第十六章 物质中的磁场

磁场不仅与电流和运动电荷有关

而且还会与磁介质发生相互作用

(电场与电介质的极化)

第十六章 物质中的磁场

熟练掌握：

16.1 磁介质的磁化；

16.2 磁场强度；

一般了解：

16.3 顺磁性与抗磁性；

16.4 铁磁性。

§16-1 磁介质的磁化

1.磁介质

在磁场的作用下能够获得磁矩的物质。

磁介质在磁场中被磁化后，介质内的磁感应强度B为真空中原来的磁感应强度B_0和附加磁感应强度B'之和，即：

$$B = B_0 + B'$$

依据附加B'的不同，磁介质可分为三类：

1) 顺磁质 $B > B_0$
2) 抗磁质 $B < B_0$
3) 铁磁质 $B >> B_0$

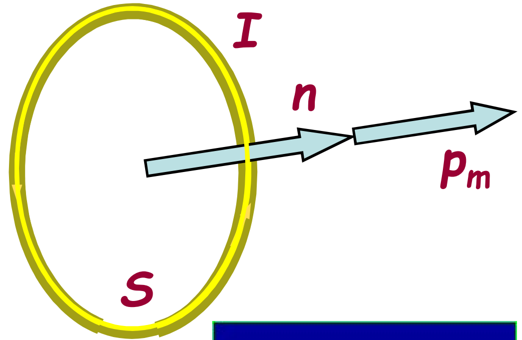
磁矩的来源?

2.分子电流 分子磁矩

➢1)分子电流(I)

分子或原子中所有电子对外界所产生磁效应总和可以等效于一个圆电流，即分子电流。

➢2)分子磁矩(p_m)



每一个分子电流都具有磁矩称为分子磁矩。

两者的关系： $\boldsymbol{p}_m = IS\vec{e}_n$

$$B = \frac{\mu_0 p_m}{2\pi x^3}$$

---解释磁现象微观机制的分子电流假设

3.磁化强度

是表征磁介质磁化程度的物理量，定义为磁介质单位体积内分子磁矩的矢量和。

$$\boldsymbol{M}=\sum \boldsymbol{p}_m/\Delta V$$

M的方向？

M的单位：**A/m**，对真空：**M=0**。

如果介质内各点的**M**都相同，称为均匀磁化。

如果介质内各点的**M**不同，称为不均匀磁化。

此时**ΔV**是取自考察点附近的无限小体积元，而$\sum \mathbf{p}_m$是该体积元内各分子磁矩的矢量和。

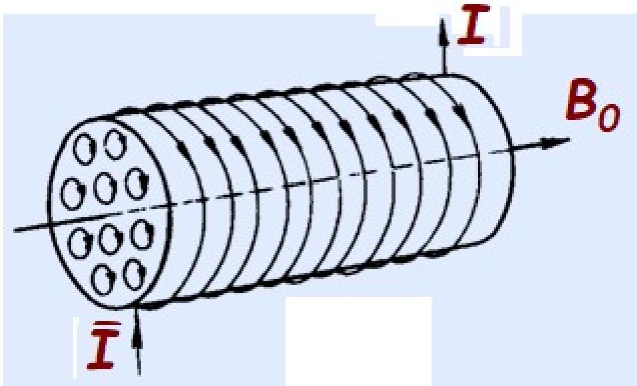
§16-2 磁场强度

1.束缚电流(磁化电流)

介质的磁化可用磁化强度来描述，也可以用磁化电流来描述。

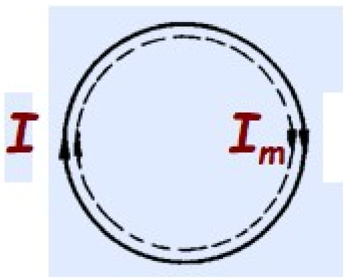
考虑充满均匀磁介质的无限长直载流螺线管：

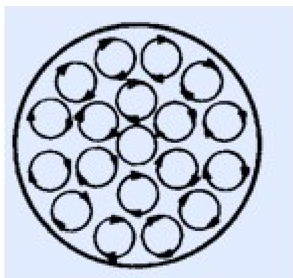
通电后产生均匀磁场B_0，介质被均匀磁化，即磁介质中分子电流的磁矩将取向磁场的方向排列起来，这时分子电流的绕行方向是一致的。

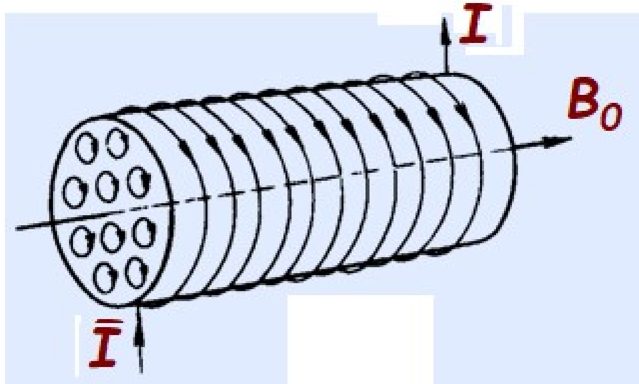


在磁介质内部任意位置上，通过的分子电流都是成对出现的，而且方向相反，它们的效果会互相抵消；而在截面的边缘上，分子电流不能被抵消，就会形成和截面边缘重合的圆电流。

对于磁介质整体，未被抵消的电流沿圆柱面流动，宏观上把它称为磁化电流，常用I_m表示。



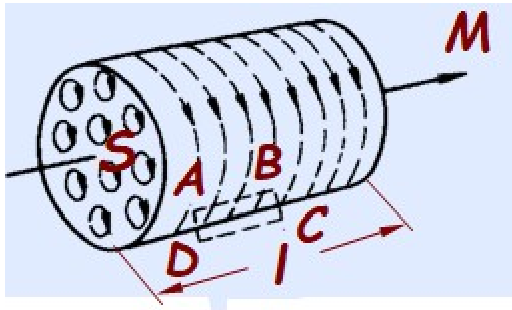




2.磁化电流与磁化强度的关系

磁化电流与磁化强度成右手螺旋关系。

仍以长直载流螺线管为例，在磁介质中截取长l的圆柱体，设单位长度的磁化电流密度为j_m，则：



$$\Delta I_m = j_m l$$

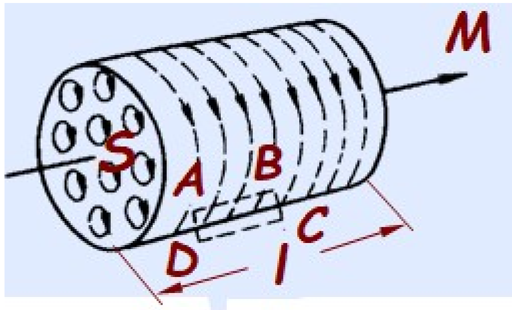
该介质段内的总分子磁矩等于磁化电流产生的磁矩，即：

$$\left|\sum_i \vec{p}_m\right| = \Delta I_m S = j_m l S$$

代入**M**的定义式 $\boldsymbol{M}=\sum \boldsymbol{p}_m/\Delta V$ ，可得：

$$\left|\boldsymbol{M}\right|=\frac{\left|\sum_i \boldsymbol{p}_m\right|}{\Delta V}=\frac{j_m lS}{Sl}=j_m$$

