

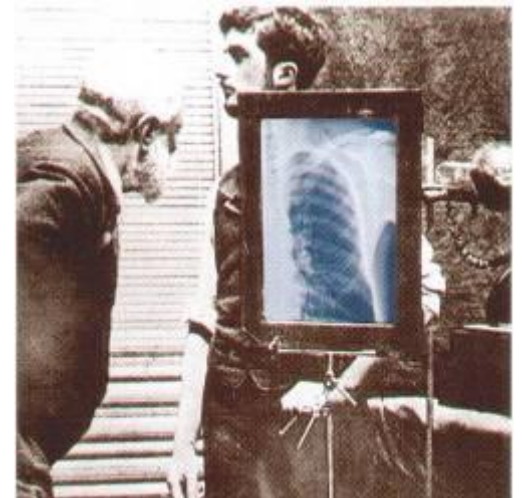
高雄榮總-18小時輻射防護原理及應用訓練班

基礎輻射原理

課程單元:基礎輻射 時數: 2 小時

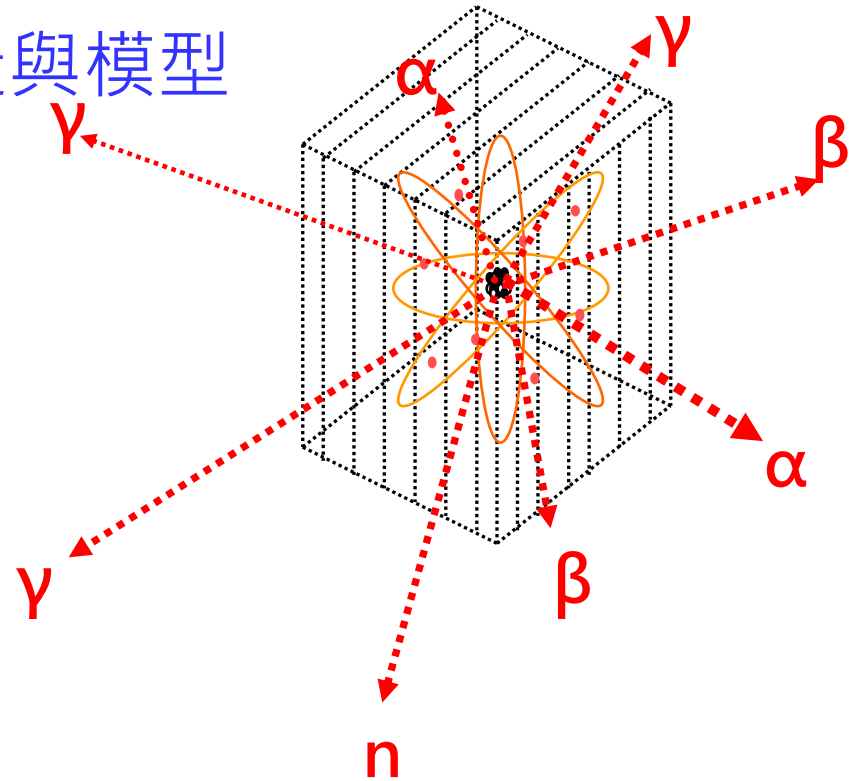


講師：藍仁鴻
日期：111.9.3



大綱

- 放射線是什麼
- 何謂輻射-游離 vs 非游離輻射
- 原子與原子核-原子構造與模型
- 核衰變模式
 - 放射性核種衰變
 - 活度與半衰期
- 輻射在哪裡?
- 游離輻射的特性
 - 游離輻射與物質的作用
 - 輻射劑量與單位

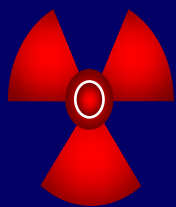




放射線是什麼？



起源於宇宙生成之初



輻射線(放射線)如何被發現？



倫琴於1895年發現
X射線(X光)

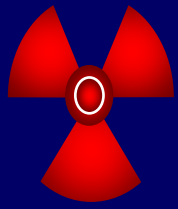


倫琴夫人X光照像

十九世紀末葉，歐洲科學家們都很熱烈的從事陰極射線的研究。其中有一位德國的科學家倫琴（Röntgen），在1895年11月8日發現一種具有相當穿透能力的射線，因為當時對它的性質還不瞭解，所以就稱之為X射線（X-Ray）。這個名字一直沿用到現在。

人造放射線





輻射線(放射線)如何被發現？

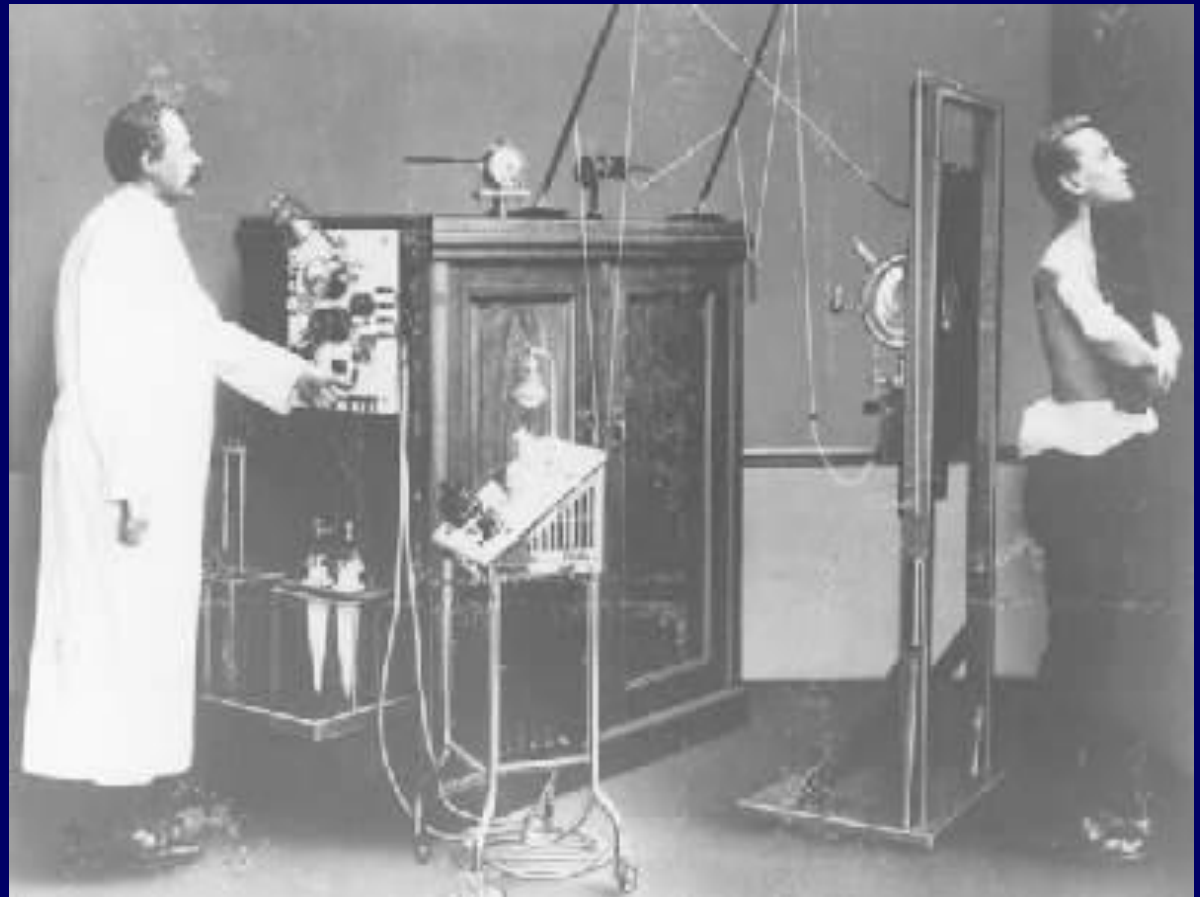
1896大家仿做他的實驗，

X射線成為無所不在

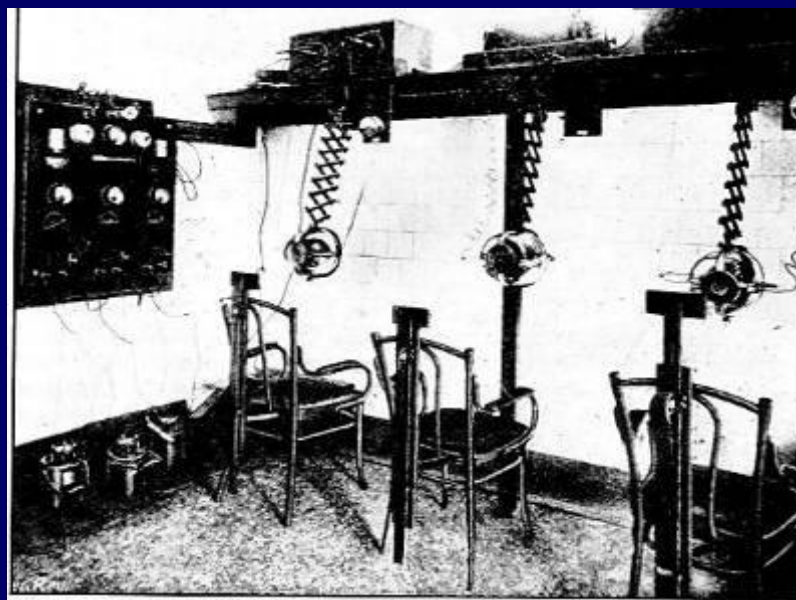
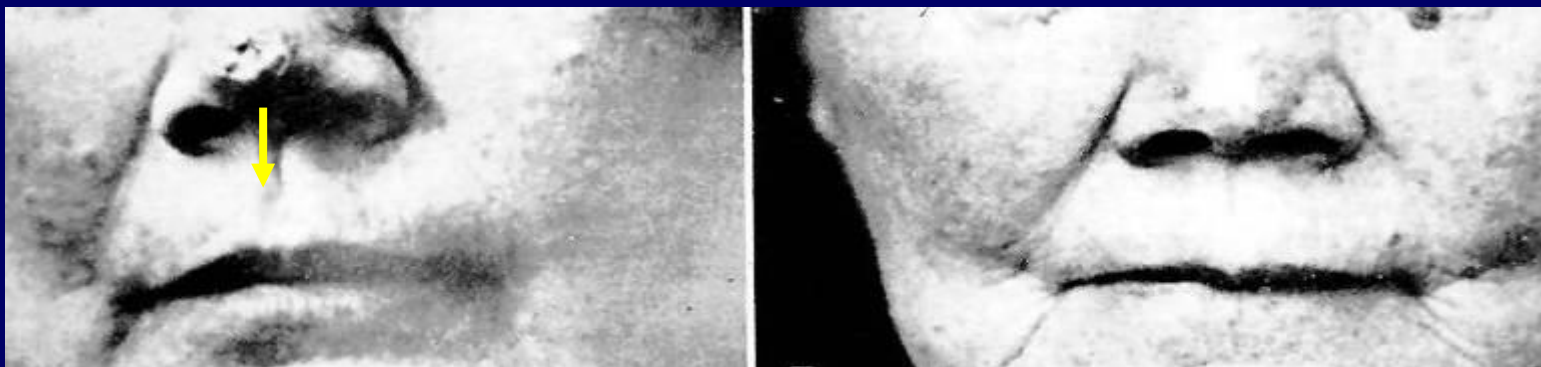
「**X射線**自動販賣機」

1901年得到第一屆諾貝爾

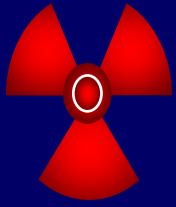
物理獎



第一個治癒個案 1899年治癒 鼻頭基底細胞腫瘤



Hammersmith醫院, 1905 倫敦



輻射線(放射線)如何被發現？



1896年 亨利貝克

礦物內發現具有放射線的鈾

1898年 居理及夫人

礦物開採出鐳及鈾

輻射(放射線)發現史

輻射(放射線)發現史



1895

1896

1898

1899

1932

1953

德國物理學家倫琴發現X光

法國物理學家貝克發現阿伐、貝他、加馬射線

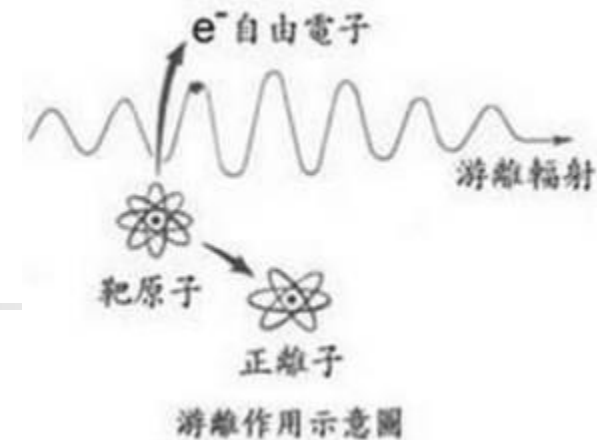
居里夫人自天鈾礦尋得鈾與鐳二種放射性元素

拉塞福發現放射性元素“鈾”

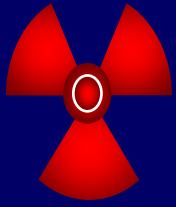
查兌克發現中子

利用鈷六十治療癌症首先被引用

何謂輻射？



- 一種能量的發射和傳遞(傳導、對流、輻射)
- 輻射型態：
 - 電磁波:無線電波、微波、可見光、 γ -ray、X-ray
 - 粒子輻射: α 、 β 、n、p
- 輻射依能量的強弱可分：考題
 - 1、游離輻射:能量高到(>10keV) 足以使物質產生游離作用的輻射(束縛能,離子對) , 可以使DNA斷裂, 引起輻射生物效應
 - 2、非游離輻射(有熱效應): 激發作用(電子躍遷)
 - 3、非游離輻射(無熱效應)指能量低無法產生游離的輻射, 例如太陽光、燈光、紅外線、微波、無線電波、雷達波等
- 一般所謂的輻射或放射線, 泛指游離輻射而言。主管機關為行政院原子能委員會。

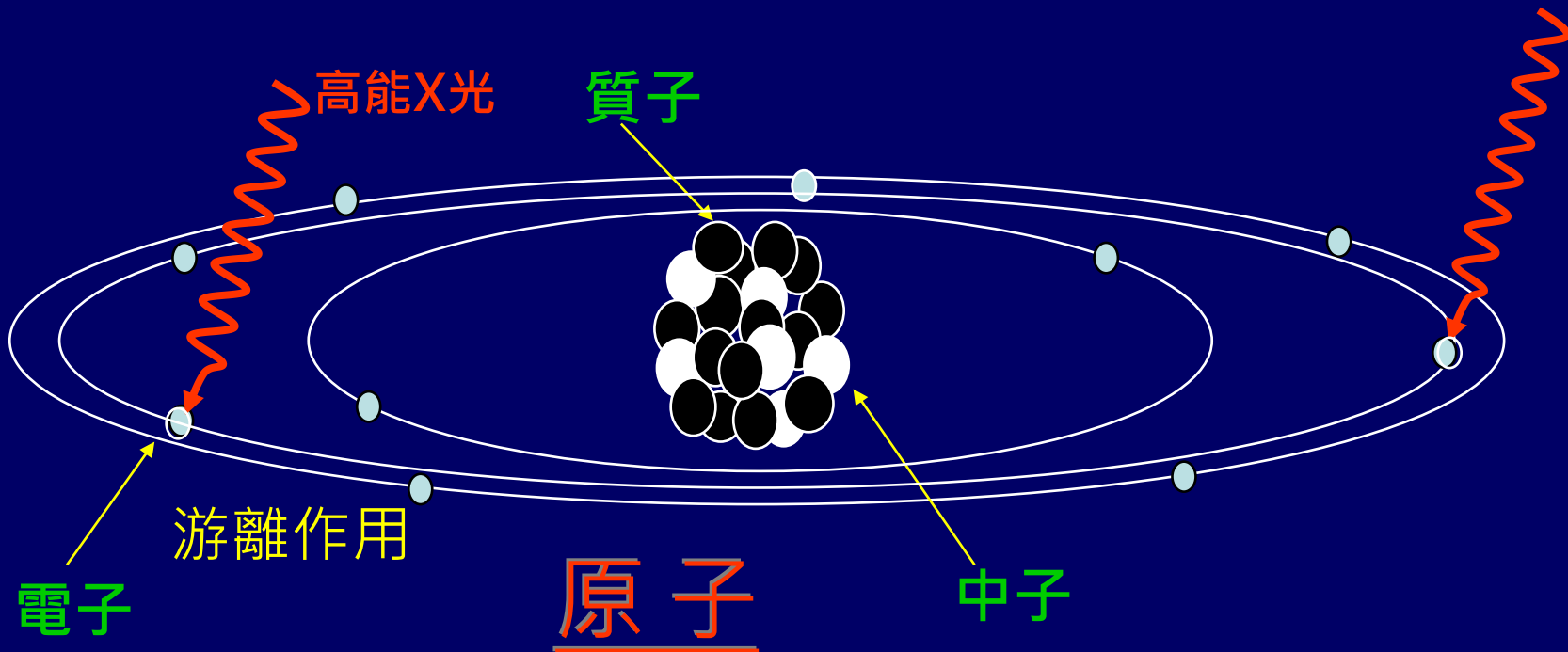


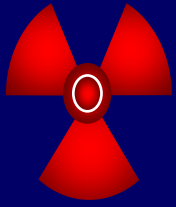
輻射與物質作用的型態

以能量高低分為游離輻射及非游離輻射

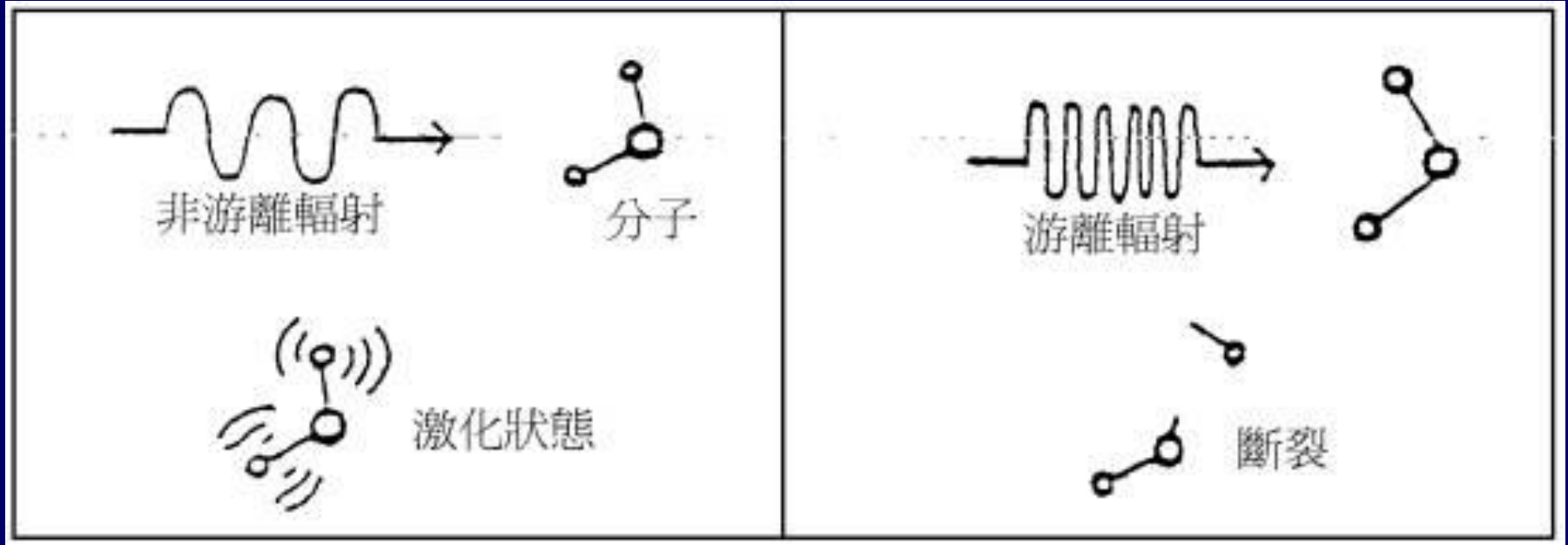
游離輻射:指能量高到可使物質產生游離作用的輻射。

非游離輻射:指能量低無法產生游離的輻射，例如太陽光、燈光、紅外線、微波、無線電波、雷達波等。





非游離輻射與游離輻射的差別



影響程度不明??

