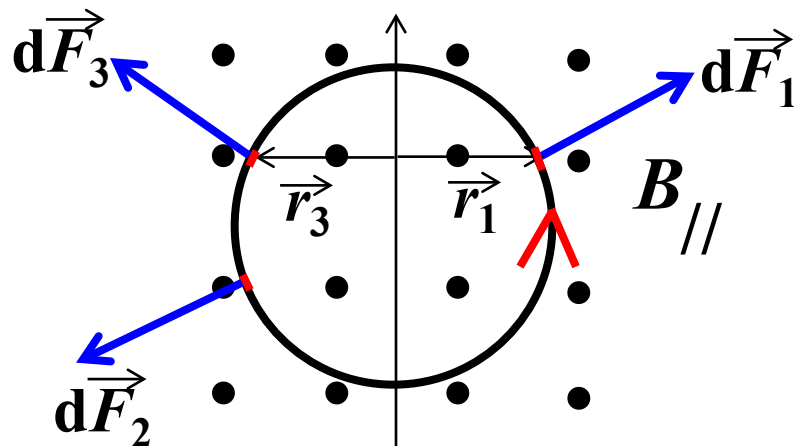


## 四、 磁场对载流线圈的作用

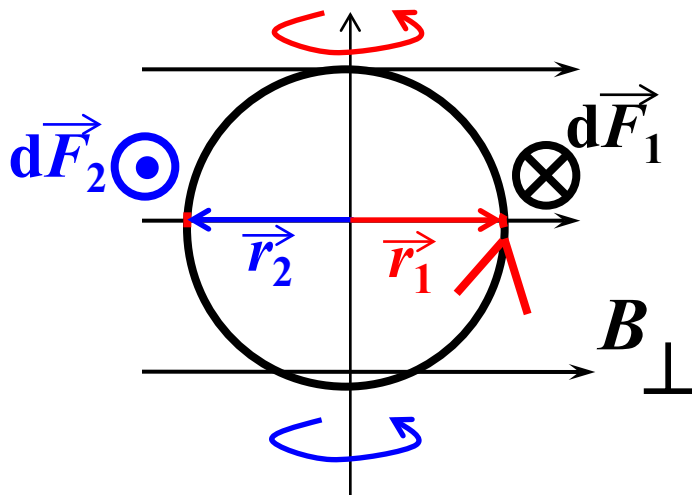
### 均匀磁场对载流线圈的作用

(1) 当**磁场**方向  $\vec{B}$  和**载流线圈面元**方向  $\vec{S}$  平行



合力为零，合力矩为零

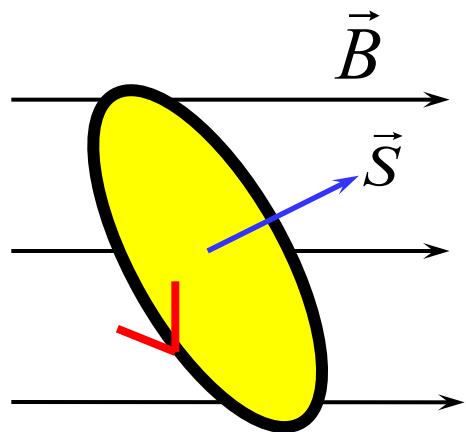
(2) 当**磁场**方向  $\vec{B}$  和**载流线圈面元**方向  $\vec{S}$  垂直



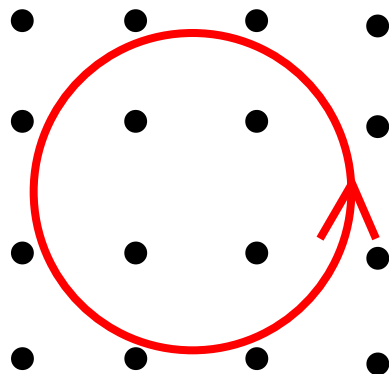
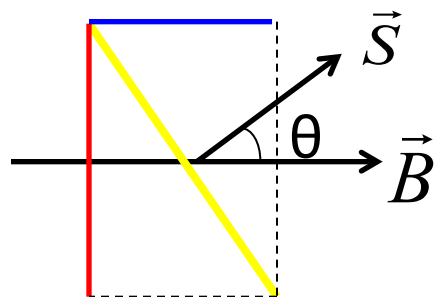
合力为零,合力矩不为零

