

放射線的防護

譯者：黃明彰

校閱者：翁寶山

徐氏基金會出版

科學圖書大庫

放射線的防護

譯者：黃明彰

校閱者：翁寶山

徐氏基金會出版

我們的工作目標

文明的進步，因素很多，而科學居其首。科學知識與技術的傳播，是提高工業生產、改善生活環境的主動力，在整個社會長期發展上，乃人類對未來世代的投資。從事科學研究與科學教育者，各就專長，竭智盡力，發揮偉大功能，共使科學飛躍進展，同把人類的生活，帶進更幸福、更完善之境界。

近三十年來，科學急遽發展之成就，已超越既往之累積，昔之認為絕難若幻想者，今多已成為事實。人類一再親履月球，是各種科學綜合建樹與科學家精誠合作的貢獻，誠令人有無限興奮！時代日新又新，如何推動科學教育，有效造就科學人才，促進科學研究與發展，允為社會、國家的基本任務。培養人才，起自中學階段，學生對普通科學，如物理、數學、生物、化學，漸作接觸，及至大專院校，便開始專科教育，均仰賴師資與圖書的啓發指導，不斷進行訓練。從事科學研究與科學教育的學者，志在貢獻研究成果與啓導後學。旨趣崇高，至足欽佩！

科學圖書是學人們研究、實驗、教學的精華，明確提供科學知識與技術經驗，本具互相啓發作用，富有國際合作性質，歷經長久的交互影響與演變，遂產生可喜的收穫。我國民中學一年級，便以英語作主科之一，然欲其直接閱讀外文圖書，而能深切瞭解，並非數年所可苛求者。因此，本部編譯出版科學圖書，引進世界科技新知，加速國家建設，實深具積極意義。

本基金會由徐銘信氏捐資創辦，旨在協助國家發展科學知識與技術，促進民生樂利。民國四十五年四月成立於美國紐約。初由旅美學人胡適博士、程其保博士等，甄選國內大學理工科優秀畢業生出國深造，前後達四十人，返國服務者十不得一。另贈國內大學儀器設備，輔助教學頗收成效；然審度衡量，仍嫌未能普及，乃再邀承國內外權威學者，設置科學圖書編譯委員會，主持「科學圖書大庫」編譯事宜。主任委員徐銘信氏為監修人，編譯委員林碧鐸氏為編輯人，各編譯委員擔任分組審查及校閱。「科學圖書大庫」首期擬定二千冊，凡四億言，叢書百種，門分類別，細大不捐；分為叢書，合則大庫。從事翻譯之學者五百位，於英、德、法、日文中精選最新基本或實

用科技名著，譯成中文，編譯校訂，不憚三復。嚴求深入淺出，務期文圖並茂，供給各級學校在校學生及社會大眾閱讀，有教無類，效果宏大。賢明學人同鑑及此，毅然自公私兩忙中，撥冗贊助，譯校圖書，心誠言善，悉付履行，感人至深。其旅居國外者，亦有感於為國人譯著，助益青年求知，遠勝於短期返國講學，遂不計稿酬菲薄，費時又多，迢迢乎千萬里，書稿郵航交遞，報國熱忱，思源固本，僑居特切，至足欽慰！

今科學圖書大庫已出版七百餘冊，都一億八千餘萬言；排印中者，二百餘冊，四千餘萬字。依循編譯、校訂、印刷、發行一貫作業方式進行。就全部複雜過程，精密分析，設計進階，各有工時標準。排版印製之衛星工廠十餘家，直接督導，逐月考評。以專業負責，切求進步。校對人員既重素質，審慎從事，復經譯者最後反覆精校，力求正確無訛。封面設計，納入規範，裝訂注意技術改善。藉技術與分工合作，建立高效率系統，縮短印製期限。節節緊扣，擴大譯校複核機會，不斷改進，日新又新。在翻譯中，亦三百餘冊，七千餘萬字。譯校方式分為：(1)個別者：譯者具有豐富專門知識，外文能力強，國文造詣深厚，所譯圖書，以較具專門性而可從容出書者屬之。(2)集體分工者：再分為譯、校二階次，或譯、編、校三階次，譯者各具該科豐富專門之知識，編者除有外文及專門知識外，尚需編輯學驗與我國文字高度修養，校訂者當為該學門權威學者，因人、時、地諸因素而定。所譯圖書，較大部頭、叢書、或較有時間性者，人事譯務，適切配合，各得其宜。除重質量外，並爭取速度，凡美、德科學名著初版發行半年內，本會譯印之中文本，廣即出書，欲實現此目標，端賴譯校者之大力贊助也。

