第十九章　有磁介质时的磁场

§ 19.1 磁介质对磁场的影响

§ 19.2 原子的磁矩

§ 19.3 磁介质的磁化

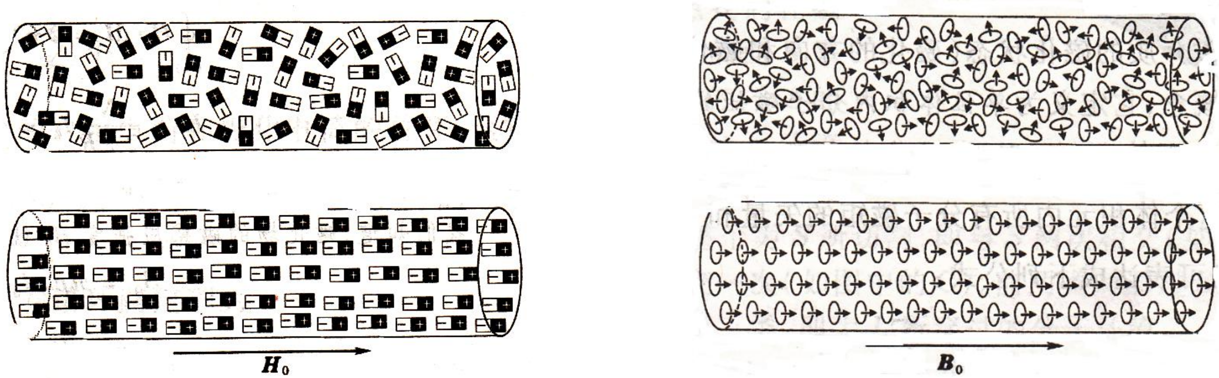
§ 19.4 H的环路定理

§ 19.5 铁磁质

Δ § 19.6 简单磁路

磁介质：在磁场中发生变化并影响磁场的物质

研究磁场与磁介质的相互作用：



磁荷观点　　　　分子电流观点

磁场对磁介质作用→→

介质中出现宏观电流——“磁化”。

附加的磁化电流亦将产生附加磁场

并最终影响磁场。

磁化规律？有磁介质时磁场的规律？

类比电介质中的电场

电介质： 自由电荷场E_0 $\rightarrow$电介质

$\rightarrow$电介质极化$\begin{cases}\text{极化电荷}q' \\ \text{分子偶极子}p\end{cases}$ $\rightarrow \vec{E} \rightarrow \vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}'$

$\rightarrow \vec{D} \rightarrow \vec{D}$ 的高斯定理、环路定理

磁介质： 自由电流场B_0 $\rightarrow$ 磁介质

$\rightarrow$磁介质磁化$\begin{cases}\text{磁化电流}I' \\ \text{分子磁矩}m\end{cases}$ $\rightarrow \vec{B}' \rightarrow \vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}'$

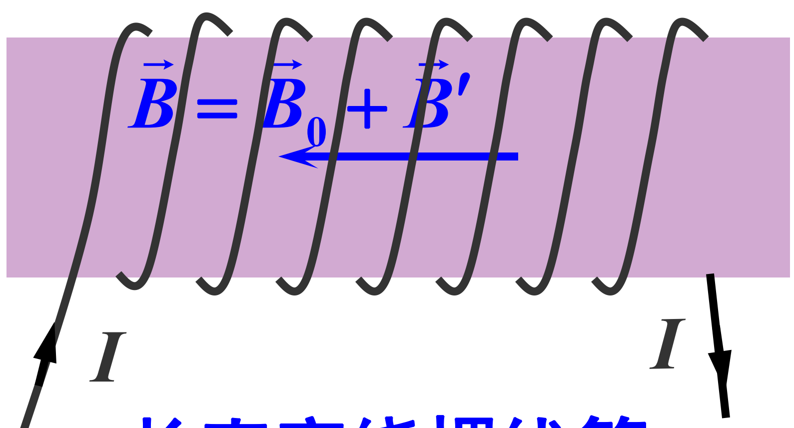
$\rightarrow \vec{H} \rightarrow \vec{H}$ 的高斯定理、环路定理

§ 19.1 磁介质对磁场的影响

所有物质皆磁介质

长螺线管通电流 I，内部产生一个均匀磁场，再将磁介质充满磁场（保持电流不变）

发现磁介质中的磁场： $\vec{B}=\vec{B}_0+\vec{B}'$



长直密绕螺线管

传导电流 $I\rightarrow\vec{B}_0$

磁介质上有磁化电流，

磁化电流 $I'\rightarrow\vec{B}'$

实验表明：均匀各向同性介质充满磁场所在空间时，有：

$$B = \mu_r B_0$$ μ_r介质的相对磁导率

实验发现：充各种磁介质，磁介质内的磁场有的比真空时弱，有的比真空时强。

磁介质的分类：按 μ_r 不同磁介质分为

顺磁质 $\mu_r > 1$

抗磁质 $\mu_r < 1$

铁磁质 $\mu_r >> 1$

§ 19.2 原子的磁矩

物质由原子、分子组成，他们包含的电子参于两种运动。

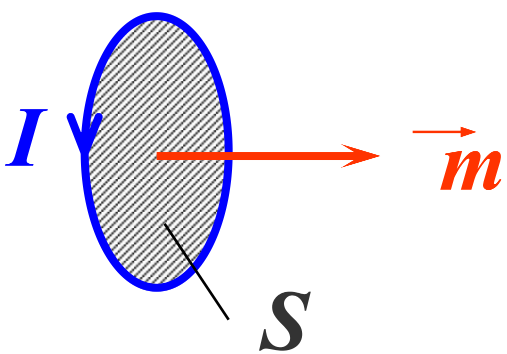
电子的自旋→自旋磁矩m_s

电子绕原子核轨道运动→轨道磁矩m_l

同时核也有自旋→核磁矩m_n

分子磁矩 $$\boxed{\vec{m} = \vec{m}_l + \vec{m}_s + \vec{m}_n = I\vec{S}}$$

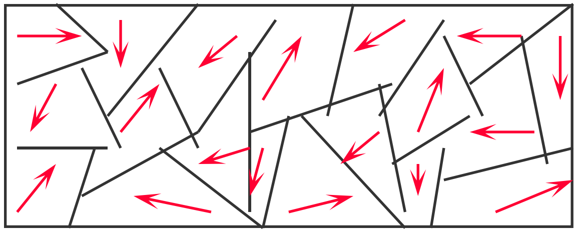
→等效成分子电流



$$\vec{m} = I\vec{S} \begin{cases} \neq 0 & \text{顺磁质} \\ = 0 & \text{抗磁质} \end{cases}$$

铁磁质 $\vec{m} \neq 0$

磁畴



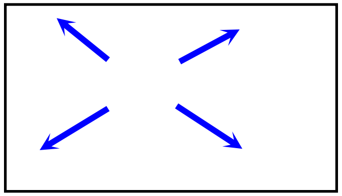
§ 19.3　磁介质的磁化

磁化：在磁场作用下，介质出现磁性或磁性发生变化的现象。

一 顺磁性：取向磁化

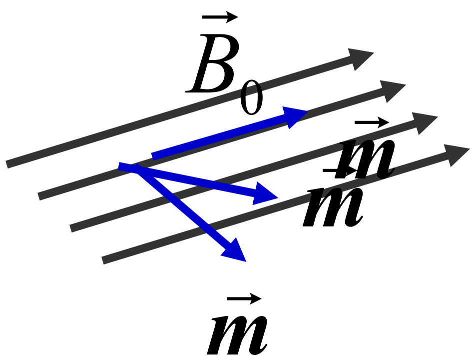
顺磁质的 $\vec{m} \neq 0$ ——称为**分子固有磁矩。**

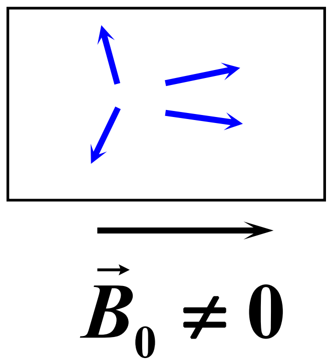
由于分子的热运动，分子磁矩 m 完全是混乱的，不显磁性。



$\vec{B}_0 = 0$

在外磁场中，分子磁矩m会发生转向而排列，这就是顺磁质被“**磁化**”