即：磁介质表面上某处的磁化强度在数值上等于磁化电流的线密度。



下面讨论磁化强度与磁化电流强度的关系：

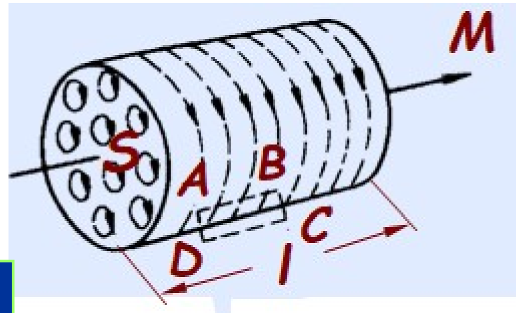
沿介质表面附近取闭合回路**ABCD**，**AB**在介质内，**BC**、**AD**与柱面垂直，**CD**在介质外，则：

$$\oint_L \vec{M}\cdot d\vec{l} = \int_A^B \vec{M}\cdot d\vec{l} + \int_B^C \vec{M}\cdot d\vec{l} + \int_C^D \vec{M}\cdot d\vec{l} + \int_D^A \vec{M}\cdot d\vec{l}$$

对于均匀磁化，介质外**M=0**，介质内**M=j_m**

$$\oint_L \vec{M}\cdot d\vec{l} = \int_A^B \vec{M}\cdot d\vec{l} = M\cdot\overline{AB} = j_m\cdot\overline{AB}$$

$j_m\cdot\overline{AB}$ 为通过闭合回路的总磁化电流，则：



$$\boxed{\oint_L \vec{M}\cdot d\vec{l} = \sum_{L内} I_m}$$

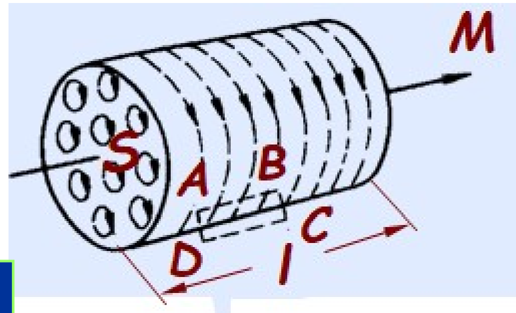
磁化强度**M**沿任意闭合回路**L**的积分，等于通过该回路所包围的磁化电流强度的代数和。

$$\oint_L \vec{M}\cdot d\vec{l} = \int_A^B \vec{M}\cdot d\vec{l} + \int_B^C \vec{M}\cdot d\vec{l} + \int_C^D \vec{M}\cdot d\vec{l} + \int_D^A \vec{M}\cdot d\vec{l}$$

对于均匀磁化，介质外**M=0**，介质内**M=j_m**

$$\oint_L \vec{M}\cdot d\vec{l} = \int_A^B \vec{M}\cdot d\vec{l} = M\cdot\overline{AB} = j_m\cdot\overline{AB}$$

$j_m\cdot\overline{AB}$ 为通过闭合回路的总磁化电流，则：



$$\boxed{\oint_L \vec{M}\cdot d\vec{l} = \sum_{L内} I_m}$$

说明：上式虽然是从均匀磁介质与矩形闭合回路推导出的，但它对于任何情况都普遍适用。

3.磁场强度 磁介质中的安培环路定理

当传导电流的磁场中存在磁介质时，介质内的总磁场应为传导电流产生的磁场***B*₀**和磁化电流产生的磁场***B'***的矢量和，即：

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

介质中的安培环路定理：

$$\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \left(\sum I_0 + \sum I_m \right)$$

利用磁化电流与磁化强度之间的关系，可得：

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

$$\oint_L (\frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M})\cdot d\vec{l} = \sum I_0$$

引入一新的物理量—磁场强度**H**：

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

H的单位：安培/米(**A/m**)

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

上式称为有介质时的安培环路定理：磁场强度**H**沿任意闭合路径**L**的环流，等于穿过该路径所包围的传导电流的代数和。

4.有磁介质时的磁场高斯定理

存在介质时的磁场由传导电流和磁化电流共同激发，所产生的磁场仍为闭合曲线。

即介质中总磁感应强度的高斯定理仍然成立：

$$\oint_S \vec{B}\cdot d\vec{s} = \oint_S (\vec{B_0} + \vec{B'})\cdot d\vec{s} = 0$$

5.磁化率 磁导率

由H的定义式：

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \vec{M}$$

对于各向同性的磁介质， M与H成正比：

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

χ_m称为磁化率，为一无量纲的物理量。

对于抗磁质：$\chi_m < 0$， $B < B_0$

对于顺磁质：$\chi_m > 0$， $B > B_0$

对于铁磁质：χ_m很大且不是恒量， $B >> B_0$

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

令： $\boxed{\mu_r = 1+\chi_m}$ 称为相对磁导率

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

μ称为磁导率，也是一无量纲的物理量。

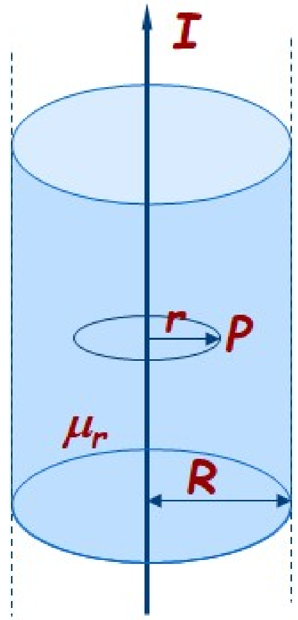
对真空： $\vec{M} = 0 \quad \chi_m = 0 \quad \mu_r = 1 \quad \mu = \mu_0$

$$\boxed{\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \longrightarrow \vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0}}$$

