

# 大学物理

# *College Physics*

主讲

华中科技大学

刘超飞

● 带电粒子的受力

$$\vec{F} = \vec{F}_e + \vec{F}_m = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B} \text{ —— 也称为洛伦兹力。}$$

● 安培定律： $d\vec{F} = I d\vec{l} \times \vec{B}$

$$\vec{F} = \int_0^l I d\vec{l} \times \vec{B}$$

● 两平行无限长直载流导线的相互作用力：

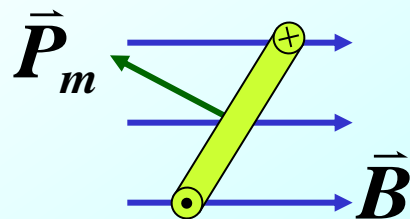
单位长度的受力： $f_{12} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi a}$ ； $f_{21} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi a}$ 。

结论：两力大小相等，方向相反

电流同向→吸引力  
电流反向→排斥力

● 载流线圈在磁场中所受的力和力矩

$$\vec{M} = \vec{P}_m \times \vec{B}$$



磁力矩总是使线圈或磁偶极子转向磁场方向。

# 七、磁介质

演示：巴克豪森效应

## (一) 磁介质的磁效应

实验发现：

在螺旋管内填充磁介质前后的磁感应强度的比值，可表征该种介质在磁场中的性质。

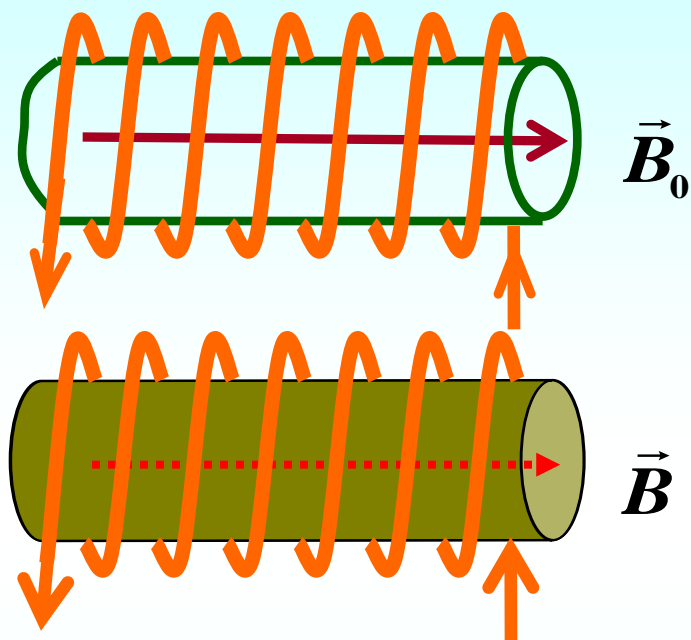
相对磁导率： $\mu_r = \frac{B}{B_0}$

常见的磁介质：


$\mu_r \geq 1$  → 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)

$\mu_r \gg 1$  → 铁磁质      如：铁、钴、镍等



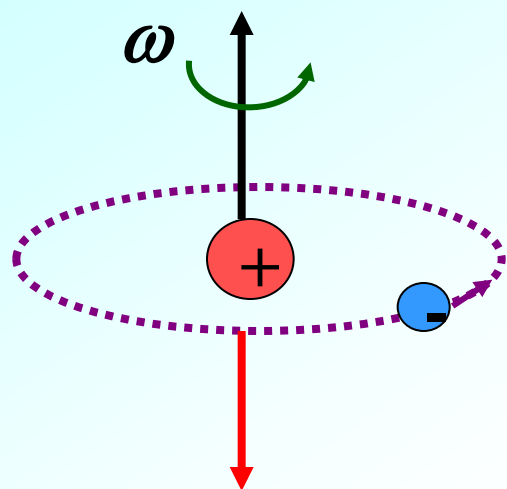
# 1. 分子磁矩


$$\vec{P}_m = IS\vec{n}$$

实物的基本组成单元：分子、原子、电子

电子运动：

绕核运动  $\rightarrow$  电流环  $\rightarrow$  轨道磁矩  $\vec{\mu}_{\text{轨}}$   
自旋运动  $\rightarrow$  自旋磁矩  $\vec{\mu}_{\text{自}}$