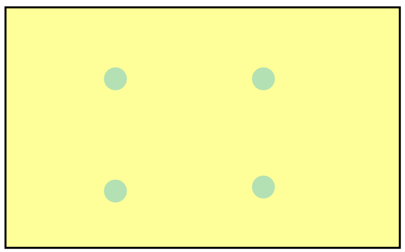
外磁场越强，转向排列越整齐。

$\vec{B}\,'$方向与$\vec{B}_0$方向相同

二 抗磁性：感应磁化

抗磁质的分子固有磁矩为 0。

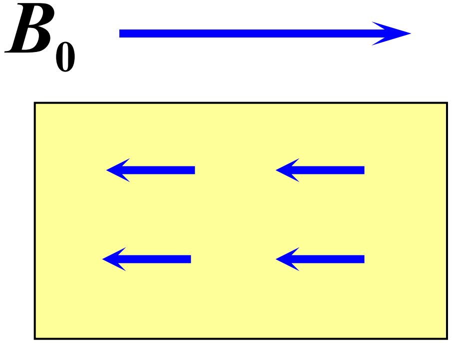
$\vec{B}_0 = 0$



$\vec{m} = 0$，

不显磁性

$\vec{B}_0$



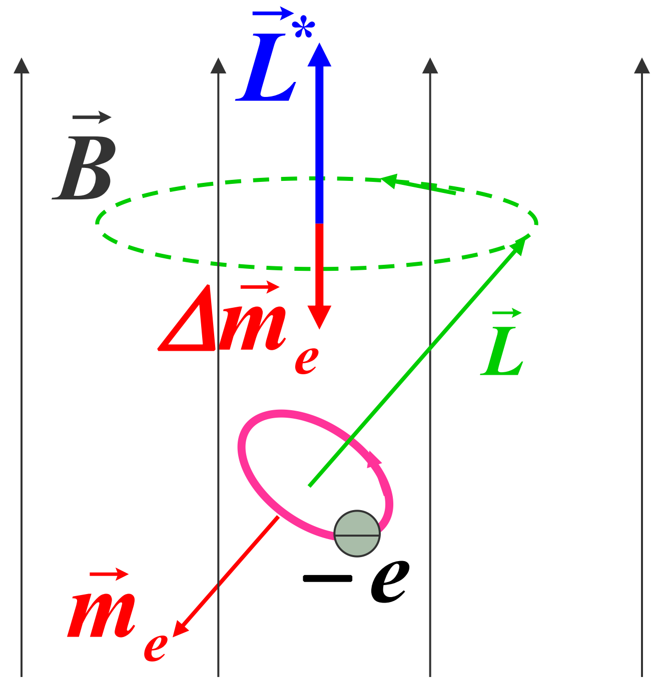
附加磁矩 $\Delta\vec{m} \uparrow\downarrow \vec{B}_0$

显示抗磁性

为什么 $\Delta\vec{m}$ 反平行于 $\vec{B}_0$ 呢？

分子固有磁矩为零，分子中某个电子的轨道磁矩、自旋磁矩不一定为零

以电子的轨道运动为例



设该电子的轨道运动角动量为 $\vec{L}$

轨道磁矩为 $\vec{m}_e$

该磁矩在外磁场中要受力矩 $\vec{M}$ ，

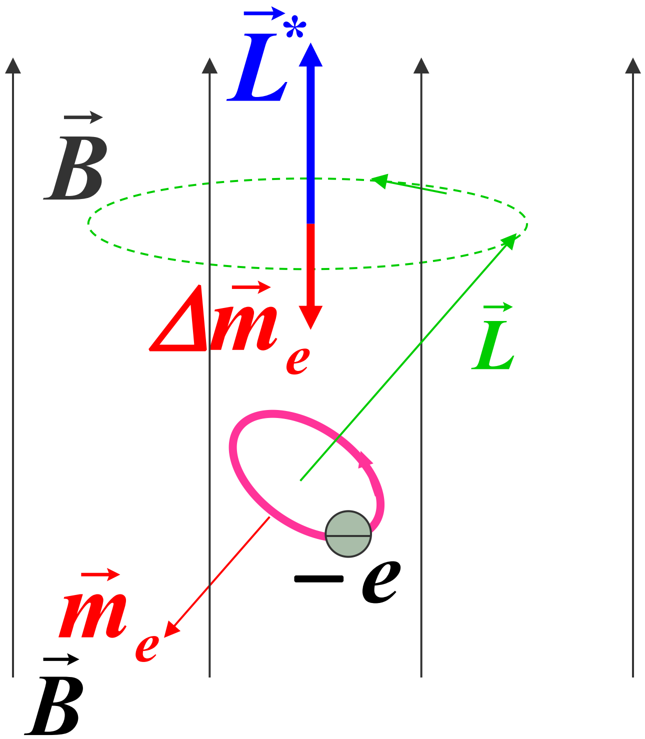
$$\vec{M} = \vec{m}_e \times \vec{B},$$

轨道角动量绕磁场进动

$$\vec{M} = \frac{d\vec{L}}{dt}, \qquad \mathrm{d}\,\vec{L} = \vec{M}\,\mathrm{d}\,t \perp \vec{L}$$

轨道进动附加的角动量L*与B的方向一致

电子附加一个与磁感强度相反的磁矩 $\Delta\vec{m}_e$



对电子的自旋运动和核自旋运动，有类似的现象。

顺磁质中也有此效应，但与分子固有磁矩的转向效应相比弱得多。

三 磁化电流与磁化强度

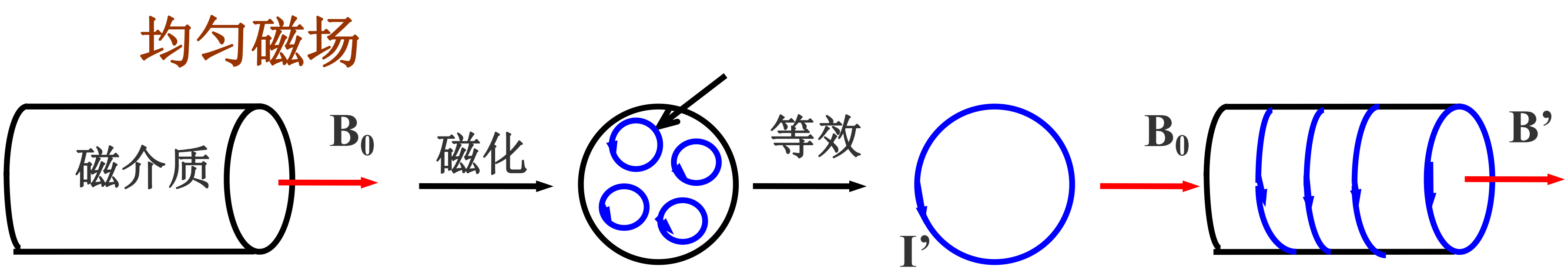
1. 磁化电流

磁化： 分子磁矩取向有序＝分子电流排列有序

→→介质中及表面出现**等效的**宏观电流。

宏观电流→→**磁化电流**

如图，长直螺线管内部充满均匀的各向同性介质，将被均匀磁化。



对顺磁质和铁磁质，磁化电流产生的磁场是加强磁介质内部原磁场的；

对抗磁质，磁化电流产生的磁场是削弱磁介质内部原磁场的。

磁化电流I'的大小反映了磁化的强弱。

思考：磁化电流与自由电流比较？

2. 磁化强度

磁化的强弱还可以用磁化强度来描述。

定义：磁化强度

$$\boxed{\vec{M}=\lim_{\Delta v\to 0}\frac{\sum_i \vec{m}}{\Delta V}}$$

单位体积内分子磁矩的矢量和。

实验表明:在各向同性的顺磁质、抗磁质内,有

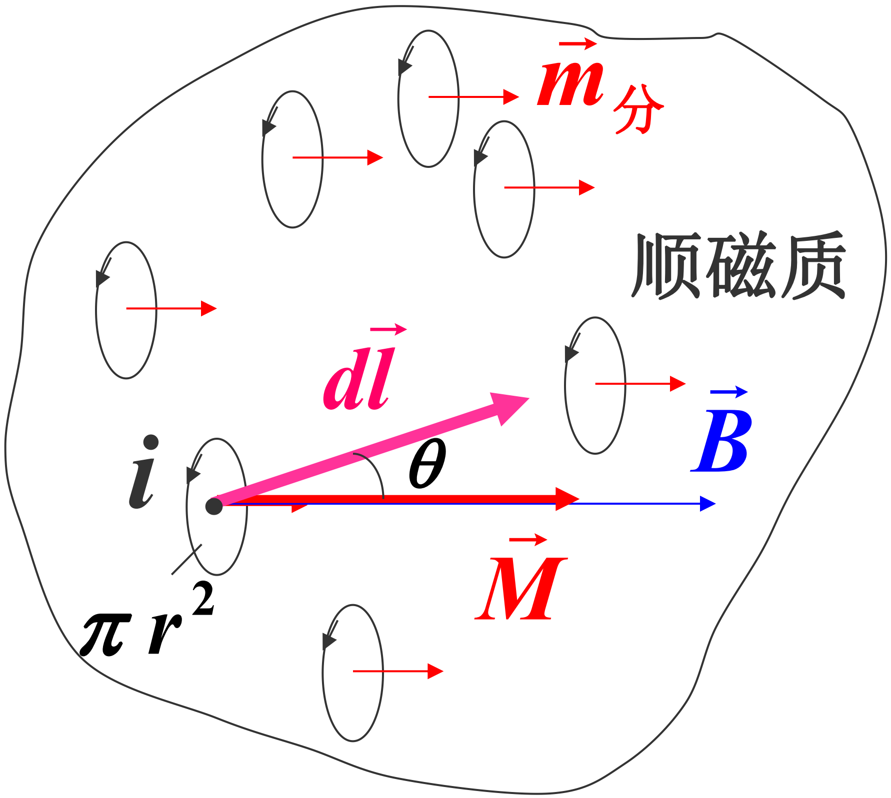
$$\vec{M}=\frac{\mu_r-1}{\mu_0\mu_r}\vec{B}$$

对顺磁质：$\vec{M}$ 平行 $\vec{B}$

对抗磁质： $\vec{M}$ 反平行 $\vec{B}$

对铁磁质，实验表明：$\vec{M}$ 和 $\vec{B}$ 呈非线性关系

3. 磁化强度与磁化电流的关系



以顺磁质为例.