显然，μ，μ_r，χ_m 三者得一可知其余两个。

课堂练习题16-1：

一无限长圆柱形载流导体，相对磁导率为μ_r，半径为R，有电流I沿轴线方向均匀分布，求：1)导体内任一点的B；2)导体外任一点的B；3)通过长为L的圆柱体的纵截面的一半的磁通量。



解：1)过距轴线r的任一点P做环路积分，如图所示。可知：

积分圆周L与磁场线重合，沿圆周H为常量，所以：

$$\oint \vec{H} \cdot \mathrm{d}\vec{l} = 2\pi r H (r < R)$$

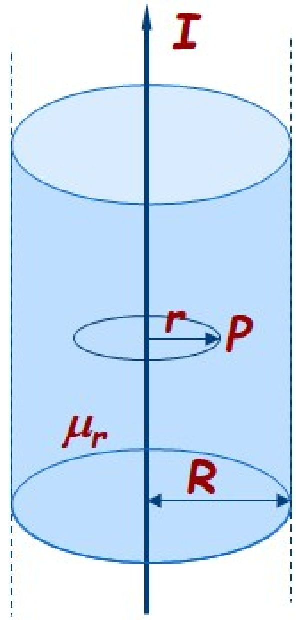
根据有介质的安培环路定理：

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

因电流均匀分布，所以电流密度为：$j = \dfrac{I}{\pi R^2}$

在半径为***r***的截面中

$$\sum_{(L内)} I_i = \pi r^2 j = (\frac{r}{R})^2 I$$



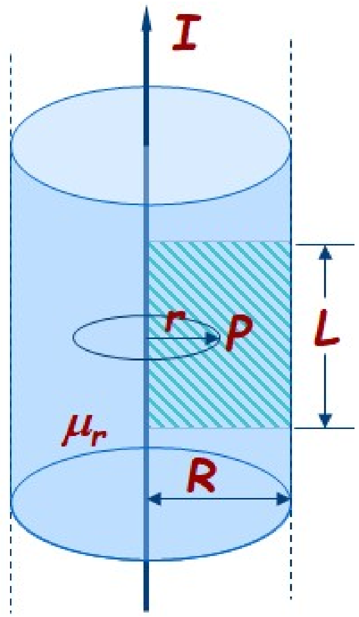
所以 $2\pi r H = (\dfrac{r}{R})^2 I,\qquad H = \dfrac{Ir}{2\pi R^2}$

则：$B = \mu_0 \mu_r H = \dfrac{\mu_0 \mu_r I r}{2\pi R^2} (r < R)$

2)在导线外**P**点：$\oint_L \vec{H}\cdot \mathrm{d}\vec{l} = 2\pi r H = \sum_{(L内)} I_i \ (r > R)$

因**r>R**，有：$\sum_{(L内)} I_i = I$

所以：$H = \dfrac{I}{2\pi r}, \qquad B = \mu_0 H = \dfrac{\mu_0 I}{2\pi r}$



2)在导线外**P**点：$\oint_L \vec{H}\cdot \mathrm{d}\vec{l} = 2\pi r H = \sum_{(L内)} I_i \; (r > R)$

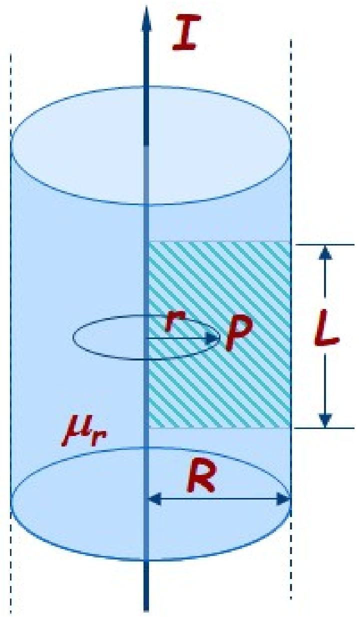
因***r>R***，有：$\sum_{(L内)} I_i = I$

所以：$H = \dfrac{I}{2\pi r}, \qquad B = \mu_0 H = \dfrac{\mu_0 I}{2\pi r}$

3)如图所示，通过长为***L***的圆柱体纵截面的一半的磁通量为：

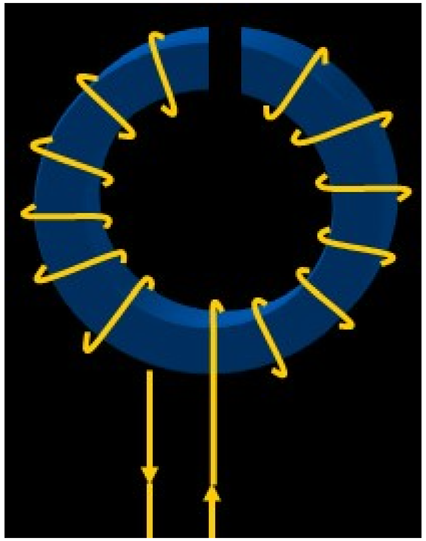
$$\Phi = \int_s \vec{B}\cdot \mathrm{d}\vec{S} = \int_0^R BL\,\mathrm{d}r$$

$$= \frac{\mu_0 \mu_r IL}{2\pi R^2}\int_0^R r\,\mathrm{d}r = \frac{\mu_0 \mu_r IL}{4\pi}$$



课堂练习题16-2：

一铁环外均匀绕有绝缘导线，导线中通有恒定电流I。若在铁环上开一狭缝，求：1)开狭缝前后，铁环中的B，H 和M 如何变化；2)铁环与缝隙中的B，H 和M。



解：由磁高斯定理可知，磁场中磁感应强度B总是连续的，而磁场强度H线却不一定连续；所以，H的环流是由回路中的传导电流来决定的，而B的环流是由回路中的传导电流和磁化电流(或束缚电流)共同决定的。

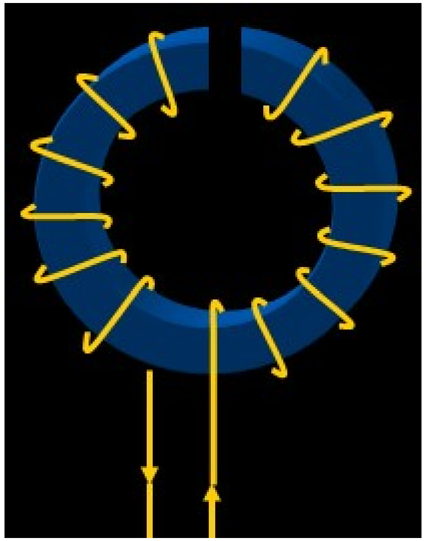
1)由上述分析可知，开狭缝前环内各点的*H*值相同，*B*=μ*H*值也相同。因此由含介质的安培环路定理：

