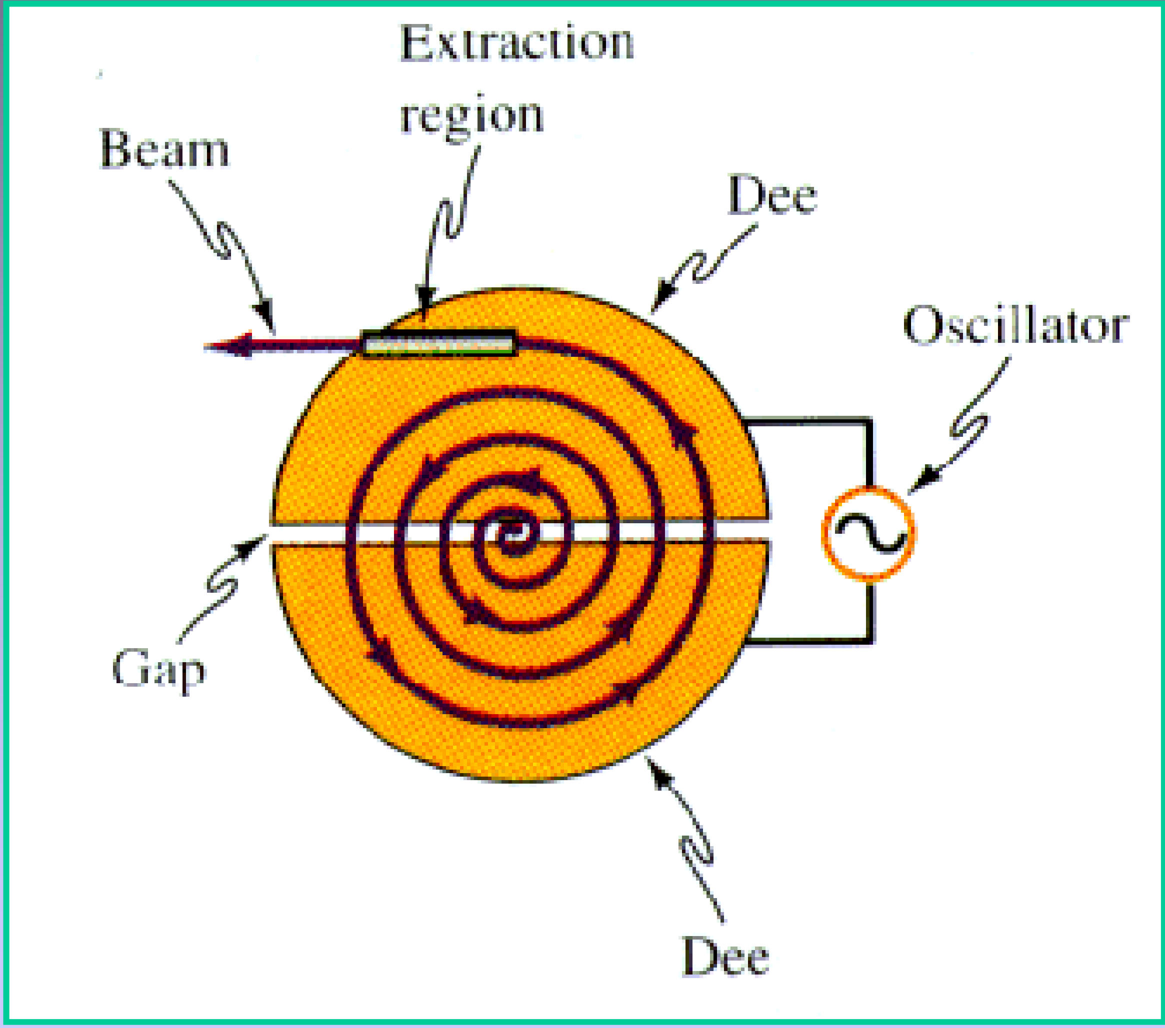
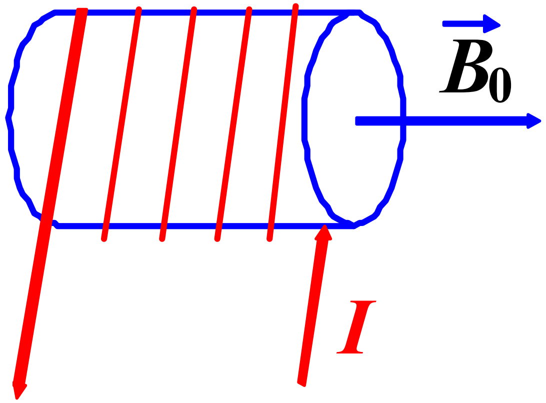
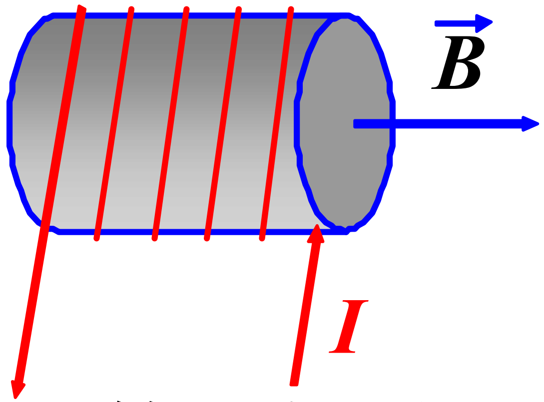
同学们好！



