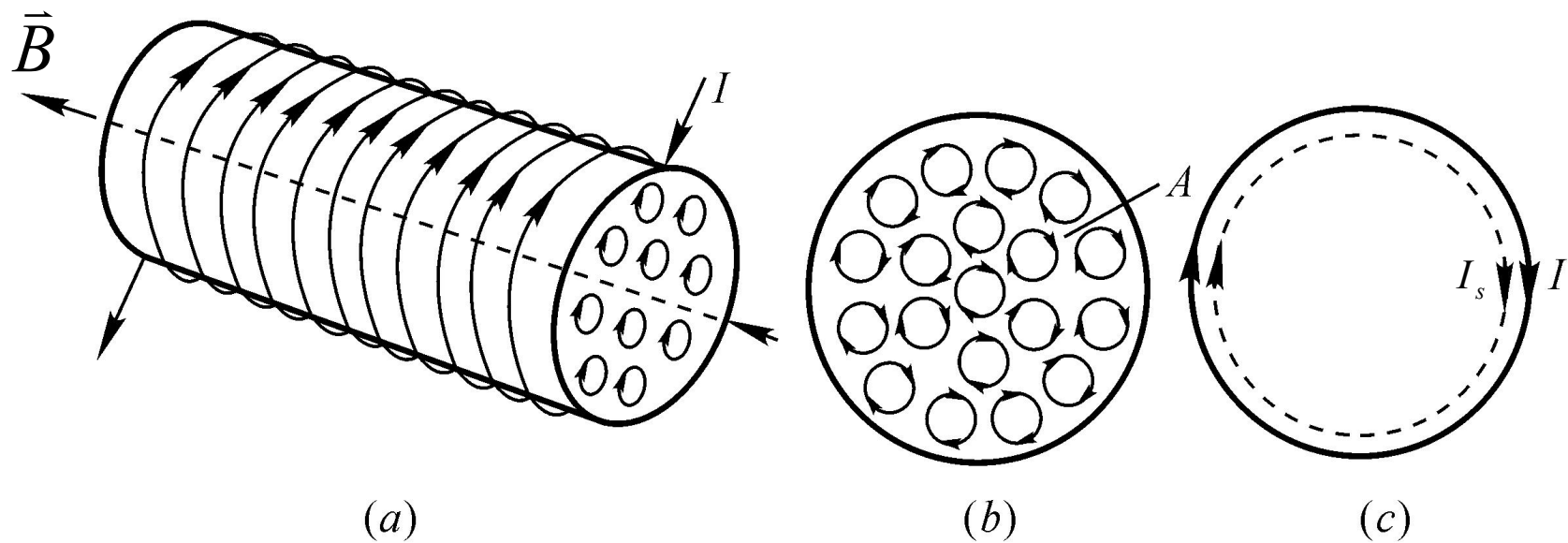


第15章 物质的磁性



本章主要内容

§ 15.1 物质对磁场的影响

§ 15.2 原子的磁矩

§ 15.3 物质的磁化

§ 15.4 H 矢量及其环路定理

§ 15.5 铁磁质

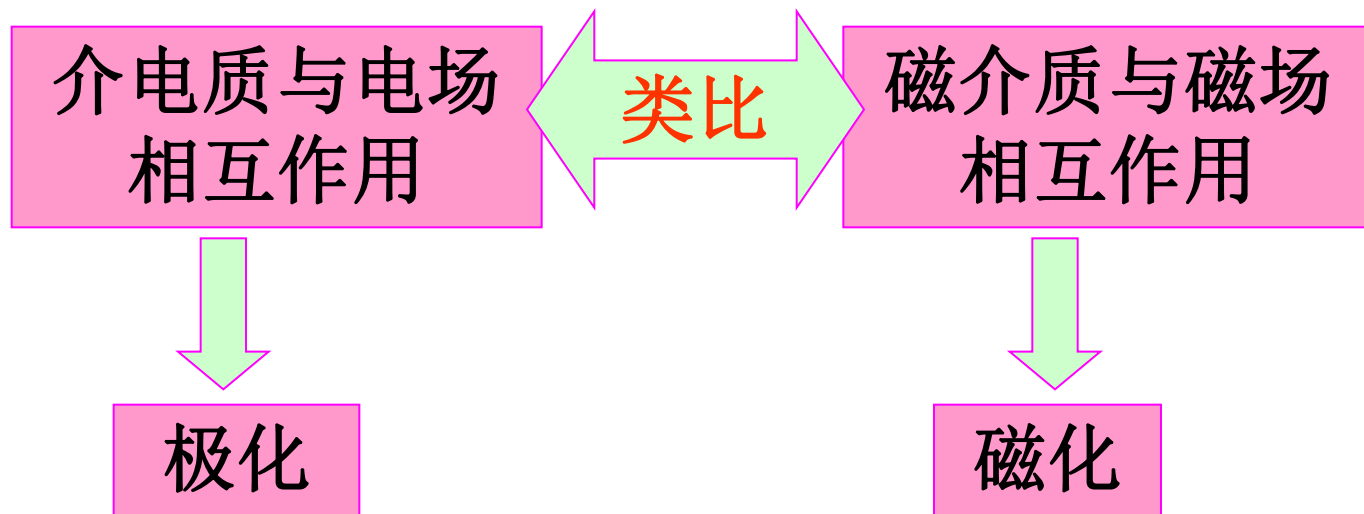
§ 15.6 简单磁路

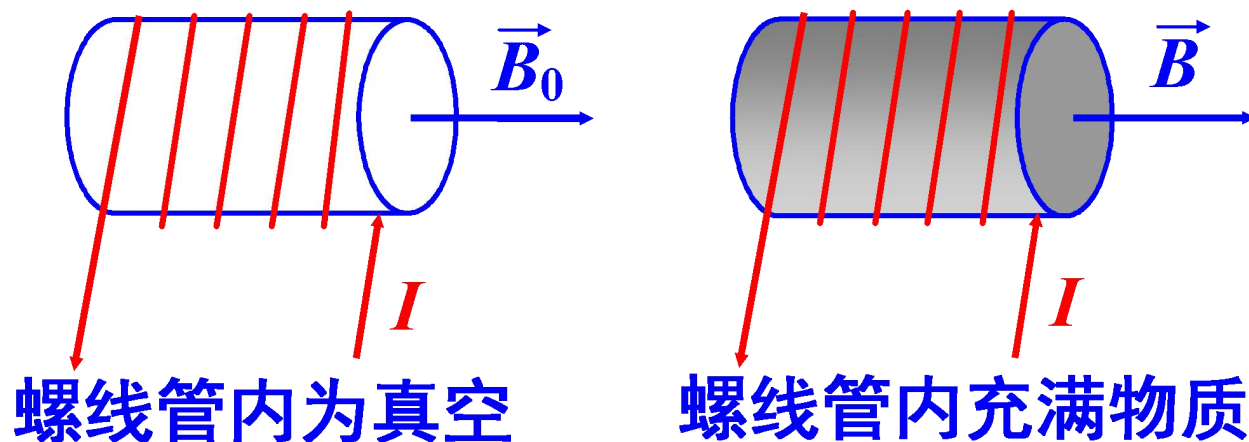
§ 15.1 物质对磁场的影响

1. 磁介质及磁化

(1) 磁介质：在磁场作用下能发生变化并能反过来影响磁场的媒质称为**磁介质**（magnetic dielectric）；

(2) 磁化：磁介质在磁场作用下所发生的**变化**叫做**磁化**（magnetism）。





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

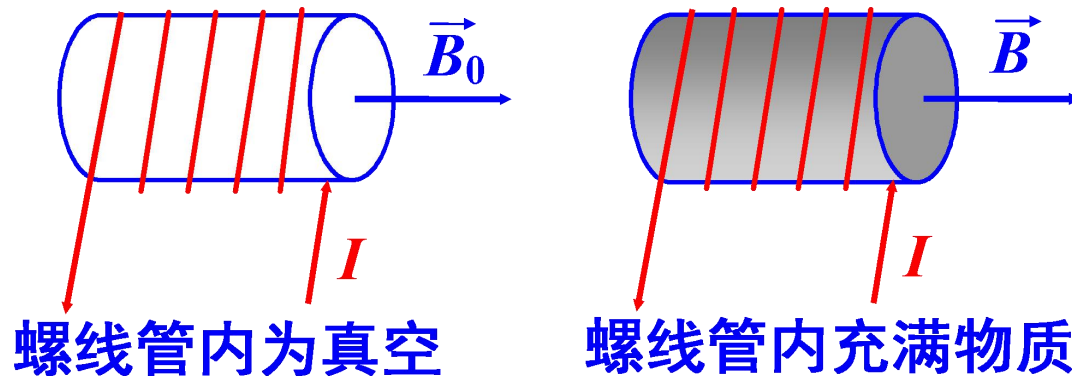
磁介质中的
总磁感强度

真空中的磁
感应强度

介质磁化后的附
加磁感应强度

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

μ_r — 相对磁导率 (无单位的纯数)



