

大学物理

University Physics

华中科技大学物理学院

王宁

ningwang@hust.edu.cn

上节回顾：四个量子数

原子中电子的状态应由四个量子数来决定

$$E_n = -\frac{me^4}{8\varepsilon_0^2 h^2} \frac{1}{n^2}$$

n ：主量子数

$$L = \sqrt{\ell(\ell + 1)}\hbar$$

ℓ ：角量子数

$$L_z = m_\ell \hbar$$

m_ℓ ：轨道磁量子数

$$L_{sz} = m_s \hbar$$

m_s ：自旋磁量子数

每一组量子数(n, ℓ, m_ℓ, m_s)将决定电子的一个状态

电子的波函数：

$$\psi_{n\ell m}(r, \theta, \varphi) = R_{n\ell}(r)Y_{\ell m}(\theta, \varphi)\chi_{m_s}$$

电子自旋波函数

第八节 原子的电子壳层结构

Electron Shell Structures of the atom

一、多电子原子体系电子状态的描述

多电子原子中核外电子的运动状态可用四个量子数 n, l, m_l, m_s 来描述。

电子能量与主量子数 n 和角量子数 l 有关。

二、原子的电子壳层结构

主量子数相同的电子分布在同一壳层上~主壳层

n	1	2	3	4	5	6	7
主壳层名称	<i>K</i>	<i>L</i>	<i>M</i>	<i>N</i>	<i>O</i>	<i>P</i>	<i>Q</i>

同一壳层上，电子的能量基本相同，但 l 不同略有差异

同一角量子数 l 的电子组成一个支壳层

l	0	1	2	3	4	5	6
支壳层名称	s	p	d	e	f	g	h

三、电子的分布准则及规律

每一主壳层和支壳层上电子如何分布及分布多少由两个原理确定。

1. 泡利不相容原理：

在原子中，不可能有四个量子数 n, l, m_l, m_s 完全相同的两个或两个以上的电子。



Wolfgang Pauli
1900-1958
1945 Nobel Prize

如**基态**氢原子： $(n, l, m_l) = (1, 0, 0)$

考虑电子自旋量子数，其量子态为： $(n, l, m_l, m_s) = \begin{cases} (1, 0, 0, +\frac{1}{2}) \\ (1, 0, 0, -\frac{1}{2}) \end{cases}$

问：若氢原子处在**第一激发态**？

泡利不相容原理决定了壳层中最多允许的电子数：

某支壳层 l 中最多能容纳的电子数为：

$$x_l = 2(2l + 1)$$

主壳层 n 中最多能容纳的电子数为：

$$Z_n = \sum_{l=0}^{n-1} 2(2l + 1) = 2n^2$$

N_n	<i>s</i>	<i>p</i>	<i>d</i>	<i>f</i>	N
32	$4s^2$	$4p^6$	$4d^{10}$	$4f^{14}$	
18	$3s^2$	$3p^6$	$3d^{10}$		<i>M</i>
8	$2s^2$	$2p^6$			<i>L</i>
2	$1s^2$				<i>K</i>

$$\begin{aligned}
 n=4 & \left\{ \begin{array}{ll} l=0 & 4s^2 \\ l=1 & 4p^6 \\ l=2 & 4d^{10} \\ l=3 & 4f^{14} \end{array} \right. \\
 n=3 & \left\{ \begin{array}{ll} l=0 & 3s^2 \\ l=1 & 3p^6 \\ l=2 & 3d^{10} \end{array} \right. \\
 n=2 & \left\{ \begin{array}{ll} l=0 & 2s^2 \\ l=1 & 2p^6 \end{array} \right. \\
 n=1 & \quad l=0 \quad 1s^2
 \end{aligned}$$

电子组态

数字表示壳层的 n 值，其后的字母是 n 壳层中次壳层的符号，指数表示在该次壳层中的电子数。

2. 能量最小原理:

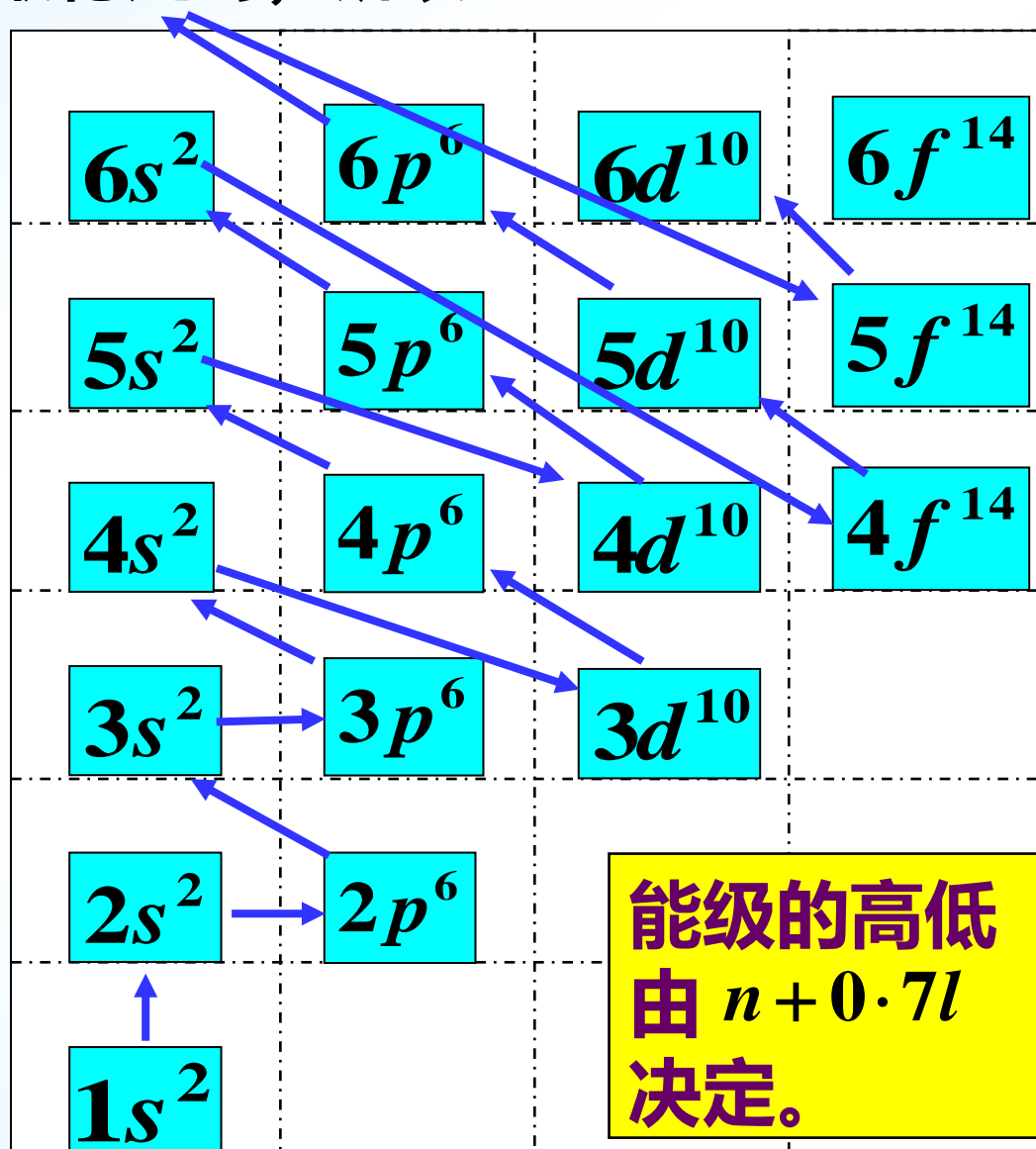
由于能量最低的状态总是最稳定的, 所以:

电子填充壳层的次序, 总是每个电子趋向于占有最低的能级。

主量子数低, 离核近的壳层首先被电子填满。

能级高低的次序与主壳层的次序并不完全一致。

有时 n 较小的壳层未充满, n 较大的壳层上却有电子填入。



例：比较4s和3d的能级大小

$$4s \longrightarrow n + 0.7l = 4 + 0.7 \times 0 = 4$$

$$3d \longrightarrow n + 0.7l = 3 + 0.7 \times 2 = 4.4$$

4s的能量较小，电子首先填入4s态。

English-Chinese Periodic Table of Elements 英漢元素周期表

1 / Ia																		18 / VIIa																	
1 H hydrogen 1.0079 [1s ¹]																		2 He helium 4.0026 1s ²																	
2 / IIa																13 / IIIa		14 / IVa		15 / Va		16 / VIa		17 / VIIa											
3 Li lithium 6.941 [He] 2s ¹		4 Be beryllium 9.0122 [He] 2s ²		atomic num 元素 symbol element name atomic weight electron configuration												5 B boron 10.811 [He] 2s ² 2p ¹		6 C carbon 12.011 [He] 2s ² 2p ²		7 N nitrogen 14.007 [He] 2s ² 2p ³		8 O oxygen 15.999 [He] 2s ² 2p ⁴		9 F fluorine 18.998 [He] 2s ² 2p ⁵		10 Ne neon 20.180 [He] 2s ² 2p ⁶									
11 Na sodium 22.990 [Ne] 3s ¹		12 Mg magnesium 24.305 [Ne] 3s ²														13 Al aluminum 26.982 [Ne] 3s ² 3p ¹		14 Si silicon 28.086 [Ne] 3s ² 3p ²		15 P phosphorus 30.974 [Ne] 3s ² 3p ³		16 S sulfur 32.065 [Ne] 3s ² 3p ⁴		17 Cl chlorine 35.453 [Ne] 3s ² 3p ⁵		18 Ar argon 39.948 [Ne] 3s ² 3p ⁶									
19 K potassium 39.098 [Ar] 4s ¹		20 Ca calcium 40.078 [Ar] 4s ²		21 Sc scandium 44.956 [Ar] 3d ¹ 4s ²		22 Ti titanium 47.867 [Ar] 3d ² 4s ²		23 V vanadium 50.942 [Ar] 3d ³ 4s ²		24 Cr chromium 51.996 [Ar] 3d ⁵ 4s ¹		25 Mn manganese 54.938 [Ar] 3d ⁵ 4s ²		26 Fe iron 55.845 [Ar] 3d ⁶ 4s ²		27 Co cobalt 58.933 [Ar] 3d ⁷ 4s ²		28 Ni nickel 58.693 [Ar] 3d ⁸ 4s ²		29 Cu copper 63.546 [Ar] 3d ¹⁰ 4s ¹		30 Zn zinc 65.409 [Ar] 3d ¹⁰ 4s ²		31 Ga gallium 69.723 [Ar] 3d ¹⁰ 4s ² 4p ¹		32 Ge germanium 72.64 [Ar] 3d ¹⁰ 4s ² 4p ²		33 As arsenic 74.922 [Ar] 3d ¹⁰ 4s ² 4p ³		34 Se selenium 78.96 [Ar] 3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁴		35 Br bromine 79.904 [Ar] 3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁵		36 Kr krypton 83.798 [Ar] 3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁶	
37 Rb rubidium 85.468 [Kr] 5s ¹		38 Sr strontium 87.62 [Kr] 5s ²		39 Y yttrium 88.906 [Kr] 4d ¹ 5s ²		40 Zr zirconium 91.224 [Kr] 4d ² 5s ²		41 Nb niobium 92.906 [Kr] 4d ⁴ 5s ¹		42 Mo molybdenum 95.94 [Kr] 4d ⁵ 5s ¹		43 Tc technetium [98] [Kr] 4d ⁵ 5s ²		44 Ru ruthenium 101.07 [Kr] 4d ⁷ 5s ¹		45 Rh rhodium 102.91 [Kr] 4d ⁸ 5s ¹		46 Pd palladium 106.42 [Kr] 4d ¹⁰		47 Ag silver 107.87 [Kr] 4d ¹⁰ 5s ¹		48 Cd cadmium 112.41 [Kr] 4d ¹⁰ 5s ²		49 In indium 114.82 [Kr] 4d ¹⁰ 5s ² 5p ¹		50 Sn tin 118.71 [Kr] 4d ¹⁰ 5s ² 5p ²		51 Sb antimony 121.76 [Kr] 4d ¹⁰ 5s ² 5p ³		52 Te tellurium 127.60 [Kr] 4d ¹⁰ 5s ² 5p ⁴		53 I iodine 126.90 [Kr] 4d ¹⁰ 5s ² 5p ⁵		54 Xe xenon 131.29 [Kr] 4d ¹⁰ 5s ² 5p ⁶	
