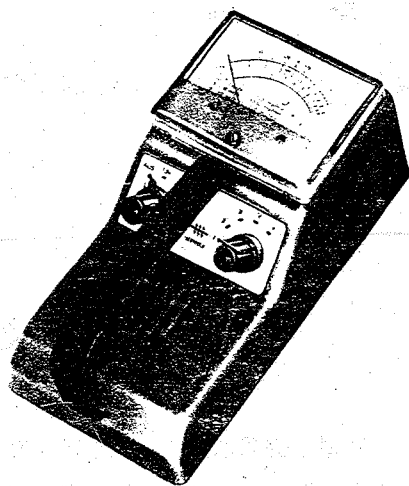


γ 輻射劑量度量及輻射防護偵測器刻度的校正

國立臺灣師範大學物理系 黃福坤 陳慶日

二月底台北市各機關學校、工廠、防護團的輻射線偵檢儀器實施校正，由於本系現有設備可自行校正，於是便在系主任張秋男教授的指導下，由筆者進行校正。茲將校正手提式輻射線保護偵測器的方法，涉及的計算及相關的常用名詞作一介紹，以便讀者對輻射線的偵測及防護有一初步的認識。

本系現有一具西德製RATO/F型直讀式的手提式輻射線防護偵測器(如圖一)，很輕巧，重量才800克，只要拿到輻射區域內，便可將該處的輻射線照射劑量率直接由儀表上顯示出來(單位為倫琴/小時)。倫琴是放射線的照射劑量單位，1倫琴的定義為在0.001293克的乾燥空氣中，能夠游離空氣而產生一靜電單位(e.s.u.)的X光線或 γ 射線的輻射線。0.001293克的空氣恰是空氣在標準狀況下(0°C，一大氣壓)1立方厘米的質量。亦即每克空氣在1倫琴劑量照射下能游離 2.08×10^9 對正負空氣離子，產生每對正負的空氣離子，平均需要吸收32.4電子伏特的能量。故每克空氣在1倫琴劑量照射下吸收的能量為88厄格，另一單位為雷得(rad)，雷得是輻射的吸收劑量單位，1雷得定義為每克物質吸收100厄格能量的劑量，故對空氣而言，1倫琴的照射劑量相當於0.88雷得的吸收劑量，然倫琴或雷得的劑量測量，均只考慮到物理上的效應，因此考慮到吸收體因輻射照射而產生生物上的效應時，輻射劑量單位便得重新定義，此單位我們即以侖目(rem)表之，即吸收劑量(雷得)與生物因數(RBE)的乘積，而生物因數則因輻射線不同、吸收體的不同及吸收體部位的不同而異，一般而言，人體對輻射的吸收劑量等值的範圍為2.5毫侖目/小時，即安全劑量為2.5毫侖目/小時。我們由儀表所顯示的輻射劑量率，便可估計該區域的輻射線將會對人體所產生的危害程度，而使我們採取相對應的防護措施，對於常在輻射區域附近工作的人員而言，手提式輻射線保護偵測器是一簡易而又重要的防護設備。



圖一

我們所使用的校正方法是取已知活性大小的標準放射源，置於手提式輻射線保護偵測器前，由刻

度上直接讀出其照射劑量率的大小，然後將這個結果和用計算出來的值互相比較，看看是否吻合，便可以知道偵測器上的刻度是否真正標示輻射劑量的大小，這就是校正。放射（性）強度是指放射源的輻射強度，即一個放射性物質，每秒鐘產生 3.7×10^{10} 個衰變，我們就稱這個放射源的活性為 1 居里。所以放射源的活性大小所顯示的即是放射源的衰變率，也就是衰變的快慢。我們都知道一個放射性物質的半衰期是指它衰變成原來一半時，所需要的時間，所以如果我們知道一個放射源的質量及它的半衰期，我們便可計算出它的活性大小。

因為對一個放射性物質內的每一個原子核而言，發生衰變的機率皆相等，我們稱之為衰變常數 λ ，所以對 N 個原子核而言，在 t 到 $t + dt$ 時間內發生衰變的原子核數為

$$-dN = \lambda N dt \quad \left(\lambda = -\frac{1}{N} \frac{dN}{dt} \right)$$

於是我們得到

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \dots\dots\dots (1)$$

若半衰期以 $t_{1/2}$ 表之，則

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

$$\therefore t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda}$$

例如鐳 Ra^{226} 的半衰期為 1620 年，則其衰變常數

$$\lambda = \frac{\ln 2}{1620 \times 365 \times 24 \times 3600} = 1.36 \times 10^{-11}$$

