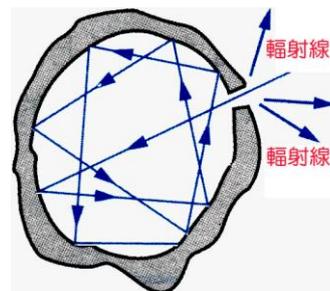


第八章：量子現象

(一)黑體輻射：

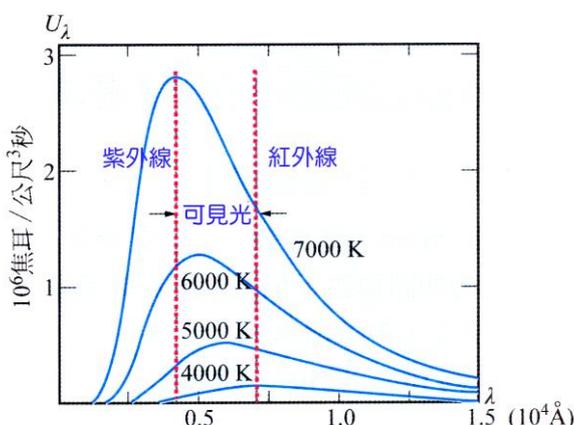
A、黑體：

- (1) 白色的物體能完全反射電磁輻射，黑色的物體能完全吸收電磁輻射，一般的物體則是部分反射部分吸收。
- (2) 將一物體內部挖空塗黑，僅留狹小縫隙，此時將光射入，經多次反射後，已無光線射出，因此將此僅有光線進入，而無光線射出的物體，稱為黑體，以此模擬真正的黑色物體。
- (3) 理想的黑體不會反射電磁波，但能輻射電磁波；宇宙間的星體發光，僅是由於星球內部核融合產生的輻射熱，不是來自於其他星體的反射，因此星球輻射視為黑體輻射。



B、黑體輻射—熱輻射：

- (1) 當物質有溫度時，內部的粒子即具有能量，溫度愈高則能量愈大，粒子間的碰撞愈激烈，因此造成速度改變，而產生了加速度。
- (2) 依電磁波理論，當帶電質點有加速度時，會輻射電磁波，使得能量減少，此種電磁輻射，是由於熱所造成的現象，稱為熱輻射。
- (3) 當溫度愈高時，電磁輻射的能量愈大，輻射的波長愈短，頻率愈高。
- (4) 宇宙間的溫度為絕對溫度 3K(攝氏-270℃)，此時的電磁輻射為無線電波(或微波)。【註】：3K 的電磁輻射應為『微波』，87 年推甄試題選項中答案為『無線電波』，視為廣義之解釋。
- (5) 水沸騰時溫度為 373K(100℃)，釋放之電磁輻射為紅外線。
- (6) 白熾燈(鎢絲燈)的溫度約為 2300K，電磁輻射的可見光強度較弱，大部分為紅外線。
- (7) 太陽表面約為 6000K，產生的電磁輻射大部分為可見光，同時有一部份的紫外線及紅外線。
- (8) 傳統的電磁學以波動形式，無法完美地解釋黑體輻射的實驗結果。



C、黑體輻射之解釋—量子論：

- (1) 物質的量子化：
道耳吞提出『原子說』，主張原子是組成物質的最小單位，原子不能被分割，即物質是由整數個原子所組成，此為物質的量子化。
- (2) 電量的量子化：
密立坎以油滴實驗測定電荷電量，認為電荷電量有最小單位，即為 1.6×10^{-19} 庫侖，帶電體的電量必為基本電荷的整數倍，稱為電量量子化。
- (3) 能量的量子化：
普朗克解釋黑體輻射，主張物體上帶電粒子振動時，所吸收或放出的能量為不連續的數值，且為 $E = hf$ 的整數倍，即輻射能量僅能為 hf 、 $2hf$ 、 $3hf$，此種不連續的能量，稱為能量量子化。
- (4) 普朗克的『能量量子化』假設，恰能完全吻合黑體輻射的結果，開啟了二十世紀近代物理的研究。

(二)光電效應：

A、現象：

光照射在金屬表面，使得金屬表面的電子脫離，此種現象稱為光電效應。

B、名詞：

- (1) 光電子：光電效應產生的電子，稱為光電子。
- (2) 光電流：光電子在電路中形成的電流，稱為光電流。
- (3) 光電板：產生光電效應的金屬板，稱為光電板。
- (4) 功函數(游離能)：光電板吸收入射光的能量，使電子脫離，金屬板所吸收的能量，稱為游離能，或稱為功函數，一般以 ϕ 表示。

