

固体物理

# 固体的磁特性和超导体

冯 雪

[x-feng@tsinghua.edu.cn](mailto:x-feng@tsinghua.edu.cn)

罗姆楼2-101B

# 固体的磁性和超导体

- 固体的磁性

- 原子的磁性与物质的磁化

- 磁性的类别

课程要求的部分

- 自旋电子学和核磁共振

- 超导体

黄昆 书P378

第8章

韦丹 书P207

第7章

黄昆书P463

第10章

韦丹书P189

第6章 § 6.3

# 固体的磁性

- 磁性是物质的基本属性
- 物质放在不均匀的磁场中会受到磁力的作用。
- 磁性是一种极为普遍的现象，小至原子、原子核和电子，直至更深的物质层次，大至地球、月亮和太阳等天体，都具有磁性。



固体磁性涉及十分广泛的领域，  
磁性材料有着广泛的应用

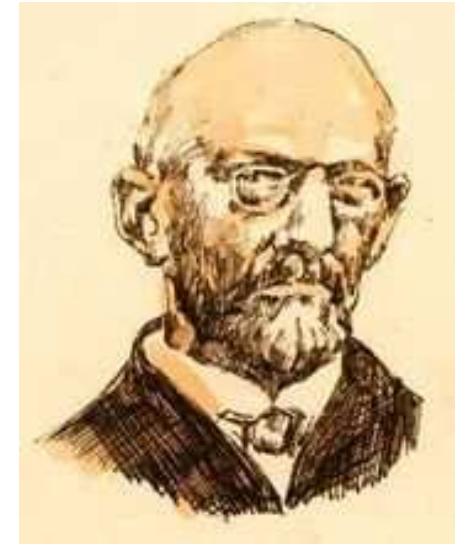
# 人类认识电与磁的历史

- 大约在公元前7-6世纪发现了磁石吸铁、磁石指南等现象。
- 《管子》中最早记载了这些发现：“山上有磁石者，其下有金铜。”其他古籍如《山海经》中也有类似的记载。
- 我国战国时期就出现了利用自然磁石制作的“司南之勺”。
- 磁石的吸铁特性很早就被人发现，《吕氏春秋》九卷精通篇就有：“慈招铁，或引之也。”那时的人称“磁”为“慈”，他们把磁石吸引铁看作慈母对子女的吸引。
- 东晋的崔豹在《古今注》中曾提到“指南鱼”。



# 人类认识电与磁的历史

- 1600年英国人吉尔伯特发表了《论磁》(*De Magnete*)——标志着人类对电磁现象的系统研究的开始。书中总结了前人对磁的研究，周密地讨论了地磁的性质，记载了大量实验，使磁学变成了科学
- 他第一个称电吸引的原因为电力，根据希腊文琥珀(*ηλεκτρον*)引入“电的”(electric)一词
- 磁和电都有吸引的性质，但是并不相同。
- 静磁的研究相对容易——因为存在天然磁石。
- 而静电的研究要困难得多——没有找到一种产生静电的方式



吉尔伯特  
(1544~1603)

# 固体磁性的研究历史

指南针 司马迁《史记》描述黄帝作战用  
1086年 宋朝沈括《梦溪笔谈》指南针的制造方法等  
1119年 宋朝朱或《萍洲可谈》磁石罗盘 用于航海的记载  
最早的著作《De Magnete》 W.Gibert  
18世纪 奥斯特 电流产生磁场  
19世纪 法拉弟效应 在磁场中运动导体产生电流  
安培定律  
电磁学基础  
电动机、发电机等开创现代电气工业

1902年诺贝尔物理学奖

1895年 居里(Pierre Curie)——居里夫人

1896年 塞曼(Pieter Zeeman) 发现了光谱在磁场中的分裂现象

1905年 朗之万(Paul Langevin) 发展了顺磁性和抗磁性理论

# 固体磁性的研究历史

## 20世纪后

- 1907年 P.Weiss的磁畴和分子场理论 **海森堡 1932年诺贝尔物理学奖**
- 1919年 巴克豪森效应
- 1928年 海森堡模型，用量子力学解释分子场起源
- 1931年 Bitter在显微镜下直接观察到磁畴
- 1933年 加藤与武井发现含Co的永磁铁氧体
- 1935年 荷兰Snoek发明软磁铁氧体
- 1935年 Landau和Lifshitz考虑退磁场，理论上预言了磁畴结构
- 1946年 Bloembergen发现NMR **1970年诺贝尔物理学奖**
- 1948年 Neel建立亚铁磁理论
- 1957年 RKKY相互作用的建立
- 1958年 Mössbauer效应的发现
- 1965年 Mader和Nowick制备了CoP铁磁非晶态合金
- 1970年 SmCo<sub>5</sub>稀土永磁材料的发现
- 1984年 NdFeB稀土永磁材料的发现 Sagawa(佐川)
- 1986年 高温超导体，Bednorz-muller
- 1988年 巨磁电阻GMR的发现, M.N.Baibich
- 1994年 CMR庞磁电阻的发现, Jin等LaCaMnO<sub>3</sub>
- 1995年 隧道磁电阻TMR的发现,T.Miyazaki

# 固体磁性的研究历史

## 20世纪后

- 1907年 P.Weiss的磁畴和分子场假说
- 1919年 巴克豪森效应
- 1928年 海森堡模型, 用量子力学解释分子场起源
- 1931年 Bitter在显微镜下直接观察到磁畴
- 1933年 加藤与武井发现含Co的永磁铁氧体
- 1935年 荷兰Snoek发明软磁铁氧体
- 1935年 Landau和Lifshitz考虑退磁场, 理论上预言了磁畴结构
- 1946年 Bloembergen发现NMR效应
- 1948年 Neel建立亚铁磁理论

发现原子自旋量子数就是普朗克常数的斯特恩  
(Otto Stern) 获1945年诺贝尔物理学奖

发现核磁共振方法的布洛赫(Felix Bloch)和普赛尔  
(Edward M. Purcell) 获1952年诺贝尔物理学奖

磁学的重要分支——自旋电子学

1995年 隧道磁电阻TMR的发现, T.Miyazaki



# 磁场强度H-磁感应强度B

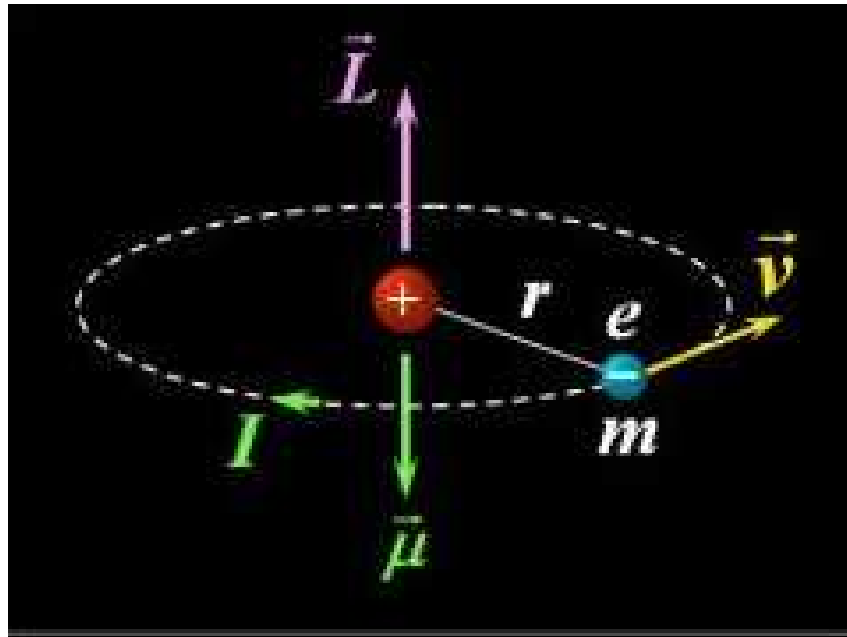
- 表征磁场强度的物理量
- 磁感应强度 $B$ :
  - 磁感应强度也被称为磁通量密度或磁通密度。
  - 是一个表示贯穿一个标准面积的磁通量的物理量。
- 磁场强度 $H$ :
  - 定义:  $H=B/\mu_0-M$ ,  $M$ : 磁化强度
- 磁场的单位: 特斯拉
  - 为了纪念(N.Tesla)(1886~1943)克罗地亚裔美国电机工程师, 曾发明变压器和交流电动机

# 磁性的量子力学根源

- 磁性的量子力学理论始于玻尔模型中的基本磁子
- 1821~1822年：安培提出了“分子电流”的观点：每个物质微粒都成为微小的磁体，它的两侧相当于两个磁极
- 1905年：朗之万指出环形电流在外加磁场中会是抗磁性或无磁性，因此铁磁性的永磁子不可能是分子电流
- 1916年：索末菲通过引进角动量量子数 $l$ 将玻尔轨道修改为椭圆轨道，从而根据“分子电流”的思想计算出量子轨道的磁矩

# 电子的轨道磁矩

- 电子绕原子核作圆轨道运转和绕本身的自旋运动都会产生“电磁涡旋”而形成磁性



磁偶极矩——磁矩：

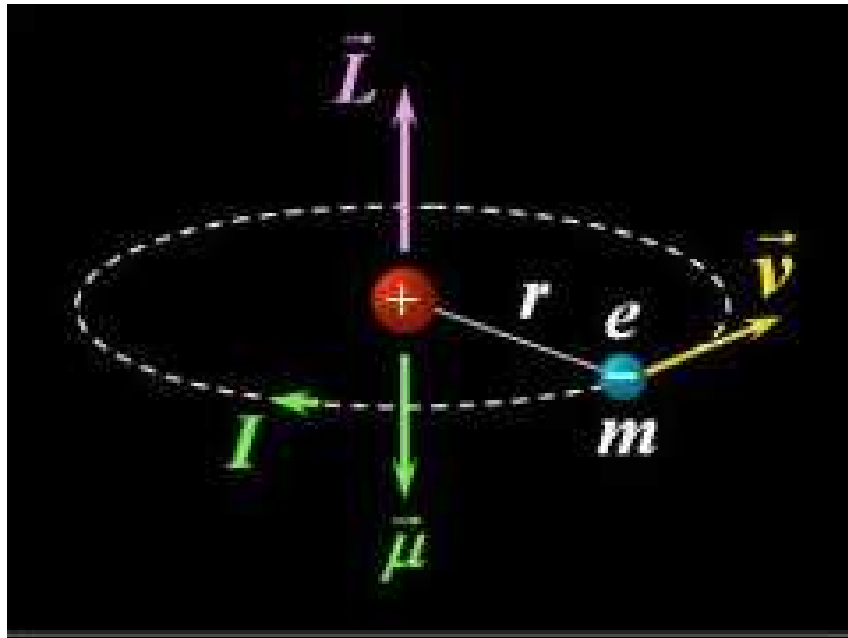
- 描述载流线圈或微观粒子磁性的物理量。平面载流线圈的磁矩定义为：

$$\vec{\mu} = I \cdot S \cdot \hat{n}$$

$I$ 为电流强度； $S$ 为线圈面积； $\hat{n}$ 为与电流方向成右手螺旋关系的单位矢量

# 电子的轨道磁矩

- 电子的轨道磁矩：电子轨道运动产生的磁矩 $\mu_L$



$T$ : 运动周期  
 $L$ : 轨道角动量

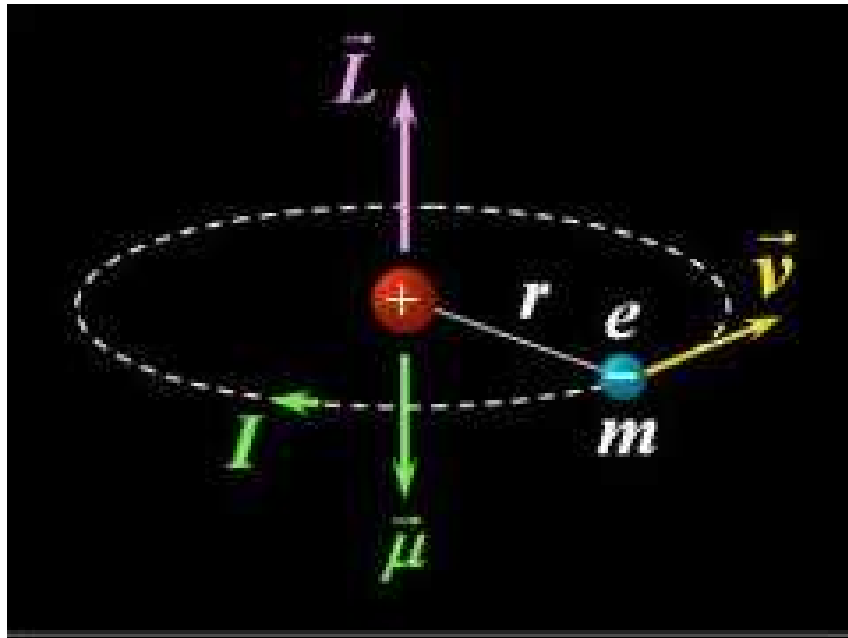
$$\vec{\mu} = I \cdot S \cdot \hat{n}$$

$I = -\frac{e}{T}$

$$S = \int_0^{2\pi} \frac{1}{2} r \cdot r d\varphi = \int_0^T \frac{1}{2} r^2 \frac{d\varphi}{dt} dt$$
$$= \int_0^T \frac{1}{2m} m r v dt = \int_0^T \frac{1}{2m} L dt = \frac{T}{2m} L$$

# 电子的轨道磁矩

- 电子的轨道磁矩：电子轨道运动产生的磁矩 $\mu_L$



$T$ : 运动周期

$L$ : 轨道角动量

$$\vec{\mu} = I \cdot S \cdot \hat{n}$$

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

$$L = l\hbar$$

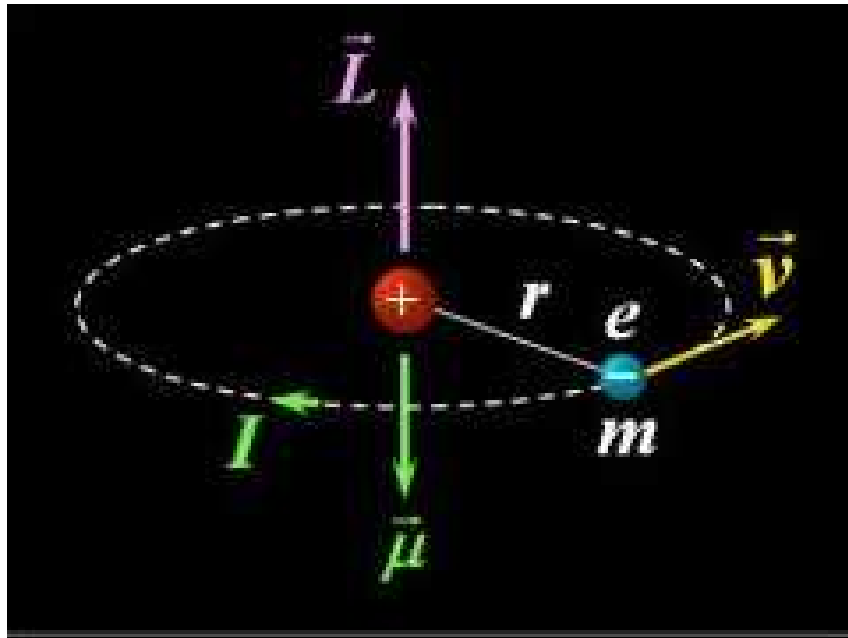
$$\mu_L = -\frac{e\hbar}{2m} l = -l\mu_B$$

