

## 第 8 章 量子現象

### 8-1 光電效應與光子

### 8-2 物質波

### 8-3 原子光譜

#### 本章教學理念

介紹量子力學的重要觀念，光子與電子以及所有微觀粒子都具有波粒二象性，原子光譜與能階的概念。

近代科技如雷射、半導體的發明與應用，均與這些現象背後的革命性概念—原子能階—有關。而能階的發生則與光電效應中的「光子」概念及非連續原子光譜之實驗密不可分。由光子所代表的輻射粒子性，也引發了粒子波動性的探討。光子、物質波與能階都是近代物理基本且重要的觀念。

#### 8-1 教學理念

簡介光電效應，因此得知光具有粒子性，且光子能量和光的頻率成正比。並舉例說明光電效應在日常生活中的應用。

## 8-1 光電效應與光子

### 一、光電效應

科學家於 1886 年時，偶然地發現，以紫外光線照在陰極金屬板上，可使金屬板帶電或放電（圖 8-1），後來證實所放出的帶電荷物質即為電子。此種將光照射在金屬物上，使其表面釋放出電子的現象，稱為光電效應（photoelectric effect），被釋放出的電子稱為光電子（photoelectron），以表示其來源是由光照所引起的，但實質上它與一般所言的電子完全相同，沒有差異。

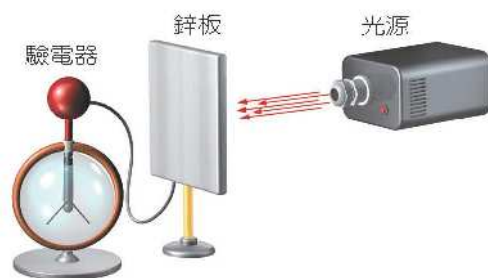


圖 8-1 光線照在金屬板上所釋放出之電子，可使驗電器帶電，而讓金箔張開。

第 6 章中曾指出光是一種電磁波，而一般波（如水波、聲波）的能量與波之振幅大小有關，與頻率無關，故主張光為波動的物理學家們推測照射光的能量也與它的強度（intensity）有關，而與光的頻率（或顏色）無關。依此觀點，光進入金屬材料內，可將能量傳給金屬內部的電子，電子吸收這些光能後，可脫離金屬的束縛，形成自由運動的光電子。且光愈強，

攜帶的能量愈大，所釋放出光電子的動能就愈高；而光愈弱，則所釋放出光電子的動能就愈低。

但至 1900 年止，光電效應的實驗結果卻顯示：僅當照射光頻率  $f$  超過或等於某一個最低頻率  $f_0$  時，才有光電子被釋放出來。若  $f$  小於  $f_0$ ，則不論照射光的強度有多強，都無法釋放出任何光電子（圖 8-2）。亦即，光電子是否產生只和入射光的頻率有關，而和光強度無關。對不同金屬材料，有不同的最低頻率。

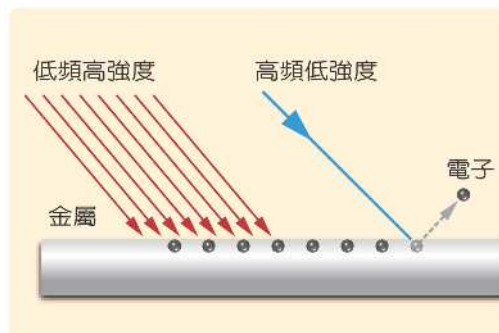


圖 8-2 金屬表面可否釋放電子，與照射光的強度完全無關，只與照射光之顏色（或頻率）有關。

## 光電效應

### 二、光子

若由上述實驗結果，光的波動性質，已無法有效地解釋光電效應的現象，必須要有新的觀念或原理來詮釋此現象。1905 年，愛因斯坦提出了簡單、但又令人驚奇的想法，來詮釋光電效應的實驗。他體會出在微觀世界裡，許多物理量只具有某種最小、或基本的數值，這個與此物理量相關的基本數值，稱為此物理量的量子（quantum）。他認為光在空間中傳播雖然具有波動性，可產生干涉與繞射的現象，但當光與物質（如金屬）作用時，則完全不像是一種連續的波，而像是一小包或一小塊的能量顆粒，他稱此每一小塊的能量包為一顆光量子（light quantum），後來被稱為光子（photon）。而每一個光子的能量  $E$  直接正比於光的頻率  $f$ ，即

$$E = hf \quad (8.1)$$

其中  $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$  稱為普朗克常數（Planck constant），是由實驗所決定的。