C、光子論：

- (1) 愛因斯坦解釋光電效應，提出光子論，主張光同時具有波動及粒子的特性。
- (2) 光波波長大或強光時，波動性較顯著；光波波長短或弱光時，粒子性較顯著。
- (3) 光的干涉及繞射現象，表現出波動性質；光電效應則表現出光的粒子性。
- (4) 愛因斯坦將電磁波視為一團光量子，具有粒子的特性，而光量子的能量則與光波的頻率成正比， $E = hf$

h ：普朗克常數(=6.63x10⁻³⁴ J-s)

f ：入射光的頻率

D、討論：

(1) 入射光能量：

甲、已知入射光頻率 f ： $E = hf$

例 1：入射光頻率 5x10¹⁴ 赫，含能量_____焦耳。

【解析】： $E = hf = (6.63 \times 10^{-34}) \times (5 \times 10^{14}) = 2.3 \times 10^{-19} \text{ J}$

而 1 e.V = 1e x 1V = (1.6x10⁻¹⁹C) x 1V = 1.6x10⁻¹⁹ J

入射能量 $E = 2.3 \times 10^{-19} \text{ J} = \frac{2.3 \times 10^{-19}}{1.6 \times 10^{-19}} = 1.44 \text{ e.V}$

乙、已知入射光波長(λ)： $E = \frac{12400}{\lambda}$

例 2：入射光波長為 5000Å，則含能量_____e.V。

【解析】： $E = hf = \frac{hc}{\lambda} = \frac{(6.63 \times 10^{-34}) \times (3 \times 10^8)}{5000 \times 10^{-10}} = 2.98 \times 10^{-19} \text{ J} = \frac{2.98 \times 10^{-19}}{1.6 \times 10^{-19}} = 1.86 \text{ e.V}$

為方便計算光子的能量 $E = \frac{(6.63 \times 10^{-34}) \times (3 \times 10^8)}{5000 \times (10^{-10} \times 1.6 \times 10^{-19})} = \frac{12400}{5000(\text{Å})}$

得到公式：

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda} = \frac{12400}{\lambda(\text{Å})}$$

(2) 游離能(功函數)：

甲、不同的金屬板，具有不同的游離能。

乙、例如：

金屬	鋰(Li)	鈉(Na)	鉀(K)
功函數	2.9e.V	2.75e.V	2.3e.V

鋰金屬的電子脫離金屬表面，需吸收 2.9 e.V 的能量；

鈉金屬的電子脫離金屬表面，需吸收 2.75 e.V 的能量；

鉀金屬的電子脫離金屬表面，需吸收 2.3 e.V 的能量；

(3) 光電子動能：

甲、入射光 4000\AA ，照射鉀金屬(功函數 = 2.3e.V)，則光電子動能為_____e.V。

【解析】：入射光能量 = $\frac{12400}{4000} = 3.1\text{ e.V}$ 光電子動能 = $3.1 - 2.3 = 0.8\text{ e.V}$

乙、入射光 2000\AA ，照射鋰金屬(功函數 = 2.9e.V)，則光電子動能為_____e.V。

【解析】：入射光能量 = $\frac{12400}{2000} = 6.2\text{ e.V}$ 光電子動能 = $6.2 - 2.9 = 3.3\text{ e.V}$

(4) 底限波長：使入射光產生光電效應的最大波長，稱為底限波長。

例：使鋰金屬(功函數 = 2.9e.V)產生光電效應的最大波長為_____Å。

【解析】：電子脫離需要的最小能量至少為 2.9 e.V ，則入射光

$$\frac{12400}{\lambda} = 2.9\text{ e.V} \quad \Rightarrow \quad \lambda = \frac{12400}{2.9} = 4276\text{ \AA}$$

(5) 截止頻率(低限頻率)：使入射光產生光電效應的最小頻率，稱為截止頻率或低限頻率。

甲、例：使鉀金屬(功函數 = 2.3e.V)產生光電效應的截止頻率為_____赫。

【解析】：電子脫離需要的最小能量至少為 2.3 e.V ，則入射光

$$\frac{12400}{\lambda} = 2.3\text{ e.V} \quad \Rightarrow \quad \lambda = \frac{12400}{2.3} = 5391\text{ \AA} \quad \Rightarrow \quad f = \frac{3 \times 10^8}{5391 \times 10^{-10}} = 5.56 \times 10^{14}\text{ 赫}$$

