



FÍSICA III

Professora Mauren Pomalis

mauren.pomalis@unir.br

ENGENHARIA ELÉTRICA - 3º PERÍODO

UNIR/PORTO VELHO

2017/1

Magnetismo em Meios Materiais

Sumário

- ▶ Introdução
- ▶ Momento dipolo spin/orbital
- ▶ Magnetismo e ímãs
- ▶ Ferromagnetismo
- ▶ Paramagnetismo
- ▶ Diamagnetismo

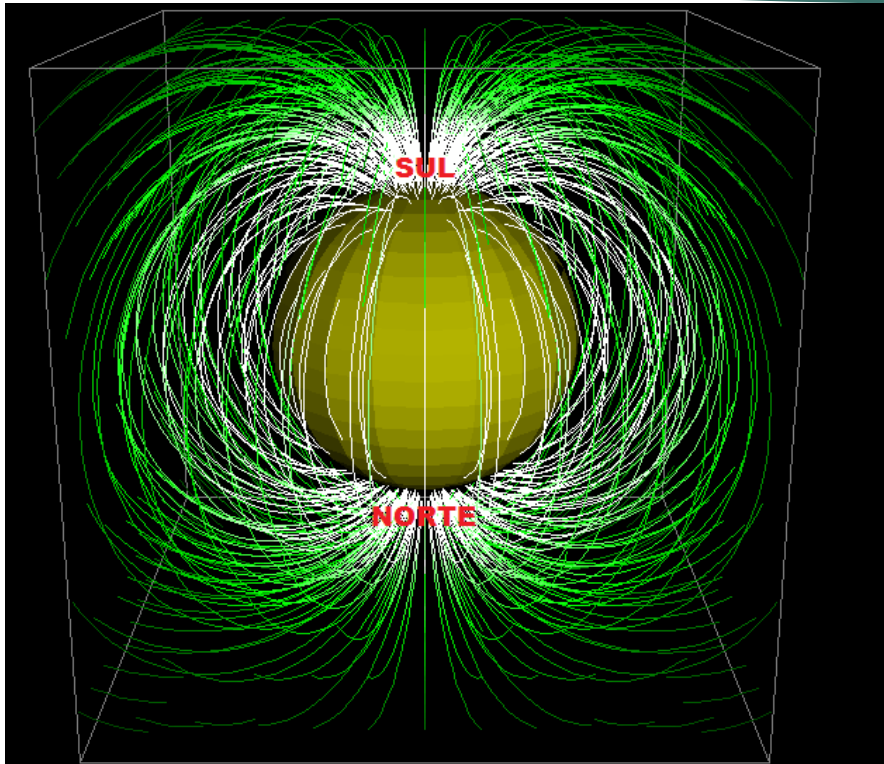
Introdução

- ▶ Abordaremos o magnetismo em meios materiais, verificando o comportamento dos mesmos devido ao campo magnético imposto a eles.

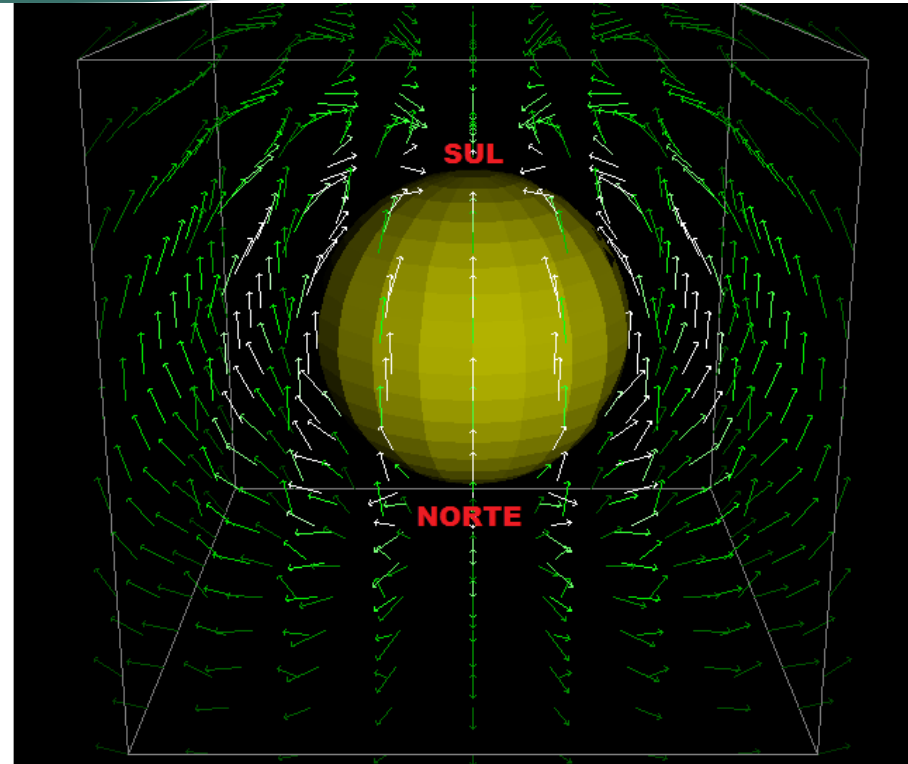
Magnetismo da Terra



Magnetismo da Terra



Linhas de Campo



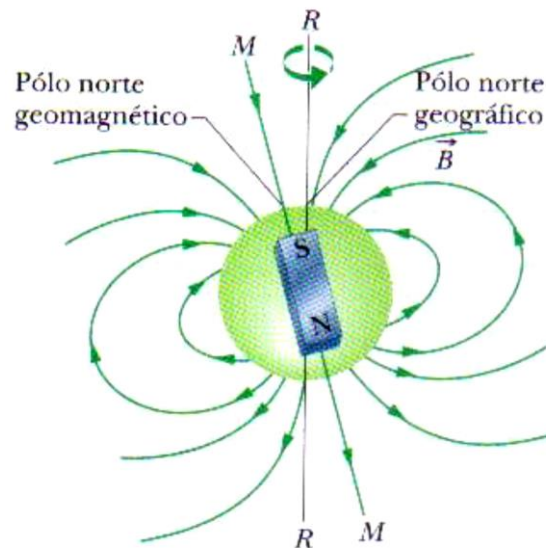
Vetor campo

Magnetismo da Terra

- ▶ O campo magnético da Terra é o campo de um dipolo, então, existe um momento dipolar magnético associado a ele.

