

大学物理3：电磁学_中国大学MOOC(慕课)
(icourse163.org) 同济大学

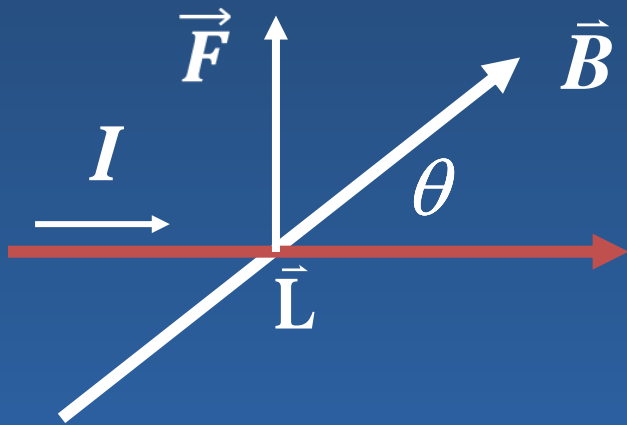
<https://www.bilibili.com/video/BV1qW411H7UX?p=20>
大学物理】 东北大学-马文蔚

<https://www.bilibili.com/video/BV1cW411S7Mm?from=search&seid=8508673857920683368> 清华大学-张三慧教材

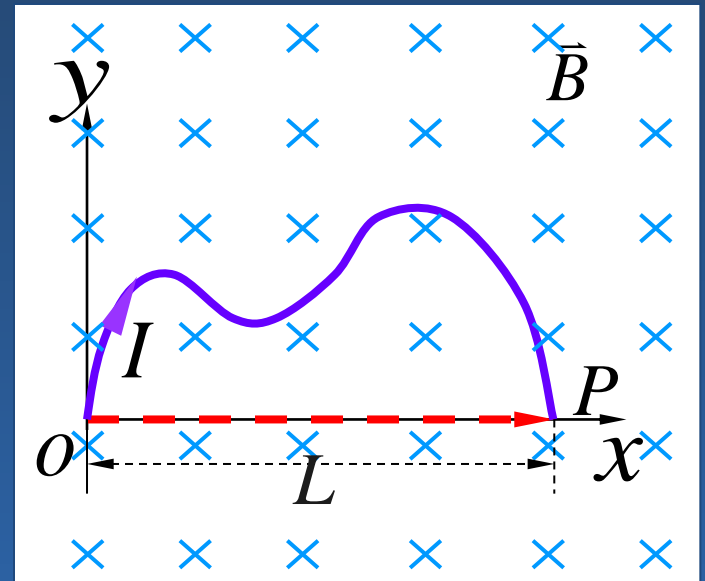
上节回顾

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

匀强磁场中：



$$\vec{F} = I \vec{L} \times \vec{B}$$
$$F = ILB \sin \theta$$



$$\vec{F} = \int I d\vec{l} \times \vec{B}$$
$$= I \left(\int d\vec{l} \right) \times \vec{B} = I \vec{L} \times \vec{B}$$

$$\vec{F} = \oint_L I d\vec{l} \times \vec{B} = 0$$

上节回顾

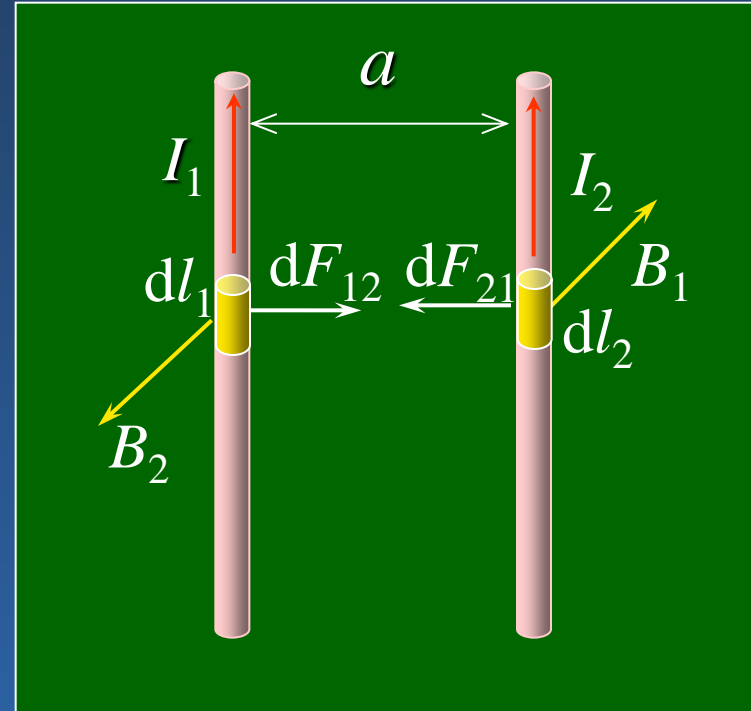
$$B_2 = \frac{\mu_o I_2}{2\pi a} \quad B_1 = \frac{\mu_o I_1}{2\pi a}$$

$$dF_{12} = I_1 B_2 dl_1 = \frac{\mu_o I_1 I_2}{2\pi a} dl_1$$

单位长度受力

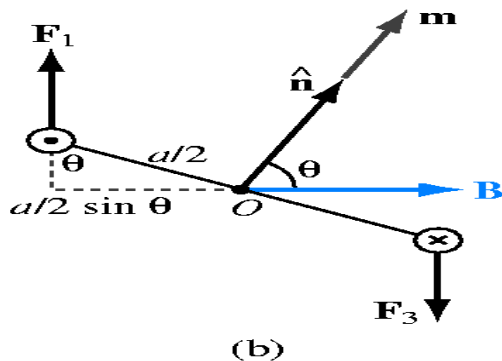
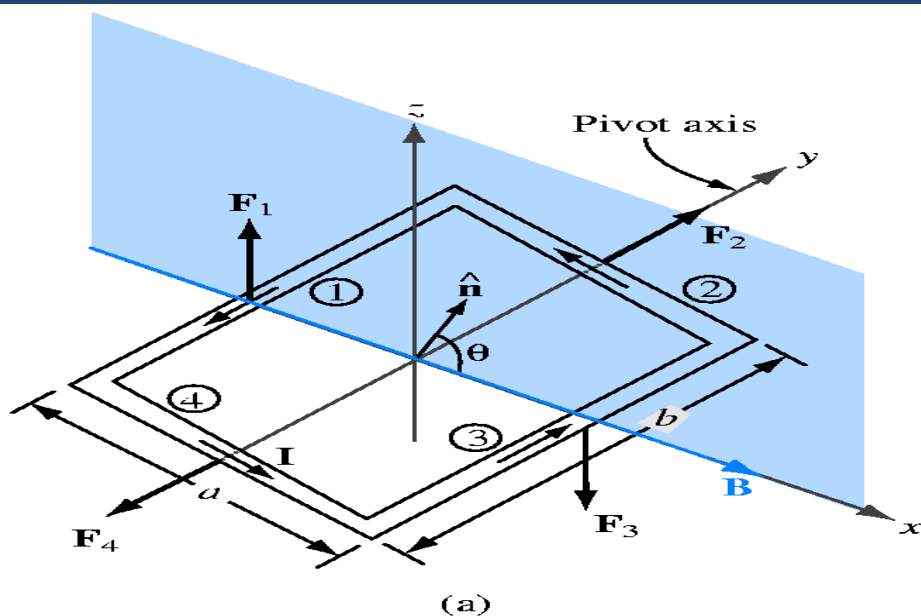
$$\frac{dF_{12}}{dl_1} = \frac{\mu_o I_1 I_2}{2\pi a}$$

