بسم الله الرحمن الرحيم

اولین کارگاه تخصصی

نانومغناطیس

مبانی، ساخت، مشخصه یابی، کاربرد

۴ و ۵ اردیبهشت ۱۳۹۲، دانشگاه صنعتی اصفهان

مقدمه ای بر مغناطیس و مواد مغناطیسی

حسین احمدوند

دانشکده فیزیک ، دانشگاه صنعتی اصفهان

فهرست مطالب:

- تاریخچه مغناطیس
- منشا مغناطیس
- مغناطیس الکترون و اتم
- حالتهای مغناطیسی: پارامغناطیس، فرومغناطیس، پادفرومغناطیس
- برهمکنش تبادلی
- ناهمسانگردی مغناطیسی
- حوزه های مغناطیسی و حلقه پسماند
- مواد مغناطیسی مهم

تاریخچه مغناطیس:

- سنگ طبیعی در منطقه مگنزیا (ترکیه امروزی) به نام مگنتیت (اکسیدآهن Fe_3O_4)
- استفاده به عنوان قطب نما
- ۱۸۲۰،کشف تصادفی ارتباط بین مغناطیس و الکتریسیته توسط ارستد
- آمپر نشان داد یک سیم پیچ حامل جریان دقیقا همانند آهنربا عمل می کند.
- ۱۸۳۱،کشف قانون القای الکترومغناطیس توسط فاراده
- ۱۸۶۴، نظریه الکترومغناطیس ماکسول
- ۱۹۰۷، اولین نظریه مدرن درباره مغناطیس توسط ویس

منابع تولید میدان مغناطیسی:

- جریان الکتریکی
- مواد مغناطیسی

در واقع منشا هر دو یکی است و برمی گردد به حرکت بار الکتریکی

سوال: مغناطش در مواد مغناطیسی از کجا سرچشمه می گیرد؟

فیزیک کلاسیک ✗

فیزیک کوانتم ☑

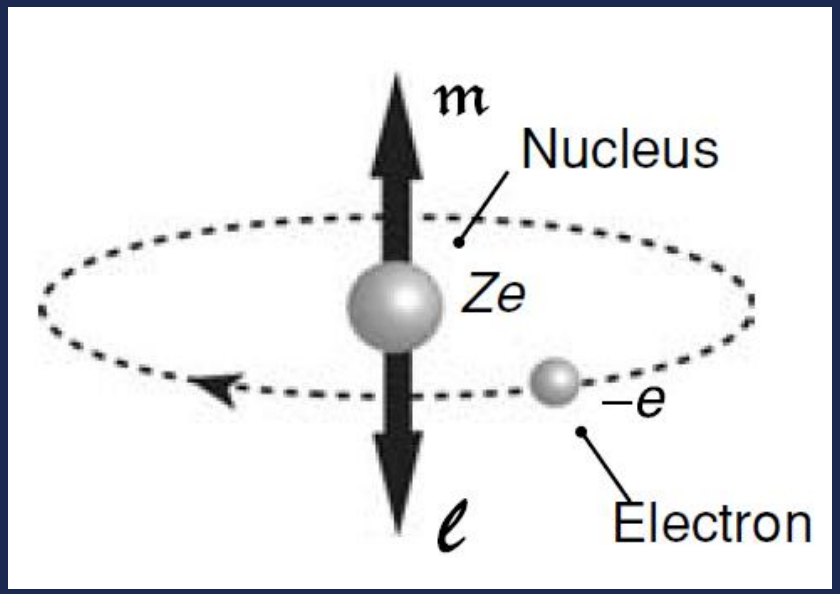
قضیه بور- ون لیوون Bohr–van Leeuwen

در تعادل گرمایی مغناطش یک مجموعه از الکترونها (جریانهای مداری) در حضور میدان مغناطیسی صفر است.

خواص مغناطیسی منشا کوانتمی دارند.

Van Vleck described Bohr's thesis as:
"perhaps the most deflationary publication of all time in physics"
"Quantum mechanics: The key to understanding magnetism"
(Nobel lecture 1977)

منشا کوانتمی مغناطیس:



ممان مغناطیسی ناشی از اندازه حرکت زاویه ای مداری الکترون

$$\mu = IA = I(\pi r^2) = \frac{-e}{T}(\pi r^2) = \frac{-ev}{2\pi r}(\pi r^2) = \frac{-e}{2m}(mrv)$$

$$\vec{\mu}_L = \gamma \vec{L} \quad ; \quad \gamma = \frac{-e}{2m}$$

$$\vec{\mu}_{Lz} = -\frac{e\hbar}{2m} m_l = -g_l \mu_B m_l \; ; \quad \mu_B = \frac{e\hbar}{2m} \; ; \quad g_l = 1$$

ممان مغناطیسی ناشی از اندازه حرکت زاویه ای اسپینی

$$\vec{\mu}_S = \frac{-e}{2m} g_s \vec{S}$$

$$\vec{\mu}_{Sz} = -\frac{e\hbar}{2m} g_s (m_s \hbar) = -g_s \mu_B m_s \quad ; \qquad g_s = 2$$

$$m_S = \frac{1}{2} \quad ; \quad \mu_{Sz} = 1\mu_B$$

ممان مغناطیسی الکترون

- مدار (L) ، μ_L
- اسپین (S) ، μ_S

ممان مغناطیسی اتم

اسپین کل (S) و اندازه حرکت کل (L) یک اتم ناشی از لایه های اتمی (اربیتال) است که به صورت کامل پر نشد ه اند.

$$\vec{J} = \vec{L} + \vec{S}$$

$$|L - S| \leq J \leq |L + S| \quad ; \quad |\vec{J}| = \sqrt{J(J+1)}\hbar$$

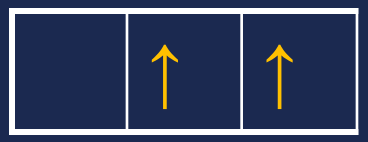
$$-J \leq M_j \leq J \quad ; \quad J_z = M_j \hbar$$

ترکیب اعداد کوانتمی اندازه حرکت زاویه ای برای کمینه شدن انرژی و تعیین حالت پایه اتم با استفاده از قوانین هوند به دست می آید.

قوانین هوند

- بیشینه بودن S برای ساختار
- بیشینه بودن L در توافق با S
- جفت شدگی L با S: اگر لایه اتمی کمتر از نیمه پر باشد J=L-S و اگر بیشتر از نیمه پر باشد J=L+S

$C : 1s^2\ 2s^2\ 2p^2$

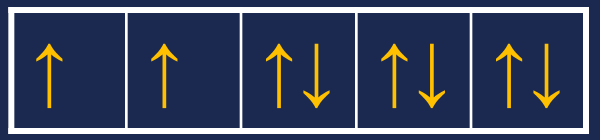


m_l= -1 0 +1

S=1 ; L=1 ; J=0

کربن غیر مغناطیسی است

$Ni^{2+}: 1s^2\ 2s^2\ 2p^6\ 3s^2\ 3p^6\ 3p^8$



m_l= -2 -1 0 +1 +2

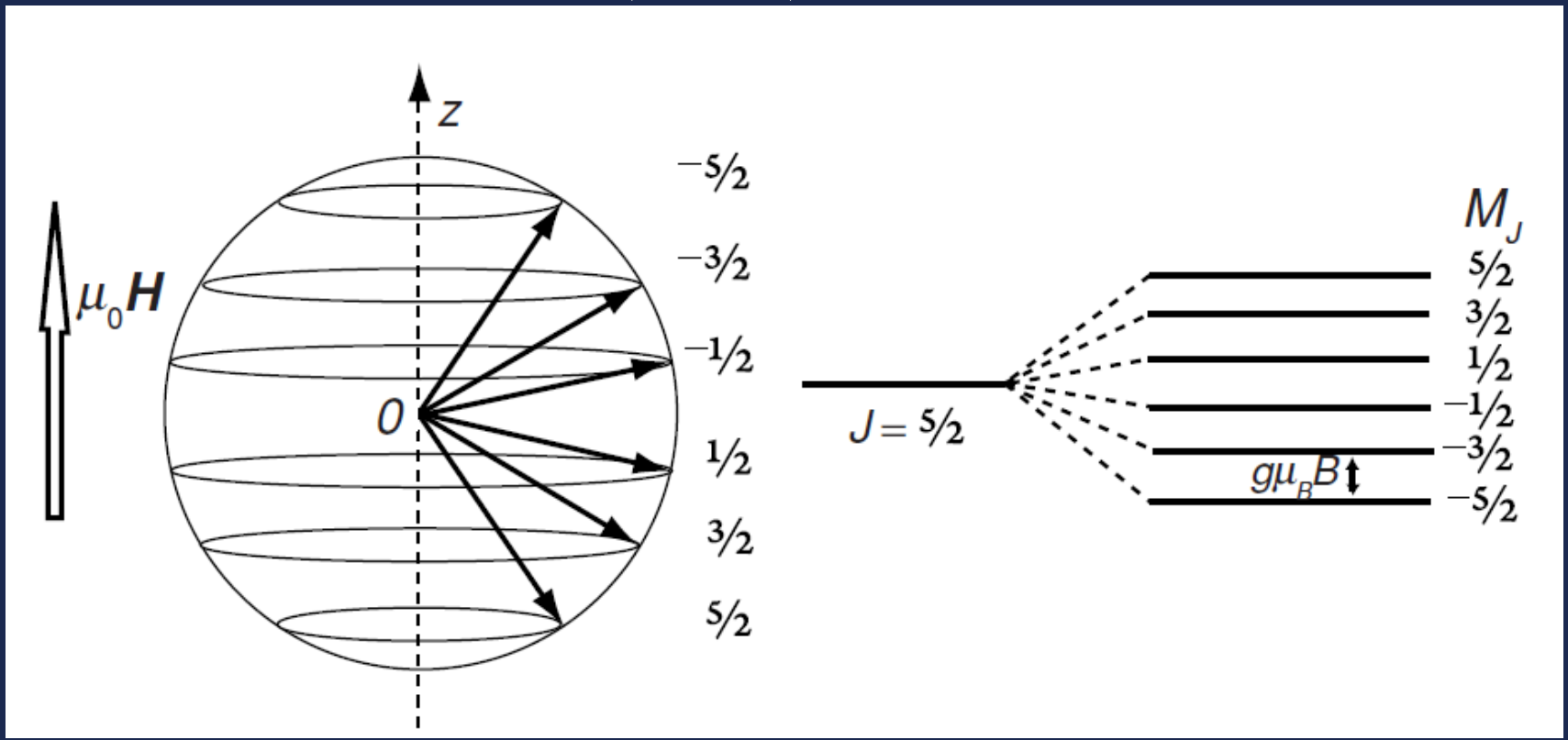
S=1 ; L=3 ; J=4

ممان مغناطیسی کل یک اتم

$$m = -g_J \frac{\mu_B}{\hbar} J$$

$$|m| = g_J \mu_B \sqrt{J(J+1)}$$

$$g_J = \frac{3}{2} + \frac{S(S+1) - L(L+1)}{2J(J+1)} \quad ; \quad \text{Lande g - factor}$$

