

第一章 磁学基础知识

1.1 磁场、磁性和基本磁学量

1.2 孤立原子的磁性

1.3 宏观物质的磁性质

1.4 磁性体的热力学基础

姜书1.1-1,6节

本章回顾总结《电磁学》、《原子物理》等基础课程中的磁性知识，**明确和统一**相关物理量的定义、符号、单位及公式，建立起深入学习的平台；**归纳和总结**物质磁性的宏观表现，**明确本课程要解决的问题**。这些内容都是最基础的，最常用的，也是大家**必须掌握和熟悉**的。

1.1 磁场、磁性和基本磁学量

磁场：在场内运动的电荷会受到作用力的物理场。

电磁学给出的定义：（见胡有秋等电磁学p202）

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$$

F : 运动电荷 q 受到的力；

q : 电荷量；

v : 电荷运动速度；

B 称作**磁通密度**或**磁感应强度**，是表征磁场方向和大小物理量。其SI单位是：**特斯拉**（ $T = N \cdot A^{-1}m^{-1} = Wb \ m^{-2}$ ）。

物质的磁化状态：**磁化强度矢量**

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

($A \ m^{-1}$)

空间总磁场是**传导电流**和**磁化电流**产生的磁感应强度之矢量和。

上述磁场定义下，**磁场强度 H** 是一个辅助矢量。

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

M : 物质的磁化强度;

μ_0 : 真空磁导率:

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N} \cdot \text{A}^{-2} (\text{H} \cdot \text{m}^{-1})$$

没有磁介质存在 ($M = 0$) 只有传导电流产生的磁场时，表述磁场的两个物理量之间才存在着简单关系： **$B = \mu_0 H$**

磁场强度的单位是： $\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

介质方程：给出磁化状态和磁场的关系

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

χ 是物质的磁化率，一般是温度和磁场的函数，偶尔是常数。

磁性：

磁性是物质的一种基本属性，正像物质具有质量一样，它的特征是：物质在非均匀磁场中要受到磁力的作用。在具有梯度的磁场中，物质受力的大小和方向反映着物质磁性的特征。

$$\vec{F} = (\vec{\mu} \cdot \vec{\nabla}) \vec{B}$$
$$\vec{\mu} = \Delta V \cdot \chi \vec{H}$$

磁化率的正负和大小反映出物质磁性的特征。大体可以分为：（通常人们习惯说有磁物质和无磁物质是不科学的）

强磁性物质： $\chi > 1$ ，例：铁， Fe_3O_4

弱磁性物质：

顺磁性物质： $0 < \chi \ll 1$ ，例：氧气，铝

抗磁性物质： $\chi < 0$ ， $|\chi| \ll 1$ ，例：水，铜

磁性被定义为物质在不均匀磁场中会受到磁力作用的一种属性，显然不能再定义**磁场**就是使物质受到磁力作用的场，这样相互定义是不科学的，**因此磁场是由在场内运动着的带电粒子所受到的力来确定的**，这种力称作洛伦兹（**Lorentz**）力，它的作用是使带电粒子的路径发生弯曲，洛伦兹力的大小正比于电荷量 q ，电荷运动速度 v 和磁通密度 B 的乘积，其方向则垂直于 v 和 B 所形成的平面，它和磁性物质在不均匀磁场中受到的磁力相比，性质上是完全不同的，这就避免了又用磁性定义磁场所产生的问题。

历史上曾用**磁荷**受力来定义磁场，所以先有了**磁场强度**的定义，在确定用运动电荷受力确定磁场后，就只能选用磁通密度（磁感应强度）来表述磁场了。

磁化强度 M 和磁极化强度 J ：都是表述物质磁化状态的量。

磁化强度 M 定义为物质**单位体积的磁矩**：(Sommerfeld)

$$\vec{M} = \frac{\sum \vec{\mu}_m}{V}$$

μ_m 是一个面积为 s 的电流为 i 的环形电流的磁矩。单位是 $\text{A} \cdot \text{m}^2$ ，因此**磁化强度的单位是 $\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$** ，它和磁场强度 H 的单位是一样的。

磁极化强度 J 定义为物质**单位体积的磁偶极矩**：(Kennelly)

$$\vec{J} = \frac{\sum \vec{j}_m}{V}$$

j_m 是一个长度为 l ，磁荷为 $\pm q_m$ 的磁偶极子，其单位是： $\text{Wb} \cdot \text{m}$ ，因此**磁极化强度的单位是： $\text{Wb} \cdot \text{m}^{-2}$** （和磁感应强度 B 单位 T 一致）

两个物理量之间的关系为：

$$\vec{J} = \mu_0 \vec{M}$$

有些文献中两个量的名称不加区别，但我们可以从它使用的单位中加以区分。

磁化强度 M 和磁场强度 H 之间的关系是：

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

该关系中，磁化强度和磁场强度是同量纲的，所以这里的磁化率是无量纲的，是一个纯粹的数字，但应注意到由于磁化强度定义为单位体积的磁矩，所以公式中的磁化率 χ 暗含着**单位体积**磁化率的意义。

在理论推导和测量中，常常使用另外两种定义：

质量磁化率：

$$\chi_m = \frac{\chi}{d} \quad d \text{ 是材料的密度 (kg} \cdot \text{m}^{-3}) \quad \text{m}^3/\text{kg}$$

摩尔磁化率：

$$\chi_{\text{mol}} = n \chi_m = n \frac{\chi}{d} \quad n \text{ 为mol质量 (kg} \cdot \text{mol}^{-1}) \quad \text{m}^3/\text{mol}$$

在查阅文献资料时要注意到几种磁化率的不同使用。

在文献中常使用**比磁化强度** σ 的概念：单位： $\text{A} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$

$$\sigma = \frac{M}{d} = \chi_m H$$

d 是物质的密度， σ 实际是单位质量物质的磁矩矢量和。

有磁介质时上述物理量之间的关系：

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

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

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

μ μ_0 称作绝对磁导率， $\mu = 1 + \chi$ 称作相对磁导率，是一个无量纲量，为简便起见，也称它为（**介质**）**磁导率**。

磁化率 χ 和磁导率 μ 以不同方式表述了材料对外磁场的响应，反映了材料最重要的性质。因为是两个矢量之间的关系，所以**一般情况下它们都是张量**。

单位制问题:

电磁学的单位由于历史的原因曾有过多种，有静电制 (CGSE)，电磁制 (CGSM)，高斯制，以及目前规定通用的国际单位制 (MKSA)，加之历史上对磁性起源有过不同的认识，至目前为止，磁学量单位的使用上仍存在着一些混乱，早期文献当然使用高斯制，目前虽建议采用国际单位制，但高斯单位制仍相当常见。因此必须熟悉两种单位制之间的换算：

$$1 \text{ CGSM } (q) = 10 \text{ C} \approx 3 \times 10^{10} \text{ CGSE } (q)$$

国际单位制 (SI)

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

$$M = \chi H$$

$$\mu = 1 + \chi$$

$$B = \mu \mu_0 H$$

高斯单位制 (EMU)

$$(\text{Gs}) \quad B = H + 4\pi M$$

$$(\text{Gs}) \quad M = \chi_1 H (\text{Oe})$$

$$\mu = 1 + 4\pi \chi_1$$

$$B = \mu H$$

没有 μ_0 !

CGSE、CGSM间电流单位的转换

MKSA 制		高斯制	
电流观点	磁荷观点	电流观点	磁荷观点
$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\vec{l} \times \hat{r}}{r^2}$	$d\vec{H} = \frac{1}{4\pi\mu_0} \frac{dq_m}{r^2} \hat{r}$	$d\vec{B} = \frac{1}{c} \frac{I d\vec{l} \times \hat{r}}{r^2}$	$d\vec{H} = \frac{dq_m}{r^2} \hat{r}$
$\vec{m} = I\vec{S}$	$\vec{p}_m = q_m \vec{l}$	$\vec{m} = \frac{1}{c} I\vec{S}$	$\vec{p}_m = q_m \vec{l}$
$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M})$	$\vec{B} = \mu_0\vec{H} + \vec{J}$	$\vec{B} = \vec{H} + 4\pi\vec{M}$	$\vec{B} = \vec{H} + 4\pi\vec{J}$
$\vec{M} = \chi\vec{H}$	$\vec{J} = \chi\mu_0\vec{H}$	$\vec{M} = \chi\vec{H}$	$\vec{J} = \chi\vec{H}$
$\vec{B} = \mu\mu_0\vec{H}$		$\vec{B} = \mu\vec{H}$	
$\mu = 1 + \chi$		$\mu = 1 + 4\pi\chi$	

MKSA 制	高斯制
$\varepsilon = -\frac{d\Phi_B}{dt}$	$\varepsilon = -\frac{1}{c} \frac{d\Phi_B}{dt}$
$\bar{\nabla} \cdot \bar{D} = \rho_{e0}$	$\bar{\nabla} \cdot \bar{D} = 4\pi\rho_{e0}$
$\bar{\nabla} \times \bar{E} = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t}$	$\bar{\nabla} \times \bar{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \bar{B}}{\partial t}$
$\bar{\nabla} \cdot \bar{B} = 0$	$\bar{\nabla} \cdot \bar{B} = 0$
$\bar{\nabla} \times \bar{H} = \bar{j}_0 + \frac{\partial \bar{D}}{\partial t}$	$\bar{\nabla} \times \bar{H} = \frac{4\pi}{c} \bar{j}_0 + \frac{1}{c} \frac{\partial \bar{D}}{\partial t}$

