

Ferromagnetismo

Modello piu' semplice del ferromagnetismo:

Ipotesi del 'campo molecolare'

Campo efficace di Weiss:

$$H_{eff} = H + \lambda M$$

Campo che agisce sul singolo dipolo

Contributi a H_{eff} :

M magnetizzazione esistente:

H c. esterno

Magnetizzazione: come in un paramagnete

$$\rightarrow M = n\mu L\left(\frac{\mu_0\mu H_{eff}}{kT}\right) = n\mu L\left(\frac{\mu_0\mu(H + \lambda M)}{kT}\right)$$

Eq. implicita, non lineare per M

Osservazione importante:

L'interazione responsabile dell'allineamento dei dipoli *non* e' magnetica

Interazione di scambio (origine quantistica)

Previsioni

$$\text{a) } H = 0 \rightarrow M = n\mu L\left(\frac{\mu\mu_0\lambda M}{kT}\right)$$

$$y = \mu_0 \frac{\mu\lambda M}{kT} \rightarrow \frac{kT}{\mu_0\mu\lambda} y = n\mu L(y)$$

$$\rightarrow \frac{kT}{n\mu_0\mu^2\lambda} y = L(y)$$

$$T_c = \frac{n\mu_0\mu^2\lambda}{3k} \rightarrow \frac{T}{3T_c} y = L(y)$$

$$y \rightarrow 0 \Rightarrow L(y) \sim \frac{y}{3}$$

$$\text{i) } T > T_c$$

Pendenza retta $> 1/3 \rightarrow$ Retta non intercetta $L(y)$

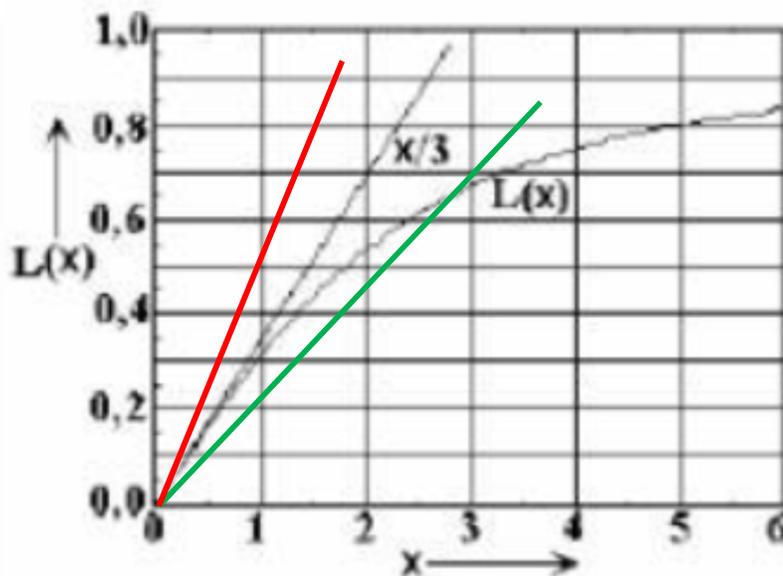
\rightarrow Sol. banale $y = 0$

$$\text{ii) } T < T_c$$

Pendenza retta $< 1/3 \rightarrow$ Retta intercetta $L(y)$

\rightarrow Sol. $y \neq 0 \rightarrow$ Magnetizzazione spontanea

NB: $y \rightarrow x$ nel grafico

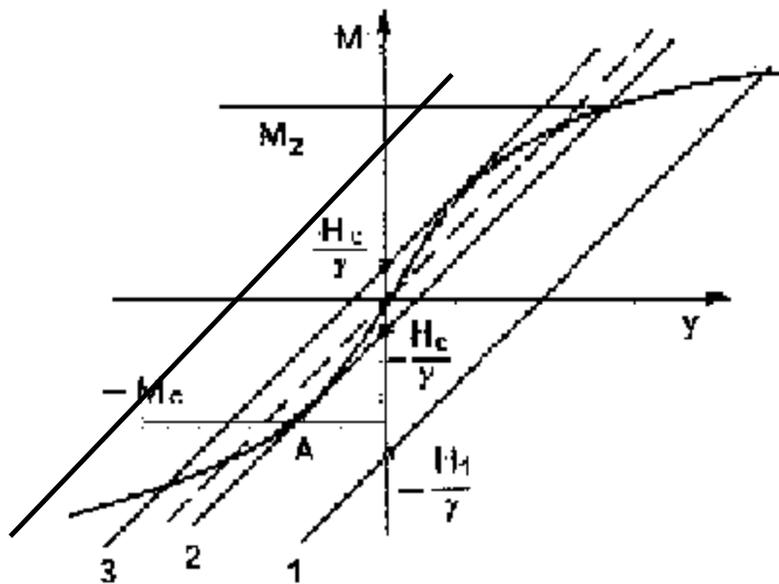


$$b) H \neq 0 \rightarrow M = n\mu L \left(\frac{\mu_0 \mu (H + \gamma M)}{kT} \right)$$

$$y = \frac{\mu_0 \mu (H + \gamma M)}{kT} \rightarrow M = \frac{kT}{\mu_0 \mu \gamma} y - \frac{H}{\gamma}$$

$$\rightarrow \begin{cases} M = n\mu L(y) \\ M = \frac{kT}{\mu_0 \mu \gamma} y - \frac{H}{\gamma} \end{cases}$$

