

原子物理學(一) 輻射和放射性

5.1 輻射和放射性

X-射線

X-射線是一種致電離、高穿透力、短波長的電磁輻射
當快速電子撞擊到重金屬靶子時便發射出 X-射線

α 、 β 和 γ 輻射

α 、 β 和 γ 輻射的由來和性質
就以下的性質比較 α 、 β 和 γ 輻射：穿透能力、射程、
致電離能力、在電場和磁場中的偏轉和在雲室中的徑跡等

放射衰變

在不穩定核素中發生的放射衰變
放射衰變的無規特性
樣本的放射強度和未衰變原子核的數目之間的正比例關係
半衰期的定義
從放射性同位素的衰變曲線或數據紀錄決定其半衰期
解釋涉及半衰期的問題

輻射檢測

使用感光底片和蓋革-彌勒計數器檢測輻射
用蓋革-彌勒計數器量度輻射，並以計數率為表達單位

輻射安全問題

本底輻射的主要來源
使用單位希沃特表達輻射劑量的大小
致電離輻射的潛在危險性和減低吸收輻射劑量的方法
處理放射源的安全措施

1. X 射線 (X-ray)

i) X 射線的性質

- 高頻率的電磁波
- 波長： $10^{-8} \text{ m} - 10^{-10} \text{ m}$
- 穿透能力很強
- 致電離能力較弱

ii) 顯示 X 射線波動性質的證據

- X 射線在晶體內的繞射現象

iii) 人工產生 X 射線

- 當電流流經燈絲時，燈絲受熱而發射電子。
 - ⇨ 這個過程稱為熱離子發射。
- 電子會由陰極加速射向陽極。
 - ⇨ 由於兩極之間的電壓極高，電子的速率(動能)也極高。
- 當這些高能量的電子撞擊到鎢製的陽極時，會急劇地減速，部分能量會轉化為 X 射線。

2. 貝克勒耳(Becquerel)實驗

- 貝克勒耳在 1896 年發現某些物質(如鈾，Uranium)能夠發射出某種不可見的輻射，能在黑暗中使照片底片曝光而變黑。
- 放射性物質(radioactive substances)是指一些能釋放穿透性輻射的物質。
- 放射現象(radioactivity)是指放射性物質釋放出輻射的現象。

3. 輻射的性質和特質

i) 三種輻射的性質

a) α 粒子輻射：氦核 (Helium nucleus)

b) β 粒子輻射：高速運動電子 (a fast moving electron)

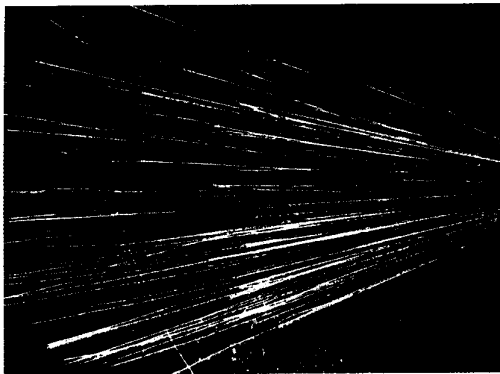
c) γ 射線輻射：波長極短的電磁波 (electromagnetic wave)

→ 有些放射源同時放射三種不同輻射，但有些則放射一至二種。

ii) 輻射性質總結

	α 粒子	β 粒子	γ 射線輻射
本質	氦原子核	電子	電磁波
電荷	+2	-1	0
射出時的速度	約光速的十分之一	約光速的十分之九	等於光速
雲室徑跡	粗而且筆直	幼細而曲折	徑跡並不明顯
致電離能力 (ionizing power)	強	中	弱
空氣中的射程 (range in air)	幾厘米	幾米	幾百米
電場中的偏轉	微小	大	不偏轉
磁場中的偏轉	微小	大	不偏轉
穿透能力 (penetrating power)	弱	中	強
阻隔物料	紙張	薄鋁片	厚鉛板