對 1 克的鐳而言，每秒鐘發生衰變的原子核數

$$-dN = \frac{1}{226} \times 6.02 \times 10^{23} \times 1.36 \times 10^{-11} = 3.65 \times 10^{10} \text{ 個}$$

所以 1 克鐳的放射（性）強度（即活性大小）就很接近 1 居里（ C_i ）。事實上居里的原始定義便是 1 克鐳的放射（性）強度。以後為了應用上的方便，才定為每秒鐘產生 3.7×10^{10} 個衰變的放射源活性為 1 居里。

我們分別使用四種標準的 γ 射線放射源作為校正的依據，其名稱、 γ 射線的能量、所佔衰變比值均列於表一中。它們的活性大小是在 1977 年 4 月 1 日測定的，由於它們一直不斷的在發生衰變，所以目前的活性大小已經發生改變，我們必須加以修正。因為活性大小

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N$$

利用式(1)，則

$$-\frac{dN}{dt} = -\lambda N_0 e^{-\lambda t} = -\left(\frac{dN}{dt}\right)_0 e^{-\lambda t}$$

故

表一

放射源核種	1977年4月1日 活 性 (μCi)	半 衰 期 (年)	1982年3月1日 活 性 (μCi)	主要 γ 射線能量 (MeV)	每100次衰變中 所產生 γ 射線數
鈉 ^{22}Na	11.43	2.60	3.08	0.5110 1.2745	181.08 99.95
鈷 ^{60}Co	11.61	5.27	6.08	1.1732 1.3325	99.88 100
銫 ^{137}Cs	10.44	30.1	9.32	0.6616	84.6
銪 ^{133}Ba	11.52	10.8	8.40	0.0810 0.1600 0.2230 0.2760 0.3030 0.3560 0.3840	33.8 0.7 0.5 7.1 18.7 61.9 8.9

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \dots\dots\dots (2)$$

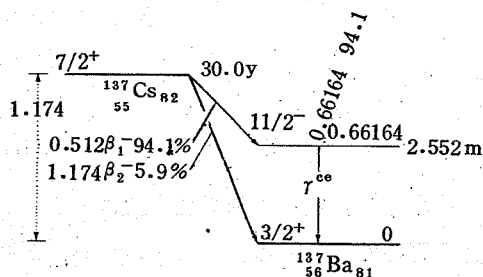
修正前後的各放射源活性大小亦列在表一中。

放射性核種衰變時，並不見得只有一種形式的衰變，例如圖二所示，銫 ^{137}Cs 發生衰變時，有兩種不同的 β 衰變方式，其一為 0.512 MeV ，另一為 1.174 MeV ，而在每 100 次的衰變中，有 94.1 次的機會屬前者，只 5.9 次的機會屬後者。 ^{137}Cs β 衰變後的產物為銪 ^{137}Ba 。從上述及圖二中，知有 94.1% 的機會是形成 ^{137}Ba 的第一激發態，此激發態回到基態時，可放出 γ 射線，其能量為

$$1.174 - 0.512 = 0.662 (\text{MeV})$$

亦可將能量傳遞給原子軌道上的電子而使它射出，後面這種現象稱為內轉變 (Internal Conversion)。所以每 100 次的銫 ^{137}Cs 衰變時，放出 0.662 MeV 的 γ 射線的機會便變為 84.6 次了。當然，另 9.5 次的機會是產生了內轉變。表一中最後一行所列的數值即屬這樣的導引而來。

這個數值對 ^{22}Na 而言，却超過 100，這個原因可略述如下：因為 ^{22}Na 本身產生 β^+ 衰變，即放射出和電子相同質量而帶正電荷的正子，它有一個很奇特的現象，便是可以與電子產生消失作用，而放出兩方向相反而具相同能量的 γ 射線稱為成對互毀效應 (pair annihilation)，正子和電子質量皆為 $9.31 \times 10^{-31}\text{ kg}$ ，由愛因斯坦質能互換公式： $E = mc^2$ 可得到 γ 射線的能量為 0.511 MeV (1