$$\vec{\mu} \text{ é } 8,0 \times 10^{22} \text{ J/T.}$$

- ▶ E o ângulo do momento dipolar com o eixo da Terra é $11,5^\circ$



Elétrons, Dipolo, Spin e Movimento Orbital

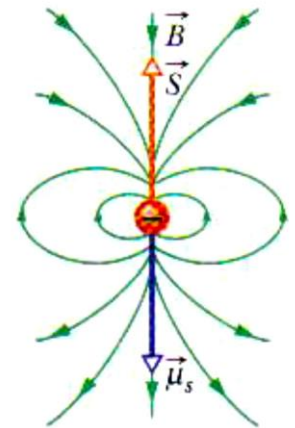
- ▶ Como sabemos, a estrutura magnética mais simples que existe na natureza é o **dipolo**!
- ▶ O dipolo magnético fundamental está associado ao elétron.
- ▶ Os elétrons produzem magnetismo de 3 formas:
 - ▶ 1. Cargas em movimento (já estudamos)
 - ▶ 2. Momento dipolar magnético de **Spin**
 - ▶ 3. Momento dipolar magnético **Orbital**

SPIN

- ▶ Um elétron isolado pode ser considerado uma carga minúscula girando, com um momento angular intrínseco ou spin (S).
- ▶ Associado a ele existe o momento magnético do spin:

$$\vec{\mu}_s = -\frac{e}{m} \vec{S}$$

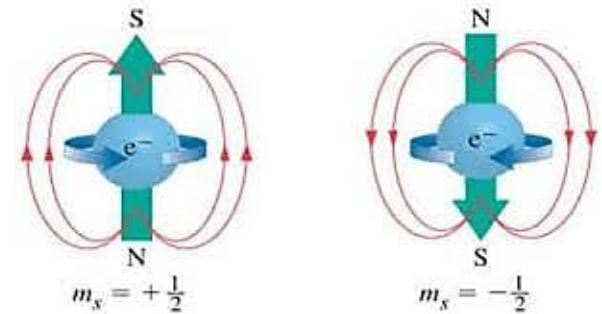
- ▶ Onde e é a carga elementar do elétron ($1,6 \times 10^{-19}$ C)
- ▶ m é a massa do elétron ($9,11 \times 10^{-31}$ kg)
- ▶ Sinal negativo é devido ao Spin e o momento magnético terem sentidos opostos.



SPIN

- ▶ Dessa forma temos o valor da componente S_z :

$$S_z = m_s \frac{h}{2\pi}, \quad \text{para } m_s = \pm \frac{1}{2}$$



- ▶ Com m_s sendo o número quântico magnético de spin (Quando S_z é paralelo ao eixo z, +, o spin do elétron está para cima, e quando ele é antiparalelo, -, elétron para baixo)
- ▶ h é a constante de Planck -> principal constante da física quântica ($6,63 \times 10^{-34}$ J.s)
- ▶ Substituindo S_z

$$\mu_{s,z} = \pm \frac{eh}{4\pi m}$$

SPIN

- ▶ Sendo: $|\mu_{s,z}| = 1\mu_B$. (De acordo com a teoria quântica, o valor de $\mu_{s,z}$ é ligeiramente maior que $1\mu_B$, mas vamos ignorar este fato.)

- ▶ Para medir o momento magnético de átomos e elétrons, utiliza-se o chamado Magnéton de Bohr:

$$\mu_B = \frac{eh}{4\pi m} = 9,27 \times 10^{-24} \text{ J/T} \quad (\text{magneton de Bohr}).$$

- ▶ A energia potencial do elétron é dada com:

$$U = -\vec{\mu}_s \cdot \vec{B}_{\text{ext}} = -\mu_{s,z} B_{\text{ext}},$$

Atom or Ion	Magnetic Moment (10^{-24} J/T)
H	9.27
He	0
Ne	0
Ce ³⁺	19.8
Yb ³⁺	37.1

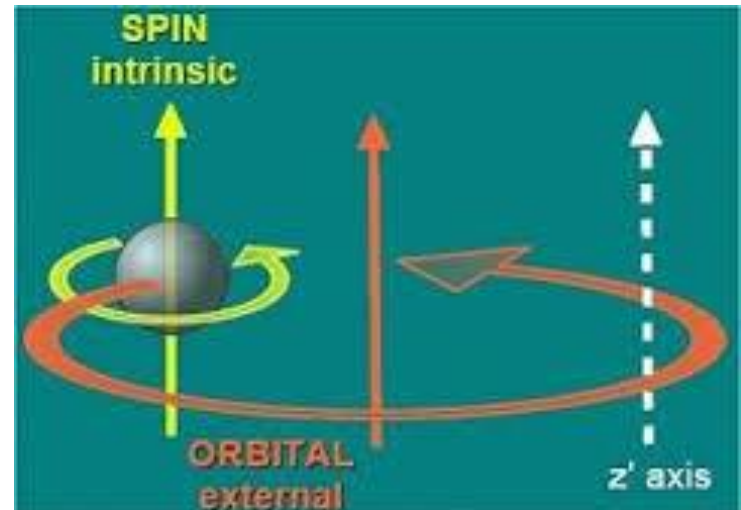
Movimento Orbital

- ▶ Quando faz parte de um átomo um elétron possui momento angular adicional, o momento angular orbital, L_{orb} :
- ▶ Associado a ele, existe o momento magnético dipolar orbital:

$$\vec{\mu}_{\text{orb}} = -\frac{e}{2m} \vec{L}_{\text{orb}},$$

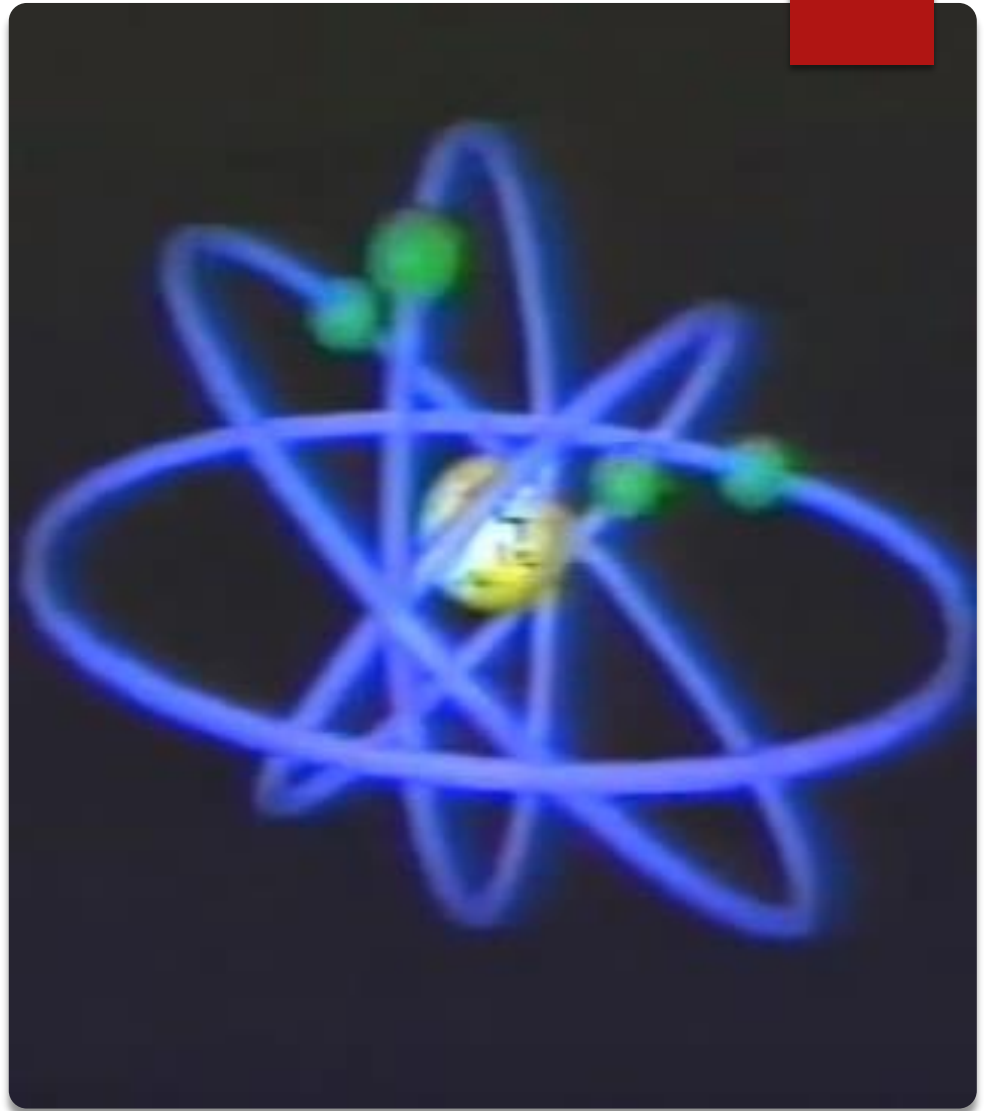
- ▶ Na presença de campo externo, a energia potencial é:

$$U = -\vec{\mu}_{\text{orb}} \cdot \vec{B}_{\text{ext}} = -\mu_{\text{orb},z} B_{\text{ext}},$$

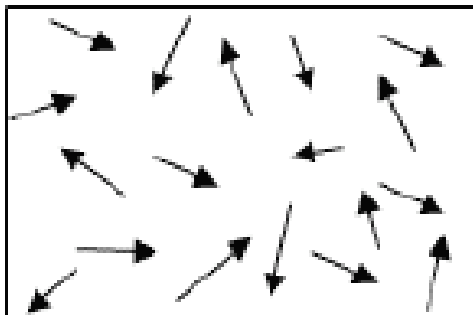


Domínio

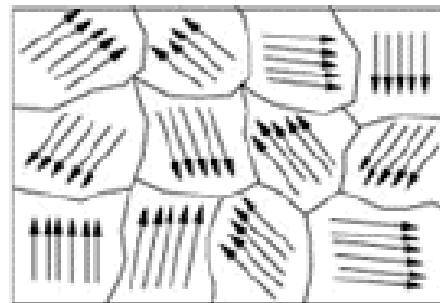
- ▶ Vídeo
<https://www.youtube.com/watch?v=yvrNcNc3-RI>
- ▶ Minuto: 22



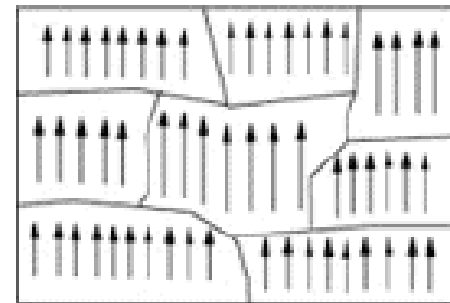
Ímã



Non-Magnetic Material
(no domains)



Magnetic Material
(domains, but not lined up)



Magnet
(domains, and all are lined up)

