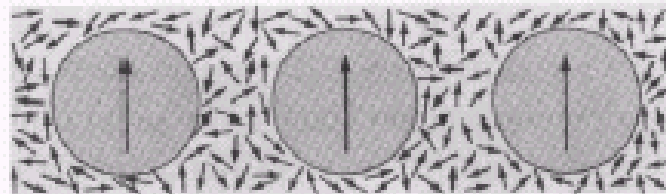


## Intercambio indirecto

### Indirect exchange interaction.

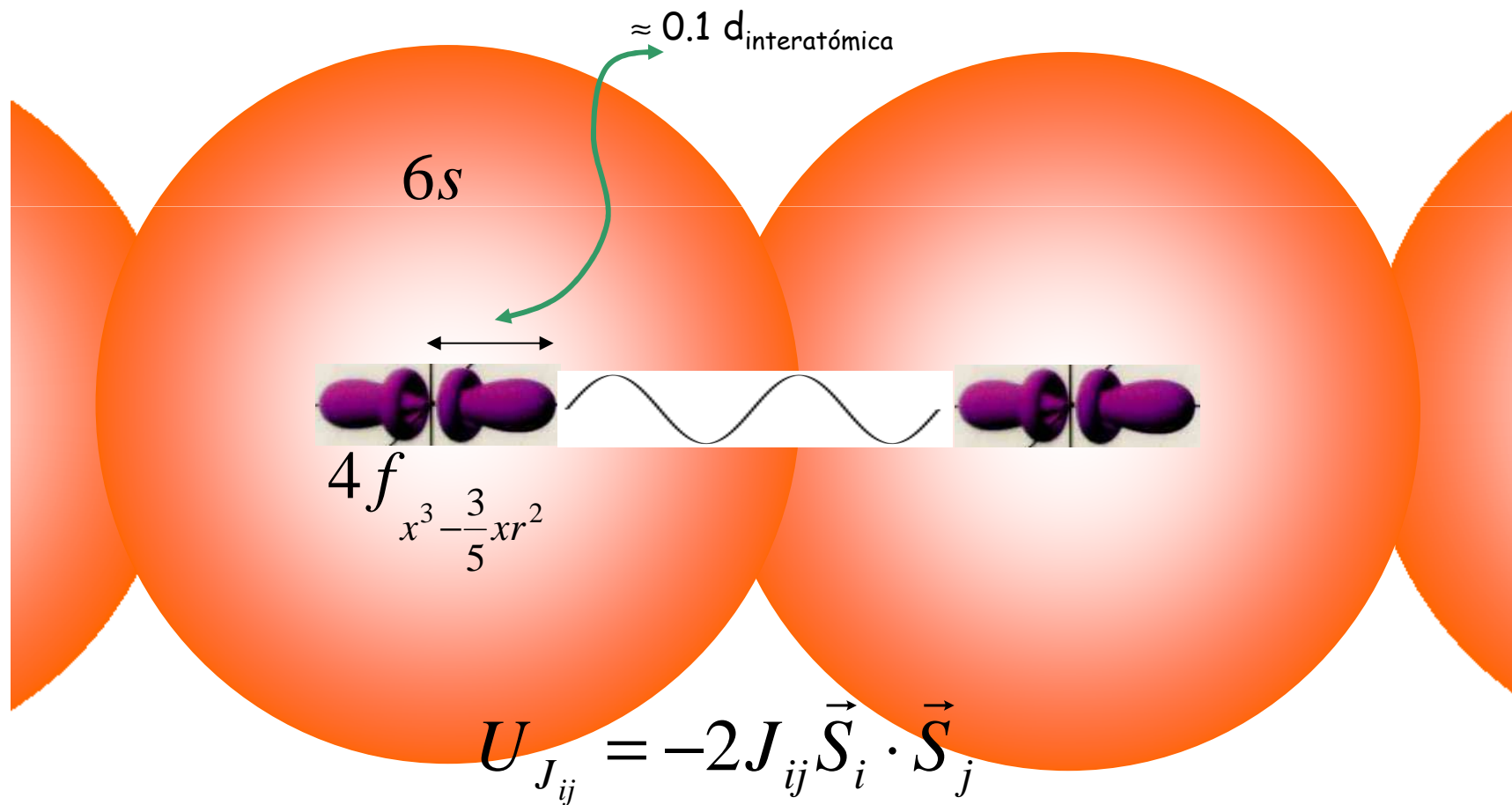
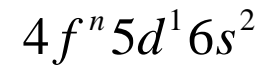
A magnetic ion induces a spin polarisation in the conduction electrons in its neighbourhood. This spin polarisation in the itinerant electrons is felt by the moments of other magnetic ions within range leading to an indirect coupling.



# Intercambio indirecto

Tierras raras o lantánidos

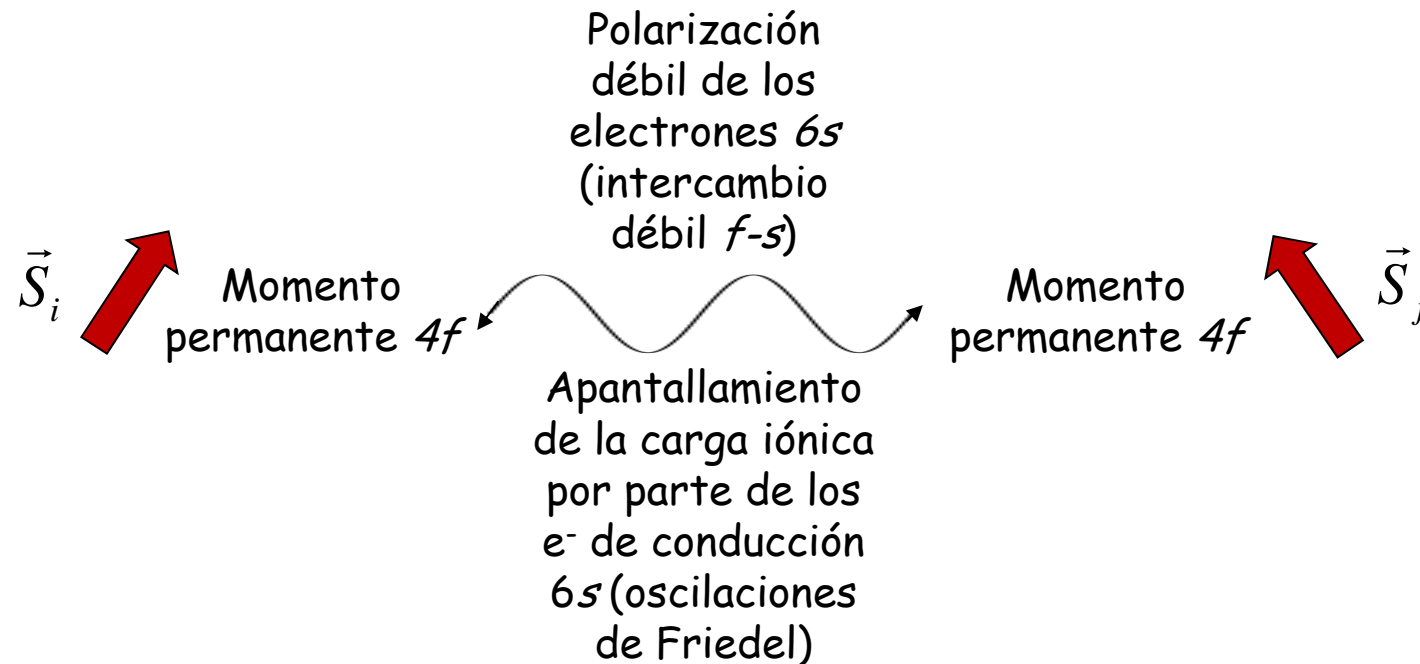
57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70
<b>La</b>	<b>Ce</b>	<b>Pr</b>	<b>Nd</b>	<b>Pm</b>	<b>Sm</b>	<b>Eu</b>	<b>Gd</b>	<b>Tb</b>	<b>Dy</b>	<b>Ho</b>	<b>Er</b>	<b>Tm</b>	<b>Yb</b>
138.9	140.1	140.9	144.2	146.9	150.4	152.0	157.3	158.9	162.5	164.9	167.3	168.9	173.0



