

§ 8-8 磁介质中的磁场

无磁介质时 $\oint_L \vec{B}_0 \cdot d\vec{l} = \mu_0 \sum_{(L \text{ 内})} I_0$

磁场中有介质存在时，总磁场有所不同，出现了磁化电流 I_s 和附加磁场 \vec{B}'

磁介质中的总磁感应强度为： $\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}'$

一. 有磁介质时磁场的高斯定理

磁化介质内的附加磁场 \vec{B}' 仍为涡旋场。因此有磁介质存在时，磁场的高斯定理仍成立

$$\oiint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$$

二. 有磁介质时的安培环路定理

$$\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = \oint_L \mu_r \vec{B}_0 \cdot d\vec{l} = \mu_r \oint_L \vec{B}_0 \cdot d\vec{l} \\ = \mu_r \mu_0 \sum I_i$$

$$\oint_L (\vec{B} / \mu_0 \mu_r) \cdot d\vec{l} = \sum I_i$$

令

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

称为**磁场强度矢量** \vec{H}

$$\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum I_i$$

有磁介质时的
安培环路定理

有磁介质时 $\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 (\sum I + I_s)$

$$\because I_s = \oint \vec{M} \cdot d\vec{l}$$

$$\therefore \oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 (\sum I + \oint \vec{M} \cdot d\vec{l})$$

$$\text{或} \quad \oint \left(\frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M} \right) \cdot d\vec{l} = \sum I$$

磁场强度矢量沿任一闭合回路的环流，等于闭合回路所包围的传导电流的代数和，而在形式上与磁介质中的磁化电流无关。

(1) 单位 (SI) : 安·米⁻¹ (A·m⁻¹)

(2) $\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M}$ 此式普遍适用。表示在磁场中任一点处, $\vec{H}, \vec{M}, \vec{B}$ 三个物理量是点对应的关系。

(3) \vec{H} 是辅助量, 决定受力的仍为磁感应强度 \vec{B} 。

(4) 由实验, 对各向同性均匀磁介质, 有 $\vec{M} = \chi_m \vec{H}$
比例系数 χ_m ——磁介质的磁化率, 大小仅与磁介质性质有关, 是无单位的纯数。

$$\begin{cases} \chi_m > 0, \text{顺磁质} \\ \chi_m < 0, \text{抗磁质} \end{cases}$$

(5) 由

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

得

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \vec{M}$$

将

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

代入上式得

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \vec{M} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \chi_m \vec{H} = \mu_0 (1 + \chi_m) \vec{H}$$

令

$$1 + \chi_m = \mu_r$$

则有

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

相对磁导率

——适用于各向同性磁介质

磁导率

• 磁介质中安培环路定理的应用

各向同性均匀磁介质



对称性分布的
传导电流和磁介质

$$\longrightarrow \vec{H} \longrightarrow \vec{B}$$

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

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



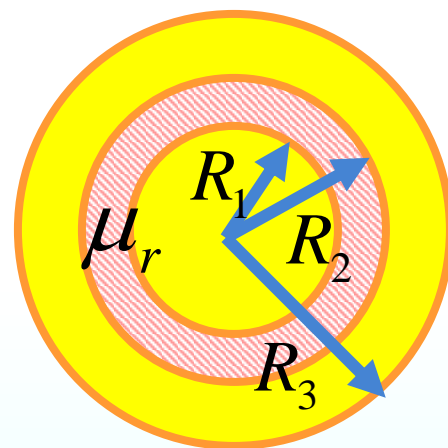
例 一电缆由半径为 R_1 的长直导线和套在外面单位内、外半径分别为 R_2 和 R_3 的同轴导体圆筒组成，其间充满相对磁导率为 μ_r 的各向同性顺磁质。电流 I 由中心导体流入，由外面圆筒流出。求磁场分布