Ímãs

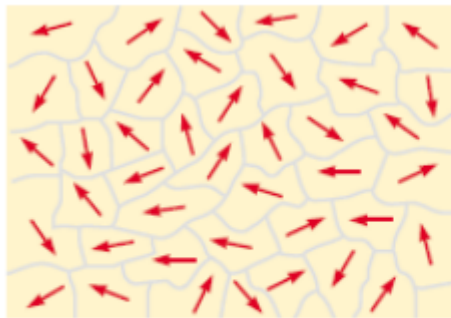
- ▶ Classificados quanto à sua *origem* ou quanto ao seu *comportamento*.
- ▶ A *origem* pode ser natural ou artificial:
 - ▶ encontrado na natureza com as propriedades de atrair outros elementos, ou
 - ▶ consegue adquirir as propriedades após ser esfregado em um ímã natural, processo chamado de imantação.
- ▶ O *comportamento*, pode ser permanente ou transitório:
 - ▶ ele sempre ficará imantado, mesmo sem campo magnético, ou
 - ▶ ele perde as propriedades magnéticas após a extinção do campo magnético.

Ferromagnetismo

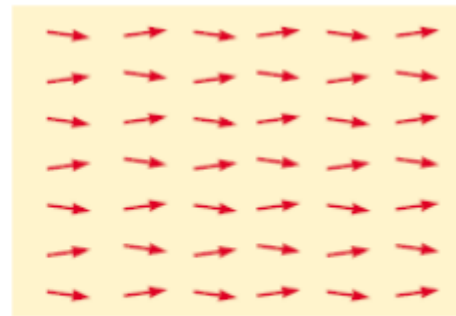
- ▶ Esta é a forma mais forte de magnetismo, exibida por materiais como ferro, cobalto, níquel, etc e por suas ligas.
- ▶ Um material ferromagnético, em seu estado normal, é constituído de um número muito grande de domínios magnéticos, dentro dos quais o alinhamento dos dipolos atômicos é perfeito.
- ▶ O ferromagnetismo surge devido a uma interação quântica especial, chamada acoplamento de troca, que permite o alinhamento dos dipolos atômicos em rígido paralelismo, apesar da tendência à desordem devida à agitação térmica.


Ferromagnetismo

Um material ferromagnético submetido a um campo magnético externo \vec{B}_{ext} adquire um grande momento dipolar magnético na direção de \vec{B}_{ext} . Se o campo é não-uniforme o material ferromagnético é atraído *da* região onde o campo magnético é menos intenso *para* a região onde o campo magnético é mais intenso.



$$\vec{B} = 0$$




$$\vec{B}$$

Ferromagnetismo

- ▶ Acima de uma certa temperatura crítica, chamada temperatura de Curie, o acoplamento de troca deixa de ter efeito e o material torna-se paramagnético.

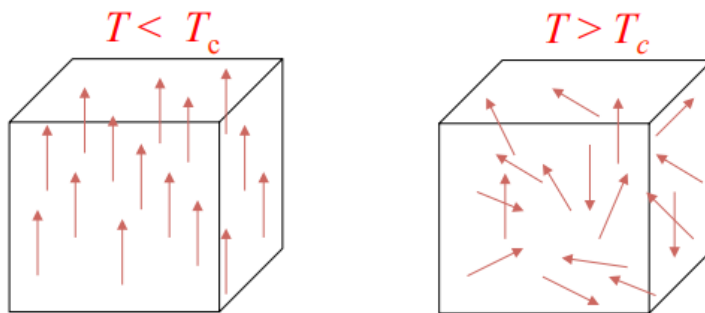
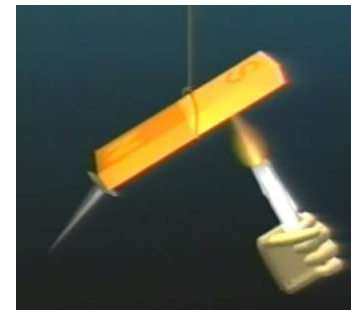


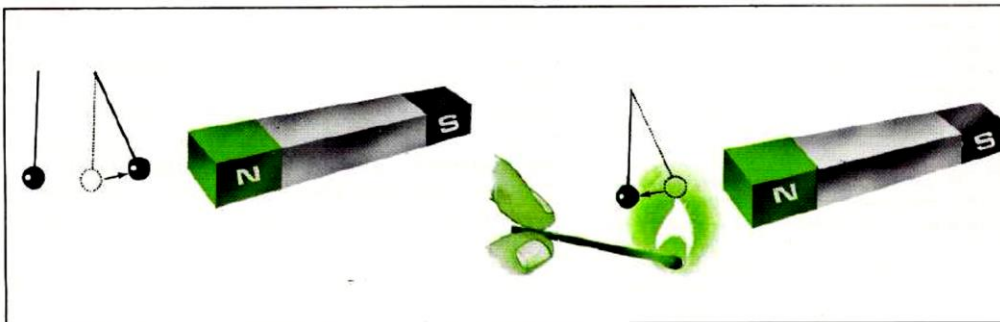
TABLE 30.2 Curie Temperatures
for Several Ferromagnetic Substances

Substance	T_{Curie} (K)
Iron	1 043
Cobalt	1 394
Nickel	631
Gadolinium	317
Fe_2O_3	893



Ferromagnetismo

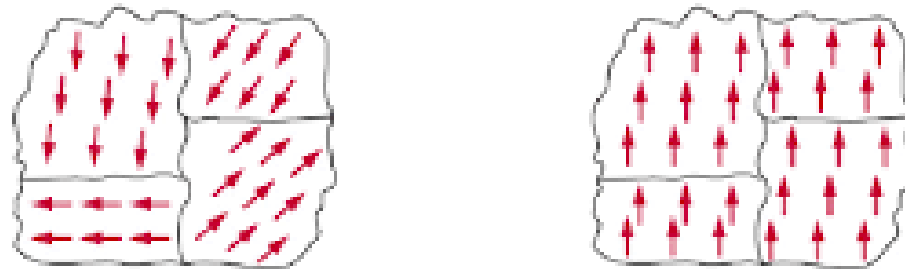
- ▶ Temperatura de Curie
- ▶ Os materiais ferromagnéticos conservam suas propriedades somente abaixo de um temperatura, característica de cada material.
- ▶ Se ele é aquecido, e a temperatura aumenta, o material torna-se paramagnético.



