

# 放射物理与防护

肇庆医学高等专科学校

梁淼林

2020/7/18



## 第二节 原子核结构

学习目标：

- 1、掌握原子核的结构
- 2、熟悉相对论公式和原子核的结合能
- 3、了解原子核的自旋和核磁矩







# 一 原子核组成

## 1、原子核



呈电中性

原子核内的质子数=核外电子数

一个氯原子有17个质子、  
18个中子和17个电子。

www.ks5u.com



## 2、原子符号 ${}^A_ZX$ 核素(nuclide)

式中：X是元素的化学符号；  
A是质量数(mass number)，  
定义为核子(质子和中子)的数目；  
Z是原子序数，即核内的质子数。

例如： ${}_1^1H$ 代表氢原子或核素

${}_2^4He$ 代表氦原子或核素

质量数A=质子数Z(原子序数)+中子数



### 3、 原子分类

(1)同位素(isotope): 有相同的质子数而中子数不同的原子

(2)同中子异核素: 有相同的中子数而质子数不同的原子

(3)同量异位素(isobar): 有相同的核子数而质子数不同的原子

(4)同质异能素(isomer): 有相同的质子数和中子数而, 只是能量状态不同

例如: $^{131m}_{54}\text{Xe}$  ( $m$ 代表高激发态)是 $^{131}_{54}\text{Xe}$ 的同质异能素

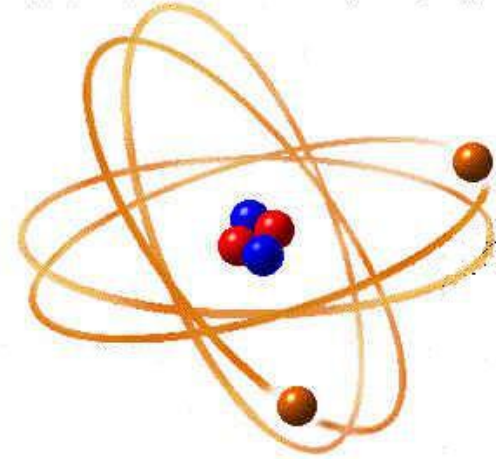




## 4、原子核的稳定性

原子核 { 稳定的原子核  
不稳定的放射性原子核

原子核的稳定性与核内质子数和中子数之间的比例有关



轻核：中子与质子之比为1：1，最稳定

原子序数增加，该比值也增加

高原子序数的重核：中子与质子之比近似为1.3：10

当中子与质子之比略高于或低于稳定的比值时，核一般是放射性的





原子核的稳定性与核内的质子数和中子数的奇偶性有关

| 质子数 | 中子数 | 核的稳定性       |
|-----|-----|-------------|
| 偶   | 偶   | 最稳定，稳定核素最多  |
| 偶   | 奇   | 次之          |
| 奇   | 偶   |             |
| 奇   | 奇   | 最不稳定，稳定核素最少 |





## 二、原子核的结合能

### (一) 几个有关的相对论公式

#### 1. 质量与速度的关系 质点质量的基本公式

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (1-14)$$

式中： $m_0$ 是静止质量， $m$ 是运动质量  
 $v$ 是运动速度， $c$ 是光速

讨论：当  $v \ll c$  时  $m = m_0$

结论：宏观低速物体运动时，运动质量等于静止质量





## 2. 动量与速度的关系

$$p = mv = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (1-15)$$

## 3. 质量与能量的关系

$$F = \frac{dp}{dt} = \frac{d(mv)}{dt}$$

当这个力作用在物体上时，物体获得的动能为

$$E_k = (m - m_0)c^2 = \Delta mc^2 \quad (1-16)$$

说明：物体的动能等于它在运动中质量的增加量乘以光速的平方





物体的总能量=动能+静止能量

$$E = E_k + m_0 c^2 = (m - m_0) c^2 + m_0 c^2 = m c^2$$

$$E = m c^2 \quad (1-17)$$

结论：一个物体具有 $m$ 的质量，必有 $E=mc^2$ 的能量

当物体的质量改变了 $\Delta m$ 时，必然伴随增加或减少 $\Delta E=\Delta mc^2$ 的能量

质量和能量是不可分割的





## (二) 原子核的结合能

### 1. 质量亏损 (mass defect)

原子核的质量<构成原子核的核子(Z个质子和N个中子)的静止质量总和

$$\begin{aligned}\Delta M &= Zm_p + Nm_n - M({}_Z^AX) \\ &= ZM({}_1^1H) + Nm_n - M({}_Z^AX)\end{aligned}\quad (1-18)$$

