

# 大学物理

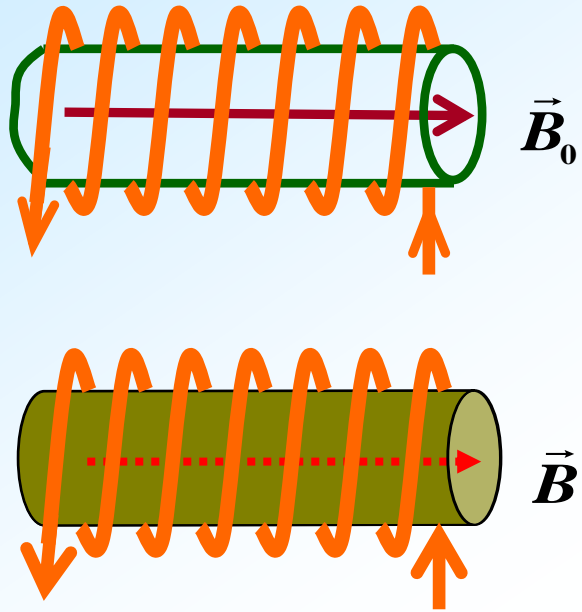
# *University Physics*

华中科技大学物理学院

王宁

ningwang@hust.edu.cn

# 回顾：磁介质

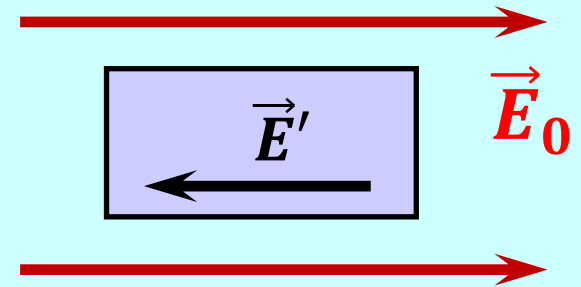


相对磁导率

$$\mu_r = \frac{|B|}{|B_0|}$$

与电介质的极化不同，磁介质的磁化可正可负，问题更加复杂。

## 电介质的极化



$$\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}'$$

$$\vec{E} < \vec{E}_0$$

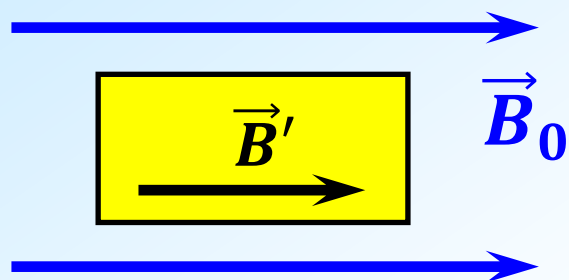
相对介电常数

$$\epsilon_r = \frac{E_0}{E}$$

# 回顾：磁介质的分类



## 顺磁质



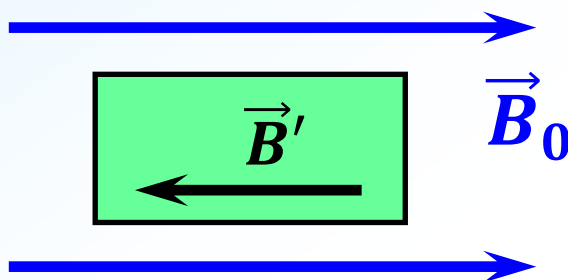
$$\vec{B} > \vec{B}_0$$

引入相对磁导率

$$\mu_r \geq 1$$

如：氧，铝，钨，  
铂，铬等

## 抗磁质



$$\vec{B} < \vec{B}_0$$