§ 10.5　磁介质

磁介质的磁化





$$B = \mu_r B_0$$

μ_r—相对磁导率

顺磁质　抗磁质　铁磁质

顺磁质（例如铝）

$$\mu_r = 1 + 1.65\times10^{-5} > 1$$

抗磁质（例如铜）

$$\mu_r = 1 - 1.0\times10^{-5} < 1$$

$\left.\begin{array}{l}\text{顺磁质} \\ \text{抗磁质}\end{array}\right\}$ 工程上取 $\mu_r \approx 1$

铁磁质（铁、钴、镍及其合金，铁氧体）

$$\mu_r >> 1$$

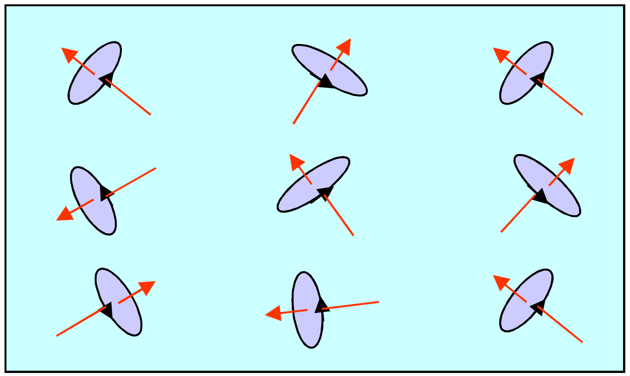
	纯铁	硅钢	坡莫合金
μ_r	5×10^3	7×10^2	1×10^5

顺磁质和抗磁质的磁化

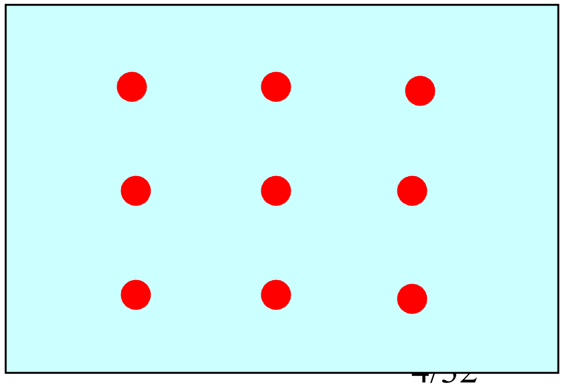
	电介质	磁介质
分子模型	电偶极子	分子电流 $\left\{ \text{分子中所有电子，原子核固有磁矩的等效电流} \right.$
分类	有极分子电介质 $\vec{p}_e \neq 0$ ，$\sum \vec{p}_e = 0$	顺磁质 $\vec{p}_m \neq 0$ ，$\sum \vec{p}_m = 0$
	无极分子电介质 $\vec{p}_e = 0$ ，$\sum \vec{p}_e = 0$	抗磁质 $\vec{p}_m = 0$ ，$\sum \vec{p}_m = 0$