式中:  $M({}_1^1H)$  是氢原子质量

$m_n$  是中子质量

$M({}_Z^AX)$  是原子质量





## 2. 原子核的**结合能** $E_B$

由自由状态的单个核子结合成原子核时，由于质量亏损所释放出来的能量

$$E_B = \Delta M c^2$$

## 3. 原子的质量单位(1u)

规定：自然界中碳最丰富的同位素 $^{12}_6\text{C}$ 原子质量的1/12为原子质量单位

$$1u = \frac{1}{12} M(^{12}_6\text{C})$$

$$1u = 1.6605566 \times 10^{-27} \text{ kg}$$





与一个原子质量单位(1u)相联系的能量

$$\begin{aligned}(1u)c^2 &= (1.6605566 \times 10^{-27}) \times (2.99792 \times 10^8)^2 J \\ &= 1.649224 \times 10^{-10} J \\ &= 931 MeV\end{aligned}$$

取  $1eV = 1.6021892 \times 10^{-19} J$

原子核的结合能 $E_B$ 的数值为

$$E_B = [ZM({}_1^1H) + Nm_n - M({}_Z^AX)] \times 931 MeV \quad (1-19)$$

如果将一个原子核拆散，使组成它的核子成为自由状态的核子，外界要作数量等于 $E_B$ 能量的功







#### 4、平均结合能 $E_b$ (average binding energy)

$$E_b = \frac{E_B}{A} = \frac{\Delta Mc^2}{A} \quad (1-20)$$

表示从核内取出一个核子平均需要从外界获得的能量，数值等于原子核的结合能与核内的总核子数**A**的比值





### 三、原子核能级

原子核的能量是量子化的，核只能够存在于一些离散的状态，每一个状态具有确定的能量

当一个核从高能级跃迁到低能级时，发出一个频率在电磁波谱 $\gamma$ 射线区内的光子





## 四、原子核自旋与核磁矩

### 1. 原子核的自旋 (nuclear spin)

大多数原子核具有自旋性。核自旋情况由核的自旋量子数 (spin quantum number)  $I$  来表征  
 $I$  是原子核的固有特性，不同的核具有不同的  $I$  值

$I$  只能取整数或半整数，即  $I$  只能取  $0, 1/2, 2, 3/2, \dots$

$I$  的取值与构成原子核的质子数和中子数有关





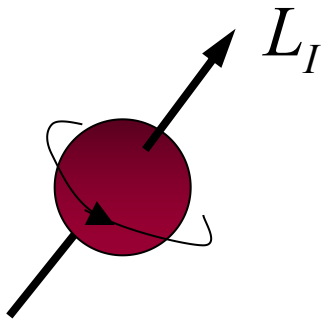
## 讨论：I的取值与核内质子数和中子数的关系

| 原子核 | 质子数 | 中子数 | 自旋量子数I                       | 核                                                   |
|-----|-----|-----|------------------------------|-----------------------------------------------------|
| 偶偶核 | 偶数  | 偶数  | $I=0$ ，没有自旋                  | $^{12}_6C, ^{16}_8O, ^{32}_{16}S$                   |
| 奇偶核 | 偶数  | 奇数  | $I=1/2$ ，有自旋                 | $^1_1H, ^{13}_6C, ^{31}_{15}P$                      |
|     | 奇数  | 偶数  | $I=3/2$ ，有自旋<br>$I=5/2$ ，有自旋 | $^{11}_5B, ^{33}_{16}S, ^{35}_{17}Cl$<br>$^{17}_8O$ |
| 奇奇核 | 奇数  | 奇数  | $I=1$ ，有自旋                   | $^2_1H, ^{14}_7N$                                   |
|     |     |     | $I=3$ ，有自旋                   | $^{12}_5B$                                          |