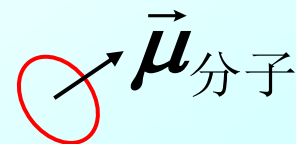


$$\begin{aligned}\vec{\mu}_{\text{轨}} &= IS\vec{n} \\ &= -\frac{er^2}{2}\vec{\omega}\end{aligned}$$

两种运动磁效应的总和 等效 分子圆电流

$$\vec{\mu}_{\text{分子}} = \sum \vec{\mu}_{\text{轨}} + \sum \vec{\mu}_{\text{自}}$$

分子的固有磁矩

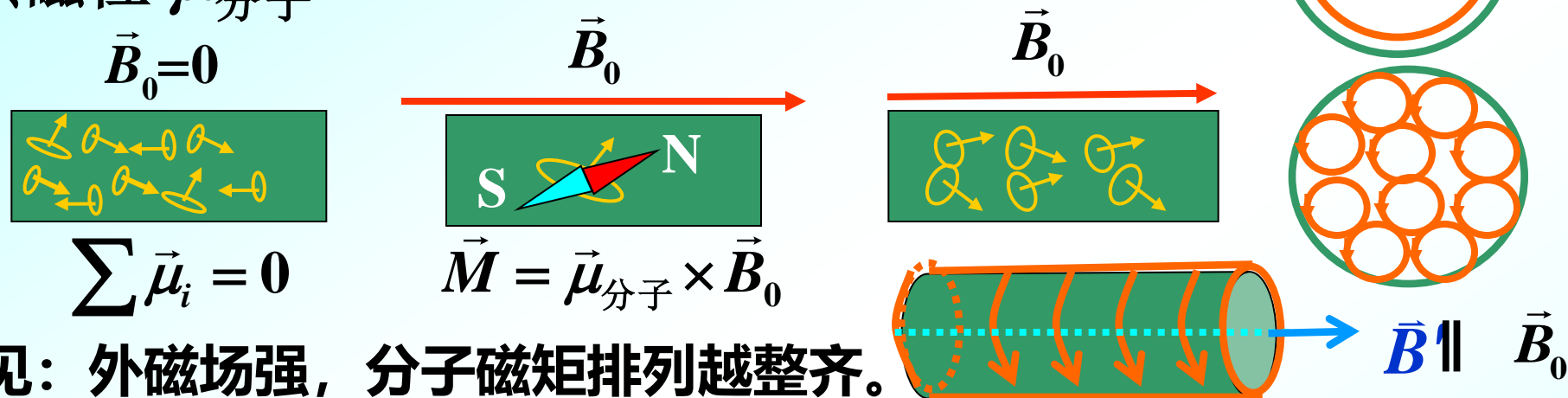


两类磁介质

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

## 2. 磁化的微观解释

### 1) 顺磁性 $\vec{\mu}_{\text{分子}} \neq 0$



磁化面电流越大，介质的磁化程度越高。

### 2) 抗磁性 $\vec{\mu}_{\text{分子}} = 0$

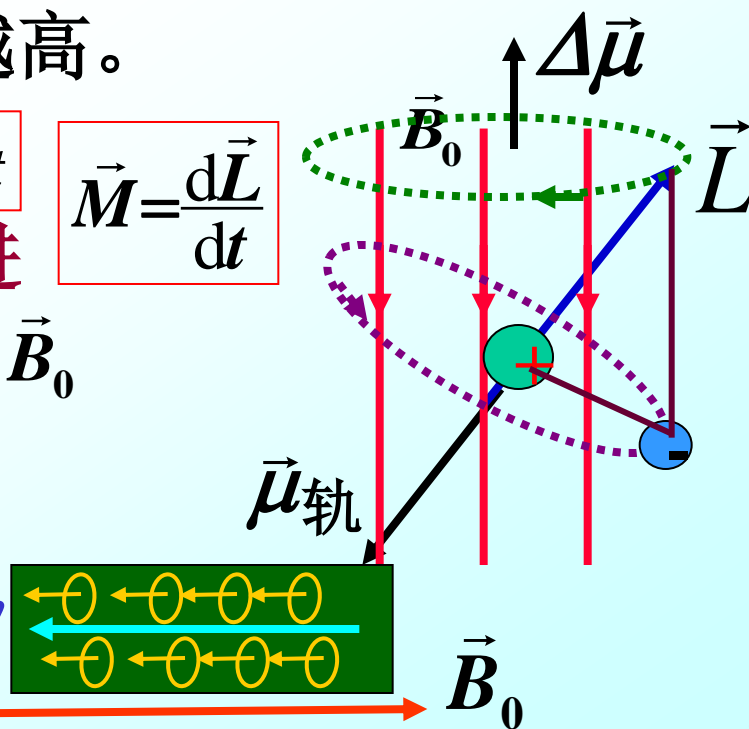
