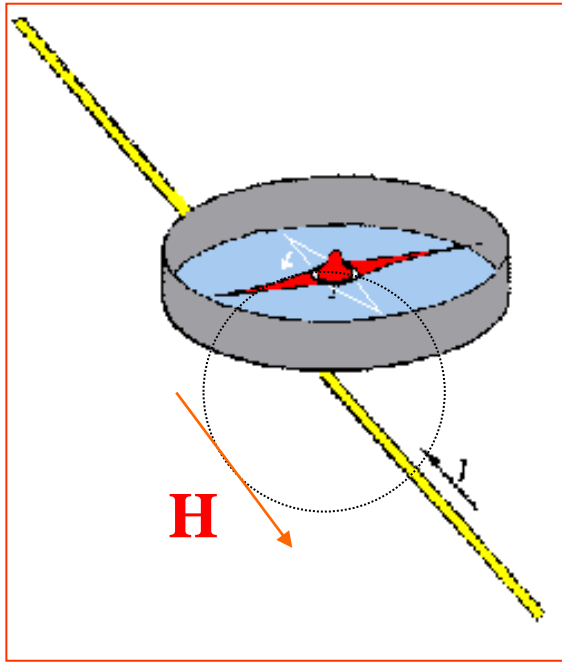


# **Capítulo 2 - Conceitos e Unidades do Eletromagnetismo**



# Elétrons em movimento criam campo magnético



A bússola se alinha perpendicularmente ao fio quando passa uma corrente elétrica.

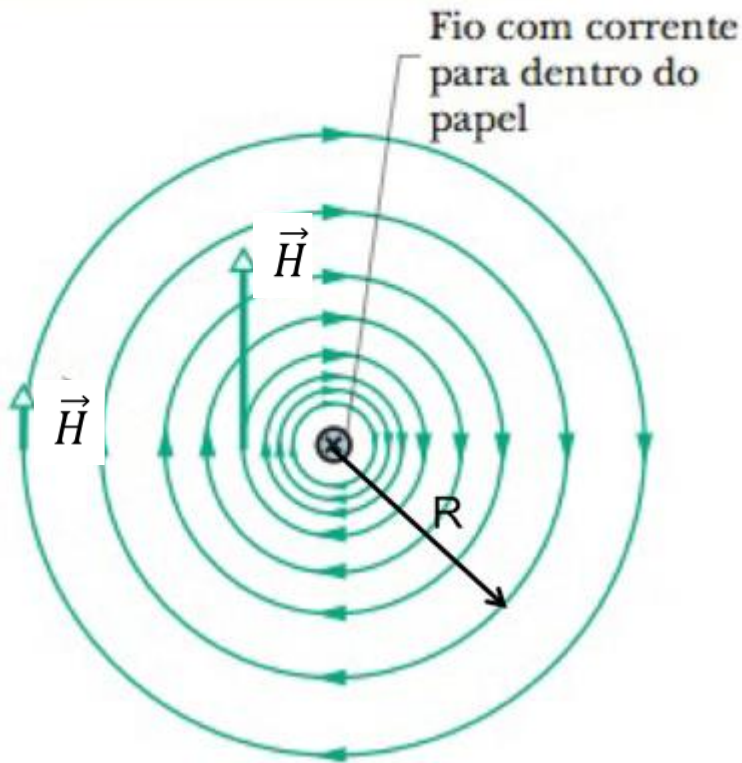
Dizemos que o ímã se alinha ao campo magnético criado pela corrente elétrica.

A palavra "campo" foi usada pela primeira vez em 1848, por Michael Faraday.

A ligação entre eletricidade e magnetismo, só foi percebida em 1820, por Hans Oersted, exatamente nesse experimento

# O campo magnético H

O vetor campo magnético é sempre tangente a uma circunferência.



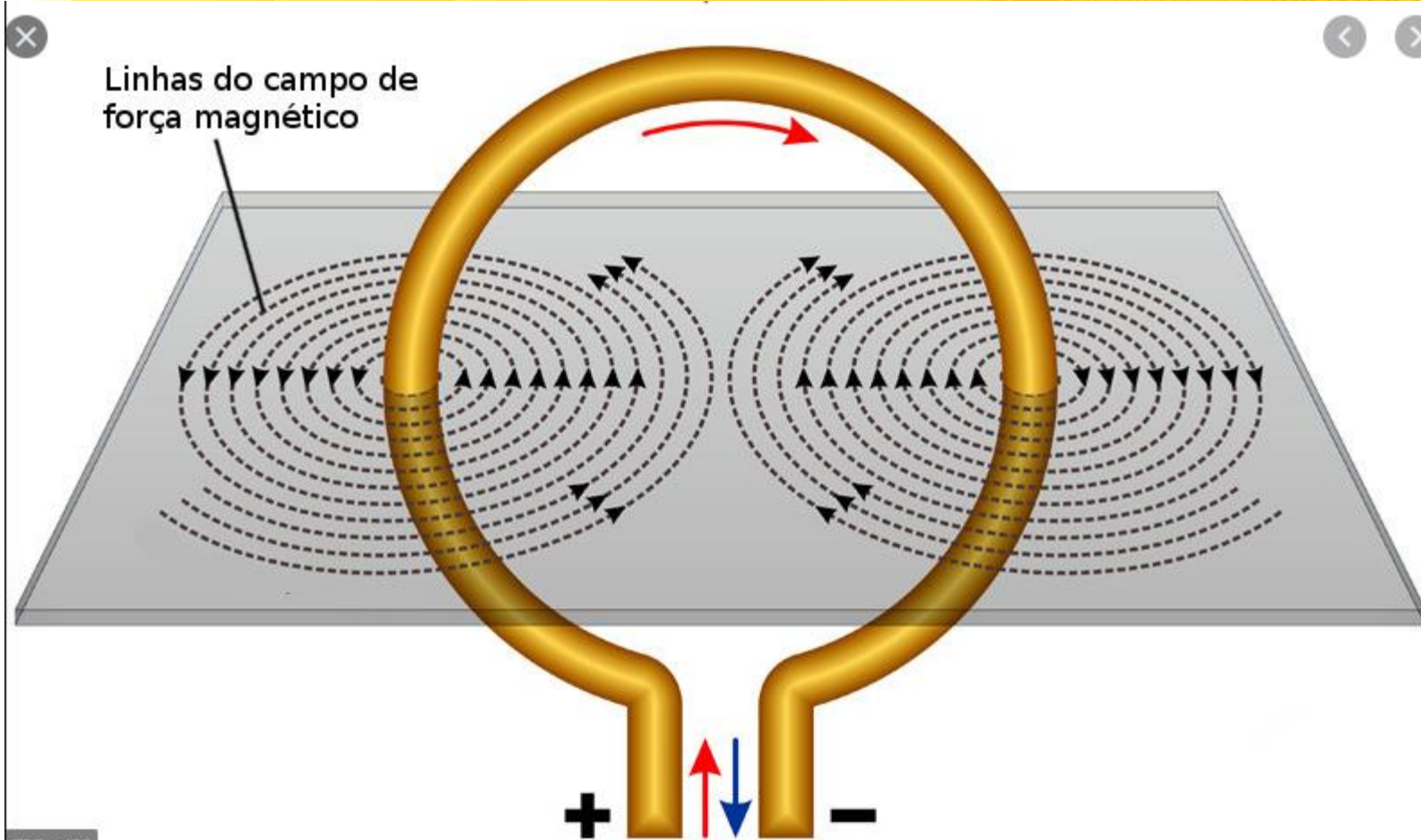
O campo magnético  $H$  criado por uma corrente  $i$  num fio infinitamente longo cai com a inverso da distância do fio

$$\vec{H} = \frac{i}{2\pi R} \left( \frac{A}{m} \right)$$

Outra consequência é que a qualquer distância  $H \cdot 2\pi R = i$ , ou a lei de Ampere

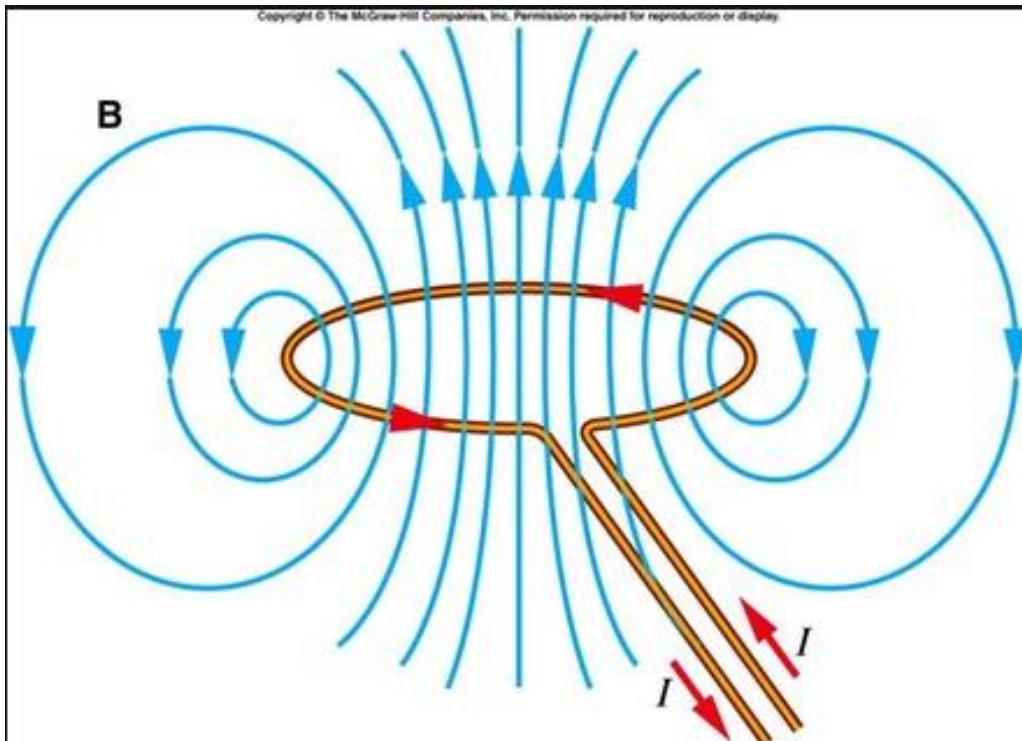
$$\oint H dl = i$$

# O campo magnético de um fio enrolado



Os campos se alinham no interior da espira

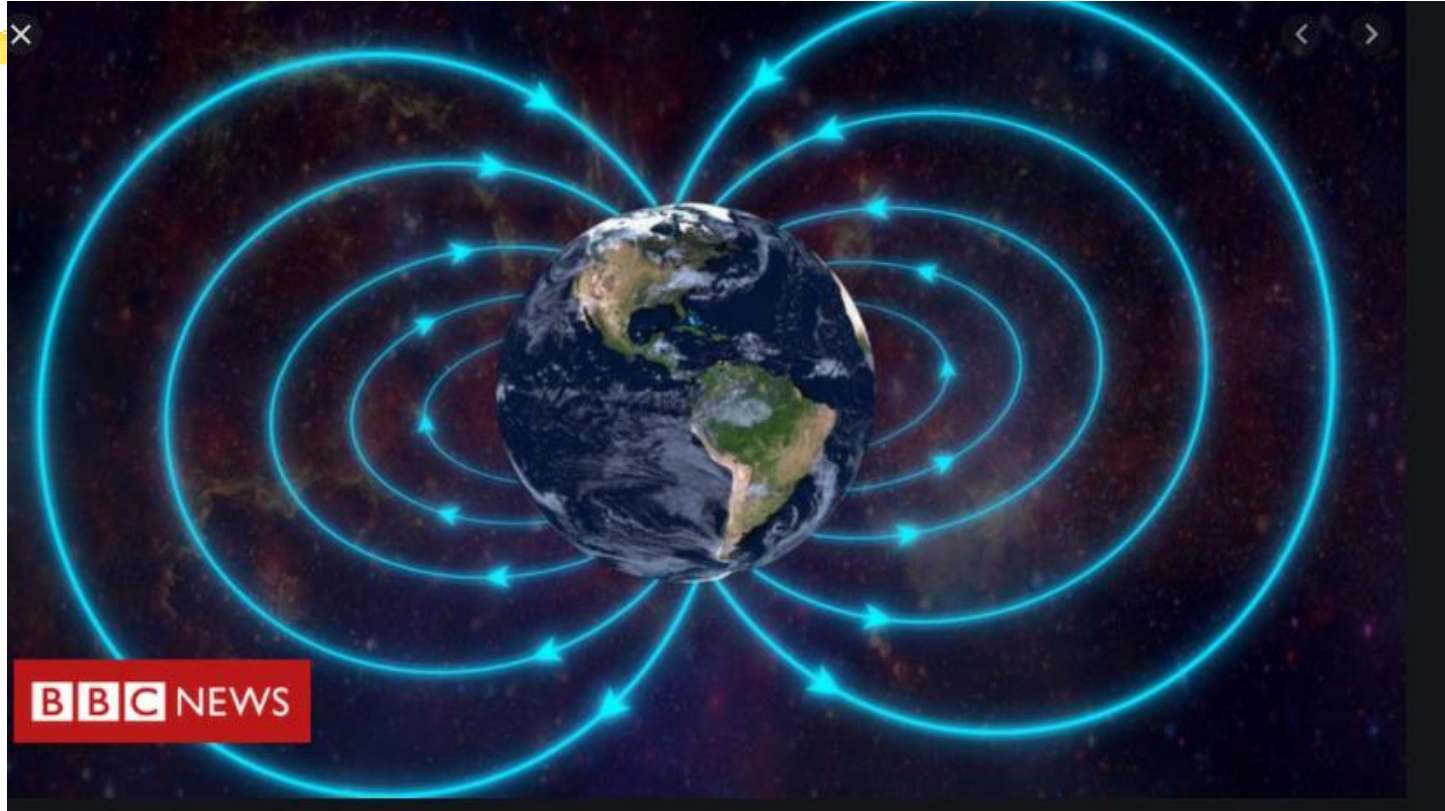
# O dipolo magnético



Esse é o campo magnético dipolar. Temos aí um lado em que o campo “sai”, que vamos chamar de polo Norte, e um lado em que o campo “entra”, que é o polo Sul.

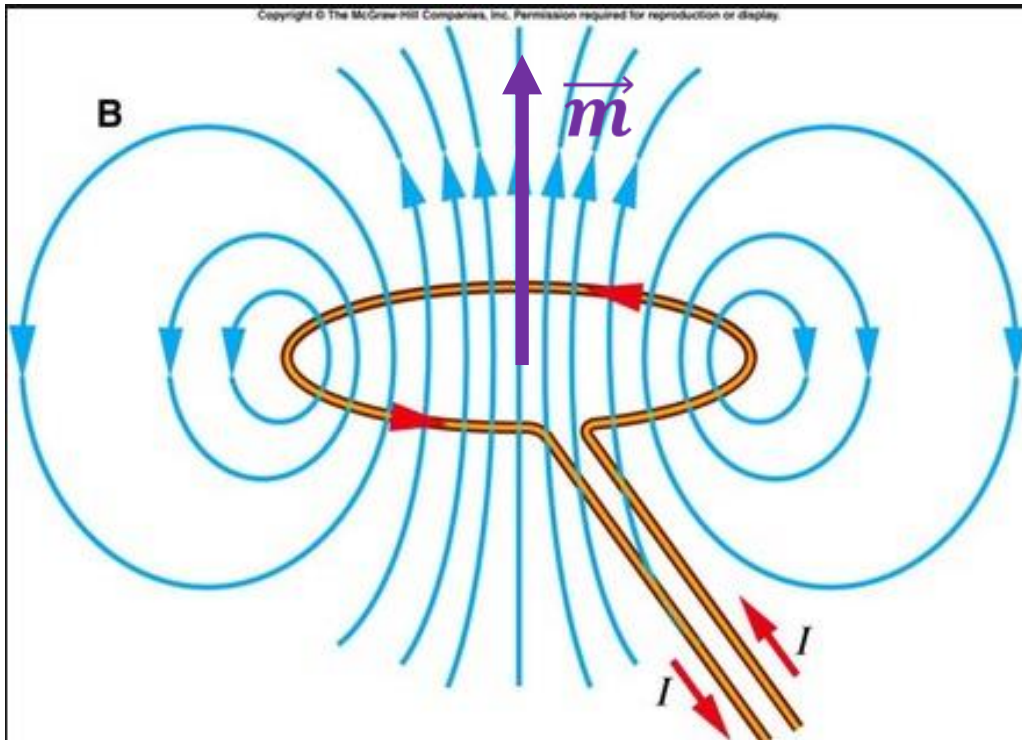
# Ahn, esse é o campo da Terra?

