



Eletromagnetismo

Aula 07 – materiais magnéticos

Prof. Acélio Luna Mesquita

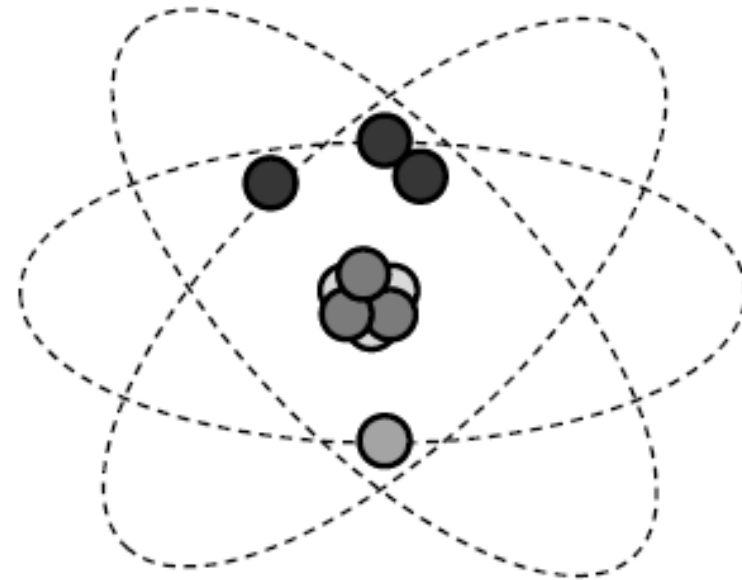
Universidade Federal do Ceará – Campus Sobral

Magnetismo da matéria

- Segundo o modelo atômico vigente, chamado de modelo orbital, todo átomo é formado por um núcleo composto por nêutrons e prótons, orbitado por elétrons. O número de prótons é igualado de elétrons, de tal forma que o átomo é eletricamente neutro.

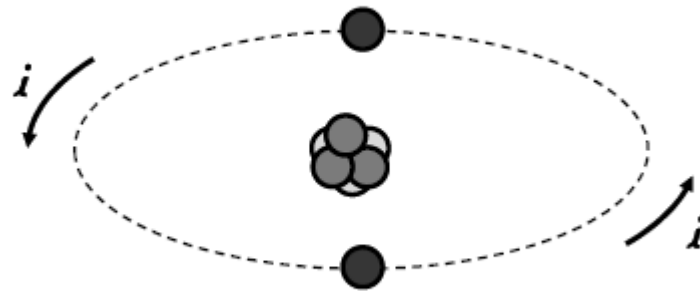
Modelo atômico orbital clássico

- Átomo:
 - Núcleo: prótons + neutrons;
 - Nuvem eletrônica: elétrons;
- 7 camadas de energia:
 - K, L, M, N, O, P e Q;
- 4 subcamadas:
 - s: 1 orbital;
 - p: 3 orbitais;
 - d: 5 orbitais;
 - f: 7 orbitais;
- Cada orbital: máximo 2 e^- :
 - Semipreenchido x totalmente preenchido;
 - Spin's contrários;



