

# 大学基础物理学

University Fundamental Physics

电子工程系@华东师范大学

李波

2019年



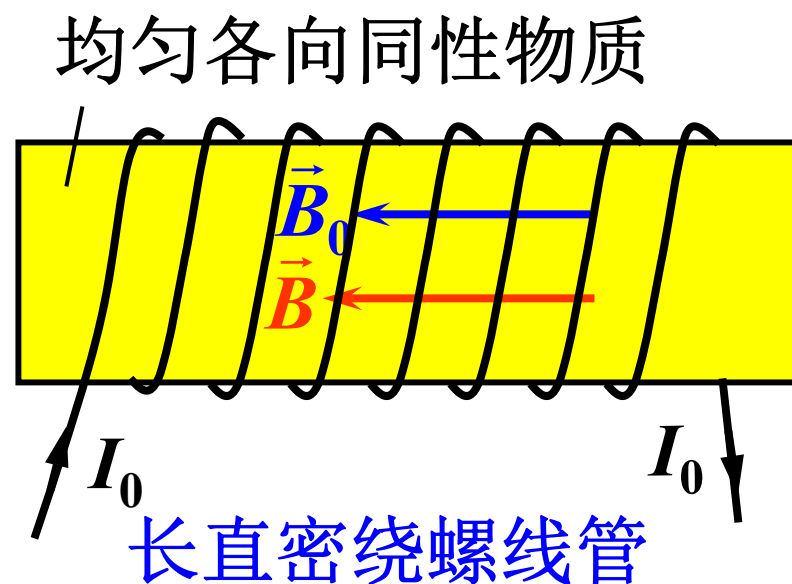
## § 6.1 物质对磁场的影响

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)



$$\vec{E} = \vec{E}_0 / \epsilon_r$$



物质的分类:

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

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

如: Cu, Ag, Cl<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> ... Cu ~ 1 - 1 × 10<sup>-5</sup>

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

如: Mn, Al, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> ... O<sub>2</sub> ~ 1 + 767 × 10<sup>-5</sup>

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

如: Fe, Co, Ni ... Fe ~ 5000



# 物质的磁性

分子磁矩  $\vec{m}_{\text{分}}$

=0 无固有磁距

≠0 固有磁距

→ ≠0 固有磁距，  
并且形成磁畴

物质的磁性

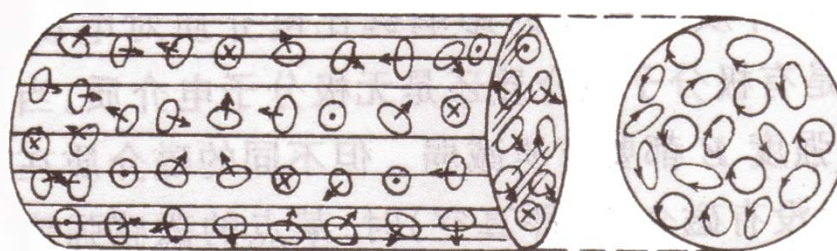
抗磁质

顺磁质

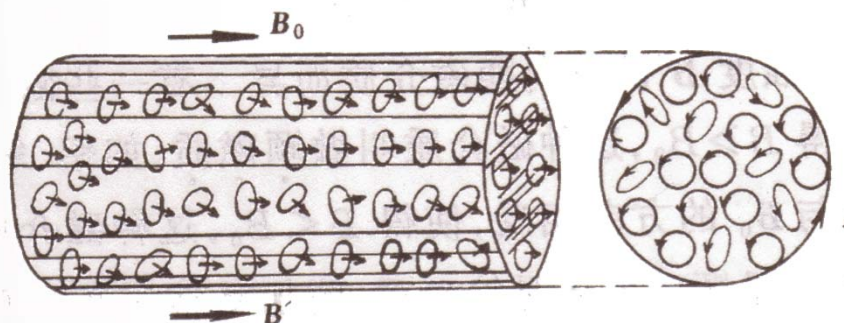
铁磁质

分子磁矩  $\vec{m}_{\text{分}}$

$=0$ 无固有磁矩	$\neq 0$ 固有磁矩
抗磁质	顺磁质



(a) 无外磁场时



(b) 有外磁场时

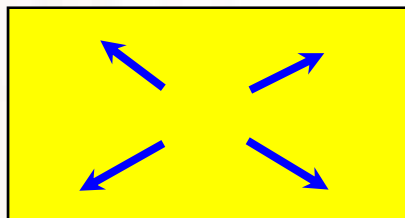
## § 6.3 物质的磁化

**磁化 (magnetization)**：在磁场作用下，物质出现磁性或磁性发生变化的现象。

### \* 顺磁质的磁化

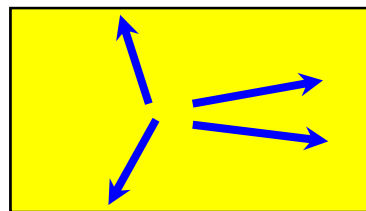
顺磁质分子有**固有的分子磁矩**（主要是电子轨道和自旋磁矩的贡献）， $m_{\text{分}} \sim 10^{-23} \text{A} \cdot \text{m}^2$ 。