真空中，长直螺线管： $B_0 = \mu_0 nI$

介质中，长直螺线管： $B = \mu_r B_0 = \mu_r \mu_0 nI = \mu nI$

μ ：磁介质的磁导率（H/m）

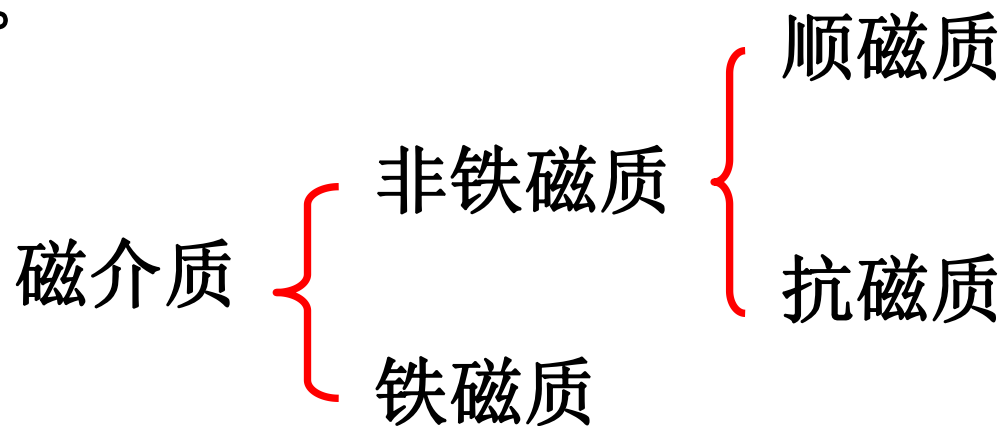
2. 磁介质的分类

根据磁介质在磁场中出现的磁化情况的不同，可将磁介质进行分类。

(1) 顺磁质 (paramagnet) : $\vec{B} > \vec{B}_0$, 即 $\mu_r > 1$
例如锰、铬、铂、氮等。

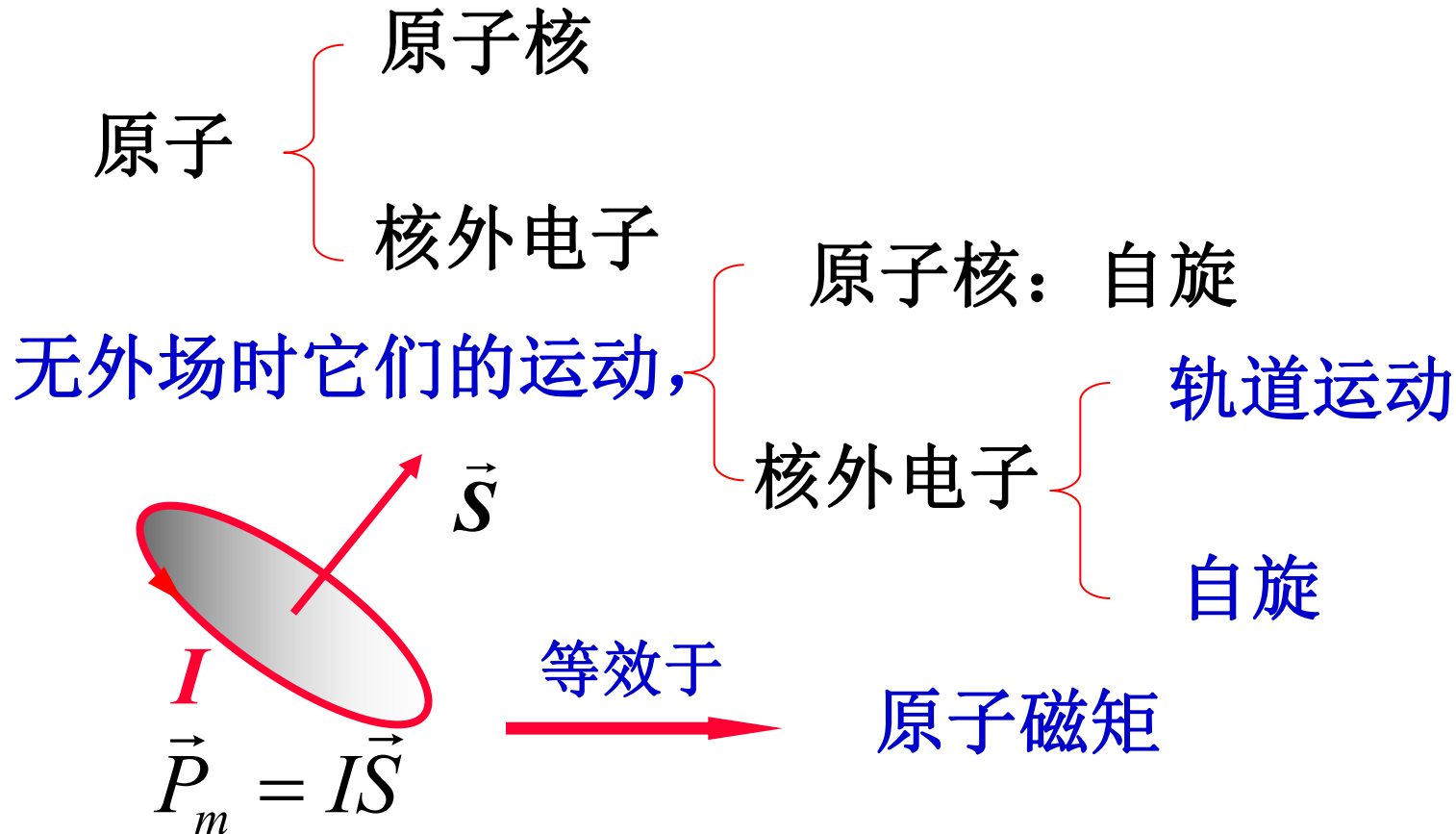
(2) 抗磁质 (diamagnet) : $\vec{B} < \vec{B}_0$, 即 $\mu_r < 1$
例如水银、铜、铋、氯、氢、银、金、锌等。

(3) 铁磁质 (ferromagnet) : $\vec{B} \gg \vec{B}_0$, 即 $\mu_r \gg 1$
例如铁、镍、钴、以及这些金属的合金, 还有铁氧体等。



§ 15.2 原子的磁矩

1、分子电流与分子磁矩



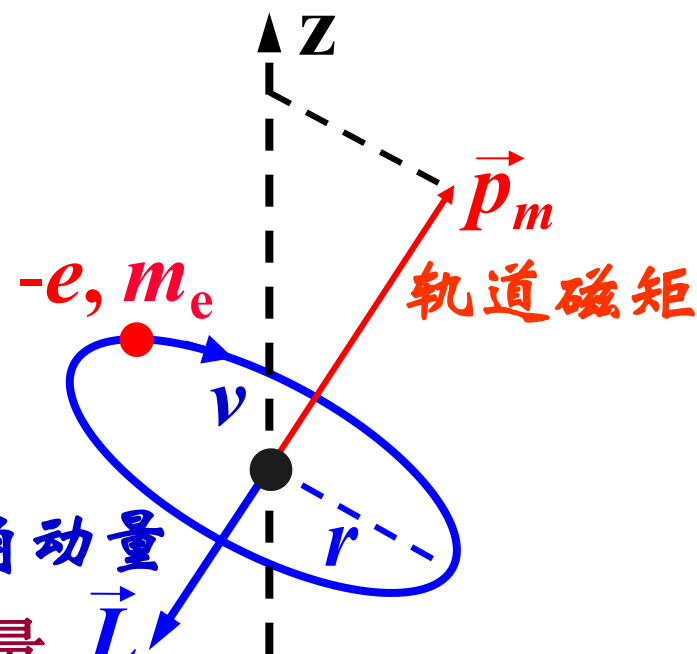
• 电子轨道磁矩的估算:

$$P_m = IS = \frac{e}{2\pi r/v} \cdot \pi r^2 = \frac{evr}{2}$$

$$P_m = \frac{e}{2m_e} \cdot m_e vr$$

$$\vec{P}_m = -\frac{e}{2m_e} \cdot \vec{L}$$

L : 轨道角动量



注: 角动量是量子化的, 其取值只能是普朗克常数的整数或半奇数倍。 $\hbar = 1.05 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$

$$L = m_l \hbar, \quad m_l = 0, 1, 2, 3 \dots$$

因此, 磁矩也是量子化的。

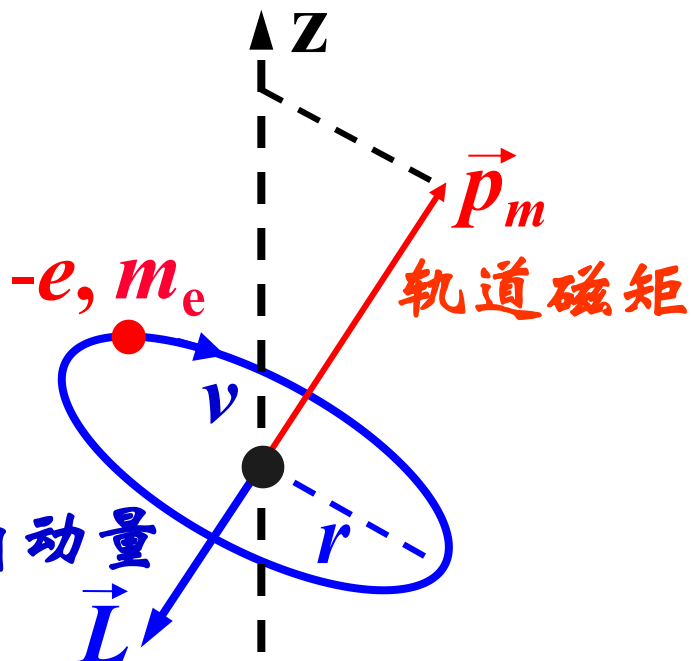
• 电子自旋磁矩

$$P_{mB} = \frac{e}{m_e} s$$

s : 自旋角动量

• 原子核的磁矩可以忽略。

轨道角动量



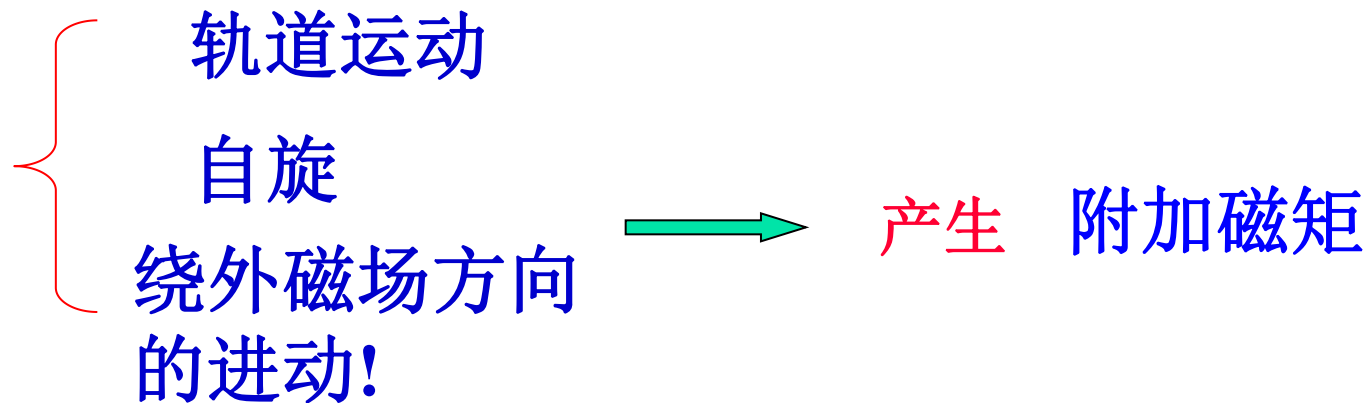
分子中各个电子对外界所产生的磁效应的总合，可用一个等效的圆电流表示，统称为**分子电流**；

一个分子的**磁矩**是各原子中电子轨道磁矩和自旋磁矩的矢量和，称为**分子磁矩**。

2、物质的抗磁性（一切磁介质的共性）

起因： 在外磁场作用下，电子的轨道运动、自旋运动以及原子核的自旋运动都会发生变化

有外场时核外电子的运动，



分子中各个电子所产生的附加磁矩的总合，合成一个分子的附加磁矩 ΔP_m （感生磁矩）

产生



与外磁场相反的附加磁场 \vec{B}'