Corrente elétrica orbital

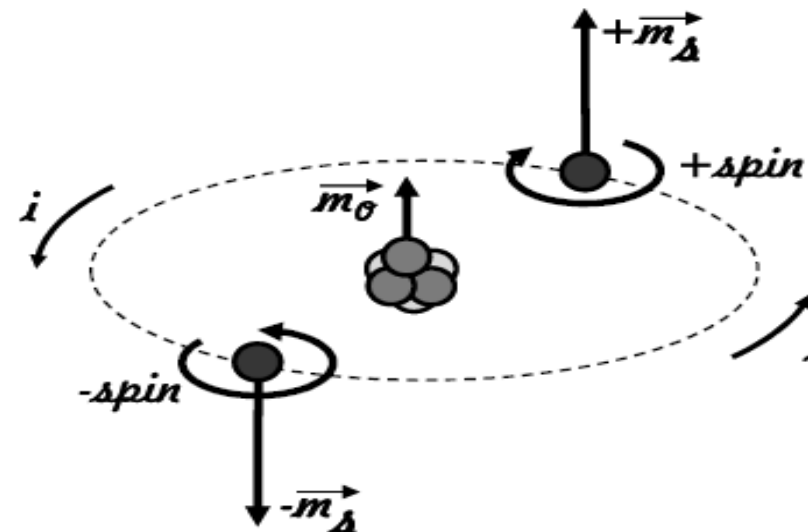
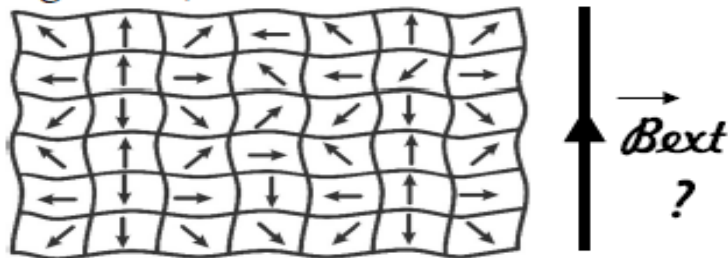
- O movimento orbital dos elétrons pode ser visto como uma corrente de condução que gera um campo magnético e, conseqüentemente, um momento magnético chamado de orbital.