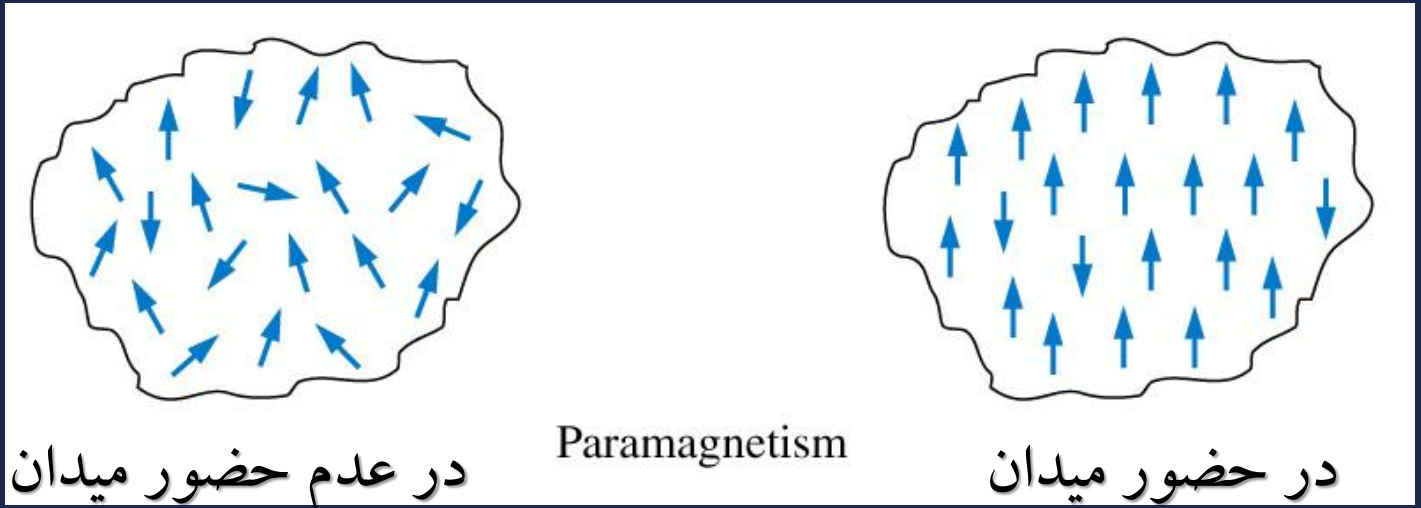


۷۹ عنصر در حالت اتمی مغناطیسی هستند.

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

پارامغناطیس

- ممانهای مغناطیسی جایگزیده
- بدون برهمکنش (برهمکنش بسیار ضعیف)
- غلبه انرژی گرمایی بر میدان مغناطیسی



نظریه کوانتمی پارامغناطیس (نظریه بریلوئن)

$$M = n\frac{\sum_{M_J=-J}^{J} -g\mu_B M_J \exp(-g\mu_0\mu_B M_J H / k_B T)}{\sum_{M_J=-J}^{J} \exp(-g\mu_0\mu_B J H / k_B T)}$$

میدان ضعیف

$$M = n\frac{\mu_0 g^2 \mu_B{}^2 J(J+1)H}{3k_B T}$$

$$\chi = \frac{M}{H} = \frac{C}{T}$$

قانون کوری: پذیرفتاری مغناطیسی یک پارامغناطیس متناسب است با معکوس دما

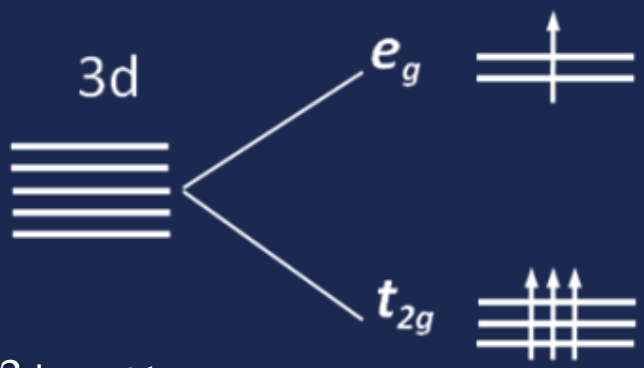
میدان بلوری(Crystal field)

هنگامی که یک یون مغناطیسی درون جامد بلوری قرار می گیرد، برهمکنش کولنی توزیع بار الکترونی آن با بارهای اطراف در بلور به برهمکنش میدان بلوری مشهور است.

این برهمکنش باعث شکافتگی ترازهای یونهای مغناطیسی می شود.

مثال: یونهای 3d

Mn^{3+} : $3d^4$



یون آزاد Mn^{3+}

یون Mn^{3+} درون بلور

فرونشانی اندازه حرکت زاویه ای (L=0)

در یونهای 3d میدان بلوری باعث فرونشانی اندازه حرکت مداری L می شود.

نتیجه : گشتاور دوقطبی مغناطیسی یونهای 3d ناشی از اسپین است.

$$|m_{eff}| = g_J \mu_B \sqrt{J(J+1)}$$

$$|m_{eff}| = g_S \mu_B \sqrt{S(S+1)}$$

$Tb^{3+} : (4f^8)$

S=3 ; L=3 ; J=6

m_{eff}=9.72μ_B

m_{eff} (Exp.)=9.77μ_B

$Cr^{3+} : (3d^3)$

S=3/2 ; L=3 ; J=3/2

m_{eff}=3.87μ_B

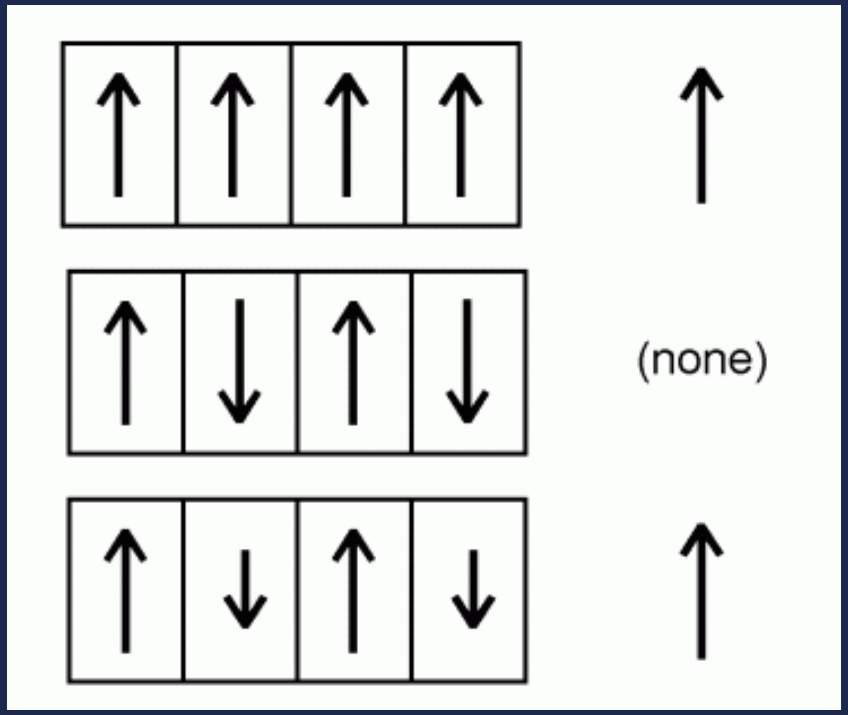
m_{eff} (Exp.)=3.85μ_B

نظم مغناطیسی

فرومغناطیس (آهن، کبالت، نیکل)

پادفرومغناطیس(اکسیدنیکل، اکسید کبالت)

فری مغناطیس(Fe_3O_4)



سوال : نظم مغناطیسی از کجا سرچشمه می گیرد؟

اولین نظریه: میدان میانگین ویس:

$$H=H_0+\lambda M$$

میدان موثر وارد بر یونها

میدان خارجی

میدان میانگین ناشی از مغناطش ماده

نتایج:

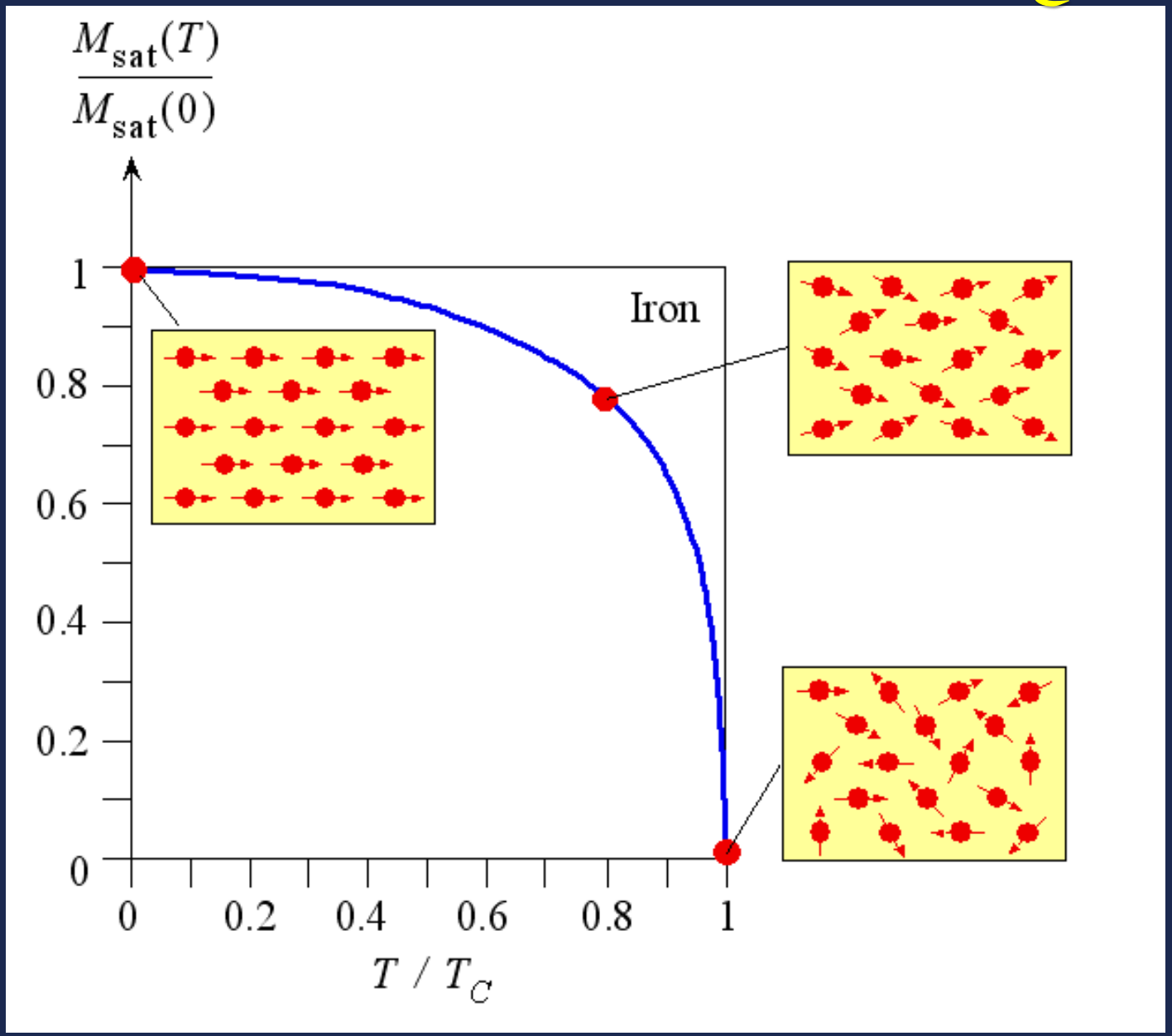
-توجیه مغناطش خودبخودی و وابستگی آن به دما

-پذیرفتاری مغناطیسی بر حسب دما در فاز پارامغناطیس

$$\chi = \frac{C}{T - T_C}$$

قانون کوری-ویس

مغناطش اشباع بر حسب دما در آهن



برهمکنش تبادلی (Exchange interaction)

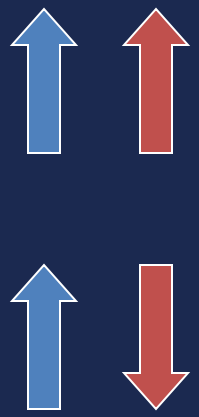
سوال: دو یون مغناطیسی در یک بلور چگونه با همدیگر برهمکنش می کنند؟

جواب : از طریق برهمکنش تبادلی

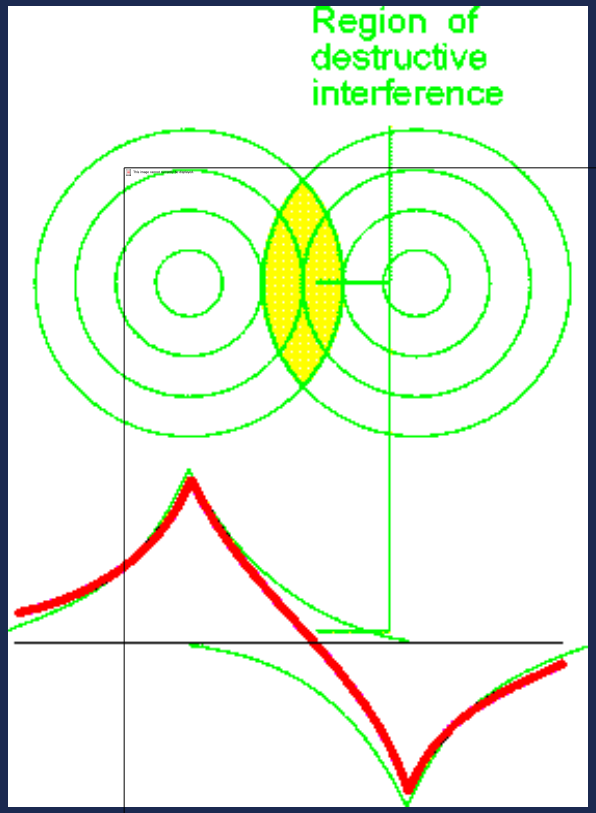
برهمکنش تبادلی ↔ نظم مغناطیسی

اصل طرد پائولی:

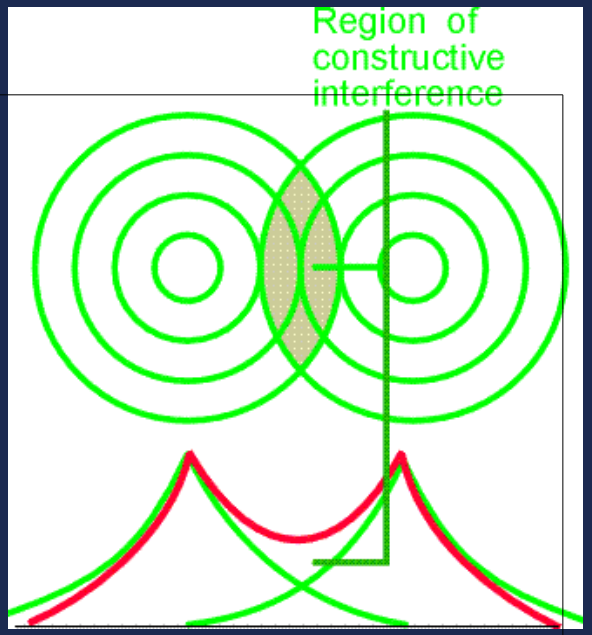
انرژی الکتروستاتیکی سیستم وابسته به جهت دو اسپین است. اختلاف انرژی دو حالت انرژی تبادلی است.



مثال:مولکول هیدروژن



تابع موج فضایی پادمتقارن
تابع موج اسپینی متقارن
S=1

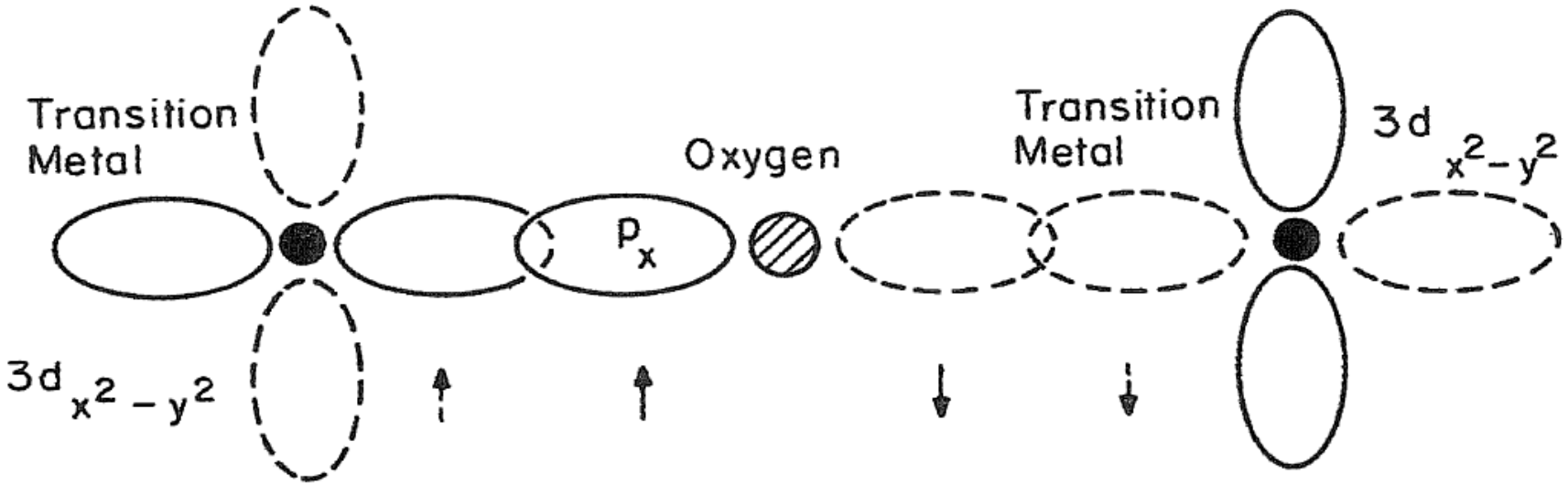


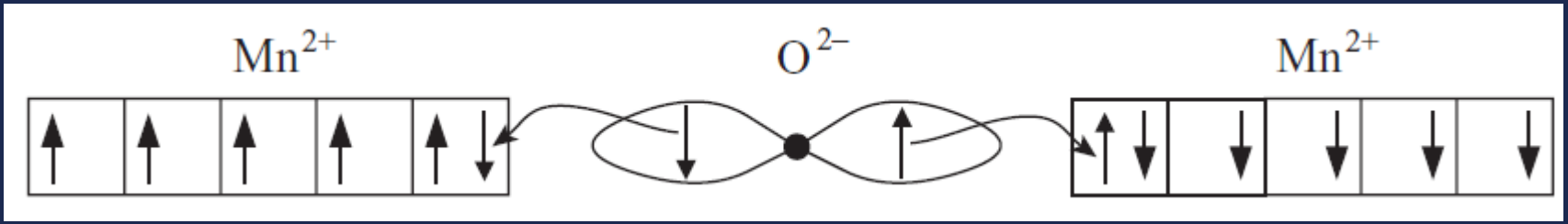
تابع موج فضایی متقارن
تابع موج اسپینی پاد متقارن
S=0