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

得 *Hl*＝*NI* (*l*为铁环平均周长)

即：$H = \dfrac{NI}{l}$,　　$B = \mu_0\mu_r H = \dfrac{\mu_0\mu_r NI}{l}$

$$M = \chi_m H = \chi_m \frac{NI}{l}$$



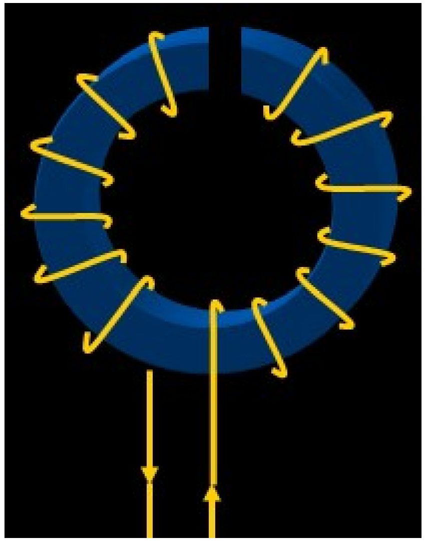
开狭缝后磁场线仍然是连续的，同时由于狭缝极窄，所以可认为铁环中与缝隙中的*B*值相等

而H值不再相等。由 $\oint_L \vec{H}\cdot \mathrm{d}\vec{l} = NI$

得：$H_{环}(l-\Delta l)+H_{缝}\Delta l = NI$ （Δl为狭缝宽度）

考虑到$\Delta l << l$，近似得：

$$H_{环}l + H_{缝}\Delta l = NI$$



则上式可写为：$\dfrac{B}{\mu_0\mu_r}l+\dfrac{B}{\mu_0}\Delta l = NI$

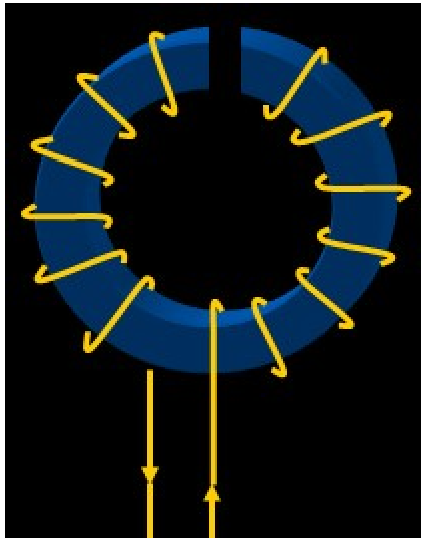
即得：$$B=\frac{\mu_0\mu_r NI}{l+\mu_r\Delta l}$$

虽然Δl很小，但对铁环来说，一般μ_r较大，所以开狭缝后铁环中的B值比开狭缝前有所减小。

同时可知：

$$H_{环}=\frac{B}{\mu_0\mu_r}=\frac{NI}{l+\mu_r\Delta l}$$

$$M_{环}=\chi_m H_{环}=\chi_m\frac{NI}{l+\mu_r\Delta l}$$



可见***H***、***M***值都比开狭缝前减小。

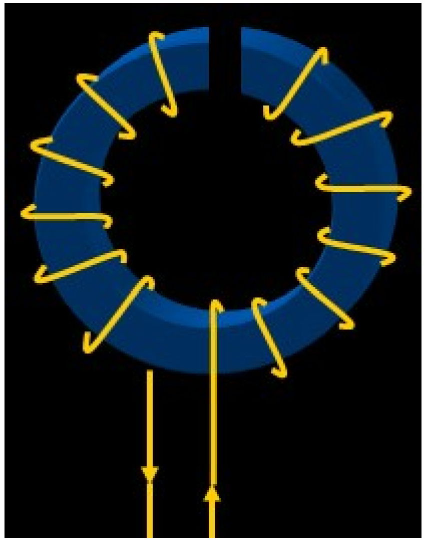
2)由上可知，开缝后铁环中与缝隙中的**B**值相等，磁场线是连续的，即：

$$B_{环}=B_{缝}=\frac{\mu_0\mu_r NI}{l+\mu_r\Delta l}$$

而由$H=B/\mu_0\mu_r$和$M=\chi_m H$ 可得：

$$H_{环}=\frac{B}{\mu_0\mu_r}=\frac{NI}{l+\mu_r\Delta l}\qquad H_{缝}=\frac{B}{\mu_0}=\frac{\mu_r NI}{l+\mu_r\Delta l}$$

$$M_{环}=\chi_m H_{环}=\chi_m\frac{NI}{l+\mu_r\Delta l}\qquad M_{缝}=0$$



开狭缝前后，**B**、**H**、**M**均发生变化。由于**B**线总是连续的，且狭缝很窄，可认为**B**线仍然被束缚在环中和缝隙中。但**B**值在开狭缝后有所减小；而**H**不连续，狭缝中的**H**值大于铁环中的**H**值。

§16-3 顺磁性与抗磁性

1.原子中电子的磁矩

由原子物理学可知，原子中的电子参与自旋和绕核的轨道运动，两种运动都会产生磁距。电子绕核运动的回旋频率为：

$$\boxed{\nu = \frac{\upsilon}{2\pi r}}$$

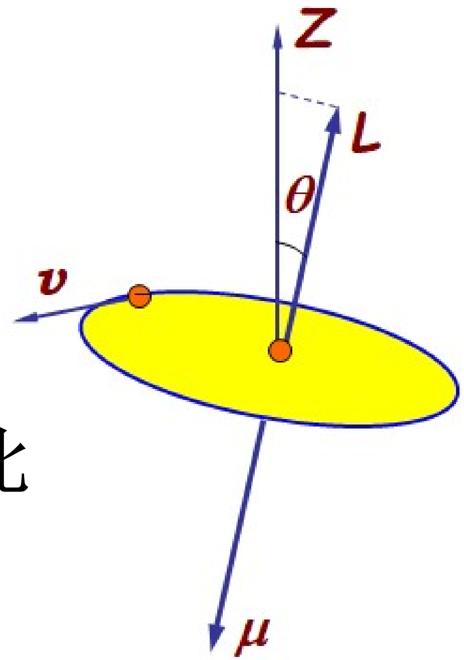
等效电流为：$I = \dfrac{dq}{dt} = \nu e = \dfrac{\upsilon e}{2\pi r}$