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



热运动使  $\vec{m}_{\text{分}}$  完全混乱，不显磁性。

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

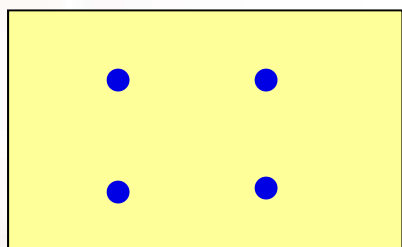


$\vec{B}_0$  使  $\vec{m}_{\text{分}}$  排列趋于  $\vec{B}_0$  方向，显现磁性。

## \* 抗磁质的磁化

抗磁质的分子固有磁矩为  $0$ 。

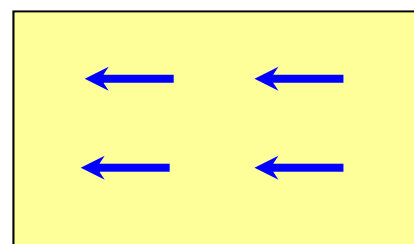
$$\vec{B}_0 = 0$$



$$\vec{m}_{\text{分}} = 0,$$

不显磁性

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

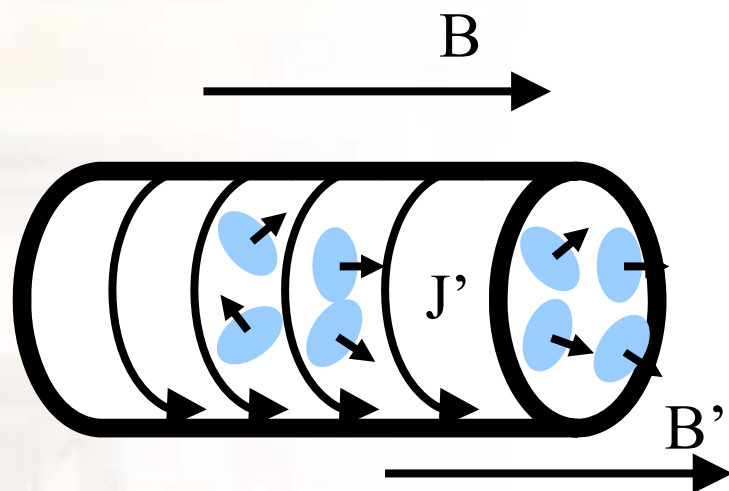


$$\text{附加磁矩 } \Delta \vec{m}_{\text{分}} \parallel \vec{B}_0$$

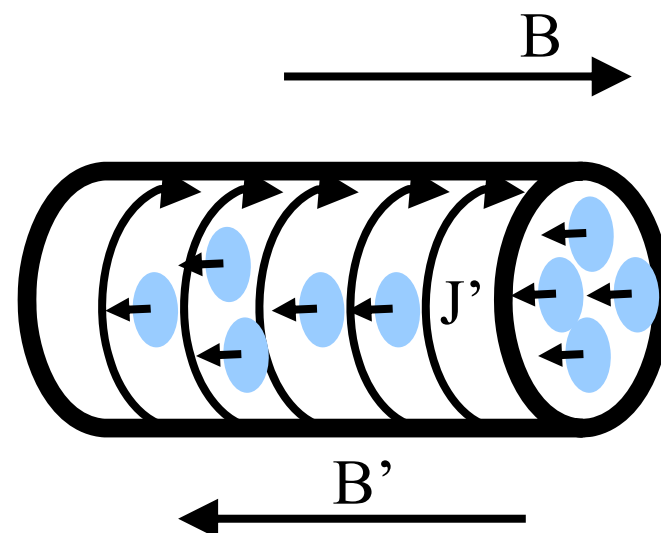
显示抗磁性

感生磁矩  $\ll$  固有磁矩

## \* 磁化电流（束缚电流）



顺磁质的磁化



抗磁质的磁化

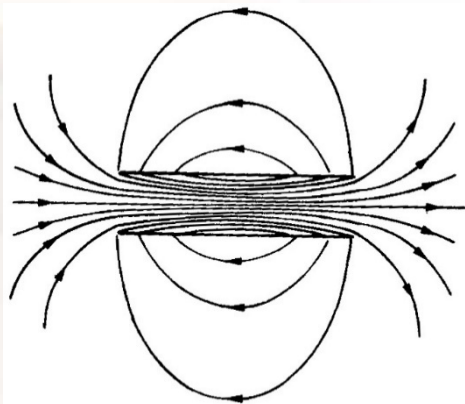
顺磁质( $\mu > 1$ )  $j' > 0$  面束缚电流方向和自由电流方向相同

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：直螺线管，单位长度有 $n$ 匝，管内充满磁导率 $\mu_r$ 的均匀物质，求导线电流为 $I$ 时的物质表面的面束缚电流密度 $j$ 。



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

$$B = \mu_r B_0 = \mu_0 \mu_r nI$$

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

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

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

励磁电流：引起磁化的自由电流

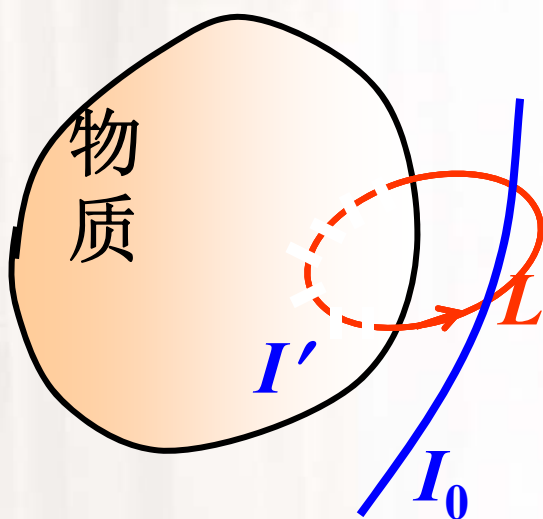
## § 6.4 有物质时磁场的规律

真空中的规律

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

考虑到磁化电流，(1) 式则需要修改。

### 一. $\vec{H}$ 的环路定理



设：  $I_0$  — 传导电流，  
  $I'$  — 磁化电流。

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



▲ 各向同性物质:

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0 \mu_r} \quad \vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H}$$

磁感应强度

令

$$\mu = \mu_0 \mu_r$$

— 磁导率 (permeability)