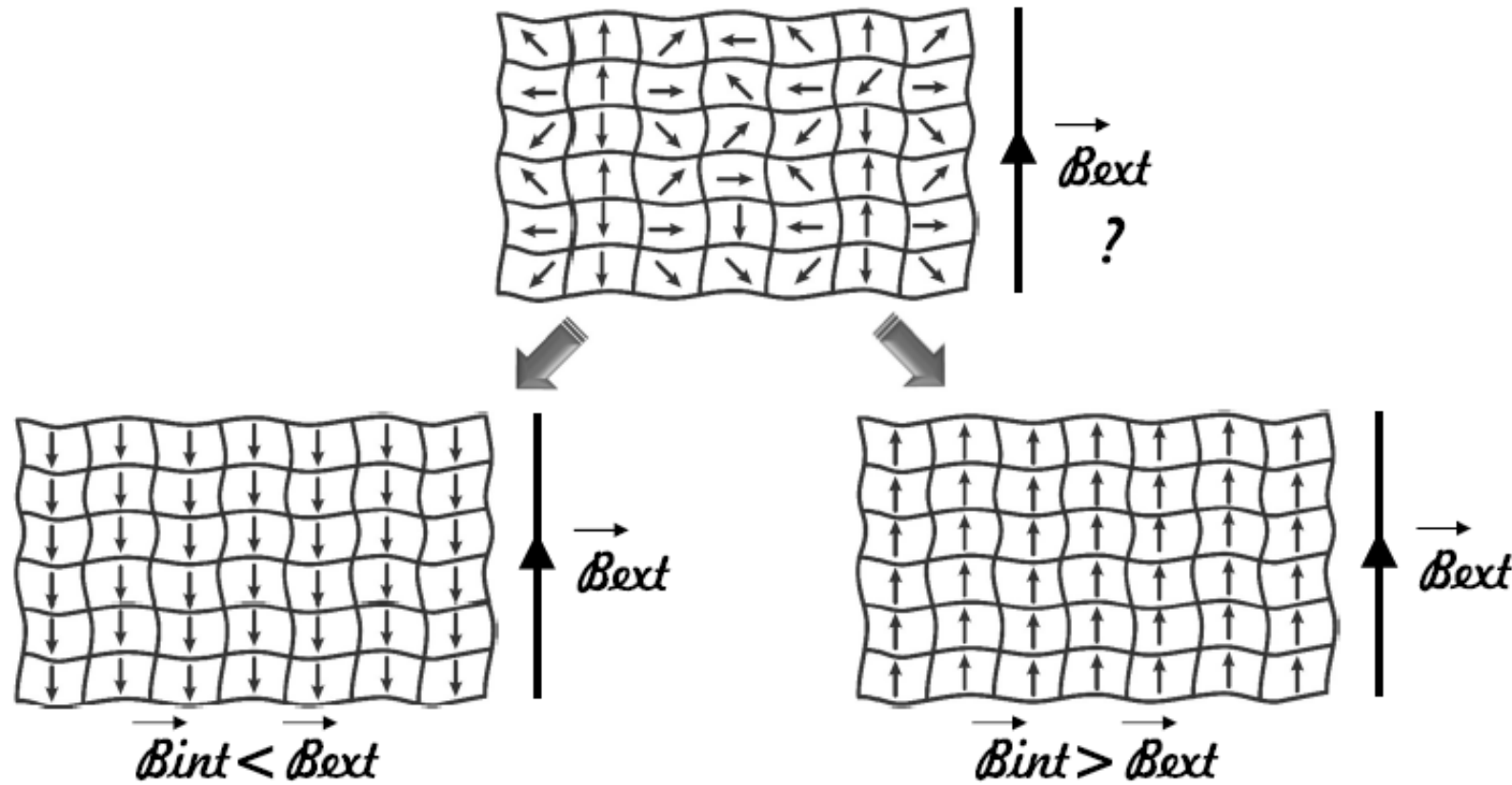
Momento magnético atômico

- Existe ainda, um momento magnético de spin associado a cada elétron, o qual se deve ao movimento de spin. Entre átomos distintos, há variação do número de elétrons bem como da distribuição deles entre camadas, subcamadas e orbitais.

- Corrente elétrica orbital:
 - Momento magnético orbital;
- Corrente elétrica de spin:
 - Momento magnético de spin;
 - Orbital semipreenchido: $\neq 0$;
 - Orbital totalmente preenchido: $= 0$;
- Momento magnético atômico:
 - $\vec{m}_a = \Sigma \vec{m}_o + \Sigma \vec{m}_s$
 - Aglomeração da matéria:



Reação da matéria a campo magnético externo



Reação da matéria a campo magnético externo

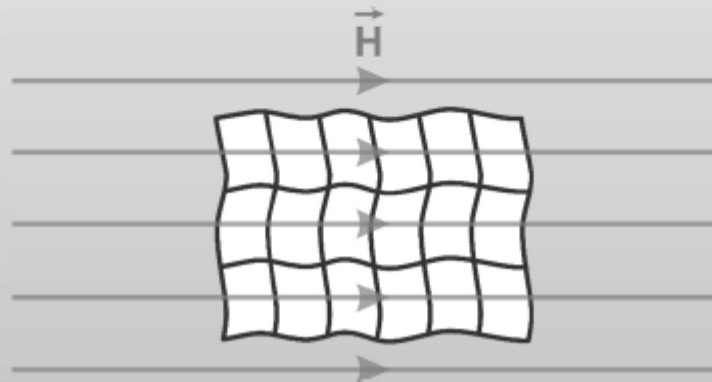
$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} \equiv \mu_r \cdot \mu_o \cdot \vec{H} \therefore \mu_r = \frac{\mu}{\mu_o}$$

vácuo: $\vec{m}_a = 0 \rightarrow \mu_r = 1$

matéria: $\vec{m}_a \neq 0 \rightarrow \mu_r \neq 1$

* antiparalelismo: subtração $\rightarrow 0 < \mu_r < 1$

* paralelismo: adição $\rightarrow \mu_r > 1$



Reação da matéria a campo magnético externo

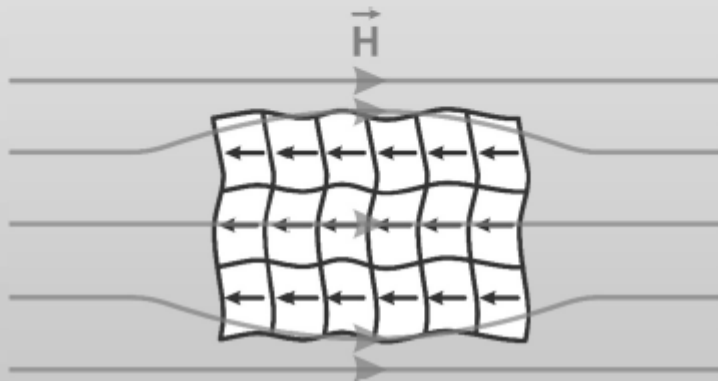
$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} \equiv \mu_r \cdot \mu_o \cdot \vec{H} \therefore \mu_r = \frac{\mu}{\mu_o}$$