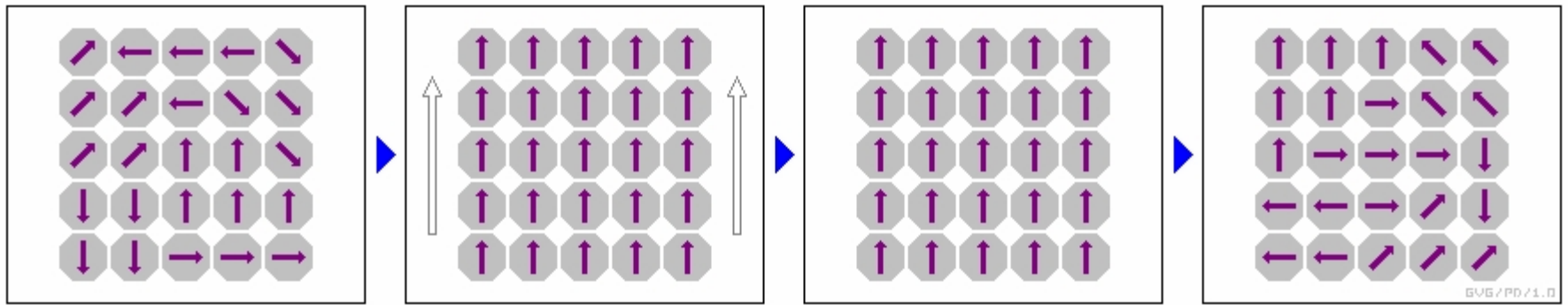
La investigadora polaca Maria Skłodowska, más conocida por el apellido de su marido, Curie,

Ferromagnéticos

► Ferromagnético

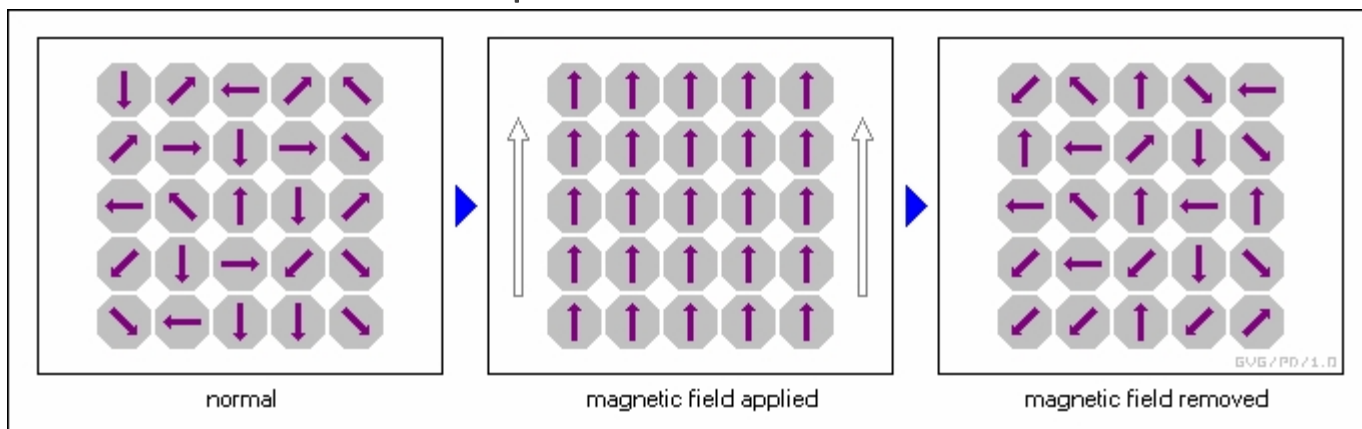


Ferromagnetism



Paramagnetismo

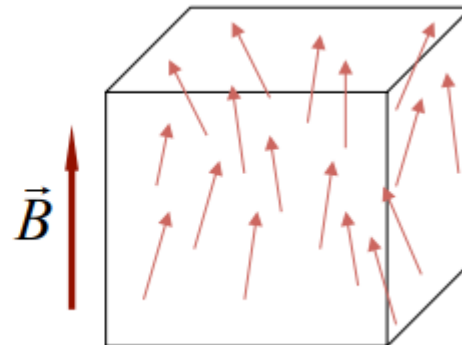
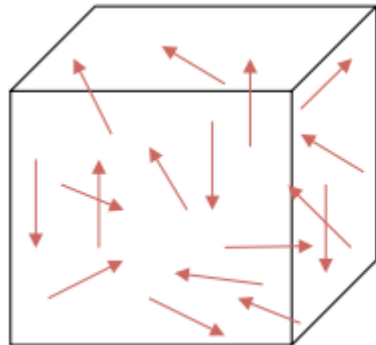
- ▶ Em materiais paramagnéticos, os átomos têm momentos de dipolo magnéticos permanentes que interagem fracamente e estão orientados aleatoriamente na ausência de um campo magnético externo.
- ▶ Na presença de um campo externo, eles tendem a se alinhar paralelamente ao campo, mas isto é dificultado pelo movimento caótico provocado pela agitação térmica.
- ▶ O grau de alinhamento dos momentos com o campo depende da intensidade deste e da temperatura.



