

四 磁介质对磁场的影响

(一) 磁介质

凡是能影响磁场的物质叫磁介质。

磁介质的分类：

①. 顺磁质 **paramagnetic substance**

B_0 外场

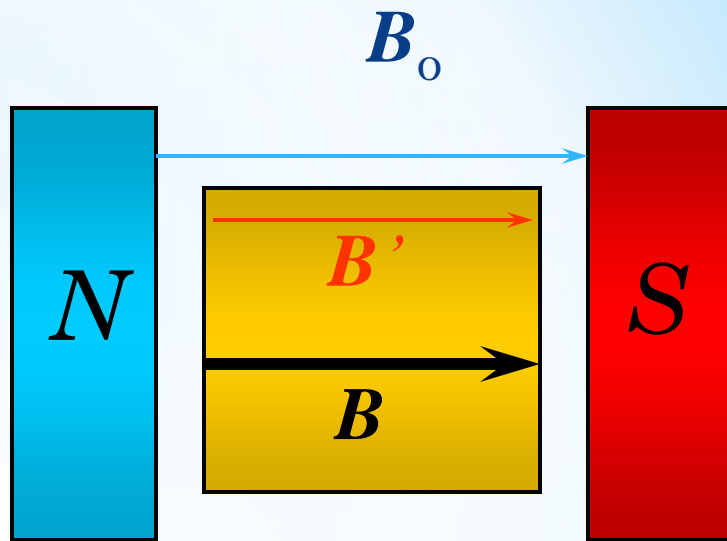
B' 附加场

B 磁介质中的场

$$B' // B_0$$

$$B = B_0 + B' > B_0$$

如金属铝、锰、铬等。

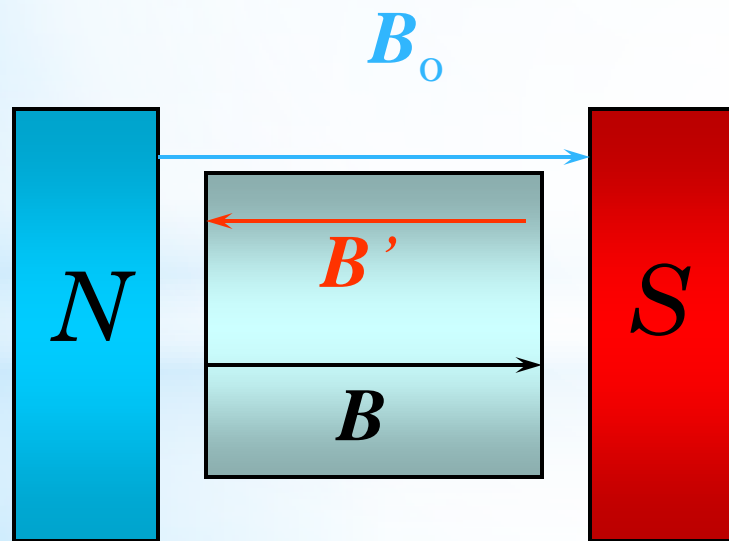


②抗磁质 **diamagnetic substance**

$$B' // -B_0$$

$$B = B_0 + B' < B_0$$

如金属金、银、铜等。



B_0 外场

B' 附加场

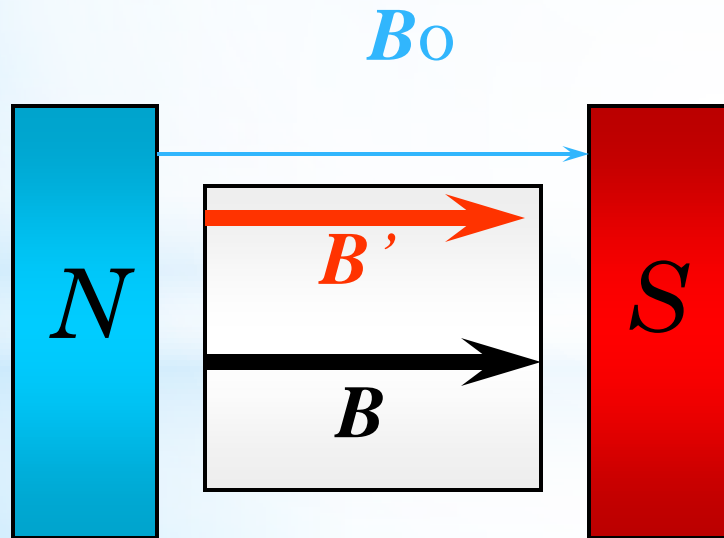
B 磁介质中的场

③铁磁质 **ferromagnetic substance**

$$B' \parallel B_0$$

$$B = B_0 + B' \gg B_0$$

如金属钢、铁、钴、镍等。



B_0 外场

B' 附加场

B 磁介质中的场

(二) 顺磁介质的磁化机制

磁介质是由大量分子或原子组成



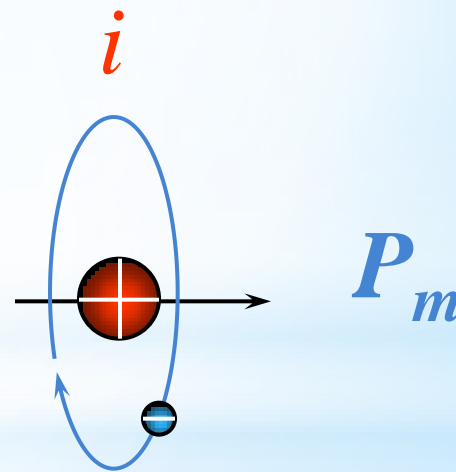
分子内电子绕核旋转



分子电流 i



分子磁矩 $\vec{P}_m = is\hat{n}$