类似载流圆线圈磁矩的定义，我们也可引进电子轨道磁矩μ：

$$\mu = IS = \frac{\upsilon e}{2\pi r}\pi r^2 = \frac{1}{2}\upsilon e r$$

同时，电子具有做轨道运动的角动量：

$$\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p} = m\upsilon r\vec{n}$$



代入上式： $\mu = \frac{e}{2m}L$

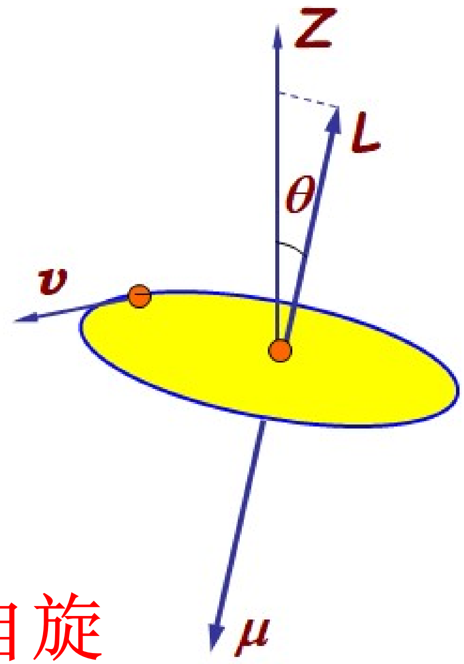
电子的角动量与磁矩反向，因此矢量式为：

$$\vec{\mu} = -\frac{e}{2m}\vec{L}$$

在量子理论中，轨道磁矩的值是量子化的，最小值称为玻尔磁子：

$$\mu_B = \frac{eh}{4\pi m} = 9.27\times10^{-24} A\cdot m^2$$

对于电子而言，自旋磁矩与自旋角动量的关系：



$$\boxed{\vec{\mu}_S = -\frac{e}{m}\vec{S}}$$

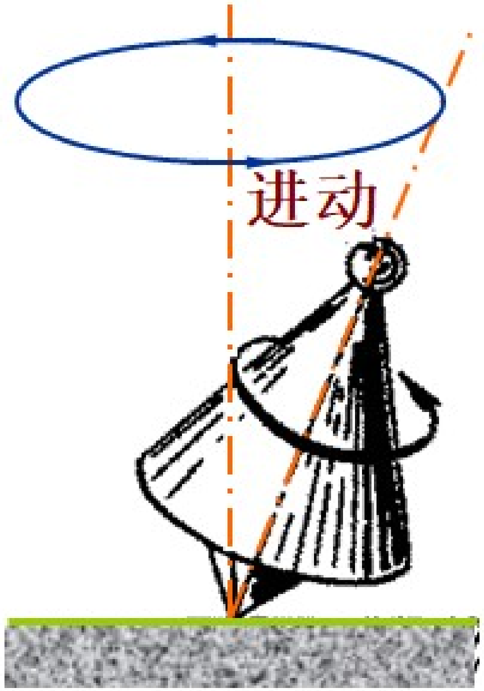
物质的磁性由电子轨道磁矩和自旋磁矩决定(**微观粒子有内禀自旋**)。

2.附加磁矩

➢进动

当磁介质在外场中时，分子中的运动电子将受到洛伦兹力的作用，其结果还要产生附加圆周运动。

该附加圆周运动是以外场方向为轴的转动。

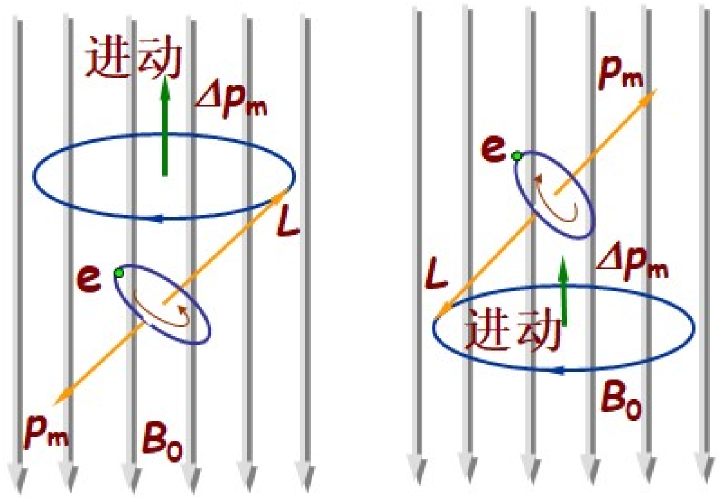


➢**可以证明:**

不论电子原来的磁矩与磁场方向之间的夹角是何值，在外场B_0中，电子角动量L进动的转向总是和B_0的方向构成右手螺旋关系。

$$p_m = ISn \Rightarrow M_B = p_m \times B_0 \Rightarrow M_B \mathrm{d}t = L' - L \Rightarrow \Delta p_m$$

因此电子的进动也等效于一个圆电流，其附加磁矩Δp_m方向的永远与B_0的方向相反。



3.抗磁质的磁化

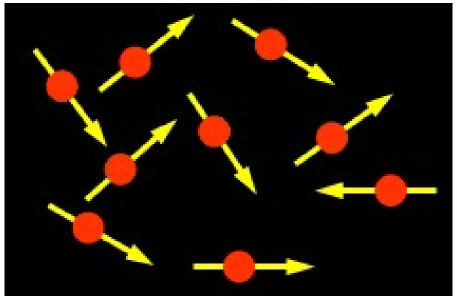
在没有外加磁场时，抗磁质内每个原子或分子中的所有电子的轨道磁矩和自旋磁矩的矢量和是等于零的。

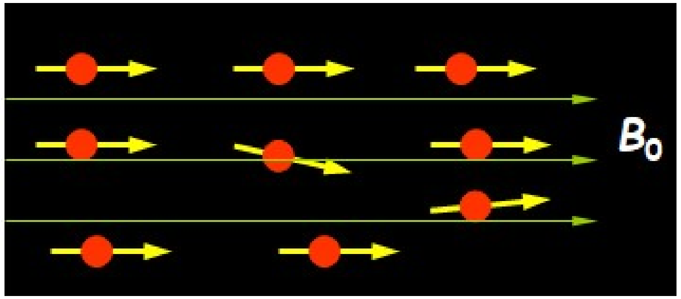
当存在外加磁场B_0时，抗磁质内原子或分子中电子轨道运动的平面在外场中的进动产生的附加磁矩Δp_m就会起作用。

