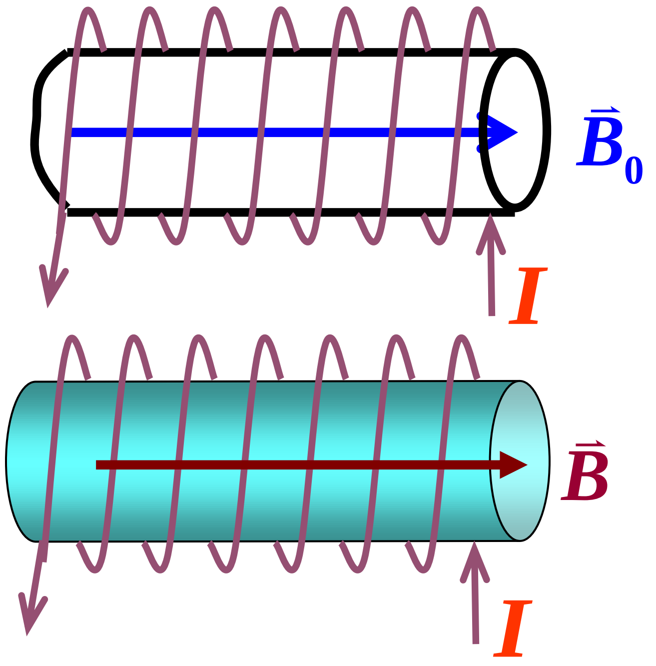
第7节 磁介质

考虑物质受磁场的影响或它对磁场的影响时，物质统称为**磁介质**。



实验表明： 磁介质影响磁场。

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

相对磁导率： $\mu_r = \dfrac{B}{B_0}$

$$\left.\begin{array}{l} \mu_r > 1 \rightarrow \text{顺磁质} \quad B > B_0 \text{（氧、铝、铂等）} \\ \mu_r < 1 \rightarrow \text{抗磁质} \quad B < B_0 \text{（水、铜、金等）} \end{array}\right\} \text{弱磁性物质}$$

$$\mu_r >> 1 \rightarrow \text{铁磁质} \quad B >> B_0 \text{（铁、钴、镍等）} \quad \text{强磁性物质}$$

一、弱磁物质磁化机制----分子磁矩

实物的基本组成单元：分子、原子

原子
- 原子核：　自旋
- 核外电子：　轨道＋自旋

两种运动磁效应的总和 $\xrightarrow{\text{等效}}$ 分子圆电流

圆电流所产生的磁场或它受磁场的作用通过其磁矩来说明。

$$\boxed{\vec{p}_m = IS\vec{e}_n}$$

分子磁矩：所有自旋磁矩和电子的轨道磁矩的矢量和。

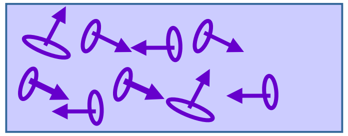
$$\vec{p}_m = \underbrace{\vec{p}_{meo} + \vec{p}_{mes} + \vec{p}_{mks}}$$

分子的固有磁矩

二、外磁场对磁介质的影响

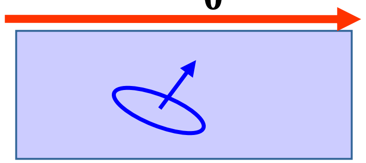
① 顺磁性：　固有磁矩 $\vec{p}_m \neq 0$

$\vec{B}_0 = 0$

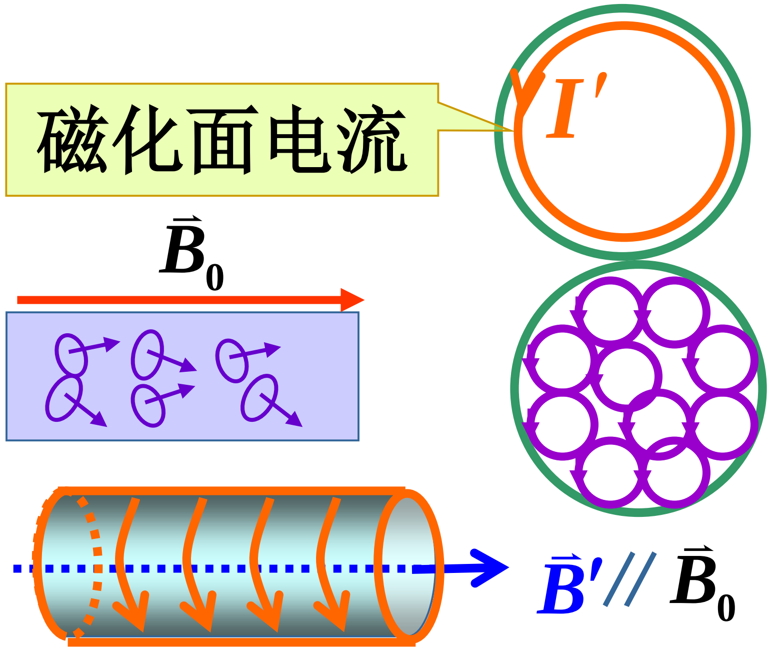


$\sum \vec{p}_i = 0$

$\vec{B}_0$



$\vec{M} = \vec{p}_m \times \vec{B}_0$

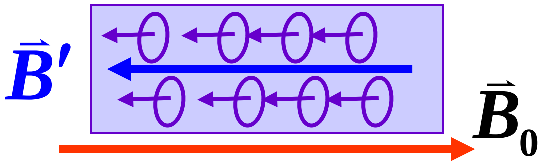


B_0↑强， $\vec{p}_m$排列越整齐 ，磁化面电流越大。

产生与外磁场同向的附加磁场，使磁场增强。

②抗磁性：$\vec{p}_m = 0$

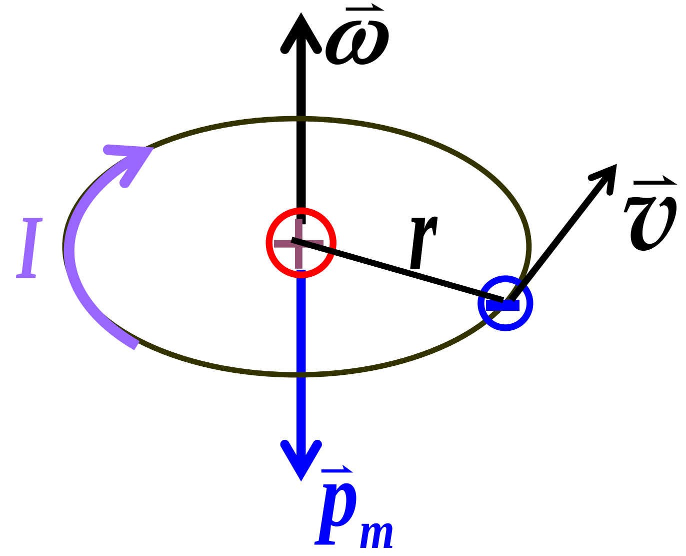
在外场中生成与磁场反向的附加磁矩（感应磁矩）$\Delta\vec{p}_m$



B_0↑强，$\Delta\vec{p}_m$↑。$\Delta\vec{p}_m \longrightarrow \vec{I}' \longrightarrow \vec{B}' \uparrow\downarrow \vec{B}_0$　附加磁场使总磁场减弱。

