

同位素应用知识

中国科学院物理研究所編印

同位素应用知識

中国科学院物理研究所

1958年7月

第 一 部 分

基 礎 原 子 核 物 理 学

第一章

原子核结构和原子核反应

1-1 元素和原子结构 在談到原子核的结构之前，首先應該談談原子的构造。我們已經知道所有地球上的物質是由 92 种不同的元素組成的¹⁾。最輕的元素是氫，依次是氦、鋰、鈹、……，最重的元素是鈾。构成某一元素的最基本单位是該元素的原子。原子是很小的粒子，直径只有 10^{-8} 厘米左右。原子的質量也十分微小。一个氫原子的質量才有 1.6732×10^{-24} 克，就是最重的鈾原子質量也不过是 3.951×10^{-22} 克。不同元素的原子具有不同的性質，但是它們的构造是十分相似的。在原子的中心是一个原子核，簡称为核。离开中心很远的地方是电子繞着原子核按照着一定的軌道而运行。原子核帶正电荷，电子帶負电荷。一个电子所带的电荷为 4.8028×10^{-10} 靜电单位，通常用字母“ e ”来代表它。原子核所帶正电荷的数量系由繞行电子数目的多少来决定。例如氫原子只有一个繞行电子，它的核帶有 $1e$ 正电荷。鉄原子有 26 个繞行电子，它的核帶有 $26e$ 正电荷。換句話說，原子核所帶的正电荷剛好和各繞行电子所帶負电荷的总和相等。这样就构成中性的原子。当子失去一个或几个(或增加一个或几个)繞行电子时，它就帶有电荷。这时我們就把它称为离子。

不同的元素可以用繞行电子数目的不同来区别。如氫元素只有一个繞行电子，氦有两个电子，鋰有三个电子，……，鈾有 92 个繞行电子。通常用字母 Z 来表示繞行电子的数目，称为原子序数。不同的 92 种元素恰好用 Z 的数值从 1 到 92 来代表。近十多年来由于人工方法制造

1) 事实上在自然界里只存在着 90 种元素，因为錒($_{83}\text{Tc}$)和鉷($_{81}\text{Pm}$)两元素沒有穩定的同位素。

同位素技术的进展，已经有办法在实验室里制造出原子序数比铀还高的新元素，即所谓超铀元素。到目前为止，已有 9 种超铀元素 ($Z = 93 - 101$) 被制造出来。当然，这些人造元素的数量都是十分微小的。

绕行电子和原子核构成一个原子，可是它们个别的質量是相差很远的。原子核差不多具有原子的整个質量，电子的質量比起核来要輕很多。例如最輕的氢原子，核的質量是 1.67243×10^{-24} 克，而它的一个绕行电子的質量才有 9.1085×10^{-28} 克。二者的比是

$$\frac{\text{电子質量}}{\text{氢核質量}} = \frac{9.1085 \times 10^{-28}}{1.67243 \times 10^{-24}} = \frac{1}{1836}.$$

原子序数大的元素，这个比数还要小些，例如铀原子，它的 92 个绕行电子的总質量和核的質量的比只有 $\frac{1}{4714}$ 。

核的質量虽然几乎等于原子的質量，可是核的大小只佔着整个原子极小的一部分空間。上面已經提到原子的直径約 10^{-8} 厘米左右，核的直径才在 $10^{-13} - 10^{-12}$ 厘米之間。所以在原子核和绕行电子之間，大部分的空間是空虛无物的。

原子核外围的每一个绕行电子都有它固定的軌道（圓的或橢圓形的）。这些軌道分成好几个壳层，每一个壳层有它固定数目的几个軌道。每个軌道最多只能有一个电子。最靠近核的是 K 壳层。它有两个軌道，所以最多只能有两个绕行电子。第二是 L 壳层。它有两个支壳层，第一支壳层有两个軌道，第二支壳层有六个軌道，所以 L 壳层最多只能有 8 个绕行电子。第三是 M 壳层。它有三个支壳层，共有 18 个軌道，所以最多只能有 18 个绕行电子。一般說起来壳层里可以有的最多电子数目可以用 $2n^2$ 来表示。 $n = 1$ 代表 K 壳层， $n = 2$ 代表 L 壳层，余类推。电子在某一軌道绕行具有一定的能量。 K 壳层軌道的电子能量最低，越往外的軌道电子的能量越高。电子可以吸收外来的能量从能量較低的軌道跃迁至能量較高的軌道，这种現象叫做激发。倘是激发的能很大可以使軌道上的电子脱离原子核的吸引力而自由运动时，則称为电离或游离。反之如果能量較低的軌道还没有电子，則能量較高軌的电子亦可以跃迁到这个能量較低的軌道。在这样跃迁的过程，

