

§4 核的基态特性之二

1. 原子核自旋

- 1924年，在G.E.Uhlenbeck和S.A.Goudsmit提出电子自旋之前，W.Pauli就提出原子核整体应具有自旋角动量 \vec{P}_I 。
- 1932年发现中子以后，实验发现：中子和质子都具有自旋为 $\hbar/2$ 。
- 原子核的自旋角动量为构成它的中子和质子的轨道角动量和自旋角动量的矢量和。

- 原子核基态自旋的规律：

偶偶 (e-e) 核的自旋为0

奇偶 (e-o; o-e) 核的自旋为半整数

奇奇 (o-o) 核的自旋为整数

- 原子的总角动量 $\vec{P}_F = \vec{P}_I + \vec{P}_J$;

$$F = I + J, I + J - 1, \dots, |I - J|;$$

$$P_I = \sqrt{I(I+1)}\hbar;$$

$$P_{Iz} = m_I \hbar; \quad m_I = I, I - 1, \dots, -I$$

- I 称为核自旋量子数。

原子核物理概论 §4 核的基态特性之二

原子核	I	μ'_I (核磁子)
n	1/2	-1.91280
^1H	1/2	+2.79255
^2H	1	+0.857348
^4He	0	0
^6Li	1	+0.82189
^7Li	3/2	+3.25586
^9Be	3/2	-1.1774

原子核物理概论

§ 4 核的基态特性之二

原子核	I	μ'_I (核磁子)
^{14}N	1	+0.40365
^{15}N	1/2	- 0.28299
^{20}Ne	0	0
^{23}Na	3/2	+2.21711
^{39}K	3/2	+0.309
^{40}K	4	-1.291
^{41}K	3/2	+0.215

2.核子磁矩

电子

$$\vec{\mu}_{e,s} = g_{e,s} \left(\frac{e}{2m_e} \right) \vec{P}_{e,s}; \quad \vec{\mu}_{e,l} = g_{e,l} \left(\frac{e}{2m_e} \right) \vec{P}_{e,l}$$

Lande因子

$$g_{e,s} = -2; \quad g_{e,l} = -1; \quad \mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e}$$