Mas o campo magnético não sai do Norte e vai pro Sul?



A confusão nasceu com a agulha da bússola. Nela, foi definido que polo norte é o lado que aponta para o norte. Se o polo norte magnético da bússola aponta para o norte, então lá no Canadá fica o polo SUL magnético da Terra...

# momento de dipolo magnético



$$\vec{m} = A \cdot i \vec{e}$$

$A$  = área da espira

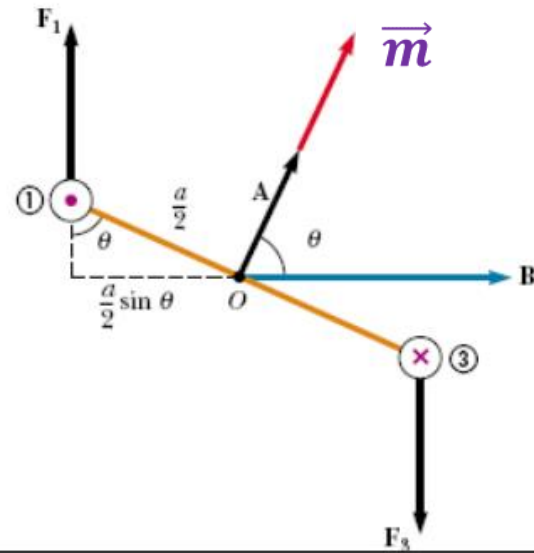
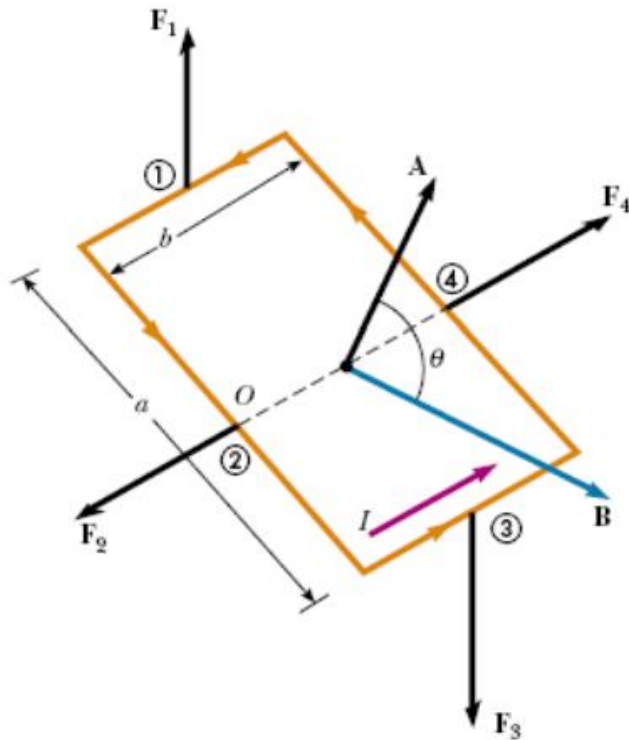
$i$  = corrente elétrica

$\vec{e}$  = versor normal ao plano da corrente

# Torque

Temos uma espira retangular percorrida pela corrente  $I$

Imersa num campo magnético  $B$



$\tau =$

Essa espira vai sofrer um torque, causado pelas forças  $F_1$  e  $F_3$

$$\vec{\tau} = \vec{m} \times \vec{B}$$

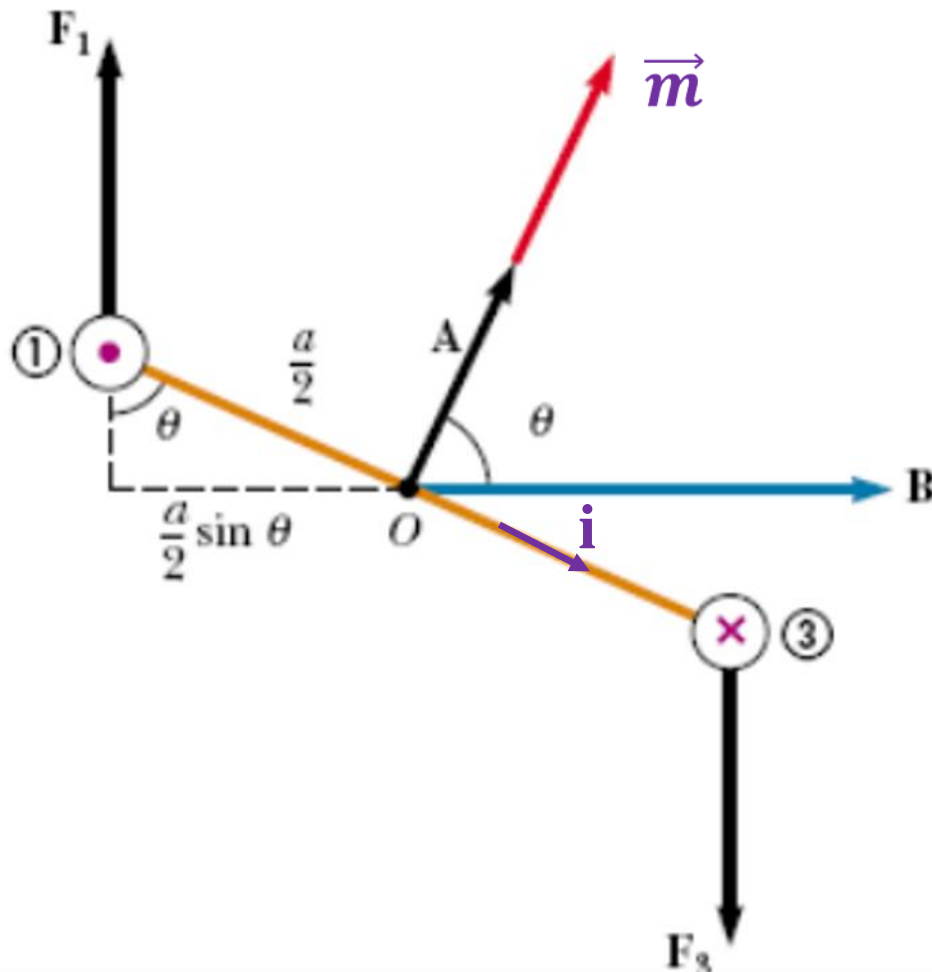
$$\vec{\tau} = Am^2 \cdot Vs/m^2$$

$$\vec{\tau} = VAs = J = Nm$$

Se nada impedir, a espira girará até que seu momento magnético fique paralelo ao campo  $B$



# Energia potencial magnetostática



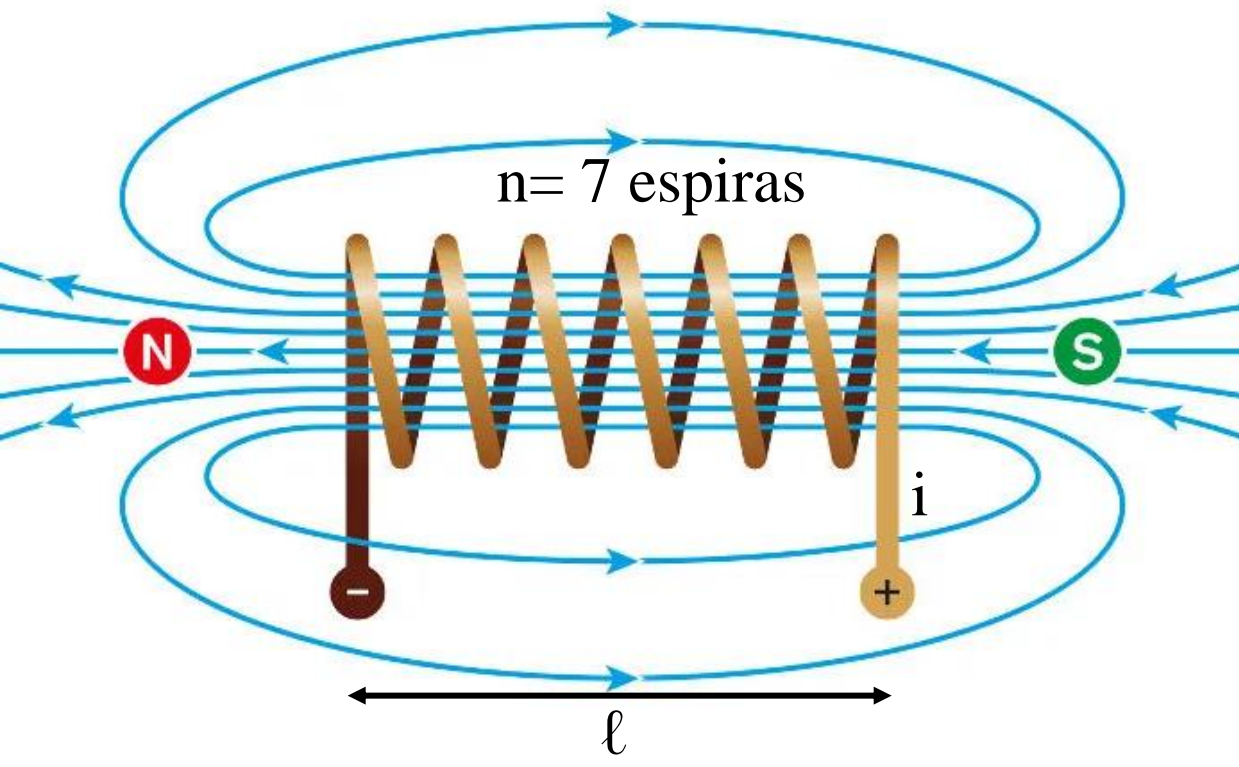
Podemos falar também de uma energia potencial acumulada quando  $M$  não está paralelo a  $B$

$$U = - \vec{m} \cdot \vec{B} = - mB \cos \Theta \quad (J)$$

$$\text{Qdo } \vec{m} // \vec{B} \quad U = - iAB$$

É o menor valor, o mais negativo que pode vir a ser.

# O campo magnético H de uma bobina



No interior da bobina

$$H = \frac{nI}{\ell}$$

# Magnetismo cria eletricidade

## □ Indução Magnética

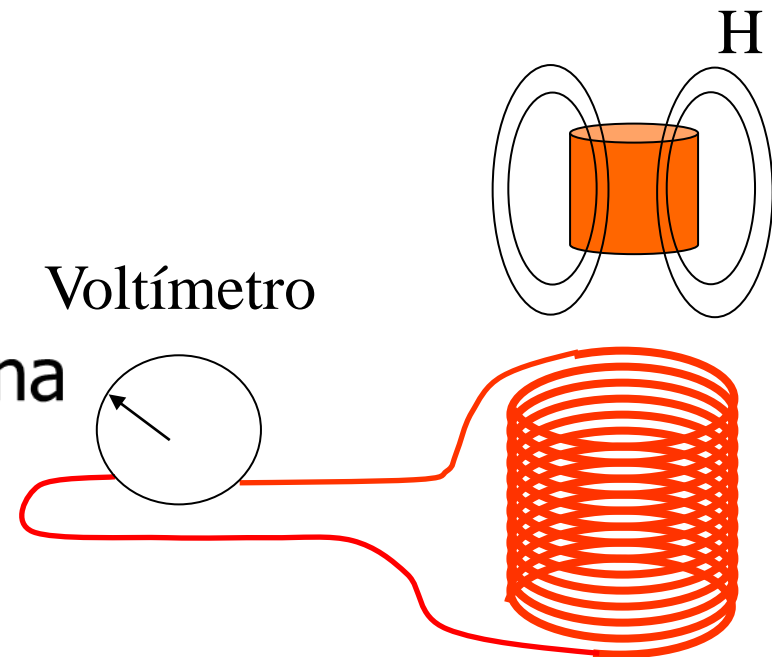
□ f.e.m. =  $B \cdot \ell \cdot v$

□ B indução do ímã

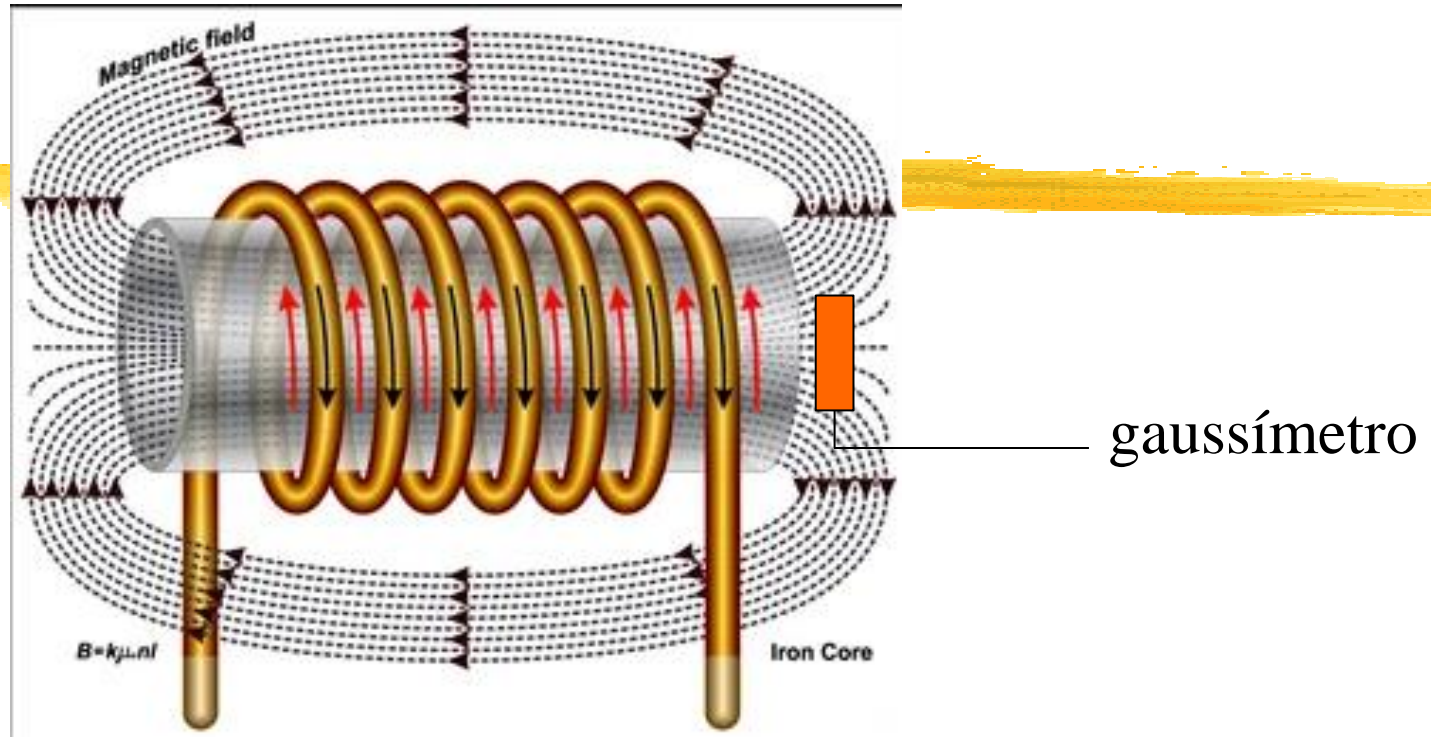
□  $\ell$  comprimento da bobina

□ V velocidade do ímã

□ fem =  $\frac{Vs}{m^2} \cdot m \cdot \frac{m}{s} = V$



1831 - Faraday



Passando uma corrente pelo solenóide,  
Um medidor de campo (um gaussímetro)  
detecta B na saída do solenóide