55 Cs cesium 132.905 [Xe] 6s ¹		56 Ba barium 137.327 [Xe] 6s ²		57 Lu lutetium 174.97 [Xe] 5d ¹ 6s ²		58 Hf hafnium 178.49 [Xe] 5d ² 6s ²		59 Ta tantalum 180.95 [Xe] 5d ³ 6s ²		60 W tungsten 183.84 [Xe] 5d ⁴ 6s ²		61 Re rhenium 186.21 [Xe] 5d ⁵ 6s ²		62 Os osmium 190.23 [Xe] 5d ⁶ 6s ²		63 Ir iridium 192.22 [Xe] 5d ⁷ 6s ²		64 Pt platinum 195.08 [Xe] 5d ⁹ 6s ¹		65 Au gold 196.97 [Xe] 5d ¹⁰ 6s ¹		66 Hg mercury 200.59 [Xe] 5d ¹⁰ 6s ²		67 Tl thallium 204.38 [Xe] 5d ¹⁰ 6s ² 6p ¹		68 Pb lead 207.2 [Xe] 5d ¹⁰ 6s ² 6p ²		69 Bi bismuth 208.98 [Xe] 5d ¹⁰ 6s ² 6p ³		70 Po polonium [209] [Xe] 5d ¹⁰ 6s ² 6p ⁴		71 At astatine [210] [Xe] 5d ¹⁰ 6s ² 6p ⁵		72 Rn radon [222] [Xe] 5d ¹⁰ 6s ² 6p ⁶	
87 Fr francium [223] [Rn] 7s ¹		88 Ra radium [226] [Rn] 7s ²		103 Lr lawrencium [262] [Rn] 5f ¹ 6d ¹ 7s ²		104 Rf rutherfordium [261] [Rn] 5f ¹ 6d ² 7s ²		105 Db dubnium [262] [Rn] 5f ¹ 6d ³ 7s ²		106 Sg seaborgium [266] [Rn] 5f ¹ 6d ⁴ 7s ²		107 Bh bohrium [264] [Rn] 5f ¹ 6d ⁵ 7s ²		108 Hs hassium [277] [Rn] 5f ¹ 6d ⁶ 7s ²		109 Mt meitnerium [268] [Rn] 5f ¹ 6d ⁷ 7s ²		110 Ds darmstadtium [271] [Rn] 5f ¹ 6d ⁸ 7s ²		111 Rg roentgenium [272] [Rn] 5f ¹ 6d ⁹ 7s ²		112 Cn copernicium [285] [Rn] 5f ¹ 6d ¹⁰ 7s ²		113 Uut ununtrium [284] [Rn] 5f ¹ 6d ¹⁰ 7s ² 7p ¹		114 Fl flerovium [289] [Rn] 5f ¹ 6d ¹⁰ 7s ² 7p ²		115 Uup ununpentium [288] [Rn] 5f ¹ 6d ¹⁰ 7s ² 7p ³		116 Lv livermorium [292] [Rn] 5f ¹ 6d ¹⁰ 7s ² 7p ⁴		117 Uus ununseptium [294] [Rn] 5f ¹ 6d ¹⁰ 7s ² 7p ⁵		118 Uuo ununoctium [294] [Rn] 5f ¹ 6d ¹⁰ 7s ² 7p ⁶	
57-70 lanthanoids 鐳系元素		57 La lanthanum 138.91 [Xe] 5d ¹ 6s ²		58 Ce cerium 140.12 [Xe] 5d ¹ 6s ²		59 Pr praseodymium 140.91 [Xe] 5d ¹ 6s ²		60 Nd neodymium 144.24 [Xe] 5d ¹ 6s ²		61 Pm promethium [145] [Xe] 5d ¹ 6s ²		62 Sm samarium 150.36 [Xe] 5d ¹ 6s ²		63 Eu europium 151.96 [Xe] 5d ¹ 6s ²		64 Gd gadolinium 157.25 [Xe] 5d ¹ 6s ²		65 Tb terbium 158.93 [Xe] 5d ¹ 6s ²		66 Dy dysprosium 162.50 [Xe] 5d ¹ 6s ²		67 Ho holmium 164.93 [Xe] 5d ¹ 6s ²		68 Er erbium 167.26 [Xe] 5d ¹ 6s ²		69 Tm thulium 168.93 [Xe] 5d ¹ 6s ²		70 Yb ytterbium 173.04 [Xe] 5d ¹ 6s ²							
89-102 actinoids 鐳系元素		89 Ac actinium [227] [Rn] 7s ²		90 Th thorium 232.04 [Rn] 7s ²		91 Pa protactinium 231.04 [Rn] 7s ²		92 U uranium 238.03 [Rn] 7s ²		93 Np neptunium [237] [Rn] 7s ²		94 Pu plutonium [244] [Rn] 7s ²		95 Am americium [243] [Rn] 7s ²		96 Cm curium [247] [Rn] 7s ²		97 Bk berkelium [247] [Rn] 7s ²		98 Cf californium [251] [Rn] 7s ²		99 Es einsteinium [252] [Rn] 7s ²		100 Fm fermium [257] [Rn] 7s ²		101 Md mendelevium [258] [Rn] 7s ²		102 No nobelium [259] [Rn] 7s ²							

