

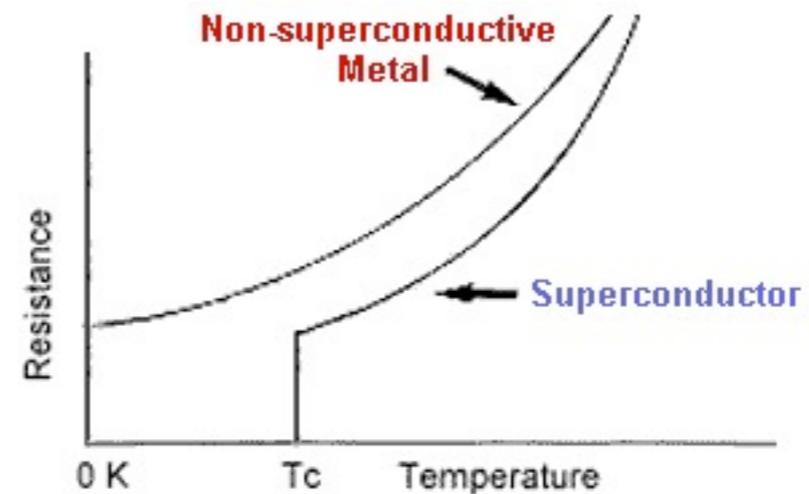
Física Moderna II

Aula 12

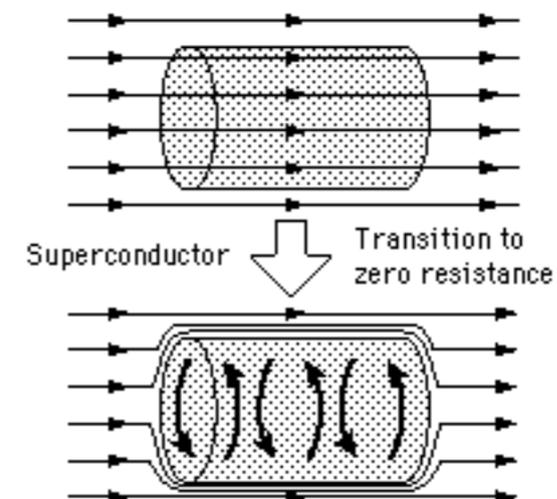
Marcelo G Munhoz
Pelletron, sala 245, ramal 6940
munhoz@if.usp.br

Supercondutores

- Um supercondutor:
 - Apresenta resistividade zero abaixo de uma certa temperatura (T_c - temperatura crítica)
 - Se comporta como um material diamagnético perfeito (efeito Meissner)