在強照射光中，每秒有大量的光子抵達金屬表面；在弱光中，每秒則只有較少光子抵達金屬表面。此外，光有不同的顏色，不同顏色的光，其光子有不同的能量，頻率較高的光子，則具有較大的能量。

#### 範例 8-1

- (1) 波長為 500 nm 之綠光，所對應光子的能量為多少焦耳？
- (2) 在討論微觀的物理現象中，一般常用的能量單位為電子伏特（eV），而  $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$ ，則 500 nm 之綠光的光子能量為多少 eV？

【相關練習：習題 1 ~ 3】

分析 1. 光波長  $\lambda$ , 頻率  $f$  與光速  $c$  之關係： $f = \frac{c}{\lambda}$

2. 光子能量  $E = hf$ , 其中  $h = 6.6 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$

解 (1) 綠光頻率  $f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3.0 \times 10^8}{500 \times 10^{-9}} = 6.0 \times 10^{14} \text{ (Hz)}$

綠光光子能量  $E = hf = (6.6 \times 10^{-34}) (6.0 \times 10^{14}) = 4.0 \times 10^{-19} \text{ (J)}$

(2) 綠光光子能量  $E = \frac{4.0 \times 10^{-19} \text{ J}}{1.6 \times 10^{-19} \text{ J/eV}} = 2.5 \text{ eV}$

在提出光子概念後，有關光子與物質的作用，愛因斯坦進一步做了下述假設：

1. 光子不是被完全吸收，就是完全不被吸收。在金屬中的電子不可吸收非整數個（如 0.6 個）光子，而只可吸收一個光子。
2. 光子被電子吸收後，其能量全部傳送給一個電子。

這些想法在說明：照射光的能量是以不連續的顆粒狀光子方式呈現，光子的能量不可以被分割，一顆光子的能量，只可傳送給一個電子。但在古典物理中，能量可以連續地被切割或分配，兩者觀念差異很大。

要將電子自金屬中釋放出來，電子必須自外界吸收某種最低的能量才能達成。而不同金屬內部電子變成光電子所需的最低能量，有不同的值。

利用光子的概念及原理，愛因斯坦便可解釋光電效應的現象：光線是一群能量為  $hf$  的光子。當它照射在金屬表面，且每個光子只能被一個電子所完全吸收。如果吸收光子後的電子能量小於產生光電子所需的最低能量，則不論光線多麼明亮，均不足以提供足夠的能量給金屬內部電子，讓它脫離金屬束縛。但只要照射光的光子能量大於產生光電子所需的最低能量，即使是非常微弱，也可讓一些吸收光子能量的電子獲得足夠能量，克服金屬束縛，成為可自由運動的光電子（圖 8-3）。