三、抗磁性的微观机制

以电子轨道运动为例：



假设电子绕原子核作匀速率圆周运动。

等效圆电流为： $I = \dfrac{e}{T} = \dfrac{e\omega}{2\pi}$

电子轨道运动的磁矩为：

$$\vec{p}_m = IS\vec{e}_{\mathrm{n}} = \frac{e\omega}{2\pi} \cdot \pi r^2 \vec{e}_{\mathrm{n}} = -\frac{er^2}{2}\vec{\omega} = -\frac{e}{2m_e}\vec{L}$$

与角速度大小成正比，方向相反。

当角速度变化时，轨道磁矩也将随之等比例改变：

$$\Delta\vec{p}_m = -\frac{er^2}{2}\Delta\vec{\omega}$$

磁场与电子磁矩在一条直线上时

无磁场： $F_q = mr\omega^2$

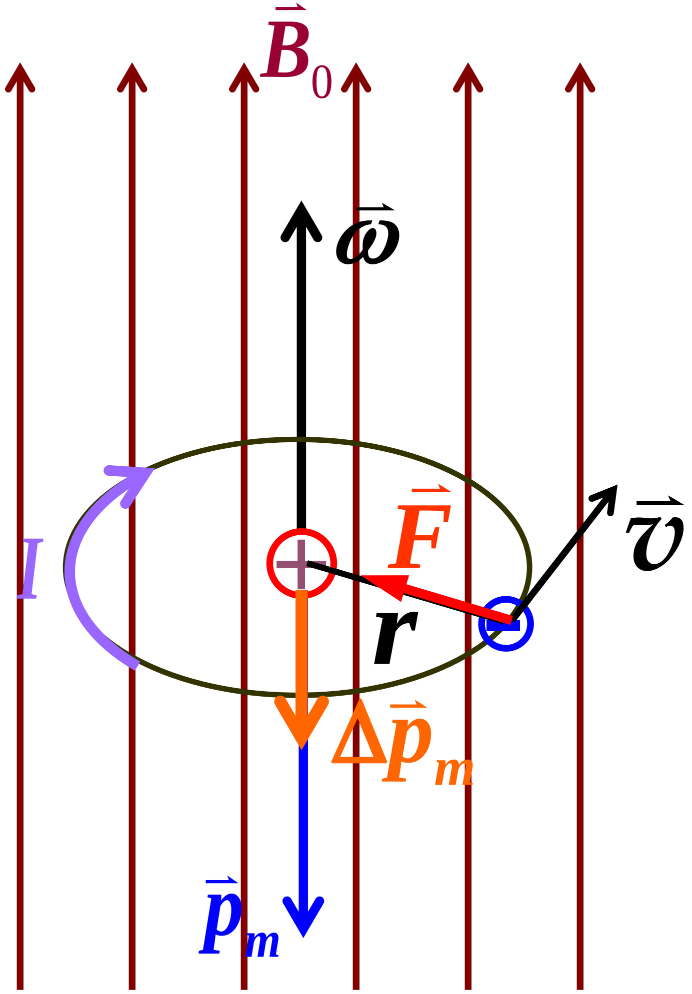
磁场中： $F_q + F = mr\omega'^2$

$$\Delta\omega = \omega' - \omega > 0$$

$$\Delta\vec{p}_m = -\frac{er^2}{2}\Delta\vec{\omega}$$

产生了向下的附加磁矩，

与外磁场方向相反！



如果轨道运动方向反向呢？

$F_q - F = mr\omega'^2$

角速度与磁矩均变小！

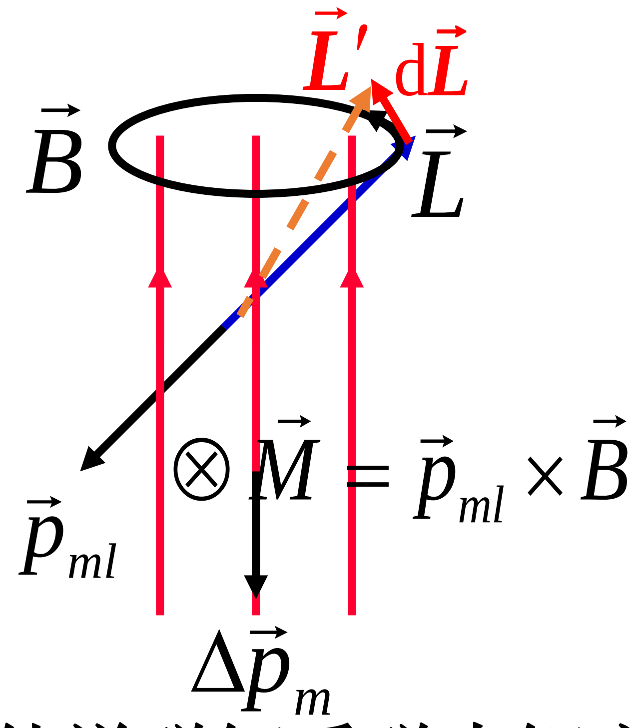
$\vec{\omega}$，$\vec{B}_0$同向

此时，磁矩方向向上，即与外磁场方向相同，

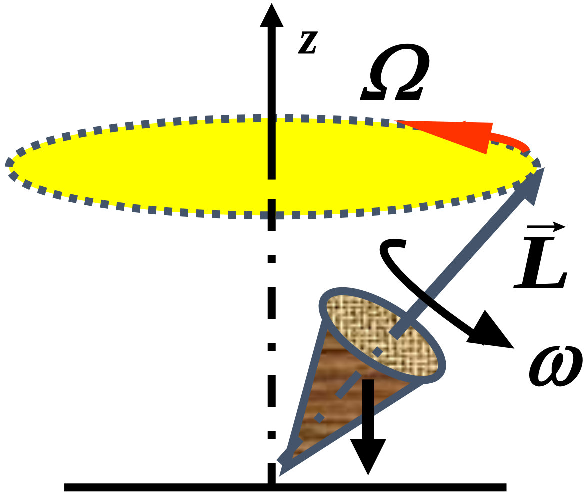
因此，附加磁矩方向仍然向下，与外磁场方向相反！

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

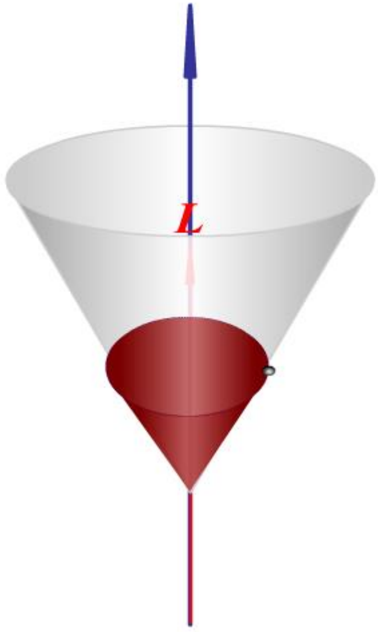
磁场与电子磁矩不在一条直线上时



陀螺进动



电子轨道磁矩受磁力矩方向垂直纸面向



角动量定理： $\mathrm{d}\vec{L}=\vec{M}\mathrm{d}t$

轨道角动量绕磁场旋进

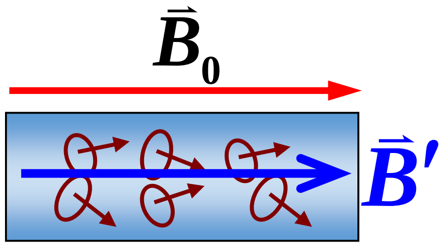
电子附加一个与外磁场相反的磁矩 $\Delta\vec{p}_m$

小结——磁介质的磁化

1. 磁介质内的磁场：

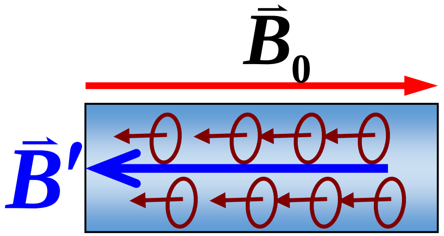
$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}'$$

顺磁质：



$B > B_0$

抗磁质：



$B < B_0$

2. 顺磁质中也有抗磁效应，但被掩盖了。 $\vec{p}_m >> \Delta\vec{p}_m$

3. 磁化的宏观效果：

在**磁介质内部**各处总有反向的电流流过，磁作用互相抵消。但在**介质的表面**上，分子圆电流一段段接合起来，总效果相当于在介质表面上有一层电流流过。

这种沿着表面流动的分子电流，称为**磁化面电流**或**束缚电流**。

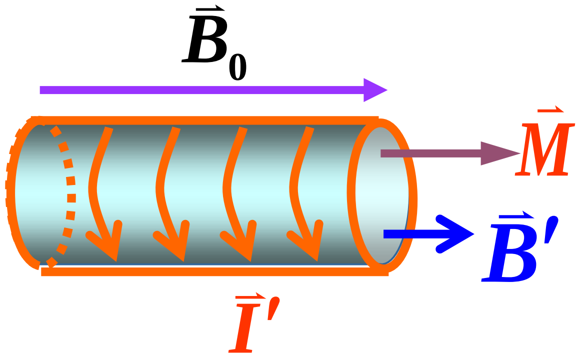
注：磁化面电流不是自由电荷定向运动形成！

四、磁化的宏观描述 磁化强度

1. 定义 $\vec{M}=\dfrac{\sum\vec{p}_m}{\Delta V}$ 单位体积内分子磁矩的矢量和　单位：安培/米 (A/m)

