

## TEMA 1: ORIGEN Y TIPOS DE MAGNETISMO

Tema 1a: Aspectos previos

Tema 1b : Origen del Momento Magnético

Tema 1c: Magnetismo de electrones localizados: Diamagnetismo orbital y  
Paramagnetismo de Curie

Tema 1d: Magnetismo Intenso: Canje y orden magnético

Tema 1e: Magnetismo de electrones deslocalizados

### Tema 1d:

- Introducción: Ferromagnetismo y Ferrimagnetismo
- Campo molecular y orden magnético
- Interacciones: Interacción dipolar magnética e interacción de canje

The logo for Cartagena99 features the text 'Cartagena99' in a stylized, green, serif font. The '99' is significantly larger and more prominent than the 'Cartagena' part. The text is set against a light blue and white background with a subtle wave-like pattern.

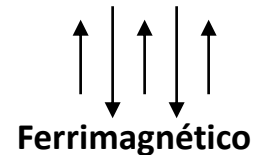
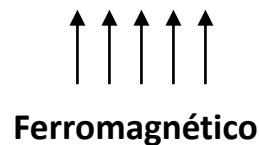
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

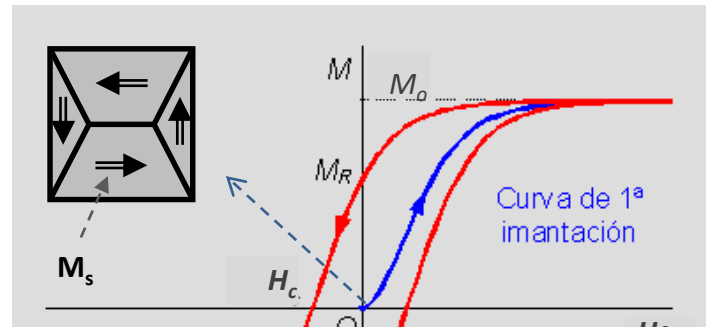
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

# INTRODUCCIÓN: FERROMAGNETISMO Y FERRIMAGNETISMO

## Magnetismo intenso



- ✓ Imanación espontánea,  $M_s$ , a  $H=0$  (prop. intrínseca).
- ✓ Se pueden imanar a saturación con bajos  $H_{apl}$ .
- ✓  $M_s \sim M_o$  (imanación de saturación).
- ✓ Temperatura de orden magnético (de Curie):  $T_C$ .
- ✓ Histéresis magnética (desaparece  $T > T_C$ ).
- ✓ Presencia de dominios magnéticos.
- ✓ Fuertes interacciones de canje entre los  $\mu_{atm}$ .
- ✓  $\exists$  direcciones de fácil imanación “Ejes Fáciles”.



CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

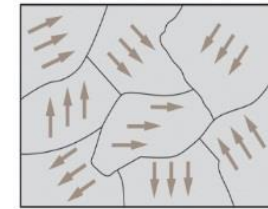
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Cartagena99

# INTRODUCCIÓN: FERROMAGNETISMO Y FERRIMAGNETISMO

- Dominios magnéticos**

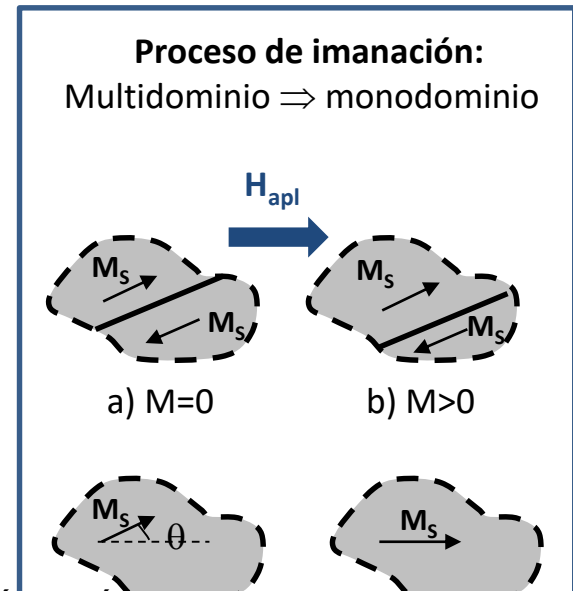
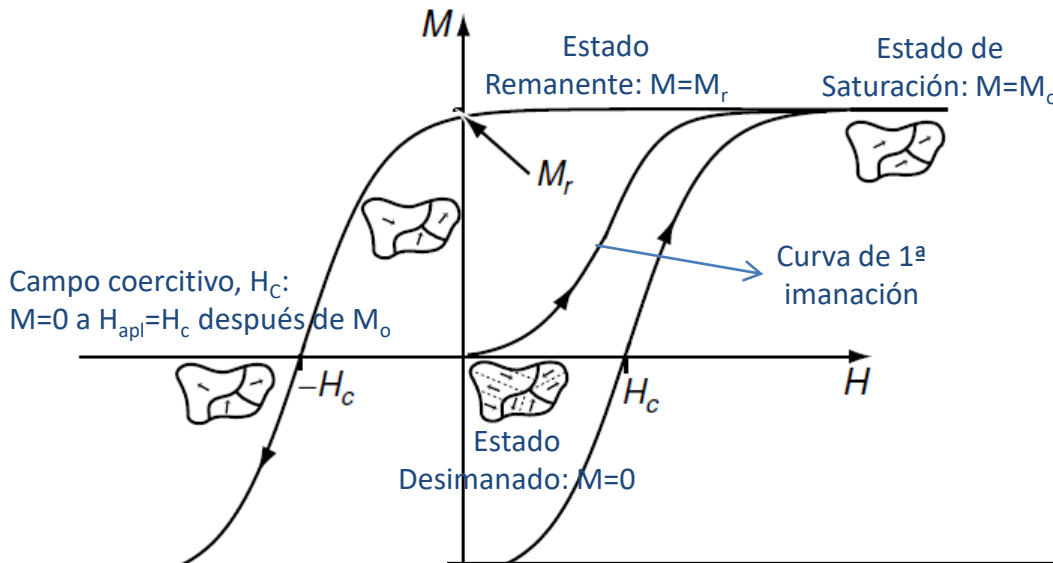
Regiones  $\sim \mu\text{m}$  donde los momentos magnéticos están ordenados separadas por la "pared de dominio".



Dominios magnéticos

- Histéresis magnética (James Ewing en 1981)**

Respuesta irreversible y no lineal de la imanación de un FM a un  $H_{\text{apl}}$ .



Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

## INTRODUCCIÓN: FERROMAGNETISMO Y FERRIMAGNETISMO

### • Imanación de saturación, $M_o$

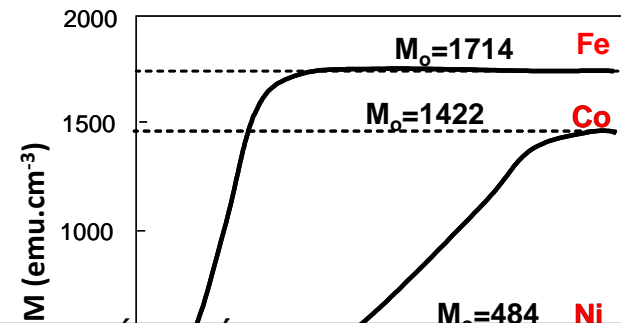
- ✓ A medida que aumenta  $H_{apl} \Rightarrow$  aumenta la imanación hasta llegar al valor de saturación,  $M_o$ .
- ✓ En saturación todos los momentos magnéticos están alineados con el campo.
- ✓  $M_o$  depende solo de la magnitud de los momentos magnéticos (propiedad intrínseca).
- ✓ El valor de campo para el cual se alcanza la saturación,  $H_{sat}$ , depende de la estructura.
- ✓  $M_o$  no depende de la microestructura, sólo de los materiales y las fases presentes.

$$M_o \sim n \mu_{at} \quad \mu_{at} \sim \mu_B \sim 10^{-23} J \cdot T^{-1} \quad n \approx 10^{29} \text{ átomos m}^{-3}$$

$$\Downarrow$$

$$M_o = n \mu_B \approx 1 T$$

Material	$M_o$ ( $10^6 \text{ A}\cdot\text{m}^{-1}$ )	$M_s$ (T)
Iron	1.71	2.1
Cobalt	1.42	1.78
Nickel	0.48	0.60
78 Permalloy (78% Ni, 22% Fe)	0.86	1.08
Supermalloy (80% Ni, 15% Fe, 5% Mo)	0.63	0.79



# Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

*Las posibilidades de variar la imanación de saturación son bastante limitadas.*

# INTRODUCCIÓN: FERROMAGNETISMO Y FERRIMAGNETISMO

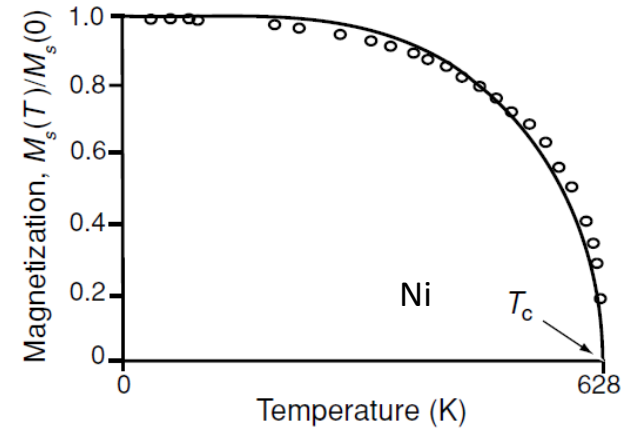
## • Temperatura de Curie

Def  $\Rightarrow$  Temperatura a la cual la  $M_s$  debida al alineamiento de los  $\mu_{atm}$  en los dominios cae precipitadamente a cero.

- $\triangleright T > T_C \Rightarrow M_s(T) = 0$ .
- $\triangleright T < T_C \Rightarrow M_s(T)$  es reversible.

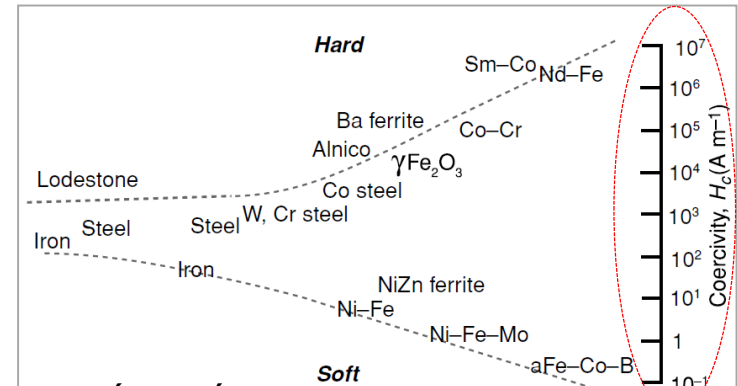
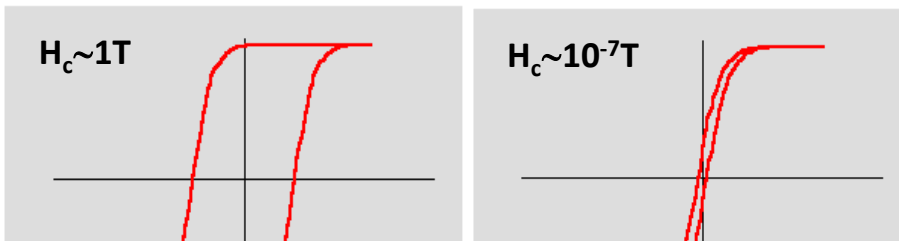
$T_{C,Ni} = 628 \text{ K}$  ;  $T_{C,Fe} = 1044 \text{ K}$  ;  $T_{C,Co} = 1388 \text{ K}$   
 (elemento con mayor  $T_C$ )

$M_s(T)/M_s(0)$  vs  $T/T_C$  es una curva universal  $\forall$  FM.



## • Campo coercitivo, $H_c$

Def  $\Rightarrow$  Campo inverso que hay que aplicar para que  $M$  vuelva a ser nula después de la saturación. Prop. extrínseca.



