

放射性辐射的防护及剂量学

(专 家 讲 稿)

1957年乙丑年

放射性輻射的防護及劑量學 (老 家 訓 刊)

序 言

大家都知道，無論在外部照射或者特別是在放射性物質進入人體內部的情況下放射性輻射都能給人體以有害的影響。在科學、技術和工業中物質的放射性的迅速增長着的应用以及原子核動力學的發展使愈來愈多的人參加到使用放射性同位素的工業中去。

在極為多種多樣的科學、技術和工業的部門中都必须在這樣或在那樣的程度上與放射性輻射發生關係。這里必須包括有：

1. 放射性礦物的開採，精鍊和提純。

2. 核反應堆：

a) 用來獲得原子核燃料的反應堆；

b) 用來獲得能量的反應堆；

c) 用來獲得放射性同位素的核反應堆。

3. 原子武器的製造。

4. 放射化學實驗室以及使用示蹤原子的實驗室。

5. 放射性物質在建築製造業、地質學、醫學等各方面的应用。

在可使用的放射性物質其數量對人體是具有危險性的地方必須施行一系列的防護措施及防護規則，做到這一些就可以保證安全的勞動條件。

本課程的任務在於給所講者以必要的一些知識，這些知識是科學工作者、工程師以及其他專業的實際工作者們在使用放射性元素時所必須知道的。

第一章 放射性

§1. 一般性的知識

我們周圍所有的各種各樣的物體是由不多幾種不同種類的原子所組成的，這些不同種類原子的區別在於其不同的結構。每一個原子是由一個具有正電荷的核以及一些圍繞着核運動着的帶負電的电子組成的，這些电子由於電的吸引力而被保持在核的附近。圍繞着原子核的电子聚集成一些所謂电子殼層。

原子的化學性質決定於其原子殼層的構造，尤其是離原子核最遠的外殼層的構造。屬於同一化學元素的原子具有同樣的电子殼層的構造以及同樣的化學性質。現在已經知道的一百種不同的化學元素。

隨着原子的电子殼層的複式化不同原子的外电子殼層的構造週期性地重複着，因而在元素的性質方面出現了有規律的週期性。這個規律性還在一八六九年在對原子的構造進行研究以前就已經被德·門德列也夫 (Д. И. Менделѣев) 發現並被用於建立元素週期表。

按照現代的觀念，原子核是由二種質量幾乎相同的基本粒子組成。其中的一種帶有正電荷，正電荷的數量等於电子的電荷，這種粒子稱為質子，另一些在電學上中性的粒子稱為中子。

質子和中子被稱為重粒子或者有時稱為核子 (由拉丁字 "Nucleus" ——核——而來) 以與輕粒子电子相區別。电子的質量比質子的質量小 1836.5 倍。

應當指出，目前除了那些根據我們現有的觀念是組成原子的基本成份的基本粒子——电子，質子和中子——外尚有以輻射的形式出現的其它的基本粒子。在下頁的表中給出關於基本粒子的綜合性的材料 (見表1)

原子的主要质量集中在核内，原子核可以想像成一个球形的特殊的核液的“滴”，这个液滴的半径可用公式

$$R = r_0 A^{1/3}$$

很好地表示出来，式中 A ——原子核中的核子数，而 $r_0 = 1.4 \times 10^{-13}$ 厘米。由这一表示式可知对所有的核而言核物质的密度是相同的。在这样一个概念中质子和中子起着组成液滴的分子的作用。它们处于不间断的运动之中，并且尽管有同号电荷的质子间有静电斥力由于短程核力的作用（ $\sim 10^{-13}$ 厘米）他们仍然稳固地呆在其中。这种核力的性质至今还不知道。

即使处于最低的激发状态的轻核使我们有理由假定有一定的核壳层结构存在。

核的正电荷（用基本电荷的大小表示的）等于核中的质子数，相应地元素在德·依·门德列耶夫的周期表中两位的方格的号码並以符号 Z 表示的元素的原子序数是等于核中的质子数时，也就是等于核的电荷的。在中性的原子中质子的电子壳层中的电子的数目等于原子核中的质子的数目。因而在原子中电子数目是等于元素的原子序数的。