$$\mu_r = \frac{B}{B_0}$$

$$\mu_r < 1$$

如：氮，水，铜，  
银，金等

## 铁磁质

自发排列磁畴，  
将在后面单独  
讨论

注意和相对介电  
常数的区别：

$$\epsilon_r = \frac{E_0}{E}$$

$$\mu_r \gg 1$$

如：铁，钴，镍等

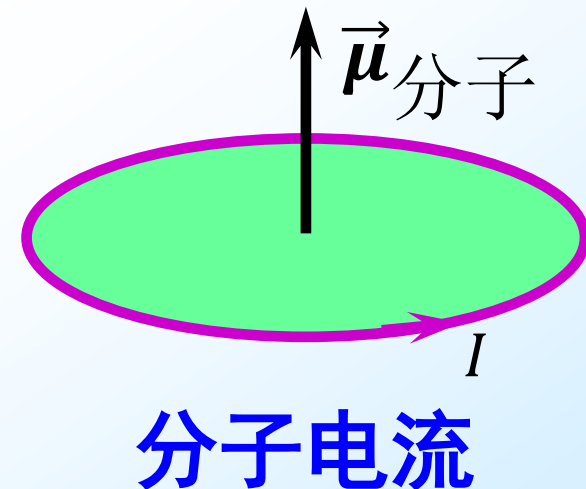
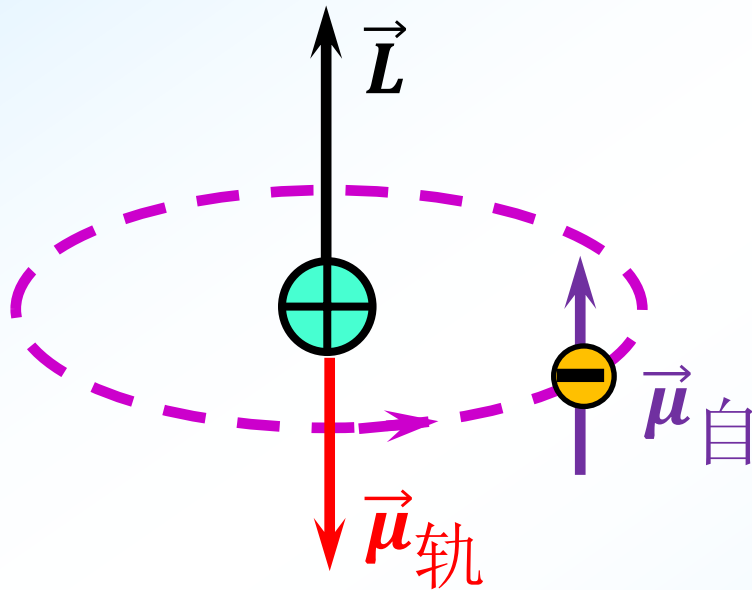
弱磁性材料

强磁性材料

# 回顾：磁性的来源

分子（固有）磁矩  $\vec{\mu}_{\text{分子}} = \sum \vec{\mu}_{\text{轨}} + \sum \vec{\mu}_{\text{自}}$

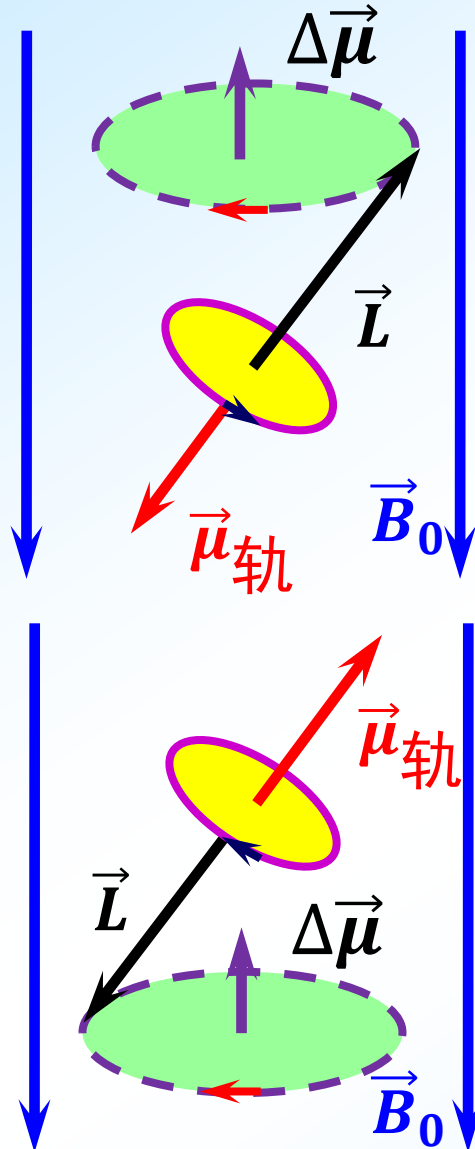
$\left\{ \begin{array}{ll} \vec{\mu}_{\text{分子}} \neq 0 & \rightarrow \text{顺磁质或铁磁质} \quad \mu_r \geq 1 \\ \vec{\mu}_{\text{分子}} = 0 & \rightarrow \text{抗磁质} \quad \mu_r < 1 \end{array} \right.$