Cartagena99

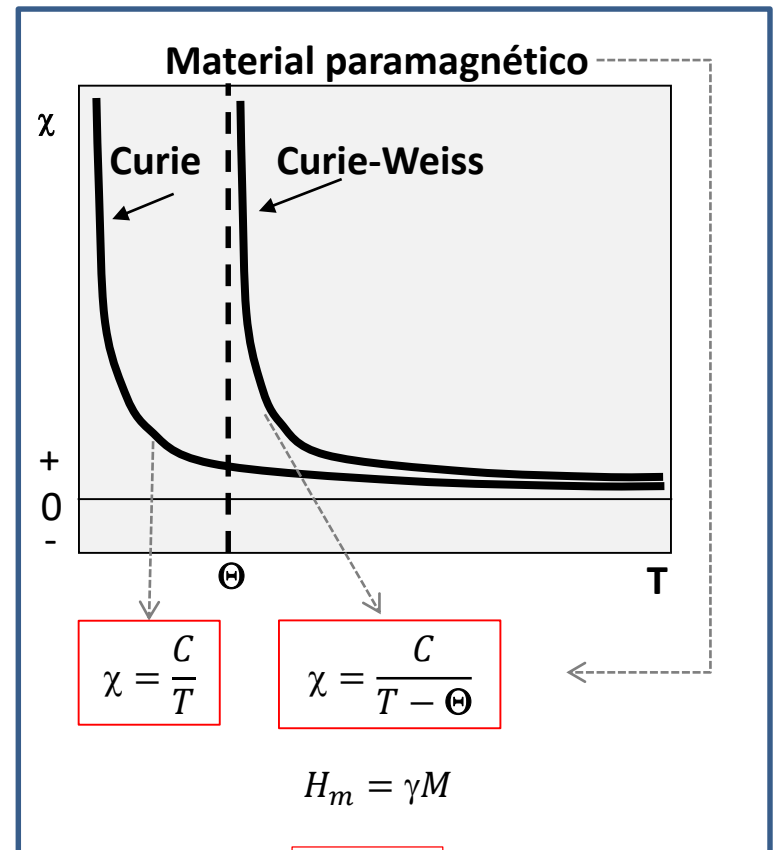
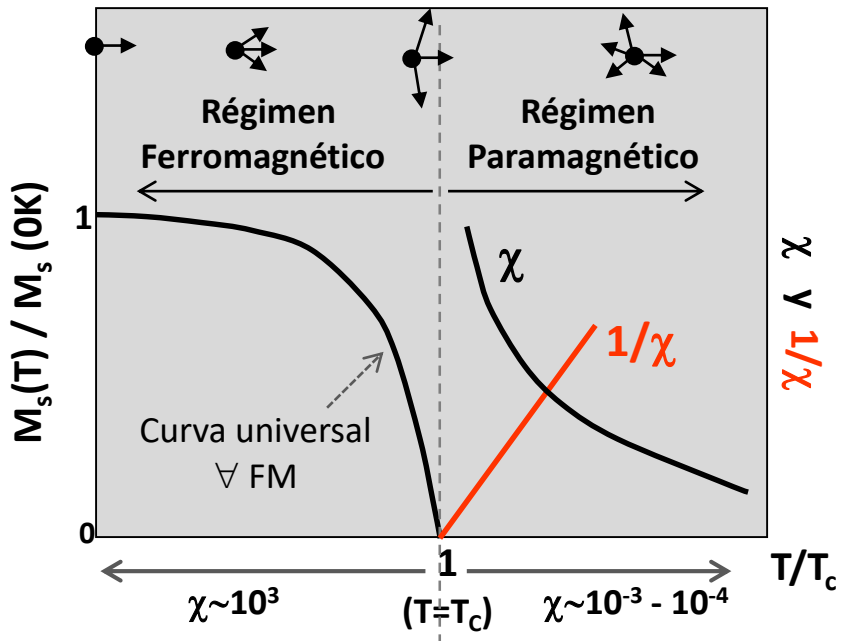
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

ciclo (pequeña para materiales blandos).

# INTRODUCCIÓN: FERROMAGNETISMO Y FERRIMAGNETISMO

## Ferromagnético vs Paramagnético



# Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

temperatura de Curie paramagnética

## CAMPO MOLECULAR Y ODEEN MAGNÉTICO

- **Pierre Weiss (1907)** → explica el comportamiento de los materiales FM en términos de un enorme “**Campo Molecular**” interno, proporcional a la imanación:

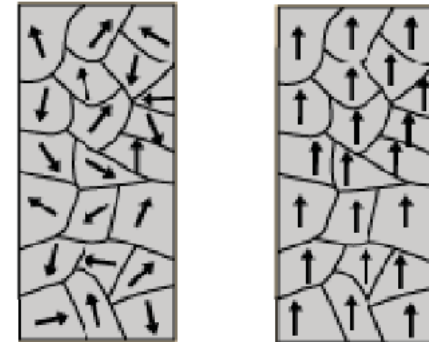
$$H_m = \gamma M \quad \gamma \gg 1: \text{Coeficiente del campo molecular } (\gamma \sim 10^3).$$

$$H_m \sim 10^9 \text{ Am}^{-1} \quad (B_m \sim 10^3 \text{ T})$$

- Este campo **también actúa a  $T < T_c$**  ⇒ los FM se “auto-imanan” espontáneamente por la acción de  $H_m$ .
- Un FM sería como un paramagnético con un  $H_m$  interno muy grande ( $\Theta \sim 1000 \text{ K} \Rightarrow \gamma \gg 1$ ).
- Extiende la teoría del paramagnetismo de Langevin suponiendo que el campo aplicado se reemplaza por la suma del campo aplicado más el campo molecular:  $H_{apl} + H_m$

- El  $H_m$  no existe realmente pero es una ayuda para describir el efecto de la interacción de Coulomb en el marco mecánico-cuántico:

$$H_{ex} = -2 \sum_{i < j} J_{ij} \vec{S}_i \vec{S}_j \quad J_{ij} > 0 \Rightarrow \text{Orden FM en 3D}$$



- Weiss también sugirió la  $\exists$  de **dominios magnéticos** en los cuales

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

# CAMPO MOLECULAR

Aplicamos las ideas de Weiss al modelo cuántico del paramagnetismo: **Teoría de Brillouin**

$$H_{Tot} = H + H_m = H + \gamma M$$

**1- Caso en que  $H=0 \Rightarrow M = M_s \Rightarrow H_{Tot} = H_m = \gamma M_s$**

$$\frac{M_s}{M_o} = B(J, a') = \frac{2J+1}{2J} \coth \frac{2J+1}{2J} a' - \frac{1}{2J} \coth \frac{a'}{2J}$$

$$a' = \frac{\mu_{z,max} B}{k_B T} = \frac{g_J \mu_B J B}{k_B T}$$

$$M_o = n \mu_{z,max} = n g_J J \mu_B$$

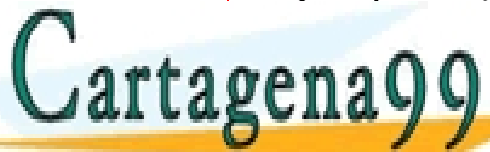
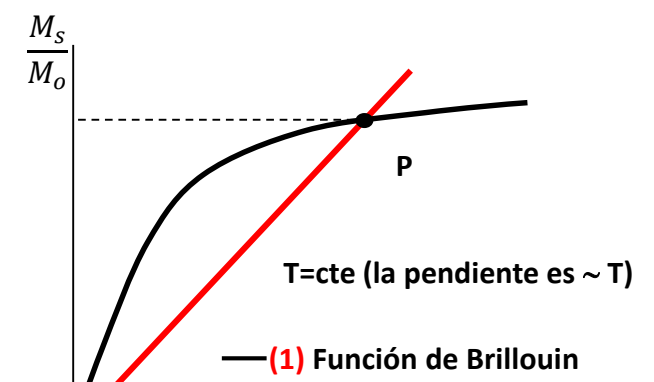
Imanación de saturación

$M_s$  (imanación espontánea a  $H=0$ )      (1)

$$a' = \frac{\mu_{z,max} \mu_o H_m}{k_B T} = \frac{g_J J \mu_B \mu_o \gamma M_s}{k_B T}$$