无外磁场：

顺磁质



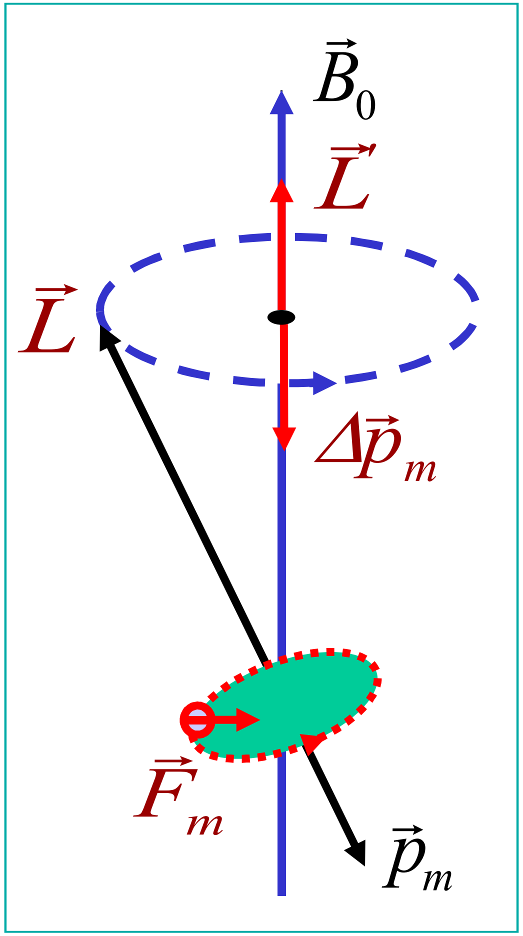
抗磁质

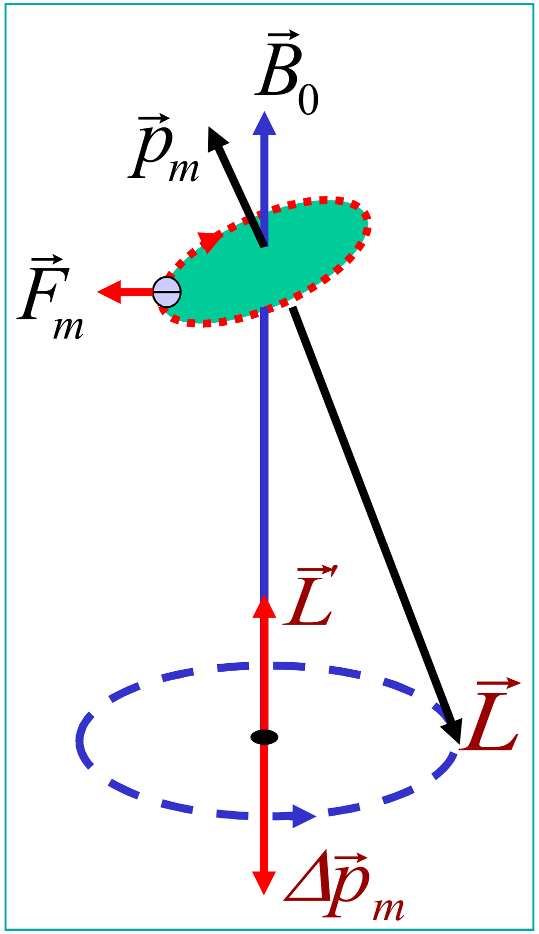


外场中： 磁化

以顺磁质为例 $\vec{M}=\vec{P}_m\times\vec{B}$ $\vec{M}=\dfrac{\mathrm{d}\vec{L}}{\mathrm{d}t}$