-----物质抗磁性的内因

附加磁矩 ΔP_m 的大小与外磁场成正比

3、顺磁质和抗磁质的磁化

(1) 磁介质分子为两类：

第一类：分子中各电子磁矩不完全抵消，整个分子存在固有磁矩， $\vec{P}_{m\text{分子}} \neq 0$ （有矩分子）

第二类：分子中各电子磁矩相互抵消，整个分子固有磁矩为零， $\vec{P}_{m\text{分子}} = 0$ （无矩分子）

顺磁质由有矩分子组成

-----分子具有固有磁矩。

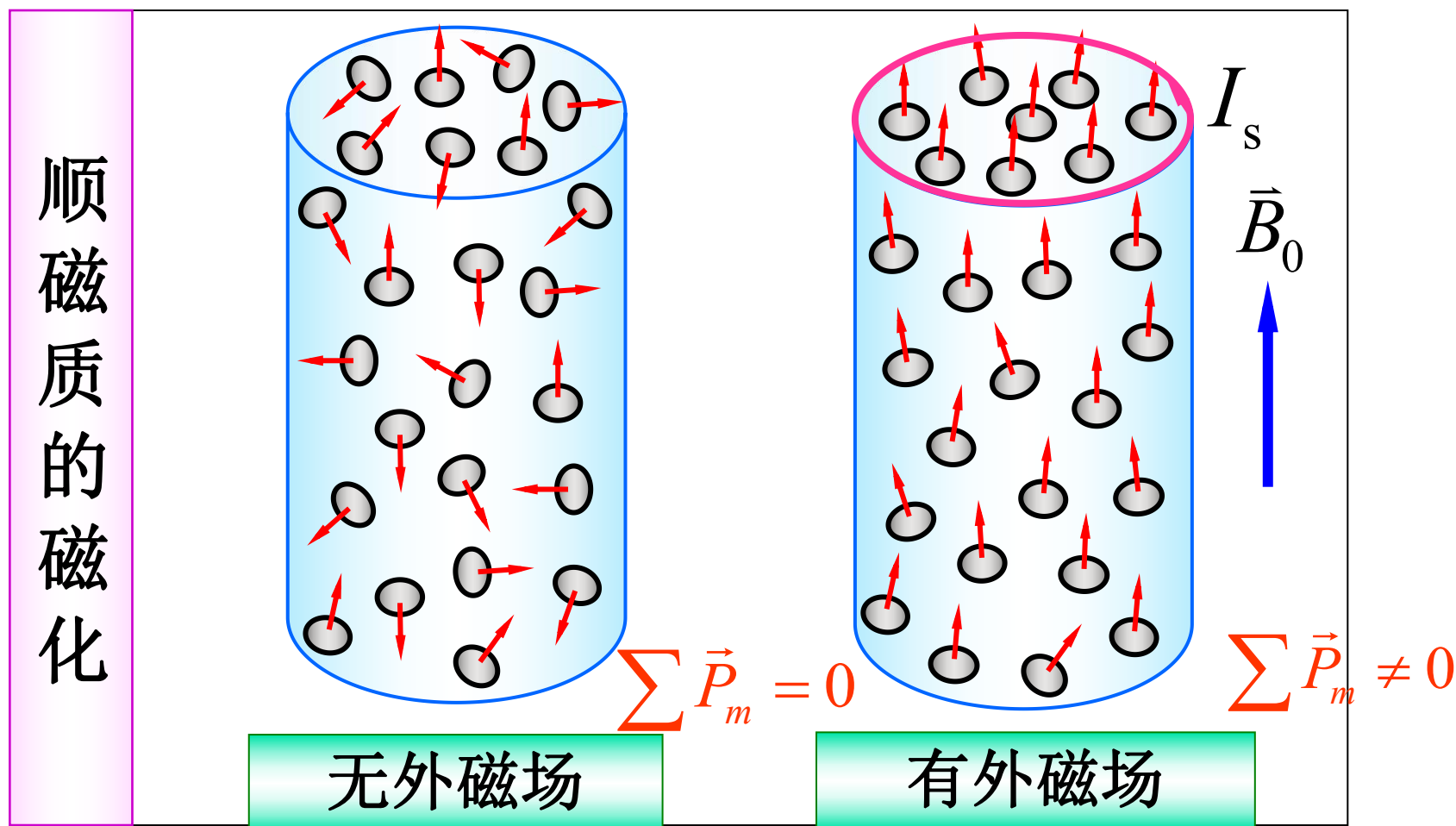
抗磁质由无矩分子组成

-----分子固有磁矩为零。

(2) 顺磁质和抗磁质的磁化

• 顺磁质的磁化

$$B = B_0 + B'$$



解释：无外场时，磁介质的分子磁矩杂乱无章地排列，合磁矩 $\sum \vec{P}_m = 0$ 为零，宏观对外不显磁性。

存在 \vec{B}_0 时，每个分子电流受磁力矩 $\vec{M} = \vec{P}_m \times \vec{B}$ 作用。在此磁力矩的作用下，各分子磁矩 \vec{P}_m 尽可能转到 \vec{B}_0 的方向上。**外磁场越强，温度越低**，分子磁矩 \vec{P}_m 取向外磁场方向的可能性就越大，分子磁矩的矢量和 $\sum \vec{P}_m$ 越大，则在宏观上呈现出一个**与外磁场同方向的附加磁场**，这便是顺磁质磁性的来源。

注：顺磁质在外磁场作用下，所产生的附加磁矩远小于分子的固有磁矩，抗磁效应被顺磁效应所掩盖。

固有磁矩是顺磁质产生磁效应的主要原因！

• 抗磁质的磁化

无外磁场时抗磁质分子磁矩为零 $\vec{p}_m = 0$

有外场时，抗磁质分子产生一个和外场方向相反的

附加磁矩 ΔP_m ，

磁化前 $\sum \vec{P}_m = 0$

磁化后 $\sum \Delta \vec{P}_m \neq 0$

附加磁矩是抗磁质产生
磁效应的唯一原因！

抗磁质内磁场

$$B = B_0 - B'$$

抗磁质的磁化

解释：

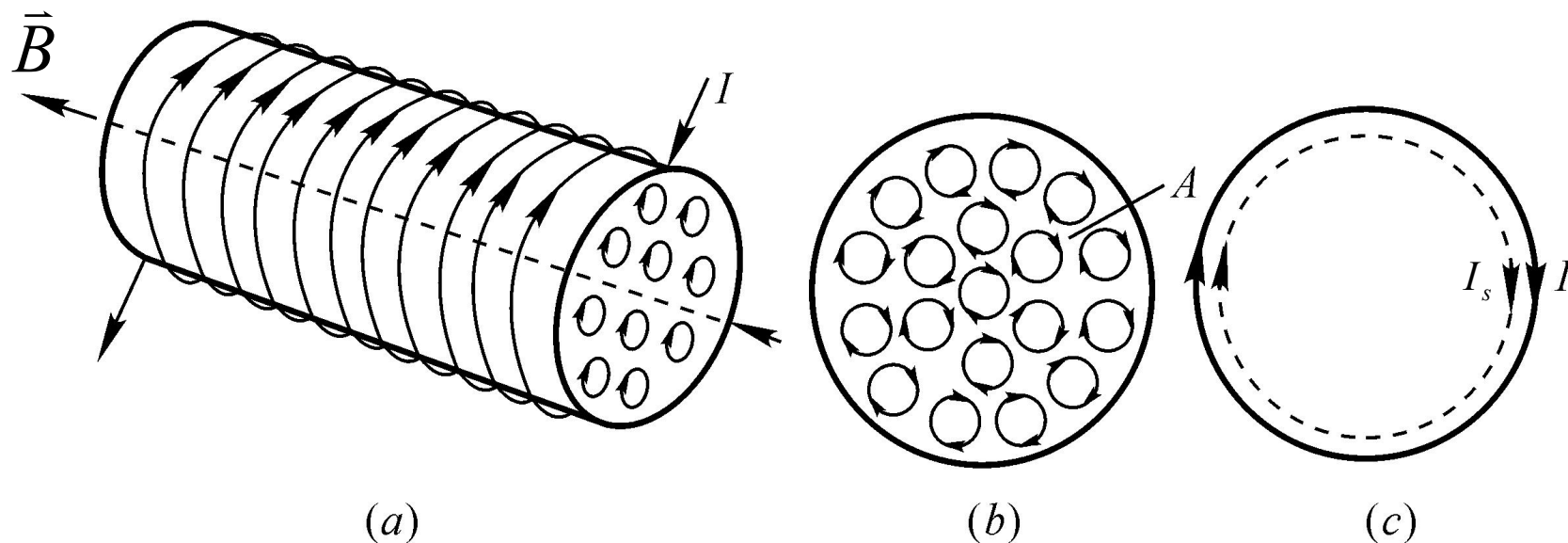
在抗磁质中，每个分子中各电子磁矩相互抵消，分子磁矩 \vec{P}_m 为零，因而在无外磁场作用时，抗磁质对外界也不显示磁效应。

在外磁场 \vec{B}_0 的作用下，引起附加磁矩 $\Delta\vec{P}_m$ ，其方向与 \vec{B}_0 相反。在抗磁质内任一体积元中大量分子的附加磁矩矢量和 $\sum \vec{P}_m$ 有一定的量值，结果在抗磁质内激发一个和外磁场方向相反的附加磁场，这就是抗磁性的起源。