解：由对称性分析， \vec{H} 线和 \vec{B} 线都是在垂直于轴线的平面内，并以轴线上某点为圆心的同心圆。取距轴线距离 r 为半径的圆为安培环路 L ，顺时针绕行，则有

$$r < R_1 : \oint_L \vec{H}_1 \cdot d\vec{l} = H_1 \cdot 2\pi r = \frac{I}{\pi R_1^2} \pi r^2$$

$$H_1 = \frac{Ir}{2\pi R_1^2}$$

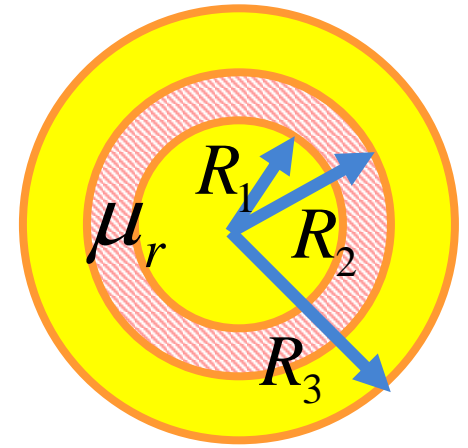
$$B_1 = \mu_0 H_1 = \frac{\mu_0 I r}{2\pi R_1^2}$$



$$R_1 \langle r \langle R_2 : \oint_L \vec{H}_2 \cdot d\vec{l} = H_2 \cdot 2\pi r = I$$

$$H_2 = \frac{I}{2\pi r}$$

$$B_2 = \mu H_2 = \frac{\mu_0 \mu_r I}{2\pi r}$$



$$R_2 \langle r \langle R_3 : \oint_L \vec{H}_3 \cdot d\vec{l} = H_3 \cdot 2\pi r = I - \frac{I}{\pi(R_3^2 - R_2^2)} \pi(r^2 - R_2^2)$$

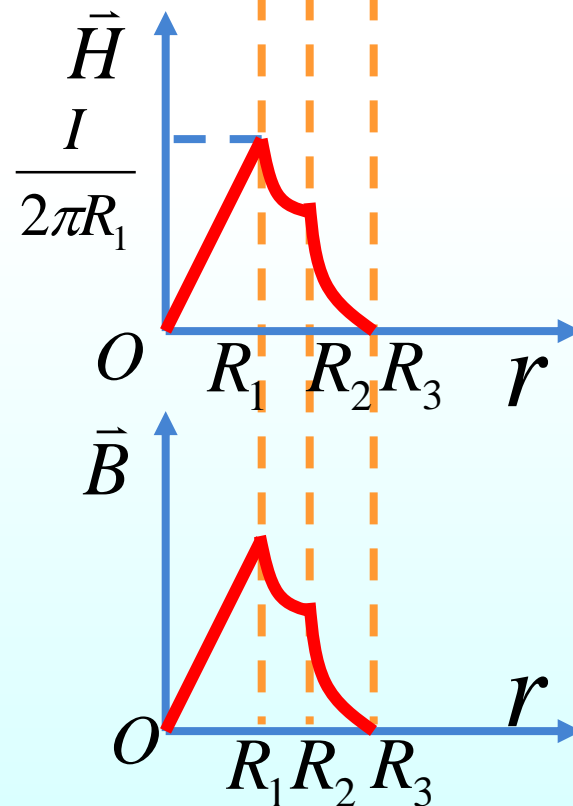
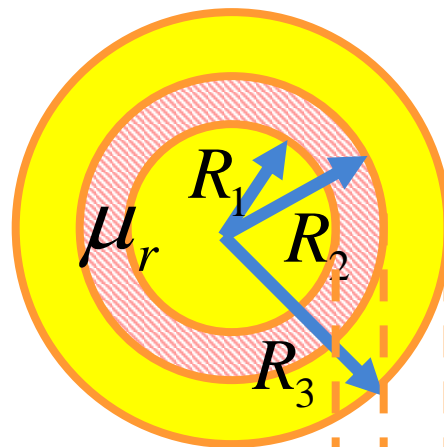
$$H_3 = \frac{I}{2\pi r} \frac{R_3^2 - r^2}{R_3^2 - R_2^2}$$

$$B_3 = \mu_0 H_3 = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \frac{R_3^2 - r^2}{R_3^2 - R_2^2}$$

