

各種輻射線

——輻射線的物理(一)

蘇賢錫

國立臺灣師範大學物理系

一、光與其他電磁波的關係

輻射線就是物體釋放出來的電磁波及粒子束的總稱。

「因為有光，所以看得見東西」，這是對電磁波的整個領域可以說的，但靠人類的眼睛來看時，只能看見所謂可視光線為廣大的電磁波之一小部分而已。一般而言，電磁波的整個光譜，通常均以某一變數（例如波長、頻率、或能量值）予以區別。此處所說的譜，是指可視光線或其他光線經過分光計來分解所得的成分。換言之，要用波長、頻率或能量來表示這成分。這些變數之間有下列關係：

$$(\text{波長}) = \frac{(\text{光速})}{(\text{頻率})} \quad \text{即} \quad \lambda = \frac{c}{\nu}$$

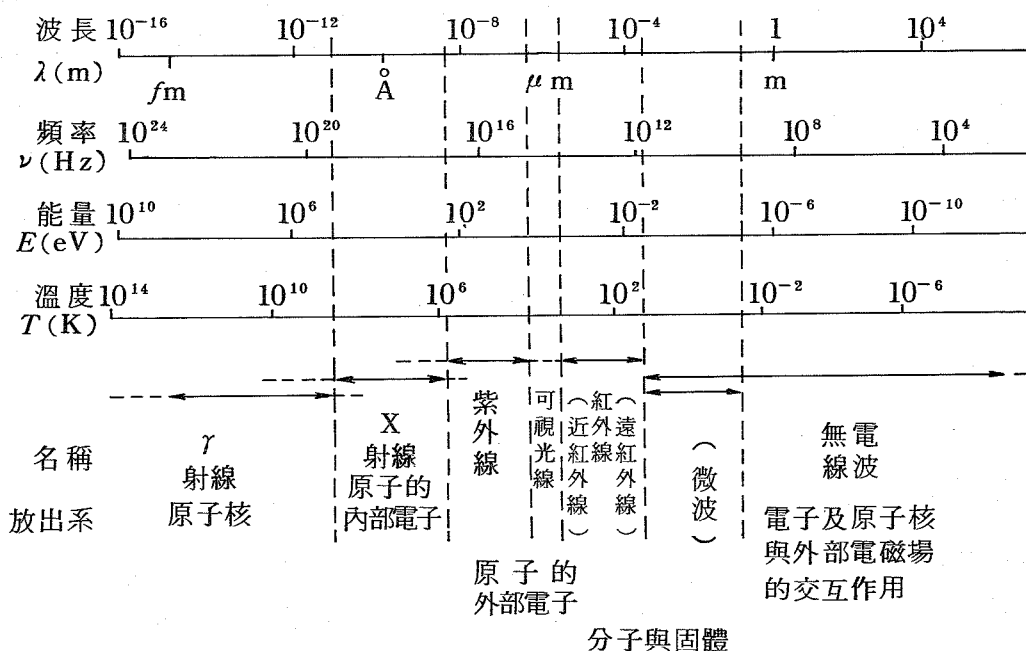
$$(\text{能量}) = (\text{蒲朗克常數}) \times (\text{頻率}) \quad \text{即} \quad E = h\nu$$

$$(\text{溫度}) = \frac{(\text{能量})}{(\text{波子曼常數})} \quad \text{即} \quad T = \frac{E}{k}$$

式中，光速 $C = 2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$ ，蒲朗克常數 $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ，波子曼常數 $k = 1.381 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ 。能量經常用電子伏特（eV）來表示，而 $1\text{J} = 6.24 \times 10^{18} \text{ eV}$ 。

電磁波譜的名稱，以及放射這些電磁波的各系，如圖一所示。放出系是原子核、分子或電磁場。

針對圖一，由長波長一方到短波長，其譜的變化簡單說明如下。長波長的領域，通常叫做無線電波（radio wave），相當於收音機與電視機的電波。無線電波因其頻率



圖一

的不同而有低頻（low frequency, 簡稱LF），中頻（medium frequency, 簡稱MF），高頻（high frequency, 簡稱HF），特高頻（very high frequency, 簡稱VHF），超高頻（ultra high frequency, 簡稱UHF），極高頻（super high frequency, 簡稱SHF），至高頻（extremely high frequency, 簡稱EHF）等名稱，但這不過是大致上的稱呼而已。有時候也將UHF到EHF的範圍叫做微波。