原子质量的数量级等于 $10^{-22} - 10^{-24}$ 克，因此它们是用专门的单位来量度的。在原子物理学中采取所谓原子质量单位（a.e.m.）。按照定义一个原子质量单位等于氧的主要同位素的原子质量的 $1/16$ ，它相当于 $1.6603 \cdot 10^{-24}$ 克。用 a.e.m. 单位时质子的质量等于 1.00758，中子的质量则等于 1.00898。

正如上面已经指出的，原子的主要质量集中在原子核中。电子的贡献只是原子总质量的万分之一。用 a.e.m. 为单位时所有的原子的质量接近整数，因为组成原子核的质子及中子的质量仅在小数点后第三位才与一有所差别。这些整数显然决定了核中重粒子的总数。但是应当注意到原子核就其质量而言是

是比它的各个组成部份的总和要小一些。关于这一被称为质量亏损的现象的原因我们在这里不准备加以叙述。

表 1

基本粒子的种类	符号	电荷	静止质量 (以质子质量为单位)	以电子质量为单位 时粒子的质量。
光子	γ	0	0.00107 ($E_0 = 1.02$ 兆电子伏特)	0
电子	$\beta^- (e^-)$	-1	0.0005486	m_e
正电子	$\beta^+ (e^+)$	+1	0.0005486	m_e
μ-介子	$\mu^\pm$	± 1	——	$\sim 209 m_e$
π-介子	π^+	+1	——	$\sim 276 m_e$
	π^-	-1	——	$\sim 276 m_e$
	π^0	0	——	$\sim 266 m_e$
τ-介子	$\tau^\pm$	± 1	——	$\sim 967 m_e$
质子	p	+1	1.00758	$\sim 1836 m_e$
反质子	$\bar{p}$	-1	1.00758	$\sim 1836 m_e$
中子	n	0	1.00898	$\sim 1838 m_e$
中微子	ν	0	0	0

原子核中重粒子的数目以符号 A 表示并称之为质量数。

氢原子的核由一个质子组成，其质量数等于一；氦原子—— α ——的核由一个质子和一个中子组成。其质量数等于二。因为原子的化学性质决定于包含于核内的质子数 Z ，故氢和氦的化学性质是一样的。这样的话，同一种化学元素的原子核之间可以有这样的区别，即在該元素的各种不同的核中有数目不同的中子（中子数等于 $A - Z$ ），亦就是说有不同的重粒子的数目 A 。

具有同样的质子序数 Z 但有不同的质量数的质子称为同位素。

大部份的元素有几种稳定的同位素，因此用原子质量单位来显示的元素平均原子质量（人们称之为原子量）有时与整数相差很远。譬如，在天然的氧的混合物中含有 7.54% 的原子质量为 34.980 的稳定同位素（ $A = 35$ ），而原子质量为 36.997 的同位素占 24.6%（ $A = 37$ ）——故由天然矿物中得到的氧的原子量为 35.5。因此在原子核物理学中取质量数为 16 的氧的同位素的原子质量的 $1/16$ 为原子质量单位，因为氧还有 $A = 17$ 和 $A = 18$ 的稳定同位素。在化学中取各种同位素的天然成份的氧的原子量的 $1/16$ 为原子质量单位。同位素以元素的符号表示，并且在右上方标示出质量数 A ，而在左下方标示出质子序数，例如， $A = 16$ 的氧同位素表为 $^{16}_8\text{O}$ ，有时候表示原子序的指数标在下边。我们再引进描述原子核的一些符号。具有同样的质量数 A 而有不同的质子序数 Z 的质子称为同质量素，例如 $^{140}_{56}\text{Ba}$ 和 $^{140}_{57}\text{La}$ 。具有同样的中子数 $N = A - Z$ ，而有不同的质量数 A 的质子称为同中素，例如， $^{30}_{15}\text{P}$ 和 $^{31}_{16}\text{S}$ 。

除了稳定同位素外所有的元素都还有不稳定同位素。它们的核在发生自发的蜕变的时变成另一些元素的原子核。这样的同位素称为放射性同位素。它们中间的大部份正是由于自己的不稳定性在自然界中没有被发现而只能用人工的方法获得。目前已经知道的有 900 种这样的同位素，其中包括几十种天然放射性同位素。正是研究这些天然放射性同位素才导致了放射性蜕变现象的发现。