则有

$$\vec{B} = \mu \vec{H}$$

真空:  $\mu = \mu_0$

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

$\vec{H}$  的环路定理

$$\oint_l \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum I_0$$

磁场强度

**例1、**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物质 $\mu_r$ ，电流 $I$ 从芯流过再沿外壁流回。求介质中磁场分布。

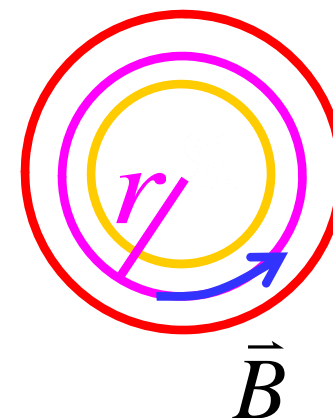
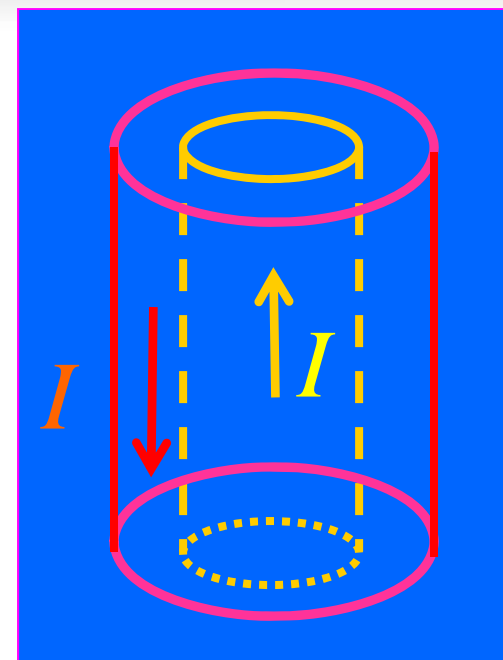
解：取如图所示安培回路

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

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

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

方向沿圆的切线方向



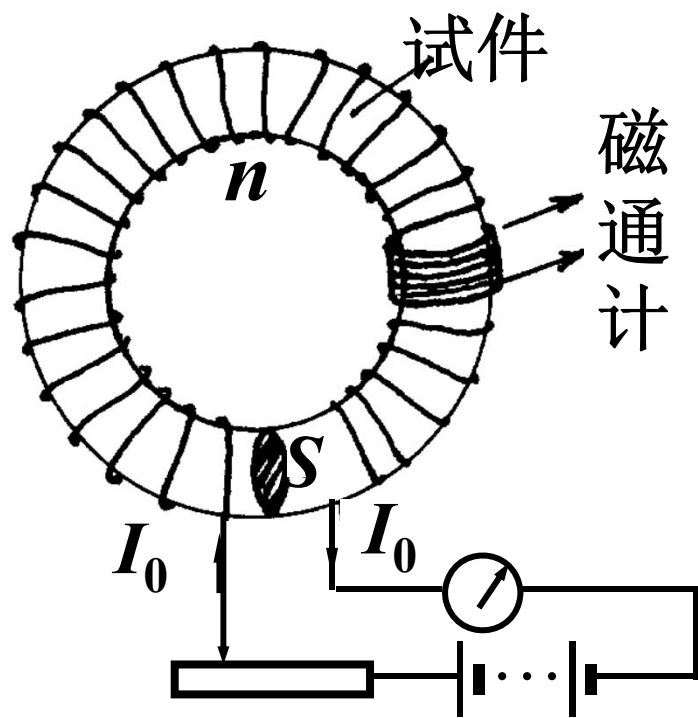
## § 6.5 铁磁质 (ferromagnetic substance)



铁磁质  $\vec{B} \sim \vec{H}$  关系非线性，也不单值，

形式上表示为  $\vec{B} = \mu \vec{H}$ ,  $\mu \neq \text{Const.}$  也不唯一。

### 1. 起始磁化曲线



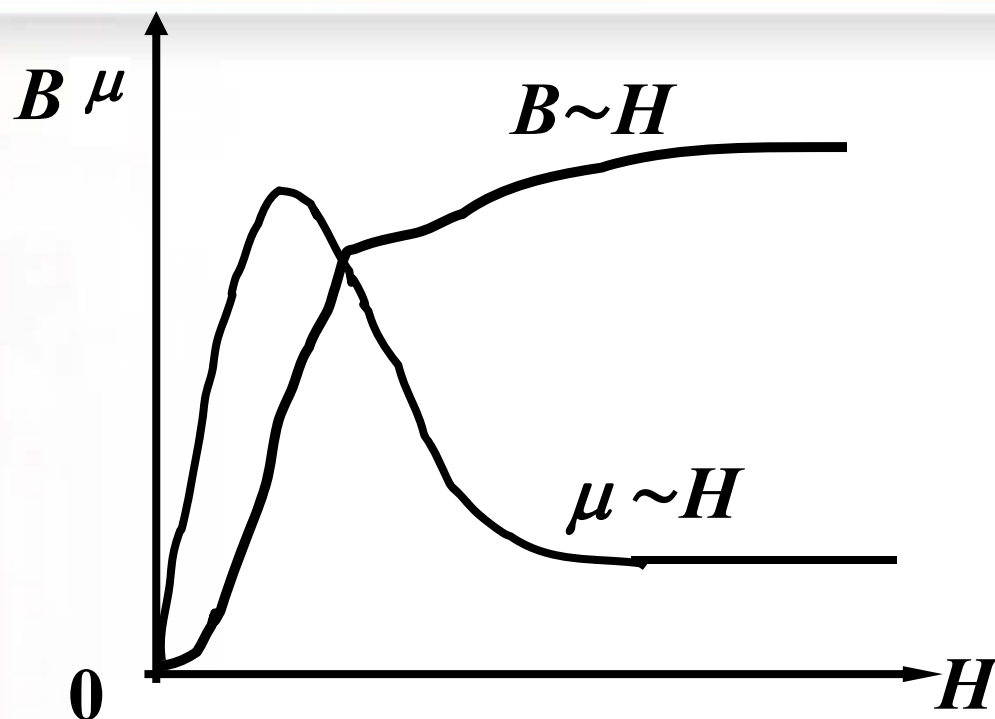
$$\text{测 } \Phi \rightarrow B = \frac{\Phi}{S}$$

$$\text{测 } I_0 \rightarrow H = nI_0$$

$$(\because \oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = H \cdot L = NI_0 ,$$

$$\therefore H = \frac{N}{L} \cdot I_0 = nI_0)$$

由此可得到  $B \sim H$  曲线:

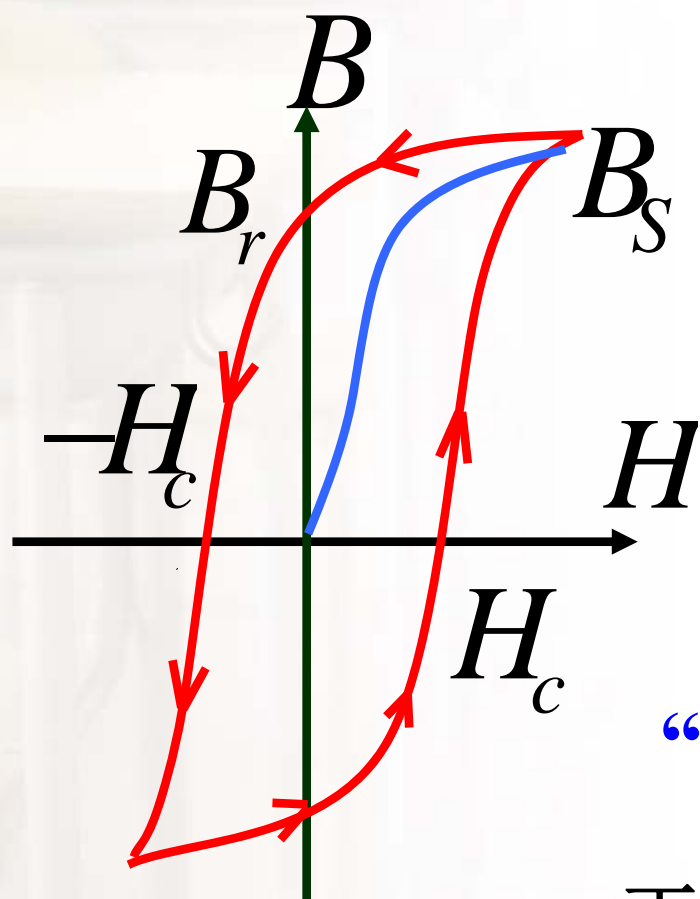


1: 起始磁化曲线（ $B$ 随 $H$ 正比增加— $B$ 随 $H$ 急剧增加— $B$ 随 $H$ 几乎不变（饱和磁感强度））

2:  $\mu$ 曲线（ $\mu$ 随 $H$ 急剧增加— $\mu$ 随 $H$ 达到顶峰— $\mu$ 随 $H$ 开始下降— $\mu$ 随 $H$ 几乎不变）

## 2. 磁滞回线 (hysteresis loop)

$B$  落后于  $H$  的变化，称为磁滞现象。



$B_r$  — 剩余磁感强度  
(remanent magnetic induction)

$H_c$  — 矫顽力 (coercive force)

$B_s$  — 饱和磁感应强度:

“磁滞损耗” (hysteresis loss)

