

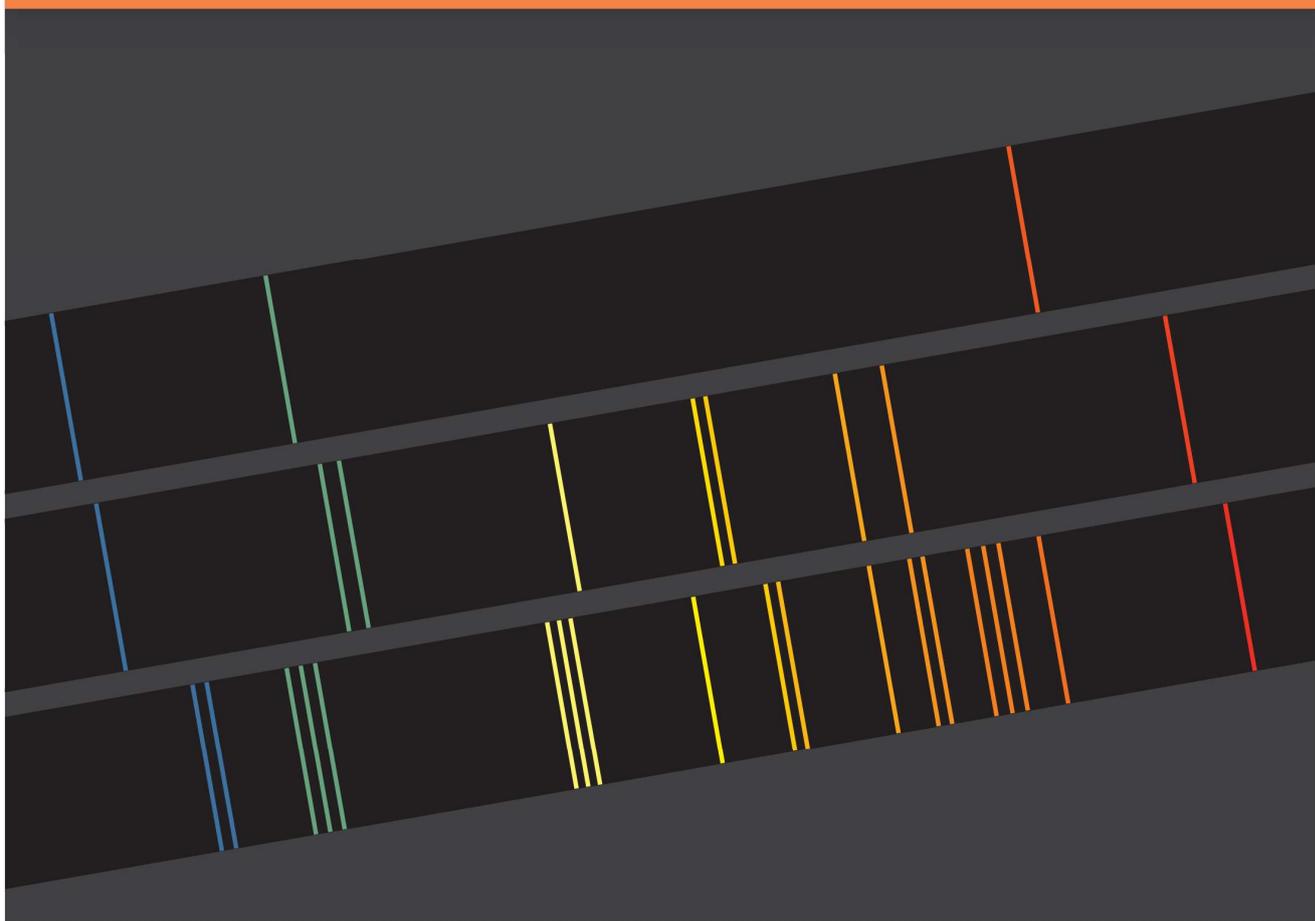
8

量子現象

- ◆ 第一節 波粒二象性
- ◆ 第二節 原子光譜
- ◆ 習題

物理學發展到十九世紀末已有了很多豐碩的成果，這些成果現在統稱為古典物理學，其基礎建立在兩大學門上：一是牛頓力學，二是馬克士威電磁波理論。前者可精確地描述粒子的運動，後者則可描述空間中各處電磁場的變化。在這種古典框架之下，電子被視為粒子，可用牛頓力學來描述其軌跡，而光則被視為一種電磁波，可用馬克士威電磁波理論來描述其各種性質，尤其是干涉、繞射……等波所特有的現象。