波尔磁子

$$\mu_B = \frac{e\hbar}{2m}$$

# 电子的轨道磁矩

- 电子的轨道磁矩：电子轨道运动产生的磁矩 $\mu_L$



负号表明电子轨道磁矩的方向和轨道角动量的方向相反

$$\vec{\mu} = I \cdot S \cdot \hat{n}$$

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

$$\mu_L = -\frac{e\hbar}{2m} l = -l\mu_B$$

$$\mu_B = \frac{e\hbar}{2m}$$

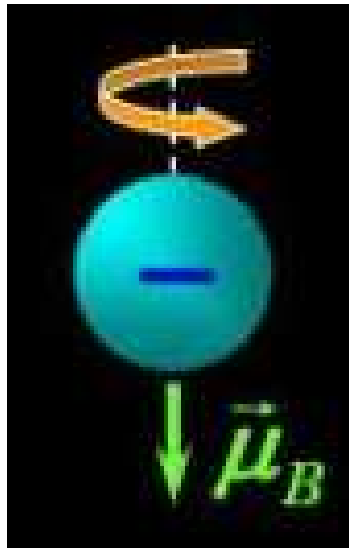
磁旋比

波尔磁子

# 电子的自旋磁矩

- 电子的自旋也会产生磁矩，旋磁比不同于轨道运动。电子的自旋量子数是1/2，自旋运动的磁旋比为：

$$\left(-\frac{e}{m}\right)$$



自旋磁矩：  $\vec{\mu}_S = -\frac{e}{m} \vec{S}$  ← 自旋角动量  $S = s\hbar$

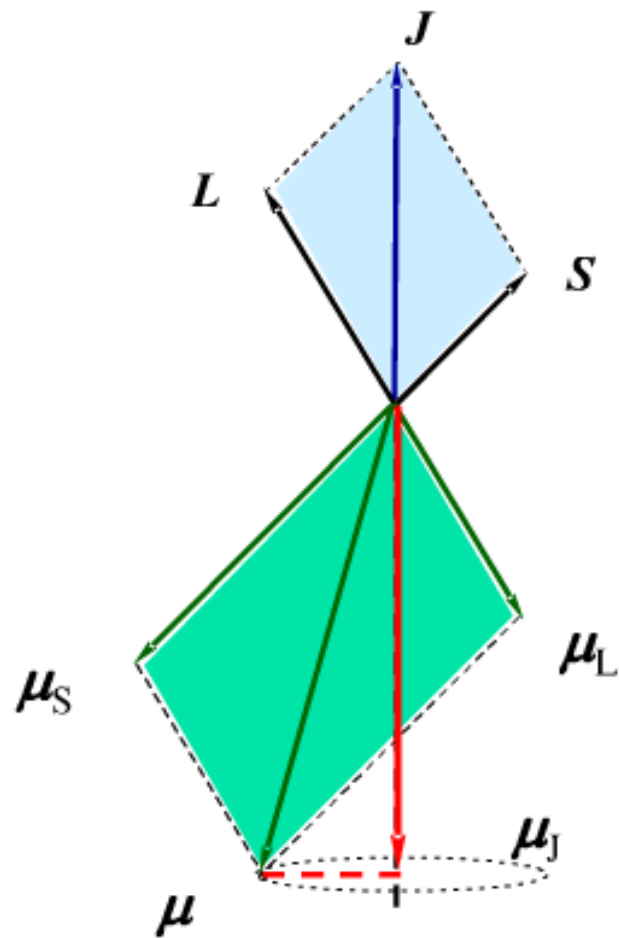
$$\mu_S = -2s\mu_B \leftarrow \mu_B = \frac{e\hbar}{2m}$$

波尔磁子

# 原子的总磁矩

- 实际原子的总角动量 $J$  由所有电子的轨道角动量和自旋角动量合成，即：

$$\vec{J} = \sum_i \vec{L}_i + \sum_i \vec{S}_i = \vec{L} + \vec{S}$$



原子的总磁矩：

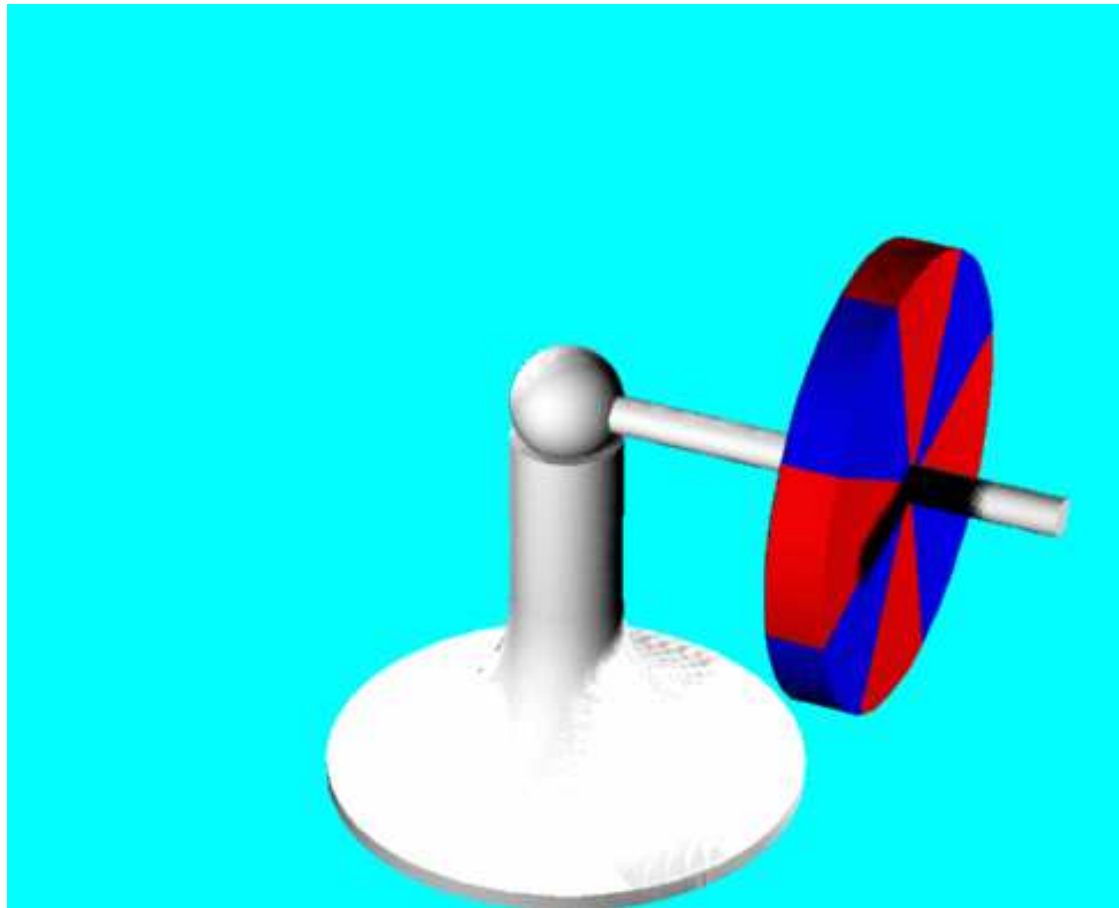
$$\vec{\mu} = \vec{\mu}_L + \vec{\mu}_S$$

由于电子的运动，原子在磁场中会产生 **进动（旋动）**

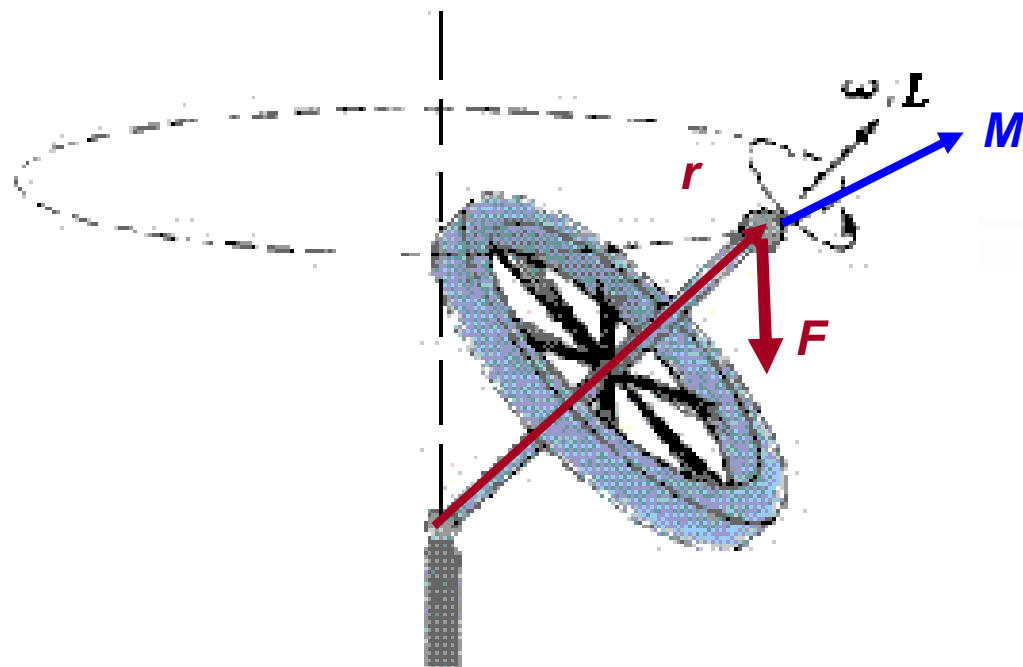


# 关于进动

Gyroscopic Precession——陀螺进动

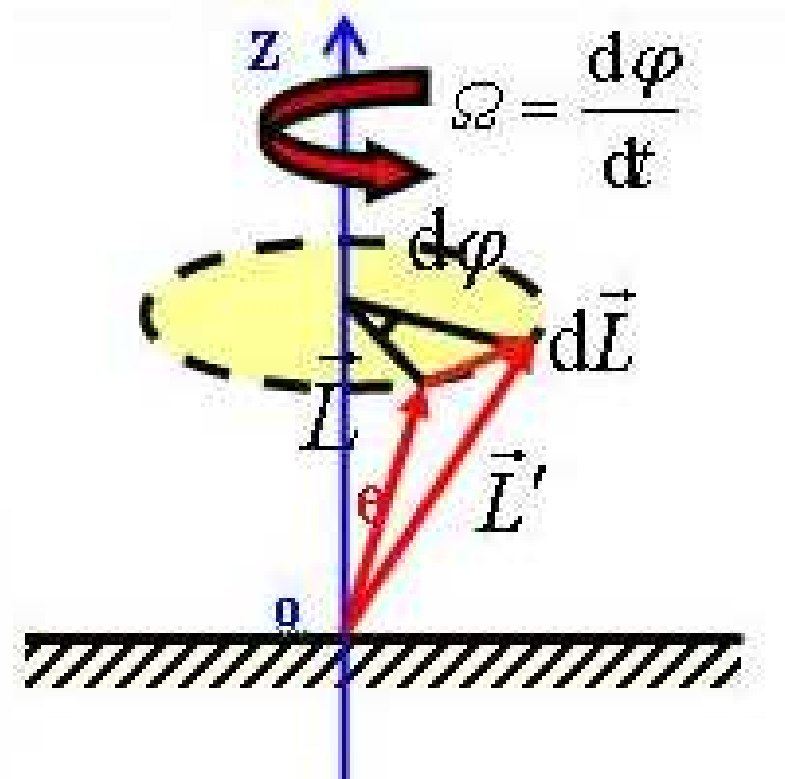


# 关于进动



外力矩:  $\vec{M} = \vec{r} \times \vec{F}$

角动量的变化:  $d\vec{L} = \vec{M}dt$

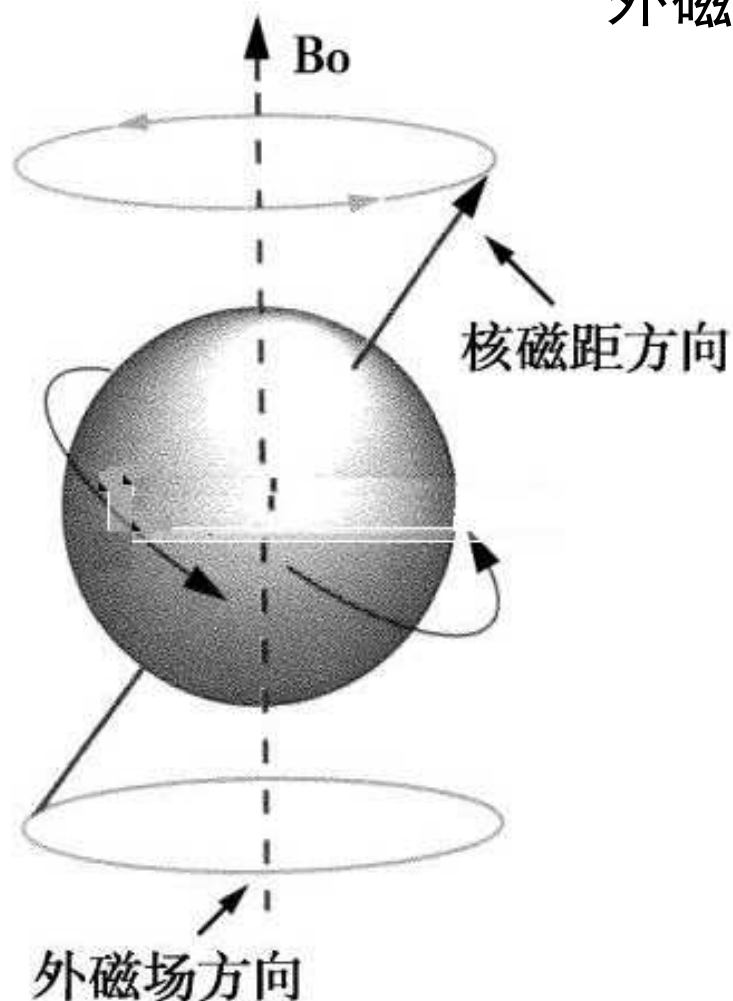


# 磁场对原子的作用

外磁场对磁矩产生力（洛伦兹力）矩：

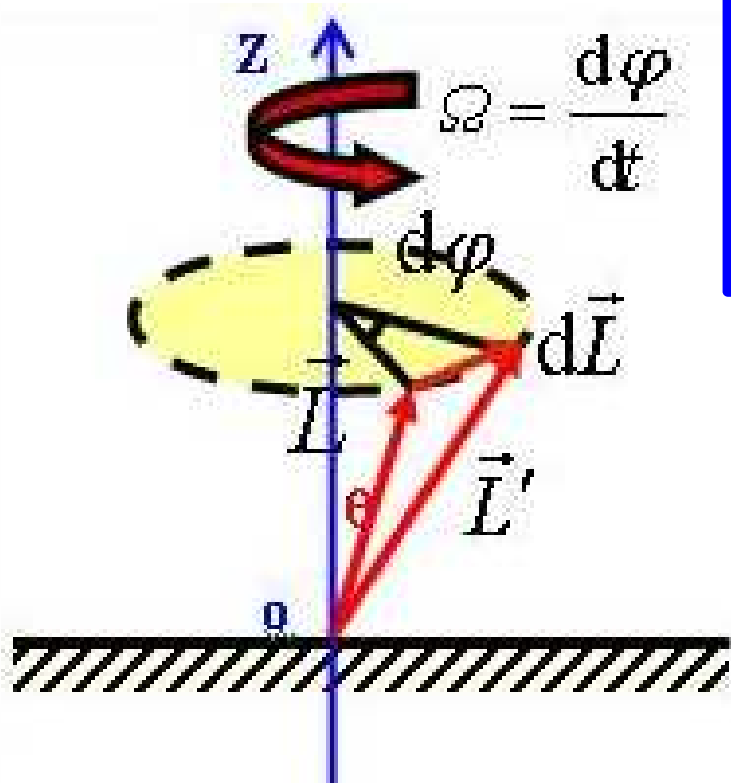
$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{\mu}_L \times \vec{B}_0$$