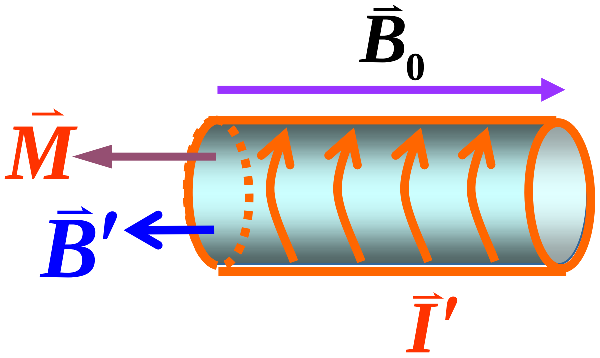
$\vec{M}$ 能反映附加磁场 $\vec{B}'$ 。

顺磁质：



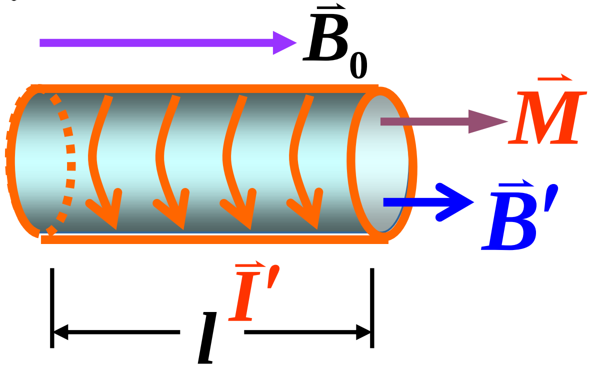
$\vec{M}$ 与 $\vec{B}_0$ 同向，
$\vec{B}'$ 与 $\vec{B}_0$ 同方向。

抗磁质：



$\vec{M}$ 与 $\vec{B}_0$ 反向，
$\vec{B}'$ 与 $\vec{B}_0$ 反方向。

2. 磁化强度与磁化面电流的关系：

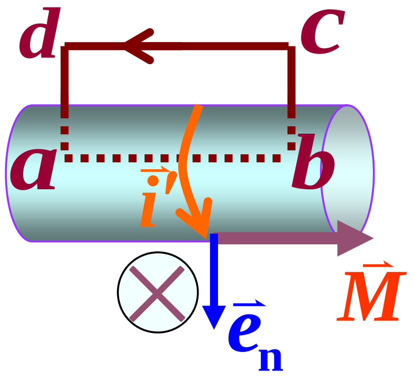


磁化面电流密度 $\vec{i}'$ = 在垂直于电流流动方向上单位长度的磁化面电流。

$$i' = \frac{I'}{l}$$

设介质的截面积 S，分子磁矩总和为：$\sum p_m = I'S$

$$\vec{M} = \frac{\sum \vec{p}_m}{\Delta V} \qquad |\vec{M}| = \frac{I'S}{lS} = i'$$



更一般的关系为：$\boxed{\vec{i}' = \vec{M} \times \vec{e}_n}$

磁化强度的环流：

$$\oint_L \vec{M} \cdot d\vec{l} = M\overline{ab} = i' \cdot \overline{ab} = \sum_{abcd内} I'$$

I' 与 L 环绕方向成右旋者为正，反之为负。

五、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： $\vec{B}=\vec{B}_{外}+\vec{B}'$

无论是什么电流激发的磁场，其磁场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： $\boxed{\oint_S \vec{B}\cdot \mathrm{d}\vec{S}=0}$

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：

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

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

$$\boxed{\oint_L \vec{M}\cdot \mathrm{d}\vec{l} = \sum I_i'}$$

$$\oint_L \vec{B}\cdot \mathrm{d}\vec{l} = \mu_0 \sum I_i + \mu_0 \oint_L \vec{M}\cdot \mathrm{d}\vec{l}$$

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

定义磁场强度： $\vec{H} = \dfrac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M}$

$\boxed{\oint_L \vec{H}\cdot \mathrm{d}\vec{l} = \sum I_i}$ ——有介质时的安培环路定理

磁场强度沿任一闭合路径的环流等于该闭合路径所包围的自由电流的代数和。

SI制中，*H* 的单位：安培/米(A/m)