但是到了二十世紀初，物理學家發現事情遠比上述的認知來得複雜。在某些實驗中，光其實也能呈現粒子性；反之，電子及其他微觀粒子，例如：中子、質子也能展現波的性質。這是非常令人費解的情況，後來物理學家發展出了完備的量子理論，來描述這種波粒二象性，奠定了二十世紀物質科學飛速進展的基礎。



重點概念圖

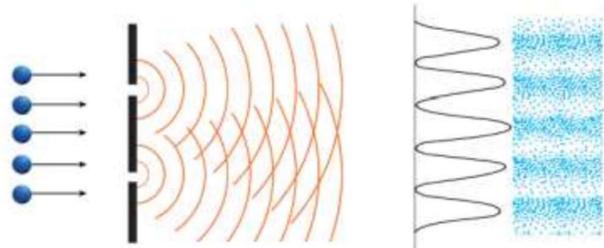
量子現象

波粒二象性

光的粒子性實驗 (光電效應)

- 照射金屬表面的入射光，頻率需超過一定值，方能使金屬釋放電子。
- 光電效應必須以光子概念解釋，無法以電磁波說明。
- 光子能量與頻率成正比。

電子的波動性實驗（雙狹縫干涉實驗）：電子束通過雙狹縫時，會產生干涉現象。



二象性：微觀粒子，如電子、光子，同時具有粒子與波動的特性。

原子光譜

能階：原子的能量呈現不連續分布。

光子的吸收與放射：原子內電子能階改變時，會吸收或放射一個光子。

原子光譜

發射譜：高溫元素產生明亮譜線。每條譜線代表一定波長，且光譜為離散譜。

吸收譜：白光通過氣態元素後，出現暗線光譜。同一元素的吸收譜與發射譜位置相同。

第一節 波粒二象性

一、光的粒子性與光電效應

1. 光電效應的發現

我們在第六章學過光是一種波，即電場與磁場交互感應形成的電磁波。但是到了二十世紀初，物理學家卻發現有時候光會呈現粒子性。光的粒子性主要是透過光電效應 (photoelectric effect) 而為人所知曉的。所謂的光電效應是指將光照射到金屬表面，讓電子從金屬表面跑出來的現象。如圖 8-1 所示，若我們以光照射金屬表面，就可偵測到有電子從金屬表面釋出，這些因光照射而釋出的電子，即稱為光電子 (photo electron)。最早發現這個效應的物理學家，也正是在實驗室製造出電磁波的赫茲。後來赫茲的學生雷納 (Philipp Lenard, 1862 – 1947, 德國人) 更深入地研究此現象，發現了以下幾個結論