载流线圈面元方向  $\vec{S}$  和电流满足右手螺旋定则

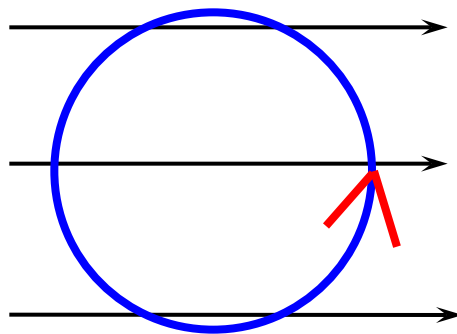
# 磁场对载流线圈的作用



分解磁场

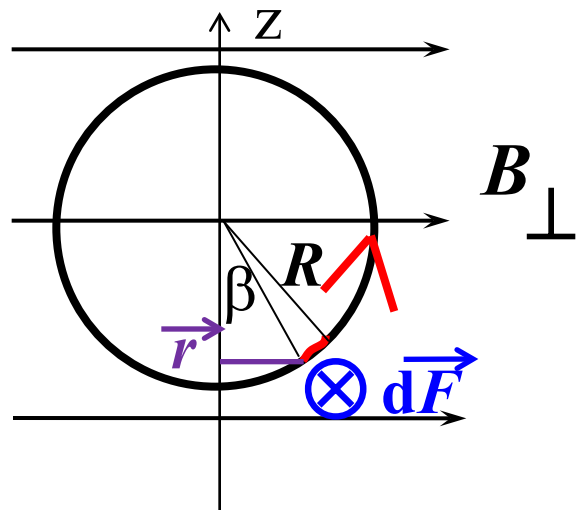


$B_{\parallel}$  合力为零  
合力矩为零



$B_{\perp}$  合力为零  
合力矩不为零

**例：**如图所示均匀磁场，载有电流 $I$ 的圆形线圈与磁场方向垂直，求该载流线圈对 $z$ 轴的力矩。



合力为零，合力矩不为零

在磁场中， $dl$ 段载流导线受到的作用力

$$dF = B_{\perp} I dl \sin \beta$$

$dl$ 段载流导线对 $z$ 轴的力矩

$$dM = r dF = r B_{\perp} I dl \sin \beta$$

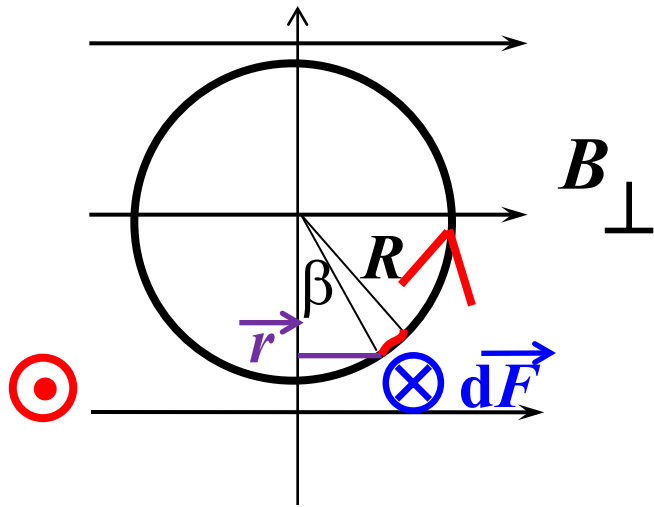
$$dl = R d\beta, r = R \sin \beta \quad \text{因此得到}$$

$$dM = B_{\perp} I R^2 \sin^2 \beta d\beta$$

$$M = \int dM = \int_0^{2\pi} B_{\perp} I R^2 \sin^2 \beta d\beta = \pi B_{\perp} I R^2$$

$$M = \pi B_{\perp} I R^2 \sin \theta$$

# 磁场对载流线圈的作用



$$M = \pi B_{\perp} I R^2 = \pi B I R^2 \sin \theta$$

旋转方向: ?