Despejando  $M_s$  y dividiendo entre  $M_o$ :

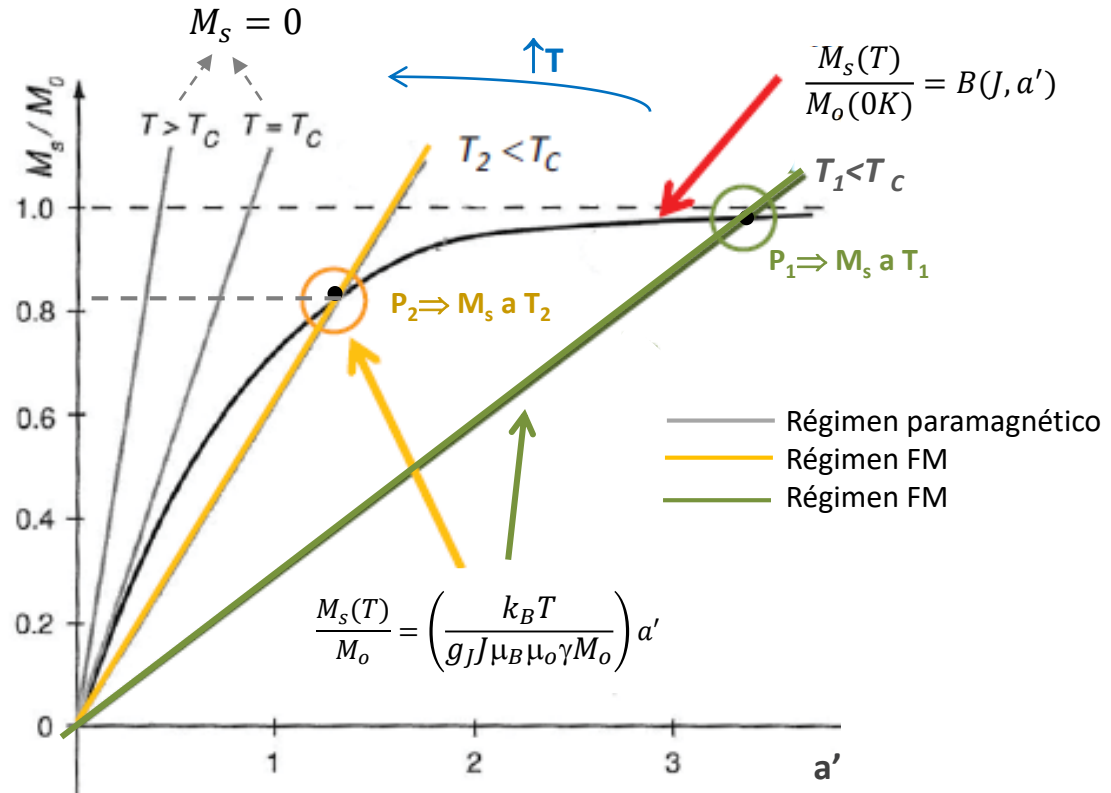
$$M_s \left( \frac{\mu_o \gamma}{k_B T} \right)$$



CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70  
 ---  
 ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70



# CAMPO MOLECULAR



• A  $T=T_c$  las pendientes de la curva de Brillouin y de la recta que representa a  $H_m$  coinciden.

• A bajos campos  $\Rightarrow \frac{M_s}{M_0} = B(J, a') \sim \left( \frac{J+1}{3J} \right) a'$

$$\frac{K_B T_c}{g J \mu_B \mu_o \gamma M_0} = \left( \frac{J+1}{3J} \right)$$

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

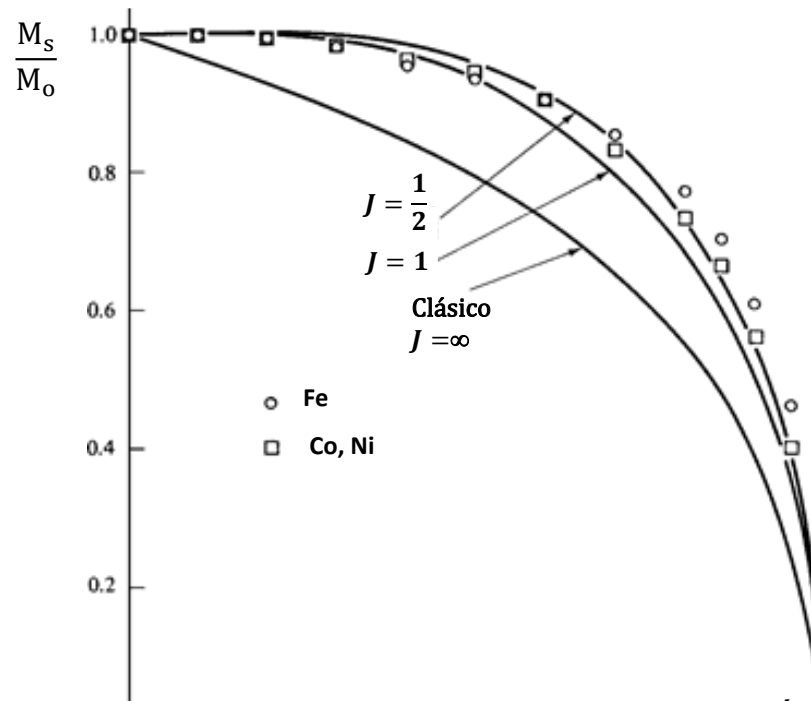
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Relación lineal que representa

a  $H_m$  en función de  $P$

## CAMPO MOLECULAR

La combinación de la ecuación de Brillouin y la relación lineal  $\frac{M_S}{M_0} = \left(\frac{J+1}{3J}\right) \left(\frac{T}{T_C}\right) \alpha'$  permite obtener  $\frac{M_S}{M_0}$  como función de  $\frac{T}{T_C} \rightarrow$  Es una curva universal para todos los FM.



Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

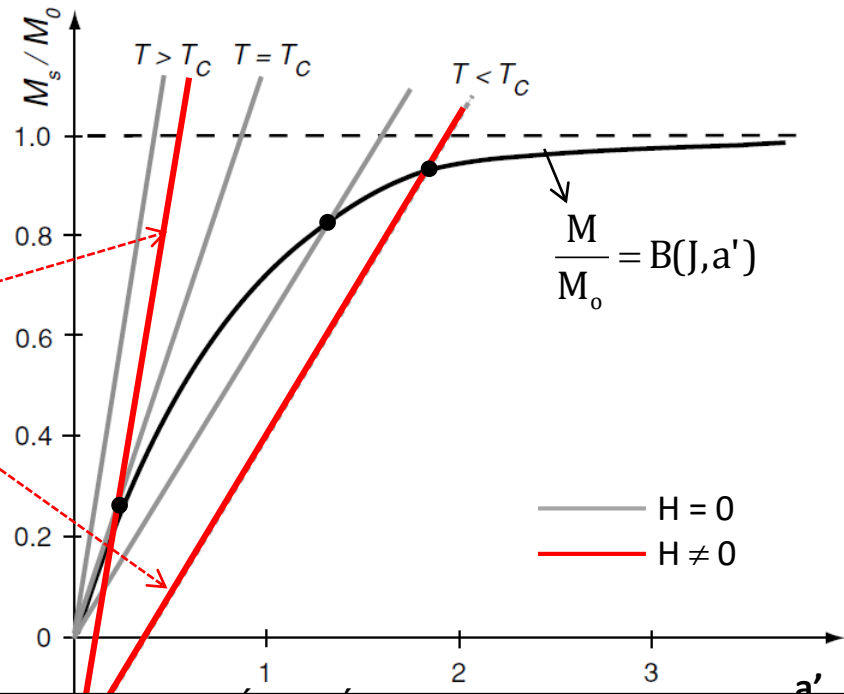
# CAMPO MOLECULAR

2- Caso en que  $H \neq 0 \Rightarrow H_{Tot} = H + H_m = H + \gamma M$

$$a' = \frac{\mu_{z,max} \mu_o (H + H_m)}{k_B T} = \frac{g_J \mu_B \mu_o (H + \gamma M)}{k_B T}$$

Despejando M y dividiendo entre  $M_o$ :

$$\frac{M}{M_o} = \left( \frac{K_B T}{g_J \mu_B \mu_o \gamma M_o} \right) a' - \frac{H}{\gamma M_o}$$



CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

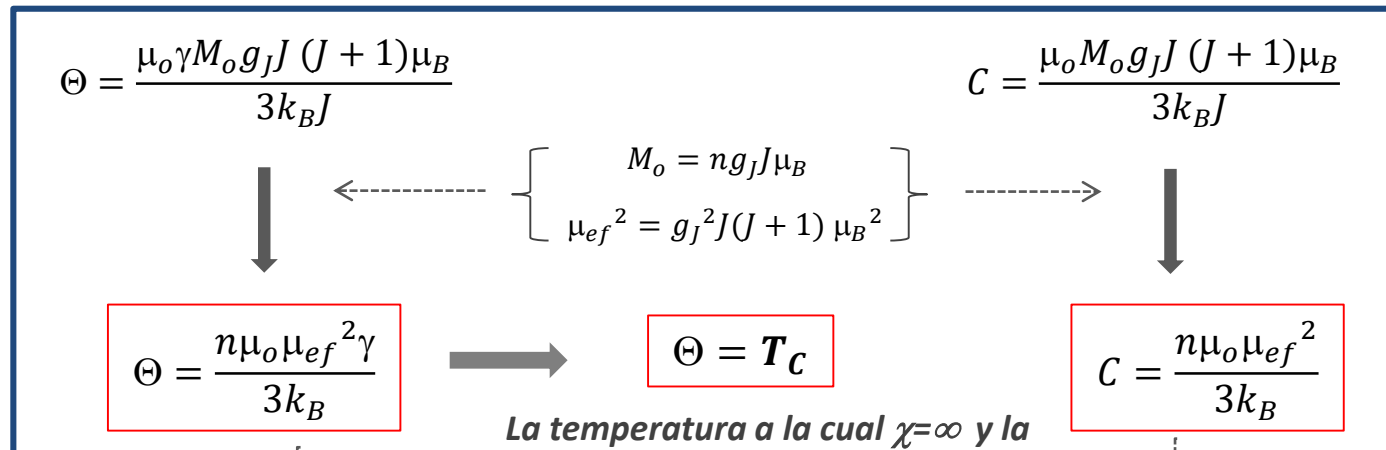
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

# CAMPO MOLECULAR

- En el límite  $a' \ll \ll$  (campos bajos y/o temperaturas altas) se puede calcular la susceptibilidad:

Eliminando  $a'$ :

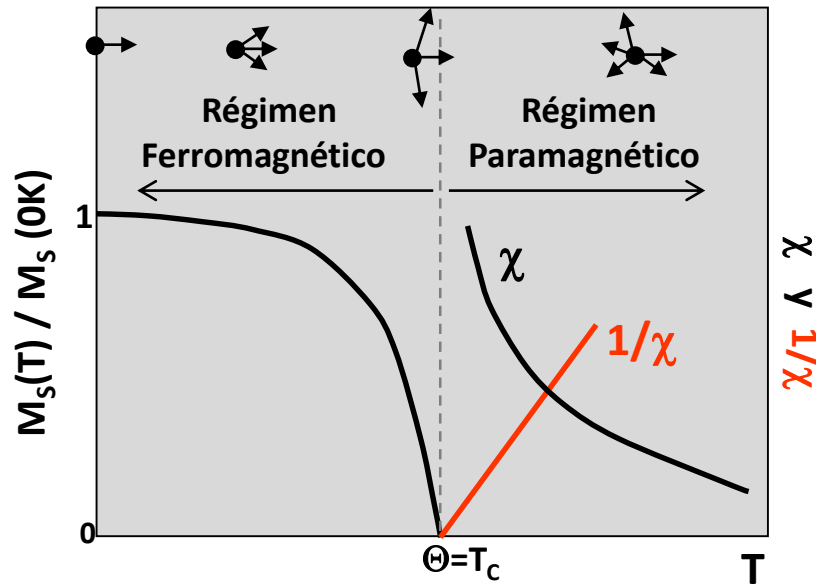
$$\left. \begin{aligned} \frac{M}{M_o} &= B(J, a') \sim \left( \frac{J+1}{3J} \right) a' \\ \frac{M}{M_o} &= \left( \frac{k_B T}{g_J \mu_B \mu_o \gamma M_o} \right) a' - \frac{H}{\gamma M_o} \end{aligned} \right\} \begin{aligned} \chi &= \frac{M}{H} = \frac{\mu_o M_o g_J J (J+1) \mu_B / 3k_B J}{T - [\mu_o \gamma M_o g_J J (J+1) \mu_B / 3k_B J]} \\ \chi &= \frac{C}{T - \Theta} \end{aligned} \left. \right\} \text{Comparando las dos expresiones:}$$



CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70  
 ---  
 ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70



# CAMPO MOLECULAR



	REGIMEN FERROMAGNETICO	REGIMEN PARAMAGNETICO	
	$\mu_{z,max}$ medido en régimen FM (1)	$\mu_{ef}$ calculado en régimen PARA (2)	$\mu_{z,max}$ calculado en régimen PARA (3)
		J=1/2	J=1
Fe	2,22 $\mu_B$	3,15 $\mu_B$	1,82 $\mu_B$ 2,23 $\mu_B$
Co	1,72 $\mu_B$	3,13 $\mu_B$	1,81 $\mu_B$ 2,21 $\mu_B$

