

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

目 录

第一部分 基础原子核物理学

第一章 原子核结构和原子核反应	(3)
1-1 元素和原子结构	(3)
1-2 原子核结构	(5)
1-3 质量、能量和结合能	(6)
1-4 原子核反应	(10)
1-5 稳定的和不稳定的同位素	(14)
1-6 核能级、共振及其他	(15)
第二章 放射性的生长与衰变的一般规律	(18)
2-1 衰变定律	(18)
2-2 衰变常数、半衰期和平均寿命	(19)
2-3 放射性的生长与衰变的相互关系	(21)
2-4 多代子体的放射性系	(26)
2-5 放射性强度的单位	(33)
第三章 核衰变的种类	(35)
3-1 α 衰变	(35)
3-2 α 射线的能量和半衰期的关系; 能量和射程的关系	(37)
3-3 β 衰变	(40)
3-4 β 射线的最大能量和半衰期以及射程的关系	(42)
3-5 γ 衰变	(44)
3-6 β^+ 衰变	(47)
3-7 电子俘获	(48)
3-8 其他类型的核衰变	(51)
第四章 射线和物质的相互作用	(53)
4-1 电离和激发	(53)
4-2 散射	(56)
4-3 吸收	(57)
4-4 韧致辐射、光化辐射和契连科夫辐射	(58)
4-5 带电粒子和电场、磁场的作用	(59)
4-6 光电效应	(60)

4-7 康普敦效应	(61)
4-8 电子对的生成	(64)
4-9 γ 射线的吸收	(65)

第二部分 放射性的测量

第五章 放射性的探测仪器	(71)
--------------	--------

引 言	(71)
5-1 金箔验电器	(73)
5-2 劳里岑验电器	(74)
5-3 电离室和静电计管	(75)
5-4 其他测量小电流的仪器	(79)
5-5 气体的电离作用和电压的关系	(80)
5-6 脉冲电离室	(82)
5-7 正比计数管	(84)
5-8 盖革计数管	(85)
5-9 闪烁计数器	(91)
附 录	(93)

第六章 常用电子学	(96)
-----------	--------

6-1 定标器	(96)
6-2 放大器	(102)
6-3 符合及反符合线路	(103)
6-4 计数率器	(104)

第七章 放射性的测量	(107)
------------	---------

7-1 测定强度的简单方法	(109)
7-2 α 射线源强度的测量	(110)
7-3 β 射线的绝对测量	(112)
7-4 符合线路测量法	(117)
7-5 4π 计数管	(119)

第八章 数据的处理	(121)
-----------	---------

8-1 泊松分布和高斯分布	(121)
8-2 标准误差和可能误差	(125)
8-3 几个例子	(129)
附 录	(133)

第三部分 放射化学基础

引 言	(137)
-----	---------

第九章 放射性同位素的来源及其制备	(141)
-------------------	---------

9-1 天然放射性同位素	(142)
9-2 人工放射性同位素	(143)
9-3 靶子物和靶子	(147)
9-4 靶子的照射和放射性同位素的产率	(148)
第十章 放射化学操作方法	(153)
10-1 共沉淀	(153)
10-2 放射性胶体的形成	(158)
10-3 离子交换和色层分离	(160)
10-4 溶液萃取和络合物及螯合物	(167)
10-5 挥发法	(174)
10-6 电化学法和反冲淀积法	(175)
10-7 分离程序的制定	(176)
10-8 齐拉-却满斯效应	(178)
第十一章 放射性同位素的鉴定	(181)
11-1 测样的制备和测量中用的仪器	(181)
11-2 衰变的形式和射线的类别	(184)
11-3 半衰期的测定	(184)
11-4 射线能量的测定	(189)
第四部分 安全防护	
第十二章 剂量和放射性	(199)
12-1 剂量单位和放射性	(199)
12-2 最高允许剂量	(202)
12-3 剂量的探测	(211)
第十三章 射线对人体的影响及其防护	(212)
13-1 射线的伤害和防护简史	(212)
13-2 射线对人体的影响	(213)
13-3 射线的防护	(225)
13-4 γ 射线的防护	(244)
第十四章 放射性同位素的安全使用	(293)
14-1 放射性实验室	(293)
14-2 工作人员	(299)
14-3 安全检查	(300)
14-4 安全的控制	(302)
第十五章 放射性污染的去除	(305)
15-1 此项工作的重要性	(305)