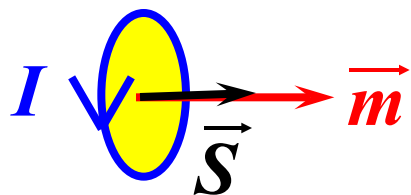
$$M = \pi B I R^2 \sin \theta = S B I \sin \theta$$

$$\vec{M} = I S \vec{e}_n \times \vec{B}$$

力矩  $\vec{M} = \vec{m} \times \vec{B}$

$\vec{m} = I S \vec{e}_n$  载流线圈的磁偶极矩(磁矩)

对圆电流圈（或任意平面电流线圈）：



$$\vec{M} = I\vec{S} \times \vec{B} = \vec{m} \times \vec{B}$$

$$\vec{m} = IS\vec{e}_n \quad \text{载流线圈的磁偶极矩(磁矩)}$$

不只是载流线圈有磁矩，原子、电子、质子等微观粒子也有磁矩。磁矩是粒子本身的特征之一。

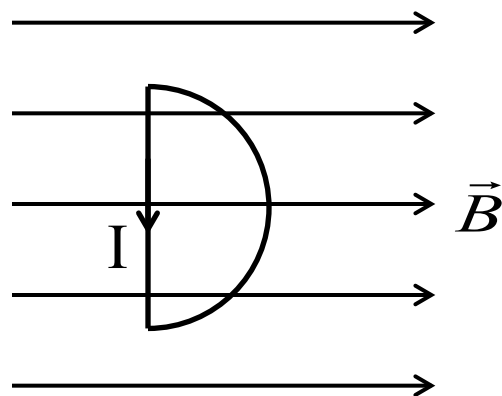
电子的自旋磁矩： $1.60 \times 10^{-23} \text{J/T}$

## 作业1:

如图所示，一半径 $R=0.1\text{m}$ 的半圆形闭合线圈，载有电流 $I=10\text{A}$ ，放在均匀磁场中，磁场方向和线圈平行，磁感应强度大小 $B=0.5\text{T}$ ，求线圈受到力矩的大小和方向。

$$\text{力矩 } \vec{M} = \vec{m} \times \vec{B}$$

$$\vec{m} = IS\vec{e}_n$$

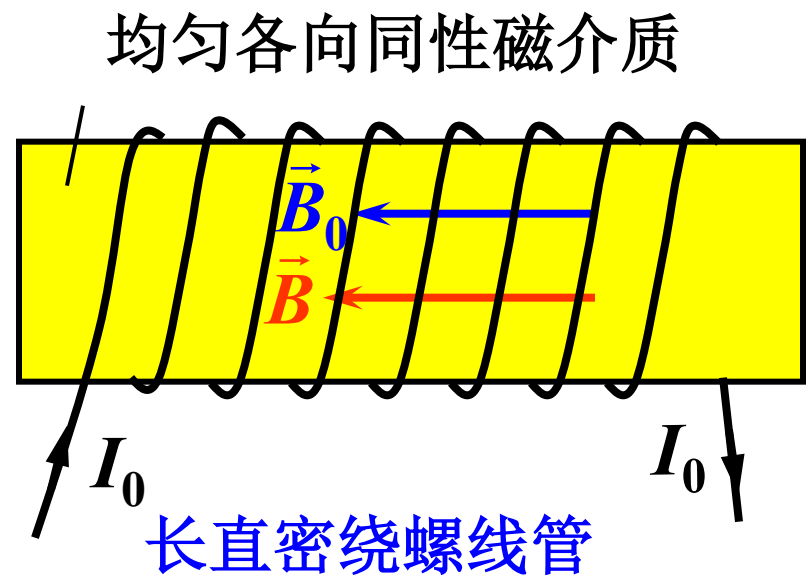


## § 13.6 磁场与物质的相互作用

磁介质(magnetic medium)是能影响磁场分布的物质。

均匀各向同性介质充满磁场  
所在空间时，有：

$$\vec{B} = \mu_r \vec{B}_0$$



$\mu_r$  — 相对磁导率(relative permeability)

## 磁介质的分类:

- 抗磁质(diamagnetic substance)  $\mu_r < 1$

如: Cu, Ag, Cl<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> ...      Cu:  $\mu_r = 1 - 1 \times 10^{-5}$

- 顺磁质(paramagnetic substance)  $\mu_r > 1$

如: Mn, Al, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> ...      O<sub>2</sub>:  $\mu_r = 1 + 767 \times 10^{-5}$