例1. 氢原子中处于 $2p$ 状态的电子。描述其量子态的四个量子数可能取的值为:

(A) $(3, 2, 1, \frac{1}{2})$

(B) $(2, 1, -1, -\frac{1}{2})$

(C) $(2, 0, 0, \frac{1}{2})$

(D) $(1, 0, 0, \frac{1}{2})$

例2. 原子内电子的量子态由 (n, l, m_l, m_s) 四个量子数描述。处于基态的氦原子内两个电子的量子态为 $(1, 0, 0, \frac{1}{2})$ 和 $(1, 0, 0, -\frac{1}{2})$

例3.若角量子数 $l=2$ ，则氢原子中电子的角动量分量 L_z 的可能取值为 $0, \pm\hbar, \pm2\hbar$ 。

例4.原子内电子的量子态由 (n, l, m_l, m_s) 四个量子数描述。当 n, l, m_l 一定时，不同的量子态数目为2；当 n, l 一定时，不同的量子态数目为 $2(2l+1)$ ；当 n 一定时，不同的量子态数目为 $2n^2$ 。

例5.试求 d 支壳层最多能容纳的电子数，并写出这些电子的 m_l 和 m_s 值。

我国量子科技的进展

九章光量子计算机
祖冲之号超导量子计算机

墨子号量子卫星

A satellite with large solar panels is shown orbiting the Earth. The satellite is positioned in the upper right quadrant of the frame, with its solar panels extended. The Earth's horizon is visible in the lower left, showing a blue and green surface. The background is a dark, starry space.

a quantum entangled experiment performed
在这颗卫星上进行的一项

第17章 原子核物理简介

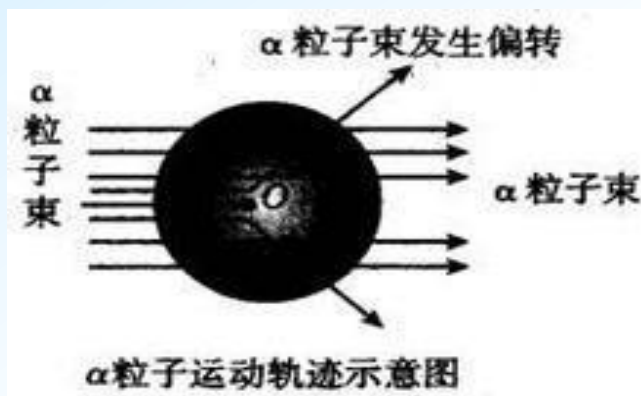
Brief Introduction of Nuclear Physics

基本要求

1. 了解原子核的基本性质;
2. 了解放射性衰变的基本规律并能进行简单计算。

第1节 原子核的结构和基本性质

一、原子核的组成

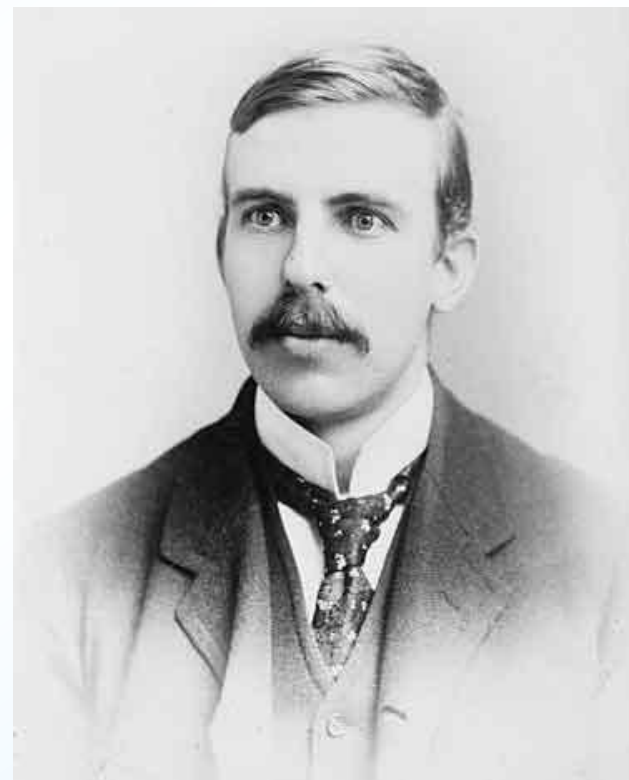


卢瑟福α粒子散射实验

1932年查德威克发现中子，获1935年诺贝尔物理学奖。

原子核由质子(p)和中子(n)组成。

质子和中子称为核子。



Ernest Rutherford

(1871-1937)

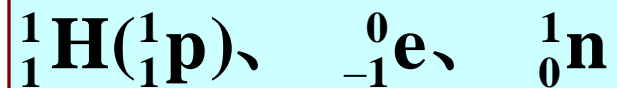
1908年诺贝尔化学奖

二、原子核的电荷和质量

原子核带电量为 $+Ze$ ， Z 为核内质子数，也称为原子核的电荷数，或元素的原子序数。

$\begin{matrix} A \\ Z \end{matrix} X$

X ：元素符号。



Z ：核电荷数（核内质子数）。

A ：核素的质量数（核子数）。 $A = Z + N$

质子质量： $m_p = 1.6726231 \times 10^{-27} \text{kg}$

中子质量： $m_n = 1.6749286 \times 10^{-27} \text{kg}$

定义碳同位素 ${}^{12}\text{C}$ 的质量为 12u 。

“u”原子质量单位： $1\text{u} = 1.660566 \times 10^{-27} \text{kg}$

$m_p = 1.007276 \text{ u}$ ； $m_n = 1.008665 \text{ u}$

三、原子核的形状和大小

实验表明：原子核的电荷与质量近似球对称分布。

原子核的平均半径： $r = r_0 A^{\frac{1}{3}}$ 量级： 10^{-15} 米。

核半径参量： $r_0 \approx 1.2 \times 10^{-15} \text{ m} = 1.2 \text{ fm}$

核的质量密度：在一切原子核中， ρ 近乎相同。

$$\rho = \frac{m}{\frac{4}{3}\pi r^3} = \frac{Am_p}{\frac{4}{3}\pi r_0^3 A} = \frac{3m_p}{4\pi r_0^3} = 2.29 \times 10^{17} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