通過微波的領域，就進入紅外譜的領域。靠近微波的部分叫做遠紅外線（far infra-red ray），而靠近可視光線的部分則叫做近紅外線（near infra-red ray）。紅外領域與熱輻射有關係，亦叫做熱射線（heat ray）。其次是可視譜的領域，是很早以前就被研究的部分，牛頓曾經做過光譜分析，顯示紅、橙、黃、綠、藍、靛、紫等顏色。其次是紫外譜的領域，是化學作用強烈的部分。靠近可視光線的部分叫做近紫外線，而靠近X射線的部分則叫做真空紫外線（vacuum ultraviolet ray）。

紫外線結束處就開始X射線譜的領域，但其出發點不能明確決定。大體而言，波長

10^{-8}m 處是軟X射線 (soft X-ray) 波長比它較短處是普通的X射線，接下去是硬X射線 (hard X-ray)。然後是 γ 射線譜領域，一部分與X射線領域重疊，而隨着核物理的發展，重疊部分逐漸增大。在 γ 射線領域，不管波長變成多短，一律叫做 γ 射線。

在這廣泛波長領域中，隨着波長的變化，電磁波的性質沒有急遽的變化，但仍緩慢變化。讀者務必注意，電磁波的產生歷程，從某一領域開始發生本質上的變化。就電磁波性質的變化而言，最顯著的特徵大概是波動性與粒子性的出現方法。例如，波長大小與裝置大小差不多的無線電波，其光子能量可以忽略，僅僅出現波動性，而可以依據電磁輻射的古典理論（亦即馬克士威方程式）來討論。另一方面，波長變短時（例如 γ 射線），波動性可以忽略，而粒子性隨即出現，必須依據電磁輻射的量子論來討論。

因為光有波動 (wave) 與粒子 (particle) 的性質，所以有人提議叫做波粒子 (wavecle)，但目前尚未通用。

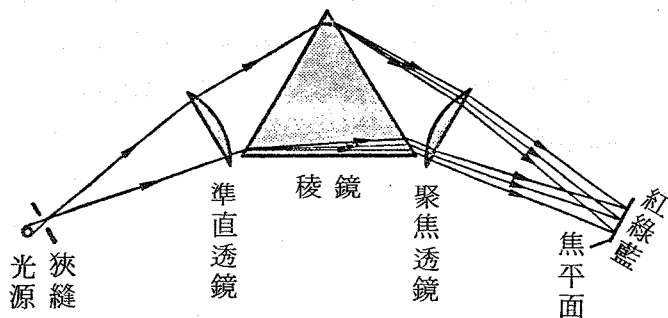
二、可視光線

可視光線就是電磁波中人眼能感覺的波長範圍，雖然因人而異，下限是 $3800 \sim 4000 \text{ \AA}$ ，而上限是 $7600 \sim 8000 \text{ \AA}$ （ $1 \text{ \AA} = 10^{-10}\text{m}$ ）。眼睛能夠感覺的意思是，網膜的感光物質〔即視網膜 (retina)〕之成份原子或分子內的電子能級，幾乎等於可視光線的能量。

爲了研究白色光（例如陽光）與顏色的關係，牛頓使房間變暗，在木板套窗上鑽一小孔來引進陽光，使陽光通過玻璃稜鏡，在相反一側的牆壁上照出各種顏色。牆上出現各種顏色的連續彩色帶，而牛頓叫它光譜。陽光依序由紅排列到紫，乃是因爲各種色光對玻璃的折射率不同所致，表示紅光的折射率最小。畢竟牛頓也沒有發覺，除可視光線外，尚有其他的光。

爲了觀察光譜所用的分光計，其原理簡單說明如下。若用狹縫來代替牛頓所用的小孔，則光譜不至於重疊，而容易理解詳細的光譜構造。分光計由狹縫、稜鏡及兩個透鏡而成，如圖二所示。光源發出的光經過狹縫而光束寬度縮小，經由準直透鏡 (collimating lens) 而變成平行光線射入稜鏡，但因折射率隨波長而異，所以不同波長的光線由稜鏡中朝向各方向射出。其次，利用聚焦透鏡將平行光線聚焦在幕上，照出光譜。