- ▲ 铁磁质(ferromagnetic substance)  $\mu_r \gg 1$

如: Fe, Co, Ni ...      Fe:  $\mu_r = 5000$

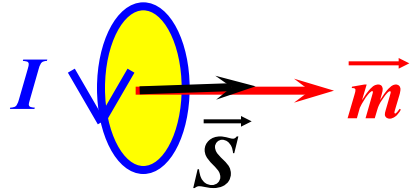


## 磁介质的分类：

- ▲ 弱磁质  $\mu_r \approx 1$
- 顺磁质(paramagnetic substance)  $\mu_r > 1$   
如：Mn , Al, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> ...
- 抗磁质(diamagnetic substance)  $\mu_r < 1$   
如：Cu, Ag, Cl<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> ...
- ▲ 铁磁质(ferromagnetic substance)  $\mu_r \gg 1$   
如：Fe, Co, Ni ...

# 一、原子的磁矩

## 1. 电子的磁矩

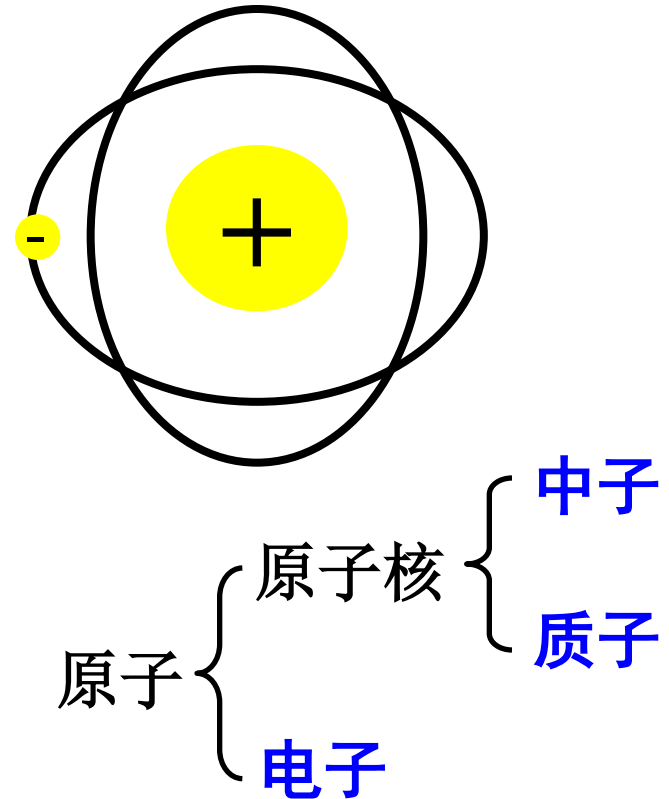


电子的轨道运动电流  $I = e/T = e \cdot \frac{v}{2\pi r}$

$$\text{轨道磁矩 } m = IS = \frac{ev}{2\pi r} \cdot \pi r^2 = \frac{evr}{2}$$

电子轨道运动的角动量  $L = r \times p = m_e v r$

电子轨道磁矩与轨道角动量的关系:  $m = \frac{e}{2m_e} L$