## Intercambio indirecto

Tierras raras pesadas

$$U_{J_{ij}} = -2J_{ij} \vec{S}_i \cdot \vec{S}_j$$

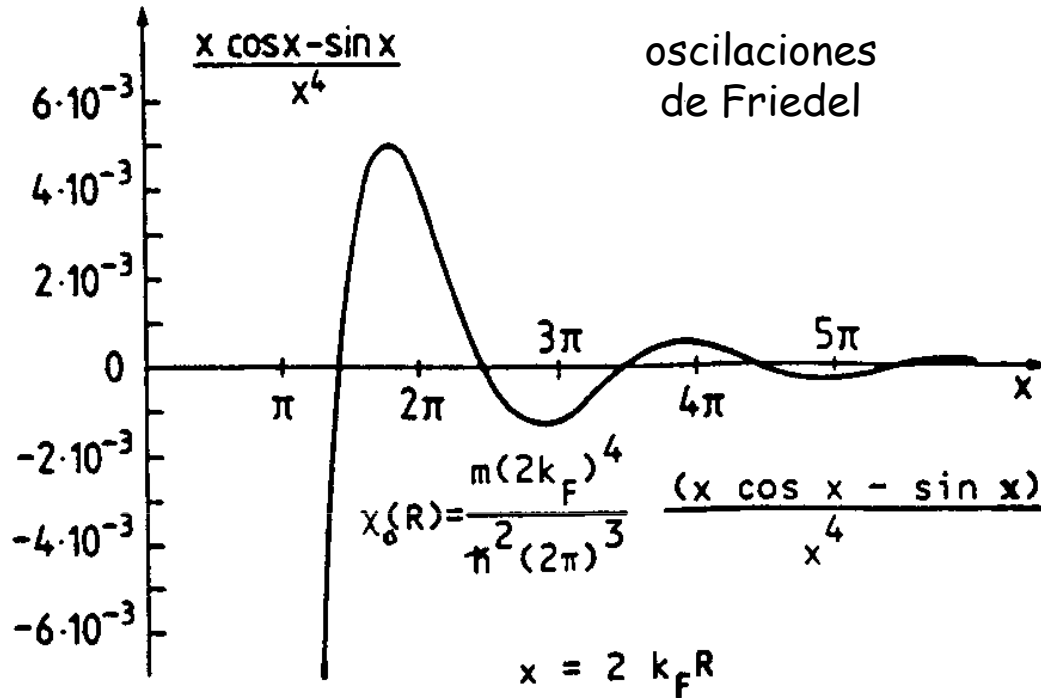


---

Compuestos de tierras raras con estequiometría variable: **vidrios de spin**

# Intercambio indirecto

Modelo RKKY: Ruderman y Kittel, Kasuya y Yosida



Distribución de carga de electrones de conducción *6s* alrededor de un sitio *4f*

*polarización neta de electrones s*

$$\rho_{\uparrow}(x) - \rho_{\downarrow}(x) \approx \frac{9n^2}{E_F} \pi J \langle S_z^2 \rangle F(x)$$

$$F(x) = \frac{\sin x - x \cos x}{x^4}; x = 2k_F r$$

- $n$  número de electrones *s*/átomo
- $J$  interacción de intercambio s-d
- $k_F$  "momento" lineal de Fermi
- $R_{ij}$  distancia entre tierras raras
- $D(E_F)$  DOS al nivel de Fermi

## Intercambio indirecto

Modelo RKKY: Ruderman y Kittel, Kasuya y Yosida

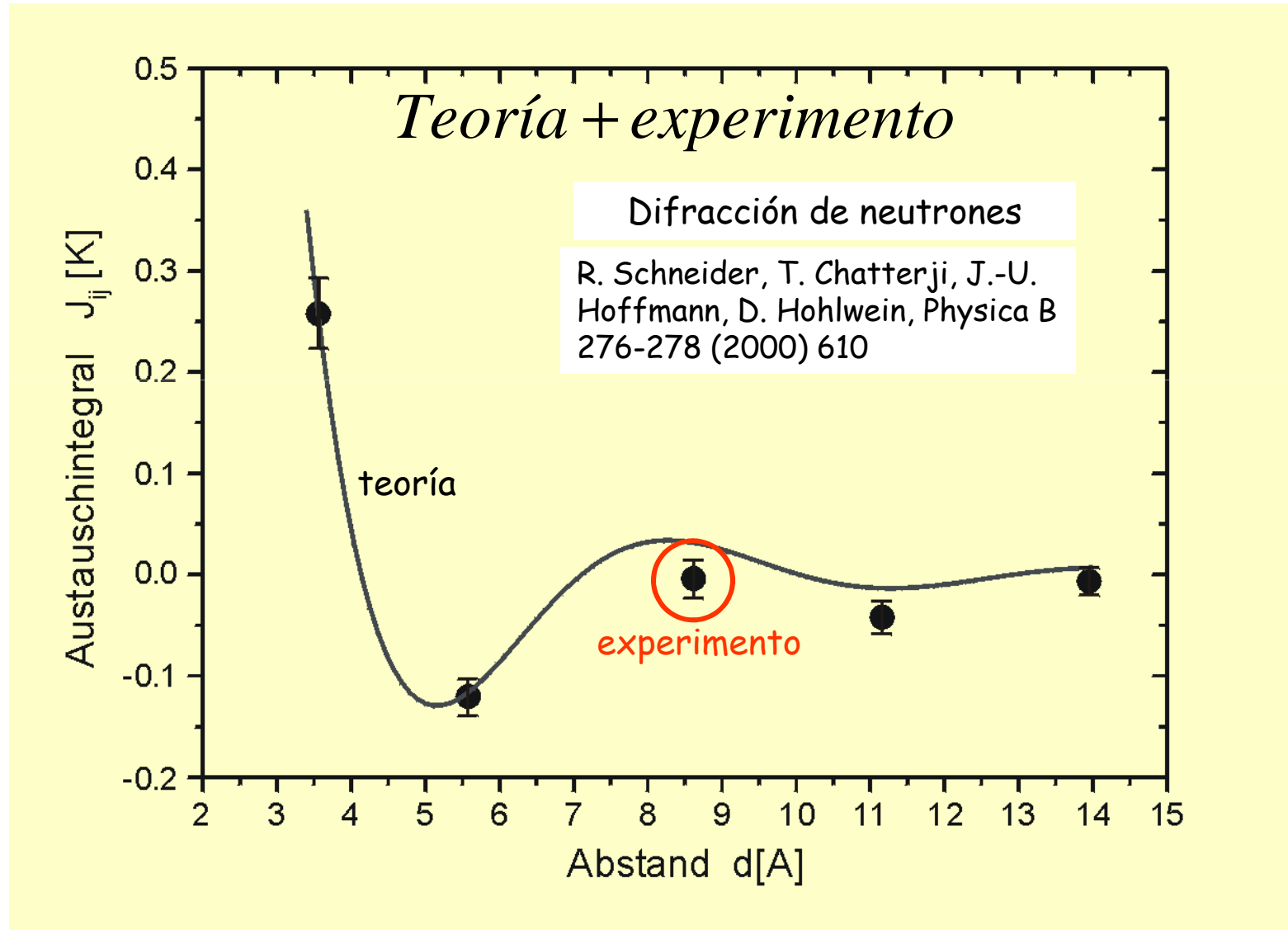
$$H = -2J_{ij} \vec{S}_i \cdot \vec{S}_j \approx -2J_{ij} S_{iz} S_{jz} \quad J_{ij} \text{ interacción de intercambio entre tierras raras}$$



$$J_{ij}(R_{ij}) = 3\pi n J D(E_F) \left[ \frac{\sin(2k_F R_{ij}) - (2k_F R_{ij}) \cos(2k_F R_{ij})}{(2k_F R_{ij})^4} \right]$$