$$\mathbf{E(\uparrow\uparrow) > E(\downarrow\uparrow)}$$

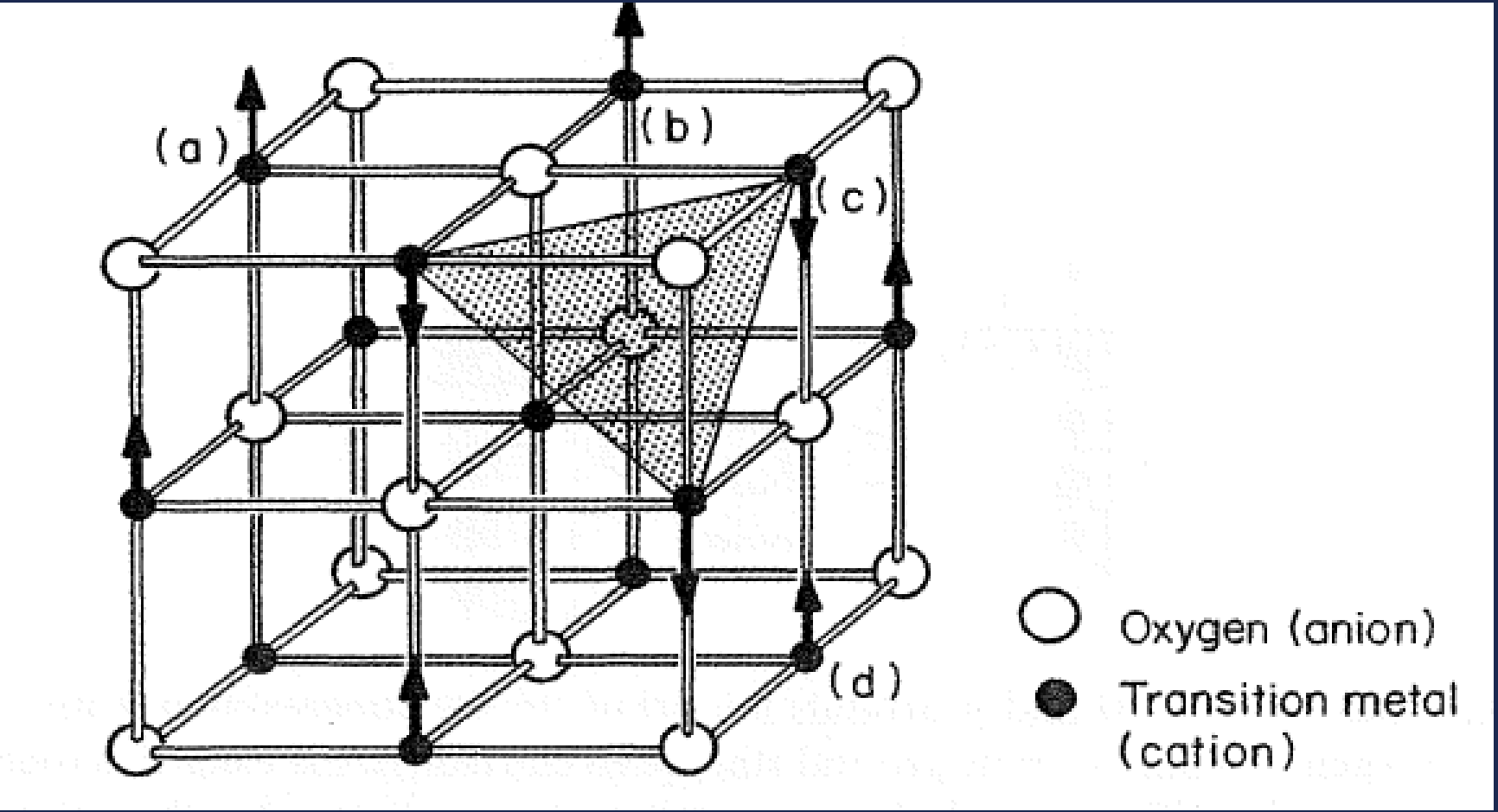
مثال برهمکنش تبادلی : اکسید منگنز (MnO) یک پادفرومغناطیس است

پادفرومغناطیس ها اکثرا دارای برهمکنش ابرتبادلی هستند.

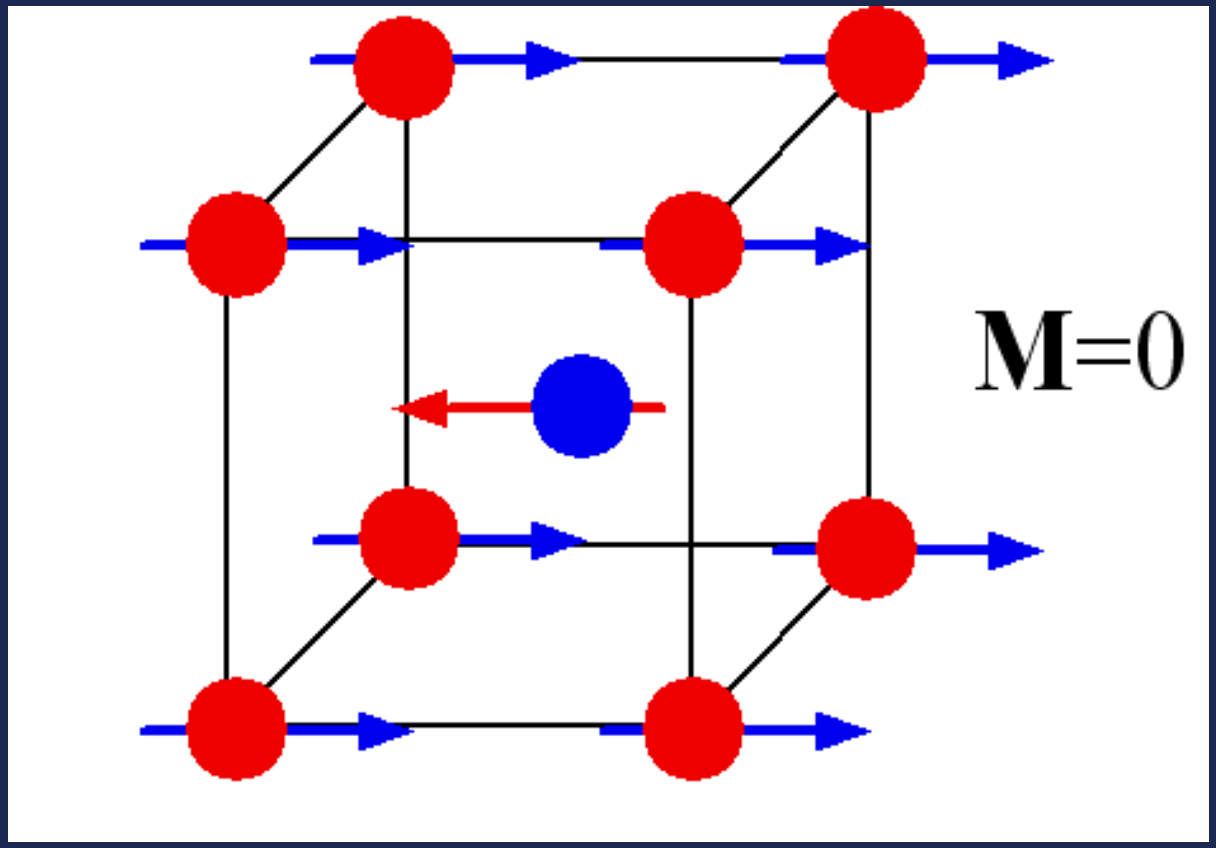




پادفرومغناطیس ها اکثرا عایق هستند.

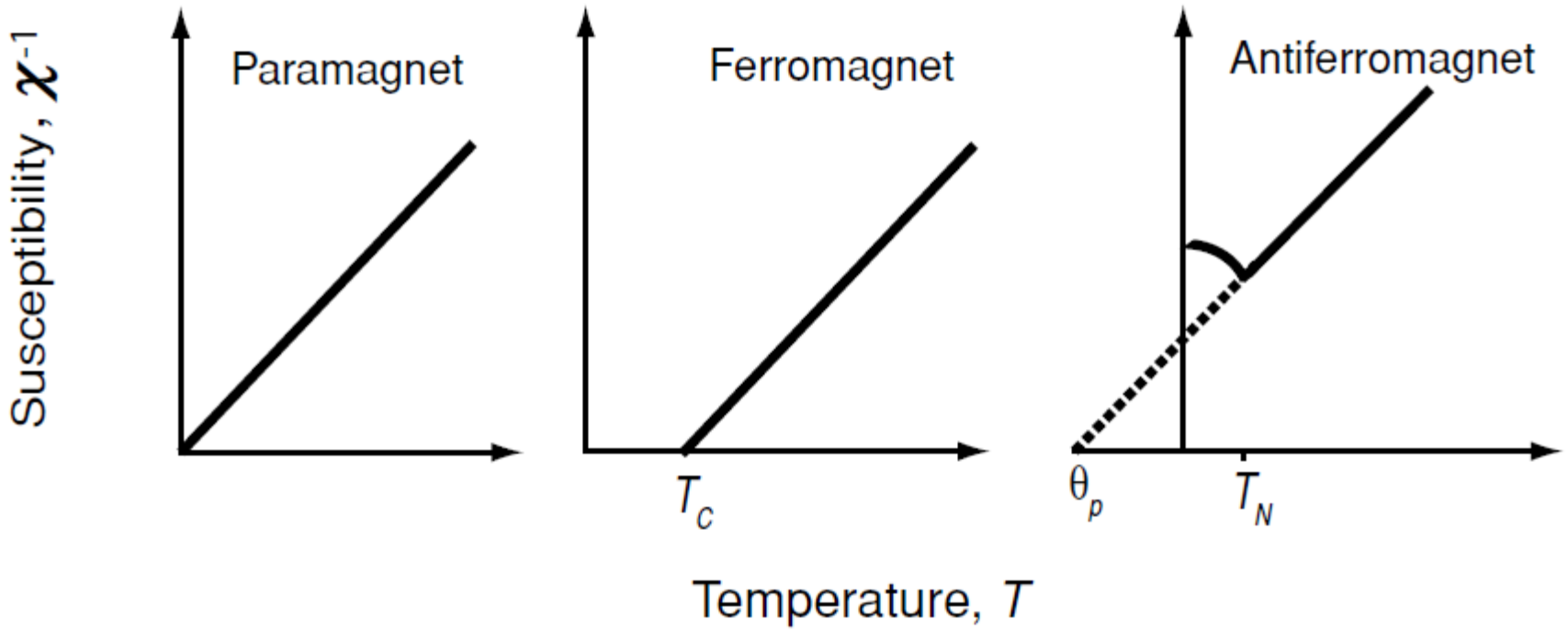


ساختار پادفرومغناطیس در MnO



BCC crystal (Cr)

