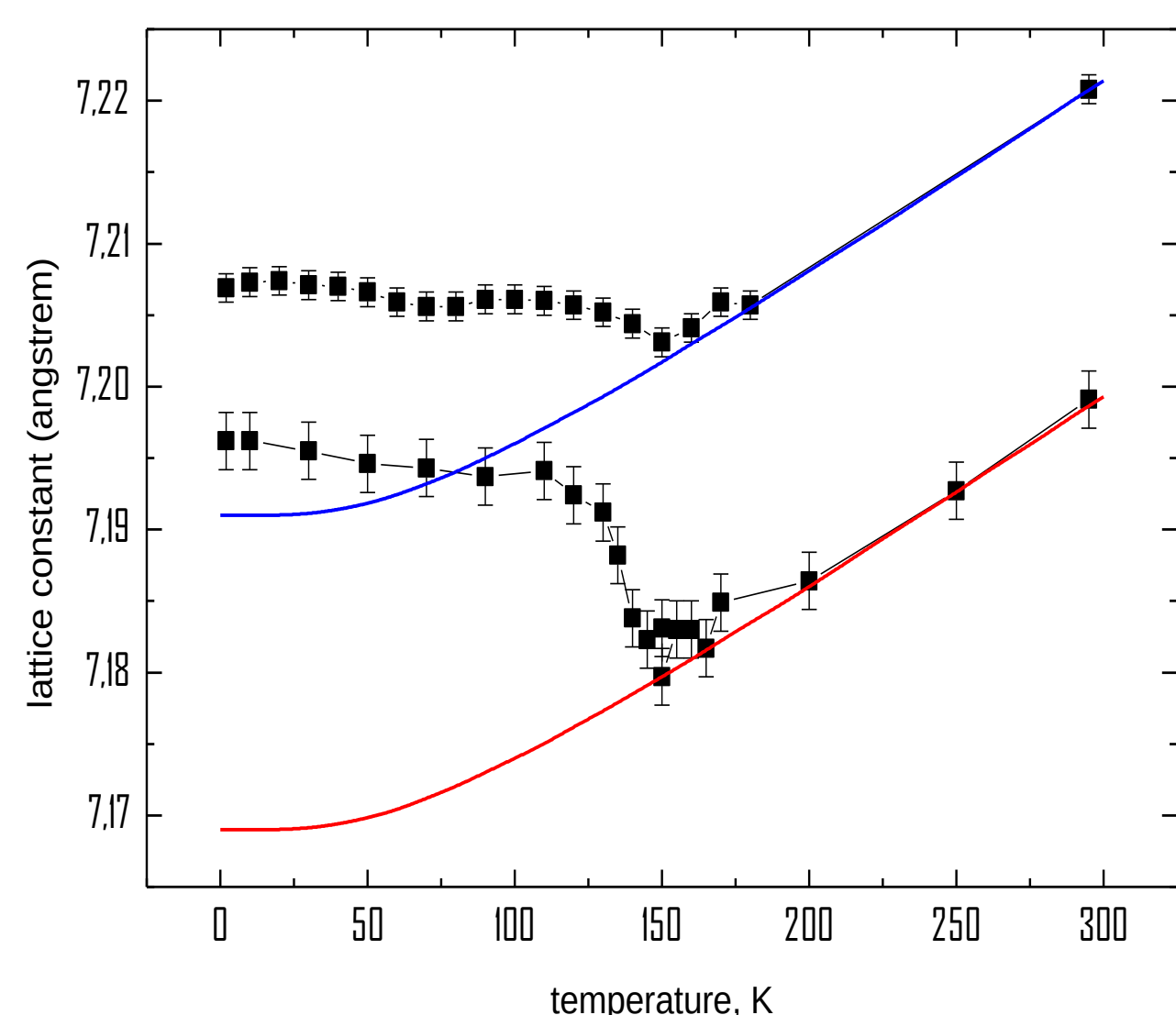


Рис. 1 Температурная зависимость постоянной решетки $\text{Ho}(\text{Co}_{0.9}\text{Ga}_{0.1})_2$. Вверху - без давления, внизу - для $P=5$ кбар. Сплошные кривые представляют расчет $a_p(T)$. Он получен экстраполяцией на 0 К, экспериментальных зависимостей для $T > T_C$, по формуле (1).