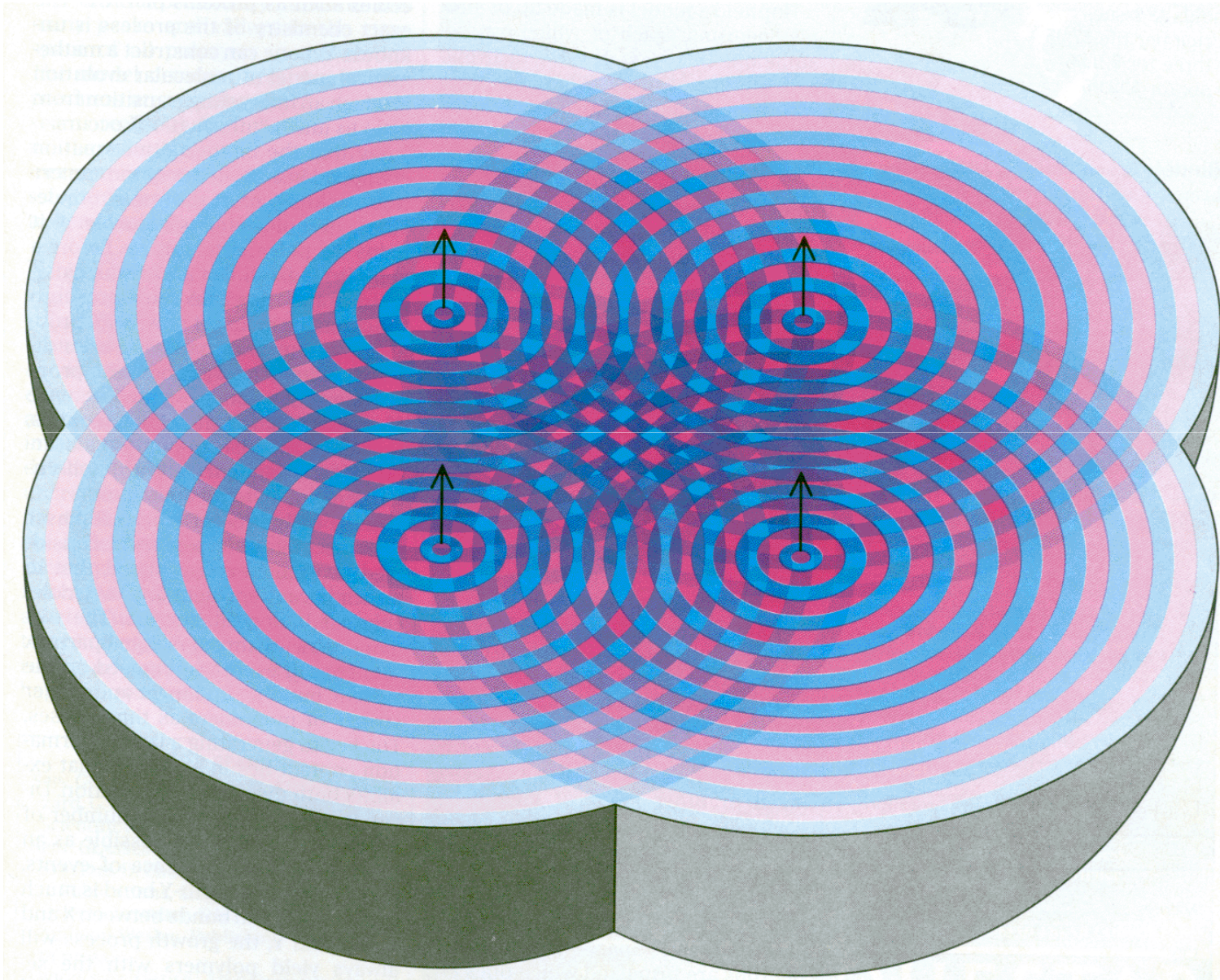
# Intercambio indirecto

Resultados experimentales en  
compuesto de Holmio



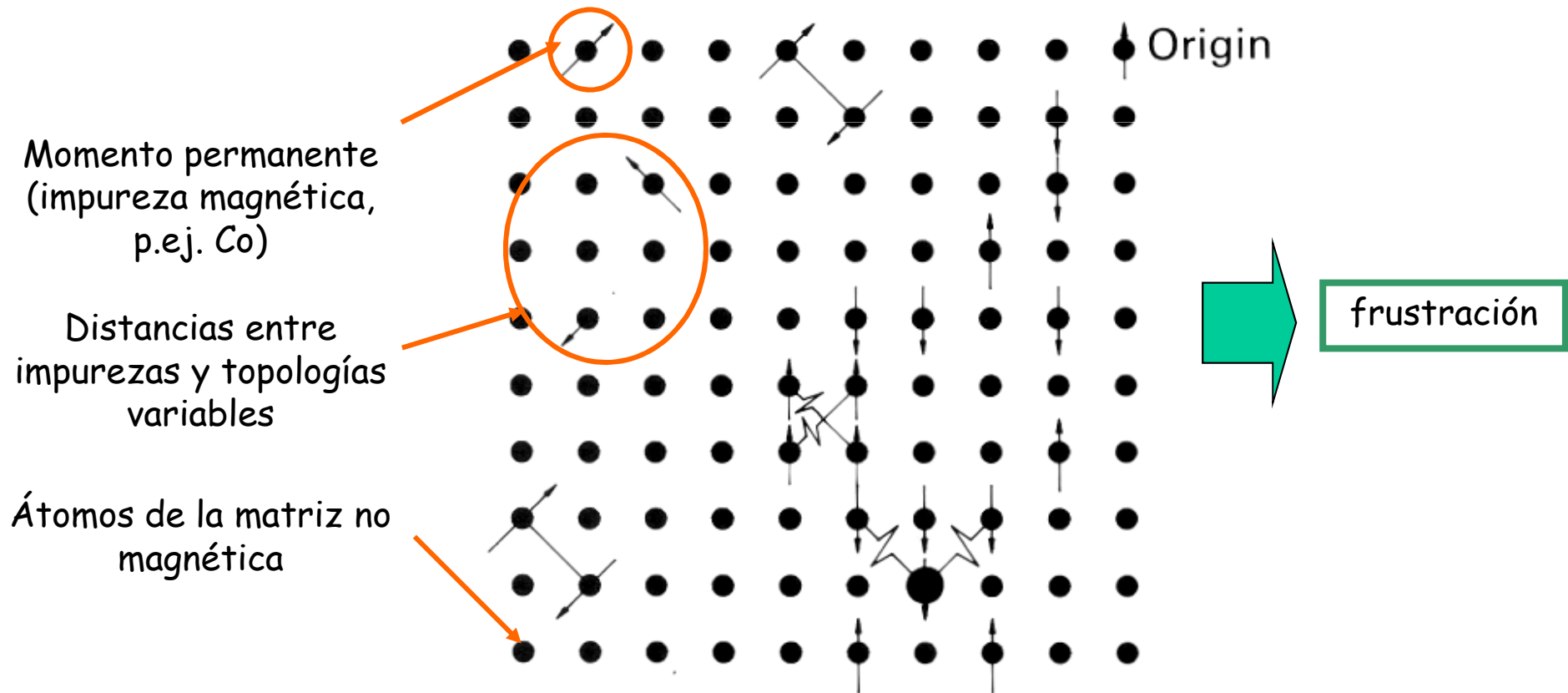
## Intercambio indirecto

Oscilaciones de polarización



## Intercambio indirecto - otros sistemas - vidrios de spin

- compuesto no magnético con algunos iones magnéticos de tierra rara substitucionales  
 $\text{Eu}_x\text{Sr}_{1-x}\text{S}$  (semiconductor)  
 $\text{La}_{1-x}\text{Gd}_x\text{Al}_2$  (metal)
- compuestos intermetálicos amorfos, especialmente con tierras raras  
 $\alpha\text{-GdAl}_2$ ,  $\alpha\text{-YFe}_2$
- Elementos con momentos permanentes (Mn, Fe, Gd, Eu, ...) diluidos en metales nobles no magnéticos ( $\text{Cu}_{1-x}\text{Mn}_x$ ,  $\text{Au}_{1-x}\text{Fe}_x$ , vidrios de spin canónicos)