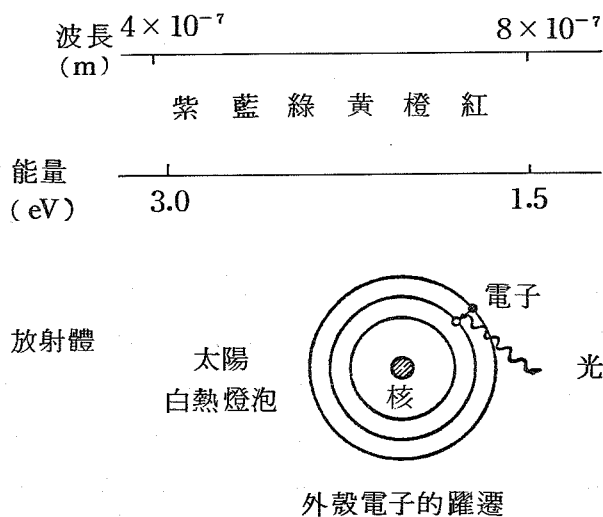
可視光線的放射體，有太陽、白熱燈泡等。例如，白熱燈泡是通電於燈絲的固態鎢來產生焦耳熱，改變鎢原子能量狀態來輻射。往後有關輻射的說明，需要能級的概念，



圖二

因此，暫且簡單介紹如下。

原子由原子核（簡稱核）與電子而成。我們可以想像電子在各自的軌道繞核運行的這種模型。圖三表示這種模型的示意圖，但實際上並不是像這樣的行星系。因為軌道半



圖三

徑愈小，能量愈低，所以電子從內側軌道依序占滿。這叫做電子的殼層結構（shell structure）。原子最穩定的狀態是，電子從內側依序占滿的狀態，叫做基態或最低能級。另一方面，由於某種作用而內側軌道電子躍遷到外側軌道，因而內側軌道產生空位

的狀態，叫做受激態或受激能級。

可視光線的情形是，加熱鎢原子來造成受激態。這狀態是不穩定，就能量而言，外殼電子躍遷到內側軌道比較有利，所以電子隨時躍遷。這時，要輻射這能量差的光。這能量差是 $1.5 \sim 3 \text{ eV}$ 左右，極其微小。這種電子躍遷所輻射的光，其頻率 ν 遵守量子論的公式 $E = h\nu$ 。在這例中， $\nu = (1.5 \sim 3) \times 1.6 \times 10^{-19} / 6.6 \times 10^{-34} = (3.6 \sim 7.2) \times 10^{14} \text{ Hz}$ ，而波長 $\lambda = c/\nu = 4000 \sim 8000 \text{ \AA}$ 。此處， 1 eV 是一個電子在 1 V 的電位差之下被加速時所得的能量，而 $1 \text{ eV} = 1.60 \times 10^{-19} \text{ J}$ 。