15-2	污染的情况分类	(305)
15-3	去除污染的方法	(306)
15-4	放射性废物的排除	(310)
15-5	紧急措施	(314)

第五部分 放射性同位素的应用

第十六章 示踪原子的应用

16-1	原理	(319)
16-2	应用示踪原子的优缺点	(320)
16-3	示踪原子的选择和保藏	(321)
16-4	示踪实验中应注意的事项	(323)
16-5	标记化合物的制备	(325)
16-6	示踪实验的设计	(326)
16-7	放射性标记物的应用	(327)
16-8	依据完全的物理混合的示踪实验	(329)
16-9	稀释分析法	(330)
16-10	多室系统(Multi-compartment)的研究	(331)
16-11	反应机构的研究和反应速度的测定	(335)
16-12	扩散和自扩散的研究	(337)
16-13	磨损的研究	(338)
16-14	自射线照相	(342)
16-15	照射分析法	(345)
16-16	示踪原子在农业上的应用	(347)

第十七章 射线的应用

17-1	射线的特性	(350)
17-2	射线治疗	(350)
17-3	气体电离	(351)
17-4	静电消除	(352)
17-5	发光和发电	(353)
17-6	高分子辐射化学	(355)
17-7	射线在农业上的应用	(355)
17-8	γ 射线照相技术和金属探伤	(357)
17-9	厚度和密度的测定	(360)

第 一 部 分

基 礎 原 子 核 物 理 学

第一卷
基础理论

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。原子核带正电荷，电子带負电荷。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。原子核所带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，它的核带有 $1e$ 正电荷。鉄原子有 26 个繞行电子，它的核带有 $26e$ 正电荷。換句話說，原子核所带的正电荷刚好和各繞行电子所带負电荷的总和相等。这样就构成中性的原子。当原子失去一个或几个(或增加一个或几个)繞行电子时，它就带有电荷。此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(${}_{43}\text{Tc}$)和鉷(${}_{61}\text{Pm}$)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。

繞行电子和原子核构成一个原子，可是它們个別的质量是相差很远的。原子核差不多具有原子的整个质量，电子的质量比起核来要輕很多。例如最輕的氢原子，核的质量是 1.67243×10^{-24} 克，而它的一个繞行电子的质量才有 9.1085×10^{-28} 克。二者的比是

$$\frac{\text{电子质量}}{\text{氢核质量}} = \frac{9.1085 \times 10^{-28}}{1.67243 \times 10^{-24}} = \frac{1}{1836}.$$

原子序数大的元素，这个比数还要小些，例如铀原子，它的 92 个繞行电子的总质量和核的质量的比只有 $\frac{1}{4714}$ 。

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

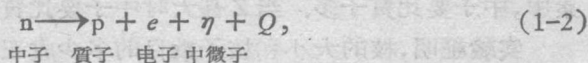
原子核外围的每一个繞行电子都有它固定的軌道（圓的或橢圓形的）。这些軌道分成好几个壳层，每一个壳层有它固定数目的几个軌道。每个軌道最多只能有一个电子。最靠近核的是 K 壳层。它有两个軌道，所以最多只能有两个繞行电子。第二是 L 壳层。它有两个支壳层，第一支壳层有两个軌道，第二支壳层有六个軌道，所以 L 壳层最多只能有 8 个繞行电子。第三是 M 壳层。它有三个支壳层，共有 18 个軌道，所以最多只能有 18 个繞行电子。一般說起来壳层里可以有的最多电子数目可以用 $2n^2$ 来表示。 $n = 1$ 代表 K 壳层， $n = 2$ 代表 L 壳层，余类推。电子在某一軌道繞行具有一定的能量。K 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。倘是激发的能量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，則能量較高軌道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，电子

多余的能量一般是成为电磁波(光子)放射出来。电磁波的波长 λ 和两个轨道能级差的关系可用下式表示:

$$\frac{hc}{\lambda} = E_n - E_{n'}, \quad (1-1)$$

这里 $h = 6.6252 \times 10^{-27}$ 尔格·秒, 称为普朗克常数; $c = 2.99793 \times 10^{10}$ 厘米/秒 (通常采用 $c = 3 \times 10^{10}$ 厘米/秒) 为光在真空中的速度。 E_n 和 $E_{n'}$ 分别代表电子在壳层 n 和壳层 n' 中的能量。从式 (1-1), 可以看出, 电子从一个轨道跃迁至另一个轨道时所放射出的电磁波的波长是具着固定的值的。