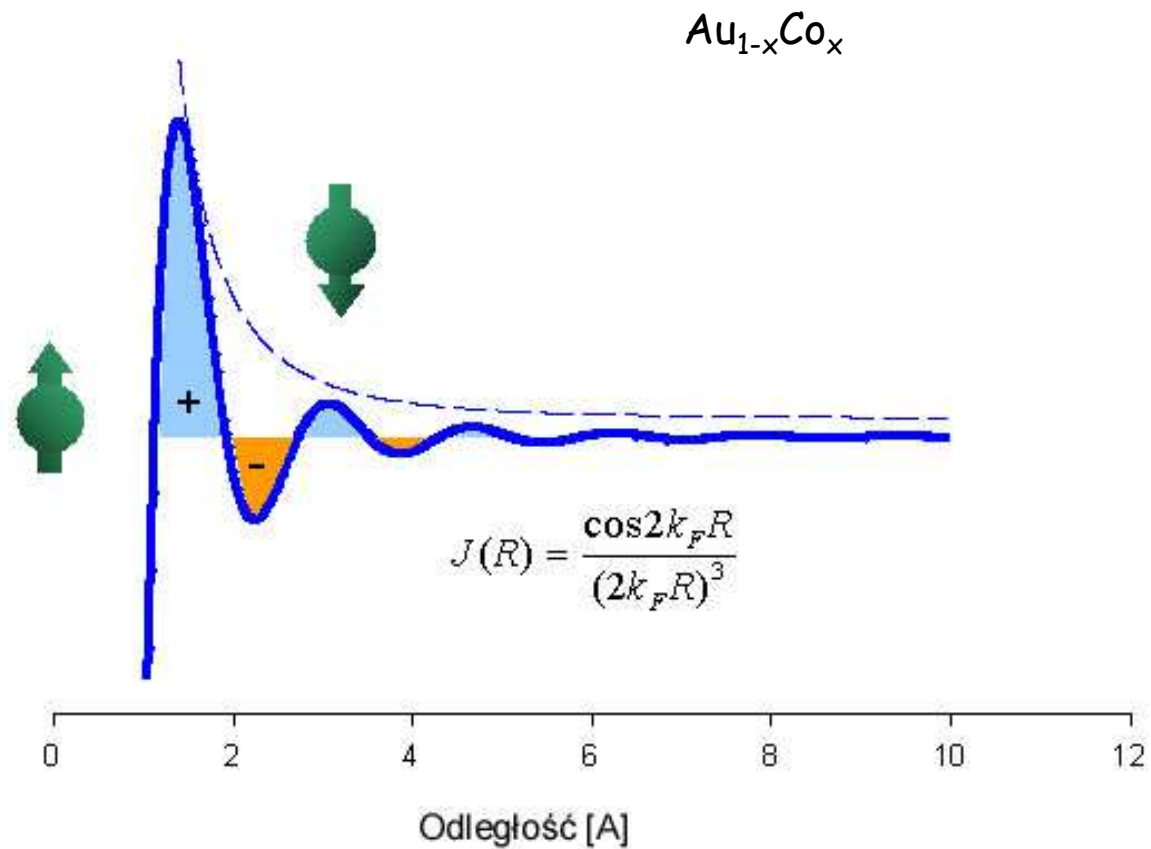




# Intercambio indirecto - aplicación a otros sistemas

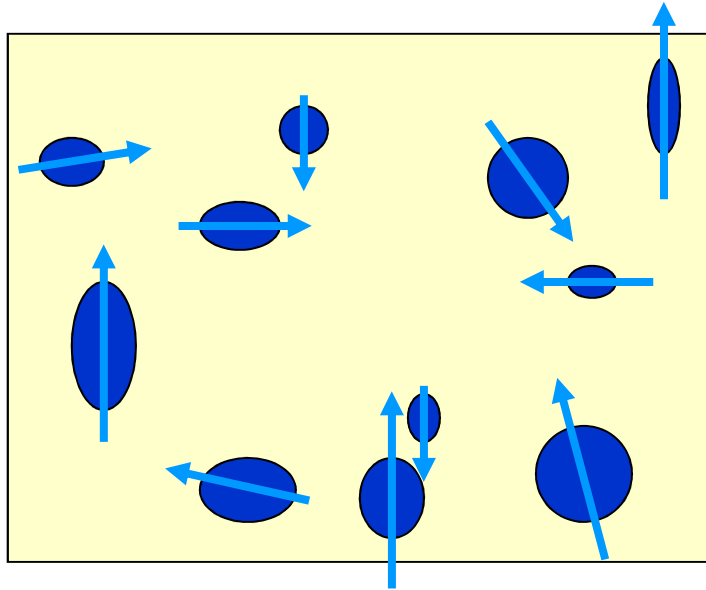
Ejemplos de sistemas diluidos

Oddziaływanie RKKY  
(izolowane domieszki np. Co w Au)



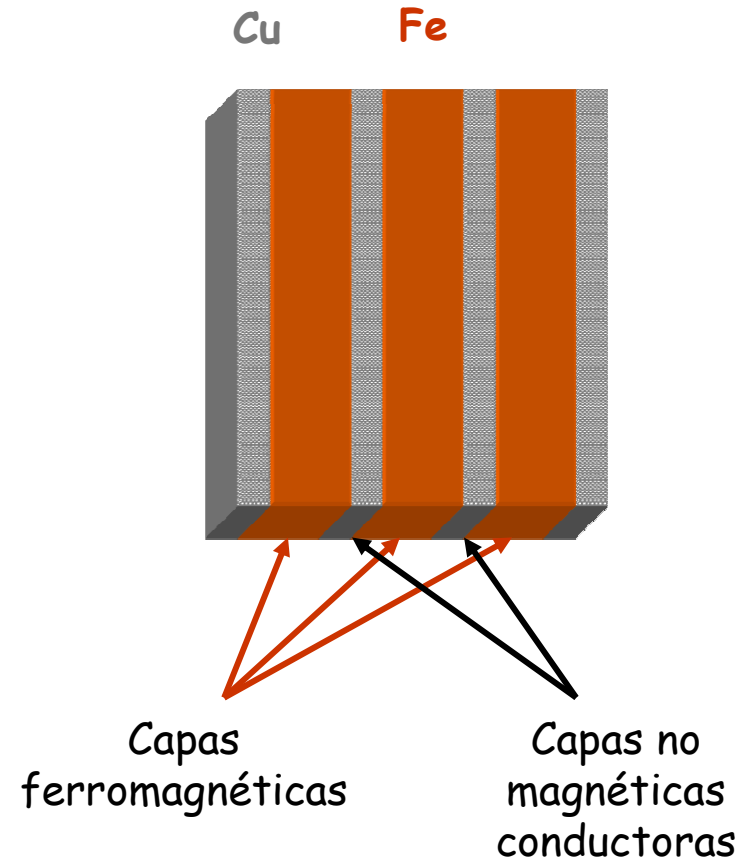
## Intercambio indirecto - aplicación a otros sistemas

Vidrio de clusters de spin  
(cluster glass)



Partículas o clusters magnéticos  
en matriz no magnética  
conductora ( $\text{Cu}_{1-x}\text{Fe}_x$ ,  $\text{Au}_{1-x}\text{Fe}_x$ ,  
 $\text{Cu}_{1-x}\text{Co}_x$ )

Acoplamiento en multicapas



## Intercambio indirecto - aplicación a otros sistemas

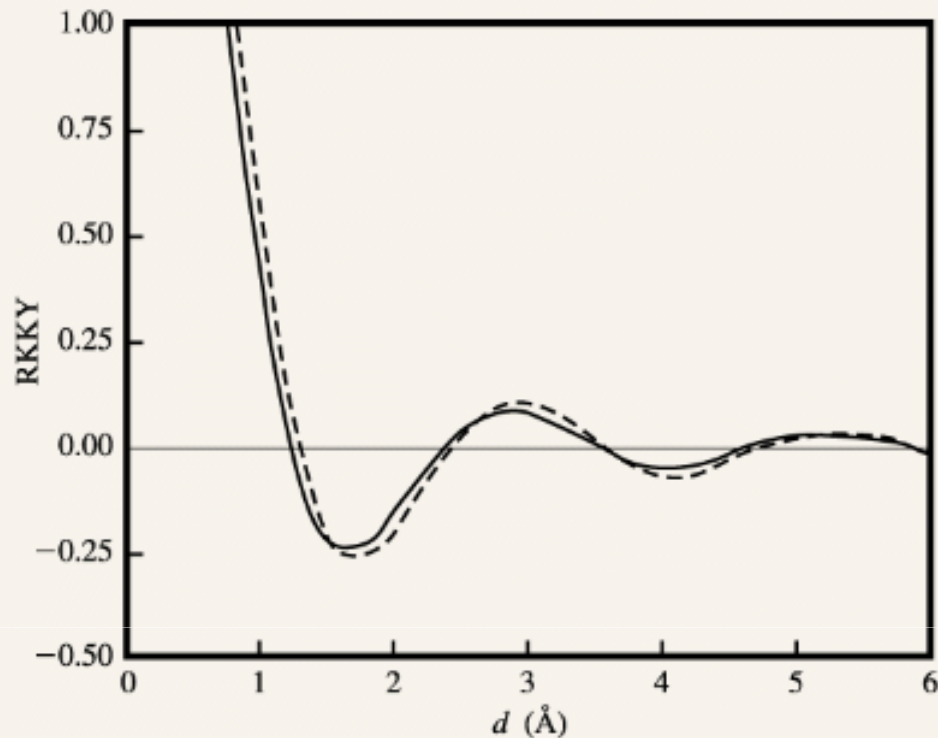


Figure 2

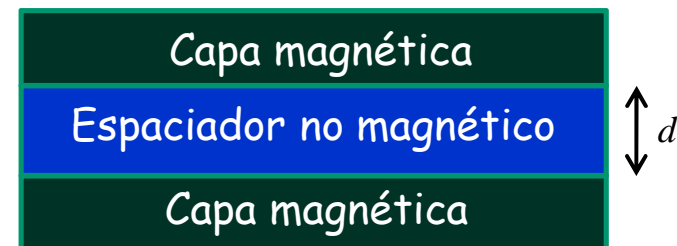
RKKY coupling between two magnetic layers separated by a distance  $d$ , for free electron bands. The units for RKKY coupling are unspecified. The Fermi energy is taken to be that for Cu. Solid line: Free electrons, no potential well. Dashed line: Effect of a small potential well relative to the Fermi energy. A phase shift is induced, and the RKKY coupling is enhanced for separations  $d$  greater than about  $0.5 \text{ \AA}$ .