謹特掬誠呼籲：

自由中國大專院校教授，研究機構專家、學者，與從事科學建設之工程師；

旅居海外從事教育與研究學人、留學生；

大專院校及研究機構退休教授、專家、學者。

主動地精選最新、最佳外文學名著，或個別參與譯校，或聯袂而來譯校叢書，或就多年研究成果，撰著成書，公之於世。本基金會樂於運用基金，並藉優良出版系統，善任傳播科學種子之媒介。祈學人們，共襄盛舉是禱！

放射線的防護

目 次

1. 緒言	1
2. 基本核子物理學	3
3. 輻射與物質的交互作用	7
4. 輻射與生命細胞的交互作用	13
5. 輻射單位	17
6. 輻射劑量率	23
7. 最大許可劑量	29
8. 輻射的偵測方法	35
9. 輻射的偵測儀器	43
10. 輻射管制的準則	49
11. 輻射屏蔽	53
12. 輻射工作區域的特色	63
13. 輻射源的操作設備	69
14. 裝放射性物質的容器	75
15. 防護衣物	79
16. 放射性物質的運送	85
17. 去污	87
18. 放射性廢料的處理	93
19. 輻射災害與緊急事件的應付措施	97
20. 放射線防護的行政工作	99

附錄：常用的保健物理數據	103
表	104
圖	119
圖解	134

1. 緒 言

放射線與放射性物質都具有潛伏的危險性。在體外則使人們遭受體外照射的危險；在體內，則使器官或組織遭受輻射的傷害。因此，保健物理人員應時時指導輻射工作人員，安全處理放射性物質。

事實與經驗告訴我們：即使遭受輕微的體外照射，或因意外災害使微量的放射性物質進入體內，均足以使肉體或遺傳遭受不可忽視的輻射損傷。最大許可劑量標準的釐定從此就成為保健物理學家的主要工作之一。在確保安全的原則下，輻射工作人員不應遭受超過最大許可劑量標準的輻射曝露。此外，我們應知道，除輻射工作人員外，一般民衆也可能遭受輻射曝露。於是，放射線的防護工作可分為兩大類：(一)輻射工作人員的防護以及(二)非輻射工作人員與普通民衆的防護。一般公衆（包括非輻射工作人員）如果遭受輻射曝露，未必能受到大規模的醫藥治療。因此，保健物理學人員應格外注重一般公衆的放射線防護。

應用下列三項基本原則，可以預防或控制人員的輻射曝露，免遭輻射危險：

(a)排除危險。

(b)預防危險。

(c)防護工作人員。

依照順序應用這三項原則，工作人員本身也可獲得適當的防護。第一項原則是顯而易知的；第二項原則意指工作區域的設計與儀器裝備的保養，均應慎重執行。最末一項則意指偵檢儀器的性能與表面污染，指正工作人員的防護技術，估定人員的輻射曝露累積量以及定期做健康檢查。雖然如此，在任何場合，爲了要完全實施上列三項原則

，應先判斷技術性與其他有關方面的問題，以周詳安排防護程序。本書後半部的附錄備有許多重要的保健物理數據，可供職業性與非職業性輻射工作人員做慎重的安排。

2. 基本核子物理學

我們周圍的世界是由不同的元素經化學結合而造成的。自然界中有 92 種這樣的元素；另有 11 種人工製造的放射性元素。原子是化學反應的基本單位，其有效半徑約為 10^{-8} 厘米。因此，1 克原子量（如 1 克氫或 16 克氧）的元素，就含有 6.02×10^{23} 個原子。原子的質量幾乎完全集中於原子核。原子核僅佔有原子的中心部分的極小體積。除氫原子核外，其他原子核均由帶正電的質子與不帶電的中子構成。帶負電的電子則在電子軌道上繞原子核運轉。