$$\frac{dF_{21}}{dl_2} = \frac{\mu_o I_1 I_2}{2\pi a}$$



上节回顾

均匀磁场中任意形状的平面载流线圈：

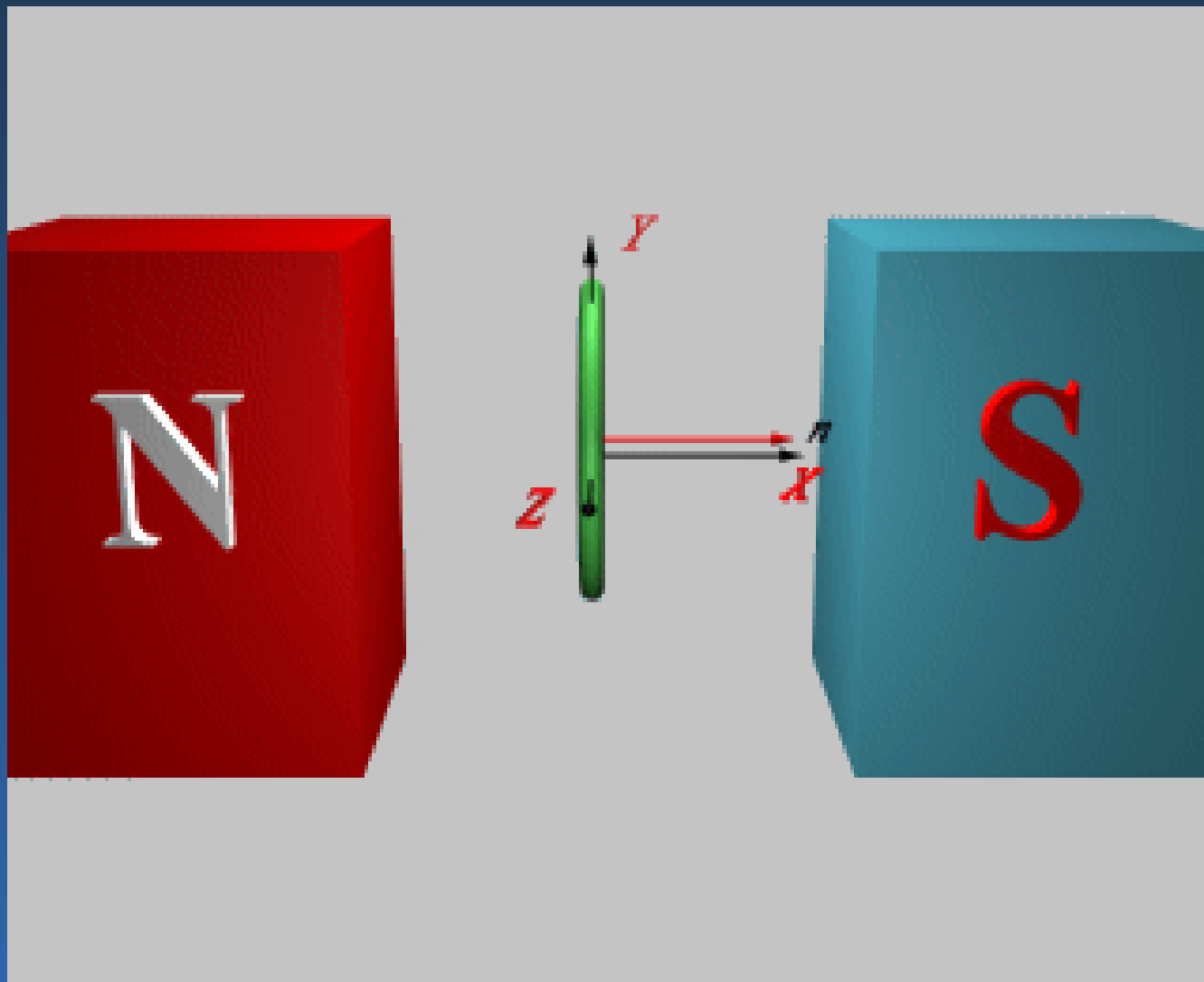


$$\sum \vec{F} = 0$$

$$\vec{M} = \vec{m} \times \vec{B}$$

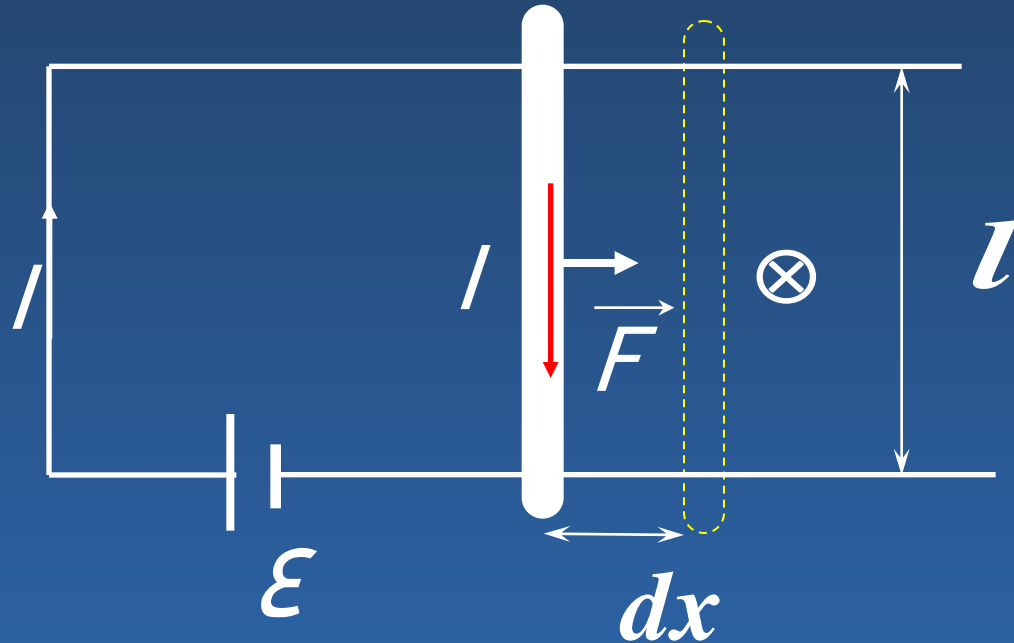
线圈磁矩： $\vec{m} = IS \vec{e}_n$

$$M = mB \sin \theta$$



上节回顾

磁力的功：载流直导线在匀强磁场中移动时



$$dW = Fdx = BIl dx = Id\Phi$$

$$W = \int Id\Phi$$

上节回顾

磁力的功：载流线圈在磁场中转动时

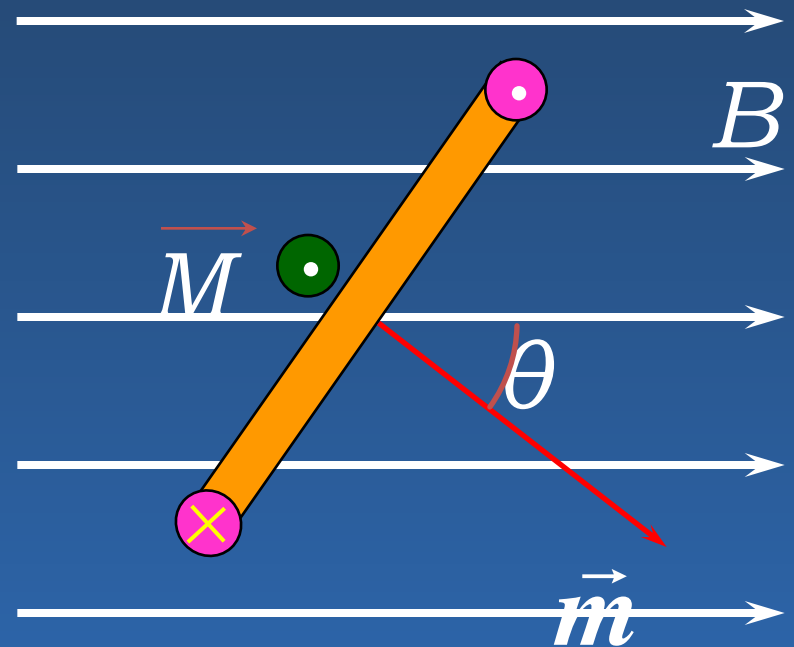
$$M = mB \sin \theta$$

$$dW = -M d\theta$$

$$= Id\Phi_m$$

若电流不变？，则有：

$$W = \int Id\Phi_m = I\Delta\Phi_m$$



第九章 磁介质



本章内容

§ 9.1 介质的磁化

§ 9.2 磁化强度和磁化电流

§ 9.3 磁介质中的磁场 磁场强度

§ 9.4 铁磁质

9.1 介质的磁化

一、磁介质定义

原子分子组成的任何物质

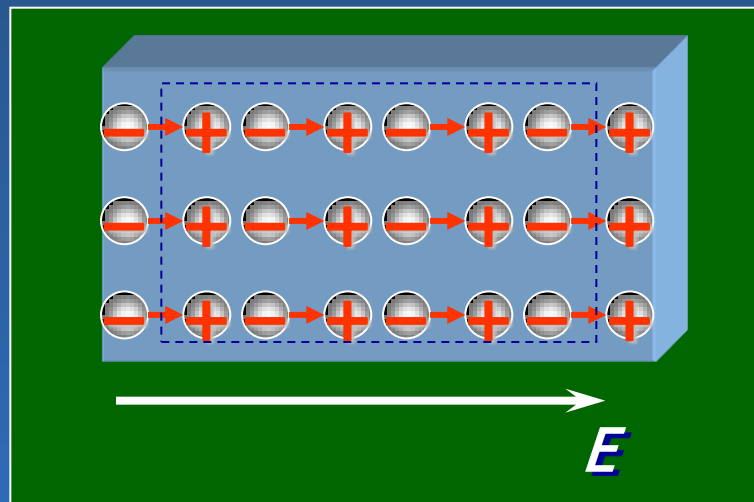
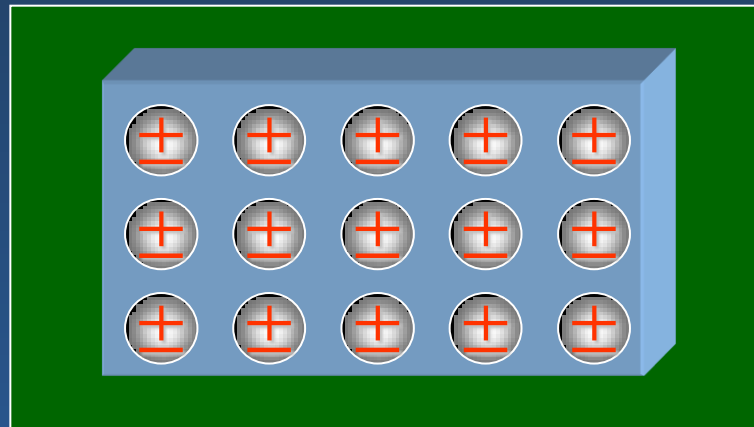
二、电介质极化回顾

9.1 介质的磁化

1、无极分子的位移极化

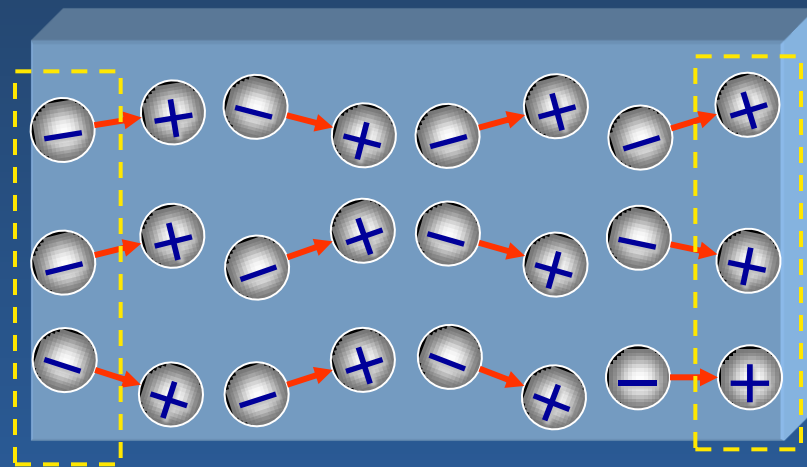
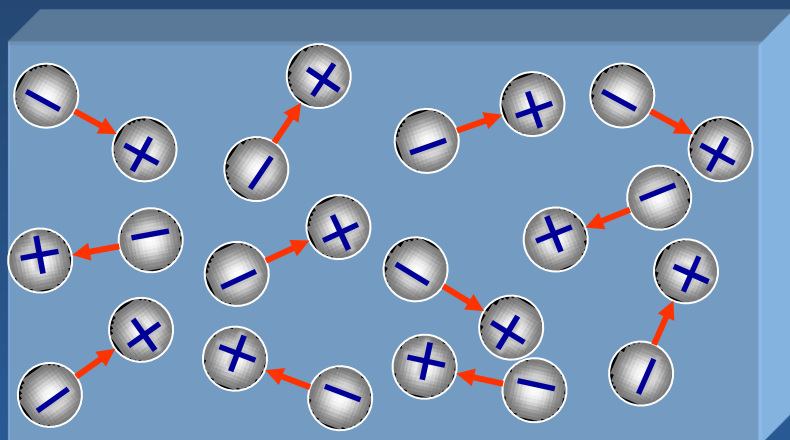
在外电场的作用下，介质表面产生电荷的现象称为电介质的极化。