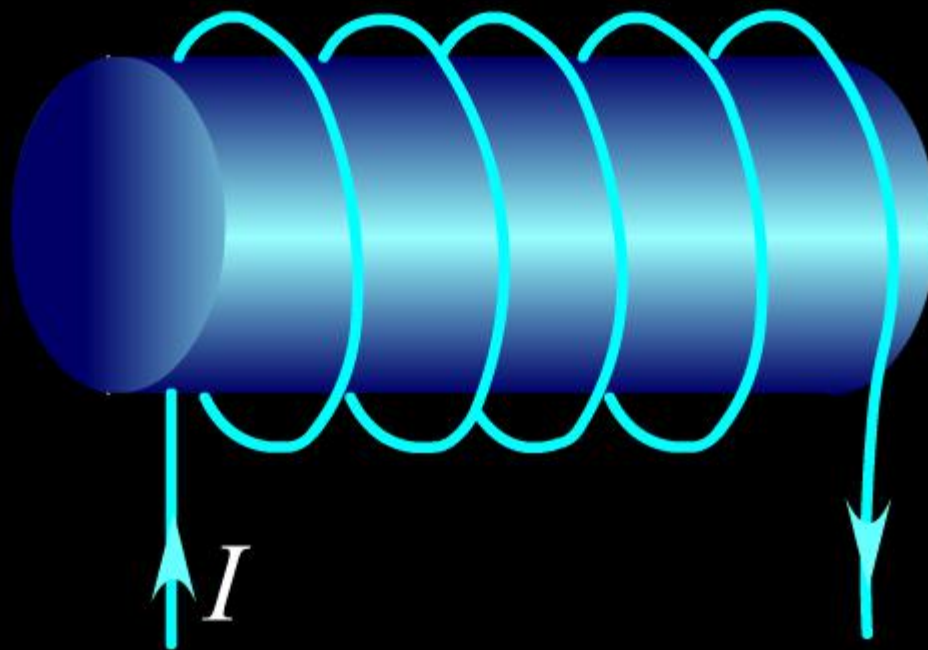
§ 15.3 物质的磁化

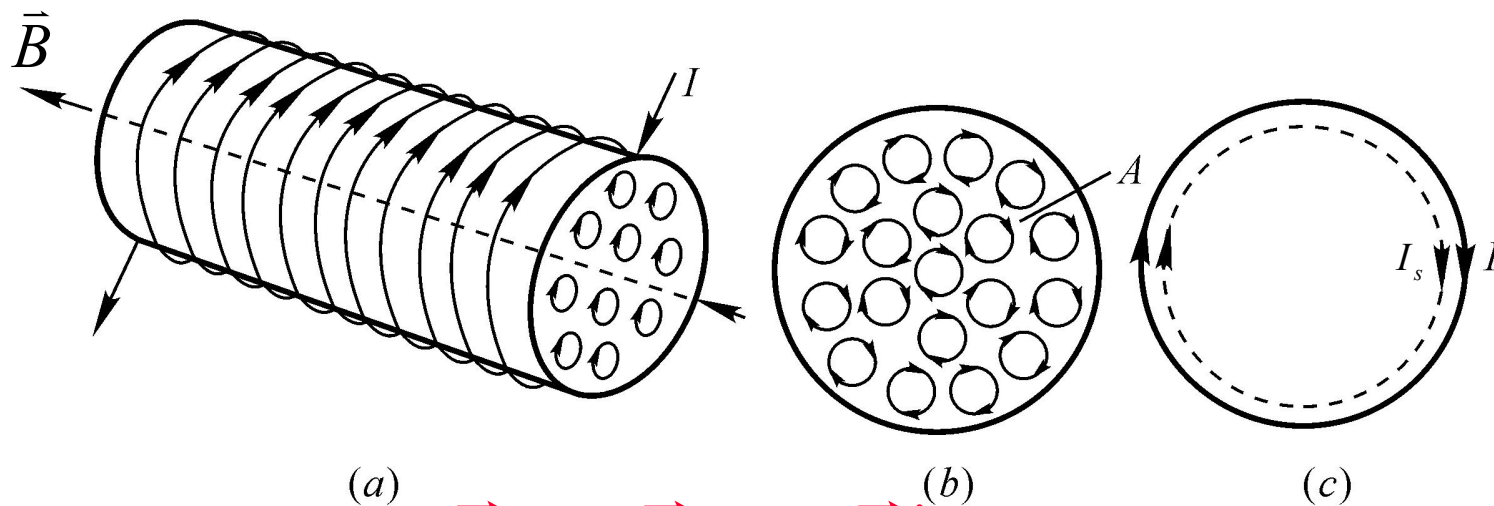
1、磁化：磁介质在外磁场作用下所发生的**变化**叫做**磁化**（magnetism）。

2、磁化电流（以顺磁质为例）



磁化电流的出现





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

在外磁场中，磁化了的磁介质会激发**附加磁场**，这**附加磁场**起源于被磁化了的介质内所出现的**磁化电流**（实际上是分子电流的宏观表现）。

对于均匀磁介质，磁化电流出现在**介质的表面上**；

把单位长度上的磁化面电流称为**磁化面电流密度**，用 j' 表示。

例15.1 一长直螺旋管，单位长度上的匝数为 n ，管内充满相对磁导率为 μ_r 的均匀磁介质。求当导线圈内通以电流 I ，管内物质表面的面束缚电流密度。

解： $\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}'$

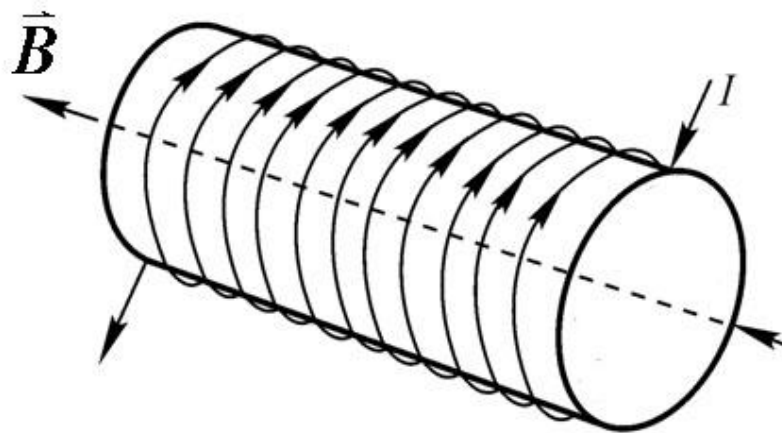
$$B = \mu_r B_0 = \mu_r \mu_0 n I$$

$$B_0 = \mu_0 n I \quad B' = \mu_0 j'$$

$$\mu_r \mu_0 n I = \mu_0 n I + \mu_0 j' \quad \therefore j' = (\mu_r - 1) n I$$

顺磁质： $j' > 0$

抗磁质： $j' < 0$



§ 15.4 H 矢量及其环路定理

真空中：

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

$$\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \sum_{i=1}^n I_i$$

1、有磁介质存在时的高斯定律

$$\oint_s \vec{B} \cdot d\vec{S} = \oint_s \vec{B}_0 \cdot d\vec{S} + \oint_s \vec{B}' \cdot d\vec{S}$$

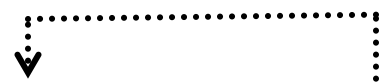
$$\therefore \oint_s \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$$

即：在任何磁场中，磁感应强度 \vec{B} 沿任意闭合曲面的积分为零。

2、有磁介质存在时的安培环路定理

$$\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 (I_0 + I_s)$$

不能直接求出 B !



$$\vec{B} \rightarrow I_0 + I_s$$

$$\oint_L \vec{B}_0 \cdot d\vec{l} = \mu_0 I_{0,\text{int}} \xrightarrow{\vec{B} = \mu_r \vec{B}_0} \oint_L \frac{\vec{B}}{\mu_r} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I_{0,\text{int}}$$

$$\longrightarrow \oint_L \frac{\vec{B}}{\mu_0 \mu_r} \cdot d\vec{l} = I_{0,\text{int}}$$

$$\text{令 } \vec{H} \equiv \frac{\vec{B}}{\mu_0 \mu_r} \equiv \frac{\vec{B}}{\mu}$$

磁场强度

磁介质的磁导率

磁介质中的安培环路定理: $\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = I_{0,\text{in}}$

物理意义: 磁场强度 \vec{H} 沿任意闭合回路的线积分等于该回路所包围的**传导电流**的代数和。

讨论

$$\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = I_{0,in}$$

(1) \vec{H} 称为**磁场强度**，其为一宏观矢量点函数。

辅助量， 单位 (SI) : 安培/米(A/m)

或: 1奥斯特= $10^3/4\pi$ (A/m)

(2) 矢量 \vec{H} 、 \vec{B} 之间的关系:

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H} = \mu \vec{H} \quad \text{-----磁介质的性质方程}$$

(只在各向同性的非铁磁质中成立)

(3) H 的环流仅与传导电流 I 有关，与介质无关。
但 \vec{H} 既与 I_0 有关，也与 I' 有关。

(4) 对于具有一定对称性分布的磁场，可用其方便地求出 \vec{H} 的分布，再求出 \vec{B} 的分布。

$$\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum I_{0, \text{in}} \xrightarrow{\quad} \vec{H} \xrightarrow{\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H}} \vec{B}$$

3、安培环路定理的应用

解题步骤：

- 磁场分布的**对称性**分析：确定 \vec{B} 的大小及方向分布特征。
- 根据对称性选择**合适的闭合路径**。
- 计算 $\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = ?$ 及 $I_{0, \text{in}}$ 。
- 应用安培环路定理**计算 H** ，进一步**计算 B** 。