$$r > R_3 : \oint_L \vec{H}_4 \cdot d\vec{l} = H_4 \cdot 2\pi r = I - I = 0$$

$$H_4 = 0$$

$$B_4 = 0$$

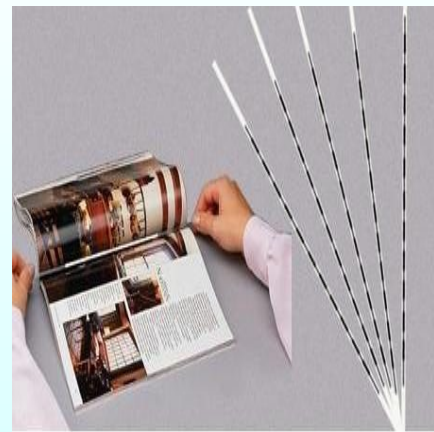


§ 8-10 铁磁质

铁磁质是一种强磁质，磁化后的附加磁感应强度远大于外磁场的磁感应强度，用途广泛。

铁、钴、镍及许多合金都属于铁磁质

50年代后：计算机和科学技术发展 → 用于信息的存储和记录（磁盘、磁带等）



铁磁质特点:

(1) 在外磁场的作用下能产生很强的附加磁场。

$$\vec{B}' \gg \vec{B}_0 \text{ (千百倍, 同方向)}$$

(2) 外磁场停止作用后, 仍能保持其磁化状态。

(3) 相对磁导率和磁化率不是常数, 而是随外磁场的变化而变化; 具有磁滞现象, \vec{B} 、 \vec{H} 之间不具有简单的线性关系。

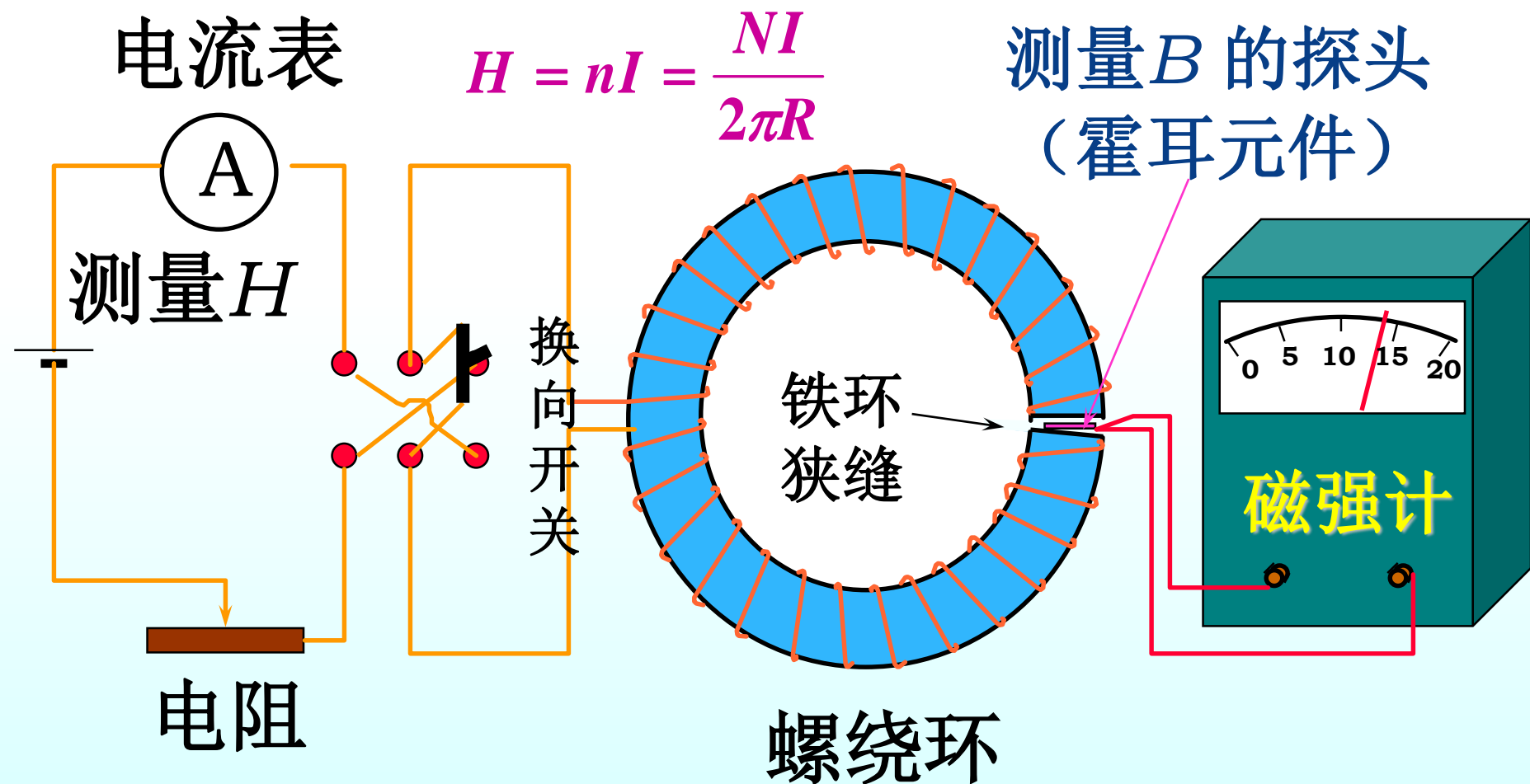
$$\mu_r(\gg 1) \neq \text{常数}, \mu_r = \mu_r(H)$$