原
书
缺
页

原
书
缺
页

在原子核物理里,常用的能量单位尔格则嫌太大.一般采用电子伏特(ev)作为能量的单位.所谓电子伏特是指电子在电位差为一伏特的两电极从阴极走到阳极时所获得的能量.因电子所带的电荷为 4.8×10^{-10} e.s.u. 1 伏特的电位差等于 $\frac{1}{300}$ e.s.u. 电位差,所以,

$$\begin{aligned} 1\text{ev} &= 4.8 \times 10^{-10} \text{e.s.u. (电荷)} \times \frac{1}{300} \text{e.s.u. (电位差)} = \\ &= 1.6 \times 10^{-12} \text{ 尔格.} \end{aligned}$$

此外,人们还常用兆电子伏特(Mev)和十亿电子伏特(Bev)作为能量单位.

例:在式(1-1)里如 E_n 以 ev 作单位,并将 h, c 的值代入以求 λ , 则得

$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{hc}{E_n - E_{n'}} = \frac{6.625 \times 10^{-27} \times 3 \times 10^{10}}{1.6 \times 10^{-12}} \cdot \frac{1}{E_n - E_{n'}} = \\ &= \frac{12422 \times 10^{-8}}{E_n - E_{n'}} \simeq \frac{12345}{E_n - E_{n'}} \text{ \AA.} \end{aligned} \quad (1-4)$$

$\text{\AA}$ 系长度的单位. $1\text{\AA} = 10^{-8}$ 厘米. 它系 Angström 的缩写, 译作“埃”. 这个式在计算特征X射线的波长时, 应用甚广. 式里用 12345 来代替 12422, 因为便于记忆.

例如铅的 $E_L = -2870 \text{ ev}$; $E_K = -20,000 \text{ ev}$, 电子从 L 壳层跃迁至 K 壳层时所放出 X 射线的波长应为:

$$\lambda = \frac{12345}{-2,870 + 20,000} = \frac{12,345}{17,130} = 0.720 \text{ 埃.}$$

质量和能量可以互相转化. 根据爱因斯坦的质量和能量的关系公式, 一个静止质量为 m 的物质所具有的能量为:

$$\text{静止质量能} = mc^2, \quad (1-5)$$

c 为光在真空中的速度. 1 克质量在全部转化为能量时为: $1 \text{ 克} \times (3 \times 10^{10} \text{ 厘米/秒})^2 = 9 \times 10^{20} \text{ 尔格} = 2.15 \times 10^{13} \text{ 卡路里}$, 这个数字约相当于 2700 公吨煤燃烧时所放出的热量(煤的燃烧热为每克 8000 卡).

利用这个克和尔格的关系以及前面已给过的 amu 和克、尔格和 Mev 间的关系, 可以算出:

$$1\text{amu} = 931.162 \text{ Mev} \simeq 931.2 \text{ Mev.}$$

在原子核物理中常常用兆电子伏特作为质量的单位, 例如电子的质量为 0.511 Mev; 质子的质量为 938.23 Mev 等.

表 1-1

粒 子	符 号	質量(amu)
电 子	e	0.000549
質 子	p	1.007593
中 子	n	1.008982
氫 原 子	${}^1_1\text{H}^1$	1.008142
氦 原 子	${}^4_2\text{He}^4$	2.014741
氮 原 子	${}^{14}_7\text{N}^{14}$	4.003873

原子由核和电子所組成,核系由中子和質子所組成,可是原子的質量并不等于組成它的各个中子、質子和电子質量的总和。表 1-1 列了一些基本粒子和氢、氦、氮等同位素的質量。从这个表可以看出,氦的質量比組成它的成員(一个中子、一个質子和一个电子)的总質量要小。它們的質量差为:

$$m_{\text{H}^1} - (m_n + m_p + m_e) = 2.014741 - 2.017124 = -0.002383 \text{amu}.$$