3. $\vec{B},\vec{H},\vec{M}$ 三矢量之间的关系

$$\left.\begin{aligned}\vec{H}&=\frac{\vec{B}}{\mu_0}-\vec{M}\\ \vec{B}&=\mu_0(\vec{H}+\vec{M})\end{aligned}\right\}$$

实验指出：各向同性的线性磁介质有

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

χ_m——介质磁化率

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

令：$\mu_r=1+\chi_m$ ——相对磁导率

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

$\mu=\mu_0\mu_r$ ——介质磁导率

χ_m 与 μ_r 均为纯数，描述磁介质特性的物理量。

$\chi_m>0 \quad \mu_r>1 \longrightarrow$ 顺磁质

$\chi_m<0 \quad \mu_r<1 \longrightarrow$ 抗磁质

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

讨论 1. $\vec{B}$、$\vec{M}$、$\vec{H}$ 三矢量之间的方向关系？

由 $\vec{B}=\mu_o(\vec{H}+\vec{M})=\mu_o(1+\chi_m)\vec{H}=\mu_o\mu_r\vec{H}$

$$\vec{M}_m=\frac{\mu_r-1}{\mu_r\mu_0}\vec{B}$$

在各项同性介质中 B与H同方向，M与B同向或反向。

2. 通常情况下的解题思路：

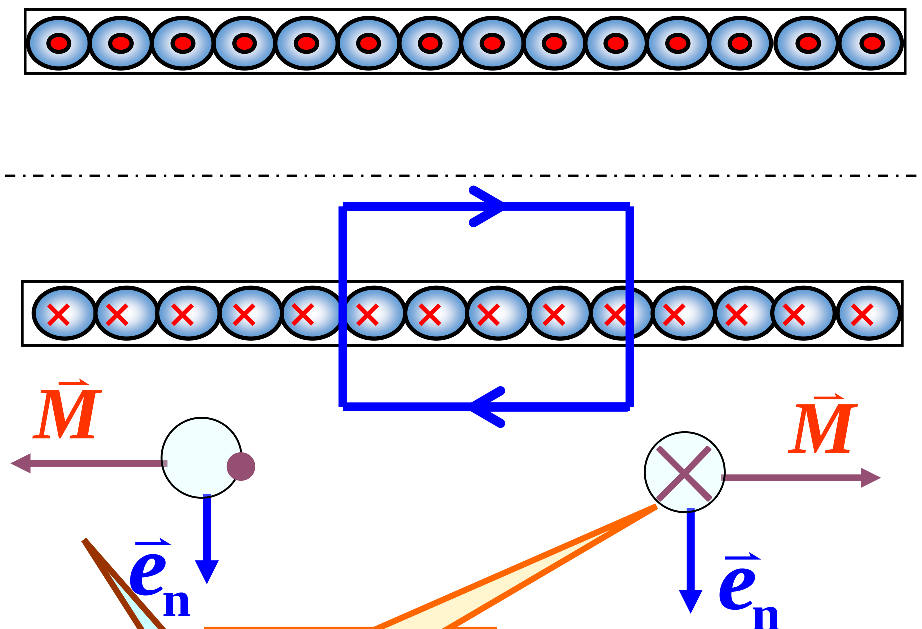
$$\text{传导电流}\xrightarrow[\text{路定理}]{\text{安培环}} H \longrightarrow B \longrightarrow M$$

$\longrightarrow I'$ (磁化电流或磁化电流密度)

例1. 长直螺旋管内充满均匀磁介质(μ_r)，设励磁电流 I_0，单位长度上的匝数为n。求管内的磁感应强度和磁介质表面的面束缚电流密度。

解： 由于轴对称性，管内是匀强磁场，管外磁场为零。

取矩形安培回路：



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

$$\therefore lH = nlI_0 \qquad \therefore H = nI_0$$

$$\therefore B = \mu_0\mu_r H = \mu_0\mu_r nI_0$$

$$\therefore M = (\mu_r - 1)nI_0$$

$$\because \vec{i}' = \vec{M}\times\vec{e}_n \qquad \therefore i' = (\mu_r - 1)nI_0$$

顺磁质：

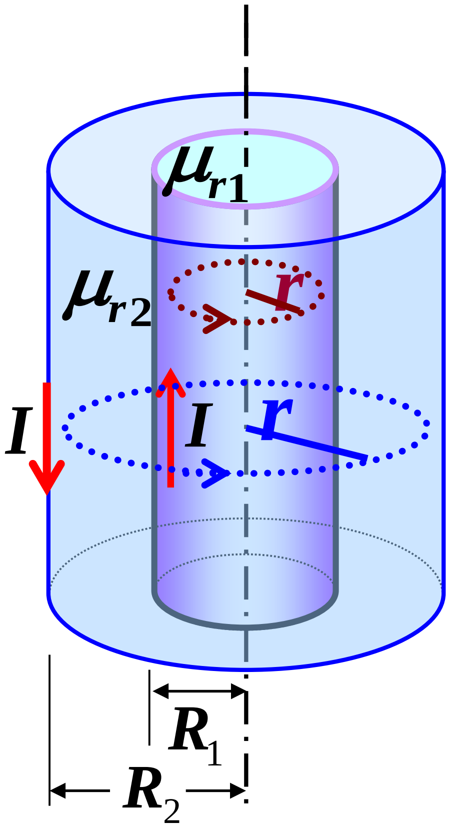
$\mu_r > 1, i' > 0$ $\quad i' \parallel I_0$

抗磁质：

$\mu_r < 1, i' < 0$ $\quad i' \uparrow\downarrow I_0$

例2. 半径为R_1无限长载流I磁介质圆柱体，其磁导为 μ_{r1}，外面有半径为 R_2的无限长同轴圆柱面，该面也通有电流I，两者间有磁介质μ_{r2}，圆柱面外为真空，且$\mu_{r2}>\mu_{r1}>1$，求B和 H的分布，在R_1处的磁化电流I'?

解： 问题有轴对称性，取圆形安培回路：



$r<R_1$ $\quad 2\pi r H_1=\dfrac{I}{\pi R_1^2}\pi r^2 \qquad H_1=\dfrac{I}{2\pi R_1^2}r$

$$B_1=\frac{\mu_{r1}\mu_0 I}{2\pi R_1^2}r$$

$R_1<r<R_2$ $\quad H_2=\dfrac{I}{2\pi r} \qquad B_2=\dfrac{\mu_{r2}\mu_0 I}{2\pi r}$