(4) 具有临界温度 T_c 。在 T_c 以上, 铁磁性完全消失而成为顺磁质, T_c 称为居里温度或居里点。不同的铁磁质有不同的居里温度 T_c 。纯铁: 770°C , 纯镍: 358°C 。

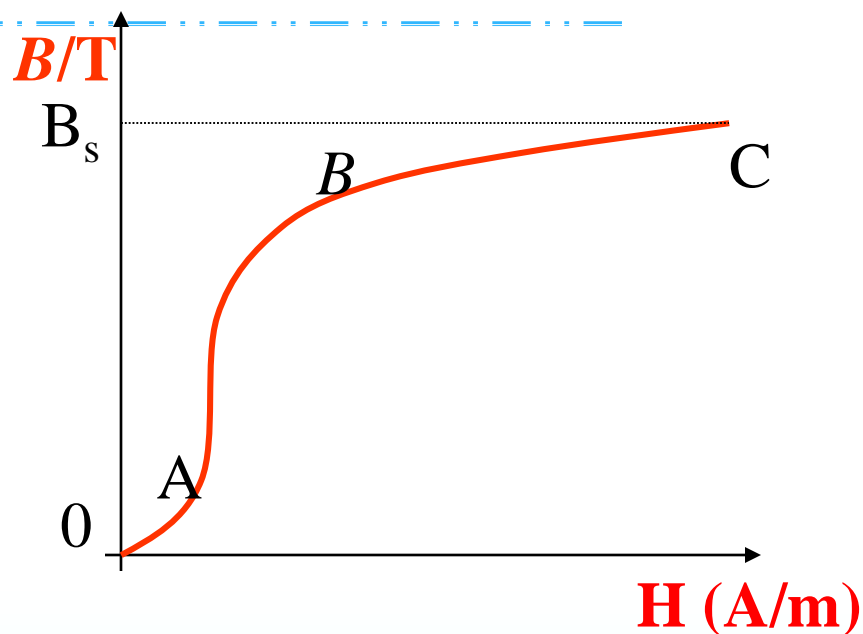


一、铁磁质的磁化规律

测量磁化曲线的实验装置



1. 磁化曲线



OA段: B 随 H 线性增加

AB段: B 随 H 急剧增加

BC段: B 随 H 缓慢增加

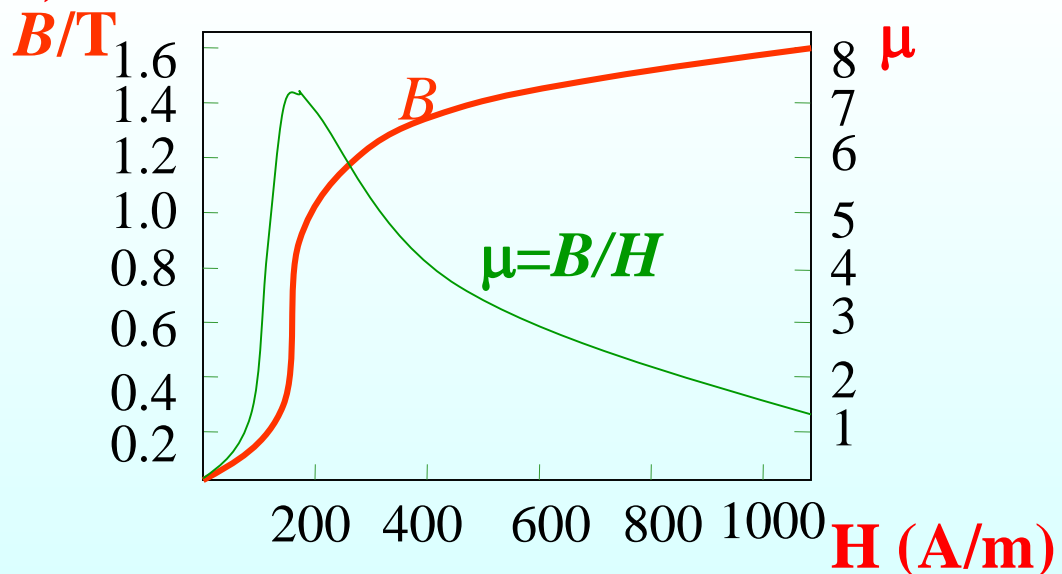
C以后: $B=B_s$ (饱和状态)

结论:

(1) μ 与 H 为非线性关系

(2) 当 $H = H_s$ 时,

B 不随 H 变(饱和状态)



2、磁滞回线 $B-H$

(1) $O \rightarrow a$ 为起始磁化曲线 (不可逆)