由測度電子或質子所荷的電量，定義基本電荷單位為：

$$e = 4.8 \times 10^{-10} \text{ 靜電單位 (esu)}$$

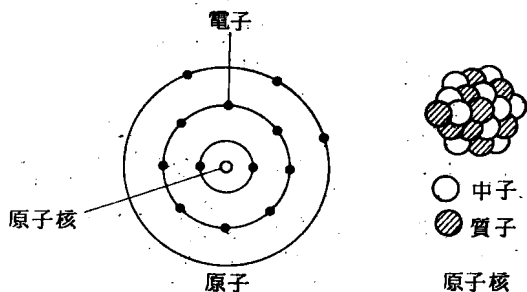


圖 2.1

質子幾乎比電子重 2,000 倍，而略輕於中子。整個原子呈電中性，因此，質子數與核外電子數應相等。質子數便是所謂的原子序，以符號 Z 表之。質子數與中子數的和稱為質量數，以符號 A 表之。於是，核內的中子數為 $A - Z$ 個。具有這種中子數與質子數性質的原子核，稱為核種 (nuclide)。原子序 Z 相同而質量數 A 不同的元素，統稱

為同位素。因為元素的化學性質僅與核外電子數有關，所以同位素都具有相同的化學性質。某元素X的核種，其原子序為Z，質量數為A，就以符號 ${}_Z^AX$ 表之（如 ${}_2^4\text{He}$ 即表氦原子核由兩個中子與兩個質子構成）。然而，在實用上常省寫Z。因為化學符號與質量數A一併使用，就可表明核種的性質。

表 2 . 1

名 稱	辨別因子	實 例	備 攷
核 種	Z , A	${}_1^1\text{H}$, ${}_8^{16}\text{O}$, ${}_{92}^{238}\text{U}$	已知的核種約有 700 種以上 每種元素的同位素約有 3—19 種
同位素	常 數 A	${}_1^1\text{H}$, ${}_1^2\text{H}$, ${}_1^3\text{H}$	

核構造中最簡單的算是氫原子核，它僅由一顆質子構成。其他的原子核則由數目不等的中子與質子所構成。質量較小的同位素，其中子數與質子數的比值接近於1。接近週期表末端的重同位素，其比值則逐漸增大（ >1 ）。當其比值增大時，原子核就達到一種不穩定的狀態。重元素中較穩定的核種是 ${}_{83}^{209}\text{Bi}$ ；比它重的核種便不穩定。因此，那些不穩定的原子核就輻射過多的能量，以回到穩定狀態。不穩定的核種常被稱為放射性核種；其輻射能量的過程稱為天然放射現象或放射性衰變現象。最常見的放射性衰變，是阿爾伐（alpha, α ）、貝他（beta, β ）與伽馬（gamma, γ ）衰變：

(a) α —衰變，是放射性核種發射氦原子核（ ${}_2^4\text{He}$ ）的一種輻射過程。氦原子核俗稱 α —粒子。這種型式的衰變，母核的質量比子核的質量總和為大。兩者間的質量差轉變為 α —粒子的動能。放射性核種一次僅發射一個或兩個高能 α —粒子，至於發射兩個以上就非常罕見。這也是放射性核種共有的特性之一。

(b) β —衰變，是由於核內中子或質子過多而產生正或負電子的輻射。正電子衰變簡稱正子衰變（Positron decay）。正子衰變與電子捕獲具有相同的效應。電子捕獲是由於原子核捕獲最內層軌道電

子所致。 β -粒子的發射常產生明顯的能譜。每一核種均有自己特有的最大貝他能量值。以此性質，可以辨認所有的放射性核種。

(c) γ -衰變，是光子的產生與發射。光子是電磁輻射的單位能量，不帶電又無質量，在真空中以光速前進。輻射 γ -射線的原子核，不改變其質量。純粹的 γ -輻射在天然放射現象中相當稀罕；一般是與 α -衰變或 β -衰變相伴而生。