同样地,氮的質量也比組成它的成員(两个中子、两个質子和两个电子)的总質量小。实验証明,所有同位素的質量都是比組成它的各粒子的总質量为小。这种现象称为質量亏损。当两个或两个以上的粒子互相結合时,就有一部分的質量轉化为能量而释放出来,这种能量称为結合能。結合能的大小可以从質量亏损的数值推算出来。如上面所說的,氦的結合能为:

$$0.002383 \times 931.2 = 2.219 \text{ Mev}.$$

这样計算出来的結合能包括中子和質子結合成核的結合能以及核和电子相結合成原子的結合能。但是核和电子的結合能比起核子間的結合能要小得好几个数量級,所以上面計算的結果可以看作是核的結合能。各种同位素的結合能并不相同。为了便于比較起見,通常是用每一核子結合能来表示的,如氦核含有两个核子,它的每一核子結合能应为 $2.219/2 \simeq 1.110 \text{ Mev}$,又如 ${}^{16}_8\text{O}^{16}$ 含有 8 个中子和 8 个質子,它的每一核子結合能为:

$$\frac{[8 \times (1.008982 + 1.007593 + 0.000549) - 16.0000] \times 931.2}{16} = 7.97 \text{ Mev}.$$

在表 1-2 和图 1-1 里,示出每一核子結合能 B. E. 和原子質量数 A 的关系。在 A 小的核,每一核子結合能比較小而且变化甚大,有四个峯值出現在 ${}^4_2\text{He}^4$, ${}^3_2\text{He}^3$, ${}^{12}_6\text{C}^{12}$ 和 ${}^{16}_8\text{O}^{16}$ 。当 A 值大于 20 后, B. E. 的变化比較小,

从 8 Mev 緩慢地增大至 8.6 Mev 左右;然后又逐漸減低。当 $A = 238$ 时 B. E. 的值約为 7.5 Mev。所謂原子能的释放就是使每一核子結合能低的核轉变成每一核子結合能高的核。在这样的过程中,就有一部分質量轉化成能量而释放出来。从图 1-1 可以看出,有两种方法能够达到这个目的。第一种方法是利用重核分裂成为两个質量中等的核。例如鈾或釷反应堆能量的获得就屬於此类。它的工作过程簡述如下:当鈾-235 吸收了一个慢中子时,它的核将发生裂变而形成两个碎片的核和几个快速中子,同时释放出能量。这些快速中子經過慢化后,又被其他鈾-235 吸收,而引起同样的变化,从而使能量的释放繼續进行,形成鏈式反应。另一种方法是将两个或几个輕的核熔聚成一个較重的核,例如 ${}^2_1\text{H}$ 和 ${}^3_1\text{H}$ 相作用可产生 ${}^4_2\text{He}$ 和中子而释放出能量。太阳上能量的来源可以認為是由于氢核經過几道核反应后变成氮而放出能量。氢弹的爆炸也是应用此法,这样的反应过程称为聚变。