例15.2 一根长直单芯电缆的芯是一根半径为 R 的金属导体，它和导电外壁之间充以相对磁导率为 μ_r 的均匀磁介质，今有电流均匀地流过芯的截面并沿外壁流回，

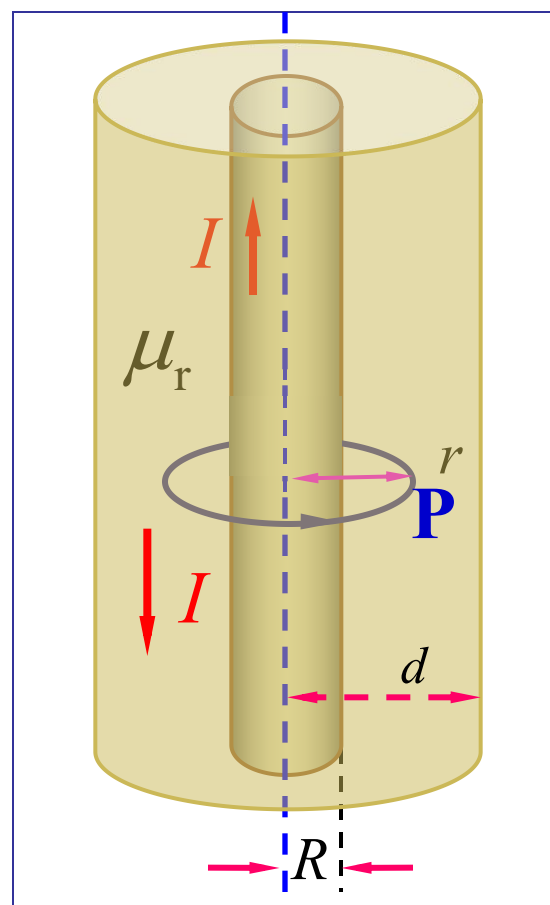
求 (1) 磁介质中任意点 P 的磁感应强度的大小；

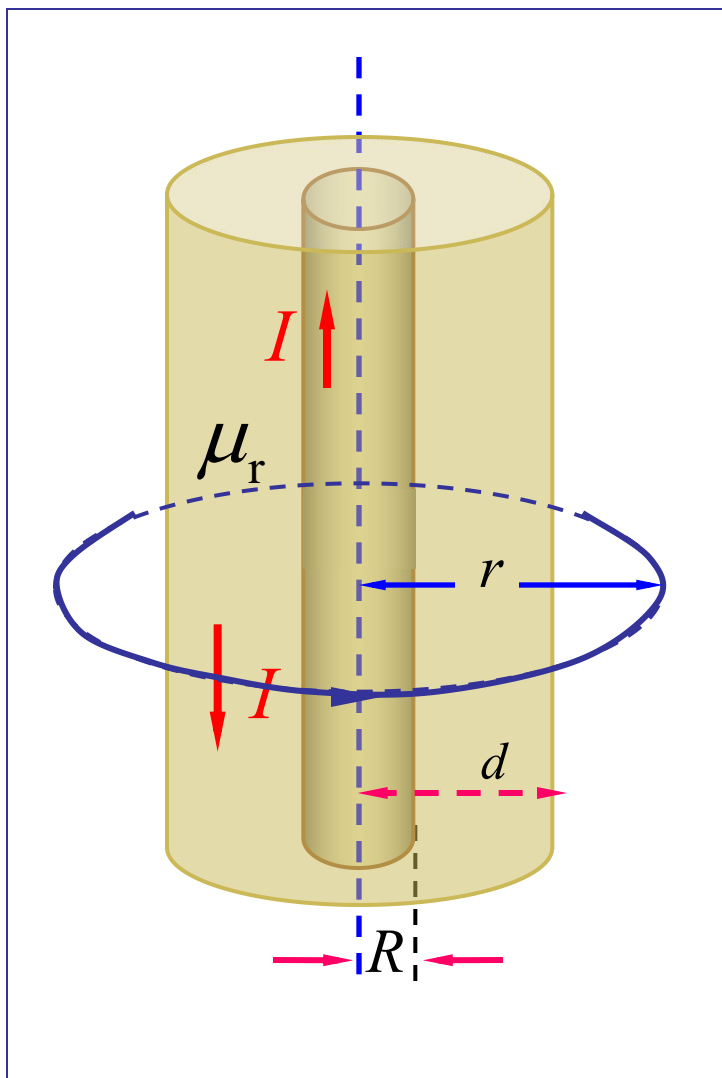
(2) 圆柱体内、圆柱壁外一点的磁感强度。

解 对称性分析

$$R < r < d: \oint_l \vec{H} \cdot d\vec{l} = I \quad 2\pi r \cdot H = I$$

$$H = \frac{I}{2\pi r} \quad B = \mu H = \frac{\mu_0 \mu_r I}{2\pi r}$$





$$R < r < d \quad B = \frac{\mu_0 \mu_r I}{2\pi d}$$

$$r > d \quad \oint_l \vec{H} \cdot d\vec{l} = I - I = 0$$

$$H = 0 \quad B = \mu H = 0$$

$$r < R: \quad \oint_l \vec{H} \cdot d\vec{l} = \frac{I}{\pi R^2} \cdot \pi r^2$$

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

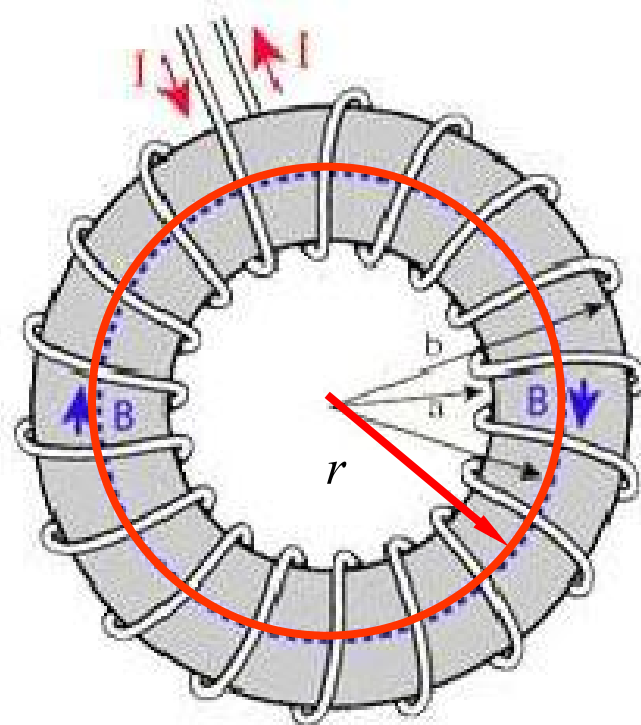
$$B = \mu_0 H = \frac{\mu_0 I r}{2\pi R^2}$$

【**例题**】在均匀密绕的螺绕环内充满均匀的顺磁质，已知螺绕环中的传导电流为 I ，单位长度上的匝数为 n ，环的横截面半径比环的平均半径小得多，磁介质的相对磁导率为 μ_r ，求环内的磁场强度、磁感应强度。

解：在环内过场点作一与螺绕环同心、半径为 r 的圆形环路。

由对称性知，在所取圆形环路上各点磁场强度的大小相等，方向沿环路切向。

由磁介质时的安培环路定理得：

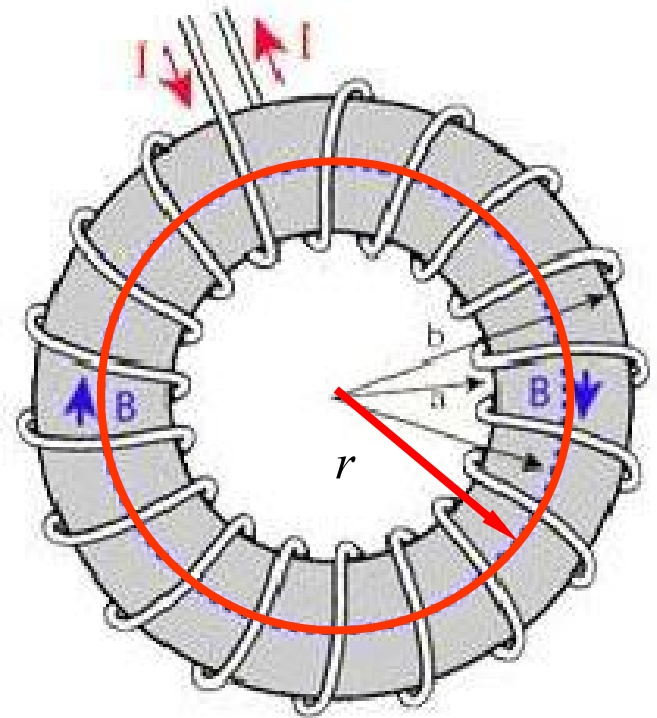


$$\oint_l \vec{H} \cdot d\vec{l} = NI$$

$$H \cdot 2\pi r = NI$$

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

$$B = \mu_0 \mu_r H = \mu nI$$



如果环内是**真空** $\mu_r = 1$ ，环内 $\vec{B}_0 = \mu_0 \vec{H}$

§ 15.5 铁磁质

1、概念

是一种相对磁导率 μ_r 很大，且 μ_r 随外磁场强弱而变化的物质。（铁、钴、镍等）

2、铁磁质的特殊性质：

(1) 强顺磁性 ($\mu_r \gg 1$)，且 μ_r 不是常量。

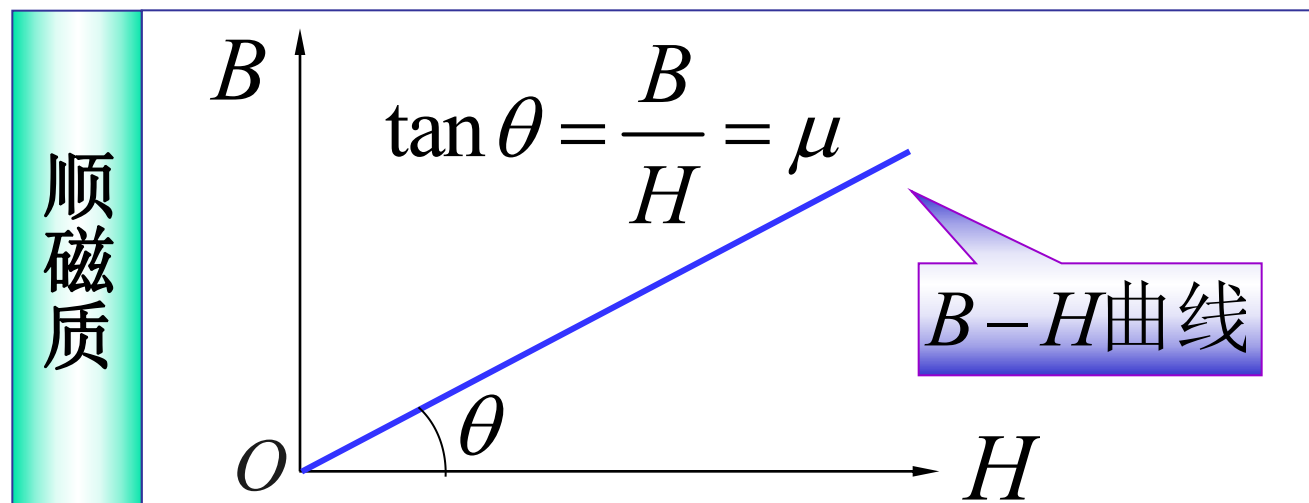
(2) 有磁滞现象，能保留部分剩磁。

(3) 有一个临界温度 T_c ——居里点。

在 T_c 以上，铁磁性完全消失而成为顺磁质。（不同的铁磁质有不同的居里温度。纯铁：770°C，纯镍：358°C。）

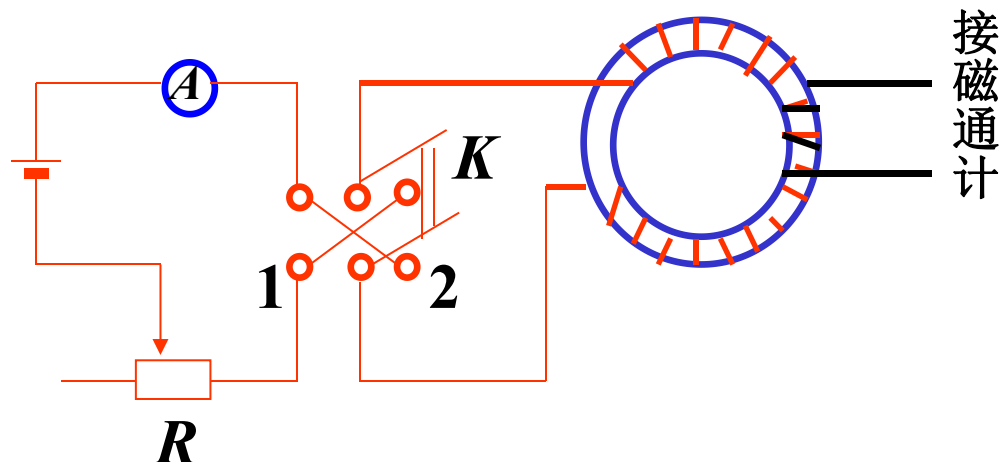
3、磁化曲线（ B 与 H 间的关系）

（1）顺磁质的磁化曲线



(2) 铁磁质的磁化曲线 (B 与 H 间的关系)