除了自然界中的放射性核種外，非放射性核種也可由人工方法使其帶有放射性。人工方法是用中子、帶電粒子或光子撞擊穩定的原子核。這些穩定的原子核一旦獲得額外的粒子或（與）能量，就激發到不穩定的狀態。當其欲回復最初的穩定狀態，就發生放射衰變（上述三種衰變的一種或一種以上）。目前廣泛應用於醫學、農業或其他的放射性同位素，大都是人造的。

放射性同位素的衰變是屬於統計學上的過程。因為我們不可能精確預知某特定原子核何時將發生衰變。但是我們仍能肯定說出單位時間內的衰變或然率。這個或然率就是著名的放射性同位素的衰變常數 λ 。由放射性衰變的統計研究得知，放射性物質在單位時間內的衰變數目 $\frac{dN}{dt}$ 與時間 t 內的放射性核種數 N 成正比；其比例常數就是那個著名的衰變常數 λ 。以簡單的數學式表之即為：

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

積分(1)式，得：

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (2)$$

(2)式中的 N_0 表最初存在的放射性核種數； N 表在時間 t 內的放射性核種數。於是

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N = \lambda N_0 e^{-\lambda t} \quad (3)$$

放射性核種數減至一半所需的時間，稱為放射性同位素的半衰期

(half-life) 。

把 $N = \frac{N_0}{2}$ 與 $t = t_{1/2}$ 代入(2)式，得：

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

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

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

放射性核種數依上述的衰變公式，經過一個半衰期就減為一半；再經過一個半衰期減為 $\frac{1}{4}$ ；經過第三個半衰期則減為 $\frac{1}{8}$ ，……。這種半衰期是放射性同位素共有的特性。

輻射的能量用電子伏特 (ev) 表之。電子受電位降為 1 伏特(V) 的電場加速，所得的動能就定義為 1 ev 。以能量單位表示即為：

$$1 \text{ 百萬電子伏特 (Mev) } = 10^6 \text{ ev} = 1.6 \times 10^{-13} \text{ 爾格}$$

剛才我們已經說過，衰變過程中 α - 粒子所得的動能，是母核與子核間的質量虧損。動能的大小可從愛因斯坦的質能關係式，

$$E = m C^2$$

計算求得。式中 C 表光速，其值為 3×10^{10} 厘米 / 秒。 m 表虧損的質量， E 表 α - 粒子所獲得的能量。從這個質能關係式我們能輕易計算獲知：

$$1 \text{ 原子質量單位 (amu) } = 931 \text{ Mev } (1 \text{ amu} = 1.66 \times 10^{-24} \text{ 克})$$

3. 輻射與物質的交互作用

輻射工作人員最常遭受的輻射，可分為(1)直接游離輻射與(2)非直接游離輻射兩大類。直接游離輻射包括一切帶電質點的輻射，例如 α -粒子、重離子與 β -粒子的輻射。非直接游離輻射則指電磁輻射與中子輻射。這些輻射藉產生游離的二次輻射 (secondary radiation)，與物質發生交互作用。雖然一切輻射均能與物質發生交互作用，但是除非受大量的輻射曝露，否則人們很難察覺其作用。因此，在輻射感染區內，應配帶靈敏的偵測儀器。偵測儀器是利用輻射與物質交互作用的性質製成。

輻射場內某點的輻射強度 (或輻射能通量密度) 定義為：單位時間內通過以該點為中心的小球體的能量，惟小球體的截面積應以單位面積為主。輻射強度的單位為爾格/厘米²-秒或瓦特/厘米²。輻射與物質交互作用的結果，使輻射強度減弱。這種減弱的現象稱為衰減 (attenuation)。衰減的程度視輻射與物質的種類而定。能減弱輻射強度的物質，稱為屏蔽物質。屏蔽術語中常採用半值層與 $1/10$ -值層等名詞。受某定量輻射照射的物質，其半值層是指使輻射強度衰減一半所需的屏蔽厚度； $1/10$ -值層則指使輻射強度衰減至 $1/10$ 所需的屏蔽厚度。如果單能射柱或混波射柱的能譜已經確知，就可描述輻射的性質。但為了廣泛應用起見，我們不必攷慮混波射柱的性質，而代之以其有效能量。所謂有效能量，是指與混波射柱具有同一半值層的單能射柱的能量。惟從半值層推導出的有效能量，不可能符合光譜分析表中的平均能量，並且也比它小。直接游離輻射與軌道電子發生交互作用而損失能量。非直接游離輻射，則因與電子、原子核或荷電粒子發生碰撞而損失能量。於是，射入物質內的游離輻射，就依次與軌道電子或原子