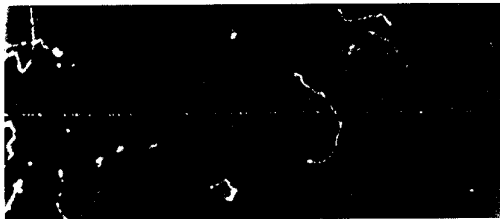
iii) 雲室徑跡 (cloud chamber tracks)



(a) α 粒子的徑跡



(c) γ 射線的徑跡



(b) β 粒子的徑跡

三種放射線的雲室徑跡

a) α 輻射的雲室徑跡：產生筆直，清楚而短粗的徑跡

→ 原因：強致電離能力

b) β 輻射的雲室徑跡：產生較細的曲折(*twisted*)徑

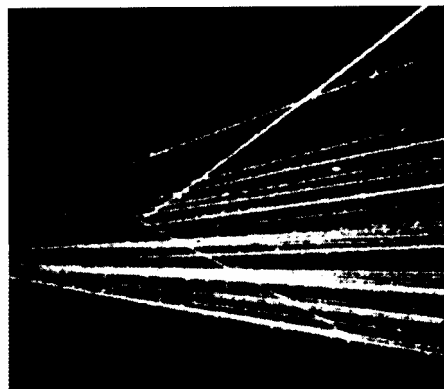
→ 原因：弱致電離能力

c) γ 輻射的雲室徑跡：產生更曲折及斷續的徑跡(或徑跡並不明顯)

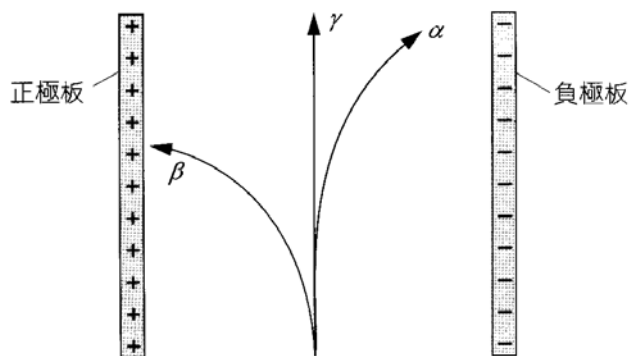
→ 原因：非常弱致電離能力

iv) 直角分叉徑跡 (right-angled fork track)

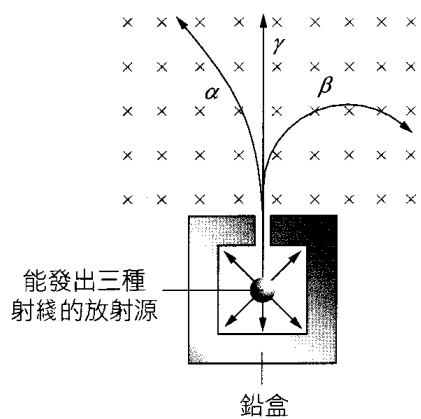
→ α 粒子在充有氦氣的雲室中成直角的徑跡表明， α 粒子和氦核具有相同質量。這意味著 α 粒子就是氦核。



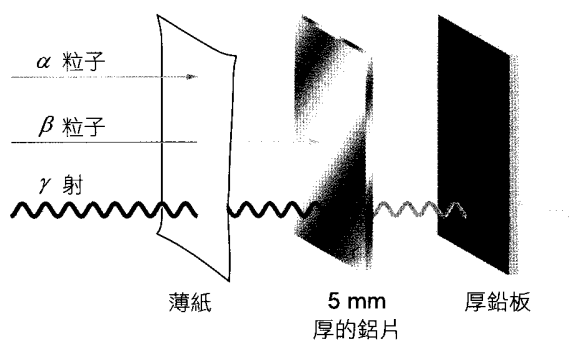
v) 在電場中的偏轉 (electric deflection)



vi) 在磁場中的偏轉 (magnetic deflection)



vii) 貫穿能力 (penetration power)

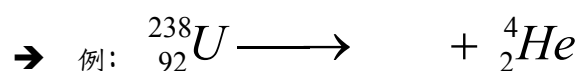
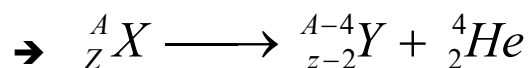