明顯的影響

DNA的損傷與修補

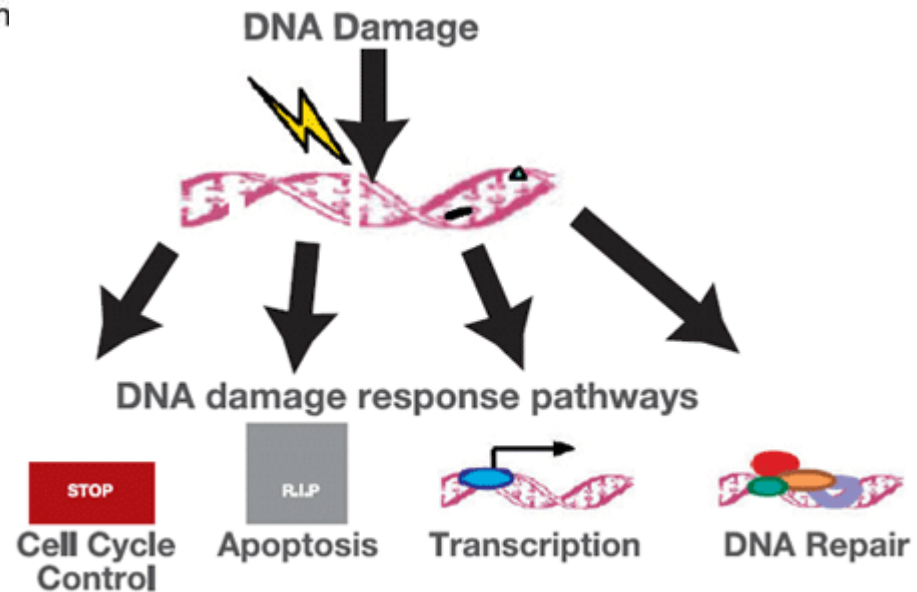
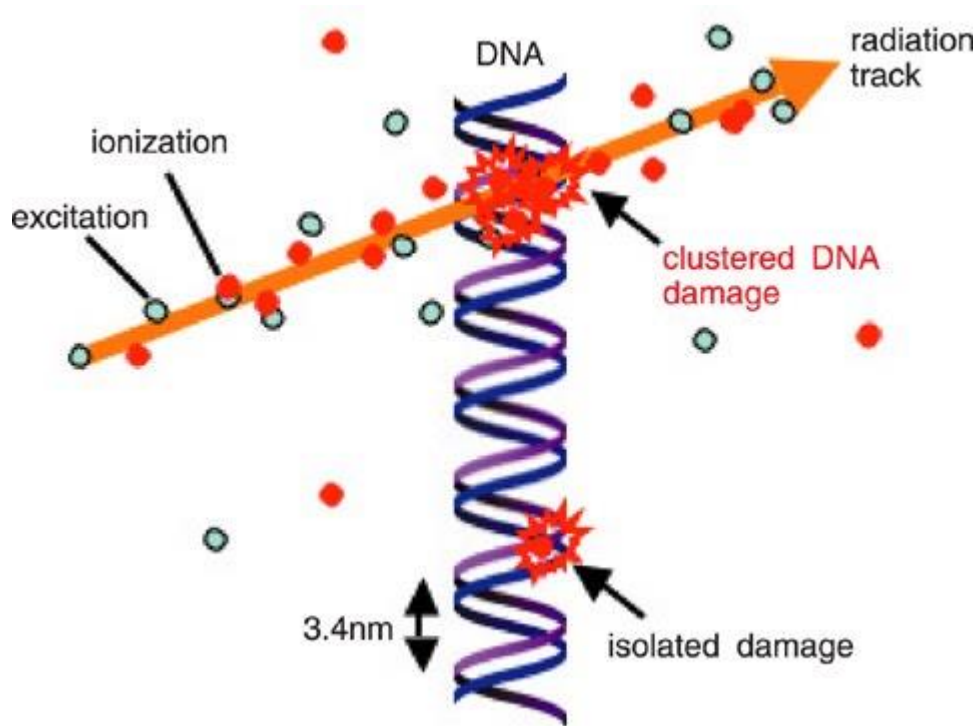
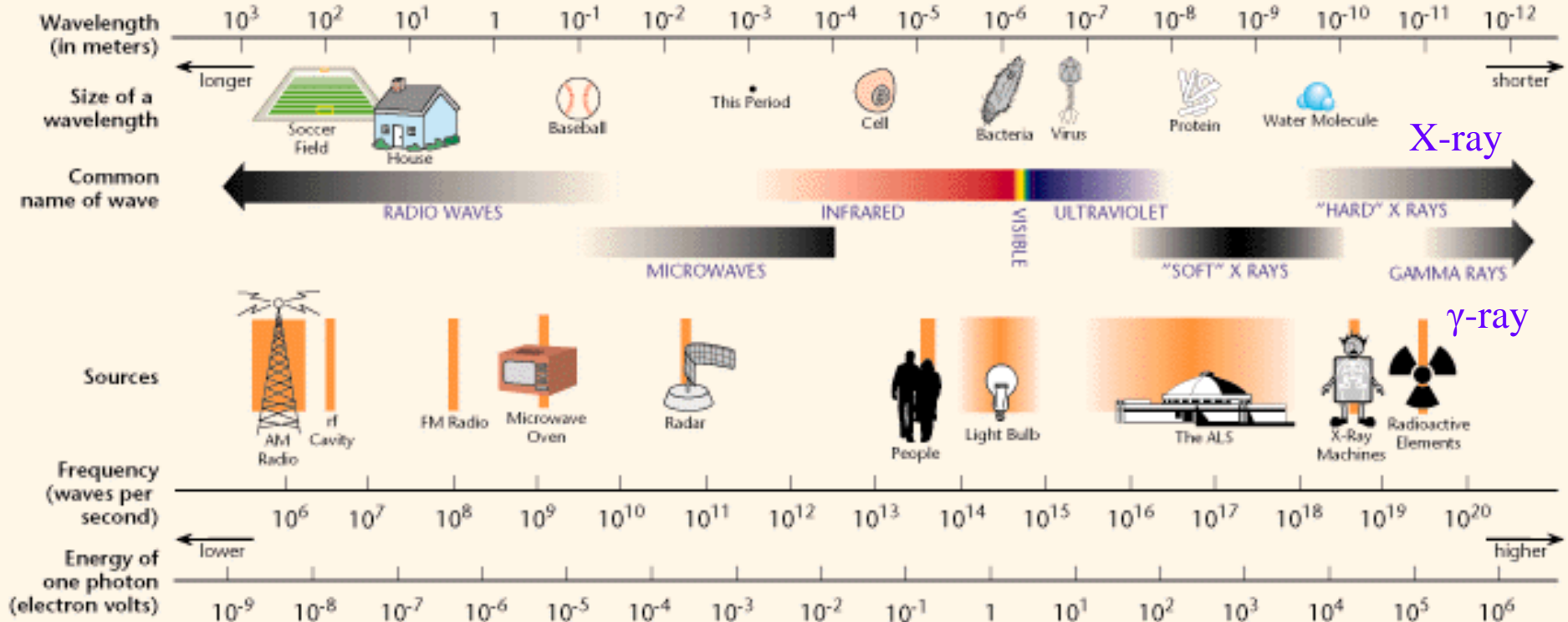


Figure 1: DNA Damage response pathways.

電磁波能譜

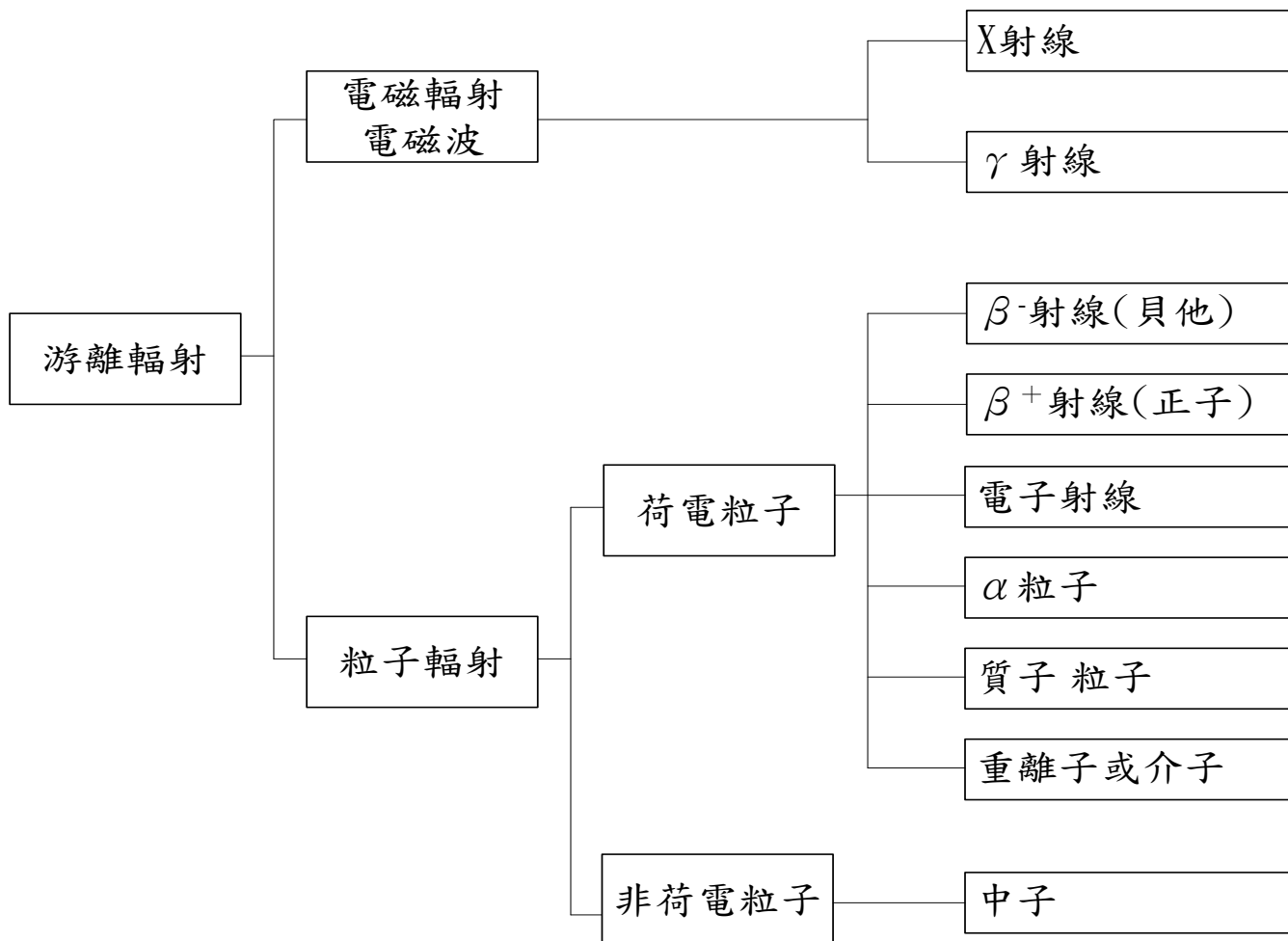
THE ELECTROMAGNETIC SPECTRUM



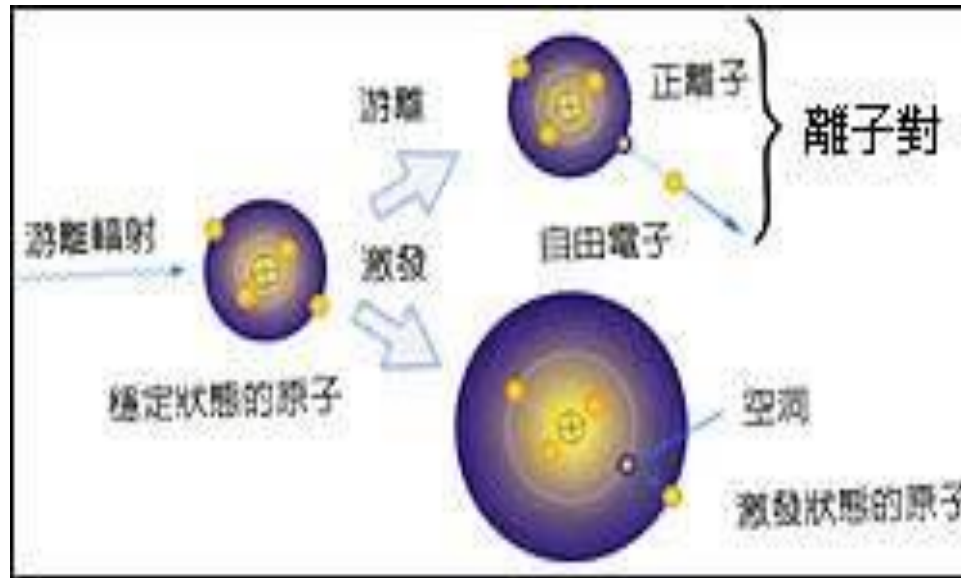
X-ray

γ -ray

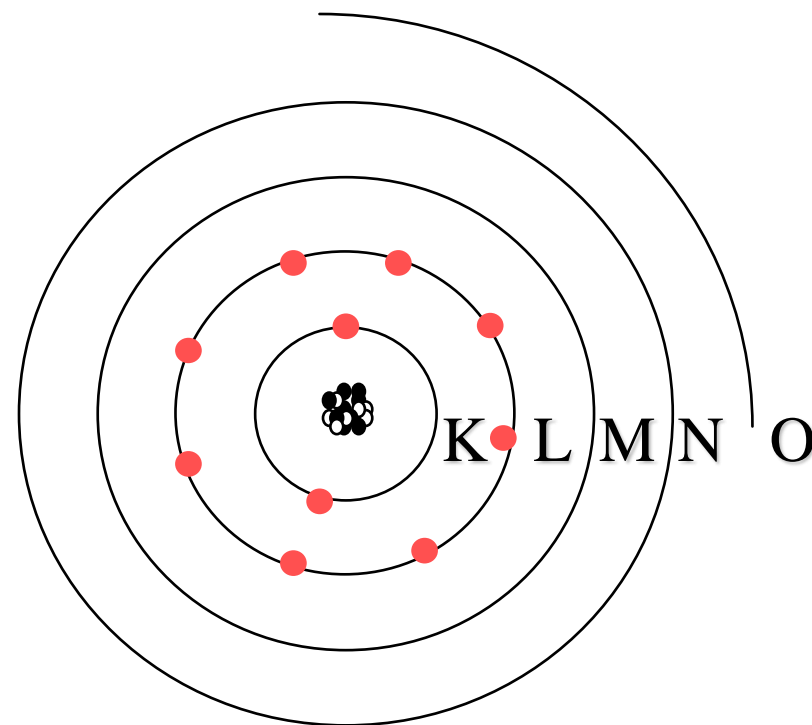
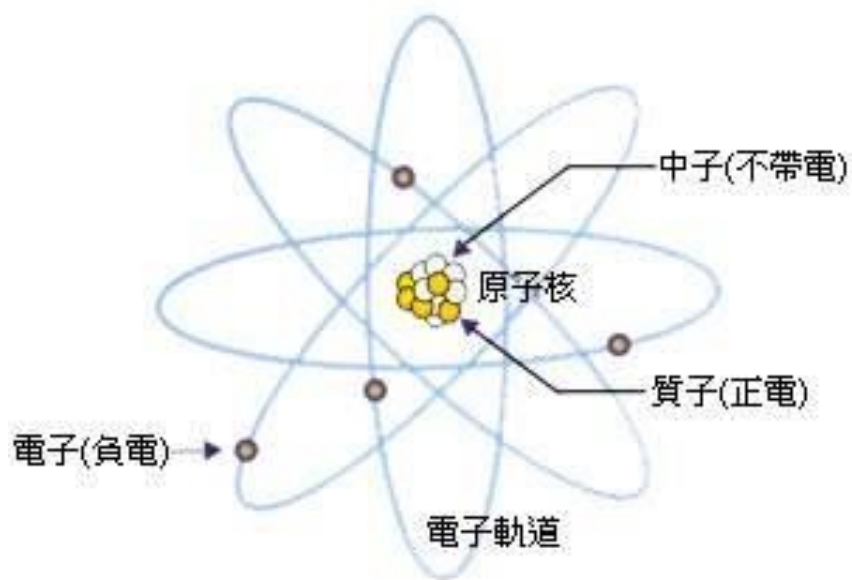
游離輻射的分類



原子與原子核



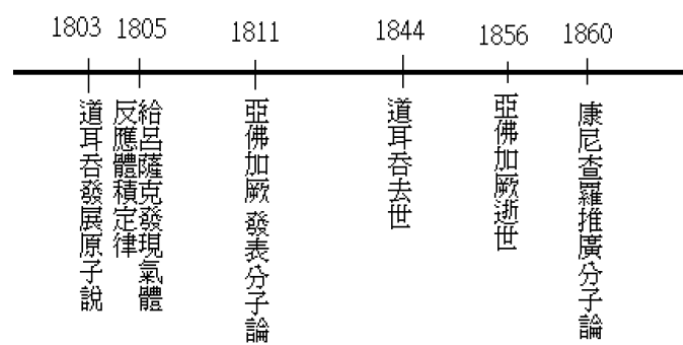
原子構造與模型



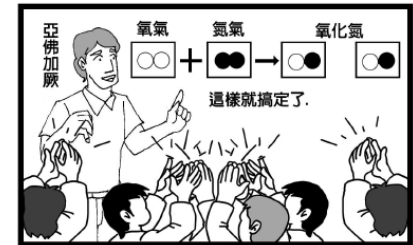
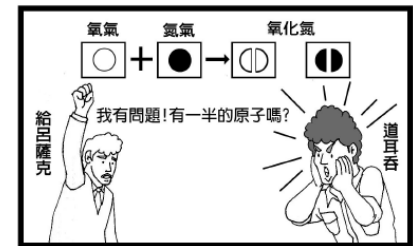
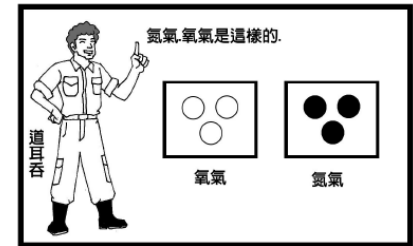
原子半徑: $1 \text{ \AA} (10^{-10} \text{ m})$
原子核半徑: $1 \sim 10 \text{ fm} (10^{-15} \sim 10^{-14} \text{ m})$

電子軌域 / 能階 / 量子層

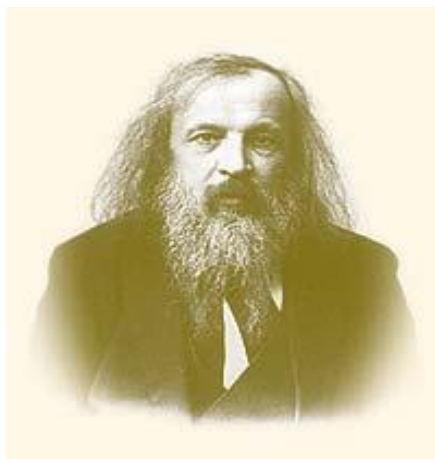
物質結構



- 1803, 道耳吞 (Dalton): 在英國皇家學會作關於原子論的演講，提出原子具有質量特性的理論。
 - 原子的名稱來源自古希臘文atomos, 其意義為 “不可切分的”
 - 1. 化學元素均由不可再分的微粒組成。這種微粒稱為原子。原子在一切化學變化中均保持其不可再分性。
 - 2. 同一元素的所有原子，質量和性質都相同；不同元素的原子，質量和性質都不相同。
 - 3. 不同的元素化合時，這些元素的原子按簡單整數比結合成化合物。化合物分解所得的原子與構成化合物的同種原子性質相同。



1896, 門得列夫 (**Mendeleev** 1836-1907),著名的蘇俄物理學家出版他所關察到有關元素與原子量之間的關係, 他發現當將自然界已知得物質依其它們原子序的排序可以得到具有相同特性週期現象,此種發現也就是我們所熟知的“ 元素週期表” . 同時德國化學家 **Lothar Meyer** (1830-1895)也發現該週期表特性的存在.