# 1. 电子的磁矩

电子轨道磁矩与轨道角动量的关系： $\vec{m} = \frac{e}{2m_e} \vec{L}$

电子自旋磁矩和自旋角动量  $\vec{S}$  的关系： $\vec{m} = \frac{e}{m_e} \vec{S}$

# 2. 质子和中子的磁矩

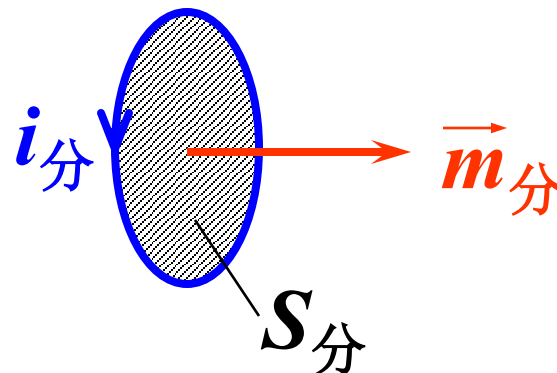
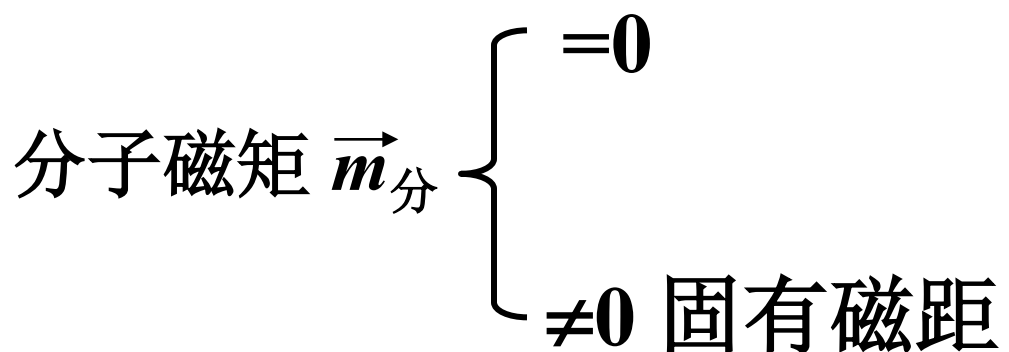
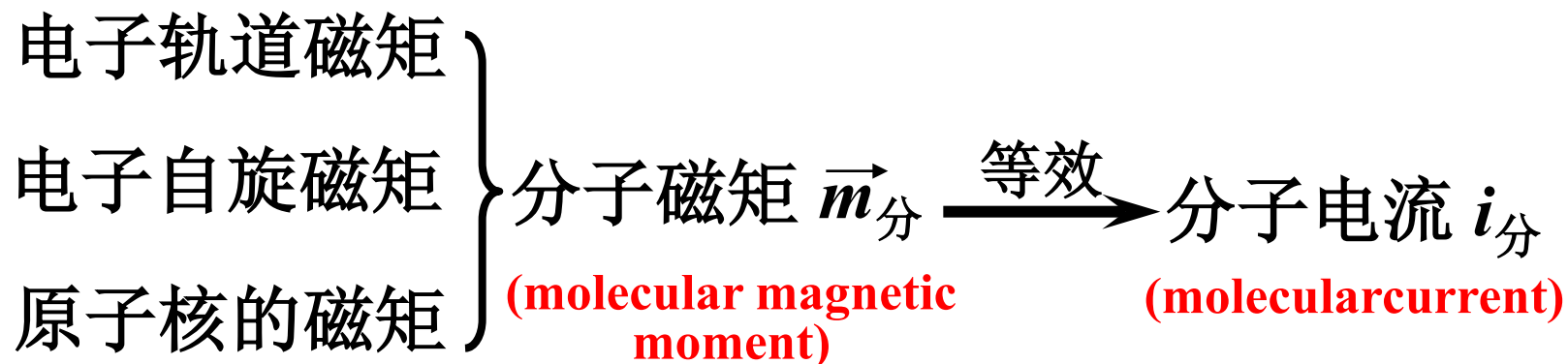
质子轨道磁矩  $\vec{m} = \frac{e}{2m_p} \vec{L}$ ，中子无轨道磁矩。

质子和中子都有自旋磁矩： $\vec{m} = g \frac{e}{2m_p} \vec{S}$

$g$  称为  $g$  因子，质子  $g = 5.5857$ ，中子  $g = -3.8261$ 。

$$m_p = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg} \quad m_e = 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$$

### 3. 分子磁矩和分子电流



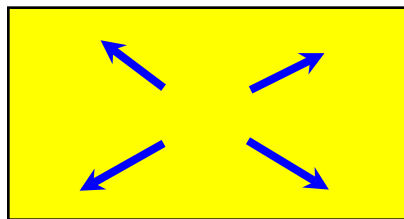
## 二、磁介质的磁化

1、磁化：在磁场作用下，介质出现磁性或磁性发生变化的现象。

### 顺磁质的磁化

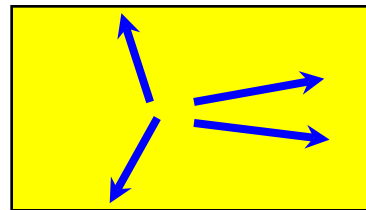
顺磁质分子有固有的分子磁矩 (主要是电子轨道和自旋磁矩的贡献)， $m_{\text{分}} \sim 10^{-23} \text{A} \cdot \text{m}^2$ 。