核發生交互作用。

輻射能損失的機構相當複雜，容我們依次研討。帶電粒子的能量損失是由於：

- (a) 原子或分子受了激發；就產生制激效應，發射光子；以及
- (b) 游離；包括因軌道電子的發射而產生的離子對。

我們已經確知，在空氣中產生一對離子，平均要消耗約 34eV 的能量。分子中的組成原子一被游離，將使分子解離。

從放射性核種輻射出的 α - 粒子，帶有其特有的能量。 α - 粒子是帶有兩個正電荷的氦離子 (He^{+2})，為強烈的正離子。因此， α - 粒子的穿透力與射程就大受限制。但能量高達 7.5Mev 的 α - 粒子，仍可貫穿皮層組織。一般 α - 粒子在空氣中的射程為數厘米。因此，屏蔽 α - 輻射並非難事。

能量高達 1Mev 的 β - 粒子，常因游離作用而損失能量。高能 β - 粒子又會因能量損失而產生另一種效應——制動輻射 (bremsstrahlung)。因 β - 粒子的質量相當輕小，其速度就特別大。但其游離比度 (specific ionization) 比較小，且依其能量而變化。所謂游離比度，是指輻射線在其所經的物質每毫米的飛程所產生的離子對，而用當量空氣表之。 β - 粒子的穿透力比相同動能的 α - 粒子大，並且，因 β - 粒子的質量相當輕小，在遭受幾次散射後，雖然能量損失不大，但其運動軌跡已變成深鋸齒狀。這種情形與物體表面的反射情形大致相同。其中有一種情形稱為回散射。回散射的程度視表面物質的原子序而定。 β - 粒子一旦從放射性核種內發射出來，就產生連續能譜。 β - 能譜的分佈情形，是從其極大區的最大處依指數衰減。祇要分析這種能譜或翻查 β - 粒子能量表，就可找到最大 β - 能量值。實用上把最大能量的三分之一，定義為平均能量。從更深刻的觀察得知，輕元素物質吸收 β - 粒子的厚度 (單位毫克/厘米²)，幾乎與其性質無關。

能量超過 1Mev 的 β - 粒子，將會因制動輻射 (bremsstrahlung) 輻射電磁波，使其能量銳減。制動輻射的強度與吸收體的原子序有關。制動過程與用高能電子撞擊金屬靶產生 X - 射線的過程相類似。於是，在設計屏蔽純粹 β - 輻射之初，應特別注重制動輻射。

電磁輻射可以依照它們的來源分類，惟與其能量無關。譬如，能量相同的X—射線與 γ —射線，可用物理方法辨認。原子核因受激發而輻射 γ —射線。輻射 γ —射線的原子核便可重還最低能量狀態或基態。連續X—射線或制動輻射的產生，已被早期科學家描述過了。發射特性X—射線，是因原子內的束縛電子受到激發而產生遷移的結果。互毀輻射 (Annihilation radiation) 的產生是由於正子與電子的交互作用。依照愛因斯坦的質能關係式，正子與電子的質量應完全轉變為輻射能。雖然如此，電磁輻射與物質的交互作用機構，僅與輻射能有關，而與其來源無關。這些重要的因素，在設計屏蔽時應格外銘記。

電磁輻射與物質交互作用的類型相當多。現在就把交互作用的類型與可能發生的效應，列表如下：

表 3 . 1

交互作用的類型	交互作用的效應
1.與原子內的電子交互作用。	a 完全吸收。
2.與原子核交互作用。	b 彈性散射。
3.與原子核或電子的庫侖電場交互作用。	c 非彈性散射。
4.與核場交互作用。	