——分子中电子轨道角动量的旋进

电子因轨道磁矩受磁力矩： $\vec{M} = \vec{\mu}_{\text{轨}} \times \vec{B}_0$

轨道角动量  $\vec{L}$  绕磁场旋进，

电子附加一个磁矩： $\sum \Delta \vec{\mu} = \Delta \vec{\mu}_{\text{分子}}$

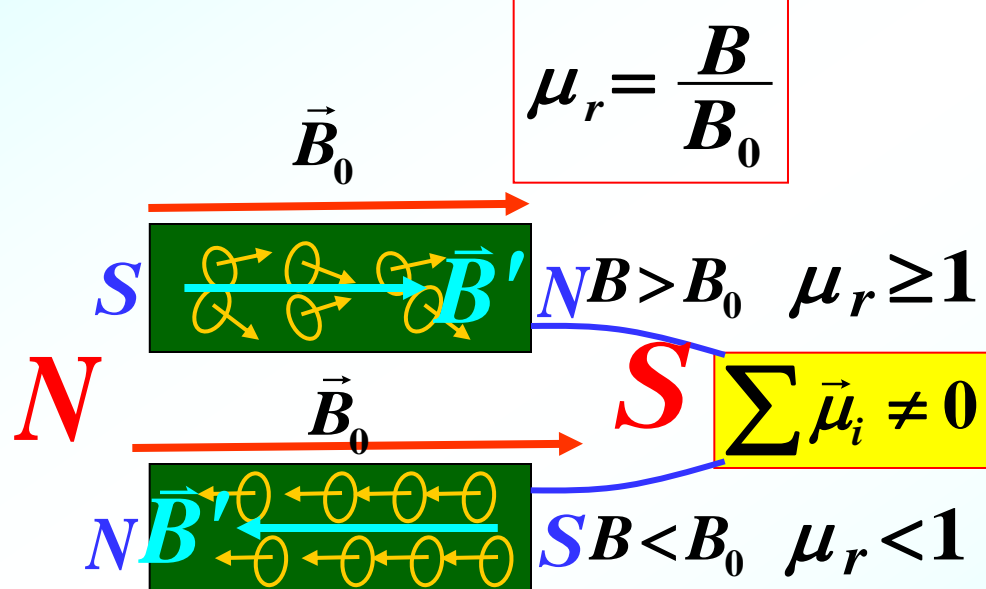
$\Delta \vec{\mu}_{\text{分子}} \rightarrow I' \rightarrow \vec{B}' // -\vec{B}_0$



讨论:

1) 顺磁性介质处在外磁场时,  
其体内磁场:  $\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}'$

抗磁性介质处在外磁场时,  
其体内磁场:  $\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}'$



2) 介质中的抗磁效应在顺磁介质中是否有?