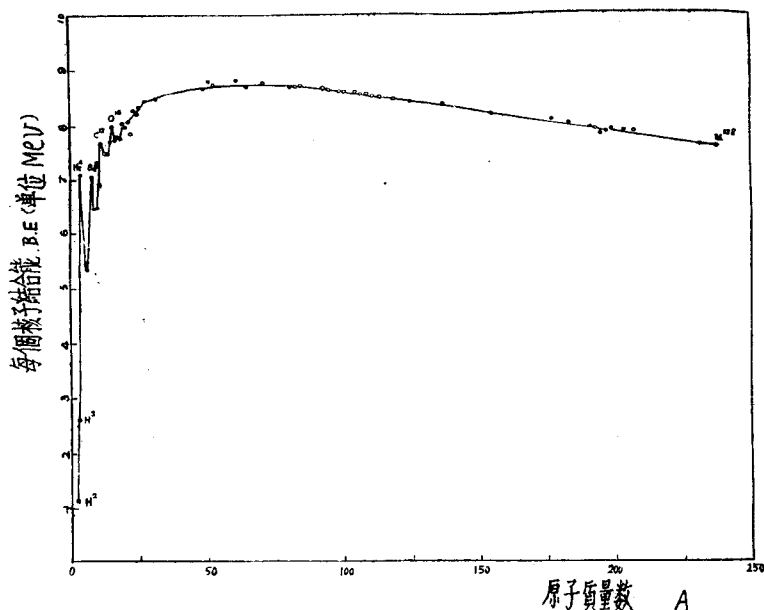


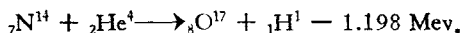
图 1-1 每个核子結合能和原子質量数的关系

表 1-2

同 位 素	每一核子結合能	同 位 素	每一核子結合能	同 位 素	每一核子結合能
${}^1\text{H}^2$	1.11(Mev)	${}^{10}\text{Ne}^{21}$	7.97(Mev)	${}^{42}\text{Mo}^{96}$	8.62(Mev)
${}^1\text{H}^3$	2.83	${}^{10}\text{Ne}^{22}$	8.07	${}^{44}\text{Ru}^{100}$	8.61
${}^2\text{He}^3$	2.57	${}^{11}\text{Na}^{23}$	7.84	${}^{44}\text{Ru}^{102}$	8.61
${}^2\text{He}^4$	7.07	${}^{12}\text{Mg}^{24}$	8.26	${}^{46}\text{Pd}^{106}$	8.58
${}^3\text{Li}^6$	5.33	${}^{12}\text{Mg}^{25}$	8.21	${}^{46}\text{Pd}^{108}$	8.54
${}^3\text{Li}^7$	5.60	${}^{12}\text{Mg}^{26}$	8.33	${}^{48}\text{Cd}^{110}$	8.54
${}^4\text{Be}^8$	7.06	${}^{14}\text{Si}^{28}$	8.44	${}^{48}\text{Cd}^{112}$	8.53
${}^4\text{Be}^9$	6.46	${}^{16}\text{S}^{32}$	8.49	${}^{72}\text{Hf}^{178}$	8.09
${}^5\text{B}^{10}$	6.47	${}^{22}\text{Ti}^{50}$	8.65	${}^{74}\text{W}^{184}$	8.00
${}^5\text{B}^{11}$	6.92	${}^{24}\text{Cr}^{52}$	8.77	O_3^{182}	7.94
${}^6\text{C}^{12}$	7.67	${}^{26}\text{Fe}^{54}$	8.73	${}^{78}\text{Pt}^{196}$	7.82
${}^6\text{C}^{13}$	7.46	${}^{26}\text{Fe}^{56}$	8.62	${}^{80}\text{Hg}^{198}$	7.86
${}^7\text{N}^{14}$	7.47	${}^{28}\text{Ni}^{62}$	8.80	${}^{80}\text{Hg}^{200}$	7.90
${}^7\text{N}^{15}$	7.69	${}^{30}\text{Zn}^{66}$	8.70	${}^{82}\text{Pb}^{204}$	7.88
${}^8\text{O}^{16}$	7.97	${}^{32}\text{Ge}^{72}$	8.74	${}^{82}\text{Pb}^{208}$	7.87
${}^8\text{O}^{17}$	7.75	${}^{34}\text{Se}^{82}$	8.68	${}^{90}\text{Th}^{232}$	7.61
${}^8\text{O}^{18}$	7.76	${}^{36}\text{Kr}^{84}$	8.71	${}^{92}\text{U}^{238}$	7.57
${}^9\text{F}^{19}$	7.77	${}^{38}\text{Sr}^{86}$	8.70		
${}^{10}\text{Ne}^{20}$	8.03	${}^{40}\text{Zr}^{94}$	8.66		

1-4 原子核反应 所謂原子核反应是指原子核因受外来的原因而引起核結構的变化。如果不是由于外来的原因而自发地发生核結構的改变則称为核衰变 (或核蜕变)。关于核衰变将于第三章里詳細討論。产生核反应的方法有好多种,主要的有: 1. 带电粒子的轟击; 2. 吸收慢中子; 3. 快速中子的轟击; 4. 高能光子的照射。茲分述如下。

1. 带电粒子轟击的核反应 远在 1919 年, 卢瑟福用 RaC 的 α 射线作实验, 他发现, 如果放射源的周围放进氮时, 粒子的射程要增长好多。后来发现, 这是因为氮核被 α 射线轟击时, 核内起了变化而放出質子。长的射程是質子产生的。这就是一种核反应, 可用下面方程式来表示:



这里 ${}_2\text{He}^4$ 和 ${}_1\text{H}^1$ 用来代表 α 粒子和質子; -1.198 Mev 系反应能量, 又称 Q 值, 負的符号表明这个反应是吸收能量、而非释放能量的。上面的

方程式也可以簡写作 ${}_7\text{N}^{14}(\alpha, p){}_8\text{O}^{17}$, 称为 α -p 反应。其他天然放射性的 α 射线也可以产生同样的核反应。利用天然放射性的 α 射线轰击而产生的核反应尚有好多种。实验室里最常用的中子源是利用铍-9 或锂-7 的 α -n 反应来产生的 $[_4\text{Be}^9(\alpha, n){}_6\text{C}^{12}$ 或 ${}_3\text{Li}^7(\alpha, n){}_3\text{B}^{10}]$ 。

天然放射性的 α 射线能量并不高, 一般只在 4—8 Mev, 用它来轰击原子序数较高的核, 并不能产生核反应, 因为核带正电荷, 而 α 粒子也带正电荷, 它们彼此间互相排斥的库仑作用力会随着靶核的 Z 值的增大而增大。只有在 α 粒子的能量足够大时, 才能使 α 粒子靠近靶核而引起核反应。自从加速器的技术发展以后, 人们可以把质子、氘核或氦核加速到比天然放射性 α 粒子大好多倍的能量, 因此可以得到各种各样的核反应。

用加速器加速的氦核和天然放射性的 α 粒子基本上是相同的。可是加速的氦核可以得到较大的、可以改变的能量和较强的强度。用加速氦核作为轰击粒子的核反应, 主要的有下列几种。

α -n 反应, 例: ${}_3\text{Li}^7 + {}_2\text{He}^4 \longrightarrow {}_5\text{B}^{10} + {}_0\text{n}^1 - 2.792 \text{ Mev};$

α -p 反应, 例: ${}_{12}\text{Mg}^{25} + {}_2\text{He}^4 \longrightarrow {}_{13}\text{Al}^{28} + {}_1\text{H}^1 - 1.196 \text{ Mev};$

α -d 反应, 例: ${}_{16}\text{S}^{32} + {}_2\text{He}^4 \longrightarrow {}_{17}\text{Cl}^{34} + {}_1\text{H}^2 - 12.4 \text{ Mev}.$

用加速质子作为轰击粒子的, 有下列几种主要的核反应。

p- α 反应, 例: ${}_5\text{B}^{10} + {}_1\text{H}^1 \longrightarrow {}_4\text{Be}^7 + {}_2\text{He}^4 + 1.147 \text{ Mev};$

p- γ 反应, 例: ${}_6\text{C}^{12} + {}_1\text{H}^1 \longrightarrow {}_7\text{N}^{13} + h\nu + 1.945 \text{ Mev};$

p-d 反应, 例: ${}_4\text{Be}^9 + {}_1\text{H}^1 \longrightarrow {}_4\text{Be}^8 + {}_1\text{H}^2 + 0.560 \text{ Mev};$

p-n 反应, 例: ${}_6\text{C}^{14} + {}_1\text{H}^1 \longrightarrow {}_7\text{N}^{13} + {}_0\text{n}^1 - 0.627 \text{ Mev}.$

用加速氘核作为轰击粒子的, 有下列几种主要的核反应。

d-p 反应, 例: ${}_{29}\text{Cu}^{63} + {}_1\text{H}^2 \longrightarrow {}_{29}\text{Cu}^{64} + {}_1\text{H}^1 - 5.6 \text{ Mev};$

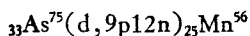
d- α 反应, 例: ${}_3\text{Li}^7 + {}_1\text{H}^2 \longrightarrow {}_2\text{He}^5 + {}_2\text{He}^4 + 14.16 \text{ Mev};$

d-n 反应, 例: ${}_4\text{Be}^9 + {}_1\text{H}^2 \longrightarrow {}_5\text{B}^{10} + {}_0\text{n}^1 + \text{Mev}.$

从上面所举的例子可以看出, Q 的值有的是正的, 有的是负的。 Q 值系等于反应前各粒子的总质量和反应后各粒子总质量的差数。上面所列反应的种类, 只提到那些在反应后仅放出一个轻粒子的。事实上当轰击粒子能量较高时, 反应后所放出来的轻粒子可以是不止一个, 如