§ 2. 放射性蜕变的规律

在放射性蜕变时显示出二个对于一切元素普遍成立的规律，即是：平均而言在单位时间内蜕变的某放射性同位素的原子的数目总是佔还未蜕变掉的原子总数的一定的份额，这份额对于该同位素而言是特征性的。在数学上这一规律可以写成关系式：

$$-\Delta N = \lambda N \Delta t; \quad (1.1)$$

在一个很小的时间间隔 Δt 中在初始的 N 个原子中蜕变掉的原子的数目 ΔN 正比于 N 和 Δt 。比例系数，有蜕变常数之称并且是该放射性同位素特有的一个常数。 λ 表示在单位时间内一个原子蜕变的几率。

简单的放射性蜕变规律的微分公式具有指数关系的形式：

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (1.2)$$

其中 N_0 — 在起始时刻，即 $t = 0$ 时的原子数， N — 到 t 时刻尚残留下来的原子数。

但是通常都使用另一个放射性蜕变速度的特征，即所谓半衰期 T 。

半衰期这是这样一个时间间隔，在这一时间间隔的过程中一定量的放射性物质减少一半。

由公式 (1.2) 我们得到：

$$\frac{N}{N_0} = \frac{1}{2} = e^{-\lambda T}$$

由此

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda} \quad (1.3)$$

在蜕变过程中核放出放射性射线。除了半衰期外辐射的性质也是放射性同位素的重要特征。就其本性而言放射性辐射一般为三种类型，即区分为 α —， β —和 γ —射线。除了这些主要形式的放射性幅射外核的蜕变可以伴随着放出伦琴射线的特

征譜和衰變譜。

α -射线就是快速飞行的氦核(确切些說就是同位素 ${}^4\text{He}$ 的核)的流。

β -幅射—就是由核放出的电子(β^-)或者正子(β^+) (正子—质量与电子相同而具有正电荷的粒子)的流。按照近代的概念在原子核没有“现成”的 β -粒子,它们是在核的变化过程中产生的就好像物质的原子所放出的光是由于原子的电子壳层中的一些过程而产生的一样。大部份放射性同位素是 β -幅射体。

γ -射线是一种相似于伦琴射线和光线的一种幅射。这种幅射是在由一个激发态过渡到另一激发态或是基态能级时所放出的。 γ -幅射常常伴随着 α -蜕变和 β -蜕变而出现。成为这一蜕变的次级效应。一般而言 γ -射线是由在放出 α -或 β 粒子后形成的新的元素的激发原子核放出的。

放射性幅射的能量常用专门的单位来量度。在原子物理中採用一个电子伏特($\equiv \text{eV}$)。这就是电子在电场中穿过一伏特的电位差时所获得的能量。1千电子伏特(KeV) (等于 10^3eV)和1兆电子伏特(MeV)等于 10^6eV)是它的导出单位。因为电子的电荷等于 $4.8 \cdot 10^{-10} \text{ CGSE 单位}$,而1伏特等于 $1/300 \text{ CGSE 单位}$,故 $1 \text{ eV} = \frac{4.8 \cdot 10^{-10}}{300} = 1.6 \cdot 10^{-12}$ 尔格。 $1 \text{ MeV} = 1.6 \cdot 10^{-6}$ 尔格。

由放射性物质放出的 α -粒子的能量通常等于几个兆电子伏特。而 β -粒子的能量则可从0到几个兆电子伏特。 γ -光子的能量则在几件到几兆电子伏特的范围内,这相当于波长从几个埃($1 \text{ \AA} = 10^{-8}$ 厘米)到千分之几埃。

已知电磁幅射的波长与 γ -光子的能量间有关系式

$$\varepsilon = \frac{hc}{\lambda} \quad (1.4)$$

· 此处 ν —— 普朗克常数 $= 6.62 \cdot 10^{-27}$ 尔格·秒, ν —— 辐射的频率。因为 $\nu = \frac{c}{\lambda}$, 其中 c —— 真空中的光速 (等于 300000 公里/秒), 所以波长 λ 相当于光子能量 $\epsilon = \frac{h\nu}{\lambda}$ 。假如 λ 用埃表示, 而 ϵ 用电子伏特表示, 则波长为 λ 埃相当于光子能量