（1）转向 （2）产生与 $\vec{B}_0$反向的附加磁矩 $\Delta\vec{p}_m$





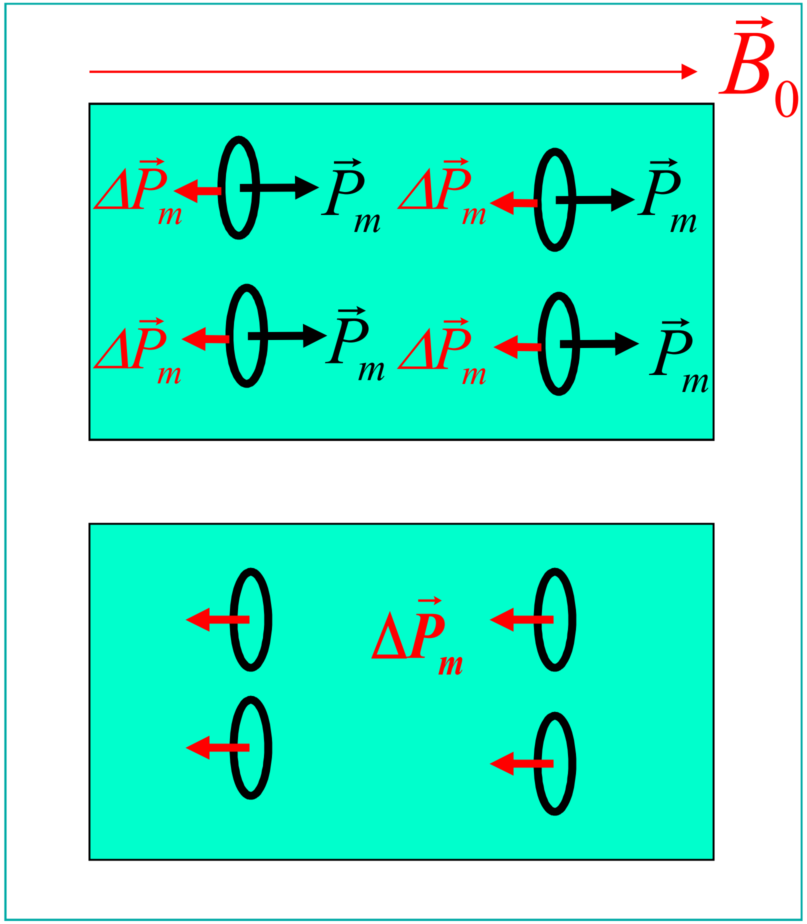
抗磁质：

相当于上图中两种情况叠加，仍产生与$\vec{B}_0$反向的附加磁矩

参考书中P271

宏观效果

1. 介质中总磁矩不为零



顺磁质

$$\sum \vec{p}_m + \sum \Delta\vec{p}_m \approx \sum \vec{p}_m \neq 0$$

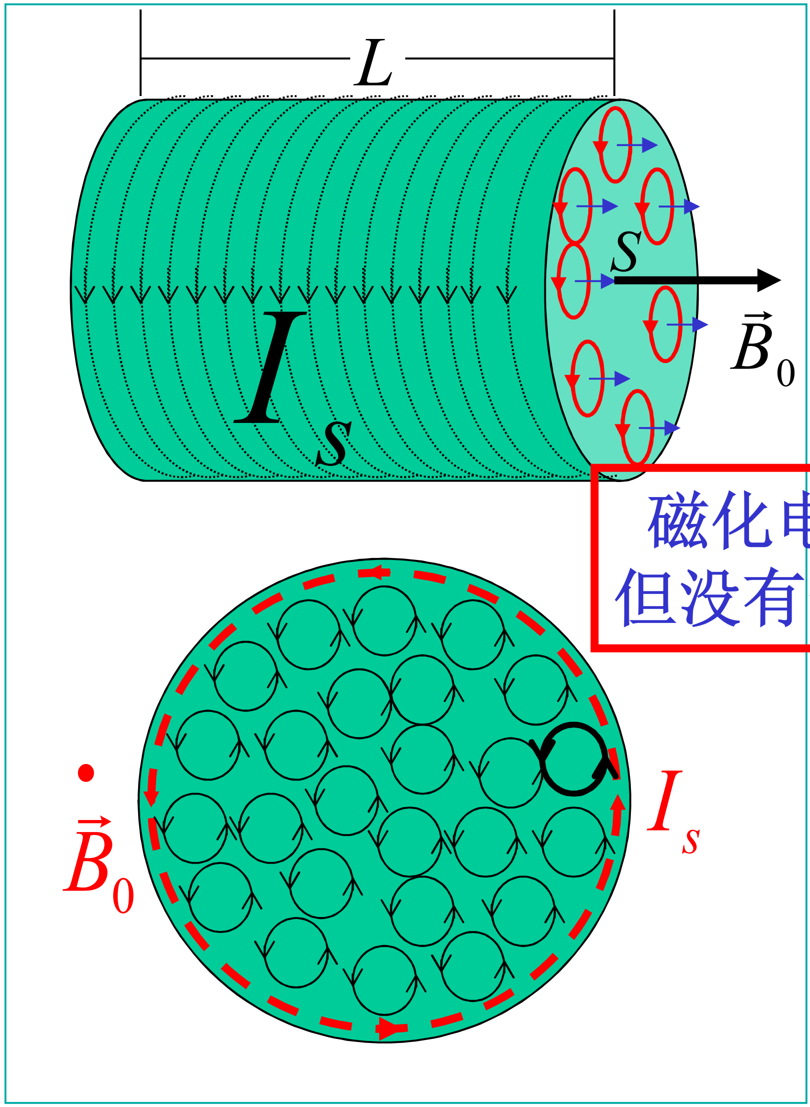
与 $\vec{B}_0$ 同向

抗磁质

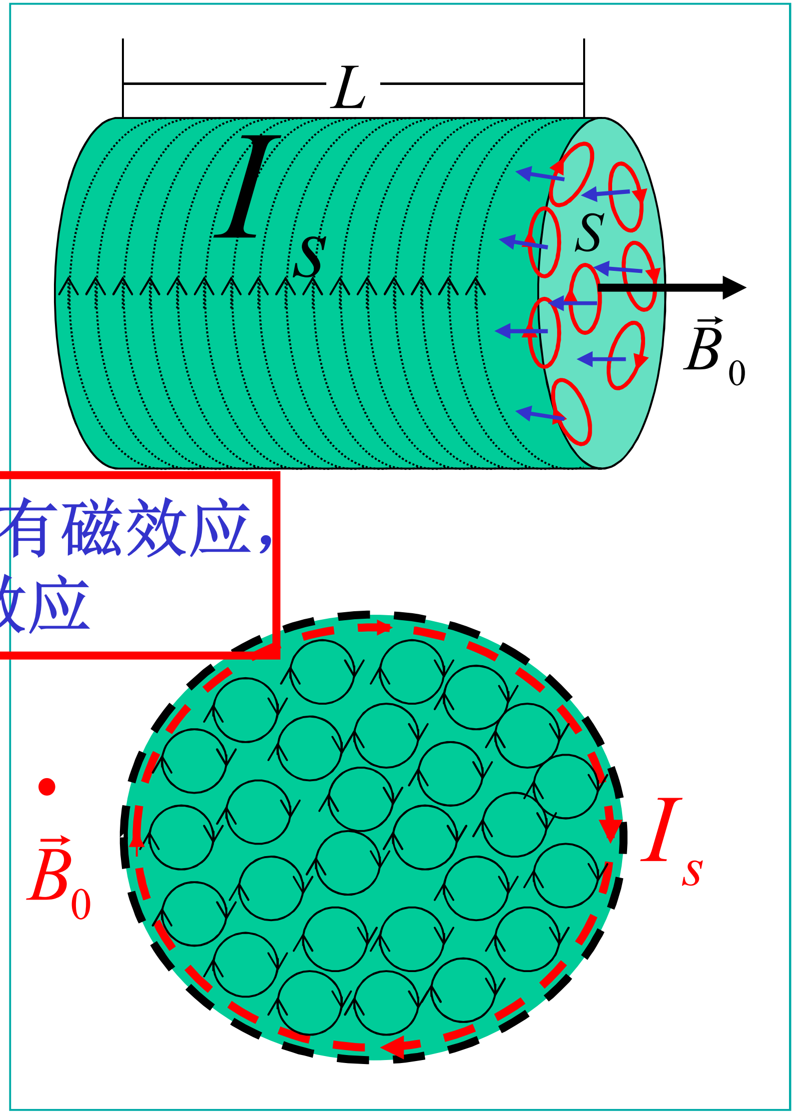
$$\sum \Delta\vec{p}_m \neq 0$$ 与 $\vec{B}_0$ 反向