(6) 不同金屬板具不同的游離能，不同的入射光，具不同的能量，皆影響光電子的動能。

光電子動能 $E_k = \text{入射光能量}(hf) - \text{功函數}(\varphi)$

即 $E_k = hf - \varphi$

令 $y = E_k$ ， $x = f$ ，則光電子動能與入射光頻率關係式為一斜直線。

其中，圖形斜率為 h (普朗克常數)

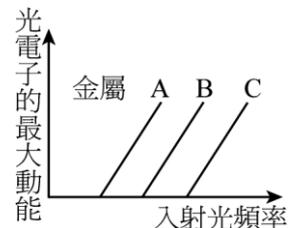
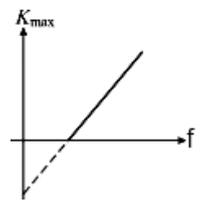
圖形與 X 軸(入射光頻率 f)的交點，為截止頻率。

圖形與 y 軸(光電子動能 E_k)交點，為功函數的負值。

右圖中，ABC 代表不同的金屬板，具有不同的截止頻率，其中

A 金屬板的功函數較小，需較低的能量(較低頻率)；

C 金屬板的功函數最大，需較高的能量(較高頻率)。



(7) 入射光的能量足夠(大於截止頻率)時，即可產生光電效應，且一個光子可產生一個光電子；光雖弱，仍然有光電效應。

入射光的能量不足(小於截止頻率)時，無法產生光電效應；

光雖強，仍然無法產生光電效應；

若照射時間增長，仍無法產生光電效應。

(8) 光電效應的時間小於 10^{-9} 秒，因此視為瞬間產生，和照射時間無關。

(9) 強光表示光子數目多，發生光電效應時，入射光增強，產生光子的數目多，在電路中的光電流大。

弱光表示光子數目少，發生光電效應時，入射光減弱，產生光子的數目少，在電路中的光電流小。

【比較】：影響光電子的動能和光電流大小的因素：

入射光頻率高，能量大，光電子動能大。

入射光增強，光子數目多，光電流大。

E、應用：

(1) 太陽能電池、太陽能計算機、光電管控制開關、雷射印表機、便利商店的條碼掃描器。

(2) 數位相機的感光元件(CCD)接受照光時，會產生光電子，入射光愈強，產生的光電子愈多，累積的電子訊號可轉換為數位訊息而被儲存或呈現。

(三)原子能階：

A、原子模型：

(1) 拉塞福原子模型：

- 甲、1908年，拉塞福以金箔實驗證實，原子內部有體積極小，但質量極大的原子核，且原子核帶正電，而電子則帶負電。
- 乙、拉塞福提出原子模型：電子在原子外圍，以靜電力繞原子核旋轉，而靜電力作為圓周運動的向心力。
- 丙、電子作圓周運動時，有向心加速度，此時電子將輻射電磁波，因此電子能量將減少，使得旋轉半徑變小，最後電子將墜毀在原子核表面。
- 丁、因此拉塞福的原子模型為不穩定的原子模型。

(2) 波耳原子模型：

- 甲、1913年，波耳以量子論修正拉塞福的原子模型，結果順利地解釋氫原子光譜的實驗結果。
- 乙、波耳提出假設：
 - 1. 電子只能以特定的軌道半徑，繞原子核運轉 ⇨ 軌道量子化。
 - 電子只能以特定的速率出現在特定的軌道上 ⇨ 速率量子化。
 - 電子只能以特定的角動量出現在特定軌道上 ⇨ 角動量量子化。
 - 電子只能以特定的能量出現在特定的軌道上 ⇨ 能量量子化。
 - 電子在特定軌道上運轉時，不會輻射出能量
 - 2. 電子由內側軌道(低能階)躍遷至外側軌道(高能階)時，必須吸收特定的能量；
 - 電子由外側軌道(高能階)躍遷至內側軌道(低能階)時，必須釋放特定的能量。

(3) 原子能階(氫原子模型)：

甲、定無限遠為零位面

1. 氫原子能階關係式：

$$E_n = -\frac{13.6}{n^2} eV$$

2. $n=1$ 時，稱為基態 $E_1 = -\frac{13.6}{1^2} = -13.6 eV$

$n > 1$ 時，稱為受激態

$n=2$ ，稱為第一受激態

$$E_2 = -\frac{13.6}{2^2} = -3.4 eV$$

$n=3$ ，稱為第二受激態 $E_3 = -\frac{13.6}{3^2} = -1.51 eV$

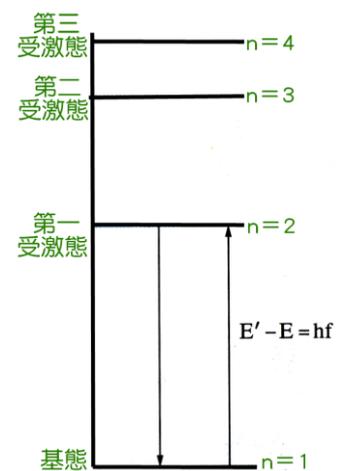
$n=4$ ，稱為第三受激態 $E_4 = -\frac{13.6}{4^2} = -0.85 eV$