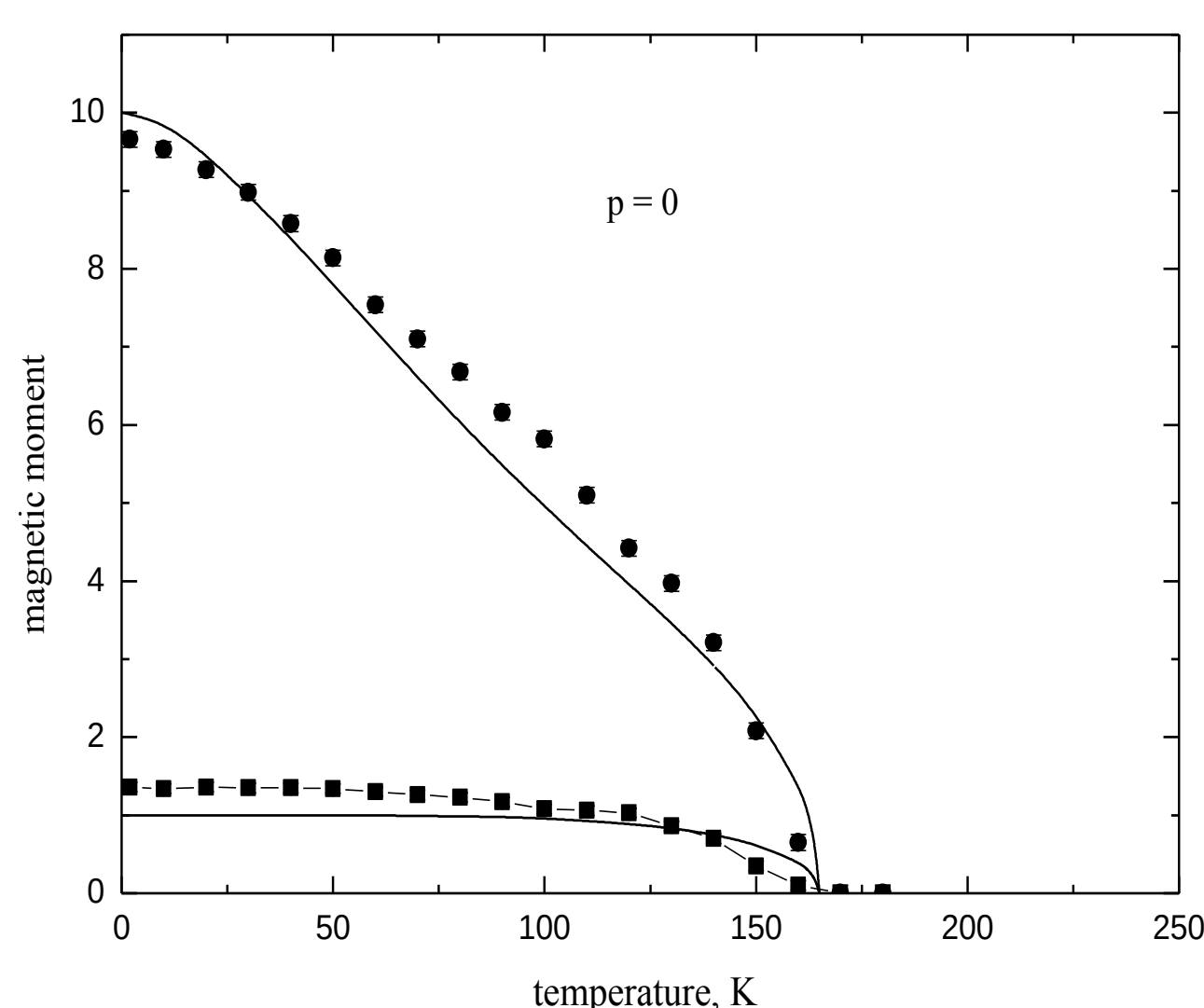


Рис. 2. Зависимость магнитного момента от температуры в отсутствие давления. Символы - эксперимент (круги для Ho, квадраты для Co) сплошные линии - расчет, с использованием формул (2).