2. 介质表面出现磁化电流（束缚电流）

顺磁质



抗磁质



磁化电流有磁效应，
但没有热效应

磁化状态的描述

定义磁化强度：

$$\vec{M} = \frac{\sum \vec{p}_m + \sum \Delta\vec{p}_m}{\Delta V}$$

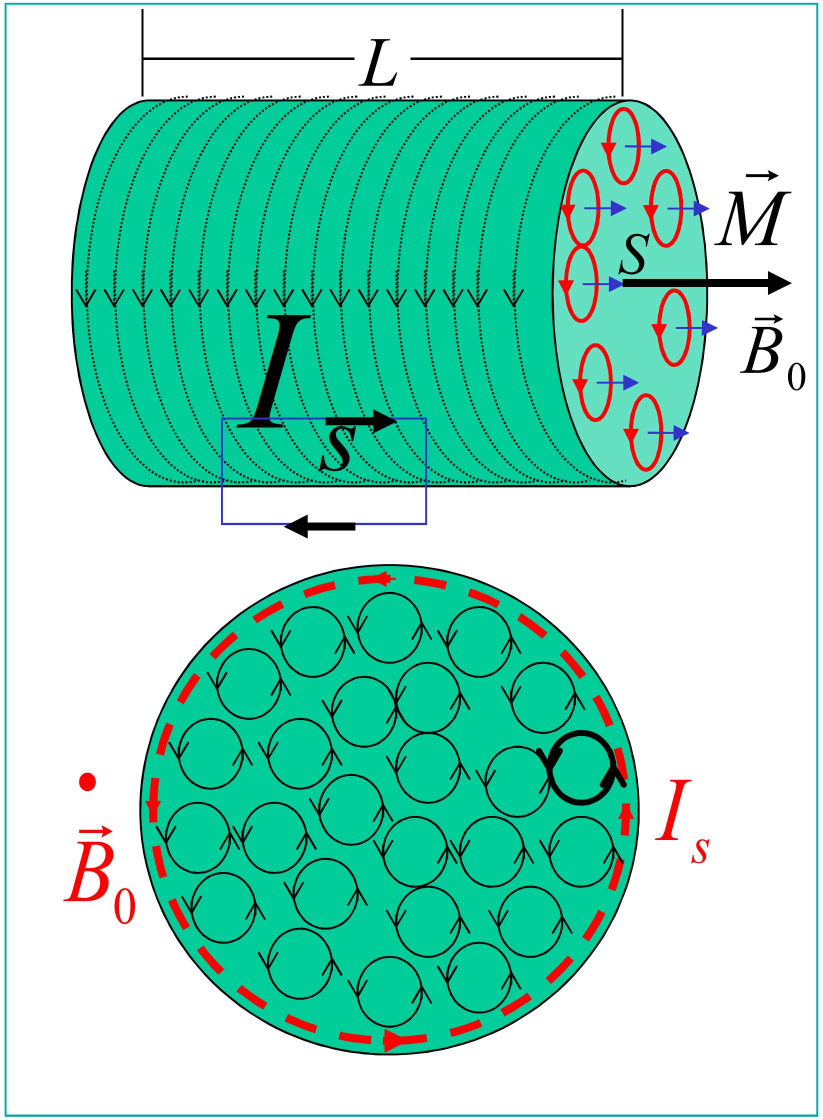
$$= \frac{I_s \cdot S\vec{n}}{LS} = j_s \vec{n}$$

