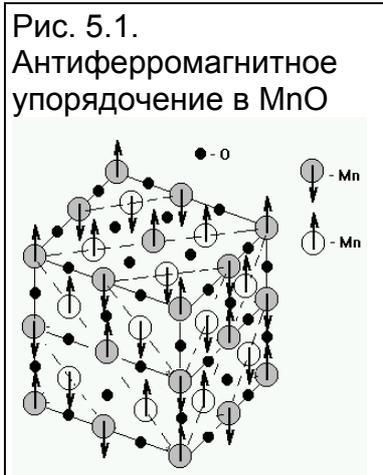
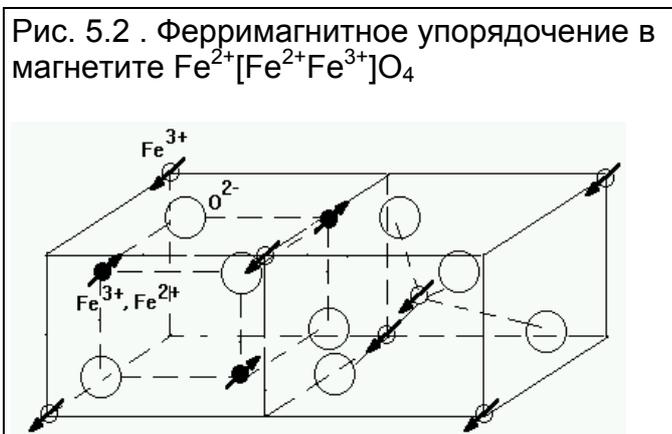


V. АНТИФЕРРО- и ФЕРРИМАГНЕТИЗМ



В антиферро- и ферримагнетиках обменный интеграл $J < 0$, реализуется антипараллельная ориентация спина. В отличие от ферро- и



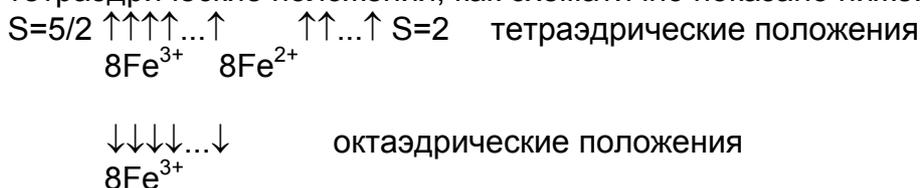
ферримагнетиков, антиферромагнетики не обладают результирующей или остаточной намагниченностью. Минимум энергии антиферромагнетика в отсутствии магнитного поля достигается тогда, когда спины полностью компенсируются, как схематично показано на рис. 5.1 для MnO. Намагниченность у них возникает при наложении внешнего поля. К антиферромагнетикам относятся элементы: Cr, Mn (в α -фазе), ряд редкоземельных металлов, а также многочисленные соединения, в состав которых, как правило, входит один или несколько химических переходных или редкоземельных элементов. Из соединений большую группу составляют оксиды, сульфиды, теллуриды, селениды, галогениды и др. Свойства некоторых из них приведены в Таблице 5.1.

Таблица 5.1. Антиферромагнетики.

Вещество	Решетка	Температура Нееля, T_N (К)	Температура Кюри-Вейса, T_C (К)	T_C/T_N	$\chi(0)/\chi(T_N)$
MnO	гцк	116	610	5.3	2/3
MnS	гцк	160	528	3.3	0.82
MnTe	гекс. слоевая	307	690	2.25	
FeF ₂	оц тетр.	67	82	1.24	0.76
FeF ₂	оц тетр	79	117	1.48	0.72
FeCl ₂	гекс. слоевая	24	48	2.0	<0.2
FeO	гцк	198	570	2.9	0.8
CoCl ₂	гекс. слоевая	25	38.1	153	
CoO	гцк	291	330	1.14	
NiCl ₂	гекс. слоевая	50	68.2	1.37	
NiO	гцк	525	~2000	~4	
Cr	оцк	308			

Из дальнейшего рассмотрения будет видно, что, аналогично ферромагнетикам, антиферромагнетики подчиняются закону Кюри-Вейса (4.4), с критической температурой, T_N , называемой температурой Нееля, перехода из антиферромагнитного состояния в парамагнитное.