- (α 粒子的穿透能力最弱。
- (這是由於 α 粒子的致電離能力最大，在空氣中前進時會不斷電離空氣分子，其動能不斷減少，故一張薄紙已可把它阻擋。
- (β 粒子的穿透能力較 α 粒子強。要完全阻擋盧粒子，需用一塊 5 mm 厚的鋁片。
- (鉛板不能用作阻隔 β 粒子。因為 β 粒子射到鉛板後，鉛板會放出另一種射線—X 射線。
- (γ 射線的穿透能力是三種射線中最強的。用一塊厚 2 cm 的鉛板，才可以把 γ 射線的強度減弱一半；而一塊厚 8 cm 的鉛板，才可以把 γ 射線的強度減弱 90%。

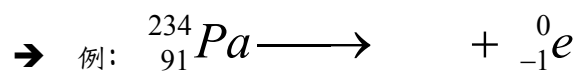
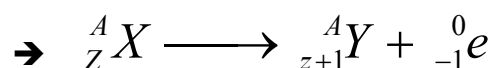
4. 放射衰變 (radioactive decay)

i) 核蛻變 (nuclear disintegration)

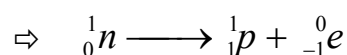
a) α 衰變 (alpha decay)



b) β 衰變 (beta decay)



→ β 衰變中，原子核內的其中一個中子，會變成一個質子和一個電子，電子隨即放射出去，而質子則留在原子核內。

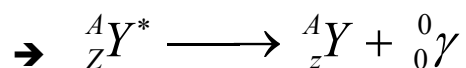


⇒ 子核(daughter nucleus)會比母核(parent nucleus)多了一個質子，而少了一個中子。

c) γ 衰變 (gamma decay)

→ 發射出一個 α 粒子或 β 粒子後，子核通常處於一個受激狀態 (excited state)，即子核有過剩能量(下方公式有*表示)。

⇒ 它將會發射 γ 射線而失去它所過剩能量。



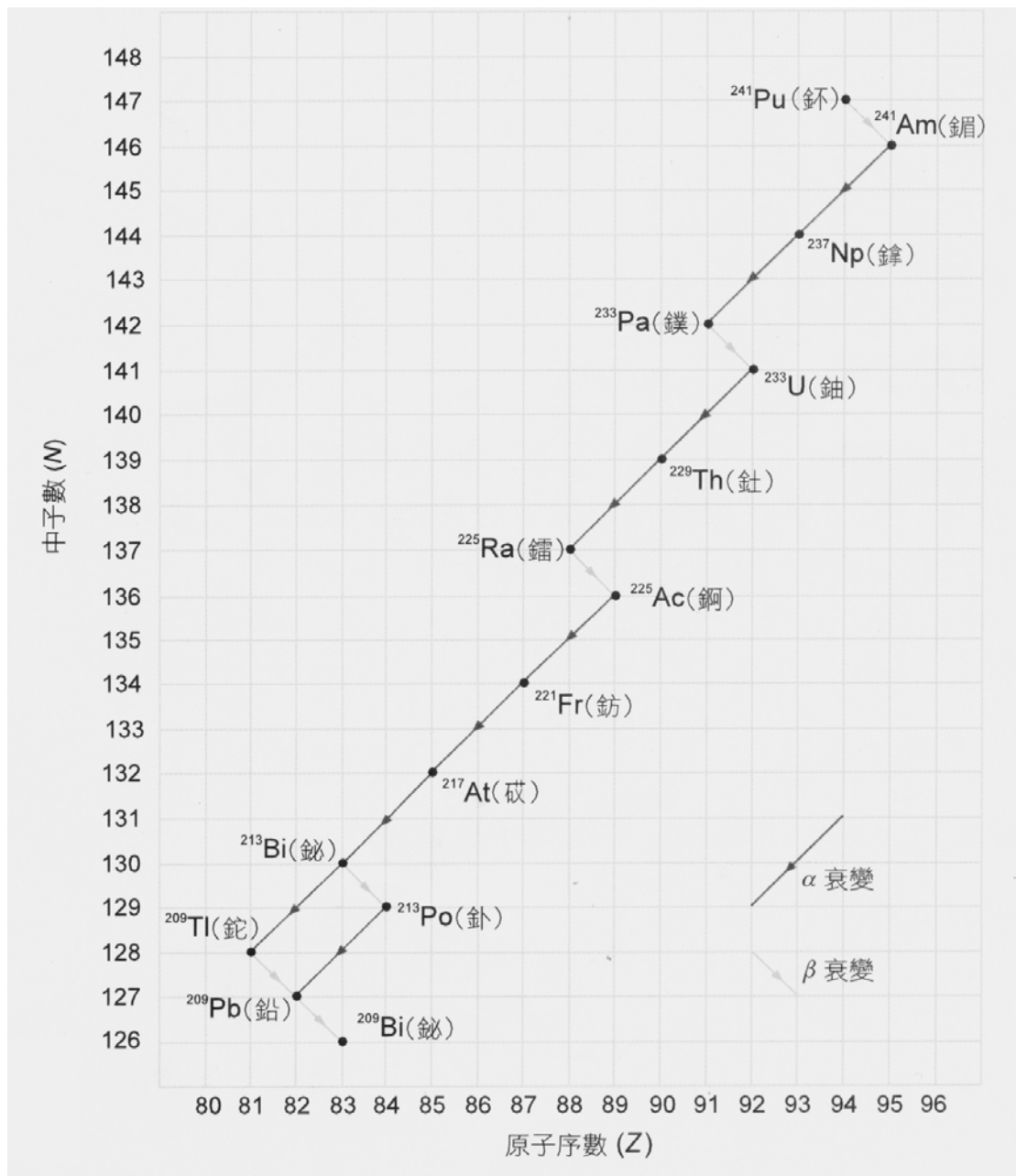
→ 在 γ 衰變中，質量數目和原子數都不會改變，衰變的產物將是與母核相同的元素。相反，在 α 和 β 衰變中，母核和子核不再屬於同一元素。

