大学物理

University Physics

华 中 科 技 大 学 物 理 学 院

王宁

ningwang@hust.edu.cn

回顾

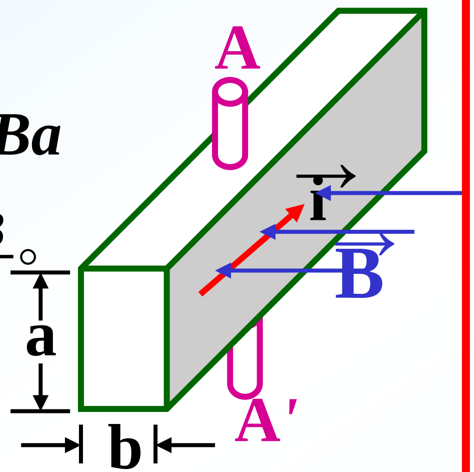
- 磁场与实物的相互作用 $\vec{F}=\vec{F}_e+\vec{F}_m=q\vec{E}+q\vec{v}\times\vec{B}$

- 磁场中的电传导—霍耳效应

$$E_H=vB$$

$$V_H=\int_0^a vBdl=vBa$$

$$V_H=\frac{1}{nq}\frac{IB}{b}=R_H\frac{IB}{b}\text{。}$$

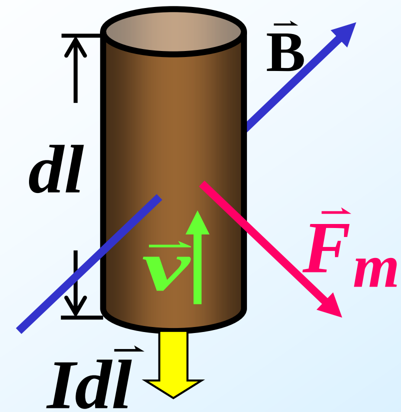


- 载流导体在磁场中所受的力

安培定律

$$\boxed{d\vec{F}=Id\vec{l}\times\vec{B}}$$

$$\boxed{\vec{F}=\int_0^l Id\vec{l}\times\vec{B}.}$$



- 安培力的实质：磁场通过洛仑兹力而施于导体的作用力

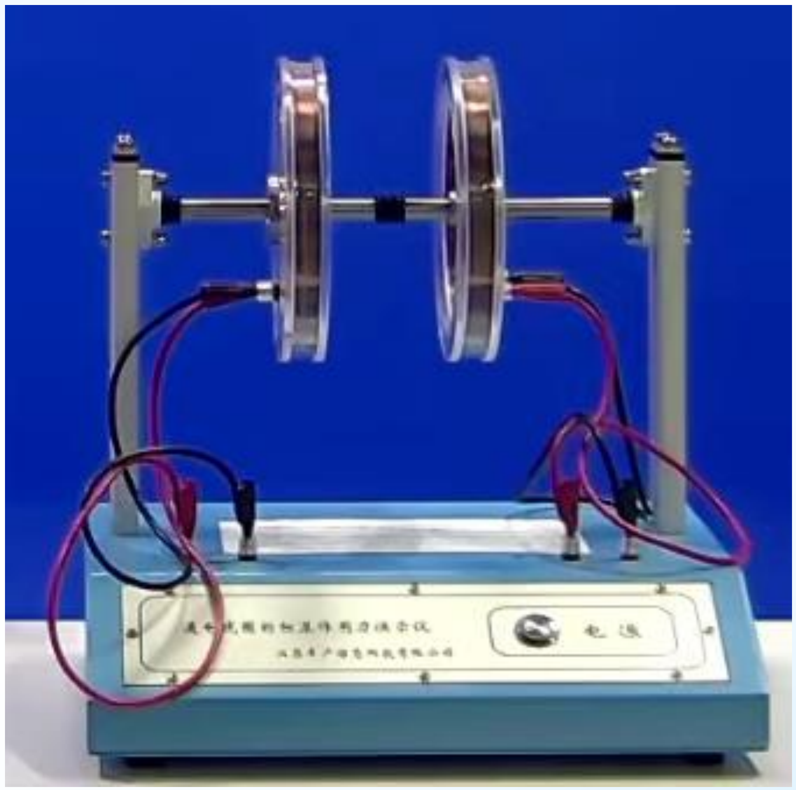
洛仑兹力 → 建立横向电场 →使导体受电场力作用

- 电流强度单位的定义：在真空中，两条无限长平行导线，各通有相等的稳恒电流，当导线相距一米，每米长度上受力为2×10^{-7}N时，各导线上的电流强度为1安培。

演示实验：电流相互作用

问题：

两个线圈电流方向相同时，什么现象？
两个线圈电流方向相反时，什么现象？



演示实验内容期末考试占6分

第6节　磁场与实物的相互作用

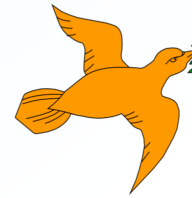
（一）磁场对运动电荷的作用

—洛仑兹力

（二）载流导体在磁场中所受的力

（三）载流线圈在磁场中所受的力和力矩

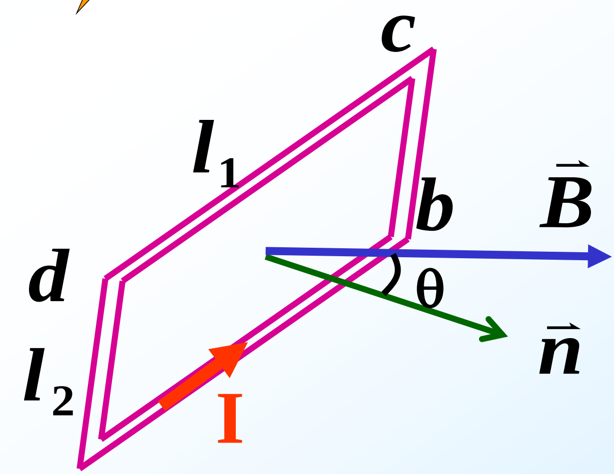
1. 在均匀磁场中的矩形线圈



$$\vec{F} = \int_0^L I d\vec{l} \times \vec{B}.$$

$$F_{da} = \int_d^a Idl \cdot B = IBl_2 \quad \text{向外}$$

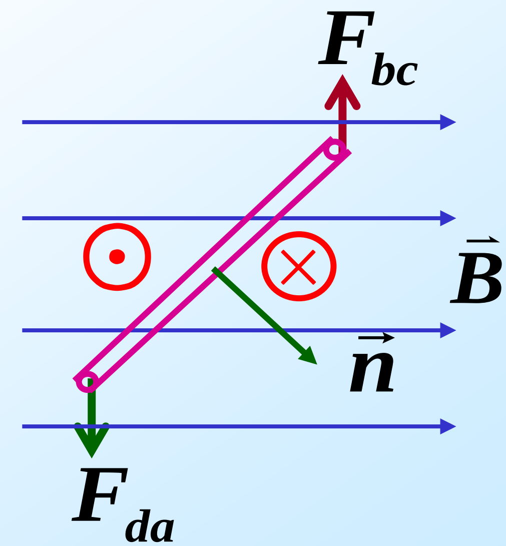
$$F_{bc} = \int_b^c IBdl = IBl_2 \quad \text{向里}$$



$$F_{ab} = \int_a^b IB\sin(\pi/2 - \theta)dl = IB\cos\theta l_1 \quad \text{向下}$$

$$F_{cd} = \int_c^d IB\sin(\pi/2 + \theta)dl = IB\cos\theta l_1 \quad \text{向上}$$