$n = \infty$ ，則 $E_n = 0$ (零位面)

乙、定基態為零位面

1. 氫原子能階關係式：

$$E_n = 13.6 - \frac{13.6}{n^2} = 13.6(1 - \frac{1}{n^2}) eV$$



2. $n=1$ 時，稱為基態 $E_1=13.6 \cdot \frac{13.6}{1^2}=0 \text{ e.V.}$ (零位面)

$n>1$ 時，稱為受激態

$n=2$ ，稱為第一受激態 $E_2=13.6 - \frac{13.6}{2^2}=10.2 \text{ e.V.}$

$n=3$ ，稱為第二受激態 $E_3=13.6 - \frac{13.6}{3^2}=12.09 \text{ e.V.}$

$n=4$ ，稱為第三受激態 $E_4=13.6 - \frac{13.6}{4^2}=12.75 \text{ e.V.}$

$n=\infty$ ，則 $E_n=13.6 \text{ e.V.}$

(4) 能階的躍遷：以無限遠處為零位面為例

甲、電子由 $n=4$ 躍遷至 $n=1$ ，高能階躍遷至低能階會釋放能量：

1. 共有 $4 \rightarrow 3$ 、 $4 \rightarrow 2$ 、 $4 \rightarrow 1$ ； $3 \rightarrow 2$ 、 $3 \rightarrow 1$ ； $2 \rightarrow 1$ 共產生 6 條光譜線。

2. $n=4(-0.85\text{e.V})$ $n=3(-1.51\text{e.V})$ $n=2(-3.4\text{e.V})$ $n=1(-13.6\text{e.V})$

$4 \rightarrow 3$: $E=(-1.51)-(-0.85)=-0.66 \text{ e.V.} \Rightarrow$ 釋放 0.66 e.V. 的光子

$4 \rightarrow 2$: $E=(-3.4)-(-0.85)=-2.55 \text{ e.V.} \Rightarrow$ 釋放 2.55 e.V. 的光子

$4 \rightarrow 1$: $E=(-13.6)-(-0.85)=-12.75 \text{ e.V.} \Rightarrow$ 釋放 12.75 e.V. 的光子

$3 \rightarrow 2$: $E=(-3.4)-(-1.51)=-1.89 \text{ e.V.} \Rightarrow$ 釋放 1.89 e.V. 的光子

$3 \rightarrow 1$: $E=(-13.6)-(-1.51)=-12.09 \text{ e.V.} \Rightarrow$ 釋放 12.09 e.V. 的光子

$2 \rightarrow 1$: $E=(-13.6)-(-3.4)=-10.2 \text{ e.V.} \Rightarrow$ 釋放 10.2 e.V. 的光子

3. 產生光譜線的波長：

$4 \rightarrow 3 \Rightarrow$ 釋放 0.66 e.V. 的光子 $\Rightarrow E = \frac{12400}{0.66} = 18788 \text{ (\AA)}$ 紅外線

$4 \rightarrow 2 \Rightarrow$ 釋放 2.55 e.V. 的光子 $\Rightarrow E = \frac{12400}{2.55} = 4863 \text{ (\AA)}$ 可見光

$4 \rightarrow 1 \Rightarrow$ 釋放 12.75 e.V. 的光子 $\Rightarrow E = \frac{12400}{12.75} = 973 \text{ (\AA)}$ 紫外光

$3 \rightarrow 2 \Rightarrow$ 釋放 1.89 e.V. 的光子 $\Rightarrow E = \frac{12400}{1.89} = 6561 \text{ (\AA)}$ 可見光