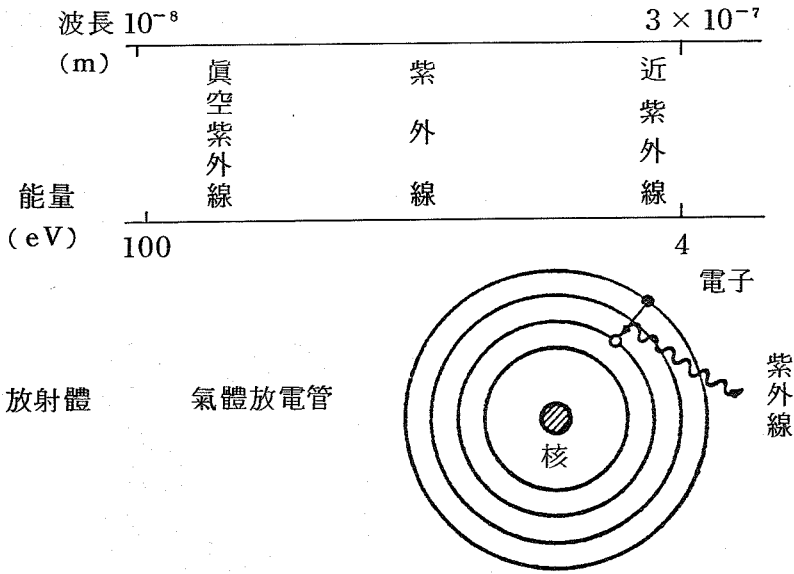
三、紫外線

西元 1801 年，德國醫師及化學家李特（Johann Wilhelm Ritter, 1776—1810）發現，可視光線的短波長末端 $3800 \sim 4000 \text{ \AA}$ 外側，有眼睛看不見的光。李特利用氯化銀因光而變黑的性質來研究光譜的化學作用，發現紫光外側也發生這種化學變化。這就是紫外線。紫外線的下限波長大約 $10^5 \text{ \AA}$ ，但不十分明確，其一部分與軟 X 射線重疊。波長 $2000 \sim 3000 \text{ \AA}$ 的近紫外線，可以利用特殊玻璃或水晶，當一般可視光線來處理。波長 $2000 \text{ \AA}$ 以下的真空紫外線，幾乎不透過玻璃類，開始被空氣中的氧分子所吸收，所以要它傳播時，必須使用真空設備。

紫外線因化學作用強烈而又叫做化學射線，因為波長這麼短就能進入物質的分子或原子中而被吸收，使物質的分子或原子的電子狀態發生變化。幾乎所有的物質對紫外線都是不透明的（亦即吸收紫外線）。由於紫外線顯示強烈光電效應與光化學反應，紫外線的探測器包括光電管、光電伏打電池（photovoltaic cell）、螢光質、照相乾板等。紫外線源則有石英水銀燈，氫或稀薄氣體放電等。

紫外線的放射系——例如氫氣放電時，因放電而氫原子內的電子被激發，然後回去原來的基態，而這時要輻射紫外線，其歷程與可視光線的情形相同。然而，紫外線的情形是，電子躍遷導致的能量變化，較可視光線的情形為大，而躍遷跨在兩個能級以上，如圖四所示。躍遷所導致的能量變化頗大，從數 eV 到 100 eV 。