说明：无论原子核中核子数目有多少，每一个核子在核内几乎都占有相同大小的体积。由此也证实了核力是短程力，具有饱和性。

四、原子核的自旋与磁矩

核总角动量 \equiv 核自旋角动量 $+$ 核轨道角动量

质子和中子都有自旋角动量与轨道角动量，其矢量和称总角动量，称之为核的自旋。自旋量子数均为 $1/2$ 。

核自旋： $P_J = \sqrt{J(J+1)}\hbar$ J 为原子核的自旋量子数

核磁矩： $\mu_J = g_N \frac{e}{2m_p} P_J$ g_N 为实验测定的朗德因子

核磁子： $\mu_N = \frac{e\hbar}{2m_p}$ 描述核磁矩的一个新单位。

对比波尔磁子： $\mu_B = -\frac{e\hbar}{2m_e}$, $\mu_B = 1836\mu_N$

原子核的自旋对原子能级的影响较小。利用原子光谱的超精细结构，可以分析测定核自旋。

五、核力

核子之间的相互作用力。

核力的特征：

- 1.核力是比电磁力强得多的强相互作用力，主要是吸引力。
- 2.核力是短程力，核子间距离小于 10^{-15} m时才明显。
- 3.核力与核子带电状况无关。
- 4.核力具有饱和性。
- 5.核力的本质：核子之间交换 π 介子的交换力。

六、原子核的结合能

原子核的质量总是小于组成该原子核的核子的质量之和，它们之间的差额称为原子核的**质量亏损**。

$$\Delta m = [Zm_p + (A - Z)m_n] - M_x \quad M_x - \text{原子核的质量}$$

核子在结合成原子核时，它们之间的核力作用使体系能量降低，从而释放出能量，相应质量减少了。

结合能：由质子和中子形成原子核时所放出的能量。

$$\Delta E = \Delta m c^2$$

平均结合能： $\bar{E}_0 = \frac{\Delta E}{A}$

平均结合能越大，
原子核越稳定。

第2节 原子核的放射性衰变

一、天然放射性

1896年法国贝克勒尔 铀盐放射性

居里夫妇 镭和钋放射性更强

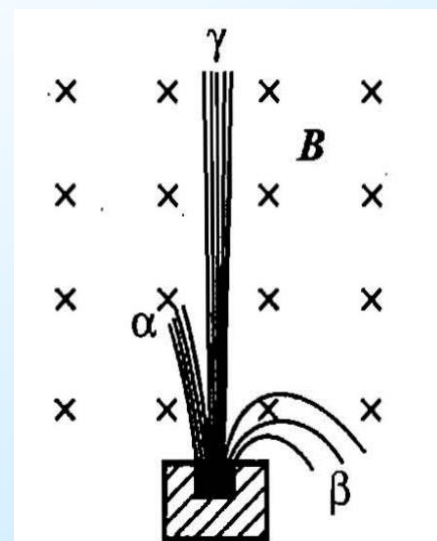
天然放射性元素的衰变方式有下列三种：

α 衰变——从核中放出 α 粒子的过程，带正电的氦核；

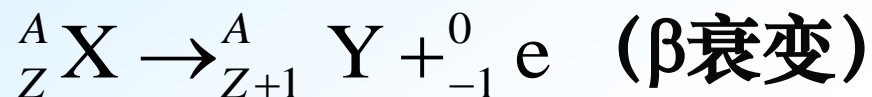
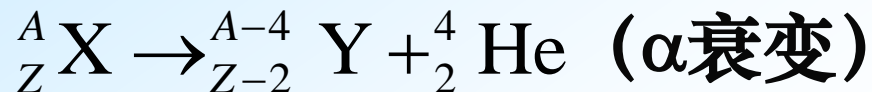
β 衰变——核中放出电子的过程；

γ 衰变——从核中放出光子的过程， α 衰变或 β 衰变后形成新核时辐射出来的。

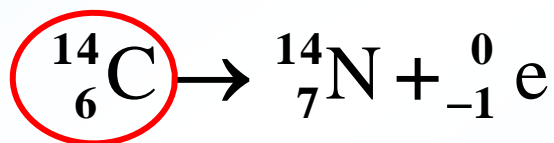
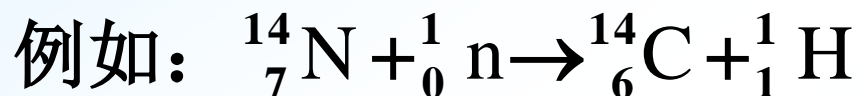
不稳定的原子核会自发地转变成另一种核而同时放出射线，这种变化叫放射性衰变。



放射性衰变过程遵守**电荷守恒**、**质量数守恒**、**能量守恒**、**动量守恒**、**角动量守恒**。



核衰变过程中的位移定则



${}^{14}\text{C}$ 是放射性同位素，半衰期约为5730a。



Willard Frank Libby
(1908-1980)
1960年诺贝尔化学奖

千万年以来，地球大气中的 ${}^{14}\text{C}$ 已达到了恒定的丰度，约为 $1.3 \times 10^{-10}\%$ ，即 1.3×10^{-12} 。