ii) 衰變系 (decay series)

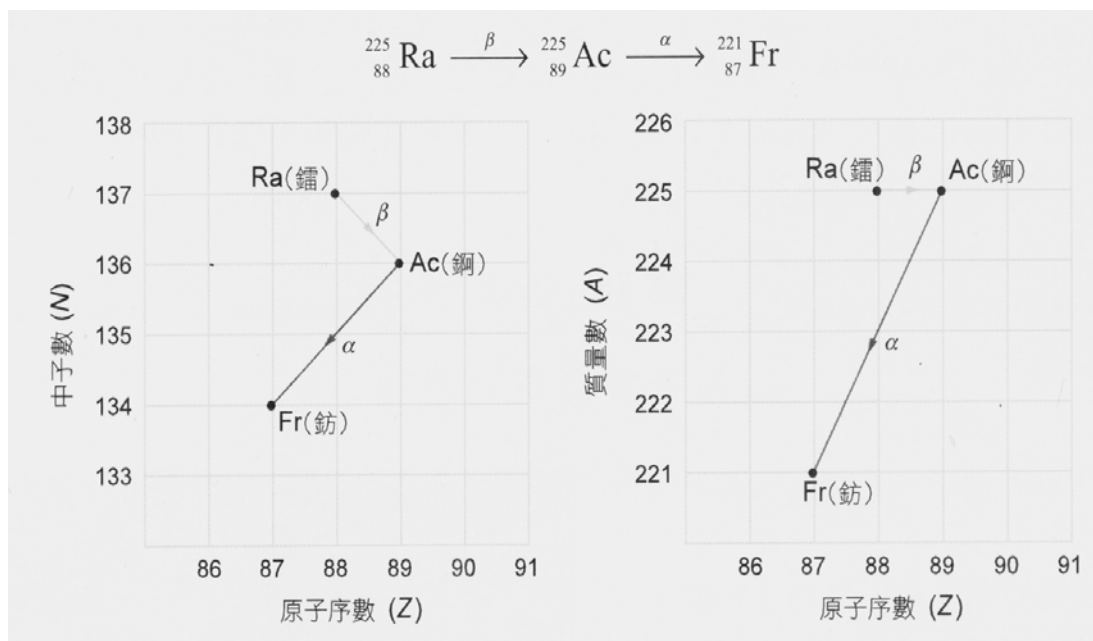
→ 衰變後產生的子核若不穩定，會繼續衰變，直至穩定為止。

⇒ 這一連串的衰變，稱為衰變系。

→ 下頁圖中，鉀 241 發生 β 衰變後產生一個不穩定的子核鎢 241，它接著會作 α 衰變而產生鐳 237。如是者，不穩定的原子核會繼續衰變，直至變成穩定的鈾 209 為止。



→ 衰變系可用中子數與原子序數的圖線(即 N-Z 圖線), 或質量數與原子序數的圖線(即 A-Z 圖線)表示。



5. 本底輻射 (background radiation)

i) 簡介

→ 即使附近沒有放射源，GM 計數器仍記錄到一個低讀數。這就是本底輻射。

ii) 本底輻射的形成原因

- a) 外太空的宇宙線(cosmic radiation from space)
- b) 石和壤中的天然放射性物質(radioactive substances in the earth)
- c) 核試的污染(radioactive pollutions from weapon testings)
- d) 工業上的輻射泄漏(industrial leakages)

iii) 計算

→ 在進行量度輻射之前，我們必需先量度出本底輻射才可以獲得正確的計數率。

→ 例如：使用 GM 管測出

本底輻射的讀數 = 58 次/分鐘

放射源 X 的輻射讀數 = 210 次/分鐘

放射源 X 的正確的輻射讀數 = $(210 - 58) = 152$ 次/分鐘

6. 衰變的無規性 (random nature)

i) 單位

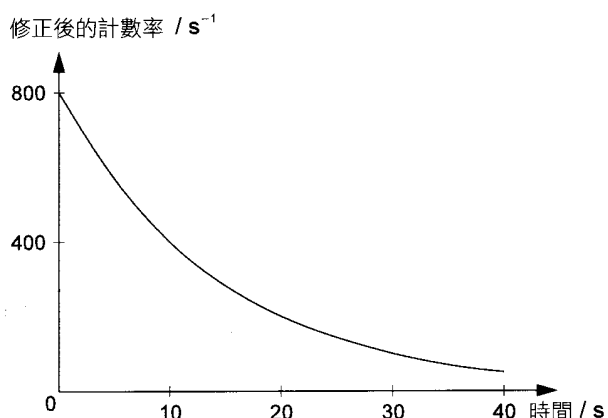
- 放射性物質每秒鐘放射的次數，稱為放射強度。
- 放射強度的單位為貝克勒耳(Bq)，1 Bq 表示放射性物質每秒鐘放射一次，即 $1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1}$ 。

ii) 衰變的無規性

- 我們雖然無法確定哪個原子核會何時發生衰變，但若放射性物質中的原子核數目很多，則可以預測在某段時間之後，將會有特定數目的原子核發生衰變。換言之，我們只能推測數目龐大的原子核的統計性行為。
 - ⇒ 由於放射衰變的無規性(randomness)，每次我們以蓋革-彌勒計數器量度放射性物質的放射強度時，所錄得的讀數都會有差異。
- 放射性元素衰變的速率很穩定，跟原子所處的物理狀態或化學狀態無關，故不會受溫度、壓強或濕度等外界因素所影響。

iii) 衰變曲線 (decay curve)

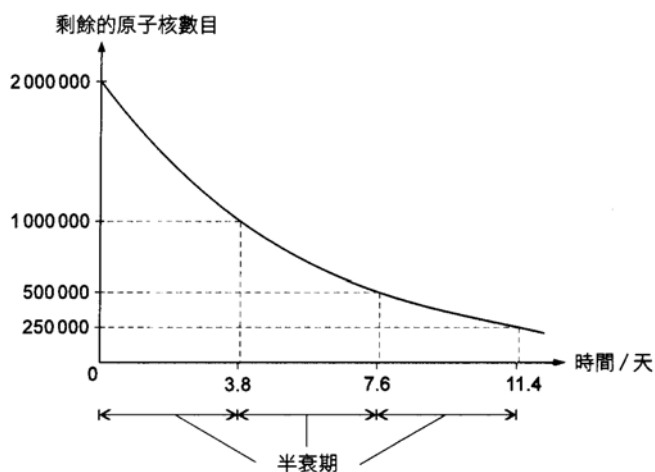
- 若以修正後的計數率(扣除本底輻射的計數率)為縱坐標，時間為橫坐標，所畫出的圖線，稱為衰變曲線。



iv) 半衰期 (half-life)