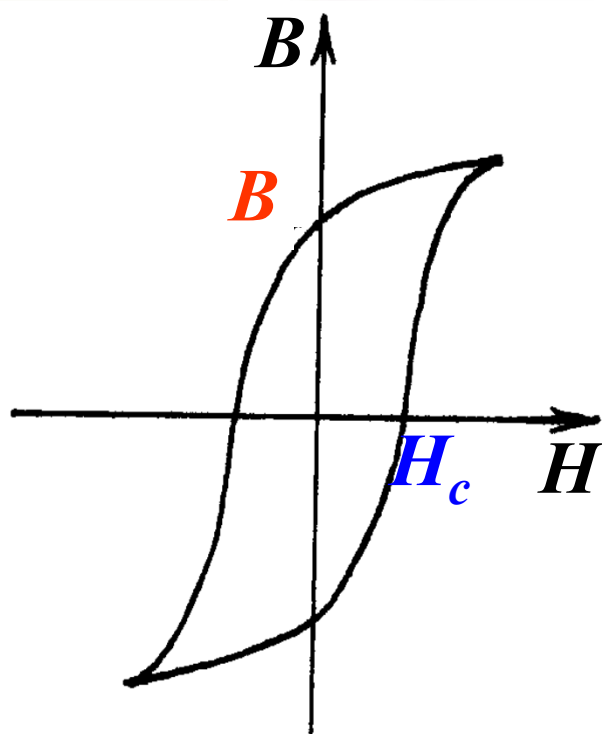
正比于  $B \sim H$  回线所围的面积。

### 3. 硬磁和软磁材料

#### \* 硬磁材料 (**hard magnetic material**)

$H_c$ 大 ( $>10^2 \text{ A/m}$ )，一般 $H_c$ 为 $10^4-10^6 \text{ A/m}$ ，

$B_r$ 也大，一般为 $10^3-10^4 \text{ G}$ 。



碳钢、钨钢

特点：磁滞回线“胖”，  
磁滞损耗大，  
适合制作永久磁铁、  
磁芯（记忆元件）等。

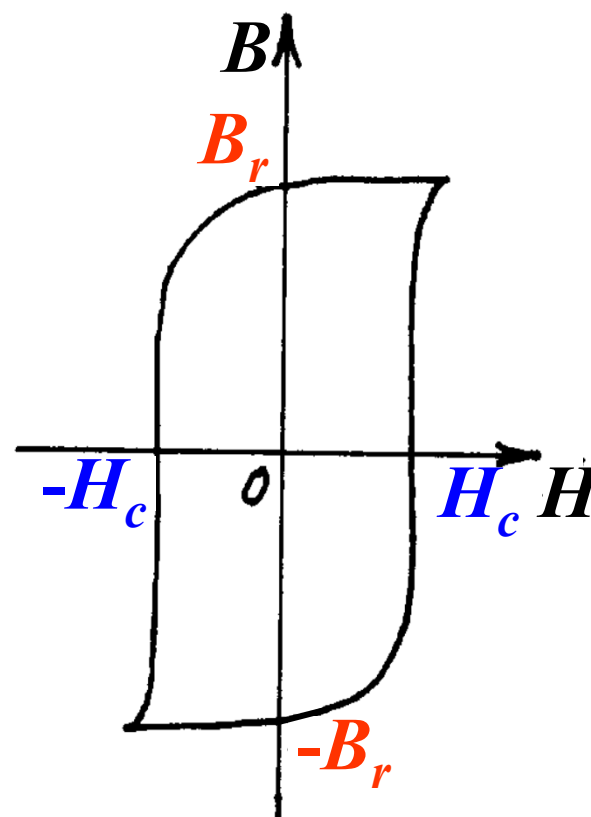


## 非金属磁性材料——矩磁材料：

铁氧体，又叫铁淦氧，是由三氧化二铁和其它二价的金属氧化物的粉末混合烧结而成，常称为磁性瓷。如锰镁铁氧体、锂锰铁氧体等

**特点：**  $B_r = B_s$ ， $H_c$ 不大，磁滞回线是矩形。

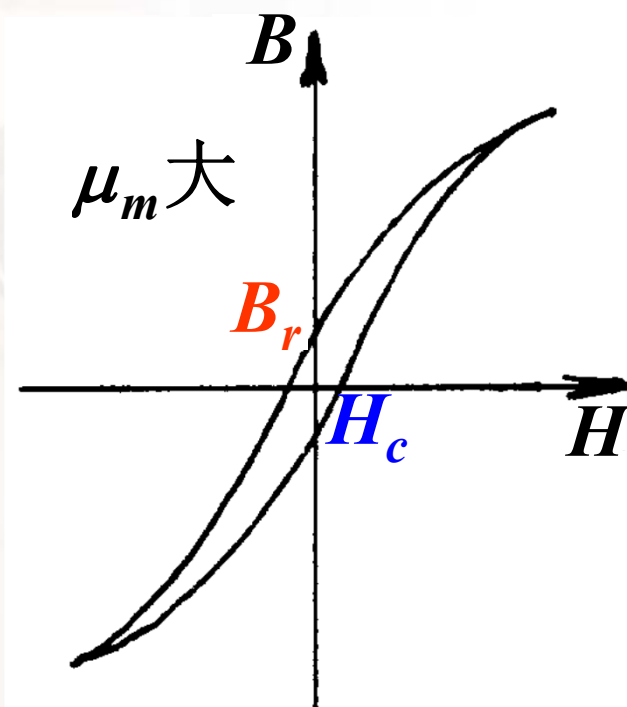
**用途：** 用于**记忆元件**，当+脉冲产生  $H > H_c$  使磁芯呈 +B 态，则-脉冲产生  $H < -H_c$  使磁芯呈 -B 态，可做为二进制的两个态。



$-B_r$       $B_r$   
“0”    “1”

\* 软磁材料 (soft magnetic material)

$H_c$  小 ( $< 10^2 \text{ A/m}$ ), 一般约  $H_c$  为  $1 \text{ A/m}$ 。



纯铁、硅钢

特点:

磁滞回线“瘦”，  
磁滞损耗小，  
适于制作交流  
电磁铁、变压器  
铁芯等。



## 4. 居里点 (Curie point)

$T \uparrow$  (铁磁性特性降低)

$T \geq T_c$  (铁磁性特性消失, 表现顺磁性)