轨道磁矩和轨道角动量方向相反，因为电子带**负电荷**。

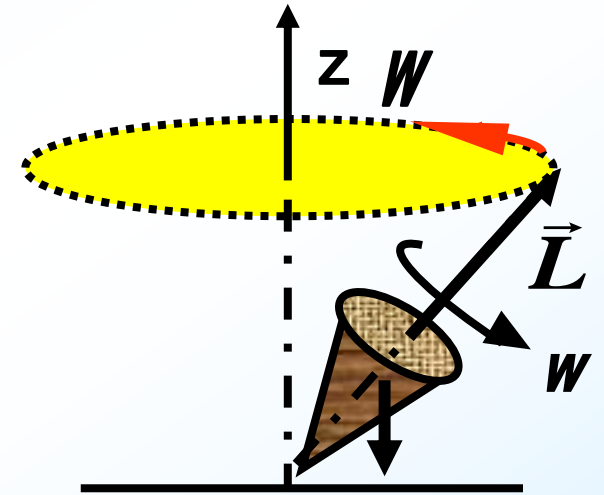
# 回顾：磁性的来源

## 分子的附加磁矩



$$\vec{M} = \vec{\mu}_{\text{轨}} \times \vec{B}$$

类比于陀螺进动



电子的进动

$$\Delta\vec{\mu} = \sum_i \Delta\vec{\mu}_i$$

——附加磁矩

# 回顾:磁性的来源

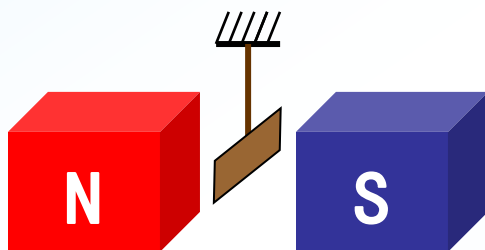
**分子（固有）磁矩：** 顺磁质产生磁效应的主要原因

**分子的附加磁矩：** 与外磁场反向，抗磁性的来源

◆ 抗磁效应在顺磁质中也存在但是不影响结果，其中  $\bar{\mu}_{\text{分子}} \gg \Delta\bar{\mu}_{\text{分子}}$ 。

◆ 若将一磁体放入外磁场中，如何判断该介质是顺磁质还是抗磁质？

俯视图：



顺磁质



抗磁质

# 回顾: 介质中的宏观磁场规律



1. 磁化强度矢量定义  $\vec{M} = \frac{\sum \vec{\mu}_i}{\Delta V}$   $\longrightarrow$  单位体积内分子磁矩的矢量和

2. 磁化强度矢量  $M$  与磁化面电流  $I'$  的关系

磁化面电流密度

$$\oint_L \vec{M} \cdot d\vec{l} = \sum I' \longrightarrow \vec{M} \times \vec{n} = \vec{i}' \text{ 或 } M_t = i'$$

面法向矢量

3. 有介质时的安培环路定理

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

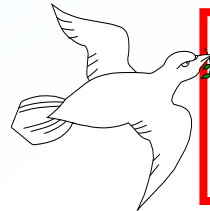
4.  $\vec{B}$ 、 $\vec{M}$ 、 $\vec{H}$  三矢量之间的关系