vácuo: $\vec{m}_a = 0 \rightarrow \mu_r = 1$

matéria: $\vec{m}_a \neq 0 \rightarrow \mu_r \neq 1$

* antiparalelismo: subtração $\rightarrow 0 < \mu_r < 1$

* paralelismo: adição $\rightarrow \mu_r > 1$



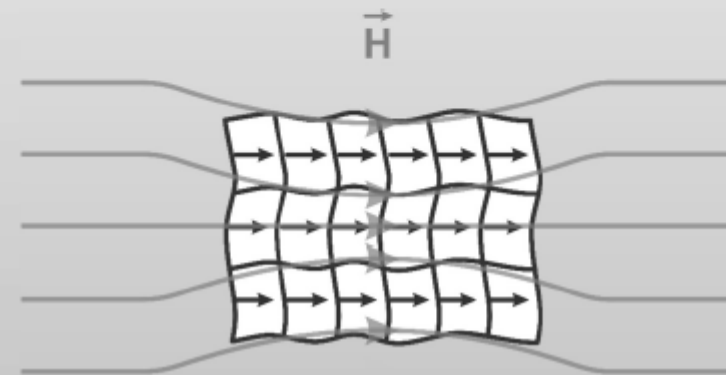
$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} \equiv \mu_r \cdot \mu_o \cdot \vec{H} \therefore \mu_r = \frac{\mu}{\mu_o}$$

vácuo: $\vec{m}_a = 0 \rightarrow \mu_r = 1$

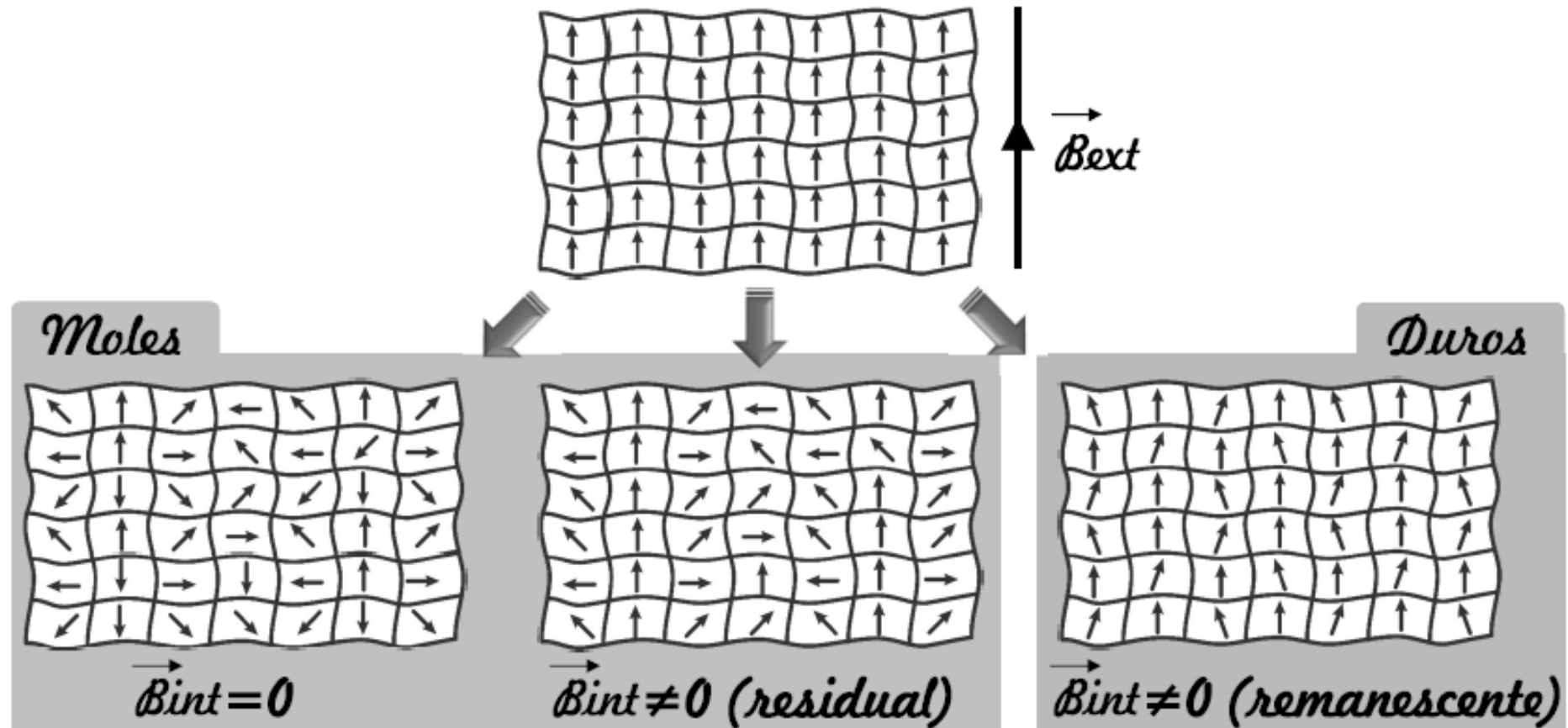
matéria: $\vec{m}_a \neq 0 \rightarrow \mu_r \neq 1$