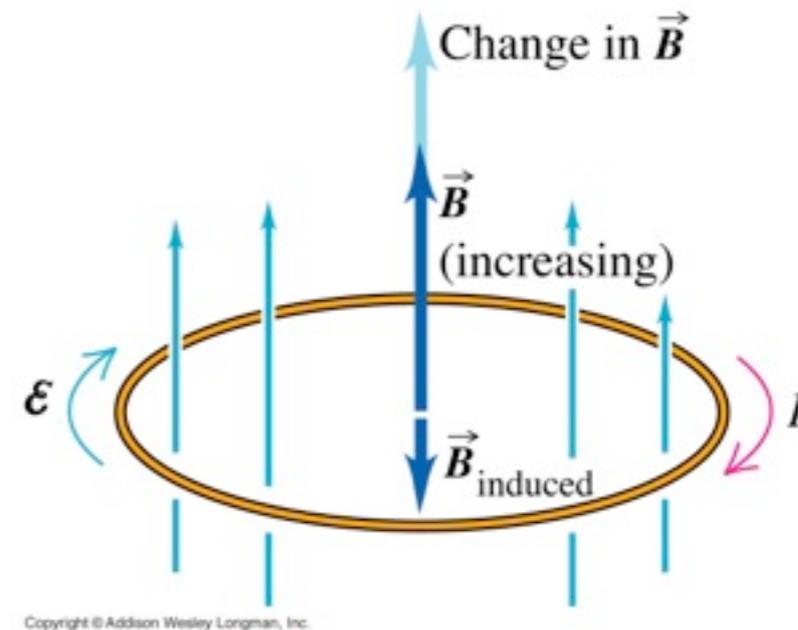
<http://www.superconductors.org>



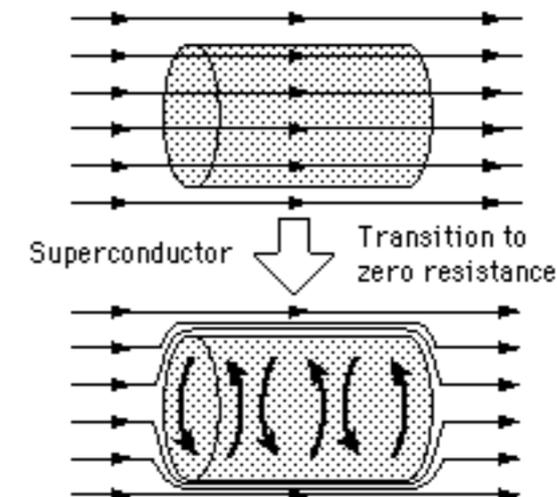
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/solids/meis.html>

Diamagnetismo

- Podemos compreender o diagnetismo a partir da Lei de Lenz
- Em um material qualquer, o campo externo modifica o movimento e *spin* dos elétrons a fim de opor a mudança de fluxo do campo externo
- No caso de supercondutores, a mobilidade dos elétrons permite o cancelamento do campo interno enquanto houver campo externo



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.



<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/solids/meis.html>

Equações de London

- A fim de explicar o perfeito diamagnetismo de um supercondutor, é necessário descrever o movimento dos elétrons como sendo coerente
- Essa descrição foi proposta Por Fritz London em 1948

Supercondutores

- Como explicar a propriedade elétrica de supercondução de alguns materiais?
- Por que a resistividade do material ao deslocamento do elétron se torna praticamente nula?
- Como descrever o movimento dos elétrons nessas condições?

Efeito Isotópico (1950)

- Um indício importante para se compreender isso é o chamado efeito isotópico, que diz que a temperatura crítica (T_c) tem uma dependência com a massa isotópica média do sólido (M):

$$M^{1/2}T_c = \text{const}$$

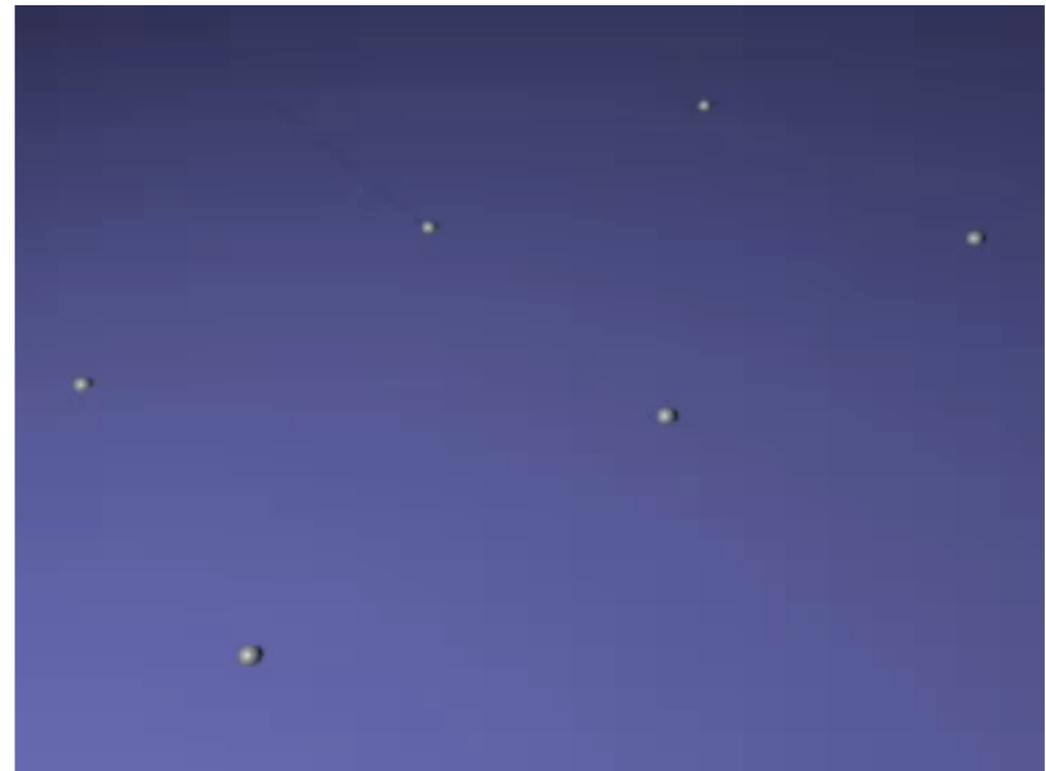
- A partir da descoberta desse efeito, fica claro que os elétrons não podem mais ser considerados livres, mas eles interagem com a rede cristalina