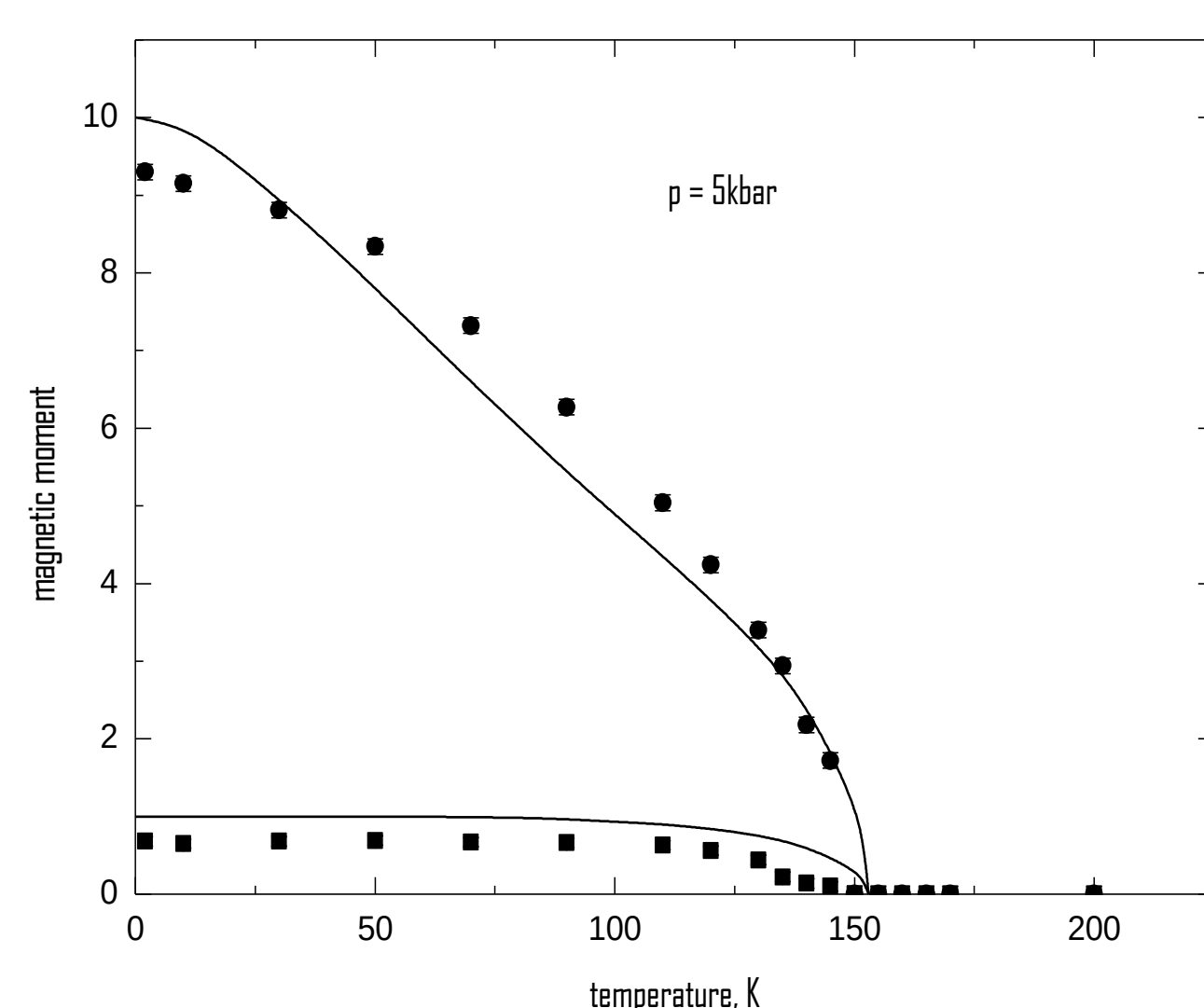


Рис. 3. Зависимость магнитного момента от температуры для давления 5 кбар. Символы - эксперимент (круги для Ho, квадраты для Co) сплошные линии - расчет, с использованием формул (2).

Расчет на Рис.1 проведен с использованием формулы для относительного теплового изменения объема решетки, полученной в работе [11]: $\omega T = 3Nk(T/\theta)\Gamma D(\theta/T)^{B-1}$. Для параметра решетки парамагнитного состояния эта формула принимает вид

$$a(T) = a_p(0) + Nk(T/\theta)\Gamma D(\theta/T)^{B-1} \quad (1)$$

Здесь: $D(\theta/T)$ - функция Дебая [12], температура Дебая θ , Γ - постоянная Грюнайзена, N - число атомов в единице объема, B - модуль объёмного сжатия, $a_p(0)$ - постоянная решетки гипотетического парамагнитного состояния при 0 К, k - постоянная Больцмана.

При расчете приняты следующие численные значения величин: $N = 6.5 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$, $\theta = 300 \text{ К}$, $\Gamma = 500 \text{ К}$, $B = 1.05 \cdot 10^{12} \text{ эрг/см}^3$.

Уравнения для расчета зависимости на рис.2 $\mu_1(T) = 2\mu_B S\sigma_1$ и $\mu_2(T) = g_J \mu_B J\sigma_2$ имеют вид [1]

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= B_s(x_1); \quad \sigma_2 = B_J(x_2) \\ x_1 &= \beta [z_{11} I_{11} s^2 \sigma_1 + N_1 s^4 B^{-1} \gamma^2 \sigma_1^{3/2} - \gamma p B^{-1} s^2 \sigma_1 + z_{12} |I_{12}| s(g_J - 1) J \sigma_2] \\ x_2 &= \beta [z_{21} |I_{12}| s(g_J - 1) J \sigma_1 + z_{22} I_{22} (g_J - 1)^2 J^2 \sigma_2] \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь: $B_s(x)$ и $B_J(x)$ функции Бриллюэна для спина s и момента J , σ_i - приведенная намагниченность атомов сорта i , z_{ij} - число ближайших соседей атомов сорта j в окружении атома i , μ_i - магнитный момент атома сорта i , I_{ij} - обменный интеграл между атомами i и j , N_1 - число атомов Co в единице объема, B - модуль объёмного сжатия, g_J - g-фактор гольмия, p - давление, γ - постоянная магнитоупругого (магнитообъёмного) взаимодействия (см. ниже), $\beta = (kT)^{-1}$.