# Curvas de magnetização

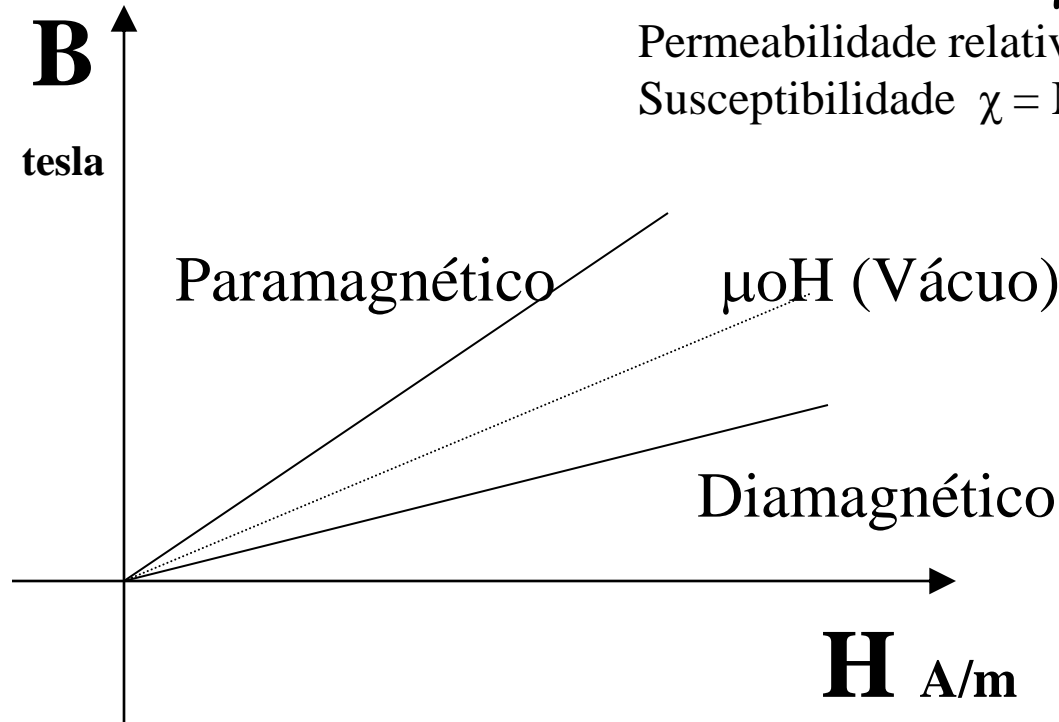
$$B = \mu_0 \cdot H + \mu_0 \cdot M$$

O que tem dentro do solenóide

Caso 1: vácuo

Caso 2: cobre

Caso 3: alumínio



Permeabilidade  $\mu = B/H$

Permeabilidade relativa  $\mu_r = \mu / \mu_0$

Susceptibilidade  $\chi = M/H$

1873 - Rowland

# Curvas de magnetização

$$B = \mu_0 \cdot H + \mu_0 \cdot M$$

Permeabilidade  $\mu = B/H$

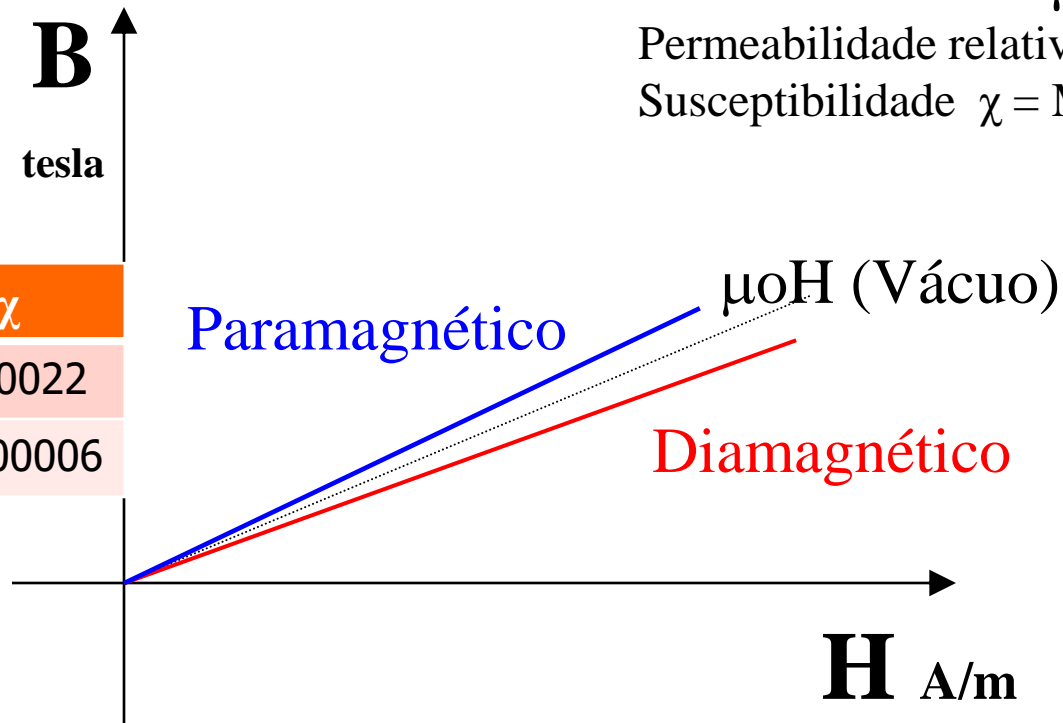
Permeabilidade relativa  $\mu_r = \mu / \mu_0$

Susceptibilidade  $\chi = M/H$

O que tem dentro do solenóide

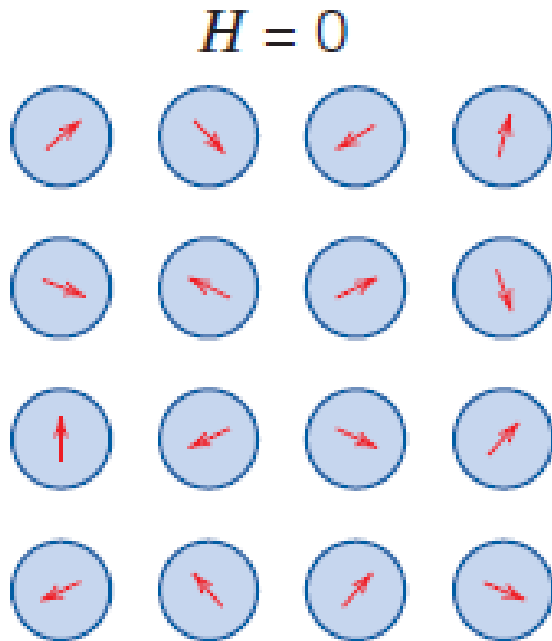
Caso 1: vácuo

	$\mu_r$	$\chi$
Al	1.000022	0,000022
Cu	0.999994	-0,000006



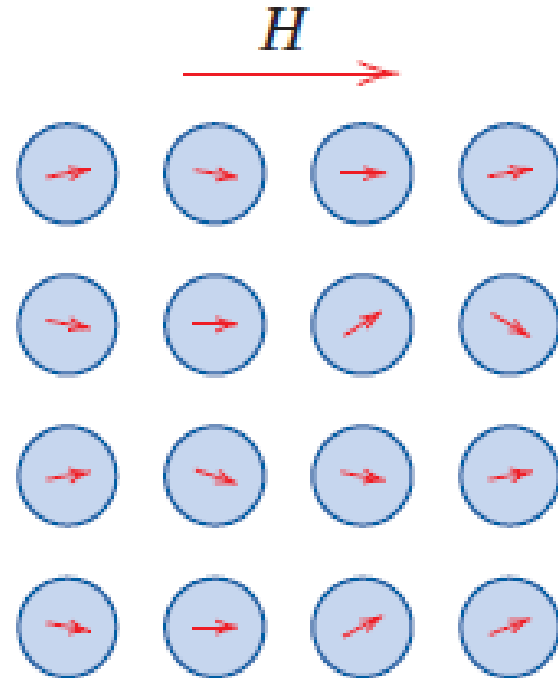
1873 - Rowland

# Paramagnetismo



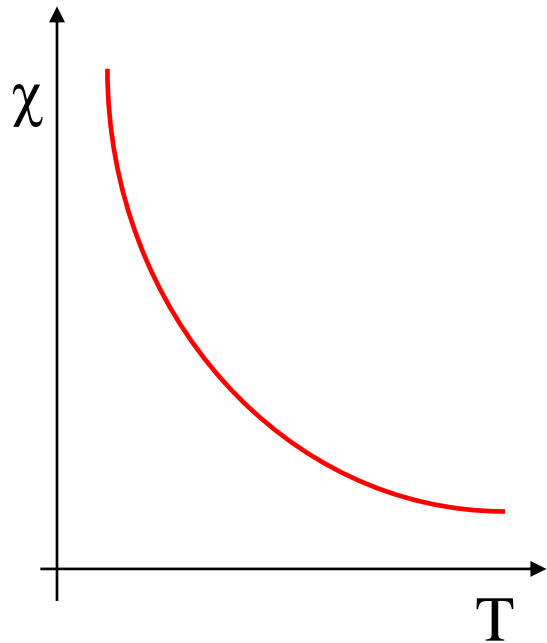
Mesmo quando  $H=0$ , cada átomo tem  $\vec{m}$ , mas não tem orientação preferencial  
 $\sum \vec{m} = 0$

(b)

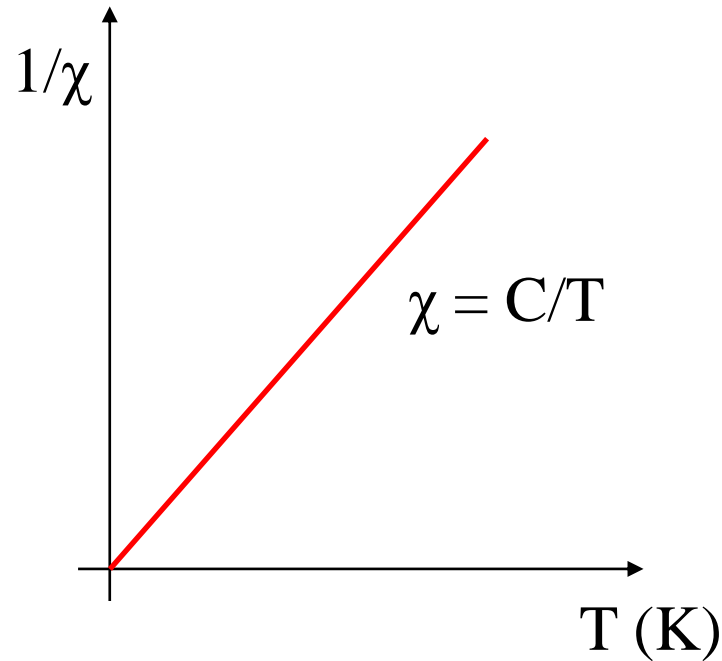


Aplicando  $\vec{H}$  existe uma fraca tendência de alinhamento (desenho exagera muuuuito)

# Efeito da temperatura no paramagnetismo



Susceptib. cresce no resfriamento

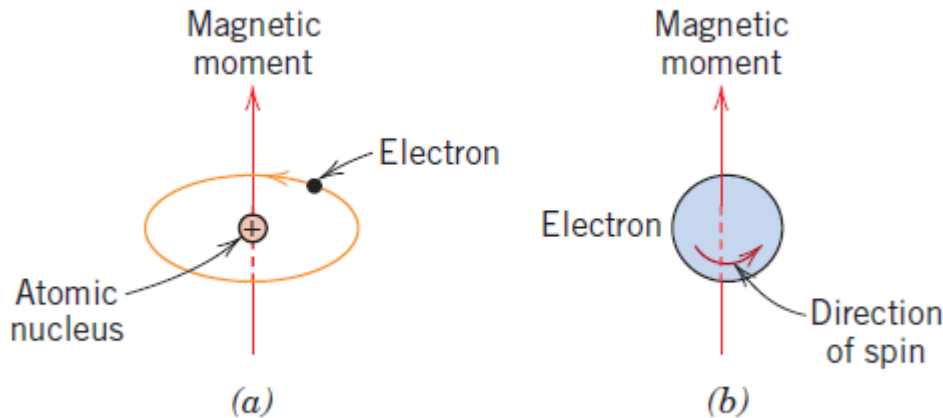


Aguarde:  
Isso voltará no  
ferromagnetismo



# Qual a origem do magnetismo da matéria, o “M”?

$$\mu_B = \frac{\hbar e}{2m} = 9,27 * 10^{-24} \text{ Am}^2$$



$\hbar$  const Planck  
e carga eletron  
M massa eletron

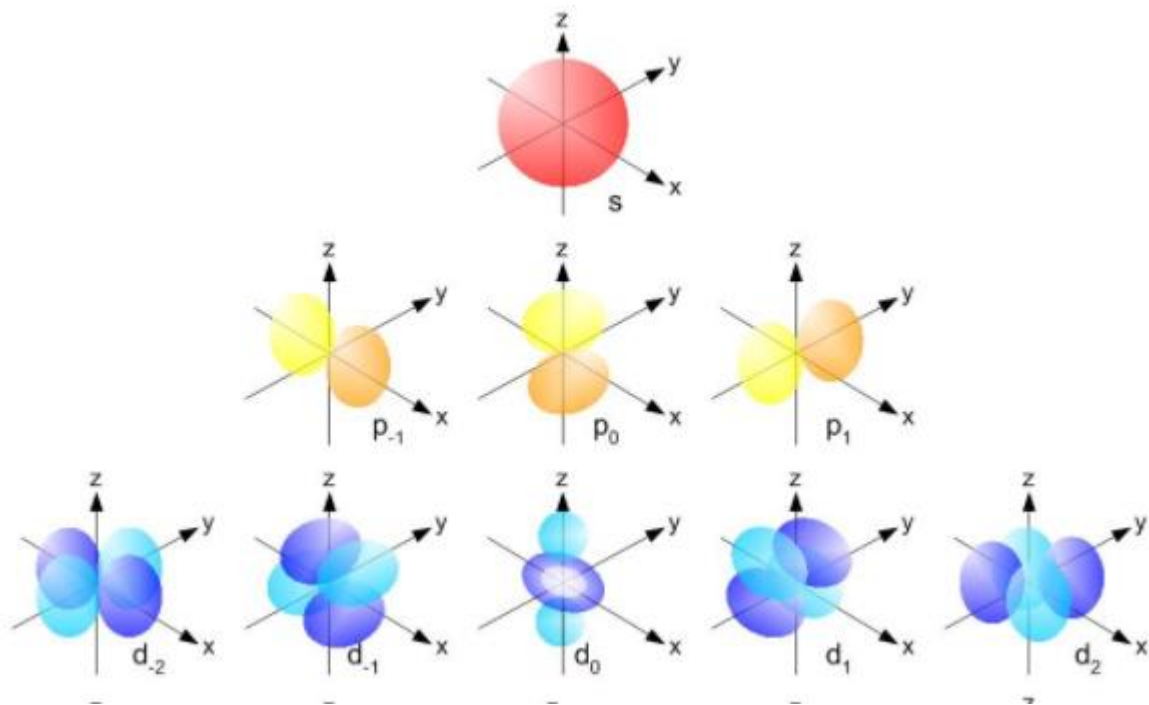
Átomos tem elétrons que giram em torno do núcleo:

Eles têm Momento magnético?

Experimentos mostraram que um elétron livre tem momento magnético!

Então ele gira em torno de si mesmo!

# De onde vem o momento magnético atômico?



Os elétrons ficam em orbitais s, p, d, f. Em cada orbital só podem existir dois elétrons,  $\uparrow$  ou  $\downarrow$ .

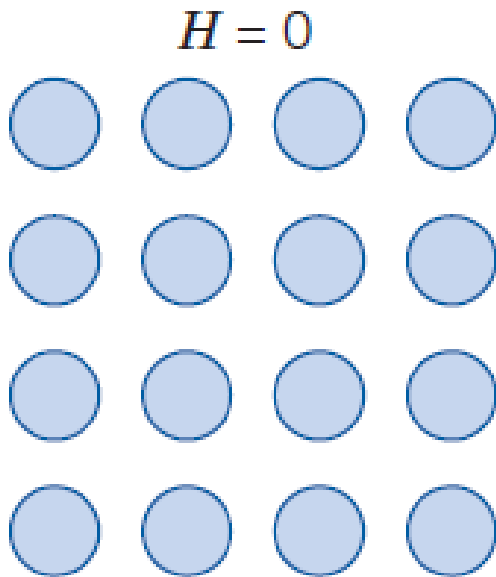
“Orbitais preenchidos”, ou seja, com dois elétrons, zeram o momento magnético.

Portanto, o momento magnético atômico vem de orbitais desemparelhados.