H_s 称为 饱和磁场强度

B_r 称为 剩余磁感应强度

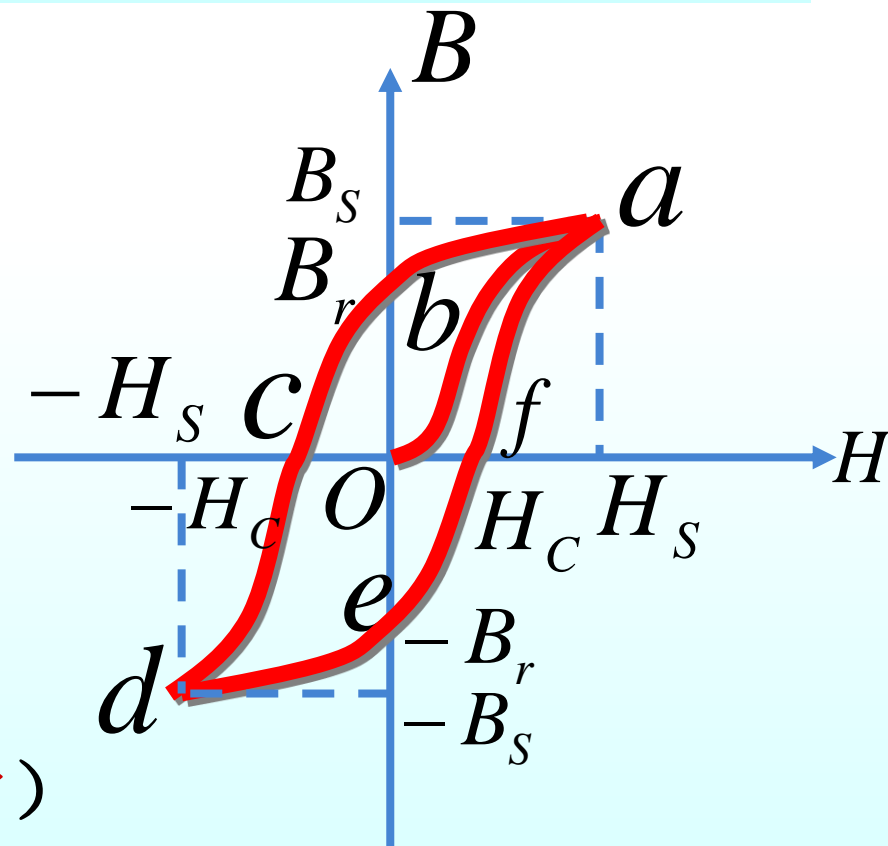
(2) $a \rightarrow b$ 剩磁

$$H = 0, B = B_r$$

(3) $b \rightarrow c$ 矫顽力

$$H = -H_c, B = 0$$

(反映保持剩余状态的能力)



(4)

$c \rightarrow d$

$$H = -H_s, B = -B_s$$

(5)

$d \rightarrow e \rightarrow f \rightarrow a$

形成闭合曲线

表明：铁磁质中 B 与 H 的关系是非线性，非单值的。

- **B和H呈非线性关系**， μ 不是一个恒量， B 不能由 H 单值确定

- **磁滞现象：** B 的变化落后于 H 的变化

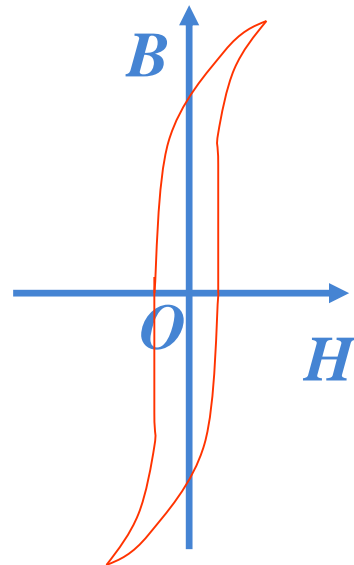
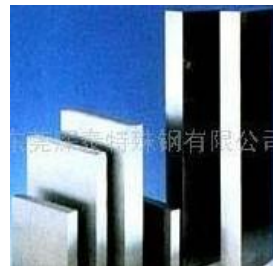
- **高 μ 值**（可使磁场增强 $10^2 \sim 10^4$ 倍）

- **存在磁滞损耗：**磁滞损耗与磁滞回线面积成正比

二、铁磁质的分类

软磁材料

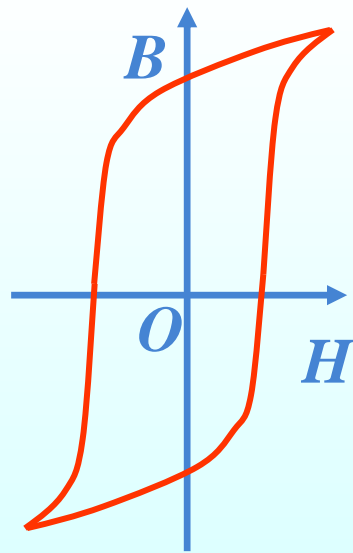
矫顽力很小 ($H_c < 10^2 \text{A} \cdot \text{m}^{-1}$)，磁滞回线窄，所围面积小，磁滞损耗小。