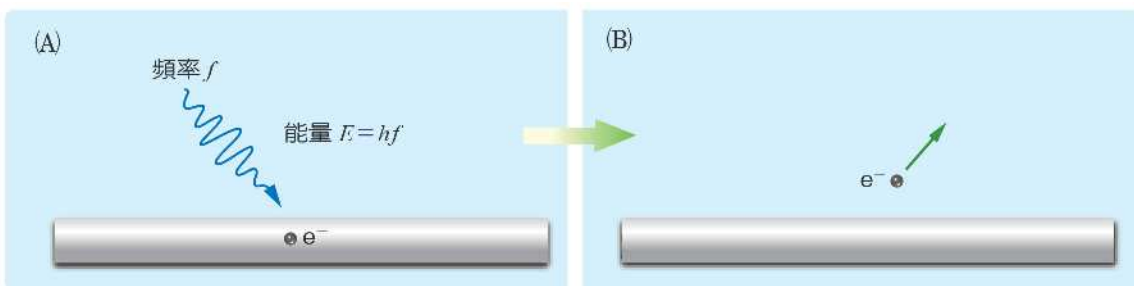


圖 8-3 光電子的產生：(A)若入射光的能量  $E = hf$  大於產生光電子所需的最低能量，當電子吸收了全部的入射光子之能量後，則(B)電子可脫離金屬表面，成為自由運動的光電子。

電磁輻射（光或電磁波）在與物質作用時，交換能量的方式，是以粒子方式進行，即只局限在微小空間點上（如某一顆電子上），而非如波的行為一般散布在整個空間。且每個光子攜帶的能量不是與振幅或光強度有關，而是由光頻率（或顏色）來決定（圖 8-4）。當電磁輻射與電子交換能量時，也是整個光子完全被吸收，或完全不被吸收，而不像波的能量可以連續地被切割或分配。這些都顯示出光的粒子性。

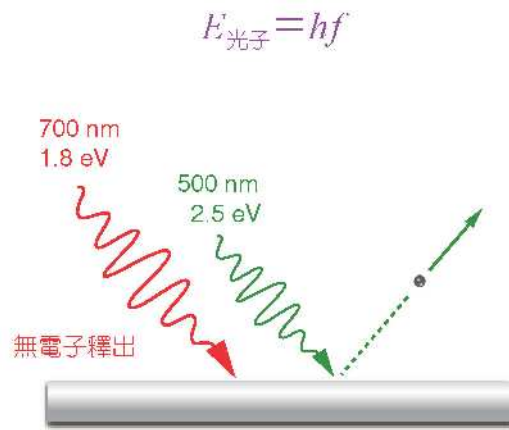


圖 8-4 兩種色光照射在鉀金屬後光電子之行為

### 三、光電效應的應用

光電效應利用入射光將金屬表面上的電子擊出，這些離開金屬的光電子，可產生電流（常稱為「光電流」），若累積到一定數量，便可作為電源用。在電梯或車庫的設計中，電梯或車庫門兩邊裝設有一對光源發射器及接收器，接收器主要是一種金屬板，當它被照射出光電子而產生光電流時，可形成電通路，而讓關門能正常運作。若在關門時，有乘客或小孩仍在電梯邊或通過車庫門，他們將會阻止發射器的光源抵達接收器上，而無法發生光電效應，電流遂中斷，關門程序瞬間停止，而可達到安全目的（圖 8-5）。



圖 8-5 小孩通過正在關閉的車庫門時，會阻擋住發射器的光線，電流瞬間被切斷，車庫門也將馬上停止。

在夜晚，雖然被觀測物無法發出或反射出明亮光線，但仍會產生少量光子，利用夜視鏡內的增強器，可將極少量的光子轉換成電子，然後加以放大並轉換成可見的影像（圖 8-6）。

圖 8-6 夜視鏡將肉眼看不見，僅能發出少量光子的物體，通過增強管的放大後，而可被觀察到。

## 8-2 教學理念

簡介物理學家在 1961 年完成的雙狹縫電子干涉實驗，確定了電子的波動性。並簡介波粒二象性與量子論，並指出適用在微觀尺度下之理論稱為量子論。

## 8-2 物質波

### 一、粒子的波動性

自愛因斯坦提出電磁輻射的粒子性，模糊了粒子與波的界限，而撼動物理世界 19 年後

的 1924 年，一位法國研究生德布羅意 (Louis de Broglie, 1892 ~ 1987) 再次審視此課題，認為自然界必定有某種對稱性，如果光波可以有粒子的特性，為何一般的粒子不能有波動性？換言之，是否存在「物質波 (matter wave)」？