Modelo para acoplamiento oscilatorio  $J(r)$  entre dos capas magnéticas separadas una distancia  $r$  por otra no magnética

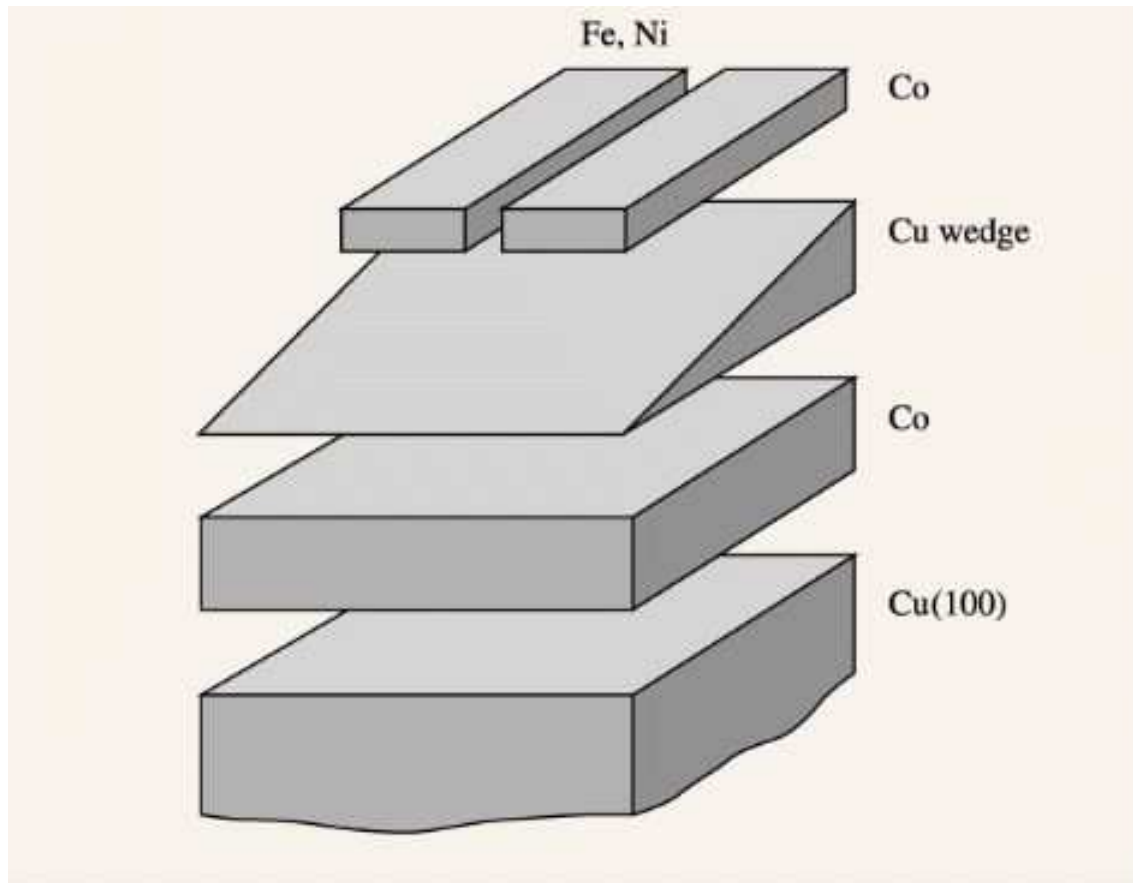
Theory of exchange coupling in magnetic multilayers  
by B. A. Jones



Volume 42, Number 1,  
1998



## Intercambio indirecto - aplicación a otros sistemas



**Figure 1**

Stacking of the magnetic structures used in the investigation of exchange coupling across Cu(100). The layers shown were grown by molecular beam epitaxy.

Experimento para observar el acoplamiento oscilatorio  $J(r)$  entre dos capas magnéticas separadas una distancia  $r$  por otra no magnética

Oscillatory magnetic properties

by R. Allenspach and W. Weber

IBM Journal of Research  
and Development

Volume 42, Number 1,  
1998

## Intercambio indirecto - aplicación a otros sistemas

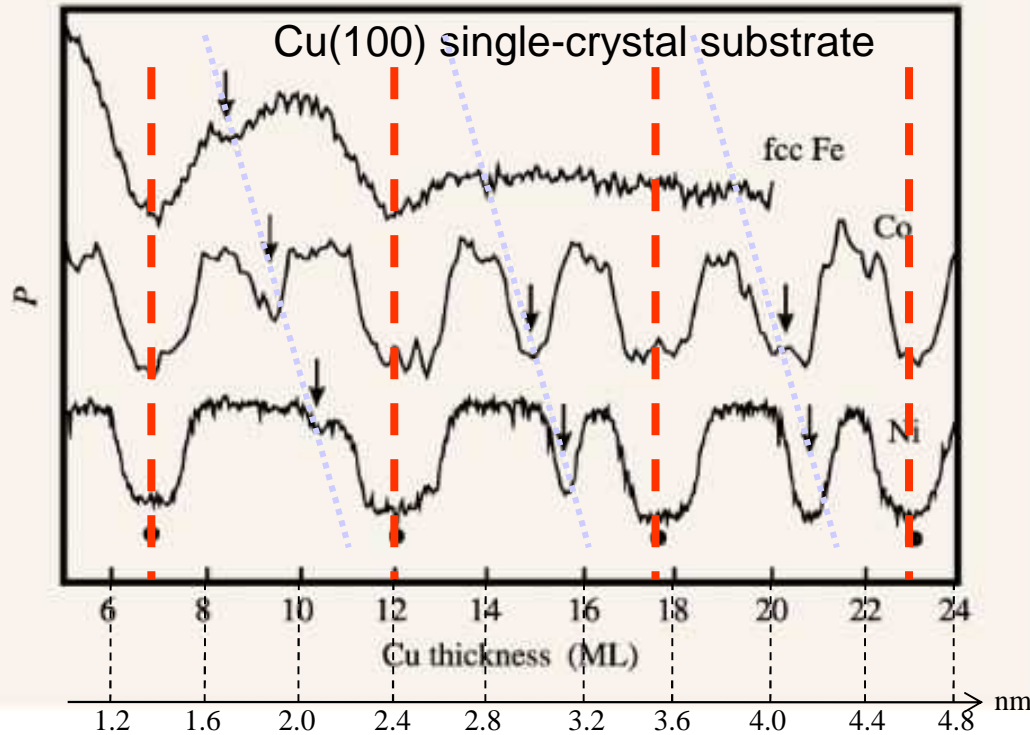


Figure 3

Spin polarization  $P$  vs. Cu spacer thickness for an  $M/\text{Cu}/\text{Co}(100)$  structure with Fe, Co, and Ni as the upper film  $M$ . The positions of the first four AF peaks derived from long-period oscillations are indicated by dots. Note the peak shifts of the short-period oscillations (arrows). From [50], reproduced with permission.

W. Weber, R. Allenspach, and A. Bischof, "Exchange Coupling Across Cu(100): A High-Precision Study," *Europhys. Lett.* 31, 491-496 (1995); *ibid.* 32, 379 (1995).

Experimento para observar el acoplamiento oscilatorio  $J(r)$  entre dos capas magnéticas separadas una distancia  $r$  por otra no magnética