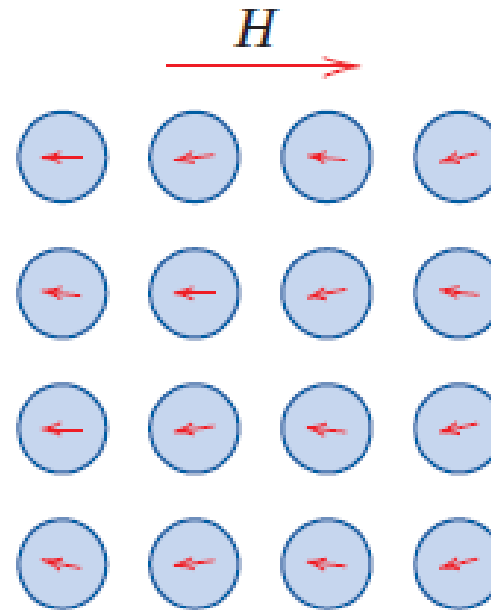
# E os gases nobres, que tem todos orbitais preenchidos?

- Não tem momento magnético atômico!
- No entanto, reagem ao campo magnético!
- Na verdade, todos os orbitais tem a reação diamagnética: quando um campo é aplicado, os elétrons de todos os orbitais reagem como se fosse a lei de Lenz, ou seja, criam um campo contrário ao campo aplicado.
- Portanto , cria-se um  $M$  negativo!
- Como esse efeito é fraco, no caso dos materiais paramagnéticos o efeito nem é percebido.

# diamagnetismo

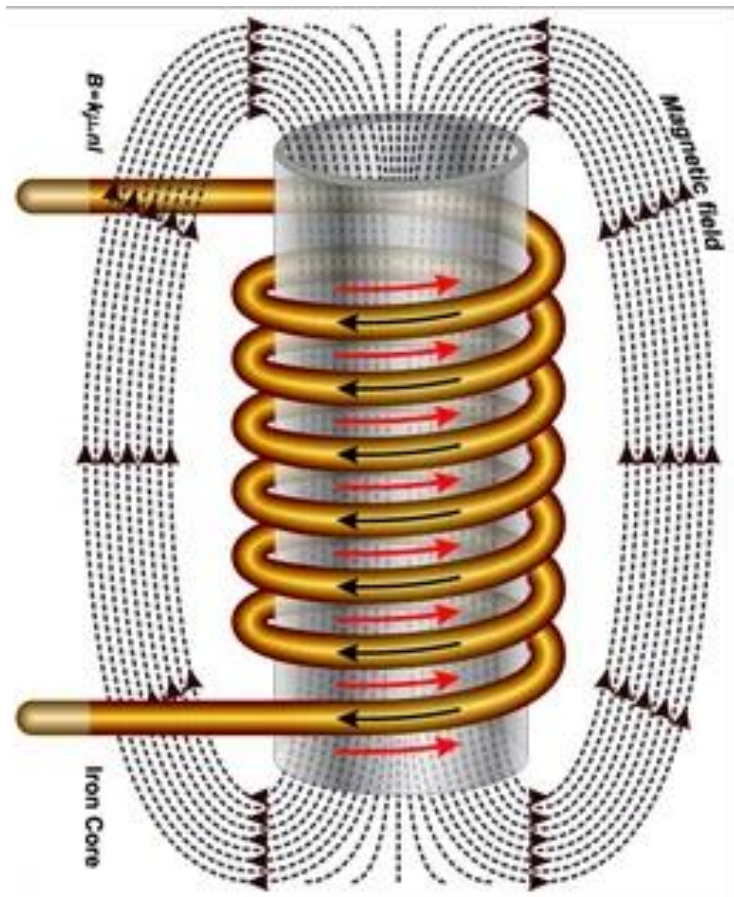


Sem campo não há m



Com campo, surge M  
contrário a H

força  
diamag



Portanto, é possível  
levitar substâncias  
diamagnéticas.

Como a susceptibilidade  
diamagnética é muito  
pequena, é necessário  
usar campo magnético  
muito forte.

# A levitação do sapo é feita com $B = 7$ tesla



Água é diamagnética.  
Sapo é água...  
Dá para levitar um sapo.

# Materiais supercondutores

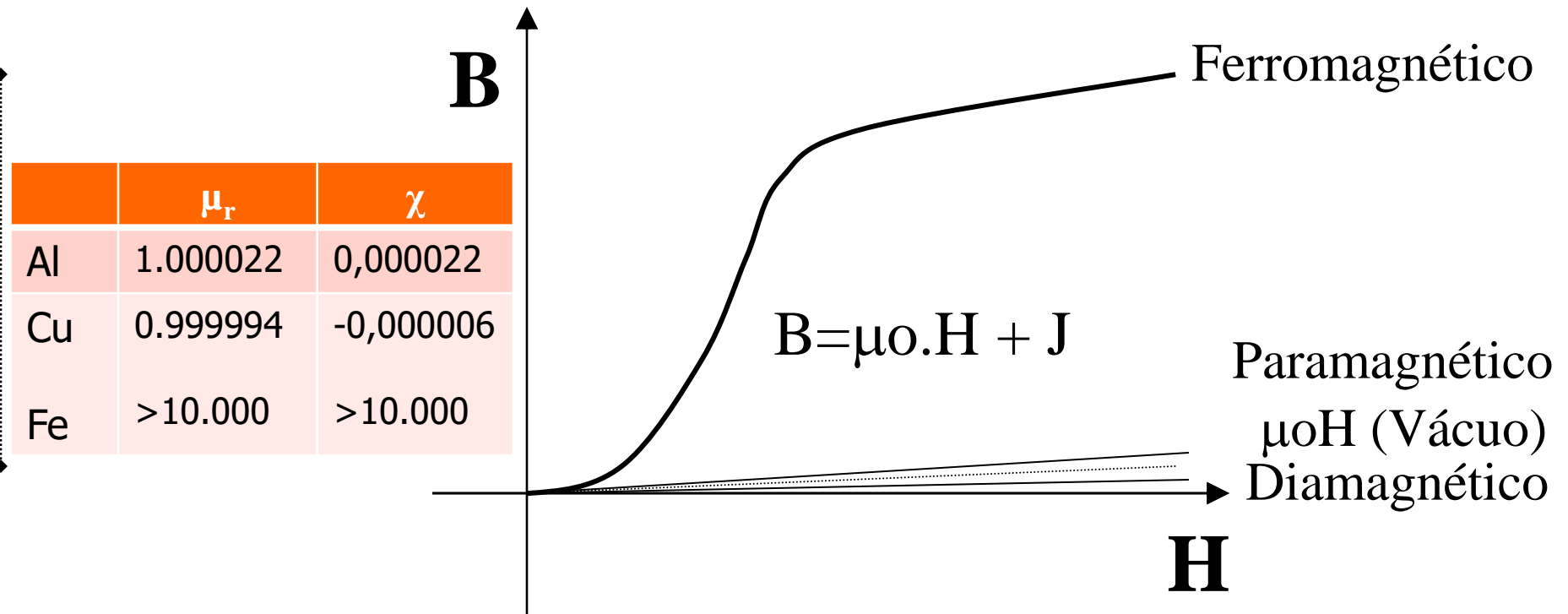


- São fortemente diamagnéticos!
- Não precisam de um campo tão forte para levitar.

superconductor (YBCO) thin film levitating high (3cm) above a permanent magnet when it is cooled with liquid Nitrogen.

# Materiais ferromagnéticos

## Curva de Magnetização



	$\mu_r$	$\chi$
Al	1.000022	0,000022
Cu	0.999994	-0,000006
Fe	>10.000	>10.000

1873 - Rowland



# Força que 1g de material sente quando sujeito a campo muito forte (1,8T)

substância	fórmula química	força (miligramas-força)
<b>vácuo</b>		0
<b>ar</b>	$O_2 + N_2$	0
<b>água</b>	$H_2O$	-22
<b>cobre</b>	$Cu$	-2,6
<b>cloreto de sódio</b>	$NaCl$	-16
<b>sódio</b>	$Na$	+20
<b>alumínio</b>	$Al$	+17
<b>cloreto de cobre</b>	$CuCl_2$	+280
<b>magnetita</b>	$Fe_3O_4$	+120.000
<b>ferro</b>	$Fe$	+ 400.000

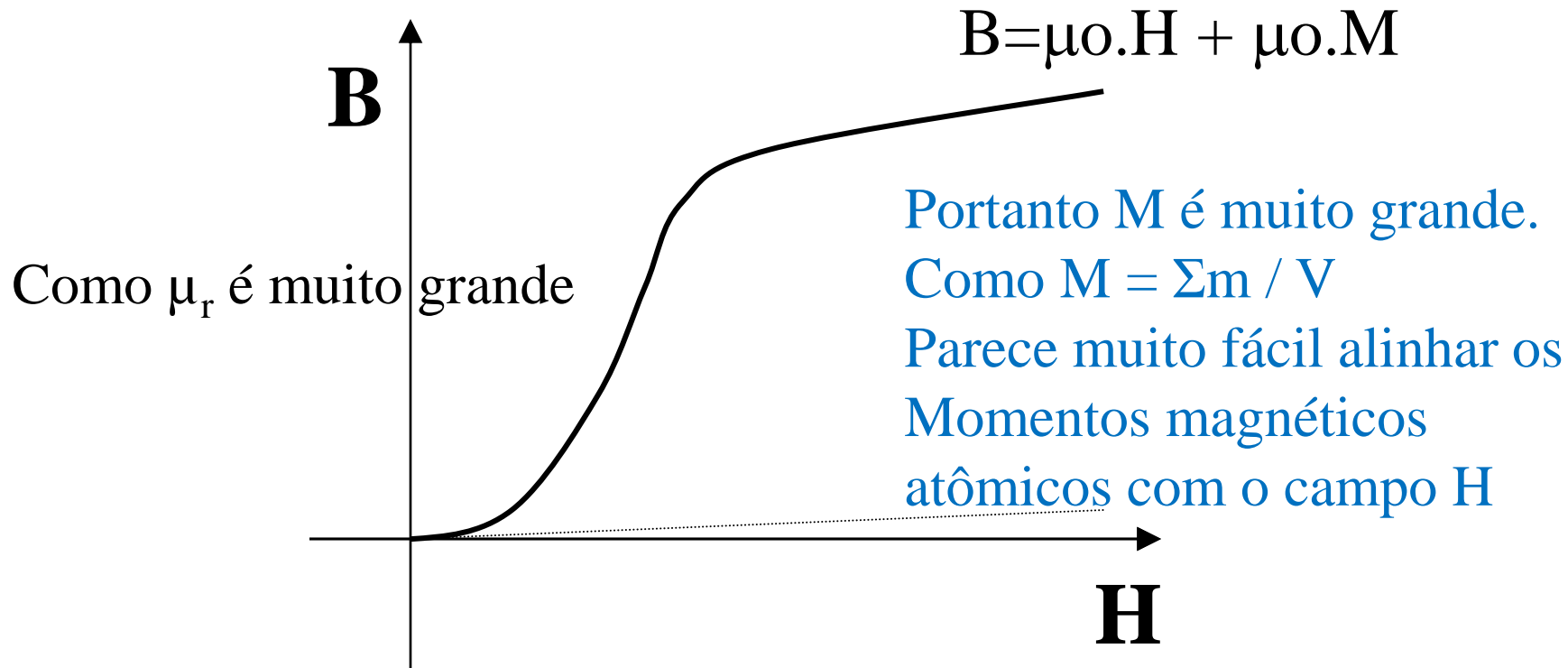
# Comportamento magnético dos elementos

1 H																	2 He	
		<input type="checkbox"/> Ferromagnetic <input type="checkbox"/> Antiferromagnetic																
		<input type="checkbox"/> Paramagnetic <input type="checkbox"/> Diamagnetic																
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne	
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar	
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr	
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe	
55 Cs	56 Ba	57 La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn	
87 Fr	88 Ra	89 Ac																
			58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu		