$\therefore F_{合}=0$。 但F_{da}、F_{bc}不在一直线上



线圈受力矩 $\tau = F_{da}\dfrac{l_1}{2}\sin\theta + F_{bc}\dfrac{l_1}{2}\sin\theta$

$= IBl_1 l_2 \sin\theta = \boxed{IS}B\sin\theta$

磁偶极矩 $= P_m B\sin\theta$

$$\boxed{\therefore \vec{\tau} = \vec{P}_m \times \vec{B}}$$

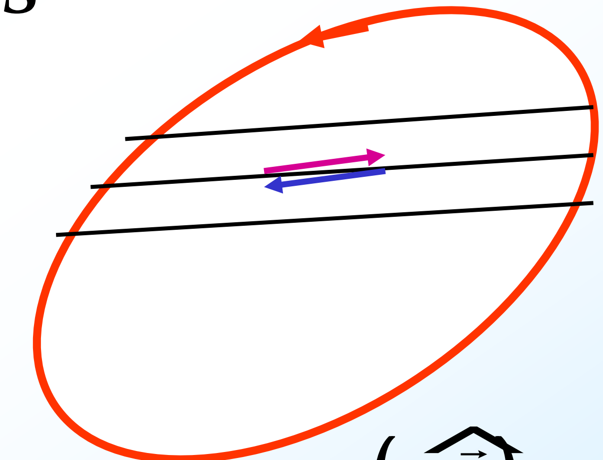
载流线圈在磁场中所受的力和力矩

2. 在均匀磁场中的任意线圈

$$\vec{F}=\int_0^L I d\vec{l}\times\vec{B}.$$

设任意形状的闭合平面线圈，电流为I，面积为S

设想把线圈分割成许多无限小窄条组成，



$(\widehat{\vec{n},\vec{B}})=\theta$

每一小窄条受力矩为：

$$d\vec{\tau}=d\vec{P}_m\times\vec{B}=IdS\vec{n}\times\vec{B}$$

线圈受的总力矩为：

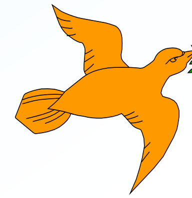
$$\vec{\tau}=\int d\vec{\tau}=\int IdS\,\vec{n}\times\vec{B}=I\left(\int dS\right)\vec{n}\times\vec{B}=IS\vec{n}\times\vec{B}$$

$$\boxed{\vec{\tau}=\vec{P}_m\times\vec{B}}$$

一般线圈 $\sum\vec{F}=0;\quad\sum\vec{\tau}\neq 0.$

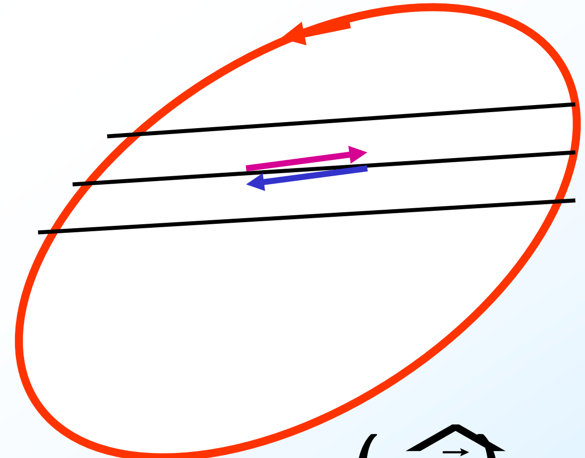
载流线圈在磁场中所受的力和力矩

2. 在均匀磁场中的任意线圈



$$\vec{F}=\int_0^L I d\vec{l}\times\vec{B}.$$

一般线圈 $\sum\vec{F}=0;$ $\sum\vec{\tau}\neq 0.$ $\boxed{\vec{\tau}=\vec{P}_m\times\vec{B}}$



$(\widehat{\vec{n},\vec{B}})=\theta$

讨论： (1) 当 $\vec{n}//\vec{B}$

$F_{合}=0$，$\tau_{合}=0$。

当 $\vec{n}\perp\vec{B}$ $\tau_{合}=\tau_{max}$

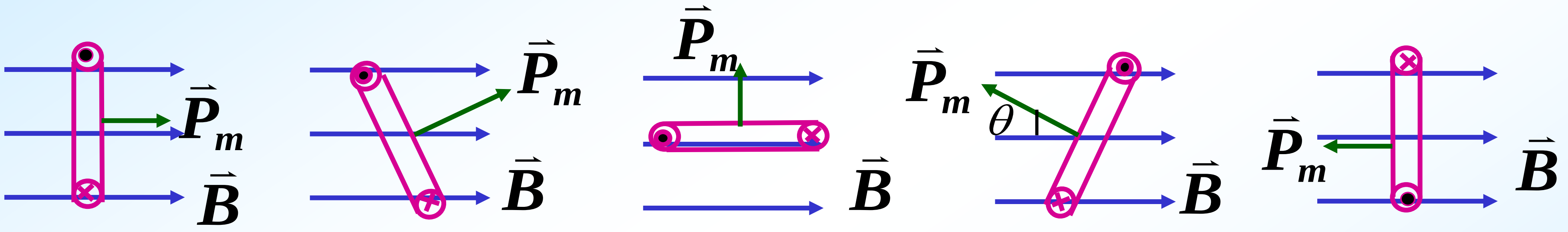
当 $(\widehat{\vec{n},\vec{B}})=\theta$ $\tau_{合}<\tau_{max}$

(2) 无论线圈什么形状, 均匀磁场对它的作用只取决于P_m，P_m相同的线圈受B的作用完全相同。

载流线圈在磁场中所受的力和力矩

2. 在均匀磁场中的任意线圈

（3）平面线圈在磁场中的几种情况



$\theta=0,\tau=0$	$\theta<90^\circ$	$\theta=90^\circ$	$\theta>90^\circ$	$\theta=\pi,\tau=0$
$\vec{P}_m \mathbin{//} \vec{B}$	$\tau\neq 0$	$\tau=\tau_{\max}$	$\tau\neq 0$	$\vec{P}_m \uparrow\downarrow \vec{B}$

稳定平衡

$$\boxed{\vec{\tau}=\vec{P}_m\times\vec{B}}$$

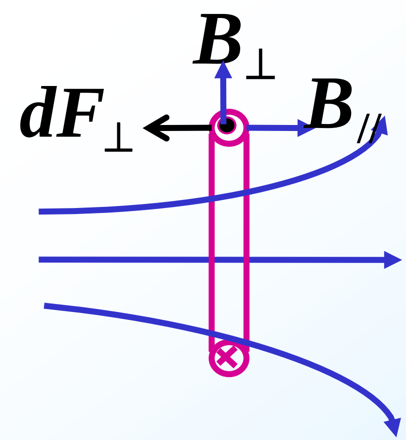
非稳定平衡

磁力矩总是使线圈或偶极子转向磁场方向

载流线圈在磁场中所受的力和力矩

3. 在非均匀磁场中的任意线圈

一般地：$F_{合} \neq 0$，$\tau \neq 0$。



线圈除了转动，还会平动，

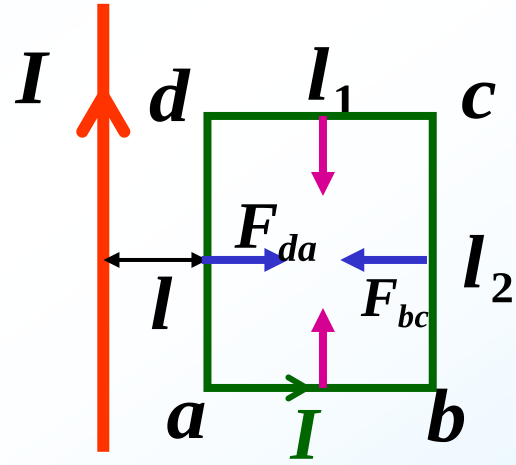
对非刚性线圈可能还有形变。

一般平动向磁场较强的方向平动

载流线圈在磁场中所受的力和力矩

3. 在非均匀磁场中的任意线圈

例: 长直导线旁的线圈受力



$$F_{da}=\left|\int I d\vec{l}\times\vec{B}\right| =\int_d^a I\frac{\mu_0 I}{2\pi r}dl =\frac{\mu_0 I^2}{2\pi l}l_2$$ 向右

$$F_{bc}=\frac{\mu_0 I^2}{2\pi(l+l_1)}l_2$$ 向左

$$F_{ab}=\int_a^b I\frac{\mu_0 I}{2\pi r}dr=\frac{\mu_0 I^2}{2\pi}\ln\frac{l+l_1}{l}$$ 向上

$$F_{cd}=\frac{\mu_0 I^2}{2\pi}\ln\frac{l+l_1}{l}$$ 向下

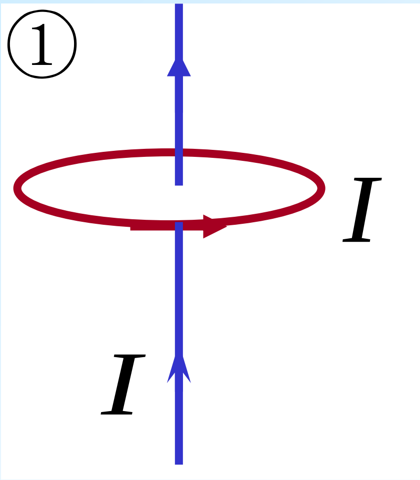
$$F_{合}=F_{da}-F_{bc}$$

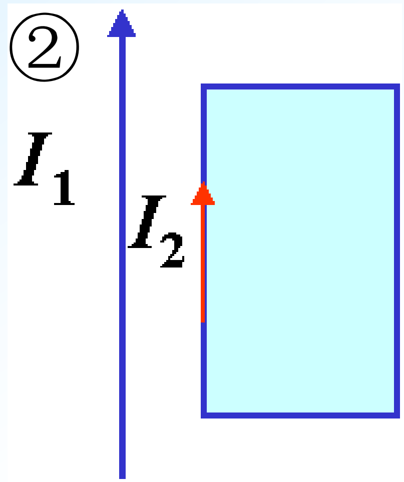
$$=\frac{\mu_0 I^2 l_2 l_1}{2\pi(l+l_1)}\neq 0$$