磁体内大量分子的附加磁矩的矢量和$\Sigma\Delta p_m$与外场方向相反，这是抗磁性的起源。

4.顺磁质的磁化

在顺磁质中，每个原子或分子都有一定的磁矩p_m，但由于热运动，$\sum p_m=0$。但是，在外场的作用下，p_m转向外场方向，使$\sum p_m \neq 0$(远大于$\sum \Delta p_m$)，且与外场同向，这是顺磁性的起源。





外磁场B_0越大，优势取向作用越强；温度T越高，优势取向效用越弱。

§16-4 铁磁质

1.铁磁质的特性

1)$B' >> B_0$，$\mu_r = B/B_0$可达$10^2 \sim 10^3$；

2)μ_r (χ_m)不是常量；

3)外场停止作用后，仍能保留部分磁性；

4)存在居里点T_c。当$T > T_c$时铁磁质就转化为顺磁质，如：

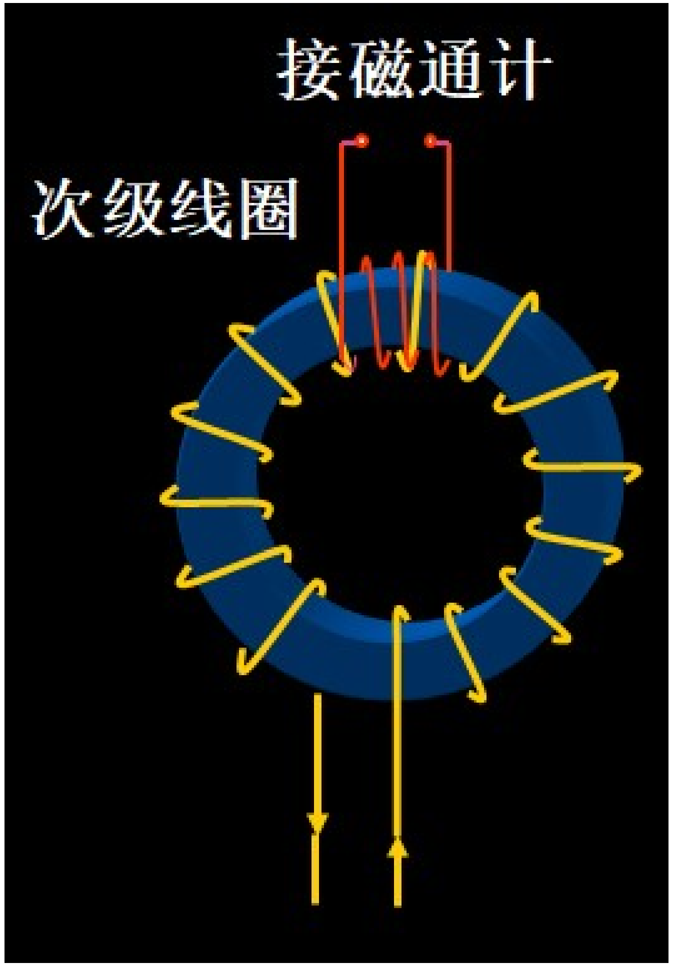
铁	镍	钴
1040K	631K	1388K

铁磁质的用途：

可用于电机、磁记录，等等。

2.铁磁质的磁化规律

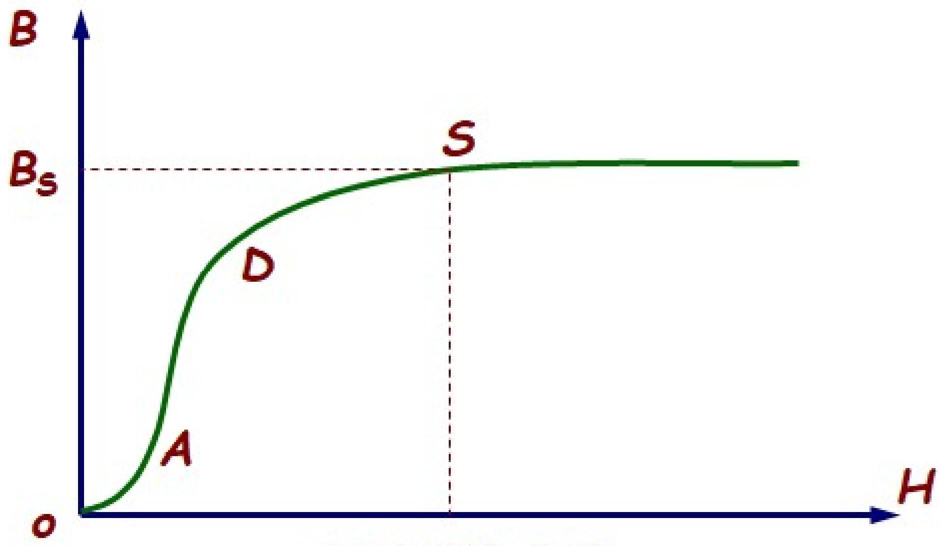
实验装置如图所示：



由安培环路定理，知铁芯中磁场强度的大小为$H=nI$，在磁通计中可测得磁感应强度B。