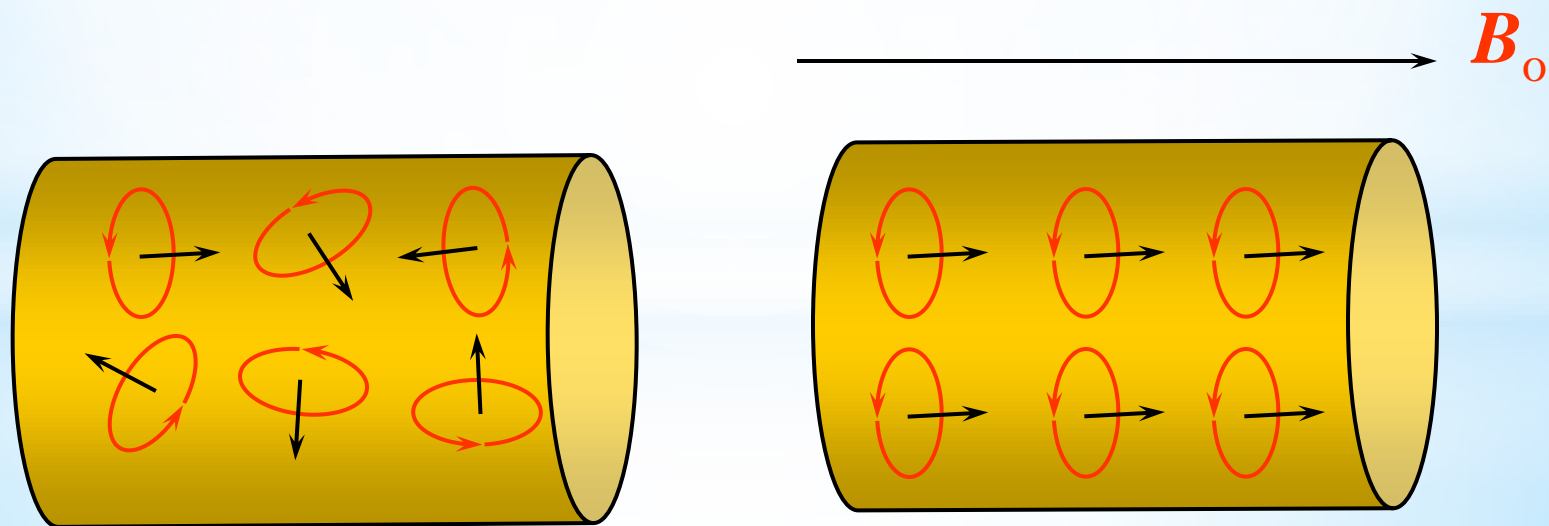


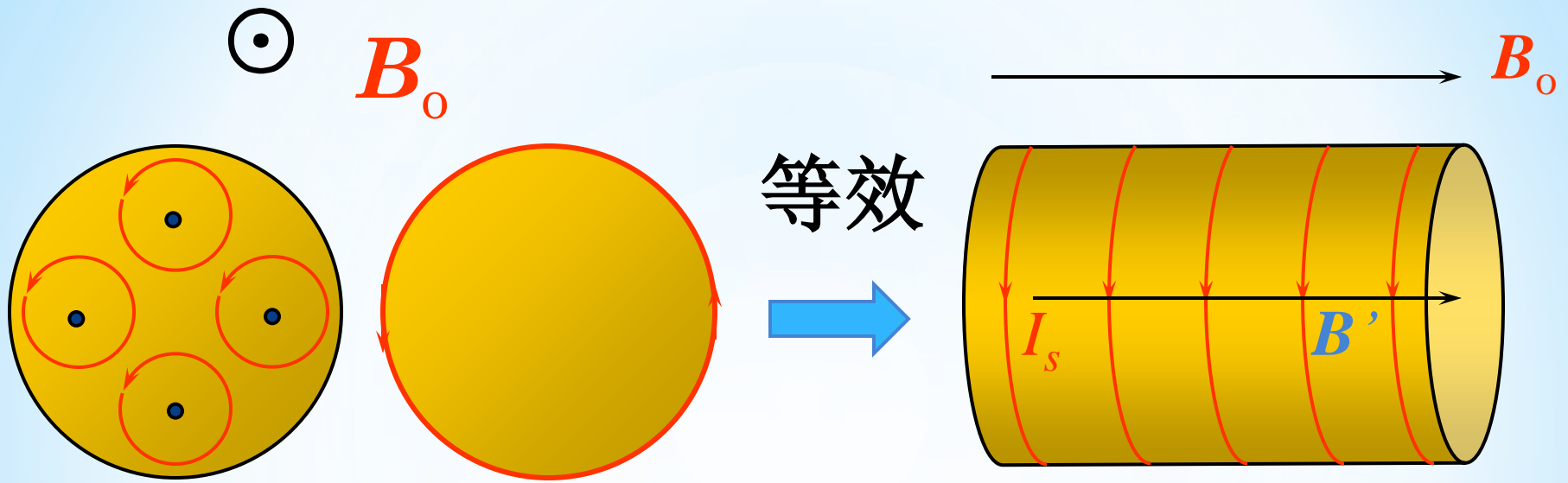
无外场 B_0 时，分子的磁矩排列杂乱无章，

$$\sum \vec{P}_m = 0$$

有外场 B_0 时，分子磁矩沿外场转向，

$$\sum \vec{P}_m \neq 0$$





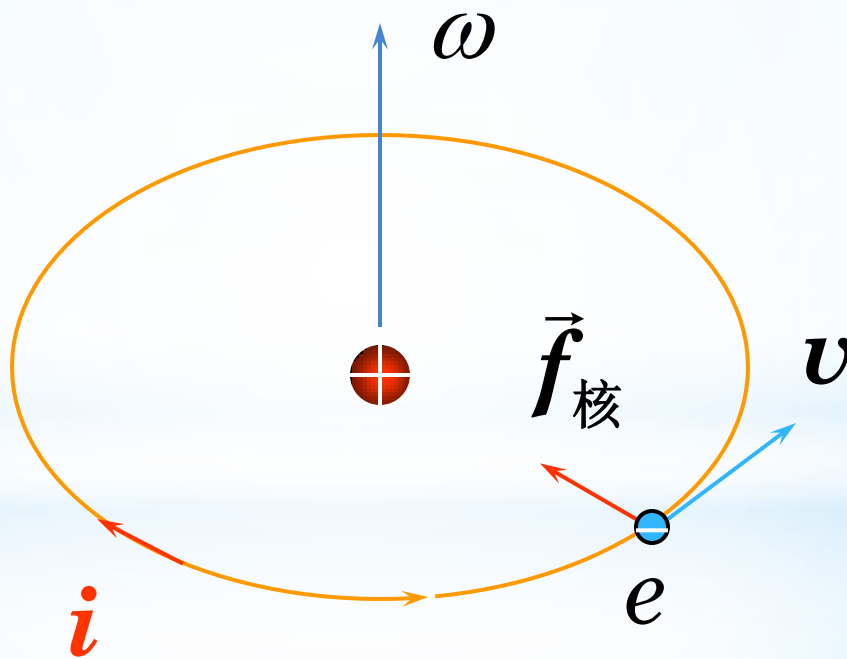
I_s 产生附加磁场 B' 。 I_s 无热效应，无宏观电荷的移动， **磁化电流** 束缚在介质表面上。

$$B' \parallel B_0$$

$$B = B_0 + B' > B_0$$

(三) 抗磁介质的磁化机制

无外磁场时，各电子的磁矩矢量和为0，分子磁矩 $P_m = 0$ ，分子不显磁性。



加外磁场 B_0 。

量子理论可以证明，在外磁场作用下，原子或分子中各个电子因进动而产生附加磁矩，用 $\Delta\vec{P}_m$ 表示，无论是抗磁物质还是顺磁物质， $\Delta\vec{P}_m$ 总是与 \vec{B}_0 反向。

电子的进动：在外磁场的作用下，分子或原子中和每个电子相联系的磁矩都受到磁力矩的作用，由于分子或原子中的电子以一定的角动量作高速转动，这时，每个电子除了保持环绕原子核的运动和电子本身的自旋以外，还要附加电子磁矩以外磁场方向为轴线的转动，称为电子的进动。

