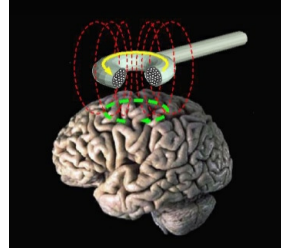
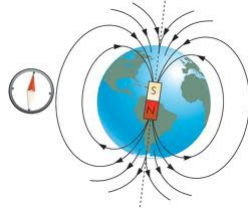
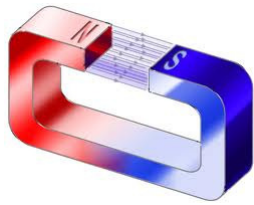


# Campo de indução magnética



## Campo de indução Magnética

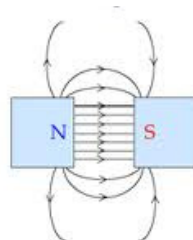
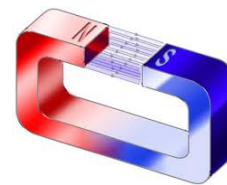
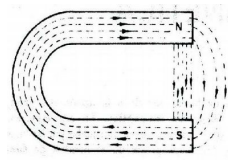
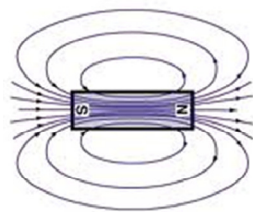
- ▶ O campo de indução magnética é um **campo vetorial**:

$$\vec{B}(x, y, z) = B_x(x, y, z) \hat{x} + B_y(x, y, z) \hat{y} + B_z(x, y, z) \hat{z}$$

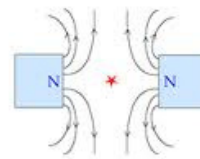
### Linhas de campo

- ▶ A tangente da linha de campo num ponto dá a direção do campo nesse ponto.
- ▶ A densidade de linhas de campo numa região do espaço dá informação sobre a intensidade do campo nessa região.

## Campo de indução magnética criado por ímanes



Pólos que se atraem

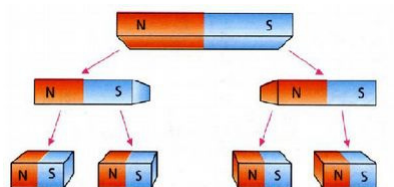


Pólos que se repelem

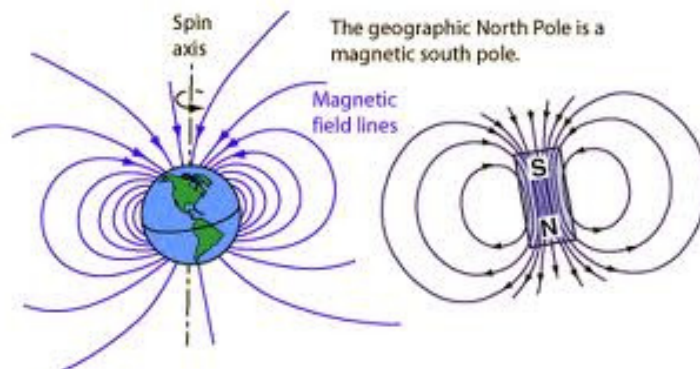
## Campo de indução magnética criado por ímanes

É impossível separar os polos de um ímã.

Se partirmos um ímã ao meio, cada uma das metades terá um pólo norte e um pólo sul.



## Campo magnético terrestre



## Campo de indução magnética criado por correntes

### Lei de Biot-Savart

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 i d\vec{l} \wedge \hat{r}}{4\pi r^2}$$

$$\vec{B} = \int \frac{\mu_0 i d\vec{l} \wedge \hat{r}}{4\pi r^2}$$

Permeabilidade magnética do vácuo:  
 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H m}^{-1}$