Somente 3  
são ferromag

# Materiais ferromagnéticos

## □ Curva de Magnetização

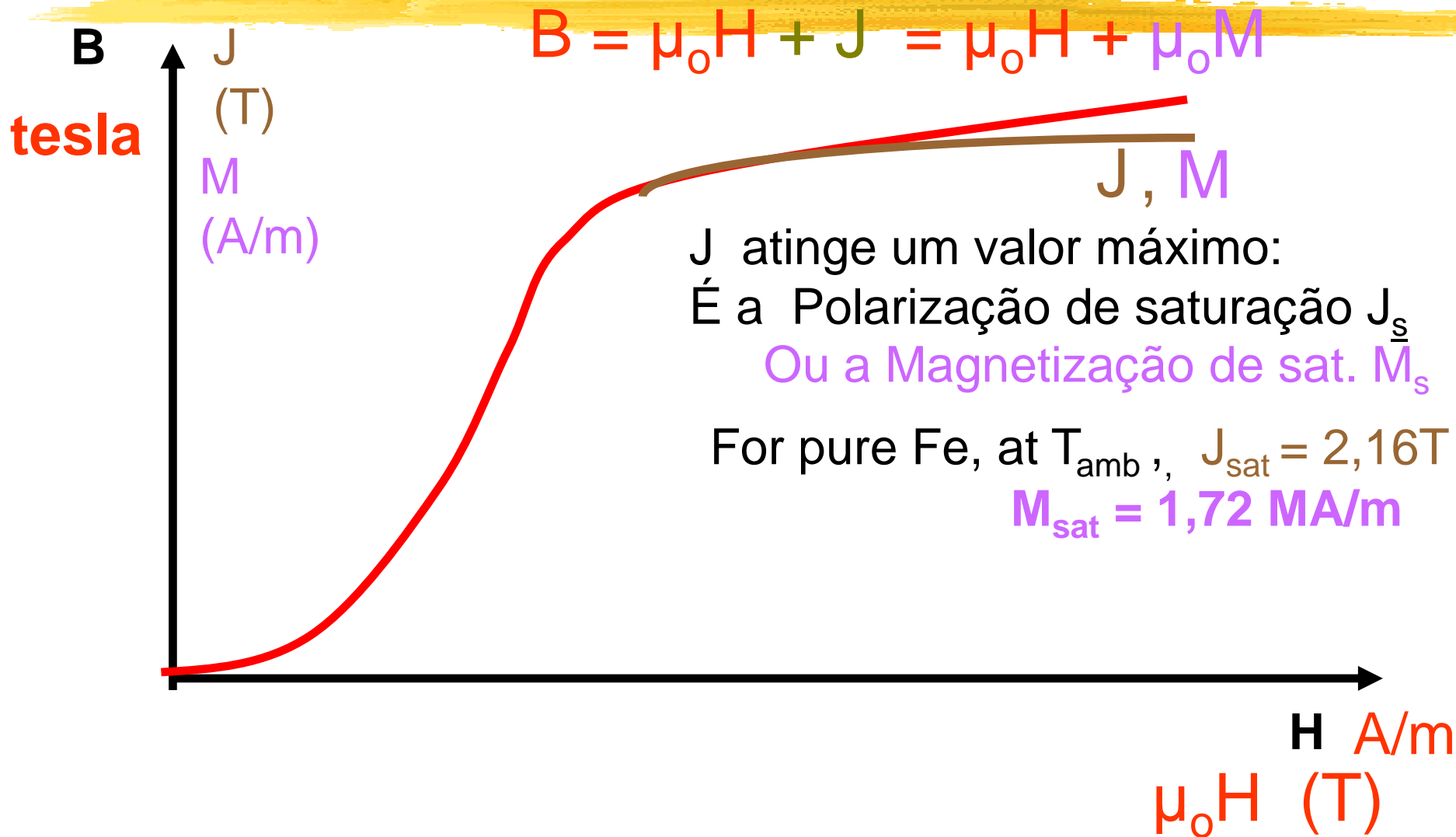


1873 - Rowland

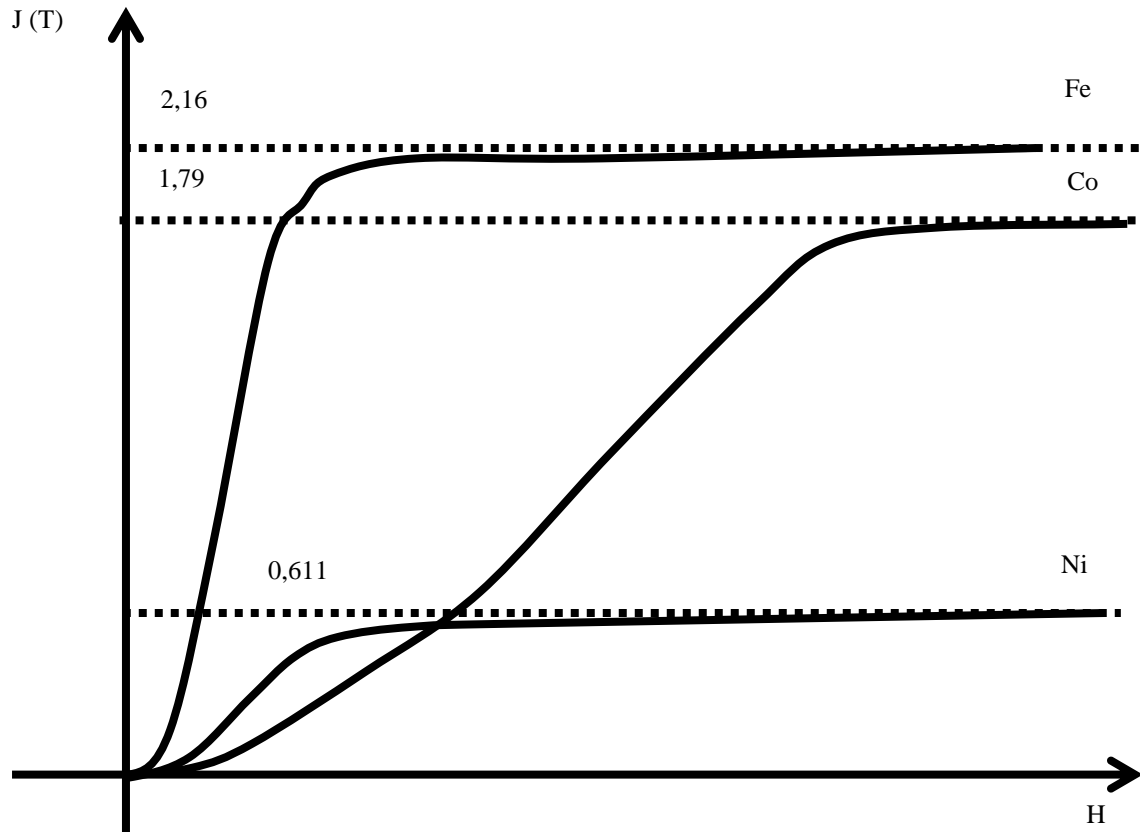
# Saturação

Nota: a rigor, não existe  $B_s$ , só  $J_s$ .

$B = \mu_0 H + J$ , portanto,  $B$  sempre cresce...



# $J_s$ depende do material



Mn é paramag

**Somente 3  
são ferromag**

25	26	27	28	29	30
Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn

Cu é diamag

# O que afeta $J_s$

- Composição química (teor de silício, manganês, cromo, etc)
- Temperatura
- O que praticamente **não afeta**
  - Microestrutura (tamanho de grão, textura, precipitados)
  - Deformação plástica
  - Frequência de excitação
  - Intensidade do campo magnético

# exercícios

1. O momento magnético atômico do ferro deve corresponder a quantos magnétons de Bohr, para explicar sua saturação com 2,16 tesla?

Relembrar:

$$J = \mu_0 M$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Tm/A}$$

$$M = \Sigma m / V$$

Ferro é CCC

(2 átomos por célula)

Parâmetro de rede:

$$a = 0,2856 \cdot 10^{-9} \text{ m}$$

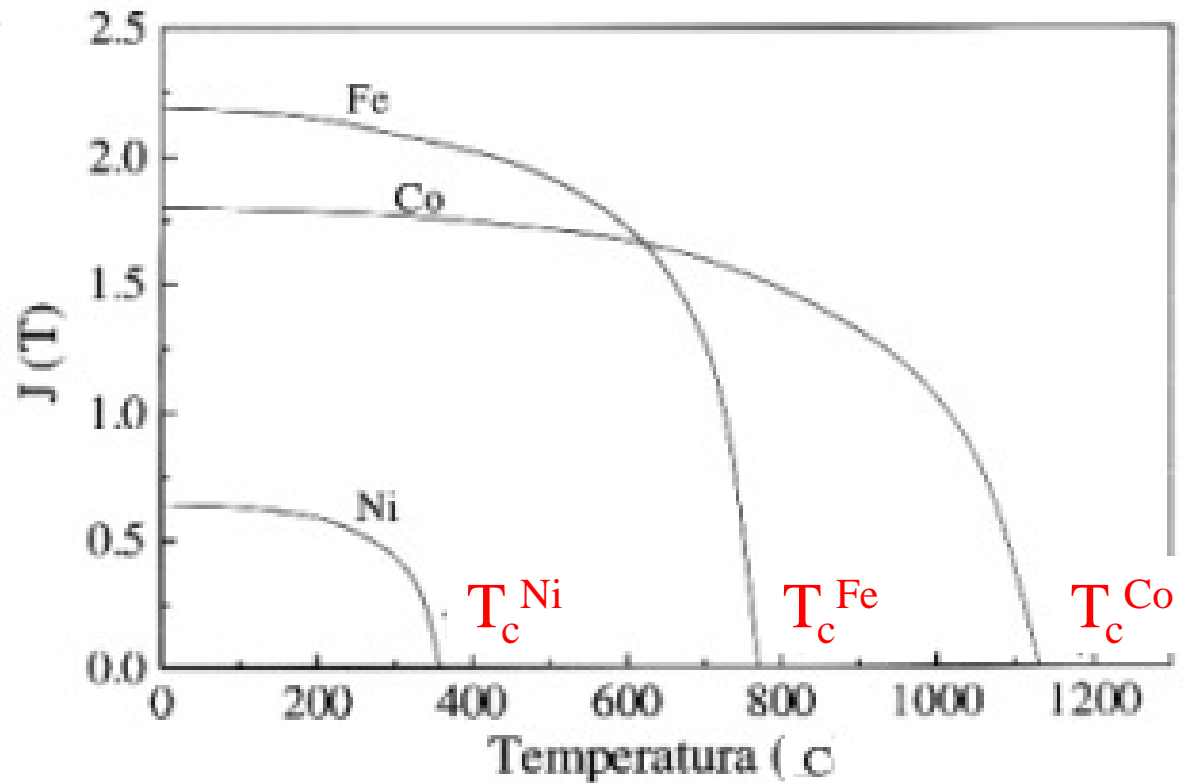
$$\mu_B = 9,27 \cdot 10^{-24} \text{ Am}^2$$

2. Qual seria a saturação magnética de um aço com 6at% Si, considerando que os átomos de silício estão em solução sólida substitucional e que nessa composição o parâmetro de rede diminui para  $0,284 \cdot 10^{-9}$ .

# Relação entre $J_s$ e $T_{Curie}$

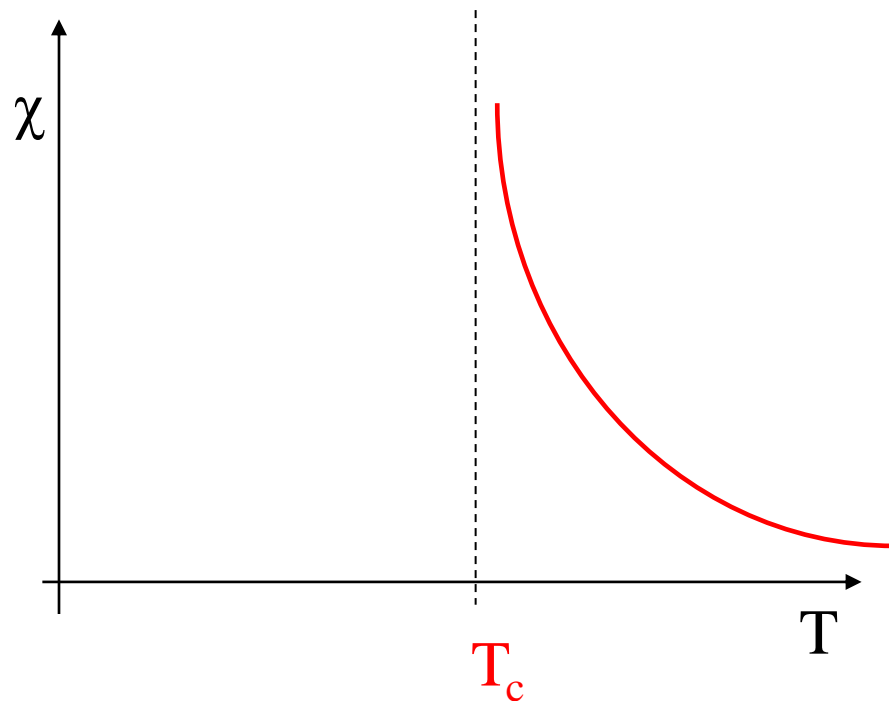
•  $J_s$  tende a zero na temperatura de Curie,  $T_c$ .

• Acima de  $T_c$ , susceptibilidade se comporta como se fosse paramagnético.

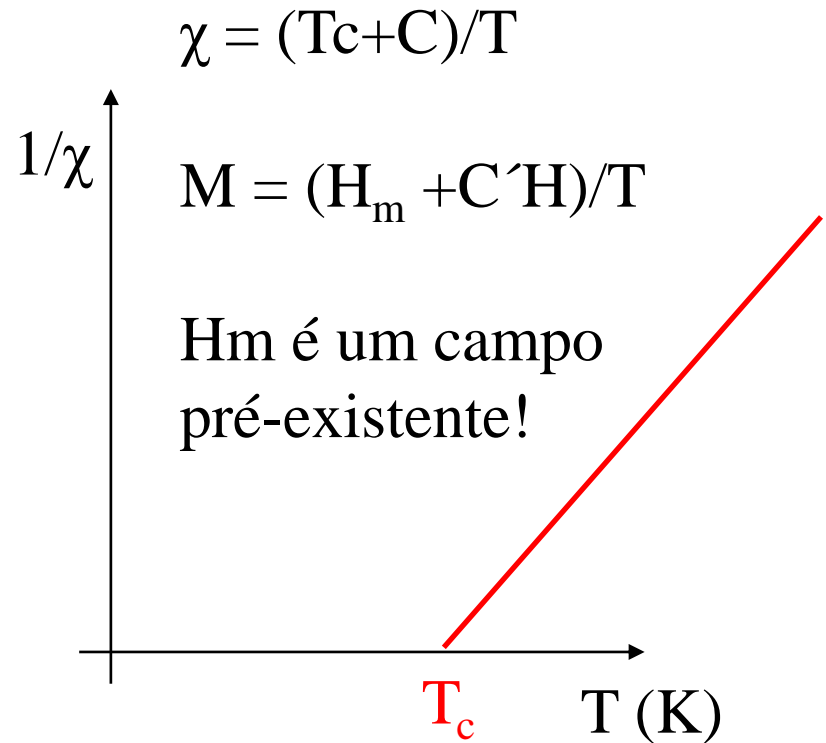




# Efeito da temperatura no ferromagnetismo



Susceptib. cresce no resfriamento



# A ideia dos domínios magnéticos

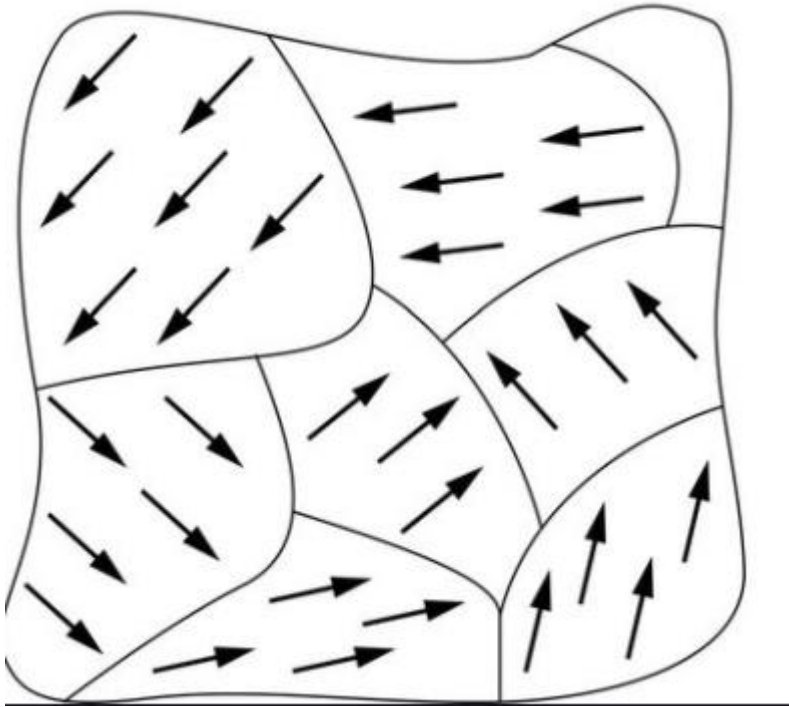


Pierre Weiss propôs, em 1906, que deveria haver um “campo molecular” orientando os momentos magnéticos atômicos mesmo na ausência de um campo externo.

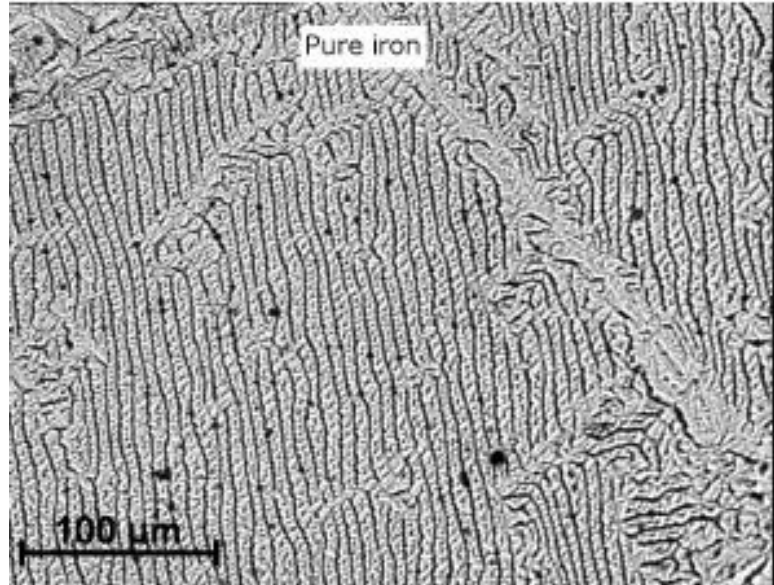
Mas se assim fosse, ferro estaria naturalmente magnetizado...

A solução foi propor que deveria existir, no interior do material, diferentes regiões onde todos os momentos magnéticos atômicos estariam orientados, mas cada região numa direção, com somatória zero no geral!