磁力矩使得角动量 $L$ 发生变化， $L$ 的末端产生一个角速度为 $\Omega$ 的圆周运动——拉莫进动



$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{\Omega} \times \vec{L}$$

# 磁场对原子的作用



注：此时仅考虑了轨道角动量，  
如果是自旋，磁旋比应为： $e/m$

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{\mu}_L \times \vec{B}_0 = \left(-\frac{e}{2m}\right) \vec{L} \times \vec{B}_0$$
$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{\Omega} \times \vec{L}$$

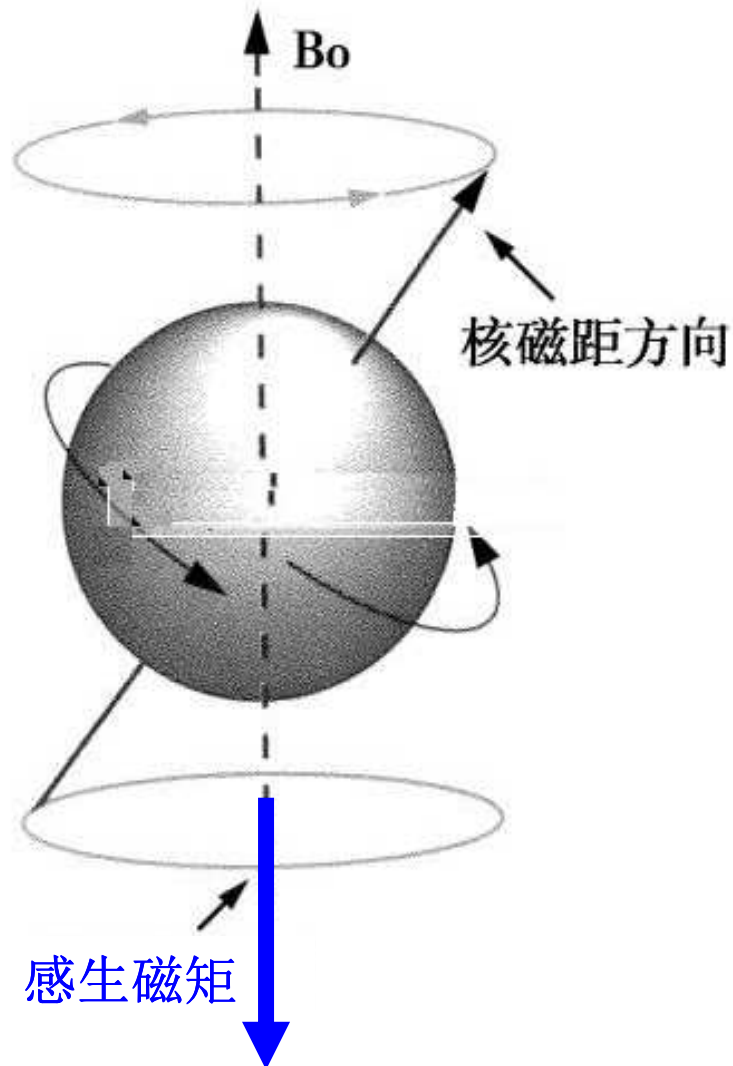


$$\vec{\Omega} = \frac{e\vec{B}_0}{2m}$$

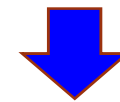
拉莫进动角速度

# 拉莫进动产生的感生磁矩

外磁场产生了拉莫进动



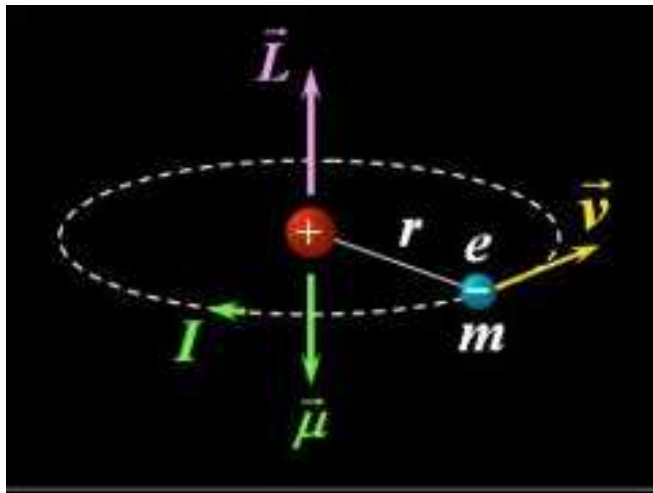
$$\vec{\Omega} = \frac{e\vec{B}_0}{2m}$$



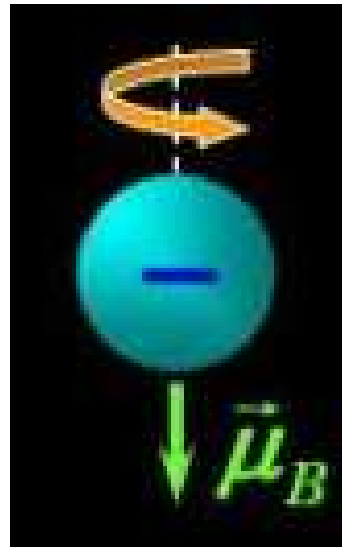
拉莫进动是在运动之上的附加运动 → 引起附加电流 → 产生相应的磁矩，方向和磁场方向相反

# 原子的磁矩

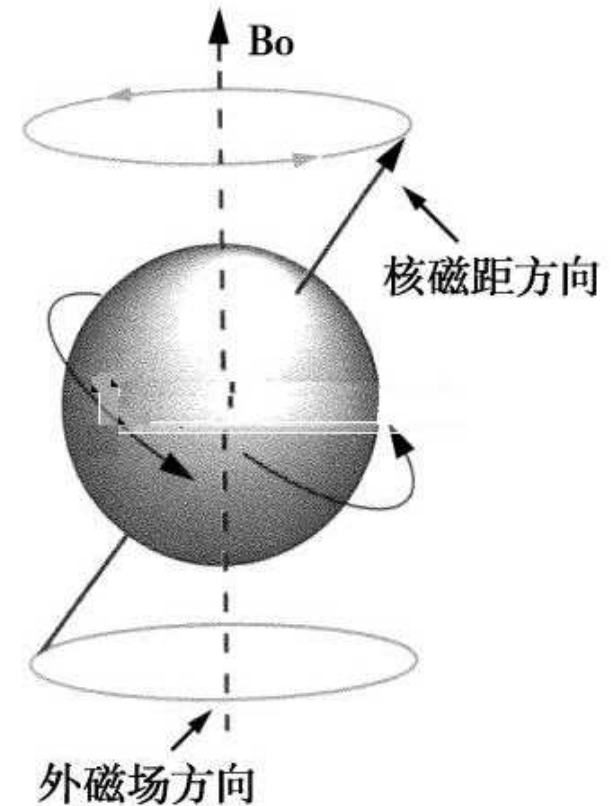
- 因为质子（中子）比电子重~1836倍，故原子核的磁矩仅可以忽略不计，原子磁矩主要来源有三个：



电子轨道磁矩



电子自旋磁矩

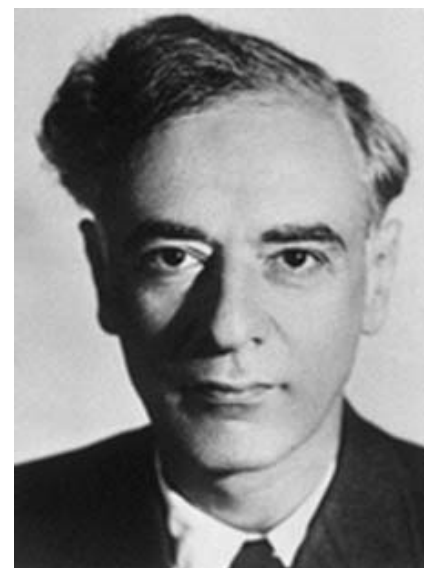


感生磁矩

# 固体的磁性

- 孤立原子的磁矩决定于原子的结构
- 对于固体，情况则要复杂得多
- 单原子近似——适用于绝缘体
- 自由电子近似——适用于解释金属
- 核心在于如何计算自由电子费米气体在磁场中的能量——朗道能级

“朗道十诫”：量子力学中的密度矩阵和统计物理学(1927)；自由电子抗磁性的理论(1930)；二级相变的研究(1936~1937)；铁磁性的磁畴理论和反铁磁性的理论解释(1935)；超导体的混合态理论(1934)；原子核的几率理论(1937)；氦II超流性的量子理论(1940~1941)；基本粒子的电荷约束理论(1954)；费米液体的量子理论(1956)；弱相互作用的CP不变性(1957)。因凝聚态特别是液氦的先驱性理论，被授予1962年诺贝尔物理学奖



**Lev Landau**  
(1908-1968)

# 固体的磁性和超导体

- 固体的磁性
  - 原子的磁性与物质的磁化
  - 磁性的类别
  - 自旋电子学和核磁共振
- 超导体

黄昆 书P378  
第8章  
黄昆 书P207  
第7章

黄昆书P463  
第10章  
韦丹书P189  
第6章 § 6.3



# 固体磁性的类别

- 抗磁性、顺磁性、铁磁性、反铁磁性和亚铁磁性
- 相关研究可以追溯到1778年布拉格曼对反铁磁性的研究以及1845年法拉第对磁性的分类
- 分类的依据：物质在外磁场中的磁化情况
  - 电子的轨道磁矩和自旋磁矩
  - 泡利不相容原理
  - 原子中大量电子的平均效应

# 磁化率与磁性的类别

磁化是指使原来不具有磁性的物质获得磁性的过程

固体的磁性是以磁化率来描述

磁化率定义:

$$\chi = \vec{M} / \vec{H}$$

$M$ : 磁化强度

感生的  $M$  又会产生磁感应强度 :

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

外磁场撤掉后物质的磁感应强度, 由  $M$  的状态决定

# 抗磁性

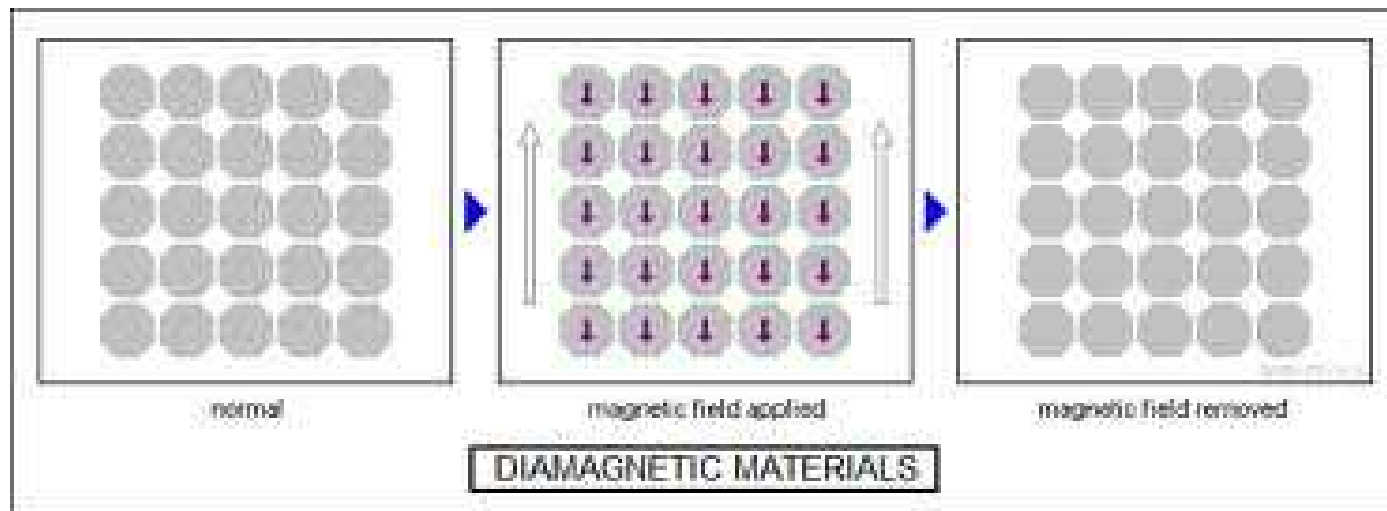
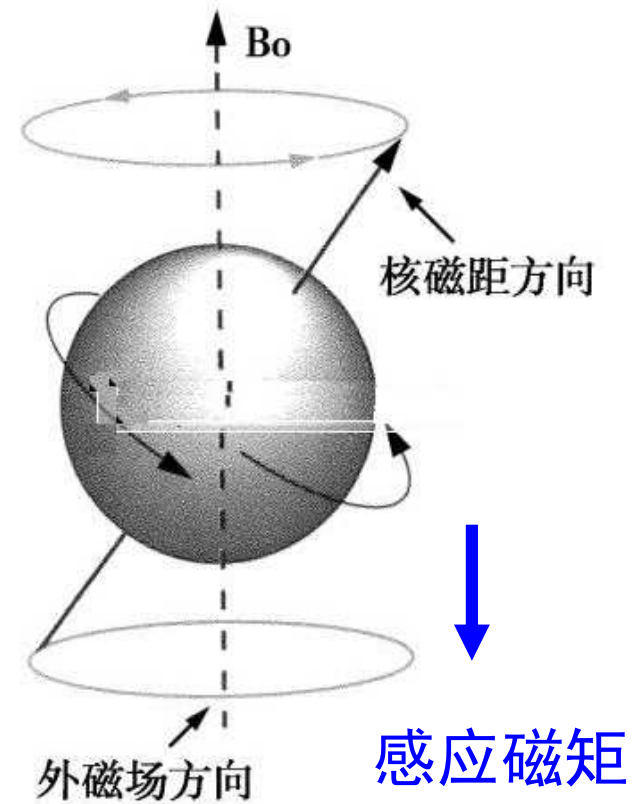
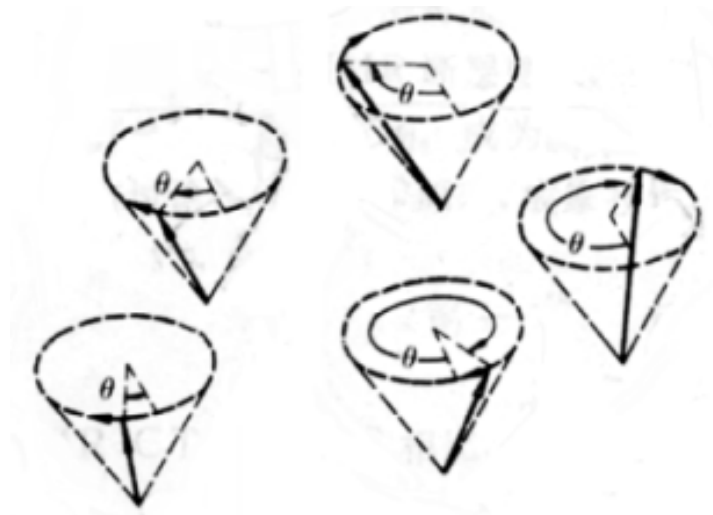
磁化率定义： $\chi = \vec{M} / \vec{H}$