## (1).原子核的自旋角动量 $L_I$

原子核的自旋运动用自旋角动量 $L_I$ 来描述，  
原子核的自旋角动量习惯上称为自旋(nuclear spin)

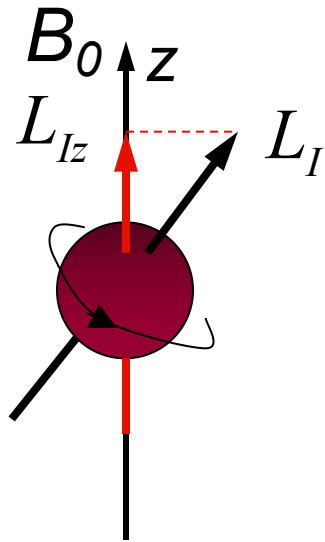


$$L_I = \sqrt{I(I+1)}\hbar \quad (1-21)$$

式中： $I$ 是自旋量子数， $\hbar = \frac{h}{2\pi}$



(2).原子核自旋角动量在空间某一选定方向（例如z轴方向）上的投影也是量子化的，即



$$L_{Iz} = m\hbar \quad (1-22)$$

式中： $m$ 为核的**自旋磁量子数**(magnetic quantum number)，可取值为 $l, l-1, l-2, \dots, -l+1, -l$ ，共有 $2l+1$ 个值

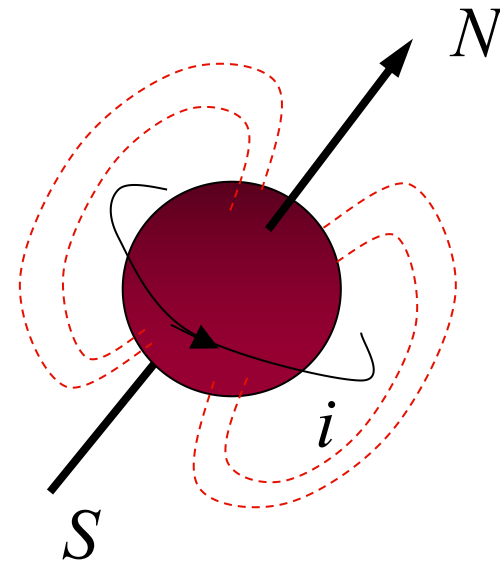
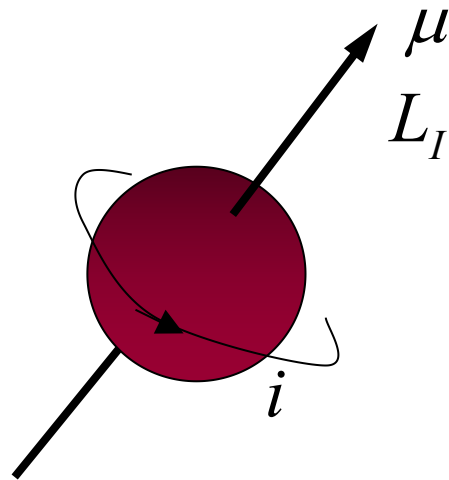






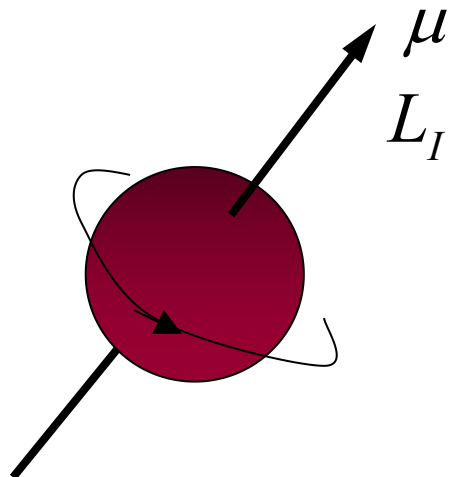
## 2.原子核的磁矩

原子核内的质子是带正电荷的粒子，电荷均匀分布核的表面上， $I \neq 0$ 的自旋核作自旋运动时，电荷也随之绕自旋轴旋转，其效应相当于环形电流，在核的周围产生磁场，核像一个小磁体