提示:

$$1 \text{ CGSM } (q) = 10 \text{ C} \approx 3 \times 10^{10} \text{ CGSE } (q)$$

1. 高斯单位制中，因为 $\mu_0=1$ ，磁偶极矩和磁矩是没有区别的，磁化强度和磁极化强度也是没有区别的，都称作磁化强度，单位是：高斯（Gs），但在国际单位制里，两者是不同的，所以换算关系不同：

$$J: 1 \text{ Gs} = 4\pi \times 10^{-4} \text{ T}$$

$$M: 1 \text{ Gs} = 10^3 \text{ A m}^{-1}$$

而磁感应强度 B 在两个单位制中的变换是：

$$B: 1 \text{ Gs} = 10^{-4} \text{ T}$$

这是由于两个物理量在两种单位制中的关系不同造成的。

2. 从实用观点看，单位制问题，主要就是两种单位制之间的换算问题，**解决办法就是建立一个换算表。**

磁学量	符号	SI单位制	高斯单位	emu→SI
磁场强度	H	$A \cdot m^{-1}$	Oe	$\times 10^3/4\pi$
磁感应强度	B	T	Gs	$\times 10^{-4}$
磁化强度	M	$A \cdot m^{-1}$	Gs	$\times 10^3$
磁通量	Φ	Wb	Mx	$\times 10^{-8}$
磁矩	μ_m	$A \cdot m^2$	emu	$\times 10^{-3}$
磁偶极矩	j_m	Wb · m	emu	$\times 4\pi \times 10^{-10}$
磁化率	χ			$\times 4\pi$
磁导率	μ			$\times 1$
磁极化强度	J	T	Gs	$\times 4\pi \times 10^{-4}$

附表 主要磁学量在两种单位制中的换算关系

磁学量	符号	SI		CGS		由 SI 单位 换算成 CGS 单位时的 相乘因数
		单位名称	单位符号	单位名称	单位符号	
磁场强度	H	安培/米	A/m	奥斯特	Oe	$4\pi \times 10^{-3}$
磁感应强度 (磁通量密度)	B	特斯拉	T	高斯	Gs	10^4
磁化强度	M	安培/米	A/m	高斯	Gs	10^{-3}
磁极化强度	J	特斯拉	T	高斯	Gs	10^4
<u>磁极强度</u>	m	韦伯	Wb	电磁单位		$10^8/4\pi$
磁通量	Φ	韦伯	Wb	麦克斯韦	Mx	10^8
磁偶极矩	j_m	韦伯·米	Wb·m	电磁单位		$10^{10}/4\pi$
磁矩	μ	安培平方米	A·m ²	电磁单位		10^3
磁化率(相对)	χ					$1/4\pi$
磁导率(相对)	μ					1
真空磁导率	μ_0	亨利/米	H/m			$10^7/4\pi$

应为: $\frac{1}{4\pi} \times 10^4$

附录五

磁学量的换算—MKSA 和 CGS 制

量	符号	MKSA 单位	转换比		CGS 单位
			MKSA 值	CGS 值	
			CGS 值	MKSA 值	
磁极	m	Wb	1.257×10^{-7}	7.96×10^6	
磁通	Φ	Wb	1×10^{-8}	1×10^8	麦克斯韦(Mx)
磁矩	M	Wb m	1.257×10^{-9}	7.96×10^8	
磁化强度	I	T	1.257×10^{-3}	7.96×10^2	G
磁通密度	B	T	1×10^{-4}	1×10^4	G
磁场强度	H	A m ⁻¹	7.96×10	1.257×10^{-2}	Oe
磁势	ϕ_m	A	7.96×10^{-1}	1.257	吉伯(Gilbert)(Gb)
磁通势	V_m				
磁化率	χ	H m ⁻¹	1.579×10^{-5}	6.33×10^4	
相对磁化率	$\bar{\chi}$		$=4\pi\chi$ (CGS)		
磁导率	μ	H m ⁻¹	1.257×10^{-6}	7.96×10^5	
相对磁导率	$\bar{\mu}$		$=\mu$ (CGS)		
真空磁导率	$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H m}^{-1}$				=1
退磁因子	N		7.96×10^{-1}	1.257×10	
瑞利常数	η	H/A	1.579×10^{-8}	6.33×10^7	Oe ⁻¹
磁阻	R_m	H ⁻¹	7.96×10^7	1.257×10^{-8}	吉伯/麦克斯韦
电感	L	H	1×10^{-9}	1×10^9	绝对亨利
各向异性常数	K				
能量密度	E_m	J m ⁻³	1×10^{-1}	10	erg cm ⁻³
正常霍尔系数	R	M ² A ⁻¹	1.257×10^{-4}	7.96×10^3	$\Omega \text{ cm Oe}^{-1}$

Wb—韦伯, T—特斯拉, A—安培, H—亨利, J—焦耳, Ω —欧姆, Mx—麦克斯韦, G—高斯
Oe—奥斯特

$$1.257 = 4\pi / 10, 7.96 = 10^2 / 4\pi, 1.579 = (4\pi)^2 / 10^2, 6.33 = 10^3 / (4\pi)^2$$

磁偶极矩
磁极化强度



B. D. Cullity, Introduction to magnetic materials

TABLE A3.1

Quantity	Symbol	Conversion
Field	H	$\frac{\text{Oe}}{\text{A} \cdot \text{m}^{-1}} = \frac{10^3}{4\pi} = 79.6$
Flux	Φ	$\frac{\text{Mx}}{\text{Wb}} = \frac{\text{Mx}}{\text{V} \cdot \text{s}} = 10^{-8}$
Flux density	B	$\frac{\text{G}}{\text{T}} = \frac{\text{G}}{\text{Wb} \cdot \text{m}^{-2}} = 10^{-4}$
Magnetic moment	m	$\frac{\text{emu}}{\text{A} \cdot \text{m}^2} = \frac{\text{erg} \cdot \text{Oe}^{-1}}{\text{A} \cdot \text{m}^2} = \frac{10\text{A} \cdot \text{cm}^2}{\text{A} \cdot \text{m}^2} = \frac{\text{emu}}{\text{J} \cdot \text{T}^{-1}} = 10^{-3}$
Magnetization per unit volume	M	$\frac{\text{emu} \cdot \text{cm}^{-3}}{\text{A} \cdot \text{m}^{-1}} = \frac{(\text{erg} \cdot \text{Oe}^{-1}) \cdot \text{cm}^{-3}}{\text{A} \cdot \text{m}^{-1}} = 10^3$
Magnetization per unit mass	σ	$\frac{\text{emu} \cdot \text{g}^{-1}}{(\text{A} \cdot \text{m}^2) \cdot \text{kg}^{-1}} = \frac{(\text{erg} \cdot \text{Oe}^{-1}) \cdot \text{g}^{-1}}{(\text{A} \cdot \text{m}^2) \cdot \text{kg}^{-1}} = 1$
Magnetic polarization	J	$\frac{\text{emu} \cdot \text{cm}^{-3}}{\text{T}} = \frac{(\text{erg} \cdot \text{Oe}^{-1}) \cdot \text{cm}^{-3}}{\text{T}} = 10^3 \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-4}$
Volume susceptibility	χ_v	$\frac{(\text{emu} \cdot \text{Oe}^{-1}) \cdot \text{cm}^{-3}}{(\text{A} \cdot \text{m}^2) \cdot (\text{A} \cdot \text{m}^{-1})^{-1} \cdot \text{m}^{-3}} = 4\pi$
Mass susceptibility	χ_M	$\frac{(\text{emu} \cdot \text{Oe}^{-1}) \cdot \text{g}^{-1}}{(\text{A} \cdot \text{m}^2) \cdot (\text{A} \cdot \text{m}^{-1})^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}} = 4\pi \cdot 10^{-3}$
Permeability	$\mu = \frac{B}{H}$	$\frac{\text{G} \cdot \text{Oe}^{-1}}{\text{T} \cdot (\text{A} \cdot \text{m}^{-1})^{-1}} = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$
Relative permeability (SI)	μ_r	$\frac{\mu_{\text{SI}}}{\mu_0} = \mu_r = \mu_{\text{cgs}}$
Energy density	W	$\frac{\text{erg} \cdot \text{cm}^{-3}}{\text{J} \cdot \text{m}^{-3}} = 0.1$
Demagnetizing factor	N	$\frac{N_{\text{cgs}}}{N_{\text{SI}}} = 4\pi$
Energy product	(BH)	$\frac{\text{G} \cdot \text{Oe}}{\text{T} \cdot (\text{A} \cdot \text{m}^{-1})} = \frac{\text{G} \cdot \text{Oe}}{\text{J} \cdot \text{m}^{-3}} = 4\pi \cdot 10^1 = 126$ $\frac{\text{MG} \cdot \text{Oe}}{\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}} = 4\pi \cdot 10^{-2} = 0.126$

Mx = maxwell, G = gauss, Oe = oersted, Wb = weber, V = volt, s = second, T = tesla, m = meter, A = ampere, J = joule, kg = kilogram, g = gram, cm = centimeter, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$.