磁化率为负的物质称为抗磁物质  
(外磁场使物体产生方向相反的磁化强度)

例如：Bi、Cu、Ag、Au

抗磁性物质的原子（离子）的磁矩为零，即不存在永久磁矩。  
当抗磁性物质放入外磁场中，外磁场使电子轨道改变，感生一个与外磁场方向相反的磁矩，表现为抗磁性。所以抗磁性来源于原子中电子轨道状态的变化。抗磁性物质的抗磁性一般很微弱，磁化率一般约为 $-10^{-5}$ ，为负值

# 物质的磁化



# 抗磁性

磁化率定义： $\chi = \vec{M} / \vec{H}$

磁化率为负的物质称为抗磁物质  
(外磁场使物体产生方向相反的磁化强度)

饱和电子结构中，抗磁性是重要的。饱和电子结构的电子层被填满，它们的各电子轨道角动量和自旋角动量互相抵消，显示不出固有磁矩，在外磁场中仅有感生磁矩产生，因而显示抗磁性

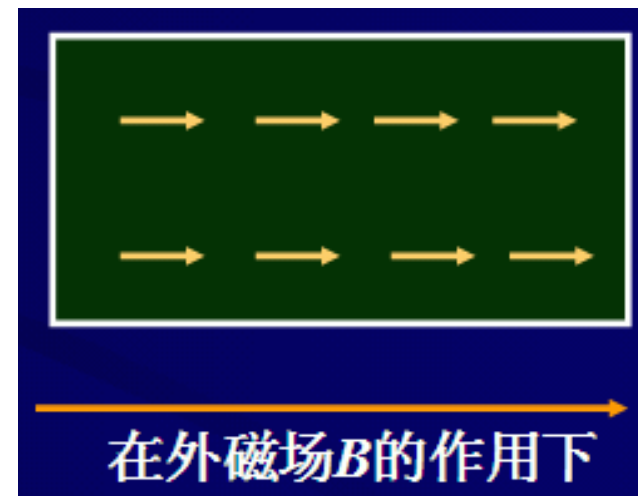
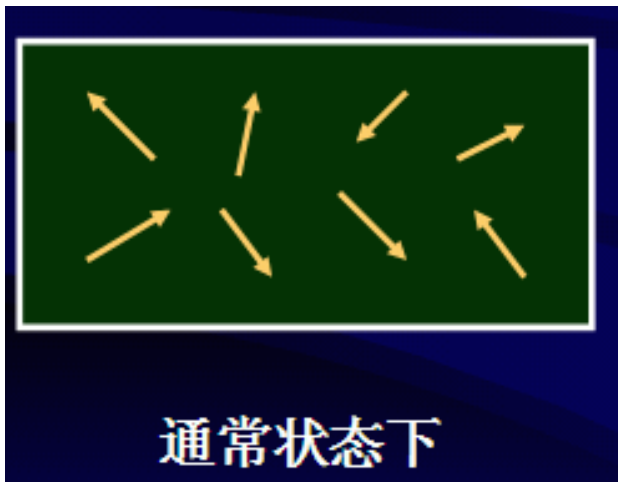
由于所有的物质都含有做轨道运动的电子，因而只要外加磁场存在，感生磁场就会存在，所以一切物质都含有抗磁性

未饱和的电子壳层结构也有抗磁性，但固有磁矩产生的顺磁性远大于抗磁性，从而使抗磁性显示不出来

# 顺磁性

磁化率定义： $\chi = \vec{M} / \vec{H}$

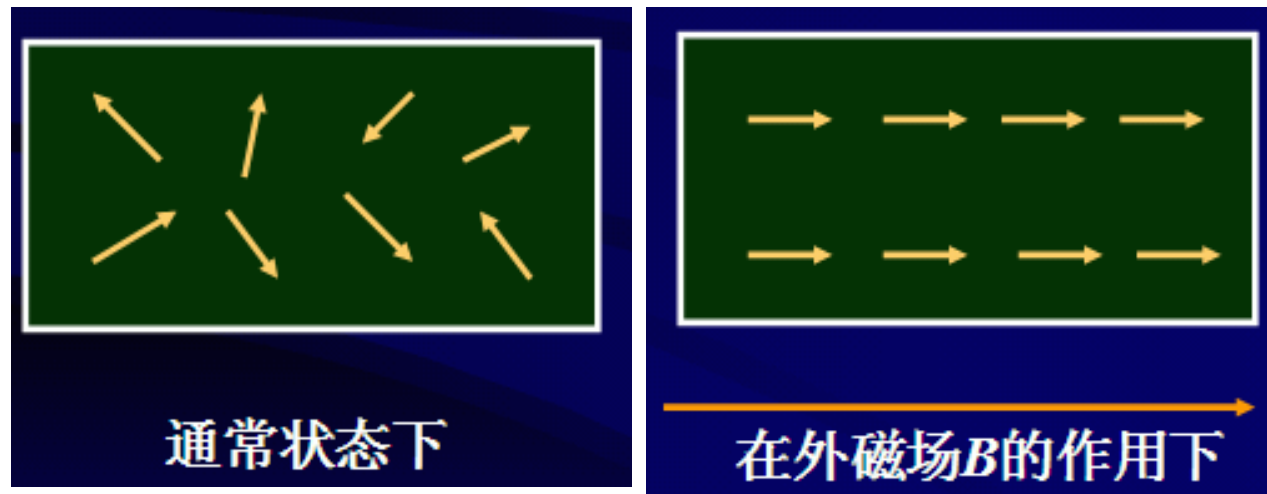
磁化率为正的物质称为顺磁物质  
(外磁场使物体产生与其方向一致的磁化强度)



# 顺磁性

- 电子轨道磁矩和自旋磁矩不能完全抵消而具有固有磁矩时，在外磁场中固有磁矩有平行于磁场方向排列的趋势，从而显示出顺磁性，所以顺磁性具有正磁化率

不论外加磁场是否存在，原子内部存在永久磁矩。但在无外加磁场时，由于顺磁物质的原子做无规则的热振动，宏观看来，没有磁性；在外加磁场作用下，每个原子磁矩比较规则地取向，物质显示极弱的磁性。磁化强度与外磁场方向一致



# 顺磁性

- 电子轨道磁矩和自旋磁矩不能完全抵消而具有固有磁矩时，在外磁场中固有磁矩有平行于磁场方向排列的趋势，从而显示出顺磁性，所以顺磁性具有正磁化率

居里定律： $\chi = C/T$

经验定律

居里-外斯定律： $\chi = C/(T - \Delta)$

不符合居里定律时的经验定律

随温度升高，磁化率减小。这是热运动影响磁矩按磁场方向排列的结果。假设原子间无相互作用，没有外磁场时，热运动使得原子的磁矩取向混乱，宏观上不显示磁性。但当有外磁场作用时，各原子磁矩趋向磁场方向排列的几率大些，使得磁矩在磁场方向的平均值不为零，显示出宏观磁性；由于温度升高，使磁矩按磁场方向排列的几率变小，导致磁化率减小



# 顺磁性

顺磁性物质的磁化率一般很小，室温下约为 $10^{-5}$ 。

一般含有奇数个电子的原子或分子，电子未填满壳层的原子或离子，如过渡元素、稀土元素、钢系元素，还有铝铂等金属

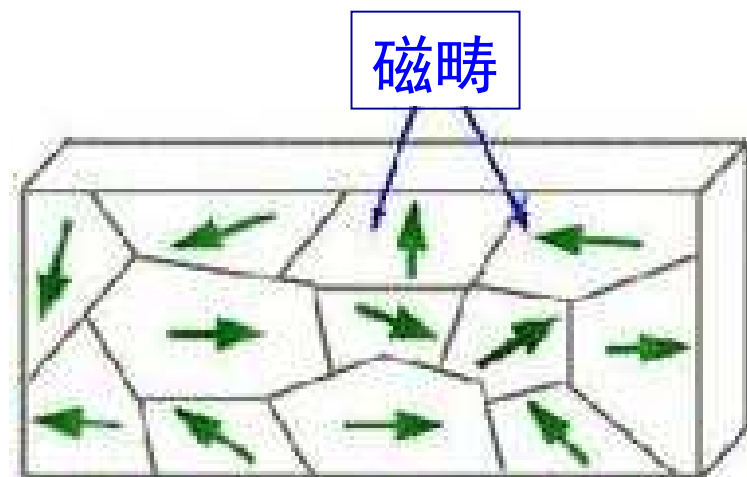
族 周期	I A	非金属 金属															0	
1	<sup>1</sup> H 氢	II A											III A	IV A	V A	VI A	VII A	<sup>2</sup> He 氦
2	<sup>3</sup> Li 锂	<sup>4</sup> Be 铍											<sup>5</sup> B 硼	<sup>6</sup> C 碳	<sup>7</sup> N 氮	<sup>8</sup> O 氧	<sup>9</sup> F 氟	<sup>10</sup> Ne 氖
3	<sup>11</sup> Na 钠	<sup>12</sup> Mg 镁	IIIB	IVB	V B	VIB	VII B	VIII			I B	II B	<sup>13</sup> Al 铝	<sup>14</sup> Si 硅	<sup>15</sup> P 磷	<sup>16</sup> S 硫	<sup>17</sup> Cl 氯	<sup>18</sup> Ar 氩
4	<sup>19</sup> K 钾	<sup>20</sup> Ca 钙	<sup>21</sup> Sc 钪	<sup>22</sup> Ti 钛	<sup>23</sup> V 钒	<sup>24</sup> Cr 铬	<sup>25</sup> Mn 锰	<sup>26</sup> Fe 铁	<sup>27</sup> Co 钴	<sup>28</sup> Ni 镍	<sup>29</sup> Cu 铜	<sup>30</sup> Zn 锌	<sup>31</sup> Ga 镓	<sup>32</sup> Ge 锗	<sup>33</sup> As 砷	<sup>34</sup> Se 硒	<sup>35</sup> Br 溴	<sup>36</sup> Kr 氪
5	<sup>37</sup> Rb 铷	<sup>38</sup> Sr 锶	<sup>39</sup> Y 钇	<sup>40</sup> Zr 锆	<sup>41</sup> Nb 铌	<sup>42</sup> Mo 钼	<sup>43</sup> Tc 锝	<sup>44</sup> Ru 钌	<sup>45</sup> Rh 铑	<sup>46</sup> Pd 钯	<sup>47</sup> Ag 银	<sup>48</sup> Cd 镉	<sup>49</sup> In 铟	<sup>50</sup> Sn 锡	<sup>51</sup> Sb 锑	<sup>52</sup> Te 碲	<sup>53</sup> I 碘	<sup>54</sup> Xe 氙
6	<sup>55</sup> Cs 铯	<sup>56</sup> Ba 钡	La~Lu 57~71 镧系	<sup>72</sup> Hf 铪	<sup>73</sup> Ta 钽	<sup>74</sup> W 钨	<sup>75</sup> Re 铼	<sup>76</sup> Os 锇	<sup>77</sup> Ir 铱	<sup>78</sup> Pt 铂	<sup>79</sup> Au 金	<sup>80</sup> Hg 汞	<sup>81</sup> Tl 铊	<sup>82</sup> Pb 铅	<sup>83</sup> Bi 铋	<sup>84</sup> Po 钋	<sup>85</sup> At 砹	<sup>86</sup> Rn 氡
7	<sup>87</sup> Fr 钫	<sup>88</sup> Ra 镭	Ac~Lr 89~103 锕系	<sup>104</sup> Rf 𨭇	<sup>105</sup> Db 𨨏	<sup>106</sup> Sg 𨭆	<sup>107</sup> Bh 𨭉	<sup>108</sup> Hs 𨭑	<sup>109</sup> Mt 𨭒	110	111	112						

# 铁磁性

- 铁磁现象很早就被发现，到20世纪才逐渐被理解，至今尚有未完全解释的问题。
- 对诸如Fe、Co、Ni等物质，在室温下磁化率可达 $10^{-3}$ 数量级，称这类物质的磁性为铁磁性。
- 铁磁性物质即使在较弱的磁场内，也可得到极高的磁化强度，当外磁场移去后，仍可保留极强的磁性，其磁化率为正值。
- 但当外场增大时，由于磁化强度迅速达到饱和，其磁化率变小

# 外斯理论

- 铁磁性理论，是以外斯提出的下面两个假设为核心：
  - (1) 一块具有宏观尺度的铁磁样品。一般说来包含了许多自发磁化了的小区域，叫做**磁畴**。每个磁畴大约有 $10^{15}$ 个原子。这些磁畴的磁化方向各不相同，互相抵消，因此，总的磁化强度为零。外场的作用是促使不同磁畴的磁化方向取得一致，从而使铁磁体表现出宏观磁化强度
  - (2) 在每一个**磁畴**里，存在一定的强相互作用，使元磁矩自发地平行排列起来，形成**自发磁化**。