1 入射光的頻率必須大於某一特定頻率才會出現光電子。如果光的頻率不夠高，無論其強度有多大，都打不出光電子來。這個特定頻率會依不同的金屬而異，如圖 8-2 所示。

$f > f_0$ 2 入射光強度愈大，金屬表面所放出的光電子數量就愈多，如圖 8-3 所示。越多團光

3 光電子所帶的動能和入射光的強度無關，但會隨入射光的頻率提高而增加。例如：照射紫色光而跑出來的光電子，比照射綠色光而出現的光電子有更大的動能 (圖 8-4)。



Key Point

光電效應是指因光照射而造成電子釋出的現象。

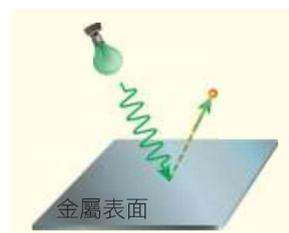


圖 8-1 光照射金屬表面使電子釋出。

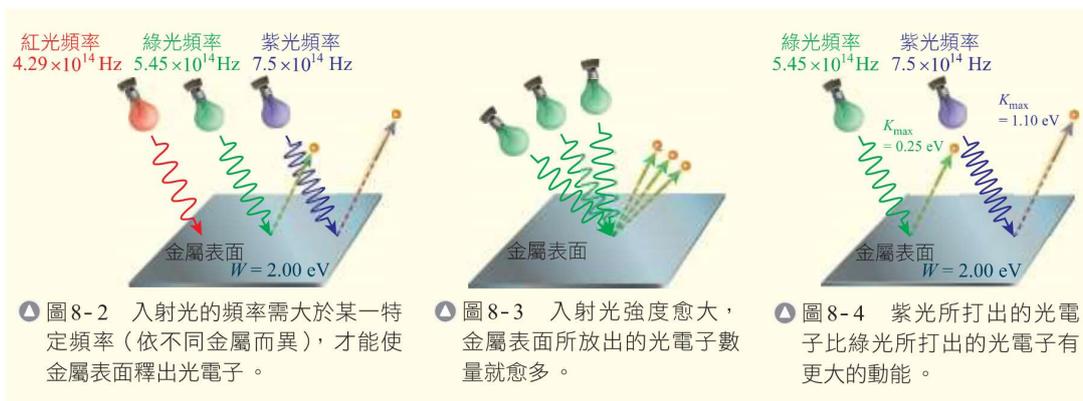
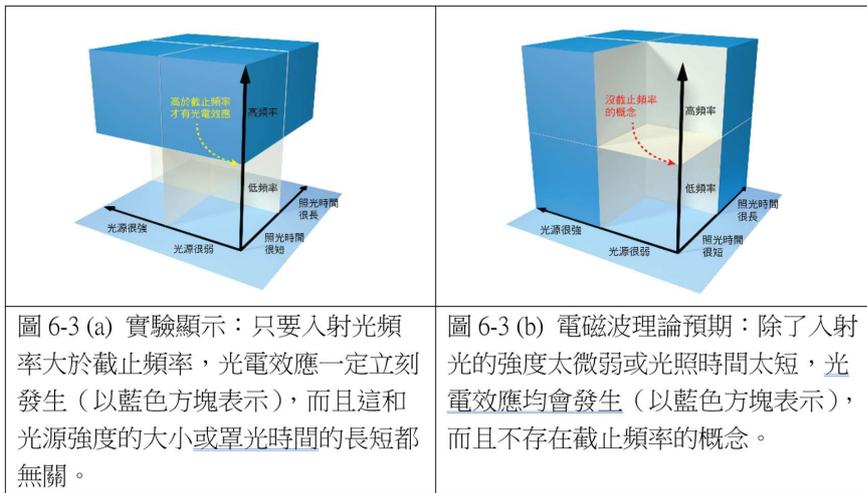


圖 8-2 入射光的頻率需大於某一特定頻率 (依不同金屬而異)，才能使金屬表面釋出光電子。

圖 8-3 入射光強度愈大，金屬表面所放出的光電子數量就愈多。

圖 8-4 紫光所打出的光電子比綠光所打出的光電子有更大的動能。



傳統電磁波理論能量和強度有關，更強能量更大更易將電子打出來，但...
 先看愛因斯坦正確的解釋再回頭來看看這些古典的錯誤解釋

$$hf - W = K \text{ 愛因斯坦光電方程式}$$

$$hf_0 - W = 0 \text{ 底限頻率 } f_0$$



Key Point

●光電效應無法以電磁波理論作出完整解釋。



(X)一個紅光光子的能量大於一個紫光光子的能量。 $f_{紅} < f_{紫}$
 (X)強度大的紅光一個光子的能量大於強度弱但頻率相同的紅光一光子的能量。

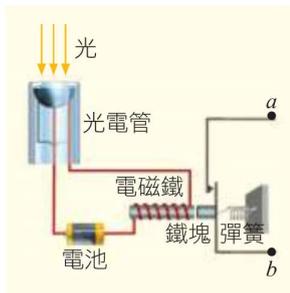
頻率相同光子能量相同
 強度和光子數目有關

總能量 = 光子數 N (強度) \times 單位光能 hf



Key Point

●光由光子組成，而光子的能量正比於頻率。
 ●光電效應可用光子碰撞電子的概念解釋。



▲圖 8-5 光電管可作為光控開關，有光時， a 、 b 兩點是接通的，否則即為斷路。

在馬克士威的電磁波理論中，光所具有的電磁能和光的強度有關。光愈強，光的電磁能就愈大，所以較強的光所打出來的電子，便應該具有較大的動能。因此上述的 1、3 兩點結果，在傳統電磁波理論中非常難以理解。

$$E = hf$$

2. 光電效應的解釋

1905年，愛因斯坦在一篇著名論文中，提出革命性的觀點以解釋光電效應，後來他也因此獲得諾貝爾物理獎。愛因斯坦假設光是由眾多一個個的光量子 (light quantum) 所組成的 (光量子也稱為光子 (photon))，每個光量子都帶有相同的能量 E ， E 和光的頻率 f 成正比：