(见下页)

# $\vec{B}$ 、 $\vec{M}$ 、 $\vec{H}$ 三矢量之间的关系

- 各向同性的线性磁介质,  $M$ 和 $H$ 的关系为

$$\vec{M} = \chi_m \vec{H} \quad \chi_m \text{ —— 介质磁化率}$$



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

那么:  $\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) = \mu_0(1 + \chi_m)\vec{H} = \underline{\mu_0\mu_r}\vec{H}$

其中:  $\mu_r = 1 + \chi_m$  —— 相对磁导率 介质磁导率

- $M$ 和 $B$ 的关系为

$$\vec{M} = \frac{\chi_m}{\mu_0\mu_r} \vec{B}$$

$\chi_m$  与  $\mu_r$  均为纯数, 描述磁介质特性的物理量

- 各向同性的线性磁介质

$\chi_m > 0 \quad \mu_r > 1 \quad \longrightarrow$  顺磁介质

$\chi_m < 0 \quad \mu_r < 1 \quad \longrightarrow$  抗磁介质

$\chi_m = 0 \quad \mu_r = 1 \quad \longrightarrow$  真空

$$\chi_m = -1$$

$$\mu_r = 0$$

超导体





# 解题一般步骤:

由  $I_{\text{传}}$   $\xrightarrow{\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum_i I_i}$   $\vec{H}$   $\xrightarrow{\vec{B} = \mu \vec{H}}$   $\vec{B}$

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

$\vec{H} \xrightarrow{\vec{i}' = \vec{M} \times \vec{e}_n}$   $\vec{i}'$

**注：** 对称场有磁介质时,只需将 “ $B$ ” 中的  $\mu_0 \rightarrow \mu$  即可。

**例：** 无限长载流直导线的磁场

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

无限长直导线周围充满介质时

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

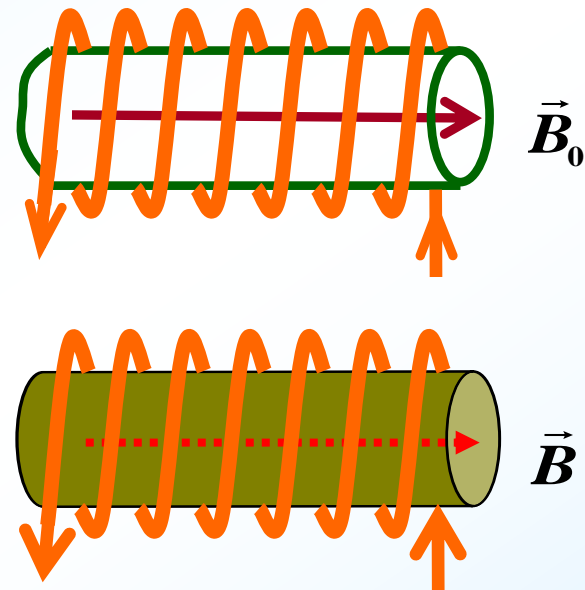
毕—萨定律有：

$$\begin{cases} \vec{B}_0 = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{Id\vec{l} \times \vec{e}_r}{r^2} & \text{真空} \\ \vec{B} = \frac{\mu}{4\pi} \int \frac{Id\vec{l} \times \vec{e}_r}{r^2} & \text{介质空间} \end{cases}$$

# 磁介质的分类

相对磁导率

$$\mu_r = \frac{|\mathbf{B}|}{|\mathbf{B}_0|}$$



磁介质的分类:

- 弱磁性

$\mu_r \geq 1$  → 顺磁质

如：氧、铝、钨、铂、铬等。

$\mu_r < 1$  → 抗磁质

如：氮、水、铜、银、金、铋等。

(超导体是理想的抗磁体:完全抗磁性)