現在已經開發成功的同步輻射（synchrotron radiation），可以提供紫外線或 X 射線的連續光。

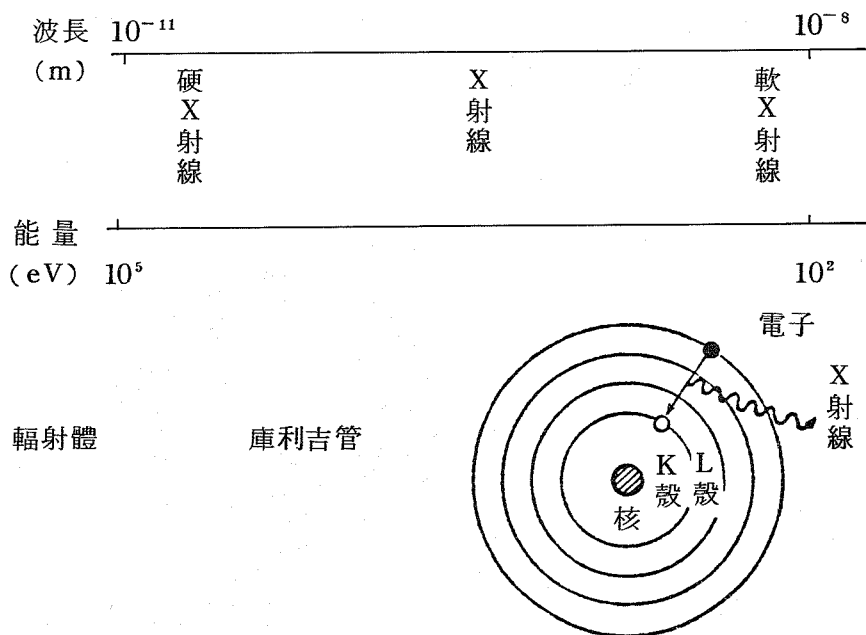


圖四 2 階段以上的電子躍遷

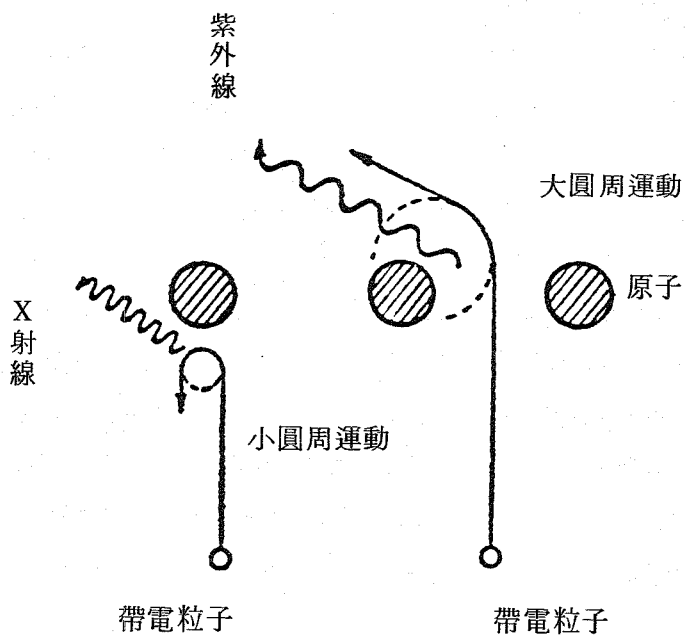
四、X射線

1895 年，德國實驗物理學家倫琴（Wilhelm Konrad Röntgen, 1845—1923）在研究氣體放電現象時，發覺離開放電管頗遠處而塗上鉑氧化鋇的螢光板發光，於是發現能夠穿透黑紙等不透明體，又不受磁場影響的未知輻射線。因為不知這輻射線的真相，所以命名為 X 射線（X-ray）。X 射線是穿透性極強的輻射線，倫琴曾說：「把手放在放電管和影幕之間，便看見手本身的微暗影像中有更暗的骨頭影子。」後來，科學家證實 X 射線是波長大約 $1 \text{ \AA}$ 的波動。1912 年，德國理論物理學家勞厄（Max von Lane, 1879—1960）研究 X 射線晶體繞射現象，證明 X 射線與光相同，是一種電磁波。

X 射線的波長是 $0.1 \sim 100 \text{ \AA}$ ，相當於能量 $10^5 \sim 10^2 \text{ eV}$ 。偌大的能量表示，這不是像可視光線或紫外線那種原子外殼電子的小躍遷，而是外側電子越過許多軌道而落在內殼軌道空位上（見圖五）。如此，原子內殼電子的躍遷所導致的 X 射線叫做特性 X 射線（characteristic X-ray），而電子在電磁場中的急遽加速運動引起軔致輻射（bremsstrahlung）所導致的 X 射線叫做連續 X 射線（continuous X-ray）（見圖六）。



圖五 向內部軌道的電子躍遷



圖六

至於X射線的產生，早期均用英國物理學家及化學家克魯克斯（Sir William Crookes, 1832～1919）所發明的克魯克斯管（Crookes tube），但因電壓與電流不容易控制，故現在改用1913年美國實驗物理學家庫利吉（William David Coolidge, 1873～1975）所發明的所謂庫利吉管（Coolidge tube）的熱離子管，即由白熱鎢絲放出來的熱離子予以加速，令其撞擊陽極而產生X射線。因為所放出的X射線之性質視陽極物質而定，所以能夠配合目的來選用適當的金屬材料。撞擊陽極的電子，其動能中要成為X射線的，在1%以下，其餘大部分都是變成熱，因此，所得的X射線，其強度與能量均有限度。

一般而言，X射線對物質的穿透本事頗大，波長愈短，穿透能力愈大。有時候因穿透能力的大小而區別成為硬X射線（hard X-ray）與軟X射線（soft X-ray）。人眼對X射線沒有感覺，其實，X射線有螢光作用，照相感光作用（X射線軟片），氣體分子的電離作用，化學作用等。X射線的波長是數 $\text{\AA}$ 左右，與晶體中原子的間隔差不多，故在利用繞射來決定物質結構時，極為重要。X射線可以說是專門觀察原子世界的光。