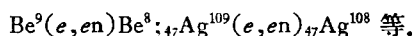
${}_5\text{B}^{10}(\text{p}, \text{p}2\text{n})_5\text{B}^8$; ${}_5\text{B}^{10}(\text{d}, \alpha\text{n})_4\text{Be}^7$; ${}_{25}\text{Mn}^{55}(\text{d}, 2\text{n})_{26}\text{Fe}^{55}$ 和 ${}_{13}\text{Al}^{27}(\alpha, 2\text{p})_{13}\text{Al}^{27}$; ${}_8\text{O}^{16}(\alpha, \text{pn})_9\text{F}^{18}$ 等。

若加速粒子的能量甚大时,被轟击的靶核有散裂作用发生,即是靶核同时放出数目甚多的輕粒子,例如:

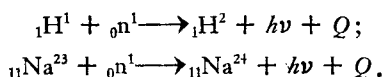


在一次核反应中放出 9 个質子和 12 个中子。近年来用加速氦核、 ${}_2\text{He}^3$ 核和高电荷重核如 ${}_{71}\text{N}^{14(3+)}$, ${}_6\text{C}^{12(2+)}$ 作为轟击粒子也得到許多新的核反应。

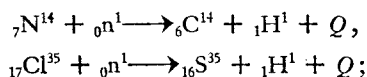
加速高能电子的技术发展以后,用高能电子(能量在数十至数百 Mev)作为轟击粒子,也可以得到核反应,例如:



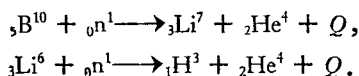
2. 俘獲中子的核反应 通常把能量在 100keV 以上的中子称为快中子,在 100 Kev 以下而在 100 ev 以上的称为中能中子,100 ev 以下而在 $\frac{1}{40}$ ev 以上的称为慢中子,在 $\frac{1}{40}$ ev 以下的称为热中子。一般在中子的能量不大时,俘获中子的核反应的几率較大(慢中子和热中子)。靶核俘获中子后,一般放射出 γ 射线,这样的核反应即是最常見的 n- γ 反应,例如:



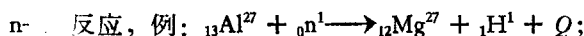
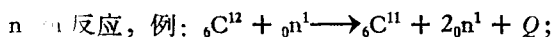
此外,俘获中子的核反应也有很少数是别的类型,如 n-p 反应,例如:



n- α 反应,例如:



3. 快中子的核反应 利用快速中子作为轟击粒子也可以产生核反应。主要的快中子核反应有下列几种:



$n-\alpha$ 反应, 例: ${}_{16}\text{S}^{31} + {}_0n^1 \longrightarrow {}_{14}\text{Si}^{31} + {}_2\text{He}^4 + Q$.

产生这样反应所用的快速中子源, 是由 $d-n$ 或 $\alpha-n$ 反应的方法来供给的, 慢中子或热中子的中子源可以用慢化快速中子的办法来得到, 更方便的方法是利用反应堆里所产生的中子(快中子及慢、热中子).

4. 高能光子照射的核反应 利用同步加速器或电子迴旋加速器的高能电子所产生的轫致辐射(性质和 X 射线相同, 但能量甚高), 可以得到许多种光致核反应(Photon induced nuclear reaction). 最普通的反应是 (γ, n) ; 例如 $\text{Be}^9(\gamma, n)\text{Be}^8$. 其他的反应 (γ, p) , (γ, α) , (γ, np) , $(\gamma, 2n)$ 和 $(\gamma, \alpha n)$ 等也都曾发现过.

关于核反应, 在讨论人工放射性同位素时(9-2 节)将有更详细的介绍.

用一种加速粒子来轰击某一种靶子, 常常是各种反应都可能发生的. 例如用加速质子来轰击碳-12, 它可以产生下列各种反应:

- | | | |
|-----|---|----------------------------|
| (1) | ${}_6\text{C}^{12}(p, \gamma){}_7\text{N}^{13}$, | $Q = 1.945 \text{ Mev};$ |
| (2) | ${}_6\text{C}^{12}(p, \alpha){}_5\text{B}^9$, | $Q = -7.559 \text{ Mev};$ |
| (3) | ${}_6\text{C}^{12}(p, d){}_6\text{C}^{11}$, | $Q = -16.486 \text{ Mev};$ |
| (4) | ${}_6\text{C}^{12}(p, n){}_7\text{N}^{12}$, | $Q = -18.5 \text{ Mev};$ |
| (5) | ${}_6\text{C}^{12}(p, pn){}_7\text{N}^{12}$, | $Q = -18.711 \text{ Mev}.$ |