由此可得，磁场强度H与磁感应强度B之间的关系曲线：

➢1)起始磁化曲线



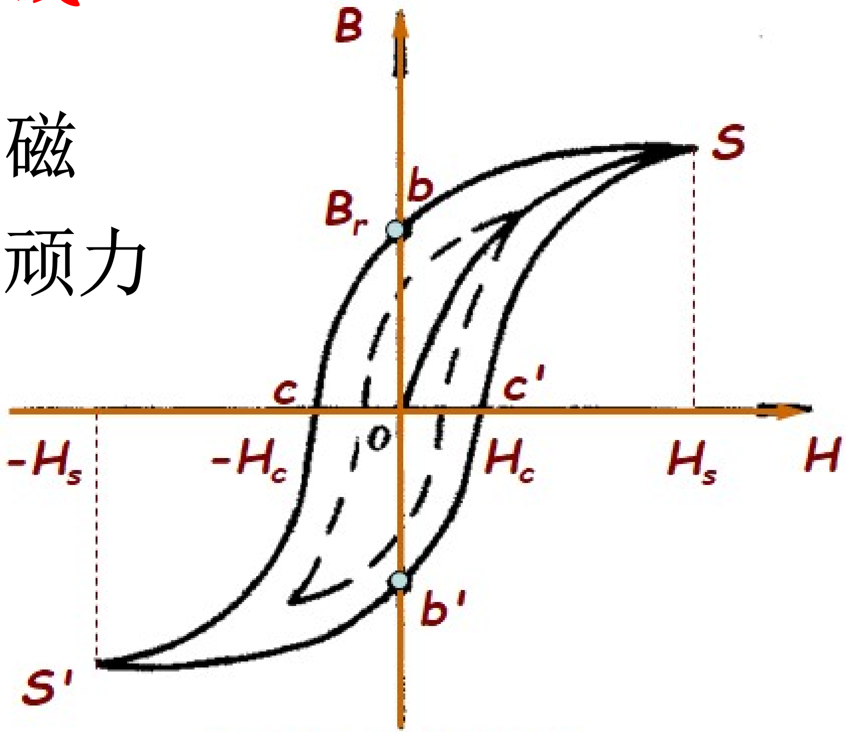
起始磁化曲线

---B_S称为饱和磁感应强度

➢2)磁滞回线

B_r—剩磁

H_c—矫顽力

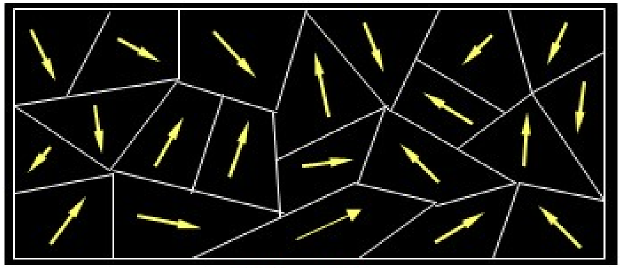


铁磁质的磁滞回线

磁滞损耗—磁化过程中，会发热消耗能量，与磁滞回线所包围的面积成正比。

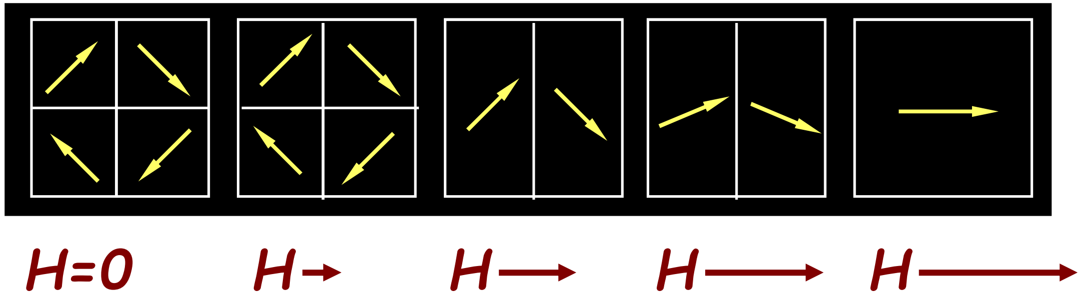
3.铁磁质的微观结构

近代理论认为铁磁质的磁性主要来源于电子自旋磁矩。相邻原子中的电子自旋磁矩通过交换偶合作用而平行排列，形成一个自发磁化达饱和状态的微小区域—磁畴。



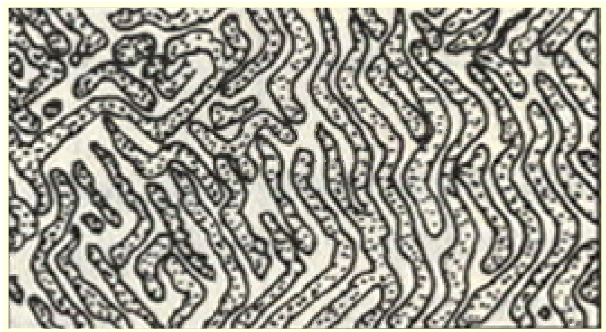
磁 畴

在无外场时，每个磁畴内的磁矩取同向，但各磁畴排列杂乱，宏观不显磁性。在外场作用下，该磁畴转向，表现为磁化过程。



磁化过程中磁畴结构变化示意图

当外场停止作用时，由于摩擦阻力，仍会出现剩磁。但是当温度升高时，磁畴被破坏，表现为居里点。磁畴的体积：10^{-8}~$10^{-12}m^3$，约有原子10^{17}~10^{21}个。