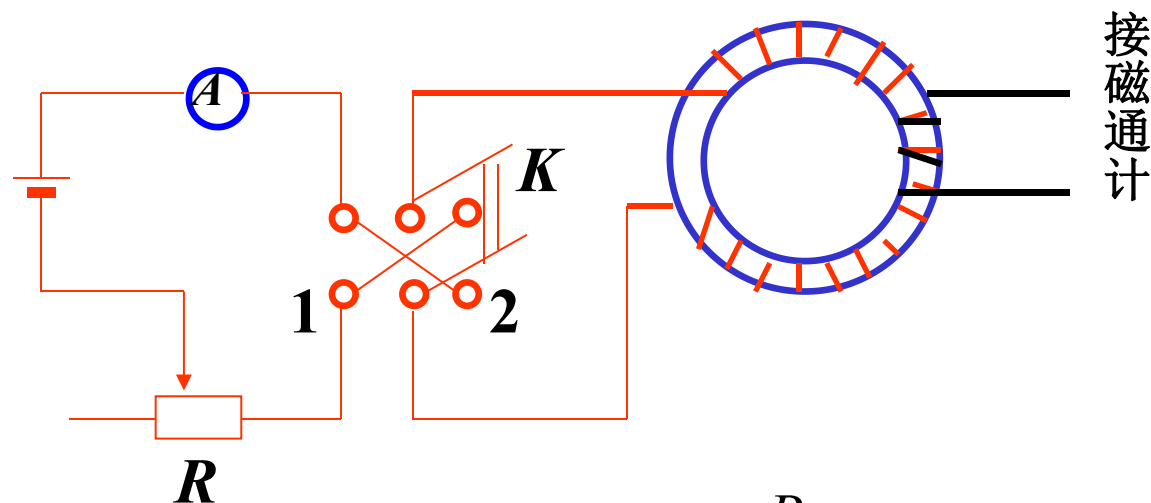
把未磁化的均匀铁磁质充满一螺绕环, 如图:



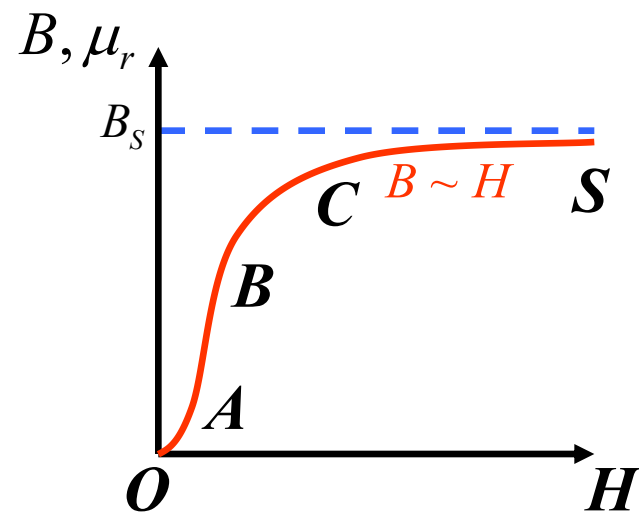
线圈中通入电流(励磁电流)后, 铁磁质就被磁化。

根据有介质时的安培环路定理, 当励磁电流为 I 时, 环内的磁场强度:

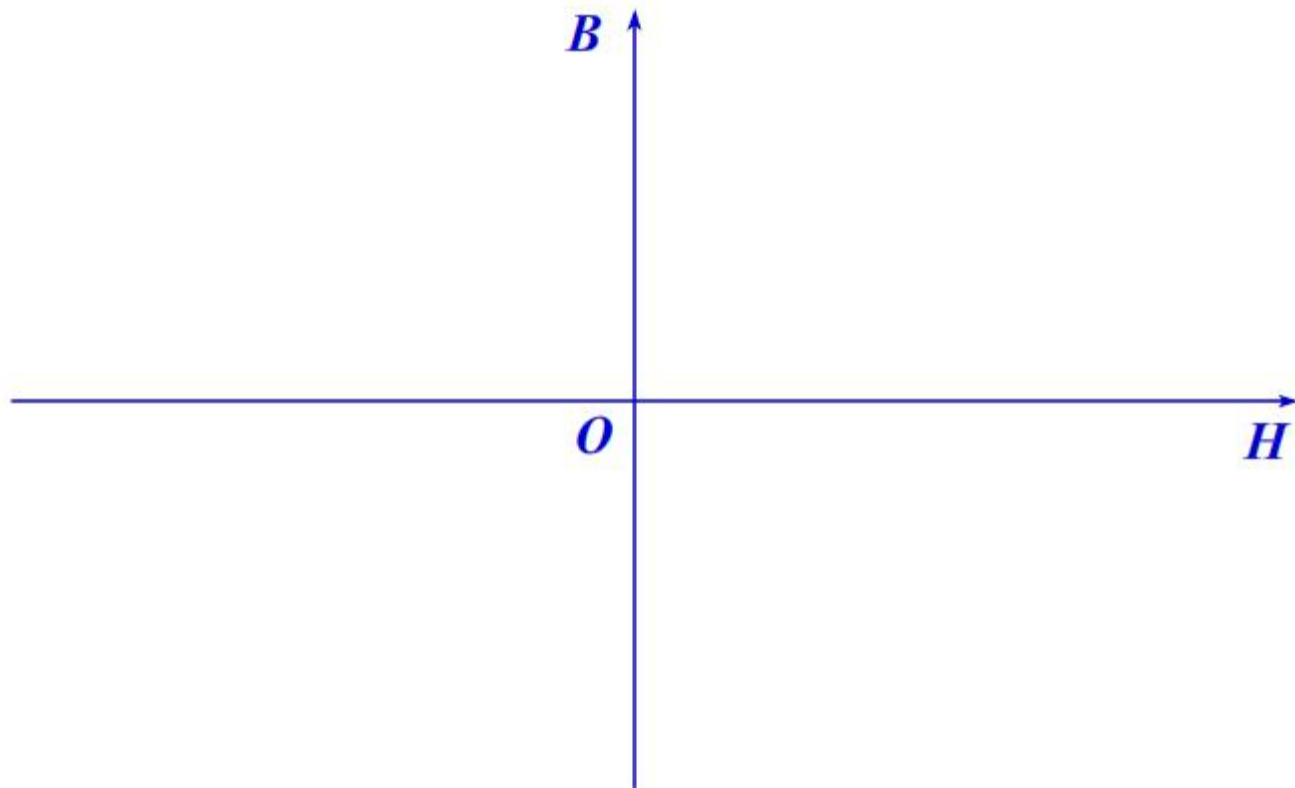
$$H = nI$$



铁芯中的 B 由磁通计上的次级线圈测出，这样，通过改变励磁电流，可得到对应的一组 B 和 H 的值，从而给出一条关于试样 $B \sim H$ 的关系曲线（**磁化曲线**）。



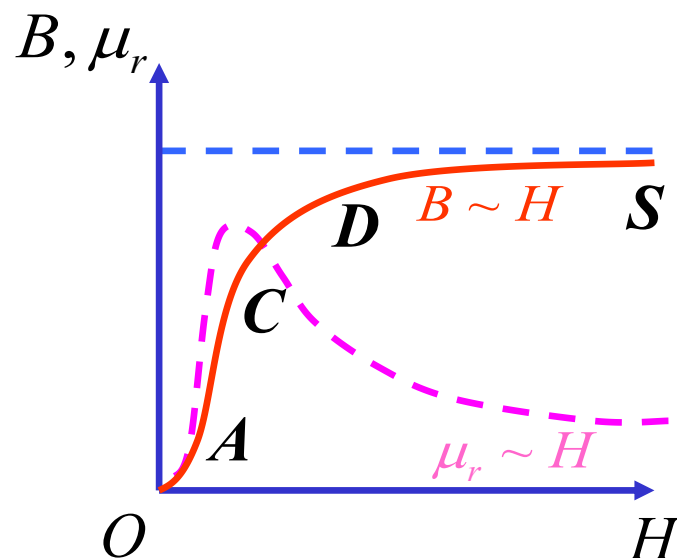
磁滞回线



(1) 起始磁化曲线

使励磁电流从零开始，此时 $B=H=0$ ，然后逐渐增大电流，以增大 H 。测得 B 与 H 的对应关系如图所示：

随 H 的增大， B 先缓慢增大(OA段)，然后迅速增大(AC段)，过C点后， B 又缓慢增大(CD段)。



从S开始， B 随 H 的增大而非常缓慢地增大，介质的磁化达到饱和。与S对应的 H_s 称饱和磁场强度，相应的 B_s 称饱和磁感应强度。

根据 $\mu_r = B / (\mu_0 H)$ ，可以求出不同 H 值对应的 μ_r 值，由此可见铁磁质 B - H 显著的特点：

非线性

相对磁导率很大

饱和性

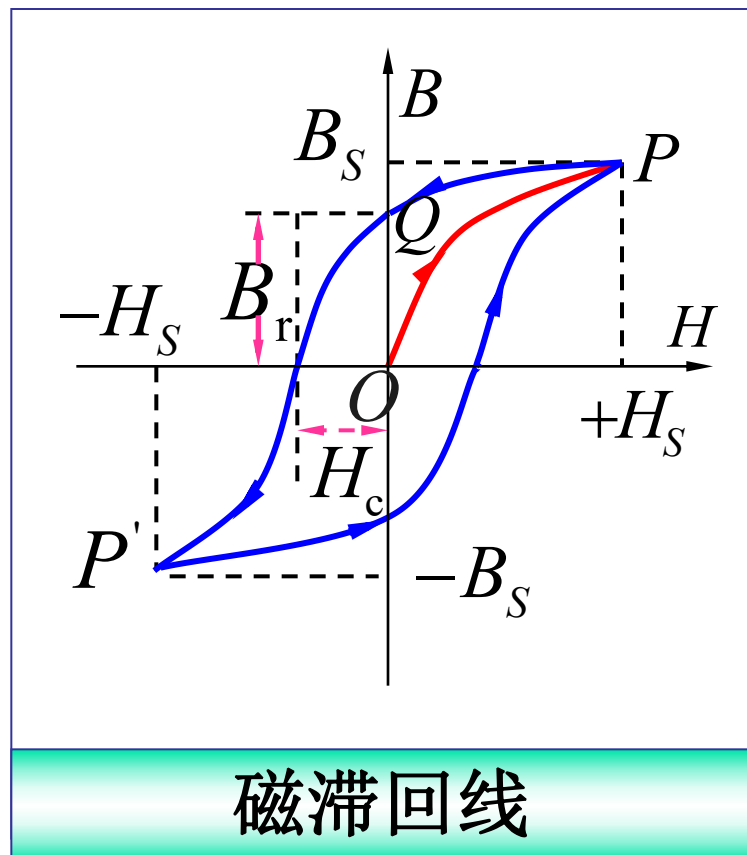
(2) 磁滞回线

当外磁场由 H_S 逐渐减小时，磁感强度 B 并不沿起始曲线 OP 减小，而是沿 PQ 比较缓慢的减小，这种 B 的变化落后于 H 的变化的现象，叫做**磁滞现象**，简称**磁滞**。