X射線被物質的電子束散射時，散射波的波長較入射波的波長為長，這是1923年美國實驗物理學家康普頓（Arthur Holly Compton, 1892～1962）所發現的現象，叫做康普頓效應（Compton effect），是視X射線為波的古典物理學所不能理解的。科學家必須將X射線視作具有能量 $h\nu$ 的光量子束。康普頓效應的發現，使光的粒子性毫無懷疑之餘地，終於確立了量子論。

五、 γ 射線

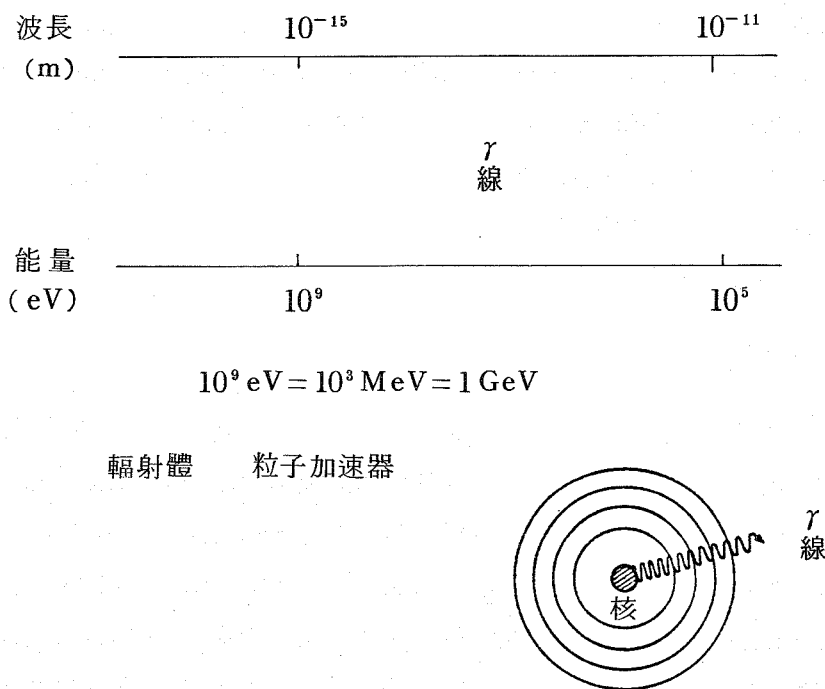
γ 射線是波長極短的電磁波，其長波長的界限不清楚，多半包括到 $0.1 \text{\AA}$ 左右，與X射線的領域重疊頗多。由於原子核物理學的發展，短波長的領域愈來愈擴大。這種擴大情形完全依靠高能原子核實驗的發展，將來不知會擴大到什麼地步。

1900年，法國物理學家維拉耳（Paul Villard, 1860～1934）發現在磁場中不彎曲而且穿透能力極大的第三種輻射線。這就是 γ 射線。1914年，英國實驗物理學家拉塞福（Ernest Rutherford, 1871～1937）用晶體做 γ 射線繞射實驗，證明 γ 射線確實是電磁波。在這時期，科學家爭論的焦點是， γ 射線究竟是粒子抑或是波動？結果大家認定 γ 射線是波動，但因光量子說而 γ 射線顯然也是粒子了。換言之，波長較短而能量較高時，粒子的性質顯著出現，雖然說是 γ 射線，卻要當粒子來處理。

γ 射線的波長暫且視作 $10^{-11} \sim 10^{-15} \text{ m}$ ，則其能量為 $10^5 \sim 10^9 \text{ eV}$ 。 $10^9 \text{ eV} = 1000 \text{ MeV} = 1 \text{ GeV}$ ，這麼高能的電磁波，不會是伴隨原子的電子結構之改變而釋放出來的。科學家已知，這高能 γ 射線不是來自作用在原子核與電子之間的庫侖力，而是來自作用在原子核內的核力。因此， γ 射線分光術 (γ -ray spectroscopy) 是要探討原子核內部情形的學問。由此可知， γ 射線是要探討物質基本單元的重要武器。

前面已述， γ 射線的能量上限，不知將達到多少，但原子核內的能量可能有上限。雖然如此，由於粒子與反粒子的湮沒 (particle-antiparticle annihilation) 或太空內的帶電粒子之加速 (宇宙射線)，極高能量可能產生出來。