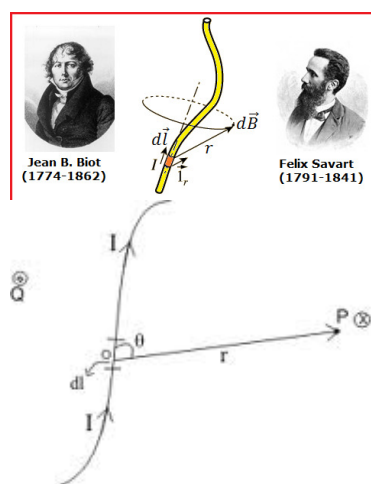
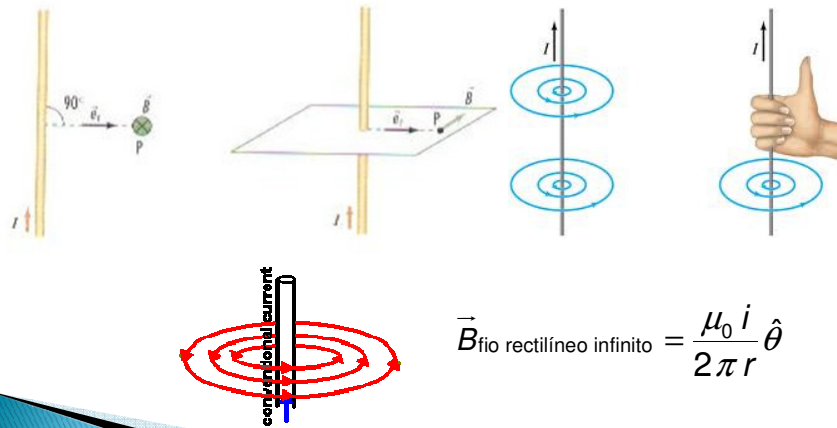


Figure 1. Field at point P is perpendicular to the plane of paper pointing into it

## Campo de indução magnética criado por correntes

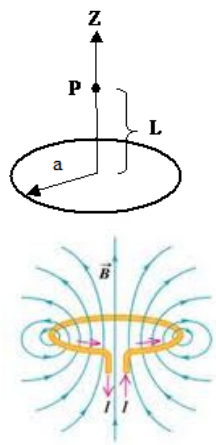
### Fio retilíneo infinito



$$\vec{B}_{\text{fio retilíneo infinito}} = \frac{\mu_0 i}{2\pi r} \hat{\theta}$$

## Campo de indução magnética criado por correntes

### Bobine circular plana



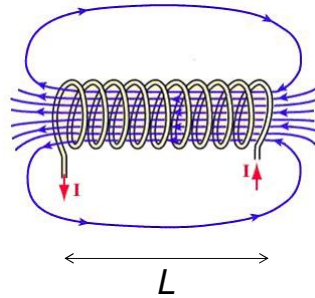
$$\vec{B}_{\text{eixo espira}} = \frac{\mu_0 i a^2}{2(a^2 + L^2)^{3/2}} \hat{z}$$

$$\vec{B}_{\text{eixo bobine}} = \frac{\mu_0 N i a^2}{2(a^2 + L^2)^{3/2}} \hat{z}$$

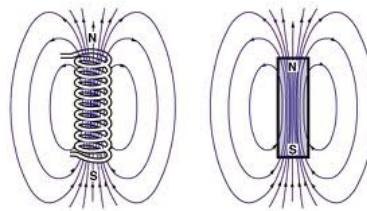
$$\vec{B}_{\text{centro bobine}} = \frac{\mu_0 N i}{2a} \hat{z}$$

## Campo de indução magnética criado por correntes

### Solenóide “muito comprido”



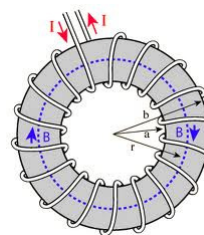
### Electro-íman



$$B_{\text{interior solenóide}} = \frac{\mu_0 N i}{L} = \mu_0 n i$$

## Campo de indução magnética criado por correntes

### Toróide

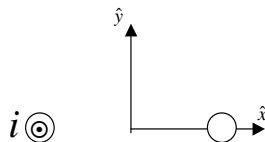


$$B_{\text{interior toróide}} = \frac{\mu_0 N i}{2 \pi r}$$

## Questões

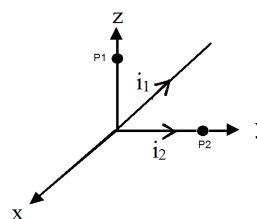
1. Dois fios condutores retilíneos, percorridos por uma corrente elétrica  $i=2\text{ A}$ , são colocados lado a lado, estando os seus centros distanciados de 2 cm. O diâmetro dos próprios fios é desprezável quando comparado com a sua separação.

- Se a corrente fluir no mesmo sentido em ambos os fios, qual o vetor campo de indução magnética no ponto intermédio entre eles?
- Se a corrente fluir em sentidos contrários, qual o vetor campo de indução magnética no ponto intermédio entre eles?