Oscillatory magnetic properties

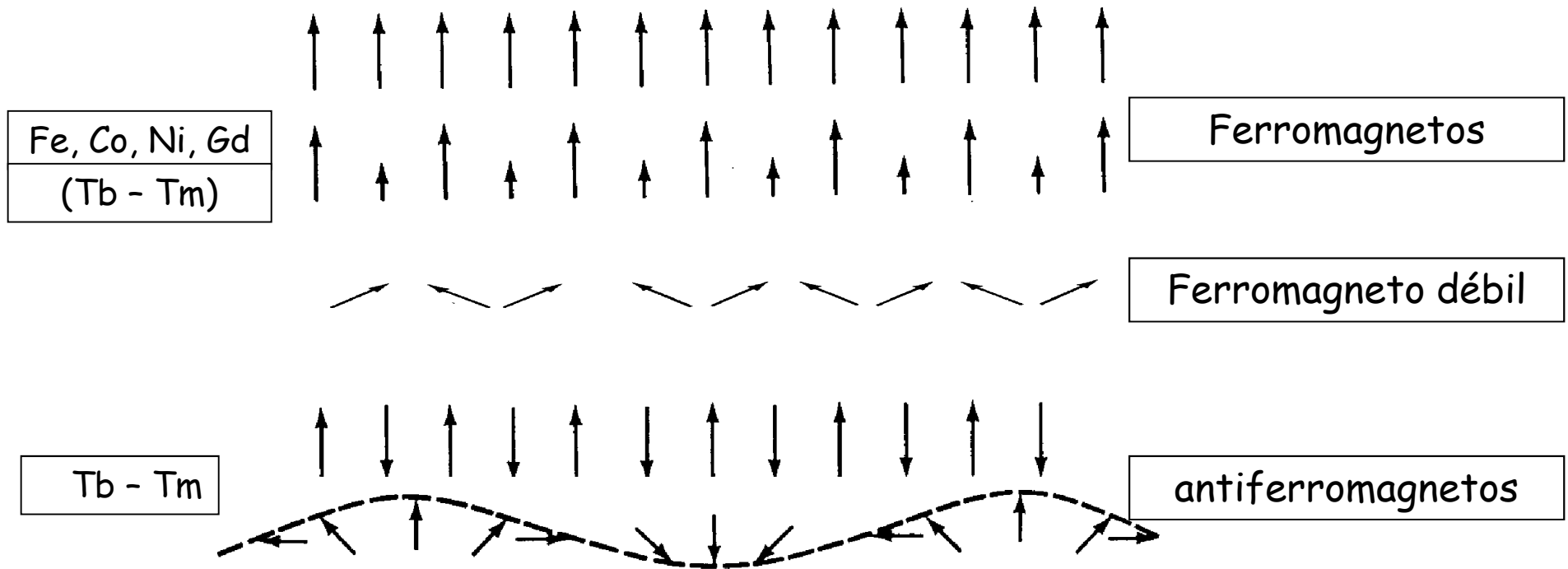
by R. Allenspach and W. Weber

EBM Journal of Research and Development

Volume 42, Number 1, 1998

Otros ordenamientos de spin

# Ordenamientos de spines



# The periodic table of the elements

	1A	2A	3A	4A	5A	6A	7A	8	1B	2B	3B	4B	5B	6B	7B	0		
1	H															He		
2	Li	Be									B	C	N	O	F	Ne		
3	Na	Mg									Al	Si	P	S	Cl	Ar		
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
6	Cs	Ba	L	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
7	Fr	Ra	A															
	L	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu		
	A	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr		

- Metals
- Metalloids
- Non-metals
- Transition Metals
- Gases

Tierras raras

ferromagneto

antiferromagneto

paramagneto

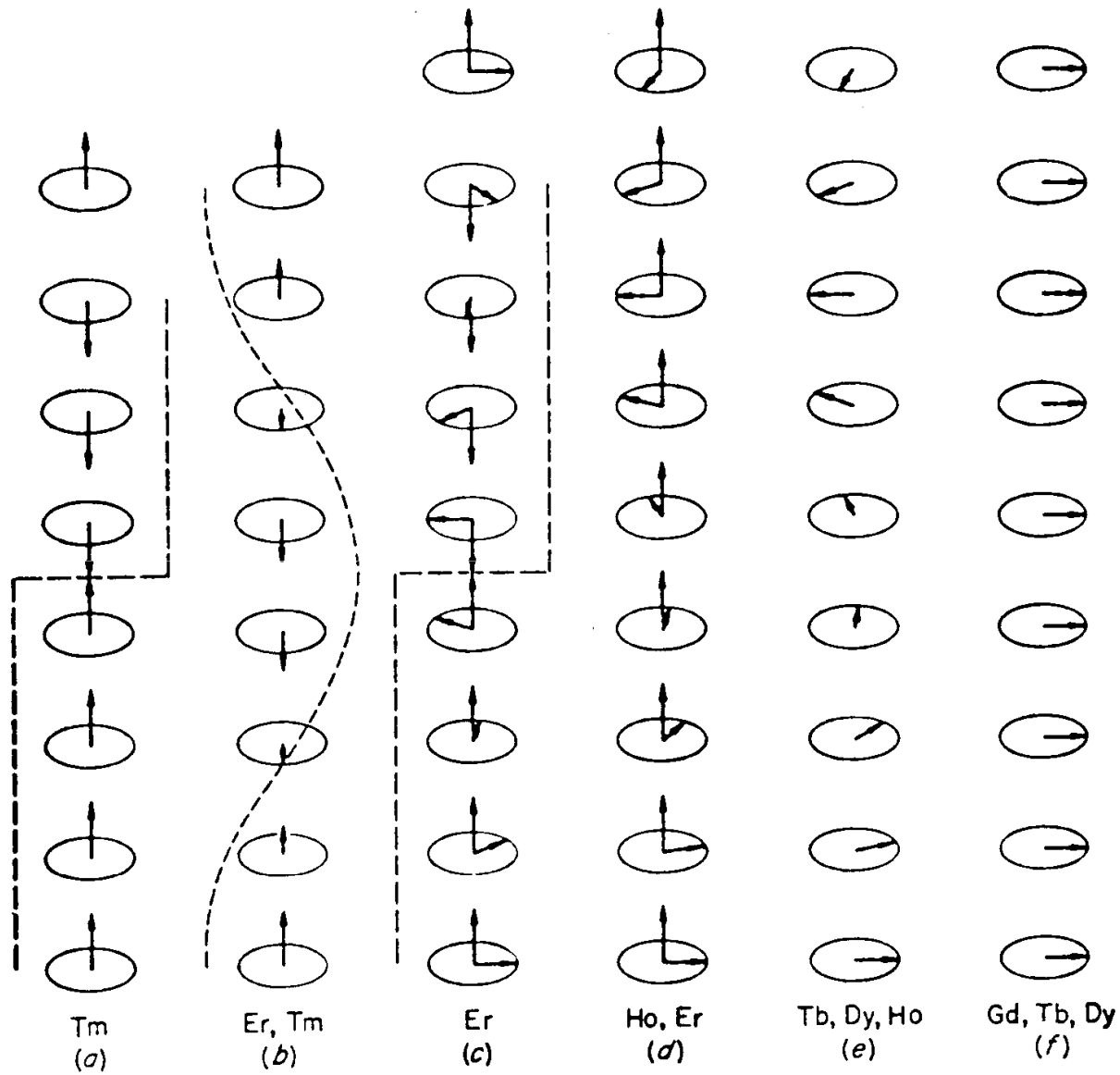
helimagneto

T





# Estructuras espiral o helicoidal

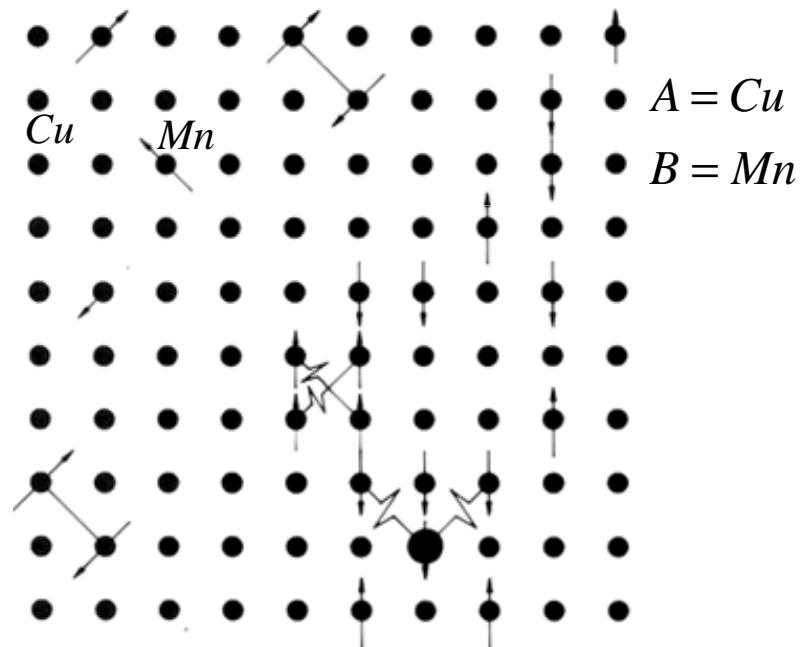


Magnetic structures of heavy lanthanide metals [after Koehler (1972)].