软磁材料如纯铁、硅钢、坡莫合金、铁氧体等材料，适用于交变磁场中，常用作变压器、继电器、电动机、电磁铁和发动机的铁芯。

硬磁材料

矫顽力大，剩磁大、磁滞回线宽，所围的面积大，磁滞损耗大。



硬磁材料如碳钢、钨钢、铝镍钴合金等材料。磁化后能保持很强的磁性，适用于制成各种类型的永久磁铁。

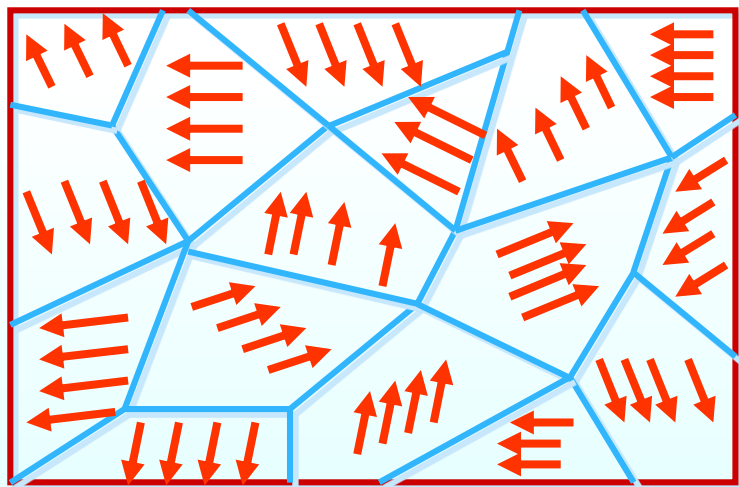
神秘的铁磁流体



三、铁磁性的起因

在铁磁质中存在着自发磁化的微小区域 \Rightarrow 磁畴

形成原因：相邻铁原子中的电子间存在着“强交换耦合作用”，此作用促使相邻原子中电子的自旋磁矩平行排列，形成“磁畴”。



磁畴体积： 10^{-8}m^3

小区域体积约： $10^{-6} \rightarrow 10^{-3}\text{cm}^3$

每个小区域包含原子数： $10^7 \rightarrow 10^{21}$

铁磁质的临界温度 “居里点”