T fissa,



(1) H grande, $+vo$: 1 soluz. $\sim M$ saturazione

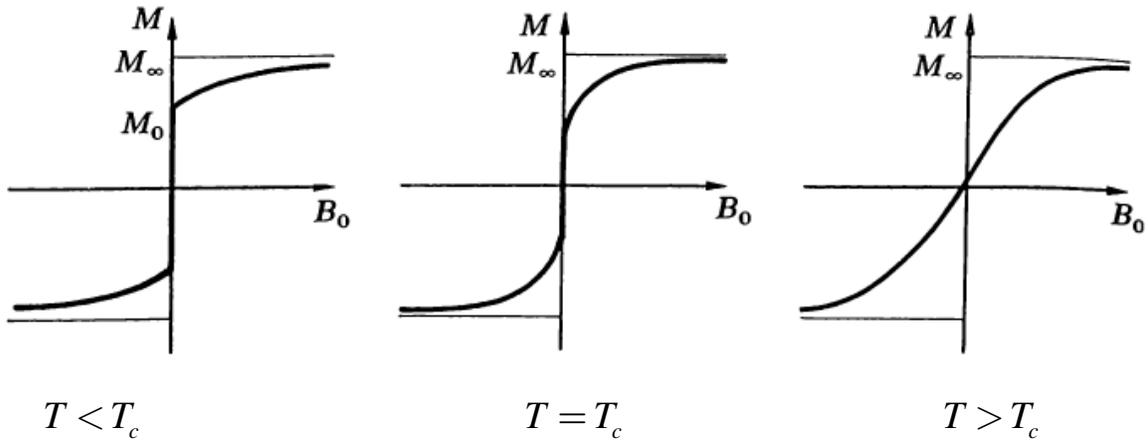
(2) 2 soluz. $\sim M_2, -M_c$

(3) 2 soluz. $\sim M_c, -M_2$

(4) H grande, $-vo$: 1 soluz. $\sim -M$ saturazione

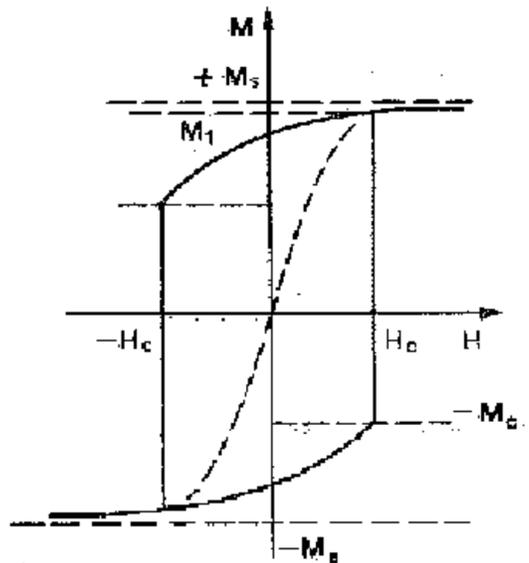
Fra 2 e 3: 3 soluz, 1 instabile

Possibile ricostruire andamento di M vs H :



Nella zona 2–3 il minimo assoluto dell'energia corrisponde a M concorde con H

Tuttavia, tenendo conto dell'esistenza di un secondo minimo locale, andamento piu' generale:



Poco rilevante per isteresi: Origine del ciclo di isteresi nella struttura a domini

Andamento di M per $T \rightarrow T_c$:

$$\frac{T}{3T_c} x \approx \frac{x}{3} - \frac{x^3}{45} \rightarrow \frac{T}{T_c} x \approx x - \frac{x^3}{15} \rightarrow \frac{T}{T_c} \approx 1 - \frac{x^2}{15}$$

$$\rightarrow x \approx \sqrt{15} \left(1 - \frac{T}{T_c} \right)^{1/2}$$

$$\rightarrow M \approx \frac{kT}{\mu\lambda} \sqrt{15} \left(1 - \frac{T}{T_c} \right)^{1/2} = \sqrt{15} n\mu \frac{T}{T_c} \left(1 - \frac{T}{T_c} \right)^{1/2}$$