縱使缺少實驗的證據，他提出：運動中的質點，必定伴隨有波動的性質，且若質點之質量與速率已知，則可決定其物質波的波長。大約三年後，實驗物理學家以電子撞擊金屬晶體表面後，可產生與 X 光類似的繞射結果，首先確認了電子的波動性 (圖 8-7)。

圖 8-7 電子撞擊金屬晶體後的電子繞射圖

## 二、電子的雙狹縫干涉

西元 1961 年德國科學家更進一步成功地製造出非常細小的狹縫，當電子通過此狹縫後，可得到很清晰的干涉條紋 (圖 8-8)，與 6-4 節楊氏雙狹縫光干涉圖形的結果，幾乎完全相同，再次清楚地證實了電子所呈現的波動性。

電子雙狹縫干涉實驗，將傳統認為質點僅具有粒子性完全顛覆，且其實驗結果可與理論預測值相當吻合。這使得此實驗在本世紀初，被物理學家評為最美麗的十個歷史實驗中的第一名。

圖 8-8 西元 1961 年首次完成的電子干涉實驗：(A)通過雙狹縫的結果。(B)通過五個狹縫的結果。

## 三、波粒二象性與量子論

電磁輻射 (含可見光、X 光、微波、……等) 在傳播行進時，它們集體地散布在、或占據較大空間，也可產生干涉與繞射現象，光明顯地呈現出波動性質。但在輻射與金屬原子交互作用形成光電效應時，則須視輻射為能量集中於一小束的顆粒 (光子)，而呈現出光的粒子性。因此光具有波粒二象性 (wave-particle duality)，它的行為到底是波或粒子，須依據所執行的實驗來決定。通常在低頻時，如無線電波，幾乎無法產生光電效應，所偵測到之電磁波訊號，可視為連續波。若在高頻時，如可見光或  $\gamma$  射線，通常可察覺出極少數，甚至單一個的光子行為，而適合將光視為粒子。

電子的質量與電荷都集中在空間中非常小的一點上，在實驗室的探測器上，可見到其運動軌跡，如圖 8-9 中很清楚地顯示電子是一種粒子。在電子的繞射與狹縫干涉實驗中，又可清晰地觀察到其繞射圖案與干涉條紋，圖紋呈現出電子是一種波。因此電子也具有波粒二象性，其行為到底是波或粒子，也須依據所執行的實驗來決定。

圖 8-9  $\gamma$  射線 (無法呈現在照片中) 自左端進入，與氫原子碰撞後，出現的電子 (小螺旋) 與正子 (大螺旋) 及氫原子 (長線) 的運動軌跡。

光有時是波，有時是粒子；電子有時是粒子，有時是波。它們到底真正是何物？直到目前，不論是日常生活用語，或是物理發展中的術語，都還沒有出現一個適當的概念名詞，可以正確完整地單獨代表光 (或電子)。我們僅能比較無誤地說：光 (或電子) 既不完全是波，也不完全是粒子。

光的粒子性表示電磁波在微觀尺度中，與原子交互作用的能量不是與振幅有關，也不具有任何連續值，而是具有特定的數值  $hf$ ，此值也稱為能量量子 (energy quantum)，並稱光

的能量被量子化 (quantized)。

探討輻射與原子交互作用時的光量子行為，以及在微觀尺度內基本粒子與其他相關的量子化特性，所發展出來的理論，稱為量子論 (quantum theory)。在微觀尺度下，牛頓運動定律因無法詮釋這些量子化現象，而不再適用。

### 8-3 教學理念

原子核外的電子因具有波動性，只能具有特定的能量。電子可以經由吸收或發射光子由一個能階躍遷到另一個能階，產生原子光譜。

## 8-3 原子光譜 光譜

### 一、原子內部能量的量子化——定態、能階

在 1-1 節裡，曾簡單提到近代物理的發生，最初是為了想了解黑體輻射實驗所引發的理論缺陷，它是由普朗克於 1900 年提出能量不連續的觀點所解決。五年後愛因斯坦提出光子概念，詮釋了完全不同的光電效應。再約十年後，有位年輕丹麥物理學家波耳 (Niels Bohr, 1885 ~ 1962) 認為這些創新觀念絕不是偶然，也不是僅局限於上述兩個特定的現象，他開始思考，並利用能量不連續性與光子此兩新觀念，來解決當時實驗已甚為成熟但仍無法了解的原子光譜問題。