- 放射元素的半衰期，是這元素的一半原子核，發生衰變所需的時間。
- 半衰期也是放射元素的放射強度減半所需的時間。半衰期愈短的元素，其衰變速率愈快。
- 下圖中，以氡 222 為例，其半衰期為 3.8 天，即每過 3.8 天，就會有一半的氡原子核發生衰變。

⇒ 若開始時共有 2000000 個氡原子核，經過 3.8 天後，會有 1000000 個衰變了，剩下 1000000 個。再經過 3.8 天，會剩下 500000 個。



氡 222 的衰變曲線

7. 輻射的用途

i) 放射性示蹤物 (radioactive tracer)

- ➔ 將微量的弱放射性同位素置於一系統之中，用檢測器可探測出它在系統中的蹤跡。這樣，放射性同位素就成了指示蹤跡的示蹤物。
- ➔ 一般來說，示蹤物的半衰期較短，輻射的後遺症較弱。
- ➔ 常見的示蹤物

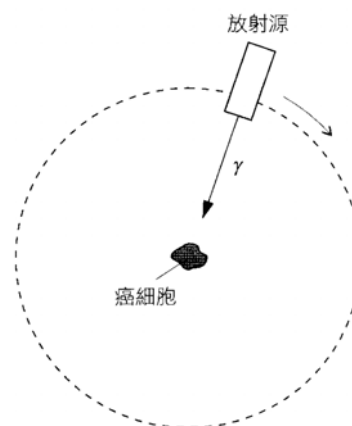
a) 示蹤物在醫療上的應用很廣。

- ⇒ 如探測血塊的位置。將鈉 ^{25}Na 注入人循環系統中，用蓋革-彌勒計數器 (GM 計數器) 探測放射性同位素在甚麼地方受阻，這就是血塊所在的位置。
- ⇒ 向體內注注入放射性碘 ^{131}I ，根據其吸收情況，可診斷狀腺疾病。
- ⇒ 用銻 ^{99}Tc 獲得腦部掃描用診斷腦部疾病。

b) 在農業上，在肥料中摻入少量的磷 ^{30}P ，可用於研究植物的吸收情況，進一步確定農作物所需要的肥料數量。

ii) 放射治療 (radiotherapy)

- 鈷 60($Co-60$)釋出的 γ 射線可殺死癌或惡性腫瘤的細胞。 γ 射線源以腫瘤部位為中心作圓周運動。這樣 γ 射線集中在腫瘤部位，能夠殺死癌細胞，而周圍健康的細胞接受的輻射微乎其微，因而不會受到損害。



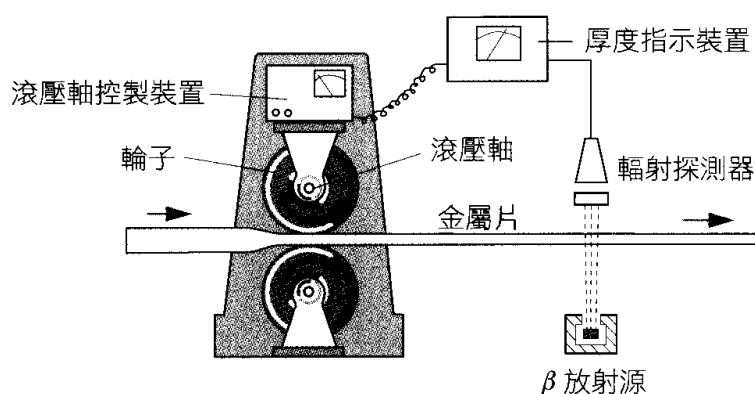
γ 射綫從不同角度射到體內的癌細胞

iii) 消毒殺菌 (sterilization)