无极分子在外场的作用下由于正负电荷发生偏移而产生的极化称为位移极化。

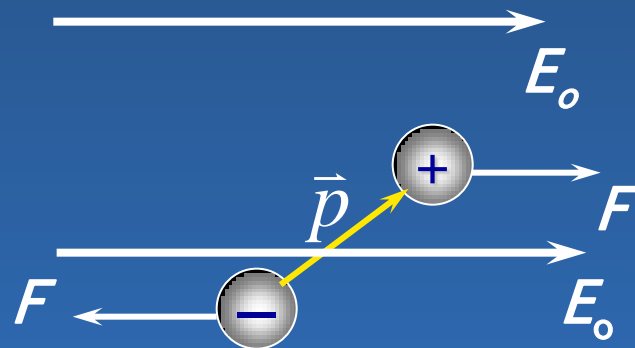


9.1 介质的磁化

2、有极分子的转向极化



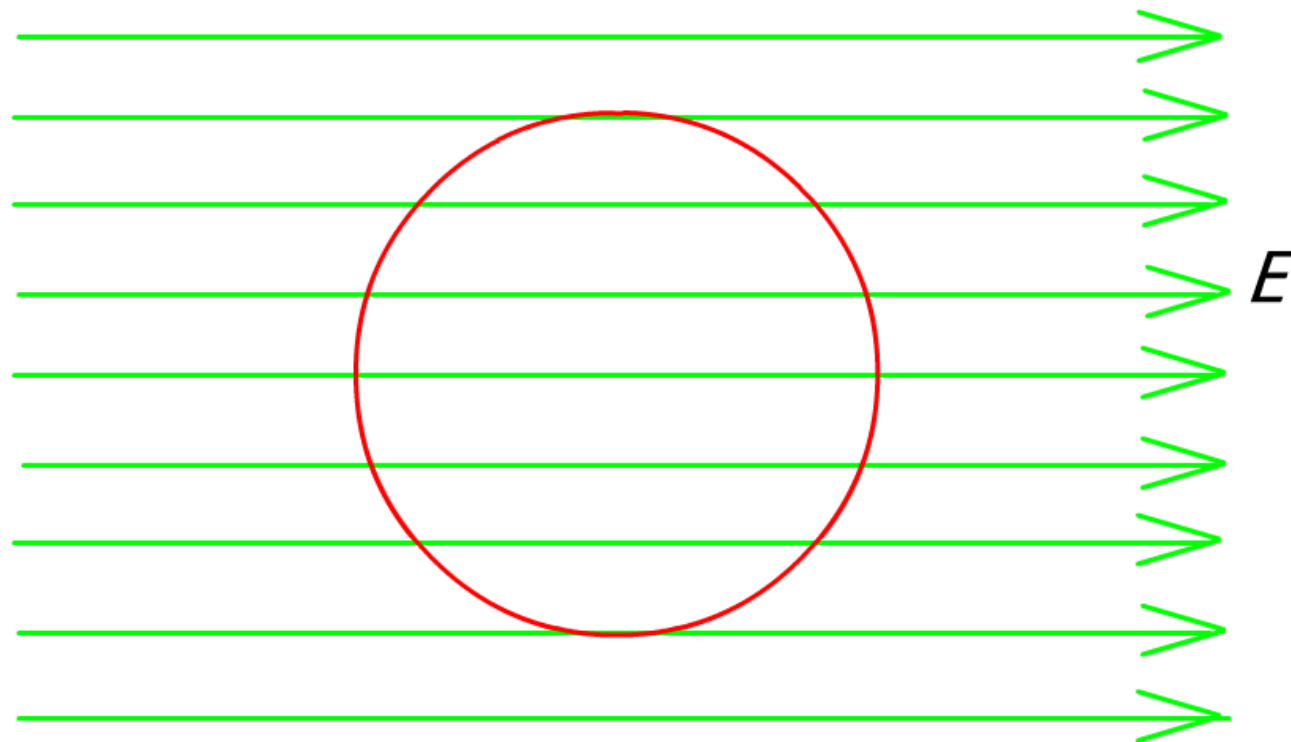
有极分子在外场中发生偏转而产生的极化称为转向极化。



$$\vec{M} = \vec{p}_e \times \vec{E}$$

9.1 介质的磁化

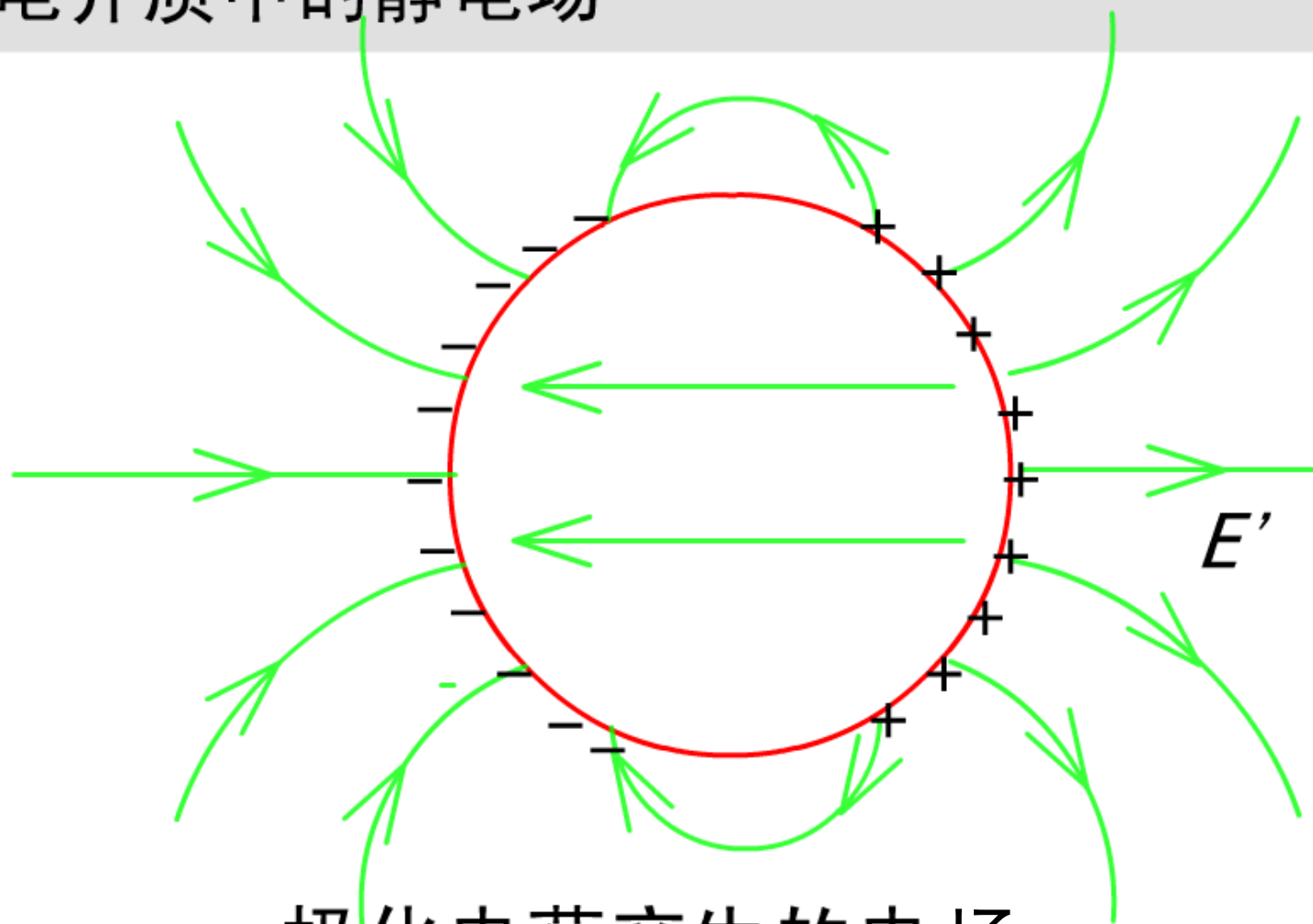
电介质中的静电场



外电场 E_0 加在电介质上

9.1 介质的磁化

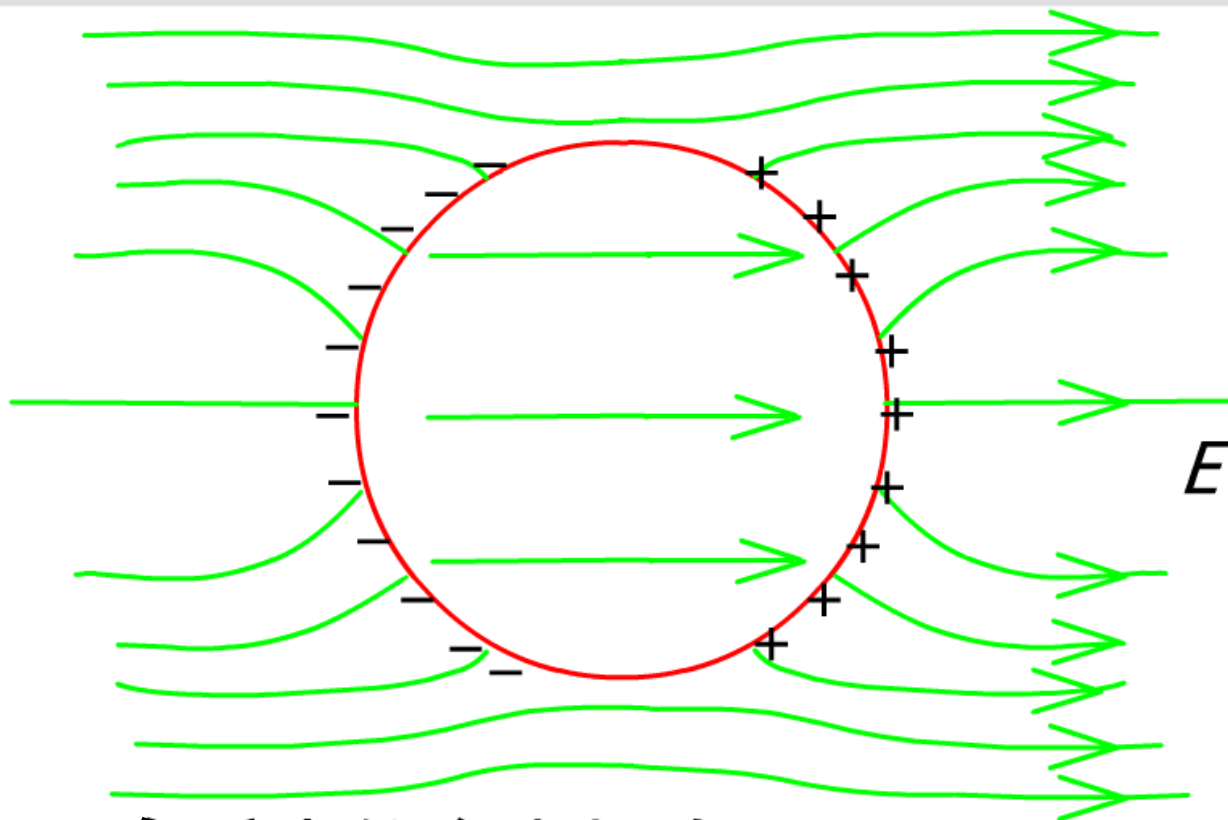
电介质中的静电场



极化电荷产生的电场

9.1 介质的磁化

电介质中的静电场



介质内的合电场为： $E=E+E'$

有介质时电场和磁场研究比较

1、极化强度和磁化强度

$$\vec{P} = \frac{\sum \vec{p}_e}{\Delta V} \qquad \vec{M} = \frac{\sum \vec{m}}{\Delta V}$$