## 核磁矩(nuclear magnetic moment) $\mu$

核磁矩矢量  $\vec{\mu}$  与核角动量矢量  $\vec{L}_I$  成正比，即

A diagram of a nucleus represented as a dark red sphere. A curved arrow around the sphere indicates its spin. A straight arrow points from the center of the sphere, labeled with  $L_I$  and  $\mu$  at its tip, representing the nuclear angular momentum and magnetic moment vectors respectively.
$$\mu = g \frac{e}{2m_p} L_I \quad (1-23)$$

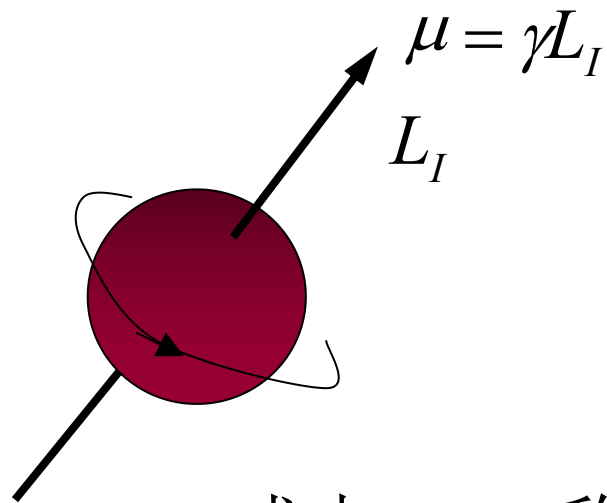
式中： $m_p$ 为质子质量

$g$ 为朗德因子(Landeg factor)  
或称为原子核的 $g$ 因子( $g$ -factor)  
不同的核有不同的 $g$ 因子



由式 (1-23)  $\mu = g \frac{e}{2m_p} L_I$  得

磁旋比  $\gamma = \frac{\mu}{L_I} = g \frac{e}{2m_p}$



$$\mu = \gamma L_I \quad (1-24)$$

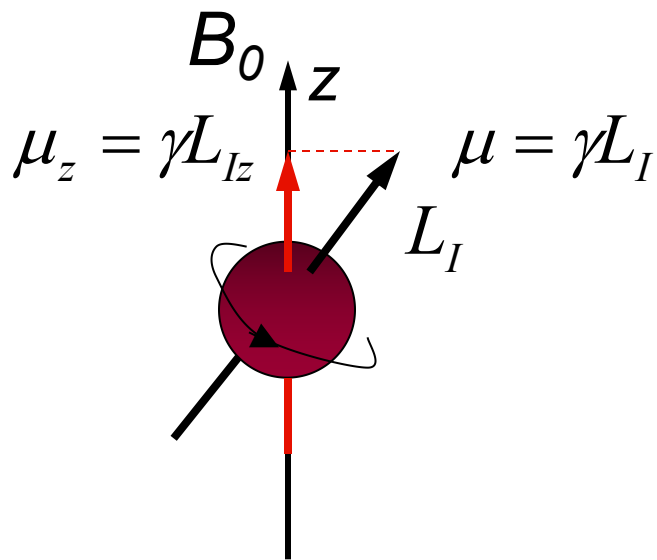
$$\gamma = g \frac{e}{2m_p} \quad (1-25)$$

式中：  $\gamma$  称为磁旋比，是一个特征量，取决于原子核的内部结构和特性



核磁矩在 $z$ 轴方向（外磁场 $B_0$ 方向）的投影为

$$\mu_z = \gamma L_{Iz} = \gamma m \hbar \quad (1-26)$$



式中： $m$ 为核自旋磁量子数  
 $\gamma$ 为核磁旋比

因此， $\mu_z$ 也是量子化的，可取值为 $l, l-1, l-2, \dots, -l+1, -l$ ，共有 $2l+1$ 个可能的取值