دسته بندی حالتهای مختلف مغناطیسی



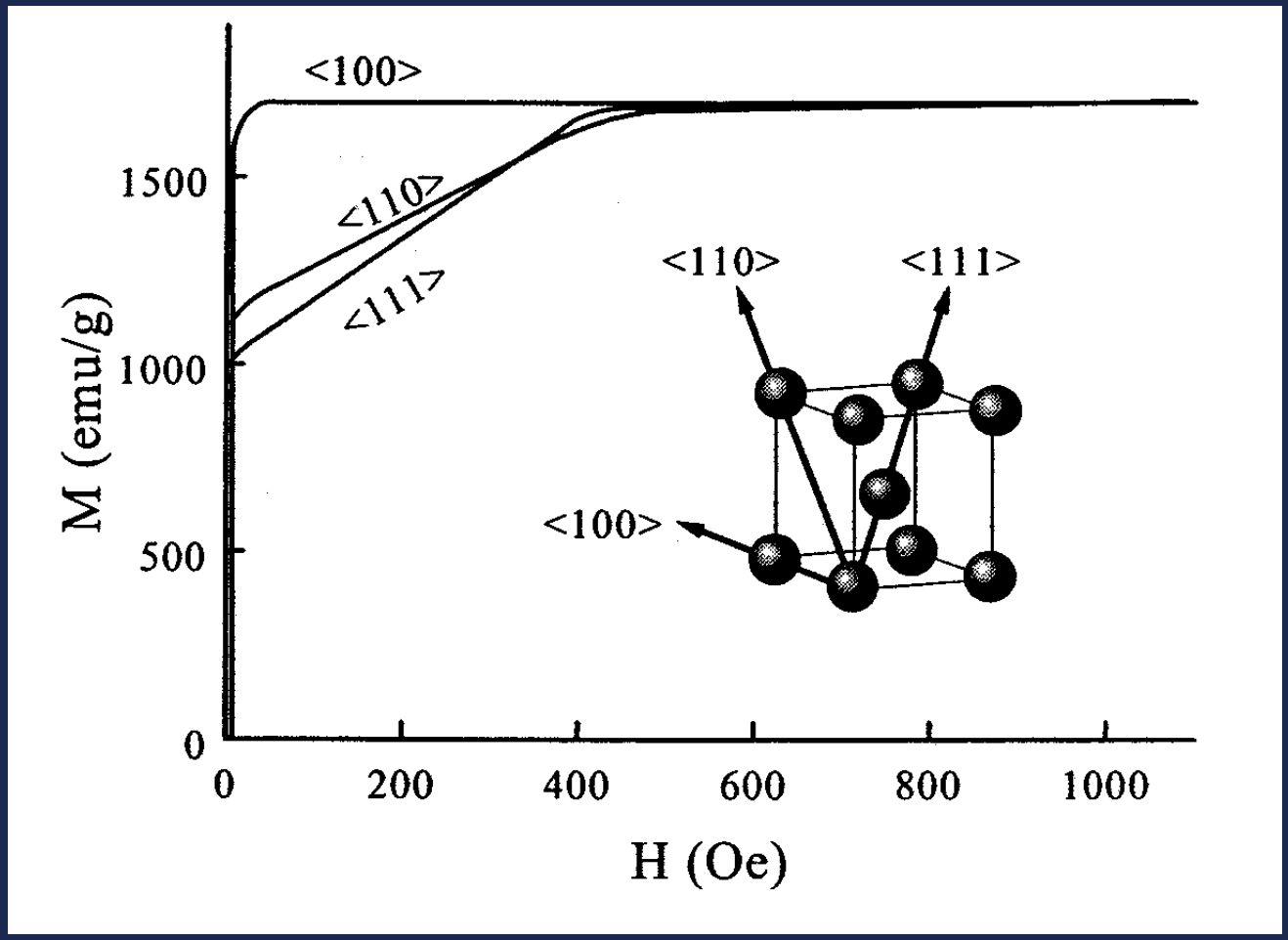
$$\chi = \frac{C}{T}$$

$$\chi = \frac{C}{T - T_C}$$

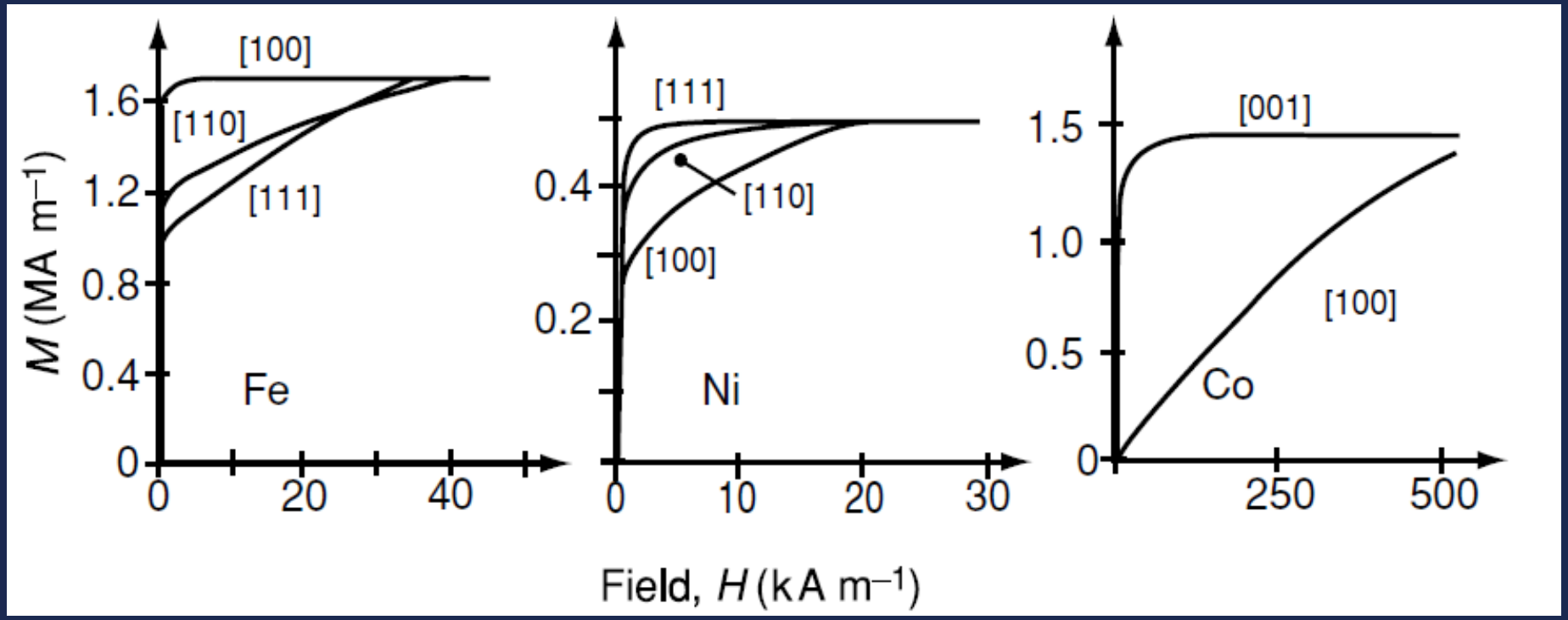
$$\chi = \frac{C}{T + \theta_P}$$

ناهمسانگردی مغناطیسی:

ممانهای مغناطیسی در فرومغناطیس ها و پاد فرومغناطیس ها در یک جهت خاص در بلور قرار می گیرند.



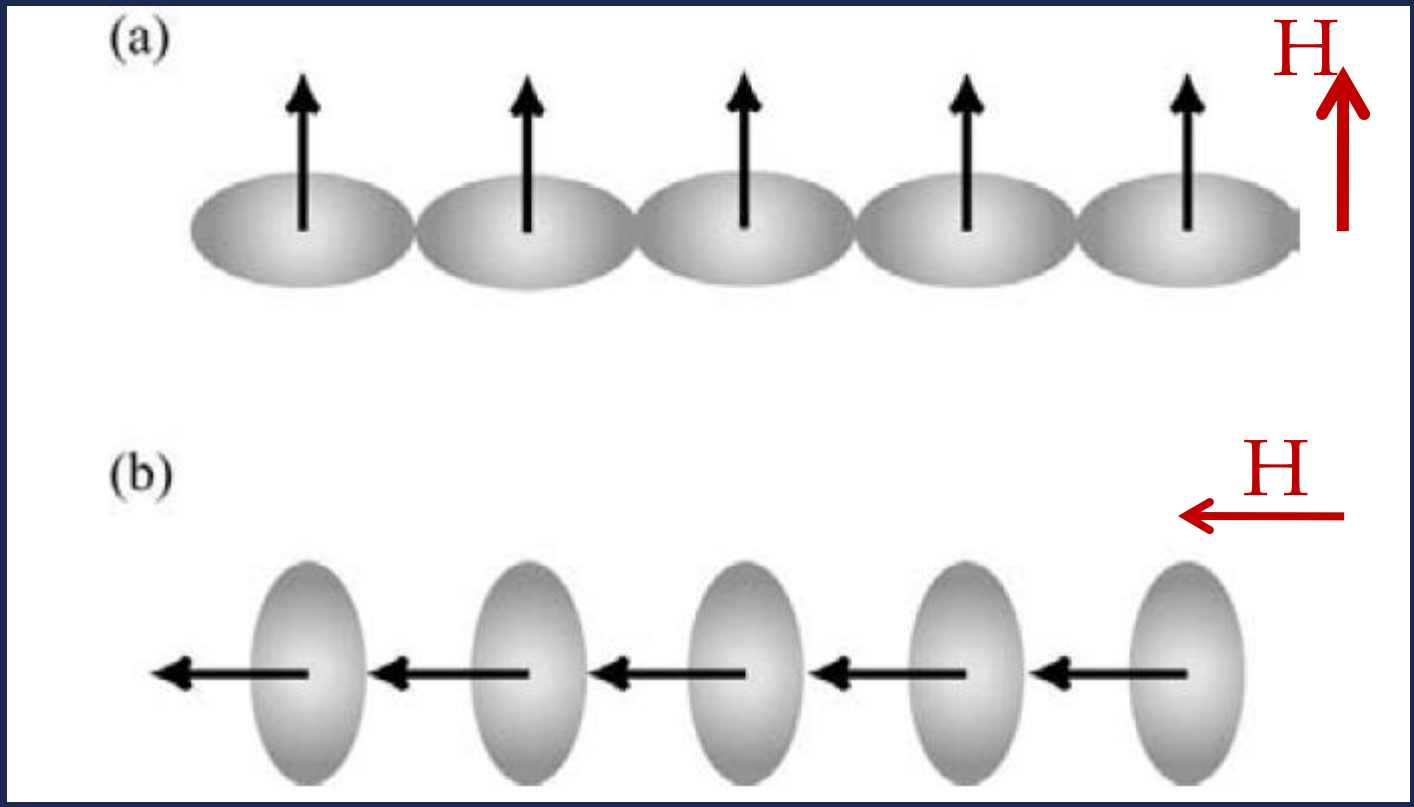
مغناطش بر حسب میدان برای آهن در جهتهای مختلف بلوری


[100]
[110]
[111]
1.6
1.2
0.8
0.4
0
Fe
0
20
40
[111]
[110]
[100]
0.4
0.2
Ni
0
10
20
30
[001]
[100]
1.5
1.0
0.5
0
Co
250
500
M (MA m−1)
Field, H (kA m−1)

ناهمسانگردی مغناطوبلوری:

منشا ناهمسانگردی اثر اسپین مدار است.