铁的居里点： $T = 1040\text{K}$

镍的居里点： $T = 631\text{K}$

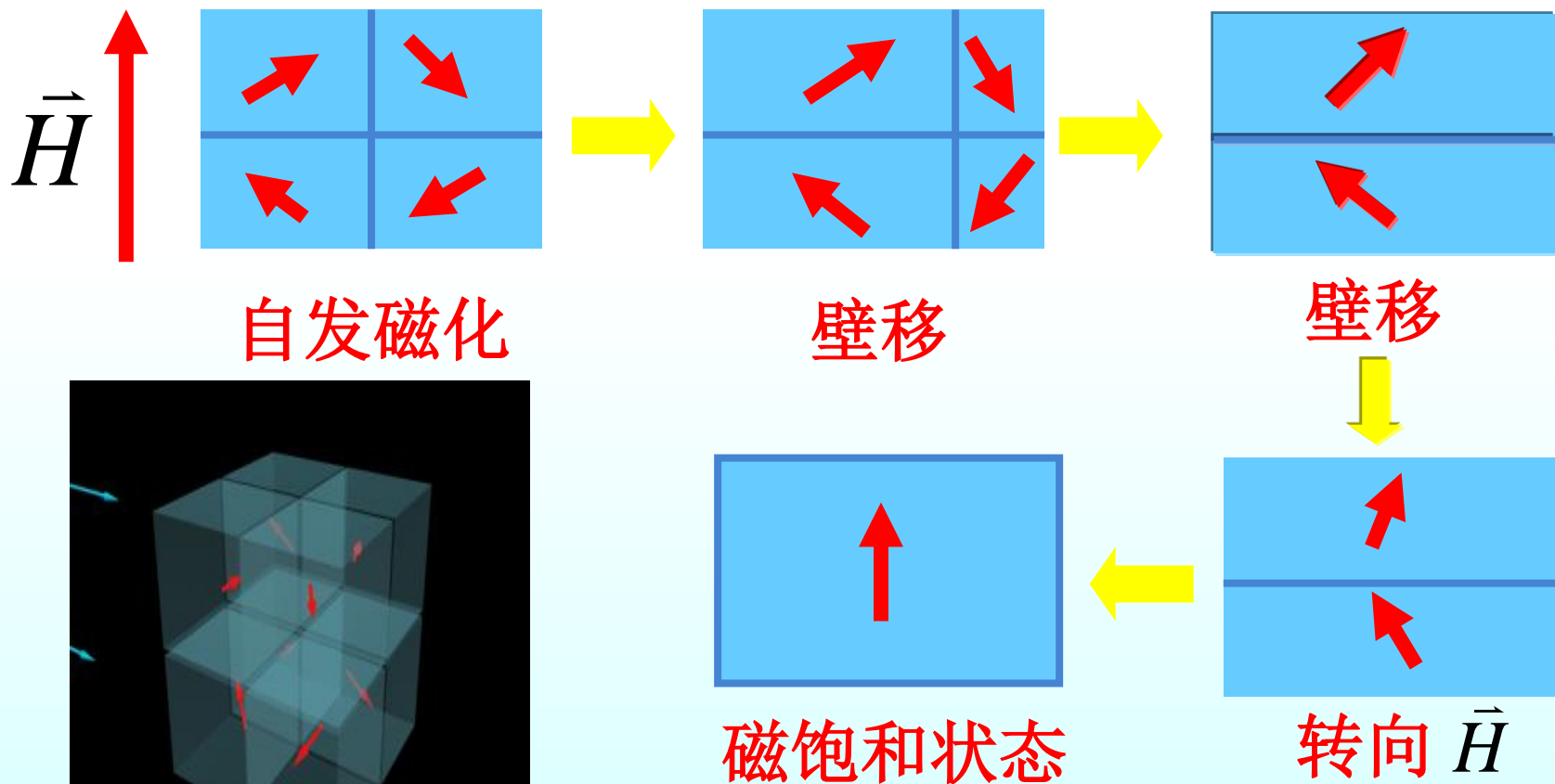
1、无外场时

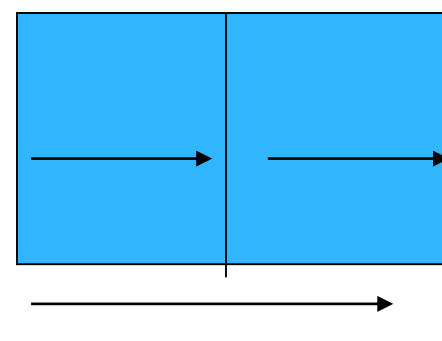
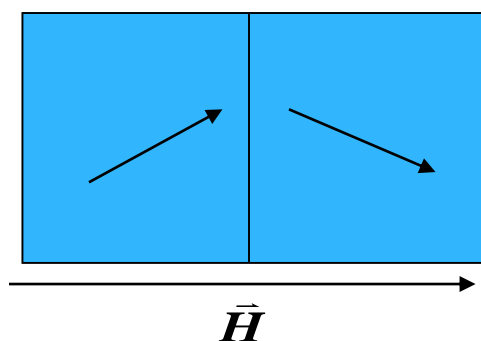
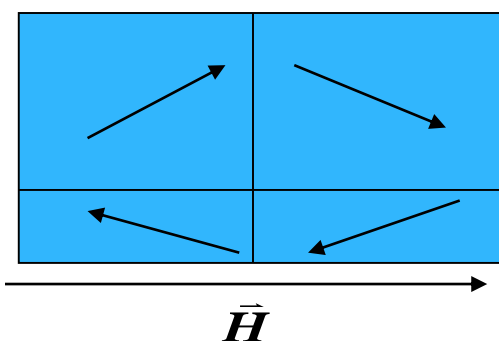
$$H = 0 \quad \sum \vec{p}_m = 0$$

宏观不显磁性

2、有外场时

与 \vec{H} 夹角较小的磁畴扩展自己的范围





(a) 外磁场较弱时，与 H 成小角度磁畴区域扩大，与 H 成大角度磁畴区域缩小

(b) 外磁场较强时，与 H 成大角度磁畴区域消失，每个磁畴磁矩方向 H 方向靠拢

(c) H 大到一定程度，磁畴磁矩方向都沿 H 方向，磁化达到饱和状态

解释

- **磁滞现象：**磁畴的磁壁很难完全恢复原来的形状。如果撤去外磁场，磁畴的某些规则排列将被保存下来，使铁磁质保留部分磁性，这就是剩磁。
- **居里点：**当温度升高到居里点时，剧烈的热运动使磁畴全部瓦解，这时铁磁质就成为一般的顺磁质了。