Ферримагнетики (оксидные ферримагнетики называют ферритами) также имеют две магнитных подрешетки с противоположно направленными спинами, которые, однако, в отличие от антиферромагнетиков, скомпенсированы не полностью. Наиболее исследованы и нашли широкое применение ферриты, например, $MeO \cdot Fe_2O_3$ $Me=(Mg^{2+}, Zn^{2+}, Cu^{2+}, Ni^{2+}, Fe^{2+}, Mn^{2+})$ или $Me^{2+}[Fe^{2+}Fe^{3+}]O_4$, имеющие кубическую структуру типа шпинель или гранат. В элементарной ячейке магнетита, $Fe^{2+}[Fe^{2+}Fe^{3+}]O_4$, (рис.5.2), 8 ионов Fe^{3+} , занимающие тетраэдрические положения, и 8 ионов Fe^{3+} , занимающие октаэдрические положения имеют противоположную ориентацию спинов и поэтому их моменты компенсируются. Магнетизм обусловлен 8-ью электронами Fe^{2+} , занимающими тетраэдрические положения, как схематично показано ниже:



Магнитные свойства некоторых ферримагнетиков приведены в Таблице 4.2.

Таблица 5.2. Ферримагнетики.

Вещество	Намагниченность M_s (Гс)		$n(0K)=\mu/\mu_B$	T_c , К
	$T = 300$ К	$T = 0$ К		
MnAs	670	870	3.4	318
MnBi	620	680	3.52	630
MnSb	710	-	3.5	587
CrO ₂	515	-	2.03	386
MnOFe ₂ O ₃	410	-	5.0	573
FeOFe ₂ O ₃	480	-	4.1	585
NiOFe ₂ O ₃	270	-	2.4	858
CuOFe ₂ O ₃	135	-	1.3	728
MgOFe ₂ O ₃	110	-	1.1	713
EuO	-	1920	6.8	69
Y ₃ Fe ₅ O ₁₂	130	200	5.0	560

Значительную часть ферримагнетиков составляют диэлектрические и полупроводниковые ионные кристаллы, содержащие магнитные ионы различных элементов и одного элемента, но находящихся в разных кристаллографических позициях (в неэквивалентных узлах кристаллографической решетки).

Условие ферримагнетизма. Представим себе кристалл, имеющий две магнитных подрешетки А и В с антипараллельными ($\uparrow\downarrow$). В этом случае:

$$\mathbf{B}_A = -\lambda \mathbf{M}_A - \mu \mathbf{M}_B; \quad \mathbf{B}_B = -\mu \mathbf{M}_A - \nu \mathbf{M}_B, \quad \lambda, \mu, \nu > 0. \quad (5.1)$$

$$U = -1/2(\mathbf{B}_A \mathbf{M}_A + \mathbf{B}_B \mathbf{M}_B) = 1/2\lambda M_A^2 + \mu \mathbf{M}_A \mathbf{M}_B + 1/2\nu M_B^2. \quad (5.2)$$

Энергия ниже, когда $\mathbf{M}_A \uparrow \downarrow \mathbf{M}_B$. Энергия ≈ 0 , когда $M_A = M_B = 0$. $\uparrow \downarrow$ -ное состояние устойчиво, когда

$$\mu M_A M_B > 1/2(\lambda M_A^2 + \nu M_B^2). \quad (5.3)$$

Температура Кюри и восприимчивость ферримангнетиков. Определим константы Кюри C_A и C_B для подрешеток А и В. Для простоты пренебрежем всеми взаимодействиями, кроме $\uparrow \downarrow$ -ного между А- и В- подрешетками: $\mathbf{V}_A = -\mu \mathbf{M}_B$; $\mathbf{V}_B = -\mu \mathbf{M}_A$;

В приближении среднего поля:

$$M_A T = C_A (V_a - \mu M_B); \quad M_B T = C_B (V_a - \mu M_A); \quad (5.4)$$

При $V_a = 0$ эта система уравнений становится однородной относительно M_A и M_B и имеет решение, если

$$\begin{vmatrix} T & \mu C_A \\ \mu C_B & T \end{vmatrix} = 0. \quad (5.5)$$

Отсюда ферромагнитная температура Кюри дается выражением

$$T_c = \mu (C_A C_B)^{1/2}. \quad (5.6)$$

Решая (5.4), мы получим восприимчивость при $T > T_c$

$$\chi = (M_A + M_B) / V_a = ((C_A + C_B)T - 2\mu C_A C_B) / (T^2 - T_c^2). \quad (5.7)$$

При $C_A = C_B = C$ - антиферромагнетизм

Антиферромагнетик – это скомпенсированный ферримангнетик. Пример: MnO (рис.5.1), где спины Mn^{2+} скомпенсированы. Переход из антиферромагнитной фазы в парамагнитную происходит при температуре Нееля T_N :