磁化（束缚）电流线密度

磁化强度与磁化电流的关系：

$$\oint_L \vec{M} \cdot \mathrm{d}\vec{l} = \sum_{(L\text{内})} I_s$$

顺磁质



	电介质	磁介质
与场相互作用机制	$\left.\begin{matrix}\text{转向极化}\\ \text{位移极化}\end{matrix}\right\}$ $\sum \vec{p}_e \neq 0$	均产生与 $\vec{B}_0$ 反向的附加磁矩 $\Delta \vec{p}_m$ 抗磁质：只有 $\sum \Delta \vec{p}_m$ 顺磁质：转向 + 附加磁矩 $\sum \vec{p}_m + \sum \Delta \vec{p}_m \approx \sum \vec{p}_m$
描 述	极化强度： $\vec{P} = \dfrac{\sum \vec{p}_e}{\Delta V}$ 极化电荷： $\sigma' = P_n$ $\oint_S \vec{P} \cdot \mathrm{d}\vec{S} = -\sum_{(S内)} q'$	磁化强度 $\vec{M} = \dfrac{\sum \vec{p}_m + \sum \Delta \vec{p}_m}{\Delta V}$ 抗：$\vec{M} = \dfrac{\sum \Delta \vec{p}_m}{\Delta V}$ 与 $\vec{B}_0$ 反向 顺：$\vec{M} \approx \dfrac{\sum \vec{p}_m}{\Delta V}$ 与 $\vec{B}_0$ 同向 磁化电流： $j_s = M$ $\oint_L \vec{M} \cdot \mathrm{d}\vec{l} = \sum_{(穿过L)} I_s$

磁场强度 $\vec{H}$ 的引入

安培环路定理：

传导电流　磁化电流

$$\oint_L \vec{B}\cdot \mathrm{d}\vec{l} = \mu_0 \sum_{(L内)} I = \mu_0 \sum_{(L内)} (I_0 + I_s) = \mu_0 (\sum I_0 + \oint_L \vec{M}\cdot \mathrm{d}\vec{l})$$

$$\oint_L \left(\frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M}\right)\cdot \mathrm{d}\vec{l} = \sum_{(L内)} I_0$$

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

磁场强度

与空间 I_0 . I_s 均有关。

$$\boxed{\oint_L \vec{H}\cdot \mathrm{d}\vec{l} = \sum_{(L内)} I_0}$$

介质中的安培环路定理

$$\oint_L \vec{H}\cdot \mathrm{d}\vec{l} = \sum_{(L内)} I_0$$ 介质中的安培环路定理

只与穿过 L 的传导电流代数和有关 .

对各向同性磁介质： $\vec{M} = \chi_m \vec{H}$

χ_m：磁化率

由 $\vec{H} = \dfrac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M}$

$$\begin{aligned}\vec{B} &= \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) \\ &= \mu_0(1+\chi_m)\vec{H} \\ &= \mu_0\mu_r\vec{H} \\ &= \mu\vec{H}\end{aligned}$$

$\mu_r = 1 + \chi_m$ 介质相对磁导率

$\mu = \mu_0\mu_r$ 介质磁导率

由 $\vec{H}=\dfrac{\vec{B}}{\mu_0}-\vec{M}$

$$\left.\begin{aligned}\vec{B} &= \mu_0(\vec{H}+\vec{M}) \\ &= \mu_0(1+\chi_m)\vec{H} \\ &= \mu_0\mu_r\vec{H} \\ &= \mu\vec{H}\end{aligned}\right\}$$

$\mu_r = 1+\chi_m$

介质相对磁导率

$\mu = \mu_0\mu_r$

介质磁导率

对于顺磁质和抗磁质来说磁化率都是很小的，因而顺磁质相对磁化率比1略大，而抗磁质来说磁化率比1略小。

	电介质	磁介质
介质中的场	$\vec{E}_0 \to \vec{P} \to q'(\sigma'.\ \rho')$ $\uparrow \qquad \downarrow$ $\vec{E} \leftarrow \vec{E}' + \vec{E}_0$	$\vec{B}_0 \to \vec{M} \to I_s(j_s)$ $\uparrow \qquad \downarrow$ $\vec{B} \leftarrow \vec{B}' + \vec{B}_0$
基本规律	电位移矢量： $\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$ 介质中的高斯定理： $\oint_S \vec{D} \cdot \mathrm{d}\vec{S} = \sum\limits_{(S内)} q_0$	磁场强度：$\vec{H} = \dfrac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M}$ 介质中的安培环路定理： $\oint_L \vec{H} \cdot \mathrm{d}\vec{l} = \sum\limits_{(穿过L)} I_0$

	电介质	磁介质
其它对应关　　系	$\vec{P}=\chi_e\varepsilon_0\vec{E}$ $\varepsilon_r=1+\chi_e$ $\vec{D}=\varepsilon_0\varepsilon_r\vec{E}$	$\vec{M}=\chi_m\vec{H}$ $\mu_r=1+\chi_m$ $\vec{B}=\mu_0\mu_r\vec{H}$
求解思路	（1）对称性分析，选高斯面 （2）由 $\oint_s \vec{D}\cdot d\vec{S}=\sum\limits_{(S内)} q_0$ 求 $\vec{D}$ （3）由 $\vec{E}=\vec{D}/\varepsilon_0\varepsilon_r$ 求 $\vec{E}$	（1）对称性分析，选安培环路 （2）由 $\oint_L \vec{H}\cdot d\vec{l}=\sum\limits_{(穿过L)} I_0$ 求 $\vec{H}$ （3）由 $\vec{B}=\mu_0\mu_r\vec{H}$ 求 $\vec{B}$