注意：无论是顺磁质还是抗磁质，都有进动，只是顺磁质的磁化以分子磁矩的转向为主。

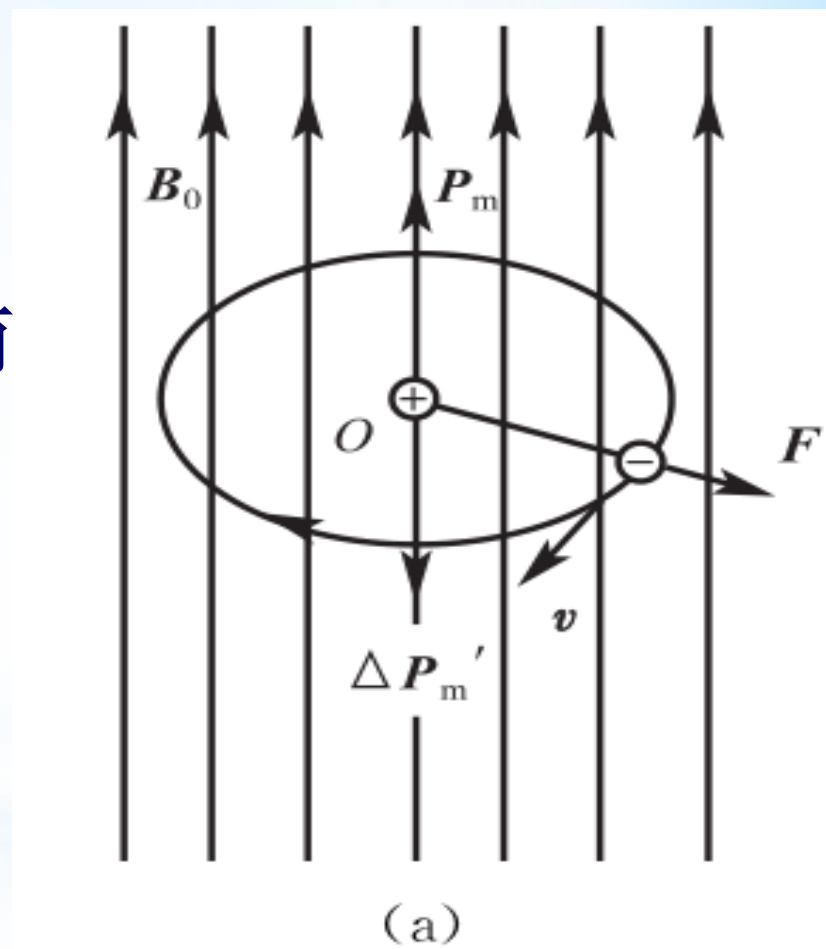
\vec{B}_0 的方向与 \vec{p}_m 一致时

电子受到的洛伦兹力沿轨道半径向外，使向心力减小。

电子运动轨道半径不变，因而电子运动的角速度将减小。

因 $p_m \propto \omega$

所以 \vec{p}_m 就减小，这就等效于产生了一个方向与 \vec{B}_0 相反的附加磁矩 $\Delta P'_m$



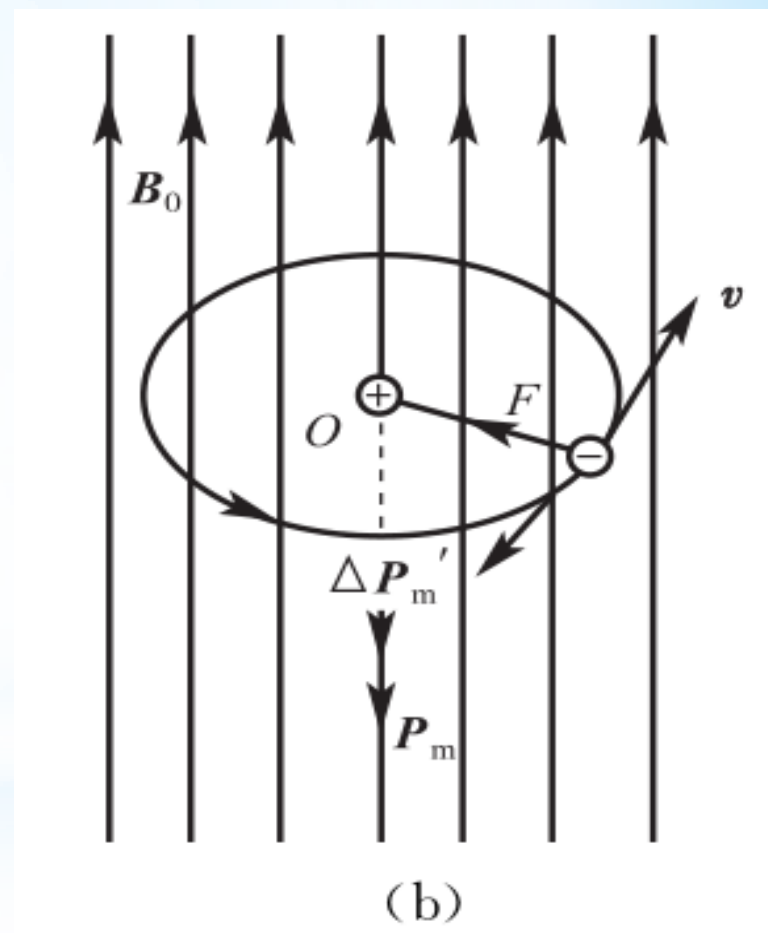
\vec{B}_0 的方向与 \vec{p}_m 相反时

电子受到的洛伦兹力沿轨道半径向内，使向心力增大。

电子运动轨道半径不变，因而电子运动的角速度将增大。

因 $p_m \propto \omega$

所以 \vec{p}_m 就增大，这就等效于产生了一个方向与 \vec{B}_0 相反的附加磁矩 $\Delta P'_m$



因此，不论 \vec{B}_0 的方向与 \vec{p}_m 方向相同还是相反，加上 \vec{B}_0 后，总是产生一个与 \vec{B}_0 方向相反的附加磁矩 $\Delta P'_m$ ，结果会产生一个相反的附加磁场 \vec{B}'_0

抗磁质的 \vec{p}_m 为零，附加磁场 \vec{B}'_0 由 $\Delta P'_m$ 贡献。故 \vec{B}' 与 \vec{B}_0 反向。

顺磁质的 \vec{p}_m 一般比 $\Delta P'_m$ 大得多，因而在顺磁质内 $\Delta P'_m$ 一般可忽略不计。所以 \vec{B}' 与 \vec{B}_0 同向。

结论1

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

μ_r 相对磁导率。真空中 $\mu_r = 1$

顺: $B > B_0$, $\mu_r > 1$;

抗: $B < B_0$, $0 < \mu_r < 1$;

铁: $B \gg B_0$, $\mu_r \gg 1$ 。

电介质中 $\frac{\vec{E}_0}{\vec{E}} = \varepsilon_r$, 真空中 $\varepsilon_r = 1$

(四) 磁介质中的安培环路定理

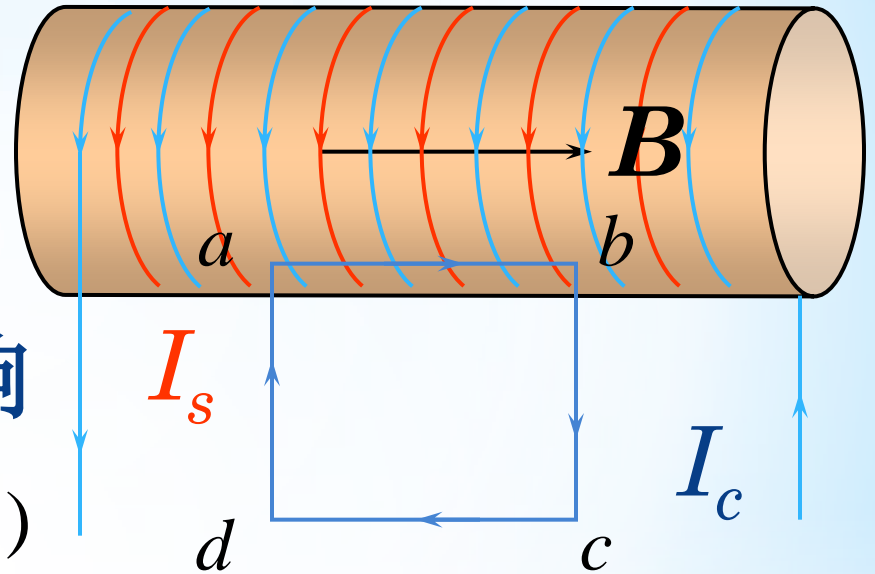
Ampere Circuital Theorem in Magnetic Medium