- γ 射綫可用於食物殺菌，或醫院儀器的消毒。由於 γ 射綫的能量高，穿透能力強，因此可以穿過食物或儀器的包裝進行消毒。這種先包裝後消毒的方法，可避免包裝過程中對食物或儀器的污染。利用放射綫殺菌的方法，對於一些會因加熱消毒而被熱力破壞的物料特別有效。

iv) 厚度監控 (thickness control)

- β 輻射可用於量製成品的厚度是否標準。我們祇需測量通製成品後到達 GM 計數器的蘆輻射的強度可監測紙張的厚度。

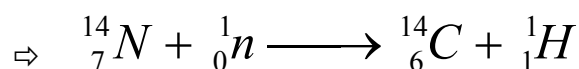


v) 洩漏監控 (leakage detector)

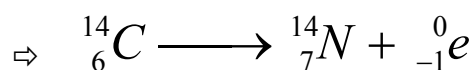
- 往輸油或輸氣管道注中入放射性同位素，人們就容易判斷出管道上洩漏點的位置，而不必把管道全都挖出來檢查。
- 用於這種探測的放射性同位素是 β 放射源，它的半衰期應該在若干小時至幾天之間，這樣的放射源一方面給我們足夠的探測時間，另一方面又不致存留太久而成安全問題。

vi) 年代鑑定 (carbon dating)

- 空氣中的二氧化碳包括兩種同位素：穩定的碳 12 和含放射性的碳 14。
- 碳 14 雖然會不斷衰變，但每當宇宙射線裏的中子撞擊氮原子核時，會產生碳 14，故空氣中碳 14 和碳 12 的比例會保持穩定。



- 活植物既吸收也放出二氧化碳，植物的組織中有含有的碳-14 的比例是不變的。
- 在植物死去之後，其所含的碳 14 開始放出 β 射線並發生衰變，半期為 5600 年。



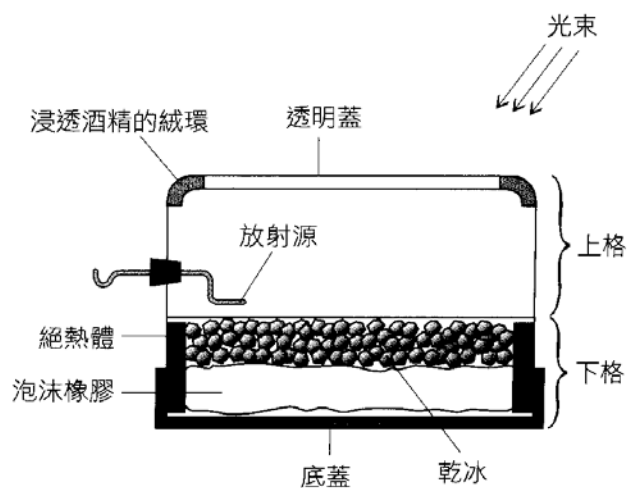
- 測定已死的植物碳 14 放射強，可以確定植物生長的年代。這種方法為碳 14 年代測定法。考古學家是用這種方法測定古代遺物的年代的。

8. 探測放射現象的方法 (methods of detection)

i) 感光底片 (photographic film)

- 輻射物質可使密封(sealed)的照相底片曝光而變黑。
- 曝露(exposure)於輻射愈久，底片變黑的程度愈高。
- 此方法可用來探測 α 、 β 及 γ 輻射。