$r>R_2$ $\quad H_3=0 \qquad B_3=0$

求R_1界面上的磁化面电流

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

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

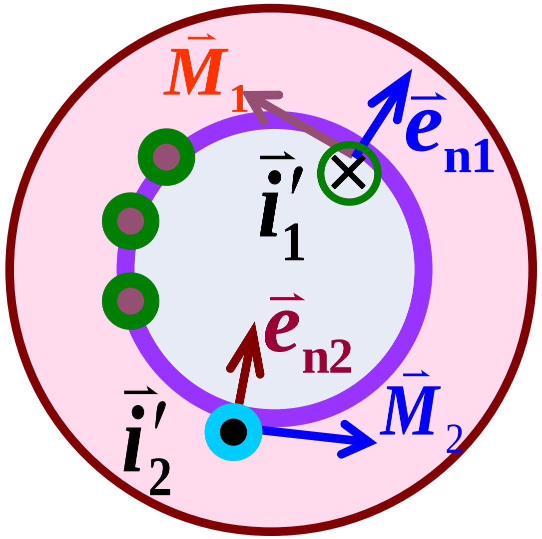
在$r<R_1$和 $R_1<r<R_2$处磁化强度：

$$M_1=\frac{(\mu_{r1}-1)Ir}{2\pi R_1^2} \qquad r<R_1$$

$$M_2=\frac{(\mu_{r2}-1)I}{2\pi r} \qquad R_1<r<R_2$$

因为磁导率均大于1，所以M方向与H相同。

在R_1内侧及外侧的磁化电流密度



$$\vec{i}'_1=\vec{M}_1\times\vec{e}_{n1}=-\frac{(\mu_{r1}-1)I}{2\pi R_1}\vec{k}$$

$$\vec{i}'_2=\vec{M}_2\times\vec{e}_{n2}=\frac{(\mu_{r2}-1)I}{2\pi R_1}\vec{k}$$

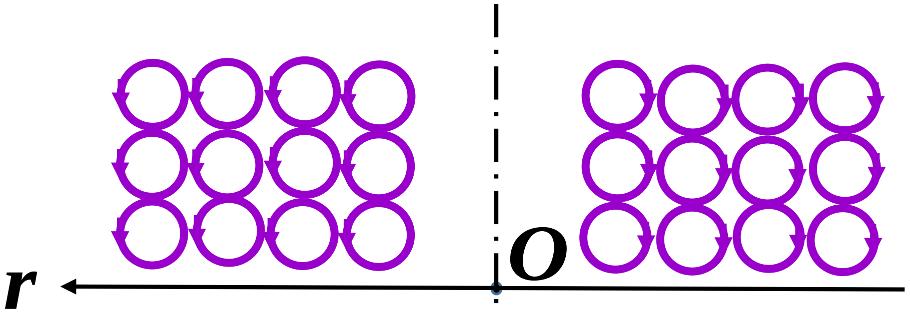
$$i'=|\vec{i}'_2|-|\vec{i}'_1|=\frac{(\mu_{r2}-\mu_{r1})I}{2\pi R_1}$$