Bohr磁子

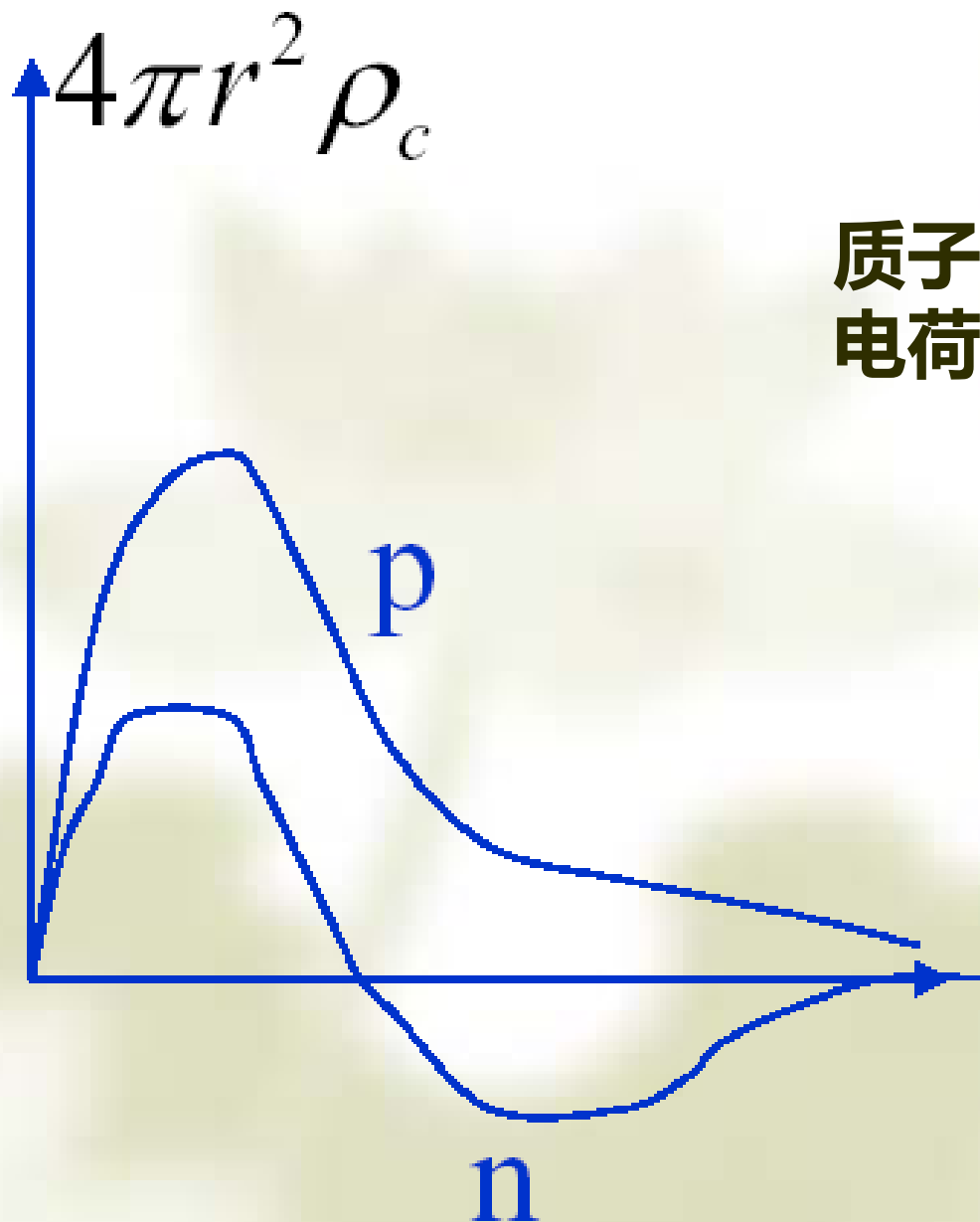
质子

$$\vec{\mu}_{p,s} = g_{p,s} \left(\frac{e}{2m_N} \right) \vec{P}_{p,s}; \quad \vec{\mu}_{p,l} = g_{p,l} \left(\frac{e}{2m_N} \right) \vec{P}_{p,l}$$

核磁子

$$g_{e,s} = +5.6; \quad g_{e,l} = +1; \quad \mu_N = \frac{e\hbar}{2m_N}$$

核子质量



质子和中子的
电荷密度分布

中子

$$\vec{\mu}_{n,s} = g_{n,s} \left(\frac{e}{2m_N} \right) \vec{P}_{n,s}; \quad \vec{\mu}_{n,l} = g_{n,l} \left(\frac{e}{2m_N} \right) \vec{P}_{n,l}$$

$$g_{n,s} = -3.82; \quad g_{n,l} = 0$$

核磁子远小于Bohr磁子，可见原子核的磁矩比电子的磁矩小很多，因此产生的超精细结构谱线也比精细结构谱线间距小很多。

注意

通常测量的结果都是磁矩在某一方向投影的最大值，并以此来衡量磁矩的大小。

3. 原子核磁矩

核磁矩就是质子的轨道磁矩以及质子和中子的自旋磁矩的总和。

$$\vec{\mu}_I = g_I \left(\frac{e}{2m_N} \right) \vec{P}_I$$

$$\mu_I = g_I \sqrt{I(I+1)} \left(\frac{e\hbar}{2m_N} \right) = g_I \sqrt{I(I+1)} \mu_N$$