$$\vec{B}_0 = 0$$



热运动使  $\vec{m}$  完全混乱，不显磁性。

$$\vec{B}_0 \neq 0$$

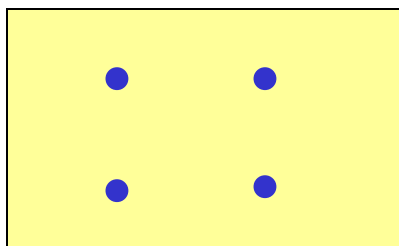


$\vec{B}_0$  使  $\vec{m}$  排列趋于  $\vec{B}_0$  方向，显现磁性。

## 抗磁质的磁化

抗磁质的分子固有磁矩为 0。

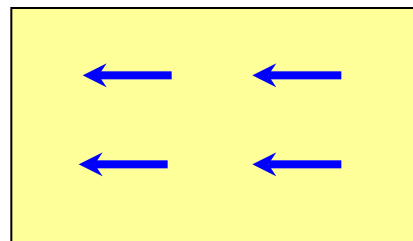
$$\vec{B}_0 = 0$$



$$\vec{m}_{\text{分}} = 0,$$

不显磁性

$$\vec{B}_0 \longrightarrow$$



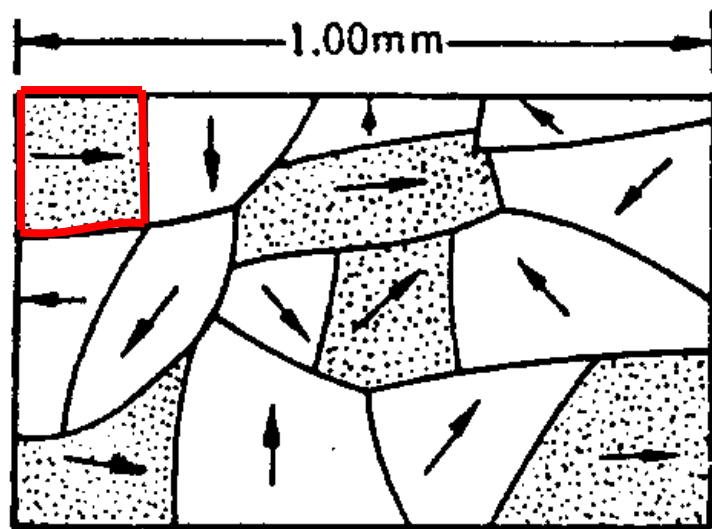
$$\text{附加磁矩 } \Delta \vec{m}_{\text{分}} \parallel \vec{B}_0$$