$T_c$ 是失去铁磁性的临界温度, 称“居里点”。

当 $T < T_c$ 时, 又恢复铁磁性。

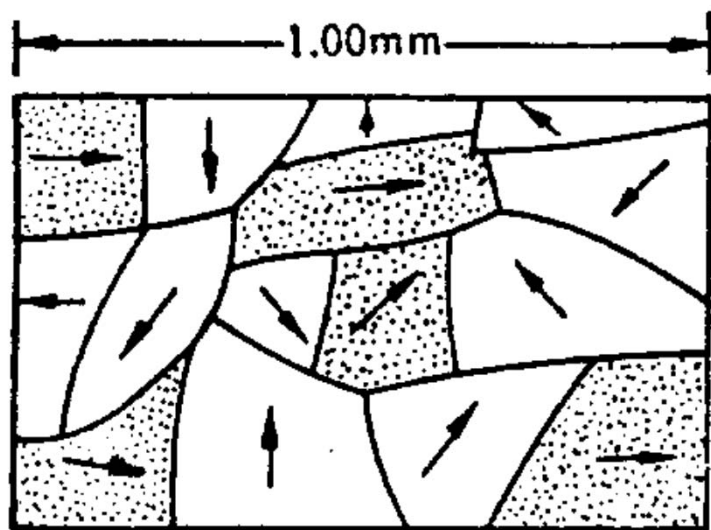
铁Fe :  $T_c = 767^\circ\text{C}$

镍Ni :  $T_c = 357^\circ\text{C}$

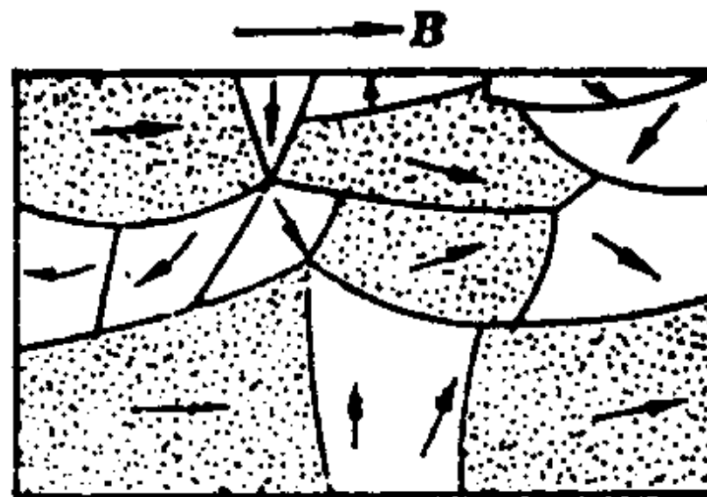
钴Co :  $T_c = 1117^\circ\text{C}$

## 5. 磁畴 (magnetic domain)

铁磁质中起主要作用的是电子的自旋磁矩。各电子的自旋磁矩靠交换偶合作用使方向一致，从而形成自发的均匀磁化小区域——磁畴。



未加磁场

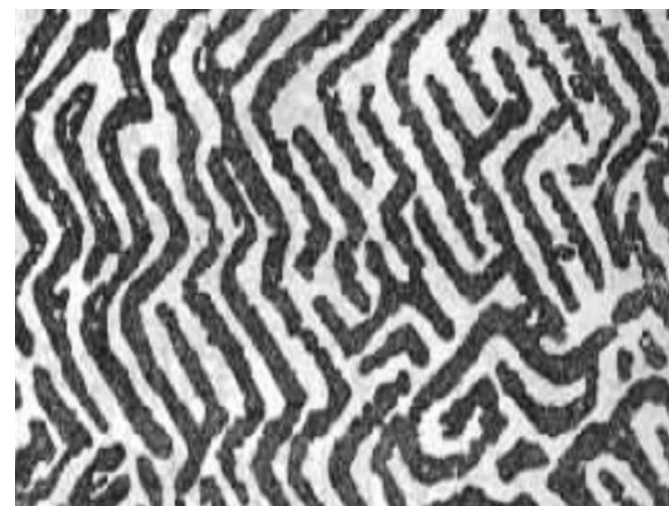


在磁场  $B$  中

各种材料磁畴线度相差较大：从 $10^{-3}\text{m}$ 到 $10^{-6}\text{m}$ ，一般为 $10^{-4}\sim 10^{-5}\text{m}$ ，磁畴体积约为 $10^{-6}(\text{mm})^3$ ，一个磁畴中约有 $10^{12}\sim 10^{15}$ 个原子。

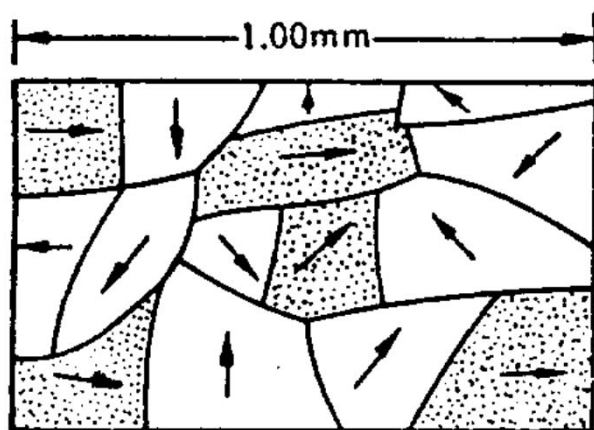
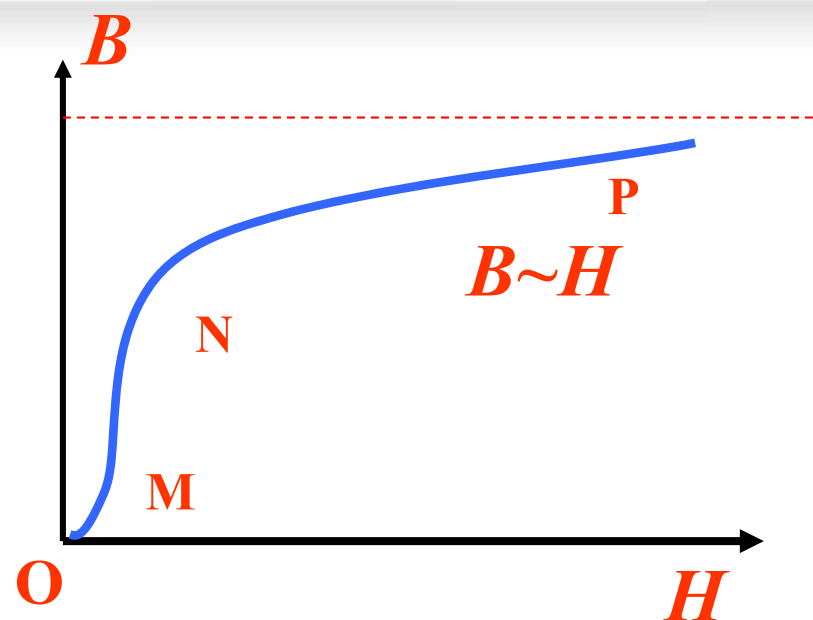
磁畴磁矩沿某个**易磁化方向**(**direction of easy magnetization**)排列。