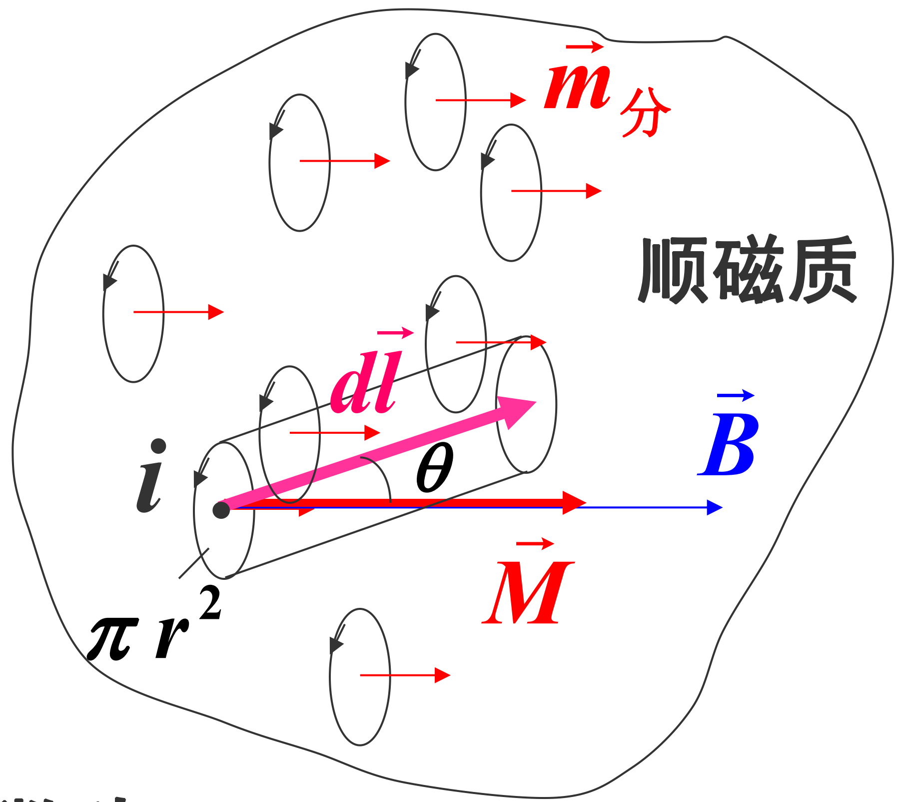
设其内部某点处的 $\vec{B}$ $\vec{M}$ 如图。

等效分子圆电流为 i、半径为 r、分子磁矩为 $\vec{m}_{分}$

在该点处，任取一微小矢量元 $d\vec{l}$ ，

设它与 $\vec{B}$ 的夹角为 θ .

则与 $d\vec{l}$ 套住的分子电流的中心，都是位于以 $d\vec{l}$ 为轴、以 πr^2 为底面积的小柱体内。



设单位体积内的分子数为n，

所以，与dl套住的总分子电流为

$$dI' = n\left(\pi r^2 \cdot dl \cdot \cos\theta\right) i$$

$$dI' = n\left(\pi r^2 \cdot dl \cdot \cos\theta\right) i$$

$$= n\, m_{分} \cdot dl \cdot \cos\theta = M \cdot dl \cdot \cos\theta$$

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

$$\boxed{dI' = \vec{M} \cdot d\vec{l}}$$

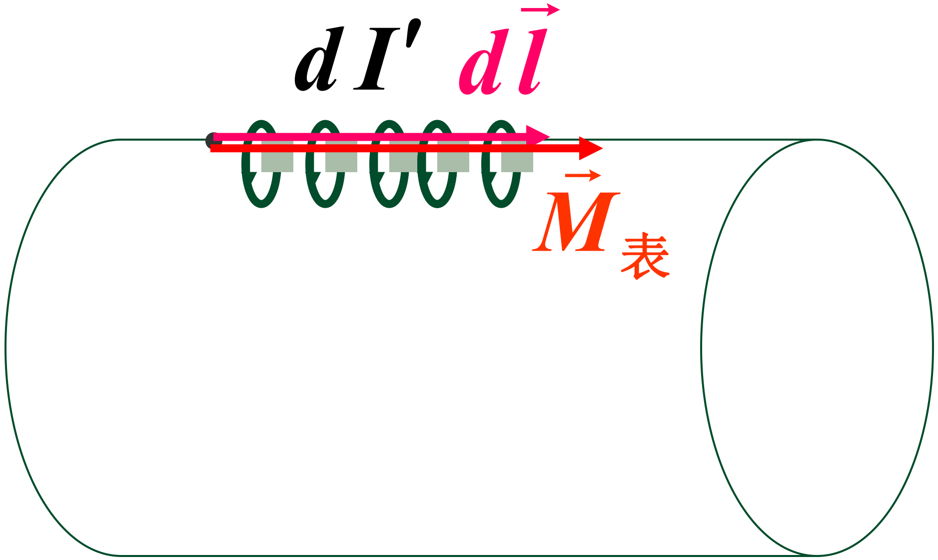
这就是磁介质上任一点处，dI'与$\vec{M}$（磁化电流与磁化强度）之间的基本关系。

在**磁介质表面**和**磁介质内部**磁化电流情况如何？

1. 磁介质表面

若 $d\vec{l}$ 在磁介质的表面上，

可以看出某些表面会有磁化面电流 dI' 。



定义：在垂直磁化面电流方向的单位长度上的磁化面电流，称为磁化面电流密度

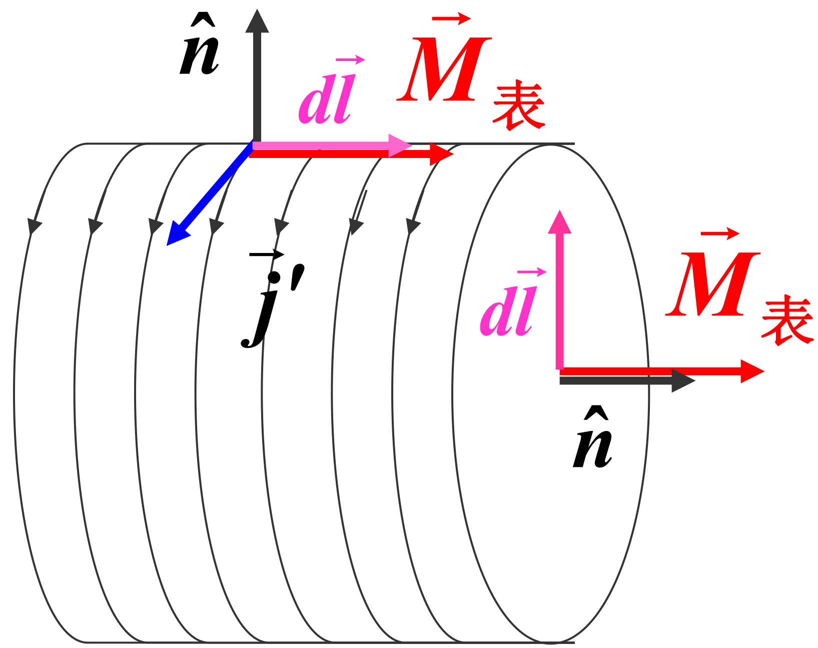
$$\boxed{j' \equiv \frac{dI'}{dl}}$$

它与磁化强度的关系为

$$j' = \frac{dI'}{dl} = \frac{\vec{M}_{表} \cdot d\vec{l}}{dl} = \frac{M_{表} \cdot dl \cdot \cos\theta}{dl} = M_{表} \cdot \cos\theta$$