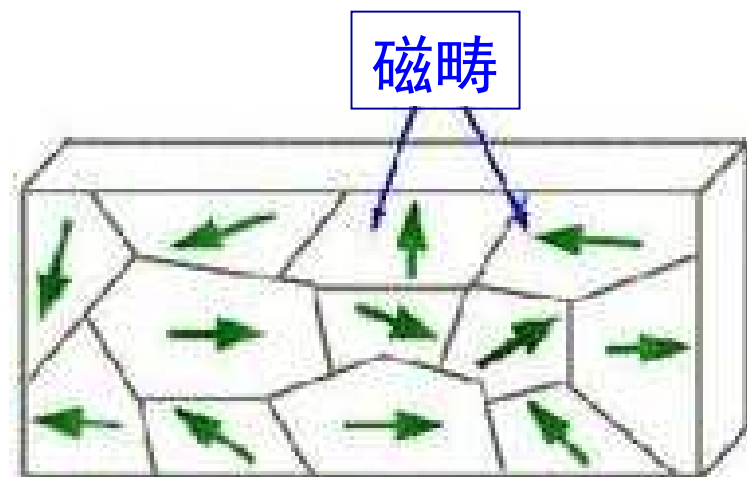
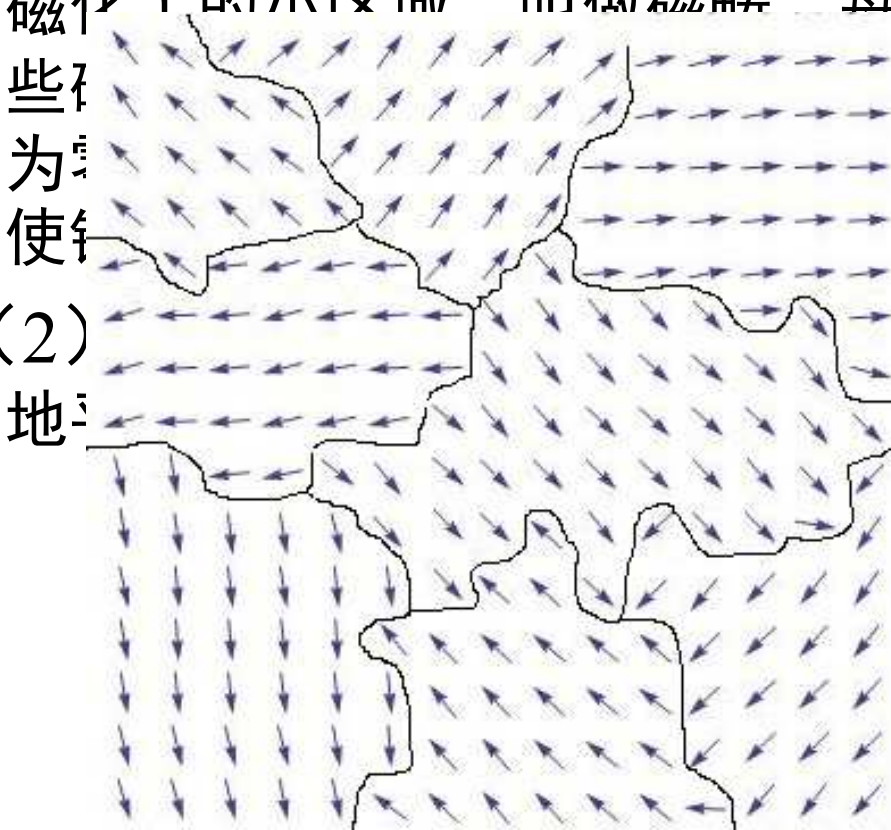


# 外斯理论

- 铁磁性理论，是以外斯提出的下面两个假设为核心：

(1) 一块具有宏观尺度的铁磁样品。一般说来包含了许多自发磁化了的微小区域，叫做磁畴。每个磁畴大约有 $10^{15}$ 个原子。这些磁畴的磁化方向各不相同，因此，总的磁化强度为零。

(2) 铁原子间的强相互作用，使元磁矩自发地排列成磁畴。



# 铁磁性

- 主要铁磁性物质：铁、钴、镍和以它们为基的合金
- 与顺磁性相比，铁磁性具有以下特征：
  - (1) 易磁化，而且是一种很强的磁性

例如，在 $(10/4\pi)$ 安/米的外加磁场下：

硅铁：0.1 特的磁化强度

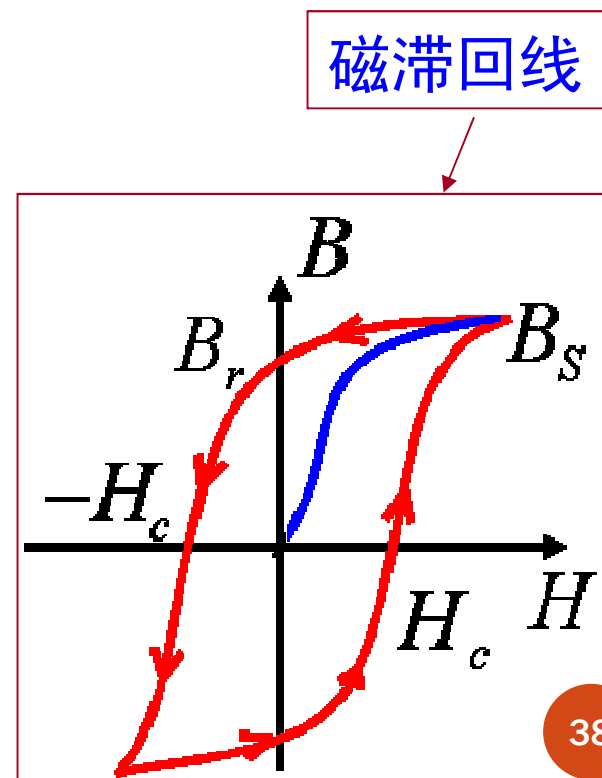
普通顺磁物质： $10^{-9}$ 特的磁化强度

# 铁磁性

- 主要铁磁性物质：铁、钴、镍和以它们为基的合金
- 与顺磁性相比，铁磁性具有以下特征：
  - (1) 易磁化，而且是一种很强的磁性
  - (2) 磁化过程显示磁滞现象

强磁物质在外磁场的作用下磁性状态改变时，物质的磁化强度的变化滞后于外磁场强度，这种现象称为**磁滞**

在原处于磁中性状态的强磁物质中施加外磁场，它就被磁化。随着外磁场强度 $H$ 的逐渐增大，物质中的磁化强度增大，当磁化强度增大到 $B_s$ 以后， $H$ 继续增加，磁化强度就不再增加了，这种状态称为**磁饱和**



# 铁磁性

- 主要铁磁性物质：铁、钴、镍和以它们为基的合金
- 与顺磁性相比，铁磁性具有以下特征：
  - (1) 易磁化，而且是一种很强的磁性
  - (2) 磁化过程显示磁滞现象

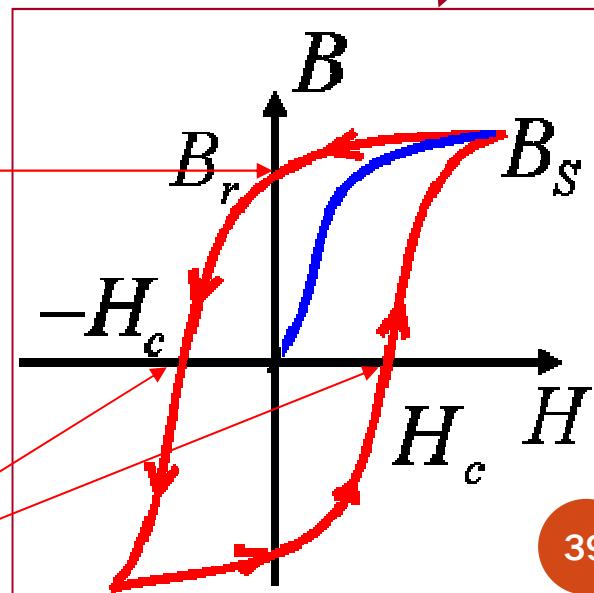
强磁物质在外磁场的作用下磁性状态改变时，物质的磁化强度的变化滞后于外磁场强度，这种现象称为**磁滞**

矫顽力是磁性材料经过磁化以后再经过退磁使具剩余磁性(剩余磁通密度或剩余磁化强度)降低到零的磁场强度

剩余磁化强度

矫顽力

磁滞回线



# 铁磁性

- 主要铁磁性物质：铁、钴、镍和以它们为基的合金
- 与顺磁性相比，铁磁性具有以下特征：
  - (1) 易磁化，而且是一种很强的磁性
  - (2) 磁化过程显示磁滞现象
  - (3) 高温顺磁性——存在一个铁磁转变温度（铁磁居里温度）

在铁磁居里温度以下具有铁磁性，在此温度以上，变为顺磁性，且服从居里-外斯定律：

$$\chi = \frac{C}{T - T_c} \leftarrow \text{铁磁居里温度}$$

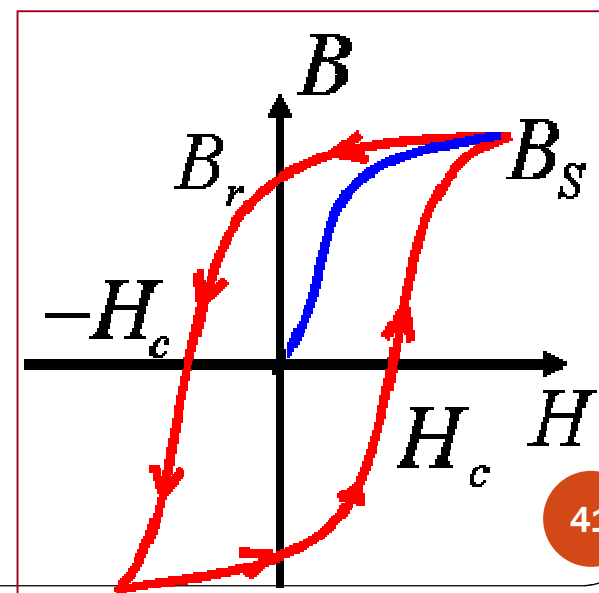


# 铁磁性

## 永（硬）磁材料、软磁材料

- 根据矫顽力(矫顽磁场)的高低，铁磁材料分为：  
永磁材料（又称硬磁材料）和软磁材料
- 这里的硬和软并不是指力学性能上的硬和软，而是指磁学性能上的硬和软。
- 硬磁性材料经过外加磁场磁化以后能长期保留其强磁性。
- 软磁材料则是加磁场既容易磁化，又容易退磁，即矫顽力很低的磁性材料。

**退磁**是指加磁场(称为磁化场)使磁性材料磁化以后，再加与磁化场方向相反的磁场使其磁性降低的磁场



# 铁磁性——磁记录材料

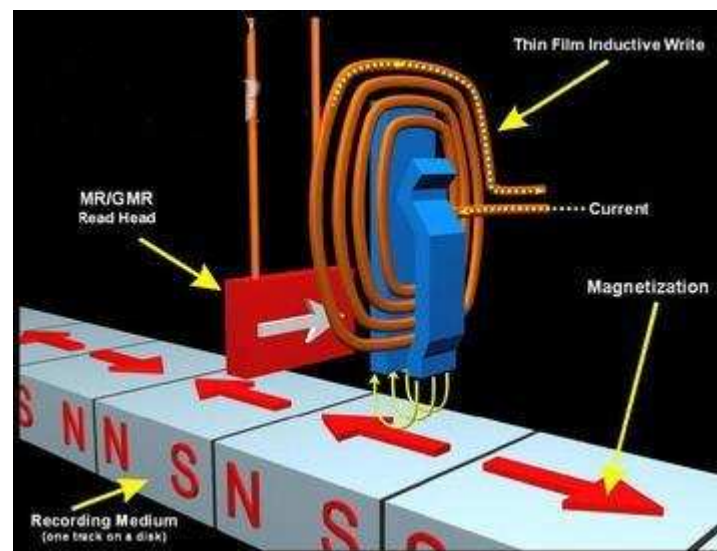
- 将各种信息转换为随时间变化的电信号，再将它转换为磁记录介质的磁化强度随空间变化的过程称为磁记录，将其逆过程称为再生（重现）过程
- 磁记录材料：一种涂敷在磁带、磁卡、磁盘和磁鼓上面用于记录和存储信息的永磁材料，它具有矫顽力和饱和磁感应强度大、热稳定性好等特点。常用的介质有氧化物和金属材料两种。金属磁记录介质材料有铁、钴、镍的合金粉末，用电镀化学和蒸发方法制成的钴-镍、钴-铬等磁性合金薄膜
- 有氧化物磁粉(主要有 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CrO}_2$ 和包钴磁粉)和合金磁粉



# 铁磁性——磁记录材料

- 将各种信息转换为随时间变化的电信号，再将它转换为磁记录介质的磁化强度随空间变化的过程称为磁记录，将其逆过程称为再生（重现）过程

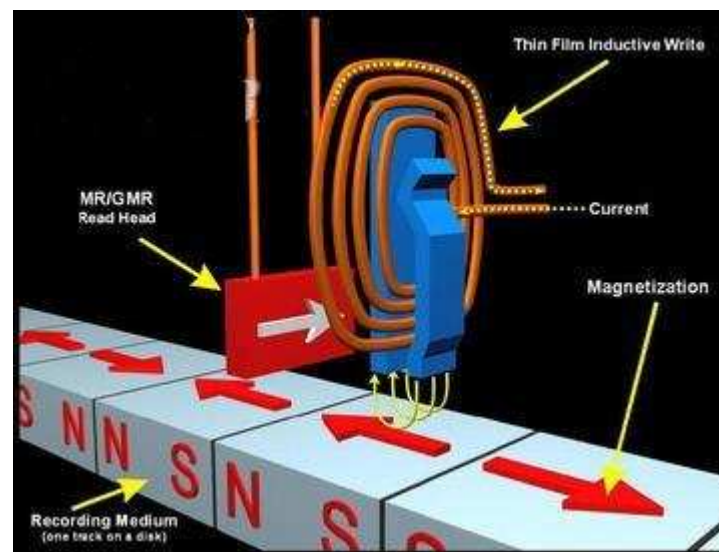
将输入的非电信息（声音、像点、数码等）转换为随时间作相应变化的电流，再通过记录磁头的线圈，使记录磁头的缝隙处产生与输入信息相应变化的磁场；于是紧靠磁头缝隙并以恒定速度运动的磁记录介质便受到缝隙磁场的作用，而产生相应的磁化强度，于是，将随时间变化的磁场转换为按空间变化的磁化强度分布从而完成了磁记录过程