正如已述，本質上 γ 射線的產生是關係到原子核的能量變化，所以必須使用放射性同位素或高能粒子加速器。例如，經過加速的質子撞上各種原子核時，原子核就在受激態，而從這能級回去基態能級時，要放出 γ 射線。此外，來自加速器的高能電子撞到原子核而減速時，如同 X 射線的情形一般，因軔致輻射而放出 γ 射線 (見圖七)。



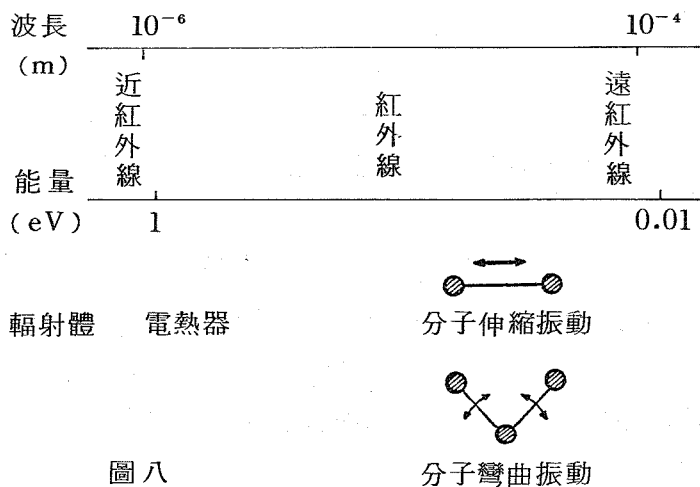
圖七

γ 射線的穿透力極大，而其電離作用，照相感光作用，螢光作用等，均遠較 X 射線為小，所以不容易探測。探測器包括，利用閃爍效果（螢光物質遭 γ 射線照射時，會發強光）的閃爍器（Scintillator），半導體探測器（ γ 射線入射半導體表面時，要探測所產生的電子—電洞對之儀器）等。此外，由於穆斯堡爾效應（Mössbauer effect）的發現， γ 射線已經在物性的研究或一般相對論的實驗研究方面占重要地位。關於穆斯堡爾效應，容後再予討論。

六、紅外線

現在，反過來看看可視光線的長波長那一側。1800 年，聞名全球的德裔英國天文學家赫謝耳（Sir Frederick William Herschel, 1738~1822），爲了研究太陽光各光譜的熱效應，將溫度計從紫光移到紅光去，發現通過紅光而沒有光的地方也有熱效應，溫度計的指標繼續上升。他把它叫做紅外線的熱效應。紅外線因爲熱效應強大而又叫做熱線。1835 年，法國物理學家安培（André Marie Ampère, 1775~1836）證明紅外線是與可視光線相同的光波。

紅外線是以可視光線的長波長端 $7600 \sim 8000 \text{ \AA}$ 爲下限，而以 1 mm 左右爲上限的電磁波。上限不甚明確，與微波的一部分重疊。紅外線的能量很小，只有 $1 \sim 0.01 \text{ eV}$ 。與這領域的光量子所對應的能量變化，遠較伴隨可視光線的外殼電子躍遷爲小，一般認爲起因於分子的轉動與振動，或固體點陣的振動（見圖八）。分子的振動光譜與轉動光譜，分別出現於近紅外線領域與遠紅外線領域。所謂熱線的名稱是，因爲近紅外線



圖八

吸收而物質內部熱運動活潑起來，溫度上升的緣故。

紅外線輻射系，只要使分子或固體的運動活潑化，亦即使其成為高溫狀態即可獲得。電熱器將紅外線與以紅色光為中心的可視光線同時放出。紅外線暖爐是經過特殊設計來增加紅外線成分的。

紅外線善於通過空氣中，又善於穿透雲霧，所以利用紅外線軟片就能夠拍攝清晰的照片。物體隨其溫度而輻射一定的紅外線，因此，即使黑夜也可以利用紅外線來觀看景色〔暗視設備（noctovision）〕。衆已熟知，火箭的追蹤裝置常用紅外線。