# A observação dos domínios

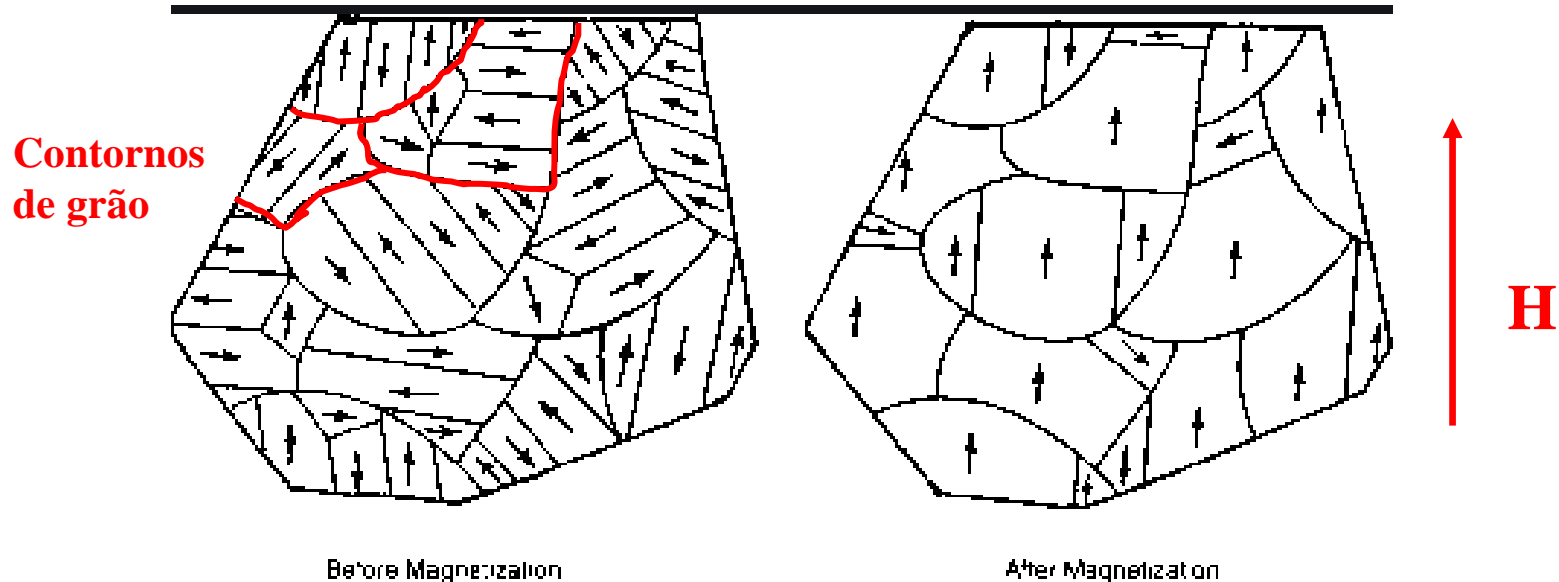


Pierre Weiss propôs em 1906



F. Bitter foi o primeiro a observar domínios, em 1931:  
Phys. Rev. **38** (1931) 1903.  
Usou partículas magnéticas numa suspensão aquosa.

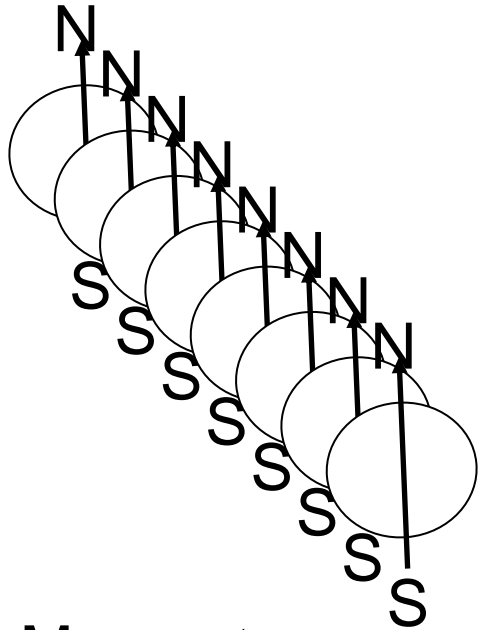
# Efeito do campo externo nos domínios



Cada grão pode ter vários domínios. Aplicando campo externo a tendência é alterar os tamanhos dos domínios e orientá-los na direção do campo externo aplicado.

# Mas qual a origem desse “campo molecular”? É uma tal “Energia de Troca”

□ Cada átomo de Fe é um “nanoímã”



Os Momentos magnéticos alinham-se paralelamente

- É uma energia eletrostática de origem quântica.
- É a parcela que força ao paralelismo os momentos magnéticos atômicos, nos materiais ferromagnéticos.
- $E_{tr} =$
- Muitos elementos tem momentos magnéticos atômicos, mas poucos (Fe, Co, Ni) alinham-se paralelamente.
- No ferro, é da ordem de  $400\text{MJ/m}^3$

É isotropica

# A interação de troca

A **interação de troca** (Exchange interaction) ou **interação de troca magnética** é um efeito descrito pela mecânica quântica que ocorre entre elétrons desemparelhados do mesmo ou de diferentes átomos ou íons, quando as suas funções de onda se sobrepõem; isto é, quando estão relativamente próximos. Esta interação é uma manifestação do princípio de exclusão de Pauli, que está relacionado com a repulsa a curta distância entre átomos e moléculas.

$$E_{\text{troca}} = -2 J \mathbf{S}_1 \cdot \mathbf{S}_2 = -2 J S_1 S_2 \cos \Theta$$

Onde  $J$  é uma constante, a constante de troca  
 $S_1$  e  $S_2$  são os spins de elétrons de átomos vizinhos

# energia de troca e TCurie

Como acima da  $T_{\text{curie}}$  o material deixa de ser ferromagnético, ou seja, deixa de ter um paralelismo entre os momentos magnéticos atômicos, então deve haver uma relação entre  $J_{\text{troca}}$  e  $T_c$

De acordo com Cullity, para o ferro,

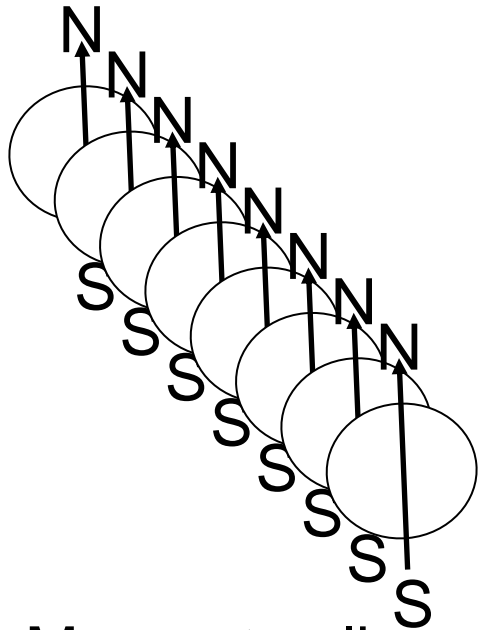
$J_{\text{exc}} = 0,34kT_c$  onde  $k$  é a constante de Boltzmann.

Ver Cullity e Graham pag 133

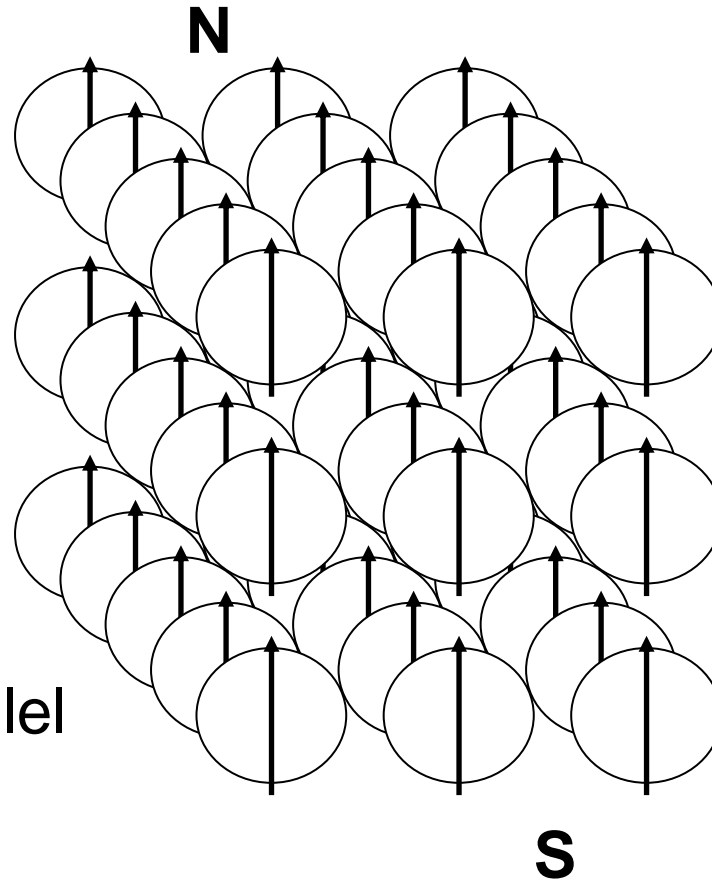
# Domínios

□ Cada átomo de ferro é um “nanoímã”

Bilhões de momentos magnéticos de átomos de Fe alinham-se num domínio magnético



The Moments align parallel spontaneously



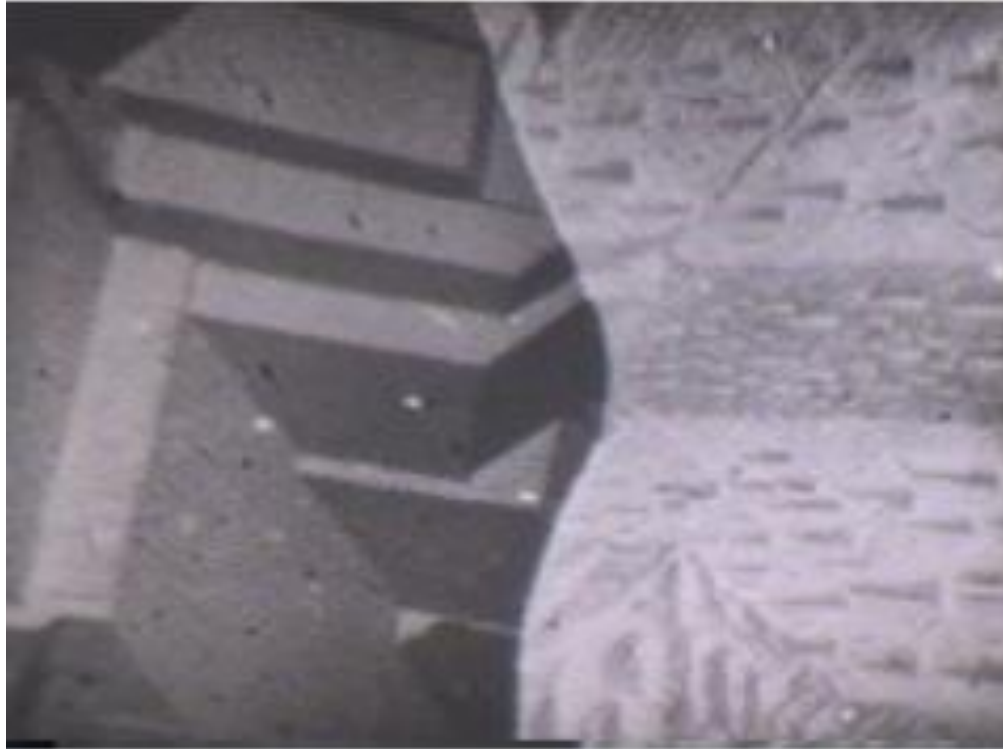
$J_{\text{sat}}$

S



# Domínios Magnéticos

O comportamento magnético dos materiais ferromagnéticos está associado ao comportamento dos domínios magnéticos sob a ação de campos magnéticos externos.

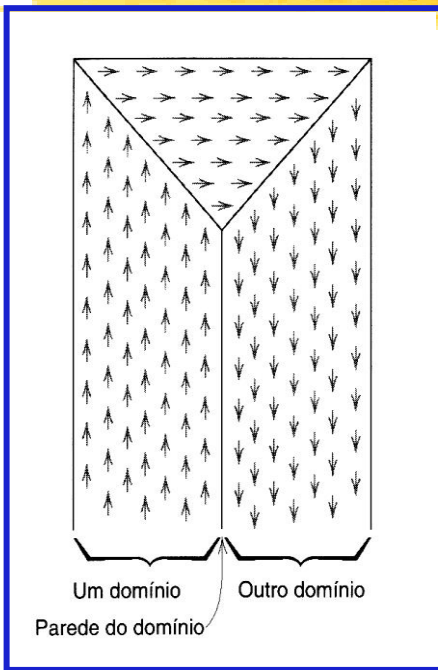


Fotografia da estrutura de domínios magnéticos em chapa de aço contendo dois grãos. Imagem mede 100 $\mu$ m de largura.

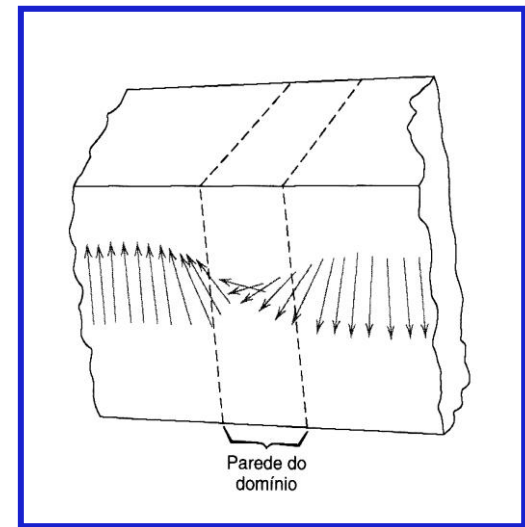
# DOMÍNIOS MAGNÉTICOS e PAREDES DE DOMÍNIO

**DOMÍNIOS** são regiões volumétricas microscópicas onde todos os momentos magnéticos atômicos estão alinhados, tendo mesma direção e sentido

Dentro de cada domínio o material está magneticamente saturado, ou seja, sua magnetização está no valor máximo possível.



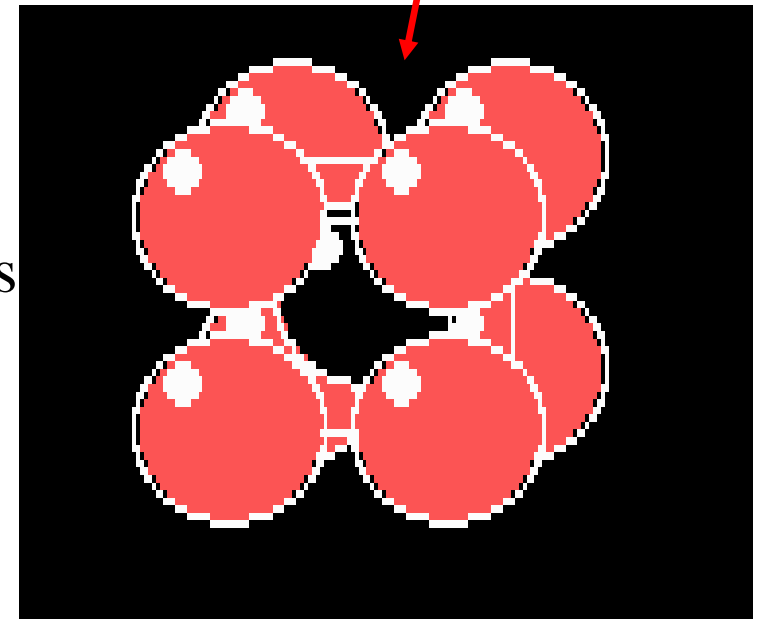
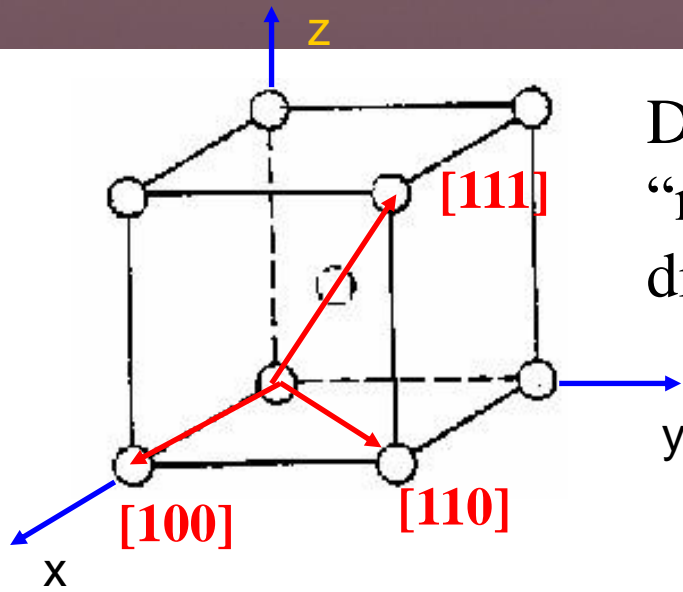
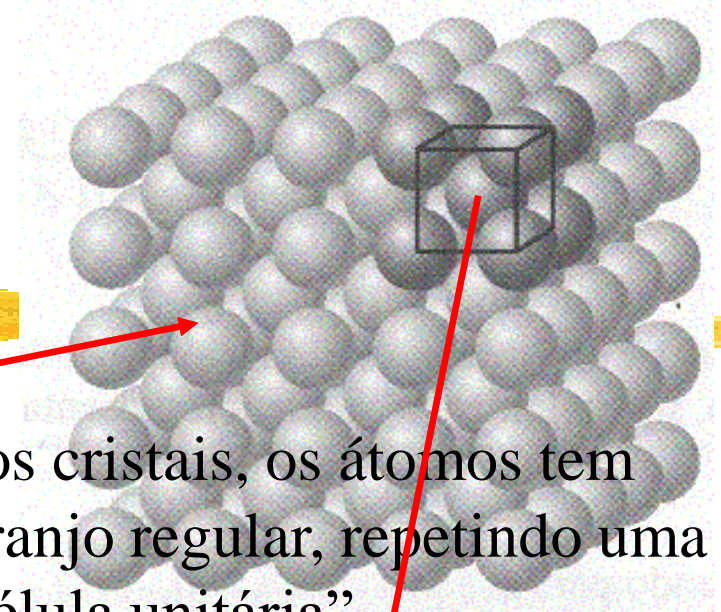
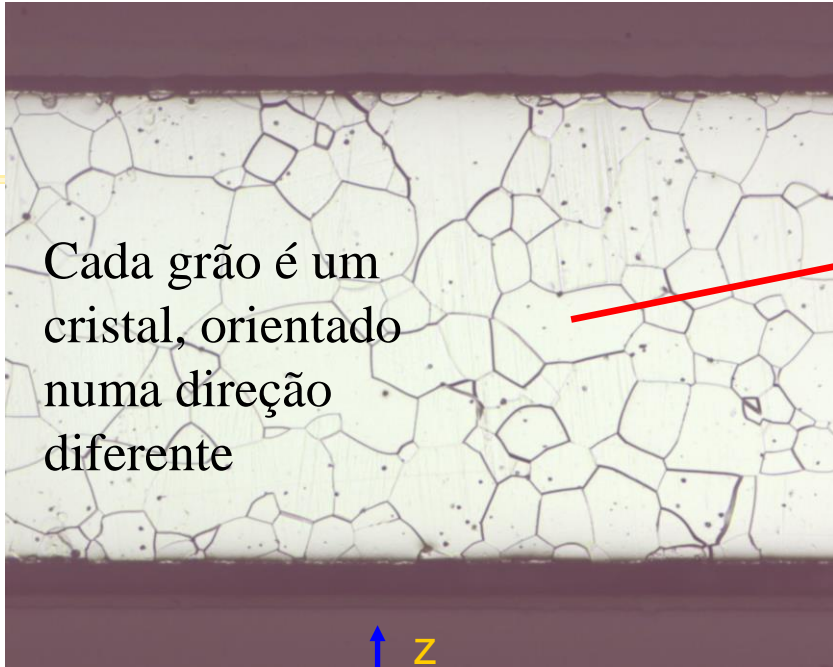
- Os domínios adjacentes estão separados por **PAREDES DE DOMÍNIO**, através dos quais a direção da magnetização varia gradualmente