# 铁磁性——磁记录材料

- 将各种信息转换为随时间变化的电信号，再将它转换为磁记录介质的磁化强度随空间变化的过程称为磁记录，将其逆过程称为再生（重现）过程

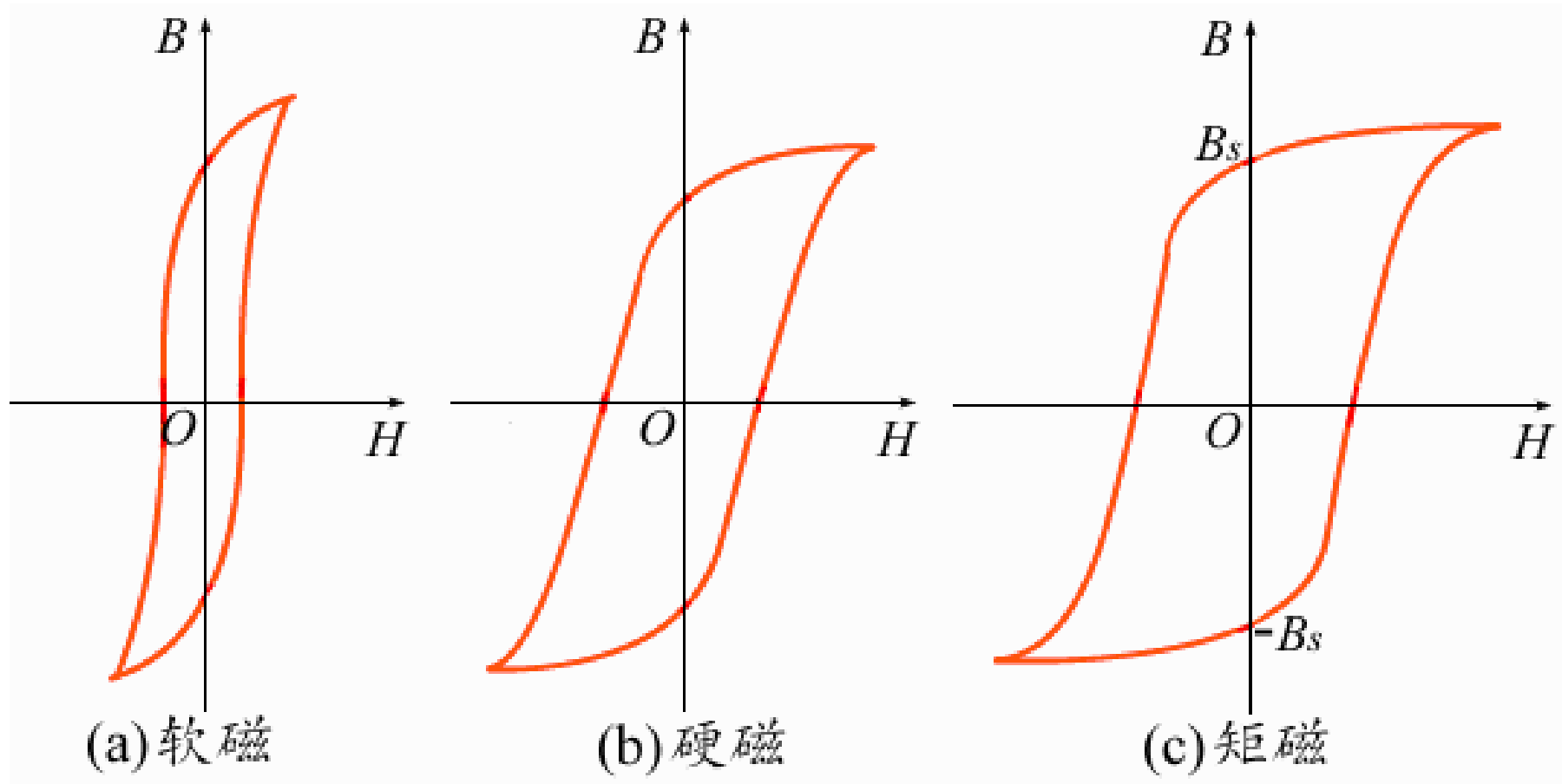
把记录和存储的信息取出（重现）时，则需经过与上述过程相反的过程，即将存储有信息的磁带以与记录时相同的速度通过重放磁头的缝隙，这时磁记录介质中的剩余磁化强度产生的外露磁场在重放磁头中感生相应的磁通量变化，而使绕在这磁头上的线圈中感生微弱的交变电压；再通过放大和电-非电转换装置，就可得到同输入信息相应的输出信息



# 铁氧体(Ferrite)

- 铁氧体是一种具有铁磁性的金属氧化物。铁氧体的电阻率比金属、合金磁性材料大得多，而且还有较高的介电性能。铁氧体的磁性能还表现在高频时具有较高的磁导率。因而，铁氧体已成为高频弱电领域用途广泛的非金属磁性材料
- 以三价铁离子作为主要正离子成分的若干种氧化物
  - 锌铬铁氧体、镍锌铁氧体、钡铁氧体、钢铁氧体.....
- 铁氧体**矩磁**材料:
- 这是指具有**矩形磁滞回线**的铁氧体材料。它的特点是，当有较小的外磁场作用时，就能使之磁化，并达到饱和，去掉外磁场后，磁性仍然保持与饱和时一样。如镁锰铁氧体、锂锰铁氧体等就是这样。这种铁氧体材料主要用于各种电子计算机的存储器磁芯等方面

# 铁磁材料的分类



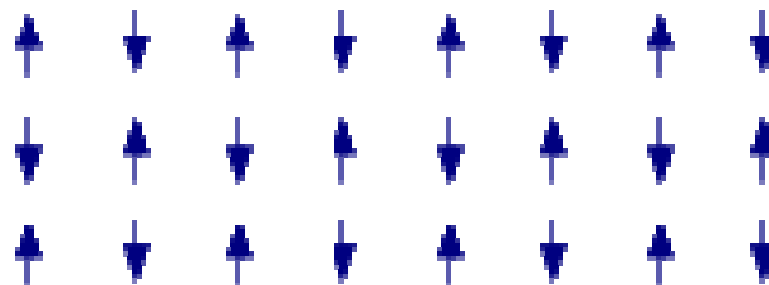
# 反铁磁性

- 在反铁磁性物质内部，相邻价电子的自旋趋于相反方向。
- 这种物质的净磁矩为零，不会产生磁场。
- 比较不常见，大多数反铁磁性物质只存在于低温状况。

反铁磁性物质中这种磁矩的有序排列只有在奈耳温度以下才能存在。

当温度高于奈耳温度时，物质从反铁磁性转变为顺磁性。

这时，磁化率随温度的变化服从居里-外斯定律，



反铁磁性的有序排列

# 反铁磁性

- 反铁磁性表现为顺磁性，但是不同于一般的顺磁性，
- 类似铁磁性一样，存在转变温度，称作奈尔温度  $T_N$   
 $T > T_N$  显示顺磁性，而且服从下述规律

$$\chi = \frac{C'}{T + T_N}$$

$T < T_N$  显示反铁磁性

假设外磁场垂直于自旋，则垂直磁化率近似为常数  $\chi_{\perp} \approx C / T_N$

假设外磁场平行于自旋，则在绝对温度0K时，平行磁化率为零；  
在从0K到奈耳温度之间，会从 0 平滑地单调递增至  $\chi_{\parallel} \approx C / T_N$

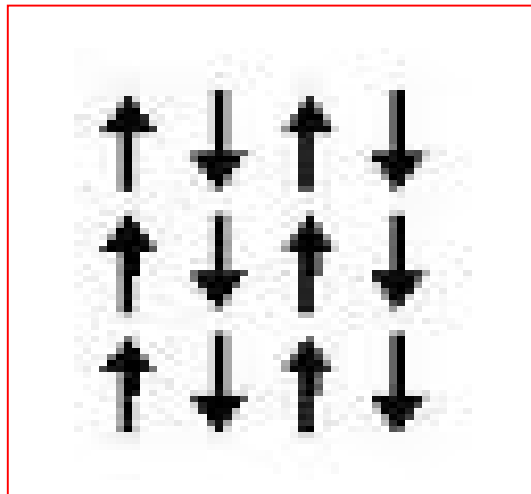
- 代表性的反铁磁材料：铬、FeMn等合金、NiO等氧化物....



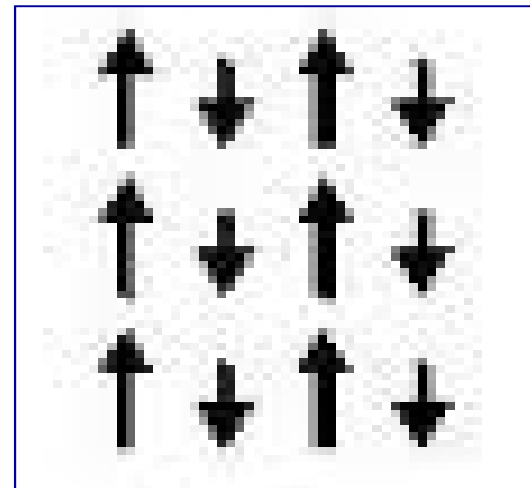
# 亚铁磁性

- 像铁磁性物质一样，当磁场不存在时，亚铁磁性物质仍旧会保持磁化不变；又像反铁磁性物质一样，相邻的电子自旋指向相反方向。
- 这两种性质并不互相矛盾，在亚铁磁性物质内部，分别属于不同次晶格的不同原子，其磁矩的方向相反，数值大小不相等，所以，物质的净磁矩不等于零，具有较微弱的铁磁性。

反铁磁体



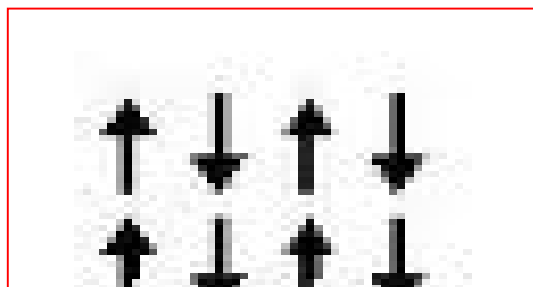
亚铁磁体



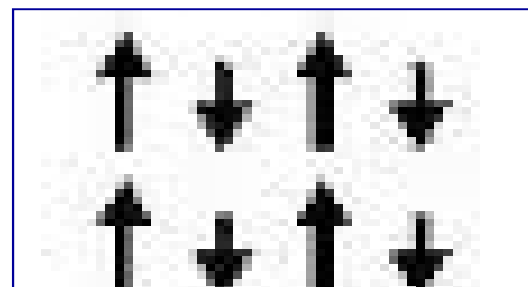
# 亚铁磁性

- 像铁磁性物质一样，当磁场不存在时，亚铁磁性物质仍旧会保持磁化不变；又像反铁磁性物质一样，相邻的电子自旋指向相反方向。
- 这两种性质并不互相矛盾，在亚铁磁性物质内部，分别属于不同次晶格的不同原子，其磁矩的方向相反，数值大小不相等，所以，物质的净磁矩不等于零，具有较微弱的铁磁性。

反铁磁体



亚铁磁体



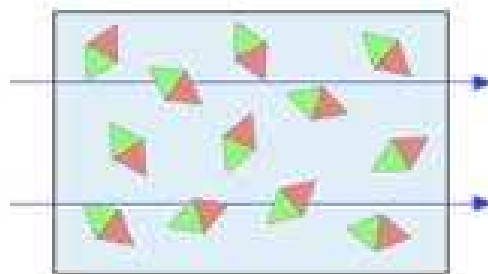
1970年，法国物理学家Louis Neel因对反铁磁和亚铁磁研究的贡献获得诺贝尔物理学奖

# 亚铁磁性

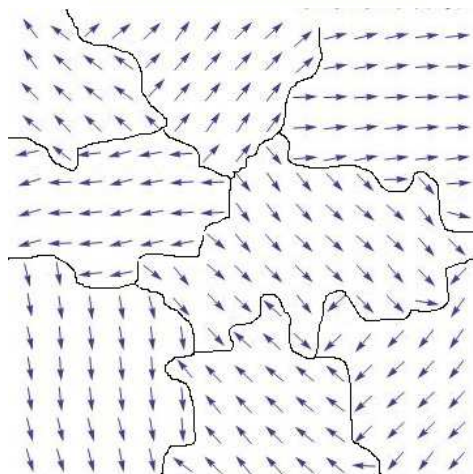
- 由于亚铁磁性物质是绝缘体。处于高频率时变磁场的亚铁磁性物质，由于感应出的涡电流很少，可允许微波穿过，从而可用于隔离器(isolator)、循环器(circulator)、回旋器(gyrator)等器件。
- 由于组成亚铁磁性物质的成分必须分别具有至少两种不同的磁矩，只有化合物或合金才会表现出亚铁磁性
- 温度高于某一数值 $T_c$ （居里温度）时，亚铁磁体变为顺磁体，铁氧体大都是亚铁磁体

# 固体的磁性

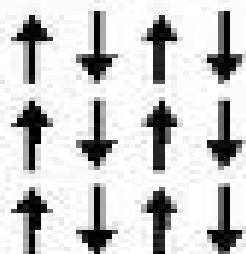
顺磁性



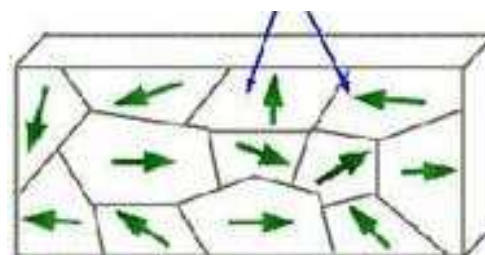
铁磁性



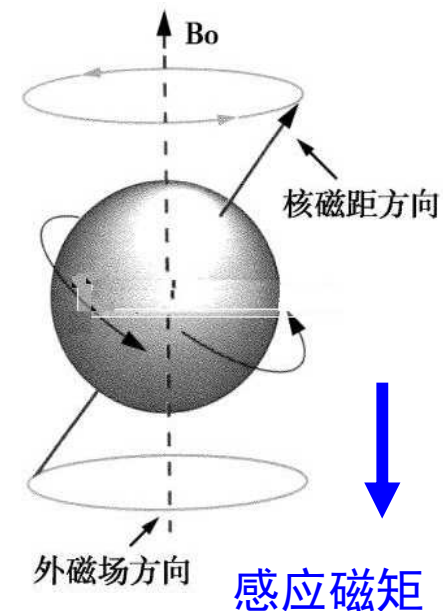
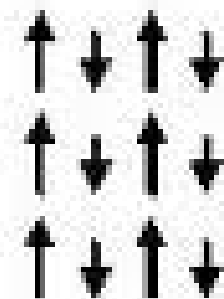
反铁磁性