附录三

重要的物理常数*

光速	$c = 2.99792458 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
重力加速度	$g = 9.80665 \text{ m/s}^2$
万有引力常数	$G = 6.67259 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$
普朗克常数	$h = 6.6260755 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ $\hbar = h/2\pi = 1.05457266 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$
热功当量	$J = 4.1840 \text{ J} (15^\circ \text{ cal})^{-1}$
玻尔兹曼常数	$k = 1.380658 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$
0°C时的能量 kT 的值	$kT_0 = 3.771 \times 10^{-21} \text{ J}$
阿伏加德罗常数	$N = 6.0221367 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
电子质量	$m = 9.1093897 \times 10^{-31} \text{ kg}$
电子电荷 (绝对值)	$e = 1.60217733 \times 10^{-19} \text{ C}$
电子荷质比	$e/m = 1.75881962 \times 10^{11} \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1}$
法拉第常数	$F = Ne = 9.6485309 \times 10^4 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}$
玻尔磁子	$M_B = 1.16540715 \times 10^{-29} \text{ Wb} \cdot \text{m} \quad 9.2732 \times 10^{-24} \text{ A} \cdot \text{m}^2$
旋磁比	$\nu = 1.10509896 \times 10^5 \text{ g} \cdot \text{mA}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$
磁通量子	$\Phi_0 = h/2e = 2.06783461 \times 10^{-15} \text{ Wb}$

*大多数数据来自 1986 年的 CODATA

各种能量单位的换算*

eV	cm^{-1}	K	J	cal	MA/m ⁺
1	$=0.80655 \times 10^4$	$=1.1604 \times 10^4$	$=1.60218 \times 10^{-19}$	$=3.8292 \times 10^{-20}$	$=1.37477 \times 10^4$
1.23985×10^{-4}	= 1	=1.43872	$=1.98646 \times 10^{-23}$	$=4.7476 \times 10^{-24}$	=1.70450
0.86177×10^{-4}	=0.69506	= 1	$=1.38071 \times 10^{-23}$	$=3.2999 \times 10^{-24}$	=1.18473
0.62415×10^{19}	$=0.50341 \times 10^{23}$	$=0.72426 \times 10^{23}$	= 1	$=2.3900 \times 10^{-1}$	$=8.5806 \times 10^{22}$
2.61151×10^{19}	$=2.10631 \times 10^{23}$	$=3.03040 \times 10^{23}$	= 4.1840	= 1	$=3.5901 \times 10^{23}$
7.27396×10^{-5}	=0.58668	= 0.84407	$=1.16542 \times 10^{-23}$	$=2.7854 \times 10^{-24}$	= 1

*此表的数据是根据 CODATA 工作小组 1973 年的推荐。参见 CODATA Bulletin 11, 7, Table IV(1973)

†这列表示磁场 H 的值, 当该场作用在一个玻尔磁子 (M_B) 上时, 给出的相应的能量为 $M_B H$ 。

各种磁场单位的换算

A m ⁻¹ (安培/米)	Oe (奥斯特)	T* (特斯拉)	备注
1 mA m ⁻¹	=1.26 × 10 ⁻⁵ Oe	=1.26 × 10 ⁻⁹ T	1 × 10 ⁻⁵ G=1 γ (gamma)
10 mA m ⁻¹	=1.26 × 10 ⁻⁴ Oe	=1.26 × 10 ⁻⁸ T	
100 mA m ⁻¹	=1.26 mOe	=1.26 × 10 ⁻⁷ T	
1 A m ⁻¹	=12.6 mOe	=1.26 μT	
10 A m ⁻¹	=0.126 Oe	=12.6 μT	地磁场=0.15-0.30Oe
100 A m ⁻¹	=1.26 Oe	=0.126 mT	
1 kA m ⁻¹	=12.6 Oe	=1.26 mT	
10 kA m ⁻¹	=126 Oe	=12.6 mT	} 可由永磁体产生
100 kA m ⁻¹	=1.26 kOe	=0.126 T	
1 MA m ⁻¹	=12.6 kOe	=1.26 T	可由电磁铁产生
10 MA m ⁻¹	=126 kOe	=12.6 T	可由超导螺线管产生
100 MA m ⁻¹	=1.26 MOe	=126 T	可由磁通压缩产生

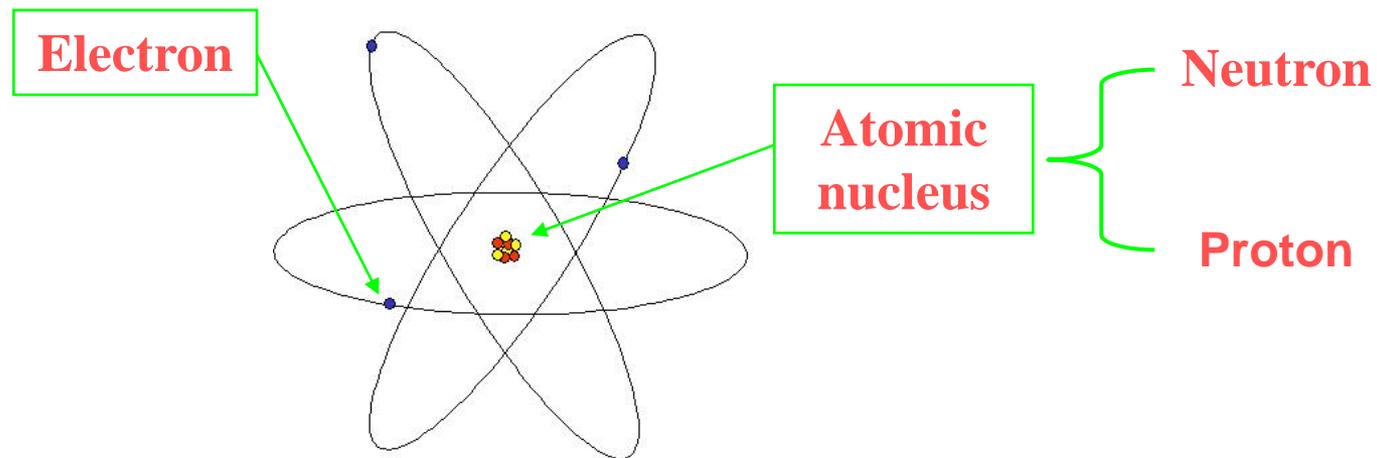
*T 是磁通密度的单位；但有时也用作磁场的单位。在这种情况下应采用 $\mu_0 H$ 且最好称为“感应场”。