- 强磁性

$\mu_r \gg 1$  → 铁磁质

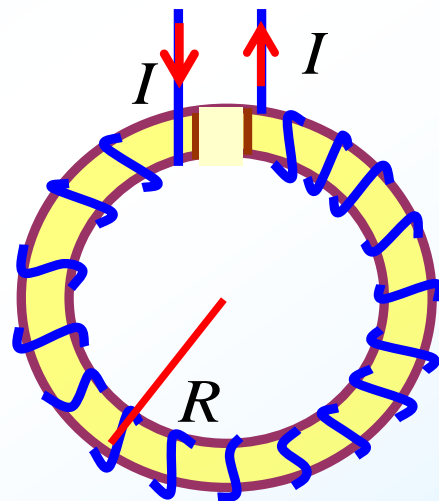
如：铁、钴、镍等

## 1. 磁化曲线

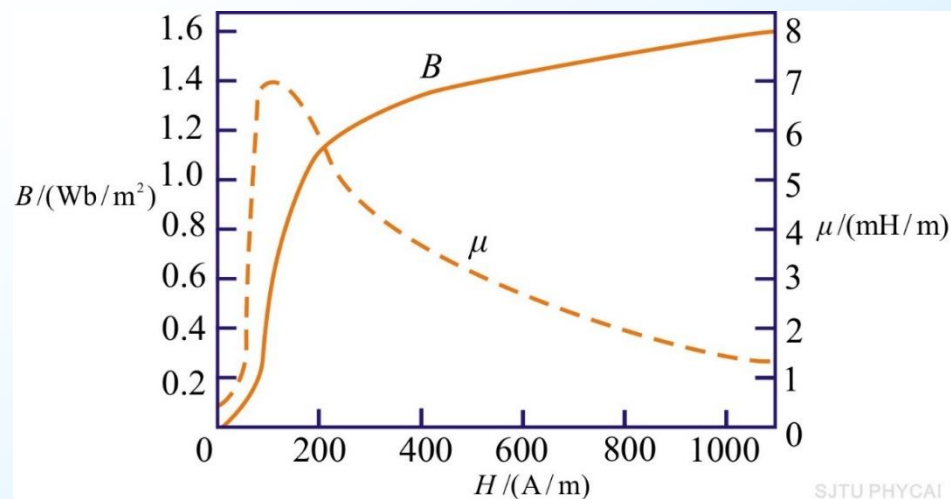
**原理：**励磁电流为  $I$ , 根据安培定理得:  $H = \frac{NI}{2\pi R}$

**实验测量  $\vec{B}$ ：** 如用感应电动势测量  
或用小线圈在缝口处测量

$$\text{由 } \mu_r = \frac{B}{B_0} = \frac{B}{\mu_0 H}$$



铁磁质的  $\mu_r$  不是个常数,  
它是  $H$  的函数.