三、放射性衰变规律

t 时刻样品中有 N 个核，在 dt 时间内有 dN 个发生衰变

$$-dN = \lambda N dt \quad \text{或} \quad \frac{dN}{N} = -\lambda dt$$

λ : 表征衰变快慢的常数（衰变常数）

$t = 0, N = N_0$ $N = N_0 e^{-\lambda t}$ ——放射性衰变定律

半衰期 τ : 原子核衰变到 $N = N_0/2$ 所需的时间。

$$\frac{1}{2} N_0 = N_0 e^{-\lambda \tau} \quad \tau = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda}$$

各种放射性元素半衰期的长短相差很大。

例如，

铀 (${}_{92}^{238}\text{U}$) —— $4.5 \times 10^9 a$ (a 表示以年为单位)

镭 (${}_{88}^{226}\text{Ra}$) —— $1600 a$

钋 (${}_{84}^{212}\text{Po}$) —— $3 \times 10^{-7} s$

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

放射性活度 (放射性强度)

一个放射源在单位时间内发生的核衰变次数。

$$A = \frac{-dN}{dt} = \lambda N = \lambda N_0 e^{-\lambda t}$$

$$\tau = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

$$t = 0, \quad N = N_0, \quad A_0 = \lambda N_0$$

$$A = A_0 e^{-\lambda t} = A_0 \times 2^{-t/\tau}$$

国际单位：贝克勒尔(Bq) $1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1}$

1Bq表示每秒发生一次核衰变的放射源的活度。

常用单位：居里(Ci) $1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$

例1、 $^{226}_{88}\text{Ra}$ 的半衰期为1600a，10g纯的 $^{226}_{88}\text{Ra}$ 活度是多少？
这一样品经过400a和6000a时的活度又分别是多少？

解：10g纯 $^{226}_{88}\text{Ra}$ 的核数为：
$$N_0 = \frac{10 \times 6.023 \times 10^{23}}{226} = 2.66 \times 10^{22}$$

镭的衰变常量为：

$$\lambda = \frac{0.693}{\tau} = \frac{0.693}{1600 \times 3.1536 \times 10^7} = 1.37 \times 10^{-11} \text{ s}^{-1}$$

起始活度为：

$$A_0 = \lambda N_0 = 1.37 \times 10^{-11} \times 2.66 \times 10^{22} = 3.65 \times 10^{11} \text{ Bq} \approx 10(\text{Ci})$$

由活度衰减公式：
$$A = A_0 e^{-\lambda t} = A_0 \times 2^{-t/\tau}$$

$$A_{400} = A_0 \times 2^{-t/\tau} = 3.65 \times 10^{11} \times 2^{-400/1600} = 3.07 \times 10^{11} (\text{Bq}) = 8.3(\text{Ci})$$

$$A_{6000} = 3.65 \times 10^{11} \times 2^{-6000/1600} = 2.71 \times 10^{10} (\text{Bq}) = 0.73(\text{Ci})$$

例2、 2003年河北省某地考古遗迹中发现有古时的粟。一些这种粟的样品中含有1g碳，它的活度经测定为 2.8×10^{-12} Ci，求这些粟的年龄？

解： 1g新鲜碳中的 ^{14}C 的核数为：

$$N_0 = \frac{6.023 \times 10^{23}}{12} \times 1.3 \times 10^{-12} = 6.5 \times 10^{10}$$

^{14}C 的半衰期：
 $\tau = 5730 \text{ a}$

这些粟的样品活着的时候，活度应为：

大气中 ^{14}C 的丰度

$$A_0 = \lambda N_0 = \frac{0.693}{\tau} N_0 = \frac{0.693 \times 6.5 \times 10^{10}}{5730 \times 3.156 \times 10^7} = 0.25 \text{ Bq} = 6.8 \times 10^{-12} \text{ Ci}$$

由活度衰减公式： $A = A_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-0.693t/\tau}$

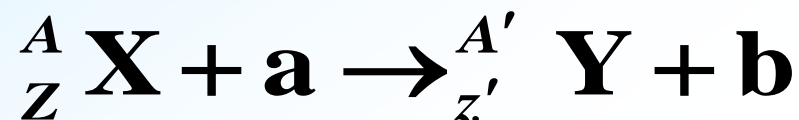
$$t = \frac{\tau}{0.693} \ln \frac{A_0}{A} = \frac{5730}{0.693} \ln \frac{6.8 \times 10^{-12}}{2.8 \times 10^{-12}} = 7300 \text{ a}$$

据考证，这些粟是世界上发现的最早的粟。

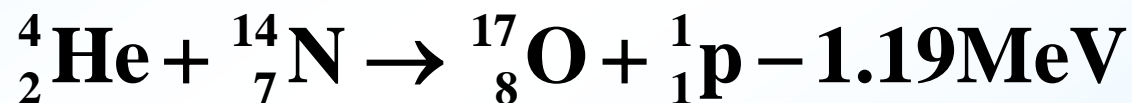
第3节 核反应与核能的利用

一、核反应

用高能粒子轰击原子核使原子核发生改变的过程叫做核反应。



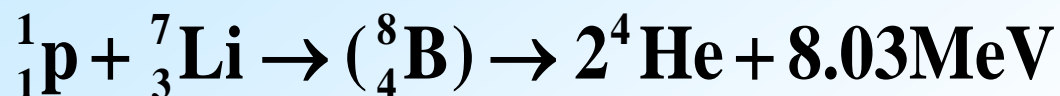
a是入射粒子，b是反应后放出的粒子；X是被轰击的原子核，称为靶核；Y是形成的新核，称为反冲核。