$$\epsilon = \frac{12.395}{\lambda} \text{ K e V} \quad (1.5)$$

电磁辐射不仅以波长和光子的能量为特征, 而且也可以一定的动量, 因而也可以一定的质量为其特征。由爱因斯坦公式

$$\epsilon = mc^2 \quad (1.6)$$

可以得到能量与质量之间的关系, 式中 c —— 真空中的光速; 关系式 (1.6) 使我们能够确定质量和能量单位间的关系。原来

1. 原子质量单位 $= 931 \text{ M e V}$ 。

与电子或正子的静止质量相联系的能量等于 0.511 M e V 。

§ 3. 放射性的单位

放射性样品的放射性强度是它的一个重要的性质。在单位时间内蜕变的原子数称为该样品的放射性强度 α :

$$\alpha = - \frac{\Delta N}{\Delta t} = \lambda N \quad (1.7)$$

由关系式 (1.7) 可以看到放射性强度就等于乘积 λN 。知道了放射性强度及蜕变常数就可以确定任何时刻该放射性物质内尚存的原子数。

放射性的基本单位是居里。

起初居里的意义就是指与自己的蜕变产物处于平衡状态的一克镭中每秒钟所发生的蜕变的数目, 大约相当于每秒钟内 $3.71 \cdot 10^{10}$ 个镭的蜕变动作。

2. 应用居里这一单位来测量非铀—镭系的放射性元素的放

射性时存在着原则性的困难。问题在于计算相当于一居里的蜕变数目的精确度是有限的，例如对于镭精确度为1—5%。最近的测定表明，在一克镭蜕变时每秒钟发出 $(3.61 \pm 0.03) \cdot 10^{10}$ 个 α -粒子。以后新的测量可能再改变上述给出的那个数字。对于铀-镭系的元素而言这种情况不使我们在表示它们的放射性时有所改变，但是对于其它的放射性元素而言则须要重新计算。

目前根据国际镭标准委员会的建议认为一居里的放射性假定是相当于每秒钟恒定的蜕变数，即每秒种 $3.71 \cdot 10^{10}$ 个蜕变的。

各种 α -及 β -辐射体的放射性的大小就是根据这一建议用居里这一单位来表示的。

对于小的放射性常用毫居里 (MKIOPM) 和微居里 (MKKOPM) 这两个单位。

$$1 \text{ 居里} = 10^3 \text{ 毫居里} = 10^6 \text{ 微居里}$$

$$1 \text{ 微居里} = 10^{-3} \text{ 毫居里} = 10^{-6} \text{ 居里}$$

由于居里这单位的人为性质不久前曾建议另一个测量 α 及 β -放射性的单位——库瑟福。库瑟福——这就是这样多的放射源物质的放射性，在这些放射性物质中每秒钟发生 $1 \cdot 10^6$ 次蜕变。较小的单位为毫库瑟福——秒钟内有 $1 \cdot 10^3$ 次蜕变和微库瑟福——秒钟有一次蜕变。符号为：库瑟福—rd；毫库瑟福—mrd，微库瑟福— μ r。

$$1 \text{ 居里} = 37 \cdot 10^3 \text{ rd}$$

但是这一单位制还没有得到广泛的应用（在苏联没有被正式地採用）。

在液体中和气体中放射性物质的浓度的单位：

$$1 \text{ 居里/升} = 2.2 \times 10^{12} \text{ 蜕变数/分钟, 升}$$

1 安培 (A) : $1 = 10^{-16}$ 居里/升 = 220 蜕变数/分钟

1 居里 (Curie) = $3.64 \cdot 10^{-11}$ 居里/升 = 780 蜕变数/分钟。升。

对于铀、钍和镭而言体积极度一般用每升多少克表示。

居里这一单位早先是用于测定天然物的放射性的。现在常用安培这一单位 (1 居里 = 3.64 安培)。

各种各样的地质里这一单位用来描述放射性的做法都引起混乱因而必须停止使用。

γ -放射性样品的强度通常由被研究的样品所产生的电离作用的大小来确定。在苏联采用毫克镭当量为 γ -样品的放射性的单位。毫克镭当量——就是任何这样的放射性样品的放射性，这个样品的 γ -辐射在同样的测量条件下在空气当量的电离室中产生的电离与一毫克苏联国家标准射镭所产生的电离相同。

一毫克与蜕变产物处于平衡状态的镭的杂质经过 0.50 毫米的铂的初步过滤后在空气中距源 1 厘米远处产生的剂量率为每小时 8.4 伦琴 (伦琴/小时) (没有铂过滤时为 9.7 伦琴/小时)。