2、极化电荷的和磁化电流

$$\sigma' = \vec{p} \cdot \vec{n}$$

$$\vec{j}_s = \vec{M} \times \vec{n}$$

$$q' = \oiint_S \vec{P} \cdot d\vec{S}$$

$$I_s = \oint_l \vec{M} \cdot d\vec{l}$$

有介质时电场和磁场研究比较

3、辅助物理量：电位移矢量和磁场强度

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad \vec{B} = \mu \vec{H}$$

4、介电常数和磁导率

$$\epsilon = \epsilon_0 (1 + \chi_e) = \epsilon_0 \epsilon_r$$

$$\mu = \mu_0 (1 + \chi_m) = \mu_0 \mu_r$$

5、电极化率和磁化率

$$\epsilon_r = 1 + \chi_e \quad \mu_r = 1 + \chi_m$$

有介质时电场和磁场研究比较

6. $\vec{D}, \vec{P}, \vec{E}$ $\vec{M}, \vec{H}, \vec{B}$ 之间的关系

$$\vec{D} = \vec{P} + \varepsilon_0 \vec{E} \qquad \vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M}$$

$$\vec{P} = \varepsilon_0 \chi_e \vec{E} \qquad \vec{M} = \chi_m \vec{H}$$

$$\vec{D} = \varepsilon_0 (1 + \chi_e) \vec{E} = \varepsilon \vec{E}$$

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

有介质时电场和磁场研究类比

7、有介质时高斯定理和安培环路定理

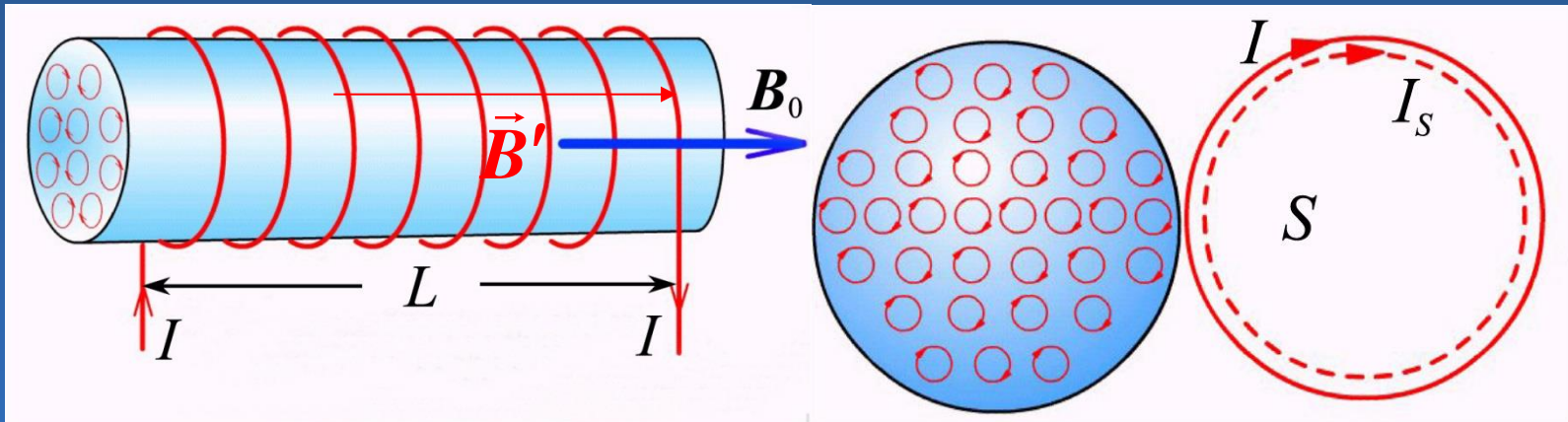
$$\oiint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{\sum_{\text{内}} (q + q')}{\epsilon_0} \quad \oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \sum_{\text{内}} (I + I_s)$$

$$\oiint_S \vec{D} \cdot d\vec{S} = \sum_{\text{内}} q \quad \oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum_{\text{内}} I$$

9.1 介质的磁化

三、介质的磁化

当一块介质放在外磁场中将会与磁场发生相互作用，介质表面会产生磁化电流，介质中出现附加磁场。这种现象叫“磁化”。



9.1 介质的磁化

设：外场的磁感应强度为 B_0

介质磁化后的附加磁场为 B'

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

相对磁导率： $\mu_r = \frac{B}{B_0}$

真空螺线管的磁场： $B_0 = \mu_0 nI$

介质螺线管的磁场： $B = \mu_r B_0 = \mu_0 \mu_r nI$

令： $\mu = \mu_0 \mu_r$ 称为磁导率

9.1 介质的磁化

四、磁介质分类

(1) 顺磁性介质：介质磁化后呈弱磁性。

附加磁场 B 与外场 B_0 同向。 $B > B_0$, $\mu_r > 1$

(2) 抗磁性介质：介质磁化后呈弱磁性。

附加磁场 B' 与外场 B_0 反向。 $B < B_0$, $\mu_r < 1$

(3) 铁磁性介质：介质磁化后呈强磁性。

附加磁场 B' 与外场 B_0 同向。 $B \gg B_0$, $\mu_r \gg 1$

(4) 完全抗磁体：（ $\mu_r = 0$ ）： $B = 0$ ，磁介质内的磁场等于零（如超导体）。

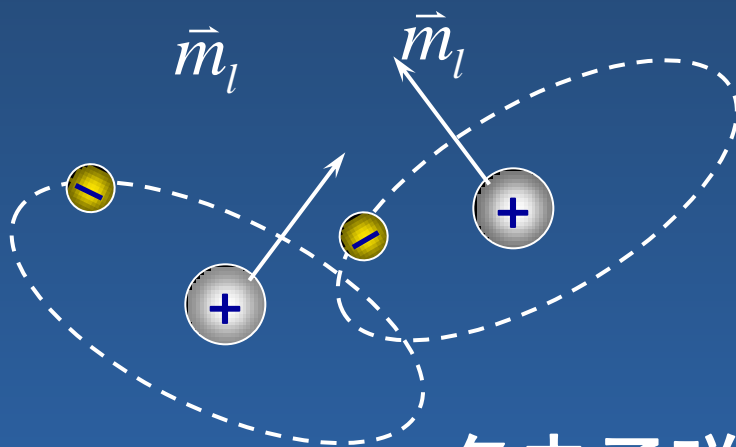
9.1 介质的磁化

磁介质种类	种 类	温度	相对磁导率
$\mu_r < 1$	铋 汞 铜 氢 (气)	293K 293K 293K	$1-16.6 \times 10^{-5}$ $1-2.9 \times 10^{-5}$ $1-1.0 \times 10^{-5}$ $1-3.89 \times 10^{-5}$
$\mu_r > 1$	氧 (液) 氧 (气) 铝 铂	90K 293K 293K 293K	$1+769.9 \times 10^{-5}$ $1+334.9 \times 10^{-5}$ $1+1.65 \times 10^{-5}$ $1+26.0 \times 10^{-5}$
$\mu_r \gg 1$	铸钢 铸铁 硅钢 坡莫合金		2.2×10^3 (最大值) 4×10^2 (最大值) 7×10^2 (最大值) 1×10^5 (最大值)
$\mu_r = 0$	汞 铌	小于4.15K 小于9.26K	0 0

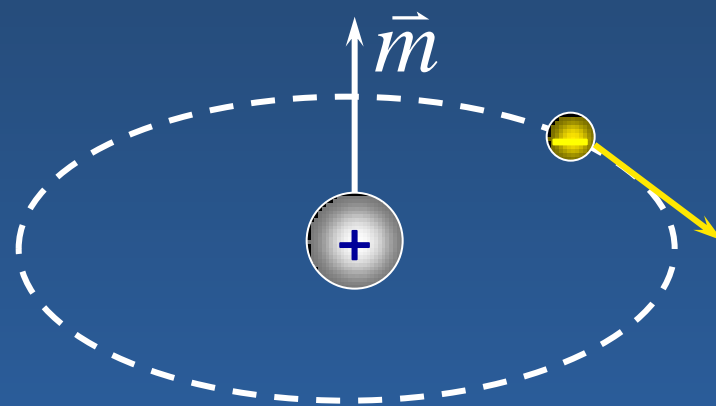
9.1 介质的磁化

三、介质的磁化

电子运动： 绕原子核的轨道运动+自旋运动



各电子磁矩



分子磁矩

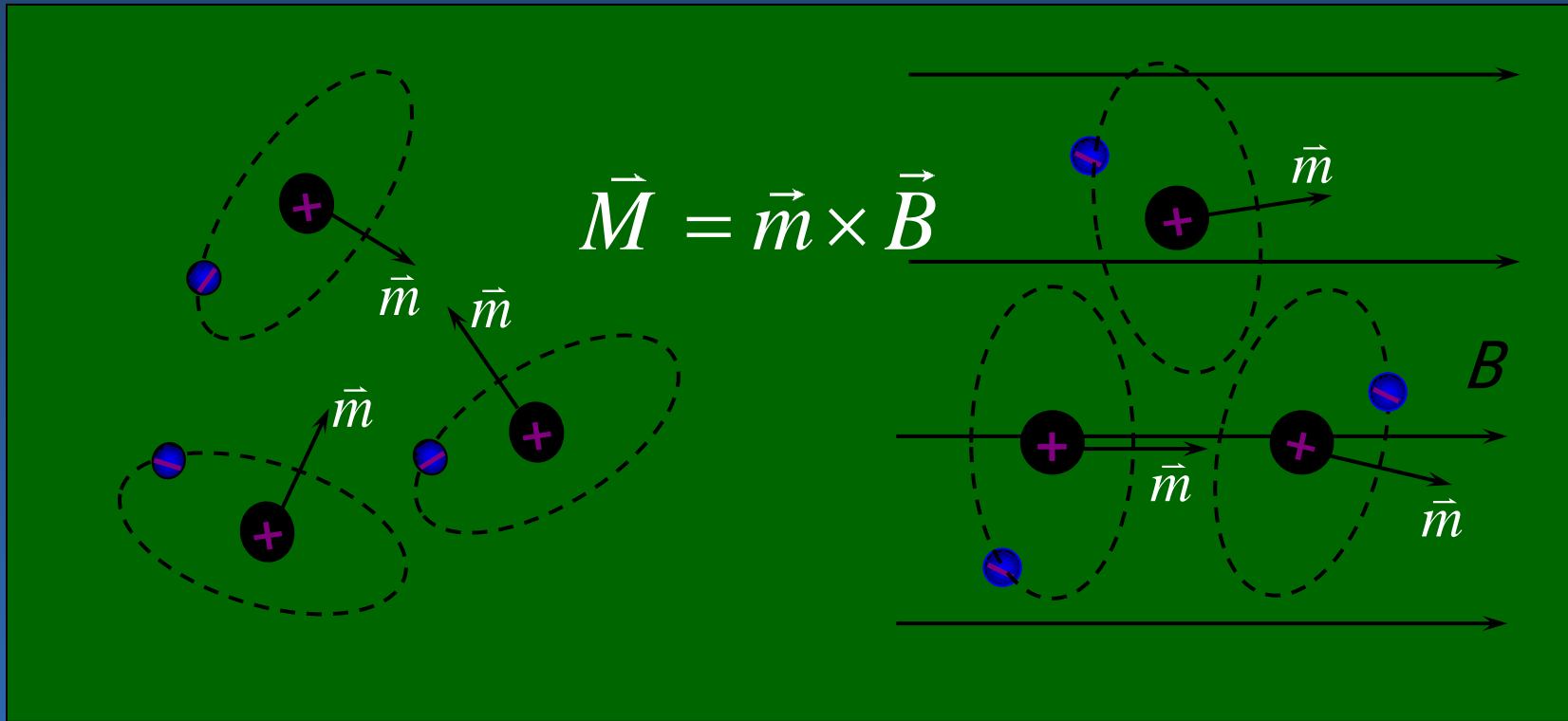
分子电流： 分子中各电子对外产生磁效应的总和，可等效于一个圆电流，称为“分子电流”。