2. Num fio de corrente sobre o eixo dos XX flui uma corrente  $i_1=100\text{ A}$  com o sentido negativo (-) e num fio de corrente sobre o eixo dos YY flui uma corrente  $i_2=100\text{ A}$  com o sentido positivo (+).

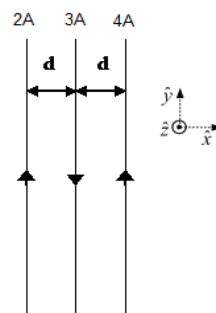
- Calcule o campo de indução magnética criado pela corrente  $i_1$  na posição do ponto P1 (10 cm sobre o eixo dos ZZ).
- Calcule o campo de indução magnética criado pela corrente  $i_2$  na posição do ponto P1 (10 cm sobre o eixo dos ZZ).
- Calcule o campo de indução magnética criado pelas correntes  $i_1$  e  $i_2$  na posição do ponto P2, situado na posição 10 cm sobre o eixo dos YY.



## Questões

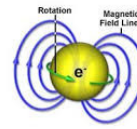
3. Considere duas bobinas planas concêntricas e coplanares, respetivamente, de raios  $r_1$  e  $r_2$ , e número de espiras  $N_1$  e  $N_2$ , percorridas pelas correntes  $I_1$  e  $I_2$  em sentidos contrários. Que relação deve existir entre as correntes para que o campo magnético seja nulo no centro das espiras?

4. Considere os três fios muito compridos e co-planares percorridos pelas correntes com as intensidades e sentidos representados na figura. A distância entre fios adjacentes é  $d=5\text{ cm}$ . Determine o campo de indução magnética sobre um ponto do fio central.



## Campo magnético na matéria

- ▶ As partículas elementares, em particular os elétrons, têm momento magnético intrínseco de spin, devido ao seu movimento circular.
- ▶ Num campo magnético externo:
  - Os momentos magnéticos tendem a alinhar com o campo magnético, reforçando-o.
  - Por outro lado, são induzidas correntes que produzem campo magnético oposto ao campo magnético aplicado.
- ▶ Os materiais caracterizam-se como **Diamagnéticos, Paramagnéticos ou Ferromagnéticos**, dependendo da forma como se comportam na presença de um campo magnético externo.



## Campo magnético na matéria

$\vec{H}$  = Campo magnético aplicado (externo)

$\vec{B}$  = Campo de indução magnética

▶ No vazio:  $\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$

▶ Na matéria:  $\vec{B} = \mu \vec{H}$

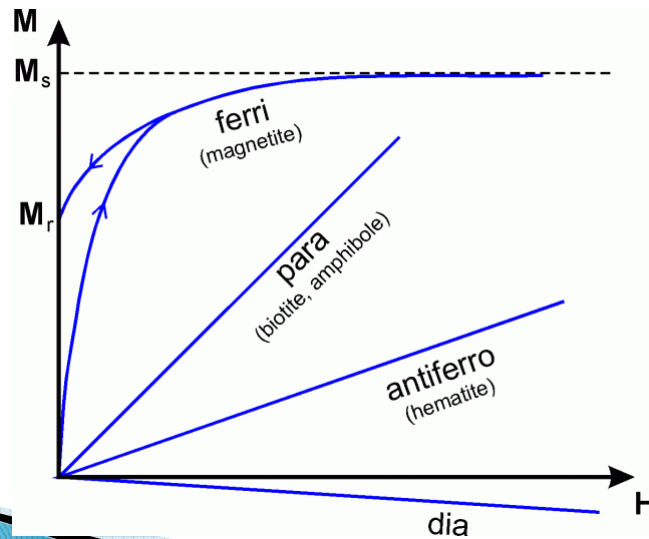
$\vec{M}$  = Campo de magnetização

$\chi_m$  = Suscetibilidade magnética

$$\vec{M} = \chi_m \vec{H}$$

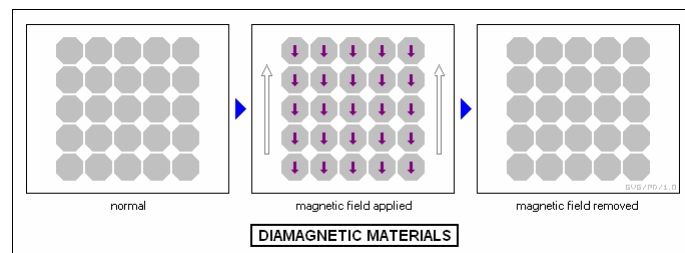
$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) = \mu_0 (1 + \chi_m) \vec{H} = \mu \vec{H}$$