显示抗磁性

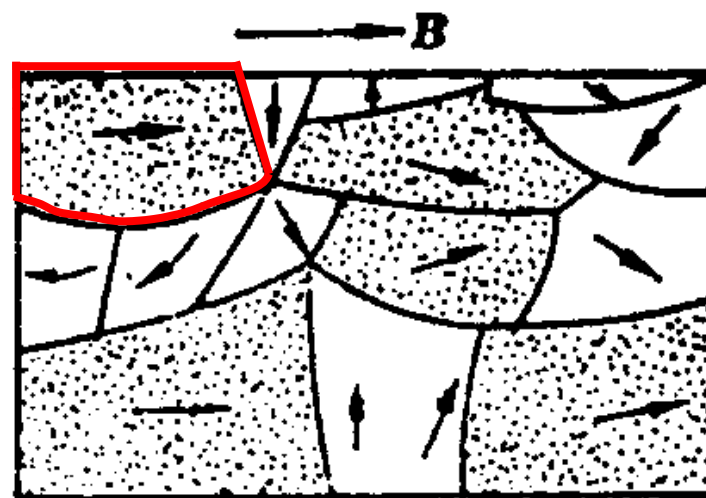
# 铁磁质的磁化

铁磁质中起主要作用的是电子的自旋磁矩。

在没有外磁场时，各电子的自旋磁矩靠交换耦合作用使磁矩方向一致，从而形成自发的均匀磁化小区域——磁畴。



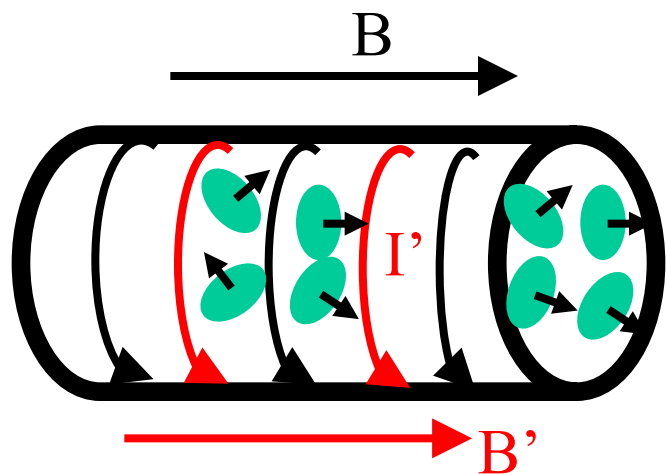
未加磁场



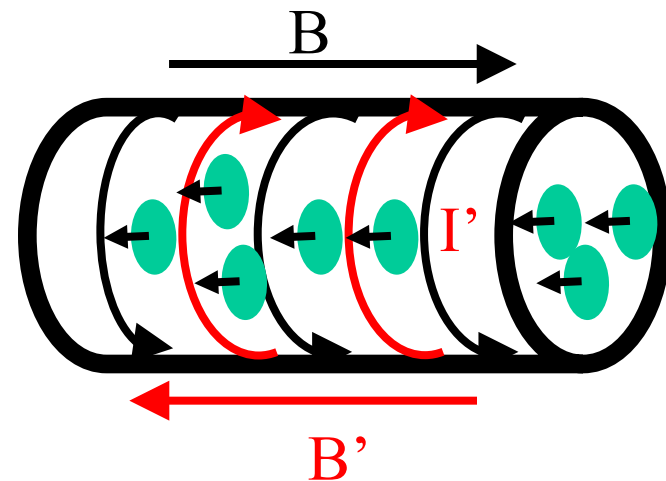
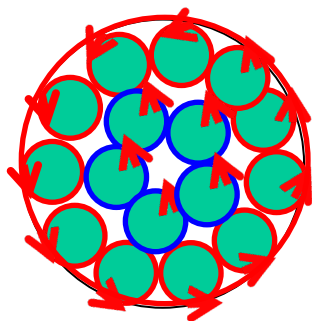
在磁场  $B$  中

磁化饱和

# 磁化电流（束缚电流）



顺磁质的磁化



抗磁质的磁化

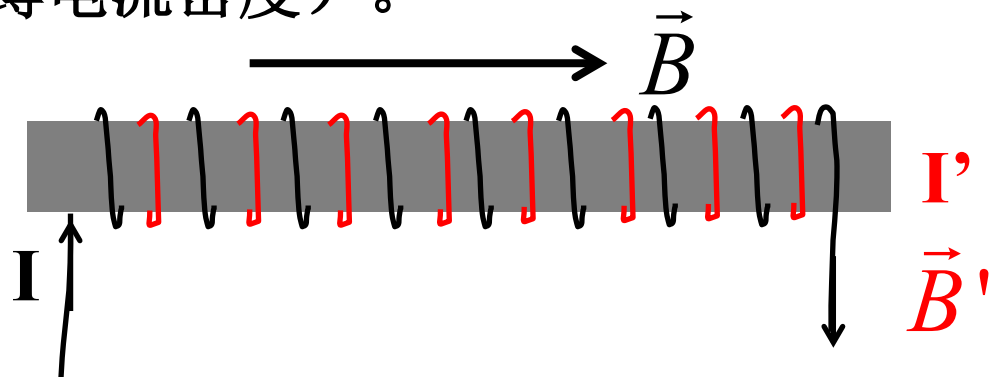
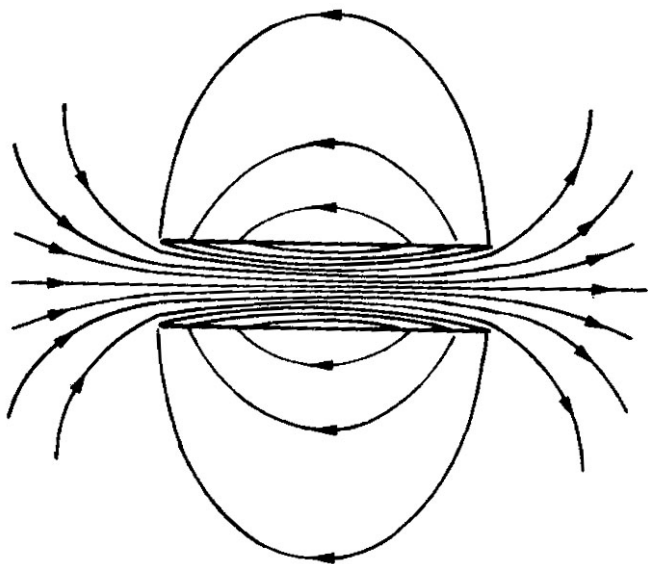
**顺磁质：**  $\mu > 1$   $j' > 0$  面束缚电流方向和自由电流方向相同；