圖二

$\text{eV} = 1.6 \times 10^{-19}$ 焦耳)

又 ^{22}Na 在作 β^+ 衰變後，形成 ^{22}Ne 的激發態，當它回到基態時，會產生 1.27454 MeV 能量的 γ 射線，它的能量大於電子與正子質量能的總和 (1.022 MeV)，會發生成對產生 (pair production) 效應，即產生的正子 - 電子對。其中的正子會再發生成對互毀效應而放出 0.511 MeV 的能量，所以 ^{22}Na 每 100 次衰變，便會有 181.08 個具 0.511 MeV 能量的 γ 光子產生。

當然，輻射線不只 X 射線及 γ 射線而已，例如以上的 ^{137}Cs 及 ^{22}Na 放射源，均有電子或正子的輻射，但是因為比較起來，X 射線及 γ 射線的穿透力較強，故我們只以 X 及 γ 射線為校正的依據。

當 X 及 γ 射線與物質起作用時，會使得構成物質的中性原子成為游離態，這是輻射線所以造成對人體傷害的主要原因。

為說明方便起見，我們仍以 X 及 γ 射線使空氣游離的現象來討論，其實已如前述命目與雷得之間只差一個生物效應因數，而對 X 及 γ 射線而言，這個因數為 1，故以下雖以倫琴為單位所得結果，即可換算成命目來表達。

我們現在開始來計算手提式輻射線防護偵測器因放射源的照射將會有的照射劑量率 (倫琴/小時)。因為 1 倫琴 (R) 等於將 0.001293 克乾燥空氣游離產生 1 單位電荷 (不論正、負電荷) 的輻射量。而在空氣中產生一離子對須要 32.4 eV 的能量，所以我們如果知道偵測器內的空氣在單位時間內所吸收 γ 射線能量的大小，我們便得到了照射劑量率。我們首先要知道有多少不同能量的 γ 射線進入偵測器內，另外還必須知道進去的每個 γ 射線的吸收率，因此我們必須要知道空氣對不同能量的 γ 射線吸收能量的效應截面積的大小，從而可求出空氣的質量吸收係數 (Mass absorption coefficient) 來。表二所列即空氣對 0.081 MeV 到 1.33 MeV X 或 γ 射線的質量吸收係數 (註)。

有了質量吸收係數，現在以 ^{137}Cs 為例求出放在離偵測器 20 公分處的劑量率： ^{137}Cs 的活性大小為 9.32 微居里 (見表一)，則每秒衰變個數為 3.45×10^5 個，又因每 100 次衰變才有 84.6 次會放射 0.662 MeV 的 γ 射線，則 γ 射線數為 $3.45 \times 10^5 \times 86\% = 2.92 \times 10^5$ 個/秒，又我們將偵測器置於放射源前 20 公分處，偵測器有效偵測面積為 63.5 平方毫米，因為我們所用點放射源假設 γ 射線射出時是各向同性的，則依平方反比率則進入偵測器內的 γ 射線數應為

$$2.92 \times 10^5 \times \frac{63.5 \times 10^{-2}}{4 \times \pi \times (20)^2} = 36.9 \text{ 個/秒}$$

偵測器內為 2—3 毫克/平方毫米的鹵素氣體，其內部的設計能顯示出實際的照射劑量率，故其吸收能量應相當於游離 0.001293 克乾燥空氣的能量，又空氣對 0.662 MeV γ 射線的能量吸收係數為 0.0293 平

表二

X 或 γ 射線能量 (MeV)	對空氣的質量吸收係數 (cm^2/gm)
0.081	0.0222
0.160	0.0242
0.223	0.0271
0.276	0.0281
0.303	0.0287
0.365	0.0291
0.384	0.0293
0.511	0.0298
0.662	0.0293
1.173	0.0263
1.274	0.0265
1.332	0.0258

方厘米/克，故偵測器內所吸收之能量為

$$36.9 \times 0.662 \times 10^6 \times 0.0293 \times 0.001293 = 925 \text{ eV/sec}$$