**易磁化方向**由晶体结构决定。

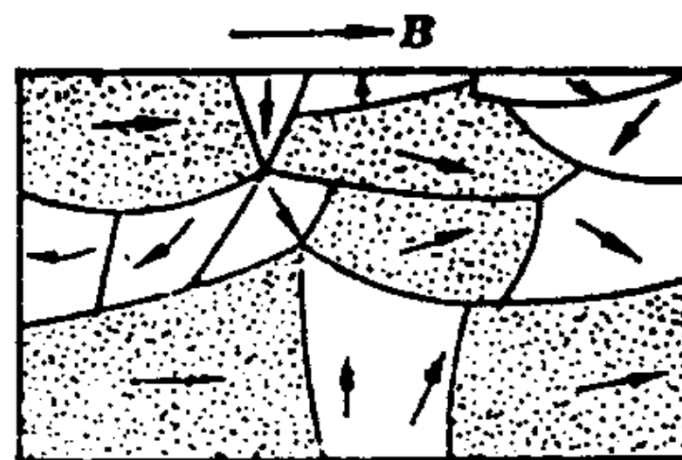


磁畴图象

## \* 起始磁化曲线



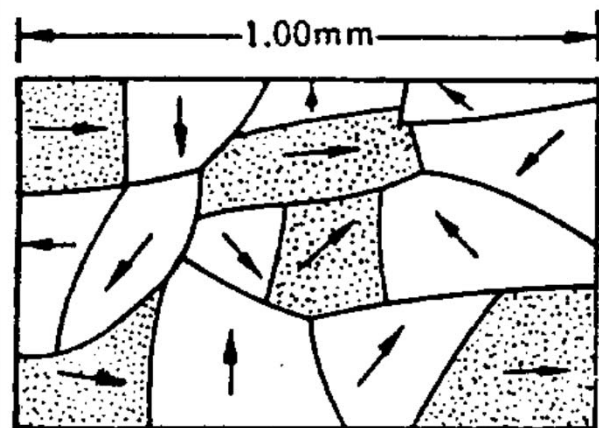
未加磁场



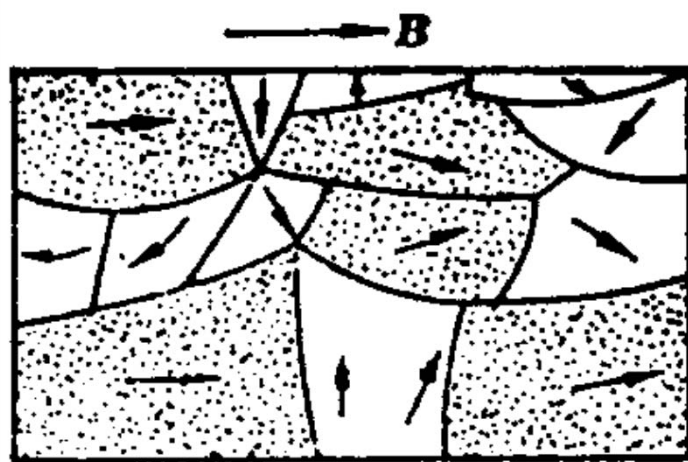
在磁场  $B$  中



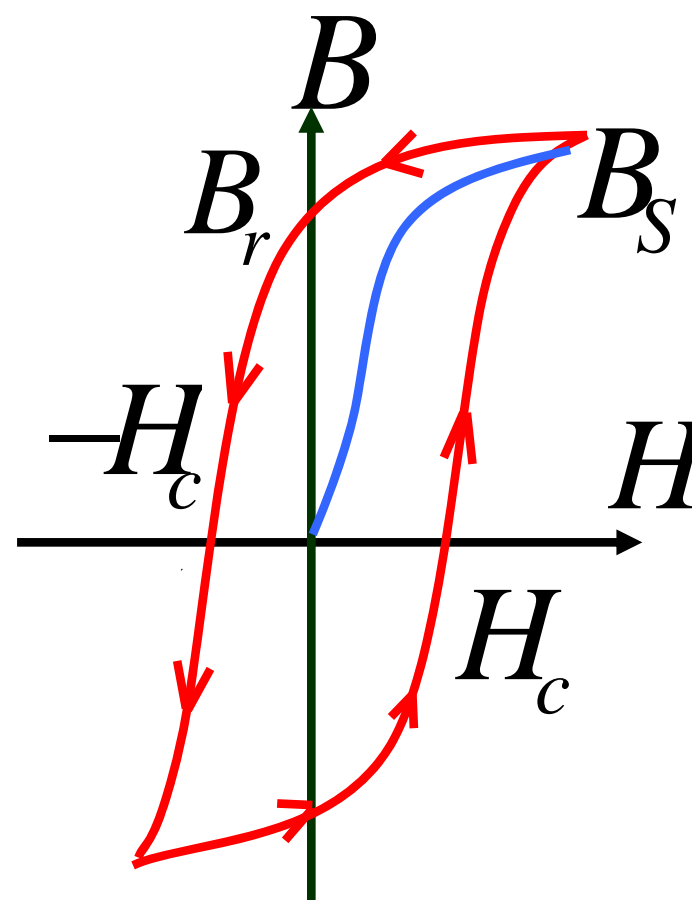
## \*磁滞回线 (hysteresis loop)



未加磁场



在磁场  $B$  中





## \*居里点 (Curie point)

$T \uparrow \rightarrow \vec{M}_{\text{磁畴}} \downarrow$  (自发磁化减弱)

$T \geq T_c \rightarrow \vec{M}_{\text{磁畴}} = 0$  (磁畴瓦解, 表现顺磁性)