分子磁矩： 分子电流的磁矩。

9.1 介质的磁化

顺磁质

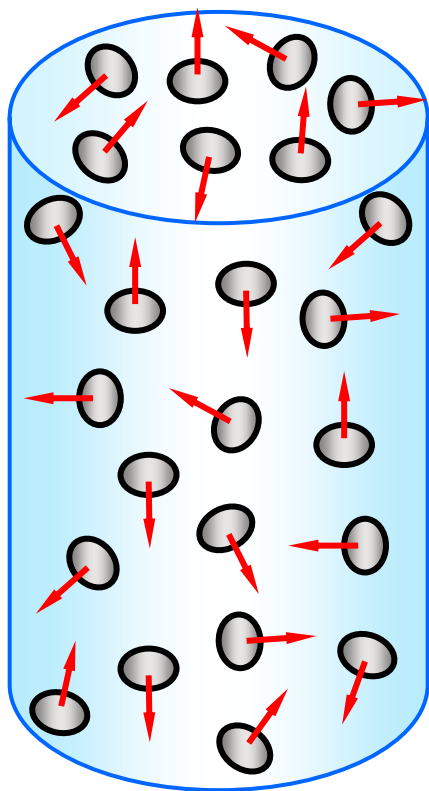
特点：存在分子固有磁矩



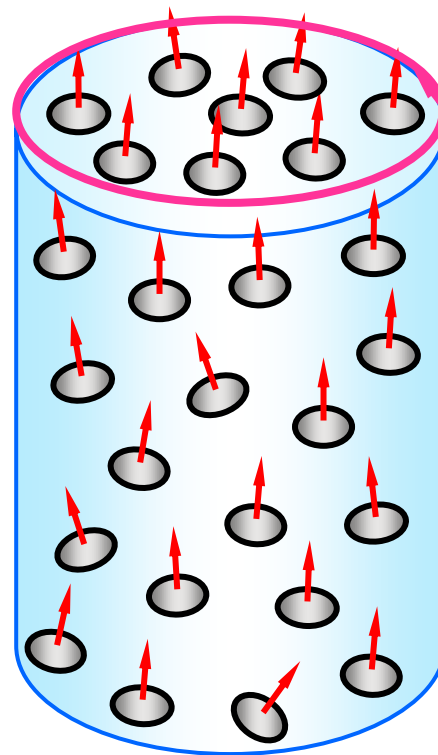
无外磁场： $\sum \vec{m}_i = 0$

外磁场中： $\sum \vec{m}_i \neq 0$

顺磁质的磁化



无外磁场

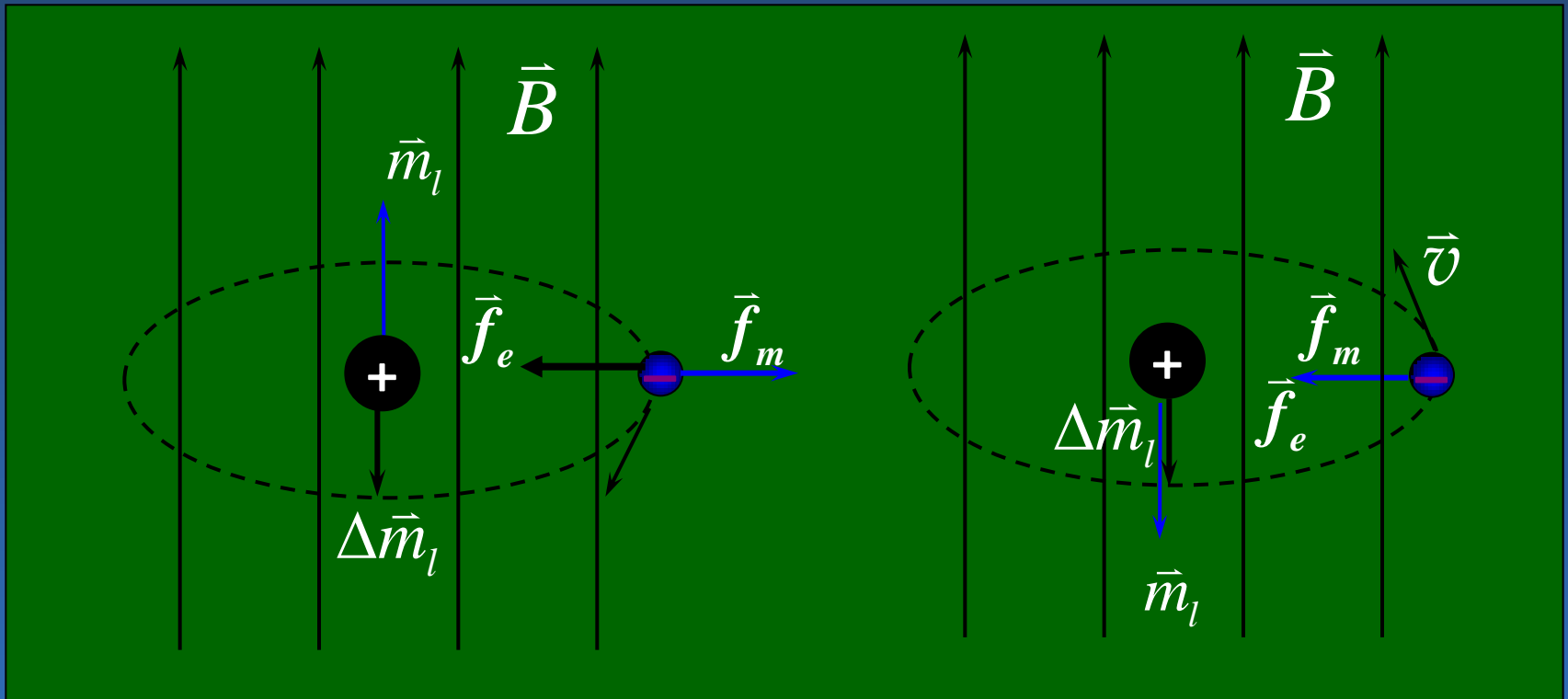


有外磁场

9.1 介质的磁化

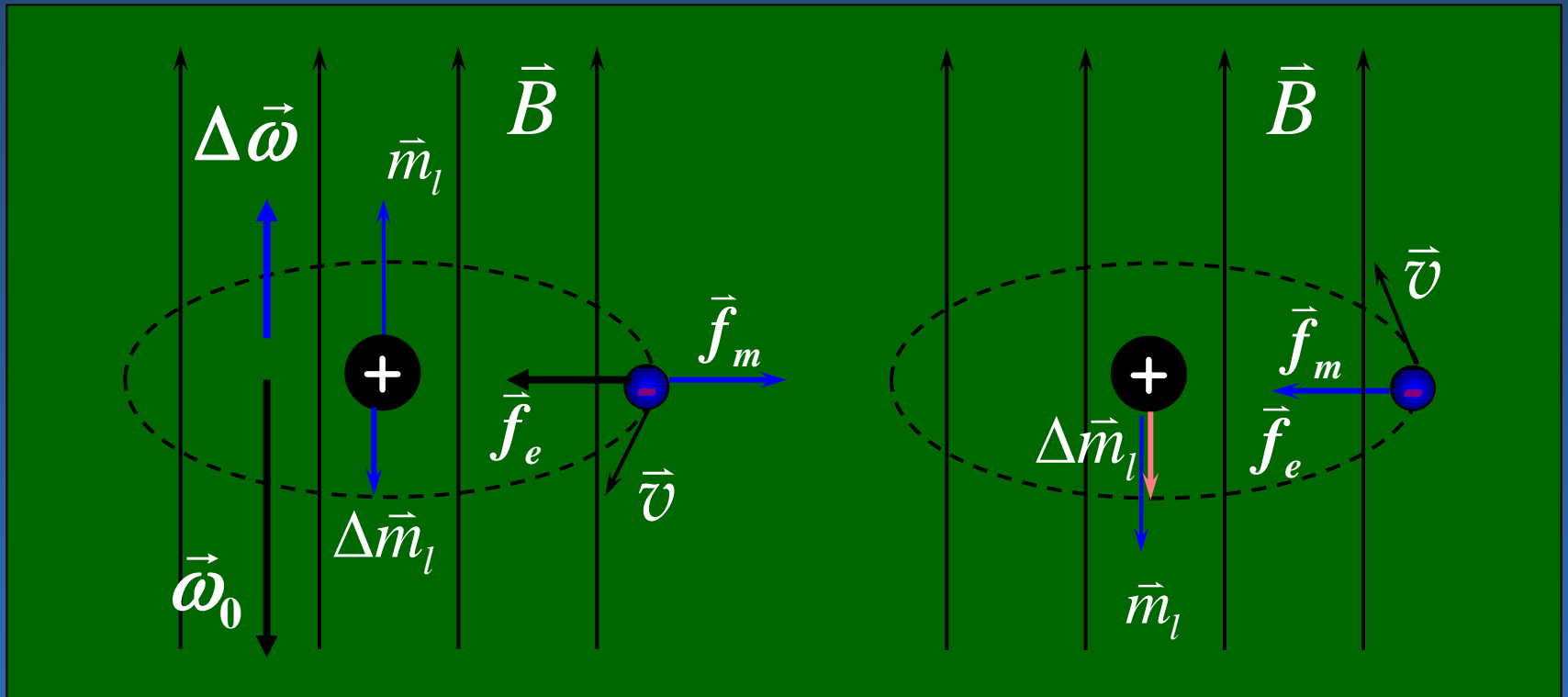
抗磁质

特点：分子固有磁矩等于零，因此不存在顺磁效应。



$$\vec{m}_l = -\frac{\vec{\omega}_0}{2\pi} e \pi r^2 = -\frac{\vec{\omega}_0}{2} e r^2 \quad f_e = m \omega_0^2 r$$

$$f_e - f_m = m \omega^2 r \quad \Delta \vec{m}_l = -\frac{\Delta \vec{\omega}}{2\pi} e \pi r^2 \parallel -\vec{B}$$



结论

附加电子磁矩 $\Delta\vec{m}_l$ 的方向总是和外磁场 \vec{B}_0 方向相反

。由于分子中每一个运动电子都要产生与外磁场反向的附加磁矩 $\Delta\vec{m}_l$ ，分子中各电子附加磁矩的矢量和即为分子的附加磁矩 $\Delta\vec{m}$ 。磁介质中大量分子的附加磁矩在宏观上对外显示出磁效应。这一磁效应与外磁场方向相反，我们把它称为“抗磁效应”。