(1) De la medida de  $M_o \rightarrow \mu_{z,max} = M_o / n$

(2) De la medida de  $T_C \rightarrow \mu_{ef}$

$$(T_C = \frac{n\mu_o\mu_{ef}^2\gamma}{3k_B} \quad T^a \text{ del } H_m)$$

(3) A partir de  $\mu_{ef} \rightarrow \mu$

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORIAS TECNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVIA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

**TABLE 3.2 Fundamental Magnetic Data for Various Crystalline Ferromagnets**

Substance	Structure	$M_s$ (290 K) (emu/cm <sup>3</sup> )	$M_s$ (0 K) (emu/cm <sup>3</sup> )	$n_B^a = M_s/\mu_B N_v$ ( $\mu_B$ )	$T_C(T_N)$ (K)
Fe	BCC	1707	1740	2.22	1043
Co	HCP, FCC	1440	1446	1.72	1388
Ni	FCC	485	510	0.606	627
Ni <sub>80</sub> Fe <sub>20</sub>	FCC	800	930	1.0	—
Gd	HCP	—	2060	7.63	292
Dy	HCP	—	2920	10.2	88
MnBi	NiAs(hex)	620	680	3.52	630
Ni <sub>2</sub> MnGa	Heusler	480	—	—	373
CrO <sub>2</sub>	—	515	—	2.03	386
MnOFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Spinel	410	—	5.0	573
FeOFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Spinel	480	—	4.1	858
CoOFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Spinel	—	—	3.2	—
NiOFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Spinel	270	—	2.4	858
CuOFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Spinel	135	—	1.3	728

<sup>a</sup>The Quantity  $n_B$  is called the magneton number, the number of bohr magnetons per atom or per formula unit in a material



CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

## INTERACCIONES

- ¿Qué hace que los momentos magnéticos atómicos se comuniquen en un sólido?
- ¿Qué interacciones pueden producir orden de largo alcance?
  - **Interacción Dipolar Magnética**
  - **Interacción de Canje**

The logo for Cartagena99 features the text 'Cartagena99' in a stylized, dark green font. The '99' is significantly larger and more prominent than the rest of the text. The logo is set against a light blue and orange background that resembles a stylized map or a banner.

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

- - -

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

## INTERACCIÓN DIPOLAR MAGNÉTICA

Dos dipolos magnéticos  $\mu_1$  y  $\mu_2$  separados una distancia  $r$  tienen una energía:

$$E = \frac{\mu_0}{4\pi r^3} \left[ \mu_1 \cdot \mu_2 - \frac{3}{r^2} (\mu_1 \cdot \vec{r})(\mu_2 \cdot \vec{r}) \right]$$

✓  $E = f(r, \text{orientación relativa de } \mu_1 \text{ y } \mu_2)$ .

✓ Estimación:  $\mu_{1,2} \sim \mu_B$ ,  $r \sim 1 \text{ \AA} \Rightarrow E \sim \frac{\mu_0 \mu_B^2}{4r^3} \sim 10^{-23} \text{ J}$

(Equivalente a  $T = \frac{E}{K_B} \sim 1 \text{ K}$  en temperatura)



✓ Muchos materiales se ordenan a  $T_c \sim 1000 \text{ K} \Rightarrow$  la interacción dipolar es muy débil como para considerarla como causa del orden de los  $\mu_{atm}$  de la mayoría de los materiales magnéticos.

✓ El campo magnético generado por un momento magnético en la posición de otro vecino a una distancia  $r \sim 3 \text{ \AA}$ :

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

- - -

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Cartagena99

$\mu_B$



## INTERACCIONES DE INTERCAMBIO O CANJE

- El origen del orden magnético (del  $H_M$  de Weiss) son las **interacciones de Canje o de Intercambio**  $\leftrightarrow$  Fuertes interacciones  $e^-$  con  $e^-$  que tienden a acoplar sus espines.
  - ✓ Si hay acoplo entre espines  $\Rightarrow$  FM, AF y FERRI. Si no lo hay  $\Rightarrow$  PARA.
  - ✓ Son de **naturaleza electrostática**  $\rightarrow$  las interacciones de coulomb se modifican con las orientaciones de los espines de los  $e^-$  cercanos.
  - ✓ El acoplo de canje es debido al **solapamiento de los orbitales electrónicos** de los diferentes átomos y al **Principio de Exclusión de Pauli** [2  $e^-$  con espines paralelos (y resto de n<sup>os</sup> cuánticos idénticos) tienden a mantenerse alejados  $\Rightarrow$  Cambia la interacción culombiana entre ellos].
- El canje intra-atómico entre  $e^-$  del mismo átomo conduce a la 1ª regla de Hund.
- En el canje inter-atómico existe una diferencia de energía entre las configuraciones paralela ( $\uparrow_i \uparrow_j$ ) y antiparalela ( $\downarrow_i \uparrow_j$ ) de los espines de átomos vecinos  $i$  y  $j$ .



**La energía de canje depende de la orientación de los espines:**

$$\epsilon_{ex} = -2J_{ex} \vec{S}_1 \cdot \vec{S}_2 = -2J_{ex} S_1 \cdot S_2 \cos \phi$$

▷ Si  $J > 0 \rightarrow$   $\epsilon_{ex}$  es mínima ( $\phi = 0$ ) cuando los espines están  $\uparrow \uparrow$  ( $\cos \phi = 1$ )  $\Rightarrow$  orden FM

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Cartagena99

# ORIGEN DEL ORDEN DEL FERROMAGNETISMO: INTERACCIONES DE CANJE

## Sistema de 2 electrones (ej. molécula de H<sub>2</sub>)

- La función de ondas total es el producto de una parte espacial y de una parte de espín y ha de ser antisimétrica con respecto al intercambio de los e<sup>-</sup>:

$$\Psi(1,2) = \phi(\vec{r}_1, \vec{r}_2) \cdot \chi(s_1, s_2) \text{ tal que } \Psi(1,2) = -\Psi(2,1)$$

$$\Psi_{\text{singlete}}(1,2) = \phi_{\text{sim}}(\vec{r}_1, \vec{r}_2) \cdot \chi_{\text{ant}}(1,2)$$

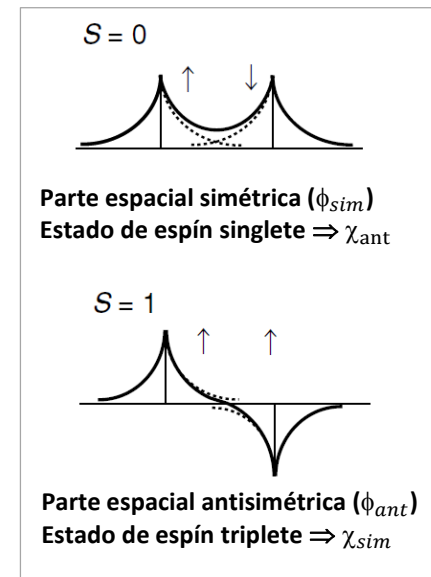
$$\Psi_{\text{triplete}}(1,2) = \phi_{\text{ant}}(\vec{r}_1, \vec{r}_2) \cdot \chi_{\text{sim}}(1,2)$$