与内圆柱传导电流方向相同。

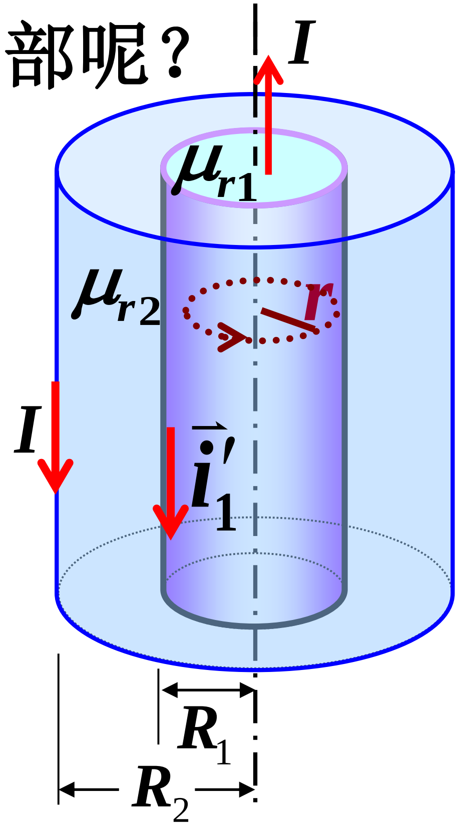
思考：

1、外同轴圆柱面的半径变化，对本题结论有无影响？

2、对内圆柱体，其表面磁化电流向下，内部呢？



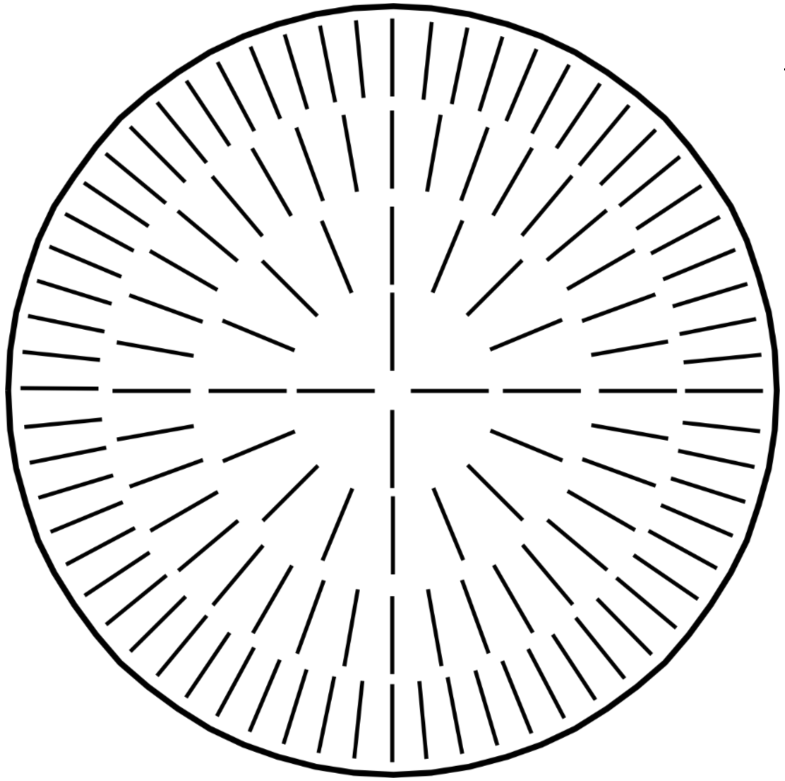
正面剖视图



$$M_1=\frac{(\mu_{r1}-1)Ir}{2\pi R_1^2}$$

简写为

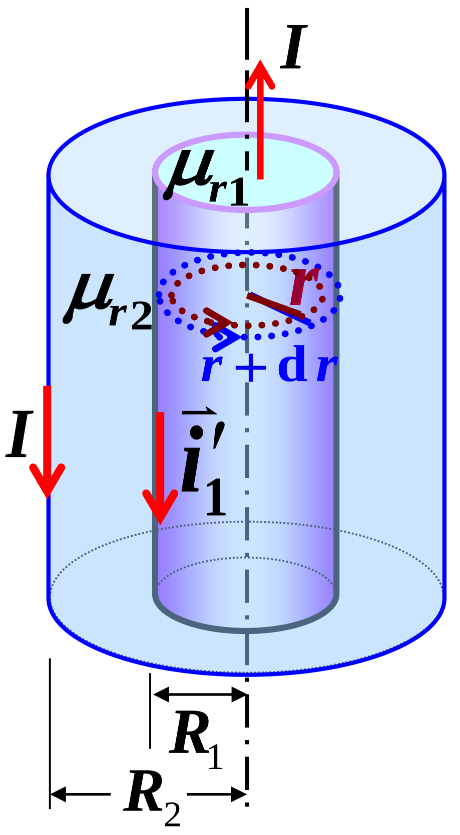
$$M_1=br$$



俯视图，每根短线代表一个圆电流

结论：内部每处磁化电流都没有抵消。

求解：内圆柱体内的磁化电流的分布情况。



解：磁化电流应该呈轴对称分布。

作一扇形环路$abcda$，

应用磁化强度的环路定理：$\oint_L \vec{M}\cdot \mathrm{d}\vec{l} = \sum I_i'$

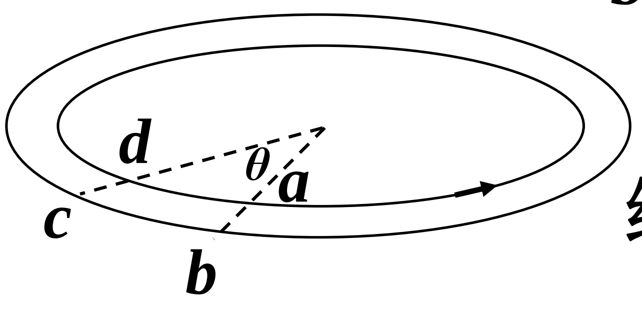
ab和cd两条边贡献环流为零

$$M_1 = \frac{(\mu_{r1}-1)Ir}{2\pi R_1^2}$$

简写为 $M_1 = br$

$$b(r+\mathrm{d}r)\theta(r+\mathrm{d}r) - br\theta r$$

$$= 2b\theta r\mathrm{d}r \quad = j'\theta r\mathrm{d}r$$



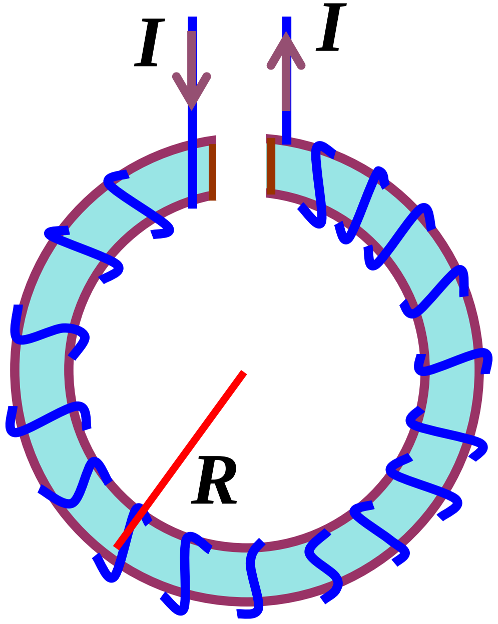
结果：磁化电流密度为 $j' = 2b \ = (\mu_{r1}-1)j_0$

其中 $j_0 = \dfrac{I}{\pi R_1^2}$

$\boxed{\text{均匀分布，与}r\text{无关}}$

六、 铁磁质

1. 磁化曲线



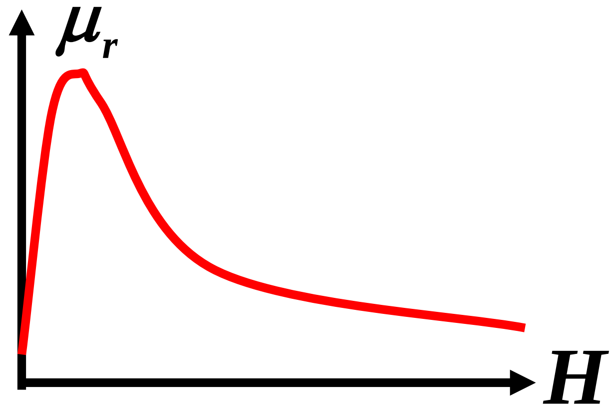
装置： 环形螺绕环，用铁磁质（Fe,Co,Ni）充满环内空间

原理：励磁电流为 I; 根据安培定理得：

$$H = \frac{NI}{2\pi R}$$

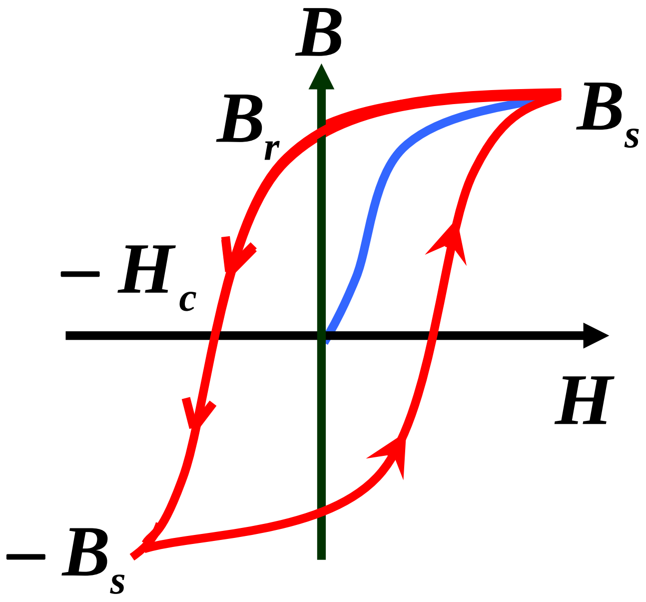
实验测量B：

由 $\mu_r = \dfrac{B}{B_0} = \dfrac{B}{\mu_0 H}$ 得出 $\mu_r \sim H$ 曲线：



铁磁质的 μ_r 不是常数，
它是 $\bar{H}$ 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。

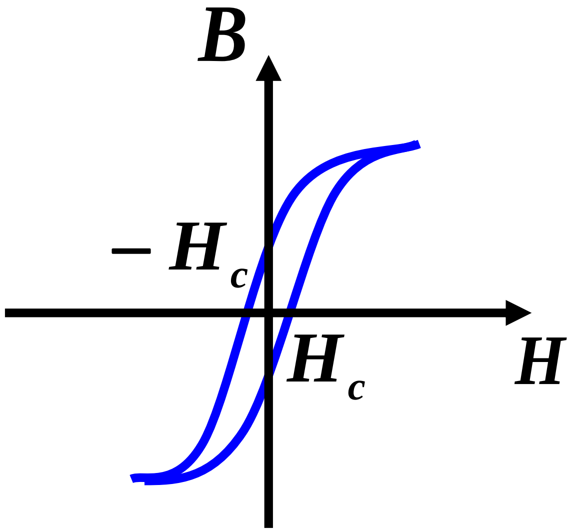
注：铁磁质剩磁 B_r对应H为零，
注意与线性弱磁性物质的区别：$\vec{B} = \mu_0(1+\chi_m)\vec{H}$