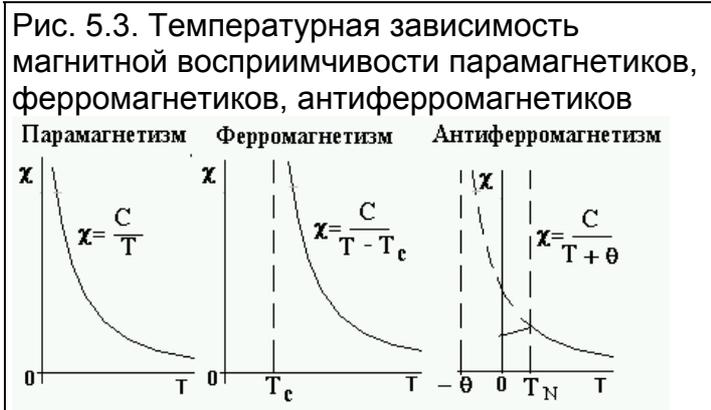
$T_N = \mu C$, $\chi = (2CT - 2\mu C^2) / (T^2 - (\mu C)^2)$, т.е.

$$\chi = 2C / (T + T_N) \quad \text{при } T > T_N. \quad (5.8a)$$

В действительности экспериментальные значения укладываются в зависимость

$$\chi = C / (T + \theta) \quad \text{при } T > T_N. \quad (5.8b)$$

Отношение $\theta/T \sim 1 \div 5$ и часто



отличается от 1 (см. также Табл.5.2).

Восприимчивость антиферромагнетиков ниже т-ры Нееля.

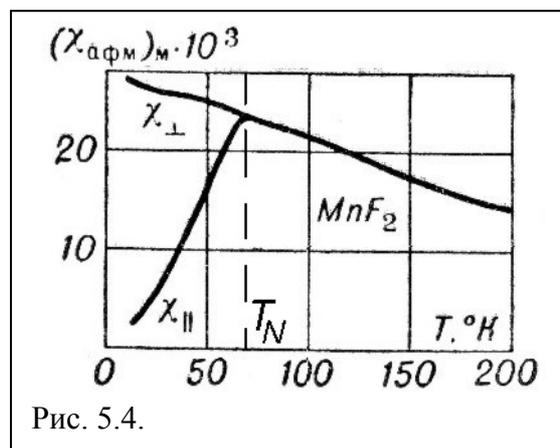


Рис. 5.4.

Рассмотрим два случая, когда внешнее поле перпендикулярно и параллельно полному спину: 1) $\mathbf{B}_a \perp \mathbf{S}$ и 2) $\mathbf{B}_a \parallel \mathbf{S}$.

При $T > T_N$ $\chi \approx \text{const}$ (т.е. практически не зависит от взаимной ориентации поля и спинов - парамагнитное поведение).

При $T < T_N$, если $\mathbf{B}_a \perp \mathbf{S}$, то можно считать, что в этом случае плотность энергии при $|M_A| = |M_B| = M$, то $-2U = \mathbf{M}_A \mathbf{B}_A + \mathbf{M}_B \mathbf{B}_B$,

$\mathbf{B}_A = \mathbf{B}_a - \mu \mathbf{M}_B$ $\mathbf{B}_B = \mathbf{B}_a - \mu \mathbf{M}_A$. Тогда $-2U = \mathbf{M}_A \mathbf{B}_a - \mathbf{M}_A \mu \mathbf{M}_B + \mathbf{M}_B \mathbf{B}_a - \mathbf{M}_B \mu \mathbf{M}_A$. Т.е. $-2U = \mathbf{B}_a (\mathbf{M}_A + \mathbf{M}_B) - 2\mu \mathbf{M}_A \mathbf{M}_B$, или

$$U = \mu \mathbf{M}_A \mathbf{M}_B - 1/2 \mathbf{B}_a (\mathbf{M}_A + \mathbf{M}_B) \cong \mu M^2 [1 - 1/2 (2\varphi)^2] - 2B_a M \varphi / 2, \quad (5.9)$$

где 2φ - угол между \mathbf{S}_A и \mathbf{S}_B . Минимум энергии будет при $dU/d\varphi = 0 = 4\mu M^2 \varphi - B_a M$;

или $\varphi = B_a / 4\mu M. \quad (5.10)$

Т.о.

$$\chi_{\perp} = 2M\varphi / B_a = 1/2\mu. \quad (5.11)$$

В ||-ной ориентации $M_{\Sigma} = M_A + M_B = 0$ при $T = 0$, поэтому восприимчивость при $T=0K$ равна нулю $\chi_{||}(0) = 0$.