真空中：

$$\oint \vec{B}_0 \cdot d\vec{l} = \mu_0 \Sigma I$$

磁介质中，消除 I_s 影响

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 (\Sigma I + \Sigma I_s)$$



定理表述： 磁场强度沿闭合路径的线积分，等于环路所包围的传导电流的代数和。

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{\ell} = \Sigma I$$

定理证明：

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{\ell} = \sum I$$

由真空中的安培环路定理和结论1

$$\oint \vec{B}_0 \cdot d\vec{\ell} = \mu_0 \sum I \quad \vec{B}_0 = \frac{\vec{B}}{\mu_r}$$

$$\oint \frac{\vec{B}}{\mu_0 \mu_r} \cdot d\vec{\ell} = \sum I$$

定义**磁场强度**： $\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0 \mu_r}$ H 是辅助物理量。

磁介质中安培环路定理： $\oint \vec{H} \cdot d\vec{\ell} = \sum I$

电介质中高斯定理： $\oiint \vec{D} \cdot d\vec{S} = \sum q$

结论2

在均匀磁介质中:

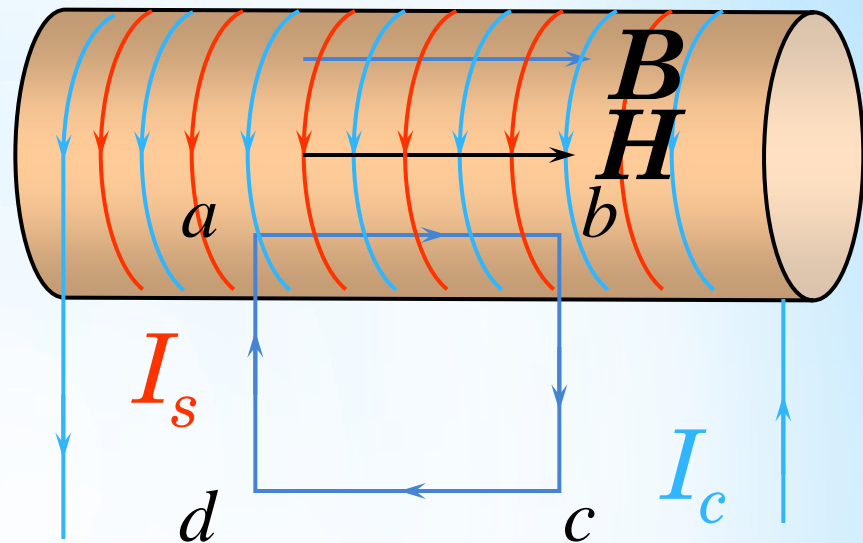
$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H} = \mu \vec{H}$$

$$\mu = \mu_0 \mu_r$$

磁导率 magnetic permeability

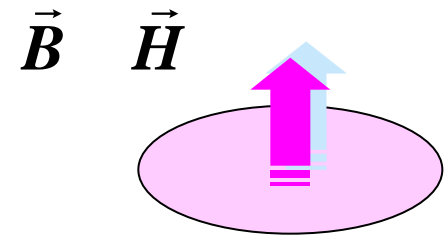
单位: $\text{T} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1}$

电介质中 $\vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \vec{E} = \varepsilon \vec{E}$



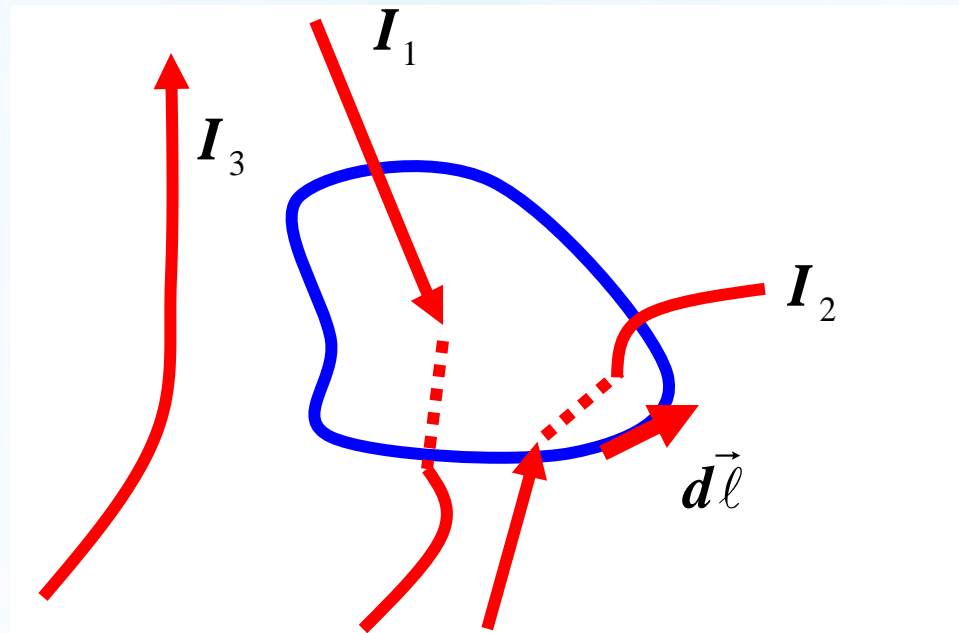
$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{\ell} = \sum I$$

Note: $\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H} = \mu \vec{H}$



- 普遍适用；
- \vec{H} 是一个辅助性 (auxiliary parameter) 的物理量，真正有意义的是 \vec{B} ；
- 与真空中的安培定理一样，如磁场具有对称性，可用磁介质中的安培定理求磁场的分布：先求 \vec{H} ，再求 \vec{B} ；
- $\sum I$ 是传导电流。

For example:



$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{\ell} = I_2 - I_1$$

应用介质中安培环路定理解题方法：

$$\oint \vec{\mathbf{H}} \cdot d\vec{\ell} = \sum I$$

1.分析场的对称性；

2.选取合适的环路；

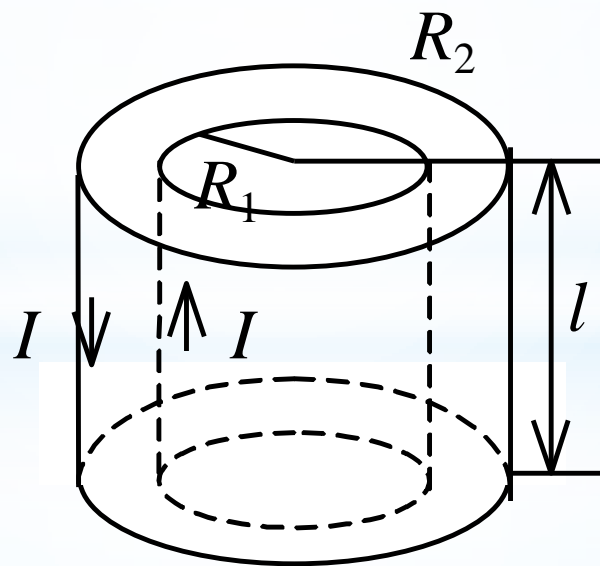
3.求环路内传导电流的代数和 $\sum I$ ；

4.由 $\oint \vec{\mathbf{H}} \cdot d\vec{\ell} = \sum I$ 求 H ；

5.由 $\vec{\mathbf{B}} = \mu_0 \mu_r \vec{\mathbf{H}}$ 求 B 。

例1：一根电缆由两个薄圆筒形导体组成，两圆筒中间填充磁导率为 μ 的均匀磁介质。电缆内层导体通电流 I ，外层导体作为电流返回路径。

求：薄圆筒间的磁场强度和磁感应强度。



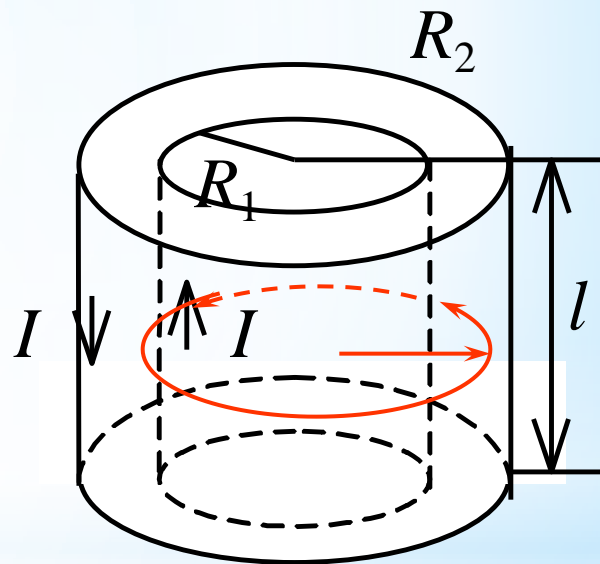
解：

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

$$2\pi r H = I \quad (R_1 < r < R_2)$$

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

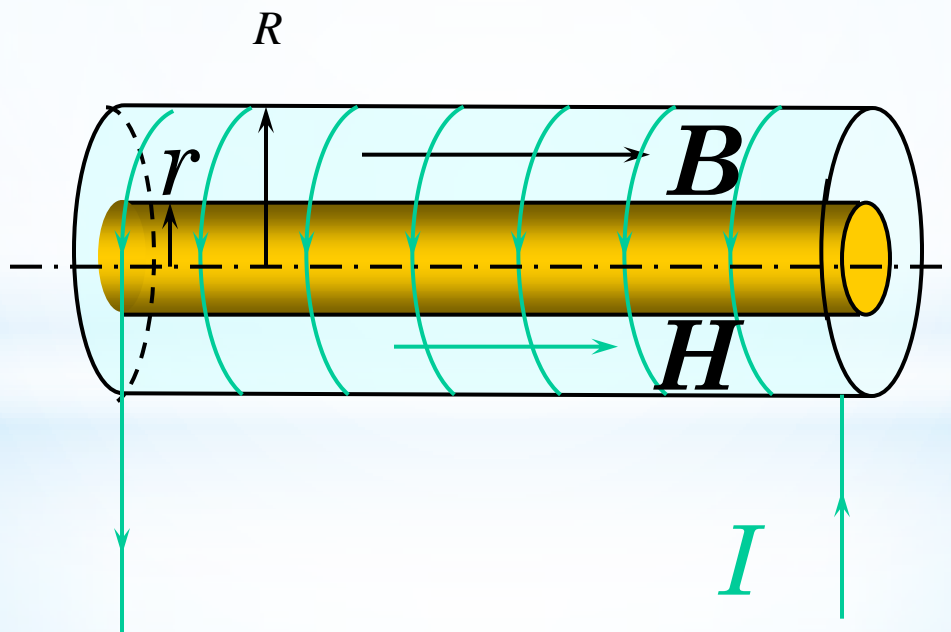
$$B = \mu H = \frac{\mu I}{2\pi r}$$



例2：长直螺线管 I , n , 管内插有 μ_r 磁介质, 求 B 的分布。

解：

管内 B 均匀, 管外 $B=0$;



1. 介质内

作回路 $ab c d a$

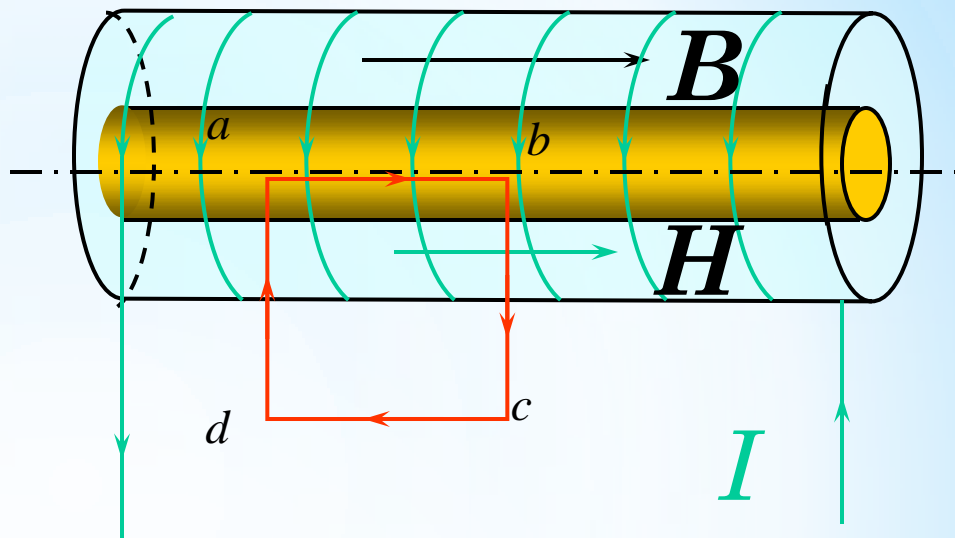
$$\sum I = n \overline{ab} I$$

应用定理:

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_{ab} + \int_{bc} + \int_{cd} + \int_{da}$$

其中 $\int_{bc} = \int_{da} = 0$ $\vec{H} \perp d\vec{l}$, $\cos\theta = 0$

且 $\int_{cd} \vec{H} \cdot d\vec{l} = 0$ 真空中 $H = 0$;



$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_{ab} \vec{H} \cdot d\vec{l}$$