* antiparalelismo: subtração $\rightarrow 0 < \mu_r < 1$

* paralelismo: adição $\rightarrow \mu_r > 1$



Reação à remoção do campo magnético externo



Magnetismo da matéria

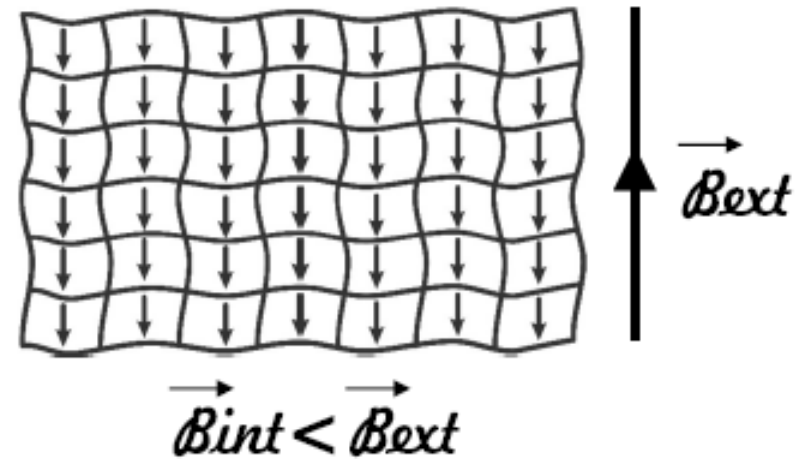
- A interação entre os momentos magnéticos de spin entre si e com os momentos magnéticos orbitais determina a característica magnética de cada átomo que juntamente com a forma de agrupamento dos átomos entre si, permite classificar magneticamente os diversos materiais em cinco tipos:
 - Diamagnéticos;
 - Paramagnéticos;
 - Ferromagnéticos;
 - Antiferromagnéticos;
 - Ferrimagnéticos.

Materiais diamagnéticos

- Do ponto de vista magnético, esse é o tipo de material mais simples que existe. Equivale a um isolante na eletrostática. São compostos por átomos cujos momentos magnéticos de spin e orbital se cancelam totalmente, resultando em um momento magnético atômico nulo.
- Quando colocados na presença de um campo magnético externo, estabelecem em seus átomos um campo magnético em sentido contrário ao que foi submetido, mas que desaparece assim que o campo externo é removido. Portanto, o campo magnético no interior do material é igual ao campo externo imposto. Em razão desse comportamento, esse tipo de material não é atraído por ímãs.
- Exemplos: mercúrio, ouro, bismuto, chumbo, prata etc.