但是那一种反应能否发生则取决于轰击粒子的能量. 从上面这个例子可以看出, 反应能 Q 值只有在第一种反应下是“正”的, 其余都是负值. 所以在质子能量不大时, 只有第一种反应可以发生; 其余的反应必需在质子的能量大于某一个最低能量时才可能发生. 这个最低能量称为这个核反应的阈能. 例如, $\text{C}^{12}(p, n)\text{N}^{12}$ 反应的阈能为 $20.0 \text{ Mev} \left[= 18.5 \times \frac{13}{12} \right]$. 事实上, Q 值为“正”的核反应也是有阈能的, 这个能量主要是用以制胜轰击粒子和靶核间由于同性电荷的排斥力作用而产生的库仑势垒 V . 若轰击粒子和靶核所带的电荷数和原子质量数分别为 Z_1, A_1 和 Z_2, A_2 , 则有

$$V = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{(A_1^{1/3} + A_2^{1/3}) R_0}, \quad (1-6)$$

若用 $R_0 = 1.2 \times 10^{-13}$ 厘米, 并将 e^2/R_0 用 Mev 单位表示, 则

$$V = \frac{1.2 Z_1 Z_2}{A_1^{1/3} + A_2^{1/3}} \text{ Mev}.$$

在轰击粒子为质子的情形下, 库仑势垒的值约从最小的 0.6 Mev 至最大的 15 Mev ($Z_2=92$, $A_2=238$). 对于碳靶, 库仑势垒约为 2 Mev . 根据这样的计算, $\text{C}^{12}(p, n)\text{N}^{12}$ 的反应似乎必须在质子的能量大于 2 Mev 时才能发生; 但是事实上, 质子能量在 0.46 Mev 时就可能发

生这样的反应。这是因为在质子能量低于库仑势垒时，它仍有洞穿势垒进入核内部的能力，只是几率比较小一些。

当轰击粒子打到靶上时，产生核反应的数目 N_R 是和每秒钟内射到靶上轰击粒子的总数目 N_0 以及每平方厘米面积内靶核的总数目 N_t 成正比，写成方程式则有：

$$N_R = \sigma N_0 N_t, \quad (1-7)$$

σ 是一个比例常数，它的因次是“平方厘米每核”，通常称为核反应的截面。 σ 的单位是巴恩 (Barn)，1 巴恩 = 10^{-24} 厘米²。核反应截面积的大小实际上即是表示核反应几率的大小。

1-5 稳定的和不稳定的同位素 核反应后的产物有很多是稳定的同位素，例如 $\text{Li}^7(\alpha, n)\text{B}^{10}$ ，硼-10 就是稳定的，但是有更多的产物是不稳定的同位素，例如： $\text{Cu}^{63}(d, p)\text{Cu}^{64}$ ； $\text{C}^{12}(p, \gamma)\text{N}^{13}$ ； Cu^{64} 和 N^{13} 都是不稳定的同位素，它们将自发地衰变成其他同位素。不稳定的同位素又称放射性同位素，应用核反应方法产生的，特称为人工放射性同位素，以别于在自然界中存在的天然放射性同位素。所谓稳定同位素是指核结构不会自发地发生改变的同位素；而不稳定的同位素则与此相反，即使不受外在原因的作用，核的构成会自发地产生变化。在这变化过程中，核将放射出 α 射线（即氦核）、或 β 射线（即电子）、或 γ 射线（一种高能量的电磁波）、或 β^+ 射线（即正电子）、或者在核外俘获一个绕行电子。这些现象统称为核衰变，将在第三章里详细讨论。原子序数在 83 以下的每一种元素都有一个或几个稳定同位素（镅 $_{43}\text{Tc}$ 和钷 $_{61}\text{Pm}$ 除外），原子序数在 83 以上的元素（包括 $Z = 83$ ）则只有放射性同位素。稳定的同位素有 274 种，按照质子和中子的奇数或偶数来分析则有：