Paramagnetismo

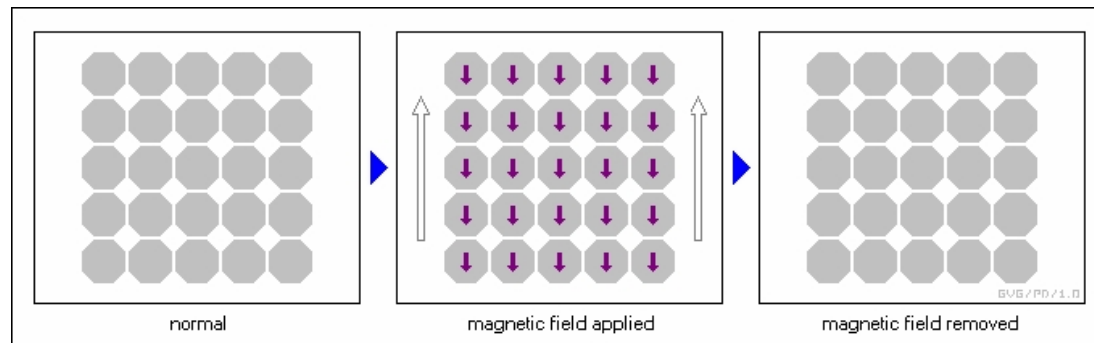
- ▶ Um material paramagnético colocado num campo externo não uniforme é atraído para a região onde o campo é mais intenso.
- ▶ Materiais: Cobre, chumbo, mercúrio, prata, silício, ouro, diamante.

Todo material paramagnético submetido a um campo magnético externo \vec{B}_{ext} apresenta um momento dipolar magnético orientado no mesmo sentido que \vec{B}_{ext} . Se o campo \vec{B}_{ext} é não-uniforme o material paramagnético é atraído *da* região onde o campo magnético é menos intenso *para* a região onde o campo magnético é mais intenso.



Diamagnetismo

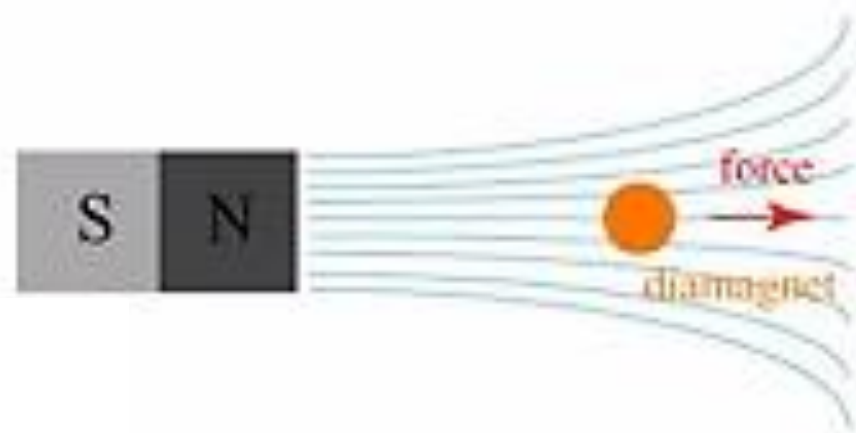
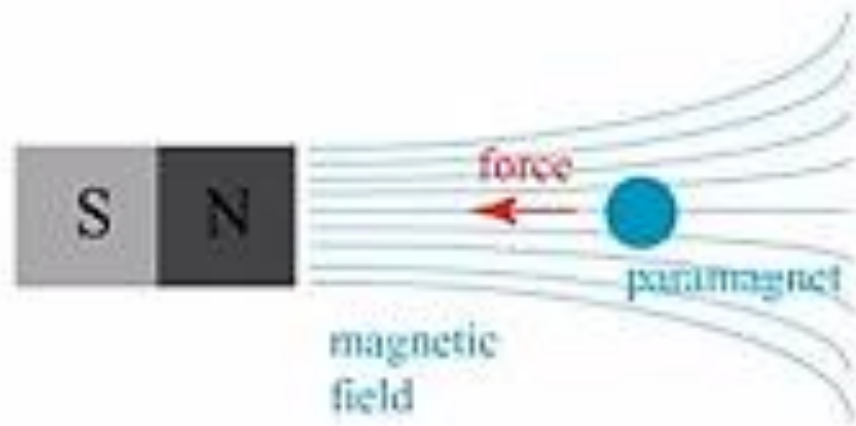
- ▶ É o tipo de magnetismo manifestado por todos os materiais comuns, mas é tão fraco que é mascarado se o material exibir também magnetismo de um dos outros dois tipos.
- ▶ Um material diamagnético não possui momento de dipolo magnético permanente; quando o material é submetido a um campo magnético externo, fracos momentos de dipolo magnético são produzidos nos átomos do material.
- ▶ A combinação destes momentos de dipolo induzidos produz um fraco campo magnético resultante, que desaparece quando o campo externo é removido.



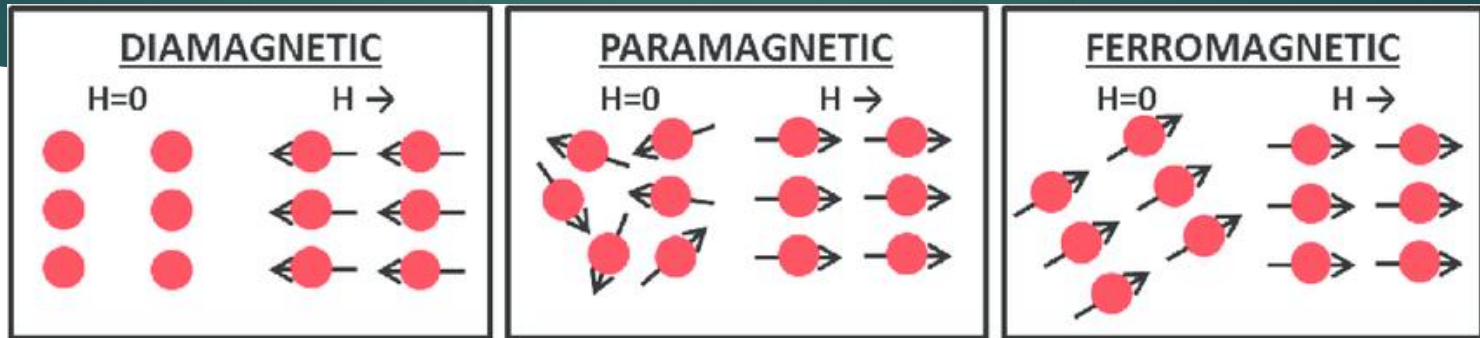
Diamagnetismo

- ▶ O momento de dipolo induzido por um campo externo B tem sentido oposto a B .
- ▶ Materiais: cálcio, alumínio, cromo, magnésio, tungstênio