此表中 H 与 B 的对应值是在真空中的，几乎可用于弱磁介质。

1.2 孤立原子的磁性

关于物质磁性起源曾有过分子电流学说和磁偶极矩学，现代科学认为物质的磁性来源于组成物质中原子的磁性：

1. 原子中外层电子的**轨道磁矩**
2. 电子的**自旋磁矩**
3. 原子核的**核磁矩**



由于质量关系，电子磁矩比原子核磁矩大 3 个量级，因此宏观物质的磁性主要由电子磁矩所决定。本节考虑孤立原子的磁矩。凝聚态物质中构成原子的磁矩在第2章中介绍。

一、电子轨道运动产生的轨道磁矩

经典地看：一个绕原子核运动的电子，相当于一个环形电流，其**轨道磁矩**为：

$$\mu_l = i \cdot A = \frac{e}{T} A \quad A \text{ 是环形轨道面积,}$$

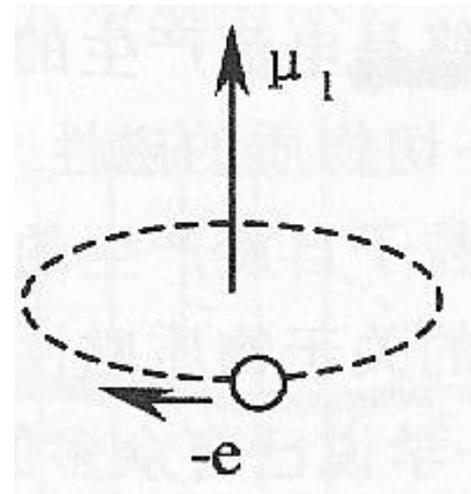
电子具有质量 m ，其轨道运动同时具有角动量 p_l ，

在圆形轨道近似下 $p_l = m\omega r^2, \mu_l = \frac{1}{2}e\omega r^2$

计入方向

$$\vec{\mu}_l = -\frac{e}{2m} \vec{p}_l = -\gamma_l \vec{p}_l$$

$$\gamma_l = \frac{e}{2m} \quad \text{称作**轨道旋磁比**}$$



原子中的电子应该服从量子力学规律，其运动状态应

该由波函数 $\Psi_{nlm_l m_s}(\mathbf{r})$ 确定，**角动量是量子化的**，当电子运动的主量子数为 n 时，

角动量的绝对值为： $p_l = \hbar\sqrt{l(l+1)}$ 其中 l 是角量子数，

式中， l 的可能值为： $l = 0, 1, 2, \dots, (n-1)$

所以**电子的轨道磁矩**为：

$$\mu_l = \sqrt{l(l+1)} \frac{e\hbar}{2m}$$

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

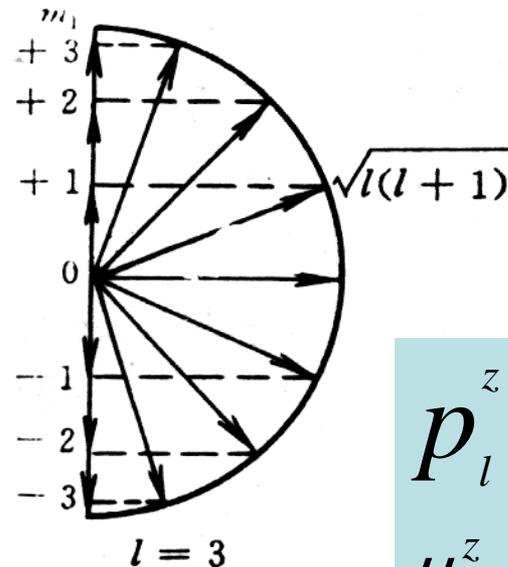
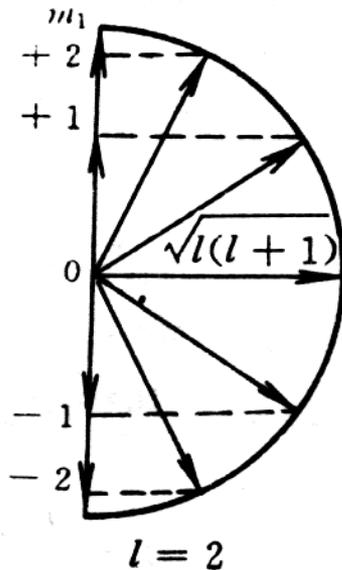
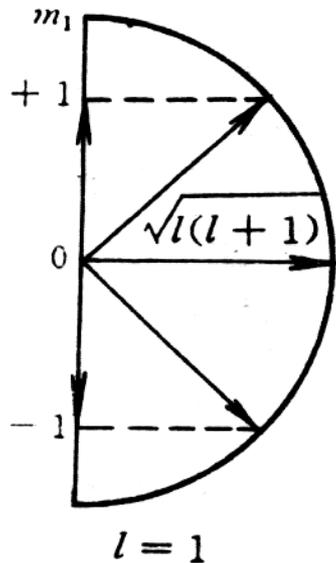
可以作为原子磁矩的基本单位，称作**玻尔磁子**

$$\mu_B = 9.2726 \times 10^{-24} \text{ A} \cdot \text{m}^2$$

如果使用**磁偶极矩**的概念，其单位是：

$$\mu_B = \frac{\mu_0 e\hbar}{2m} = 1.16528 \times 10^{-29} \text{ Wb} \cdot \text{m}$$

$l = 0$ 时 s 态时电子的轨道角动量/磁矩都等于**0**，这是一种特殊的状态。而 $l \neq 0$ 时电子轨道磁矩不为 0，但其绝对值并不是玻尔磁子的整数倍。另外，**轨道角动量/磁矩的空间取向也是量子化的**，由磁量子数 $m_l = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots, \pm l$ 的 $(2l + 1)$ 个分立值确定，**所以，磁矩在磁场方向的投影是玻尔磁子的整数倍**



$$p_l^z = m_l \hbar$$

$$\mu_l^z = m_l \mu_B$$

电子的 p_l 空间量子化

二、电子的自旋磁矩

电子磁矩的第二个来源是电子具有**自旋磁矩**，它是电子的本征性质，电子的自旋角动量取决于自旋量子数， $s = \frac{1}{2}$

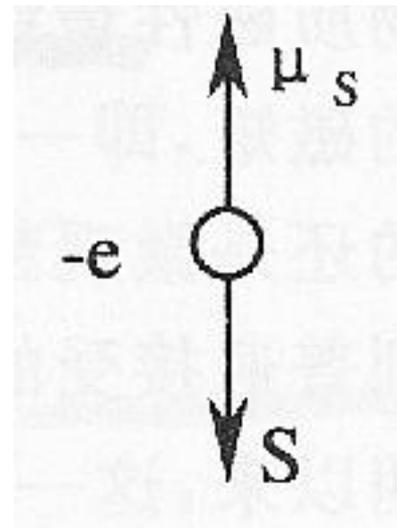
自旋角动量的绝对值： $p_s = \sqrt{s(s+1)}\hbar = \frac{\sqrt{3}}{2}\hbar$

而自旋角动量在外场中的分量只取决于**自旋量子数** $m_s = \pm \frac{1}{2}$

$$\therefore p_s|_z = m_s \hbar = \pm \frac{1}{2} \hbar$$

实验表明：与自旋角动量相联系的自旋磁矩 μ_s 在外磁场方向上的投影刚好等于一个玻尔磁子。

$\therefore \mu_s = -\gamma_s p_s$, $\gamma_s = \frac{e}{m}$ 称作**自旋旋磁比**
(两倍于轨道的)

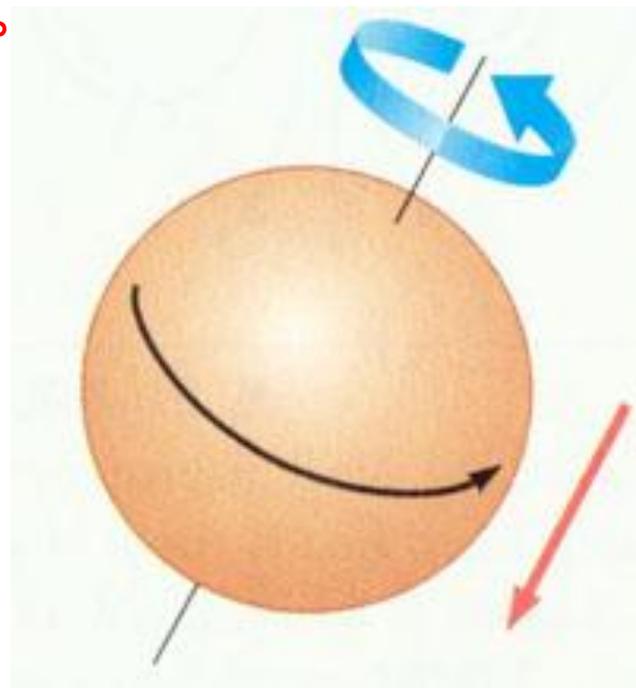


电子具有自旋磁矩清楚而直接的证明是 Stern-Gerlach所做的使原子束在不均匀磁场中偏转的实验，而理论证明则是 Dirac 建立的相对论量子力学。

一直有人把电子自旋看作是电子的自转运动（如图所示，把原子中电子绕原子核做轨道运动和自旋运动比作行星绕太阳做轨道运动和自转运动。这样理解是错误的，**电子具有自旋及自旋磁矩是相对论量子力学的结果，是包括电子在内的微观粒子(例如中子)都具有的内禀性质。**

把电子的自旋磁矩看作是电子自转运动产生的磁矩，除去理论计算难以解决外，也难以解释电子自旋磁矩的空间量子化，而在相对论量子力学里它们都可以得到很好的解释。

---见李书p27-28



从上面的讨论中，不难看到：不论是自旋磁矩，还是轨道磁矩，**在外磁场中的观察数值**都是玻尔磁子 μ_B 的整数倍。这就是选它做磁矩单位的理由。

知道了电子的轨道磁矩和自旋磁矩后，还需要知道它们是如何耦合的，才能计算出原子的磁矩，特别在核外电子多于一个的情况下，还必须考虑电子的分布规律。

在多电子原子中，决定电子所处状态的准则有两条：

1. Pauli不相容原理：在已知体系中，同一 (n, l, m_l, m_s) 量子态上只能有一个电子。

2. 能量最小原理：体系能量最低时，体系最稳定。

三、原子的电子分布

核外电子结构用四个量子数 $n.l.m_l.m_s$ 表征：（多电子体系）
电子轨道大小由主量子数 n 决定

$n = 1, 2, 3, 4, \dots$ 的轨道群

又称为 K, L, M, N, \dots 的电子壳层

轨道的形状由角动量量子数 l 决定

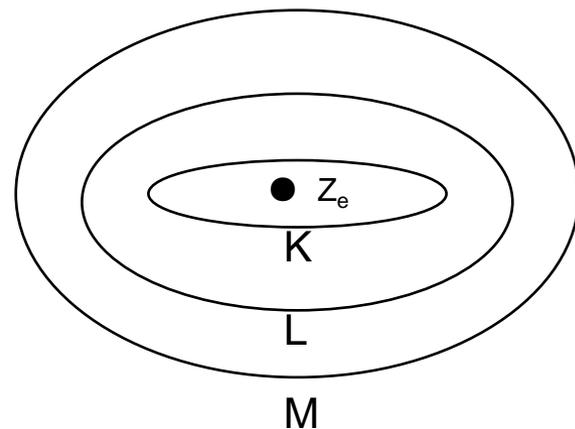
$l = 0, 1, 2, 3, \dots, n-1$

又称为 s, p, d, f, g, \dots 电子

当施加磁场在一个原子上时，平行于磁场的角动量分量也是量子化的。 l 在磁场方向上的分量由磁量子数 m_l 决定

$m_l = l, l-1, l-2, \dots, 0, \dots, -(l-1), -l$ 共有 $(2l+1)$ 个值

电子自旋量子数由 m_s 决定 $S = \pm \frac{1}{2}$



n

M电子壳层 ($n = 3$)