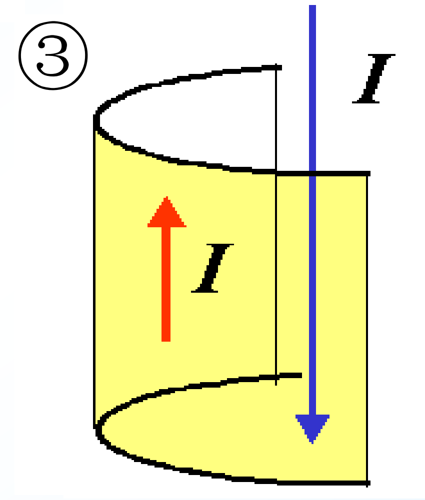
合力方向向右

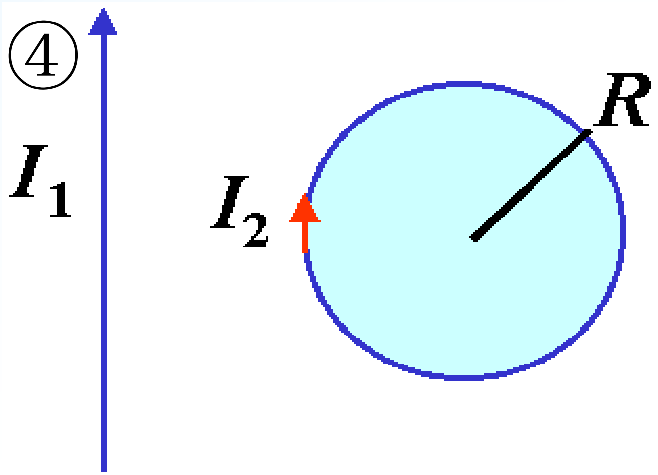
求下列电流之间的相互作用：

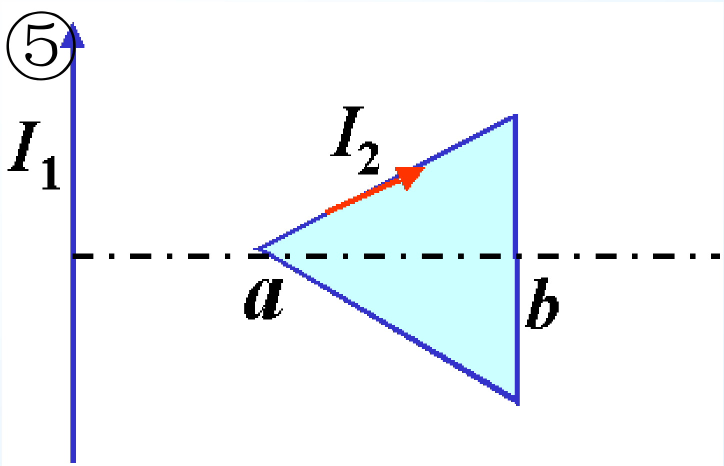
$$\vec{F} = Id\vec{l} \times \vec{B}$$











本节知识点小结

- 磁场对运动电荷的作用
- 霍尔效应
- 磁致聚焦
- 磁约束
- 磁场对载流导线的作用
- 均匀磁场对平面闭合载流线圈的作用

Tips:

以上均属于考试内容，请及时按照知识点梳理相关内容

规定作业： Chap.7(page 41-42) —T11、T12、T13、T14

作业要求

1. 独立完成作业。
2. 图和公式要有必要的标注或文字说明。
3. 作业纸上每次都要写学号。
4. 课代表收作业后按学号排序，并装入透明文件袋。
5. 每周周二交作业。
6. 作业缺交三分之一及以上者按规定不能参加考试。

磁性是物质的基本属性，就像物质具有质量和电性一样。

换句更简单的话说就是：

一切物质都具有磁性。

磁现象（物质磁性）的研究和应用依然是21世纪科学技术研究的重要领域。

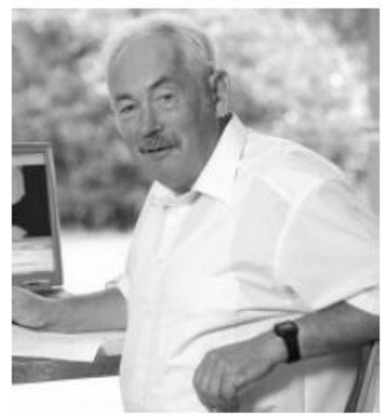
（自旋）磁电子学的发展和应用（*）

- 巨磁阻效应：导电电子的自旋磁矩如果顺着磁有序材料的电子自旋方向前进，材料处于低电阻状态；反之，如果垂直于自旋方向，则呈高电阻状态。

2007年诺贝尔物理奖

Albert Fert

法国Paris-Sud大学



Peter Grünberg

德国尤里希研究中心

室温超导 LK-99？（*）

实现室温超导是长期攻坚目标。

[LK-99验证_哔哩哔哩_bilibili]

室温超导 LK-99？（*）

The First Room-Temperature Ambient-Pressure Superconductor

Sukbae Lee[1*], Ji-Hoon Kim[1], Young-Wan Kwon[2†]

[1]Quantum Energy Research Centre, Inc., (Q-centre, Inc.), B1, 46-24, Songi-ro 23 gil, Songpa-gu, Seoul 05822, Korea

[2]KU-KIST Graduate School of Converging Science and Technology, Korea University, Seoul 02841, Korea

Superconductor $Pb_{10-x}Cu_x(PO_4)_6O$ showing levitation at room temperature and atmospheric pressure and mechanism

Sukbae Lee,[1,a)] Jihoon Kim,[1] Hyun-Tak Kim,[2,3,b)] Sungyeon Im,[1] SooMin An,[1] and Keun Ho Auh[1,4]

[1]Quantum Energy Research Centre, Inc., Seoul 05822, South Korea
[2]ICT Basic Research Lab. ETRI, Daejeon 34129, South Korea
[3]Department of Physics, College of William & Mary, Williamsburg, VA 23185, USA
[4]Hanyang University, Seoul 04763, South Korea

a)Author to whom correspondence should be addressed : stsaram@qcentre.co.kr
b)Author to whom correspondence should be addressed : hkim22@wm.edu, hkim0711@snu.ac.kr

LK-99 含义：两人姓氏简写，99年开启研究

室温超导为什么重要（*）

什么是超导？

指材料低于某一特定温度时，电阻变为0的现象，这一温度为超导转变温度（T_C）。

- ✓ T_C越高，成本低且稳定；
- ✓ T_C越高，H_C越高，可实现磁场越高。

超导的两个重要特征：

零电阻和完全抗磁性（迈斯纳效应）

零电阻应用前景：

1. 可忽略焦耳热，极大节省电能
2. 用超导材料可产生强磁场

a. 低温磁体设备（QAHE）

b. MRI设备（核磁共振）

c. 粒子对撞机

d. 磁约束（可控核聚变）

迈斯纳效应前景：

磁悬浮（列车、建筑等）

磁通量子化应用前景：

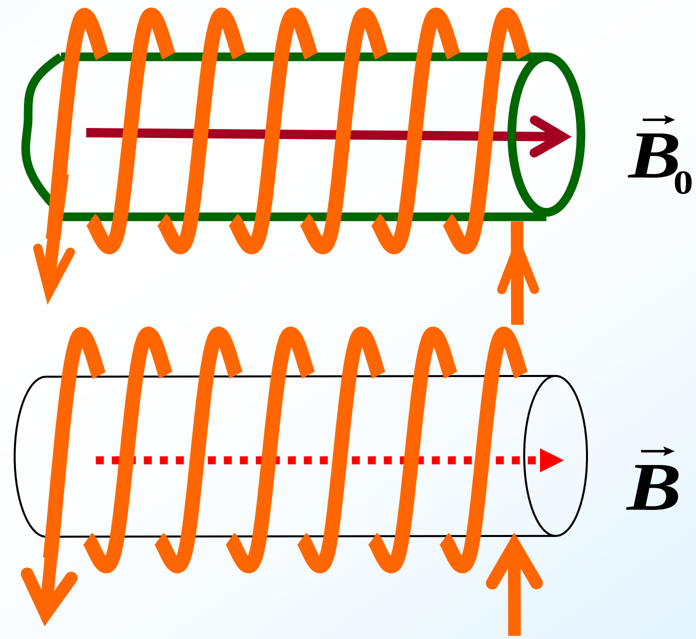
1. 弱磁探测
2. 超导量子计算

…..