抗磁性



亚铁磁性



永(硬)磁材料  
软磁材料

# 固体的磁性和超导体

- 固体的磁性

- 原子的磁性与物质的磁化

- 磁性的类别

- 自旋电子学和核磁共振

此部分不要求

黄昆 书P378

第8章

黄昆 书P207

第7章

- 超导体

黄昆书P463

第10章

韦丹书P189

第6章 § 6.3

# 自旋电子学

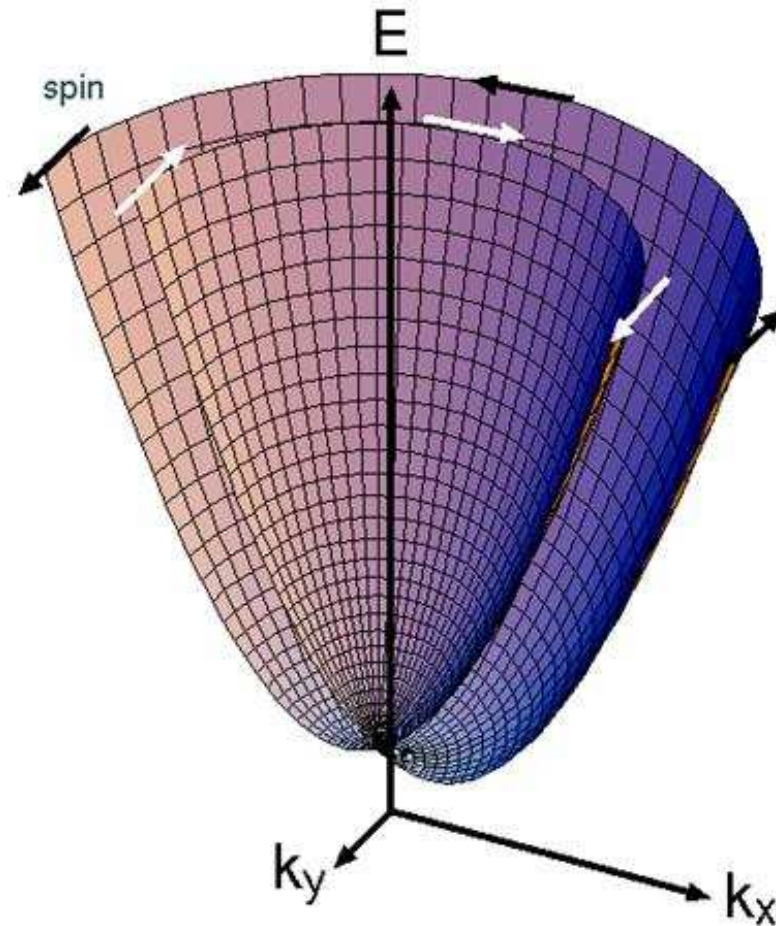
- 自旋电子学(Spintronics or spin electronics, 亦称磁电子学(Magneto-electronics))是一门结合磁学与微电子学的交叉学科。
- 以载流子输运特性为主要内容的微电子学是二十世纪人类最重要的发现之一。
- 电子既是电荷的负载体, 又是自旋的负载体。在传统的微电子学中, 电子的输运过程仅利用它的荷电性由电场来控制, 而它的自旋状态是不予考虑的。
- 随着纳米科学技术的发展, 科学家发现当半导体组件减小到纳米尺寸后, 许多宏观特性将丧失, 因此必须考虑电子的自旋特性。自旋电子学或磁电子学正是在这样的背景产生的

# 自旋电子学

- 对于普通金属和半导体，自旋向上和自旋向下的电子在能量状态上是一致的，这也是传统的金属电子学忽略电子的自旋自由度的原因所在。
- 铁磁金属中，电子的能带分为自旋向上和自旋向下两个子带。这两个子带的形状完全相同，只是由于铁磁金属中存在交换作用，从而使两个子带在能量上有一个位移。正是这种能量上的差别，使得电子在两个子带上的占据情况并不相同，在费米面处，自旋向上和自旋向下的电子态密度也是不同的。
- 这样在铁磁金属中，参与运输的两种自旋取向的电子在数量上是不等的。

# 自旋电子学

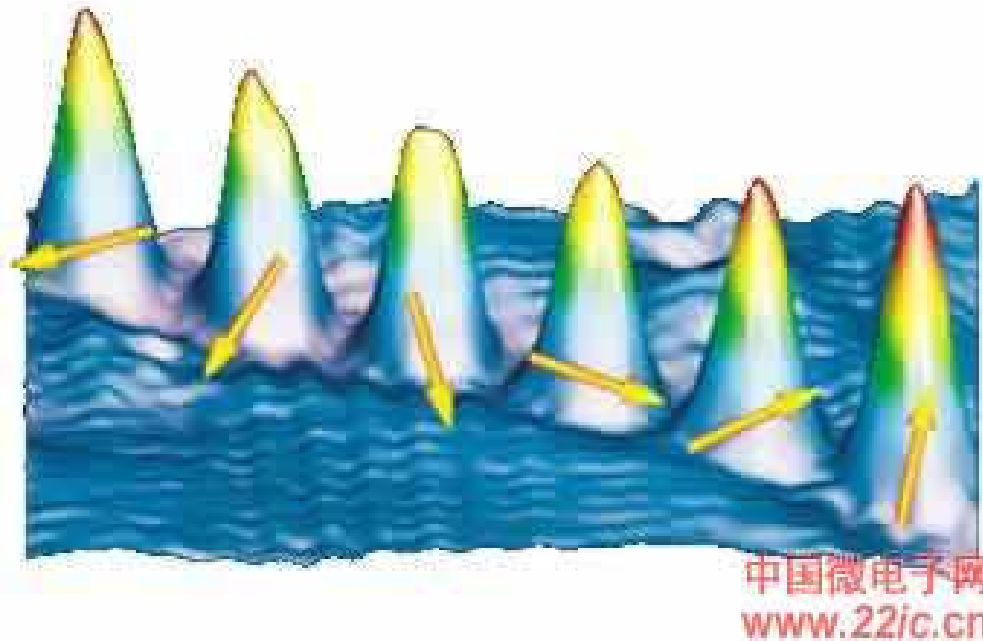
- 由于两个电子带在费米面处的电子态密度不同，不同自旋取向的电子在铁磁金属中受到的散射也是不同的。





# 自旋电子学

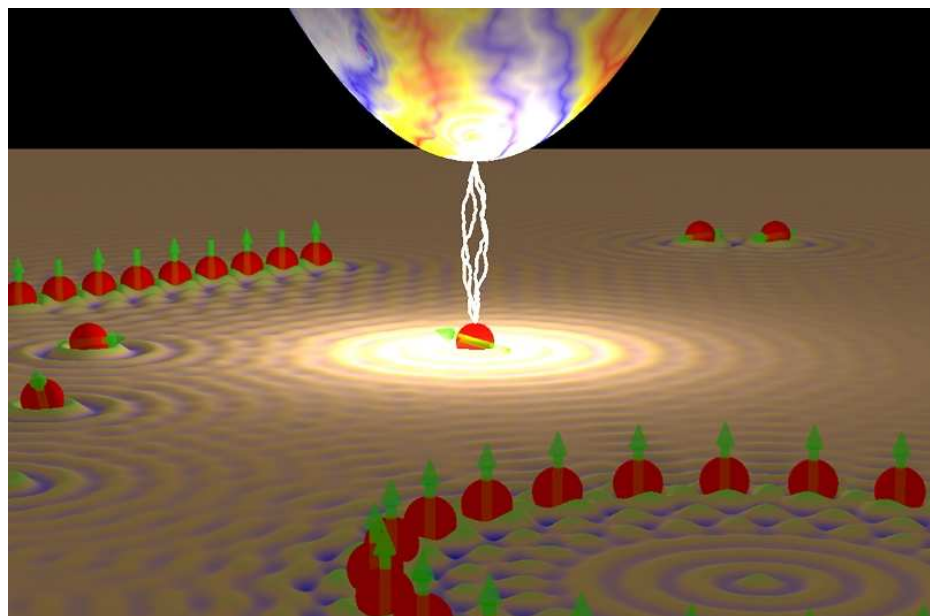
- 2010年04月28日，美国俄亥俄大学和德国汉堡大学的科学家们展示了他们首次获得的电子不同自旋状态下的单个钴原子图像



不同的电子自旋方向导致单个钴原子具有不同的形状

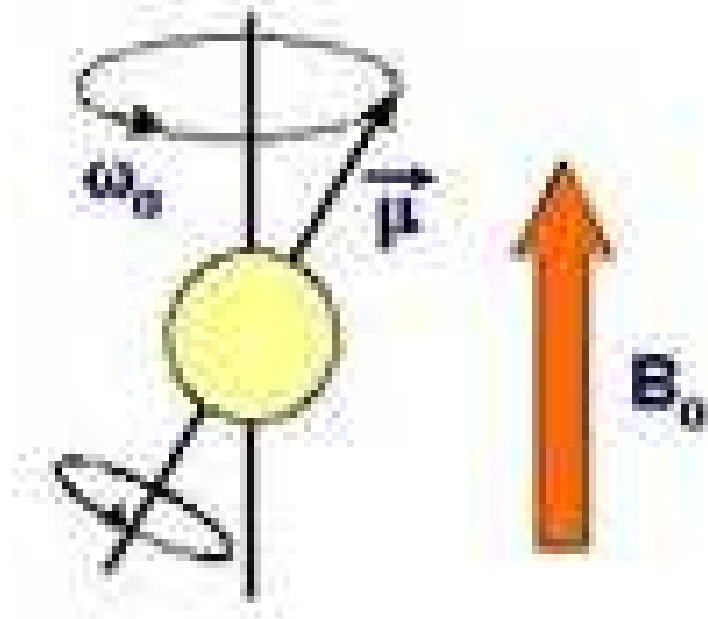
# 自旋电子学

- 自旋测控扫描探针显微镜（Spin-STM）的研制
- 随着磁纪录材料的不断微小化、以及自旋电子学的迅速发展，如何实现对纳米尺度磁结构乃至单原子、单电子的自旋量子态的测量、控制、及其相干性的调控成为人们关注的热点。期望能由此揭示自旋量子态的物理规律，探索自旋量子态的极限测量、自旋相干时间测控、及自旋量子纠缠态的构造，为基于自旋量子比特的量子计算和量子通讯研究提供物理基础



# 核磁共振

- (Nuclear Magnetic Resonance即NMR) 是处于静磁场中的原子核在另一交变电磁场作用下发生的物理现象。通常人们所说的核磁共振指的是利用核磁共振现象获取分子结构、人体内部结构信息的技术



原子核能产生核磁共振现象是因为具有核自旋。原子核自旋产生磁矩，当核磁矩处于静止外磁场中时产生进动核和能级分裂

在交变磁场作用下，自旋核会吸收特定频率的电磁波，从较低的能级跃迁到较高能级。这种过程就是核磁共振

# 核磁共振

- 核磁共振(MRI)又叫核磁共振成像技术。是继CT后医学影像学的又一重大进步。自80年代应用以来，它以极快的速度得到发展。其基本原理：是将人体置于特殊的磁场中，用无线电射频脉冲激发人体内氢原子核，引起氢原子核共振，并吸收能量

在停止射频脉冲后，氢原子核按特定频率发出射电信号，并将吸收的能量释放出来，被体外的接受器收录，经电子计算机处理获得图像，这就叫做核磁共振成像



核磁共振波谱仪



# 固体的磁性和超导体

- 固体的磁性
  - 原子的磁性与物质的磁化
  - 磁性的类别
  - 自旋电子学和核磁共振

- 超导体

此部分不要求，自学

黄昆 书P378  
第8章  
黄昆 书P207  
第7章

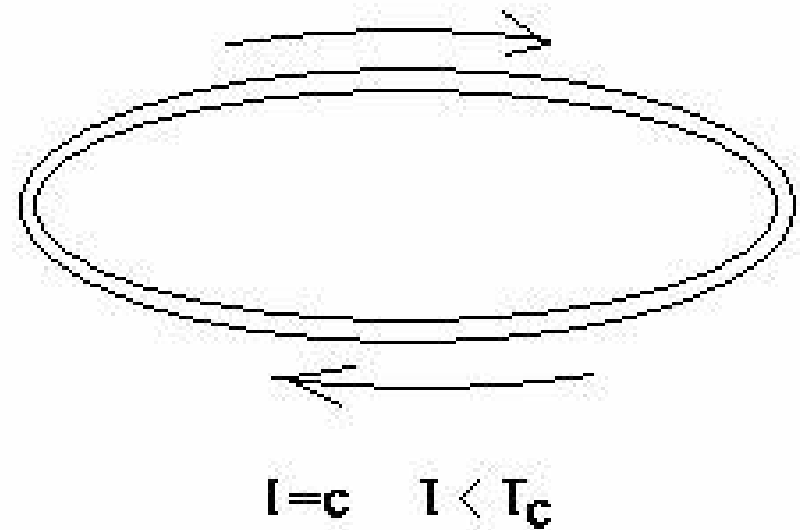
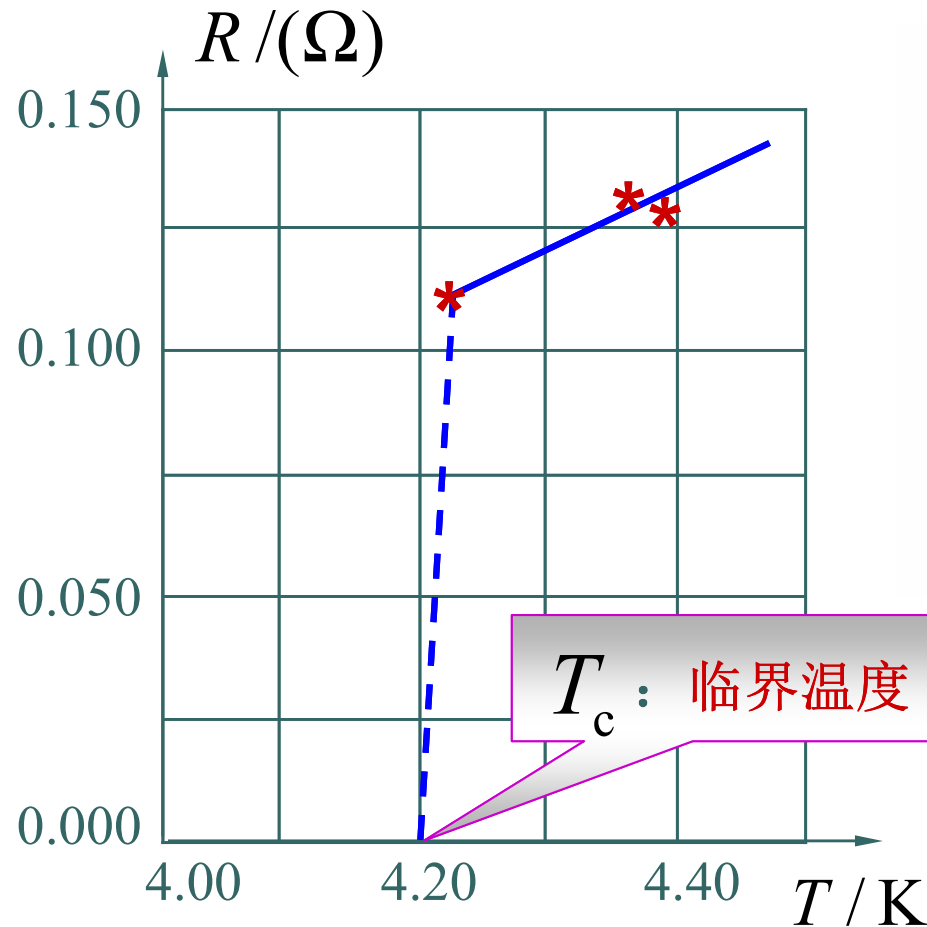
黄昆书P463  
第10章  
韦丹书P189  
第6章 § 6.3

# 超导体

- 超导体（Superconductor）就是对电流移动没有阻力的导体，是科学发现的最新前沿之一。这不仅是因为超导性的实际应用，而且来自于超导性的理论解释尚未完善，**仍然是活跃的研究领域**。
- 物质的电阻来自电子与晶格散射；在晶体中，来自杂质离子和晶格的散射总是存在的，因此根据一般的输运理论是无法理解超导性的出现的。