8·1 式

$$E = hf$$

上式中的比例常數 h 稱為普朗克常數 (Planck Constant)，其值非常小，等於 6.63×10^{-34} 焦耳·秒。譬如說：一束 4.5×10^{14} 赫的紅色光，就是由很多紅光子所組成的，每個紅光子的能量等於 h 乘以紅光的頻率，即 3.0×10^{-19} 焦耳。愛因斯坦對於光電效應的解釋如下：假設能量夠大的光子打上金屬板之後，其能量會全部轉移給金屬內的一個電子，這個電子便可獲得足夠大的能量，而脫離金屬對它的束縛，成為逸出金屬表面的光電子；如果光子頻率不夠高，能量不夠大，電子就不會被打出來。每個光電子的動能，即是它所吸收光子的能量扣掉金屬對於電子的束縛能所剩餘的。因此若光子頻率愈高，光電子離開金屬表面後的動能就愈大，所以愛因斯坦的假設可以輕易說明上述實驗結果。

愛因斯坦之所以能提出光子假設，除了立基於實驗學家的發現，還受了前人理論性工作的影響。這位前人即是普朗克，他是在研究所謂的黑體輻射 (我們在此無需深入討論這是什麼現象，簡單的說明見下頁) 時，於1900年發現了 (8·1) 式，也就是普朗克發現在輻射現象中，能量是某個最小單元的整數倍。這個能量有最小單元的概念完全無法從牛頓力學或是馬克士威電磁波理論推導出來，此革命性的發現開啟了量子論之門。

在愛因斯坦提出光電效應理論之時，實驗還沒有精確到足以驗證愛因斯坦的觀點。後來密立坎 (Robert Millikan, 1868—1953, 美國人) 精確地量出不同頻率的光對電子動能的影響，終

於在1916年證實了光子的能量與頻率成正比，而且其比例常數的大小和之前普朗克所得到的數值相當吻合。

3. 光電效應的應用

光電效應的應用非常廣，例如：光電管 (phototube) 即是利用光電效應將光轉換成電流的裝置，可以應用於電路中。如圖8-5，有光的時候，電路是通的，否則即是斷路，因此光電管可以當作一個光控開關，常應用於例如防範電梯門夾傷人的安全設計。而照相機的光計 (light meter) 也是光電效應的一種應用。在照相時，物體反射的光照到光器的光電板時，會讓光電板放出光電子，形成光電流，我們可利用此光電流來控制光圈的大小(圖8-6)。



▲ 圖8-6 照相用的曝光表。

你知道嗎？

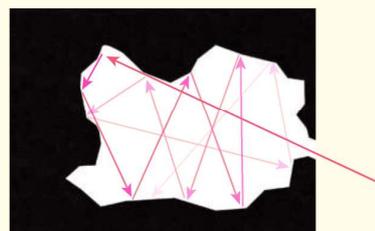
光子的數目有多大？

依據(8·1)式，一個100瓦特的紅光光源，每秒所輻射的光子數目約為 3×10^{20} 個，這是極大的數目。平常我們只會感受到如此大量光子的集體行為，而不會察覺個別光子的存在。一般而言，馬克士威電磁波理論適用於光子數目很大的情況。光的強度(能量)其實是和光子的數目成正比，所以當光的強度較大時，我們可以利用馬克士威電磁波理論來描述光的行為，但是在某些物理現象中(例如：光電效應)，光子的效應是不可忽略的。

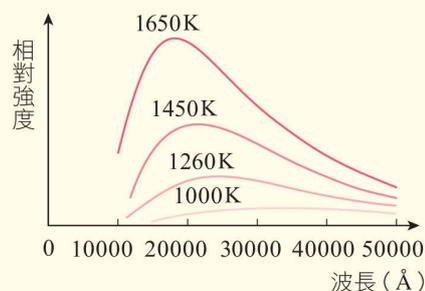
什麼是黑體輻射？

如果一個物體能夠吸收落在它上面的全部輻射，而完全沒有反射，我們就稱這種物體為黑體(black body)。這個名稱是從光學那裡來的，因為如果一個物體能夠吸收所有的入射光，而不將它反射，這個物體就是黑色的。我們平常很難碰到完美的黑體，不過我們可以來模擬一個黑體(圖(a))：想像一個溫度固定的空腔，空腔壁上有一個極小的孔，從外面經此小孔進入空腔的輻射便幾乎沒有機會再跑出來，而總是在空腔內不斷反射或被吸收。所以對於照射到這個小孔上的輻射來說，小孔看起來就非常近似於一個理想的黑體。可是黑體雖然不會反射落於其上的光，但對於一個具有固定溫度的黑體來說，它還是會放出輻射，否則黑體的能量便會愈來愈高，而無法維持在平衡的狀態。實驗學家測量從小孔在不同溫度所發射出來的輻射波譜，得到圖(b)的結果。