## Campo magnético na matéria



## Campo magnético na matéria

### ► Materiais Diamagnéticos

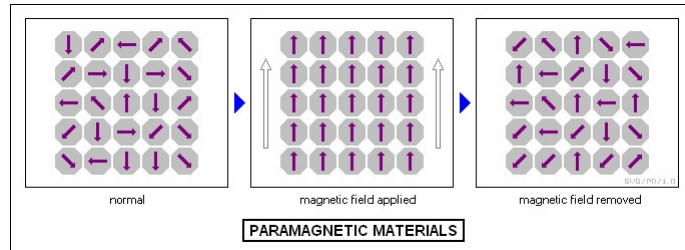


$$\chi_m < 0$$



# Campo magnético na matéria

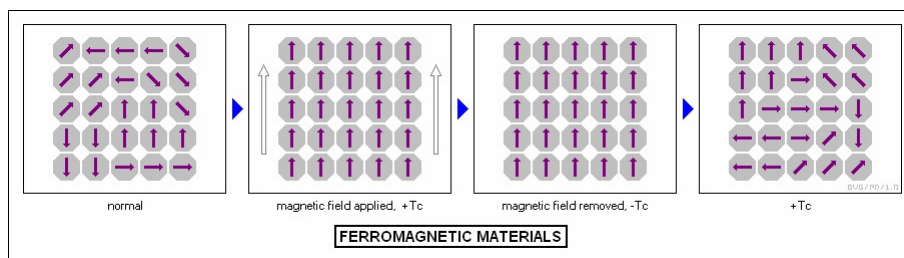
## ▶ Materiais Paramagnéticos



$$\chi_m > 0$$

# Campo magnético na matéria

## ▶ Materiais Ferromagnéticos



$$\chi_m > 0$$

- ▶ Tc=Temperatura de Curie
- ▶ Para uma temperatura acima da Tc, um material ferromagnético comporta-se como paramagnético

# Campo magnético na matéria

## Some Diamagnetic Minerals

Mineral	Susc., SI*
quartz	-6.3E-6
calcite	-4.8E-6
halite	-6.5E-6
galena	-4.3E-6
sphalerite	-3.3E-6

## Some Paramagnetic Minerals

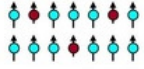
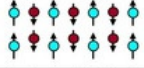

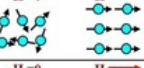
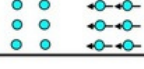
Mineral	Susc., SI*
fayalite	1.3E-3
pyroxene	9.2E-4
amphiboles	1.6-9.4E-4
biotite	6.7-9.8E-4
garnet	0.4-2.0E-3

## Important Ferromagnetic Minerals

Mineral	Formula	Type	Susc., SI*	Curie T
magnetite	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	ferri	3.8-10.0	580°C
hematite	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	antiferro	6.9E-3	680°C
ilmenite	FeTiO <sub>3</sub>	ferri	1.7	50-300°C
pyrrhotite	FeS	ferri	1.6	320°C
maghaemite	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ferri	variable	545-675°C

# Campo magnético na matéria

Types of Magnetic Behavior (in order of decrease strength):  
everything related to magnetism is due to electron spin....

type	spin alignment	spin in simplified plot	examples
ferromagnetic	all spins align parallel to one another: spontaneous magnetization- $M = a + b$		Fe, Co, Ni, Gd, Dy, SmCo <sub>5</sub> , Sm <sub>2</sub> Co <sub>17</sub> , Nd <sub>2</sub> Fe <sub>14</sub> B
ferrimagnetic	most spins parallel to one another, some spins antiparallel: spontaneous magnetization- $M = a - b > 0$		magnetite (Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> ), yttrium iron garnet (YIG), GdCo <sub>5</sub>
antiferromagnetic	periodic parallel-antiparallel spin distribution: $M = a - b = 0$		chromium, FeMn, NiO
paramagnetic	spins tend to align parallel to an external magnetic field: $M = 0 @ H=0, M > 0 @ H > 0$		oxygen, sodium, aluminum, calcium, uranium
diamagnetic	spins tend to align antiparallel to an external magnetic field: $M = 0 @ H=0, M < 0 @ H > 0$		superconductors, nitrogen, copper, silver, gold, water, organic compounds