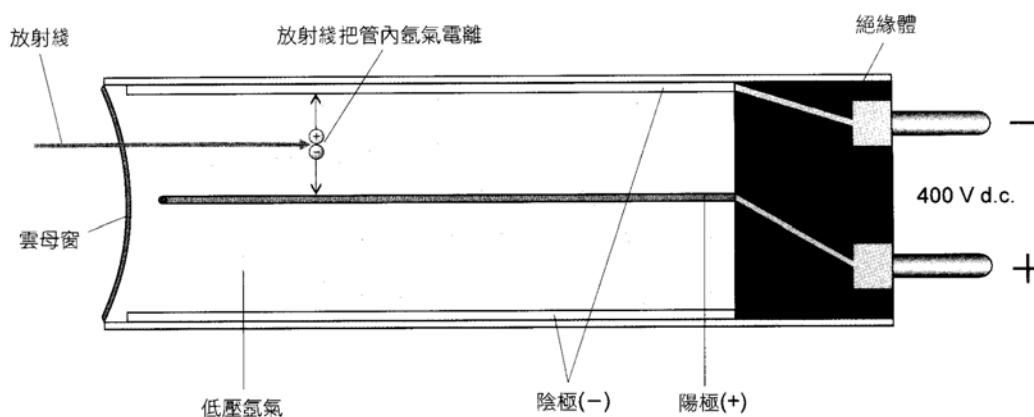
ii) 擴散雲室 (Diffusion Cloud Chamber)



擴散雲室的橫截面

- 在雲室中可看到輻射的徑跡(tracks)。
- 可用來探測 α 、 β 及 γ 輻射。

iii) 蓋革-彌勒計數器 (Geiger-Muller Counter, GM Counter)



- ➔ 蓋革-彌勒計數器(簡稱蓋革計數器或 GM 計數器)，是一種靈敏的輻射探測器，由蓋革-彌勒管(簡稱蓋革管或 GM 管)連接脈衝計數器(**scaler**)或定率計(**ratemeter**)組成。
- ➔ 脈衝計數器及定率計可顯示每秒脈衝計數，即計數率(**counter rate**)。
 - ⇒ 可用來比較各種輻射樣本的相片輻射強度。
- ➔ 它可用來探測 β 和 γ 輻射及高能量的 α 輻射。

9. 輻射的有害影響 (harmful effects)

- i) 過度暴露(over-exposure)於輻射中
 - a) 會殺死生物細胞。
 - b) 增加了使正常生物細胞轉化為癌細胞(cancer cells)的可能性。
 - c) 影響細胞核中的遺傳密碼(genetic codes)，此遺傳應會在受輻射者的下一代身上表現出來。
 - d) 皮膚灼傷，眼睛白內障(eye cataracts)及壞血病。

- ii) 比較三種輻射的潛在危險
 - a) α 粒子在空氣中的射程短且穿透能力弱。它是危害性最小的輻射，除非它被吞下。
 - b) γ 射線具有非常強的穿透能力，它是最危險的輻射。

10. 安全措施 (safety precautions)

i) 輻射劑量和有效劑量

→ 要估計某一劑量的輻射對人體的危害，可計算它的有效劑量或等效劑量 (H)。

⇒ 有效劑量 = 吸收劑量 × 輻射加權因數 × 組織加權因數

⇒ 單位: 希沃特 (Sv) 或 毫希沃特 (mSv)

→ 吸收劑量 (D) 是指人體每單位質量所吸收的輻射能量。

⇒ 若不同的輻射向人體釋放的能量相同，它們的輻射劑量便會一樣。

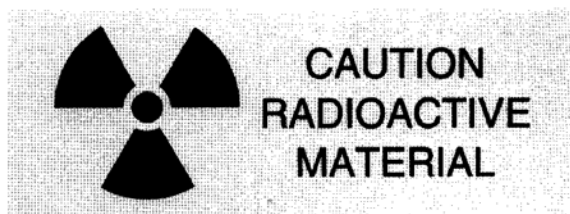
⇒ 單位： J kg^{-1} 或 Gy

→ 輻射加權因數是指不同輻射 (α 、 β 或 γ 輻射) 對人體的傷害程度。

→ 組織加權因數是指不同的人體組織對同一種輻射的敏感度。

ii) 輻射防護

- 放射源應儲存在鉛容器內。
- 放射源在貯存地與實驗室之遷移時，放射源應放在容器內。
- 應該用夾子(tongs)或鑷子(forceps)取起放射源。
- 放射源應保持離使用者 30 cm 以上，並遠離人體。
- 放射源在空氣中暴露的時間(exposure time)應盡可能短。
- 在儲存放射源時的地方，應貼下面的標誌。



放射性的警告標誌