当θ=0时，$j' = M_{表}$，在磁介质的侧表面上有磁化面电流。

当θ=90^0 时，$j' = 0$ ，在磁介质的端面上无磁化面电流。

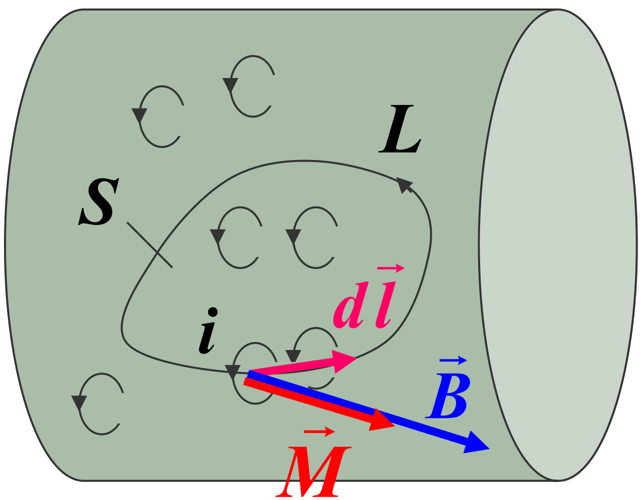


顺磁质

通常用 $\boxed{\vec{j}' = \vec{M}_{表} \times \hat{n}}$ 表示二者的矢量关系。

2. 磁介质内部

任取一面积S，其周界为L，则通过S面的磁化电流是与周界套连的分子电流的总和。



$$I'_{内} = \oint_L dI' = \oint_L \vec{M} \cdot d\vec{l}$$

若磁介质均匀磁化，通过体内任意面积的磁化电流为零，因为

$$I'_{内} = \vec{M} \cdot \oint_L d\vec{l} = 0$$

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

$$\boxed{\vec{j}' = \vec{M} \times \hat{n}}$$

类比电介质

$$\boxed{q' = -\oint_S \vec{P} \cdot d\vec{s}}$$

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

§ 9.4 H的环路定理

一. 有介质时的环路定理

$$I_0 \to \vec{B}_{0;} \quad I' \to \vec{B}'$$

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

基本规律:

高斯定律 $$\boxed{\oint_s \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0}$$

安培环路定理 $$\boxed{\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \sum (I_{0内} + I'_{内})}$$

求B ⇐ **I'$_{内}$** ⇐ **M** ⇐ **B?**

$$\oint_L \vec{B}\cdot d\vec{l} = \mu_0 \sum (I_{0内} + I'_{内})$$

$$\oint_L \left(\frac{\vec{B}}{\mu_0}\right)\cdot d\vec{l} = \sum I_{0内} + \oint_L \vec{M}\cdot d\vec{l}$$

$$\oint_L \left(\frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M}\right)\cdot d\vec{l} = \sum I_{0内}$$

定义: 磁场强度

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

有

$$\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum I_{0内}$$

……H的环路定理

沿任一闭合路径的磁场强度的环流，等于该闭合路径所套连的传导电流的代数和。

当无磁介质时，上式就过渡到真空时的环路定理.

具有直接物理意义的是磁感应强度B

对各向同性的磁介质

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

$$\boxed{\vec{B}=\mu\vec{H}}$$ 磁介质的物性方程

由 $\vec{H}$ 也能得到磁化强度 $\vec{M}$：

$$\vec{M}=\frac{\mu_r-1}{\mu_0\mu_r}\vec{B}=\frac{\mu_r-1}{\mu_0\mu_r}\mu\vec{H}=(\mu_r-1)\vec{H}=\chi_m\vec{H}$$

$$\boxed{\vec{M}=\chi_m\vec{H}}$$ χ_m ……称为磁化率

【例1】证明：各向同性均匀磁介质内，无传导电流处，也无磁化电流。

证：磁介质中取任一小面元，其周界闭合回路L所套联的磁化电流 $\Delta I'$

$$\Delta I' = \oint_L \vec{M} \cdot d\vec{l} = \oint_L (\mu_r - 1)\vec{H} \cdot d\vec{l}$$

$$= (\mu_r - 1)\oint_L \cdot \vec{H} \cdot d\vec{l}$$

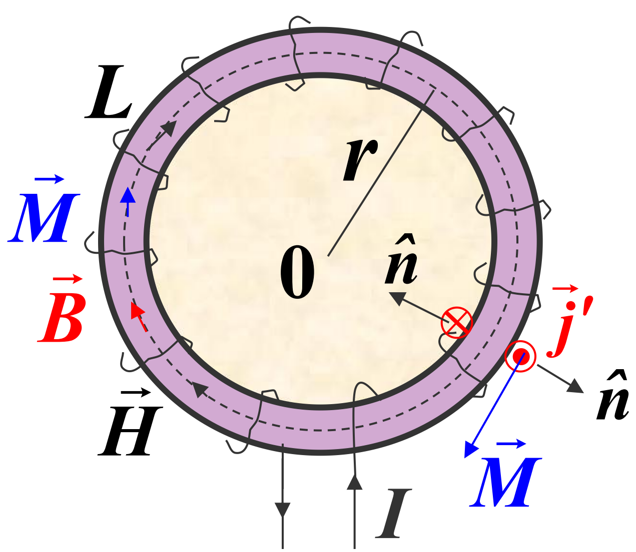
$$= (\mu_r - 1) \cdot \sum I_{o内}$$

若$\sum I_{o内} = 0$，则$\Delta I' = 0$.

【例2】一均匀密绕细螺绕环， $n=10^3$ 匝/m，I=2A，充满 $\mu=5\times10^{-4}$T·m/A 的磁介质。

求：介质内的 $\vec{H},\vec{B},\vec{M}$ 及表面磁化电流面密度

解：此磁介质是顺磁质？抗磁质？铁磁质？



$$\mu_r=\frac{\mu}{\mu_0}=\frac{5\times10^{-4}}{4\pi\times10^{-7}}\approx398$$

取环路L如图，在L上各点的H、B、M都沿L的方向，L上的H大小相等。设总匝数为N

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

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

$$B = \mu H = \mu nI$$

（与无限长螺线管内的B相同）

$$M = \frac{\mu_r - 1}{\mu_0\mu_r}B = (\mu_r - 1)nI$$

$$= (398-1)\times 2\times 3\times 10^3 = 7.94\times 10^5\ A/m$$

$$j' = M_{表} = 7.94\times10^{5}\,A/m$$

I' 的方向与I_0的方向是一样的.

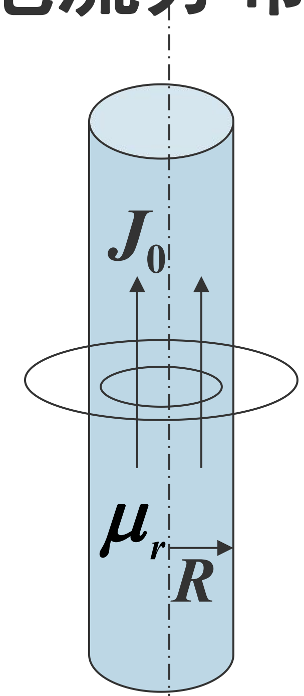
讨论： 如果设想把这些磁化面电流也分成每米10^3匝，相当于每匝多大电流?

$$\frac{j'}{n} = \frac{7.94\times10^{5}}{10^{3}} = 794\,A \qquad （>>2A）$$

B>>B_0，铁磁质作铁心可以大大加强磁场

【例】半径为R的一无限长圆柱形介质中沿轴线均匀通有恒定电流，电流密度为J_0，介质相对磁导率为μ_r(>1)。求：磁场分布和介质磁化电流分布。

解：1）磁场分布



因传导电流和介质呈相同的轴对称分布，故磁场轴对称，环向。

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

$r<R$ $$\sum_i I_{oi} = J_0\pi r^2$$

环路定理： $$H=\frac{J_0 r}{2} \Longrightarrow B=\mu H=\frac{\mu J_0 r}{2}=\mu_r B_0$$

$r>R$ $$\sum_i I_{0i} = J_0\pi R^2 = I_0 \quad \therefore H=\frac{I_0}{2\pi r} \qquad B=\frac{\mu_0 I_0}{2\pi r}=B_0$$