هنگامی که میدان مغناطیسی سعی می کند جهت اسپین را تغییر دهد، مدار نیز باید تغییر کند. اما مدار عموما مقید به شبکه است. بنابراین تلاش جهت تغییر محور اسپین با مقاومت روبرو می شود.

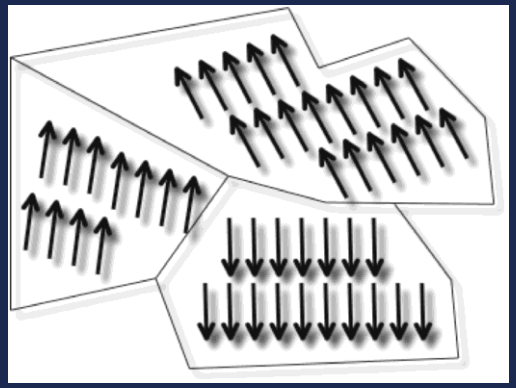


3d ← اسپین مدار ضعیف ← ناهسانگردی نه چندان قوی
4f ← اسپین مدار قوی← ناهسانگردی نسبتا قوی تر

سوال ۱: گادلونیم (Gd) یک فرومغناطیس است اما ناهمسانگردی مغناطو بلوری نشان نمی دهد. چرا؟

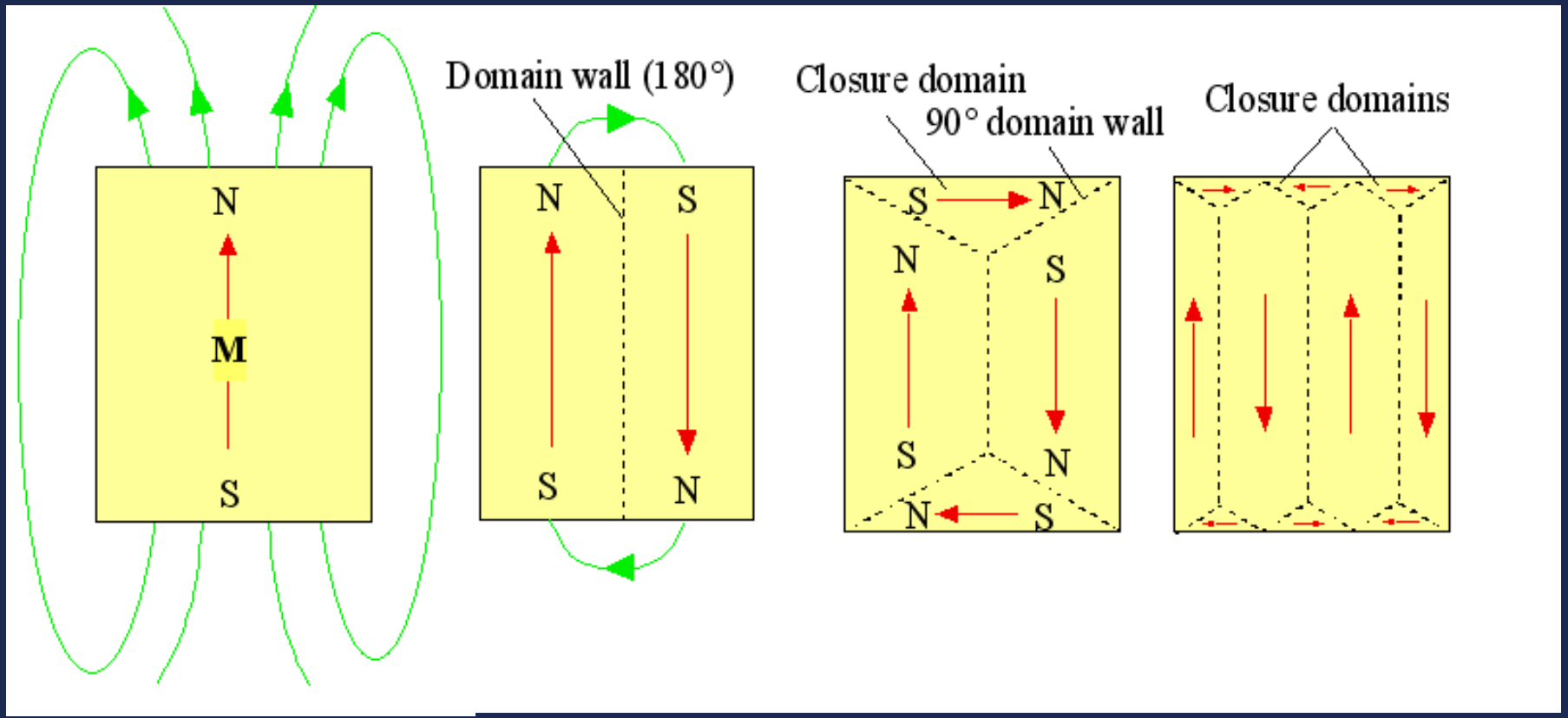
حداکثر فرصت پاسخگویی: پنجشنبه ساعت ۱۳

حوزه های مغناطیسی:

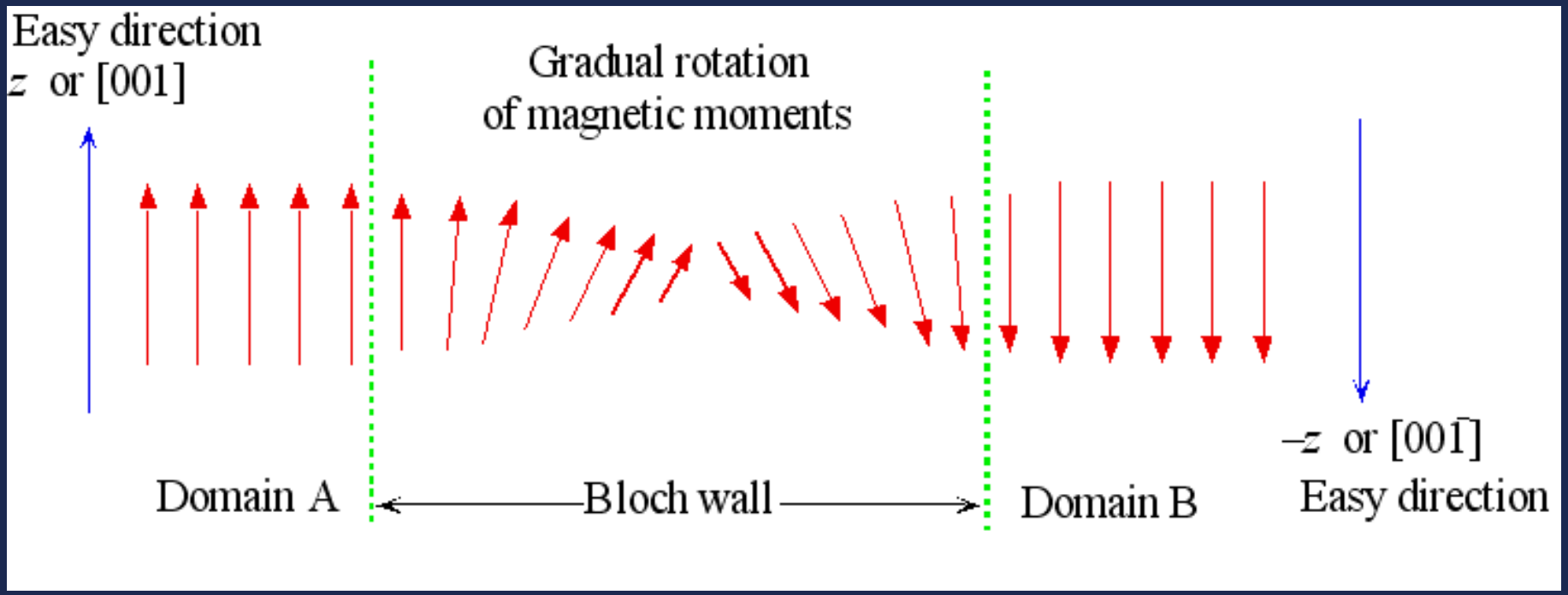


فرومغناطیس ها متشکل نواحی مغناطیسی به نام حوزه هستند.