$$\mu_{IZ} = g_I m_I \mu_N$$

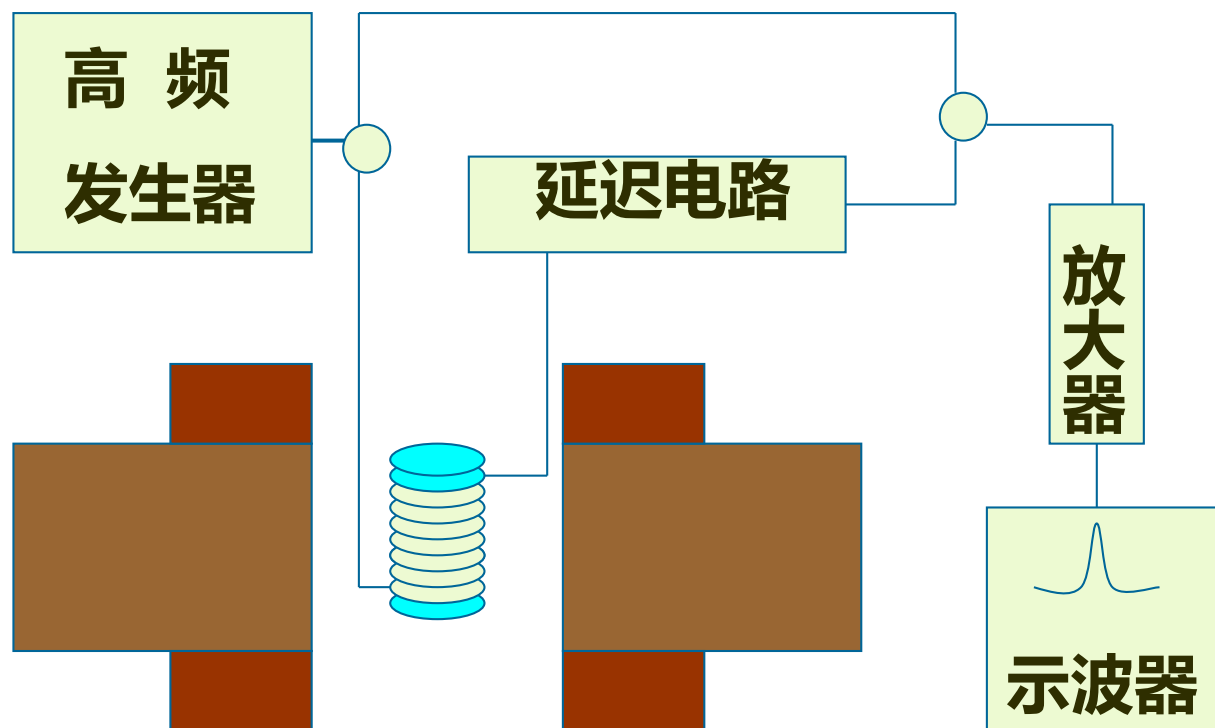
g_I 因子 的数值不能通过公式计算,只能由实验测得。

测量原子核磁矩的重要方法之一是核磁共振

$$U = -\vec{\mu}_I \cdot \vec{B}$$
$$= -g_I m_I \mu_N B$$

$$\Delta U = g_I \mu_N B$$
$$= h \nu$$

$$g_I = \frac{h \nu}{\mu_N B}$$



4. 原子核电四极矩

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{\rho}{R} dV = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{\rho}{\sqrt{z_0^2 + r^2 - 2z_0 r \cos \theta}} dV$$

$$= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{l=0}^{\infty} \frac{1}{z_0^{l+1}} \int \rho r^l P_l(\cos \theta) dV$$

$$= \frac{1}{4\pi\epsilon_0 z_0} \int \rho dV + \frac{1}{4\pi\epsilon_0 z_0^2} \int \rho r \cos \theta dV$$

$$+ \frac{1}{2 \cdot 4\pi\epsilon_0 z_0^3} \int \rho r^2 (3 \cos^2 \theta - 1) dV + \dots$$

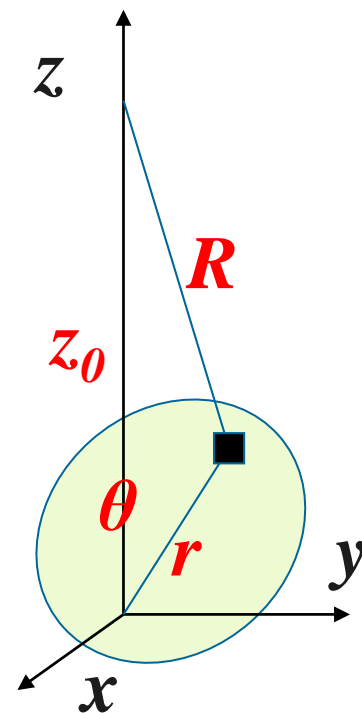
$$= \frac{Ze}{4\pi\epsilon_0 z_0} + \frac{1}{4\pi\epsilon_0 z_0^2} \int \rho z dV + \frac{1}{2 \cdot 4\pi\epsilon_0 z_0^3} \int \rho (3z^2 - r^2) dV + \dots$$