主量子数 n 代表主壳层，轨道量子数 l 代表次壳层，能量相同的电子可以视为分布在同一壳层上。

l

s 电子

p 电子

d 电子

m_l

0

1

0

-1

2

1

0

-1

-2

$\sum_{l=0}^{n-1} 2l+1 = n^2$ 轨道

主量子数相同的电子数最多：

m_s

$\frac{1}{2}$

$-\frac{1}{2}$

$2n^2$ 电子

属于 M 电子壳层的各种电子态

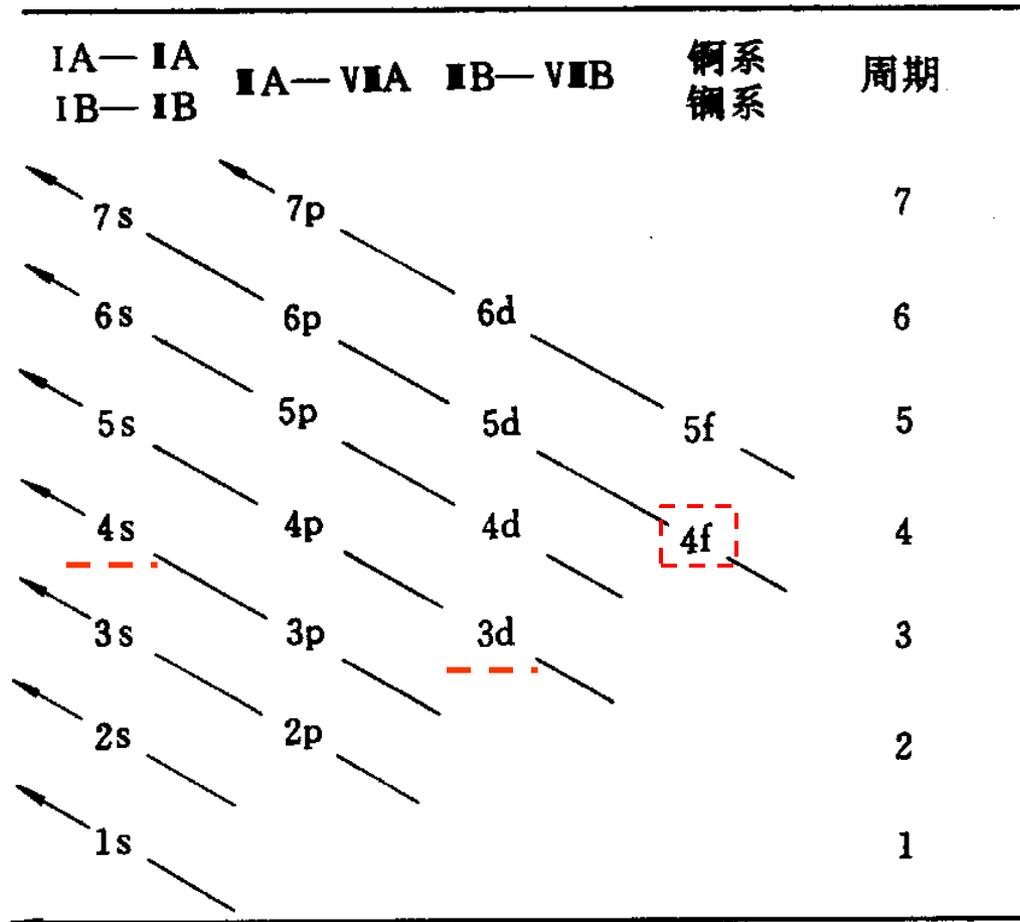
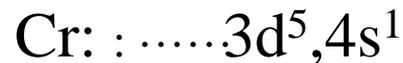
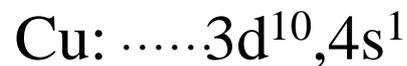


图 核外电子填充顺序图

大多数原子基态的电子组态可以按此规律给出。

少数元素有些变化，如：



(半、全满规则)

见《结构与物性》p15

基态原子的电子在原子轨道中填充的顺序是：

1s, 2s, 2p, 3s, 3p, 4s, 3d, 4p, 5s, 4d, 5p, 6s, 4f, 5d, 6p, 7s, 5f, 6d

Table 3.1. Electronic configuration of elements.

Elements		Levels and number of states																				Ground terms		
		<i>K</i>		<i>L</i>			<i>M</i>				<i>N</i>				<i>O</i>					<i>P</i>			<i>Q</i>	
		2	8	2	3	3	3	4	4	4	4	5	5	5	5	5	6	6	6	6	6		6	7
1s	2s	2p	3s	3p	3d	4s	4p	4d	4f	5s	5p	5d	5f	5g	6s	6p	6d	6f	6g	6h	7s ...			
		2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10	14	18	2	6	10	14	18	22	2	
1	H	1																						$2S_{1/2}$
2	He	2																						$1S_0$
3	Li	2	1																					$2S_{1/2}$
...	
10	Ne	2	2	6																				$1S_0$
11	Na	2	2	6	1																			$2S_{1/2}$
...	
18	Ar	2	2	6	2	6																		$1S_0$
19	K	2	2	6	2	6		1																$2S_{1/2}$
20	Ca	2	2	6	2	6		2																$1S_0$
3d transition elements	21	Sc	2	2	6	2	6	1	2															$2D_{3/2}$
	22	Ti	2	2	6	2	6	2	2															$3F_2$
	23	V	2	2	6	2	6	3	2															$4F_{3/2}$
	24	Cr	2	2	6	2	6	5	1															$7S_3$
	25	Mn	2	2	6	2	6	5	2															$6S_{5/2}$
	26	Fe	2	2	6	2	6	6	2															$5D_4$
	27	Co	2	2	6	2	6	7	2															$4F_{9/2}$
	28	Ni	2	2	6	2	6	8	2															$3F_4$
	29	Cu	2	2	6	2	6	10	1															$2S_{1/2}$
	30	Zn	2	2	6	2	6	10	2															$1S_0$
...	
4d transition elements	36	Kr	2	2	6	2	6	10	2	6														$1S_0$
	37	Rb	2	2	6	2	6	10	2	6		1												$2S_{1/2}$
	38	Sr	2	2	6	2	6	10	2	6		2												$1S_0$
	39	Y	2	2	6	2	6	10	2	6	1	2												$2D_{3/2}$
	40	Zr	2	2	6	2	6	10	2	6	2	2												$3F_2$
	41	Nb	2	2	6	2	6	10	2	6	4	1												$6D_{1/2}$
	42	Mo	2	2	6	2	6	10	2	6	5	1												$7S_3$
	43	Tc	2	2	6	2	6	10	2	6	5	2												$6S_{5/2}$
	44	Ru	2	2	6	2	6	10	2	6	7	1												$5F_5$
	45	Rh	2	2	6	2	6	10	2	6	8	1												$4F_{9/2}$
46	Pd	2	2	6	2	6	10	2	6	10	0												$1S_0$	
47	Ag	2	2	6	2	6	10	2	6	10	1												$2S_{1/2}$	
...	
54	Xe	2	2	6	2	6	10	2	6	10	2	6												$1S_0$

Table 3.1. (contd.)

Elements		Levels and number of states																			Ground terms				
		K		L			M			N				O			P					Q			
		2	8	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10	14	18	2	6	10	14		18	22	2	
1s	2s	2p	3s	3p	3d	4s	4p	4d	4f	5s	5p	5d	5f	5g	6s	6p	6d	6f	6g	6h	7s ...				
55	Cs	2	2	6	2	6	10	2	6	10		2	6											$2S_{1/2}$	
56	Ba	2	2	6	2	6	10	2	6	10		2	6											$1S_0$	
57	La	2	2	6	2	6	10	2	6	10		2	6	1										$2D_{3/2}$	
58	Ce	2	2	6	2	6	10	2	6	10	1	2	6	1										$3H_4$	
59	Pr	2	2	6	2	6	10	2	6	10	(3)	2	6	(0)											
60	Nd	2	2	6	2	6	10	2	6	10	4	2	6	0										$5I_4$	
61	Pm	2	2	6	2	6	10	2	6	10	(5)	2	6	(0)											
62	Sm	2	2	6	2	6	10	2	6	10	6	2	6	0										$7F_4$	
63	Eu	2	2	6	2	6	10	2	6	10	7	2	6	0										$8S_{7/2}$	
64	Gd	2	2	6	2	6	10	2	6	10	7	2	6	1										$9D_2$	
65	Tb	2	2	6	2	6	10	2	6	10	8	2	6	1										$8H_{17/2}$	
66	Dy	2	2	6	2	6	10	2	6	10	(9)	2	6	(1)											
67	Ho	2	2	6	2	6	10	2	6	10	(10)	2	6	(1)											
68	Er	2	2	6	2	6	10	2	6	10	(11)	2	6	(1)											
69	Tm	2	2	6	2	6	10	2	6	10	13	2	6	0										$2F_{7/2}$	
70	Yb	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	0										$1S_0$	
71	Lu	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	1										$2D_{3/2}$	
72	Hf	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	2										$3F_2$	
73	Ta	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	3										$4F_{3/2}$	
74	W	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	4										$5D_0$	
75	Re	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	5										$6S_{5/2}$	
76	Os	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	6										$5D_4$	
77	Ir	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	7										$4F_{9/2}$	
78	Pt	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	9										$3D_3$	
79	Au	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10										$2S_{1/2}$	
80	Hg	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10										$1S_0$	
...
86	Rn	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10							6			$1S_0$	
87	Fr	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10							2	6	1	$2S_{1/2}$	
...
102	No	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10	(13)						2	6	(1)		