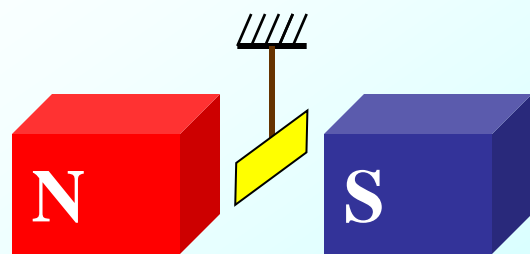
**有** 但:  $\bar{\mu}_{\text{分子}} \gg \Delta\bar{\mu}_{\text{分子}}$

3) 若将一磁介质放入磁场中, 如何  
判断该介质是顺磁还是抗磁介质?

4) 超导体是完全抗磁体

在外磁场中超导体内:  $\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}' = 0$

视频演示



真的是金条?

金、银是  
抗磁质

**注:** 表面分子磁化电流不是自由电荷定向运动形成。

## (二) 磁化强度矢量 $\vec{M}$

### 1. 磁化强度矢量定义

$$\vec{M} = \frac{\sum \vec{\mu}_i}{\Delta V}$$

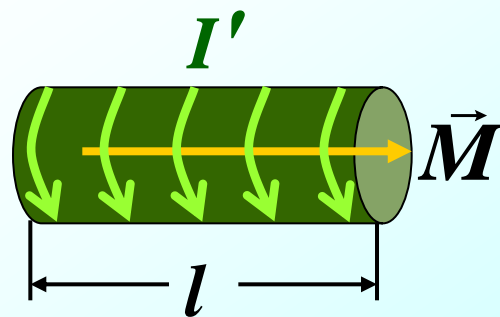
——→ 单位体积内分子磁矩的矢量和

### 2. 磁化强度矢量 $M$ 与磁化面电流 $I'$ 的关系

设长为  $l$ 、横截面为  $S$  的柱形介质在外磁场中沿轴向被均匀磁化，表面束缚面电流为  $I'$

磁化强度的环流：

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



### (三) 有介质时的高斯定理和安培环路定理

#### 1. 有介质时的高斯定理

介质中的磁感应强度： $\vec{B} = \vec{B}_{\text{外}} + \vec{B}'$

无论是什么电流激发的磁场，其磁力线均是无头无尾的闭合曲线。

∴ 通过磁场中任意闭合曲面的磁通量为零。

即：
$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$$

#### 2. 有介质时的安培环路定理

在有介质的空间，传导电流与磁化电流共同产生磁场

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \sum I + \mu_0 \sum I'$$

有磁介质的  
总场

传导电流

磁化电流



无介质时的安培环路定理：

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

磁感应强度沿任意  
闭合曲线L的线积分

$\propto$

穿过这闭合曲线的所有  
传导电流强度的代数和

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

考虑到：  $\mu_r = \frac{B}{B_0}$

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

则有：



$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \sum I + \mu_0 \sum I'$$

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum I_i \rightarrow \text{有介质时的} \\ \text{安培环路定理}$$

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

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

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M} \text{ —— 磁场强度}$$

沿任一闭合路径磁场强度的环流等于该闭合路径所包围的传导电流的代数和。

SI制中磁场强度 $H$  的单位： 安培/米(A/m)

$$1 \text{ 奥斯特} = 10^3 / 4\pi (\text{A/m})$$

## 磁介质中的安培环路定理

$$\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \sum_L I_i + \mu_0 \sum_L I'_i$$

$$\oint_L \left( \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M} \right) \cdot d\vec{l} = \sum_L I_i$$

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

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

## 电介质中的高斯定理

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{1}{\epsilon_0} \sum_S (q_i + q'_i)$$

$$\oint_S (\epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}) \cdot d\vec{S} = \sum_S q_i$$