当 $H=0$ 时， B 不等于0，具有一定值，这种现象称为**剩磁**（ B_r ）。

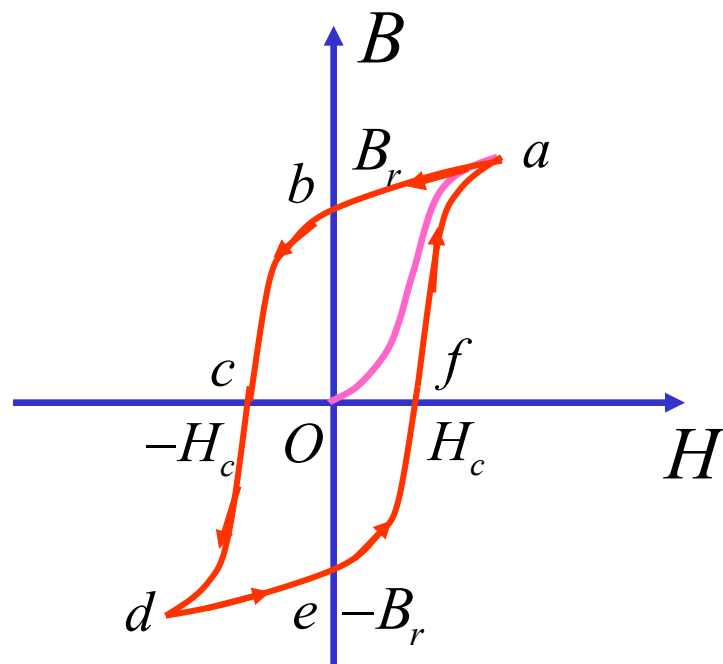
要完全消除剩磁 B_r ，必须加反向磁场，当 $B=0$ 时磁场的值 H_c 为铁磁质的**矫顽力**。

当反向磁场继续增加，铁磁质的磁化达到反向饱和。反向磁场减小到零，同样出现剩磁现象。不断地正向或反向缓慢改变磁场，磁化曲线为一闭合曲线——**磁滞回线**。



在反复磁化时，由于分子状态不断改变，导致分子振动加剧，温度升高。

在反复磁化过程中能量的损失叫做**磁滞损耗**。缓慢磁化过程，经历一次磁化过程损耗的能量与磁滞回线包围的面积成正比。



铁磁体在交变磁化磁场的作用下，它的形状随之改变，叫做**磁致伸缩效应**。

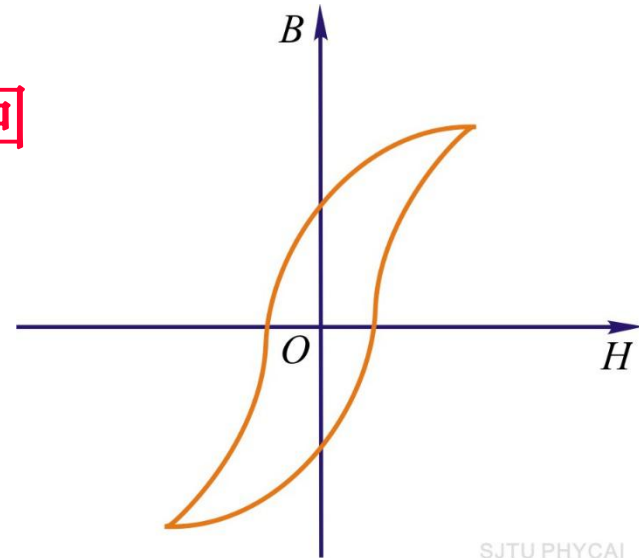
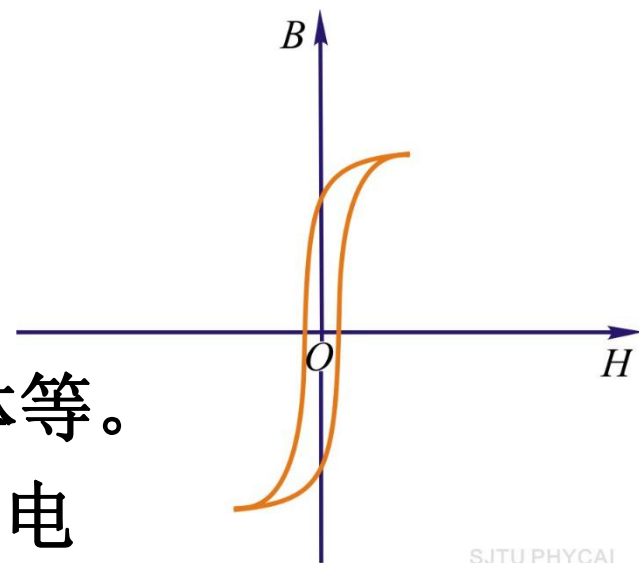
4、磁性材料的分类

- **软磁材料** 矫顽力小，磁滞回线窄，所围的面积小，磁滞损耗小。

如纯铁、硅钢、坡莫合金、铁氧体等。适用于交变磁场中，常用作变压器、继电器、电动机、电磁铁和发动机的铁心。

- **硬磁材料** 矫顽力大，剩磁大、磁滞回线宽，所围的面积大，磁滞损耗大。

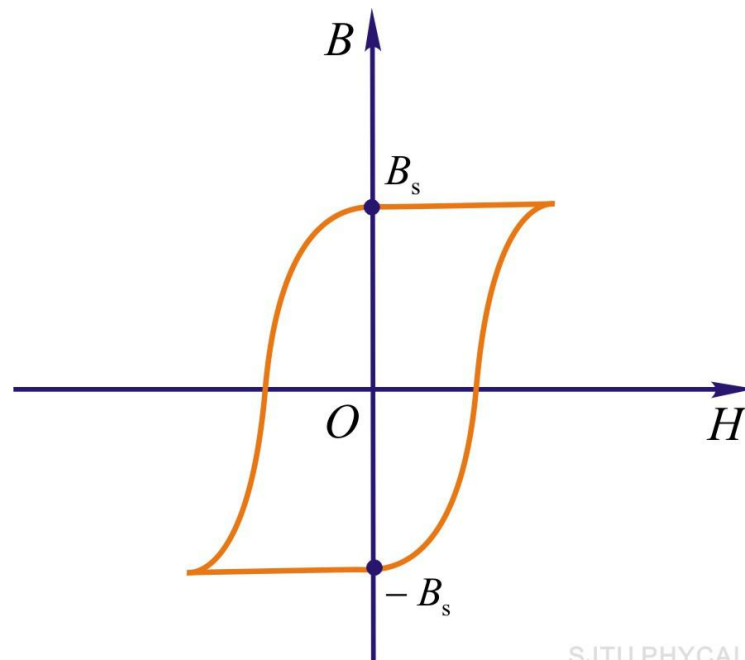
如碳钢、钨钢、铝镍钴合金等。适用于制成各种类型的永久磁铁。



• 矩磁材料

特点：磁滞回线接近于矩形，一经磁化，其剩磁 B_r 接近饱和值 B_s ，矫顽力小。如铁氧体材料。

当矩磁材料在不同方向的外磁场磁化后，总是处于 $+B_s$ 和 $-B_s$ 两种剩磁状态，可作为电子计算机的“记忆”元件、自动控制等新技术中的储存元件、开关等。



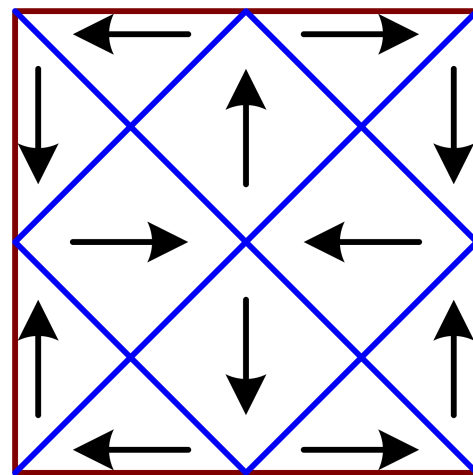
SJTU PHYCAI

5. 铁磁性的起因

(1) 铁磁质内存在许多自发磁化的小区域，叫**磁畴**（magnetic domain）。每个磁畴都有一定的磁矩，是由电子自旋磁矩自发取向一致而产生，与电子的轨道运动无关。

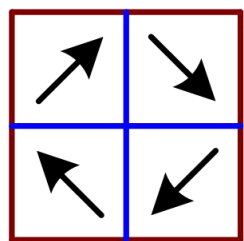
(2) 无外磁场时，磁畴取向无规律性，单位体积内的磁矩矢量和 \vec{P}_m 为零，宏观不显磁性。

(3) 在外磁场 \vec{B} 的作用下，磁畴发生变化：

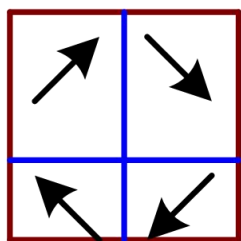


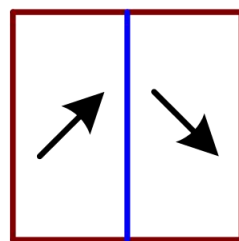
① **外磁场较弱时**，凡是磁矩方向与外磁场方向相同或相近的磁畴都要**扩大自己的体积**（畴壁向外移动）；

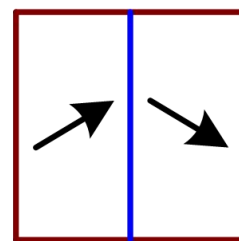
② **外磁场较强时**，每个磁畴的磁矩方向都不同程度地**向外磁场方向取向**，外磁场越强，取向程度越大。这时单位体积内的磁矩矢量和 \vec{P}_m 不为零，且 \vec{P}_m 与 \vec{B} 方向相同。