点电荷

偶极矩

四极矩

八极矩



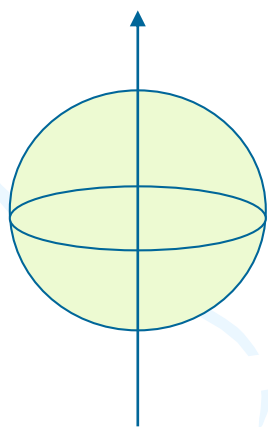
原子核物理概论 §4 核的基态特性之二

理论和实验都证明，原子核的电偶极矩等于零。其电四极矩的定义为（量纲？单位？）

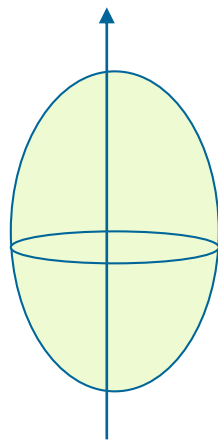
$$Q = \frac{1}{e} \int \rho(3z^2 - r^2) dV$$

假设原子核为一均匀带电的旋转椭球，作为对称轴的半轴为 c ，另外二个半轴均为 a ，则

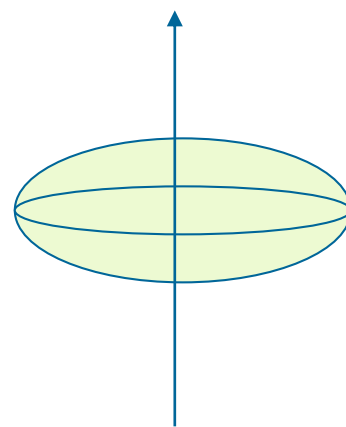
$$Q = \frac{2}{5} Z(c^2 - a^2)$$



球形核 $Q=0$



长椭球 $Q>0$



扁椭球 $Q<0$

根据电四极矩 Q 值的大小和符号，可以推知原子核如何偏离球形以及偏离球形的程度，所以说电四极矩描写了原子核的形状变化。

另外，实验上发现电四极矩 Q 值随核子数有着周期性的变化，这正是建立原子核壳模型的重要依据之一。

5. 原子核宇称

- **宇称**是表示描述微观粒子体系状态的波函数在**空间反演**变换下的奇偶性的物理量。
- $P\psi(r) = \psi(-r)$, $P^2\psi(r) = \pi^2\psi(r)$, $\pi = \pm 1$
- 核子的宇称

$$\psi(r, \theta, \varphi) = NR(r)P_l^m(\cos \theta)e^{im\varphi}$$

$$P_l^m(x) = \frac{1}{2^l l!} (1-x^2)^{\frac{m}{2}} \frac{d^{l+m}}{dx^{l+m}} (x^2-1)^l$$

- 原子核的宇称

$$\pi_N = \prod_{i=1}^A (-1)^{l_i} \prod_{i=1}^A \pi_i$$

宇称守恒:

孤立体系的宇称不会从偶性变为奇性或从奇性变为偶性。

弱相互作用中宇称不守恒:

1956年, 李政道和杨振宁提出后, 经吴健雄用 β 衰变的实验加以证实, 是近代物理学史中的一个重大突破。实验上发现原子核总是具有确定的宇称, 不是奇, 就是偶。而且 N , Z 都为偶数的核, 它基态的宇称总是偶的。原子核激发态的宇称既有和基态宇称相同的, 也有相反的。

6. 原子核统计性

**A为奇数的原子核是费米子，
遵从Fermi-Dirac统计。**

**A为偶数的原子核是玻色子，
遵从Bose-Einstein统计。**

※氮核不可能由质子和电子组成，由统计性判断：

A=14是玻色子 (由质子和中子组成)

A=21是费米子 (由质子和电子组成)

7.超精细结构

原子核有一定的大小，其电荷有一个分布（电四极矩），它还有自旋角动量和磁矩，这些性质对核外电子的运动必然要产生影响，从而使原子光谱进一步分裂，其分裂程度比精细结构还要小3个数量级，故称为超精细结构，它的起因称为超精细相互作用。

视原子核为点电荷 Ze ，得到原子光谱的粗结构。

考虑电子的自旋-轨道作用后，得到原子光谱的精细结构。

考虑核的自旋、磁矩和电四极矩，得到原子光谱的超精细结构。

原子核物理概论 §4 核的基态特性之二

原子核的角动量可以从原子光谱的超精细结构，或从分子光谱测得。例如，当用分辨本领更高的光谱仪观察钠的光谱时，会发现钠主线系第一条谱线D双线的 D_1 线(5895.93 \AA)由相距为0.023埃的两条线组成， D_2 线(5889.96 \AA)由相距为0.021埃的两条线组成。这就是原子光谱的超精细结构。