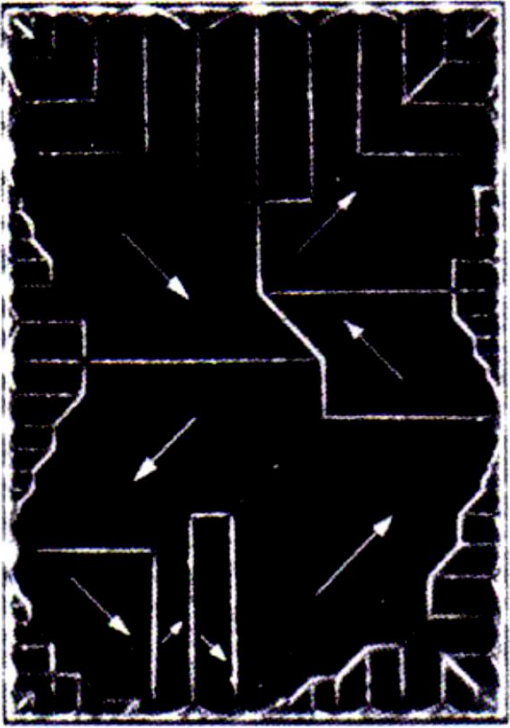
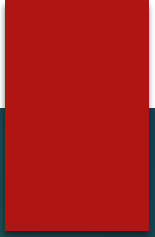
👉 Todo material diamagnético submetido a um campo magnético externo \vec{B}_{ext} apresenta um momento dipolar magnético orientado no sentido oposto ao de \vec{B}_{ext} . Se o campo \vec{B}_{ext} é não-uniforme, o material diamagnético é repelido *da* região onde o campo magnético é mais intenso *para* a região onde o campo magnético é menos intenso.



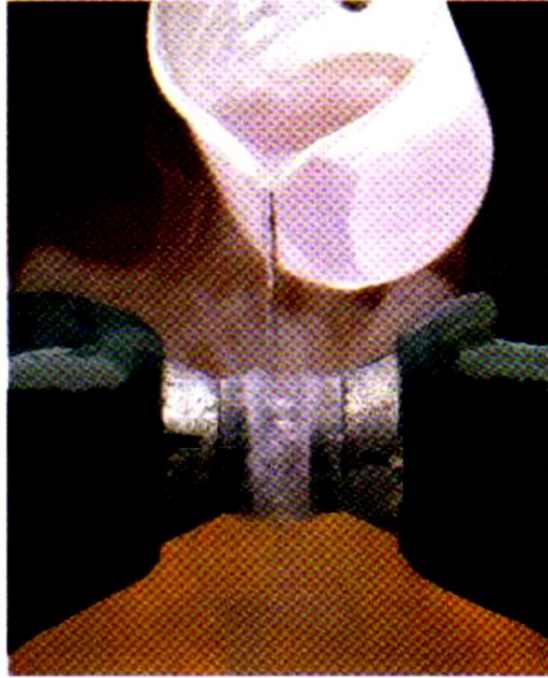
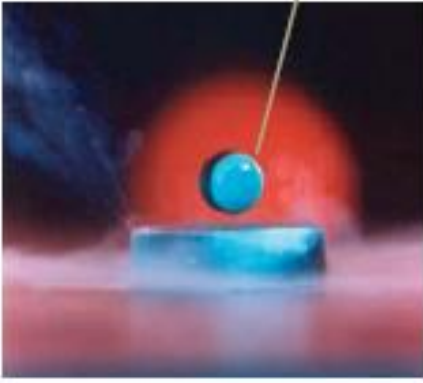
Resumo



Meios Materiais	Dipolo Magnético	Orientação dos dipolos em presença de B externo	Interação entre momentos dipolos	Magnetização do material quando retira B externo
Ferromagnéticos	Permanente	Mesmo sentido de B externo	Forte	Pode virar imã permanente
Diamagnéticos	Em presença de B externo	Contrário sentido de B externo	Fraca	Nula
Paramagnéticos	Permanente	Mesmo sentido de B externo	Fraca	Nula



Courtesy Argonne National Laboratory




O oxigênio líquido fica suspenso entre os pólos de um ímã porque o líquido é paramagnético e, portanto, é atraído pelo ímã. (Richard Megna/Fundamental Photographs)



FIG. 32-13 Uma rã sendo levitada pelo campo magnético produzido por um solenóide vertical colocado abaixo da rã. (A rã não está sendo submetida a nenhum desconforto; a sensação é a mesma de flutuar na água, algo que as rãs apreciam muito.) (Cortesia de A. K. Gein, High Field Magnet Laboratory, University of Nijmegen, Holanda)

FIG. 32-17 Micrografia da estrutura de domínios de um monocristal de níquel; as linhas brancas mostram as paredes dos domínios. As setas brancas traçadas na fotografia mostram a orientação dos dipolos magnéticos dentro de cada domínio e, portanto, a orientação do dipolo magnético total de cada domínio. O cristal como um todo não apresenta magnetização espontânea, a menos que o campo magnético total (soma vetorial dos dipolos magnéticos para todos os domínios) seja diferente de zero. (Cortesia de Ralph W. DeBlois)