$3 \rightarrow 1 \Rightarrow$ 釋放 12.09 e.V. 的光子

$\Rightarrow E = \frac{12400}{12.09} = 1026 \text{ (\AA)}$ 紫外光

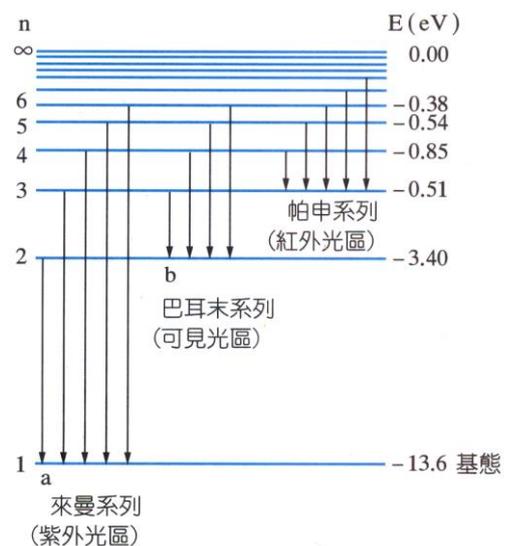
$2 \rightarrow 1 \Rightarrow$ 釋放 10.2 e.V. 的光子

$\Rightarrow E = \frac{12400}{10.2} = 1216 \text{ (\AA)}$ 紫外光

乙、氫原子光譜為明線光譜，電子由高能階躍遷至低能階時，釋放能量。

丙、各能階躍遷至基態時的光譜線，皆位於紫外光區，稱為來曼系列。

氫原子光譜有可見光區的光譜線，稱為巴耳末系列。



(四)物質波：

A、緣起：

- (1) 愛因斯坦以光子論解釋了光電效應的結果。
- (2) 愛因斯坦認為光為同時具有波動及粒子現象的微粒，稱為光子；光子的能量和光的頻率有關，光子的強度和光子數目有關。
- (3) 1924年，德布羅意注意到光同時具有物質及波動的性質，於是假設：運動中的粒子可以表現出干涉及繞射等波動的性質，稱為物質波。

B、物質波的性質：

- (1) 若物質具有動能 $E_k(=\frac{1}{2}mv^2)$ ，動量 $P(=mv)$ ，則：

$$\text{物質波的頻率 } f = \frac{E_k}{h}$$

$$\text{物質波的波長 } \lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} = \frac{h}{\sqrt{2mE_k}}, \text{ 此波長稱為德布羅意波長。}$$

- (2) 物質波為物質在空間中出現的機率分布，和水波、聲波的橫波、或縱波無關。

【註】：物質波為機率波，不是力學波。

- (3) 1927年戴維森、格末以鎳晶體做電子的繞射實驗，證實電子的波動性。
- (4) 1961年約生完成電子的雙狹縫干涉實驗，所得結果與光波的雙狹縫干涉圖形相似。
- (5) 在電子的雙狹縫干涉條紋中，亮紋代表通過兩狹縫的物質波在該處產生建設性干涉，意味著在該處，電子出現的機率較高。暗紋代表通過兩狹縫的物質波在該處產生破壞性干涉，意味著在該處，電子出現的機率較低。
- (6) 光子與物質都遵守波動性與粒子性，但是兩者的意義不相同。
- (7) 物質與光子都遵守動量守恆及動能守恆。
- (8) 欲使物質的波動性明顯，應：
(1)減少物質的質量； (2)減少物質的速度。
- (9) 任何物質都具有物質波，然而一般不易觀察到物質波，是由於物質的質量太大，以至於物質波的波長太小，無法測量出。

例 1：質量 20 克的子彈，以 100m/s 的速率前進，則此子彈的物質波長度為若干？

【解析】：物質波的波長 $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} = \frac{6.63 \times 10^{-34}}{(2 \times 10^{-2}) \times 100} = 3.31 \times 10^{-34}$ 公尺

例 2：動量相同之下列各質點，何者波動性質較顯著？

- (A)電子 (B)質子 (C)中子 (D)三者均相同。

【解析】：物質波的波長和物質的動量相關，任何質點，只要動量相同，物質波的波長即相同。

例 3：某粒子以 10^4 公尺/秒的速率運動，其物質波波長為 10^{-10} 公尺。若速率降為 10^3 公尺/秒，則物質波波長變為

- (A) 10^{-7} (B) 10^{-8} (C) 10^{-9} (D) 10^{-11} (E) 10^{-12} 公尺。

【解析】： $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} \Rightarrow \lambda_1 : \lambda_2 = \frac{h}{mv_1} : \frac{h}{mv_2} = \frac{1}{v_1} : \frac{1}{v_2} \quad 10^{-10} : \lambda_2 = \frac{1}{v_1} : \frac{1}{v_2} = \frac{1}{10^4} : \frac{1}{10^3} = 1 : 10$

$\Rightarrow \lambda_2 = 10^{-9} m$