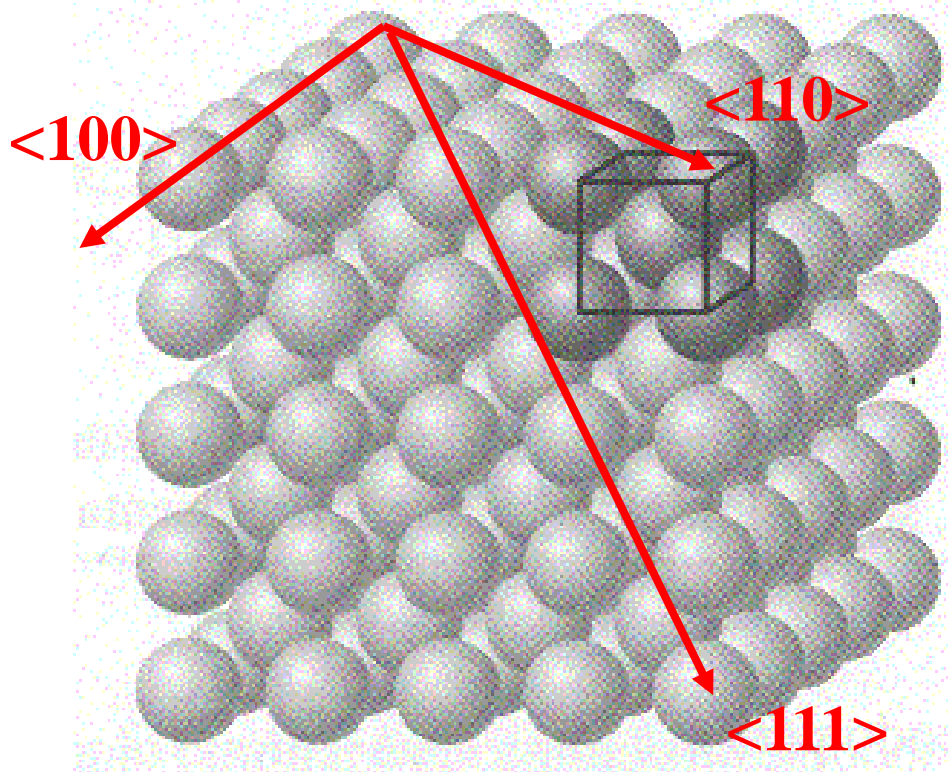
# Anisotropia magnetocristalina

- Em cada material, os momentos magnéticos atômicos alinham-se paralelamente em determinadas direções cristalinas (vamos rever direções cristalinas na próxima aula).
- No ferro, em que os cristais assumem uma estrutura cúbica, os momentos magnéticos espontaneamente alinham-se nas direções paralelas às arestas do cubo, ou seja, nas direções chamadas de  $\langle 100 \rangle$ .
- O aumento do campo externo numa outra direção consegue tirar os momentos magnéticos atômicos das direções espontâneas, mas isso acumula energia dentro do material. Tirando o campo externo, os momentos voltam às direções espontâneas.

# As direções cristalinas no ferro

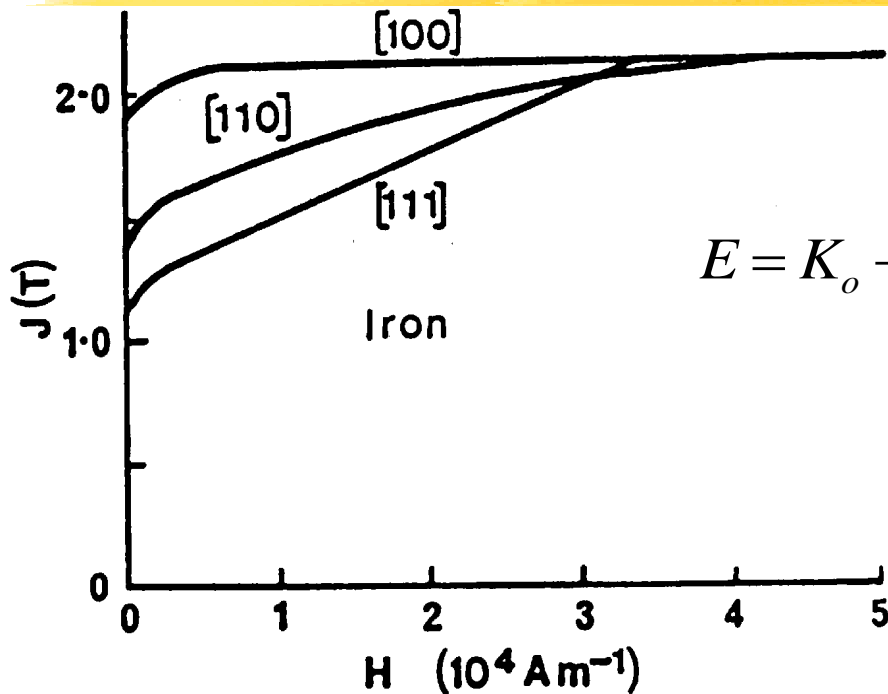


# Anisotropia das propriedades magnéticas



É possível pegar um monocristal de ferro, usar difração de raios X para saber sua orientação cristalina e levantar a curva de magnetização aplicando campo  $H$  e medindo  $J$  em qualquer direção.

# Energia de anisotropia magnetocristalina



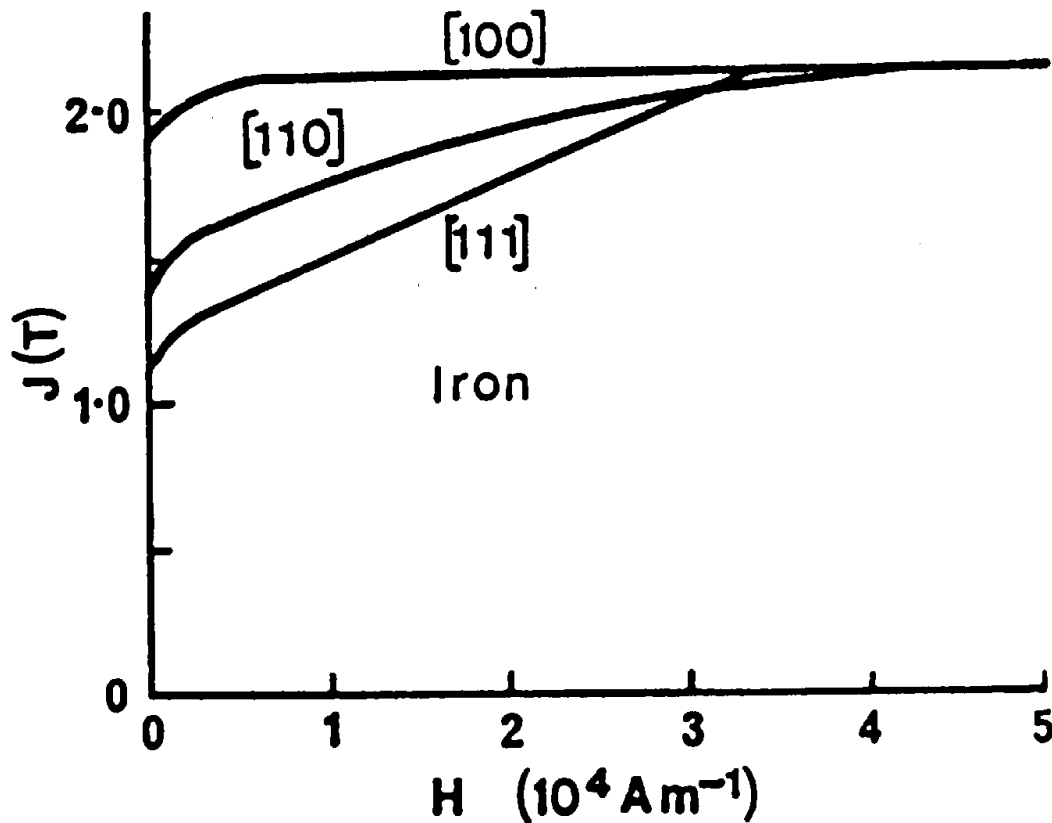
$$E = K_0 + K_1(\alpha_1^2\alpha_2^2 + \alpha_2^2\alpha_3^2 + \alpha_3^2\alpha_1^2) + K_2\alpha_1^2\alpha_2^2\alpha_3^2$$

- onde  $K_1$  e  $K_2$  são constantes de anisotropia.
- $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  e  $\alpha_3$  são os cossenos dos ângulos entre a direção do campo aplicado e os 3 eixos cristalográficos.

É muito mais fácil magnetizar um monocristal de ferro na direção [100].

Os momentos magnéticos atômicos alinham-se espontaneamente nessa direção.

# Js não depende da orientação!



- Quando todos os momentos magnéticos atômicos se alinham, o valor de  $J$  é sempre o mesmo!

# Anisotropia Magnética

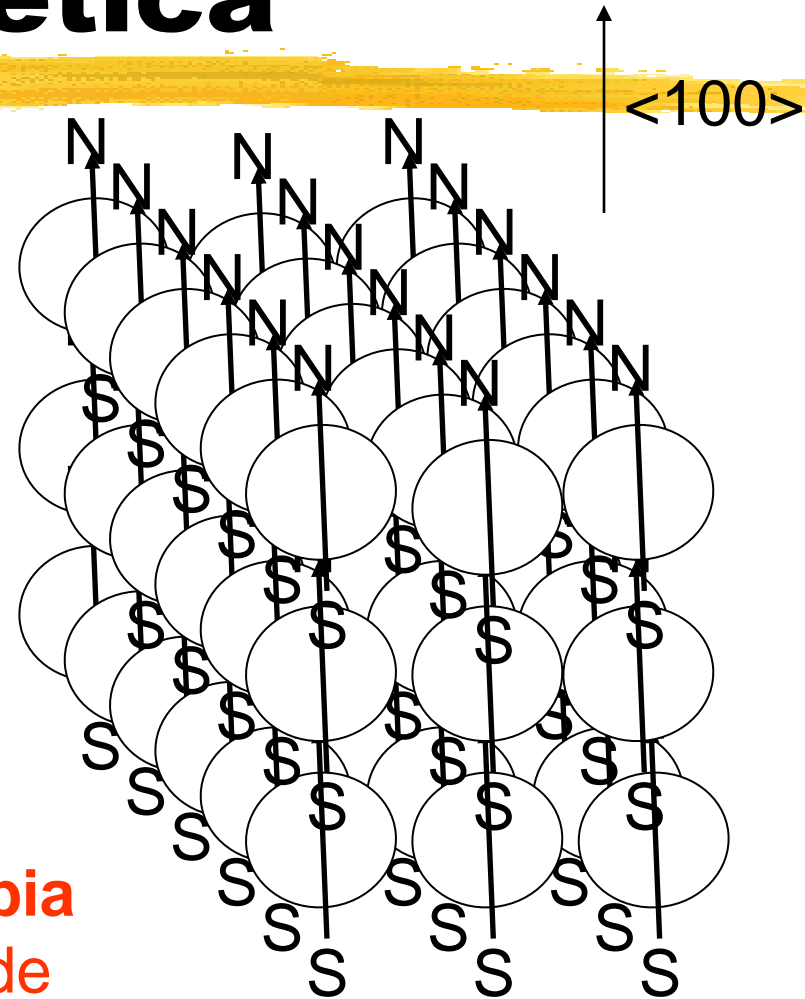
É possível mover os momentos magnéticos atômicos para fora da direção  $\langle 100 \rangle$  se você aplicar um campo suficientemente forte.

**H**



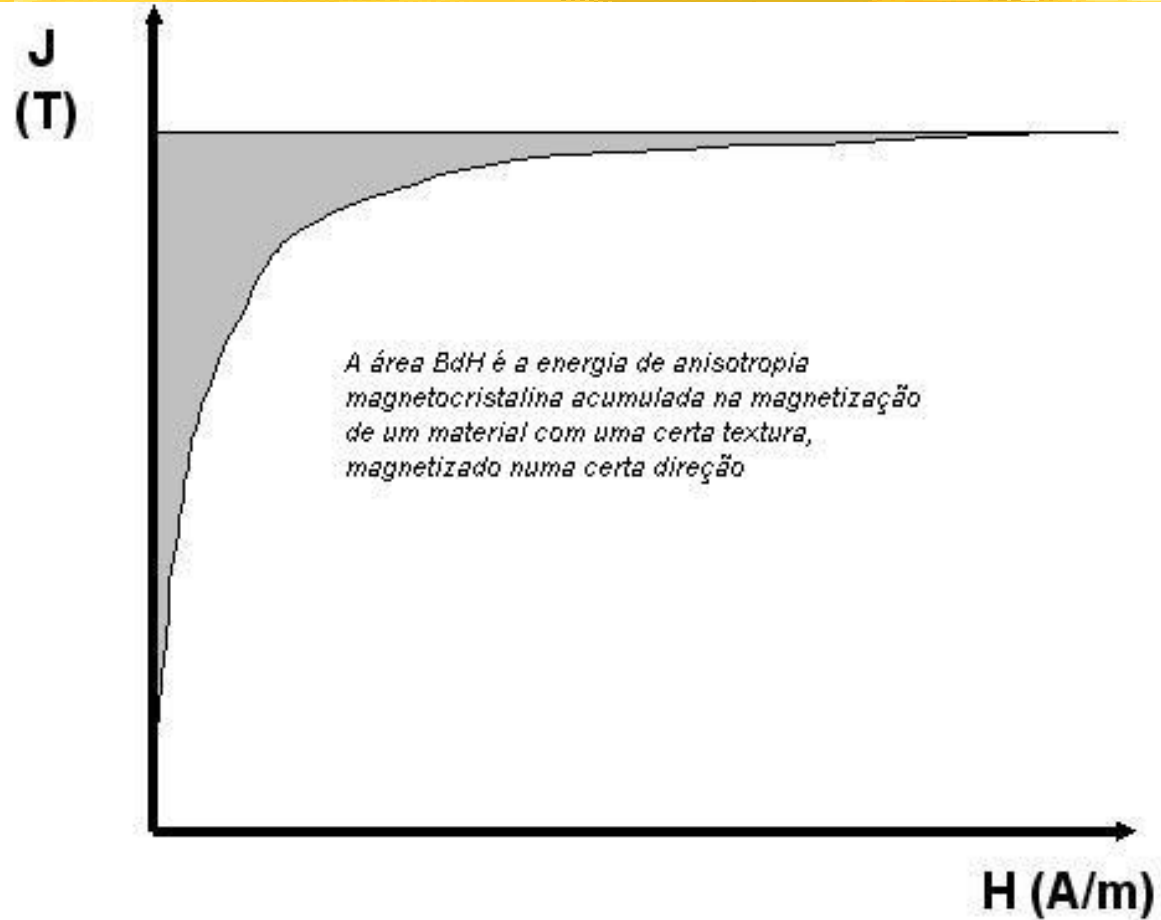
Se retirar o campo externo, magnetização pode voltar para orientação inicial.