磁畴结构的铁粉图形

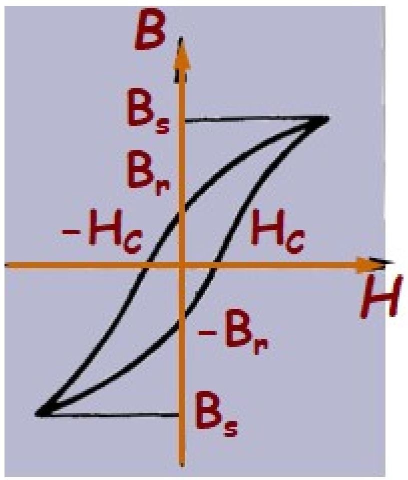
---磁畴理论的基本观点

4.铁磁质的分类和应用

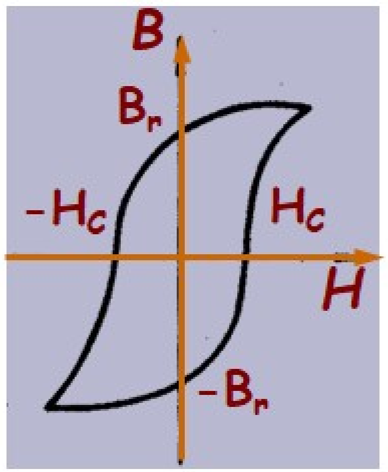
软磁材料：$H_C<10^2 A/m$，磁滞损耗小，交变磁场；

硬磁材料：$H_C>10^2 A/m$，剩磁大难消除，永久磁铁；

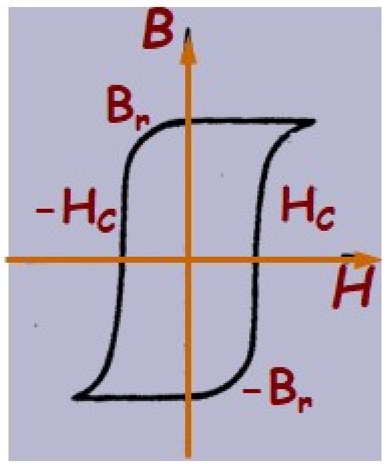
矩形材料：B_r接近饱和值B_S，信息储存。



软磁材料



硬磁材料



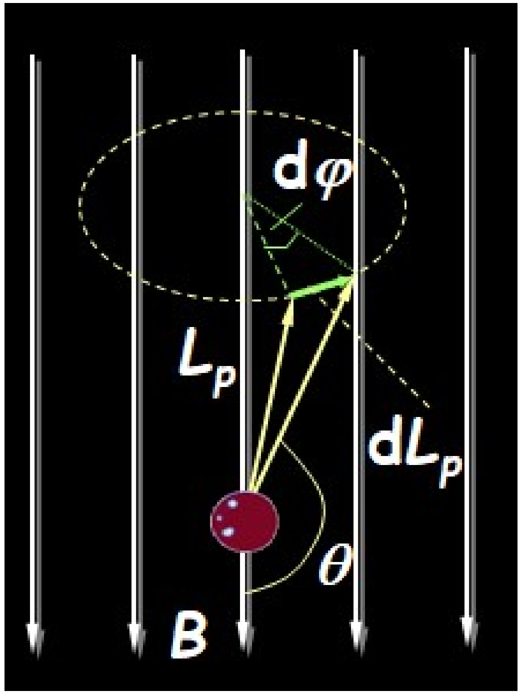
矩形材料

课堂练习题16-3☆：

已知质子的磁矩为$p_m=1.4\times10^{-26}A\cdot m^2$，自旋角动量为$L_p=0.53\times10^{-34}kgm^2/s$，求：质子在磁感应强度$B=0.50T$的均匀磁场中的进动角速度。

解：因为质子带正电，所以它的自旋磁矩p_m与自旋角动量L_p的方向是相同的。所以质子在磁场B中所受磁力矩为：

$$M_p=\left|\vec{p}_m\times\vec{B}\right|=p_mB\sin\theta$$



质子以磁场为轴线做进动，在**d*t***时间内转过角度**d**φ，角动量的增量为**d*L*p**，由图可知：

$$dL_p = L_p \sin(\pi - \theta) d\varphi = L_p \sin\theta \, d\varphi$$

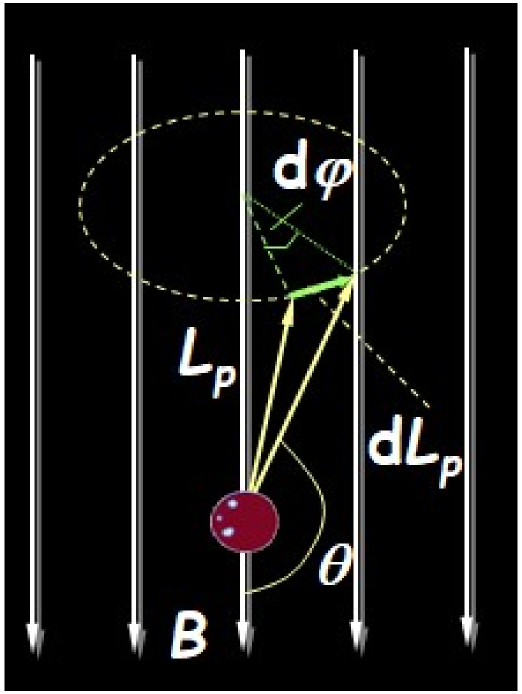
又因角动量的时间变化率等于力矩，即：

$$M_p = \mathrm{d}L_p / \mathrm{d}t$$

$$\mathrm{d}L_p = M_p \mathrm{d}t$$

所以：

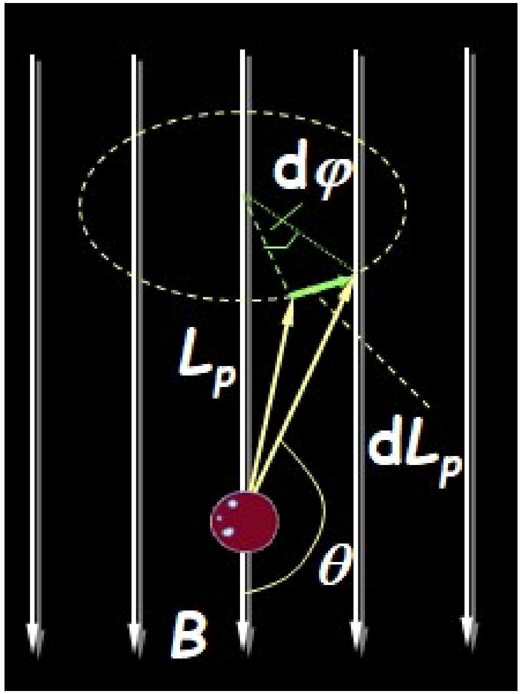
$$L_p \sin\theta \mathrm{d}\varphi = p_m B \sin\theta \mathrm{d}t$$



从而可求得质子在磁场中进动角速度

$$\omega_p = \frac{\mathrm{d}\varphi}{\mathrm{d}t} = \frac{p_m B \sin\theta}{L_p \sin\theta} = \frac{p_m B}{L_p} = 1.32 \times 10^8 \mathrm{rad/s}$$

质子进动的角速度与磁场的夹角无关，说明进动方向和磁场方向总是相反。



磁介质与电介质的对比

项目	电介质	磁介质
描述极化或磁化状态量	极化强度 $\boldsymbol{P}=\dfrac{\sum \boldsymbol{p}_{分子}}{\Delta V}$	磁化强度 $\boldsymbol{M}=\dfrac{\sum \boldsymbol{p}_{m分子}}{\Delta V}$
极化或磁化的宏观效果		
基本矢量		
介质对场的影响		
辅助矢量		

磁介质与电介质的对比

高斯定理	$\oint_S \vec{D}\cdot d\vec{S}=\sum_{(S)} q_0$	$\oint_S \vec{B}\cdot d\vec{S}=0$
环流定理	$\oint_L \vec{E}\cdot \mathrm{d}\vec{l}=0$	$\oint_L \vec{H}\cdot \mathrm{d}\vec{l}=\sum I_0$
各向同性介质	$\vec{P}=\varepsilon_0\chi_e\vec{E}$ $\sigma'=\vec{P}\cdot\vec{n}$ $\vec{D}=\varepsilon_0\varepsilon_r\vec{E}$	$\vec{M}=\chi_m\vec{H}$ $\vec{j}_m=\vec{M}\times\vec{n}$ $\vec{H}=\vec{B}/\mu_0\mu_r$
常量		

物质中的磁场【学习重点】

1.深刻理解分子电流、磁矩、束缚电流、磁化强度、磁场强度、磁导率、回旋频率、附加磁矩、进动、磁力矩等**概念**。

2.熟练运用介质存在的安培环路定理、磁化强度、磁化电流、磁场强度的定义和相互关系等求解**介质中磁场的相关问题**。

<抽象的物理定义>

介质存在的安培环路定理和介质磁化

第五次作业 物质中的磁场

P301：

16-2

16-3

16-4

16-5

16-7

16-8