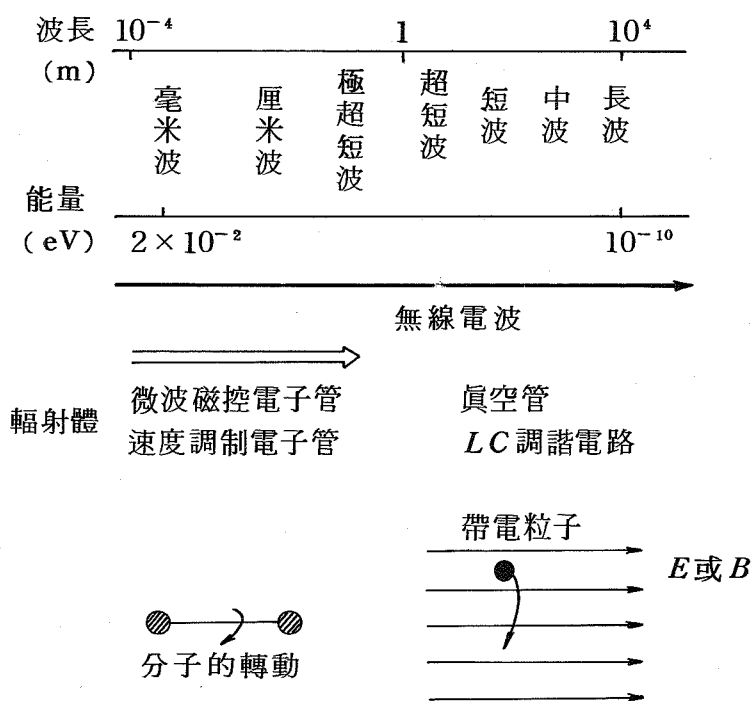
紅外線的短波長領域，除熱效應外，另外顯示照片感光作用、磷光作用、光電作用，故其探測器要採用熱電偶，照相軟片，光電池等，而長波長領域的探測器則要使用熱電偶，輻射熱測定器（bolometer），熱敏電阻（thermistor）等。此外，根據紅外線吸收光譜，可作物質的認定，定性及定量分析等。紅外線在決定晶體點陣的結構方面，扮演重要的角色。

七、微波與無線電波

波長比紅外線長就逐漸進入微波領域。這是波長1m以下的無線電波，包括與遠紅外線相連的1mm以上電磁波。自古以來，紅外線與無線電波已被徹底研究，但截至第二次世界大戰，微波領域依然是一片空白。衆已週知，由於軍用雷達的研究，這領域始得以突破性開發。戰後，微波的和平用途急速擴展，包括微波通訊、航空雷達、高頻加熱等。

微波能量的範圍大約 $10^{-5} \sim 2 \times 10^{-2}$ eV，而這領域的輻射源是基於分子或固體的分子運動，尤其是轉動或分子的反轉（inversion）。實際上要造成這種輻射時，通常都使用磁控電子管（magnetron）或速度調制電子管（klystron）等雷達管（見圖九）。例如，磁控電子管擁有圓筒形陽極與中心軸陰極，而當垂直於電場的磁場加上時，若這磁場大小超過某臨界值附近，則陽極電流遽減，發生類似迴旋振盪（cyclotron oscillation）的振盪。

無線電波的波長可達數百乃至數千公尺。這個領域，首先是由德國的物理學家赫茲（Heinrich Rudolf Hertz, 1857～1894），後來又由義大利電機工程師及發明家馬可尼（Guglielmo Marconi, 1874～1937）深入研究過。無線電波的出現使科學家對電磁波的本質作進一步的瞭解，而無線電波的應用不僅是在通訊方面，更是擴展到



圖九 電磁場中帶電粒子的運動

科技的整個分野，深深影響到我們的生活。

無線電波的輻射是起因於電磁場中的帶電粒子之運動。具體而言，用 LC 電路，從天線輻射出去即可。這波長，只要調節 L 或 C 的大小便可決定。

自然界的電波源包括來自太陽的太陽電波，來自銀河系的星球或電波星（radio star）的太空電波（space wave）等。透過這種電波（主要是厘米波及分米波，甚少被電離層與地球大氣中所含的氣體來吸收）以研究太空的所謂電波天文學（radioastronomy），近年發展特別神速。電波望遠鏡（radiotelescope）的應用，使光學望遠鏡看不見的太空逐一露出其真面目。（待續）