占满电子的支壳层对原子磁矩无贡献

当电子填满某一支电子壳层时，各电子的轨道运动和自旋取向就占据了所有可能方向，形成一个球形对称集合，这样电子自身具有的动量矩和磁矩必然相互抵消，因而，凡是占满电子的支壳层，其总动量矩和总磁矩都为零。只有未填满电子的支壳层上的电子才会对原子磁矩作出贡献。这种未填满支壳层称为磁性电子壳层。

当某未满支壳层中包含多个电子时，该支壳层的电子按角动量耦合原则耦合成一个**总角动量**。原子磁矩是和这个总角动量相联系的。

电子角动量耦合的方式有两种：

1. L-S耦合：适用于原子序数较小的原子，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**，因而，各个电子的轨道角动量和自旋角动量先分别合成为一个总轨道角动量和总自旋角动量，然后，**总轨道角动量和总自旋角动量再耦合成为该支壳层电子的总角动量**。

$$\vec{P}_L = \sum_l p_{li} \quad \vec{P}_S = \sum_l p_{si} \quad \vec{P}_J = \vec{P}_L + \vec{P}_S$$

2. $j-j$ 耦合：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**，每个电子的轨道角动量和自旋角动量先合成为电子的总角动量，然后各个电子的总角动量再合成为该电子壳层的总角动量。

原子序数 $Z \leq 32$ 的元素都采用第一种耦合方式，原子序数 $Z > 32$ 到 $Z = 82$ 之间元素角动量的耦合方式将逐渐地从第一种方式转变为第二种方式。

所以原子序数不太大的原子的基态和低激发态，均可使用第一种耦合（简称 **$L-S$ 耦合**），我们以后经常讨论到的**3d族和4f族元素都可以使用 $L-S$ 耦合方式**。

下面以原子某一壳层包含两个电子为例说明 **$L-S$** 的耦合方法：

设两个电子的轨道角动量量子数分别为： l_1, l_2

则其总轨道角动量量子数的可取值为：

$$L = l_1 + l_2, l_1 + l_2 - 1, \dots, |l_1 - l_2|$$

$$\therefore P_L = \sqrt{L(L+1)}\hbar, \quad \mu_L = \sqrt{L(L+1)}\mu_B$$

自旋情况相同： $S = s_1 + s_2, s_1 + s_2 - 1, \dots, |s_1 - s_2|$

$$P_S = \sqrt{S(S+1)}\hbar, \quad \mu_S = \underline{\underline{2}}\sqrt{S(S+1)}\mu_B$$

两个电子的总角动量量子数：

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

如果 $L > S$, J 的取值为：

$$J = L + S, L + S - 1, \dots, L - S \quad (\text{共 } 2S + 1 \text{ 个值})$$

如果 $L < S$, J 的取值为:

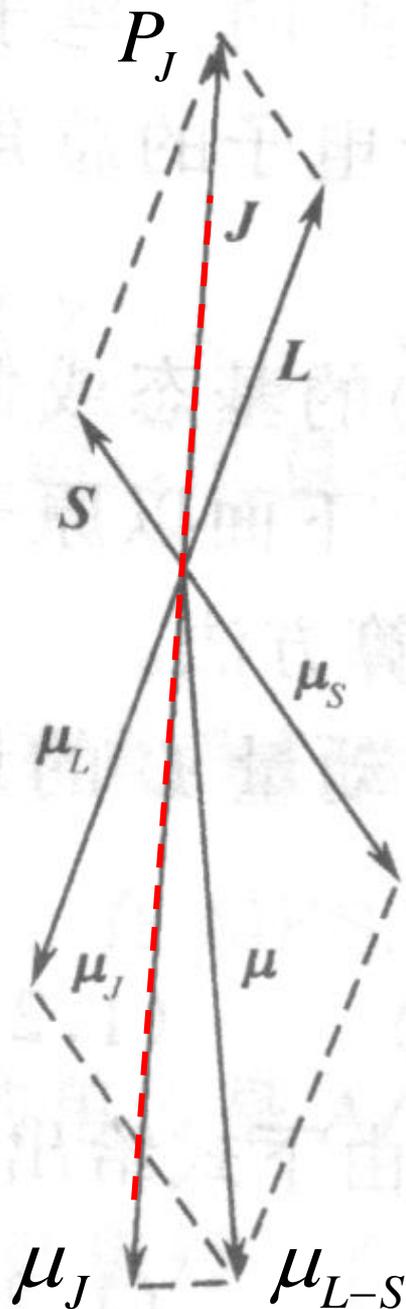
$$J = L + S, L + S - 1, \dots, S - L \quad (\text{共 } 2L + 1 \text{ 个值})$$

其总角动量:

$$P_J = \sqrt{J(J + 1)}\hbar$$

在磁场方向上的投影是量子化的, 多值的。

此时不能立即给出两个电子的总磁矩。因为**总动量矩**
和总磁矩的方向是不重合的。



$$\begin{aligned} \because P_L &= \sqrt{L(L+1)}\hbar, & \mu_L &= \sqrt{L(L+1)}\mu_B \\ P_S &= \sqrt{S(S+1)}\hbar, & \mu_S &= 2\sqrt{S(S+1)}\mu_B \end{aligned}$$

显然，合成后的 P_J 和 μ_{L-S} 不在同一方向上，为了得到 μ_J ，必须将 μ_{L-S} 投影到 P_J 方向上。

$$\mu_J = \mu_L \cos(P_L \cdot P_J) + \mu_S \cos(P_S \cdot P_J)$$

可以证明：
$$\mu_J = g_J \sqrt{J(J+1)}\mu_B$$

$$\begin{aligned} g_J &= 1 + \frac{J(J+1) + S(S+1) - L(L+1)}{2J(J+1)} \\ &= \frac{3}{2} + \frac{S(S+1) - L(L+1)}{2J(J+1)} \end{aligned}$$

$$\mu_J^z = g_J m_J \mu_B$$

四、基态的确定---洪德法则

从上面的例子中可以看出， L ， S ， J 有多种取值方式，这就导致有多个 P_J 和 μ_J 值，它们中的哪一组数值对应于系统的最低能量因而是稳定状态下的取值？**洪德**依据对原子光谱分析给出了一个**经验法则**：

1. 在泡利原理许可的条件下，总自旋量子数 $S = \sum_l m_{sl}$ 取最大值。
2. 在满足条件 1 的前提下，总轨道量子数 $L = \sum_l m_{ll}$ 取最大值。
3. 当电子数未达到电子壳层总电子数的一半时，
总角量子数： $J=L-S$
当电子数达到或超过电子壳层总电子数的一半时，
总角量子数取： $J=L+S$

常将原子的量子态用光谱学的方法来标记：

$$2S+1 L_J$$

将总自旋量子数、总角量子数的数字填入相应位置即可，

总轨道量子数 $L = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, \dots$ ，分别记为：

$$S, P, D, F, G, H, I,$$

例如：某元素的基态记作： $4 F_{9/2}$

即指该元素基态的总自旋量子数： $S = 3/2$

总轨道量子数： $L = 3$ 总角量子数： $J = 9/2$

$(1s)^2, (2s)^2, (2p)^6, (3s)^2, (3p)^6, (4s)^2, (3d)^{10}, (4p)^6,$
 $(5s)^2, (4d)^{10}, (5p)^6, (6s)^2, (4f)^{14}, (5d)^{10},$

五、原子磁矩计算举例

1. Fe 原子: $Z = 26$, 电子分布是: $\dots\dots 3d^6$

根据洪德法则1, 5个电子自旋占据5个 $+\frac{1}{2}$ 的 m_s 状态, 另一个只能占据 $-\frac{1}{2}$ 的 m_s 状态, 所以总自旋:

$$S = 5 \times \frac{1}{2} - 1 \times \frac{1}{2} = 2$$

$$L = \sum_i m_{l_i} = 2 + 1 + 0 + (-1) + (-2) + 2 = 2 \quad (\text{根据法则 2})$$

$$J = L + S = 4 \quad (\text{根据法则 3, 电子数超过一半})$$

基态

5D_4

$$g_J = \frac{3}{2} + \frac{S(S+1) - L(L+1)}{2J(J+1)} = 1.5$$

$$\mu_J = g_J \sqrt{J(J+1)} \mu_B = 6.7 \mu_B$$

$$\mu_J^z = g_J m_J \mu_B = 6 \mu_B$$

$$\mu_S = 2 \sqrt{S(S+1)} \mu_B = 4.9 \mu_B$$

$$\mu_S^z = g_S m_S \mu_B = 4 \mu_B$$

2. Cr^{+3} 离子: Cr 原子 $Z = 24$, Cr^{+3} 电子组态为... $3d^3$

$$S = 3 \times \frac{1}{2} = \frac{3}{2}$$

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

$$J = L - S = \frac{3}{2}$$

$$g_J = 0.4$$

$(1s)^2, (2s)^2, (2p)^6, (3s)^2, (3p)^6, (4s)^2, (3d)^{10}, (4p)^6,$
 $(5s)^2, (4d)^{10}, (5p)^6, (6s)^2, (4f)^{14}, (5d)^{10},$

电子数不到半满,

基态

$4F_{3/2}$

$$\mu_J = g_J \sqrt{J(J+1)} \mu_B = 0.7746 \mu_B \quad \mu_J^z = g_J m_J \mu_B = 0.6 \mu_B$$

$$\mu_S = 2 \sqrt{S(S+1)} \mu_B = 3.87 \mu_B \quad \mu_S^z = g_S m_S \mu_B = 3 \mu_B$$