Material mole – Diamagnéticos

- Diamagnéticos:
 - Momento magnético atômico natural nulo;
 - Imposição do campo externo:
 - Redução do momento magnético orbital;
 - $\vec{m}_a \neq 0$;
 - Antiparalelismo;
 - $\mu \approx \mu_0 \because \mu_r \approx 1$;
 - Exemplos:
 - Ouro: $\mu_r = 0,99986$;
 - Prata: $\mu_r = 0,99998$;
 - Água: $\mu_r = 0,99999$;

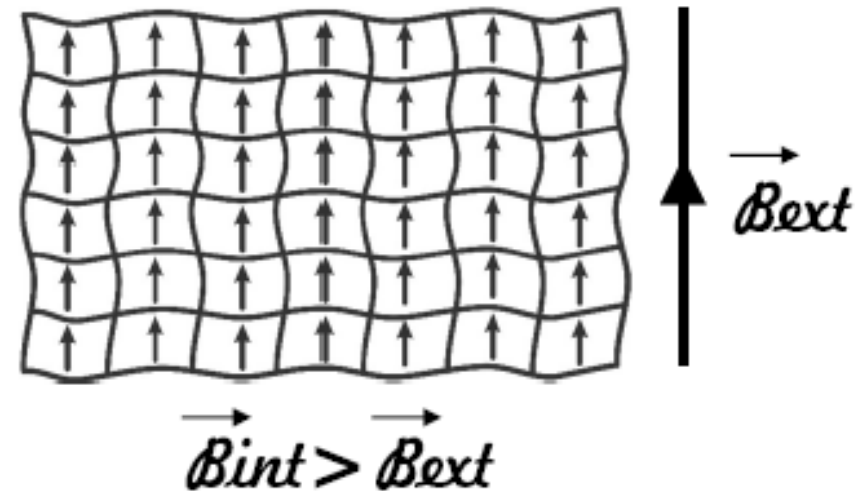


Materiais paramagnéticos

- Nesses materiais os momentos magnéticos de spin e orbital não se anulam completamente, resultando em um momento magnético atômico pequeno. Contudo a orientação aleatória dos átomos produz um momento magnético macroscópico nulo.
- Mas quando submetidos a um campo magnético externo, os momentos magnéticos atômicos da amostra de matéria sofre a ação de torque que força o alinhamento dos momentos magnéticos atômicos com o campo externo imposto.
- Esse alinhamento proporciona o aumento do campo magnético no interior do material. Exemplos: o potássio, o oxigênio, alumínio, entre outros

Material mole – Paramagnéticos

- Paramagnéticos:
 - Momento magnético atômico *fraco*;
 - Paralelismo;
 - $\mu \approx \mu_o \therefore \mu_r \approx 1$;
 - Exemplos:
 - Ar: $\mu_r = 1,0000004$;
 - Alumínio: $\mu_r = 1,00002$;
 - Platina: $\mu_r = 1,003$;