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$$

$$\oint_S \vec{D} \cdot d\vec{S} = \sum_S q_i$$

★  $\vec{B}, \vec{H}, \vec{M}$  之间的关系:

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

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

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad \text{磁导率}$$

$$\mu_r \quad \text{相对磁导率}$$

★  $\vec{P}, \vec{D}, \vec{E}$  之间的关系:

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$$

$$\vec{D} = \epsilon_r \epsilon_0 \vec{E} = \epsilon \vec{E}$$

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r \quad \text{介电常数}$$

$$\epsilon_r \quad \text{相对介电常数}$$

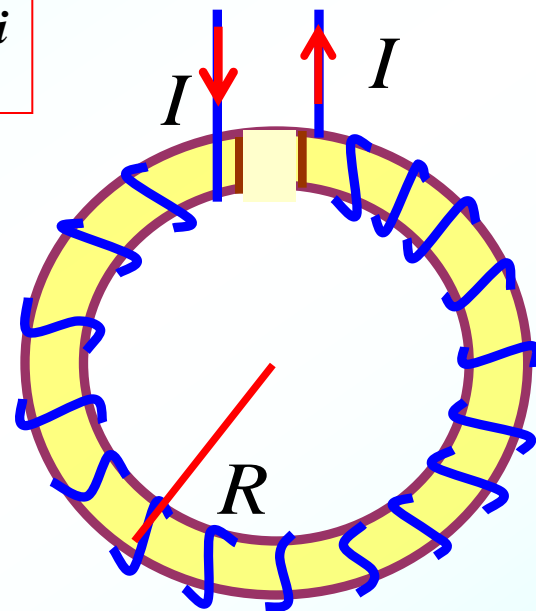