与实验值相比, μ_S 更接近, 这是因为受到晶场作用, 轨道角动量被冻结的缘故, 只有自旋磁矩起作用。

离子磁距计算与实验的比较

表 1 三价镧系离子的有效磁子数 p (接近室温)

离子	组态	基态	$p(\text{计算}) = g[J(J+1)]^{\frac{1}{2}}$	$p(\text{实验})$ 近似结果
Ce ³⁺	4f ¹ 5s ² p ⁶ (5d ¹ 6s ²)	² F _{5/2}	2.54	2.4
Pr ³⁺	4f ² 5s ² p ⁶	³ H ₄	3.58	3.5
Nd ³⁺	4f ³ 5s ² p ⁶	⁴ I _{9/2}	3.62	3.5
Pm ³⁺	4f ⁴ 5s ² p ⁶	⁵ I ₄	2.68	—
Sm ³⁺	4f ⁵ 5s ² p ⁶	⁶ H _{5/2}	0.84	1.5
Eu ³⁺	4f ⁶ 5s ² p ⁶	⁷ F ₀	0	3.4
Gd ³⁺	4f ⁷ 5s ² p ⁶	⁸ S _{7/2}	7.94	8.0
Tb ³⁺	4f ⁸ 5s ² p ⁶	⁷ F ₆	9.72	9.5
Dy ³⁺	4f ⁹ 5s ² p ⁶	⁶ H _{15/2}	10.63	10.6
Ho ³⁺	4f ¹⁰ 5s ² p ⁶	⁵ I ₈	10.60	10.4
Er ³⁺	4f ¹¹ 5s ² p ⁶	⁴ I _{15/2}	9.59	9.5
Tm ³⁺	4f ¹² 5s ² p ⁶	³ H ₆	7.57	7.3
Yb ³⁺	4f ¹³ 5s ² p ⁶	² F _{7/2}	4.54	4.5

黄昆《固体物理学》p403-404

4f元素：与总J符合不错。

表 铁族离子的有效磁子数

离子	组态	基态	$p(\text{计算}) = g[J(J+1)]^{\frac{1}{2}}$	$p(\text{计算}) = 2[S(S+1)]^{\frac{1}{2}}$	$p(\text{实验})^{\text{①}}$
Ti ³⁺ , V ⁴⁺	3d ¹	² D _{3/2}	1.55	1.73	1.8
V ³⁺	3d ²	³ F ₂	1.63	2.83	2.8
Cr ³⁺ , V ²⁺	3d ³	⁴ F _{3/2}	0.77	3.87	3.8
Mn ³⁺ , Cr ²⁺	3d ⁴	⁵ D ₀	0	4.90	5.4
Fe ³⁺ , Mn ²⁺	3d ⁵	⁶ S _{5/2}	5.92	5.92	5.9
Fe ²⁺	3d ⁶	⁵ D ₄	6.70	4.90	5.4
Co ²⁺	3d ⁷	⁴ F _{9/2}	6.63	3.87	4.8
Ni ²⁺	3d ⁸	³ F ₄	5.59	2.83	3.2
Cu ²⁺	3d ⁹	² D _{5/2}	3.55	1.73	1.9

① 表示代表性数值。

姜书p34 有相同表

3d元素：只是自旋S磁矩的贡献

这不是自由原/离子！

2-2表(a) 遷移金属元素(イオン)の3dⁿ電子配置によるスピンと軌道の関係

$$\mu_{\text{eff}}(S) = 2\sqrt{S(S+1)} \quad : \quad \text{スピンによる有効磁子数}$$

$m_x \backslash n$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2	—	↑	↑	↑	↑	↑	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓
1	—	—	↑	↑	↑	↑	↑	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓
0	—	—	—	↑	↑	↑	↑	↑	↑↓	↑↓	↑↓
-1	—	—	—	—	↑	↑	↑	↑	↑	↑↓	↑↓
-2	—	—	—	—	—	↑	↑	↑	↑	↑	↑↓
$S = \sum s_x$	—	1/2	1	3/2	2	5/2	2	3/2	1	1/2	—
$L = \sum m_x$	0	2	3	3	2	0	2	3	3	2	0
$J = L \pm S$	0	3/2	2	3/2	0	5/2	4	9/2	4	5/2	0
$\mu_{\text{eff}}(S)$	—	1.732	2.828	3.873	4.899	5.916	4.899	3.873	2.828	1.732	—
基底状態	¹ S ₀	² D _{3/2}	³ F ₂	⁴ F _{3/2}	⁵ D ₀	⁶ S _{5/2}	⁵ D ₄	⁴ F _{9/2}	³ F ₄	² D _{5/2}	¹ S ₀
$\lambda(\text{cm}^{-1})$	—	154	104	87	57	—	-100	-180	-335	-850	—
イオン	Sc ³⁺	Ti ³⁺	V ³⁺	Cr ³⁺	Cr ²⁺	Fe ³⁺	Fe ²⁺	Co ²⁺	Ni ²⁺	Cu ²⁺	Zn ²⁺
	Ti ⁴⁺	V ⁴⁺	Ti ²⁺	Mn ⁴⁺	Mn ³⁺	Mn ²⁺	Co ³⁺				

3d⁴のJ为零, 但有4μ_B磁矩, 因为3d电子轨道角动量被冻结

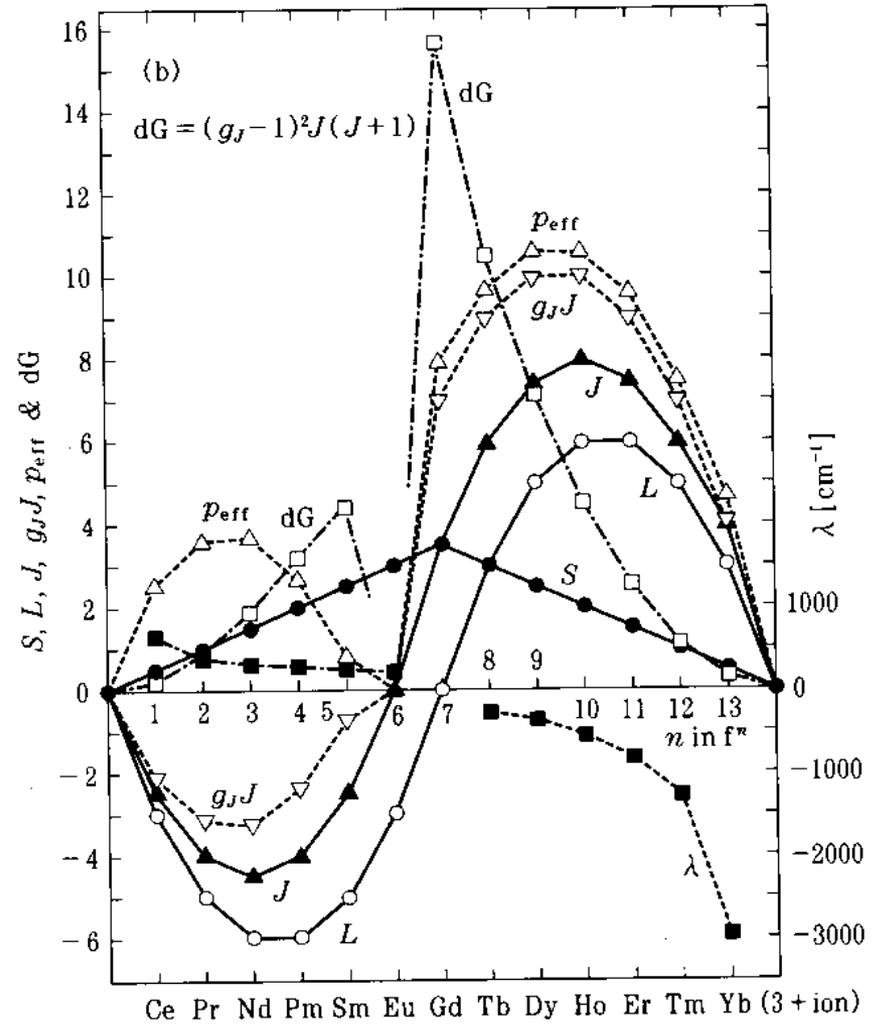
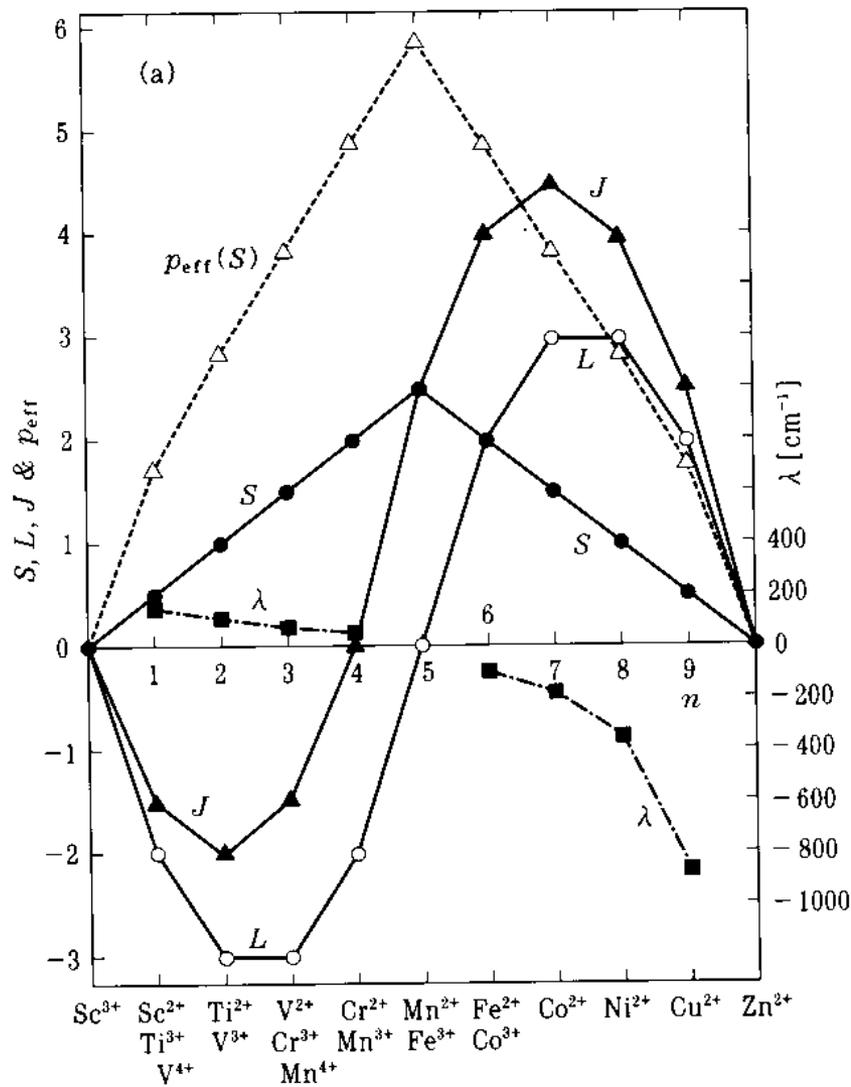
2-2表 (b) 希土類元素 R^{3+} の $4f^n$ 電子配位におけるスピンと軌道の関係。
Landé 因子 g_J と de Gennes 因子 $dG = (g_J - 1)^2 J(J + 1)$.