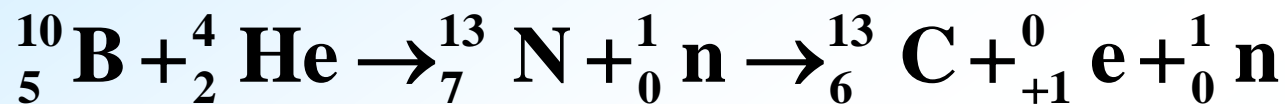
——1919年卢瑟福第一次人工核嬗变



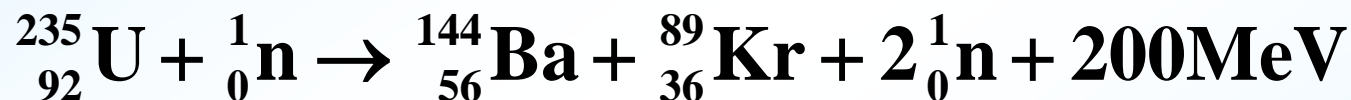
——1932年查德威克首次发现中子



——第一次用加速粒子引发的核反应



——首次发现正电子的核反应



——一种可能的铀核裂变反应



——氢弹爆炸的热核反应

反应截面

核反应的**反应截面** σ 是单位时间内一个靶粒子的反应次数和入射粒子流强 I (单位时间内通过单位面积的入射粒子数)的比值, 即

$$\sigma = \frac{R}{NI} \quad \text{--- 其中, } R \text{ 是反应速率, 即单位时间内的反应次数, } N \text{ 是入射粒子流射中的靶核数。}$$

注意: 反应截面并非核靶的横截面积, 因为入射粒子不是经典粒子, 需要考虑波动性。

反应能: 核反应 $X(a, b)Y$ 的反应能为 $\left\{ \begin{array}{ll} Q > 0 & \text{放能反应} \\ Q < 0 & \text{吸能反应} \end{array} \right.$

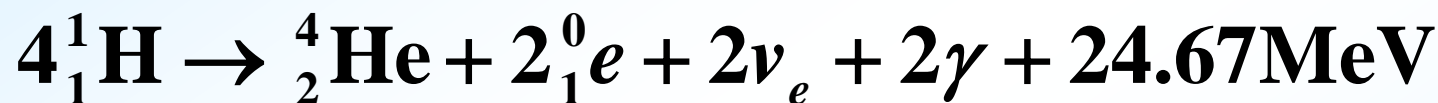
$$Q = (m_X + m_a - m_b - m_Y)c^2$$

阈能: 引发吸能反应所需的入射粒子最小能量

$$E_{th} = \frac{m_X + m_a}{m_X} |Q|$$

17-T4 目前太阳内含有 1.5×10^{30} kg的氢，而其辐射总功率为 3.9×10^{26} W，按此功率辐射下去，经多长时间太阳内的氢就要烧光了？

解：太阳中进行的热核反应（质子—质子链）总效果是：



太阳燃烧能辐射的总能量是：

$$W = \frac{1.5 \times 10^{30}}{4 \times 10^{-3}} \times 6.02 \times 10^{23} \times \frac{24.67 \times 10^6}{4} \times 1.6 \times 10^{-19} = 2.23 \times 10^{44} \text{ (J)}$$

按现在的功率辐射，太阳还能燃烧的时间是

$$t = \frac{W}{P} = \frac{2.23 \times 10^{44}}{3.9 \times 10^{26}} = 5.72 \times 10^{17} \text{ (s)} = 1.82 \times 10^{10} \text{ (a)}$$

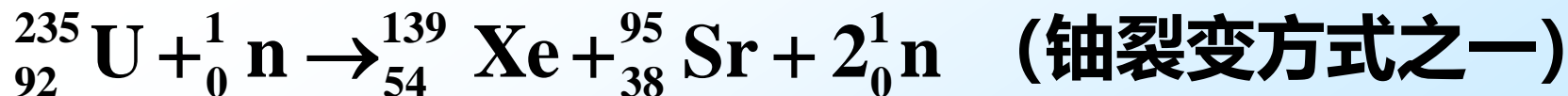
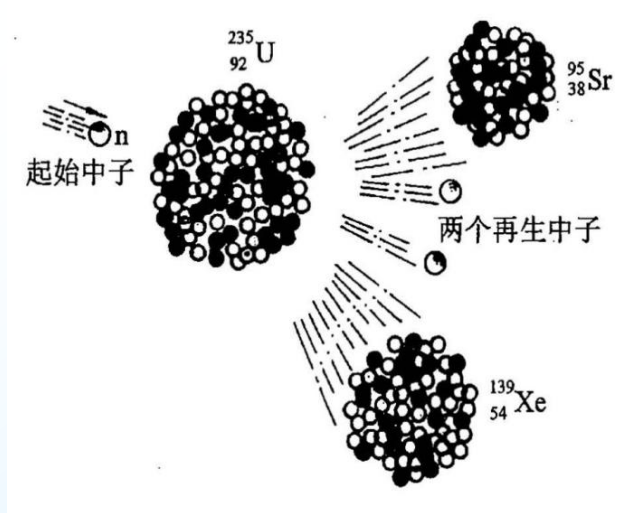
二、核能的开发与利用