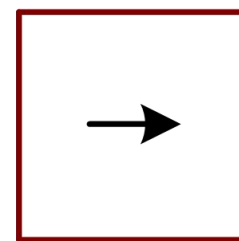


无外磁场

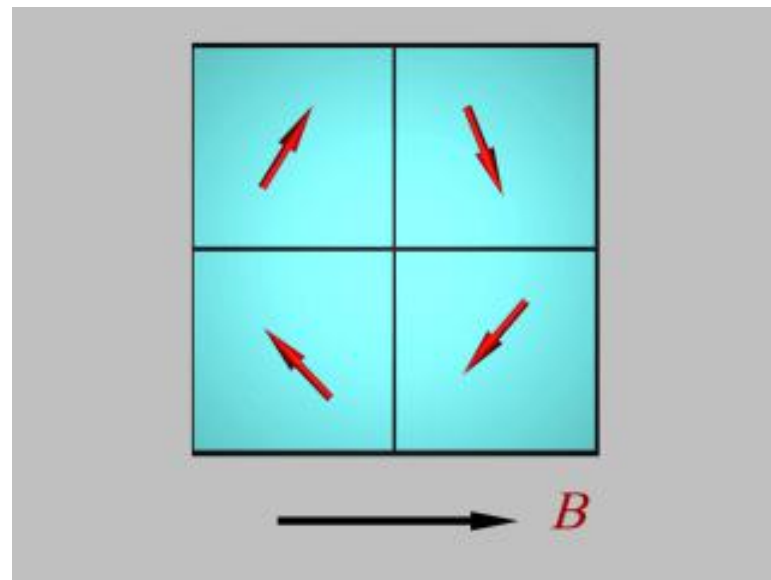
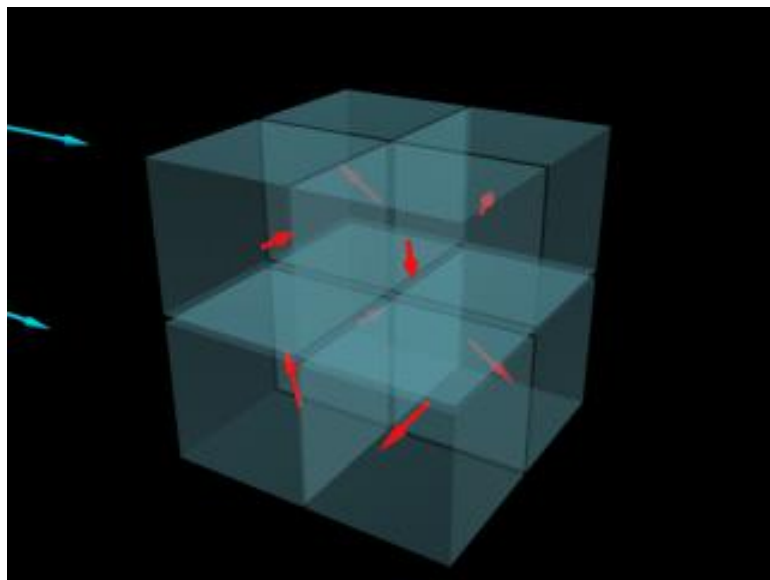


外磁场


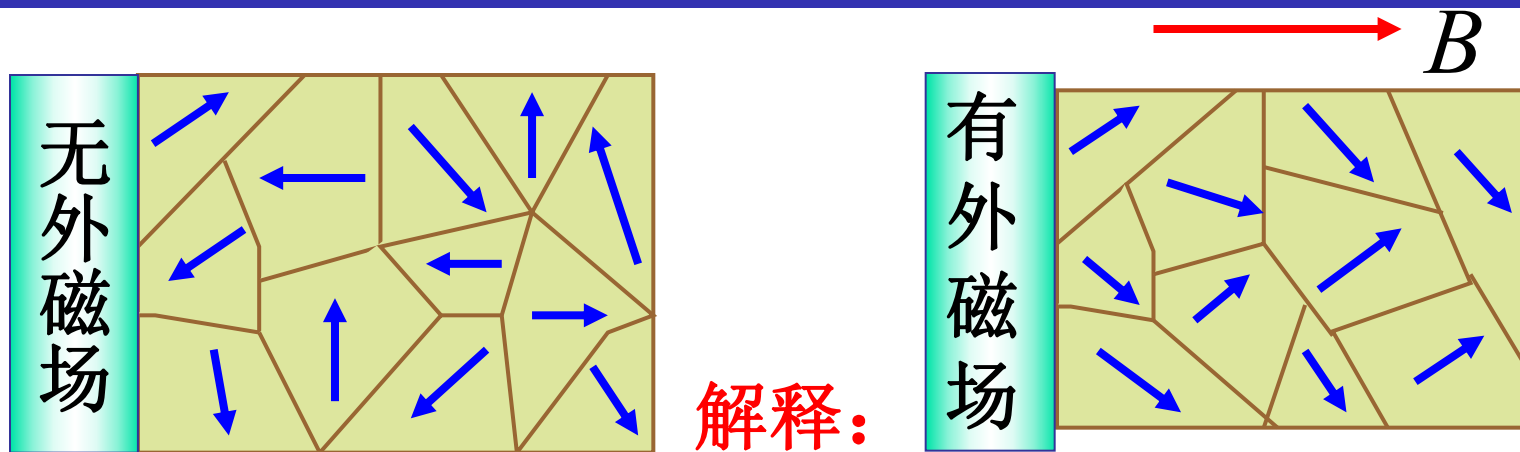
外磁场


外磁场


外磁场



铁磁质的磁化



(1) 外场越强, $\sum \vec{P}_m$ 也越大; 但当所有磁畴的磁矩都转到外场方向相同时, 即使再增加外磁场, $\sum \vec{P}_m$ 不可能增加——**饱和**。

(2) 磁壁的外移及磁畴的磁矩取向是不可逆的, 当外磁场减弱或消失时, 磁畴不按原规律逆着退回原状——**磁滞 (剩磁)**。

(3) 既然磁畴起因于电子自旋磁矩自发取向一致, 而热运动是有序排列的破坏者, 因此, 当温度高于某一**临界温度**时, 磁畴不复存在, **铁磁质变为顺磁质**。

有介质时，静磁场与静电场方程的对比

	磁介质	介电质
微观模型	分子电流	电偶极子
变化的宏观效果	产生磁化电流（分布）	产生极化电荷（分布）
介质对场的影响	I' 产生的场 \vec{B}' $\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}'$	q' 产生的场 \vec{E}' $\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}'$
辅助矢量	\vec{H}	\vec{D}

磁介质

电介质

高斯定理

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

$$\oiint_S \vec{D} \cdot d\vec{S} = q_0$$

环路定理

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

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

性能方程

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

$$\vec{E} = \frac{\vec{D}}{\varepsilon}$$

(对各向同性非铁磁质及电介质)



§ 15.6 简单磁路

铁环被磁化后，在它的表面产生束缚电流，整个铁环就相当于由这些束缚电流组成的螺绕环，磁场分布基本上由束缚电流决定，使磁场大大增强，而且集中到铁心内部。

铁心可以使磁场集中到铁磁材料的内部。

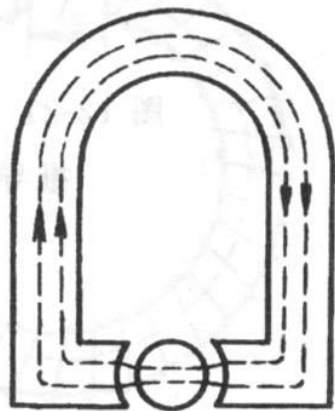
一、漏磁通、磁路

1、漏磁通

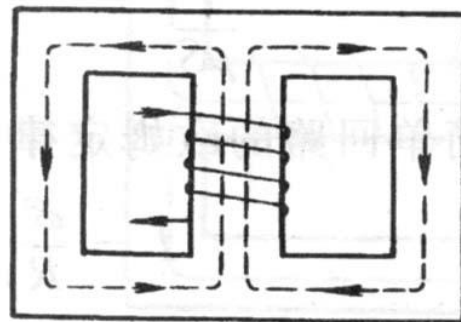
铁心外部相对很弱的磁场。

2、磁路

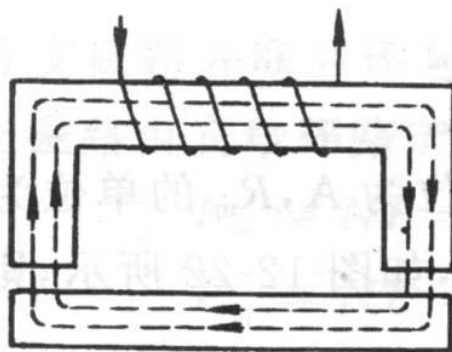
由铁心（或一定的间隙）构成的这种磁感线集中的通路。



(a)



(b)



(c)



(d)

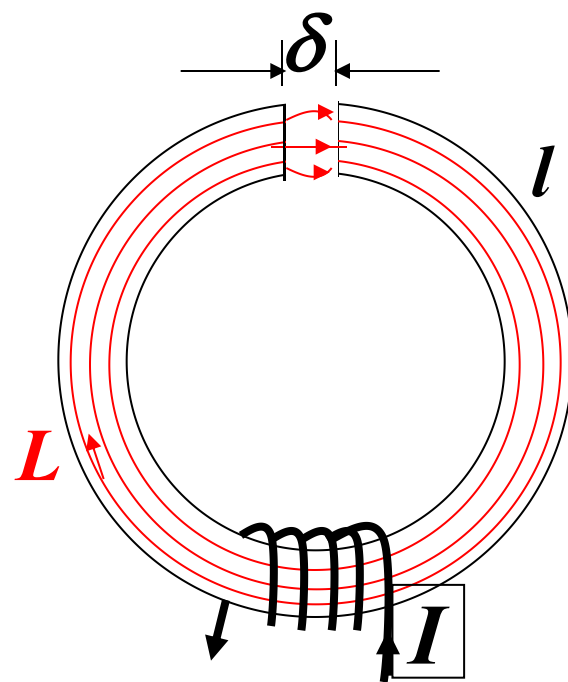
例. 如图所示的一个铁环, 设环的长度 $l=0.5\text{m}$, 截面积 $S=4\times 10^{-4}\text{m}^2$, 环上气隙的宽度为 $\delta=1.0\times 10^{-3}\text{m}$. 环的一部分上绕有线圈 $N=200$ 匝, 设通过线圈的电流 $I=0.5\text{A}$, 而铁心相应的 $\mu_r=5000$, 求铁环气隙中的磁感应强度的数值和磁通量。

【解】 根据 \vec{H} 的环路定理

$$\oint_{(l+\delta)} \vec{H} \cdot d\vec{l} = NI$$

$$Hl + H_0\delta = NI$$

由于 $\delta \ll l$, 在气隙内磁场散开不大, 可认为铁环和气隙内的 B 一样大。



$$Hl + H_0\delta = NI$$

$$\frac{B}{\mu_0\mu_r}l + \frac{B}{\mu_0}\cdot\delta = NI$$

$$B = \frac{\mu_0 NI}{\frac{l}{\mu_r} + \delta} = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 200 \times 0.5}{\underbrace{\frac{0.5}{5000}}_{10^{-4} \text{ (铁心)}} + \underbrace{10^{-3}}_{\text{(气隙)}}} = 0.114 \text{ T}$$

可见，气隙虽小，但是大大影响铁心内的磁场。

磁通量 $\Phi = BS$

$$= 0.114 \times 4 \times 10^{-4} = 4.56 \times 10^{-5} \text{ Wb}$$



作业

15-3, 15-4, 15-5 , 15-6 , 15-8。