1-2 原子核结构 在 1932 年中子被发现之后, 人们对于原子核的构造才得到进一步的正确了解。中子是一种不带电的中性粒子, 它的质量是 1.6747×10^{-24} 克, 比氢核的质量略为重一些, 在天然界里中子并不单独存在。它是在原子核受了外来粒子的轰击而起了变化时, 才从核里释放出来的。中子, 当它是自由状态而存在时, 是不稳定的。它会蜕变成为一个氢核(质子)、一个电子和一个中微子。蜕变的半衰期为 12.8 分钟。若用式子表示则为



这里 η 代表中微子, 是一种质量十分微小的中性粒子。它的质量比电子质量的 $\frac{5}{10000}$ 还小。 Q 代表在这蜕变过程中所释放出来的能量。我们现在知道质子、中子和电子都是基本粒子。原子核的构造, 就是由质子和中子相结合而成。现在就以氢元素为例来说明。天然氢元素的原子并不是都相同的。一种氢原子的质量差不多比另一种氢原子的质量大一倍。较轻的一种含量佔天然氢的 99.9844%, 它的核就是一个质子。另一种称为重氢(或氘)含量只佔 0.0156%。它的原子质量是 3.3439×10^{-24} 克。它的核由一个质子和一个中子结合而成。此外, 还有一种含量极乎微小而质量更重的氢, 称为氚。它的原子质量是 4.991×10^{-24} 克。它的核由一个质子和两个中子结合而成。氢、氘和氚是原子序数相同、而原子质量不同的元素, 因此称为同位素。同位素的原子质量通常称为

同位素質量。氢和氦是稳定的。氚是不稳定的，它会放射 β 粒子而蜕变成氦。不稳定的同位素又称为放射性同位素。

通常用式子 ${}_Z X^A$ 来表示同位素。 X 代表元素的符号； Z 为原子序数； A 为原子質量数，等于質子和中子的总数。例如氢、氚和氘用式子来表示分别为 ${}_1\text{H}^1$ ， ${}_1\text{H}^2$ 和 ${}_1\text{H}^3$ 。左下角的数字除了表示原子序数外，还表示原子核里的質子数。中子的数目则为 $A-Z$ 。凡是 Z 相同而 A 不同的称为同位素(Isotopes)。 A 相同而 Z 不同的如 ${}_1\text{H}^3$ 和 ${}_2\text{He}^3$ ； ${}_3\text{Li}^3$ ， ${}_4\text{Be}^3$ 和 ${}_5\text{B}^3$ 等則称同量異位素(Isobars)。 A 和 Z 相同的，如 ${}_5\text{B}^{11}$ ， ${}_6\text{C}^{12}$ 和 ${}_7\text{N}^{13}$ ； ${}_{19}\text{K}^{39}$ ， ${}_{20}\text{Ca}^{40}$ 和 ${}_{18}\text{A}^{38}$ 等則称为同中子異荷素(Isotones)。 A 和 Z 都相同，但核处于不同的能級如 ${}_{47}\text{Ag}^{110}$ 和 ${}_{47}\text{Ag}^{110*}$ ； ${}_{55}\text{In}^{115}$ 和 ${}_{55}\text{In}^{115*}$ 等則称为同質異能素(Isomers)，处于較高能級的同質異能素通常加一星号以和低能級的相区别。

質子和中子相結合而构成原子核，因此它們又簡称为核子。在一个核里，質子和中子的相对数目并不是可以成任意比例的。一般說来，在 Z 小的稳定同位素中，中子数差不多等于質子数或略多一些。只有 ${}_1\text{H}^1$ 和 ${}_2\text{He}^3$ 算是例外，在它們的核中，中子比質子还少。在 Z 大的同位素中，中子要比質子多。当 Z 甚大时中子要比質子多50%左右。

实验証明，核的大小和核子数目的多少成正比。換句話說，核的半径 R_n 和原子質量数的立方根成正比，即：

$$R_n = R_0 A^{1/3}. \quad (1-3)$$

R_0 为一常数，它的值在不同的文献里并不一致。比較常用的是 $R_0 = 1.2 \times 10^{-13}$ 厘米。

1-3 質量、能量和結合能 基本粒子的質量都是十分小的，因此原子或原子核的質量通常是用原子質量单位(amu)来表示。原子質量单位是以 ${}_8\text{O}^{16}$ 的原子質量作为16.000000 amu为标准而定出来。这和化学上所用的原子量是有区别。化学的原子量是以氧元素作为16单位，而自然界里的氧元素是 ${}_8\text{O}^{16}$ ， ${}_8\text{O}^{17}$ 和 ${}_8\text{O}^{18}$ 三种同位素的混合物。此外原子量只是一个比数，而原子質量单位則是量度質量的单位。它和克的关系是：

$$1\text{amu} = 1.6554 \times 10^{-24} \text{克}.$$

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.