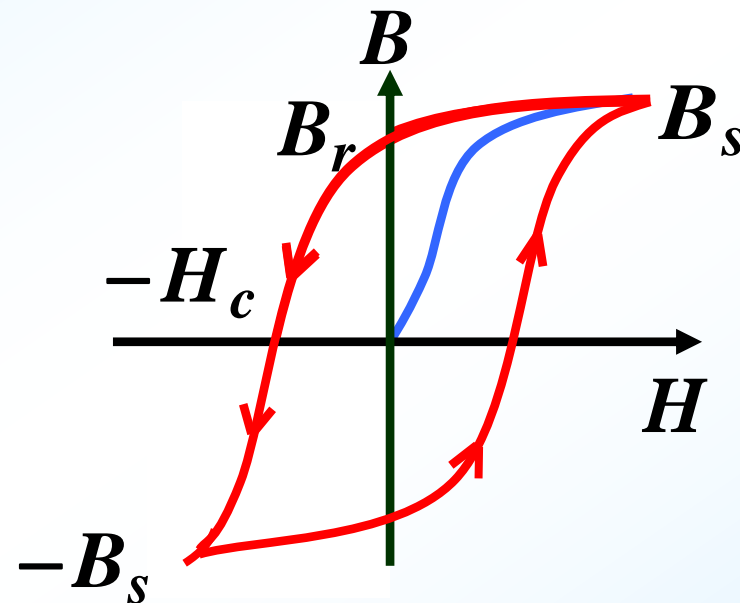
## 2. 磁滞回线 —— 不可逆过程

### 1) 起始磁化曲线

饱和磁感应强度  $B_s$

### 2) 剩磁 $B_r$

### 3) 矫顽力 $H_c$



$B$ 的变化落后于 $H$ ，从而具有剩磁——磁滞效应

每个 $H$  对应不同的 $B$ 与磁化的历史有关。

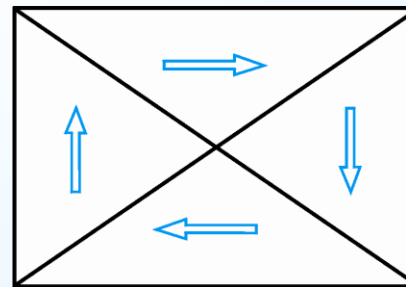
## 3. 在交变电流的励磁下反复磁化使其温度升高

—— 磁滞损耗

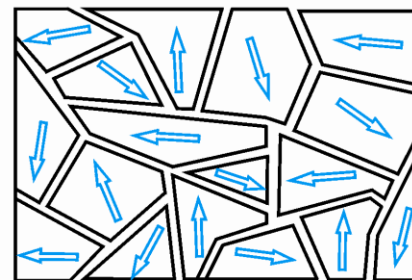
磁滞损耗与磁滞回线所包围的面积成正比。

- 自发磁化区

- 实验证明，铁磁质的磁性主要来源于**电子自旋磁矩**。在没有外磁场的条件下铁磁质中电子自旋磁矩可以在小范围内“自发地”排列起来，形成一个个小的“自发磁化区”—— **磁畴**
- 自发磁化的原因是由于**相邻原子中电子之间存在着一种交换作用**（一种量子效应），使电子的**原子磁矩平行排列起来**而达到自发磁化的饱和状态
- 单晶和多晶磁畴结构的示意