چرا این اتفاق می افتد؟ کمینه شدن انرژی



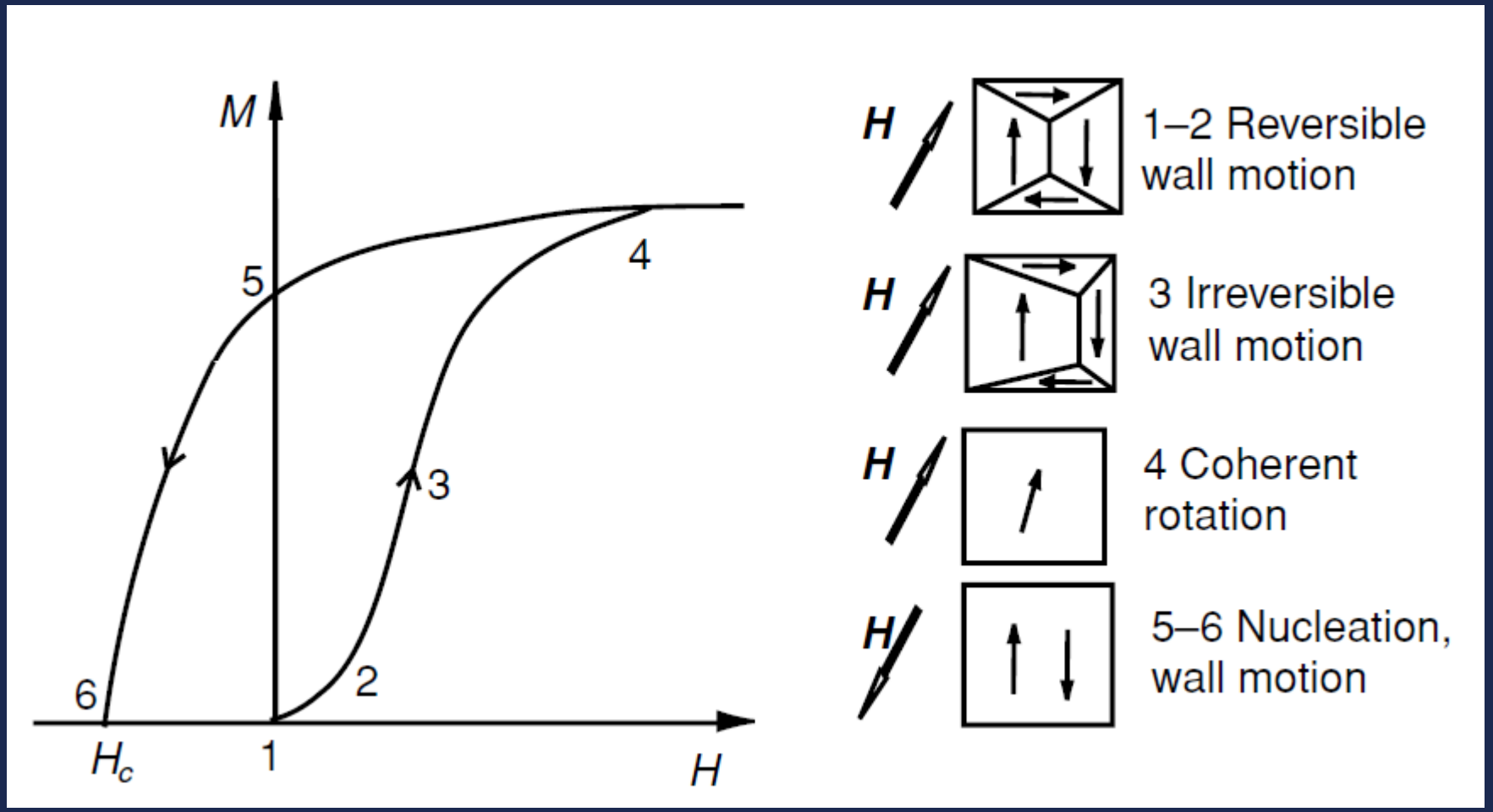
انرژی تشکیل دیواره+ انرژی مغناطواستاتیک=انرژی

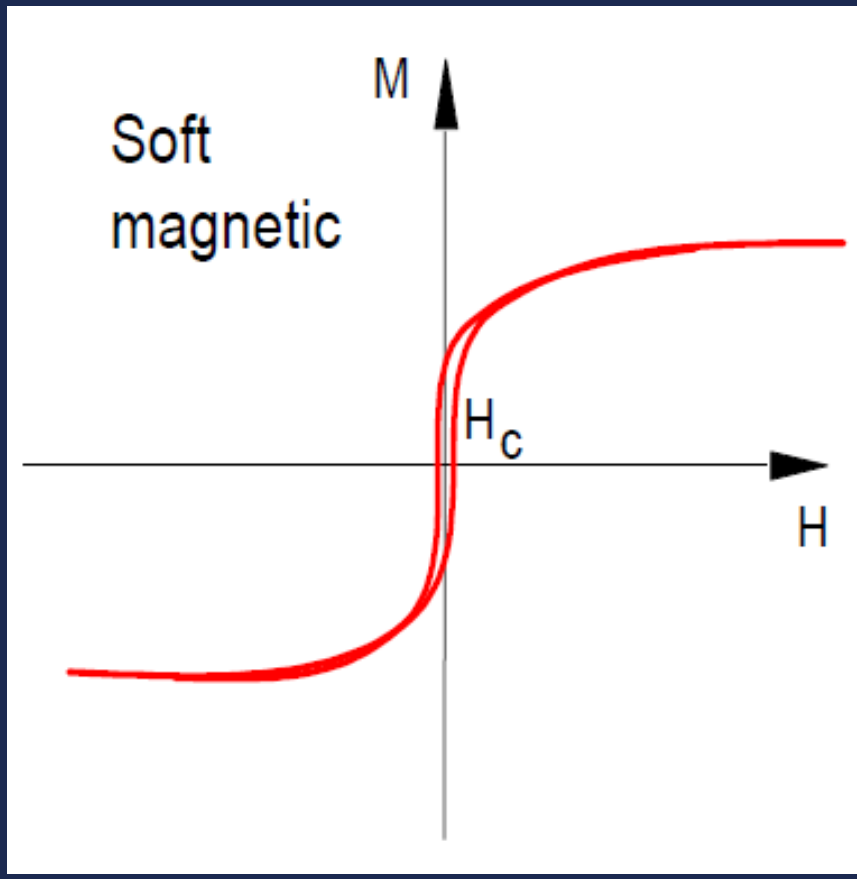


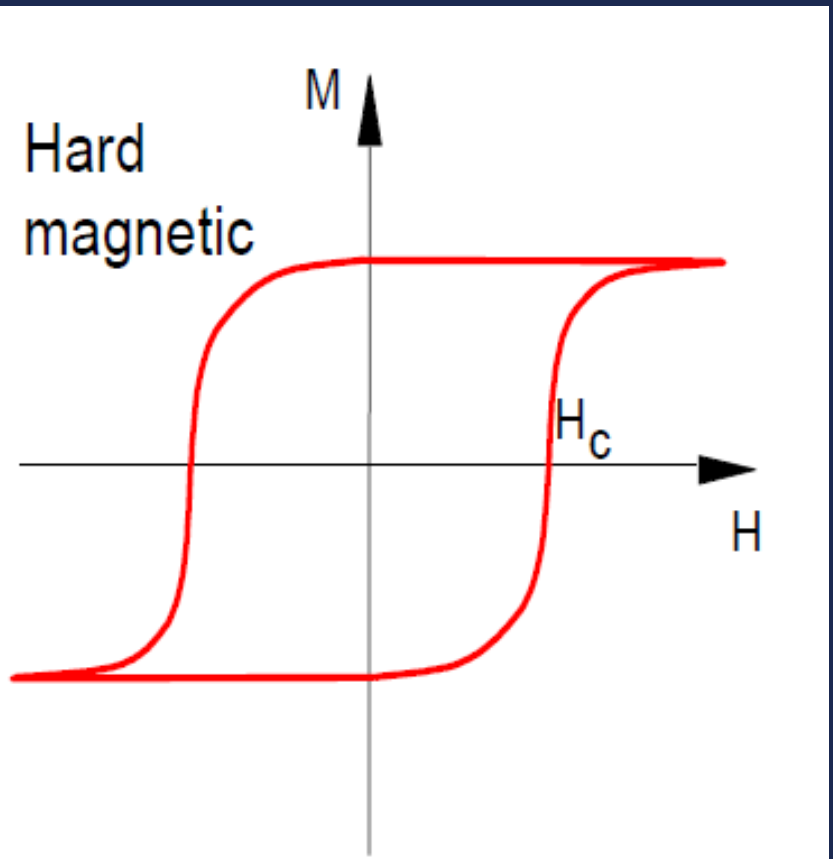
نمای تغییر جهت مغناطش در عرض یک دیواره مغناطیسی

حلقه پسماند

با اعمال میدان به یک فرومغناطیس برای حوزه های مغناطیسی چه اتفاقی رخ می دهد؟







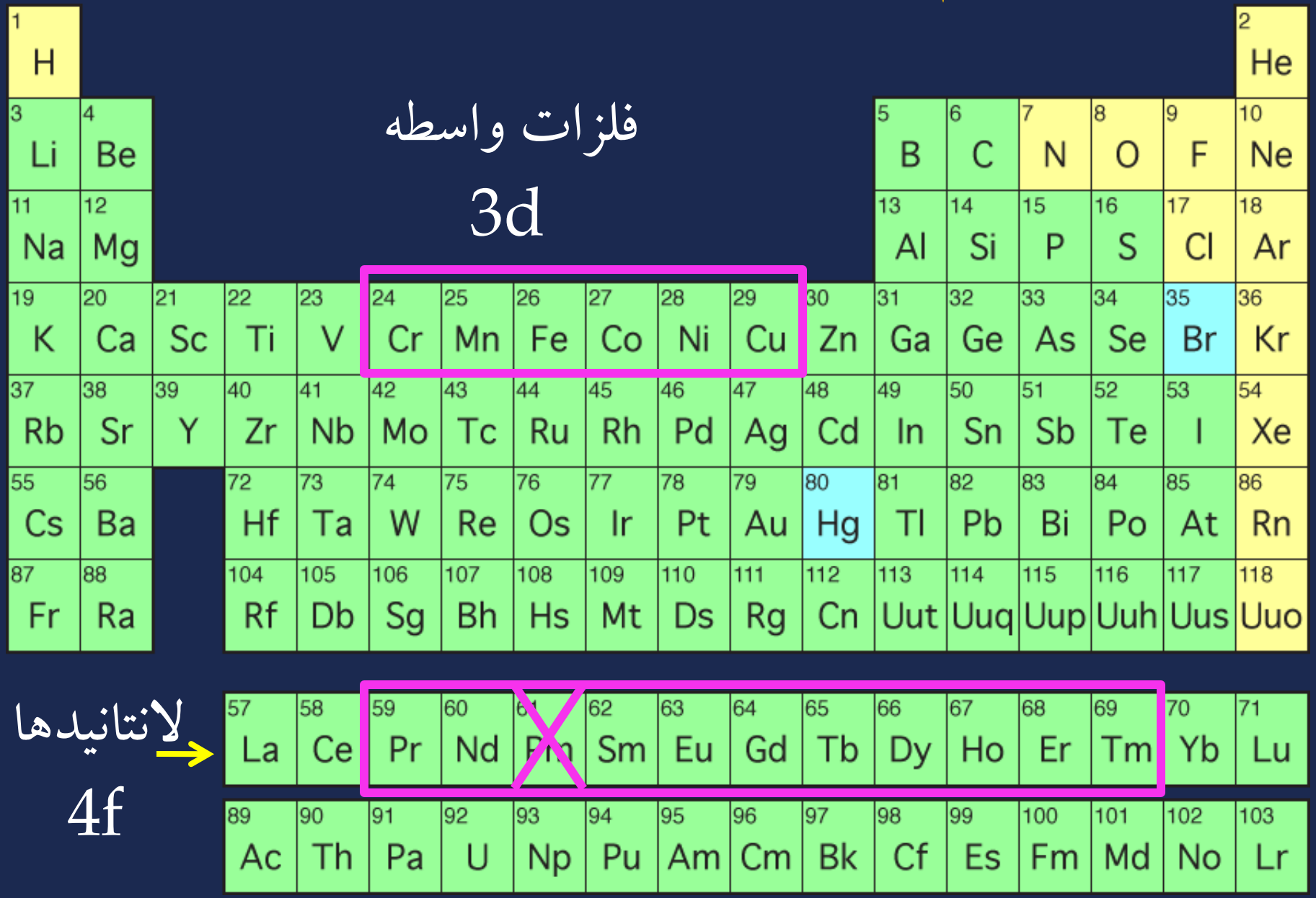
مواد مغناطیسی نرم:
- میدان وادارندگی کوچک
- مساحت حلقه کوچک