西元 1911 年拉塞福認為原子是由帶有正電的原子核，以及環繞原子核運轉的電子所共同組成 (見 2-2 節)。若核外僅有單一電子，則此電子可在任何軌道上繞著原子核作圓周運動，1913 年波耳大膽假設電子不可在任意軌道，而只可以特殊的半徑繞著原子核運動，且只攜帶特定的能量 (動能與位能之和)。他稱此特定狀態為定態 (stationary state)，亦即一個定態必對應於一特定的電子軌道半徑。在特定軌道繞核運轉的電子也僅具有特定的、不連續的能量  $E_n$ 。換言之，原子內電子的總能量為量子化，這些被允許特定的、不連續的原子能量  $E_1$ 、 $E_2$ 、 $E_3$ 、…… 稱為原子的能階 (energy level)，代表這些不連續能階特性的正整數  $n$ ，則稱為量子數 (quantum number)。

原子的能階有高低不同的能量，最低能階  $E_1$  的狀態稱為基態 (ground state)，量子數  $n=1$ 。其餘狀態稱為激發態 (excited state)，量子數  $n=2$ 、3、4、……，依序稱為第一激發態、第二激發態、……。圖 8-10 為四個最低能階的軌道半徑示意圖。

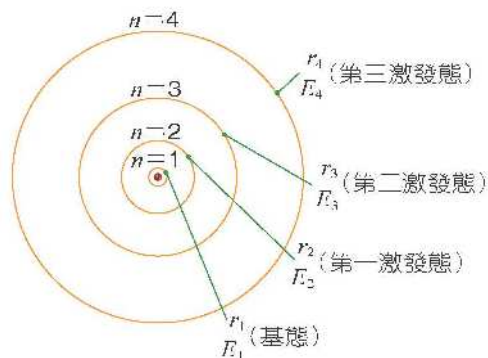


圖 8-10 為要滿足電子運轉時，其波長與圓周長固定關係，所得到的氫原子軌道半徑  $r_n$ ，對應的總能量  $E_n$ 。



## 二、躍遷與光譜

對於原子內能階的轉化，波耳接著提出了以下革命性的想法：

圖 8-11 原子躍遷觀念與光子關係的開創者 —— 波耳

1. 原子內的電子可吸收光子，而「跳躍」到較高能量的狀態。按能量守恆律，此光子的能量  $hf$  必須等於原子後來的高能階與初能階之能量差  $\Delta E$ ，即（圖 8-12）

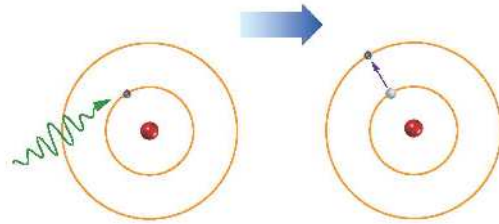


圖 8-12 原子吸收光子後，可躍遷至高能階狀態。

$$hf = \Delta E = E_{\text{末}} - E_{\text{初}} \quad (8.2)$$

2. 原子內的電子可放射出光子，而「跳躍」到能階較低的狀態。按能量守恆律，此光子的能量  $hf$  必須等於初能階與後來的低能階之能量差  $\Delta E$ ，即（圖 8-13）