- 
- ▶ Ferromagnético vídeo:
 - ▶ <https://youtu.be/AWYqYbEd-UY>
 - ▶ Paramagnético e outros vídeo:
 - ▶ <https://youtu.be/u36QpPvEh2c>
 - ▶ Diamagnético vídeo rã:
 - ▶ <https://youtu.be/A1vyB-O5i6E>

Viagem a eletricidade

Comportamento de elétrons
Aplicações

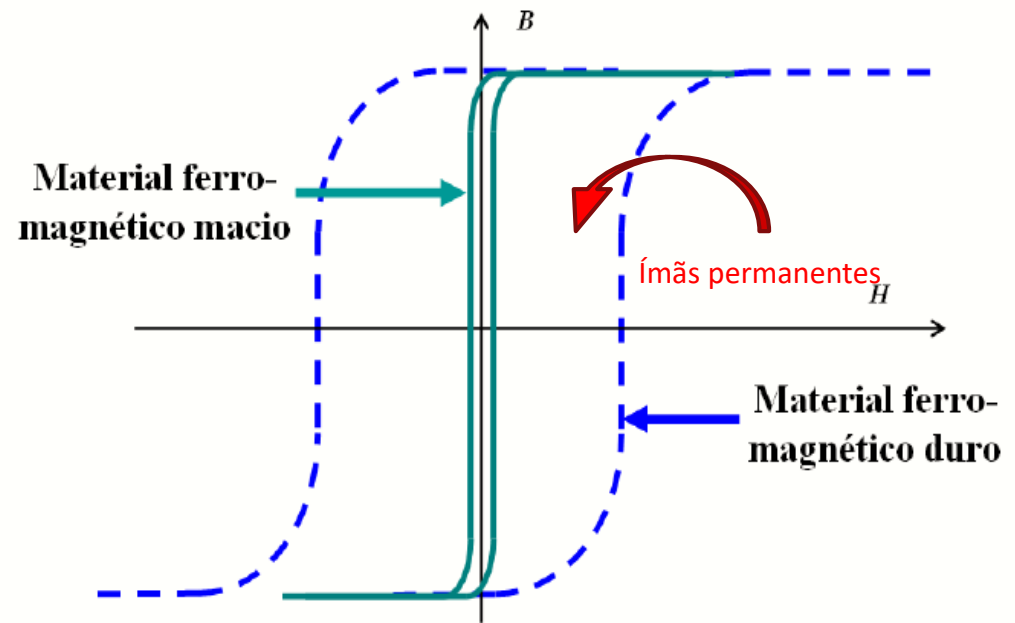
[HTTPS://WWW.YOUTUBE.COM/WATCH?V=BTA9MO5QLZM](https://www.youtube.com/watch?v=BTA9MO5QLZM)



Ciclo de Histerese

COERCITIVIDADE (H_c)

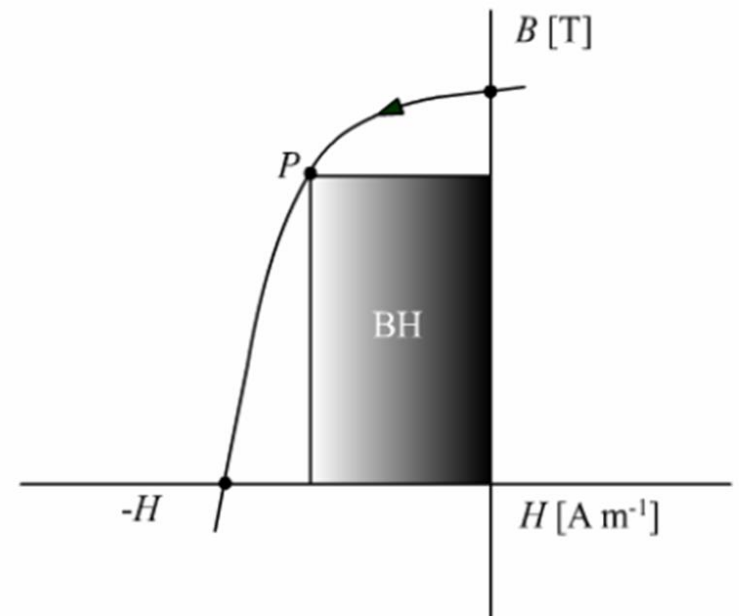
- ▶ B indica o quanto é forte um ímã.
- ▶ H indica o quanto difícil é reverter a magnetização de um ímã.



Ciclo de Histerese. Fonte: Anocibar, H. R. 2011

Ímãs Permanentes

- ▶ Os ímãs permanentes são materiais ferromagnéticos, eles produzem fluxo magnético, e permanecem magnetizados mesmo na ausência de campo magnético.
- ▶ As características e definições de um ímã permanente são analisadas através do segundo quadrante do ciclo de histerese.
- ▶ O desempenho é caracterizado por seu campo coercitivo ou coercitividade.
- ▶ Sua qualidade é dada através do produto máximo de BH.



Referências Bibliográficas

- ▶ HALLIDAY, Resnick. Física 3. 4ª edição. Rio de Janeiro. Editora LTC, 1996.
- ▶ HALLIDAY, Resnick. Física 3. 8ª edição. Rio de Janeiro. Editora LTC, 2009.
- ▶ DIAS, V. S. Michael Faraday: Subsídios para metodologia de trabalho experimental. Dissertação de mestrado. USP, Instituto de Física. São Paulo, 2004.
- ▶ SERWAY, R.A.& JEWETT, J.W. Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics. 8ª edição. Ed Brooks/Cole Cengage, 2010.
- ▶ TIPLER, Paul. Física Volume 2. 5ª edição. Rio de Janeiro. Editora LTC, 2006.
- ▶ <https://www.youtube.com/watch?v=3AZcVRDGIk>