第 7 节　磁 介 质

磁　化： 磁场对磁场中的物质的作用。

磁介质： 在磁场中影响原磁场的物质。



真空中：$\vec{B}_0$

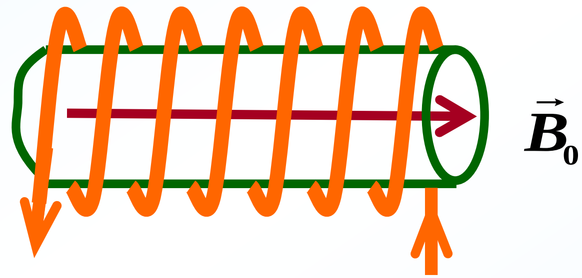
磁介质中：　$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}'$

相对磁导率　$\mu_r = \dfrac{|\boldsymbol{B}|}{|\boldsymbol{B}_0|}$

在螺旋管内填充磁介质前后的磁感应强度的比值，可表征该种介质在磁场中的性质。

磁介质的分类

相对磁导率　$\mu_r = \dfrac{|B|}{|B_0|}$



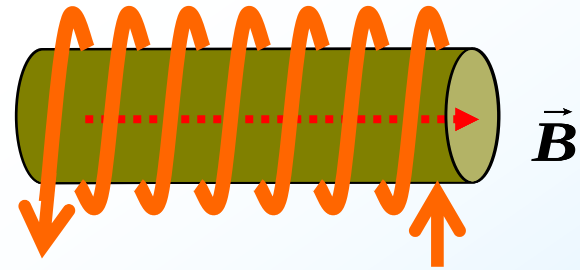
■ 磁介质的分类：

- 弱磁性

$\mu_r \geq 1$ →顺磁质　　如：氧、铝、钨、铂、铬等。

$\mu_r < 1$ →抗磁质　　如：氮、水、铜、银、金、铋等。

(超导体是理想的抗磁体:完全抗磁性)

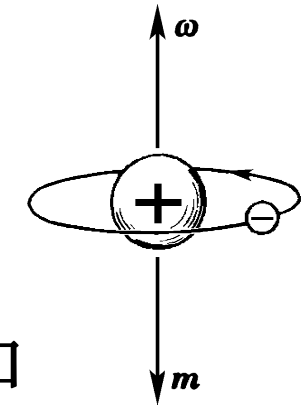


- 强磁性

$\mu_r >> 1$ →铁磁质　　如：铁、钴、镍等

分子磁矩

- 电子运动：
  - 绕核运动 → 电流环 → 轨道磁矩 $\vec{\mu}_{轨}$
  - 自旋运动 → 自旋磁矩 $\vec{\mu}_{自}$



- 分子磁矩：所有电子的轨道磁矩和自旋磁矩的矢量和

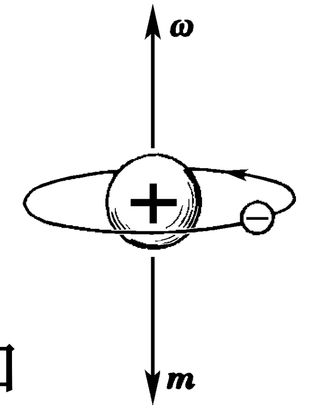
$$\vec{\mu}_{分子} = \sum \vec{\mu}_{轨} + \sum \vec{\mu}_{自}$$

分子（固有）磁矩

- 两类弱磁性磁介质
  - $\vec{\mu}_{分子} \neq 0$ → 顺磁质 $\mu_r \geq 1$
  - $\vec{\mu}_{分子} = 0$ → 抗磁质 $\mu_r < 1$

分子电流

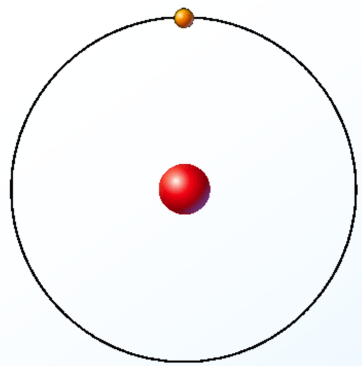
- 电子运动：
  - 绕核运动 → 电流环 → 轨道磁矩 $\vec{\mu}_{轨}$
  - 自旋运动 → 自旋磁矩 $\vec{\mu}_{自}$

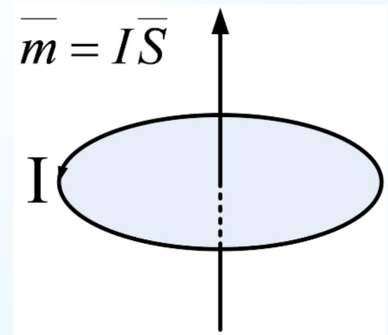


- 分子磁矩：所有电子的轨道磁矩和自旋磁矩的矢量和

$$\vec{\mu}_{分子}=\sum\vec{\mu}_{轨}+\sum\vec{\mu}_{自}$$

分子（固有）磁矩



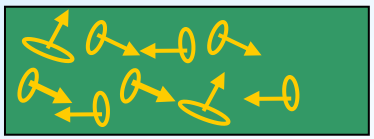


分子或原子中各个电子对外界所产生磁效应的总和，可用一个等效的圆电流表示，称为分子电流

顺磁质的磁化

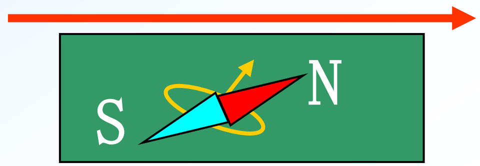
1) 顺磁性 $\vec{\mu}_{分子} \neq 0$

$\vec{B}_0=0$



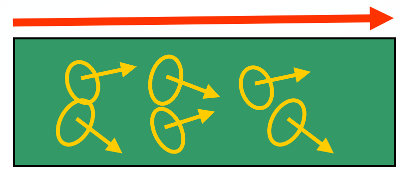
$\sum \vec{\mu}_i = 0$

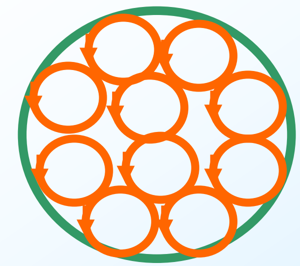
$\vec{B}_0$



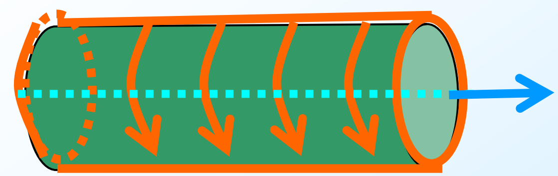
$\vec{M} = \vec{\mu}_{分子} \times \vec{B}_0$

$\vec{B}_0$





- 外磁场强，分子磁矩排列越整齐。



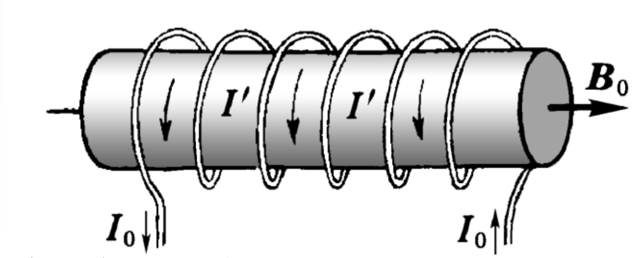
$\vec{B}' // \vec{B}_0$

- 磁化面电流越大，介质的磁化程度越高。

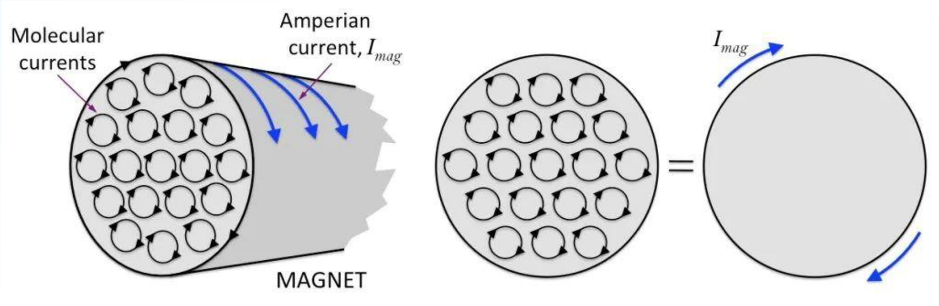
分子磁矩 $m_{分子} = m_l + m_s \neq 0$ $\sum m_{分子}=0$ （无外场） $\sum m_{分子} \neq 0$ （有外场）

磁化电流

- 介质对磁场作用的响应——产生磁化电流



- 各向同性的磁介质只有介质表面处分子电流未被抵销，形成磁化电流



- 它也能产生磁场，满足毕奥-萨伐尔定律，可以产生附加场B'
- 附加场反过来要影响原来空间的磁场分布。

磁化电流之所以是电流，因为它与真实的电荷运动形成的电流（传导电流）一样，能等效的产生磁场！

磁化电流与传导电流

- **传导电流**

  载流子的定向流动，是电荷迁移的结果，产生焦耳热，产生磁场，遵从电流产生磁场规律

- 磁化电流不能传导，束缚在介质内部，也叫束缚电流。

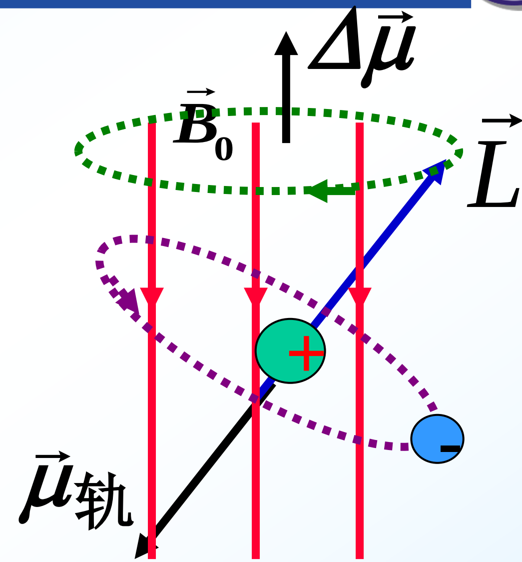
■ 相同之处：同样可以产生磁场，遵从电流产生磁场规律

□ 不同之处：电子都被限制在分子范围内运动，与因电荷的宏观迁移引起的传导电流不同；分子电流运行无阻力，即无热效应

抗磁质的磁化

2) 抗磁性 $\vec{\mu}_{分子}=0$

—— 分子中电子轨道角动量的旋进

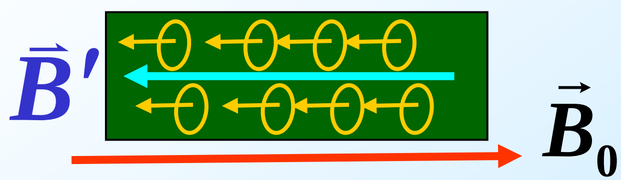


电子因轨道磁矩受磁力矩: $\vec{M}=\vec{\mu}_{轨}\times\vec{B}_0$

轨道角动量 $\vec{L}$ 绕磁场旋进, $\boxed{\vec{M}=\dfrac{d\vec{L}}{dt}}$

电子附加一个磁矩: $\sum\Delta\vec{\mu}=\Delta\vec{\mu}_{分子}$

$\Delta\vec{\mu}_{分子}\longrightarrow I'\longrightarrow\vec{B}'//-\vec{B}_0$

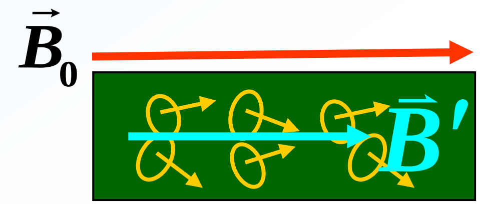


分子磁矩 $m_{分子}=m_l+m_s=0$ $\sum m_{分子}=0$ （无外场） $\sum m_{分子}\neq 0$ （有外场）

◆注意

1）顺磁性介质处在外磁场时，

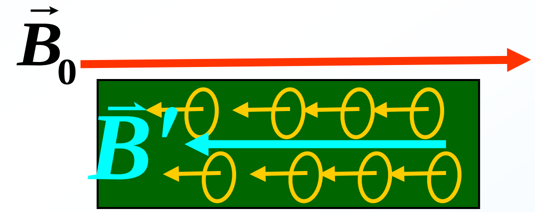
其体内磁场：$\vec{B}=\vec{B}_0+\vec{B}'$



$B>B_0$

抗磁性介质处在外磁场时，

其体内磁场：$\vec{B}=\vec{B}_0+\vec{B}'$

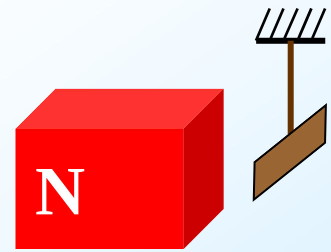


$B<B_0$

2）介质中的抗磁效应在顺磁介质中是否有？

有　但：$\vec{\mu}_{分子} \gg \Delta\vec{\mu}_{分子}$

3）若将一磁介质放入磁场中，你如何判断该介质是顺磁还是抗磁介质？



4）超导体是完全抗磁体

在外磁场中超导体内：$\vec{B}=\vec{B}_0+\vec{B}' = 0$

5）表面分子磁化电流不是自由电荷定向运动形成。

磁化强度矢量 $\vec{M}$：磁化的物理描述

1. 磁化强度矢量定义

$$\vec{M} = \frac{\sum \vec{\mu}_i}{\Delta V} \longrightarrow \text{单位体积内分子磁矩的矢量和}$$

单位：A/m

- 非磁化状态下，分子固有磁矩为0，或由于分子磁矩的取向无规则分布，统计平均为0

- *M*反映介质单位体积的宏观磁矩，其值越大，与外磁场的相互作用越强，相应物质的磁性越强

- ΔV 的尺度远大于分子间平均距离而远小于*M*的非均匀尺度，上述统计平均才有意义

磁化强度矢量 $\vec{M}$：磁化的物理描述

1. 磁化强度矢量定义

$$\boldsymbol{\vec{M}} = \frac{\sum \vec{\mu}_i}{\Delta V}$$

⟶ 单位体积内分子磁矩的矢量和

单位：A/m

$$\left.\begin{cases} \vec{M} \\ I' \\ \vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}' \end{cases}\right\}\text{描绘磁化}$$

- 三者从不同角度定量地描绘同一物理现象 —— 磁化，之间必有联系，这些关系——磁介质磁化遵循的规律

磁化强度矢量 $\vec{M}$ 与磁化电流的关系

1. 磁化强度矢量定义

$$\boxed{\vec{M} = \frac{\sum \vec{\mu}_i}{\Delta V}} \longrightarrow$$ 单位体积内分子磁矩的矢量和

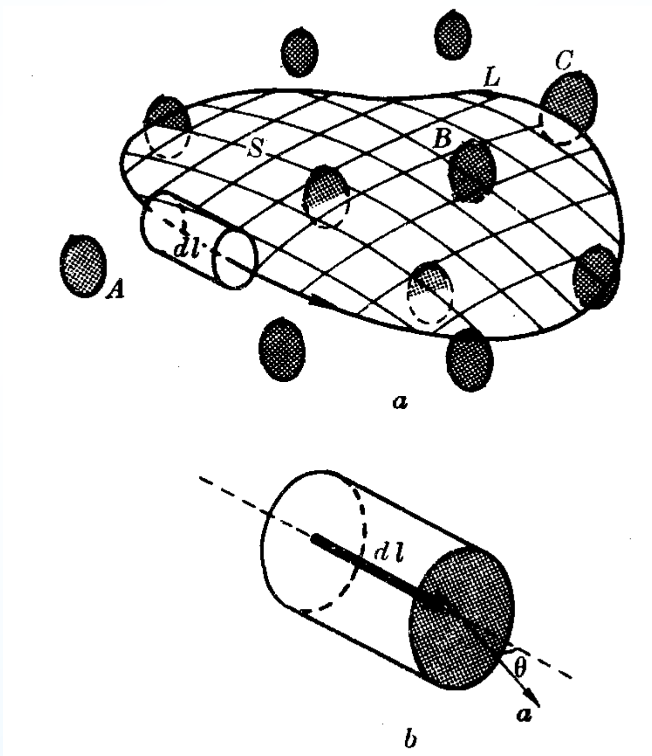
2. 磁化强度矢量M与磁化面电流 I'的关系

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

*M*在一闭合回路的环路积分(磁化强度的环流)等于该闭合回路中穿过的磁化电流之和

磁化强度矢量 $\vec{M}$ 与磁化电流的关系(证明*)

磁化强度的环流： $\boxed{\oint_L \vec{M}\cdot \mathrm{d}\vec{l} = \sum I'}$



- 在L上取一线元,以dl为轴线，a为底，作一圆柱体体积为$\Delta V = adl\cos\theta$，凡是中心处在ΔV内的分子环流都为dl所穿过， ΔV内共有分子数

$$N = n\Delta V = nadl\cos\theta = n\vec{a}\cdot d\vec{l}$$

- **N个分子总贡献**

$$I' = IN = nI\vec{a}\cdot d\vec{l} = \vec{M}\cdot d\vec{l}$$

积分形式

$$\oint_L \vec{M}\cdot d\vec{l} = \sum_{L内} I'$$

通过以L为界S面内全部分子电流的代数和

磁化强度矢量$\vec{M}$与磁化电流的关系(*)

积分形式

$$\oint_L \vec{M} \cdot d\vec{l} = \sum_{L内} I'$$

通过以L为界S面内全部分子电流的代数和

斯托克斯公式

$$\iint_S (\nabla \times \vec{M}) \cdot d\vec{S} = \iint_S \vec{j}_m \cdot d\vec{S}$$

微分形式

$$\nabla \times \vec{M} = \vec{j}_m$$

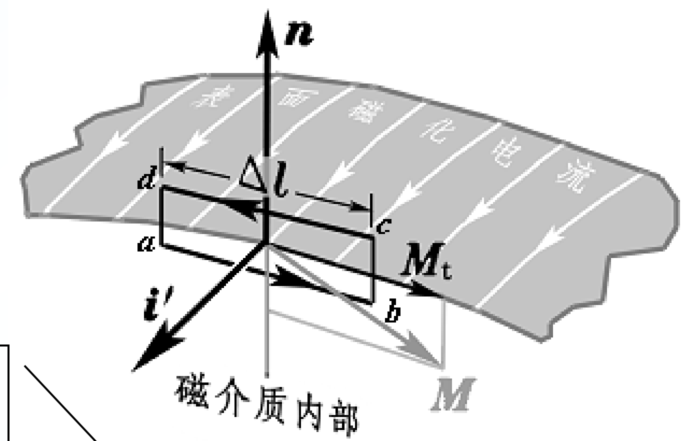
- j_m：磁化电流密度
  - 表示单位时间通过单位垂直面积的磁化电流
- 均匀磁化：M为常数，$\nabla\times$M=0，j_m=0，介质内部没有磁化电流，磁化电流只分布在介质表面

磁化强度矢量$\vec{M}$与磁化电流的关系

$$\vec{M}\times\vec{n}=\vec{i}\,'\text{或}M_t=i'$$

磁化电流面密度

- 在介质表面取闭合回路
- 穿过回路的磁化电流



$$I'=i'\Delta l$$

$$\int_a^b M_t dl$$

M=0

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

bc、da<< dl

$$M_t\Delta l=i'\Delta l\Rightarrow M_t=i'$$

有磁介质存在的静磁场的基本性质

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

无论是什么电流激发的磁场，其磁力线均是无头无尾的闭合曲线。

∴ 通过磁场中任意闭合曲面的磁通量为零。

即：$\oint \vec{B}\cdot d\vec{S}=0$

有磁介质存在的静磁场的基本性质

$$
\begin{tikzcd}
I_0 \arrow[r, "\text{产生}"] & \vec{B}_0 \arrow[r, "\text{使介质磁化}"] & \vec{M} \arrow[d] \\
& + & \\
& \vec{B}' & I' \arrow[l, "\text{产生附加场}"'] \\
& \parallel & \\
& \vec{B} &
\end{tikzcd}
$$

$$
\begin{cases}
\oiint_S \mathbf{B}\cdot d\mathbf{S}=0 \\
\oint_L \mathbf{B}\cdot d\mathbf{l}=\mu_0\sum_{L\text{内}} I_0+\mu_0\sum_{L\text{内}} I'
\end{cases}
$$

$$
\begin{cases}
\oiint_S \mathbf{B}_0\cdot d\mathbf{S}=0 \\
\oint_L \mathbf{B}_0\cdot d\mathbf{l}=\mu_0\sum_{L\text{内}} I_0
\end{cases}
+
\begin{cases}
\oiint_S \mathbf{B}'\cdot d\mathbf{S}=0 \\
\oint_L \mathbf{B}'\cdot d\mathbf{l}=\mu_0\sum_{L\text{内}} I'
\end{cases}
$$

- 磁化电流和B互相牵扯，难于测量和控制，通常也是未知的
- B-S定律和安培环路定理以已知电流分布为前提

有介质时的安培环路定理

总场

$$\oint_L \vec{B}\cdot d\vec{l} = \mu_0 \sum_{L内} I \Rightarrow \mu_0\left(\sum I_0 + \sum I'\right)$$

$$\sum I' = \oint \vec{M}\cdot d\vec{l}$$

$$\oint_L \vec{B}\cdot d\vec{l} = \mu_0 \sum_{L内} I_0 + \mu_0 \oint \vec{M}\cdot d\vec{l}$$

两边同除以 μ_0，再移项

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

传导电流

定义：

磁场强度

$$\mathbf{H} = \frac{\mathbf{B}}{\mu_0} - \mathbf{M}$$

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

有介质时的安培环路定理

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

$$\mathbf{H} = \frac{\mathbf{B}}{\mu_0} - \mathbf{M}$$

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

■ 磁场强度H沿任意闭合环路的线积分总等于穿过以闭合环路为周界的任意曲面的传导电流强度的代数和。

■ 磁场强度： H是一个辅助矢量, 单位为安培每米，用A/m表示

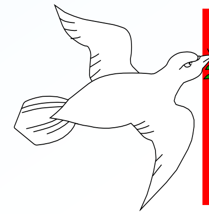
◆ 问题

➢ 已知I_0——可能求H，但因为M未知——依旧无法求B

➢ 需要描绘磁介质磁化性质的物理量，并补充H和B的关系

$\vec{B}$、$\vec{M}$、$\vec{H}$ 三矢量之间的关系

- 各向同性的线性磁介质, M和H的关系为



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

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

χ_m ——介质磁化率

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

其中：$\mu_r = 1 + \chi_m$ —— 相对磁导率　介质磁导率

- M和B的关系为 $\boxed{\vec{M} = \frac{\chi_m}{\mu_0\mu_r}\vec{B}}$

χ_m 与 μ_r 均为纯数，描述磁介质特性的物理量

- 各向同性的线性磁介质

$\chi_m > 0 \quad \mu_r > 1$ ⟶ 顺磁介质

$\chi_m < 0 \quad \mu_r < 1$ ⟶ 抗磁介质

$\chi_m = 0 \quad \mu_r = 1$ ⟶ 真空

$\chi_m = -1$

$\mu_r = 0$

超导体

磁化率 χ_m（*）

- 对于各向同性线性介质来讲χ_m是一个没有量纲的标量

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

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

- 均匀介质 χ_m是常数

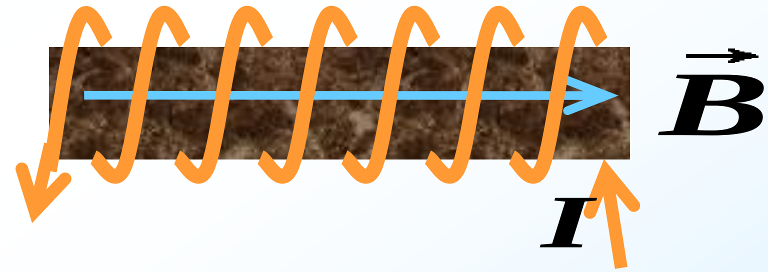
  非均匀介质χ_m是介质中各点坐标的函数，甚至于是时间的函数

- 对各向异性磁介质 χ_m会因为方位不同而不同，是二阶张量
  - 如铁磁质 M与H不成正比关系，甚至也不是单值关系
  - 当M与H无单值关系时，不再引用χ_m、μ 的概念了

例1. 长直螺线管内充满均匀磁介质μ_r, 单位长度上上的匝数为n, 通有电流I 。

求管内的B, 磁化强度M及表面束缚电流密度i'。

解： 因管外磁场为零，取图示的回路

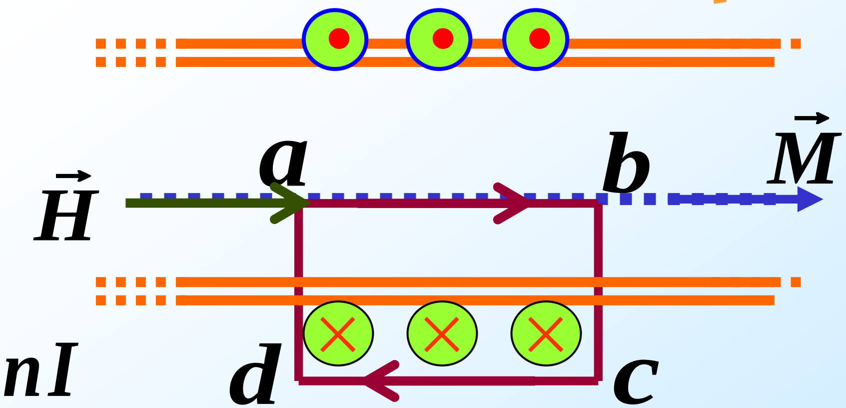


根据： $\oint_L \vec{H}\cdot d\vec{l} = \sum_i I_i$

$$ab\cdot H = n\cdot ab\cdot I$$

则： $H = nI$

$$B = \mu_0\mu_r H = \mu n I$$



又： $\vec{M} = \chi_m \vec{H}$

$$\therefore M = \chi_m H = (\mu_r - 1)nI$$

$$\because \vec{i}' = \vec{M}\times\vec{e}_n$$

$$\therefore i' = (\mu_r - 1)nI \quad \begin{cases} \text{顺磁质} & \mu_r > 1, \quad i' \,//\, I \\ \text{抗磁质} & \mu_r < 1, \quad i' \uparrow\downarrow I \end{cases}$$

解题一般步骤：

$$
\begin{tikzcd}[column sep=huge]
\text{由}\,I_{\text{传}} \arrow[r, "\oint_L \vec{H}\cdot \mathrm{d}\vec{l} = \sum_i I_i"] & \vec{H} \arrow[r, "\vec{B}=\mu\vec{H}"] \arrow[d, "\vec{M}=\chi_m \vec{H}"'] & \vec{B} \\
& \vec{M} \arrow[r, "\vec{i}'=\vec{M}\times\vec{e}_n"] & \vec{i}'
\end{tikzcd}
$$

注： 对称场有磁介质时,只需将 “B” 中的 $\mu_0 \to \mu$ 即可。

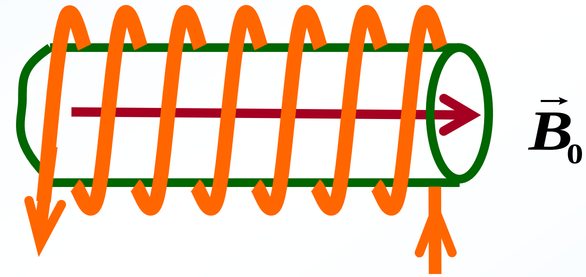
例： 无限长载流直导线的磁场 $\boxed{B=\dfrac{\mu_0 I}{2\pi r}}$

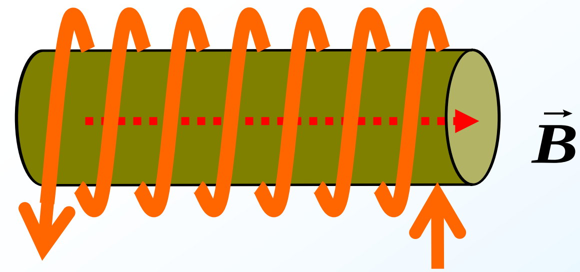
无限长直导线周围充满介质时 $\boxed{B=\dfrac{\mu I}{2\pi r}}$

毕—萨定律有：
$$
\begin{cases}
\vec{B}_0 = \dfrac{\mu_0}{4\pi}\displaystyle\int \dfrac{I\mathrm{d}\vec{l}\times\vec{e}_r}{r^2} & \text{真空} \\[2ex]
\vec{B} = \dfrac{\mu}{4\pi}\displaystyle\int \dfrac{I\mathrm{d}\vec{l}\times\vec{e}_r}{r^2} & \text{介质空间}
\end{cases}
$$

磁介质的分类

相对磁导率　$\mu_r = \dfrac{|\boldsymbol{B}|}{|\boldsymbol{B}_0|}$





磁介质的分类：

- 弱磁性

$\mu_r \geq 1$ →顺磁质　　如：氧、铝、钨、铂、铬等。

$\mu_r < 1$ →抗磁质　　如：氮、水、铜、银、金、铋等。

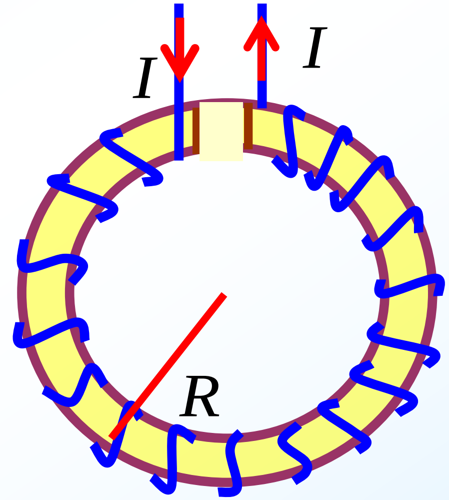
(超导体是理想的抗磁体:完全抗磁性)

- 强磁性

$\mu_r >> 1$ →铁磁质　　如：铁、钴、镍等

铁磁质

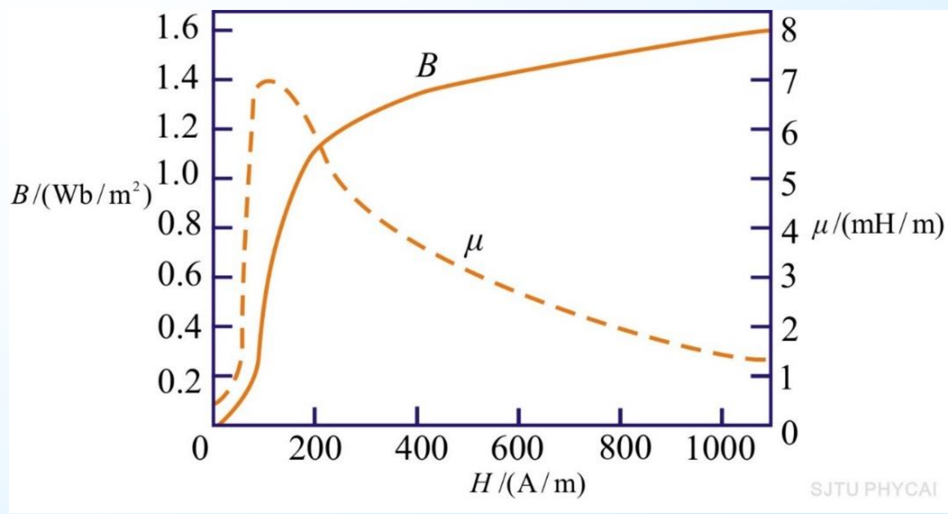
1. 磁化曲线



原理：励磁电流为 I, 根据安培定理得：$H=\dfrac{NI}{2\pi R}$

实验测量$\vec{B}$： 如用感应电动势测量
或用小线圈在缝口处测量

由 $\mu_r=\dfrac{B}{B_0}=\dfrac{B}{\mu_0 H}$



铁磁质的 μ_r 不是个常数，
它是 $\vec{H}$ 的函数.

铁磁质的磁效应

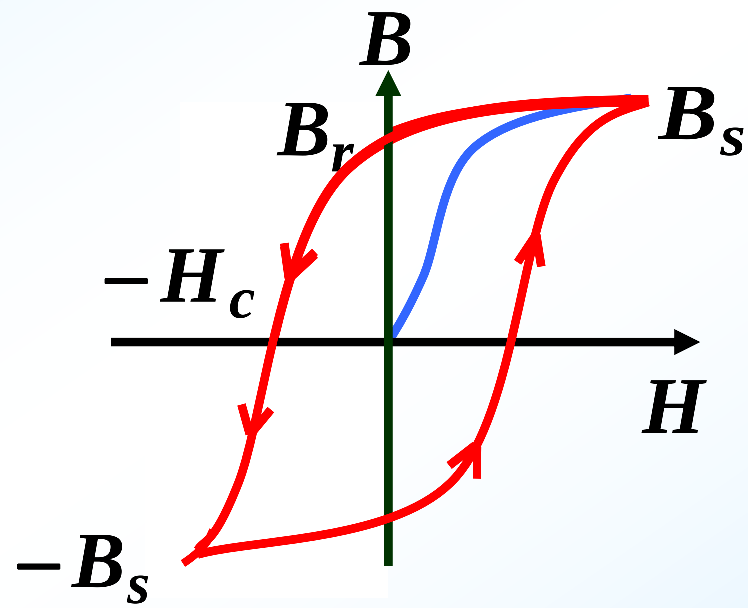
2. 磁滞回线 —— 不可逆过程

1）起始磁化曲线

饱和磁感应强度 B_S

2）剩磁 B_r

3）矫顽力 H_c



B的变化落后于H，从而具有剩磁——磁滞效应

每个H 对应不同的B与磁化的历史有关。

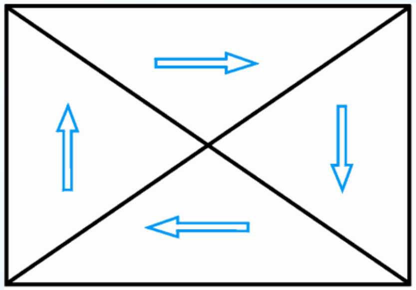
3. 在交变电流的励磁下反复磁化使其温度升高

—— 磁滞损耗

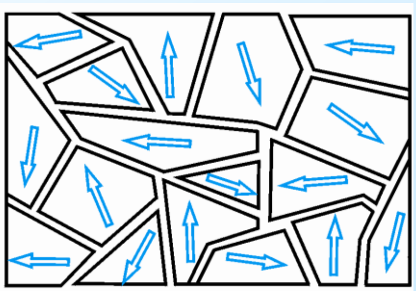
磁滞损耗与磁滞回线所包围的面积成正比。

铁磁质的磁化机制

- 自发磁化区
  - 实验证明，铁磁质的磁性主要来源于电子自旋磁矩。在没有外磁场的条件下铁磁质中电子自旋磁矩可以在小范围内“自发地”排列起来，形成一个个小的“自发磁化区”—— 磁畴
  - 自发磁化的原因是由于相邻原子中电子之间存在着一种交换作用（一种量子效应），使电子的原子磁矩平行排列起来而达到自发磁化的饱和状态
  - 单晶和多晶磁畴结构的示意