- Las energías de estos dos estados posibles se evalúa con el hamiltoniano y resulta ser distinta en los materiales con orden magnético espontáneo:

$$\epsilon_{\text{singlete}} = \int \Psi_{\text{singlete}}^* H \Psi_{\text{singlete}} d\vec{r}_1 d\vec{r}_2$$

$$\epsilon_{\text{triplete}} = \int \Psi_{\text{triplete}}^* H \Psi_{\text{triplete}} d\vec{r}_1 d\vec{r}_2$$

Parte espacial	Parte de espín
$\phi_{SIM}(\vec{r}_1, \vec{r}_2)$	$\times \chi_{ANT}(s_1, s_2)$
$\phi_{ANT}(\vec{r}_1, \vec{r}_2)$	$\times \chi_{SIM}(s_1, s_2)$



Funciones de onda espaciales,  $\phi$ :

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

punto del espacio (nodo en  $\phi_{an}$ ).

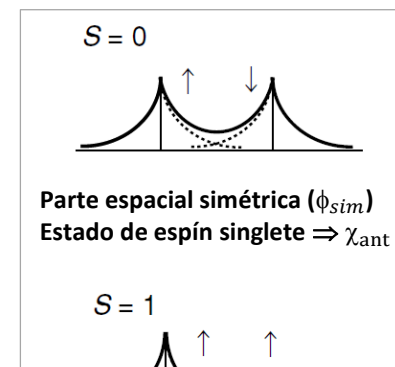
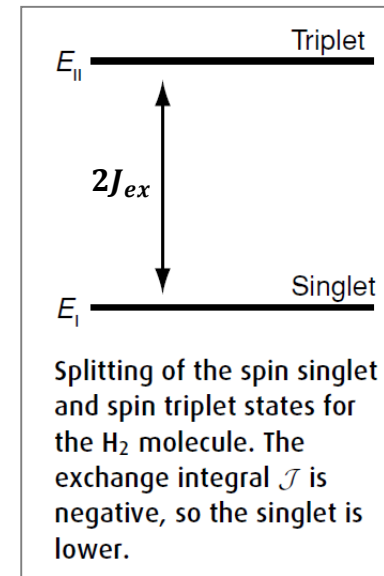
## INTERACCIONES DE INTERCAMBIO O CANJE

- Def  $\Rightarrow$  **La constante de Canje o Integral de Canje** se define a partir de la diferencia de energía entre el estado singlete y el triplete:

$$J_{ex} = \frac{\varepsilon_{\text{singlete}} - \varepsilon_{\text{triplete}}}{2}$$

$J_{ex}$  tiene unidades de energía

- Si  $J_{ex} > 0 \Rightarrow \varepsilon_{\text{singlete}} > \varepsilon_{\text{triplete}}$  y entonces el estado triplete está favorecido. Sucede una **interacción ferromagnética** que tiende a ordenar los espines paralelos.
- Si  $J_{ex} < 0 \Rightarrow \varepsilon_{\text{singlete}} < \varepsilon_{\text{triplete}}$  y entonces el estado singlete está favorecido. Sucede una **interacción antiferromagnética** que tiende a ordenar los espines antiparalelos.
- Se puede escribir la energía de canje como:



CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Cartagena99

## INTERACCIONES DE INTERCAMBIO O CANJE

### Hamiltoniano de Heisenberg para una red de átomos con sitios i y j

$$H_{ex} = -2 \sum_{\text{pares } ij} J_{ij} \hat{S}_i \cdot \hat{S}_j \sim -J_{ex} \sum_{\text{pares } ij} \hat{S}_i \cdot \hat{S}_j$$

$\hat{S}_i$  y  $\hat{S}_j$  son operadores de espín adimensionales.

- La suma se extiende sobre todas las parejas de átomos pero como la interacción de canje es muy intensa pero de corto alcance  $\Rightarrow$  la suma se restringe solo a los primeros vecinos ( $J_{ij} \leftrightarrow J_{ex}$ )
- Conclusión  $\Rightarrow$  **El hamiltoniano deducido muestra que las interacciones de canje acoplan los espines atómicos.**
- La constante de canje se puede relacionar con la constante de Weiss del campo molecular,  $\gamma$  :

$$J_{ex} = \frac{\mu_0 g_s^2 \mu_B^2 \gamma}{2Z}$$

con Z el nº de primeros vecinos

$$T_C = \frac{2ZJ_{ex}S(S+1)}{3k_B}$$

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

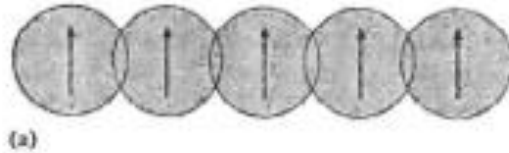
---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

$$\text{Ej. Para el Cu, } T_C = 292 \text{ K, } S = 1/2, Z = 12 \Rightarrow J_{ex}/K_B = 2,5 \text{ K}$$

## INTERACCIONES DE INTERCAMBIO O CANJE. TIPOS.

### Tipos de interacciones de canje



- **CANJE DIRECTO**



- **SÚPERCANJE**



- **CANJE INDIRECTO (en Metales)**

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

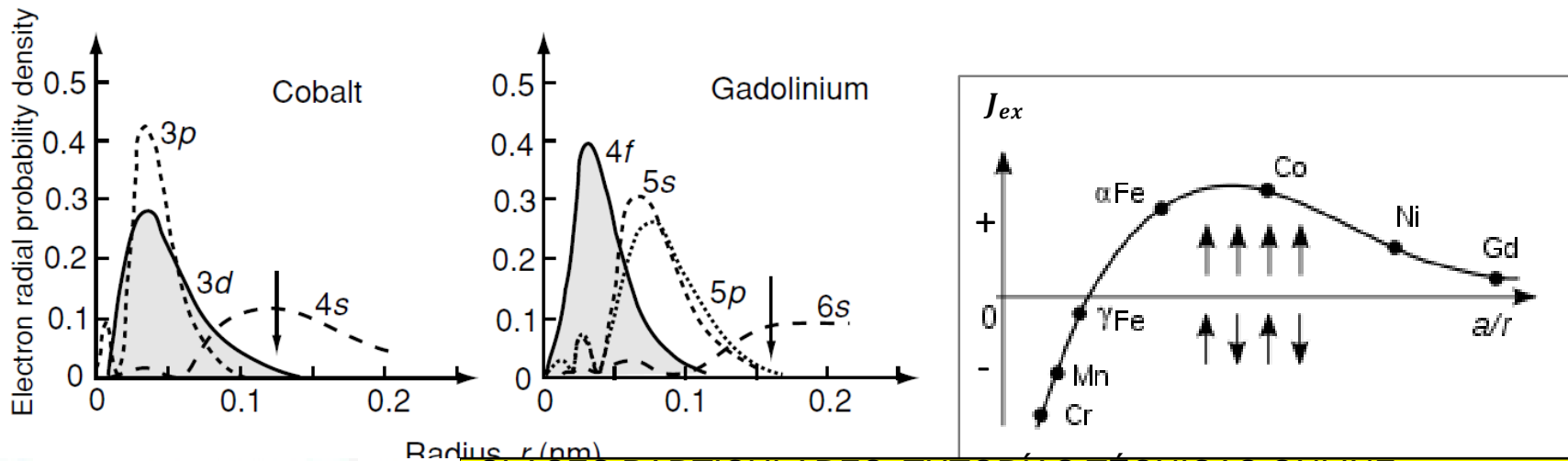
---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