利用組合公式，可從上表組合12種不同的型式。雖然如此，在這些機構中祇有三種，對 γ —射線與物質的交互作用比較重要，這三種機構是光電效應 (1 a)，康普吞效應 (1 b) 與成對發生 (3 b

光電效應 (Photo-electric effect)

能量範圍為 $10\text{Kev}-500\text{Kev}$ 的低能光子，其能量損失的最重要機構是光電效應。在作用過程中，低能光子與軌道電子發生碰撞，並把其全部能量傳給電子，使此電子從原子內發射出來。這種電子俗稱光電子。光電子的動能 T 依愛因斯坦的光電方程式應為：

$$T = h\nu - \Phi$$

式中 $h\nu$ 是光子的能量， Φ 表電子的束縛能。於是，爲了使光電效應發生，光子的能量應大於電子的束縛能。光電效應的重要特徵如下：

(a) 產生光電效應的截面，隨着光子能量的增大而減小。對高能光子而言，常使光電效應失效。惟其他的效應，如康普吞效應，則較重要。此外，光電效應的發生截面，也與吸收體的原子序成正比。對鉛而言，能量高達 1MeV 的光子，才使光電效應有意義。

(b) 縱使光子的能量稍大於電子的束縛能，也能促使光電效應發生。

康普吞效應(Compton effect)

雖然低能光子與束縛電子的交互作用產生光電效應，高能光子與自由電子或束縛能低的電子的交互作用，則產生康普吞效應。在這過程中，入射光子與自由電子或束縛能低的電子發生彈性碰撞。康普吞散射不能像吸收過程般，被獨特地描述。這是因爲散射光子的散射角與其所減小的能量不易估測。

康普吞效應僅與物質的電子數有關。對中能量 γ 射線而言，此效應最爲顯著。對鉛而言，其發生的能量範圍爲 $1-5\text{MeV}$ ；對鉛而言，相對應的能量範圍則變爲 $0.1-15\text{MeV}$ 。

成對發生(Pair production)

能量超過 1.02MeV 的光子，常與原子核的庫倫電場發生交互作用，產生正子-電子對。此外，偶爾也會與電子的庫倫電場起作用。成對發生實爲互毀輻射的逆效應。能量超過 1.02MeV 的光子，因此效應而完全轉變爲正子與電子的質量與動能。爲了要屏蔽輻射，成對

發生也應視為實在的吸收過程。這是因為已創生的正子會再因互毀作用而轉變為輻射，惟其輻射能較低，且朝各方向發射。

用一般規定厚度的屏蔽物質，就可完全吸收 α 與 β 粒子。然而，對 γ —射線而言，輻射的吸收依指數函數而變。在屏蔽物質內任一點的輻射強度 I 為：

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

式中 I_0 為入射的 γ —射線強度； I 為通過厚度 x 後的輻射強度； μ 表屏蔽物質的線性吸收常數。因此，當物質的密度與原子序增大時，其屏蔽能力也就隨之增強。所以鉛是最佳的 γ —射線屏蔽物質。

中子在物質內的衰減，大致與 γ —射線相同。中子的吸收有兩種不同的作用機構：高能中子因與原子核發生彈性與非彈性的散射作用而減速。能量低於 1 MeV 的中子可被碳氫之類的輕元素減速；較高能量的中子則需用重原子核減速。得到能量的原子核當其運動時，就產生劇烈的游離。經過減速的中子很快就被捕獲。對大多數元素而言，其捕獲低能中子的截面非常大。一旦發生中子捕獲，就產生能量約為 6 MeV 的粒子輻射。因此，在設計屏蔽之初，應先考慮選用緩速物質，使中子減速而捕獲之。雖然中子捕獲效應促使帶電粒子的發射，但那些粒子易被吸收。

在上述所討論的過程，我們直接引入了“截面”(cross-section)的觀念。“截面”是一個相當重要的物理觀念，表示用粒子或光子撞擊靶原子核而產生預期效應的有效面積或截面，同時，也表發生效應的或然率。這個有效面積未必等於靶原子核的幾何面積。截面的單位為邦(barn)；1邦等於 10^{-28} 平方厘米。