Tierras raras pesadas

Frustración

# Vidrios de Spin $A_{1-x}B_x$ ( $x \ll 1$ )



# ingredientes principales de un vidrio de spin

- ❖ aleatoriedad o desorden
  - ❖ sitios aleatorios
  - ❖ Acoplamientos aleatorios
- ❖ Competencia entre interacciones que conducen a orientaciones de spin paralelas y antiparalelas



antiferro



ferro

- ❖ Frustración  $\Rightarrow$  da lugar a muchos posibles estados fundamentales

# Congelamiento de un vidrio de spin (SG)



$T \gg \gg T_f$  spines paramagnéticos, ley de Curie

$T \gg T_f$  clusters de spines, internamente acoplados AFM, FM, etc., por RKKY, momentos gigantes (superparamagnetismo) + spines libres

$T \geq T_f$  interacción de clusters via spines libres, estados metaestables

$T \leq T_f$  configuración de spines congelada debajo de  $T_f$ , dependiente de la tasa de enfriado y tiempos de espera

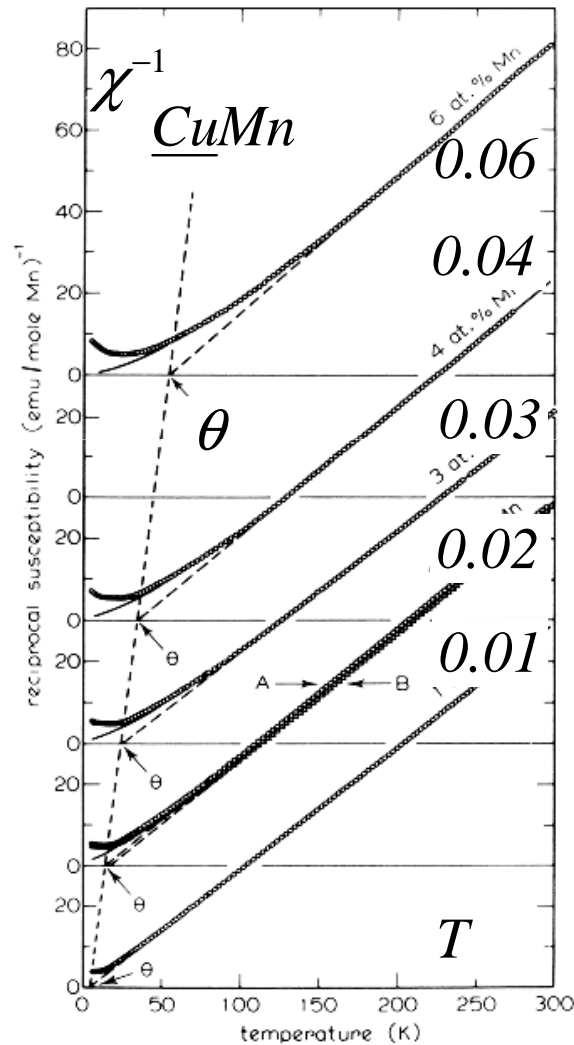
# Régimen de alta temperatura

Characterizado por paramagnetismo a temperaturas  $T \gg T_f$

Ley de Curie-Weiss: 
$$\chi = \frac{N\mu_B^2 g^2 S(S+1)}{3k_B} \frac{1}{T - \Theta}$$

- ❖ A temperaturas más bajas ( $T > T_f$ ): clustering magnético  $\Rightarrow$  desviaciones de la ley de Curie-Weiss debido a la formación de clusters

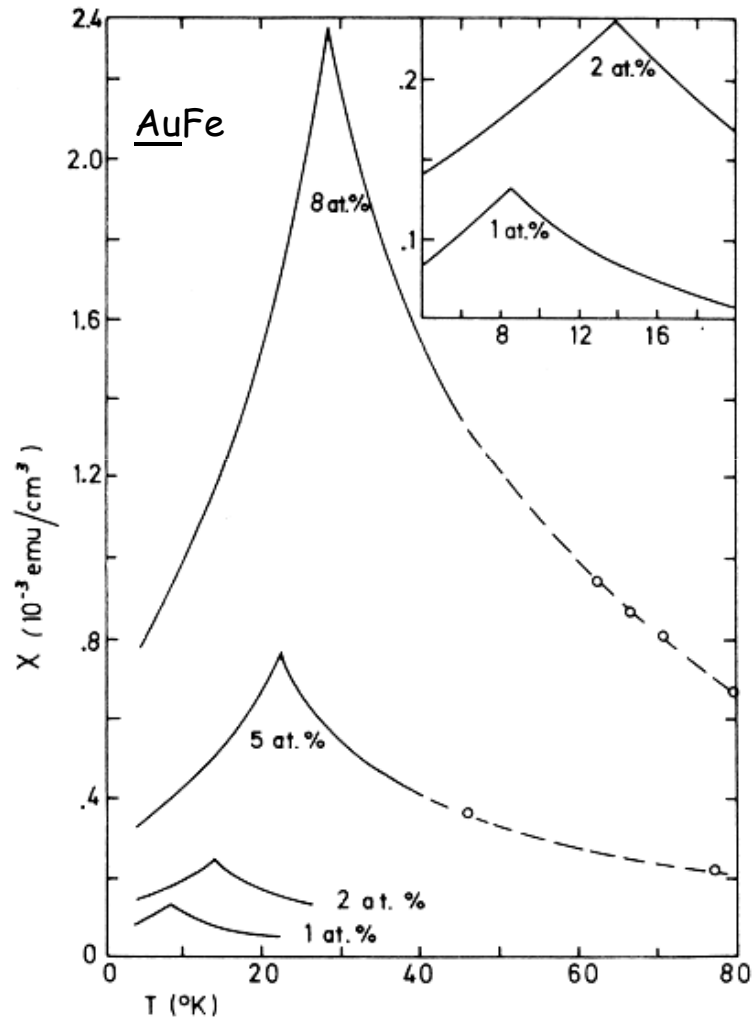
# Régimen de alta temperatura, susceptibilidad



- ❖ Ley de Curie-Weiss,  $\Theta = \Theta(x)$
- ❖ desviación a temperaturas bajas y concentraciones altas debido a formación de clusters

$$H = -\sum_{i < j} S_i J_{ij} S_j - g \mu_B H \sum_i S_i$$

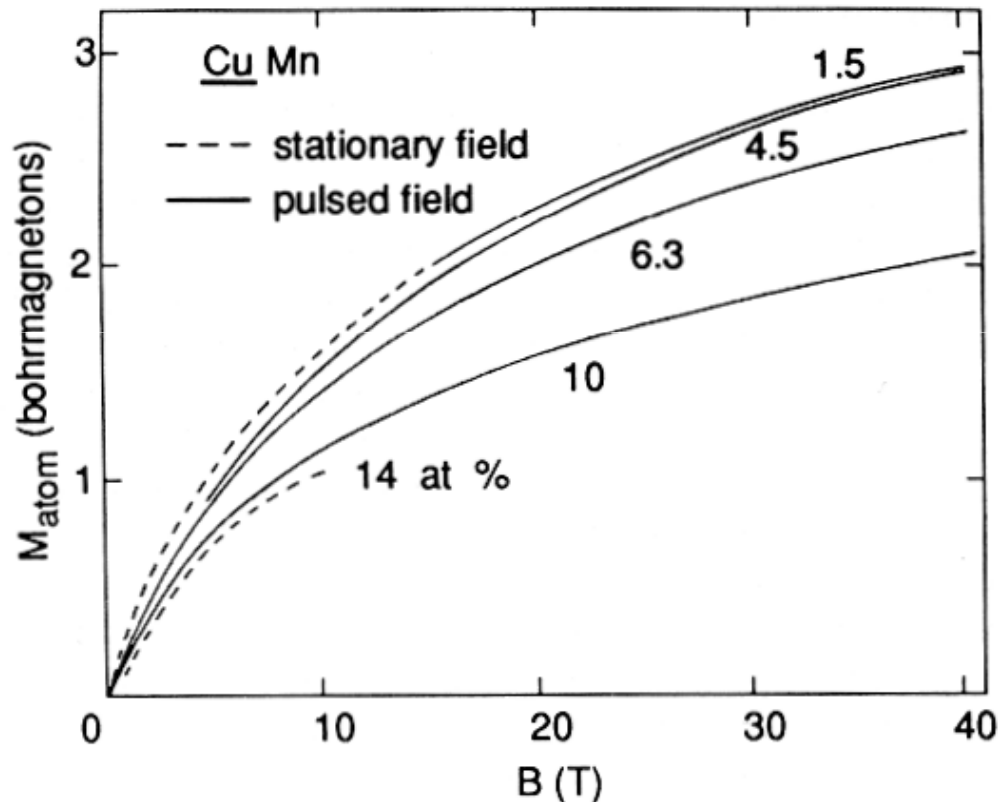
## En la vecindad de $T_f$ : susceptibilidad $ac$



- ❖ Experimentos posibles sólo a campos magnéticos muy pequeños  
↳ medición de la susceptibilidad  $ac$
- ❖ pico agudo en  $T_f$



# Debajo de $T_f$ : Magnetización



- ❖ Ausencia de saturación aún a los mayores campos
- ❖ Formación de anisotropía aleatoria debajo de  $T_f$
- ❖ Mucha energía necesaria para apartar momentos de clusters de la orientación anclada de la anisotropía congelada