Materiais ferromagnéticos

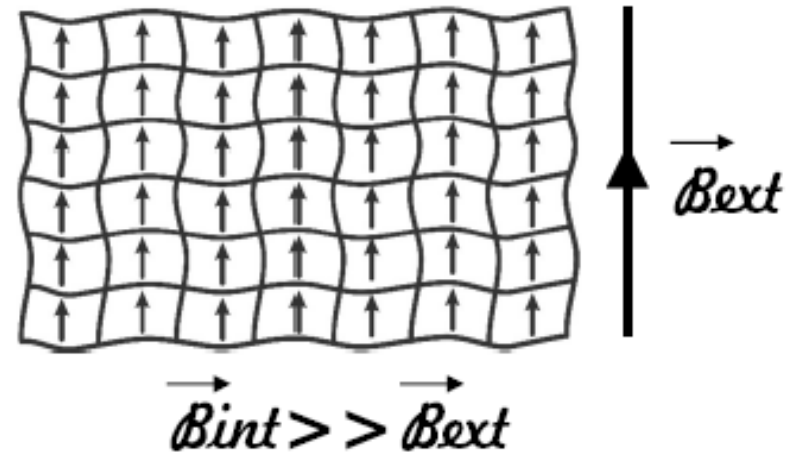
- Os átomos dos materiais ferromagnéticos apresentam predominância de momento magnético de spins mas compensados, resultado em um momento magnético atômico forte. Além disso, nesses materiais as forças interatômicas provocam o alinhamento dos momentos magnéticos atômicos em regiões com elevadas densidade de átomos, denominadas de domínios.
- Embora cada domínio isolante possua um momento magnético forte, a orientação dos domínios entre si é aleatória e anulam-se mutuamente.
- Contudo, se uma amostra do material ferromagnético é submetida a um campo magnético externo, os domínios são alinhados e a amostra como um todo passa a se comportar como um único domínio, elevando substancialmente o campo magnético em seu interior.

Materiais ferromagnéticos

- Quando o campo magnético externo é removido, os domínios permanecem praticamente alinhados, conferindo a amostra um momento magnético residual.
- Deve-se ressaltar que o ferromagnetismo é fortemente influenciado pela temperatura, tanto que os materiais ferromagnéticos sob temperatura ambiente são o ferro, o níquel, o cobalto e algumas de suas ligas.
- A temperatura para a qual esses materiais perdem suas propriedades ferromagnéticas é denominada de temperatura de Curie.

Materiais ferromagnéticos

- Ferromagnéticos:
 - Momento Magnético Atômico Elevado;
 - Spin não compensado;
 - Aglomeração em domínios:
 - Alta densidade de átomos;
 - Alinhamento magnético;
 - Momento magnético macroscópico nulo;
 - Paralelismo;
 - Exemplos:
 - Cobalto: $\mu_r=250$;
 - Níquel: $\mu_r=600$;
 - Ferro (99,8%): $\mu_r=5.000$;
 - Ferro (99,96%): $\mu_r=280.000$;

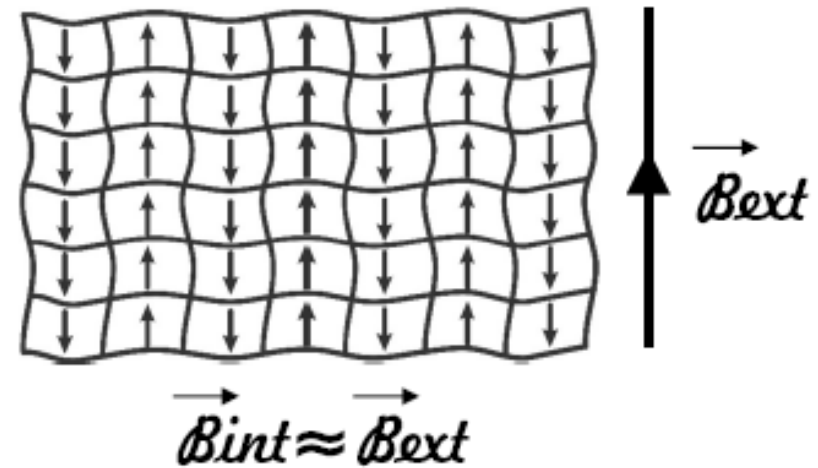


Materiais antiferromagnéticos

- Possuem estrutura atômica bem semelhantes a dos ferromagnéticos, contudo, as forças interatômicas atuam no alinhamento em antiparalelo dos momentos atômicos, impedindo a formação dos domínios e tomando esses materiais insensíveis a campos magnéticos.
 - O antiferromagnetismo só se mantém sob temperaturas bem baixas, denominadas de temperaturas de Néel. Acima dessa temperatura se comportam como materiais paramagnéticos.
 - Exemplos: óxido de níquel (NiO), sulfeto de ferro (FeS) e cloreto de cobalto (CoCl₂)
- *A **Temperatura de Néel**, é a temperatura acima da qual desaparece o efeito antiferromagnético dos materiais, passando estes a comportar-se como materiais paramagnéticos. É uma propriedade específica de cada material.