9.1 介质的磁化



注意

在抗磁质和顺磁质中都会存在抗磁效应，只是顺磁质中的抗磁效应与顺磁效应相比较要小得多，因此在顺磁质中，抗磁效应被顺磁效应所掩盖。

9.2 磁化强度和磁化电流

一、磁化强度

为了反映磁化程度的强弱，引入“磁化强度矢量”

磁化强度：磁介质中某一点处单位体积内分子磁矩的矢量和。

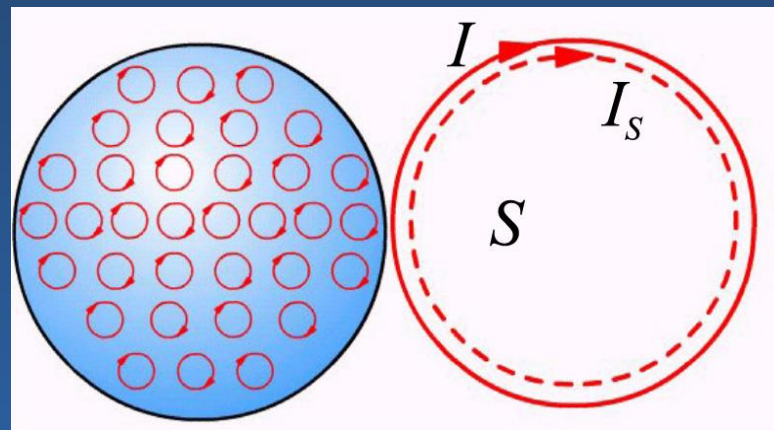
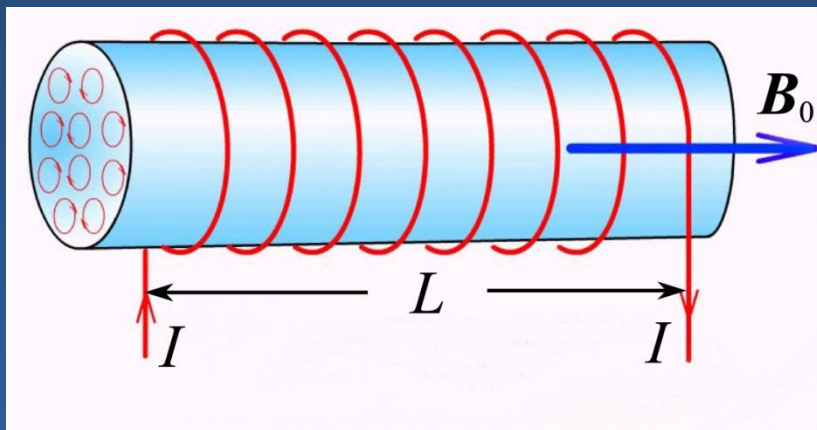
$$\vec{M} = \frac{\sum \vec{m}}{\Delta V} \quad \text{单位：} \text{A} \cdot \text{m}^{-1}$$

注意：磁化强度是空间坐标的矢量函数。当磁化强度矢量为恒矢量时，磁介质被均匀磁化。

9.2 磁化强度和磁化电流

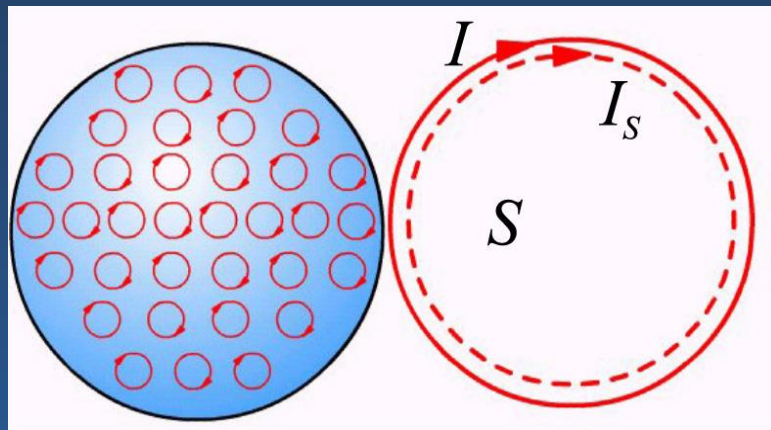
二、磁化电流

以长直螺线管为例：



介质磁化以后，由于分子磁矩的有序排列，其宏观效果是在介质横截面边缘出现环形电流，这种电流称为“磁化电流” (I_s)。

磁化电流与传导电流的区别



磁化电流是分子电流规则排列的宏观反映，并不伴随电荷的定向运动，不产生热效应。而传导电流是由大量电荷作定向运动而形成的。

9.2 磁化强度和磁化电流

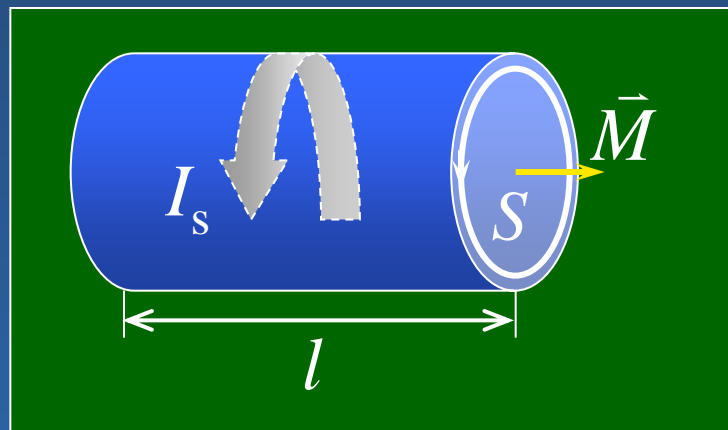
三、磁化强度与磁化电流的关系

磁化面电流密度：介质表面单位长度上的磁化电流

$$j_s = \frac{I_s}{l}$$

磁化强度矢量的大小与
磁化面电流密度的关系

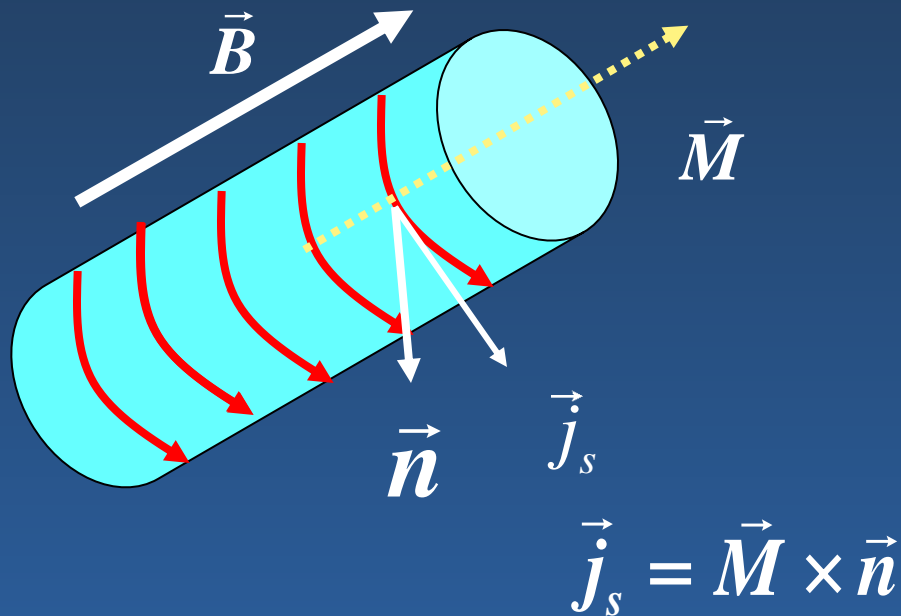
$$|\vec{M}| = \frac{|\sum \vec{m}|}{\Delta V} = \frac{j_s l S}{l S} = j_s$$



$$\sigma' = \vec{P} \cdot \vec{n} = P_n$$

$$\vec{j}_s = \vec{M} \times \vec{n}$$

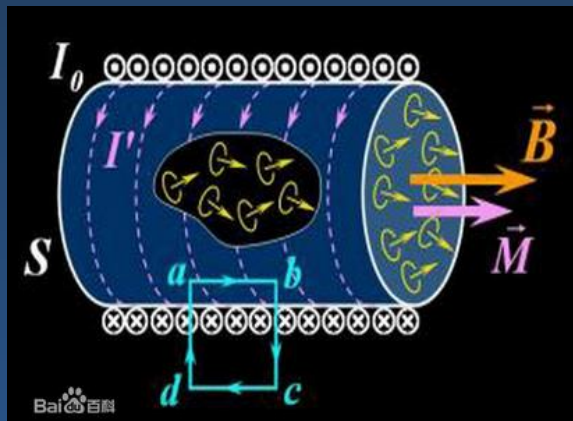
9.2 磁化强度和磁化电流



结论：当磁化强度与磁介质表面的法向垂直时，磁化强度在数值上等于磁化面电流密度，它们之间的关系由右手螺旋法则确定。

9.2 磁化强度和磁化电流

$$\vec{M} = \vec{j}_s$$



$$\oint_L \vec{M} \cdot d\vec{l} = \left(\int_a^b + \int_b^c + \int_c^d + \int_d^a \right) \vec{M} \cdot d\vec{l}$$

$$\int_b^c \vec{M} \cdot d\vec{l} = \int_d^a \vec{M} \cdot d\vec{l} = 0 \quad \int_c^d \vec{M} \cdot d\vec{l} = 0$$

$$\oint_L \vec{M} \cdot d\vec{l} = \int_a^b \vec{M} \cdot d\vec{l} = \int_a^b j_s dl = I_s$$

结论：磁化强度 \vec{M} 沿闭合回路的环流，等于穿过回路所包围面积的磁化电流。

9.3 磁介质中的磁场 磁场强度

一、有介质存在时的高斯定理

磁介质在磁化后，由于外磁场 \vec{B}_0 和附加磁场 \vec{B}' 都属于涡旋场。因此，在有磁介质存在时，磁场中的高斯定理仍成立。

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

9.3 磁介质中的磁场 磁场强度

二、有介质存在时的安培环路定理

$$\begin{aligned}\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} &= \mu_o (\sum I + I_s) \\ &= \mu_o \left(\sum I + \oint_L \vec{M} \cdot d\vec{l} \right)\end{aligned}$$

$$\oint_L \left(\frac{\vec{B}}{\mu_o} - \vec{M} \right) \cdot d\vec{l} = \sum I$$

定义 “磁场强度”

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

9.3 磁介质中的磁场 磁场强度

二、有介质存在时的安培环路定理

$$\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum I_i \quad \text{单位: } \text{A} \cdot \text{m}^{-1}$$

结论：磁场强度 \vec{H} 沿任一闭合回路的环路积分，等于闭合回路所包围并穿过的传导电流的代数和（在形式上与磁介质中的磁化电流无关）。

注意： \vec{H} 只是辅助量

实验指出： $\vec{M} = \chi_m \vec{H}$

系数 χ_m 称为“磁化率”

9.3 磁介质中的磁场 磁场强度

二、有介质存在时的安培环路定理

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

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

令： $\mu_r = (1 + \chi_m)$ 称为磁介质的 “相对磁导率”