普朗克在十九世紀末想從古典物理推導出這個黑體輻射波譜，卻一直未能成功。後來他發現如要得到和實驗相符的波譜，必須假設輻射的能量是某個最小單元的整數倍。對於頻率為 f 的輻射來說，這個最小單位就是 hf 。普朗克非常清楚他的假設是革命性的，因為在古典物理中，不可能有所謂的「最小能量單元」這回事。由於他對物理的觀點其實較為保守，所以他一輩子都對於自己的發現感到不自在。



a 模擬黑體的空腔示意圖。



b 不同的溫度其輻射功率與波長之關係。

為了湊合實驗數據提出理論的普朗克，被逼著走上革命之路的古典物理學家。

例題 8-1

底限頻率/截止頻率

以單色光照射某金屬表面，若要使該金屬放出電子，照射光的頻率最低為 7.5×10^{14} 赫，則

- (1) 此照射光子的最小能量為多少焦耳？
- (2) 依古典物理學，光具有波動性，則此照射光的波長最長為多少公尺？
- (3) 若用最低頻率的光照射金屬表面，其功率為每秒 10 焦耳，則每秒照射金屬表面的光子數為多少個？

分析

光量子的能量要大於或等於電子離開金屬表面所需的能量。故照射光的頻率必須大於或等於某一最低頻率，而波長則必須小於或等於某一最大波長。

- (1) 由公式，光子的能量 $E=hf$ ，即可求出光子的能量。
- (2) 由公式，光的傳播速率（光速） $c=\lambda f$ ，即可求出光的波長。
- (3) 將每秒照射的能量 \div 一個光子的能量 = 每秒照射的光子數。

解 (1) $E=hf=(6.63 \times 10^{-34}) \times (7.5 \times 10^{14})=5.0 \times 10^{-19} \text{ (J)}$

(2) $c=\lambda f \Rightarrow \lambda = \frac{c}{f} = \frac{3.0 \times 10^8}{7.5 \times 10^{14}} = 4.0 \times 10^{-7} \text{ (m)}$ 截止波長

(3) 每秒照射的光子數 $= \frac{10}{5.0 \times 10^{-19}} = 2.0 \times 10^{19} \text{ (個)}$

類題

承例題 8-1：

- (1) 若改用頻率為 8.0×10^{14} 赫的光照射該金屬表面，則跳出金屬表面的電子動能會有什麼改變？
- (2) 若改用相同頻率，但強度較高的光照射該金屬表面，跳出金屬表面的電子動能會有什麼改變？
- (3) 若改用波長為 600 奈米的光照射該金屬表面，電子是否會被打出？

答 (1) 動能變大；(2) 動能不變；(3) 不會

但光電子數增加

二、電子的波動性與電子雙狹縫干涉現象

現在讓我們稍微整理一下前面所討論的問題。在十九世紀末之前，大家都知道光具有波的性質，例如：繞射、干涉……等現象。但是在上一節的討論中，我們知道光電現象迫使我们接受光也具有粒子性，也就是光有所謂的波粒二象性 (wave-particle duality)。反之，我們要問微觀粒子（例如：平常被看待成是粒子的電子）是否也會有這種奇怪的二象性？歷史上最早猜測電子也

有波動性的人是德布羅意 (Louis de Broglie, 1892 – 1987, 法國人, 圖 8-7)。這一節將透過一個實驗來說明電子的確也會呈現波的性質。

如要呈現電子的波動性, 最簡單的辦法就是重複楊氏在 1803 年所作的雙狹縫實驗, 但以電子取代光為波源, 看看是否有干涉現象出現。由於一般而言, 電子的波動性遠比光子不易觀察, 所以很難看出電子的雙狹縫干涉條紋, 一直到 1961 年才為德國蒂賓根大學的瓊森 (Claus Jönsson, 1931 –) 成功的觀測到。在這類實驗中, 電子束從左方之熱燈絲射出來後被電場加速, 然後通過一個雙狹縫 (圖 8-8 (a))。在雙狹縫之右方放置電子探測器來捕捉電子, 此探測器的作用類似楊氏干涉實驗中的屏幕。