2）磁化电流计算

$\because \mu_r > 1 \quad \vec{M} = (\mu_r - 1)\vec{H}$ 二者同向

体内电流： 取垂直于轴线的圆截面，有

$$I' = \oint_L \vec{M} \cdot \mathrm{d}\vec{l} = M \cdot 2\pi r = (\mu_r - 1) J_0 \pi r^2$$

$$\therefore J'_S = (\mu_r - 1) J_0$$

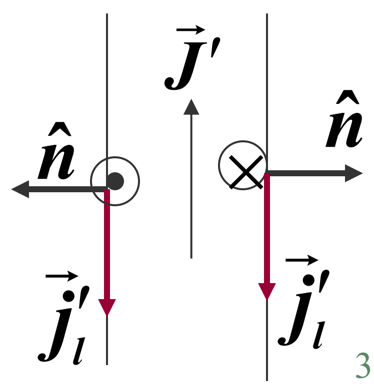
磁化电流在体内均匀分布，方向与自由电流同。

表面电流：

$$j'_l = \left| \vec{M}_R \times \hat{n} \right| = M_R = \frac{(\mu_r - 1) I_0}{2\pi R}$$

$$J'_S \pi R^2 = j'_l 2\pi R$$

二者反向



例. 一半径为 R 的长薄壁金属圆筒，其上沿轴向均匀流有传导电流 I_0，筒的外壁紧包着一层均匀的各向同性磁介质圆柱壳，壳层厚度为 d，介质的相对磁导率为μ_r（$\mu_r>1$）。

求：金属筒外空间各区的 $\vec{B}$ 及磁介质的 磁化电流。

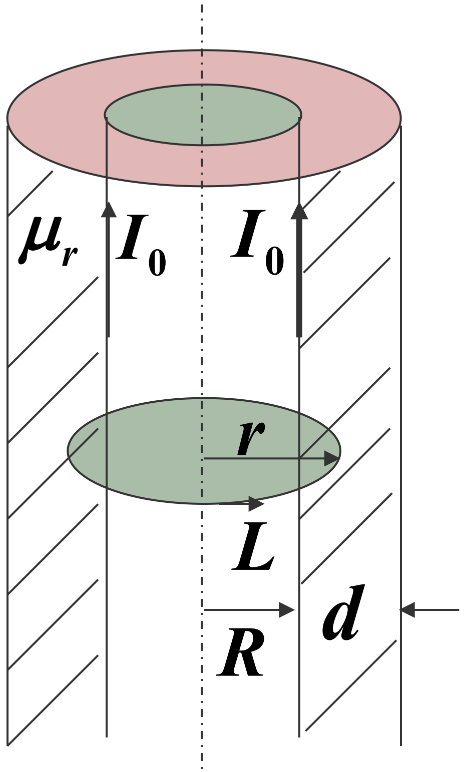
【解】 由传导电流、磁介质有相同的轴对称性可知，

磁场分布也是轴对称性分布的。

作圆形环路L, 由 $\vec{H}$ 的环路定理

对 $r > R$ 区，

$$\oint_L \vec{H}\cdot d\vec{l} = H\cdot 2\pi r = I_0$$



$$\oint_L \vec{H}\cdot d\vec{l} = H\cdot 2\pi r = I_0$$

$$\rightarrow H = \frac{I_0}{2\pi r}$$

金属筒外空间各区的 $\vec{B}$：

在磁介质外部，

$$B = \mu_0 H = \frac{\mu_0 I_0}{2\pi r} \qquad \boxed{\rightarrow B = B_0}$$

在磁介质内，

$$B = \mu_0 \mu_r H = \frac{\mu_0 \mu_r I_0}{2\pi r} \qquad \boxed{\rightarrow B = \mu_r B_0}$$

即磁介质内的磁场为传导电流的磁场的 μ_r 倍，

(对比：电介质的 $E = \dfrac{E_0}{\varepsilon_r}$)

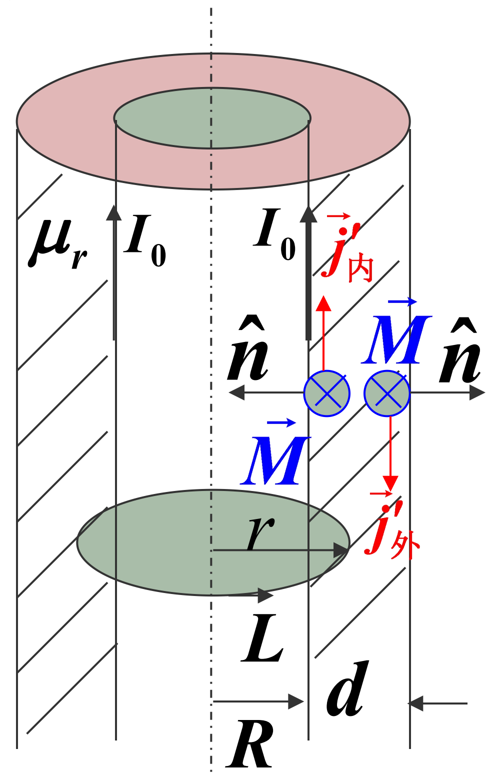
磁介质的磁化电流：

由于磁介质均匀，体内又无传导电流，所以磁化电流只出现在磁介质柱壳的内外表面。

磁介质柱壳的内表面：

$$\because M_{内} = \chi_m H_{内} = (\mu_r - 1) H_{内}$$

$$= (\mu_r - 1)\frac{I_0}{2\pi R}$$



内表面上的磁化面电流密度：

$$j'_{内} = \left|\vec{M}_{内} \times \hat{n}_{内}\right| = \frac{(\mu_r - 1)\ I_0}{2\pi R}$$

同理 $$j'_{外} = \left|\vec{M}_{外} \times \hat{n}_{外}\right| = \frac{(\mu_r - 1)\ I_0}{2\pi (R + d)}$$

它们的方向如图所示。

内外表面上的磁化面电流：

$$I'_{内}=j'_{内}\cdot 2\pi R=\frac{(\mu_r-1)I_0}{2\pi R}\cdot 2\pi R$$

$$=(\mu_r-1)I_0$$

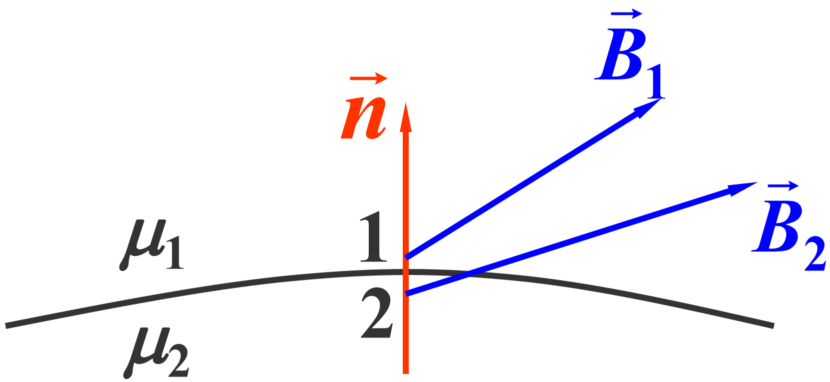
$$I'_{外}=j'_{外}\cdot 2\pi(R+d)=\frac{(\mu_r-1)I_0}{2\pi（R+d）}\cdot 2\pi（R+d）$$

$$=(\mu_r-1)I_0$$

磁化的结果，使磁介质柱壳内外表面（柱面）上，有相等相反的均匀面磁化电流 I' 通过。

从传导电流和磁化电流的场的叠加来验证前面求得的磁场结果。

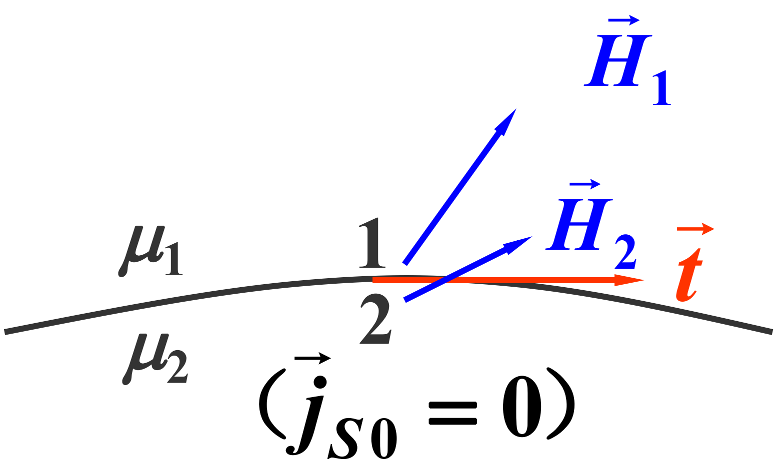
三．磁场的界面关系，静磁屏蔽*



由 $\oint_S \vec{B}\cdot d\vec{s} = 0$

可得 $\boxed{B_{1n} = B_{2n}}$ (1)