而在空氣中想產生一離子對須要 32.4 eV 的能量，所以入射的 γ 射線每秒可游離的離子對數目為 28.5 對，而一離子所帶電荷為 $4.8 \times 10^{-10} \text{ e.s.u.}$ ，所以照射劑量率為

$$28.5 \times 4.8 \times 10^{-10} = 1.37 \times 10^{-8} \text{ 倫琴/秒}$$

$$= 4.93 \times 10^{-5} \text{ 倫琴/秒}$$

$$= 0.0493 \text{ 毫倫琴/小時}$$

我們現有的手提式輻射線防護偵測器最小刻度為 0.01 毫倫目/小時，當 9.32 微居里的 ^{137}Cs 置於偵測器前 20 公分處，儀表指針大半時間皆在 0.05 毫倫琴/小時的位置，顯示本實驗室的手提式輻射偵測器的刻度仍然準確。利用其它三種放射性源測試所得結果亦相同，因計算方式與上述 ^{137}Cs 的方法相同，不加贅述。茲將所得結果列於表三。由表三的結果，知道我們防護偵測器的刻劃仍然正確，否則我們可利用計算值相應於偵測器指針的位置，重新加以刻劃。

表三

放 射 性 源	照 射 劑 量 率 (毫倫琴/小時)	
	真實值 (由計算得)	儀表指示值 (由偵測得)
鈉 ^{22}Na	0.244	0.22
鈷 ^{60}Co	0.128	0.13
銫 ^{137}Cs	0.0493	0.05
鋇 ^{133}Ba	0.112	0.11

【註】：由 Nuclear Data Table (Section A, Vol. 7, No. 6, June 1970) 中資料，我們知道氮 (N) 游離效應總截面積對 0.662 MeV 的 γ 射線而言為 0.686 靶 (barn)，對 0.8 MeV 的 γ 射線而言為 0.667 靶。於是我們求出對 ^{137}Cs 0.662 MeV 而言的截面積為

$$0.686 + \frac{0.662 - 0.6}{0.8 - 0.6} \times (0.667 - 0.686) = 0.680 \text{ barn}$$

又產生游離效應的機率：

$$-\frac{dN}{N} = n \sigma dx$$

$$= \frac{n \sigma}{\rho} \times \rho dx$$

$$= \left(\frac{N_A}{m_A} \times \sigma \right) (\rho dx)$$

$$= \mu_m (\rho dx)$$

式中

N_A : 亞佛加厥常數

m_A : 元素之原子量

n : 單位體積該元素之原子數目

ρ : 該元素之密度

μ_m : 質量吸收係數

所以氮對 ^{137}Cs 0.662 MeV 的質量吸收係數為

$$\mu_m = \frac{6.02 \times 10^{23}}{14} \times 0.680 \times 10^{-24} = 0.043 \times 0.680 = 0.0292 \text{ cm}^2/\text{g}$$

(1 barn = 10^{-24} cm^2)

所以要將截面積以 barn 為單位改為質量吸收係數以 cm^2/g 為單位，對氮而言只要乘以 0.0430 即可，對氧而言則乘以 0.3764，因為我們入射的 γ 射線是用來游離偵測器內的空氣，所以

$$\mu_m(\text{空氣}) = 80\% \times \mu(\text{氮}) + 20\% \times \mu(\text{氧})$$

對 ^{137}Cs 0.662 MeV 的 γ 射線而言

$$\mu_m(\text{空氣}) = 80\% \times 0.0292 + 20\% \times 0.0295 = 0.0293 \text{ cm}^2/\text{gm}$$

□

預告：

下列各稿即將自 51 期陸續刊出，敬告讀者：

1. 物體在楔形方塊上滑行所引起的相對運動
 2. 方程式論發展史簡介(三)
 3. “幫蜜蜂一個忙”一個數學趣味問題探討
 4. 簡易數學教具——幾何篇
 5. 高級中學數學課程實驗教材試教心得
 6. 日本高等學校「理科 I」實施面面觀
 7. 卡諾——其人其事
 8. 從 $2(\sqrt{n+1}-\sqrt{n}) < \frac{1}{\sqrt{n}} < 2(\sqrt{n}-\sqrt{n-1})$ 到 $(1+\frac{k}{k+1}\alpha)^{k+1} > (1+\alpha)^k$
 9. 「數學恐懼症」的治療與預防——談如何減低學生的數學焦慮——
-