伦琴单位——这是这样数量的伦琴射线或 γ -射线，它在穿过标准状态的纯空气时在 1 厘米³ 中产生 1 CGSE 的正电荷和 1 CGSE 的负电荷。

这样 1 毫克镭当量就相当于任何这样的放射性物质的 γ -放射性，其杂质在 1 厘米远处产生的物理剂量率为 8.4 伦琴/小时。

有时采用伦琴一小时——这是 γ -放射性单位 (伦琴/小时，米)。伦琴一小时——这是这样过滤的 γ -放射性，它在 1 米远处产生的物理剂量率为 1 伦琴/小时。在苏联伦琴/小时，其并没有被正式采用。我们用毫克镭当量来表示在 1 米远处产

它的物理剂量率为 1 伦琴/小时的瞬时放射性。毫克镭当量在一厘米远处产生的剂量率为 8.4 伦琴/小时，而在 1 米远处为 $8.4 \cdot 10^{-4}$ 伦琴/小时。要在 1 米远处产生 1 伦琴/小时的物理剂量率放射就必须使 $\frac{1}{8.4 \cdot 10^{-4}} = 1.2 \cdot 10^3$ 伦，就是说需要是 1200 毫克镭当量 = 1.2 克镭当量。

让我们来求放射性为 1 居里的放射性元素的重要（用克为单位），由 (1.7) 和 (1.1) 可以得出这样的结论：对于一定的样品在单位时间内蜕变掉的原子数：

$$\alpha = - \frac{\Delta N}{\Delta t} = \lambda N$$

因为对 1 居里而言 $= 3.71 \cdot 10^{10}$ 蜕变数/秒， $N = \frac{Q}{A}$ ，其中 N —— 原子和德罗常数 $6 \cdot 10^{23}$ 原子/克原子量， Q —— 用克为单位的放射性元素重量（不计载体体的重量）， A —— 原子量，而 T —— 半衰期，并且 $\lambda = \frac{0.693}{T}$ ，故 $3.71 \cdot 10^{10} = \frac{0.693}{T} \cdot \frac{Q}{A} \cdot 6 \cdot 10^{23}$ 。

$$Q = 8.9 \cdot 10^{-4} \text{ AT (T 用秒为单位)}$$

$$Q = 3.3 \cdot 10^{-12} \text{ AT (T 用分为单位)}$$

$$Q = 3.2 \cdot 10^{-10} \text{ AT (T 用小时为单位)}$$

(1.8)

$$Q = 7.7 \cdot 10^{-9} \text{ AT (T 用天为单位)}$$

例： $Q = 2.4 \cdot 10^{-6} \text{ AT (T 用年为单位)}$ 。

例：我们计算 1 居里的 Ca^{45} 的重量 ($A = 45$, $T = 152 \text{ 天}$)

$$Q = 7.7 \cdot 10^{-9} \cdot 45 \cdot 152 = 52.7 \cdot 10^{-6} \text{ 克} = 52.7 \cdot 10^{-3} \text{ 毫克} = 52.7 \text{ 微克}$$