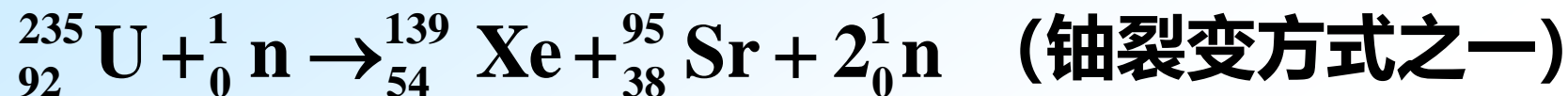
1. 重核的裂变

把重核分裂成两个中等质量的原子核，或把轻核聚合成较重的中等质量的原子核，都会放出大量能量。

天然放射性元素就在自发地进行**重核分裂**，但这种过程不容易用人工的方法加以控制；另外功率太低，不能加以大量利用。

1938年发现用中子轰击铀 $^{235}_{92}\text{U}$ 等几种重核时的分裂现象后，利用重核裂变释放原子核能才成为可能。





——链式反应

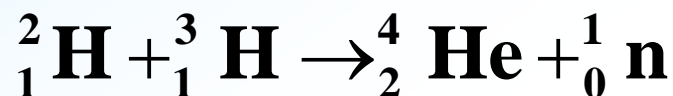
临界体积： 能发生链式反应的最小体积

临界质量： 临界体积中所含的铀的质量

当几块质量小于临界质量的铀很快的合拢起来而总质量超过临界质量时，就会发生极猛烈的链式反应而引起爆炸。原子弹的构造就是根据这个原理制成的。

2. 轻核的聚变

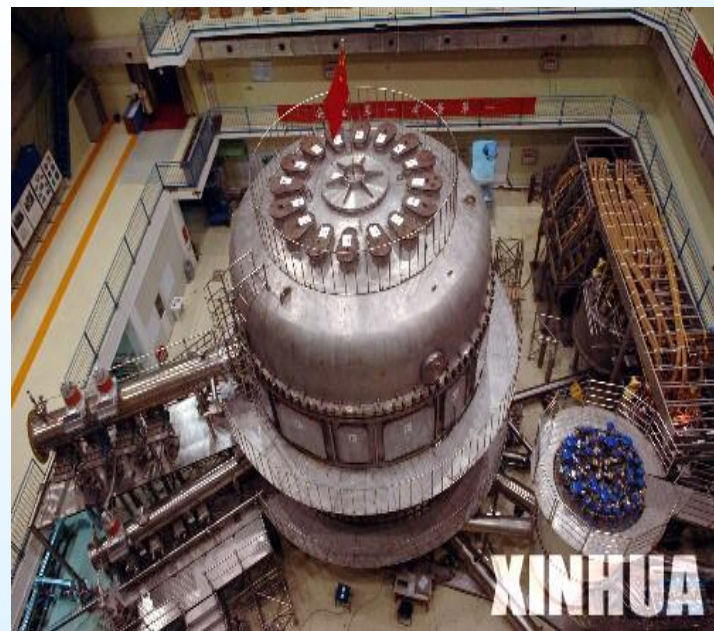
轻核聚变是指在高温下，使轻核聚合而放出大量原子核能的反应称为热核反应。氢同位素氘 ${}^2_1\text{H}$ 和氚 ${}^3_1\text{H}$ 聚合形成氦核 ${}^4_2\text{He}$ 是一个比较容易产生的**热核反应**，它的反应式是



在人工控制下进行的热核反应叫受控热核反应，能够根据需要控制热核反应的速度，使之缓慢而均匀地进行。

国际热核聚变实验堆（ITER）计划

托卡马克（Tokamak）是一种利用磁约束来实现受控核聚变的环形容容器。



三 放射性的防护

核辐射是原子核从一种结构或一种能量状态转变为另一种结构或另一种能量状态过程中所释放出来的微观粒子流。核辐射可以使物质引起电离或激发，故称为**电离辐射**。

直接致电离辐射： α 粒子， β 射线，质子等带电粒子

间接致电离辐射：光子，中子等不带电粒子

电磁波的电离作用很弱，称为**非电离辐射**。

就辐射对人体的影响而言，又分为**内照射**和**外照射**。

1. 辐射剂量及其单位

照射剂量：单位体积或单位质量被照射物质所吸收的能量
测量照射剂量主要依据在标准状态下干燥空气中测量辐射产生的电离效应，即测量X射线和 γ 射线在单位质量空气中产生的正(或负)离子电量来表征X射线和 γ 射线的照射量

$$E = \frac{dQ}{dm} \quad ; \quad \text{单位: } \text{C} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ 或 伦琴(R); } 1\text{R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1}$$

吸收剂量：被照射物质单位质量所吸收的电离能量。它是衡量单位质量受照射物质吸收辐射能量多少的物理量。

$$D = \frac{dE}{dm} \quad ; \quad \text{单位: } \text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ 或 戈瑞 (Gy); } 1 \text{ Gy} = 1 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1};$$

$$\text{拉德 (rad)} : \quad 1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$$

当量剂量

生物体内单位质量的组织, 从各种射线中吸收同样多能量, 所产生的生物学效应有很大差别。

$H_T = D_{TR} \times w_R$ 单位: 西沃特 (Sv) 1西弗 = 1000 毫西弗

表: 射线的辐射权重因子 w_R

射线种类及能量范围	权重因子 w_R	射线种类及能量范围	权重因子 w_R
X (g) 射线	1	2MeV ~ 20MeV	10
β^- 和 β^+ 射线	1	> 20MeV	5
中子, 能量<10eV	5	质子, 能量>2MeV	5
100eV~2MeV	20	α 粒子, 重核	20

最大容许剂量: 即经过一次照射成长期积累, 对人体没有损害又不发生遗传危害的最大剂量限值。

从业人员: 50mSv/a; 居民: 50μSv/a 。

2. 辐射防护

外照射防护

因为不同放射线的性质不同，采取的防护措施也不一样。 α 射线的电离能力很强，但射程短，穿透能力小。由 α 射线不可能由体表深入体内，故对 α 射线照射只要戴上手套即可。

β 射线和 γ 射线穿透能力强，外照射不容忽视。对 β 射线常用含有中等原子序效的物质作屏蔽材料，如各种塑料和有机玻璃。 β 射线对重原子序数物质易引起起韧致辐射(高速带电粒子急剧减速时发出的电磁辐射)，后者对人体健康亦不利，故不宜采用。 γ 射线不存在这一问题，故多用重原子序数物质如铅、混凝土等来屏蔽。

内照射防护

用放射性核素注入体内进行的照射叫内照射。 α 射线源进入体内，由于其电离比值高，产生电离作用将对人体造成极大危害。故工作时要特别防止 α 射线源由呼吸道、食管或外伤伤口进入体内。

除采用屏蔽措施外，还应注意保护环境。对于含有放射性物质的废物，要妥善处理，不要随便弃置。



作业： Chap.17 —T1、 T2、 T3、 T4、 T5

1. 独立完成作业。
2. 图和公式要有必要的标注或文字说明。
3. 通过学习通提交作业。
4. 作业缺交三分之一及以上者按规定不能参加考试。