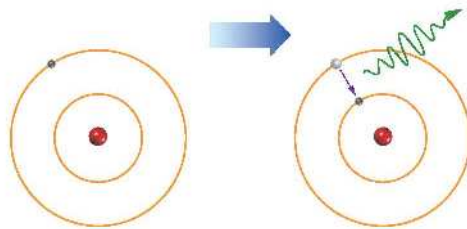


圖 8-13 原子放射出光子後，可躍遷至低能階狀態。

$$hf = \Delta E = E_{\text{初}} - E_{\text{末}} \quad (8.3)$$

此種跳躍稱為躍遷（transition）。換言之，原子可藉著吸收或放射出特定頻率的光線（或特定能量的光子），自一定態躍遷到另一定態。若在垂直方向上將能階自最低的基態，依序以水平直線向上畫出各能階的能量值  $E_1$ 、 $E_2$ 、 $\dots$ 、 $E_n$ 、 $\dots$ ，及對應的量子數  $n = 1, 2, 3, \dots$  的能階圖（圖 8-13），可以清楚地看出各種躍遷與能量的變化。

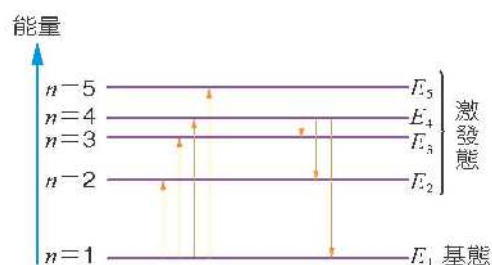


圖 8-14 能階示意圖含對應之量子數  $n$  及能量大小  $E$ 

由波耳的概念可以得到以下一些很重要的推論：

1. 原子的穩定性：原子的基態由於沒有更低的能階供它躍遷，此原子若不吸收光線，則可以穩定地停留在基態。
2. 原子藉著吸收光子可形成分離的吸收譜線：只有特定頻率的光線，它所對應光子的能量剛好等於兩個原子定態的能階差值，才能使低能階狀態下的原子吸收光子能量後，躍遷至高能階狀態，而原連續光譜線上，因該特定頻率的光線將消失而形成暗線（圖 8-15）。

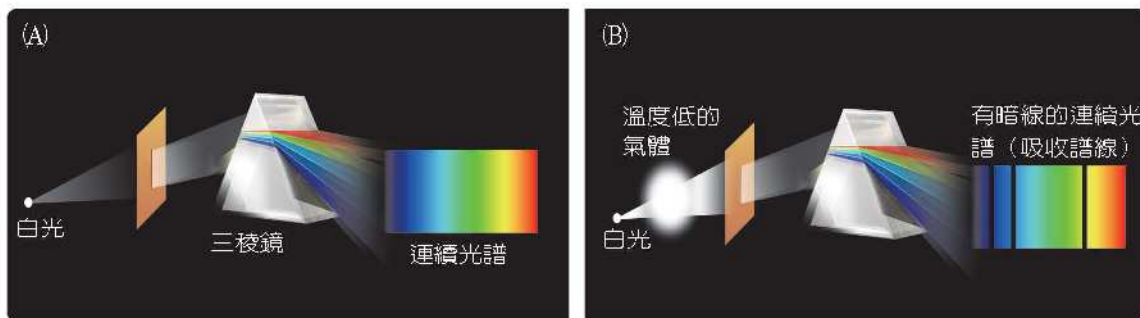


圖 8-15 (A)連續光譜圖：可由白光通過三稜鏡後形成。(B)吸收光譜圖：白光通過氣體後，氣體可吸收其中特定光線而躍遷，使得連續光譜中缺少該特定光線，而呈現暗線。

3. 原子藉著放射光子可形成分離的放射譜線：只有特定頻率的光線，它所對應光子的能量剛好等於兩個原子定態的能階差值，才能自高能階狀態的原子中被放射出來，並在譜線上形成亮線（圖 8-16）。