Transizione paramagnetica

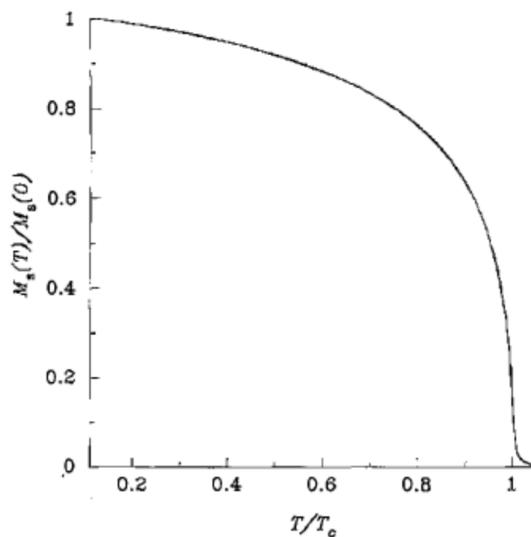
$T > T_c$, H piccolo:

$$L(x) \sim \frac{x}{3}$$

$$\rightarrow M = n\mu^2 \frac{H + \lambda M}{3kT}$$

$$\rightarrow M = \frac{n\mu^2}{3k} \frac{1}{T - T_c} H$$

$$\rightarrow \chi_m = \frac{n\mu^2}{3k} \frac{1}{T - T_c}, \text{ legge di Curie-Weiss}$$



T_c = temperatura critica

Transizione di fase:

Ferromagnetico \leftrightarrow Paramagnetico

~~Forza magnetica fra i dipoli ?~~

→ Proprietà della funzione d'onda di coppie di elettroni,

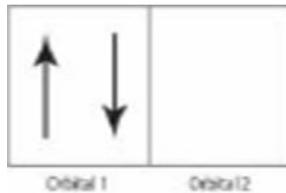
Solido ferromagnetico: energia minima per coppia di elettroni se spin allineati, anche in assenza di campo esterno

→ mom. magnetici allineati → magnetizzazione

Interazione fra i dipoli:

importanza fondamentale dell'interazione di scambio, conseguenza del Principio di Esclusione.

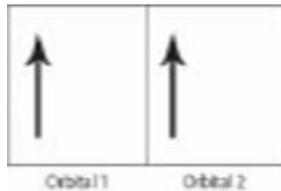
Due elettroni con spin opposto: possono occupare lo stesso orbitale
Piu' vicini → maggiore repulsione Coulombiana



Due elettroni con spin uguale: devono occupare orbitali diversi

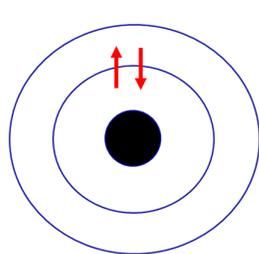
Piu' lontani → repulsione coulombiana inferiore

→ Energia minima

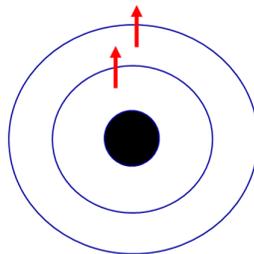


→ Tendenza ad allineare gli spin per minimizzare l'energia totale

→ Magnetizzazione spontanea

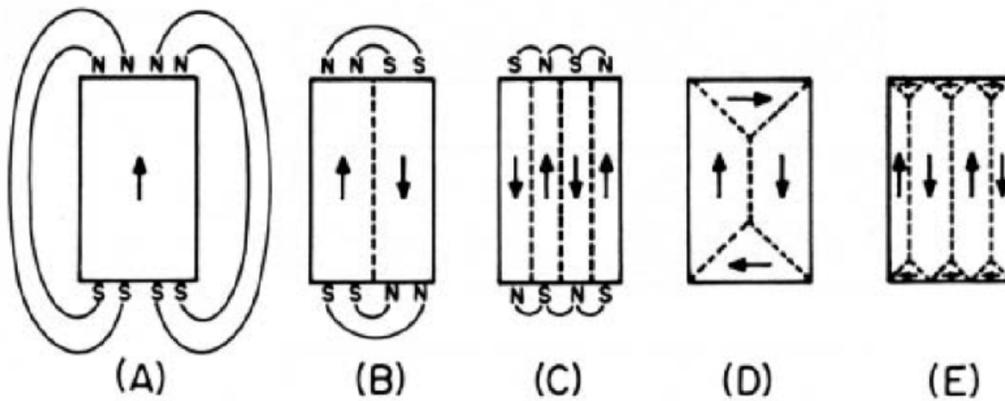


Energia coulombiana (repulsiva) elevata



Energia coulombiana (repulsiva) ridotta

Struttura a domini: Minimizza energia totale (v. ferroelettrici)



Interpretazione del ciclo di isteresi in termini di domini:

