

第六章 磁电子学

磁介质中带电粒子的转动产生磁性:

- 电子轨道运动产生电子轨道磁矩
- 电子自旋运动产生电子自旋磁矩
- 原子核转动产生原子核自旋磁矩 (很小)

真空中磁感应强度(magnetic induction) B_0 与磁场 H 的关系:

$$B_0 = \mu_0 H, \mu_0 \text{ 为真空中磁导率}$$

磁介质中磁感应强度 B 与磁场 H 的关系:

$$B = \mu_0 (H + M) = \mu_0 \mu H$$

$$M = \chi H, \mu = 1 + \chi$$

$$M = \sum m / \Delta V$$

分子磁矩的矢量

M 为磁化强度 magnetization, μ 为磁介质的相对磁导率 permeability, χ 为磁介质的磁化率 susceptibility

磁介质材料的磁化率 χ 不同，导致不同的磁性：

逆磁性diamagnetism、顺磁性paramagnetism、铁磁性ferromagnetism、亚铁磁性ferrimagnetism、反铁磁性材料的磁性：

- 逆磁性： $\chi < 0$ ， -10^{-4} ，几乎与温度无关

所有材料的共性，很小（一般被抵消），可观察材料：

简单绝缘体、惰性气体、一半简单金属

- 顺磁性： $\chi > 0$ ，较小，许多非铁磁性金属

- 正常顺磁性：满足居里(Curie)定律：

$$\chi \approx C\mu_0/T \approx 10^{-4}$$

- 自由电子顺磁性：几乎与温度无关， $\chi \approx 10^{-6}$

- 铁磁性: $\chi: 10 \sim 10^6$, 过渡金属、稀土金属 (磁滞、剩磁)
 - $T > T_C$ (铁磁体居里温度), 居里—外斯(Curie-Weiss)定律: $\chi \approx C\mu_0/(T-T_C)$ (顺磁性: $\chi \approx C\mu_0/T$)
 - $T < T_C$, 自发磁化、铁磁性
- 亚铁磁性: $\chi: 10 \sim 10^4$, 非金属磁性材料 (铁氧体)
 - $T > T_C$, 顺磁性
 - $T < T_C$, 亚铁磁性
- 反铁磁性: $\chi: 10^{-4}$, $\text{MnO}, \text{MnF}_2, \text{NiO}, \text{CoF}_2, \text{FeCO}_3$
 - $T > T_N$ (奈尔Neel温度), $\chi = C\mu_0/(T+\Theta)$
 - $T < T_N$, χ 随温度 T 而变大

温度足够高时, 都会体现顺磁特性: $\chi \approx C\mu_0/(T-T_X)$

部分自然界磁场

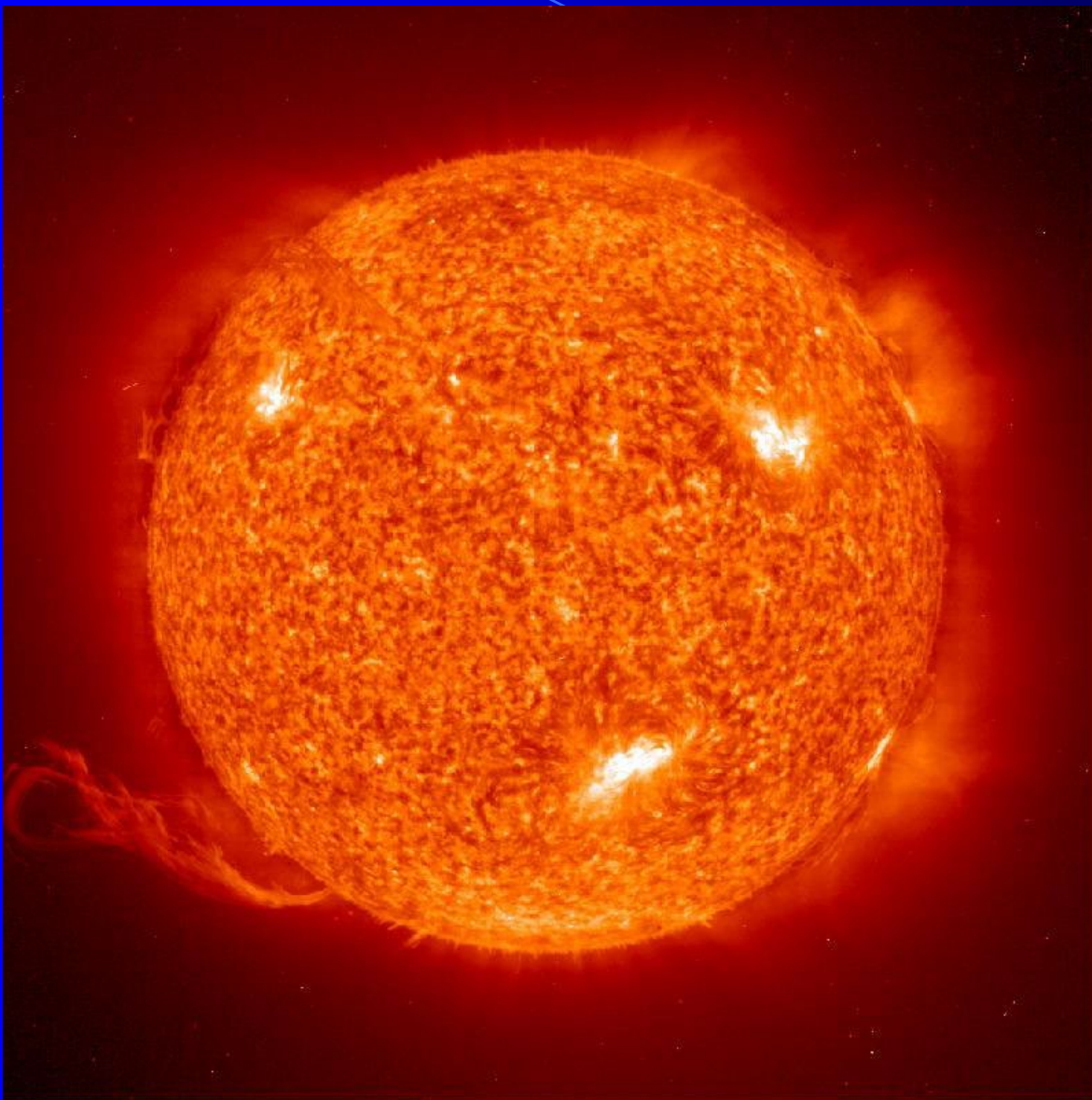
宇宙磁场例：

- 地球磁场（约1 Gauß）
 - 南北极磁场
 - 地球磁暴
 - 北极光
- 月球磁场（约 10^{-3} — 10^{-5} Gauß）
- 太阳磁场（表面约1 Gauß）
 - 太阳黑子、太阳耀斑
 - 太阳磁暴
 - 太阳风暴

生物磁场例：

- 磁共振CT
- 心电图→心磁图
- 脑电图→脑磁图

太阳耀斑



太阳黑子：太阳表面较暗的黑点

- 太阳表面部分区域的磁场较强： 10^2 — 10^4 Gauß
- 太阳表面大部分区域的磁场较弱： 1 Gauß
- 太阳表面温度很高： 6000 K



高温等离子体热平衡

较强磁场区域的温度较低



太阳表面暗斑

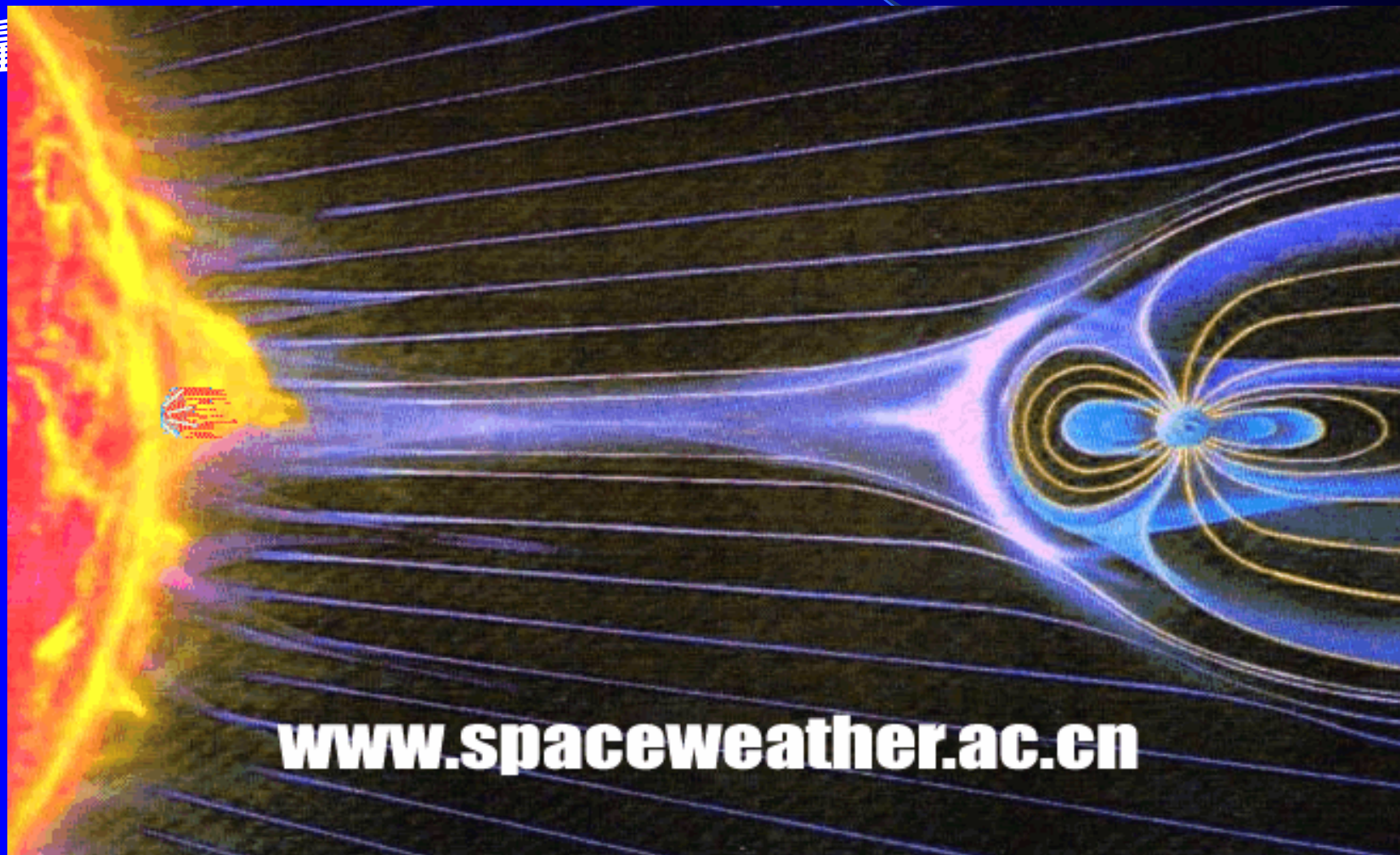


太阳黑子

太阳风暴

太阳风其实就是太阳向宇宙辐射发出的大量带电粒子，这种带电粒子高速度到达地球表面，并释放出巨大能

量



www.spaceweather.ac.cn

磁层亚暴(magnetospheric substorm)：

发生于地球磁层的强烈扰动



亚暴前：
极光



亚暴期间：
带状极光



亚暴期间：
漩涡状极光

北极光：北极高空出现多彩的发光现象

太空高能带电粒子（太阳风）进入大气层



沿地球磁场磁力线飞向南北极，并加速



与南北极大气分子、原子碰撞电离



激发光子，产生五颜六色的光

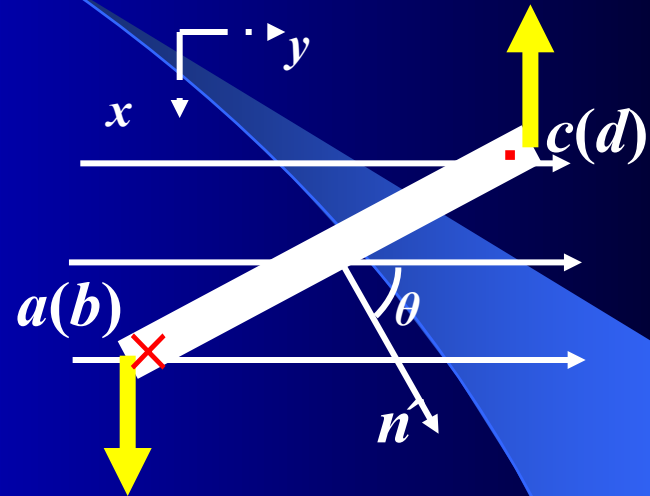
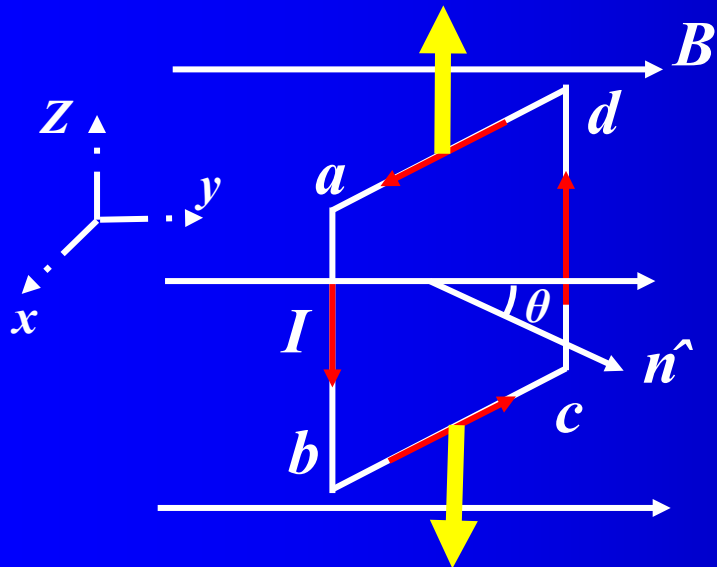
如：氧（绿、红光）、氮（紫光）、氩（蓝光）



北极光（北半球）、南极光（南半球）

磁场对载流线圈的力矩 磁矩

均匀磁场中，闭合载流线圈所受的安培力矢量和为零，但载流线圈可能受力矩作用。



- ad 和 bc 段所受磁力大小相等，方向相反，在同一条直线上；
- ab 和 cd 段所受磁力产生力矩。

均匀磁场对置于其中的载流平面线圈的力矩 T 等于线圈的磁矩 μ 与磁感应强度 B 的矢量积。

$$T = \mu \times B$$

$$\mu = IS\hat{n}$$

\hat{n} 与 I 服从右手螺旋定则

经典的电子轨道磁矩与角动量

带电粒子轨道角动量的经典图像

角动量:

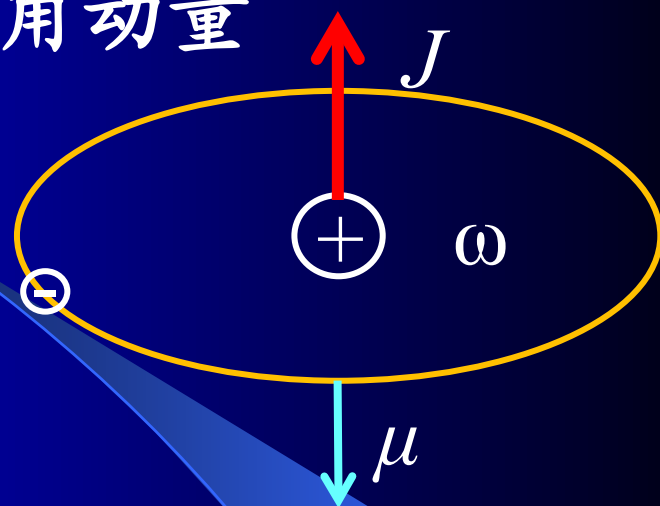
$$J = mvr = m\omega r^2$$

等效环形电流:

$$i = -e/T = -e\omega / 2\pi$$

磁矩是电流乘以面积

$$\mu = i(\pi r^2) = -\frac{1}{2} e\omega r^2$$



$$\mu = i(\pi r^2) = -\frac{e}{2m} J$$

轨道回旋比

量子力学承认磁矩与角动量的正比关系，但是角动量在空间任何方向的分量值是量子化的。

由量子力学知，电子的角动量是量子化的，其绝对值为：

$$P_l = \sqrt{l(l+1)}\hbar \quad l = 0, 1, \dots, (n-1)$$

因此电子的轨道磁矩为：

$$\mu_l = -\frac{e}{2m} P_l = -\sqrt{l(l+1)} \frac{e\hbar}{2m} \quad l = 0, 1, 2, \dots, (n-1)$$

γ_l : 轨道回旋比

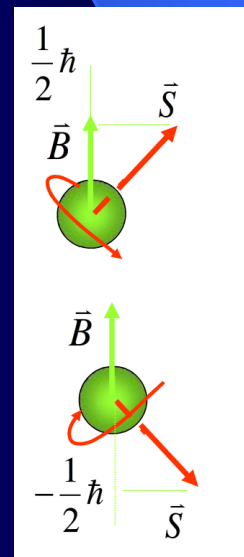
由量子力学知，电子自旋量子数为 $S=1/2$ ，自旋角动量为：

$$P_s = \sqrt{S(S+1)}\hbar = \frac{\sqrt{3}}{2} \hbar$$

电子自旋量子对应的磁矩为

$$\mu_s = -\frac{e}{m} P_s$$

γ_s : 自旋回旋比



6.1 原子磁矩

6.1.1 单电子原子的磁矩magnetic moment

原子磁矩导致物质的磁性

原子核磁矩 \ll 电子磁矩

电子轨道磁矩:

$$\mu_l = -[e/(2m)]P_l$$

电子自旋磁矩:

$$\mu_s = -[e/(m)]P_s$$

电子轨道磁旋比: $\gamma_l = -e/(2m)$

(轨道磁矩与轨道角动量 P_l 之比)

电子自旋磁旋比: $\gamma_s = -e/m$

(自旋磁矩与自旋角动量 P_s 之比)

$$\text{电子总磁矩: } \mu = \mu_l + \mu_s = -[e/(2m)](P_l + 2P_s)$$

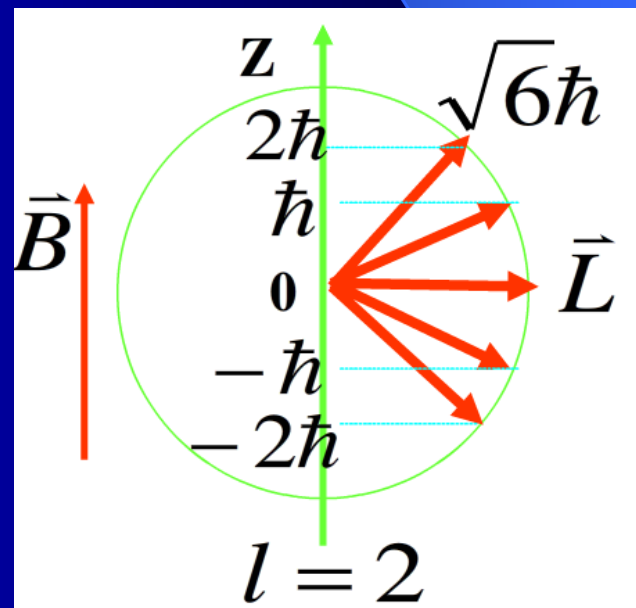
6.1.2 多电子原子的磁矩

当电子填满某一电子壳层，各电子的轨道运动和自旋取向占据了所有可能的方向，形成一个球对称集合，这些电子自身具有的总角动量和磁矩互相抵消。因此，被电子占满的壳层，总角动量和磁矩均为零。

未填满的壳层中的电子才会对总角动量和磁矩产生贡献

原子中电子结合的模式：

- LS耦合模型
- JJ耦合模型



JJ耦合模型:

适用于原子序数 $Z > 82$ 的原子。在这类原子中，**同一电子的轨道-自旋耦合较强**，每个电子的轨道磁矩和自旋磁矩先合成该电子总的磁矩，然后各个电子的总磁矩再合成该电子壳层的总磁矩。

$$\text{电子磁矩: } \mu_j = \mu_l + \mu_s$$

$$\text{原子磁矩: } \mu_J = \sum \mu_j$$

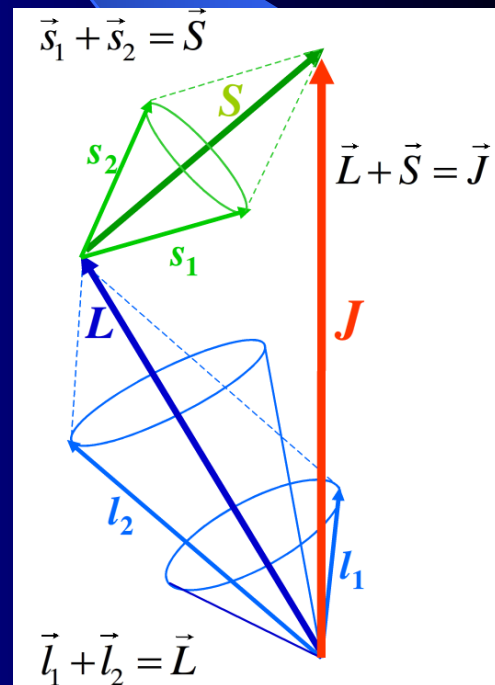
LS耦合模型:

适用于原子序数 $Z < 32$ 的原子。在这类原子中，**不同电子之间的轨道-轨道耦合和自旋-自旋耦合较强**，而**同一电子的轨道-自旋耦合较弱**，因此，各个电子的轨道磁矩和自旋磁矩先分别合成一个总轨道磁矩和总自旋磁矩；然后，总轨道磁矩和总自旋磁矩再耦合成该壳层电子的总磁矩。

$$\text{原子轨道磁矩: } \mu_L = \sum \mu_l$$

$$\text{原子自旋磁矩: } \mu_S = \sum \mu_s$$

LS+JJ耦合模型: $82 > Z > 32$



$$\mu_L = \sum \mu_l$$

$$\mu_S = \sum \mu_s$$

$$P_L = [L(L+1)]^{1/2} \hbar$$

量子化

$$P_S = [S(S+1)]^{1/2} \hbar$$

$$\mu_L = [L(L+1)]^{1/2} [e\hbar/(2m)]$$

$$\mu_S = [S(S+1)]^{1/2} (e\hbar/m)$$

玻尔磁子(Bohr magneton):

$$\mu_B = e\hbar/(2m) = 9.273 \times 10^{-24} \text{ A} \cdot \text{m}^2$$

$$\mu_L = [L(L+1)]^{1/2} \mu_B$$

$$\mu_S = 2[S(S+1)]^{1/2} \mu_B$$

总角动量: $P_J = P_L + P_S = [J(J+1)]^{1/2} \hbar$

总角动量量子数 J 的可能取值: $J = L + S, L + S - 1, \dots, |L - S|$

总磁矩: $\mu = \mu_L + \mu_S$

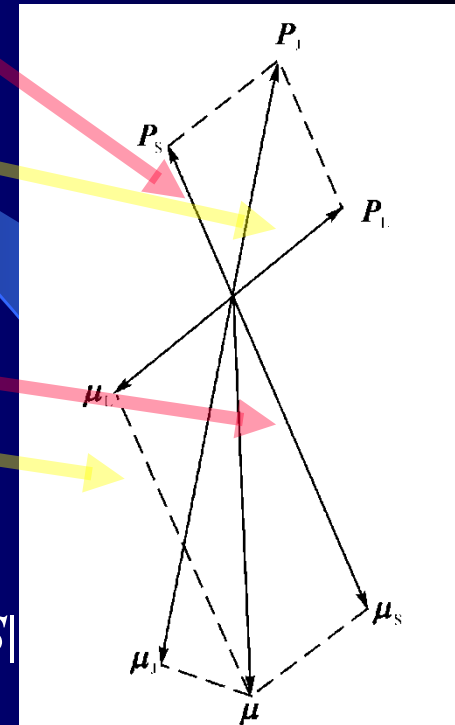
电子有效磁矩: $\mu_J = \mu \cos(P_J, \mu)$

$$\cos(P_J, \mu) = (P_J \cdot \mu) / (|P_J| \times |\mu|)$$

S : 总自旋角动量量子数

L : 总轨道角动量量子数

J : 总角动量量子数



总角动量和总磁矩方向不重合

- P_L 、 P_S 绕 P_J 进动
- μ_L 、 μ_S 绕 P_J 进动
- μ_L 、 μ_S 与 P_J 垂直分量在一个进动周期内的平均值为0



原子有效磁矩： $\mu_J = \mu_L \cos(P_L, P_J) + \mu_S \cos(P_S, P_J)$
 $= g_J [J(J+1)]^{1/2} \mu_B = p \mu_B$

p 为有效玻尔磁子数

朗德因子(Lande splitting factor) g_J ：

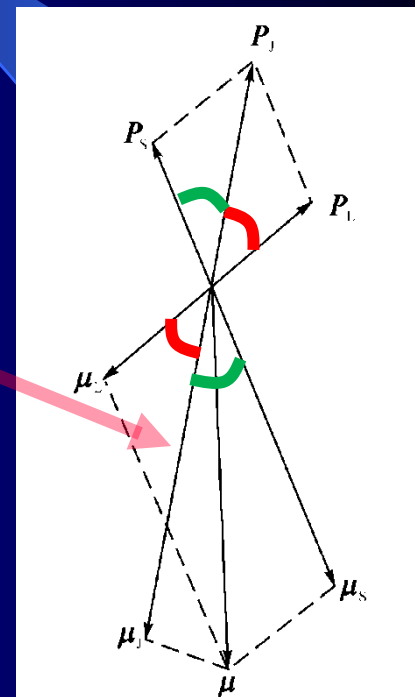
$$g_J = 1 + [J(J+1) + S(S+1) - L(L+1)]/[2J(J+1)]$$

原子序数： $Z \leq 32$, $1 < g < 2$

$Z \geq 82$, g_J 不同，公式一样

$32 < Z < 82$ ，由LS耦合向JJ耦合过渡，也只是 g_J 不同

S :总自旋角动量量子数
 L :总轨道角动量量子数
 J :总角动量量子数



总角动量量子数 J 的可能取值: $J = L + S, L + S - 1, \dots, |L - S|$

S : 总自旋角动量量子数

L : 总轨道角动量量子数

J : 总角动量量子数

朗德因子的物理意义:

$$g_J = 1 + [J(J+1) + S(S+1) - L(L+1)]/[2J(J+1)]$$

- $L=0$ 时, $J=S$, $g_J=2$, $\mu_J=2[S(S+1)]^{1/2}\mu_B$, 磁矩来自于自旋运动;
- $S=0$ 时, $J=L$, $g_J=1$, $\mu_J=[L(L+1)]^{1/2}\mu_B$, 磁矩来自于轨道运动;
- $1 < g_J < 2$, 原子磁矩由轨道磁矩和自旋磁矩共同贡献;

g_J 反映了原子中轨道磁矩和自旋磁矩对总磁矩贡献的大小

6.1.3 洪德定则Hund's rules

S :总自旋角动量量子数

L :总轨道角动量量子数

J :总角动量量子数

洪德定则：确定多电子原子或离子**无外场激发基态**量子数 L 、 S 和 J

- **总自旋角动量量子数 S** : 在取泡利(Pauli)原理所允许的最大值，能量最低， $S = \sum m_s$ 。
- **总轨道角动量量子数 L** : 在 S 取最大值的各状态中，取泡利原理所允许的最大值，能量最低， $L = \sum m_L$ 。
- **总角动量量子数 J** : 若壳层中电子不到半满， $J = |L - S|$ ；若超过半满，则 $J = |L + S|$ ；若刚好半满， $L = 0$ 、 $J = S$ 。

例：三价铒离子(Er^{3+})

Er原子电子组态： $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^6 4d^{10} 4f^{12} 5s^2 5p^6 6s^2$

Er^{3+} 离子电子组态： $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^6 4d^{10} 4f^{11} 5s^2 5p^6$



4f¹¹不满壳层 ↓ f壳层4f electronic shells: 14个电子满
 S取泡利原理所允许的最大值

• $n = 4, l = 3, m_L = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3$

• 第一定则: 自旋角动量量子数: $S = 7 \times (1/2) + (-4) \times (1/2) = 3/2$

第二定则 ↓ L在S取最大值的各状态中, 取泡利原理所允许的最大值

$m_L = 0, 1, 2, 3, -1, -2, -3; 3, 2, 1, 0$

↓ $L = \sum m$

$L = 3 + 2 + 1 + 0 = 6$

| m_L | -3 | -2 | -1 | 0 | 1 | 2 | 3 |
|-------|-----|-----|-----|------|------|------|------|
| m_s | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1/2 |
| | | | | -1/2 | -1/2 | -1/2 | -1/2 |

• 4f: 11个电子, 大于半满 (7个电子)

第三定则 ↓

超过半满, $J = |L + S|$

$J = |L + S| = 6 + 3/2 = 15/2$

取 $g = 1.5$ ↓

$\mu_J = g [J(J+1)]^{1/2} \mu_B = 11.98 \mu_B$

6.2 顺磁性与逆磁性

6.2.1 半经典理论

外磁场作用任何材料



与外磁场方向相反的磁矩



逆磁性（材料的共性）

磁性材料：1. 净磁矩 = 0

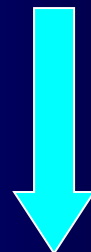
2. 净磁矩 $\neq 0$ （本征磁矩）



电子轨道磁矩与自旋磁矩抵消相邻原子磁矩



可以观测到逆磁性：逆磁性材料



本征磁矩 \gg 逆磁性：其它磁性材料

逆磁性分析方法：拉摩-朗之万理论

电子轨道磁矩 μ_1



外磁场 B_0

力矩 $\mu_1 \times B_0$



角动量变化

$$dP_1/dt = \mu_1 \times B_0$$



$$\mu_1 = -[e/(2m)]P_1$$

$$d\mu_1/dt = -[e/(2m)]\mu_1 \times B_0 = [e/(2m)]B_0 \times \mu_1$$

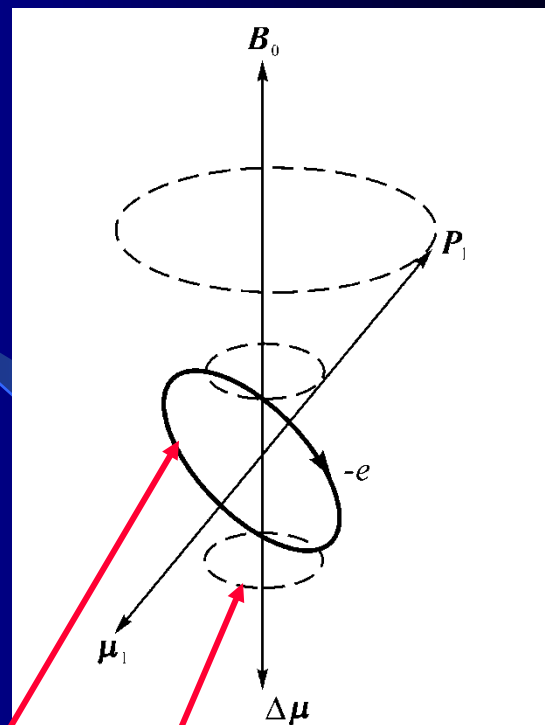
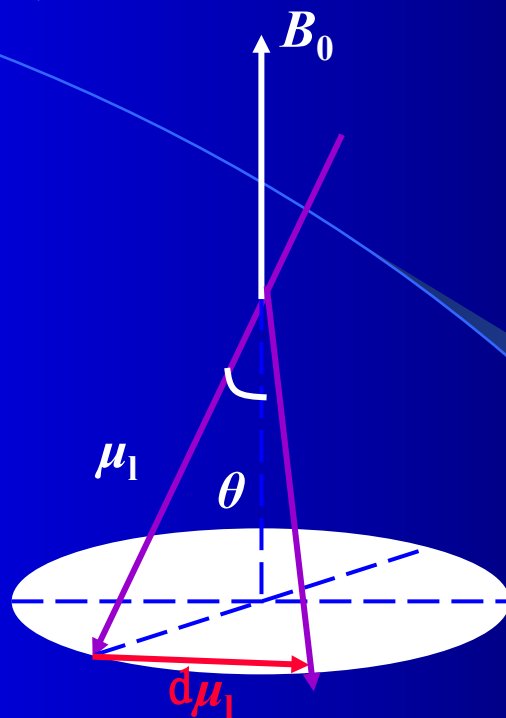


$$d\mu_1 = [e/(2m)]|B_0||\mu_1|\sin\theta dt$$

拉摩进动角频率： $\omega = d\mu_1/(|\mu_1|\sin\theta dt) = [e/(2m)]B_0$

- 无外磁场，电子绕原子核轨道运动，磁矩 μ_1
- 加外磁场，除 μ_1 外，电子 μ_1 还绕外磁场拉摩进动

感应磁矩 $\Delta\mu_1$ 方向正好与外磁场方向相反：逆磁性



电子在磁场作用下发生绕磁场方向的进动

顺磁性分析方法：布里渊-朗之万理论

本征磁矩在固体中分布稀疏



原子间磁矩相互作用很小（自由原子）



理想气体假设

顺磁气体



热运动

磁矩无规则取向



磁化强度 $M = \sum m = 0$

外磁场

磁矩试图转到磁场方向排列（能量最低）



平衡分布

$M = \sum m \neq 0, (M \cdot B_0 > 0, \text{顺磁性})$

原子有效磁矩 $\mu_J = g[J(J+1)]^{1/2}\mu_B$

外磁场 $B = B_0 \hat{z}$

(z 方向)

原子磁矩在 B_0 方向的分量:

$$\mu_z = \mu \hat{z} = g M_J \mu_B \hat{z} \quad M_J = -J, \dots, J-1, J$$

μ_z 玻尔兹曼分布:

$$\exp[\Delta E / (k_B T)]$$

μ_J 在 B_0 场中的附加能量 (势能)

$$\Delta E = -(\mu_J \cdot B) = -M_J g \mu_B B_0$$

统计平均:

平均磁矩:

$$\bar{\mu} = \frac{\sum_{M_J=-J}^{M_J=J} -\mu_z \exp[\Delta E / (k_B T)]}{\sum_{M_J=-J}^{M_J=J} \exp[\Delta E / (k_B T)]} = J g \mu_B B_J \left(-\frac{M_J g \mu_B B_0}{k_B T} \right)$$

布里渊函数

$$B_J(x) \Big|_{x \ll 1} \approx (J+1)x / (3J)$$

$$\bar{\mu} \approx \mu_J^2 B_0 / (3k_B T)$$

$$\bar{\mu} \approx \mu_J^2 B_0 / (3k_B T)$$

磁化强度: $M = |\sum \mu / V| = N \bar{\mu}$ \downarrow N : 单位体积中有磁矩的原子数

顺磁磁导率: $\chi = \mu_0 M / B_0 = \mu_0 N \bar{\mu} / B_0 = \mu_0 \frac{C}{T}$

居里定律, C : 居里常数

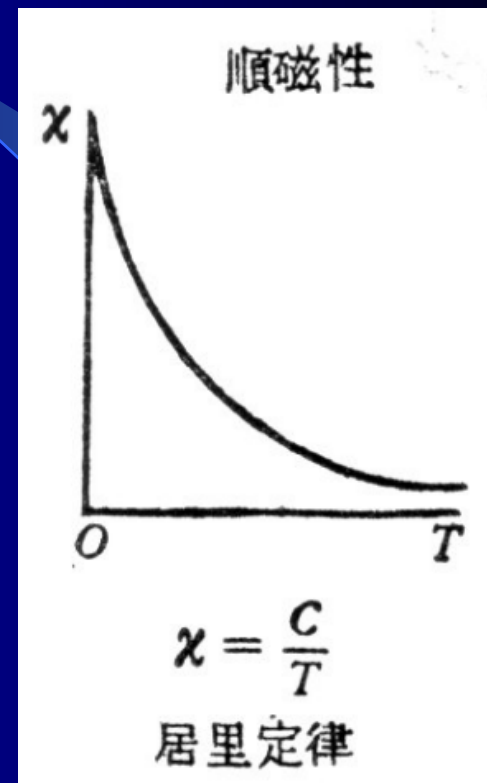
量子力学方法:

- 基础为哈密顿Hamilton量
- 薛定谔方程
- 微扰理论

\downarrow 能量算子

$$\hat{H} = \sum_{i=1}^N \left[\frac{\hbar^2}{2m} \nabla_i^2 + V(i) \right] \mu + \frac{e^2}{r_{ij}}$$

(多体问题) \longrightarrow



6.2.2 稀土族和铁族离子的顺磁性

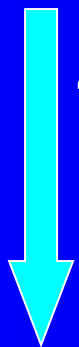
稀土族离子例: Er^{3+}

Er原子电子组态: $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^6 4d^{10} 4f^{12} 5s^2 5p^6 6s^2$

Er^{3+} 离子电子组态: $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^6 4d^{10} 4f^{11} 5s^2 5p^6$



4f层电子对顺磁性有贡献



4f层电子被填满电子的外层 $5s^2$ 和 $5p^6$ 电子屏蔽



相邻离子对离子内部4f电子影响很小

采用“自由原子”模型



表6.2.1的三价稀土离子有效玻尔磁子数理论值与实验符合较好

铁族离子例: Ni^{2+}

Ni原子电子组态: $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^8 4s^2$

Ni^{2+} 离子电子组态: $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^8$

3d电子是最外面壳层的电子

受到其他离子的影响较大

不能用孤立离子的分析方法

洪德定则不完全适用

轨道角动量平均值 $L \approx 0$ (轨道角动量的猝灭效应)

受离子势场作用

轨道角动量平均值 $L \approx 0$ (轨道角动量的猝灭效应)



$$J = L + S \approx S$$



$$g \approx 2$$

有效玻尔磁子数 $p = g [J(J+1)]^{1/2} \approx 2[S(S+1)]^{1/2}$



表6.2.2的3d

过渡铁族离子

有效玻尔磁子数



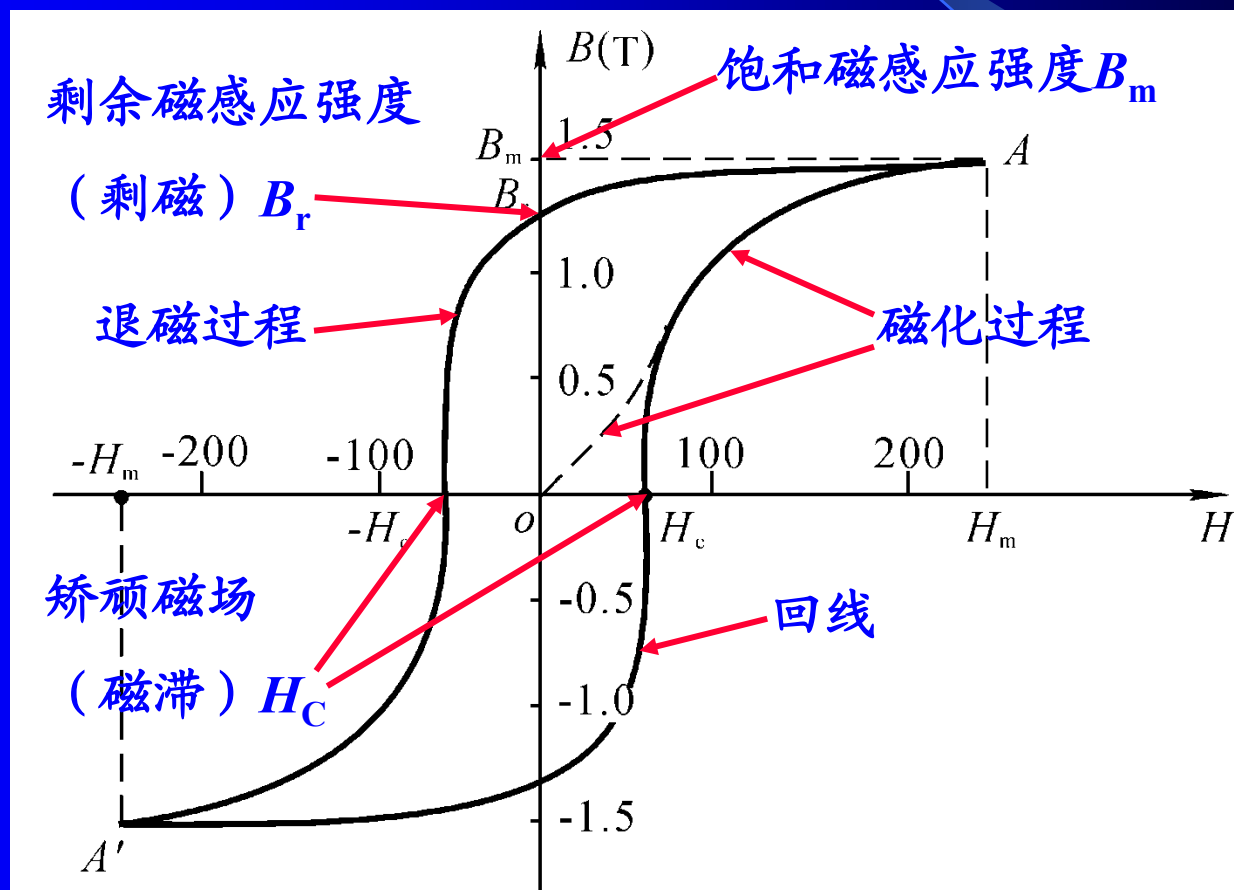
理论值与实验差距较大

理论值与实验符合较好

6.3 铁磁性

6.3.1 铁磁质的宏观特性

磁化曲线（磁滞回线）：



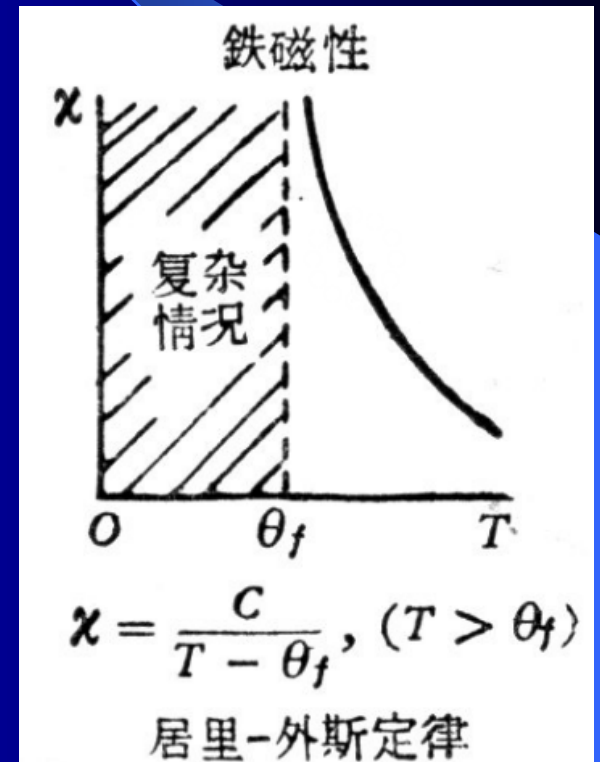
铁磁性:

- 磁现象:

- 磁化率 ($\chi=10^1$ 到 10^6) 远大于顺磁性物质 ($\chi=10^{-2}$ 到 10^{-5})
- 温度高于临界温度 (居里温度), 铁磁性变为顺磁性
- 复杂的非线性磁化曲线
- 反复磁化时的磁滞现象
- 剩磁现象

- 非磁现象 (临界温度附近):

- 比热反常现象
- 电导率反常现象
- 热膨胀系数反常现象
- 磁阻、杨氏模量、.....反常现象



6.3.2 外斯分子场理论 (Weiss mean field theory)

分子场假设： 铁磁体内部存在一种很强附加磁场。

铁磁性物质在一定温度范围内（居里温度）存在和外加磁场无关的自发磁化，使得离子磁矩相互平行排列。导致自发磁化的某种作用力假设为铁磁性物质内存在着“分子场”。

$$B_m = \mu_0 \lambda M$$

分子场强度

分子场常数

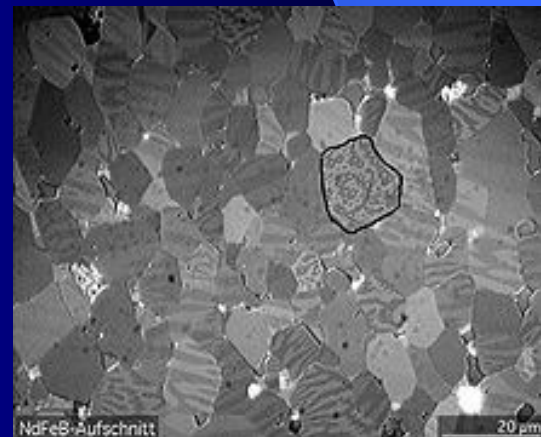
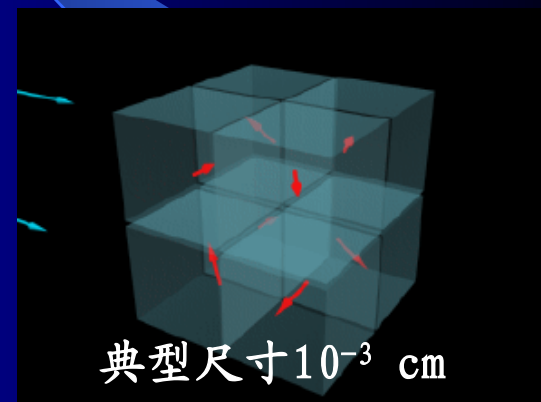
$$B = B_0 + \mu_0 \lambda M$$

原子磁矩感受到的磁感应强度

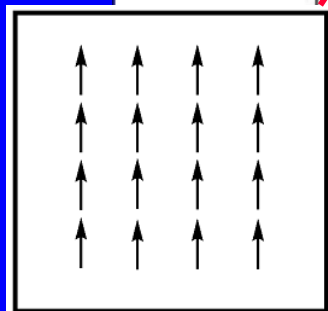
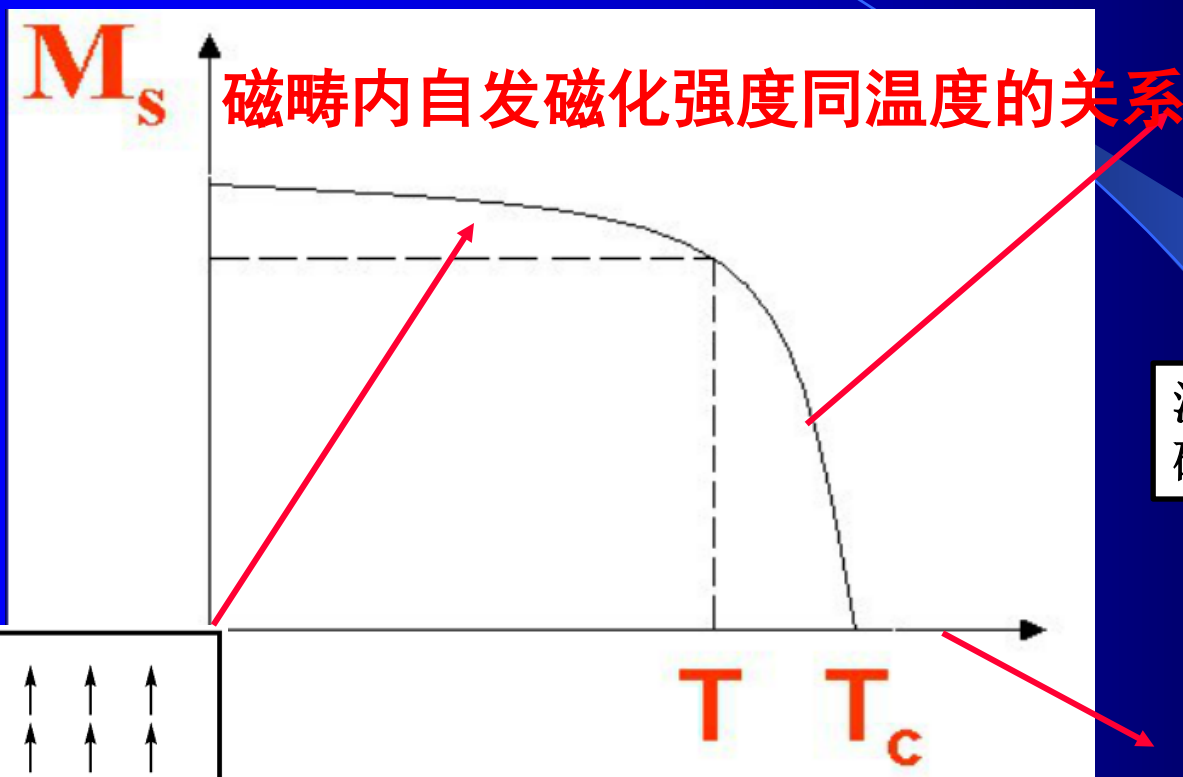
磁畴假设：

自发磁化是按区域分布的，各个自发磁化区域称为磁畴。无外场时，磁畴都是自发磁化到达饱和。但磁化方向不同，宏观磁体总磁矩为零。

$$M = \sum m = 0$$

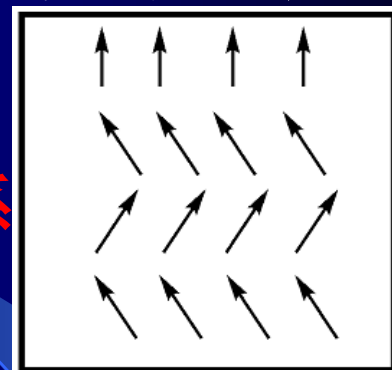


分子场和外磁场共同作用下铁磁体的宏观磁化强度随温度和磁场的变化可用玻尔兹曼统计计算（与计算顺磁性方法类似）。



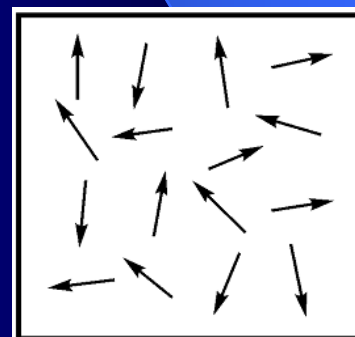
温度很低

磁矩有序排列



温度略低于 T_c

温度上升, $T < T_c$,
磁矩无序排列增加



$T \gg T_c$

顺磁性（居里-外斯定律）： $\chi \approx C\mu_0/(T - T_c)$

温度进一步上升, $T > T_c$, 热运动破坏分子场, 各磁矩完全无序排列, 独立偏转。

6.3.3 铁磁性的起源

分子场：

- 分子场导致铁磁性
- 分子场作用形似磁场，但分子场不是磁场。
- 相邻原子中电子间能量交换作用产生分子场



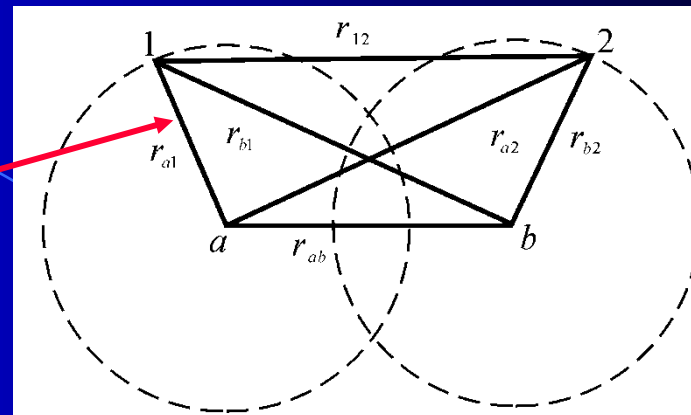
磁有序，静电作用



分子场：不同于经典库仑静电，是一种量子效应

铁磁性的主要起因:

- 海森堡 (Heisenberg) 的
直接交换作用

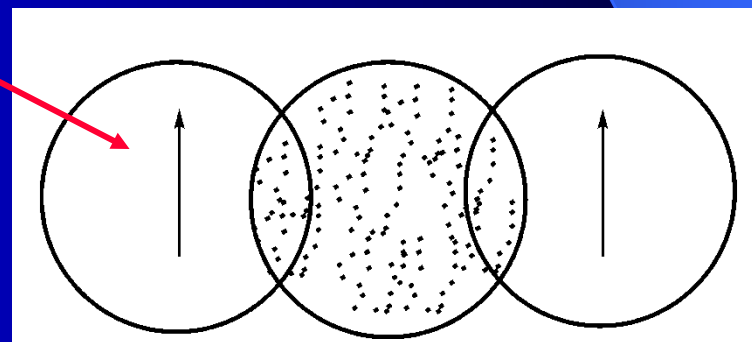
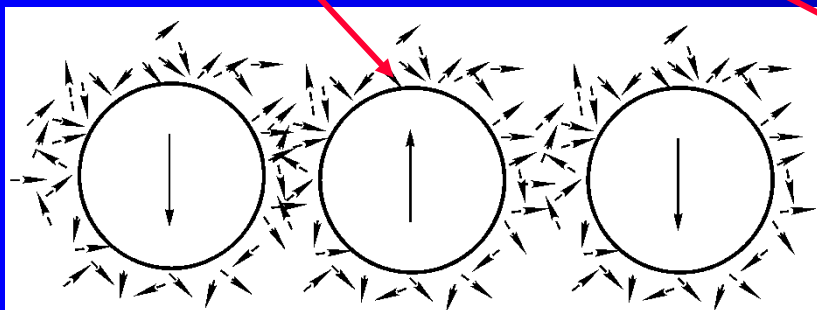


- 布洛赫(Bloch)自旋波

- 能带模型 (s-d电子交换作用、巡游d电子交换作用)

- 超交换作用superexchange

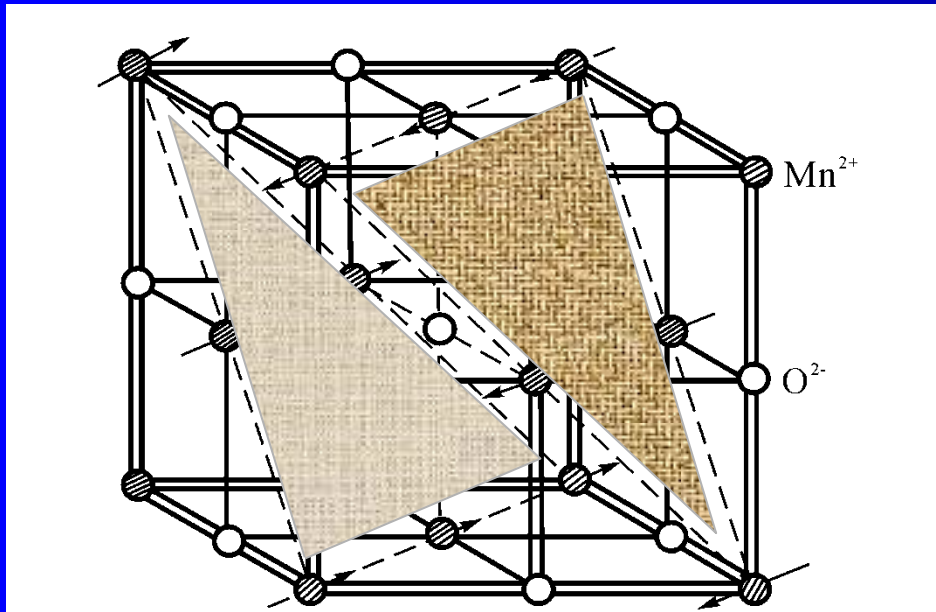
- 非直接交换作用undirect exchange



各种相互作用能

6.4 反铁磁质和亚铁磁质

6.4.1 反铁磁性的奈尔(Neel)理论

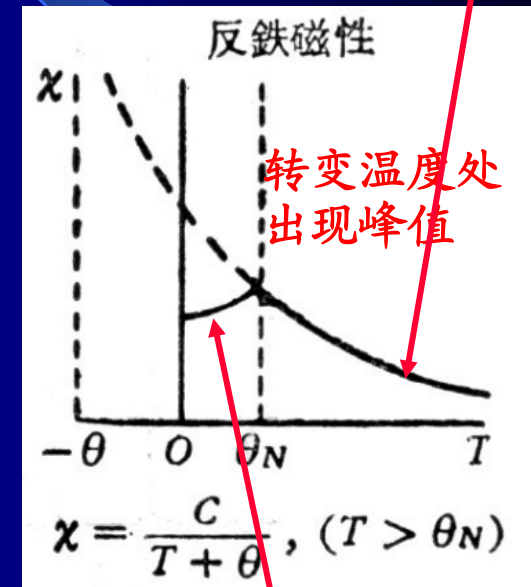


MnO离子晶体, 各自面心立方结构

反铁磁体: 自旋磁矩有序排列 反平行

- 同一(111)面上 Mn^{2+} 自旋方向相同
- 相邻(111)面上 Mn^{2+} 自旋方向相反

$T > \theta_N$: 顺磁性



$T < \theta_N$: 反铁磁性: 磁化率随温度降低而减小

- 顺磁性、特征温度: 0 K $\chi \approx C\mu_0/T$
- 铁磁性、特征温度: T_C $\chi \approx C\mu_0/(T-T_C)$
- 反铁磁性、特征温度: $-\Theta$

奈尔温度 T_N

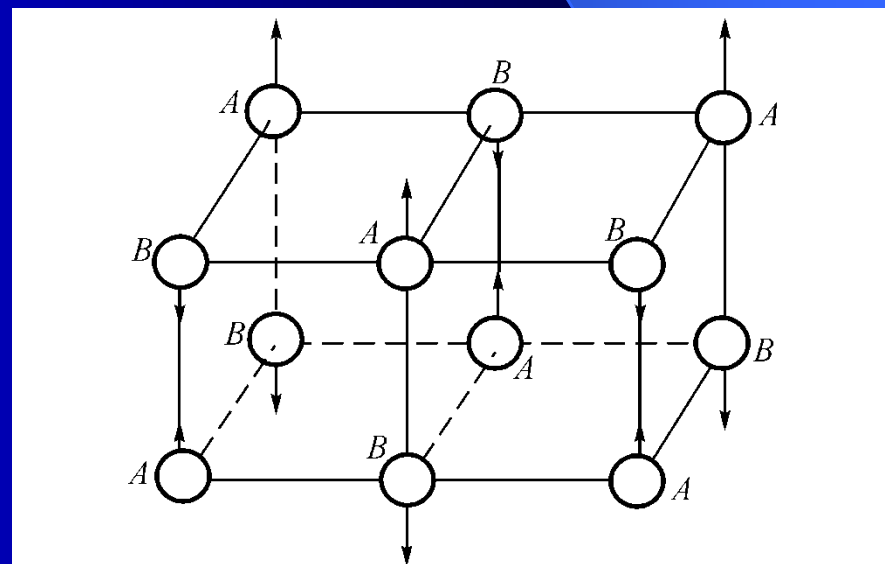
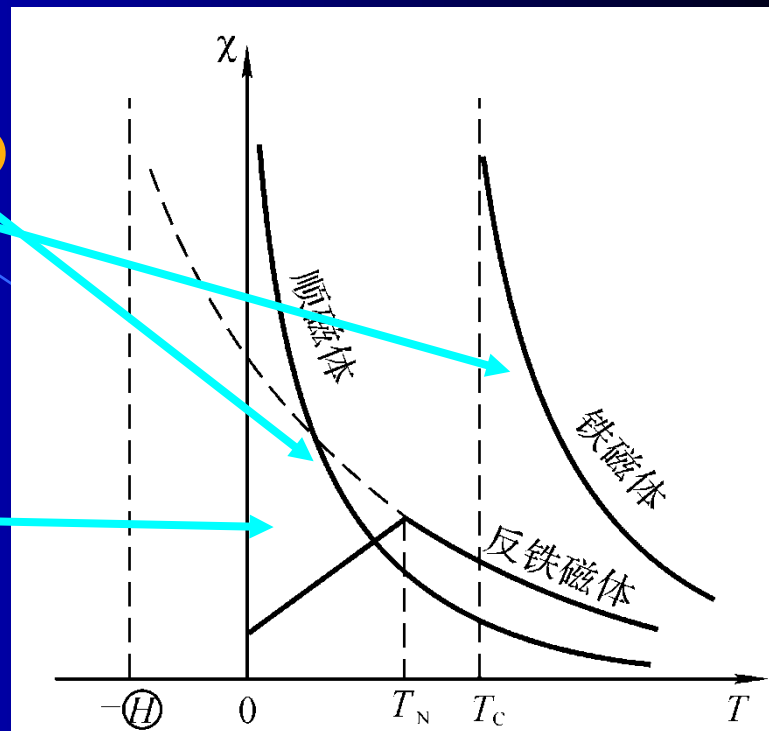
反铁磁体:

- $T < T_N$, 反铁磁性
- $T > T_N$, 顺磁性:

$$\chi = C\mu_0 / (T + \Theta)$$

奈尔理论:

- 子晶格: A类、B类
- 内场



反铁磁性：磁性原子之间的相互作用是反铁磁性的

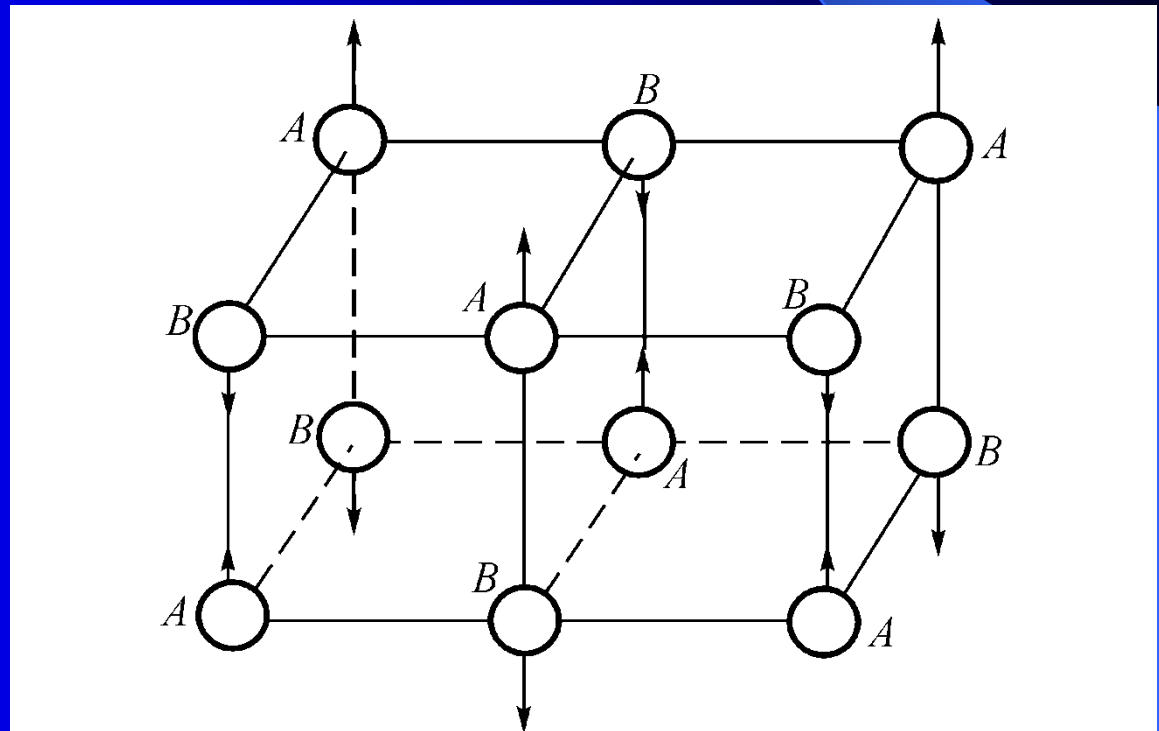
- 子晶格A上的离子与子晶格B上的离子相距较小(A-B)
- 子晶格A或B上的离子之间相距较远(A-A)或(B-B)



(A-B)作用 > (A-A)作用或(B-B)作用



- (A-B)反平行
- (A-A)平行
- (B-B)平行



子晶格A或B，产生的磁化强度 M_A 或 M_B

$T < T_N$

$M_A = -M_B$

$\Sigma M \approx 0$

总磁化强度很小 (10^{-4})

$T > T_N$

离子热运动增加

转变为顺磁性:

$\chi = C\mu_0 / (T + \theta)$

反铁磁性: 磁性离子通过无磁性离子作为媒介进行交换作用

超交换作用 (间接交换作用)

6.4.2 亚铁磁性和铁氧体

子晶格 $M_A \neq -M_B$ ，导致 $\sum M \neq 0$



亚铁磁性：铁和另外一种或多种金属组成复合氧化物certain double oxides of iron and another metal（铁氧体ferrites）

- 非金属磁性材料、高电阻率
- 铁氧体例：
 - 尖晶石型铁氧体 AB_2O_4 ，如 $MgAl_2O_4$ （镁铝尖晶石）
 - 磁铅石型铁氧体 $AFe_{12}O_{19}$ ，如 $BaFe_{12}O_{19}$ （钡铁氧体）
 - 石榴石型铁氧体 $B_3Fe_5O_{12}$ ，如 $Y_3Fe_5O_{12}$ （钇铁石榴石YIG）
- 磁性：
 - $T < T_C$ 为铁氧体 其磁性是未被抵消的反铁磁性
 - $T > T_C$ ，热运动使磁矩无序排列，转变为顺磁性

6.4.2 亚铁磁性的基本特征

在磁结构的本质上和反铁磁物质相似，但宏观特性上更接近铁磁物质。

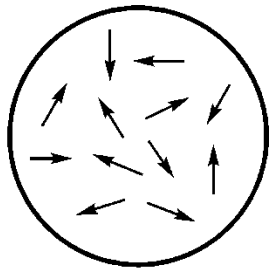
- 存在磁有序—无序的转变温度（尼尔点或居里点）；
- 存在磁滞现象；
- 存在磁各向异性和磁致伸缩效应；

同铁磁性

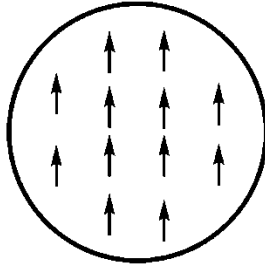
- 饱和磁化强度较低（ 10^4 vs. 10^6 ）；
- 居里温度较低；
- 电阻率高、介电常数大

不同铁磁性

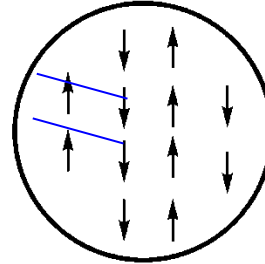
顺磁性、铁磁性、反铁磁性和亚铁磁性的磁矩排列：



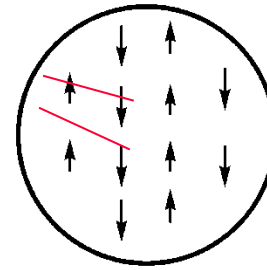
(a)顺磁性(朗之万)



(b)铁磁性

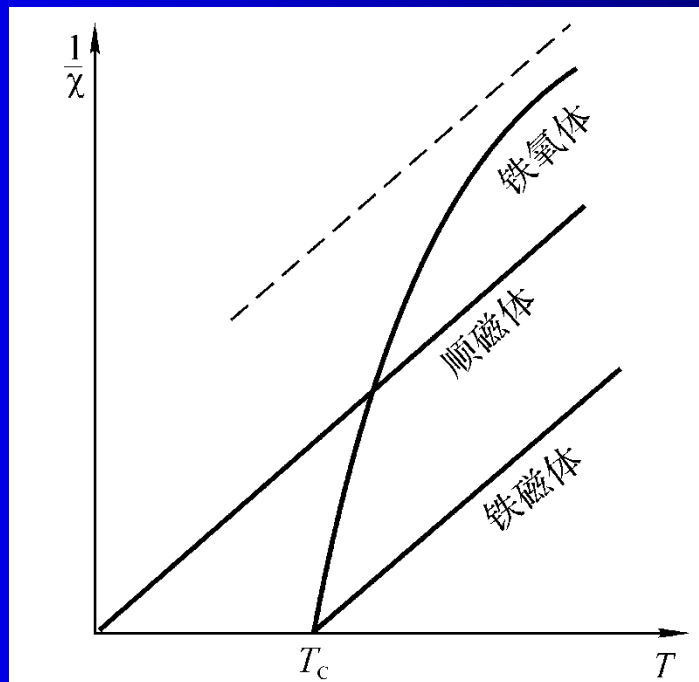


(c)反铁磁性



(d)亚铁磁性

顺磁性、铁磁性和亚铁磁性的 $1/\chi$ 同温度的关系：



6.5 铁磁体的磁畴magnetic domains理论

磁化曲线（磁滞回线）上各点都代表铁磁体的磁化平衡状态，其总自由能为极小

6.5.1 铁磁体的各种相互作用能

铁磁体

↓ 平衡过程
能量最低原理

↓
总自由能极小

总自由能: $F = u - TS - PV$

总自由能

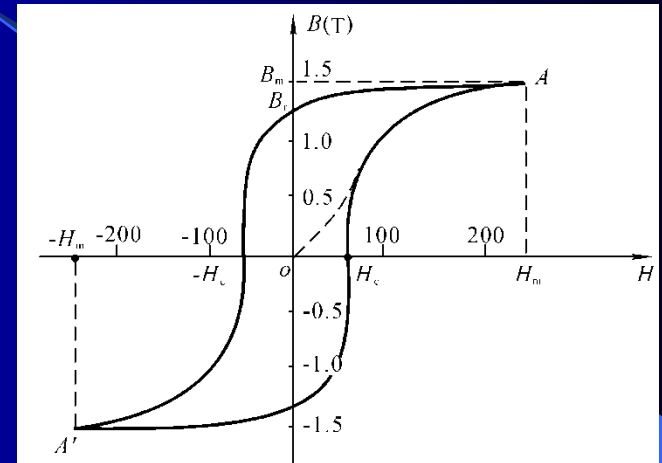
内能

温度

系统的熵

体积

压强



总自由能: $F = u - TS - PV$



$B = 0$

$$dF = d(u - TS - PV)$$



等温、等体积

$$dF \approx du \approx 0$$

(系统稳定状态)



$B \neq 0$

磁畴理论 (微观); (宏观) 技术磁化

磁化曲线

磁滞回线

各种相互作用能的变化量

铁磁体的相互作用能:

- 两个自旋之间的交换能
- 磁晶各向异性能 magnetocrystalline anisotropy energy
- 磁致伸缩 magnetostriction 和 磁应力能
- 外磁场能和退磁场能 demagnetizing energy

6.5.2 磁畴的形成

磁畴: 各种能量都要取**最小值**过程中, 相互矛盾、相互平衡

- 自旋交换能**较大下降**、退磁能 (单一磁畴) 上升

- 退磁能**较大下降**、自旋交换能上升

- 单轴晶体: 磁晶各向异性能**较大下降**

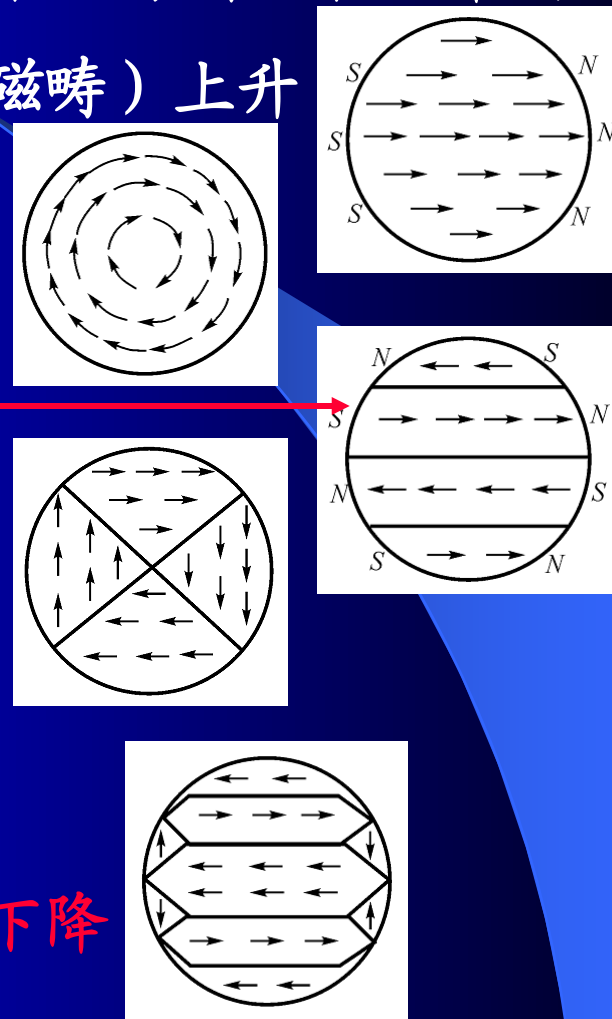
- 多个磁畴: 磁晶各向异性能**较大下降**

- 磁致伸缩能**下降**

- 磁畴数增加、封闭, 导致退磁能**较大下降**



各种能量共同作用: **能量最小值**磁畴, 达到稳定



磁畴magnetic domain

磁矩取向不一致

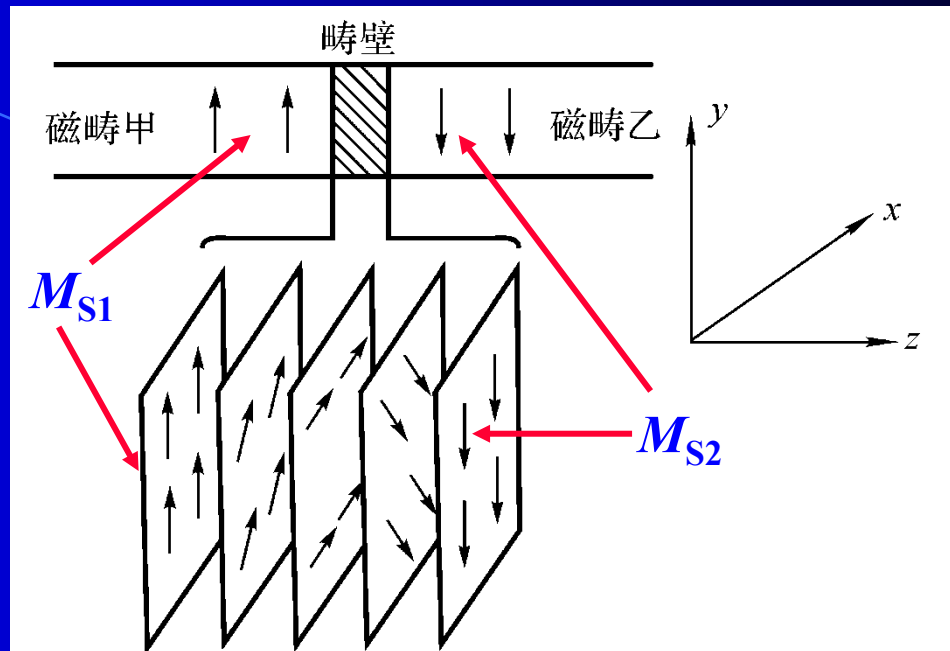
自旋交换能增加

为使自旋交换能增加量减少

磁畴之间存在方向逐渐改变的过渡层

磁畴壁domain walls

- 磁矩 M_{S1} 与 M_{S2} 成 φ_0 角，磁畴壁内有 $(N+1)$ 层磁矩
- 两层磁矩夹角为 φ_0 / N



6.5.3 单畴颗粒

小颗粒磁性物质



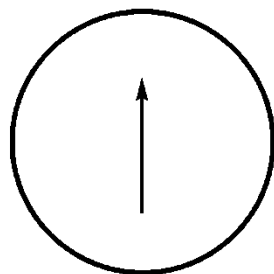
颗粒足够小（尺寸小于临界尺寸）

整个颗粒可以在一个方向自发磁化到饱和



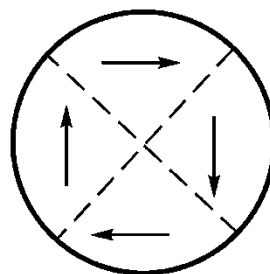
单个磁畴（单畴颗粒）

单畴



(a)

封闭畴

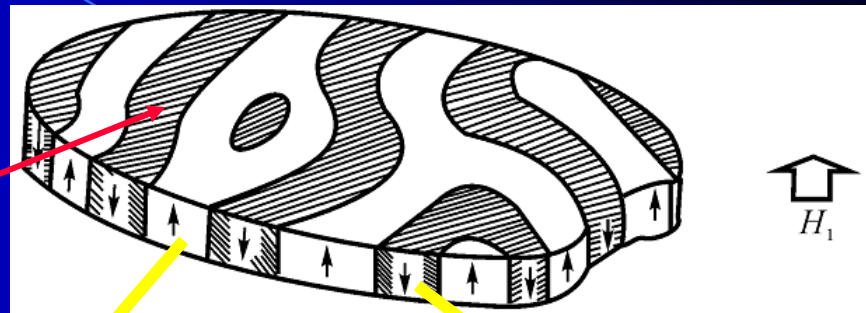


(b)

6.5.4 磁泡畴

磁泡畴：

- 磁性材料（单轴各向异性）
- 易磁化轴垂直于表面
- 薄膜或薄片



无外磁场

有外磁场

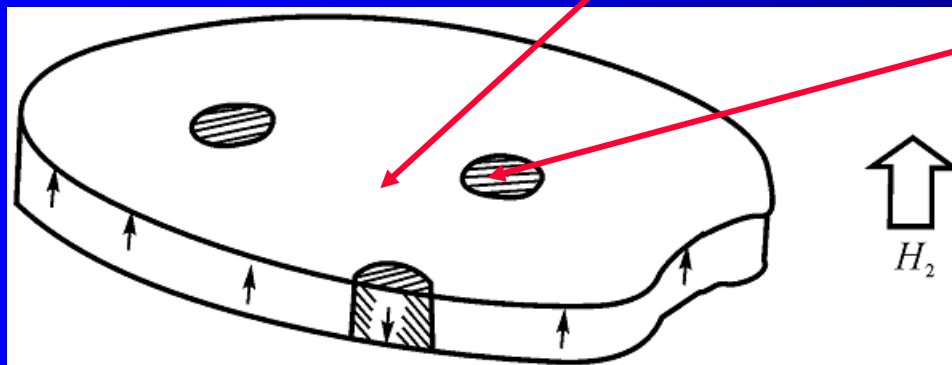
带状磁畴

磁矩与外磁场平行

磁矩与外磁场反平行

磁畴变宽

磁畴变窄



分立的柱形畴

磁泡畴

6.6 铁磁体的磁化过程

6.6.1 静态磁化过程

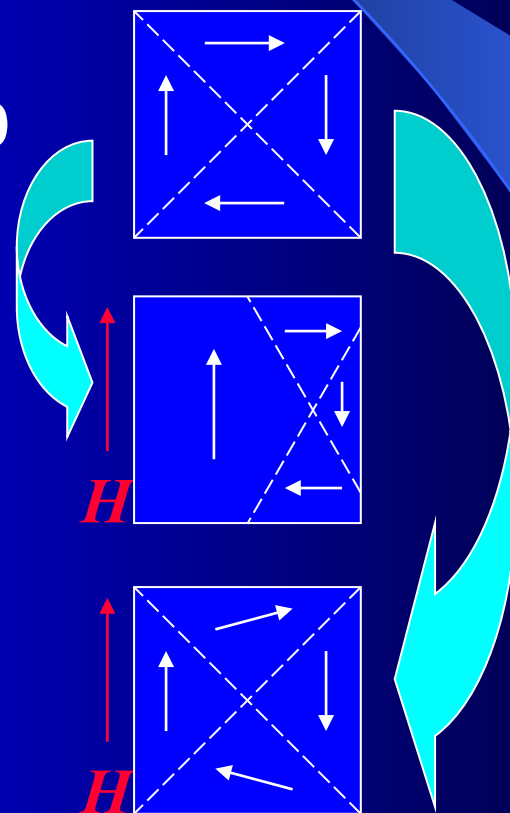
1. 磁化过程 (H 上升)

磁化过程主要：磁壁位移、磁畴转动

- 磁畴： $H = 0 \rightarrow M = 0$

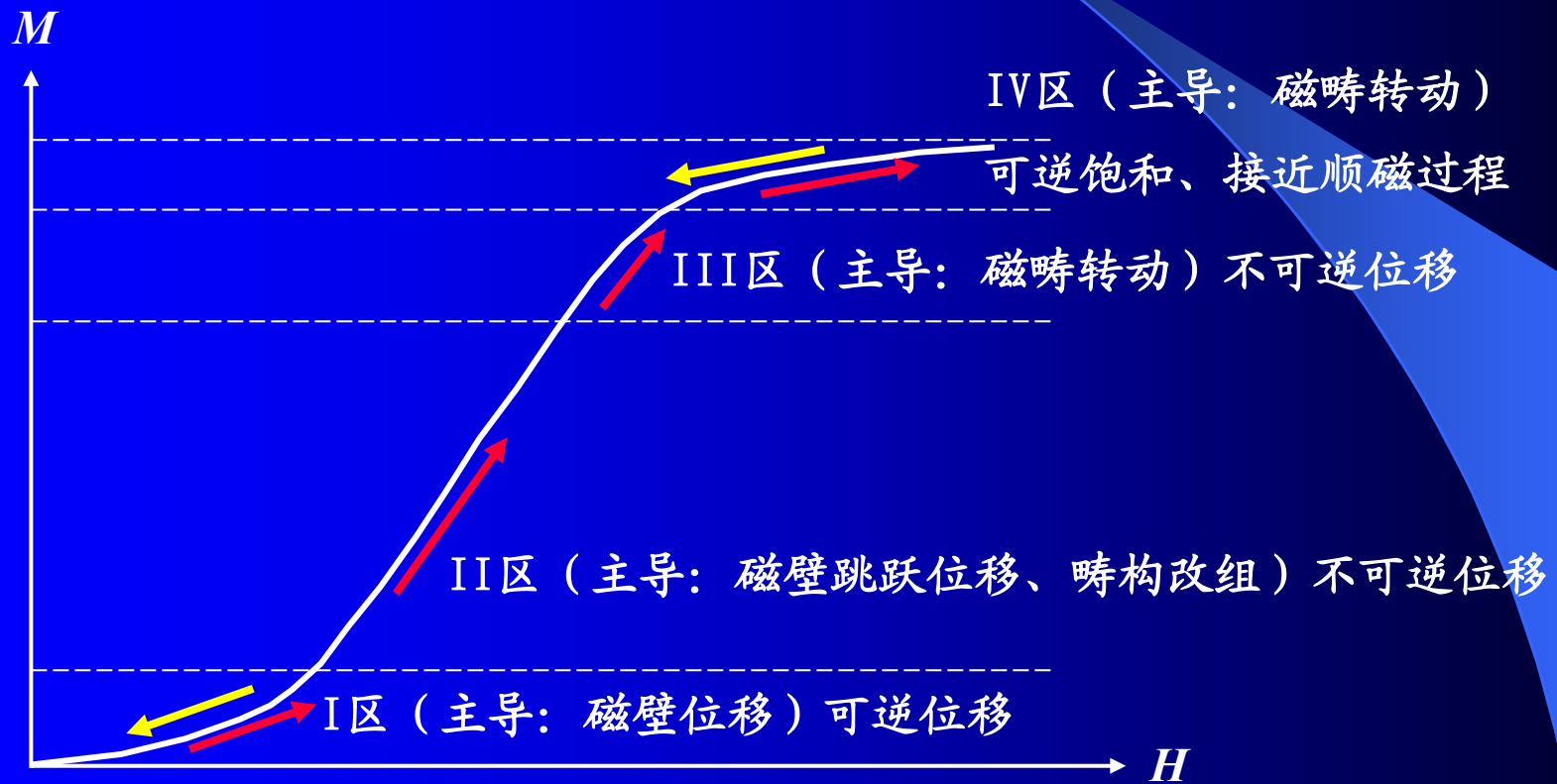
- 磁壁位移： $M \cdot H > 0$

- 磁畴转动： $M \cdot H > 0$

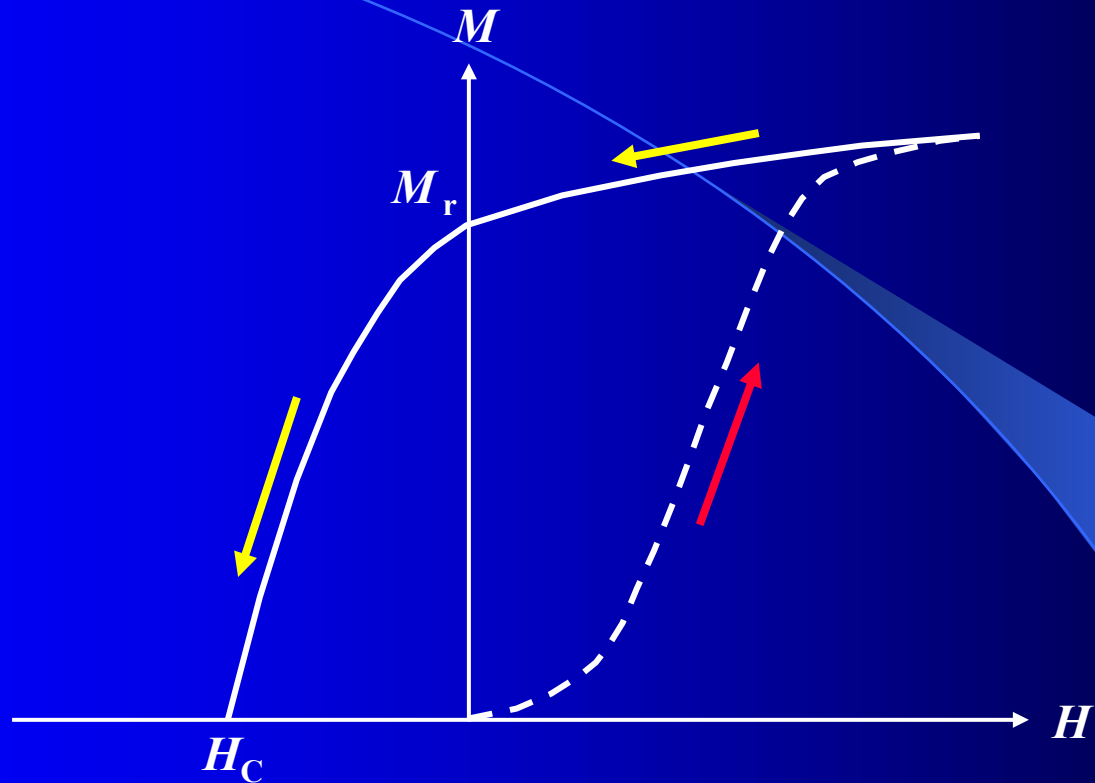


磁化过程主要：磁壁位移、磁畴转动

磁化曲线：

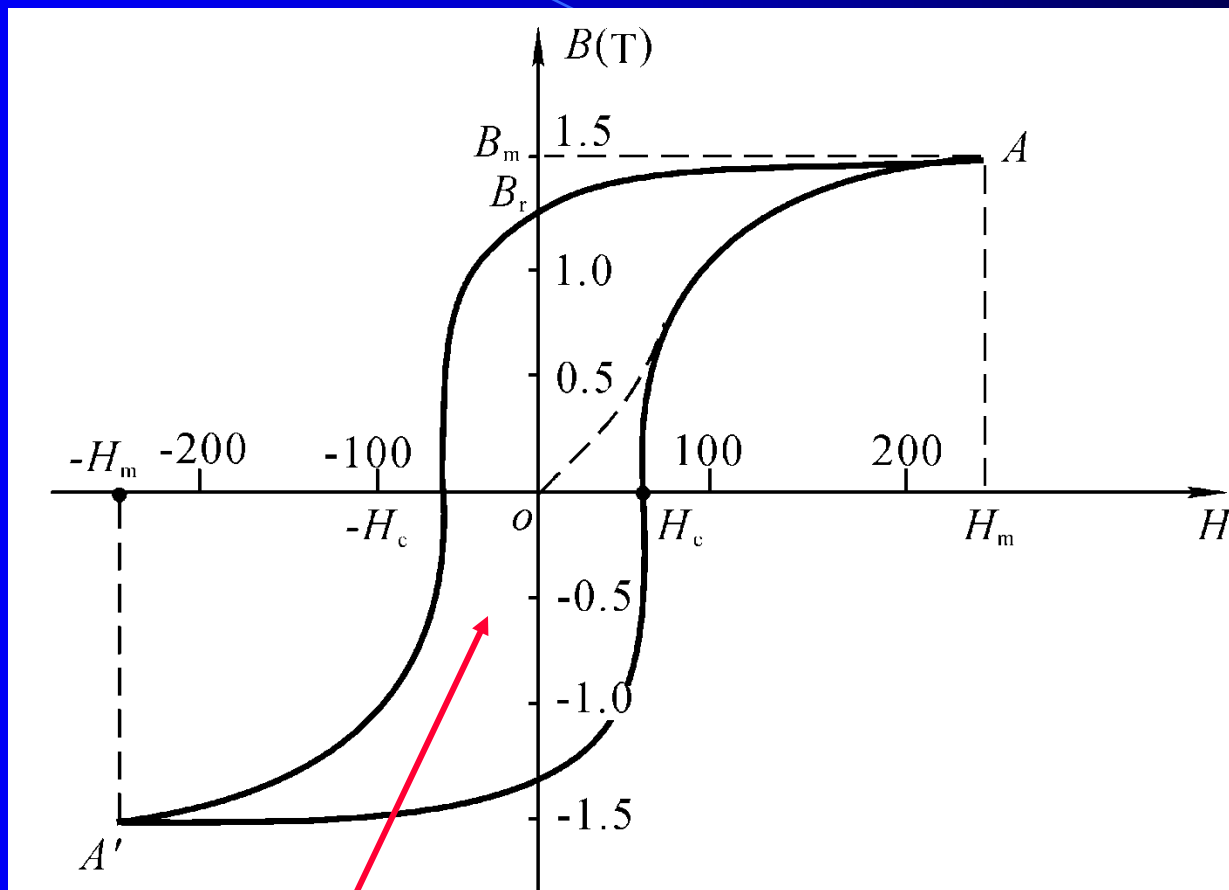


2. 反磁化过程 (H 下降及反向)



- 剩余磁化强度 M_r
- 矫顽力 H_C :
 - 软磁材料: 矫顽力较小、很容易退磁
 - 硬磁(永磁)材料: 矫顽力较大、不易退磁

磁化曲线（磁滞回线）：



- 面积代表能量损耗
- 面积上升，导致能量损耗增加

6.6.2 动态磁化过程

动态磁化:

交变场产生交变磁场

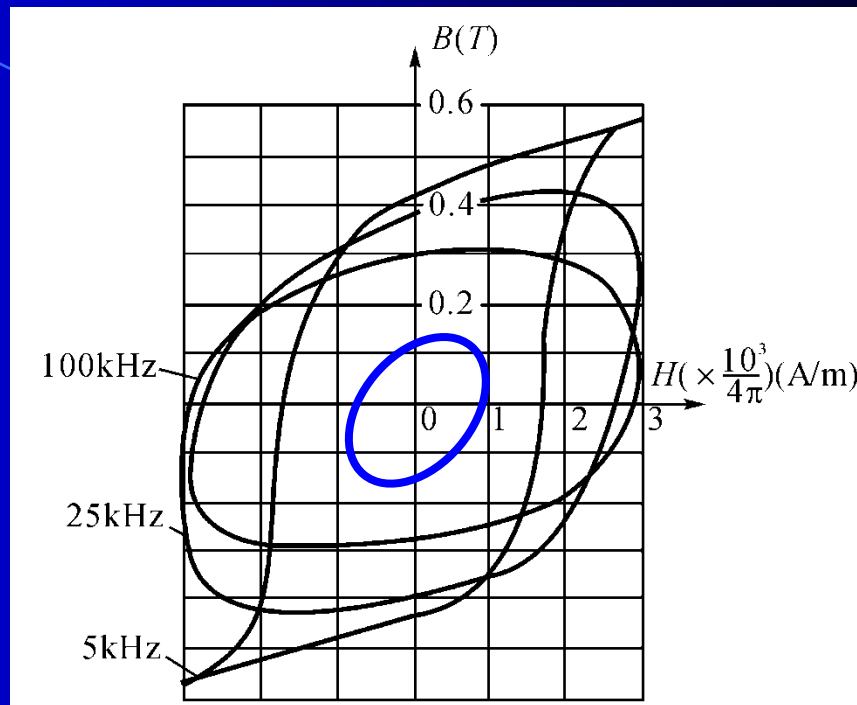


磁化的弛豫

动态磁滞回线面积上升



能量损耗增加



- 磁滞现象 (复数磁导率)
- 涡流效应 (磁化强度产生感应电流, 形成涡流)
- 磁性后效 (磁滞和涡流造成 B 落后于 H)