# 超导体

1911年荷兰莱顿大学的物理学家昂尼斯（H. K. Onnes）首先在Hg中发现了超导电现象: Hg的电阻在4.2K（液态氮）左右陡然下降



在几个小时之内，完全不能发现任何变化。温度提高到 $T_c$ 以上，电流立即消失

# 超导体的实验基础：低温物理

1908年，Onnes成功地液化了氦气



昂尼斯1913年因液氦的制备和对低温物理的贡献获得诺贝尔奖



上海济阳科技发展有限公司



# 超导电的基本现象之一

- 在低温下发生的零电阻现象，称为物质的超导电性，具有超导电性的材料称为超导体。电阻突然消失的温度叫做超导体的临界温度，用 $T_c$ 表示，是物质常数，同一材料在相同的条件下有确定的值。
- 当温度在 $T_c$ 以上时，超导体与正常的金属一样，具有有限的电阻值，这时超导体处于正常态，当温度在 $T_c$ 以下时，超导体进入零电阻状态——超导态
- 在常压下有超导转变的元素共计28种

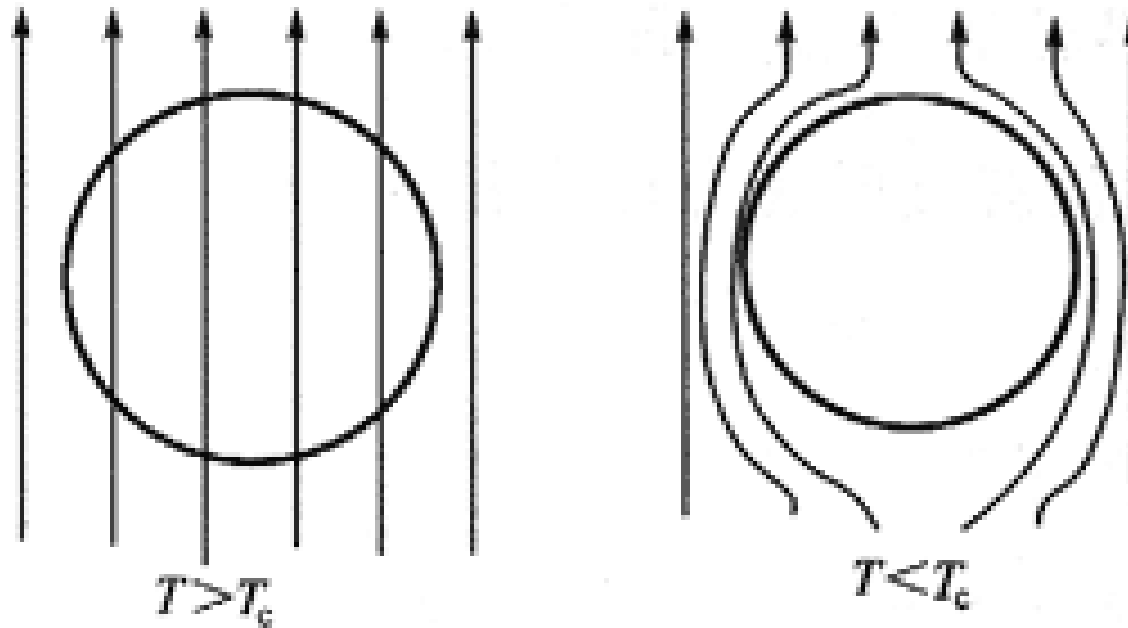
# 常压下有超导转变的元素

- 在常压下有超导转变的元素共计28种

# 超导电的基本现象之二

## • 迈斯纳效应

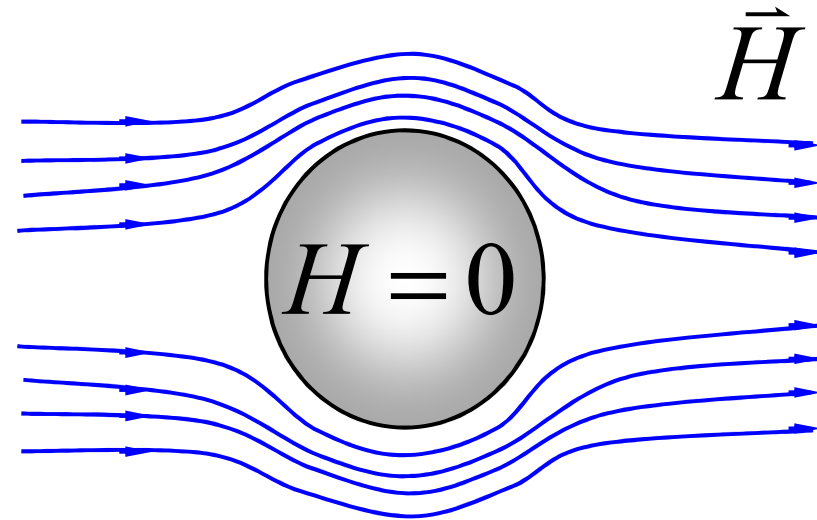
- 1933年德国物理学家迈斯纳（W.Meissner）和奥森菲尔德（R.Ochsebfekd）对锡单晶球超导体做磁场分布测量时发现，在小磁场中把金属冷却进入超导态时，体内的磁力线一下被排出，磁力线不能穿过它的体内，也就是说超导体处于超导态时，体内的磁场恒等于零



# 迈斯纳效应

当  $H_{\text{外}} < H_c$   $H_{\text{内}} = 0$

如果外磁场太大，超过了临界磁场 $H_c$ ，超导性会被破坏掉，电阻不再是零



磁力线完全被排斥在超导体外面

超导体上方的磁铁会感受到一个排斥力。如果这个排斥力足够强，超过了重力，这块磁铁竟然可以再超导体上悬浮起来！



# 超导理论的发展:唯象理论

- 唯象理论 (Phenomenological Theory)
- 1934年 Corter-Casimir提出二流体模型
- 1935年 London兄弟 (Fritz and Heinz) 提出一个方程解释迈斯纳效应并能预测磁场的穿透深度
- 1950年 前苏联物理学家Vitaly Ginzburg和Lev Landau提出了Ginzburg-Landau理论全面解释超导性, 并能导出London方程
- Landau的学生Alexei Abrikosov简化了Ginzburg-Landau理论, 解释了Abrikosov漩涡点阵
- Landau在1962年因二级相变理论获诺贝尔奖
- Ginzburg和Abrikosov 在2003年因其对超导研究的贡献获诺贝尔奖

# 超导理论的发展:微观理论

- 1957年, Bardeen、Cooper和Schrieffer发表的经典性文章才确立了超导电性量子理论的基础——**BCS理论**, 确定了超导体内的载流子实际上是一对电子——库珀对, 库珀对的束缚能来自电子-声子相互作用。后来证明BCS理论对所有金属类别的超导体都是成立的。**三位共同获得1972年诺贝尔物理学奖**
- 1962年 英国的Brian Josephson预言超导电流在压阈值之上可以穿过超导-金属-超导结或超导-绝缘-超导结, 这种隧穿现象后被命名为**约瑟夫森现象**。**分享了1973年诺贝尔物理学奖**



Bardeen: 1908-1991

1956年同W·H·布喇顿和  
W·肖克莱因发明晶体管  
获得诺贝尔物理学奖



Josephson  
1940-

# 高温超导体

- 1986年IBM瑞士苏黎世实验室工作的物理学家Georg Bednorz和Alex Muller发现非金属氧化物陶瓷LaBaCuO竟然有超导性，而且临界温度很高（30K）。此类超导体被称为**高温超导体**。两人因此获得了**1987年的诺贝尔物理学奖**。
- 1987年初美国的吴茂昆等、我国科学家赵忠贤以及台湾科学家朱经武等宣布了临界温度90K 钇钡铜氧超导体的发现，突破了**液氮的“温度壁垒”**（77K）。
- 1987年底，铊-钡-钙-铜-氧系材料又把临界超导温度的记录提高到125K。
- 2001年，二硼化镁(MgB<sub>2</sub>)被发现其超导临界温度达到39K。此化合物的发现，打破了非铜氧化物超导体(non-cuprate superconductor)的临界温度纪录。

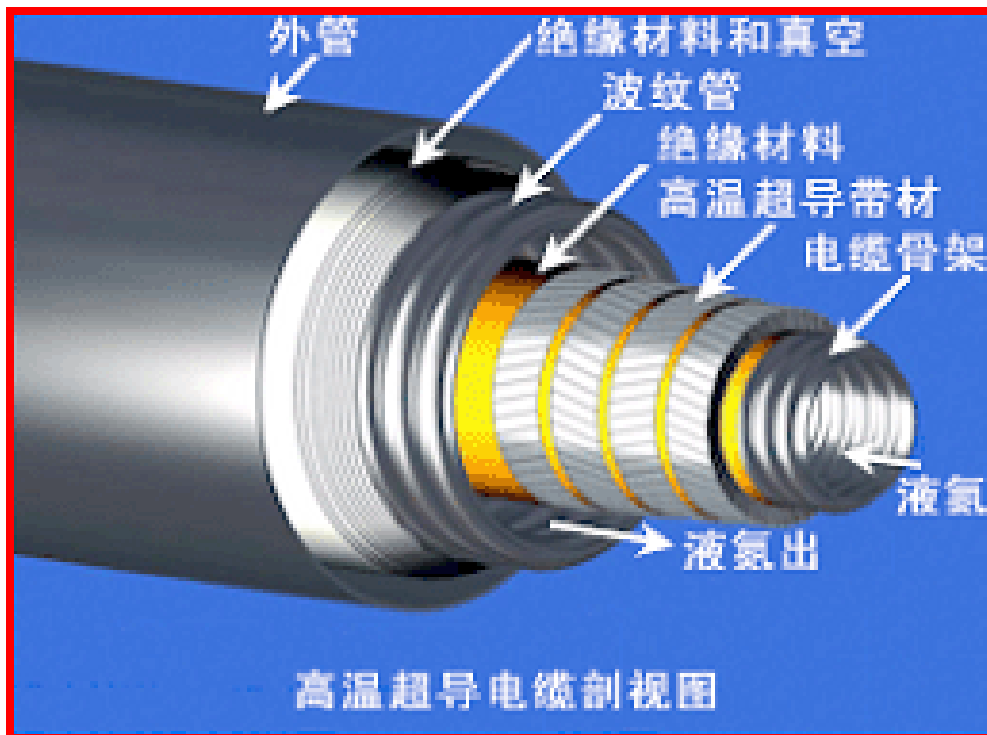
# 超导电现象的应用

- 利用材料的超导电性可制作磁体，应用于电机、高能粒子加速器、磁悬浮运输、受控热核反应、储能等；可制作电力电缆，用于大容量输电；可制作通信电缆和天线，其性能优于常规材料。利用材料的完全抗磁性可制作无摩擦陀螺仪和轴承。利用约瑟夫森效应可制作一系列精密测量仪表以及辐射探测器、微波发生器、逻辑元件等。利用约瑟夫森结作计算机的逻辑和存储元件，其运算速度比高性能集成电路的快10~20倍，功耗只有四分之一。

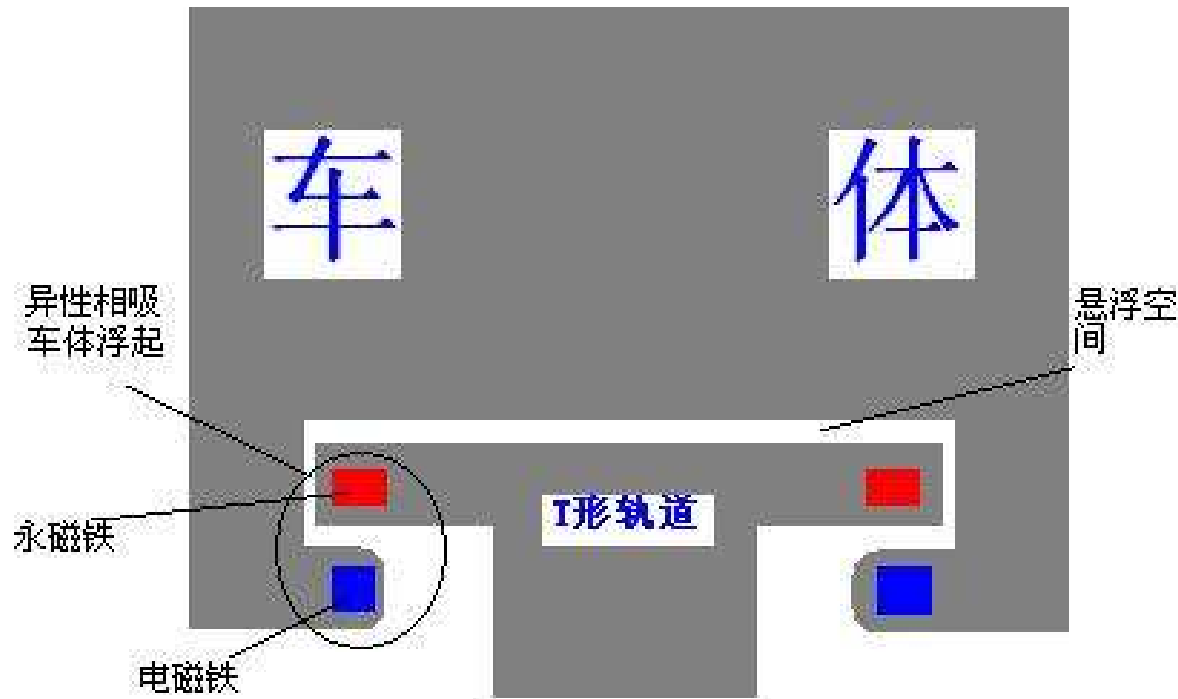


# 超导电现象的应用

- 美国纽约长岛电力局（LIPA）与美国超导公司更联合建设的世界上第一条高温超导（HTS）电缆已于2008年4月22日投入商业运行。这一超导输电系统在满负荷运转时能够满足30万户家庭的用电需求，仅由三根138千伏的电缆组成。相比同样粗细的铜导线，他们的输电能力高达150倍。



# 超导磁悬浮列车



如果把铌钛之类的超导线制成线圈，放在液体氮中，当温度降到 $-269^{\circ}\text{C}$ 时通上电流，就成为超导电磁铁。目前，日本已研制出专用于磁浮列车的冷冻设备。这样，轻便、强力的永久磁铁--超导电磁铁就在磁浮列车上诞生了

# 超导磁悬浮列车



创下世界最高时速记录581km/h  
的超导线性马达机车“MLX01-1”

# 移动通信用高温超导滤波器系统



2006年清华大学正式对外宣布，我国第一台CDMA移动通信用高温超导滤波器系统在使用过程中性能优秀。这是我国高温超导在移动通信中的首次实际应用。专家称，这一成功是我国高温超导技术应用研究领域的重要里程碑，标志着自高温超导1986年发现以来，我国成为继美国之后，第二个用自己的技术实现了高温超导滤波器在移动通信中应用的国家。