例1：

已知：正方形截面螺绕环 $(R_1 \cdot R_2 \cdot N \cdot I \cdot \phi_m)$

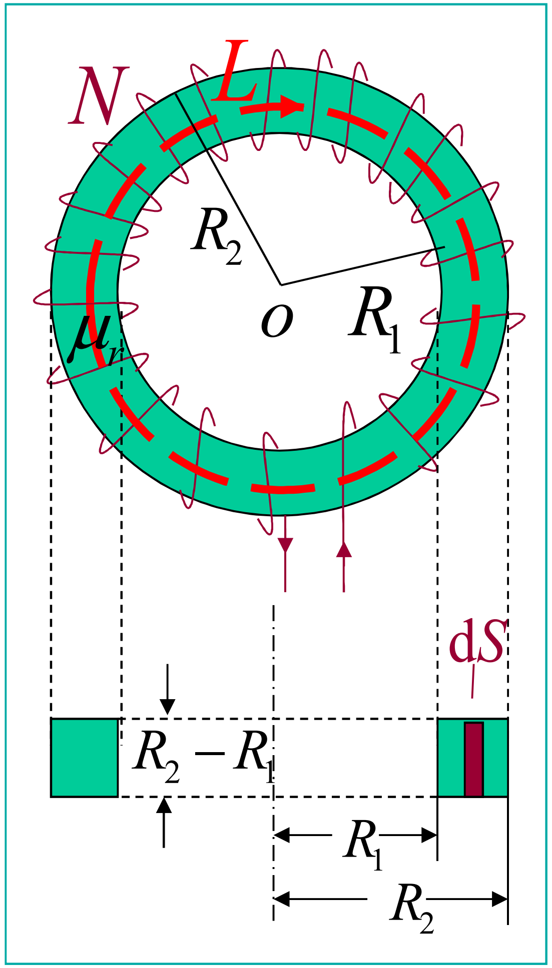
求：　$\mu_r = ?$

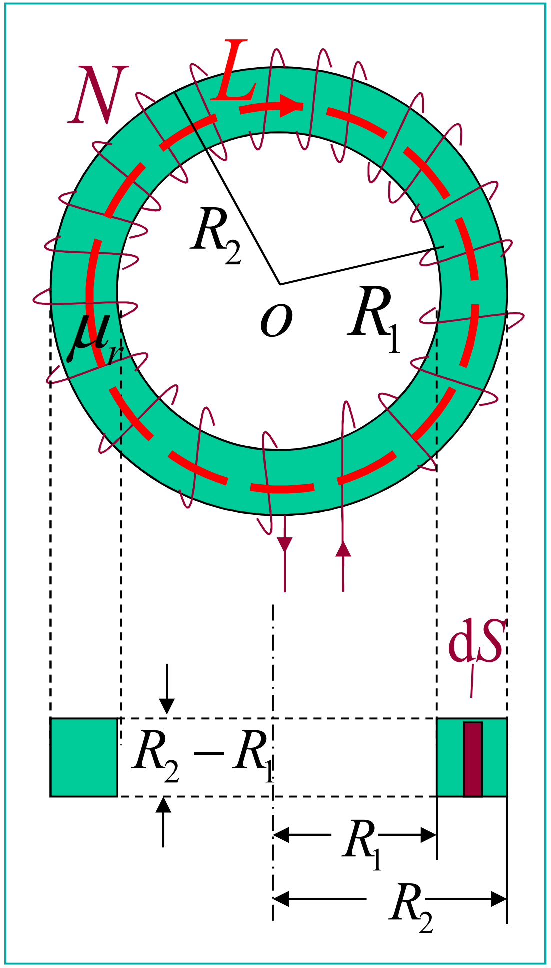
解：对称性分析
选如图同心圆环为安培环路

$$\oint_L \vec{H} \cdot \mathrm{d}\vec{l} = H \cdot 2\pi r = NI$$

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

$$B = \frac{\mu_0 \mu_r NI}{2\pi r}$$





$$\phi_m = \int_s \vec{B}\cdot \mathrm{d}\vec{S} = \int_{R_1}^{R_2} \frac{\mu_0 \mu_r NI}{2\pi r}(R_2 - R_1)\mathrm{d}r$$