## (四) 铁磁质的磁效应

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

### 1. 磁化曲线

**装置：** 环形螺绕环，用铁磁质  
( $Fe, Co, Ni$ ) 填满环内空间

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

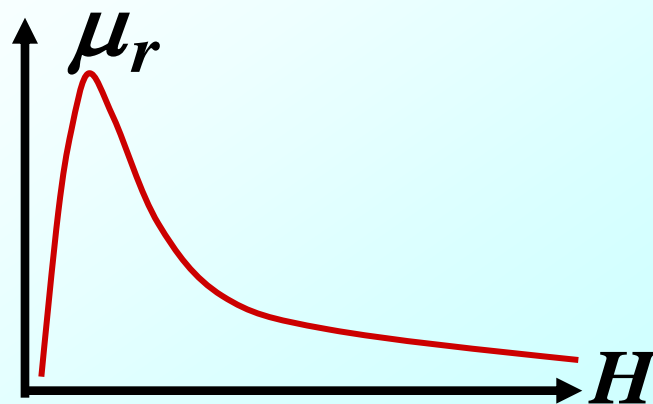


**实验测量  $\vec{B}$ ：** 如用感应电动势测量  
或用小线圈在缝口处测量

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

得出  $\mu_r \sim H$  曲线：

铁磁质的  $\mu_r$  不是个常数，  
它是  $\vec{H}$  的函数。



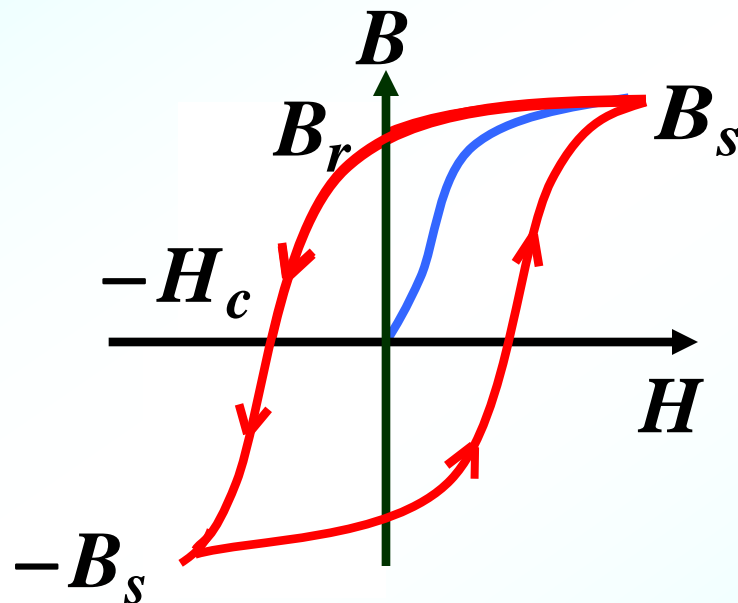
## 2. 磁滞回线——不可逆过程

### 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。

为什么会出现这些现象？

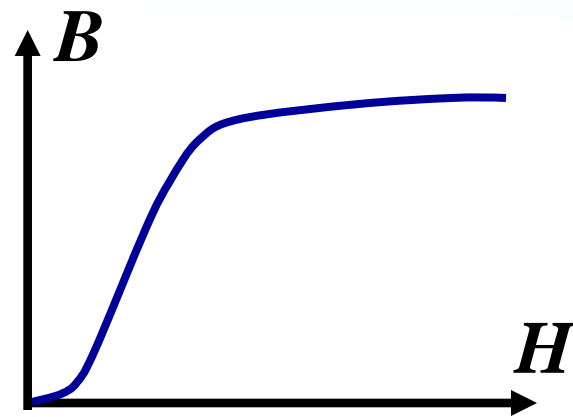
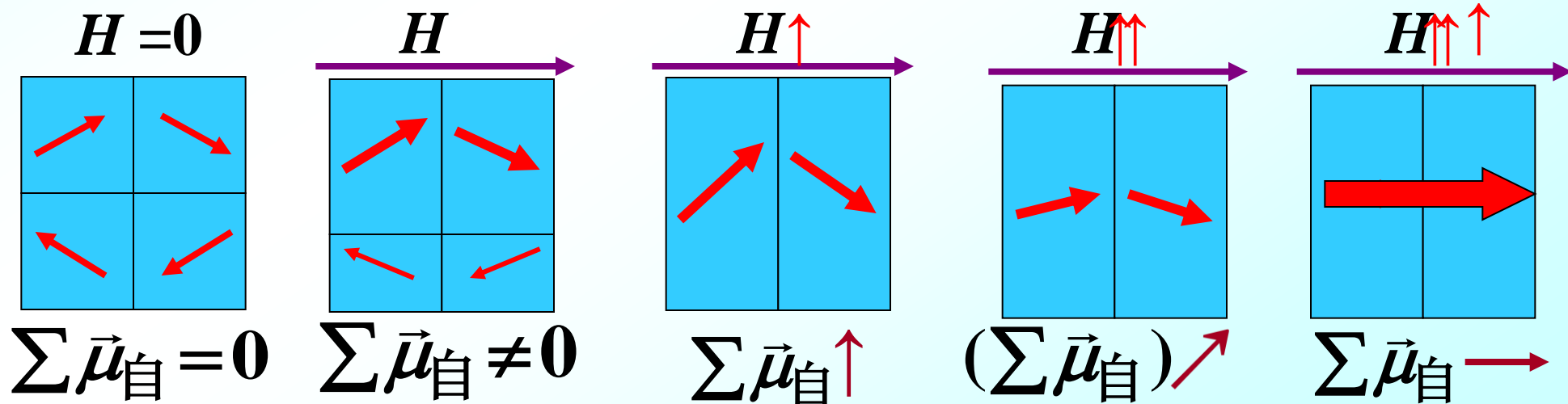
## 2. 铁磁质磁化的机制