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

令： $\mu = \mu_0 \mu_r$ 称为磁导率 $\vec{B} = \mu \vec{H}$

9.3 磁介质中的磁场 磁场强度

(1) 在真空中: $\vec{M} = 0$ $\chi_m = 0$ $\mu_r = 1$

(2) 在顺磁质中: $\chi_m > 0$ $\mu_r > 1$

(3) 在抗磁质中: $\chi_m < 0$ $\mu_r < 1$

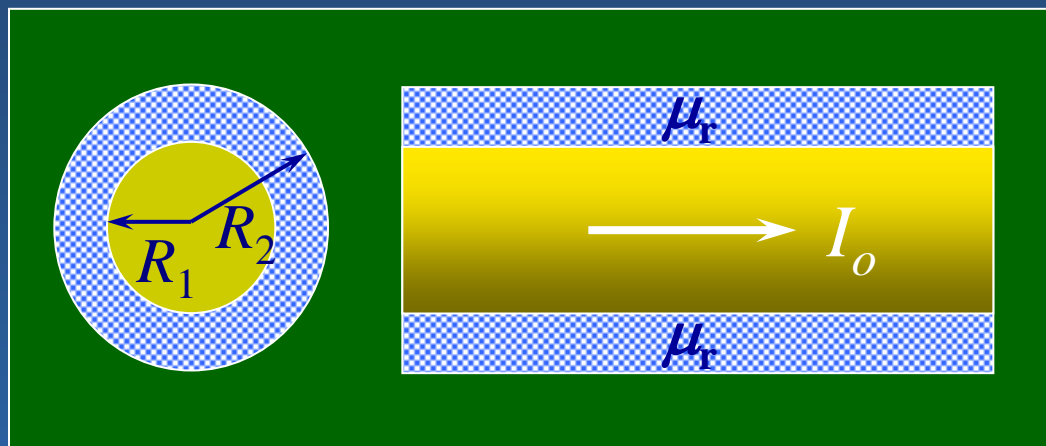
例. 一半径为 R_1 的无限长圆柱形直导线，外面包一层半径为 R_2 ，相对磁导率为 μ_r 的圆筒形磁介质。通过导线的电流为 I_0 。求磁介质内外磁场强度和磁感应强度的分布。

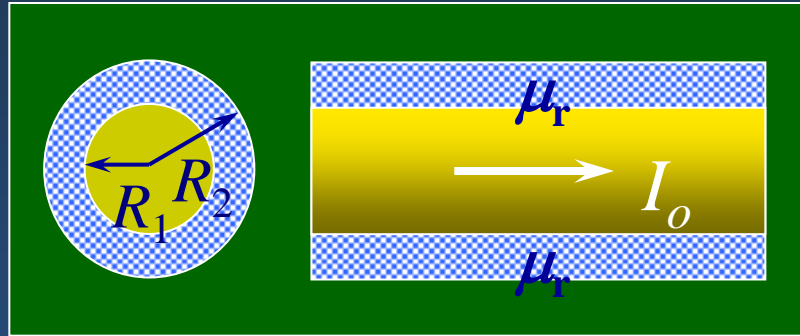
解： $0 < r < R_1$

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

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

$$B = \mu_o H = \frac{\mu_o I r}{2\pi R_1^2}$$





$$R_1 < r < R_2 \quad \oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = H \cdot 2\pi r = I$$

$$H = \frac{I}{2\pi r} \quad B = \mu_o \mu_r H = \frac{\mu_o \mu_r I}{2\pi r}$$

$$R_2 < r < \infty \quad H = \frac{I}{2\pi r} \quad B = \mu_o H = \frac{\mu_o I}{2\pi r}$$

9.4 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，因此用途广泛。铁、钴、镍以及许多合金都属于铁磁质。



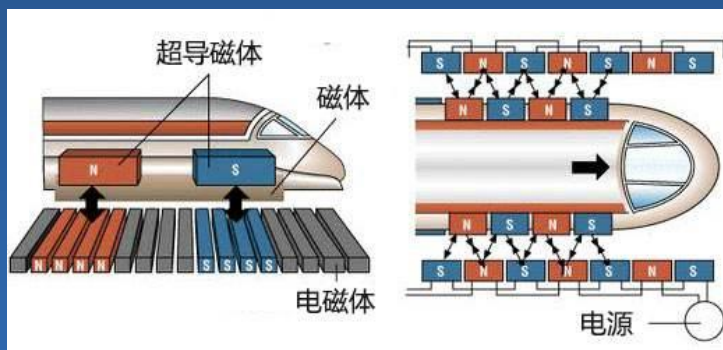
9.4 铁磁质



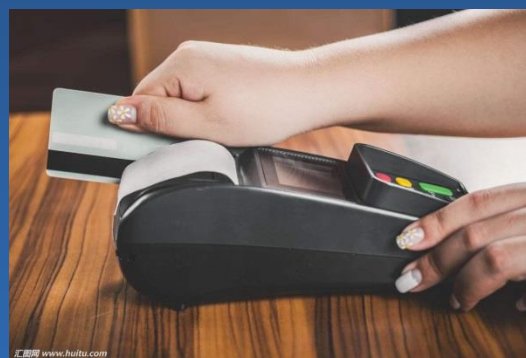
指南针



图书馆防盗磁条



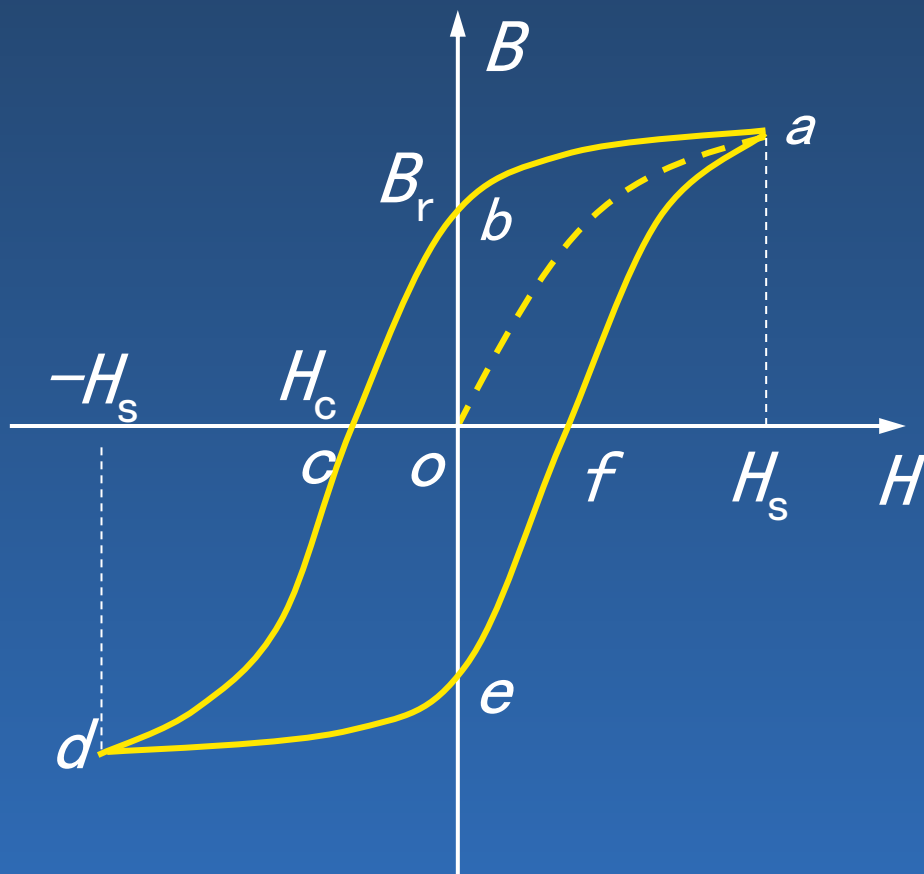
磁悬浮列车



存储

9.4 铁磁质

一、磁滞回线



Oa : 起始磁化曲线

H_s : 饱和磁场强度

B_r : 剩余磁感应强度

H_c : 矫顽力

9.4 铁磁质

二、铁磁质的特点

- 1、能产生非常强的附加磁场 B' 甚至是外磁场的千百倍。而且与外场同方向。
- 2、磁滞现象， B 的变化落后于 H 的变化。
- 3、 B 和 H 呈非线性关系， μ 不是一个恒量。
- 4、高 μ 值。
- 5、存在居里点 铁磁质转化为顺磁质的温度