**抗磁质：**  $\mu < 1$   $j' < 0$  面束缚电流方向和自由电流方向相反；

**铁磁质：**  $\mu \gg 1$   $j' > 0$  面束缚电流方向和自由电流方向相同，  
而且面束缚电流比自由电流大很多。



**例1:** 直螺线管，单位长度有  $n$  匝，管内充满磁导率  $\mu_r$  的均匀磁介质，求导线电流为  $I$  时磁介质表面单位长度的面束缚电流  $j'$ （也称为束缚电流密度）。



$$B = B_0 + B' = \mu_0 (nI + nI')$$

$$B = \mu_r B_0$$

$$B_0 = \mu_0 nI$$

$$nI' = (\mu_r - 1)nI = j'$$

对于抗磁质和顺磁质,  $\mu_r \sim 1$ ,  $j'$  很小

对于铁磁质, Fe  $\mu_r \sim 5000$ ,  $j'$  很大

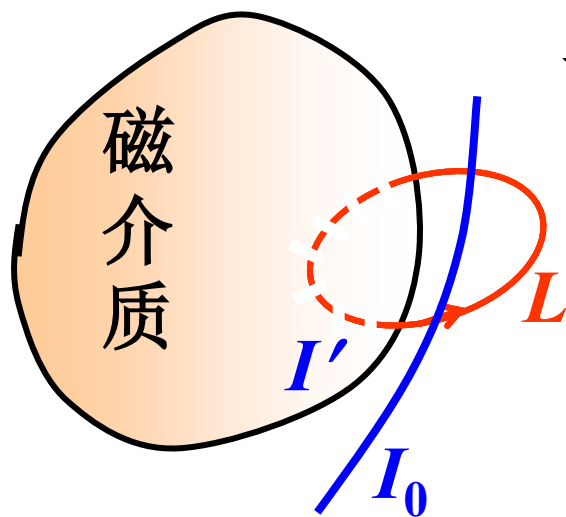
### 三、有磁介质时磁场的规律

真空中的规律

$$\left\{ \begin{array}{l} \oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \sum I_{\text{in}} \quad (1) \\ \oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0 \quad (2) \end{array} \right.$$

考虑到磁化电流，(1)式则需要修改。

#### 1. $\vec{H}$ 的环路定理



设：  $I_0$  — 传导电流，  $I'$  — 磁化电流。

$$\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \sum (I_{0,\text{in}} + I'_{\text{in}})$$

## 各向同性磁介质:

$$\text{磁场强度 } \vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0 \mu_r} \quad \text{磁感应强度 } \vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H}$$

令  $\mu = \mu_0 \mu_r$  — 磁导率 , 则有  $\vec{B} = \mu \vec{H}$

真空:  $\mu = \mu_0$

$$\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = \oint_L \frac{\vec{B}}{\mu_0 \mu_r} \cdot d\vec{l} = \oint_L \frac{\vec{B}_0}{\mu_0} \cdot d\vec{l} = \frac{1}{\mu_0} \oint_L \vec{B}_0 \cdot d\vec{l} = \sum I_0$$

----- $\vec{H}$  的环路定理

**例2：**长直单芯电缆的芯是一根半径为 $R$ 的金属导体，它与外壁之间充满均匀磁介质，电流 $I$ 从芯流过再沿外壁流回。求介质中磁场分布。

解：取如图所示安培回路

$$\oint_l \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum I$$

$$H = \frac{I}{2\pi r}$$

$$B = \mu_0 \mu_r H = \frac{\mu_0 \mu_r I}{2\pi r}$$

方向沿圆的切线方向