Periodic Table of the Elements

1A																	0		
1	H																		He
2	Li	Be											B	C	N	O	F	Ne	
3	Na	Mg	III B	IV B	V B	VI B	VII	IB	IIB	13	14	15	16	17	18				
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	
6	Cs	Ba	*La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	
7	Fr	Ra	+Ac	Rf	Ha	Sg	Ns	Hs	Mt	110	111	112	113						

* Lanthanide Series	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
* Actinide Series	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

原子模型



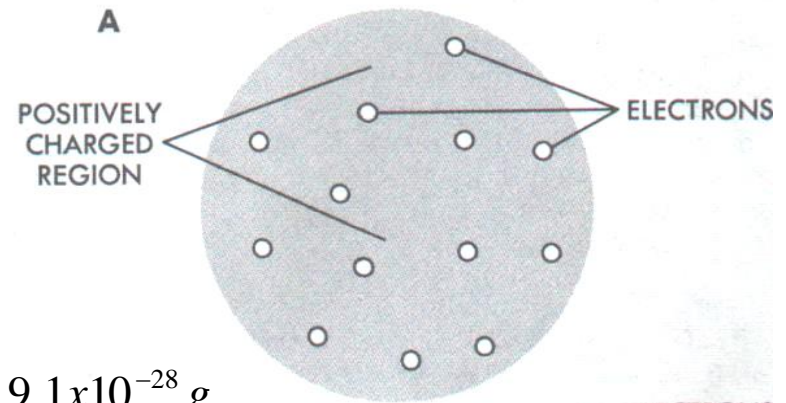
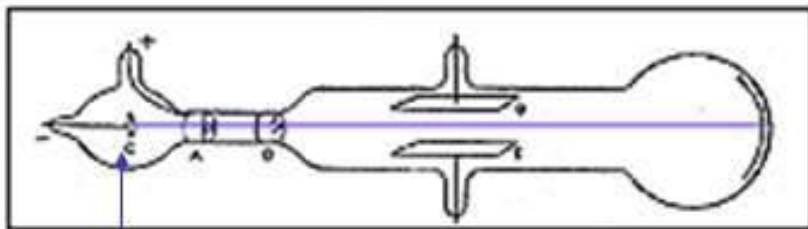
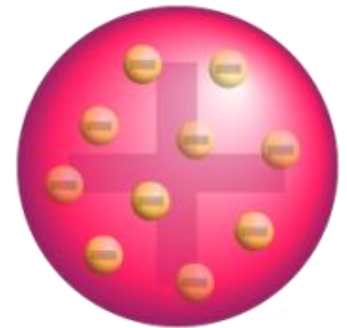
1897, 英國物理學家湯姆森(J.J. Thomson) 發現電子存在具有正電荷的介質內作固定的速度移動,此現象稱為葡萄乾布丁理論 (plum pudding model). 利用陰極射線在特定電場、磁場作用下, 由其偏折之曲率半徑求得 $e/m=1.759 \times 10^8 \text{ coul/g}$

$$m \frac{v^2}{r} = ma = F = evB$$

$$r = \frac{mv}{eB}$$

$$E_k = eV = \frac{1}{2}mv^2$$

$$\frac{e}{m} = \frac{2V}{r^2 B^2} = 1.759 \times 10^8 \text{ coul/g}$$



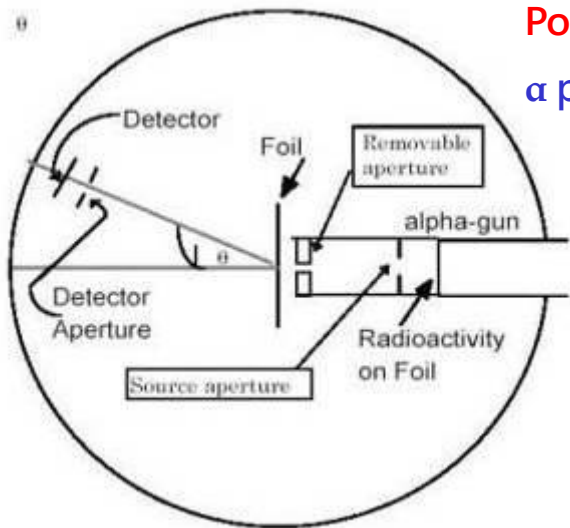
$$m = \frac{e(1.6 \times 10^{-19} \text{ coul})}{e/m(1.759 \times 10^8 \text{ coul/g})} = 9.1 \times 10^{-28} \text{ g}$$

electron

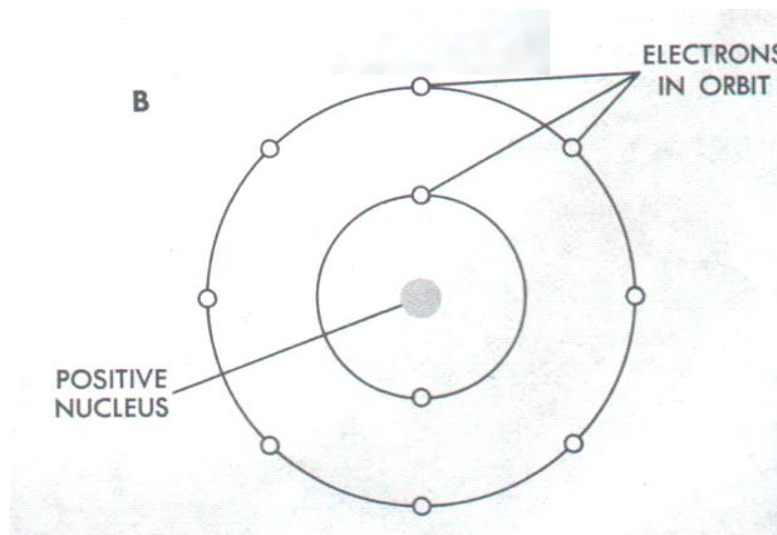


1914, 拉塞福 **Ernest Rutherford** 提出電子在原子內環繞著帶正電荷並具有質量的原子核,正如行星環繞著太陽一樣. 他是以 α 粒子撞擊薄金箔片的實驗中所發現的理論.

散 射 實 驗



Po-214
 α particle



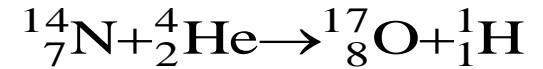
原子模型

原子核是由兩種次原子粒子所組成：質子與中子。



1918年拉塞福Rutherford 發現質子(proton) 以後

，又預言了不帶電的中子存在



1932年查維克Chadwick發現中子(neutron)



從此我們知道原子是由三種物質組成：

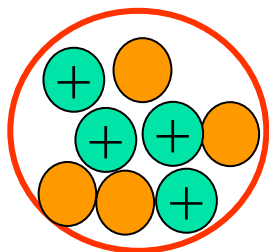
電子(electrons), 質子(protons), 中子(neutrons).

電子: 電荷量 = $-1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$ 質量 $\sim 9.109 \times 10^{-31} \text{ kg}$.

質子: 電荷量 = $+1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$ 質量 $\sim 1.6726 \times 10^{-27} \text{ kg}$.

中子: 不帶任何電量 質量 $\sim 1.6747 \times 10^{-27} \text{ kg}$.

原子核(Nucleus)



原子核
(nucleus)

核子 (nucleon):

⊕ 質子 (proton)

● 中子 (neutron)



拉塞福

Z = 原子序 (atomic number) = 質子數

A = 質量數 (mass number) = 質子數 + 中子數 = $Z + N$

$N = A - Z$ = 中子數

原子核的電荷 = Ze (e : 電子電荷 electron charge)

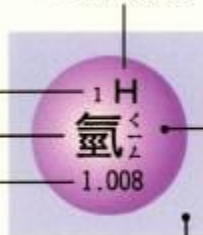
原子核的質量 = A amu (atomic mass unit)

元素週期表

圖例：

元素符號

原子序
元素名稱
原子量



- 固體
- 液體
- 氣體
- 人造元素
- 金屬元素
- 非金屬元素
- 兩性元素

▲本週期表係根據最新年份的美國原子能委員會之同位素表和國際化學學會之資料編彙而成。
▲由本週期表中可以查到下列各項數據：元素符號、元素名稱、原子序、原子量、金屬元素、非金屬元素、元素中的氣體、液體、固體及人造元素。

1	1A	2											13	14	15	16	17	18
1	1 H 氫 1.008												13	14	15	16	17	18
2	3 Li 鋰 6.941	4 Be 鈹 9.012											5 B 硼 10.81	6 C 碳 12.01	7 N 氮 14.01	8 O 氧 16.00	9 F 氟 19.00	10 Ne 氖 20.18
3	11 Na 鈉 22.99	12 Mg 鎂 24.31	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13 Al 鋁 26.98	14 Si 矽 28.09	15 P 磷 30.97	16 S 硫 32.07	17 Cl 氯 35.45	18 Ar 氬 39.95
4	19 K 鉀 39.10	20 Ca 鈣 40.08	21 Sc 釷 44.96	22 Ti 鈦 47.88	23 V 釩 50.94	24 Cr 鉻 52.00	25 Mn 錳 54.94	26 Fe 鐵 55.85	27 Co 鈷 58.93	28 Ni 鎳 58.69	29 Cu 銅 63.55	30 Zn 鋅 65.39	31 Ga 鎵 69.72	32 Ge 鍺 72.59	33 As 砷 74.92	34 Se 硒 78.96	35 Br 溴 79.90	36 Kr 氬 83.80
5	37 Rb 鉀 85.47	38 Sr 銻 87.62	39 Y 釷 88.91	40 Zr 鈦 91.22	41 Nb 鈮 92.91	42 Mo 鉬 95.94	43 Tc 錳 98.91	44 Ru 鈷 101.1	45 Rh 銻 102.9	46 Pd 鈀 106.4	47 Ag 銀 107.9	48 Cd 鎘 112.4	49 In 銦 114.8	50 Sn 錫 118.7	51 Sb 銻 121.8	52 Te 碲 127.6	53 I 碘 126.9	54 Xe 氙 131.3
6	55 Cs 銻 132.9	56 Ba 鋇 137.3	鐳系元素 57-71	72 Hf 鈦 178.5	73 Ta 鉭 180.9	74 W 鎢 183.8	75 Re 銻 186.2	76 Os 銻 190.2	77 Ir 銻 192.2	78 Pt 鉑 195.1	79 Au 金 197.0	80 Hg 汞 200.5	81 Tl 鉍 204.4	82 Pb 鉛 207.2	83 Bi 鉍 209.0	84 Po 鉍 (210)	85 At 砒 (210)	86 Rn 氡 (222)
7	87 Fr 銻 (223)	88 Ra 銻 (226)	鐳系元素 89-103	104 Rf 鈦 (261)	105 Db 鈮 (262)	106 Sg 鈳 (263)	107 Bh 銻 (262)	108 Hs 銻 (265)	109 Mt 銻 (266)									
鐳系元素			57 La 鐳 138.9	58 Ce 釷 140.1	59 Pr 釷 140.9	60 Nd 鈷 144.2	61 Pm 銻 144.9	62 Sm 鈷 150.4	63 Eu 銻 152.0	64 Gd 鈷 157.3	65 Tb 銻 158.9	66 Dy 銻 162.5	67 Ho 鈷 164.9	68 Er 銻 167.3	69 Tm 銻 168.9	70 Yb 銻 173.0	71 Lu 銻 175.0	
鐳系元素			89 Ac 銻 (227)	90 Th 鈷 232.0	91 Pa 釷 (231)	92 U 鈷 238.0	93 Np 銻 (237)	94 Pu 銻 239.1	95 Am 銻 243.1	96 Cm 銻 247.1	97 Bk 銻 247.1	98 Cf 銻 251.1	99 Es 銻 252.1	100 Fm 銻 257.1	101 Md 銻 258.1	102 No 銻 259.1	103 Lr 銻 260.1	

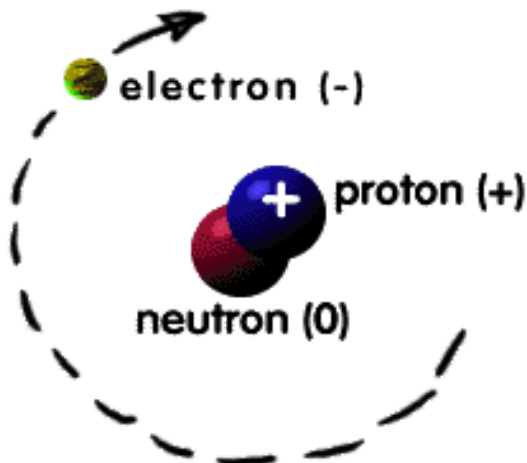
製百集好化學網 <http://i.am/chemsir>

質量

- 原子質量單位(atomic mass unit, amu) :
一個 ^{12}C 原子質量的 $1/12$ 為1 amu。
- 一個 ^{12}C 原子重： $(1/6.02 \times 10^{23}) \times 12 \text{ g} = 12 \text{ amu}$
- $1 \text{ amu} = 1.66 \times 10^{-27} \text{ kg}$ 。

$$\frac{12.000 \text{ 克 / 莫耳}}{6.022045 \times 10^{23} \text{ 原子 / 莫耳}} \times \frac{1}{12}$$

IT'S LIKE THIS...



名稱	符號	質量		電量
		kg	amu	C
質子	p	1.6725×10^{-27}	1.007277	1.602×10^{-19}
中子	n	1.6747×10^{-27}	1.008665	0
電子	e^-	9.1098×10^{-31}	0.000548	-1.602×10^{-19}

主要次原子粒子的質量與電荷

Masses and charges of the main subatomic particles

Particle	Symbol	Rest mass		Rest energy (MeV)	Charge ^a	Comments
		kg	amu ^b			
Proton	p	1.672×10^{-27}	1.007	938	+1	Nucleons, i.e. present in the atomic nucleus
Neutron	n	1.675×10^{-27}	1.009	939	0	
Alpha-particle	α	6.645×10^{-27}	4.003	3725	+2	Two protons and two neutrons Ejected in α decay
Electron	e^- or β^-	9.109×10^{-31}	0.00055 or 1/1820	0.511	-1	Form stable discrete orbits around nuclei Ejected from nucleus in β^- decay
Positron	e^+ or β^+	9.109×10^{-31}	0.00055 or 1/1820	0.511	+1	Antiparticle of the electron— produces annihilation radiation when both meet
Pi meson	π^+	2.480×10^{-28}	0.150	139	+1	Keep the nucleus together (π^0 and π^- also exist)
Neutrino	ν	0	0	0	0	Emitted during β -decay and electron capture Very weak attenuation by matter
Photon or quantum	$h\nu$	—	—	—	0	Travels at $3 \times 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ Forms part of the electromagnetic spectrum

^aA charge of +1 is $+1.602 \times 10^{-19}$ coulomb.

^b1 amu is 1 atomic mass unit which is one-twelfth of the mass of a neutral $^{12}_6\text{C}$ atom.



能量

- 動能： $\frac{1}{2}mv^2$ (m為質量，v為速度)
- 位能： mgh (m為質量，g為重力加速度，h為高度)
- 動能與位能的單位： $1 \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-2} = 1 \text{ J}$, $1 \text{ g cm}^2 \text{ s}^{-2} = 1 \text{ erg}$
- 熱能： $1 \text{ 卡(calorie)} = 1 \text{ g水升高}1^\circ\text{C}$ ($1 \text{ calorie} = 4.18 \text{ J}$)
- 電子伏特(electron volt, eV)：一個電子以1 V的電位差加速1 m時，所呈現或所具有之能量為1 eV。
- $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$
- 質能互換公式： $E = mc^2$ (E指能量，m指質量，c指光速)
- 1 amu經質能互換，相當於
$$E = mc^2 = (1.66 \times 10^{-27} \text{ kg}) \times (3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1})^2$$
$$= 1.494 \times 10^{-10} \text{ J}$$
$$1.494 \times 10^{-10} \text{ J} / (1.6 \times 10^{-13} \text{ J/MeV}) \doteq 931.5 \text{ MeV}。$$

核種表示法

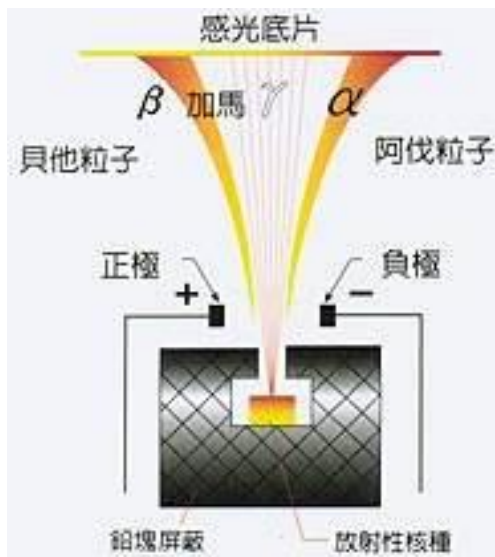


考題

- 核種(nuclide)：指原子之種類，由核內之中子數、質子數及核之能態區分之。
- 1.同位素(isotope)：相同質子數(Z)，不同中子數， ${}^{16}_8\text{O}, {}^{17}_8\text{O}, {}^{18}_8\text{O}$
- 2.同中素(isotone)：相同中子數(N)，不同質子數， ${}^{54}_{25}\text{Mn}, {}^{55}_{26}\text{Fe}, {}^{56}_{27}\text{Co}$
- 3.同重素(isobar)：相同質量數(A)，不同中子數，不同質子數， ${}^{133}_{54}\text{Xe}, {}^{133}_{55}\text{Cs}, {}^{133}_{56}\text{Ba}$
- 4.同質異能素(isomer)：相同核種，不同核子能階， ${}^{99m}_{43}\text{Tc}, {}^{99}_{43}\text{Tc}$

放射性核種特性

- 自發性的放出輻射，並衰變成另一種核種。
 - 常見的有 α 衰變、 β 衰變
 - 無法以物理或化學方法改變
- 具有一定的半衰期($T_{1/2}$)。
 - $^{60}\text{Co}=5.26$ 年， $^{238}\text{U}=45$ 億年
- 放射性核種的原子數目隨時間成指數衰減。
 - $N = N_0 e^{-\lambda t}$
 - N_0 ：放射性核種 初始的原子數目
 - N ：放射性核種 經時間 t 衰變後原子數目
 - λ ：衰變常數



天然放射性核種

- 極長半衰期(地球壽命約46億年)核種：例如 ^{40}K 。
- ^3H 與 ^{14}C ：宇宙射線與大氣層中 ^{14}N 作用所生成。
- 衰變系列成員：