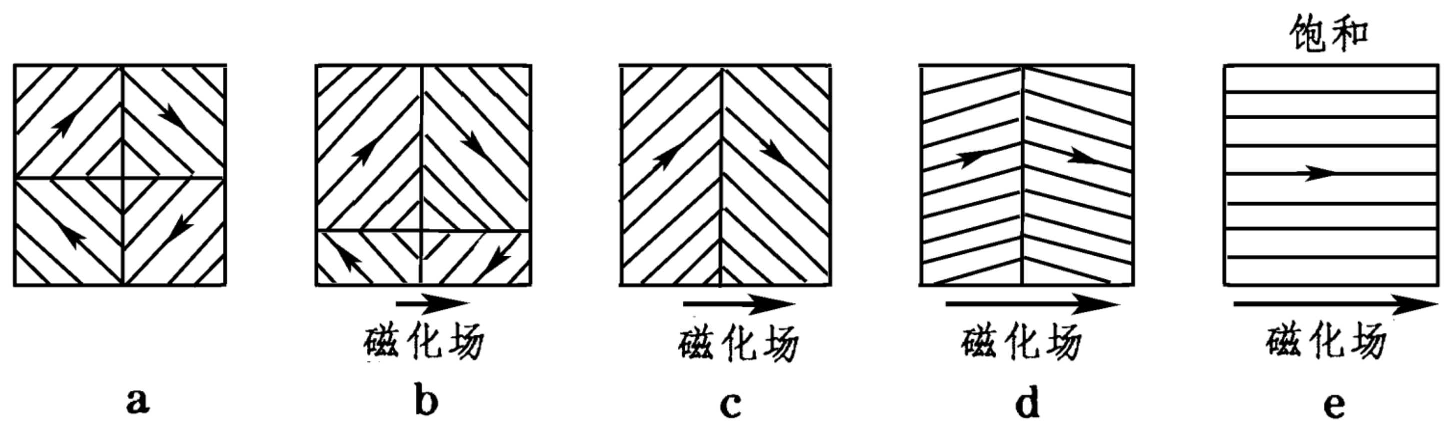


(a) 单晶磁畴结构示意图



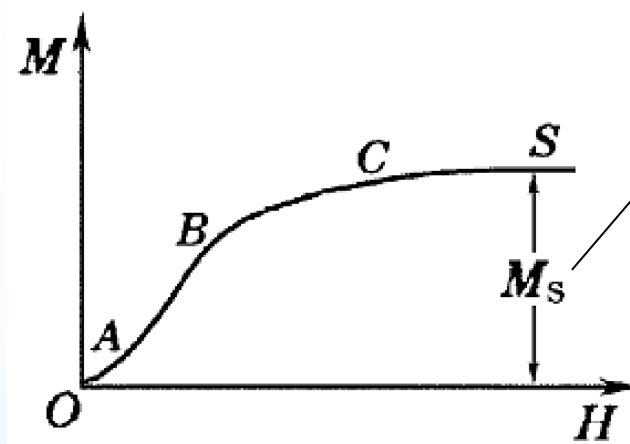
(b) 多晶磁畴结构示意图

铁磁质的磁化机制



等于每个磁畴中原有的磁化强度

- a：未磁化时状态
- b：畴壁的可逆位移阶段— OA段
- c：不可逆的磁化—— AB段
- d：磁畴磁矩的转动—— BC段
- e：趋于饱和的阶段—— CS段



- 在外磁场撤消后，铁磁质内掺杂和内应力或因为介质存在缺陷阻碍磁畴恢复到原来的状态

铁磁质的磁化机制

1. 当全部磁畴都沿外磁场方向时，铁磁质的磁化就达到饱和状态。饱和磁化强度M_S等于每个磁畴中原来的磁化强度，该值很大。

——这就是铁磁质磁性 μ_r大的原因。

2. 磁滞现象是由于材料有杂质和内应力等的作用，当撤掉外磁场时磁畴的畴壁很难恢复到原来的形状，而表现出来。

3. 当温度升高时，热运动会瓦解磁畴内磁矩的规则排列。在临界温度（相变温度*Tc*）时，铁磁质完全变成了顺磁质。居里点 ***Tc* (*Curie Point*)**

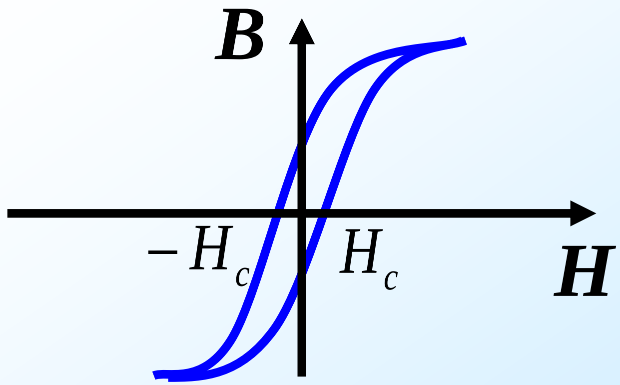
如：铁为 **1040 K**，钴为 **1390 K**， 镍为 **630 K**

铁磁质的分类

1. 软磁材料： 如 $\begin{cases}\text{纯铁，坡莫合金}(\textbf{\textit{Fe}}\text{，}\textbf{\textit{Ni}})\text{，}\\ \text{硅钢，铁氧体等。}\end{cases}$

特点：

- μ_r大，(起始磁化率大)饱和磁感应强度大
- 矫顽力(H_c)小，磁滞回线的面积窄而长，损耗小(回线面积小)。
- 易磁化、易退磁



适用于变压器、继电器、电机、以及各种高频电磁元件的磁芯、磁棒。

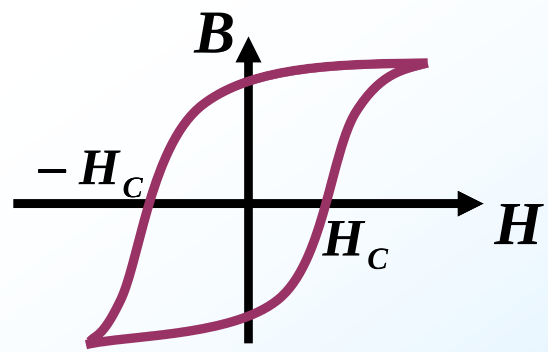
铁磁质的分类

2. 硬磁材料： 如: 钨钢，碳钢，铝镍钴合金

- 矫顽力(H_c)大，剩磁B_r大，磁滞回线的面积大，损耗大。

适用于做永磁铁。

耳机中的永久磁铁，永磁扬声器。

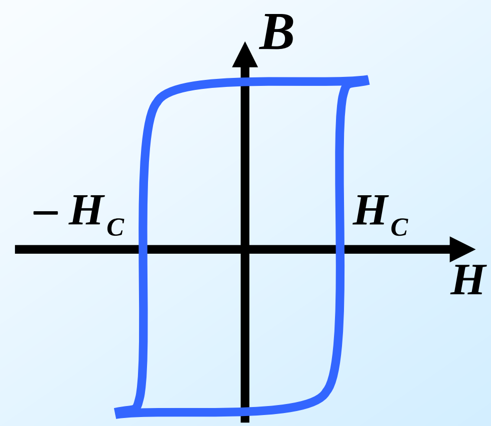


3. 矩磁材料

锰镁铁氧体，锂锰铁氧体

$B_r = B_S$ ，H_c不大，

磁滞回线是矩形。用于记忆元件，



本节知识点小结

- 顺磁性和抗磁性
- 磁化强度与磁化电流
- 介质中的磁场
- 磁场强度
- 有介质时的安培环路定理
- 铁磁性

Tips:
以上均属于考试内容，请及时按照知识点梳理相关内容

规定作业： Chap.7(page 43) —T15、T16

Chap.8(page 44) —T1 、T2

作业要求

1. 独立完成作业。
2. 图和公式要有必要的标注或文字说明。
3. 作业纸上每次都要写学号。
4. 每周周二交作业。
5. 作业缺交三分之一及以上者按规定不能参加考试。