偶偶核（质子偶数，中子偶数）165 种，

偶奇核（质子偶数，中子奇数）55 种，

奇偶核（质子奇数，中子偶数）49 种，

奇奇核（质子奇数，中子奇数）5 种，

原子序在 83 以下的天然放射性同位素为数不多，它们的半衰期（有一半原子核发生衰变所需要的时间）大都是很长的，因此很难测量。比较确定的如表 1-3 所示。

此外还有一些天然同位素可能也是放射性的，它们是 $_{20}\text{Ca}^{48}$ ， $_{23}\text{V}^{50}$ ， $_{40}\text{Zr}^{96}$ ， $_{49}\text{In}^{113}$ ， $_{82}\text{Sn}^{124}$ ， $_{52}\text{Te}^{130}$ ， $_{60}\text{Nd}^{144}$ ， $_{60}\text{Nd}^{150}$ ， $_{74}\text{W}^{180}$ ， $_{78}\text{Pt}^{190}$ 。大气中的物质受着宇宙射线的轰击，有的也会变成放射性的。例如大气里含有微量

表 1-3 Z 小于 83 的天然放射性同位素

同 位 素	含 量	半 衰 期	放射的粒子和能量
鉀 ${}_{19}\text{K}^{40}$	0.0119%	1.31×10^9 年	$\beta(1.32 \text{ Mev})$; γ ; K
鐳 ${}_{87}\text{Rb}^{87}$	27.85%	6.15×10^{10} 年	$\beta(0.275 \text{ Mev})$
錫 ${}_{49}\text{In}^{115}$	95.77%	6.1×10^{14} 年	$\beta(0.63 \text{ Mev})$
鐳 ${}_{57}\text{La}^{138}$	0.089%	7×10^{10} 年	$\beta(1.0 \text{ Mev})$; γ ; K
釷 ${}_{62}\text{Sm}^{147}$	15.07%	6.7×10^{11} 年	$\alpha(2.18 \text{ Mev})$
鐳 ${}_{71}\text{Lu}^{176}$	2.6%	2.4×10^{10} 年	$\beta(0.215; 0.4 \text{ Mev})$; γ
鐳 ${}_{75}\text{Re}^{187}$	62.93%	$(4 \pm 1) \times 10^{12}$ 年	$\beta(0.04 \text{ Mev})$
鉍 ${}_{83}\text{Bi}^{200}$	100%	2.7×10^{17} 年	$\alpha(3.15 \text{ Mev})$

的放射性氦-3(H^3) 和碳-14(C^{14}), 它們就是由于空气里的氮因受宇宙綫中子的轟击, 通过 $\text{N}^{14}(\text{n}, \text{H}^3)\text{C}^{12}$ 和 $\text{N}^{14}(\text{n}, \text{p})\text{C}^{14}$ 的核反应而产生的, 因为它們的含量非常少, 只有用精密的探测方法才能测出。原子序数大于 83 的天然同位素分成三个放射性系, 等到第二章再詳加介紹。

人工放射性同位素是应用加速器或反应堆制造出来的同位素, 有某些是从鈾或釷的裂变产物里分离出来的。由于人工制造同位素方法的开展, 目前同位素的总数已經超过一千种。关于人工放射性同位素在第九章将加詳述。

1-6 核能級、共振及其他 如同原子一样, 原子核也具有許多能級, 最低的能級称为基級, 高的能級称为激发能級。通常用平行綫来表示核的能級, 最低的綫代表基級, 用 0 来标记。表示激发能級的横綫和基級綫的距离系与它們的能量差成正比(用 Mev 单位), 距离基級綫最近的代表第一激发能級, 其次是第二、第三、……等激发能級。不同的同位素的原子核能級也不相同。图 1-2 表示 ${}_{6}\text{C}^{13}$ 和 ${}_{7}\text{N}^{13}$ 的原子核能級图。核能級的研究是原子核物理最主要内容之一。在正常情形下, 核都是处在基态(即核的能級在基級); 只有在核反应过程中、核衰变过程中以及裂变产物中, 核可能会处在激发态。处在激发态的核一般是不能停留很久的, 它将很快跃迁到基級或先跃迁到較低能級而后到基級, 而放射出 γ 射綫(有的是放射出粒子而变成別种同位素), 这就是 γ 射綫的来源, γ 射綫的能量則等于两个能級間的能量差。有为数不多的同位素