$$= \int_{ab} H dl \cos \theta$$

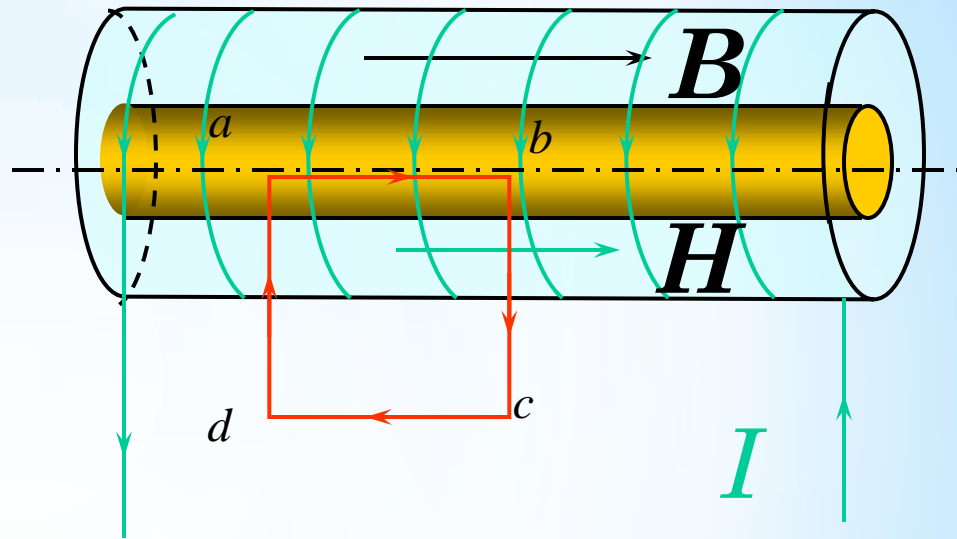
$$= H \int_{ab} dl$$

$$\therefore H \overline{ab} = \sum I = n \overline{ab} I$$

$$\therefore H = nI$$

由 $\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H}$

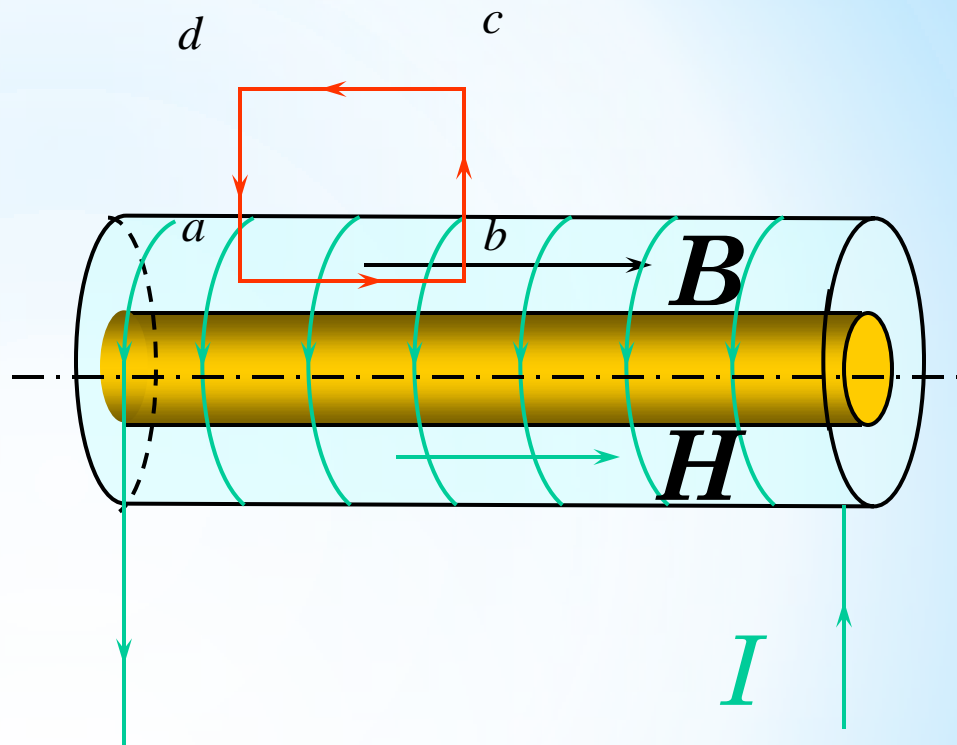
有 $B = \mu_0 \mu_r n I$



2.管内真空中

作环路 $abcd a$;
同理有:

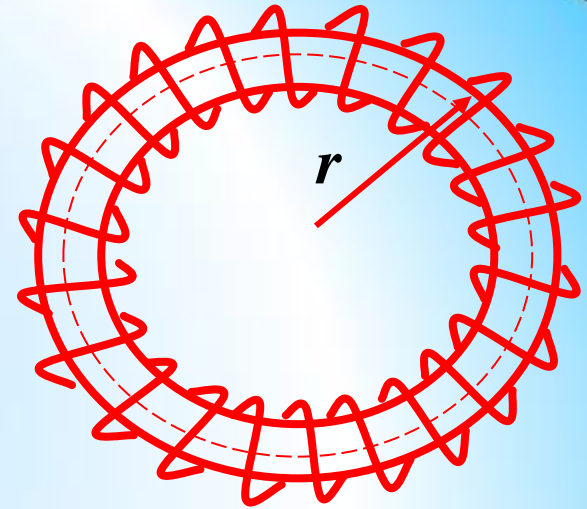
$$H = nI$$



由 $\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H}$ 和真空中 $\mu_r = 1$

有 $B = \mu_0 H = \mu_0 n I$

例3: 如图螺绕环, 磁导率为 μ , 设单位长上有 n 匝线圈, 每匝电流为 I , 求螺绕环内部的磁场。



解: 取半径为 r 积分回路。

$$\text{由} \oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum I \text{ 有} \quad 2\pi r H = NI$$

$$\Rightarrow H = \frac{NI}{2\pi r} = nI$$

$$\Rightarrow B = \mu H = \mu nI$$

$$\text{Here: } n = \frac{N}{2\pi r}$$

练习：用细导线均匀密绕成长为 l 、半径为 a ($l \gg a$)、总匝数为 N 的螺线管，管内充满相对磁导率为 μ_r 的均匀磁介质．若线圈中载有稳恒电流 I ，则管中任意一点的 ()

(A) 磁感强度大小为 $B = \mu_0 \mu_r NI$.

(B) 磁感强度大小为 $B = \mu_r NI / l$.

(C) 磁场强度大小为 $H = \mu_0 NI / l$.

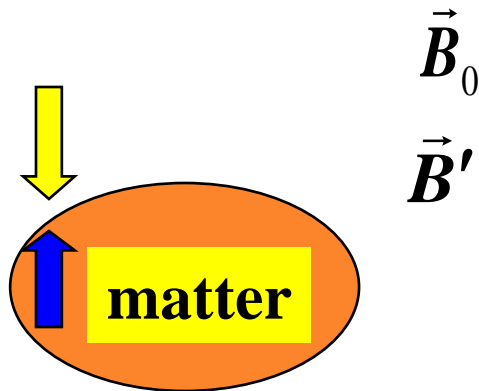
(D) 磁场强度大小为 $H = NI / l$.

(D)

五 铁磁质 Ferromagnetic

1. Properties of Ferromagnetic material 铁磁质的特征

(1) \vec{B} field in the ferromagnetic material may be hundreds or even thousands of times as great as that of other matter ($\mu_r \gg 1$, 产生特强附加磁场 B');



$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}' \gg \vec{B}_0$$

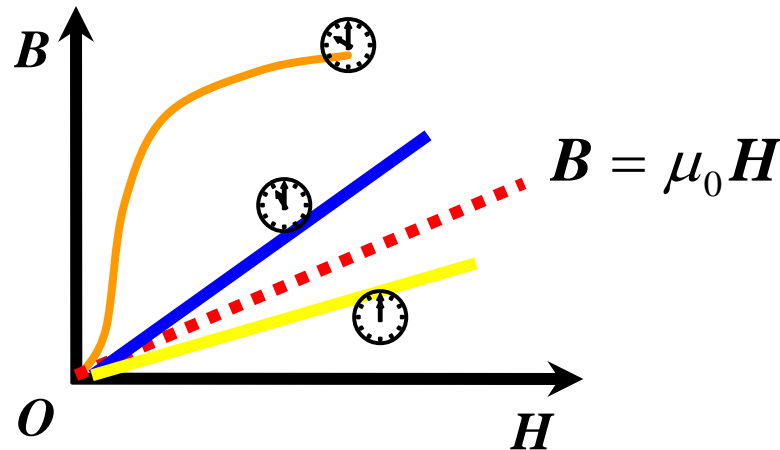
(2) \vec{B} is not a linear function of \vec{H} in other words, the permeability is not a constant (μ_r 与磁化的过程有关, B 与 H 非线性);

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

(3) hysteresis (磁滞现象, B 变化落后于外磁场 H);

(4) The temperature effect of ferromagnetism: Curie temperature (居里温度, 一定的铁磁材料存在一特定的临界温度, 称为居里点, 当温度在居里点以上时, 它们的磁导率和磁场强度 H 无关, 这时铁磁质转化为顺磁质).