圖 8-16 自高溫氣體放電管內的單一氣體元素輻射出的光線，所形成之放射光譜圖：(A)氦(He)。(B)氬(Ar)。(C)汞(Hg)。

利用這些觀點，波耳準確地詮釋出氫原子放射光譜線。在可見光部分是氫原子自高能階躍遷至  $n=2$  狀態時，釋放出之光子所形成的（圖 8-17）。

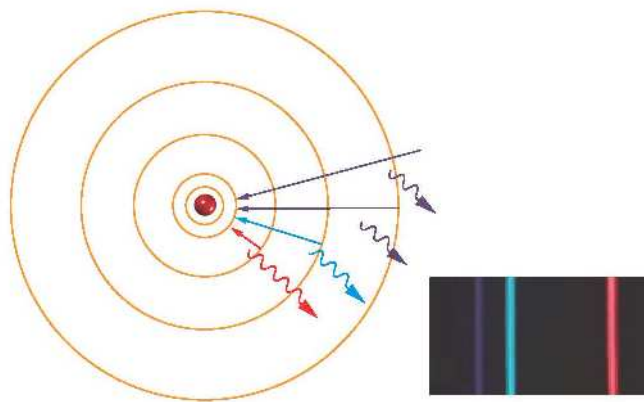


圖 8-17 氫原子的可見光譜圖，分別是自高能階躍遷至  $n=2$  狀態時，釋放出的光子所形成。

由於原子各種定態的能量是由原子內運動電子的能量來代表，不同的元素含有不同數目的電子與相異的定態，因此也就有不同的能階。不同能階的定態可以吸收或放射出不同頻率的光線，所以每個元素便有了自己特殊唯一的譜線。如此，藉由測量一個物體發出的原子光譜，



就可以推論出該物體的組成成分(圖 8-18)。

圖 8-18 不同的原子內部有不同能階，會造成不同的放射光譜線。

### 範例 8-2

一原子具有 4.0 eV 與 6.0 eV 兩最低能階的定態，求當原子自基態躍遷至激發態時，所吸收光子的能量為多少 eV？

【相關練習：習題 8. ~ 10.】

**分析** 吸收光子之能量  $hf = \Delta E = E_{末} - E_{初}$

**解**  $E_{末} = E_{激發態} = 6.0 \text{ eV}$ ,  $E_{初} = E_{基態} = 4.0 \text{ eV}$

故吸收光子能量  $= E_{激發態} - E_{基態} = 6.0 - 4.0 = 2.0 \text{ ( eV)}$

## 要點整理

### 重要概念

- 光電效應與光電子：光照射在金屬上，於其表面釋放出電子的現象。被釋放出的電子稱為光電子。
- 電磁輻射與物質作用時，交換能量只局限在微小的空間點上，即是以粒子（光子）方式進行。光子與物質作用時，其能量不是被完全吸收，就是完全不被吸收。
- 量子：在微觀世界裡，許多物理量只具有某種最小或基本的數值。
- 波粒二象性：同時具有波動及粒子性質的現象。光（波）具有粒子性質，而運動中的質點（粒子）亦具波動的性質。
- 量子論：探討電磁輻射與原子交互作用時的光量子行為，及其他在微觀現象中的量子化行為所發展出來的理論。在量子論中，牛頓運動定律不再適用。
- 定態：繞原子核運轉的電子僅具有特定能量之狀態。
- 原子能階：稱定態下電子具有特定的、不連續的能量。具有最低的能階  $E$  之狀態稱為基態，其餘狀態稱為激發態。
- 躍遷：原子內的電子吸收光子而跳躍到能量較高的現象。原子內的電子也可以發射出光子而跳躍到能量較低的狀態。

### 基本原理

- 光子能量：每個光量子（或光子）的能量正比於光的頻率  $f$

$$E = hf \quad (8.1)$$

- 光電效應原理：光電子能否產生只和入射光的頻率有關，而和光強度無關。
- 原子躍遷關係：原子內的電子吸收（或發射）頻率為  $f$  的光子而跳躍到能量較高（或較低）的狀態時，其能量差  $\Delta E$  等於