Para o ferro, a **energia de anisotropia magnetocristalina**  $E_a$  é da ordem de  $48.000 \text{ J/m}^3$





# Energia acumulada na magnetização



# Porque a polarização rotacionou?

- Pela mesma razão que a agulha de uma bússola gira:

Para minimizar a **energia magnetostática**

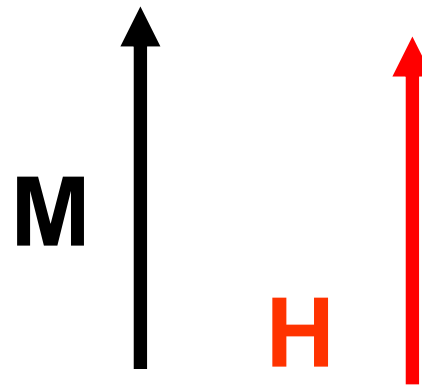
$$E_{ms} = - \mu_0 \mathbf{H} \cdot \mathbf{M} V \cos\theta$$

Ou pode-se dizer que surgiu um torque

- $\tau = (\mathbf{M} \times \mu_0 \mathbf{H})V$   
(produto vetorial)

- O sistema busca espontaneamente diminuir o torque, alinhando  $\mathbf{m} // \mathbf{H}$

$E_{ms}$  é mínima  
quando  $\mathbf{H}$  e  $\mathbf{M}$  são paralelos



$E_{ms}$  é máxima  
Quando são anti paralelos

# O equilíbrio de energia

- A polarização rotacionou para minimizar  $E_{ms}$
- Mas aumentou  $E_a$
- M rotaciona até o equilíbrio onde

$$E_{ms} = E_a$$

$E_{ms}$  depende do ângulo entre H and M

$E_a$  depende do cosseno do angulo entre H e as três  $\langle 100 \rangle$ , chamados  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  and  $\alpha_3$

$$E_A = K_o + K_1(\alpha_1^2 \alpha_2^2 + \alpha_2^2 \alpha_3^2 + \alpha_3^2 \alpha_1^2) + K_2 \alpha_1^2 \alpha_2^2 \alpha_3^2$$

$K_1$  é a principal propriedade intrínseca para  $E_a$

# As três energias, até agora

## □ Energia de troca

$E_{exc}$

- momentos atômicos devem ser paralelos
- No ferro,  $E_{exc}$  maximo = 400MJ/m<sup>3</sup>

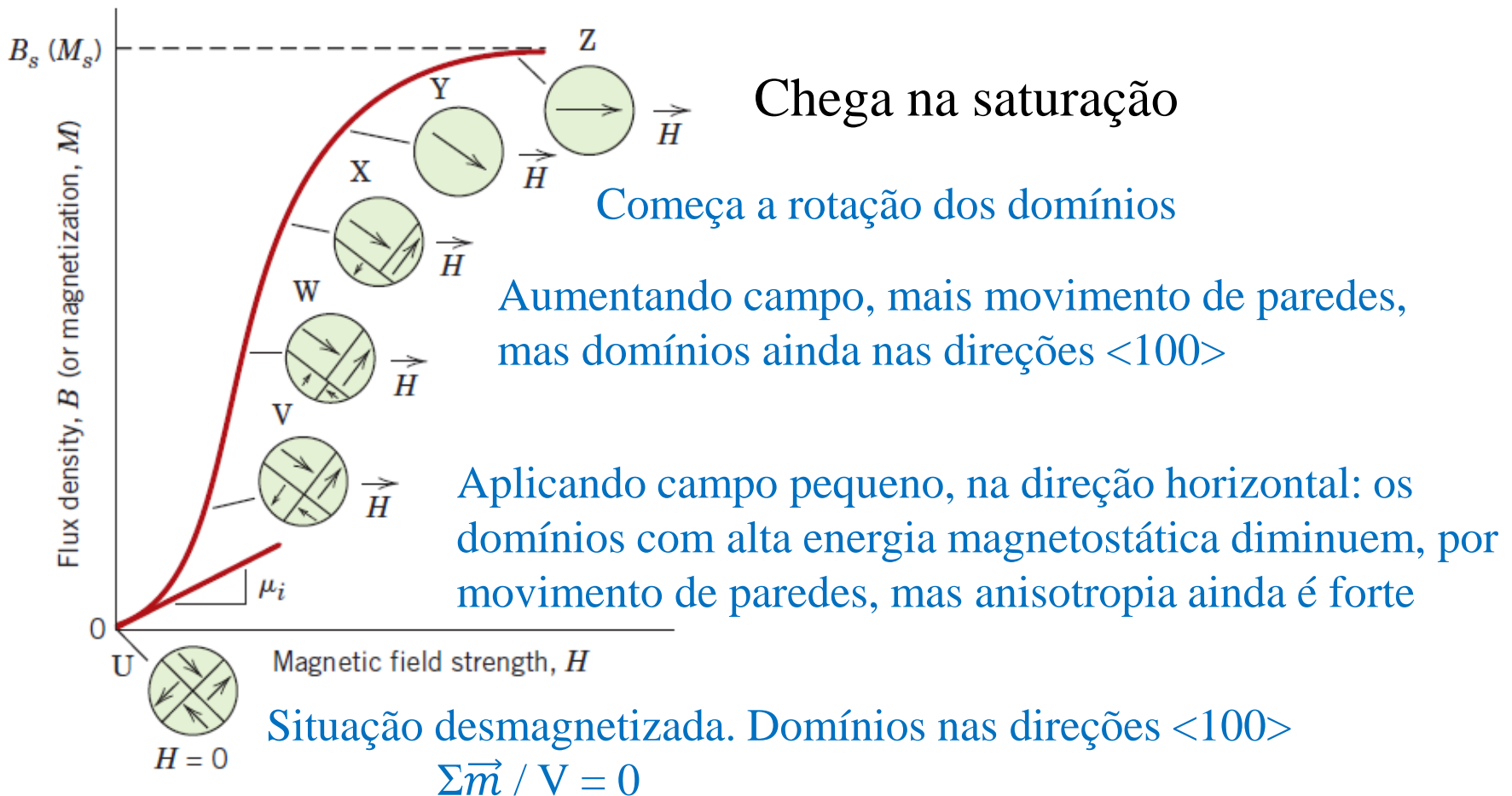
## □ energia anisotropia Magnetocristalina $E_a$

- momentos atômicos devem estar em  $\langle 100 \rangle$
- No ferro, Maxima  $E_a = 48.000$  J/m<sup>3</sup>

## □ energia Magnetostática $E_{ms}$

- $J$  deve ser paralelo a  $H$
- No ferro, quando  $H = 5.000$ A/m max  $E_{ms} = 10.800$  J/m<sup>3</sup>

# Entendendo o processo de magnetização



# Lembram das propriedades desejadas dos aços para e-mob?

Electrical steel (NO) – For e-mobility and high frequencies

Para EVs

Steel grade designation	Standard designation	Thickness [mm]	Density [kg/dm <sup>3</sup> ]	Max. Core loss [W/kg] at	Min. Polarization			Min. yield strength as per DIN EN ISO 6892-1  R <sub>p0.2</sub> in the rolling direction at room temperature [MPa]
					[T] at	[A/m]	[A/m]	
				400 Hz	2,500	5,000	10,000	
				1.0 T	[A/m]	[A/m]	[A/m]	[MPa]

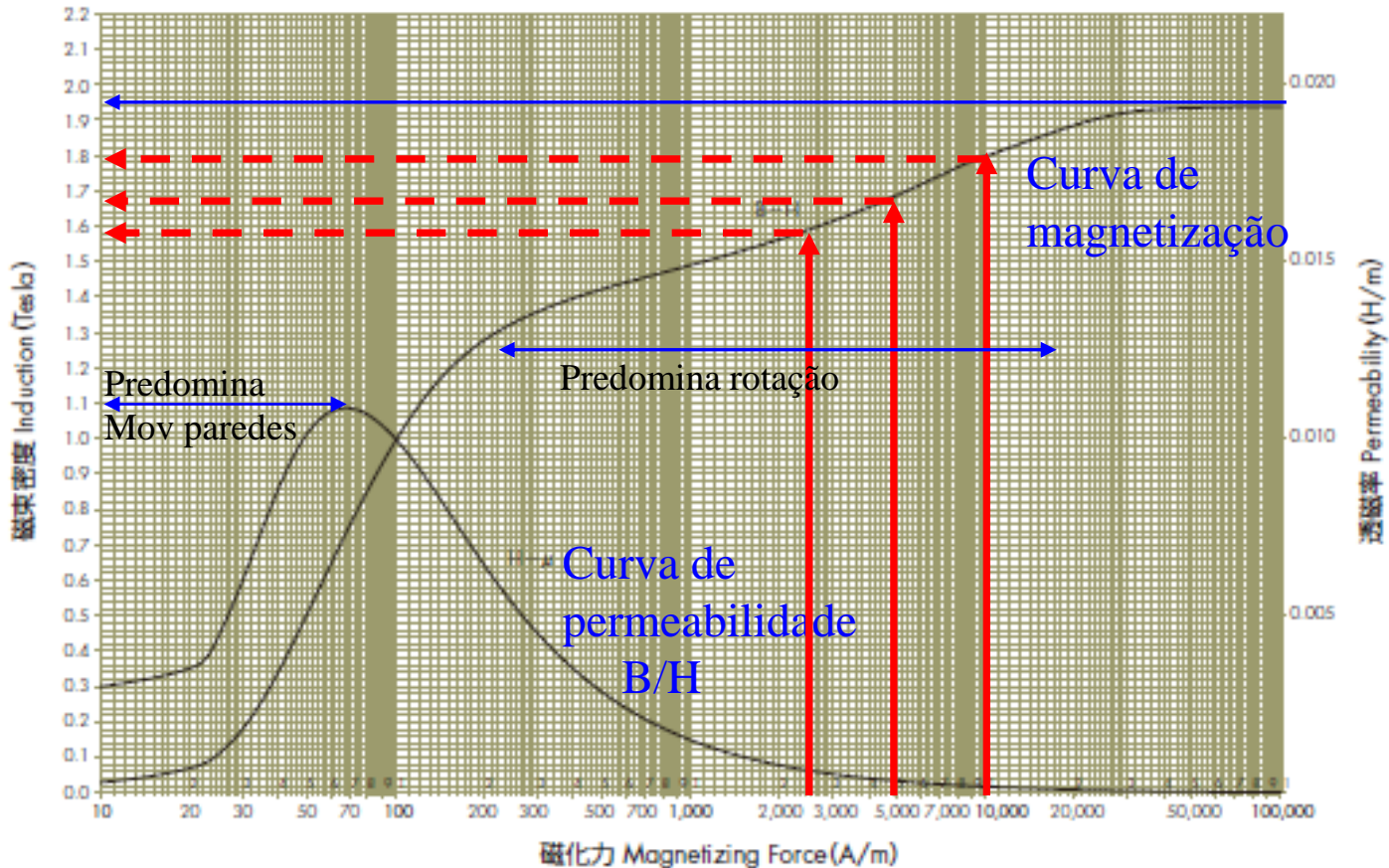
According to EN 10303

Steel grade designation	Standard designation	Thickness [mm]	Density [kg/dm <sup>3</sup> ]	Max. Core loss [W/kg] at	Min. Polarization			Min. yield strength as per DIN EN ISO 6892-1  R <sub>p0.2</sub> in the rolling direction at room temperature [MPa]
				400 Hz	2,500	5,000	10,000	
				1.0 T	[A/m]	[A/m]	[A/m]	[MPa]
powercore® 020-130Y320	NO20-13	0.20	7.60	13	1.48	1.59	1.69	320
powercore® 020-150Y320	NO20-15	0.20	7.60	15	1.48	1.59	1.69	320
powercore® 027-140Y420	NO27-15	0.27	7.60	14	1.51	1.61	1.73	420
powercore® 027-150Y370*	NO27-15	0.27	7.60	15	1.52	1.61	1.73	370

# Caso real dos aços: o que é $B_{25}$ , $B_{50}$ , $B_{100}$ ?

Min. Polarization		
[T] at		
2,500	5,000	10,000
[A/m]	[A/m]	[A/m]
1.48	1.59	1.69

直流磁化曲線 DC Magnetization Curve  
 直流透磁率曲線 DC Permeability Curve



# Mudanças na estrutura de domínios



Domínios em dois grãos vizinhos são alterados pela aplicação de campo magnético alternado na direção horizontal, em 4 ciclos.

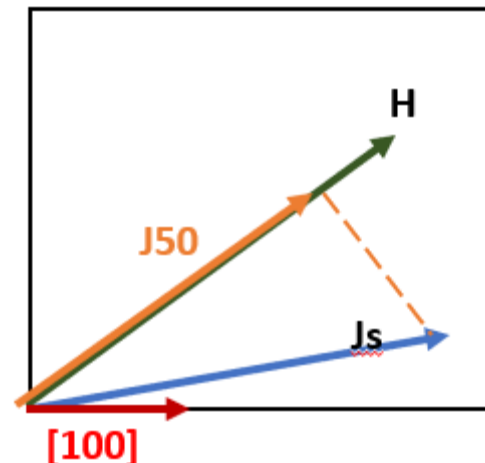
Vemos movimentos de paredes, aniquilação e nucleação de domínios nos contornos de grão.





# equilíbrio de energias

- Exercício sobre o equilíbrio de energias magnetostática e magnetocristalina controlando o valor de  $J$  num certo campo
- 
- **B50 é uma propriedade importante para os aços elétricos. É o valor de  $B$  quando aplicado  $H=5.000\text{A/m}$ . Calcular o valor de  $B50$  de um monocristal de ferro, que tem  $J_s=2,16\text{T}$ , na direção  $110$ , sabendo que  $K_1=48.000\text{ J/m}^3$  (desprezar  $k_2$ ).**



**resumo**



# Próxima aula: microestrutura



- Falaremos sobre estrutura cristalina, sobre grãos, sobre solução sólida, defeitos causados pela deformação plástica, precipitados e textura.
- disponibilizarei um pdf de um texto de 27 páginas sobre microestrutura.

# Sistemas de Unidades - S.I.

$$\square B = \mu_0 \cdot H + J = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot H$$

$\square$  B - Indução (Tesla - T)

$\square$  H - Campo Magnético (A/m)

$\square$  J - Polarização Magnética (T)

$\square$   $\mu_0$  - Permeabilidade Absoluta do Vácuo

–  $4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$  (Henry/m)

$\square$   $\mu_r$  - Permeabilidade Relativa

$\square$   $\chi = \mu_0 \cdot (\mu_r - 1) = J/H$ - Susceptibilidade (H/m)

# Sistemas de Unidades - cgs

$$\square B = H + 4.\pi.M = \mu_r.H$$

$\square$  B - Indução (Gauss - G)

$\square$  H - Campo Magnético (Oersted - Oe)

$\square$  M - Magnetização (emu/cm<sup>3</sup>)

$\square$   $\mu_r$  - Permeabilidade Relativa (adimensional)

$\square$   $\chi$  = Susceptibilidade (adimensional)