母核
parent

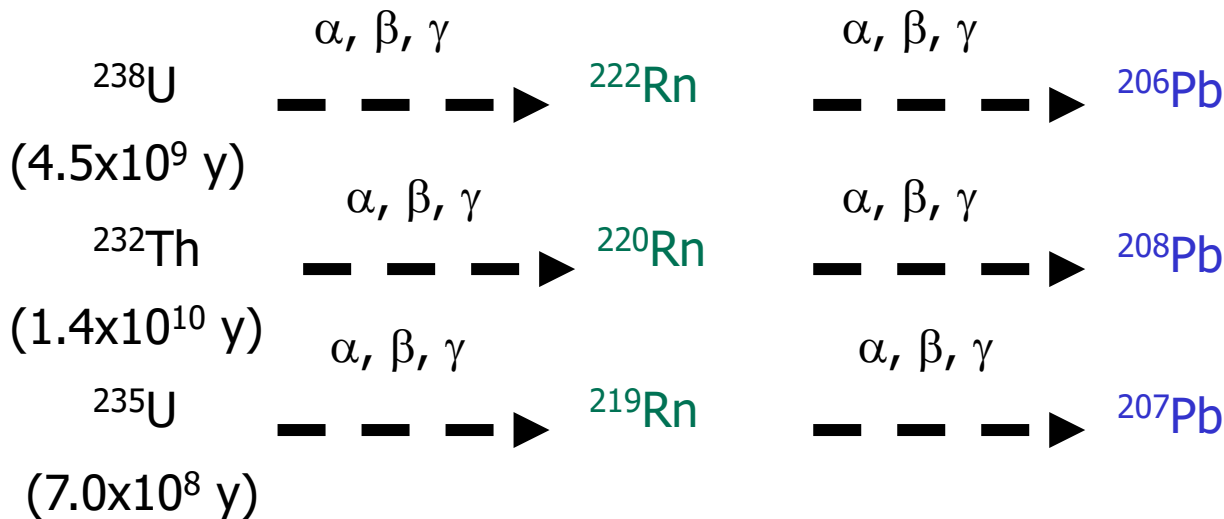
氣體子核
Gas daughter

最終子核
Final daughter

鈾系
U series

釷系
Th series

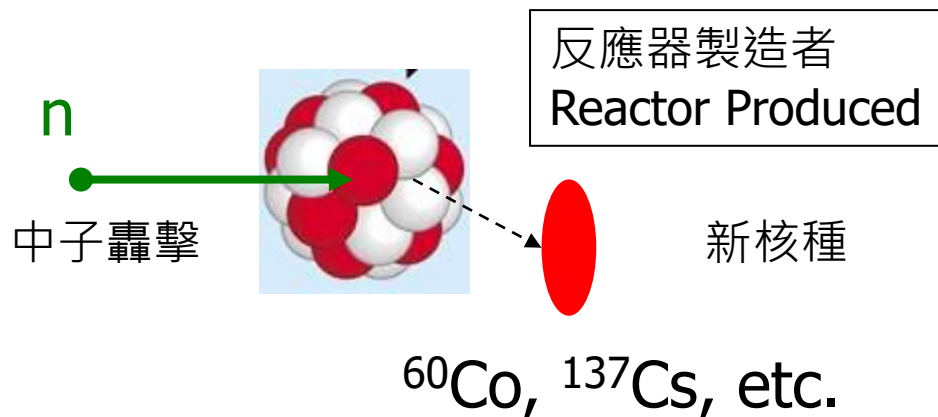
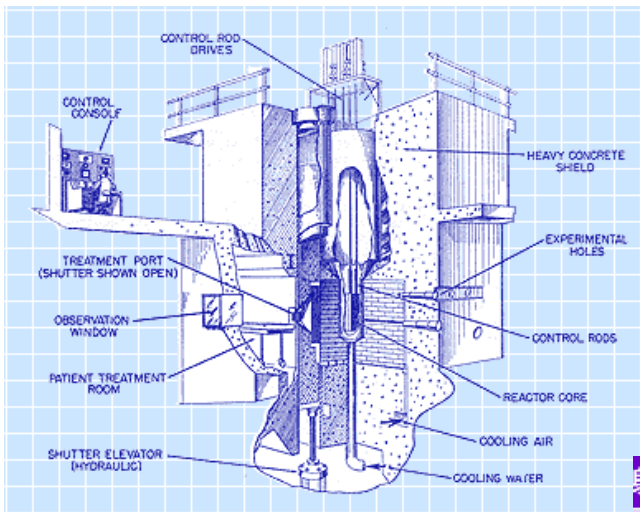
錒系
Ac series



鐳系(4n+1)： $^{237}\text{Np} \rightarrow \dots \rightarrow ^{209}\text{Bi}$ (所有成員皆已衰變)

人造放射性核種

核反應器
(原子爐)



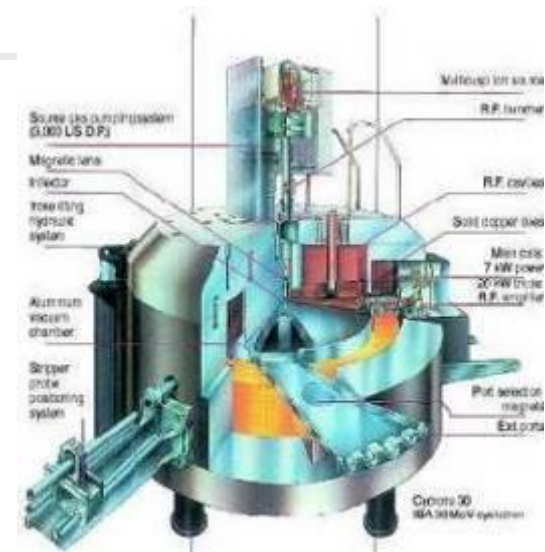
射性同位素	核反應	半衰期($t_{1/2}$)	應 用
鈉-24	$^{23}_{11}\text{Na}(n, \gamma)^{24}_{11}\text{Na}$	14.6 小時	診斷醫學
鐵-59	$^{58}_{26}\text{Fe}(n, \gamma)^{59}_{26}\text{Fe}$	4.45 天	診斷醫學
鈷-60	$^{59}_{27}\text{Co}(n, \gamma)^{60}_{27}\text{Co}$	5.27 年	殺菌、放射治療
鉬-99	$^{98}_{42}\text{Mo}(n, \gamma)^{99}_{42}\text{Mo}$	66 小時	—
銻-99	$^{99}_{42}\text{Mo} \rightarrow ^{99}_{43}\text{Tc} + ^0_{-1}\text{e}$ (β 粒子)	6.03 小時	腦波掃描
磷-32	$^{31}_{15}\text{P}(n, \gamma)^{32}_{15}\text{P}$	14.3 天	放射治療
	$^{32}_{16}\text{S}(n, \gamma)^{32}_{15}\text{P}$		
硫-35	$^{34}_{16}\text{S}(n, \gamma)^{35}_{16}\text{S}$	87.4 天	—
	$^{35}_{17}\text{Cl}(n, \gamma)^{35}_{16}\text{S}$		

人造放射性核種

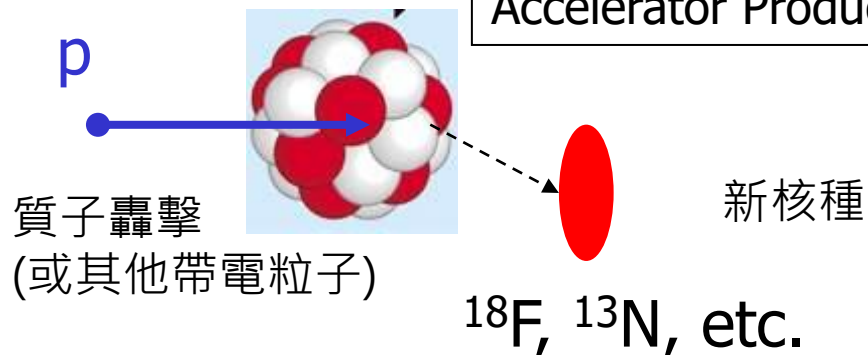
放射性同位素	核反應	反應式	半衰期(t)	醫學應用
碳-11	$^{10}\text{B}(d, n)^{11}\text{C}$	$^{10}_5\text{B} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^{11}_6\text{C} + {}^1_0\text{n}$	20.38 分	正子放射 造影生理 示蹤劑
	$^{12}\text{B}(d, 2n)^{11}\text{C}$	$^{12}_5\text{B} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^{11}_6\text{C} + 2{}^1_0\text{n}$		
	$^{14}\text{N}(p, \alpha)^{11}\text{C}$	$^{14}_7\text{N} + {}^1_1\text{p} \rightarrow {}^{11}_6\text{C} + {}^4_2\text{He}^{2+}$ (α 粒子)		
氮-13	$^{12}\text{C}(d, n)^{13}\text{N}$	$^{12}_6\text{C} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^{13}_7\text{N} + {}^1_0\text{n}$	9.96 分	正子放射 造影生理 示蹤劑
	$^{10}\text{B}(\alpha, n)^{13}\text{N}$	$^{10}_5\text{B} + {}^4_2\text{He}^{2+} \rightarrow {}^{13}_7\text{N} + {}^1_0\text{n}$		

氧-15	$^{14}\text{N}(d, n)^{15}\text{O}$	$^{14}_7\text{N} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^{15}_8\text{O} + {}^1_0\text{n}$	122 秒	正子放射 造影生理 示蹤劑
氟-18	$^{18}\text{O}(p, n)^{18}\text{F}$	$^{18}_8\text{O} + {}^1_1\text{p} \rightarrow {}^{18}_9\text{F} + {}^1_0\text{n}$	110 分	正子放射 造影生理 示蹤劑
鎳-67	$^{67}\text{Zn}(p, n)^{67}\text{Ga}$	$^{67}_{30}\text{Zn} + {}^1_1\text{p} \rightarrow {}^{67}_{31}\text{Ga} + {}^1_0\text{n}$	78.3 小時	腫瘤造影 生理示蹤劑
	$^{68}\text{Zn}(p, 2n)^{67}\text{Ga}$	$^{68}_{30}\text{Zn} + {}^1_1\text{p} \rightarrow {}^{67}_{31}\text{Ga} + 2{}^1_0\text{n}$		
碘-123	$^{127}\text{Te}(p, 2n)^{123}\text{I}$	$^{127}_{52}\text{Te} + {}^1_1\text{p} \rightarrow {}^{123}_{53}\text{I} + 2{}^1_0\text{n}$	13 小時	腫瘤造影 生理示蹤劑、 甲狀腺攝 取功能及 造影示蹤 劑
鉍-201	$^{203}\text{Tl}(p, 3n)^{201}\text{Pb}$	$^{203}_{81}\text{Tl} + {}^1_1\text{p} \rightarrow {}^{201}_{82}\text{Pb} + 3{}^1_0\text{n}$	74 小時	心肌血流 灌注及肌 肉造影 示蹤劑
	β 衰變 \rightarrow ^{201}Tl	$^{201}_{82}\text{Pb} \rightarrow {}^{201}_{81}\text{Tl} + {}^0_{-1}\text{e}$ (β 粒子)		

迴旋加速器

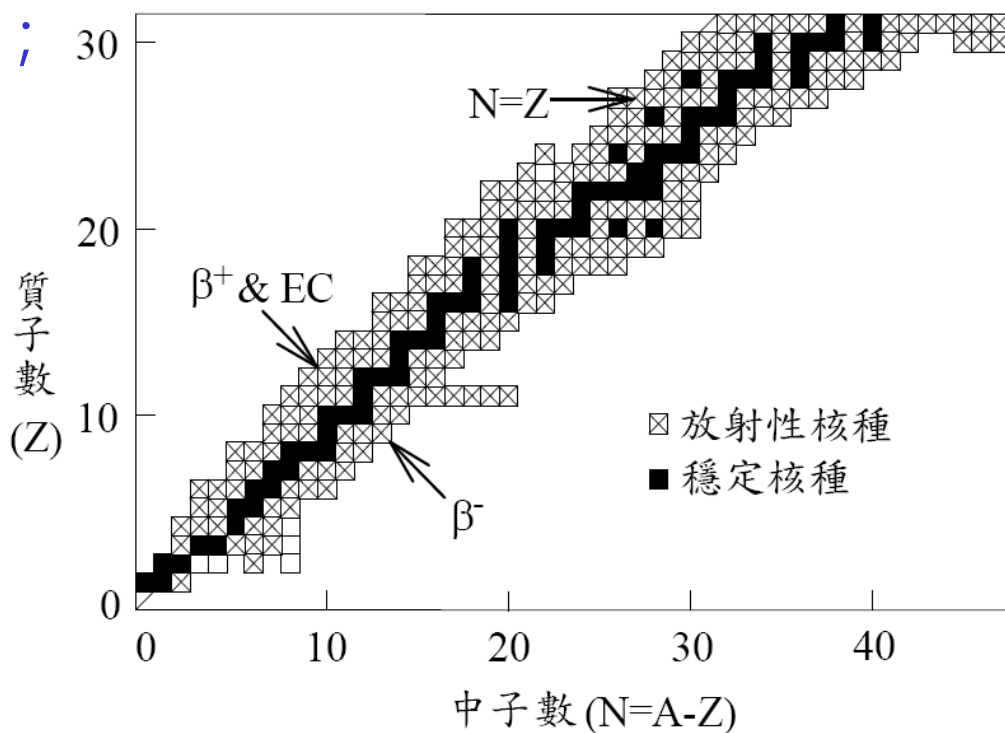


加速器製造者
Accelerator Produced



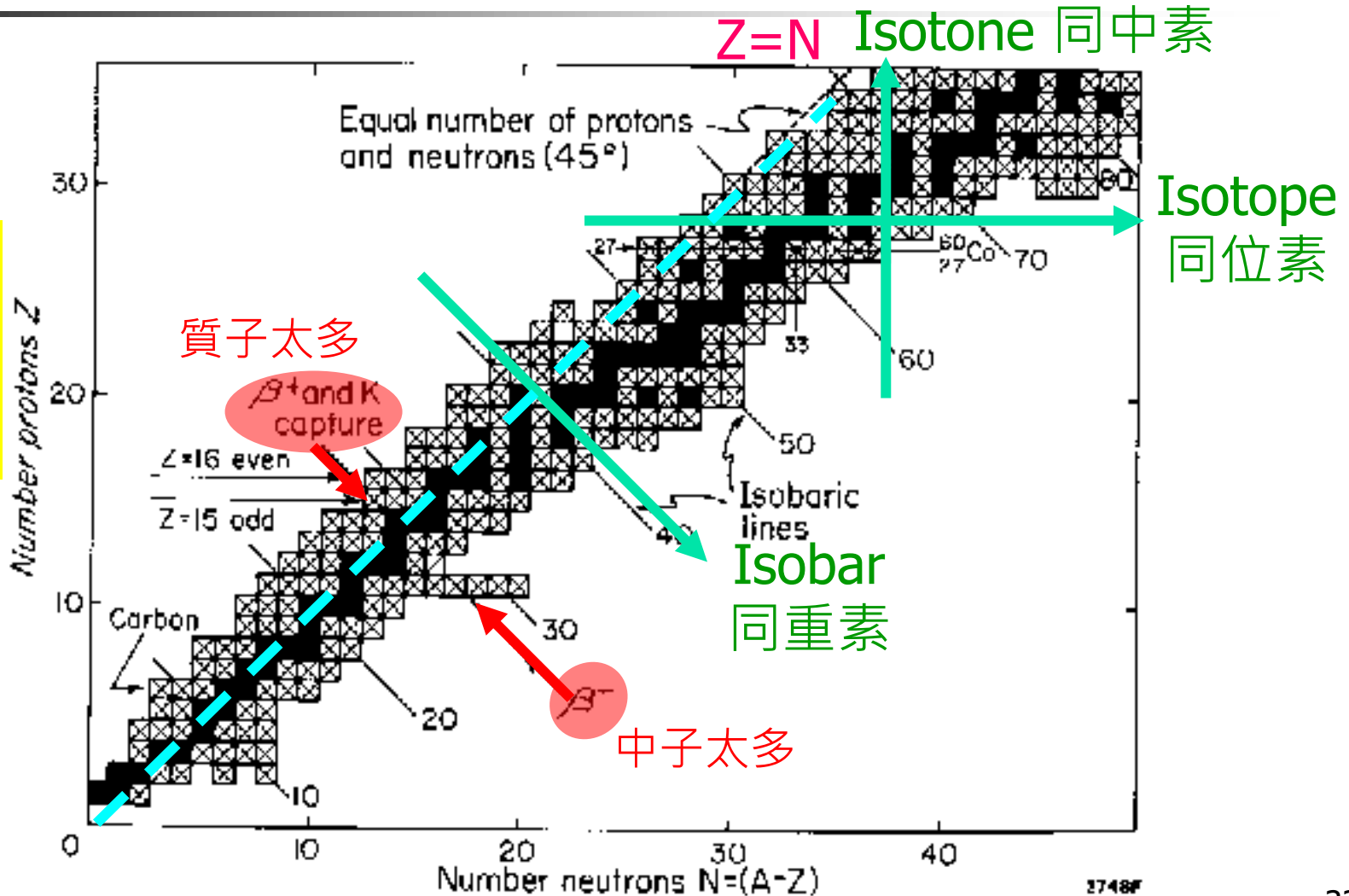
穩定核種

- 質子與中子比例須適中： $Z < 20$ 時， $Z/N \approx 1$ ； Z 越大， Z/N 的值則越小。
- Z/N 值太大，進行電子捕獲或 β^+ 衰變；
- Z/N 值太小，進行 β^- 衰變；



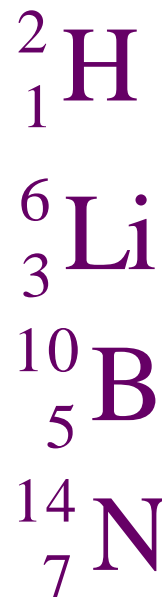
- stable nuclei 穩定原子核
- ⊠ radioactive nuclei 放射性原子核

$\frac{A}{Z}$ element
 質量數 元素
 原子序
 ${}_{6}^{12}\text{C}$, ${}_{27}^{60}\text{Co}$



穩定核種數目

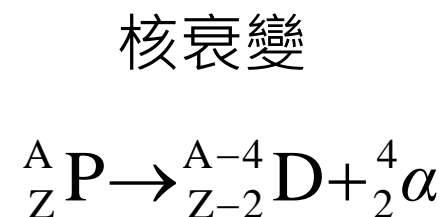
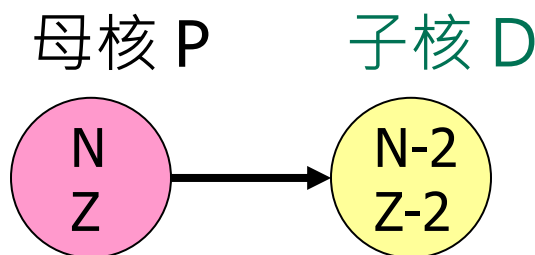
- 目前約有300種的穩定同位素，其中
 - 50% even p, even n
 - 20% even p, odd n
 - 20% odd p, even n
 - 10% odd p, odd n



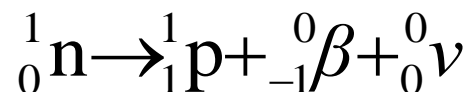
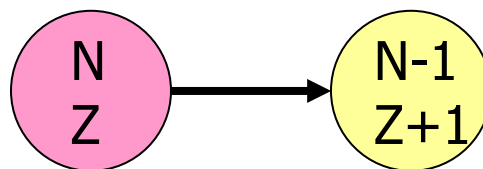
穩定核種數目	157	52	50	5
質子數	偶數	偶數	奇數	奇數
中子數	偶數	奇數	偶數	奇數

核衰變模式

α Decay

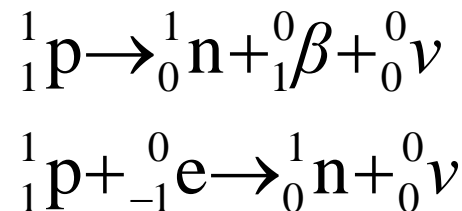
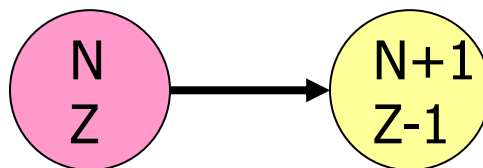


β^- Decay



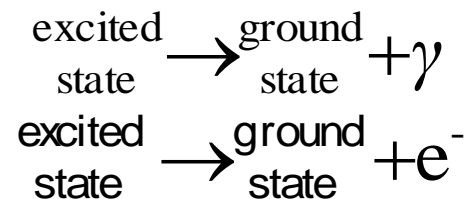
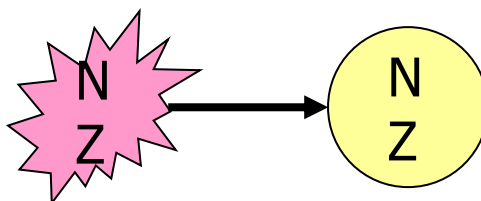
β^+ Decay