## INTERACCIONES DE INTERCAMBIO O CANJE. TIPOS.

### Canje directo

- Interacción de canje entre  $e^-$  de átomos vecinos vía una interacción directa, sin necesidad de intermediarios.
- Sucede cuando hay un solapamiento directo suficiente (aunque sea parcial) entre los orbitales electrónicos localizados de átomos vecinos.
- El signo del canje directo depende principalmente de la ocupación de la banda y del espaciado interatómico. Un largo espaciado favorece un acoplo FM y uno corto acoplo AF.



Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

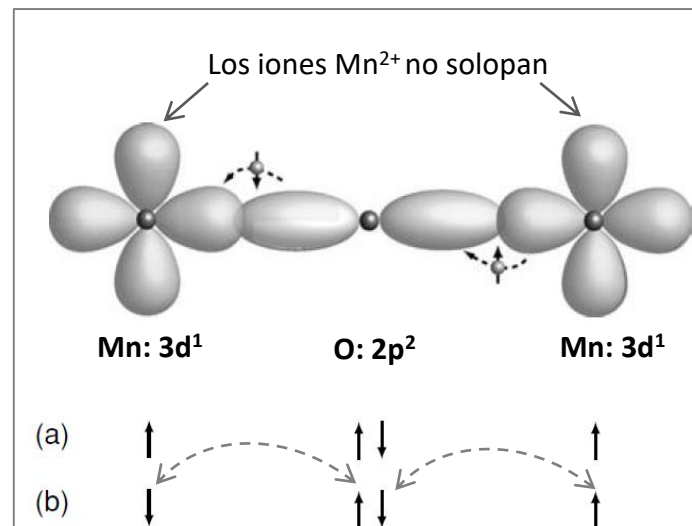
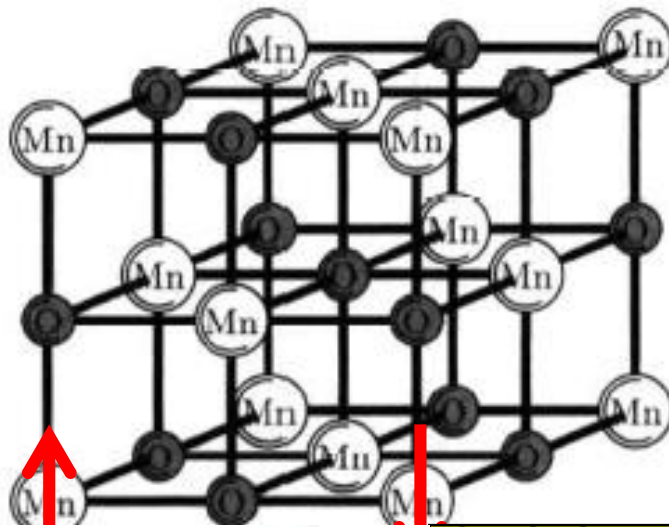
---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

## INTERACCIONES DE INTERCAMBIO O CANJE. TIPOS.

### Supercanje

- **Interacción de canje indirecto** entre 2 momentos magnéticos localizados de dos átomos no vecinos (sus orbitales no están hibridizados) que está mediada por un ion no magnético situado entre ellos.
- Se las denomina “súper” canje porque las interacciones de canje son normalmente de muy corto alcance.
- El supercanje suele producir orden AF aunque también puede dar orden FM.



CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Los puentes de oxígeno transmiten la interacción de canje.

## INTERACCIONES DE INTERCAMBIO O CANJE: TIPOS

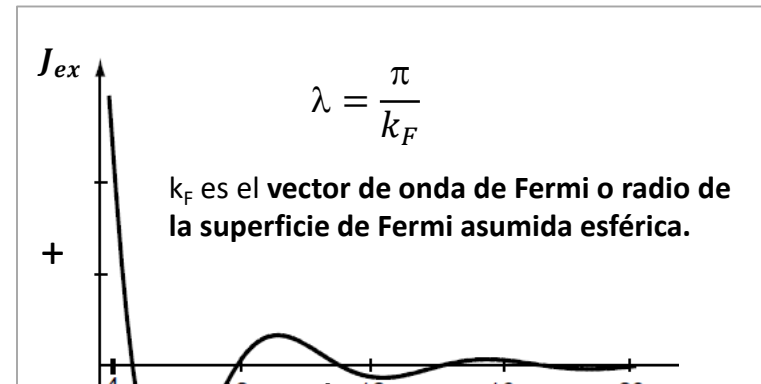
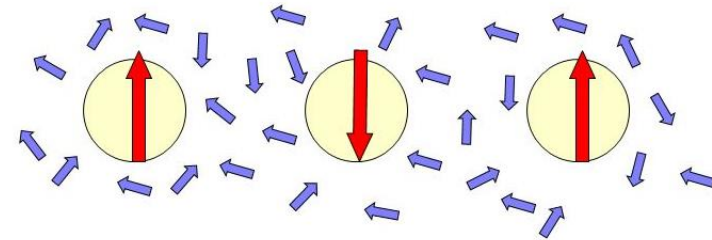
### Canje indirecto en metales

- En metales, la interacción entre iones magnéticos puede ser mediada por los  $e^-$  de conducción. No hay canje directo entre  $e^-$  localizados.
- Un  $\mu_{atm}$  localizado polariza el espín de un  $e^-$  de conducción y esta polarización produce un acoplo con un  $\mu_{atm}$  localizado vecino a una distancia  $r$ .
- Interacción de canje indirecta oscilatoria en  $r_{ab}$  (distancia entre los átomos localizados) y que decae con  $1/r_{ab}^3$ :

$$J_{RKKY} \sim \frac{\cos(2k_F r_{ab})}{r_{ab}^3}$$

#### RKKY (Ruderman, Kittel, Kasuya and Yosida)

- Dependiendo de la distancia el acoplo puede ser FM o AF.



Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70