مواد مغناطیسی سخت:
- میدان وادارندگی بزرگ
- مساحت حلقه بزرگ

سوال ۲:
در فرومغناطیس ها انرژی مغناطواستاتیک باعث تشکیل حوزه های مغناطیسی می شود. در پادفرومغناطیس ها انرژی مغناطواستاتیک وجود ندارد، اما حوزه های مغناطیسی وجود دارند. چرا؟

حداکثر فرصت پاسخگویی: پنجشنبه ساعت ۱۳

مواد مغناطیسی مهم

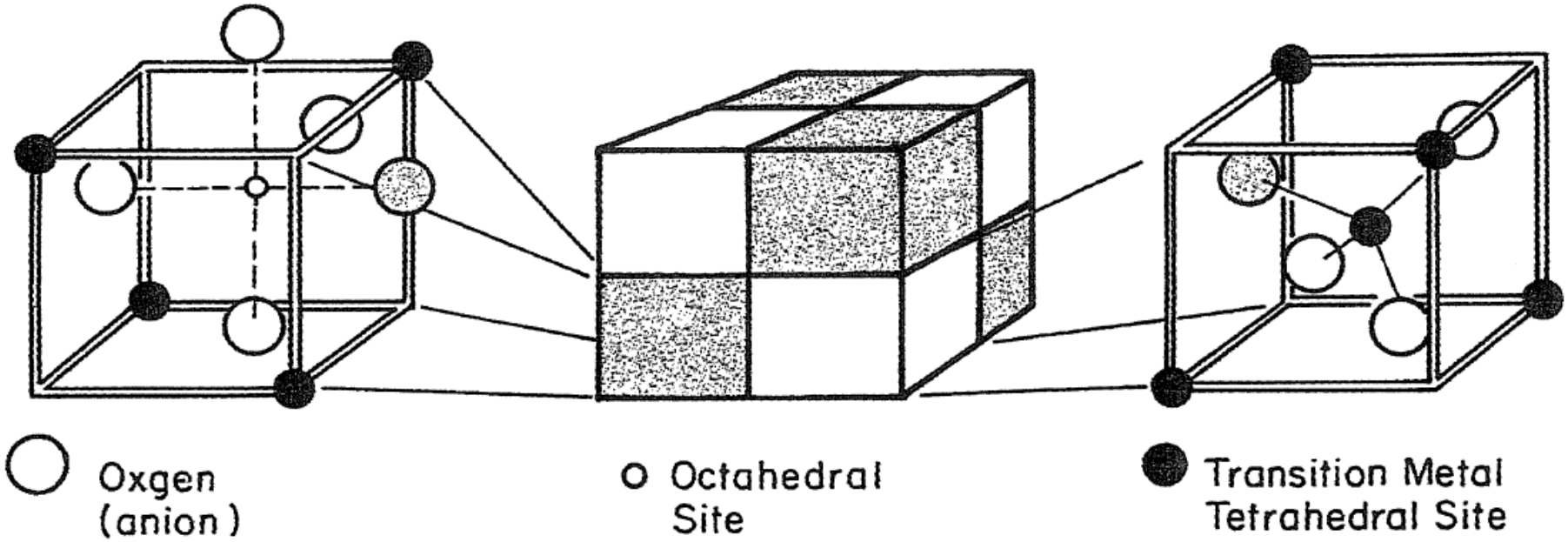


Fe_3O_4 (Magnetite)

فریتهای اسپینلی

تا دهه ۱۹۴۰ مگنتایت یک فرومغناطیس درنظر گرفته می شد.

یک یاخته واحد شامل هشت Fe_3O_4 است



جایگاه اکتاهدرال

$8Fe^{3+}$ $8Fe^{2+}$

جایگاه تتراهدرال

$8Fe^{3+}$

$m_{eff}(Fe^{2+}) = 4\mu_B$

$M[Fe_3O_4] = 4\mu_B$

MFe_2O_4 : M=Fe, Mn, Mg, Ni, Co, Zn

Ferrites	T_C(K)
Fe_3O_4	860
$MgFe_2O_4$	713
$MnFe_2O_4$	575
$NiFe_2O_4$	865
$CoFe_2O_4$	790
$ZnFe_2O_4$	T_N=9

آهنرباهای دائمی

فریتهای سخت : ($BaFe_{12}O_{19}$; $SrFe_{12}O_{19}$)

خاکی نادر: ($Nd_2Fe_{14}B$; $SmCo_5$)

Material	Remanence (Tesla)	Coercivity (kA/m)
$BaFe_{12}O_{19}$	0.42	275
$SmCo_5$	0.88	1750
$Nd_2Fe_{14}B$	1.28	1000

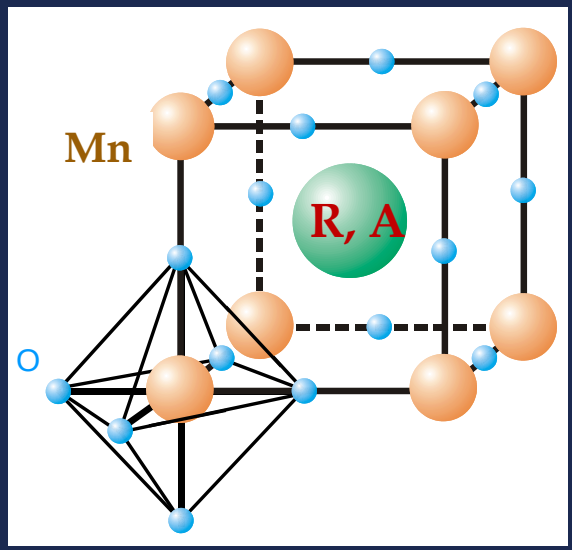
منگنایتها

$LaMnO_3$

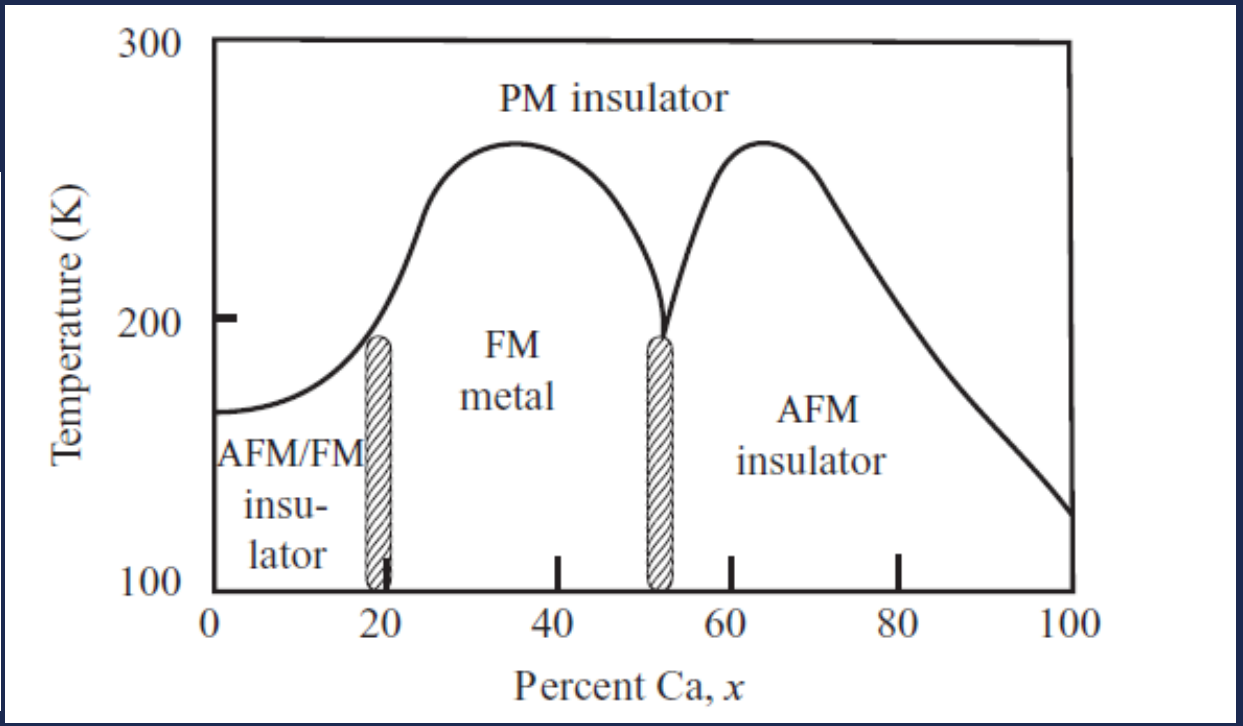
$La_{1-x}Ca_xMnO_3$ فرومغناطیس در یک مقدار خاص X

$0 \leq x \leq 1$ $La^{3+}_{1-x}Ca^{2+}_{x}Mn^{3+}_{1-x}Mn^{4+}_{x}O_3$

ساختار پروسکایتی ساده



نمودار فاز منگنایت بر حسب دما و آلایش



تو هر گوهر که می‌بینی بجو دُری دگر
وی
که هر ذره همی گوید که در باطن دفی

با تشکر از حضور و توجه شما