$$10^{-3} \text{ 毫克} = 52.7 \text{ 微克}$$

一克任意的放射性元素（用居里为单位）可由下列公式来确定：

$$C = \frac{3.71 \cdot 10^{10}}{A \cdot T} \text{ (T 以秒为单位)}$$

$$C = \frac{1.30 \cdot 10^3}{4T} \quad (T \text{ 以分钟为单位})$$

$$C = \frac{3.12 \cdot 10^4}{4T} \quad (T \text{ 以小时为单位})$$

$$C = \frac{1.30 \cdot 10^8}{4T} \quad (T \text{ 以天为单位})$$

$$C = \frac{3.57 \cdot 10^5}{4T} \quad (T \text{ 以年为单位})$$

例：确定 1 克 Cd^{45} 的放射性 ($A = 45$, $T = 152$ 天)。

$$C = \frac{1.30 \cdot 10^3}{45 \cdot 152} = 1.9 \cdot 10^4 \text{ 居里/克}$$

在使用放射源的时候随时都应该考虑到源的放射性的逐渐减弱，这主要是对短寿命的同位素而言的。我们上面已经指出过，放射性样品的改变由下面的公式决定：

$$C_t = C_0 e^{-\lambda t} = C_0 e^{-\frac{0.693t}{T}}$$

其中 C_0 —— $t = 0$ 时源的放射性， C_t —— 经过时间间隔 t 后源的放射性。

如果在某一定时刻 t 时的放射性 C_t 已知，则在 t 时间前的初始放射性 C_0 可由下式确定：

$$C_0 = C_t \cdot e^{\lambda t} = C_t \cdot \frac{0.693t}{T}$$

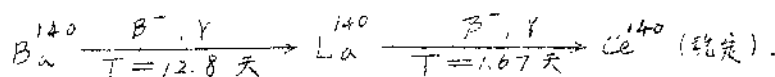
假如 0_1 —— 母代元素的放射性，则子代元素的放射性 C_2 在时间 t 内的增长按下式的规律进行：

$$C_2 = C_1 \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})$$

其中指数 1 和 2 分别属于母代元素和子代元素。

在所有上面列举出来的公式中 T , t 和 λ 应当用同样的单位来表示。

我们举一个铀放射链中的放射性同位素钍和镭的对比关系的例子，放射链为



假定我们要确定在起初只含有 Ba^{140} 的样品中经过 30 天后 Ba^{140} 和 La^{140} 的相对含量为多少，

设在 $t=0$ 时 Ba^{140} 原子的数目等于 N_0 ，那么经过 30 天后钍原子的数目将等于

$$\begin{aligned} N_{\text{La}} &= \frac{\lambda_{\text{Ba}} N_0}{\lambda_{\text{La}} - \lambda_{\text{Ba}}} (e^{-\lambda_{\text{Ba}} t} - e^{-\lambda_{\text{La}} t}) \\ &= \frac{0.054 N_0}{0.415 - 0.054} (e^{-0.054 \cdot 30} - e^{-0.415 \cdot 30}) = 0.693 N_0 \end{aligned}$$

$$(\lambda = \frac{0.693}{T}; \lambda_{\text{Ba}} = \frac{0.693}{12.8} = 0.054; \lambda_{\text{La}} = \frac{0.693}{1.67} = 0.415)$$

也就是说放射性的钍核的数目将等于钍原子的初始数目的 $\frac{3}{100}$ 。

经 30 天后钍原子的数目为

$$N_{\text{Ba}} = N_0 e^{-\lambda_{\text{Ba}} t} = N_0 e^{-0.054 \cdot 30} = 0.2 N_0.$$

为了确定放射性随时间的相对改变 ($C_t/C_0 = e^{-\frac{0.693t}{T}}$) 使用这样一个表是很方便的，在这表中给出作为 $\frac{t}{T}$ 的函数的 $\frac{C_t}{C_0}$ 。(请参看附录中的表 1)。

§ 4. 人工放射性

正如已经讲过的，放射性元素的主要部份是用人工方法取得的。

应当把钋 (${}^{210}_{84}\text{Po}$)，(${}^{214}_{86}\text{Rn}$)，(${}^{214}_{82}\text{Pb}$) 和 (${}^{214}_{83}\text{Bi}$) 归入种类很少的天然放射性元素之列。

有时候样品是由几种在放射上相互有关的放射性物质组成。在这种情况下放射性原子的蜕变导致另一种放射性原子的形

成，而这种原子也蜕变产生新的放射性原子，如此等 γ 。蜕变的过程分为几个阶段进行直到这样的放射系以形成有稳定核的原子而告终为止。已经知道有三个天然放射系：钍系，铀系和锕系。随着超铀元素的发现已经发现有一个第四系——镭系存在。除此以外在重核分裂时形成了一些由几个同位素组成的放射链。

人工放射性同位素都是由于核反应的结果而得到的。

现代的技术能够获得强大的高能荷电粒子流。加速器，例如，回旋加速器，线性加速器等 γ 便是这样的粒子的流。通常人们在这些的加速器中获取被加速了的原子（重核）束，氦核（重氢的核）束或者 α -粒子（ ${}^4\text{He}^+$ 的核）束。在以巨大速度运动着的粒子与靶的核相互作用时就发生核反应。由于这些核反应的结果就产生人工放射性同位素。