Electron Capture



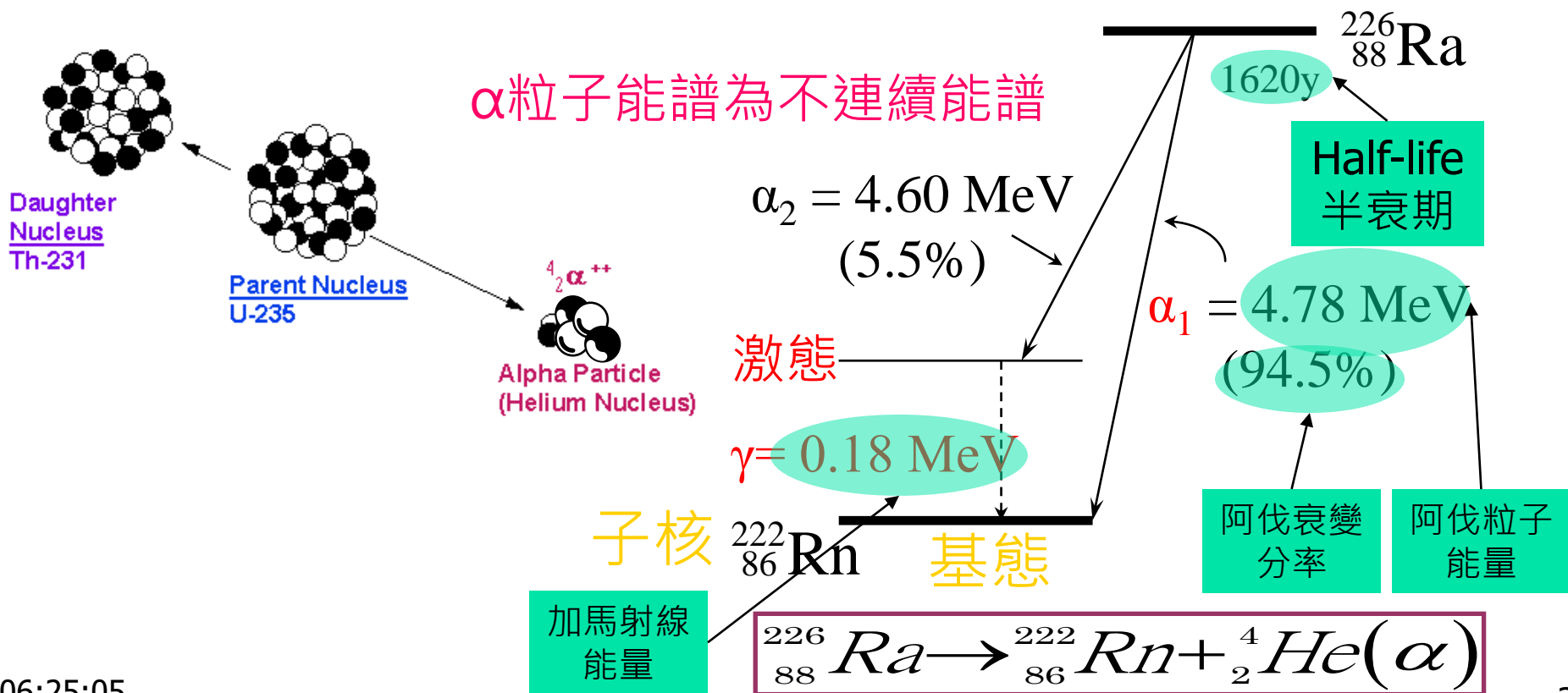
γ Decay

Internal conversion



α 衰變

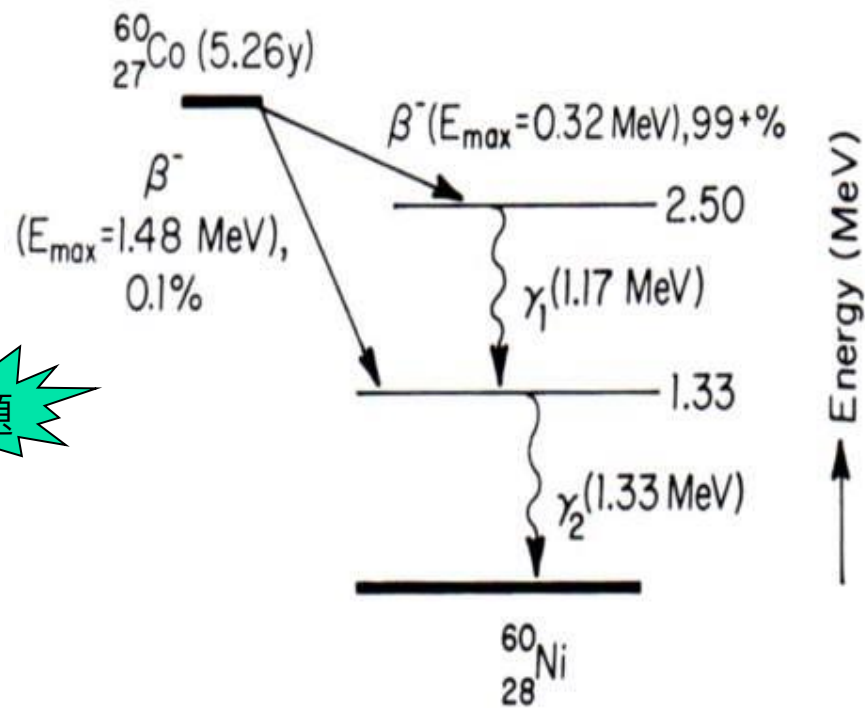
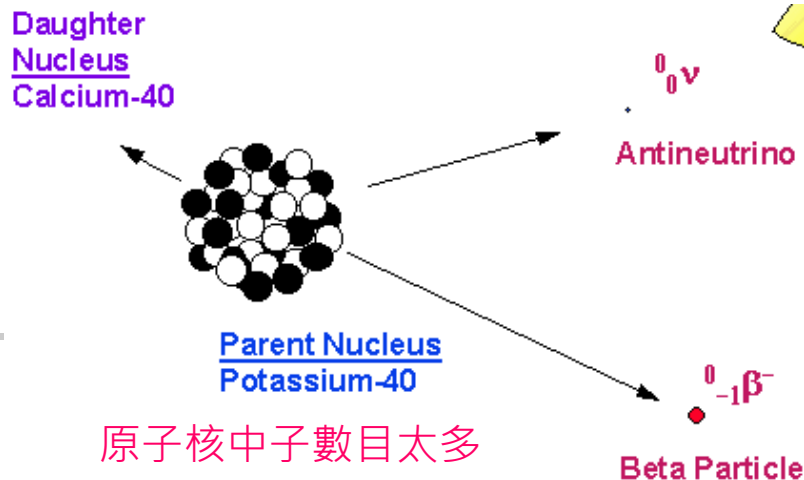
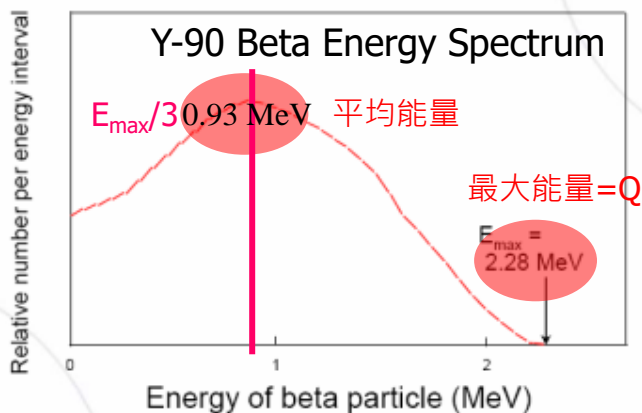
- 原子序大於83，因核內正電斥力過大，將進行 α 衰變。
- α 粒子是由兩個質子和兩個中子所組成的。



β^- 衰變

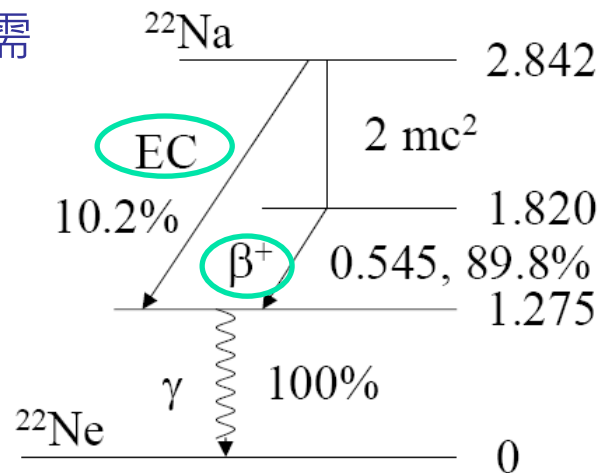
- 當原子中的中子數目超過穩定所需時，該原子就會作 β^- 衰變，也就是從原子核中釋放出一個帶負電的電子而使原子趨於穩定。
- 衰變能量主要由 β^- 與反微中子共同攜帶，均為連續能量。 β^- 的平均能量約為最大能量的 $1/3$ 。

考題



β^+ 衰變

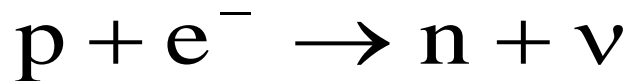
- β^+ 衰變是質子過多的核種易進行。
- β^+ 衰變，原子中的質子，即會蛻變為中子和正電子，將中子留在核中，而將正電子(β^+)釋放出來，在這個變化過程中，同時也有微中子(ν)伴同產生。
- 原子作 β^+ 衰變時，母核種的質量必須較子核種質量多出兩個電子的靜止質量(1.02 MeV)衰變才可以發生。
 - 須消耗0.511 MeV於質子轉為中子的質虧所需
 - 另須消耗0.511 MeV於形成 β^+ 之質量





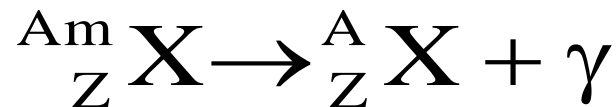
電子捕獲

- 電子捕獲是質子過多的核種易進行。
- 質子過多的核種亦可進行電子捕獲，即原子可以從其核外電子中捕捉一個電子，使與原子核中的質子結合形成中子，衰變能量則由 ν 所攜帶。
- 電子捕獲蛻變中母核種並沒有新電子釋放出來，因此不需像 β^+ 蛻變那樣，母核種能量必須要比子核種能量高1.02 MeV的限制

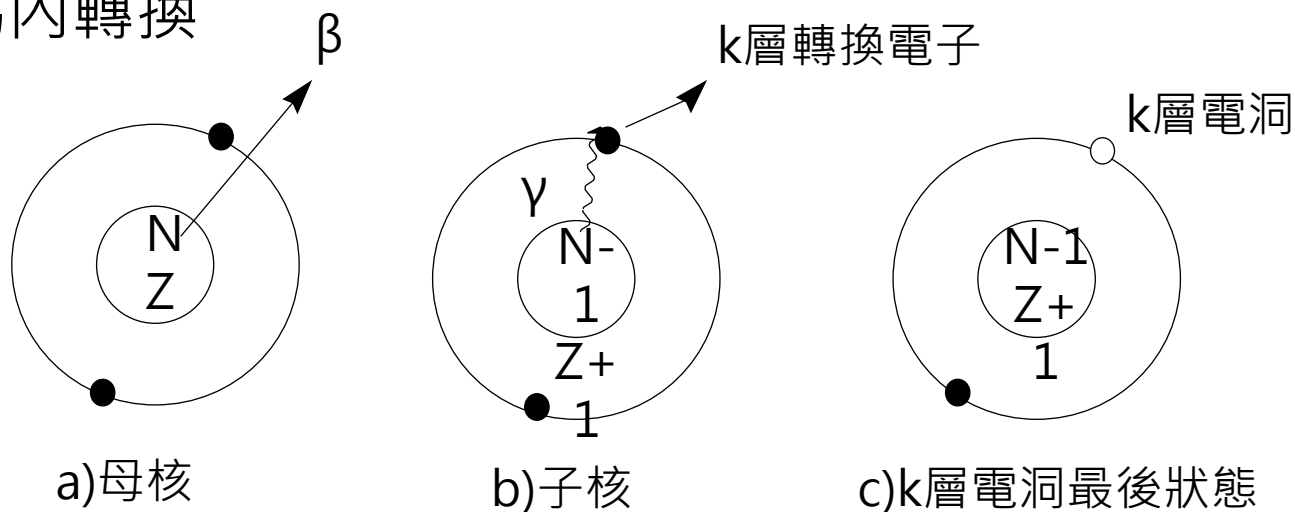


γ 遞移與內轉換

- 伴隨衰變後子核仍處於激發態者，可進行 γ 遞移或內轉換



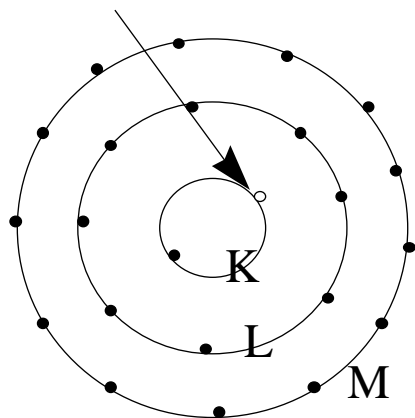
- 在某些適當的情況下，核種衰變時所釋出的 γ 射線能量，有時會被該原子的核外電子所吸收而使核外電子游離出來，這種變化稱為內轉換



特性輻射、鄂惹電子

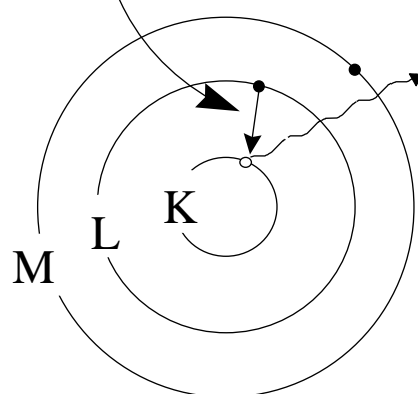
- 原子的內層電子軌域出現電洞(源於電子捕獲、游離、激發、內轉換等)時，外層或自由電子將補進此電洞，此時將有多餘能階能量生成，此能量若被更外層電子所吸收，此更外層電子將被游離，此被游離的電子稱為**鄂惹電子**；此能量若以光子的形式釋放，此光子稱為**特性輻射(能階的位能差)**。

電洞



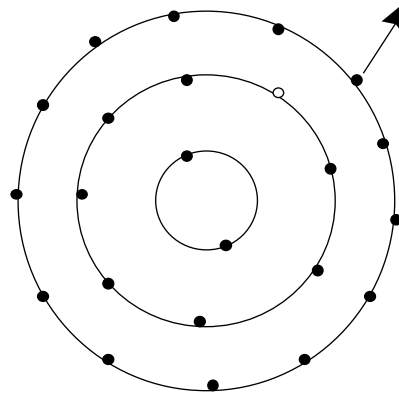
a) k層電洞初態

電子由L層填補電洞

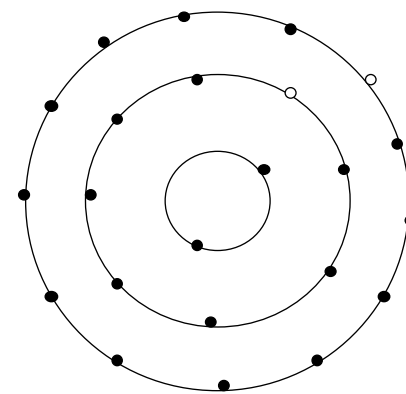


b) 特性輻射

射出鄂惹電子



c) 鄂惹電子

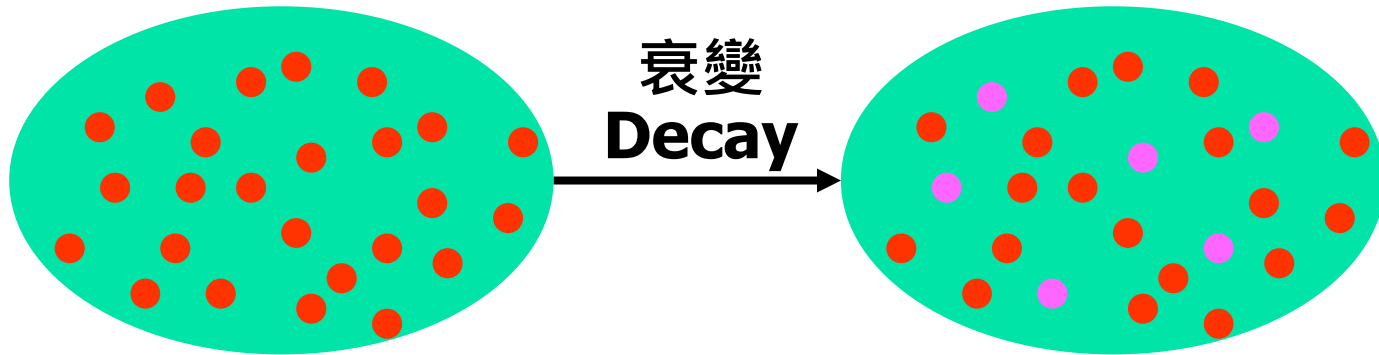


d) L與M層電洞最後狀態

指數衰變

母核(parent nuclei)

子核(daughter nuclei)



Time 0 · N_0 parent nuclei

Time t · N parent nuclei

λ = decay constant (衰變常數)

= 單位時間內原子核發生衰變的機率

$$= \frac{-dN/N}{dt}$$

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



活度

- 放射性核種衰變的速率

$$A = -\lambda N \quad A = A_0 e^{-\lambda t}$$

- A_0 ：放射性核種初始（ $t = 0$ ）的活性。
- A ：放射性核種經過 t 時間衰變後的活性。
- 單位：居理（curie, Ci）
貝克（becquerel, Bq）
- $1 \text{ Bq} = 1 \text{ dps} = 2.70 \times 10^{-11} \text{ Ci}$