$T_c$ 是失去铁磁性的临界温度, 称“居里点”。

当 $T < T_c$ 时, 又恢复铁磁性。



## § 6.6 简单磁路 (magnetic circuit)

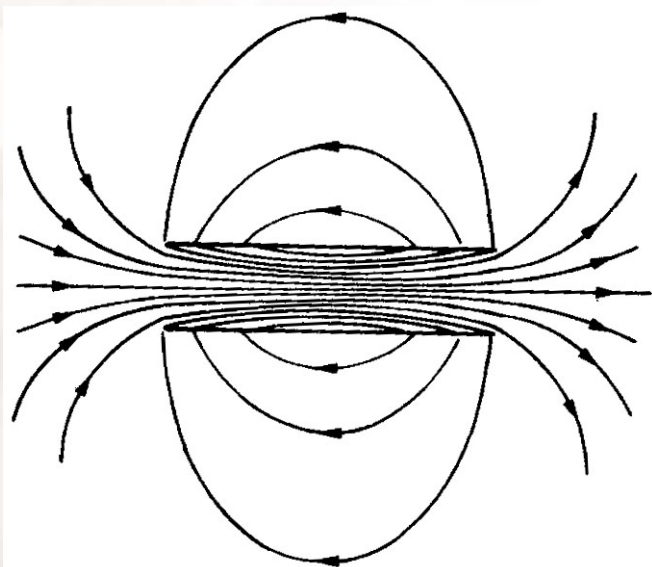
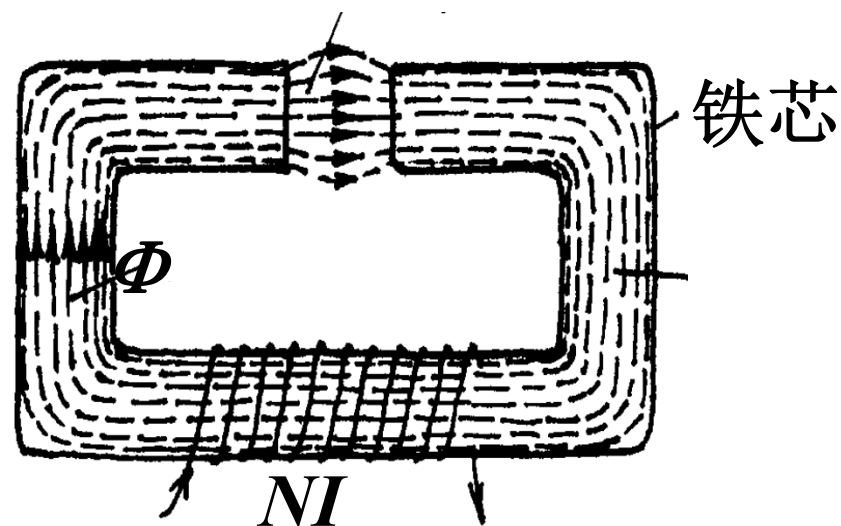


图 8.9 螺线管的  $B$  线分布示意图



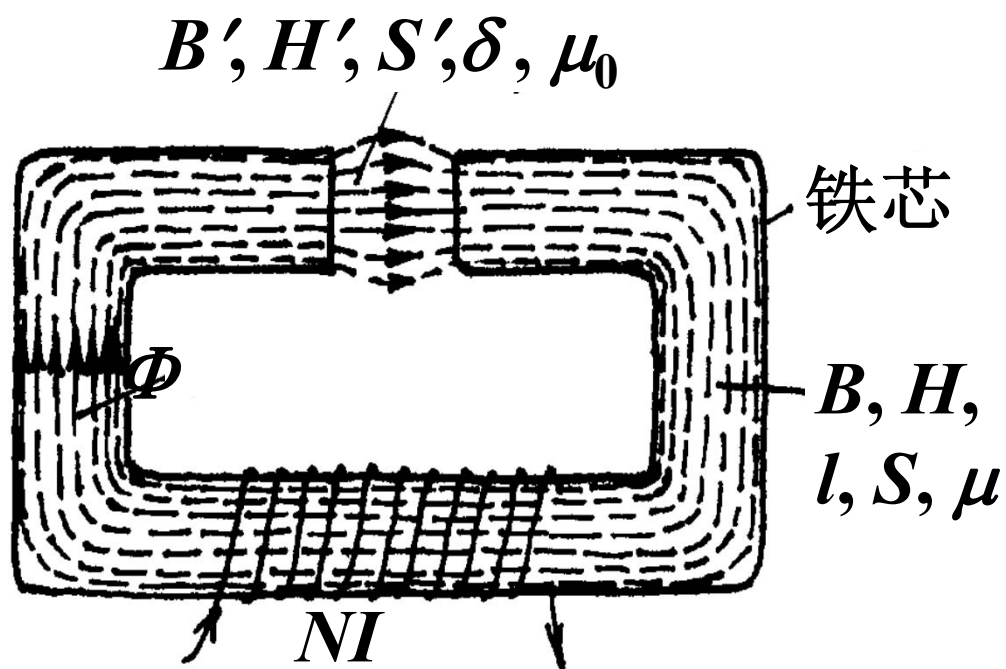
例：如图一铁环 $u$ ，环长 $l$ ，截面积 $S$ ，缺陷 $\delta$ ，上绕 $N$ 匝电流为 $I$ 的线圈，求气隙中的 $B$

$$\oint_{(l+\delta)} \vec{H} \cdot d\vec{l} = NI$$

$$Hl + H'\delta = NI$$

$$\frac{Bl}{\mu_0\mu_r} + \frac{B\delta}{\mu_0} = NI$$

$$B = \frac{\mu_0 NI}{\frac{l}{\mu_r} + \delta}$$





$$B = \frac{\mu_0 NI}{\frac{l}{\mu_r} + \delta}$$

$$I=0.5 \text{ A } N=200$$

若  $\mu_r = 5000$ , 则  $\delta = 1 \text{ mm}$  的气隙,

$l = 0.5 \text{ m}$  的铁芯磁阻,  $S = 4 \times 10^{-4} \text{ m}^2$

若无  $\delta$ , 则  $B = 1.257 \text{ T}$

若有  $\delta$ , 则  $B = 0.114 \text{ T}$

所以气隙对磁路  
影响很大。

$NI$  电磁铁的安匝数



电荷 +, -  
电荷守恒

$$F = qE$$

$$dE = \frac{dq}{4\pi\epsilon_0 r^2} e_r$$

电力线, 电通量

电流 +, -  
电流连续

$$F = qv \times B$$

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Idl \times e_r}{r^2}$$

磁力线, 磁通量

闭合曲面  
闭合曲线



$$B = \mu_r B_0$$

$\mu_r$  的大小？ 顺磁，  
抗磁，铁磁

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

顺磁 固有磁矩  
抗磁 感应磁矩

面束缚电流  
物质的磁化

磁场变化？

$$E = E_0 / \epsilon_r$$

$$\vec{p} = q\vec{l}$$

极性分子 固有电矩  
非极性分子 感生电矩

面束缚电荷  
介电质的极化

电场变化？



$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0 \mu_r}$$

$$\oint_l \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum I_0$$

H的环路定理

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \vec{E}$$

$$\oint_l \vec{D} \cdot d\vec{s} = \sum q_0$$

D的高斯定理

谢谢！