B-H curve:



- ⌚ for ferromagnetism (铁磁质) ;
- ⌚ for paramagnetism (顺磁质) ;
- ⌚ diamagnetism (抗磁质) ;

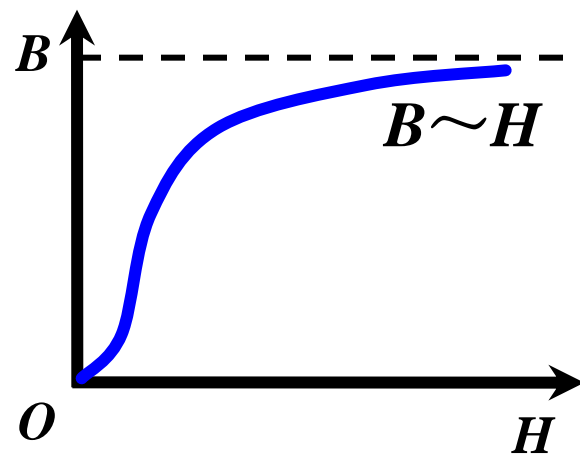
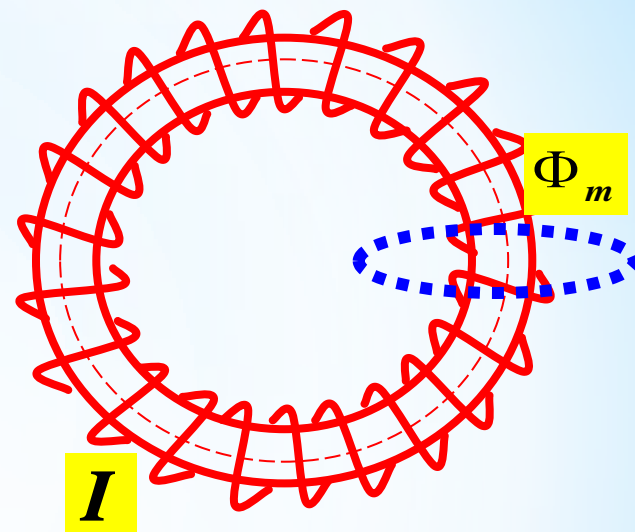
2. Hysteresis Loop 磁滞回线

(1) 起始磁化曲线

通常把铁磁质试样做成环状，外面绕上若干线圈

$$H = nI$$

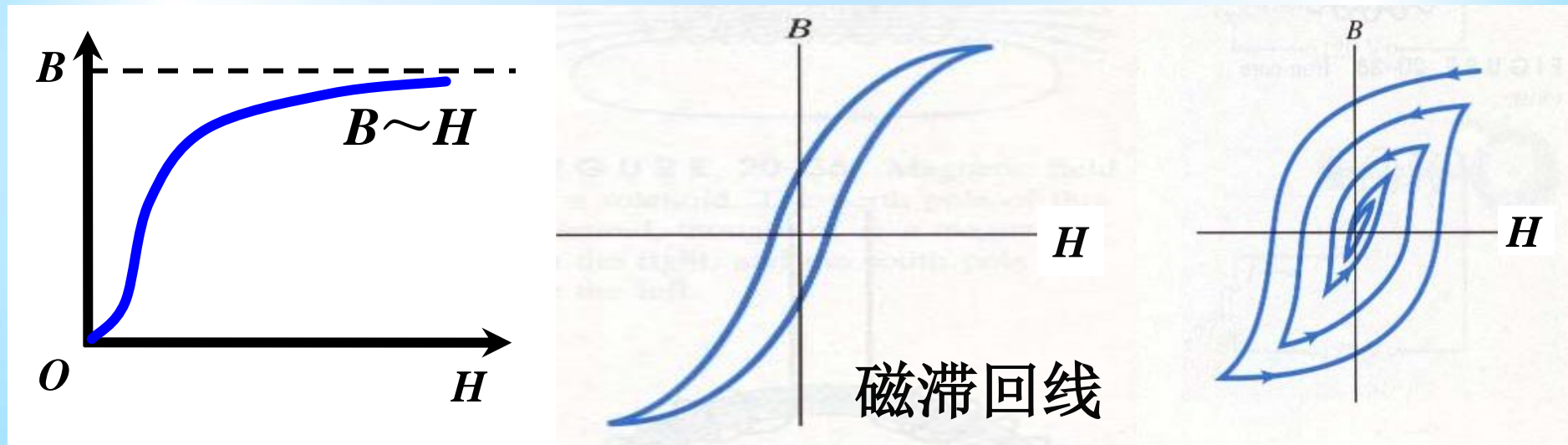
电流计测量 I ，磁通计测量 B ，得到试样的 $H \sim B$ 曲线。



(2) Hysteresis Loop

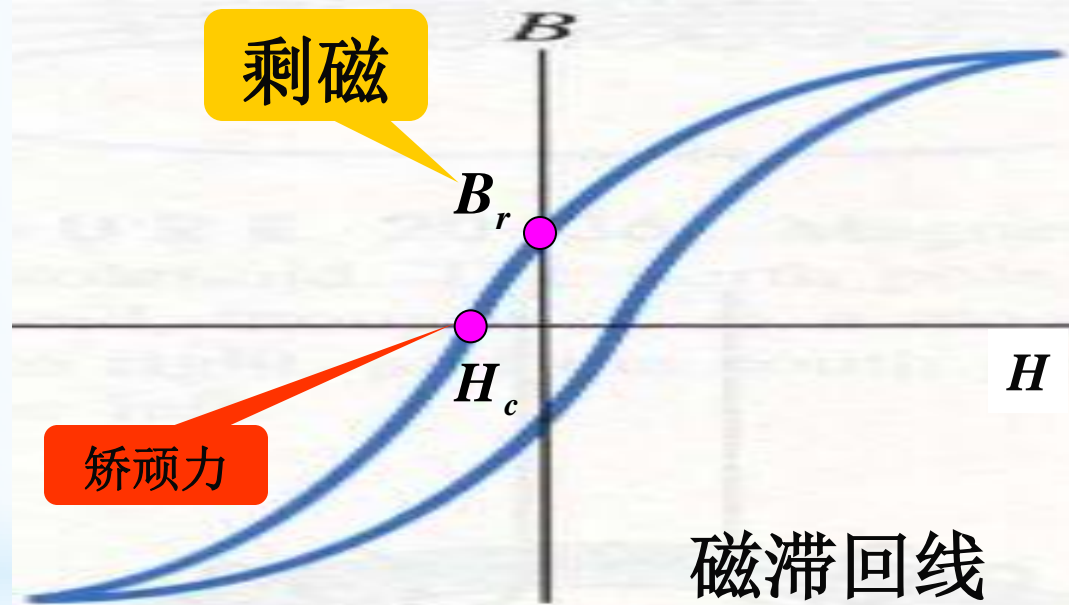
磁滞回线及磁滞现象

- The process of magnetization;



- \vec{B} :depending on not only H but on the magnetic history of sample ;