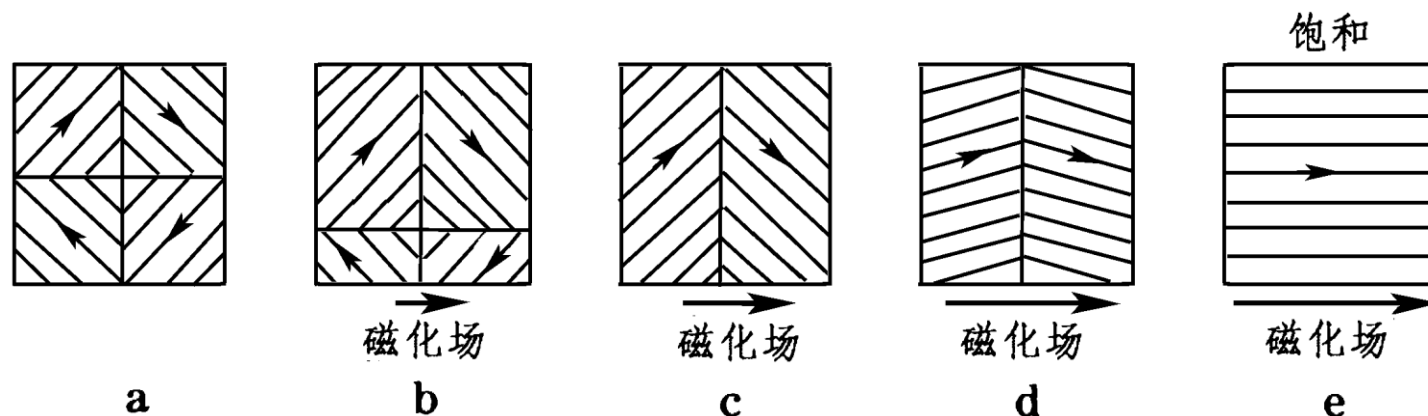
(a) 单晶磁畴结构示意图



(b) 多晶磁畴结构示意图

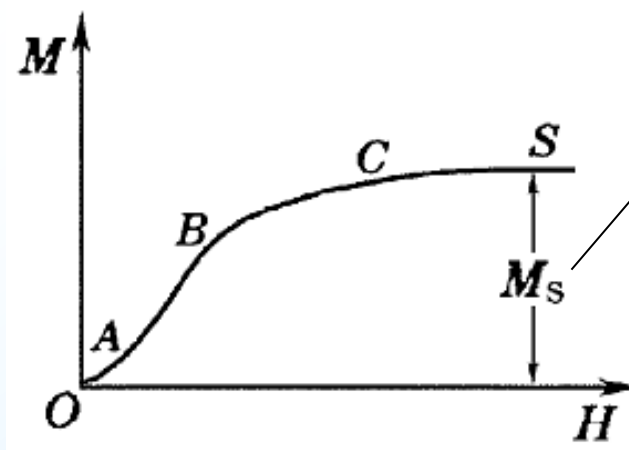


# 铁磁质的磁化机制



等于每个  
磁畴中原  
有的磁化  
强度

- a: 未磁化时状态
- b: 畴壁的可逆位移阶段—— OA段
- c: 不可逆的磁化—— AB段
- d: 磁畴磁矩的转动—— BC段
- e: 趋于饱和的阶段—— CS段



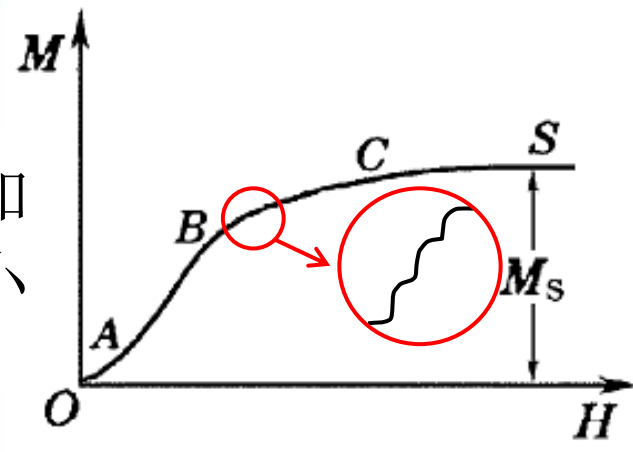
- 在外磁场撤消后，铁磁质内掺杂和内应力或因为介质存在缺陷阻碍磁畴恢复到原来的状态

# 演示实验：巴克豪森效应



巴克豪森效应 (**Barkhausen effect**) :

当铁磁物质被磁化时，由于其中磁畴大小和取向变化的不连续性，以致磁化过程以一小列跳跃的形式进行。



磁畴畴壁的移动和磁畴磁矩的转动引起巴克豪森效应



1. 当全部磁畴都沿外磁场方向时，铁磁质的磁化就达到饱和状态。饱和磁化强度 $M_S$ 等于每个磁畴中原来的磁化强度，该值很大。

——这就是铁磁质磁性  $\mu_r$  大的原因。

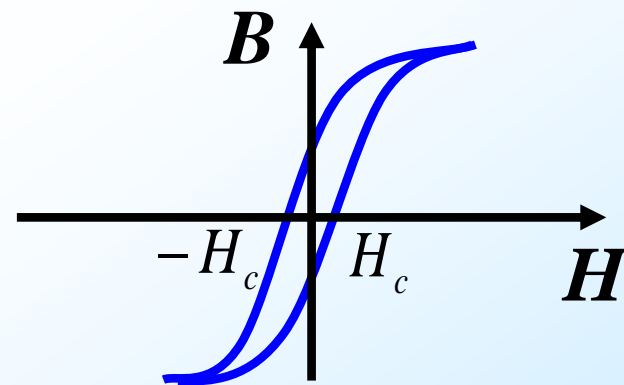
2. 磁滞现象是由于材料有杂质和内应力等的作用，当撤掉外磁场时磁畴的畴壁很难恢复到原来的形状，而表现出来。
3. 当温度升高时，热运动会瓦解磁畴内磁矩的规则排列。在临界温度（相变温度 $T_c$ ）时，铁磁质完全变成了顺磁质。居里点  $T_c$  (*Curie Point*)