電子探測器偵測到的電子數目累積起來會呈現如圖 8-8 (a) 右端所示的條紋, 這種條紋與光的雙狹縫干涉條紋十分相似。如果我們設法讓電子一次一個地通過雙狹縫, 而不是一次通過很多個, 干涉現象還會成立嗎? 物理學家其實可以在技術上一次射出一個電子 (而不是電子束) 來作雙狹縫的實驗。從實驗的結果 (圖 8-8 (b)) 可以看到, 當入射電子數較少時, 電子所落的位置看起來似乎是散亂的; 等到電子數增多後, 電子所呈現的干涉條紋就愈來愈明顯了。圖 8-8 (b) ①~⑤ 分別是螢幕上累積了 10 個、100 個、3, 000 個、20, 000 個及 70, 000 個電子的干涉影像。總之, 在此雙狹縫實驗中, 電子清楚地呈現了波的特性。除了電子, 後來物理學家也觀察到中子的波動性。事實上, 我們如果回頭看光的楊氏干涉實驗, 並將光看成是一個個的光子所組



圖 8-7 德布羅意。

1928 G.P.湯姆森電子繞射實驗
1897 J.J.湯姆森電子荷質比

Key Point
• 微觀的粒子都有波粒二象性。

$$\text{光的粒子性} \begin{cases} E = hf \\ p = \frac{h}{\lambda} \end{cases}$$

$$\text{粒子的波動性} \begin{cases} f = \frac{E}{h} \\ \lambda = \frac{h}{p} \end{cases}$$

MP4
doubles...

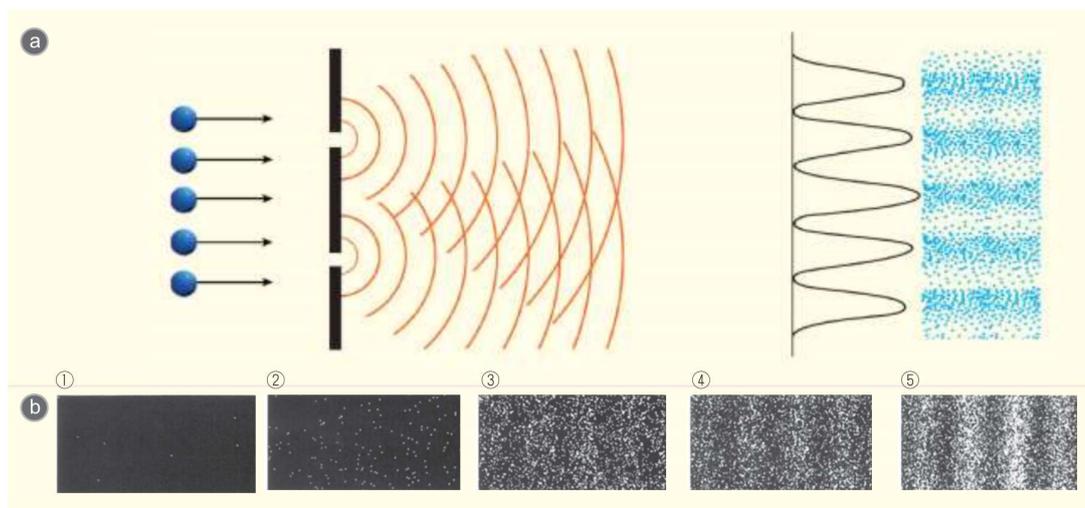
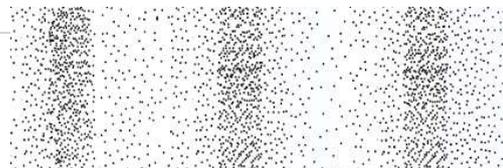


圖 8-8 電子雙狹縫干涉: (a) 干涉實驗示意圖 (右端每一個藍點代表電子落在屏幕上的位置); (b) 當抵達屏幕的電子數目增加時, 由 ① 至 ⑤, 干涉圖樣愈來愈明顯 (白點代表電子所落位置)。