Materiais antiferromagnéticos

- Antiferromagnéticos:
 - Momento Magnético Atômico Elevado;
 - Paralelismo e Antiparalelismo;
 - Momento magnético macroscópico nulo;
 - Comportamento observado apenas em baixas temperaturas;
 - Exemplos:
 - Cloreto de Cobalto: $\mu_r \approx 1$;
 - Óxido de Níquel: $\mu_r \approx 1$;
 - Sulfeto de Ferro: $\mu_r \approx 1$;

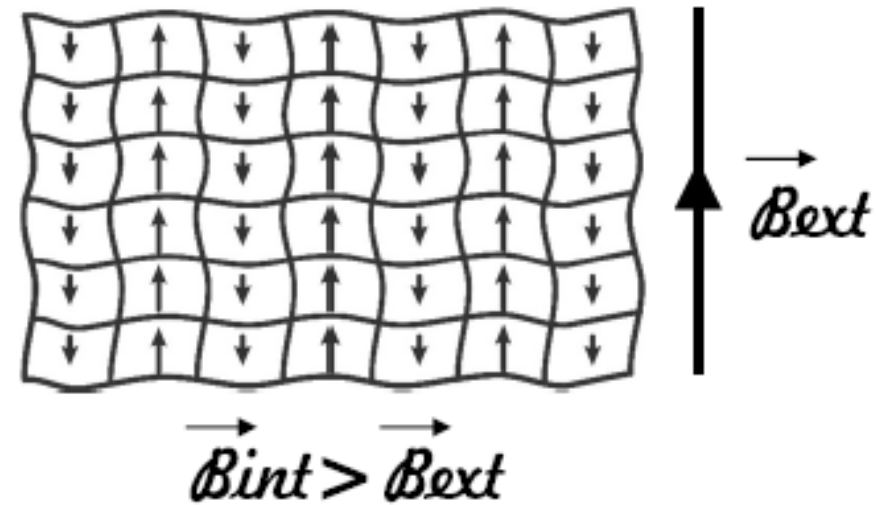


Materiais ferrimagnéticos

- Nesses materiais, assim como ocorre com os ferromagnéticos, quando submetidos a um campo magnético externo, apresentam alinhamento dos momentos magnéticos atômicos intensificando o campo magnético no interior da amostra da matéria.
- Contudo, vale ressaltar que há uma significativa diferença da ordem de grandeza do campo magnético no interior desses materiais quando estão sob ação de um mesmo campo magnético externo.
- Assim como o ferromagnetismo, o ferrimagnetismo desaparece quando o material é submetido a sua temperatura de Curie.
- Exemplos: ferrite de níquel-zinco e o ferrite de níquel.

Materiais ferrimagnéticos

- Ferrimagnéticos:
 - Similares aos antiferromagnéticos;
 - Diferença de ordem de grandeza entre os paralelos e os antiparalelos;
 - Momento magnético macroscópico não nulo;
 - Exemplos:
 - Óxido de Ferro : $\mu_r \approx 1000$;
 - Ferrite de Níquel-Zinco: $\mu_r \approx 1000$;
 - Ferrite de Níquel: $\mu_r \approx 1000$;



Aplicações em dispositivos magnéticos

- Aplicações típicas:
 - Materiais ferromagnéticos ($<1\text{kHz}$): Máquinas elétricas, transformadores, indutores acoplados e indutores:
 - Aço silício;
 - Aço silício grão orientado;
 - Materiais ferrimagnéticos ($>1\text{kHz}$): indutores, indutores acoplados, indutores, transformadores de pulso e filtros de EMI:
 - Ferrite de Manganês-Zinco;
 - Ferrite de Níquel-Zinco;



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ CAMPUS SOBRAL

Perguntas?

acelioucolie@alu.ufc.br