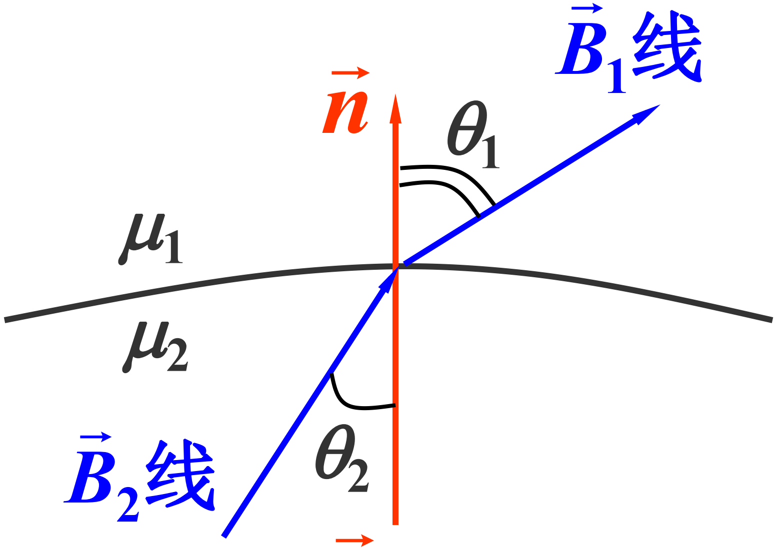
设界面无传导电流，



由 $\oint_L \vec{H}\cdot d\vec{l} = 0$

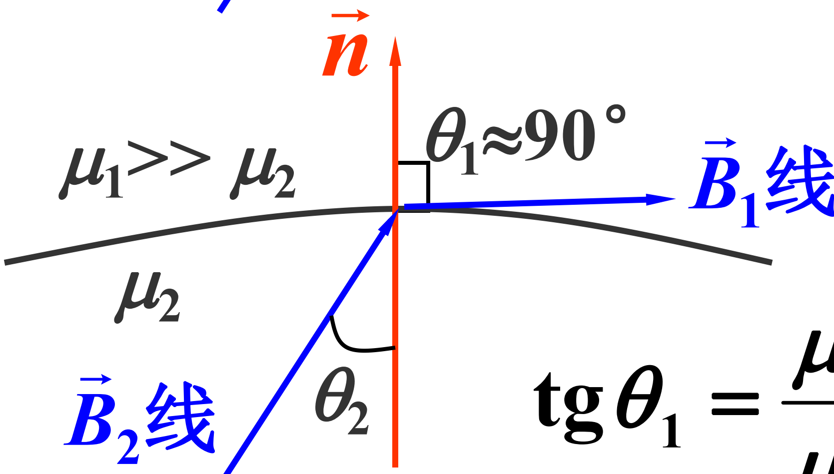
可得 $\boxed{H_{1t} = H_{2t}}$ (2)

即： $\dfrac{B_{1t}}{\mu_1} = \dfrac{B_{2t}}{\mu_2}$ (2)′



$$\frac{(2)'}{(1)}:\ \frac{1}{\mu_1}\mathrm{tg}\,\theta_1=\frac{1}{\mu_2}\mathrm{tg}\,\theta_2$$

若 $\mu_1>\mu_2$，则 $\theta_1>\theta_2$，



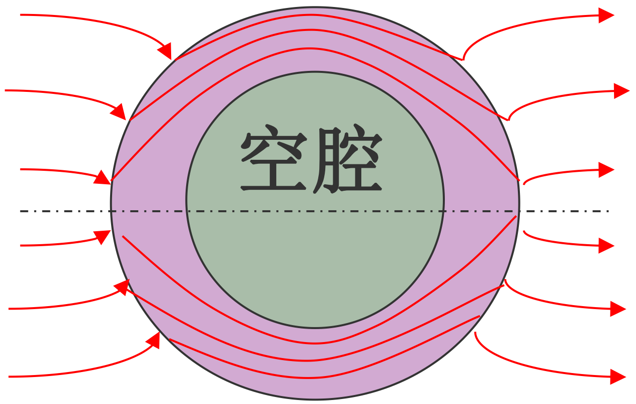
当 $\mu_1>>\mu_2$ 时，

$$\mathrm{tg}\,\theta_1=\frac{\mu_1}{\mu_2}\mathrm{tg}\,\theta_2>>1,\ \theta_2\neq 0,\ \theta_1\approx\frac{\pi}{2}。$$

在μ_1很大的介质1中，$\vec{B}$线几乎平行界面，

这就是铁磁质中 $\vec{B}$ 线沿铁芯延续的情形。

*静磁屏蔽



铁磁质的“磁屏蔽”作用

精密探头、显象管...都需要磁屏蔽。

§9.5　铁磁质

一、铁磁质与非铁磁质的比较

1．铁磁质、非铁磁质相同之处:

场方程　$\oint \vec{H}\cdot d\vec{l} = I_{0内}$　　$\oint \vec{B}\cdot d\vec{S} = 0$

H、B关系　$\vec{H} \equiv \dfrac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M}$

磁化电流　$I' = \oint_L \vec{M}\cdot d\vec{l}$　　$\vec{j}\,' = \vec{M}\times\hat{n}$

边界条件　$B_{1n}=B_{2n}$，　　$H_{1t}=H_{2t}$

2．铁磁质、非铁磁质不同之处

物性方程不同

非铁磁质：$B=\mu H$，B、H同向

铁磁质：形式上可写作 $B=\mu H$

但μ不是常数

磁化机制不同

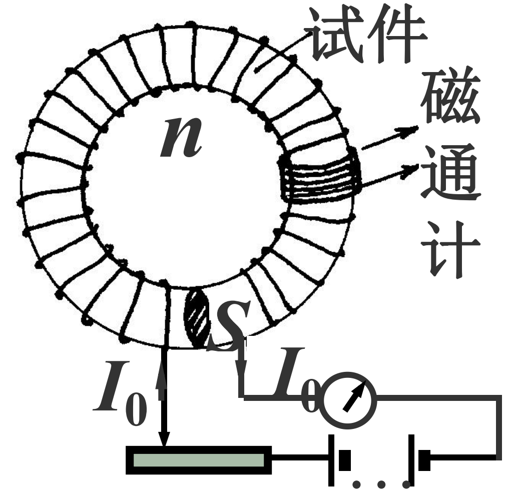
非铁磁质：磁化是分子的个体行为

铁磁质：由于量子效应，在小区域自发磁化整齐——磁畴

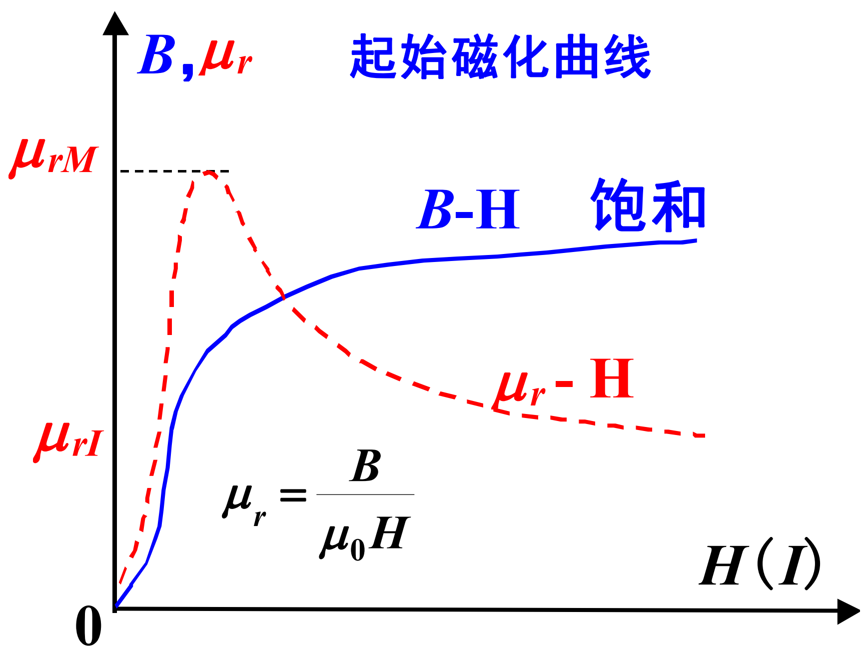
二、铁磁质的磁化规律

测 $\Phi \to B = \dfrac{\Phi}{S}$，　测 $I_0 \to H = nI_0$

$$(\because \oint_L \vec{H}\cdot d\vec{l} = H\cdot L = NI_0,\quad \therefore H = \frac{N}{L}\cdot I_0 = nI_0)$$