活度隨時間成指數減少

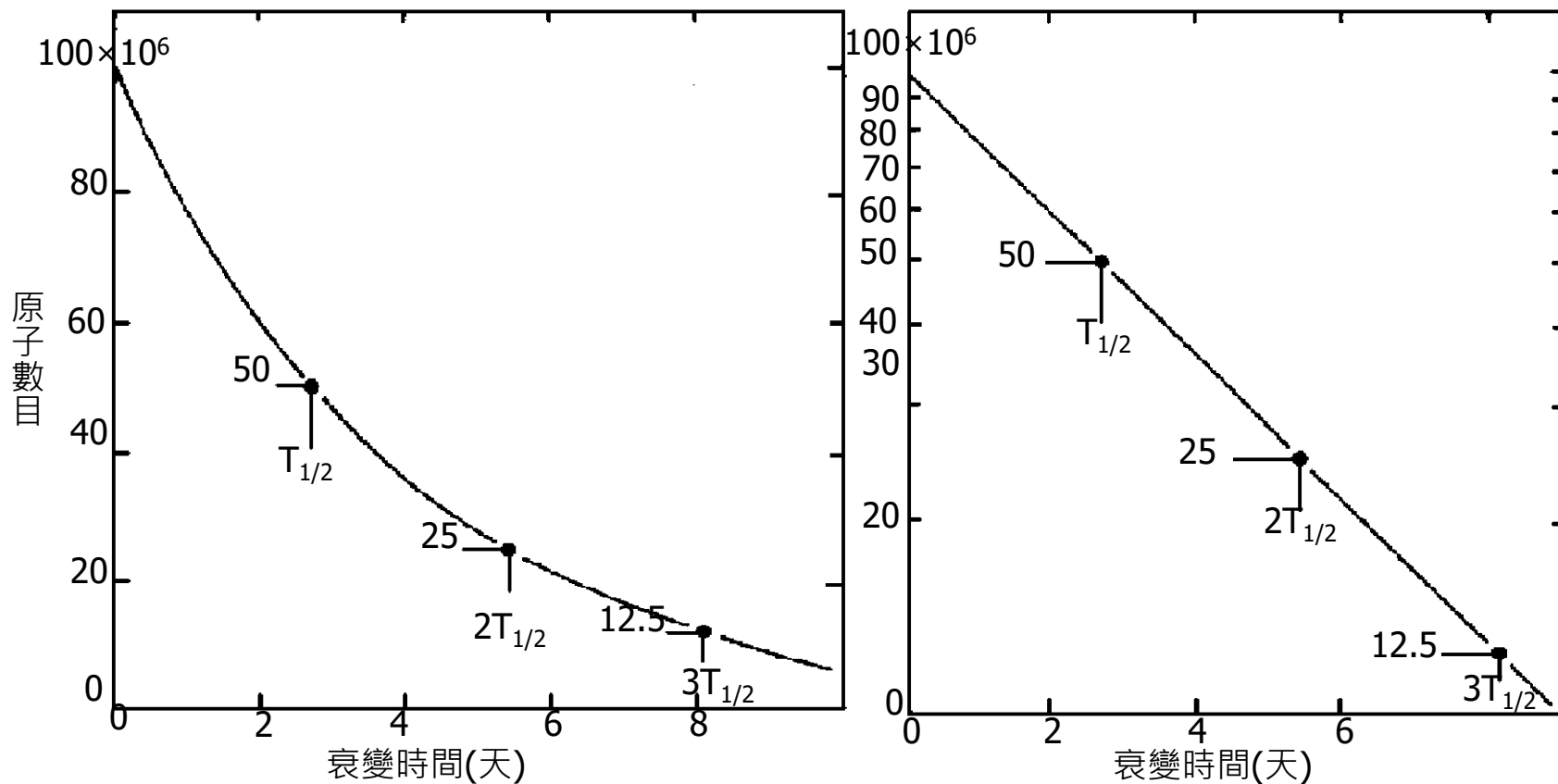


圖 金198的半衰期為2.70天，初始的金198原子數目為 10^8 個。左圖為線性尺度圖，右圖為半對數圖。

平均壽命、半衰期

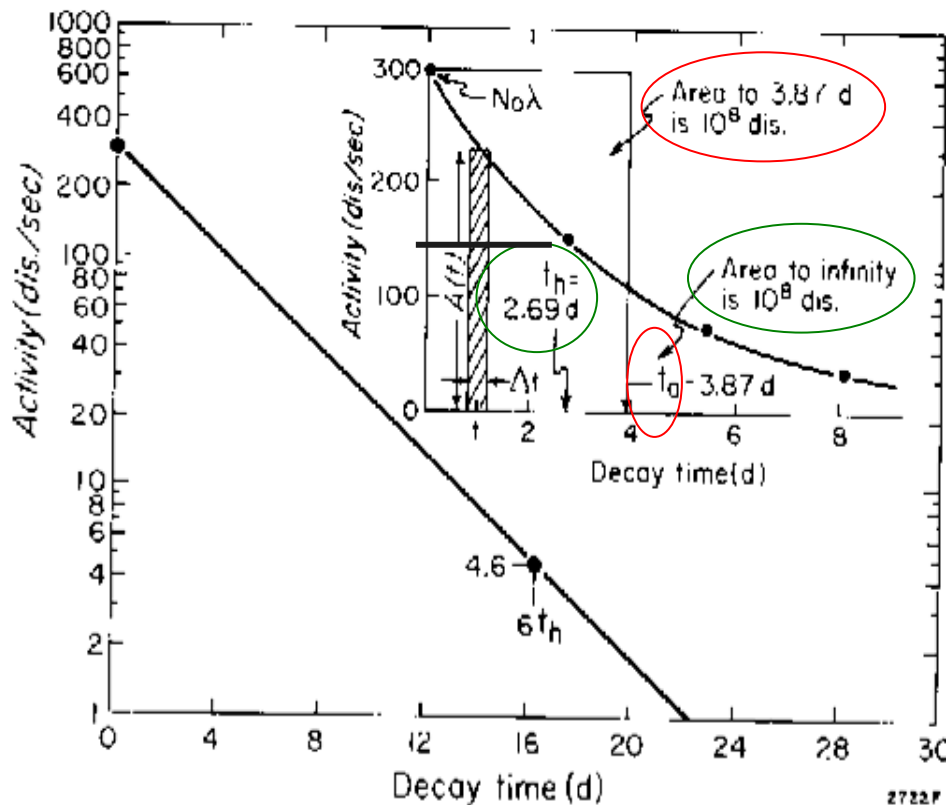


Figure 3-1. Decay of the activity of a ^{198}Au source containing 10^8 atoms.

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

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}} \Rightarrow \frac{1}{2} = e^{-\lambda T_{1/2}}$$

$$\therefore \ln \frac{1}{2} = -\lambda T_{1/2}$$

$$-0.693 = -\lambda T_{1/2}$$

$$T_{1/2} = \frac{0.693}{\lambda}$$

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


$$\bar{T} = \frac{\int_0^{\infty} N_0 e^{-\lambda t} dt}{N_0} = \frac{1}{\lambda}$$

$$A = \left| \frac{dN}{dt} \right| = \lambda N$$

$$A \times \bar{T} = \lambda N_0 \times \bar{T} = N_0$$

$$\bar{T} = \frac{1}{\lambda}$$

衰變與活度的計算

- 衰變常數(decay constant, λ 單位為 s^{-1})：指單位時間內放射性核種進行衰變的機率；故可用以代表一放射性核種穩定性的程度，即單位時間內衰變機率高者穩定性差，反之則優。

- 半衰(化)期(half-life, T 或 $T_{1/2}$)：放射性核種衰變至原有數量一半所需的時間，稱為該放射性核種的半化期， $\lambda = 0.693/T_{1/2}$ 或 $T_{1/2} = 0.693/\lambda$ 。
- 平均壽命(average life, τ)：我們可以求出某放射性核種，任一原子的平均壽命期望值，即將所有原子壽命的總和，除以原子總數即得。解得 $\tau = 1.44 T_{1/2} = 1/\lambda$ 。

輻射在哪裡？





游離輻射之來源

天然輻射 (約占民眾劑量之82%)

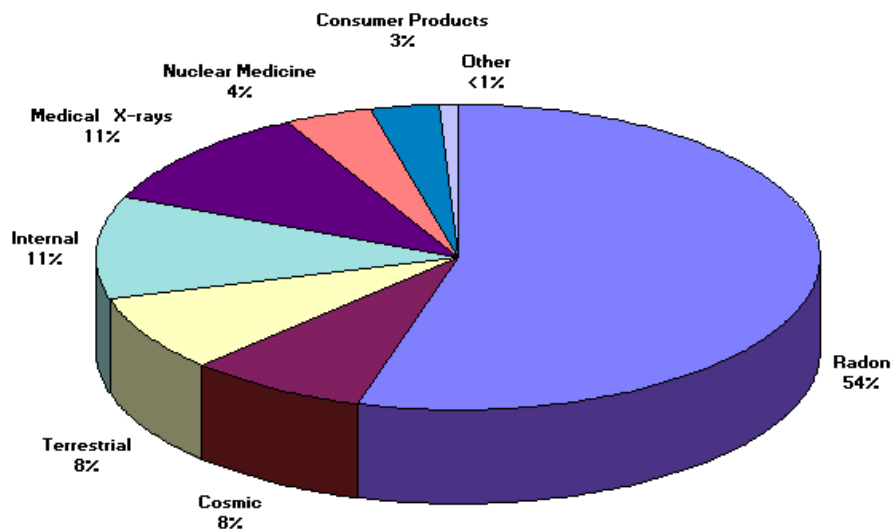
- ◻ 宇宙射線
- ◻ 地表(殼)輻射(含鈾、釷等)
- ◻ 人體內輻射(鉀-40、攝取食物)
- ◻ 氫氣
- ◻ 天然放射性物質(NORM及TENORM)

人造輻射 (約占民眾劑量之18%)

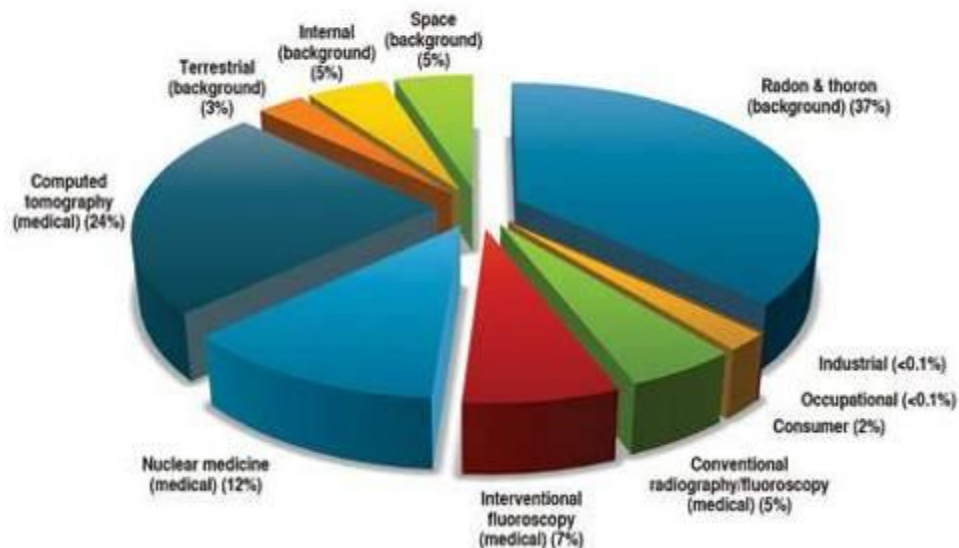
- ◻ 醫療曝露、農、工應用等
- ◻ 職業曝露
- ◻ 生活消費品
- ◻ 其他(核爆落塵與核能發電等)

輻射來源與民眾劑量貢獻比較

Sources of Radiation Exposure to the US Population

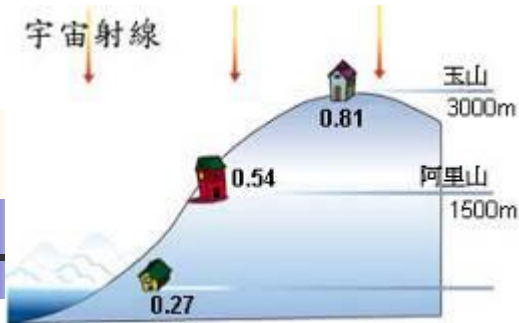


EXPOSURE SOURCES FOR COLLECTIVE EFFECTIVE DOSE, 2006



醫療曝露劑量大幅成長

各國天然輻射劑量評估值的比較 單位：毫西弗/年



類別	世界平均	美國	日本	台灣
宇宙射線	0.36	0.28	0.38	0.27
地表及植物	0.41	0.28	0.29	0.55
小計	0.77	0.56	0.67	0.82
氡等	1.26	2.0	0.56	0.83
鉀40等	0.36	0.39	0.47	0.33
小計 (體內輻射)	1.62	2.39	1.03	1.16
合計	2.4	3.0	1.7	2.0

UNSCEAR：聯合國原子輻射效應委員會

航線 (往返)	接受劑量 (微西弗)
台北 = 紐約	156
台北 = 阿姆斯特丹	99
台北 = 洛杉磯	93
台北 = 約翰尼斯堡	93
台北 = 雪梨	48
台北 = 新加坡	15
台北 = 金門	0.67
台北 = 高雄	0.48
台北 = 台南	0.23
台北 = 蘭嶼	0.13
台北 = 馬公	0.07

註：1000微西弗 = 1毫西弗

地區	年劑量	倍數 (4)
伊朗 Ramsar 市 (1)	6 至 360	3 至 180
印度 Kerala 區十個村莊(2)	平均 13	6.5
巴西 Espirito Santo (3)	0.9 至 35	1、7.5
大陸福建鬼頭山區 (3)	平均 3.8 最高 120	1.9 60

資料來源：
 (1) 國際原子能總署簡訊，1991年第33卷第2期。
 (2) 聯合國原子輻射效應科學委員會1962及1992年報告。
 (3) 聯合國原子輻射效應科學委員會1992年報告。
 (4) 台灣地區平均自然背景輻射年劑量 2 毫西弗的倍數。



生活環境中的輻射

- 人體所受到的游離輻射可分為**天然**輻射及**人為**輻射。
- **天然輻射**:顧名思義就是**自然界中早已存在**的輻射，這些輻射的來源包括空氣中的氡氣、地表土壤與岩石所含微量放射性元素鈾、鈷等所釋放出的輻射、宇宙射線及人體內因攝食食物中的放射性物質，如鉀-40、碳-14等。
 - **人為輻射**:來源則以接受**X光診斷及放射治療**癌症等醫用為主，少量為來自、核能發電及日常生活中的輻射如住屋火警煙霧偵檢器、電視機螢光幕等。

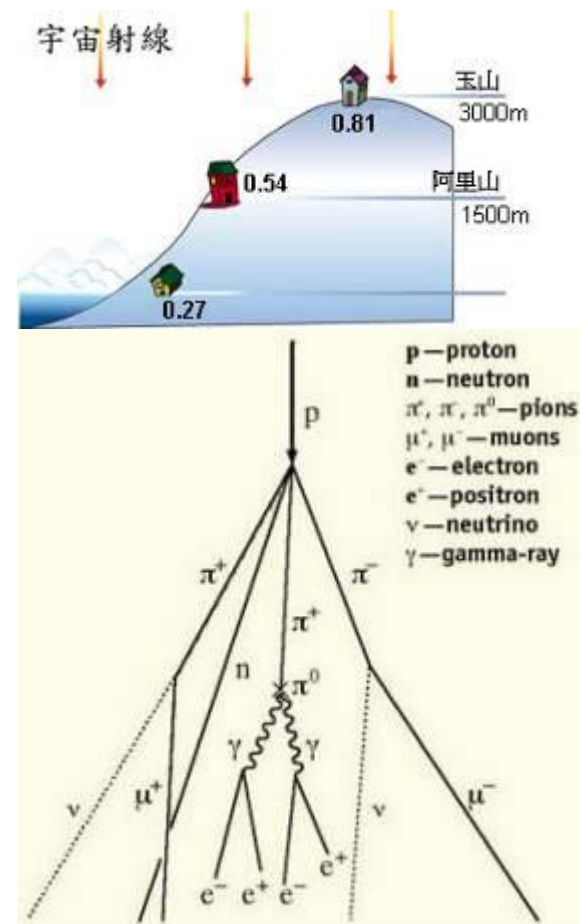


天然輻射

- 天然輻射的強度及人類接受的輻射劑量各地不同。
- 可能因**緯度**變化、**地形高低**、**土壤**與岩石中放射性物質含量與性質、居住與飲食習慣之不同等而有差異。
- 平均而言，**台灣**地區每人每年所受到的**天然輻射劑量**約為**2毫西弗**，較全球的平均值稍低。
- 世界上有許多地區其天然輻射甚強，如巴西喀拉哈利年劑量約**10毫西弗**，在印度喀拉拉地區年劑量更高達**20毫西弗**。
- 美國科羅拉多州天然輻射年劑量較其他州平均高三倍以上，然而其癌症死亡率平均較其他州低**15%**。

宇宙射線

- 宇宙射線來自外太空，因受到大氣層的阻擋而減弱，在高海拔地區因大氣稀薄輻射較強，一般地區每**上升1500公尺，輻射劑量約增加一倍**。
- 台灣阿里山的宇宙射線強度約為海平面的**2.5倍**。
- 此外輻射也會隨著緯度變化，在高緯度地區的宇宙射線通常較低緯度地區強。



地表輻射

- 地表的土壤及岩石或多或少都含有放射性核種，某些地點因其地質特性使放射性核種含量較多，而造成偏高的輻射劑量。
- 例如台灣北投地區的地熱谷，溫泉水中含較多的放射性核種，所以該地區的地表輻射劑量是台灣一般地區的五到六倍。



台灣區地表輻射年劑量



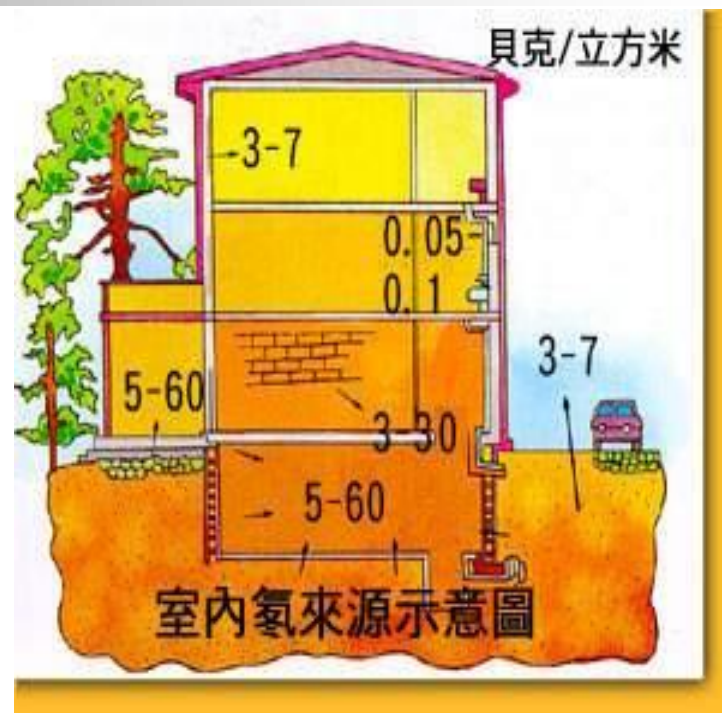
氡氣

- 氡氣是一種天然的放射性氣體，主要為鈾系元素衰變過程中的產物，由於土壤及岩石中都含有少量的鈾，因此我們居住環境的週圍，亦不免有氡氣的存在。
- 氡氣是天然輻射的最大來源(50-60%)，台灣地處亞熱帶，住宅、辦公室通風良好，無重要鈾礦床，故不易發生高濃度氡氣聚積之情況。

天然礦石及氡氣來源



含鈾、鈷礦石(北投石)



台灣室內平均氡濃度: 10貝克/立方米
英國室內平均氡濃度: 20貝克/立方米
美國建議之行動水平: 150貝克/立方米

體內輻射

- 人體的體重約有0.2%是鉀，其中0.012%是具有放射性的**鉀-40**。
- 此外人們每天的飲食中也會攝入含有放射性的物質，這些都會造成我們受到體內輻射。
- 由於這些放射性物質也會排出體外或衰變減弱，長時間後，進入人體與排出人體的放射性物質將達成平衡，使體內輻射維持一定。



日常食物是可能的體內輻射來源

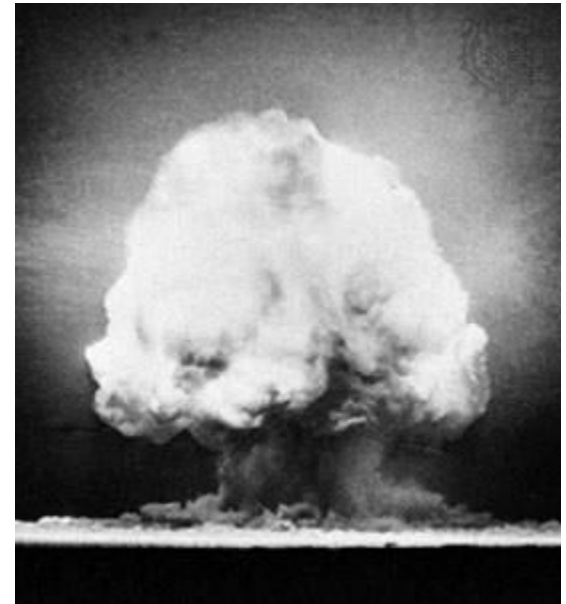


醫療輻射

- 人為輻射來源中，以醫療保健輻射應用為主。
- 我們所熟知的X-光攝影檢查、電腦斷層掃描、核醫造影診斷及癌症放射治療等都是最佳例證。
。顯示核能科技在醫學方面的廣泛應用，對於維護大眾生命健康功不可沒。

核子試爆落塵

- 自一九四五年七月美國首次進行核子試爆以來，核爆所產生的輻射落塵隨著氣流散布於大氣中，而遍及世界各地，經長時間沉降聚積於地球表面，使自然環境中增加了額外的人為輻射來源。
- 禁止核武擴散條約的約束而減少核試爆頻率。



First atomic bomb test,
Alamogordo, N.M., July 16, 1945.