$m_x \backslash n$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
3	—	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓
2	—	—	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓
1	—	—	—	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓
0	—	—	—	—	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓
-1	—	—	—	—	—	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑↓	↑↓	↑↓
-2	—	—	—	—	—	—	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑↓	↑↓
-3	—	—	—	—	—	—	—	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑↓
$S = \sum s_x$	0	1/2	1	3/2	2	5/2	3	7/2	3	5/2	2	3/2	1	1/2	0
$L = \sum m_x$	0	3	5	6	6	5	3	0	3	5	6	6	5	3	0
$J = L + S $	0	5/2	4	9/2	4	5/2	0	7/2	6	15/2	8	15/2	6	7/2	0
p_{eff}	—	2.54	3.58	3.62	2.68	0.845	—	7.94	9.72	10.63	10.58	9.59	7.55	4.54	—
g_J	—	6/7	4/5	8/11	3/5	2/7	—	2	3/2	4/3	5/4	6/5	7/6	8/7	—
$g_J J$	—	15/7	16/5	36/11	12/5	5/7	—	7	9	10	10	9	7	4	—
dG	—	5/28	4/5	81/44	16/5	125/28	—	63/4	21/2	85/12	9/2	51/20	7/6	9/28	—
$\lambda(\text{cm}^{-1})$	0	640	360	290	260	240	230		-290	-380	-520	-820	-1290	-2940	—
基底状態	1S_0	$^3F_{3/2}$	3H_4	$^4I_{3/2}$	5L_4	$^6H_{5/2}$	7F_0	$^8S_{7/2}$	7F_6	$^6H_{15/2}$	5I_4	$^4I_{15/2}$	3H_6	$^2F_{7/2}$	1S_0
イオン	La^{3+}	Ce^{3+}	Pr^{3+}	Nd^{3+}	Pm^{3+}	Sm^{3+}	Eu^{3+}	Gd^{3+}	Tb^{3+}	Dy^{3+}	Ho^{3+}	Er^{3+}	Tm^{3+}	Yb^{3+}	Lu^{3+}
							(Sm^{2+})	(Eu^{2+})							

$$1 \text{ cm}^{-1} = 1.24 \times 10^{-4} \text{ eV}$$

S关联 (+) 晶場効果 (-)

J关联



2-4 図 (a) 遷移金属元素(イオン)の d^n 配位における S, L, J と p_{eff}

(S : スピン角運動量, L : 軌道角運動量, J : 全角運動量, p_{eff} : 有効磁子数, λ : スピン-軌道結合定数)

(b) 希土類元素 f^n 配位における S, L, J, p_{eff} (λ : (a)と同じ, g_J : ランデの g 因子, dG : de Gennes 因子)

习题

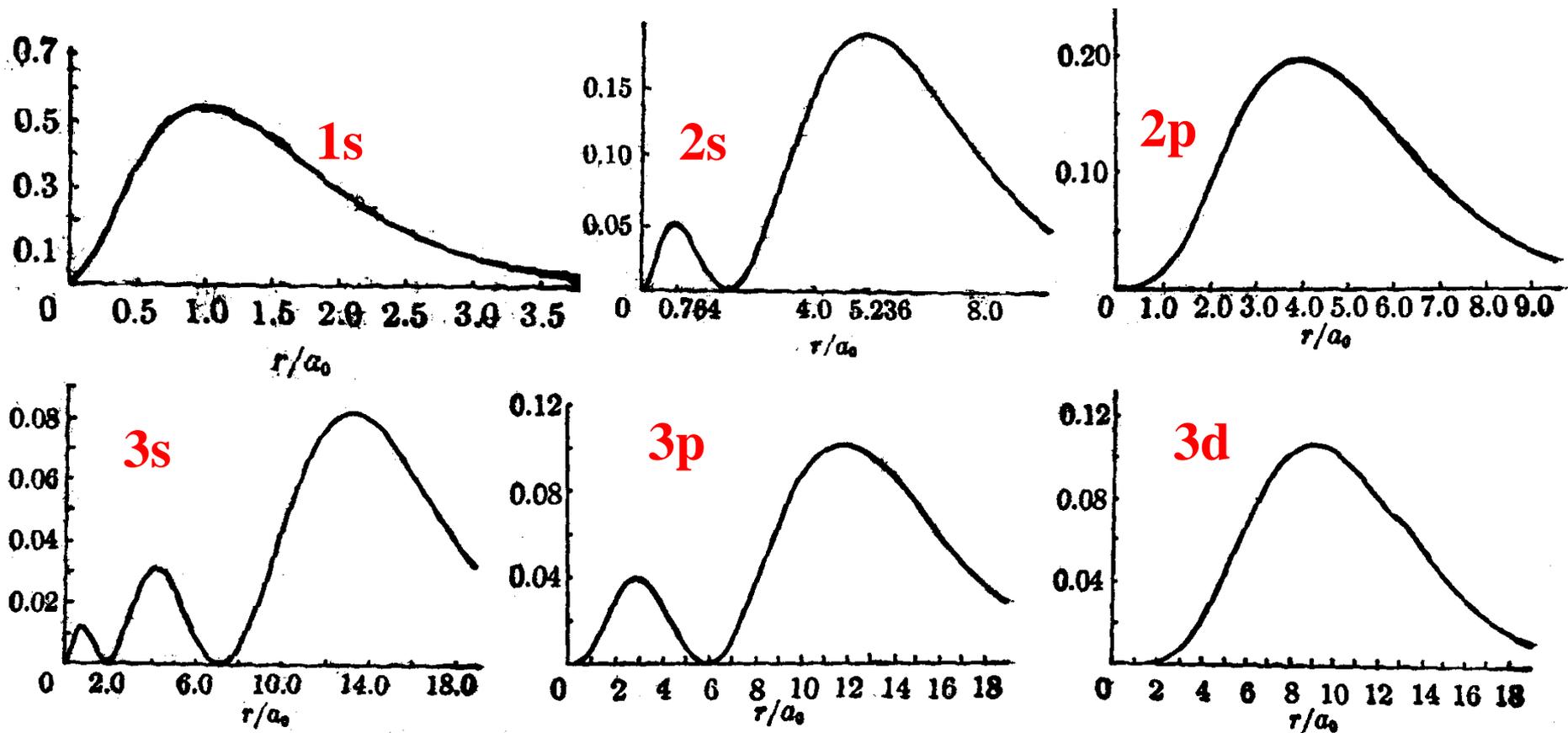
1.1 列表给出主要磁学量的国际单位和高斯单位，并给出它们之间的换算关系。铁磁金属Ni的室温饱和磁化强度常被写为 $M_S \cong 52 \text{ emu/g}$ ，请换算为标准形式。

1.2 按照洪德法则计算下列自由离子的磁距，
 Cr^{+3} , Fe^{+2} , Nd^{+3} , Tb^{+3}

1.3 证明:

$$\begin{aligned}\mu_J &= g_J \sqrt{J(J+1)} \mu_B \\ g_J &= 1 + \frac{J(J+1) + S(S+1) - L(L+1)}{2J(J+1)} \\ &= \frac{3}{2} + \frac{S(S+1) - L(L+1)}{2J(J+1)}\end{aligned}$$

轨道分布



氢原子核外电子的D函数分布