Teoria BCS (1957)

- Bardeen, Cooper e Schrieffer propõem uma teoria, muito bem sucedida, para explicar a supercondutividade
- Essa teoria se baseia na interação entre elétrons e a rede cristalina do sólido, que se manifesta na forma de fônons
- Essa relação leva à criação dos pares de Cooper

Pares de Cooper

- Os pares de Cooper são pares de elétrons que estão altamente correlacionados devido à ação da rede



Propriedades Magnéticas de um Sólido

- Como é o campo magnético no interior de um sólido, isto é, como ele “reage” na presença de uma indução magnética?
- Como compreender esse comportamento do ponto de vista microscópico e da física quântica?

Propriedades Magnéticas de um Sólido

- A intensidade do campo magnético no interior de um sólido será dada por:

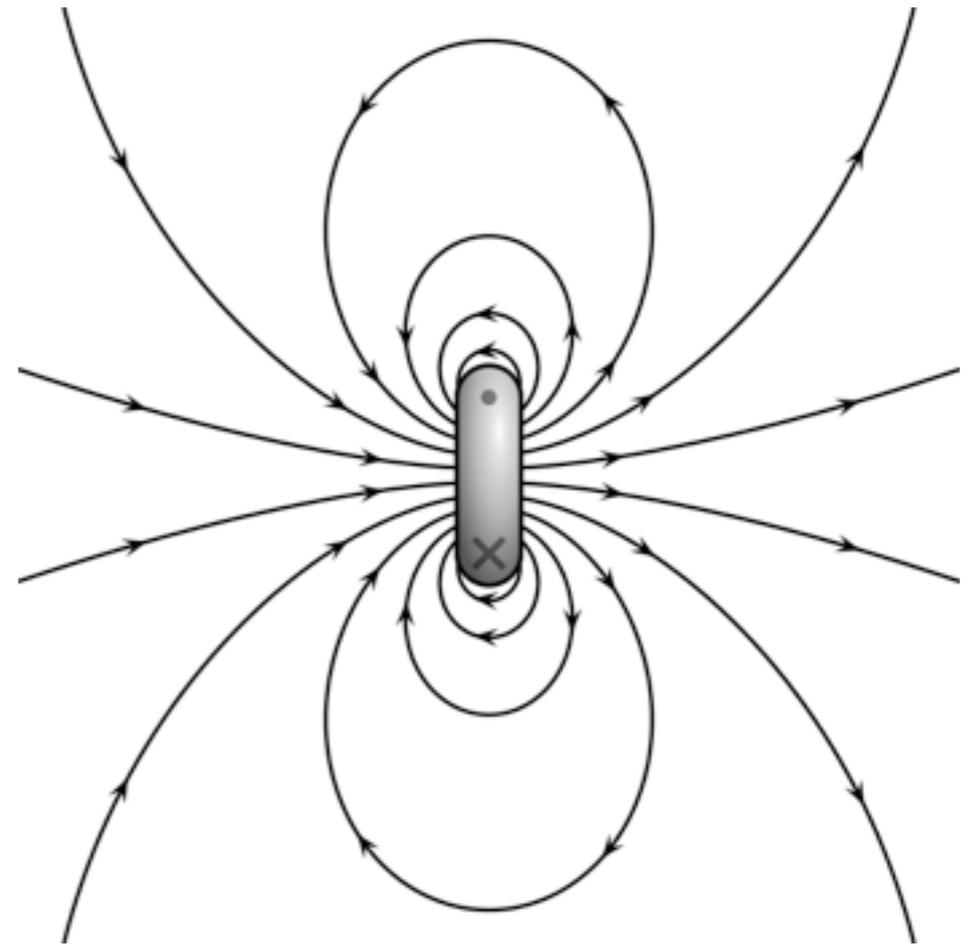
$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M}$$

- ou seja, é a indução magnética aplicada (dividido pela permeabilidade do material) subtraída a magnetização (M)

- A magnetização é dada por: $\vec{M} = \frac{\vec{\mu}}{V}$

Momento de dipolo magnético

- Uma espira que compreende uma área S por onde passa uma corrente elétrica i gera um campo magnético de características semelhantes ao campo elétrico gerado pelo dipolo elétrico.