铁磁性主要来源于电子的自旋磁矩。

★ 交换力：电子之间的交换作用使其在自旋平行排列时能量较低，这是一种量子效应。

★ 磁畴：原子间电子交换耦合作用很强，使其自旋磁矩平行排列形成磁畴——自发的磁化区域。

★ 磁畴的变化可用金相显微镜观测



# 说明:

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造成的。
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，铁磁质完全变成顺磁质。**居里点  $T_c$  (Curie Point)**

视频演示

如：铁为 1040K，钴为 1390K，镍为 630K



### 3. 铁磁质的分类

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

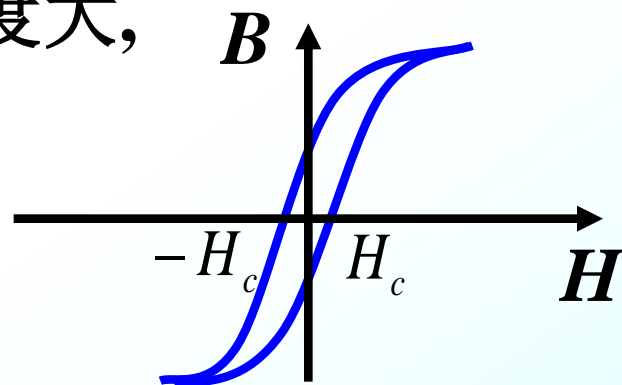
特点：

$\mu_r$ 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。



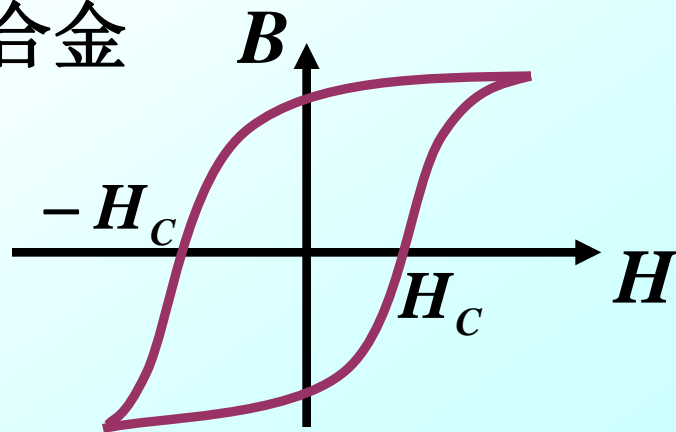
2. 硬磁材料：如：钨钢，碳钢，铝镍钴合金

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。

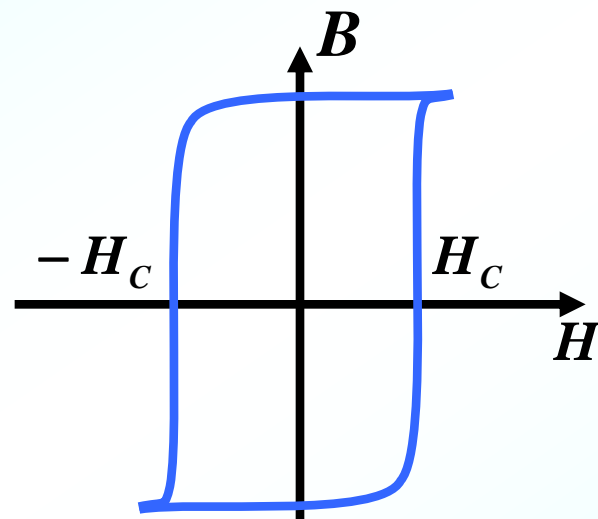
耳机中的永久磁铁，永磁扬声器。



### 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。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,  
可作为二进制的两个态。

适用于制作计算机磁带和磁盘的记录介质。

# 作业： 7 —T11-T14

## 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姓名以及学号(或学号末两位)。
4. 课代表收作业后按学号排序，并装入透明文件袋。
5. 每周二交上周的作业。迟交不改。
6. 作业缺交三分之一及以上者综合成绩按零分计。