核能發電與核反應器

- 核能電廠的輻射來源，主要是核電廠運轉過程所排放帶有微量放射性的廢氣和廢水，及電廠內放射性廢料貯存場、核燃料和核廢料運送的微量輻射曝露。
- 我國對核能電廠廠界外輻射曝露限度有嚴格的規定，是一般公眾年劑量的十分之一(每年0.5毫西弗)。此劑量在國際輻射防護委員會建議之安全範圍內。
- 意外事故：
 - 1957 英國文治克耳反應器
 - 1979 美國賓州三哩島核能電廠
 - 1986 蘇聯車諾比爾核能電廠



含放射性物質之消費性產品

煙霧偵檢器(含Am-241)

手錶、時鐘及指北針(夜光用含H-3、Pm-147或
Ra-226 (舊式,高劑量))

香煙(含Po-210)

陶磁器、磁磚、玻璃(含U-235/238、Th-232、K-40)

電焊條(含Th-232)

肥料(含K-40、P-32、N-13)

鍺能量石





職業曝露

- 核能民生應用業界的從業人員，如核能電廠員工、X光機操作人員、放射性研究與處理人員等，比一般人接受到輻射的機會與劑量均較多。
- 政府規定職業人員年劑量限度為每連續五年不超過一百毫西弗，單一年度不超過50毫西弗，以保障人員工作安全。此劑量亦在國際輻射防護委員會建議之安全範圍內，並無健康上的顧慮。

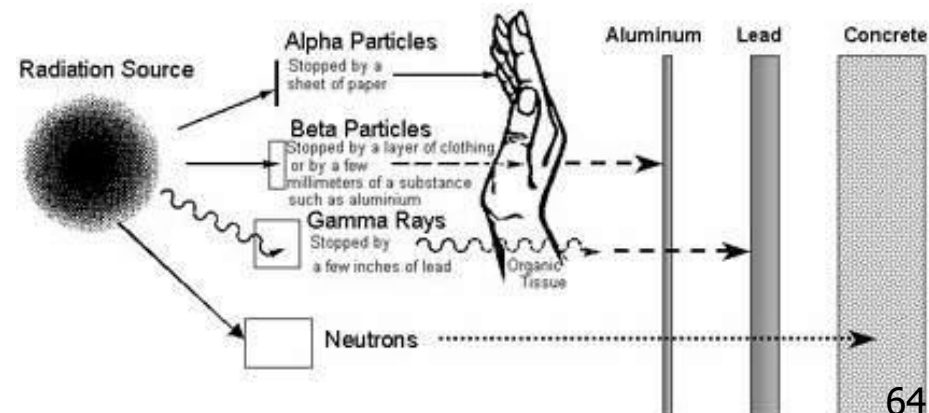


曝露限值

	職業曝露限度	一般人限度	十六歲以上未滿十八歲者
有效劑量	<u>(1)5年內平均:20 mSv/y</u> <u>(2)任何單1年:50 mSv/y</u>	<u>(1)1年:1 mSv/y</u> <u>(2)1年:5 mSv/y ,</u> <u>5年內平均:1 mSv/y</u>	<u>任何單1年:6 mSv/y</u>
眼球水晶體等價劑量	150	15	50
皮膚等價劑量	500	50	150
手和足等價劑量	500	--	150

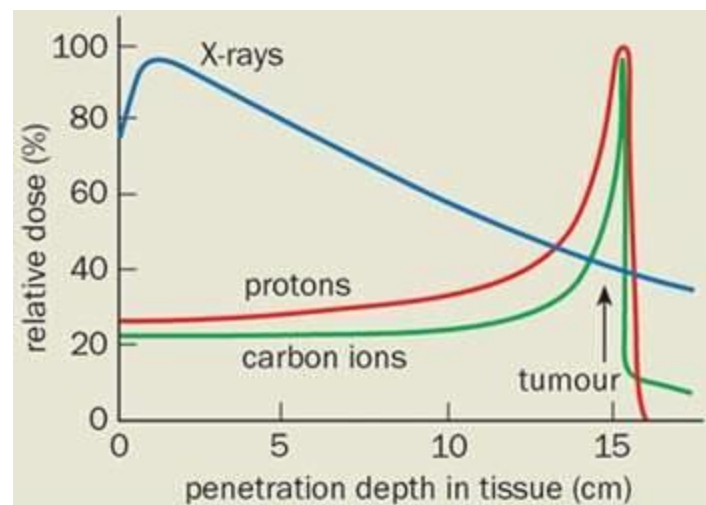
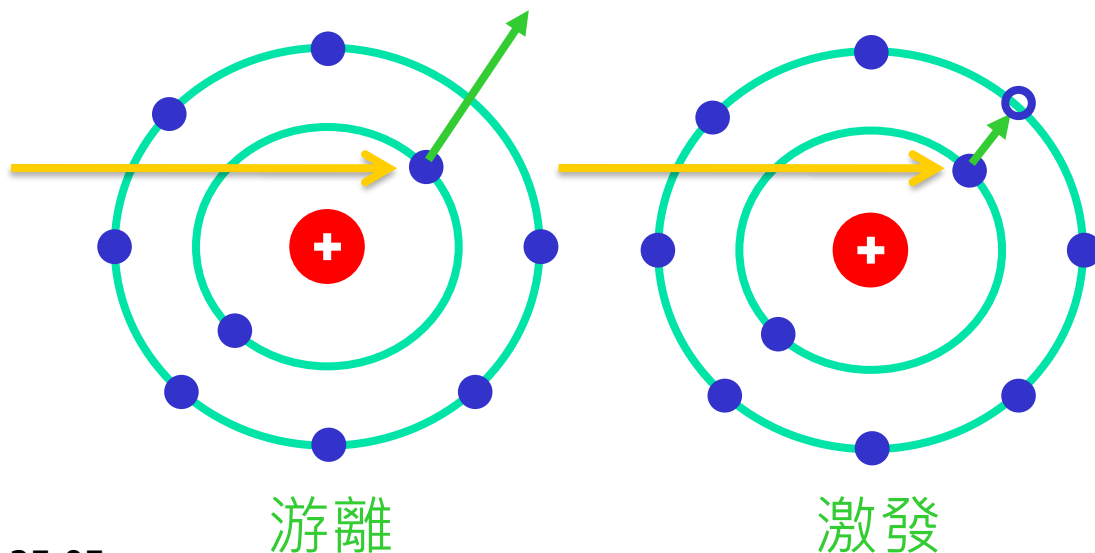
游離輻射的特性

- 依輻射線的游離物質特性
 - 直接游離 (指荷電粒子，如 α 、 β 等)
 - 間接游離 (指電中性輻射線，如X、 γ 、中子等)
- 依輻射線的產生方式(來源)
 - 原子輻射(指來自核外者，如X、鄂惹電子等)
 - 核輻射(指來自核內者，如 α 、 β 、 γ 等)
- 依其物理性質可區分
 - 重荷電粒子
 - 輕荷電粒子
 - 光子
 - 中子



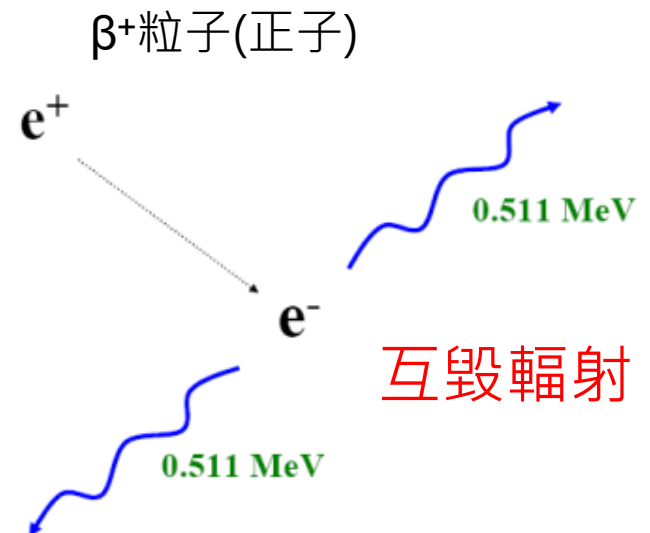
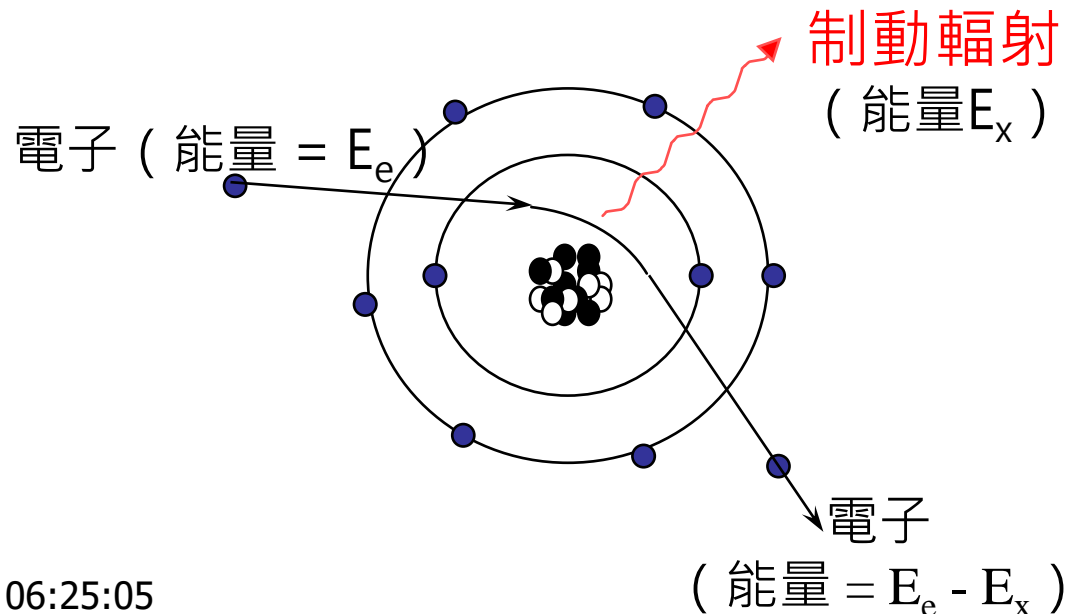
重荷電粒子與物質的作用

- 重荷電粒子重且帶電荷，極易造成電子的游離(含激發)，游離後本身行進路徑幾乎不偏折。
- 各輻射線體外曝露的劑量深度曲線(橫座標為深度，縱座標常使用比游離或阻擋本領)中，僅重荷電粒子有**布拉格峰(Bragg peak)**現象(射程末端具高游離比度(能力))。

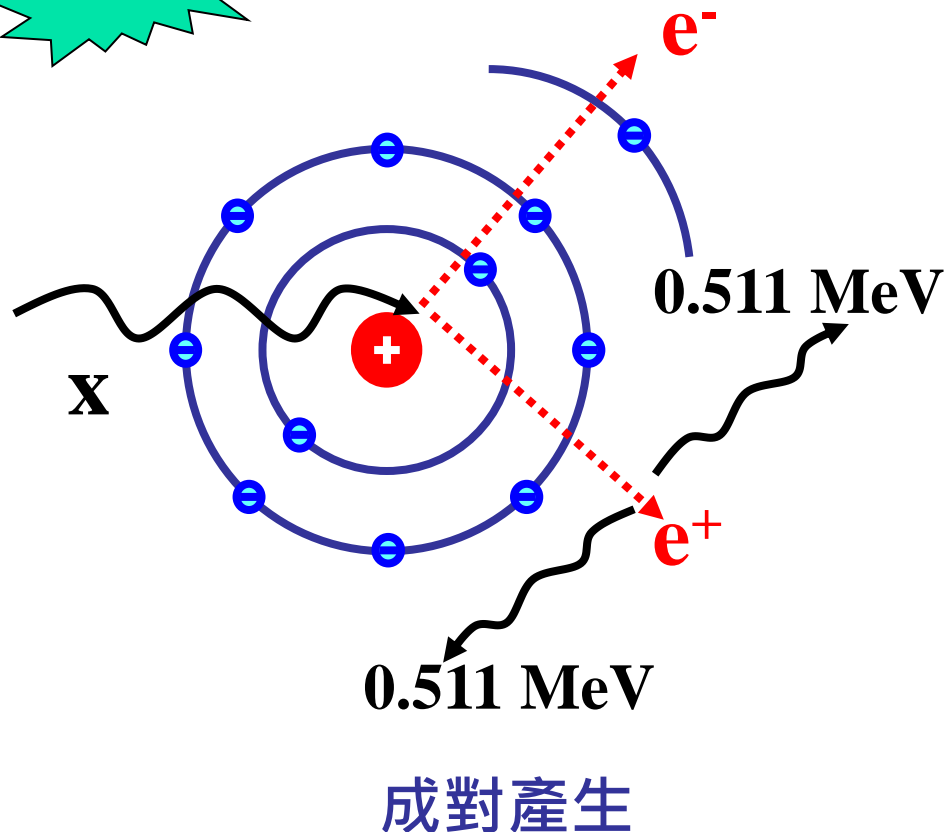
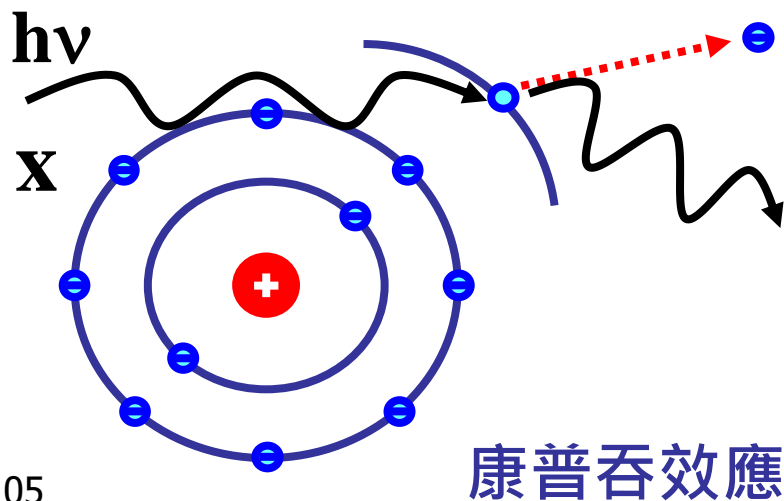
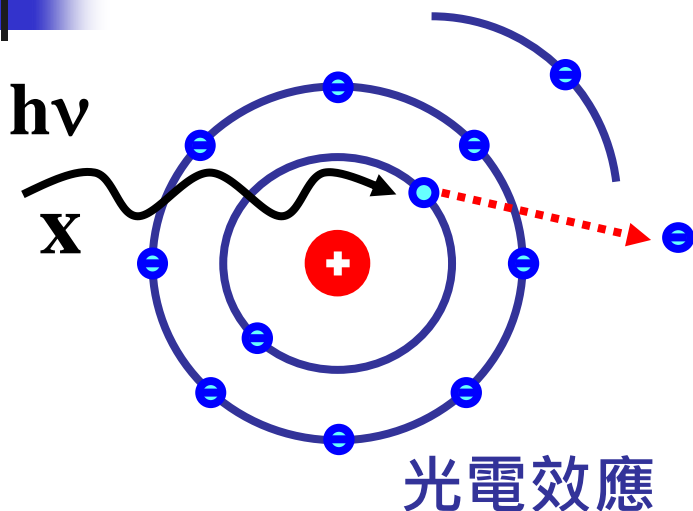


輕荷電粒子與物質的作用

- 輕荷電粒子能量損失機轉主要有二：(1)主要因游離(含激發)損失能量；(2)少量因與原子核發生非彈性碰撞，產生制動輻射而損失能量。
- β^+ 粒子的另一作用機轉：輕荷電粒子中的 β^+ 粒子將與電子互毀並產生互毀輻射。



光子與物質的作用機轉



中子與物質的作用機轉

- 快中子(能量 ≥ 0.1 MeV)與核的**彈性碰撞**:碰撞後入射中子的動能，由散射中子與回跳核以動能形式攜帶。
- 快中子與核的**非彈性碰撞**：快中子動能超過核反應低限能時，因發生核反應，入射中子的動能，不等於散射中子與回跳核動能之和。
- 慢中子(能量 < 0.1 MeV)與熱中子(室溫下的中子，平均能量為0.025 eV)的**中子捕獲反應**。

中子與物質作用-碰撞反應

- 彈性碰撞:中子與靶核碰撞而損失能量，損失的能量轉移成靶核的動能。
- 非彈性碰撞:入射中子把一部分能量傳給靶核並使靶核激發，當受激核返回基態時，通常會放出 γ 射線。對於重元素而言，非彈性碰撞的作用較為重要。

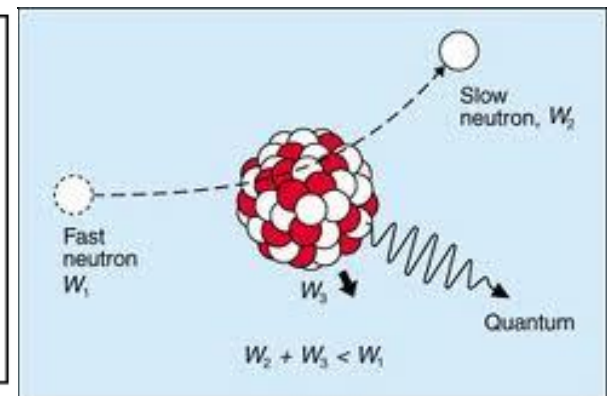
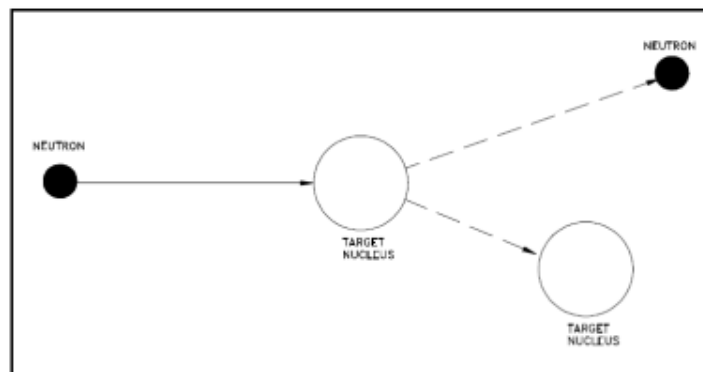
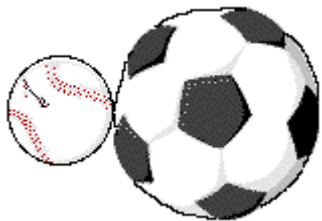
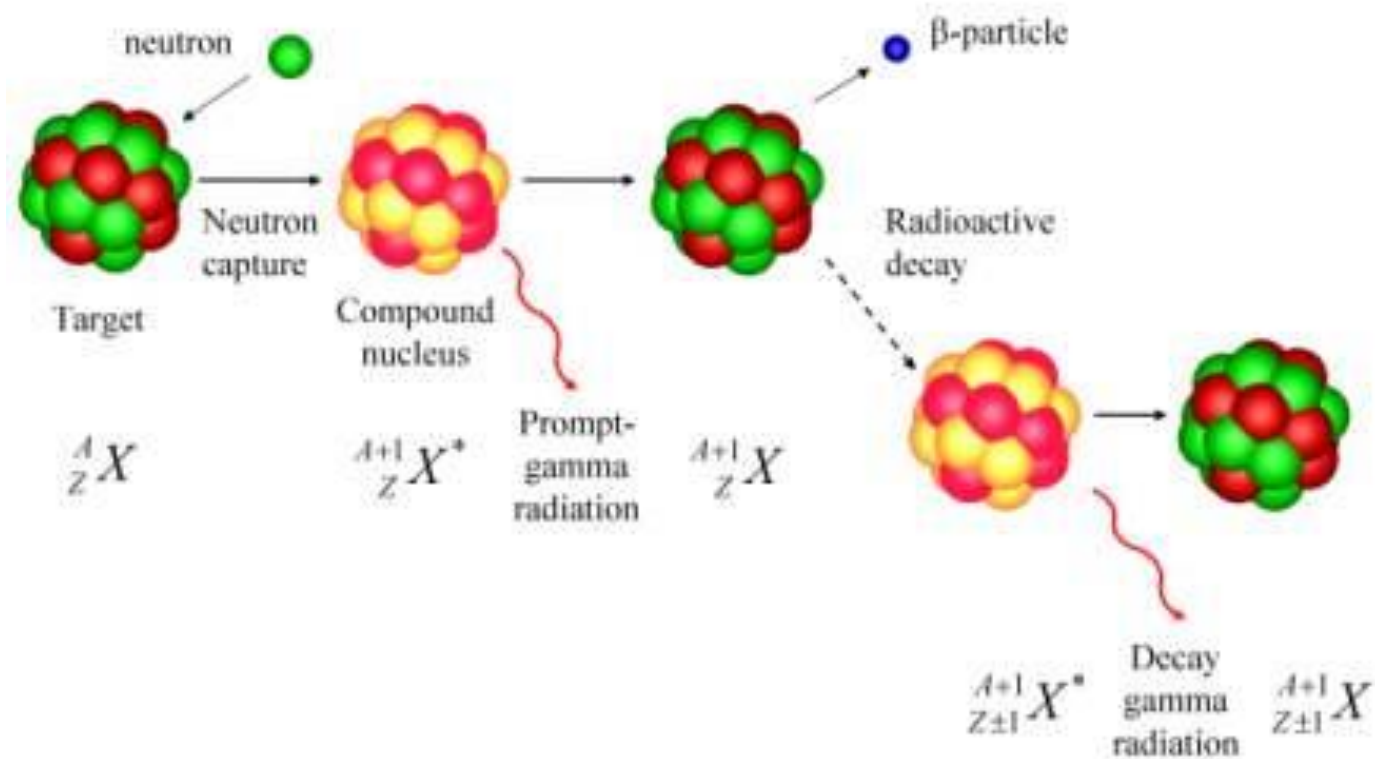