（1）起始磁化曲线



非线性

饱和性

磁导率与H有关

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

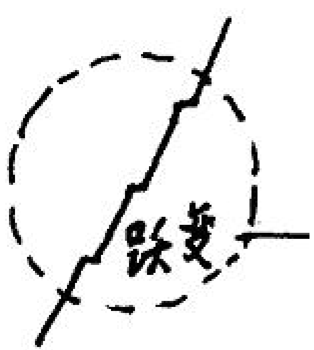
说明：

* B 有饱和现象，但仍有一定的斜率。原因：

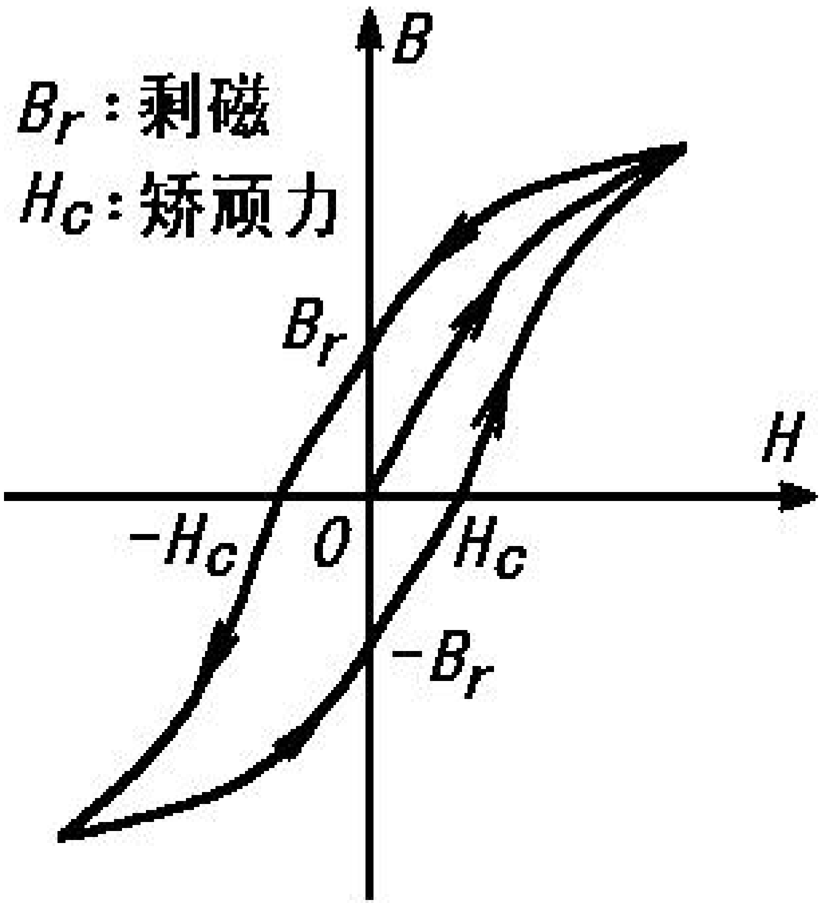
$$H \equiv \frac{B}{\mu_0} - M \quad \to B = \mu_0 \left(H + M \right)$$

*可以看出 μ_r 不是常数。但是在给定了μ_r值的情况下，有 $\vec{B} = \mu \vec{H}$，通常形式上仍说成B与H成正比。

* 巴克豪森效应



（2）磁滞回线



在一个循环磁化过程中，单位体积磁滞损耗的能量与磁滞回线的面积成正比。

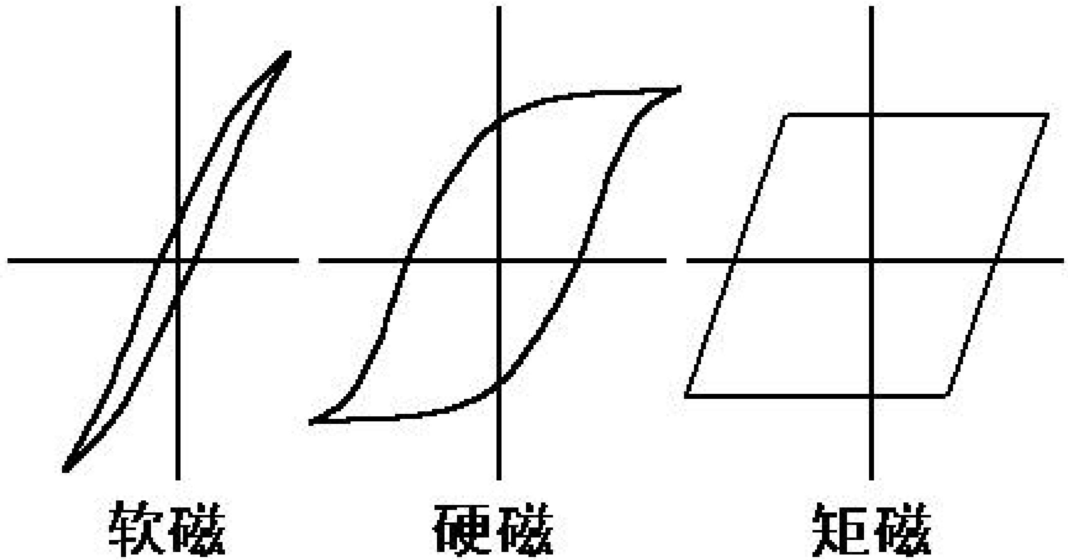
剩磁状态：

$$\mu_r \sim \pm\infty$$

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

（3）铁磁体分类

铁磁质按H_c分类:



软磁材料： 磁滞损耗小，交变磁场中的铁芯。

硬磁材料： 矫顽力和剩磁大，永磁体。

矩磁材料： “记忆”元件。

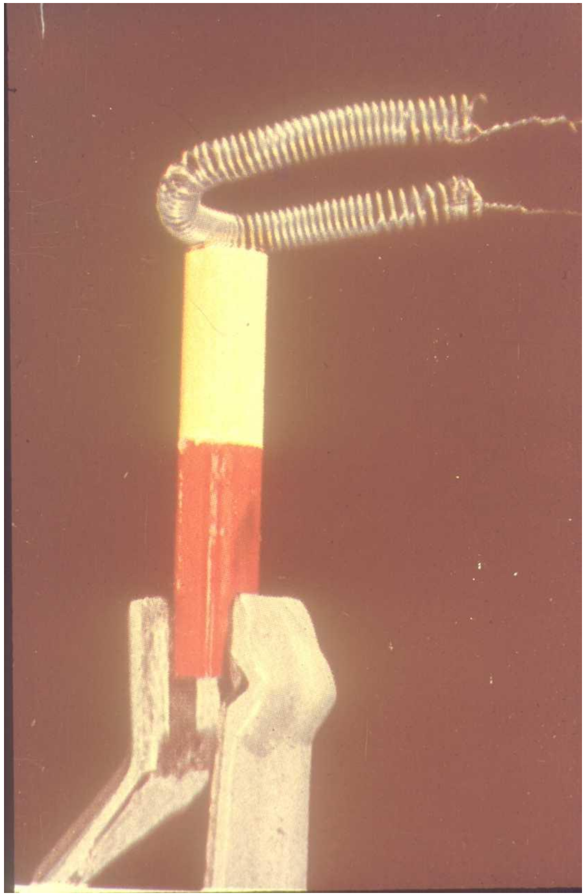
（4）居里温度

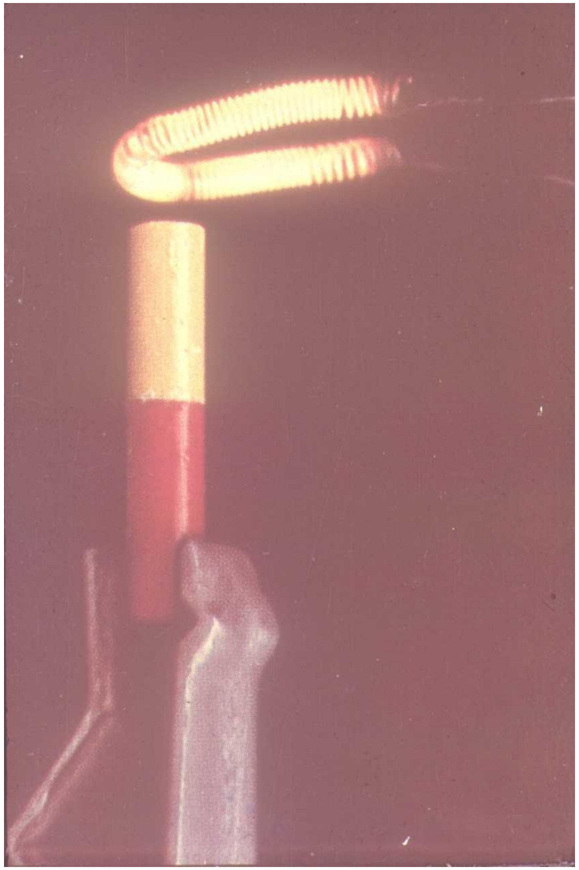
失去铁磁性（变为顺磁质）的临界温度。

T升高　$T=T_c$　铁磁质→顺磁质

　　　　$T<T_c$　又恢复铁磁性

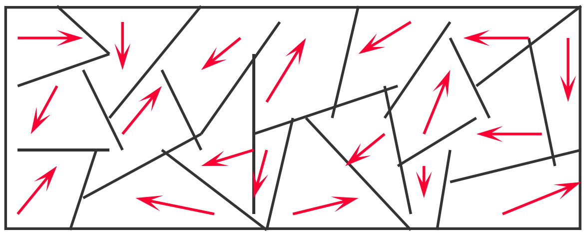
居里温度





三. 铁磁性起因

量子理论　磁畴

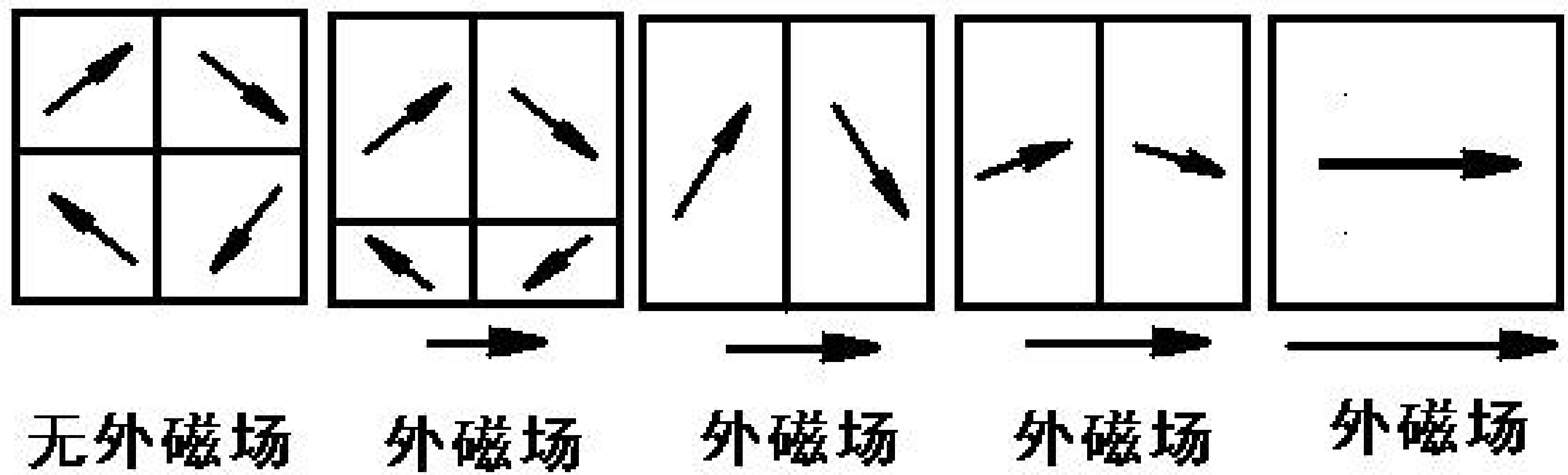


铁磁质中起主要作用的是电子的自旋磁矩。

各电子的自旋磁矩靠交换耦合作用使方向一致，

从而形成**自发的均匀磁化小区域——磁畴**。

一个磁畴中约有10^{17}~10^{21}个原子.



磁滞是由于晶体缺陷和内应力、以及磁畴在外磁场减退时，就近沿易磁化方向排列而造成的。

居里点:温度升高，磁畴瓦解，表现顺磁性

铁磁体的磁致伸缩：

原因：磁畴的 $\vec{M}$ 方向改变

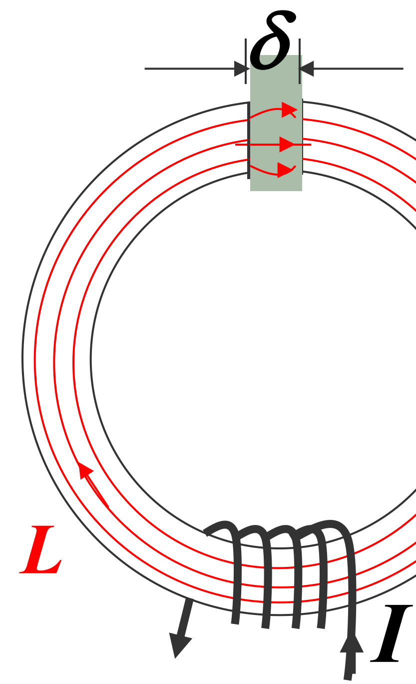
→晶格间距改变

→铁磁体长度和体积改变

（长度相对改变约10^{-5}量级）

用途：可用于制作超声发生器等。

*§9.6　简单磁路



磁路也有类似于电路的规律。

设铁环长 l，气隙长度 δ，

根据 $\vec{H}$的环路定理

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

设铁环中和气隙中的磁场强度和磁感应强度分别为 $\vec{H}, \vec{H}_0; \vec{B}, \vec{B}_0$ 有：

$$Hl + H_0\delta = NI$$

$$\frac{B}{\mu}l+\frac{B_0}{\mu_0}\cdot\delta=NI$$

设铁环截面积 S ,气隙处磁场截面积 S',
因为磁通是连续的，都是 Φ ，所以

$$\frac{\Phi}{S\mu}l+\frac{\Phi}{S'\mu_0}\cdot\delta=NI$$

$$\Phi=\frac{NI}{\dfrac{l}{S\mu}+\dfrac{\delta}{S'\mu_0}}\ \underline{\underline{令}}\ \frac{\overbrace{\varepsilon_m}^{磁通势}}{\underbrace{R_m+R'_m}_{磁阻}}$$

把 $\boxed{\Phi = \dfrac{\mathcal{E}_m}{R_m + R'_m}}$ 和 $\boxed{R_m = \dfrac{l}{S\mu}}$ 与电路相比

$$\mathcal{E}_m \sim \mathcal{E}, \quad \Phi \sim I, \quad R_m \sim R, \quad \mu \sim \sigma$$

$$\frac{R_m}{R'_m} = \frac{l \cdot S' \cdot \mu_0}{\delta \cdot S \cdot \mu_r \mu_0} \doteq \frac{l}{\delta \mu_r}$$

若$\mu_r = 10^3$，则$\delta = 1\,\mathrm{mm}$的气隙，其磁阻相当于$l = 1\,\mathrm{m}$的铁芯磁阻，

所以气隙对磁路影响很大。

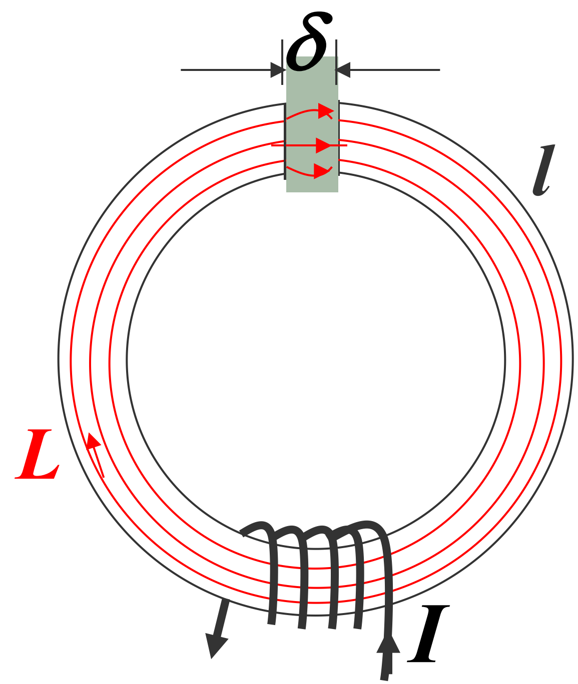
例：铁环环长 l=0.5m，截面积 S=4×10^{-4} m^2，气隙宽δ=1.0 ×10^{-3}m。环上一部分绕有线圈 N=200匝，通电流I=0.5A，铁心μ_r=5000，求：铁环气隙中的磁感应强度和磁通量。

解 根据 $\vec{H}$ 的环路定理

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

$$Hl + H_0\delta = NI$$

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



$$Hl + H_0\delta = NI$$

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

$$B = \frac{\mu_0 NI}{\frac{l}{\mu_r}+\delta} = \frac{4\pi\times10^{-7}\times200\times0.5}{\underbrace{\frac{0.5}{5000}}_{10^{-4}（铁心）}+\underbrace{10^{-3}}_{（气隙）}} = 0.114 \quad T$$

可见，气隙虽小，但是大大影响铁心内的磁场。

磁通量 $\Phi = BS$

$$= 0.114\times4\times10^{-4} = 4.56\times10^{-5}\ \mathrm{Wb}$$