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。

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。

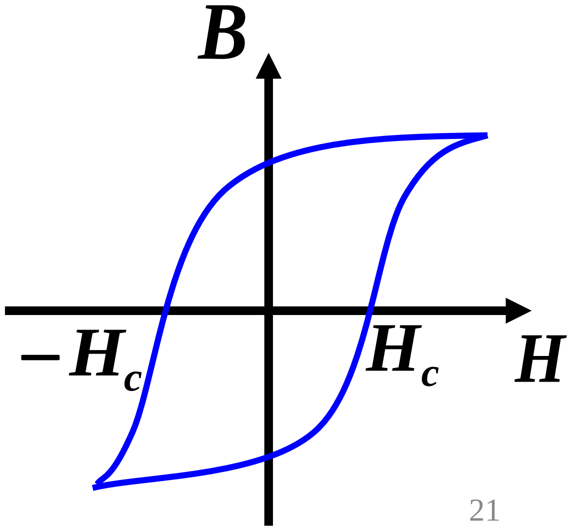


特点：矫顽力(H_c)小，
磁滞回线的面积窄而长，
损耗小（面积小）。

易磁化、易退磁

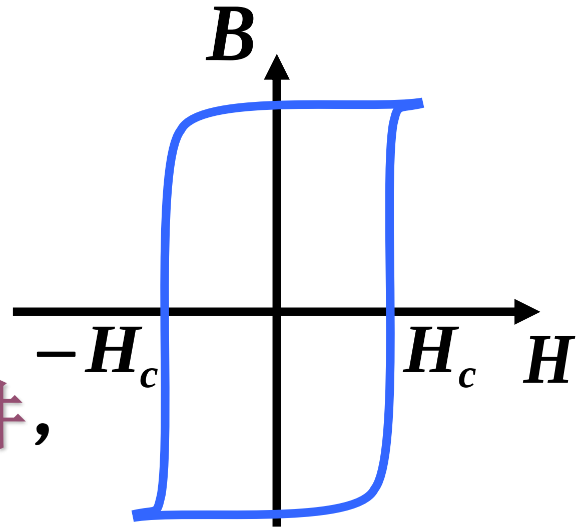
适用于变压器、继电器、电机、以及各种高频电磁元件的磁芯、磁棒。

2）硬磁材料：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、扬声器等中的永久磁铁。

3) 矩磁材料

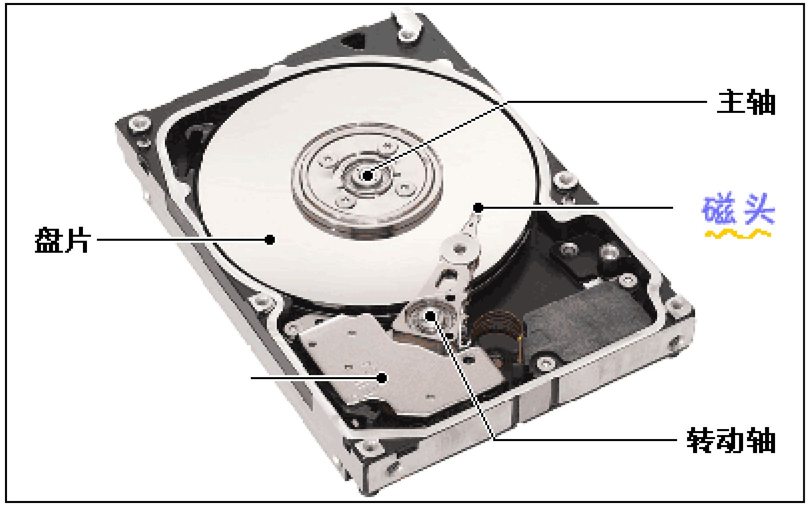


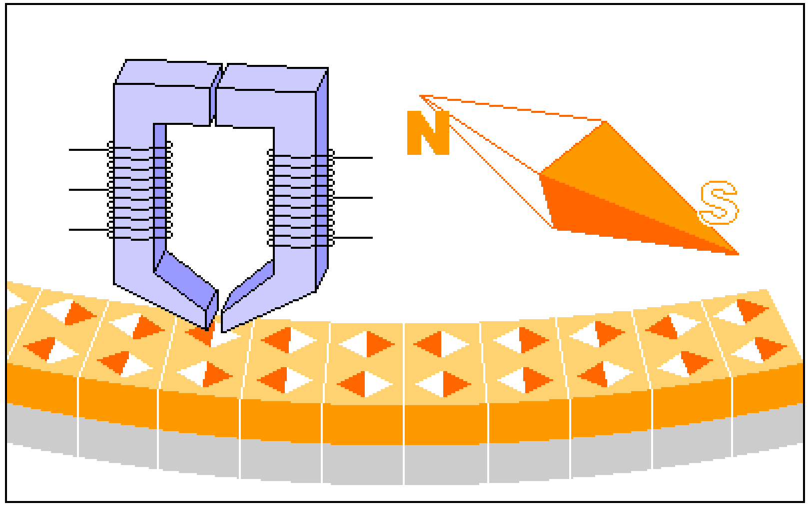
锰镁铁氧体，锂锰铁氧体

B_r=B_S ，H_c不大，
磁滞回线是矩形。用于记忆元件，

可做为二进制的两个态。

适用制作计算机磁带和磁盘的记忆元件。

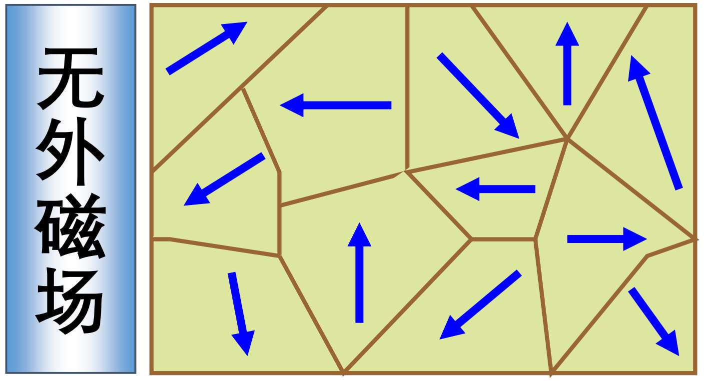


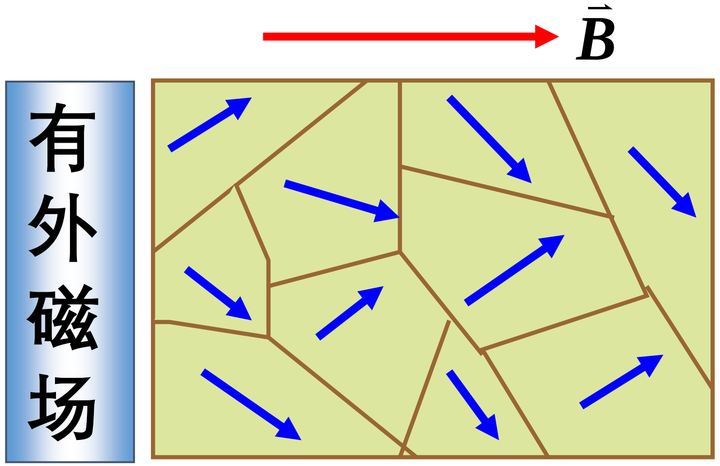


4. 铁磁质的微观结构——磁畴

铁磁性主要来源于电子的自旋磁矩。——量子效应