Figure 16 Elastic Scattering

中子與物質作用-捕獲反應





曝露劑量種類及定義

名稱	單位	定義	適用範圍
曝露劑量(X)	R, C/Kg 倫琴	使1cm ³ 空氣產生一個靜電單位之輻射量	輻射場強度的單位僅適用X及γ射線，且介質為空氣
吸收劑量(D)	rad, Gy 雷得、格雷	一公斤水吸收1焦耳之能量	作用物吸收的輻射能適用所有之輻射
等效劑量(H)	rem, Sv 倫目、西弗	描述各種輻射線與生物作用所產生之差異	表示人體受傷害的程度適用所有之輻射
放射活度(A)	Ci, Bq 居里、貝克	放射性核種之蛻變率	度量放射源強度的單位



輻射劑量與單位

- (一)西弗的單位：人體每公斤接受加馬射線的能量為一焦耳時，其劑量定為一西弗。
- (二) 侖目的單位：人體每克接受加馬射線的能量為一〇〇爾格時，劑量定為一侖目。
即1侖目=100爾格/克(1 rem=100 erg/g)。
故1西弗 = 一千萬爾格 / 公斤 = 一萬爾格 / 1克=100侖目。
(1Sv=10000 erg/g= 100 rem)
簡單的換算,1西弗=100侖目。

量	新國際專用單位 (符號)	國際制單位(SI Unit)	約相當於舊輻射單位
活度	貝克(Bq)	1/秒(1/s)	(27.03/兆)居里(Ci)
曝露		庫倫/公斤(C/Kg)	3876侖琴
吸收劑量	格雷(Gy)	焦耳/公斤(J/Kg)	100雷得
等效劑量	西弗(Sv)	焦耳/公斤(J/Kg)	100侖目



放射活度與輻射劑量單位之關係

1. 一位「演講者每分鐘說出的話」，如以術語表示時即為「字的通率」，此即如同「居里（放射活度）」。
2. 每一位「聽眾耳朵所傳進的量」，就如同「侖琴（曝露量）」。
3. 經由每一位「聽眾腦海所能記下來的量」，就如同「雷得（吸收劑量）」。
4. 記下來的話在每一位聽眾「心裡所產生回響的大小」就如同「侖目（等效劑量）」。

活度 (activity)

考題

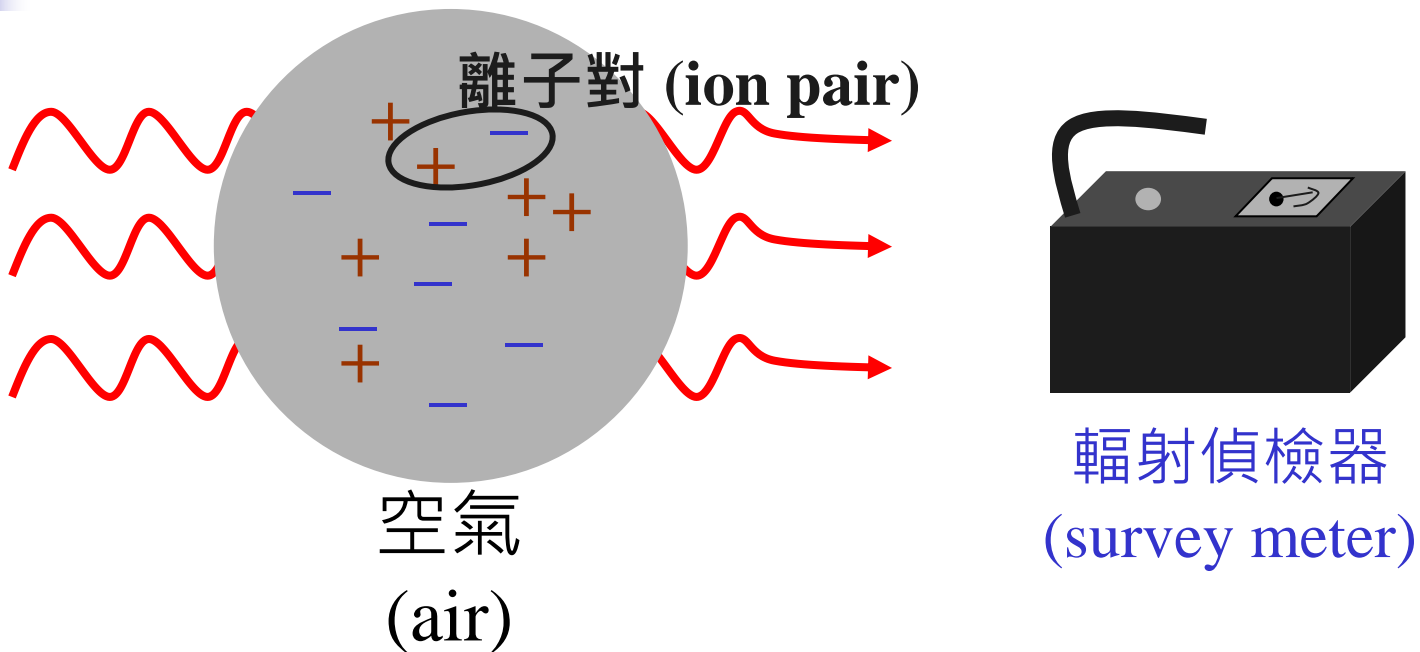
一放射性核種於每單位時間內產生自發性蛻變的次數，稱為活度。活度的單位為「貝克」，簡寫成Bq，它的定義為
 $1 \text{ 貝克 (Bq)} = 1 \text{ 蛻變/秒}$

貝克是用來表示一個輻射源，如 ^{60}Co 的強度 (蛻變率)。

另外一個常用的單位為「居里」Ci：
 $1 \text{ 居里 (Ci)} = 3.7 \times 10^{10} \text{ 貝克 (Bq)}$



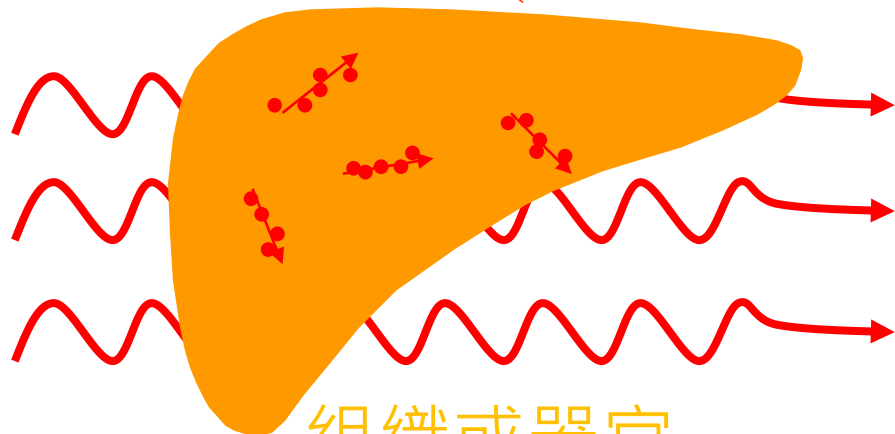
曝露 (Exposure), X



$$X = \text{charge liberated} / \text{mass}$$
$$1 \text{ R (倫琴)} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$$

吸收劑量(Absorbed Dose), D

- 游離或激發 (ionization or excitation)



組織或器官
Tissue or organ



游離腔
Ion chamber

$$D = \text{energy absorbed} / \text{mass}$$
$$1 \text{ Gy (格雷)} = 1 \text{ J/kg}$$



吸收劑量 (absorbed dose) , D

考題

每單位質量的物質 (公斤) , 平均吸收的輻射能量 (焦耳) , 稱為吸收劑量。吸收劑量單位是「格雷」, 簡寫為 Gy , 它的定義為

$$1 \text{ 格雷(Gy)} = 1 \text{ 焦耳/公斤}$$

每小時平均所接受的吸收劑量稱為吸收劑量率, 單位為格雷/小時, 它的千分之一為毫格雷/小時 (mGy/h) , 百萬分之一為微格雷/小時 (μGy/h) 。



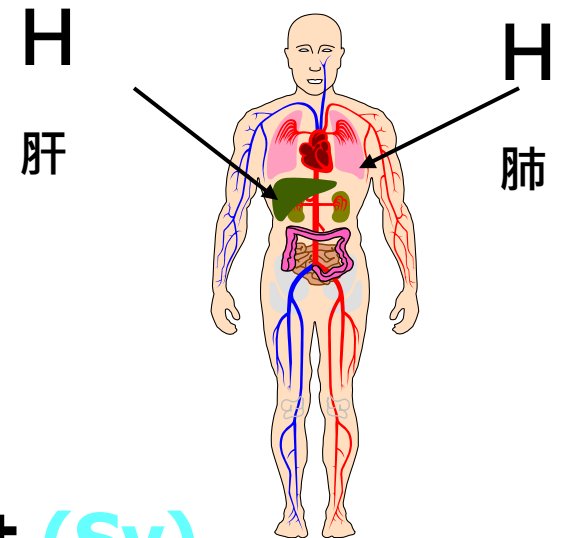
等價劑量 (equivalent dose) , H_T

不同種類的輻射 (α 、 β 、 γ 、 n) 照射人體的組織或器官，雖使人體組織有相同的吸收劑量，但卻會造成不同程度的傷害現象。為此，針對不同種類的輻射訂出射質因數 (Q)，代表不同輻射對人體組織造成不同程度的生物傷害，它的值列於下表：

等價劑量即為人體組織的吸收劑量和輻射加權因數(w_R)的乘積，它已含有輻射對組織器官傷害的意義了。它的單位是「西弗」，簡寫成Sv，定義為：

$$H_T (\text{西弗}) = D (\text{格雷}) \times w_R$$

個別組織器官的等價(效)劑量



$$H_{T,26} = D_T \times Q$$

$$H_{T,60} = D_T \times W_R$$

$H_{T,26}$: 等效劑量 dose equivalent (Sv)

$H_{T,60}$: 等價劑量 equivalent dose (Sv)

D_T : 吸收劑量 organ absorbed dose (Gy)

Q : 射質因數 (quality factor)

W_R : 輻射加權因數 (radiation weighting factor)



射質因數與輻射加權因子

<i>Radiation</i>	ICRP 26 Quality factor (Q_R)	ICRP 60 <i>Radiation weighting factor</i> (w_R)
X, γ , β	1	1
Neutron		
Thermal	2	5
0.5 MeV	11	20
20 MeV		5
unknown	10	
Proton >2 MeV	10	5
α , fission fragments, heavy nuclei	20	20



輻射加權因子

光子	各種能量	1
電子， μ 介子	各種能量	1
中子	能量 < 10 keV	5
	10 keV - 100 keV	10
	100 keV - 2 MeV	20
	2 MeV - 20 MeV	10
	20 MeV	5
質子 (不包括回跳質子)	> 2 MeV	5
α 粒子，分裂碎片，重核		20

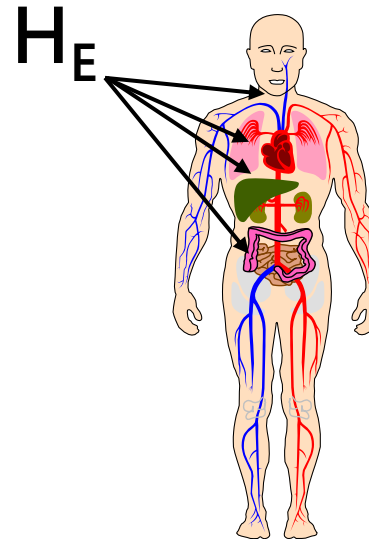
有效劑量(effective dose) , E

由於人體各組織器官對輻射的敏感度不同，所以雖各接受相同的等價劑量，但是造成健康損失（罹患致死癌或不良遺傳）的風險（機率）卻不同，也就是說不同的器官組織，照射相同的輻射量所照成的傷害不同。

因此訂出「組織加權因數」(W_T)來代表各組織器官接受輻射對健康損失的機率。如下表，可知性腺抵抗輻射的能力較其他器官來的低。

若把各組織器官的等價劑量(H_T)，與其加權因數的乘積加以總和，即成為有效劑量(E)。E代表全身的輻射劑量，用來評估輻射可能造成我們健康效應的風險，單位也是西弗(Sv)。例如台灣地區的民眾，平均每年接受天然背景輻射劑量(H_E)約2毫西弗(mSv)，與全世界的平均值(2.4mSv)差不多。

全身組織器官的有效劑量



$$H_E = \sum_T H_{T,26} \times W_{T,26}$$

$$E = \sum_T H_{T,60} \times W_{T,60}$$

H_E : 有效等效劑量 **effective dose equivalent (Sv)**

E : 有效劑量 **effective dose (Sv)**

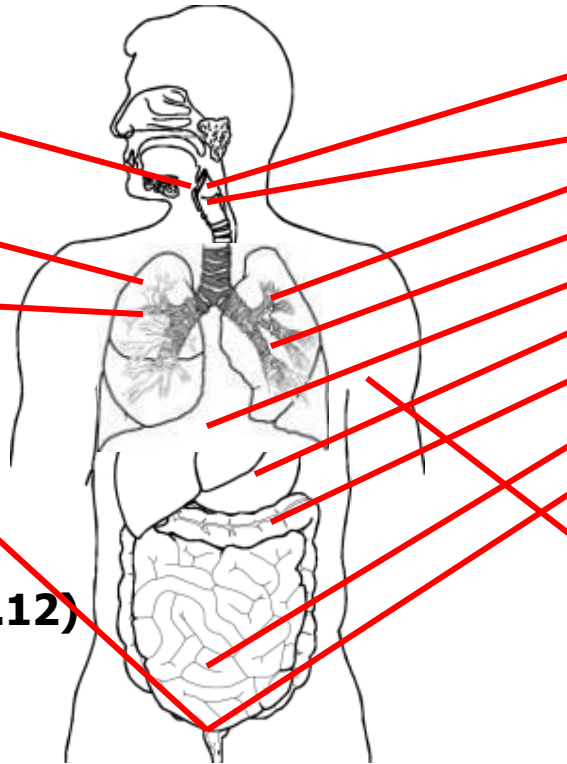
$W_{T,26}$: 組織加權因數 **tissue weighting factor**

$W_{T,60}$: 組織加權因數 **tissue weighting factor**

ICRP-26 與 ICRP-60 之組織加權因數比較

Tissue ($W_{T,26}$)

- Thyroid (0.03)
- Lung (0.12)
- Breast (0.15)
- Gonads (0.25)
- Bone surface (0.03)
- Red bone marrow (0.12)
- Remainder (0.30)



Tissue ($W_{T,60}$)

- Thyroid (0.05)
- Oesophagus (0.05)
- Breast (0.05)
- Lung (0.12)
- Stomach (0.12)
- Liver (0.05)
- Colon (0.12)
- Bladder (0.05)
- Gonads (0.20)
- Skin (0.01)
- Bone surface (0.01)
- Red bone marrow (0.12)
- Remainder (0.05)

組織器官的加權因數(Wt)

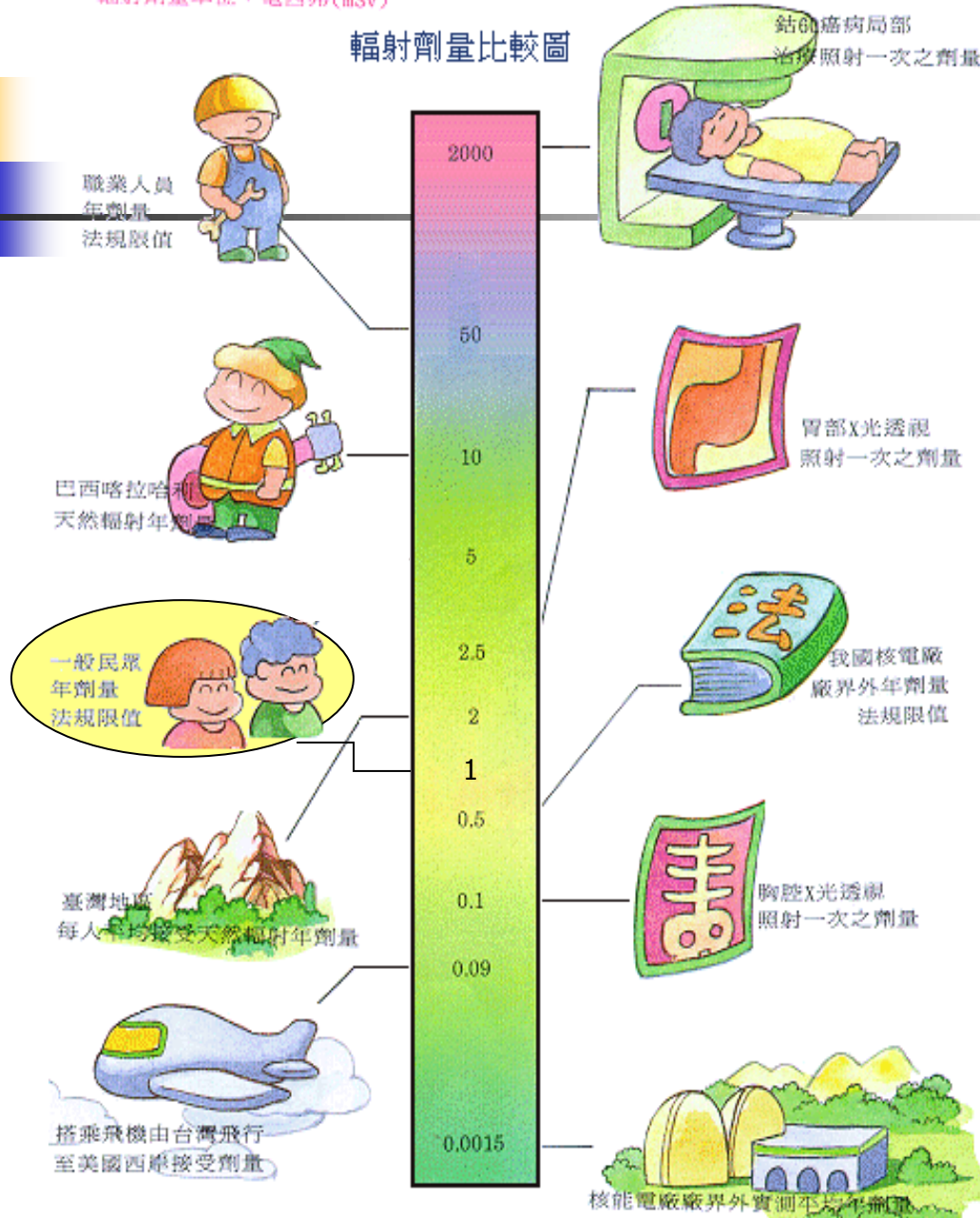
器官或組織, T	ICRP 26 <i>Tissue Weighting Factor, w_T</i>	ICRP 60 <i>Tissue Weighting Factor, w_T</i>
性腺(生殖腺)	0.25	0.2
紅骨髓	0.12	0.12
結腸(大腸直腸)		0.12
肺	0.12	0.12
胃		0.12
膀胱		0.05
乳腺	0.15	0.05
肝臟		0.05
食道		0.05
甲狀腺	0.03	0.05
皮膚		0.01
骨表面	0.03	0.01
其餘部分	0.3	0.05

- ICRP 60 Remainers including Adrenals, Brain, Small Intestine, Kidney, Muscle, Pancreas, Spleen, Thymus, and Uterus.

資料來源：ICRP-26(1977)及ICRP-60(1991)

輻射劑量單位：毫西弗(mSv)

輻射劑量比較圖



航線 (往返)	接受劑量 (微西弗)
台北 - 紐約	156
台北 - 阿姆斯特丹	99
台北 - 洛杉磯	93
台北 - 約翰尼斯堡	93
台北 - 雪梨	48
台北 - 新加坡	15
台北 - 金門	0.67
台北 - 高雄	0.48
台北 - 台南	0.23
台北 - 蘭嶼	0.13
台北 - 馬公	0.07

註：1000微西弗 = 1毫西弗