$$\Delta E = E_{高} - E_{低} = hf$$

### 分析應用

- 每個元素有特殊的光譜。測量一個物體所發出的原子光譜圖，可以推論出物體內部的組成成分。

### 名詞術語

光電效應、光電子、光子、物質波、波粒二象性、量子化、能量量子、量子論、定態、能階、

## 迷思概念辨析



### 概念錯誤

光與原子交互作用時，光愈明亮其能量愈大，愈暗淡其能量愈低。

原子的放射光譜是由電子在原子核外固定軌道上運動時，所輻射出來的電磁波形成。



### 概念正確

光與原子交互作用時，光子能量與光頻率成正比，與光的明亮強弱完全無關。

原子內電子自高能量狀態躍遷至低能量狀態時，釋放出的能量以光子形式脫離原子，而形成原子的放射光譜。

## 習題

### 8-1 光電效應與光子

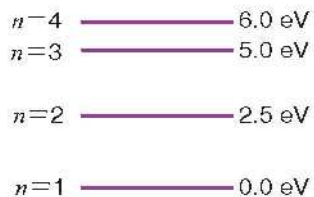
- ( ) 1. 頻率為  $8.0 \times 10^{14} \text{ Hz}$  之光線，所對應光子的能量為多少焦耳 (J) ?  
(A)  $3.0 \times 10^{-19}$  (B)  $4.2 \times 10^{-19}$  (C)  $5.3 \times 10^{-19}$  (D)  $6.0 \times 10^{-18}$   
(E)  $5.0 \times 10^{-18}$ 。
- ( ) 2. 一波長為  $600 \text{ nm}$  的光線，所對應光子的能量為多少焦耳 (J) ?  
(A)  $3.3 \times 10^{-19}$  (B)  $4.0 \times 10^{-19}$  (C)  $5.2 \times 10^{-19}$  (D)  $6.0 \times 10^{-18}$   
(E)  $3.3 \times 10^{-18}$ 。
- ( ) 3. 已知一光照射一金屬表面後，恰可釋放出電子。下列有關釋放電子之敘述，何者正確？(應選三項)  
(A)若將此光的亮度減弱，則無法釋放出電子  
(B)若將光波長變短，則可釋放出電子  
(C)若將光波長變長，則無法釋放出電子  
(D)若將光波頻率增大，則可釋放出電子  
(E)若將光波頻率增大，則無法釋放出電子。
- ( ) 4. 以  $400 \text{ nm}$  波長的光照射到一金屬上，恰好可釋放出光電子來，則以下列何種波長的光照射到同一金屬，可釋放出光電子來？(應選兩項)  
(A)  $300 \text{ nm}$  (B)  $350 \text{ nm}$  (C)  $450 \text{ nm}$  (D)  $500 \text{ nm}$  (E)  $550 \text{ nm}$ 。
- ( ) 5. 在光電效應實驗中，若欲增加釋放出光電子的動能，則應該如何操作？(應選兩項)  
(A)增加照射光的亮度 (B)降低照射光的頻率 (C)降低照射光的波長 (D)增加照射光的光子數目 (E)選用較大能量的入射光子。

## 8-2 物質波

- ( ) 6. 下列哪些實驗，可以證明電子具有波的性質？（應選兩項）  
(A)電流的磁效應 (B)電磁感應 (C)繞射 (D)雙狹縫干涉  
(E)光電效應。

## 8-3 原子光譜

- ( ) 7. 當原子內之電子處於  $n=3$  的定態時，吸收光子後，電子可能到哪個定態？  
(A)  $n=0$  (B)  $n=1$  (C)  $n=2$  (D)  $n=3$  (E)  $n=5$ 。
- ( ) 8. 當原子內之電子處於  $n=3$  的定態時，在此原子的放射光譜上，最多可觀察到多少光譜線？  
(A) 1 (B) 2 (C) 3 (D) 4 (E) 無限多。
- ( ) 9. 若一原子之能階圖如右圖所示，在此原子放射光譜圖上，可觀察到幾條光譜線？  
(A) 3 (B) 4 (C) 5 (D) 6 (E) 7。



- ( ) 10. 原子能階如第 9. 題圖所示，此原子不會放射出何種能量之光子？  
(A) 1.0 (B) 2.0 (C) 3.5 (D) 5.0 (E) 6.0 eV。