例如钨的 $E_L = -2870 \text{ ev}$; $E_K = -20,000 \text{ ev}$, 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
氢 原 子	${}_1\text{H}^1$	1.008142
氘 原 子	${}_1\text{H}^2$	2.014741
氦 原 子	${}_2\text{He}^4$	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、氘、氦等同位素的質量。从这个表可以看出,氘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:

$$m_{\text{H}^2} - (m_n + m_p + m_e) = 2.014741 - 2.017124 = -0.002383 \text{amu}.$$

同样地,氦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小。这种現象称为質量亏损。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,氘的結合能为:

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

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,如氘核含有两个核子,它的每一核子結合能应为 $2.219/2 \simeq 1.110 \text{Mev}$,又如 ${}_8\text{O}^{16}$ 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,有四个峯值出现在 ${}_2\text{He}^4$, ${}_4\text{Be}^8$, ${}_6\text{C}^{12}$ 和 ${}_8\text{O}^{16}$ 。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, 它的核将发生裂變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 ${}_1\text{H}^2$ 和 ${}_1\text{H}^3$ 相作用可产生 ${}_2\text{He}^4$ 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氦而放出能量. 氢弹的爆炸也是应用此法, 这样的反应过程称为聚变.

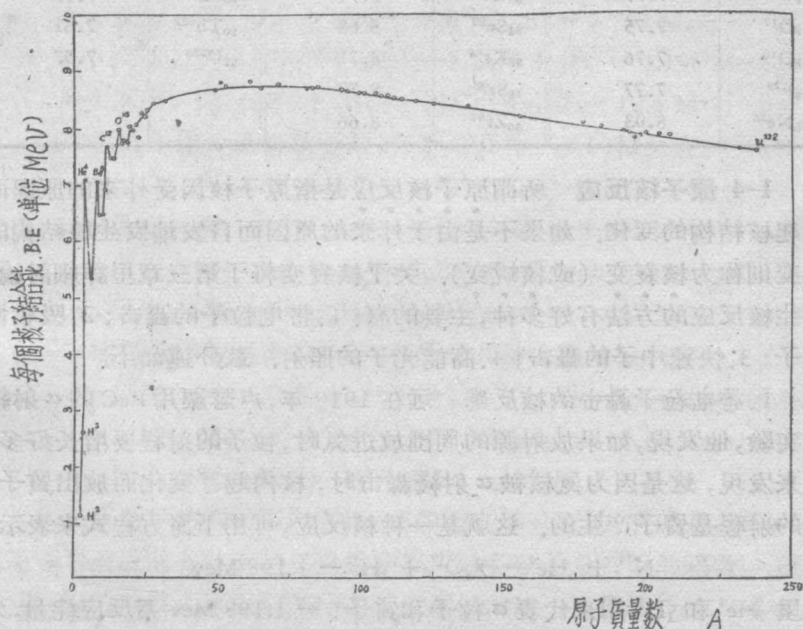


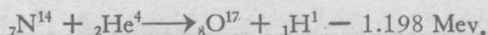
图 1-1 每个核子結合能和原子質量数的关系

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	${}^{85}\text{Os}^{192}$	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	${}^{28}\text{Fe}^{56}$	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. 帶电粒子轟击的核反应 远在 1919 年, 卢瑟福用 RaC 的 α 射綫作实验, 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 射綫轟击时, 核內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; $- 1.198 \text{ Mev}$ 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 ${}_3\text{Li}^7(\alpha, n){}_4\text{Be}^{10}$]。

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: ${}_3\text{B}^{10} + {}_1\text{H}^1 \longrightarrow {}_4\text{Be}^7 + {}_2\text{He}^4 + 1.147 \text{ Mev};$

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: ${}_4\text{Be}^9 + {}_1\text{H}^2 \longrightarrow {}_5\text{B}^{10} + {}_0\text{n}^1 + \quad \text{Mev}.$

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