如：铁为 1040 K，钴为 1390 K， 镍为 630 K

1. 软磁材料：如 { 纯铁，坡莫合金( $Fe$ ,  $Ni$ ),  
硅钢，铁氧体等。

特点：

- $\mu_r$ 大，(起始磁化率大)饱和磁感应强度大
- 矫顽力( $H_c$ )小，磁滞回线的面积窄而长，损耗小(回线面积小)。
- 易磁化、易退磁



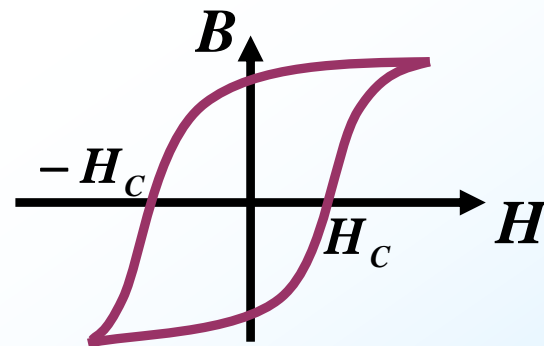
适用于变压器、继电器、电机、以及各种高频电磁元件的磁芯、磁棒。

## 2. 硬磁材料： 如：钨钢，碳钢，铝镍钴合金

- 矫顽力( $H_c$ )大，剩磁 $B_r$ 大，磁滞回线的面积大，损耗大。

适用于做永磁铁。

耳机中的永久磁铁，永磁扬声器。

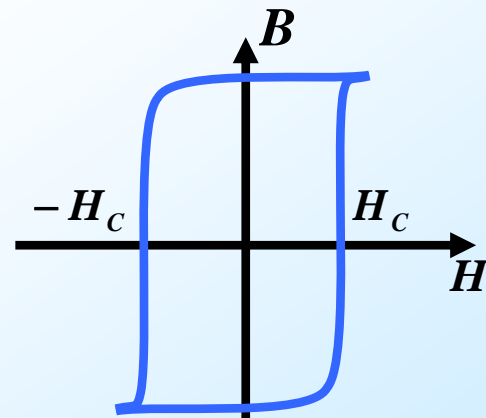


## 3. 矩磁材料

锰镁铁氧体，锂锰铁氧体

$B_r=B_S$ ， $H_c$ 不大，磁滞回线是矩形。

可用于记忆元件。



当+脉冲产生 $H > H_c$ 使磁芯呈+ $B$ 态  
当-脉冲产生 $H < -H_c$ 使磁芯呈- $B$ 态 } 可作为二进制的两个态

# 静磁场和稳恒磁场的基本性质



## 静电场

1. 高斯定理:

$$\oiint_S \vec{D} \cdot d\vec{s} = \sum q_i$$

有源场

2. 环路定理:

$$\oint_L \vec{E} \cdot d\vec{l} = 0$$

无旋场

## 稳恒磁场

1. 高斯定理:

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

无源场

2. 环路定理:

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

有旋场

# 本节知识点小结



- 顺磁性和抗磁性
- 磁化强度与磁化电流
- 介质中的磁场
- 磁场强度
- 有介质时的安培环路定理
- 铁磁性

Tips:

以上均属于考试内容，请及时按照知识点梳理相关内容

规定作业： Chap.7(page 43) —T15、 T16

Chap.8(page 44) —T1 、 T2

## 作业要求

1. 独立完成作业。
2. 图和公式要有必要的标注或文字说明。
3. 作业纸上每次都要写学号。
4. 每周周二交作业。
5. 作业缺交三分之一及以上者按规定不能参加考试。