$$= \frac{\mu_0 \mu_r NI}{2\pi}(R_2 - R_1)\ln\frac{R_2}{R_1}$$

$$\mu_r = \frac{2\pi\phi_m}{\mu_0 NI(R_2 - R_1)\ln\dfrac{R_2}{R_1}}$$

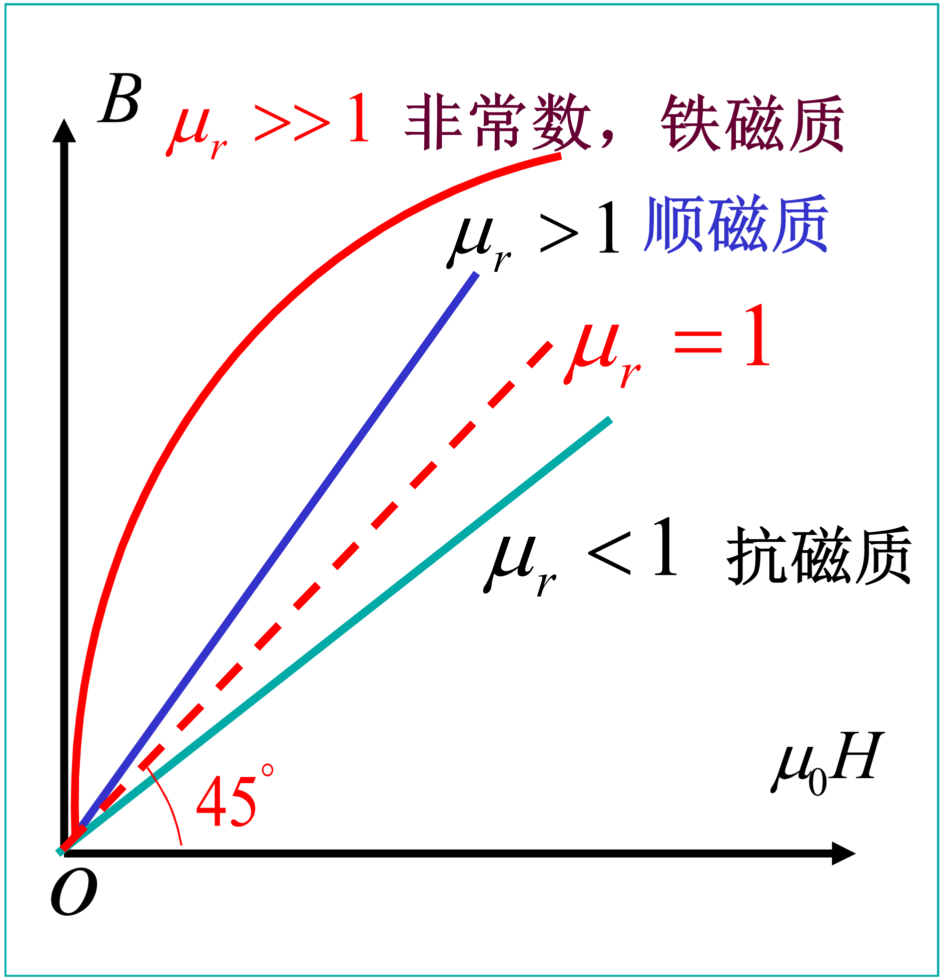
代入数据：$R_1 = 10^{-2}\,\mathrm{m}$．　$R_2 = 2\times 10^{-2}\,\mathrm{m}$

$N = 200$ ．　$I = 0.1\,\mathrm{A}$

$\phi_m = 6\times 10^{-5}\,\mathrm{Wb}$

得：$\mu_r = 2160$

μ_r很大且与 I 有关，非常数，说明该磁介质非顺磁质，也非抗磁质，而是铁磁质。



§ 10.6　铁磁质*

要点：　高μ值
非线性
磁滞回线
居里点
磁畴理论

小结

一. 磁介质

$$\begin{cases} \text{顺磁质} & \mu_r > 1 \\ \text{抗磁质} & \mu_r < 1 \\ \text{铁磁质} & \mu_r \gg 1 \end{cases}$$

二. 磁化机理

顺磁质 $\sum \vec{p}_m + \sum \Delta\vec{p}_m \approx \sum \vec{p}_m \neq 0$ 与 $\vec{B}_0$ 同向

抗磁质 $\sum \Delta\vec{p}_m \neq 0$ 与 $\vec{B}_0$ 反向

三. 磁化状态的描述

磁化强度： $\vec{M}=\dfrac{\sum \vec{p}_m}{\Delta V}=j_s\vec{n}$

磁化强度与磁化电流的关系： $\oint_L \vec{M}\cdot \mathrm{d}\vec{l}=\sum\limits_{(L内)} I_s$

四. 磁介质中安培环路定理

$$\boxed{\oint_L \vec{H}\cdot \mathrm{d}\vec{l}=\sum_{(L内)} I_0}$$

其中 $\vec{H}=\dfrac{\vec{B}}{\mu_0}-\vec{M}$

$$\vec{M}=\chi_m\vec{H} \qquad \mu_r=1+\chi_m \qquad \vec{B}=\mu_0\mu_r\vec{H}$$

五. 磁介质中的磁场

（1）对称性分析，选安培环路

（2）由 $\oint_L \vec{H} \cdot \mathrm{d}\vec{l} = \sum\limits_{（穿过L）} I_0$ 求 $\vec{H}$

（3）由 $\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H}$ 求 $\vec{B}$