9.4 铁磁质



玛丽·居里和皮埃尔·居里

1895年，皮埃尔居里发现了顺磁体的磁化率正比于其绝对温度，即居里定律。为了纪念他在磁性方面研究的成就，后人将铁磁性转变为顺磁性的温度称为居里温度或居里点。

铁的居里点： $T = 1040\text{K}$

镍的居里点： $T = 631\text{K}$

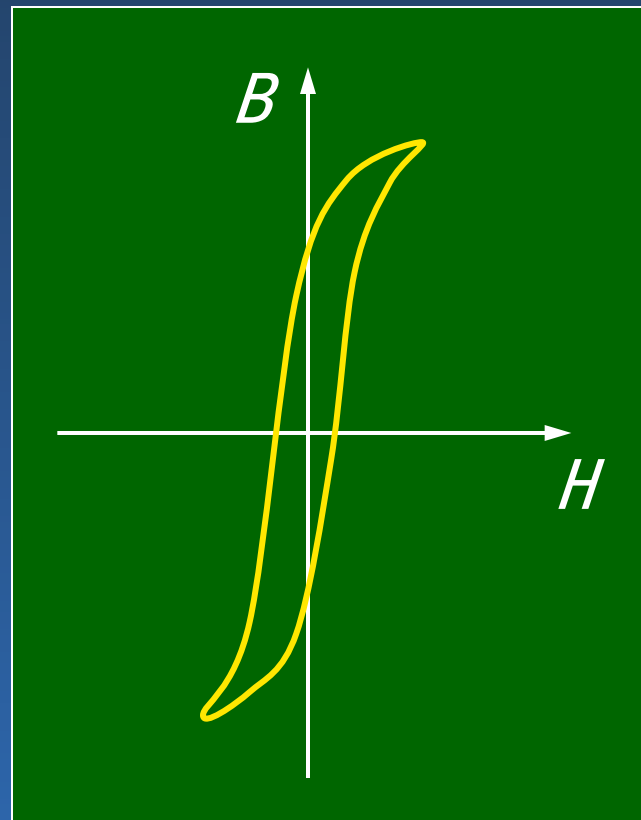
9.4 铁磁质

三、铁磁质的分类

软磁材料

磁滞回线细而窄，矫顽力小。

磁滞损耗小，容易磁化，容易退磁，适用于交变磁场。如制造电机，变压器等的铁芯。



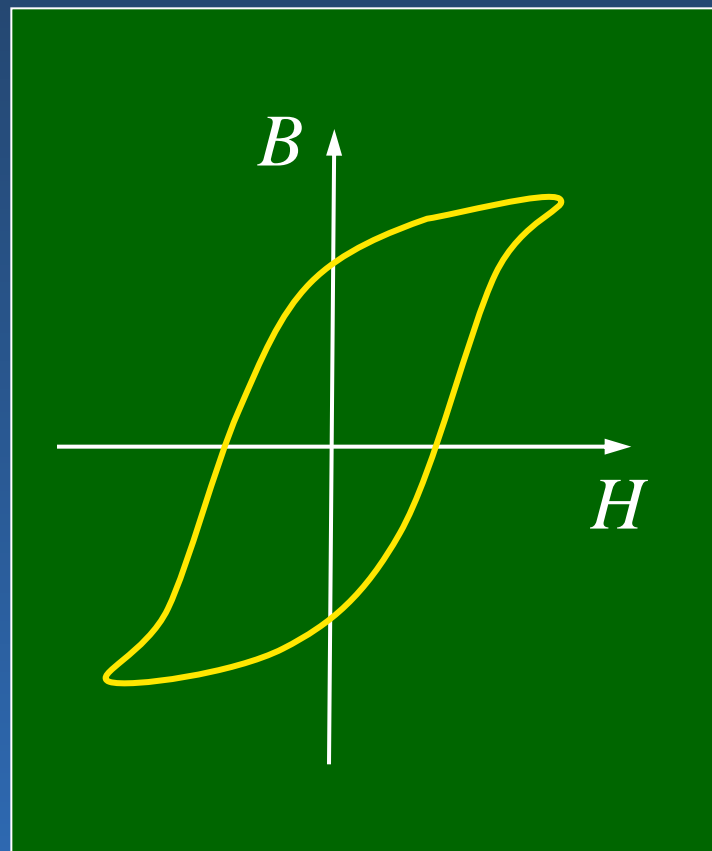
9.4 铁磁质

三、铁磁质的分类

硬磁材料

磁滞回线较宽，剩余磁感应强度和矫顽力都比较大。

适合于制造永磁体



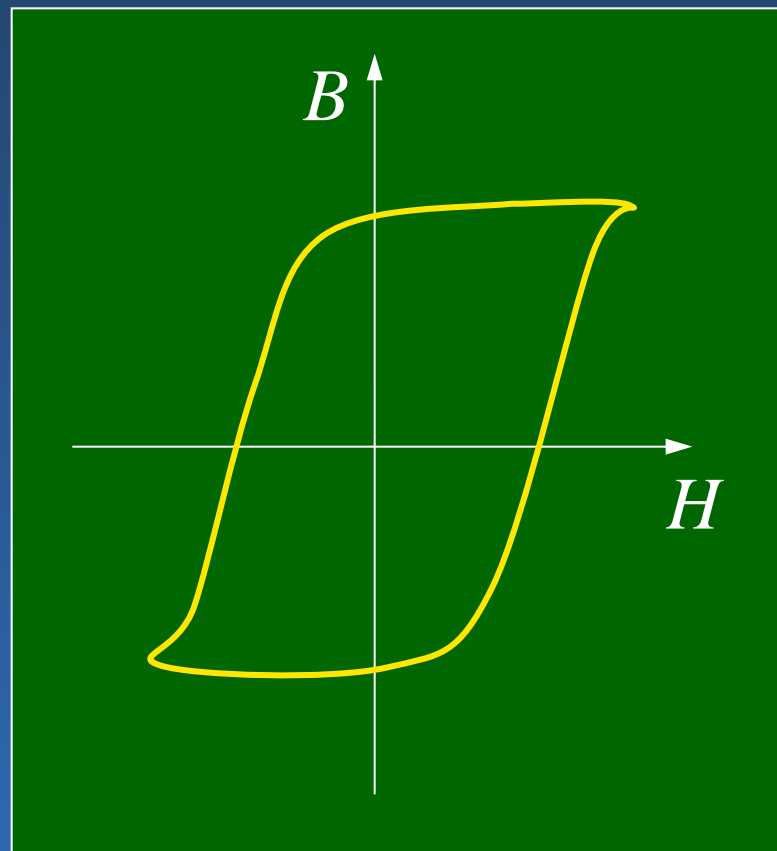
9.4 铁磁质

三、铁磁质的分类

矩磁材料

磁滞回线接近于矩形，
剩余磁感应强度 B_r 接近
于饱和磁感应强度 B_s 。

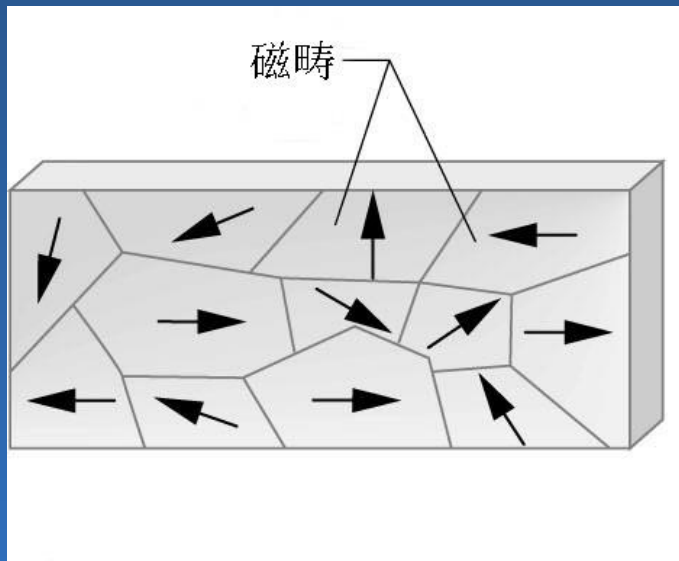
适合于制作记录磁带及
计算机的记忆元件。



9.4 铁磁质

四、磁畴

根据现代理论，铁磁质相邻原子的电子之间存在很强的“交换耦合作用”，使得在无外磁场作用时，电子自旋磁矩能在小区域内自发地平行排列，形成自发磁化达到饱和状态的微小区域。这些区域称为“磁畴”。



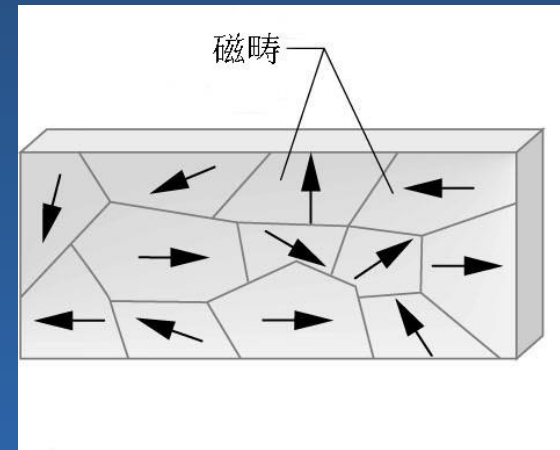
9.4 铁磁质

四、磁畴

用磁畴理论可以解释铁磁质的磁化过程、磁滞现象、磁滞损耗以及居里点。

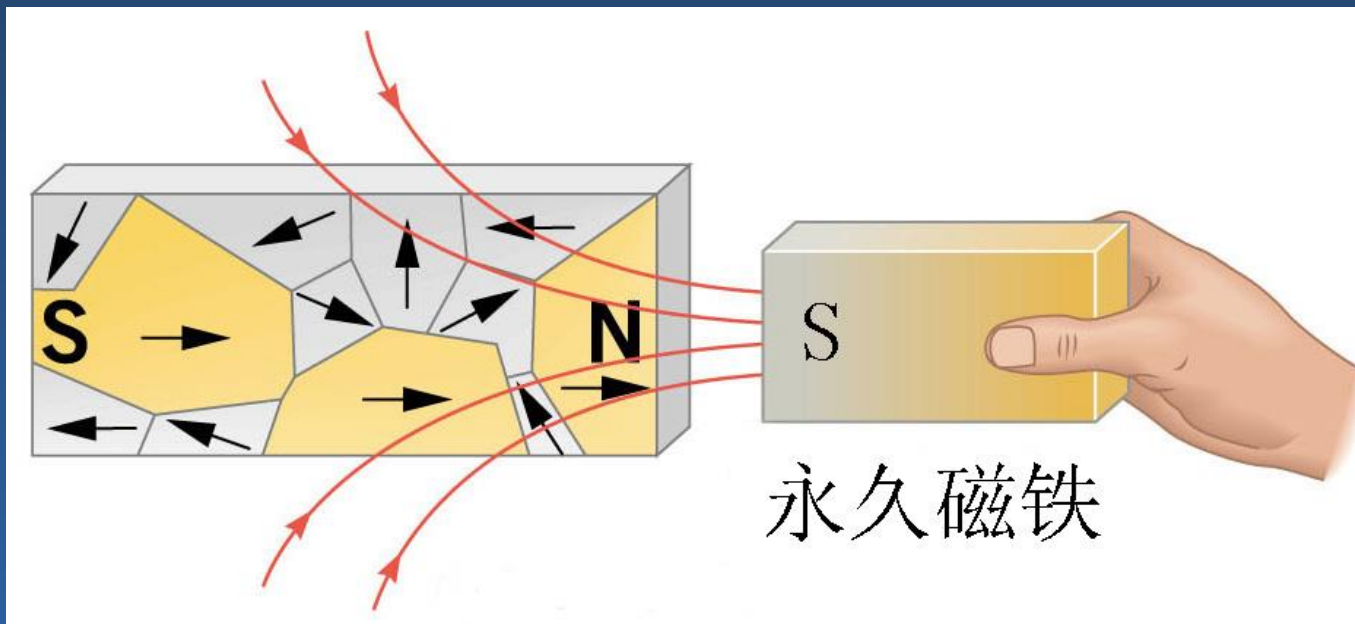
磁畴大小： $10^{-10} \sim 10^{-8} \text{ m}^3$

每个磁畴所含分子数： $10^{17} \sim 10^{21}$



9.4 铁磁质

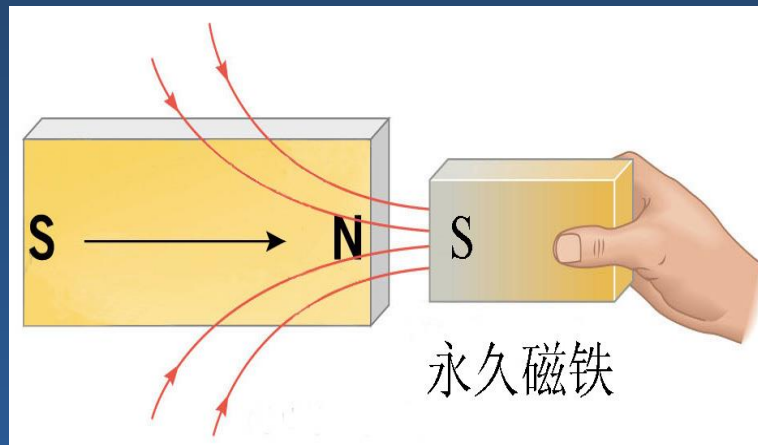
四、磁畴



铁磁质在外磁场中的磁化过程主要为畴壁的移动和磁畴内磁矩的转向。

9.4 铁磁质

四、磁畴



随着外磁场的增大，自发磁化方向逐渐转向外磁场方向（磁畴转向），直到所有磁畴都沿外磁场方向整齐排列时，铁磁质就达到磁饱和状态。