При расчете принято: $s = 1/2$, $N_1 = 3.83 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$, $\gamma = 1.7 \cdot 10^{-12} \text{ эрг}$, $|I_{12}| = 1.75 \cdot 10^{-15} \text{ эрг}$, $I_{22} = 5 \cdot 10^{-16} \text{ эрг}$, $I_{11} = 14 \cdot 10^{-15} \text{ эрг}$, $z_{11} = 6$, $z_{12} = 6$, $z_{21} = 12$, $z_{22} = 4$. $J = 8$, $g_J = 5/4$.

С этими значениями физических величин из расчета по формулам (2) получаем $T_C = 165 \text{ К}$ ($p=0$) и $T_C = 152 \text{ К}$, в соответствие с экспериментом.

Отметим, что значения обменных интегралов, определенные из сравнения результатов расчетов по нашей модели с экспериментом, хорошо согласуются с результатами многих работ по соединениям RCO_2 для обменного интеграла $|I_{12}| \approx 1.6 \cdot 10^{-15} \text{ эрг}$ (см. например [2]).

Для интеграла обмена I_{11} наше значение $I_{11} \approx 14 \cdot 10^{-15} \text{ эрг}$ согласуется с оценкой работ [2]: $I_{11} \sim 10 \text{ mev}$. Кроме того, расчеты по формуле (1) позволяют уточнять величины интегралов I_{12} и I_{22} , так как их значения заметно влияют на скорость убывания магнитного момента редкоземельного атома с температурой. Отметим также само-согласованность численного значения постоянной γ при определении величин спонтанной объёмной магнитострикции и зависимости температуры Кюри от давления.

Результаты нашей работы и работы [1] позволяют обсудить вопрос о разном характере магнитного фазового перехода (МФП) в HoCo_2 и $\text{Ho}(\text{Co}_{0.9}\text{Ga}_{0.1})_2$. Как известно в HoCo_2 этот переход является переходом первого рода [2], а в нашем соединении он второго рода. Согласно нашей модели этот факт связан с тем, что $T_C = 80 \text{ К}$ для HoCo_2 значительно меньше чем в $\text{Ho}(\text{Co}_{0.9}\text{Ga}_{0.1})_2$.

Заключение

Показано, что модель локальных магнитных моментов для ферримагнетика с сильной зависимостью параметра обменного взаимодействия от межатомного расстояния позволяет удовлетворительно количественно объяснить величину магнитообъёмного эффекта (самопроизвольной объёмной магнитострикции), зависимость T_C от давления и температурную зависимость намагниченности подрешеток в соединении $\text{Ho}(\text{Co}_{0.9}\text{Ga}_{0.1})_2$. Подтверждена предложенная ранее иерархия величины обменных взаимодействий в соединениях RCO_2 : $I_{\text{Co-Co}} \gg |I_{\text{R-Co}}| \gg I_{\text{RR}}$ [3]. Приведено доказательство того, что наибольшее обменное взаимодействие $I_{\text{Co-Co}}$ сильно зависит от межатомного расстояния, что и определяет магнитообъёмные и магнитные свойства соединения $\text{Ho}(\text{Co}_{0.9}\text{Ga}_{0.1})_2$ и родственных соединений. Наша модель также согласуется с выводами работ [4], так как ближний ферримагнитный порядок сохраняется в некотором интервале температур выше T_C .

Авторы признательны А.А. Подлесняку за предоставленную возможность использовать данные работы [5]

- [1] Э.З. Валиев. // ФММ. 2003. Т.96. С.5.
- [2] Duc M.N., Brommer P. Handbook on Magnetic Materials. 1999. V.12, (ed. K.H.J. Bushow, Amsterdam Elsevier) ch.3.
- [3] J.J. Rhyne. // JMMM. 1987. V.70. P. 88.
- [4] C.M. Bonilla, I. Calvo, J. Herrero-Albillos et al, J. Appl. Phys. 2012.V.111, P. 07E315-1-3.
- [5] A. Podlesnyak, A. Teplykh and et al, Physica B v.350, e143 (2004).