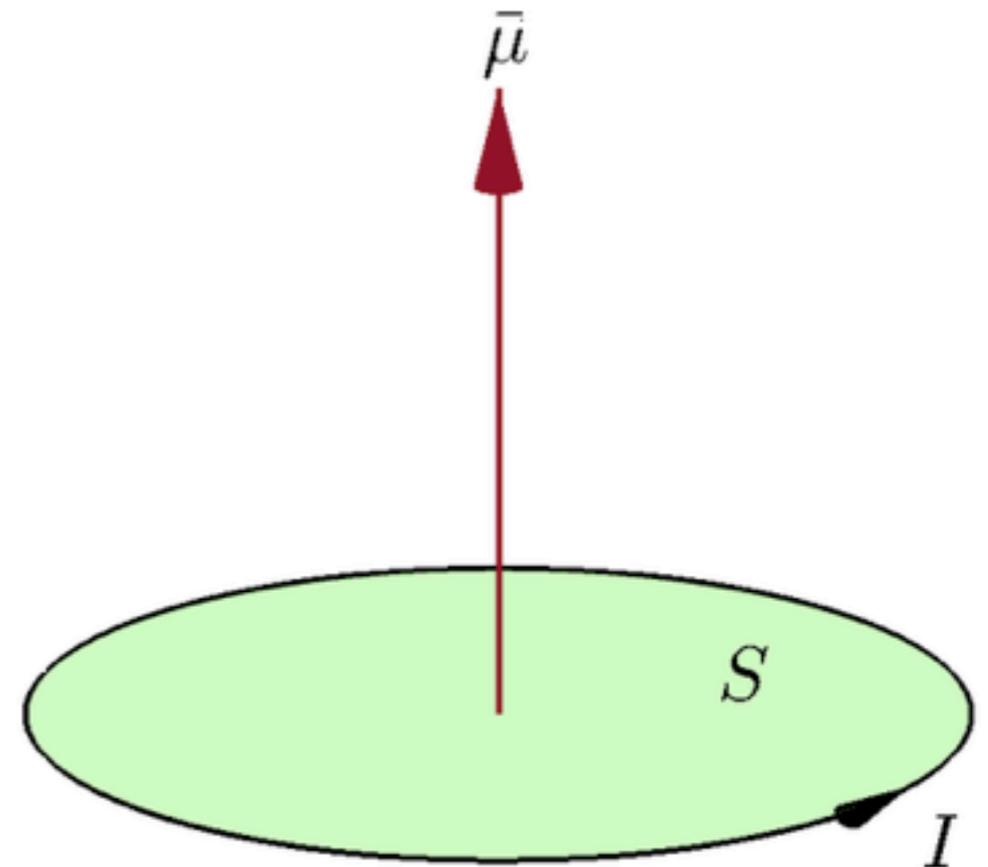
Wikipedia, the free encyclopedia

Momento de dipolo magnético

- Portanto, podemos definir um momento de dipolo magnético (μ) dado por:

$$\vec{\mu} = i \cdot \vec{S}$$

- onde a direção do momento de dipolo magnético é perpendicular à área S

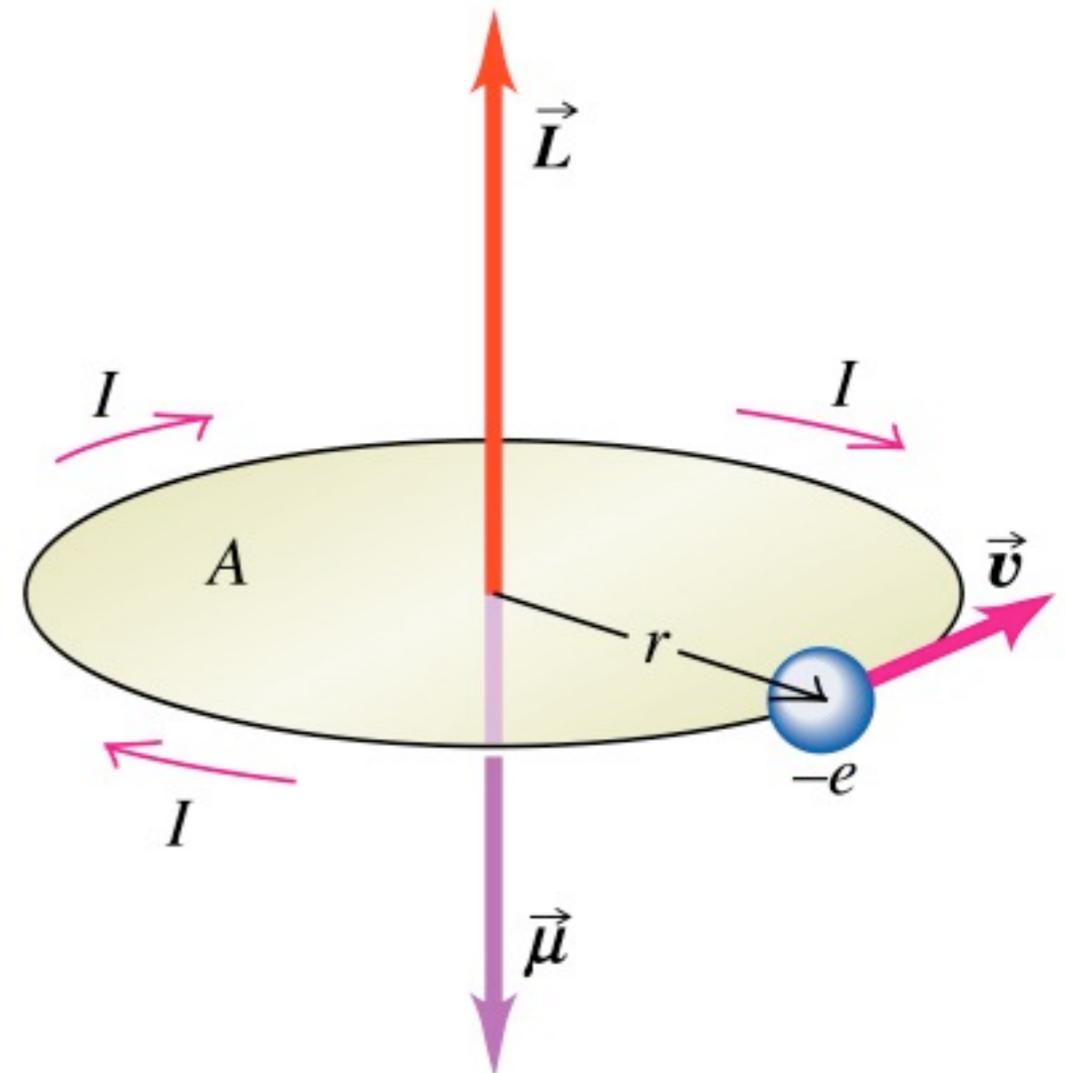


Wikipedia, the free encyclopedia

Momento de dipolo magnético orbital

- Um elétron em órbita gera uma corrente que, por sua vez, produz um campo magnético similar ao de um dipolo magnético.
- A corrente gerada pelo elétron é dada por:

$$I = \frac{e}{T} = \frac{ev}{2\pi r}$$

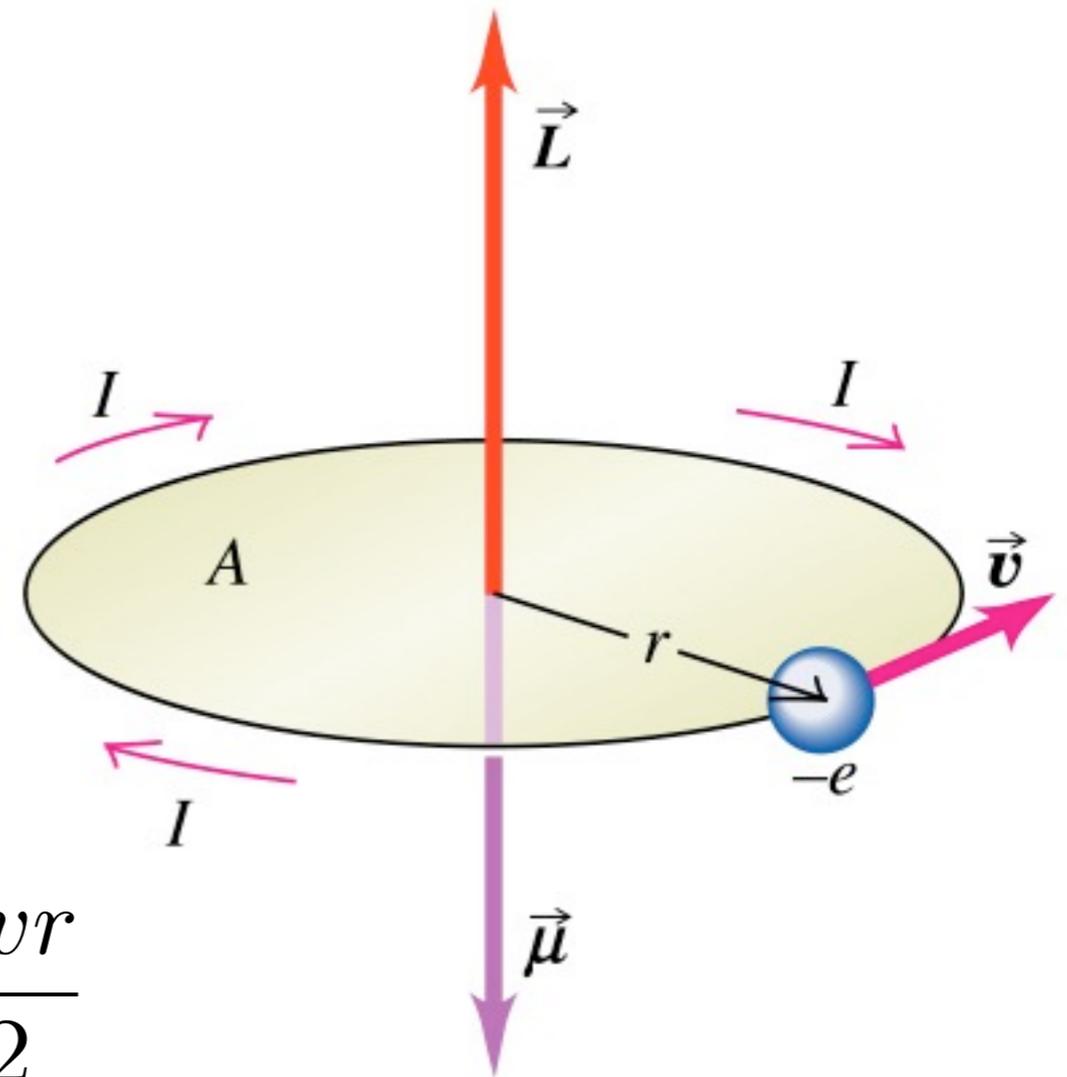


Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

Momento de dipolo magnético orbital

- Portanto, em uma aproximação semi-clássica, podemos dizer que o elétron em um átomo gera esse momento de dipolo magnético:

$$\mu = I \cdot A = \frac{ev}{2\pi r} \cdot \pi r^2 = \frac{evr}{2}$$



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

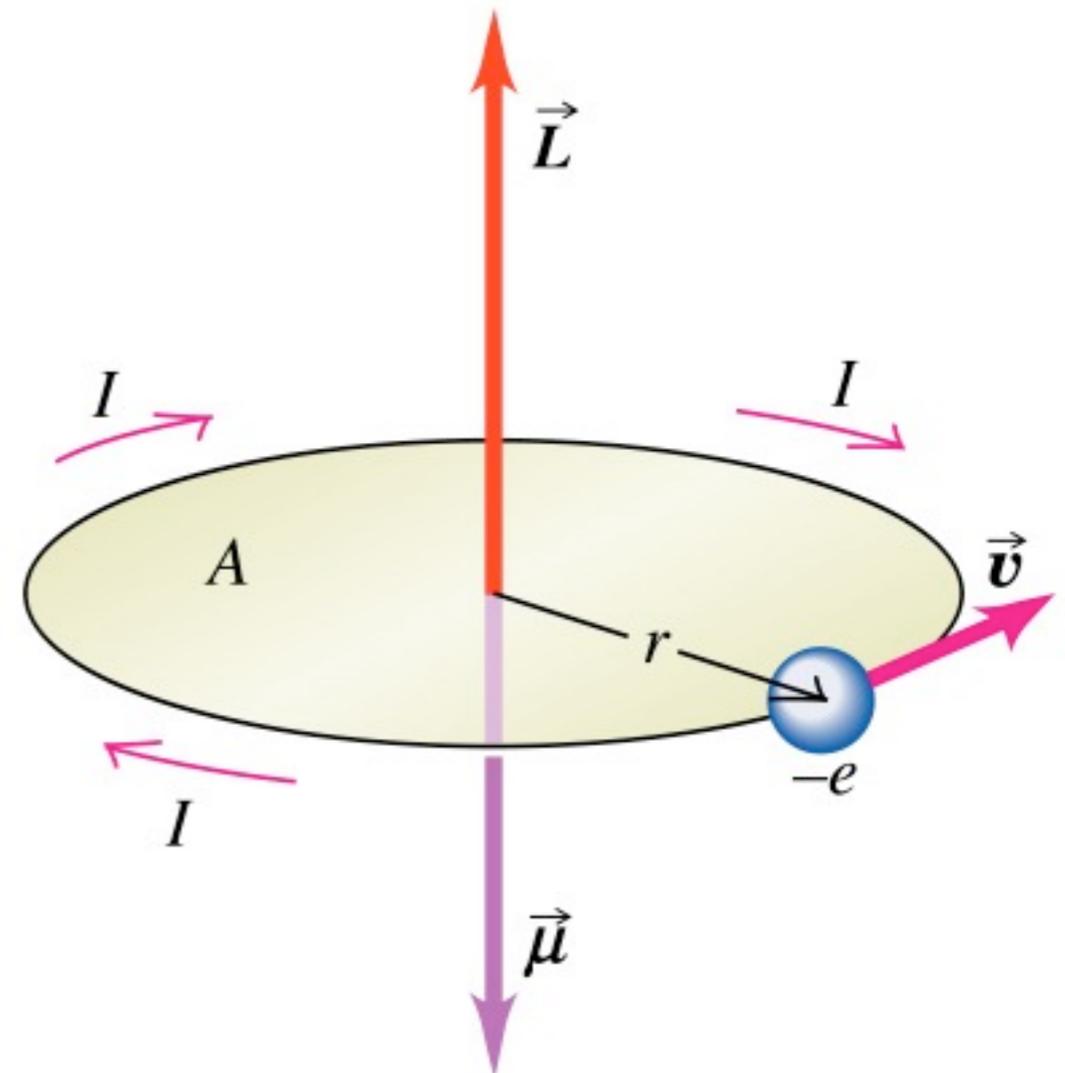
Momento de dipolo magnético orbital

- Podemos agora associar esse momento de dipolo magnético com o momento angular do elétron, que é dado por:

$$L = mvr$$

- Portanto:

$$\mu = \frac{e}{2m}L$$



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

Momento de dipolo magnético orbital

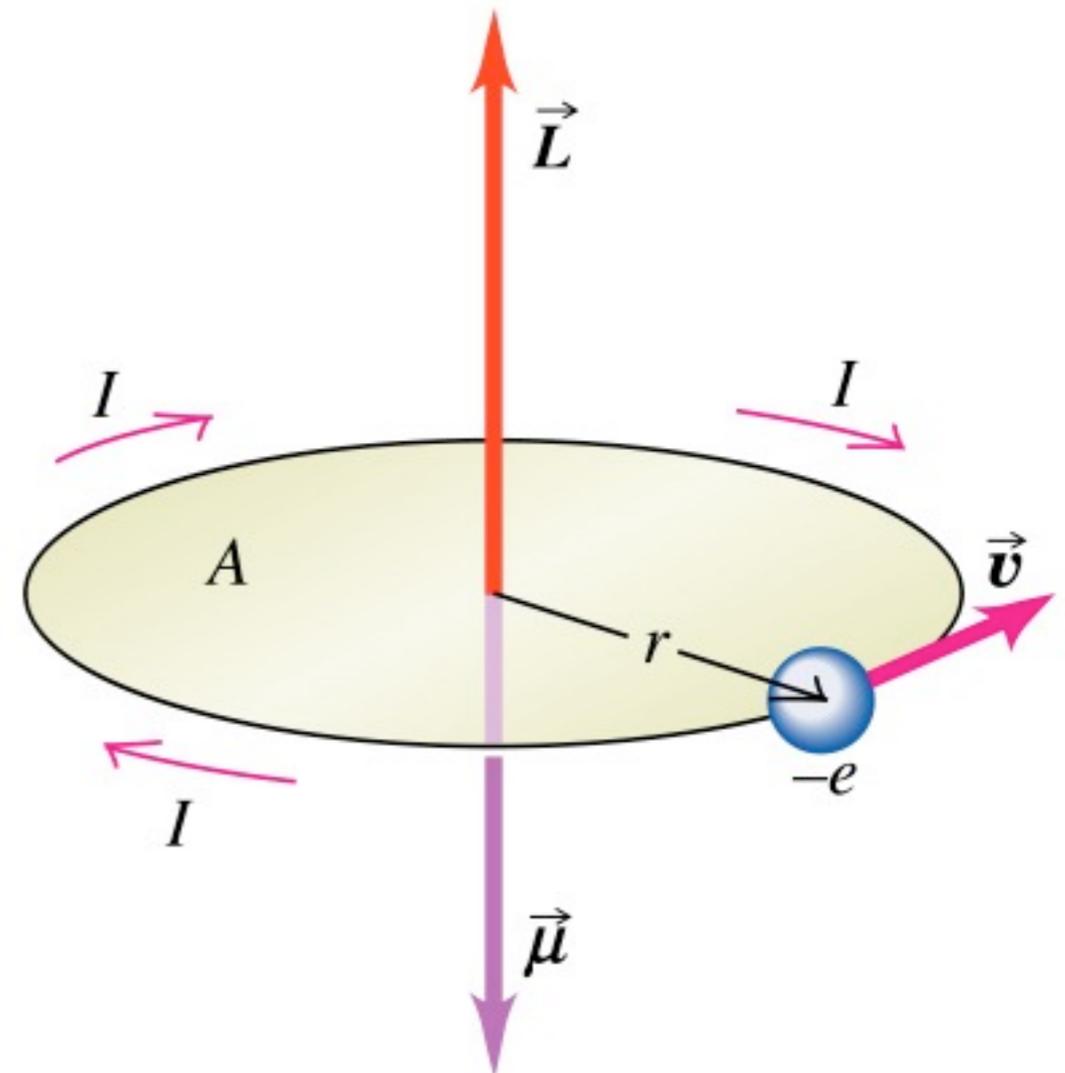
- Por convenção, escreve-se essa relação como:

$$\vec{\mu} = -\frac{g_l \mu_b}{\hbar} \vec{L}$$

- onde:

$$\mu_b = \frac{e\hbar}{2m}$$

- e $g_l = 1$



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

A descoberta do *spin* do elétron

- Como o elétron apresenta um momento angular intrínseco e, por consequência, apresenta um momento de dipolo magnético intrínseco (e não devido ao seu movimento orbital) dado por:

$$\vec{\mu}_S = -\frac{g_s \mu_b}{\hbar} \vec{S}$$

Magnetização

- A maneira como um material “reage” à um campo magnético (H) é dada empiricamente pela relação:

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

- onde χ é a suscetibilidade magnética
- Materiais que apresentam $\chi < 0$ são os diamagnéticos e materiais com $\chi > 0$ são paramagnéticos. Materiais ferromagnéticos são aqueles que apresentam uma magnetização mesmo sem uma indução magnética externa (B).

Paramagnetismo

- O campo magnético externo tende a orientar os momentos de dipolo dos constituintes do sólido para minimizar a energia potencial:

$$U = -\vec{\mu} \cdot \vec{B}$$

- Isso só ocorrerá se os elétrons estiverem em camadas que não estejam cheias e estiverem isolados

Paramagnetismo

- O campo magnético externo tende a orientar os momentos de dipolo dos constituintes do sólido para minimizar a energia potencial:

$$U = -\vec{\mu} \cdot \vec{B}$$

- Haverá uma competição entre esse efeito e a agitação térmica, resultando na lei de Curie:

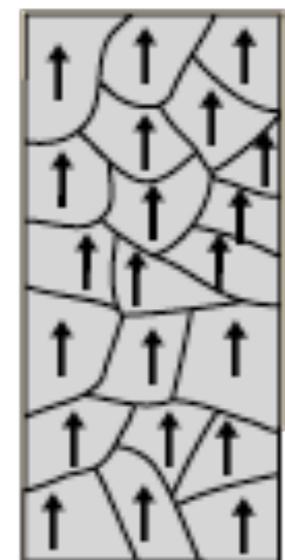
$$\chi = \frac{C}{T}$$

Ferromagnetismo

- É a magnetização espontânea em pequenas regiões de um material (domínios), que persiste mesmo na ausência de um campo de indução externo
- A magnetização é máxima para $T=0$ e esses materiais tornam-se paramagnéticos acima de uma temperatura T_c



In bulk material the domains usually cancel, leaving the material unmagnetized.



Externally applied magnetic field.

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/solids/ferro.html>

Ferromagnetismo

- O ferromagnetismo surge quando os elétrons apresentam *spins* paralelos
- Isso deve ocorrer minimizando a energia e satisfazendo o princípio de exclusão de Pauli
- Haverá portanto uma competição entre a minimização da energia mantendo os elétrons distantes (*spins* paralelos) e mantendo os elétrons próximos entre os núcleos (*spins* anti-paralelos)