为了获得人工放射性同位素同样也使用中子。在用 α -粒子，氦核或者原子束击很多种同位素的原子核时都可以从中取得中子。在莫斯科的条件下人们常由镭—铍源获取中子。在铍的 α -粒子的作用下铍就放出中子。在铀或者其它重元素的核分裂时也产生中子。在所谓反应堆中进行的核分裂的链式反应产生很强的中子流。原子核反应堆目前是获取人工放射性同位素的主要来源之一。原子核反应的种类很多。核反应的性质与用来轰击的粒子的种类，它的能量以及什么样的原子受到照射有关。

对于实验获取某种放射性同位素而言一个核反应的合适性在很大程度上决定于所谓反应效率。

我们将用单位流量能照射粒子得到的我们感兴趣的反应产物的放射性强度为核反应效率。通常发表的效率是对一微安位的荷电的轰击粒子的电流而言的，除了所利用的核反应的形式

此外，轰击粒子或光子的能量，在元素中核反应的起始同位素的百分含量，在靶的材料中该元素的百分含量以及照射的延长时间都会对反应效率的大小发生影响。因为当形成放射性同位素的同时在靶中还发生该同位素的蜕变，而且蜕变次数正比于靶内放射性核子的总数而增长，靶的放射性一直增加到照射时间达到了 λ^{-1} 时为止，此后在放射性核的产生和蜕变的过程之间实际上达到了平衡，而放射性就不再增加（要正确些说增加得很小）。

可以证明，在靶中放射性核 N^* 的随照射时间的积累按下列规律进行

$$N^* = \frac{A}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t}) \quad (1.10)$$

此处 A ——在靶加速了的粒子束不变时为一常数， λ ——所产生的放射性同位素的蜕变常数。

实际上放射比度（样品）的单位质量（或体积）所有的放射比度也是一个重要的量。放射比度与放射性元素以何种化合物的形式被使用以及该化合物在溶液或者其它载体中的数量有关。此时元素的原子中有怎样一部份是放射性的是一个很重要的问题。在元素中放射性原子愈多，就可能由该元素中获取放射比度更大的样品。因此当放射性同位素和起始物质是不同的化学元素时就可以得到放射比度最大的样品。此时放射性同位素可以用化学方法来分离因而得到纯粹的放射性同位素或者有比较少的“载体”杂质，也就是有较少的同一元素的非放射性原子，这些原子是在化学浓缩的过程中附加进来的。

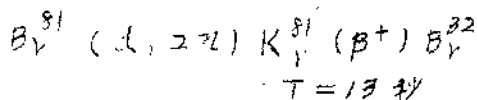
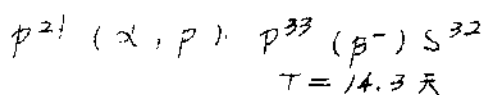
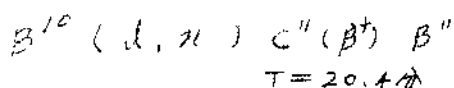
通常核反应是按照引起反应的粒子和反应的结果产生的粒子的种类来分类的。依据所采用的书写方法它们写成 $(\alpha, \dots n)$ ， (d, n) ， (d, p) ， $(d, 2n)$ ， (n, p) ， (n, γ) ， $(n, 2n)$

反应等等。

通常带电粒子与物质相互作用的截面随粒子能量的增加而增加。在低能由于有库伦势垒存在相互作用截面很小。

在带电粒子轰击下由于获得强大的被加速了的带电粒子流的可能性受到限制是非常少的。

下列反应可以作为产生放射性产物的反应的例子：



反应 (d, α) 、 (d, n) 及 $(d, 2n)$ 对于获取某些没有载带体的重要的放射性核是有意义的。回旋加速器是用来生产放射性同位素的重要装置。虽然在生产率方面它也不能够和反应堆相比，然而它是一种更加多方面的仪器。用回旋加速器可以得到在反应堆中不产生的，或者产生的量很少的，或者不纯的一些同位素。

中子给出的放射性产物的总产量要大得多，因为中子没有电荷，故首先与元素的原子相互作用时并没有库伦势垒存在。中子的吸收（以及在 (n, γ) 反应时之辐射俘获）的截面随中子能量之减小而增长。这可以这样解释，就是：在中子速度较小时中子与核相互作用的时间增加，因而核反应的几率也增加。

核反应堆在目前是人工放射性同位素的主要来源。下列反应可以作为利用热中子来进行的核反应的例子：