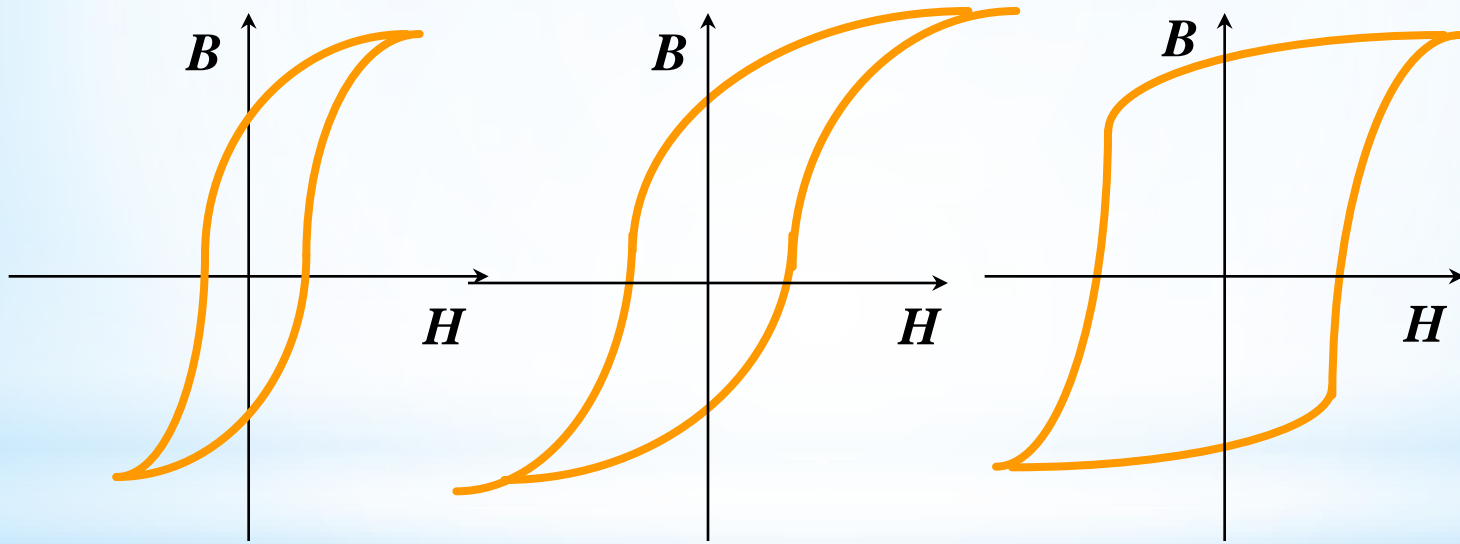
- The B-H curve for decreasing H does not coincide with (重合) that for increasing H, which is called hysteresis(滞后) ;



- Remanence B_r (剩磁) and Coercive force H_c (矫顽力)

3. Hard & soft materials 磁性材料

不同铁磁性物质的磁滞回线有很大差异。图示三种铁磁材料的磁滞回线。



a) 软磁材料

b) 硬磁材料

c) 矩磁铁氧体材料

磁滞回线所包围的面积越大，磁滞（热）损耗越大，

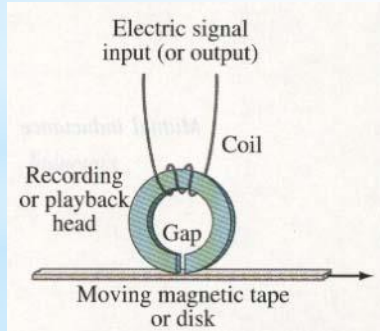
因此必须根据不同的用途选用不同的磁性材料。

(举例说明)

软磁材料：矫顽力小，所需退磁电流小，适用于高频材料，如用做变压器铁芯，电声材料等。

硬磁材料：矫顽力大，不易退磁，剩磁大，适用于做永磁材料

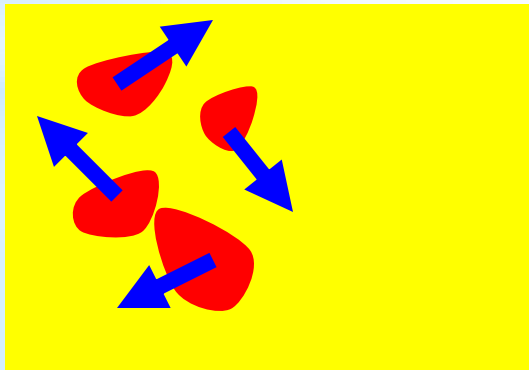
矩磁铁氧体材料：反向磁场一超过矫顽力磁化方向立即反转——只有两种磁化状态，对应电流的开与关两种状态，适用于做计算机的存储器元件的环形磁芯。



4 . Magnetic Domains 磁畴（铁磁质的磁化机制）

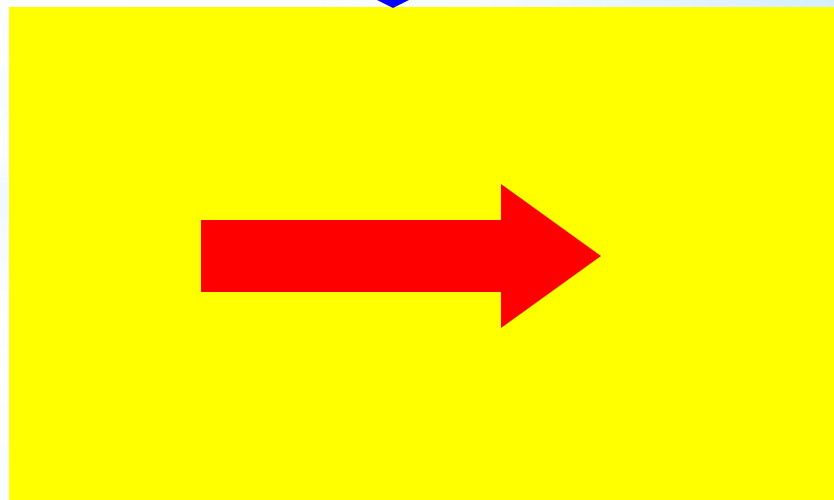
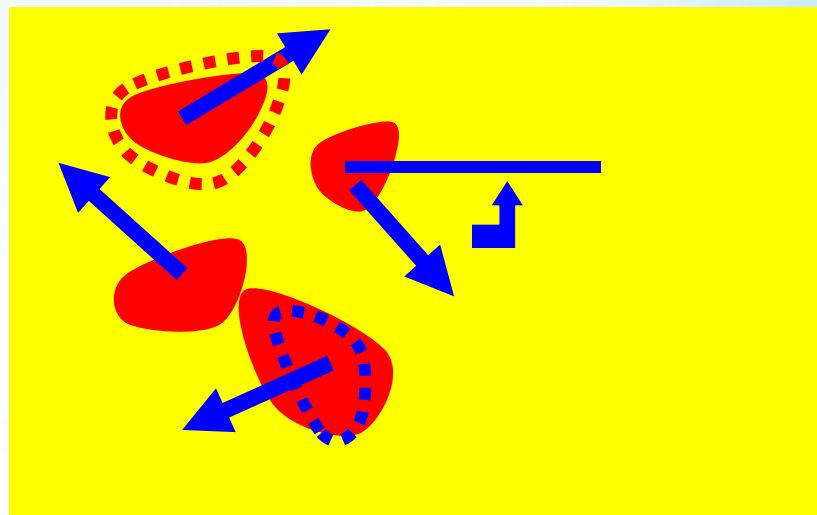
对永久磁铁的认识比其它磁现象的认识更早，但对其起因却长期以来感到困惑不解；近代科学实践证明：
铁磁质的磁性主要来自电子的自旋。

铁磁质内部原子间的相互作用非常强烈，量子理论证明，在这种作用下，铁磁质的内部形成了一些自发磁化的小区域—**磁畴**：



磁畴在外磁场:

- (1) 凡磁矩与外磁场方向相同或相近的磁畴扩大自己的体积;
- (2) 每个磁畴的磁矩方向都不同程度地向外磁场方向靠拢;
- (3) 磁畴壁的外移和磁矩的转向是不可逆的; 随外磁场的增加, 过程达饱和;



(4) 存在居里点原因:温度升高至居里点时铁磁质中的自发磁化区域磁畴受到剧烈的分子热运动的破坏, 磁畴被瓦解, 铁磁质的特性消失, 过渡到顺磁质. 不同的铁磁质居里温度亦不同.

(5) 金属中, 一般情况, 两电子配对, 一个自旋向上, 一个自旋向下; 然而, 对铁、镍、钴等, 它有两个过剩的电子未配成对, 铁的磁性几乎全部是由于这些电子的磁矩顺序排列所造成的。