磁畴： 电子交换作用使其自旋磁矩平行排列形成自发的磁化区域。（$10^{-9}cm^3$区域）





全部磁畴都沿外磁场方向时，铁磁质的磁化即达饱和。

材料有杂质和内应力等，当撤掉外磁场时磁畴的畴壁很难恢复到原来的形状，即表现出磁滞现象。

当温度升高时，热运动会瓦解磁畴。达到临界温度T_c (居里点)时，铁磁质变成了顺磁质。

如铁、钴、镍的居里点分别为770℃、1115℃、358℃。

含镍30%的坡莫合金居里温度 $t_c = 70$ ℃；

当温度低于 t_c 时，又由顺磁质转变为铁磁质。

利用铁磁质具有居里温度的特点，可将其制作温控元件，如电饭锅自动控温。

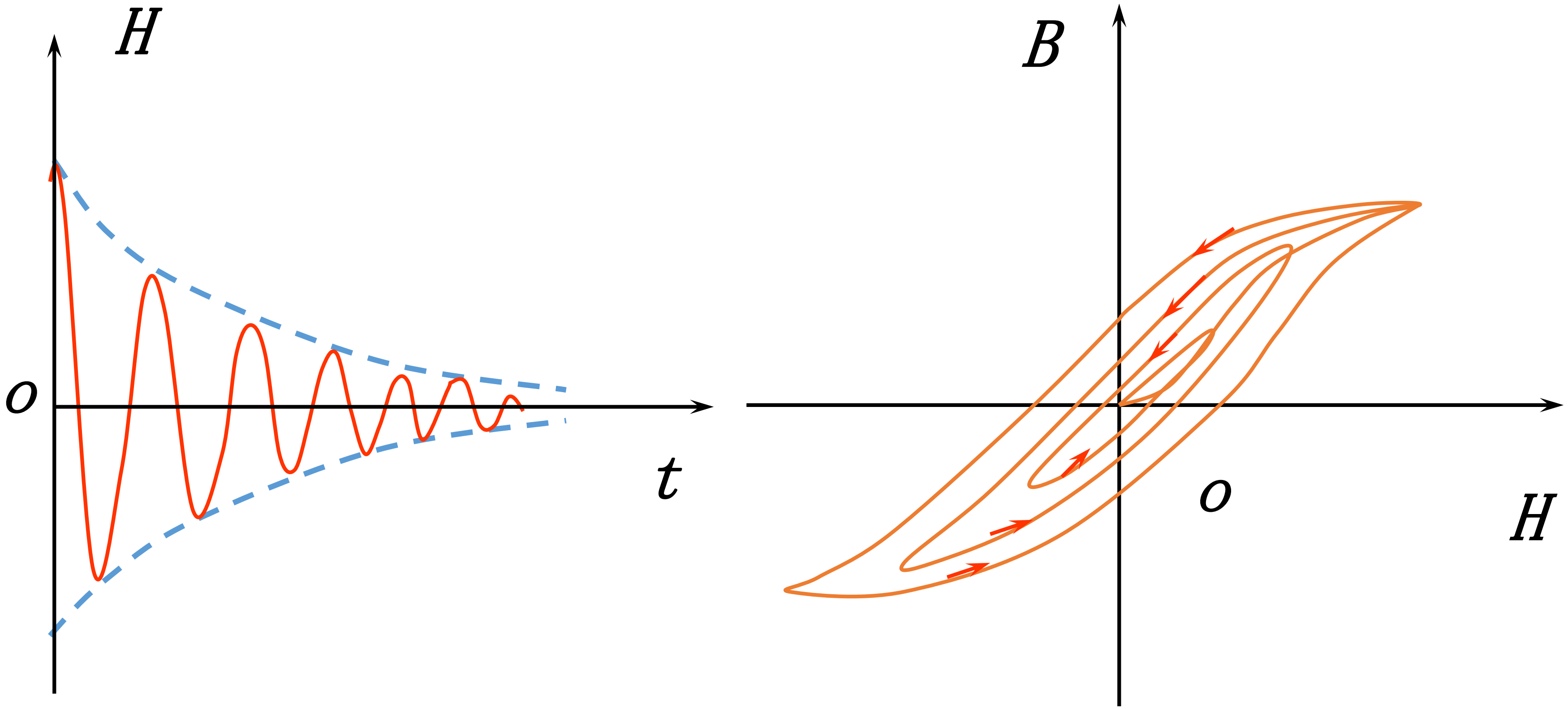
其它退磁方法

1. 敲击法

通过振动可提供磁畴转向的能量，使介质失去磁性。如敲击永久磁铁会使磁铁磁性减小。

2. 加交变衰减的磁场

使介质中的磁场逐渐衰减为 0，应用在录音机中的交流抹音磁头中。

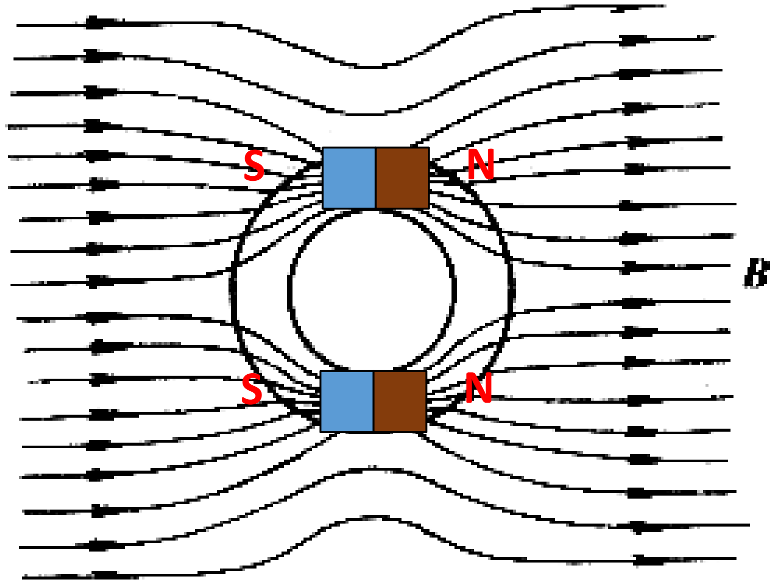


磁屏蔽原理

1、磁力线是闭合曲线，不会中断，也不会“无中生有”。

2、铁磁材料的磁导率比空气大几千倍，也即空气的磁阻比铁磁材料大得多。

结果：外磁场的磁力线的绝大部份将沿着铁磁材料壁内通过，而进入空腔的磁通量极少。



本质上：因为磁屏蔽材料的被磁化，以及因此而产生的新磁场强度，完全依外部原场强而变，相消而实现“屏蔽”。