Magnetization per Mn-atom for various concentrations of CuMn;  
 $T = 4.2\text{K}$ , J.J. Smith et. al., Solid State Commun. **31**, 265 (1979)

Otros sistemas frustrados

# Frustración - Manganitas hexagonales

$ABX_3$  hexagonal

A: metal de transición, tierra rara o alcalino

B: metal de transición (usualmente Mn);

X: halógeno u oxígeno)

Manganitas de tierra rara (RE)

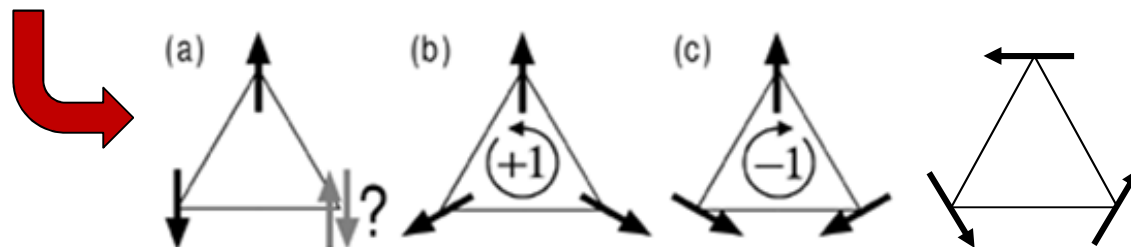
$HoMnO_3$ ,  $ErMnO_3$ ,  $TmMnO_3$ , y  $YbMnO_3$ .

$ABX_3$
A: MT
B: TR
X: O, halógeno

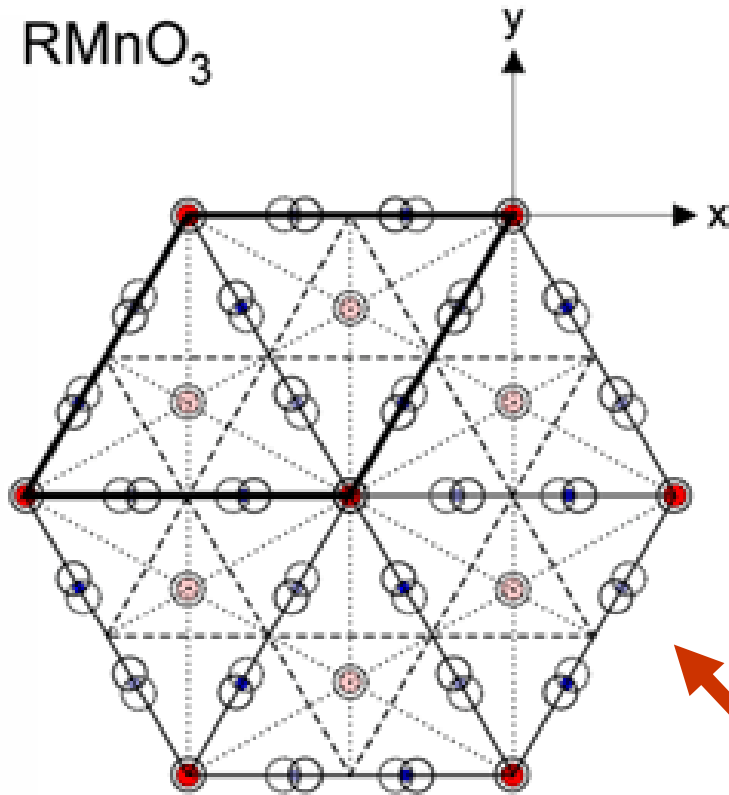
subredes  $Mn^{3+}(3d^4)$  y  $RE^{3+}(4f^{10...13})$ .

Interacción antiferro

Geometría Triangular → Ocurre frustration en las subredes de Mn y RE y entre ellas.



# Frustración - Manganitas exagonales



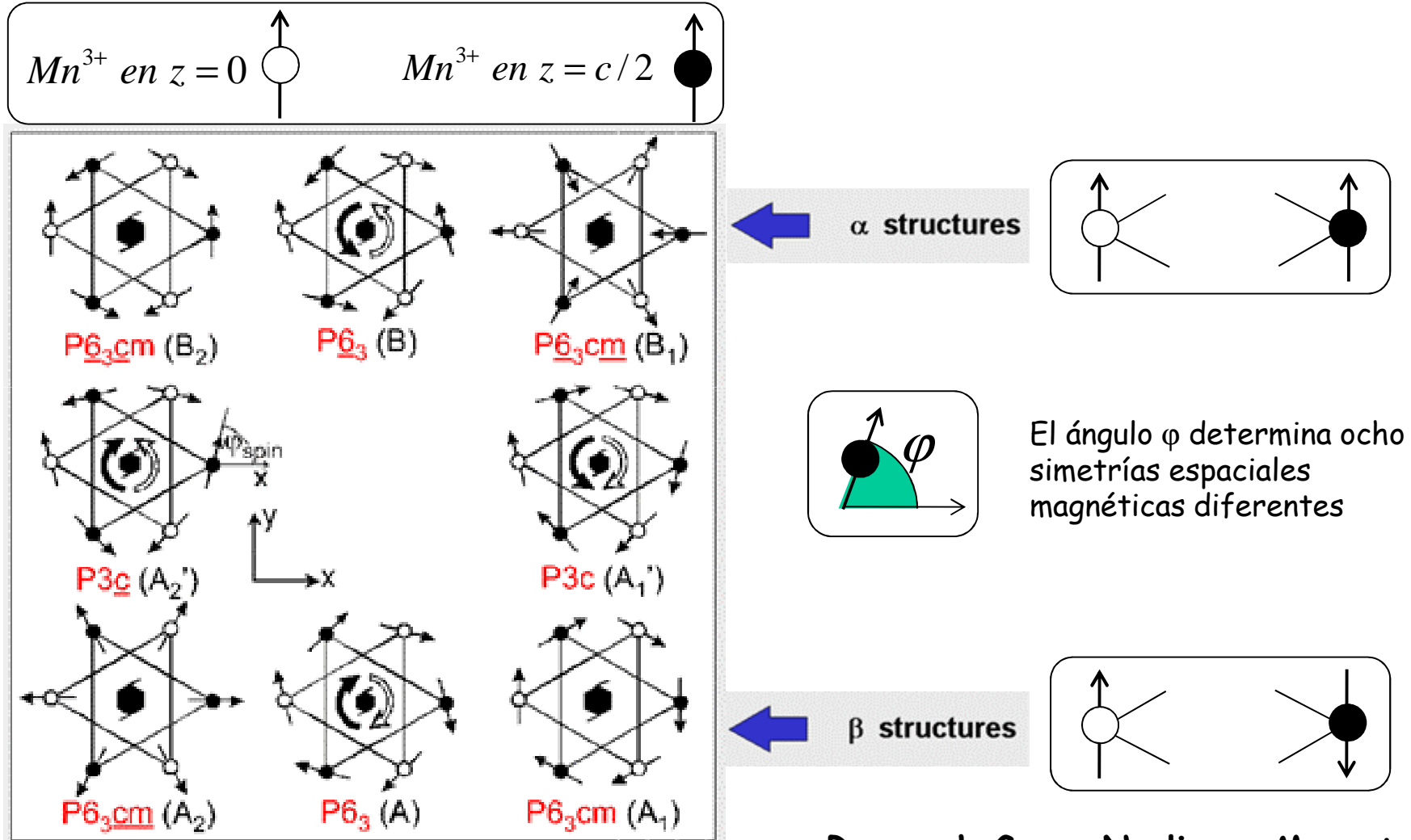
$\text{ABX}_3$   
 A: MT  
 B: TR  
 X: O, halógeno

- $\text{R}^{3+}$  with local symmetry  $3m$
- $\text{R}^{3+}$  with local symmetry  $3$
- $\text{Mn}^{3+}$  in the middle plane
- $\text{Mn}^{3+}$  in the lower/upper plane
- $\text{O}^{2-}$  below  $\text{Mn}^{3+}$
- $\text{O}^{2-}$  above  $\text{Mn}^{3+}$
- $\text{O}^{2-}$  between  $\text{R}^{3+}$  ( $3m$ )
- $\text{O}^{2-}$  between  $\text{R}^{3+}$  ( $3$ )

Vista superior de la estructura hexagonal de las manganitas. Hay dos subredes de RE y una de Mn que se ordenan magnéticamente.

# Frustración - Manganitas exagonales

Estructuras antiferromagneticas **frustradas** de  $\text{RMnO}_3$  exagonal.



Research Group Nonlinear Magneto-Optics  
at the Max-Born Institute

# Frustración

Transiciones de fase