粒子的波動性是什麼意義？



成的，則我們也會發現每個光子在通過雙狹縫之後，會隨機地落在屏幕上的各個位置，可是一旦累計了屏幕各處所接收的光子數目之後，就會看到屏幕上有些地方的光子數目較多，有些地方較少，我們熟悉的明暗干涉條紋就出現了。

三、波粒二象性

牛頓力學所能探討的問題就是物體運動的軌跡，**但物體只要薛丁格的貓有明確的軌跡，就不可能具有波的性質**，因為干涉是一種波動性，所以牛頓力學很明顯的無法處理電子干涉現象。同樣地，馬克士威的電磁波理論也無法應付光子的概念。電子與光怎麼可能既有粒子性又有波性？儘管現今已有成功的**量子理論**來描述**微觀世界的這種波粒二象性**，很多物理學家還是不停地在思考這個問題，例如：愛因斯坦就說過：「我思考量子問題的時間百倍於我思考廣義相對論的時間。」我們目前只能說大自然真的很奧妙！

第二節

原子光譜

一、能階

1. 非連續式的原子能量

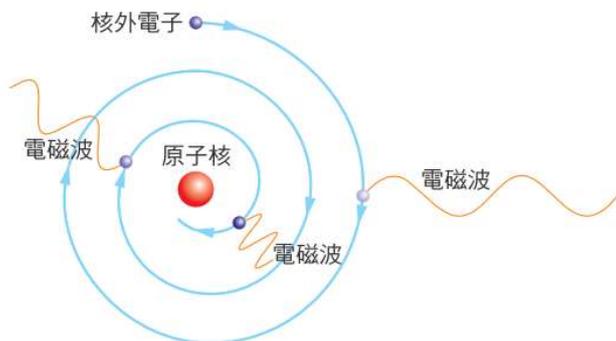
如果電子如上一節所說明的那樣具有波動性，那麼這件事有什麼有意思的後果嗎？當然有的，電子的波動性對於原子的性質有重大的影響，其中很重要的一件事就是，電子在原子中所具有的能量會受到限制，不能夠是任意值。

依據拉塞福原子模型，原子的結構就是電子繞著原子核在運動，好似地球繞著太陽跑那樣。**最初人們假設電子的軌道和行星軌道類似，都是橢圓形**（如果簡化些，可以只考慮圓形）。假如這是真實的狀況，**則電子的能量就會和軌道大小有關**，軌道半徑愈大，電子能量就愈大。由於古典物理對於電子軌道半徑並沒有任何限制，所以原則上，電子在氫原子中的能量可以是任意值。事實上，**根據古典電磁理論**，電子在環繞原子核時，會不停放出輻射而最終墜入至原子核上。

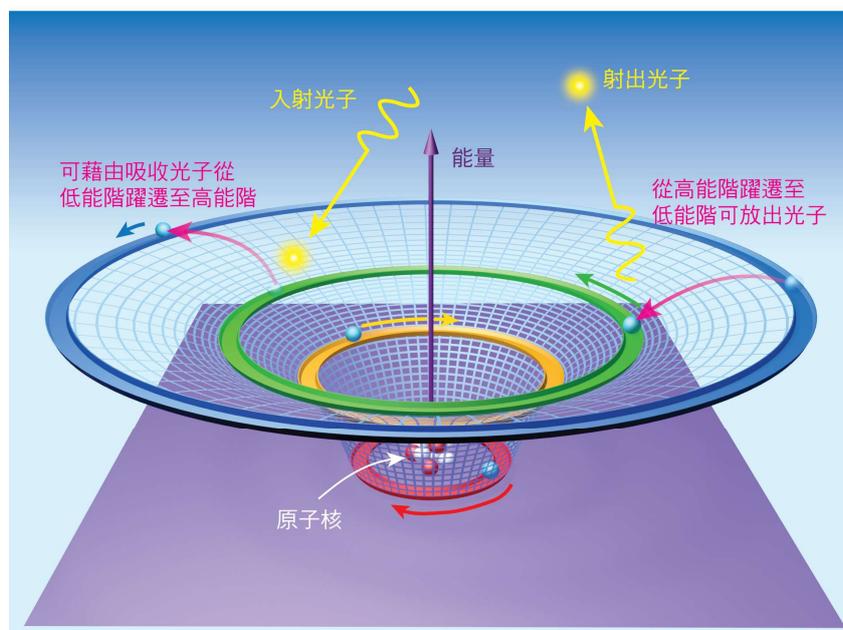
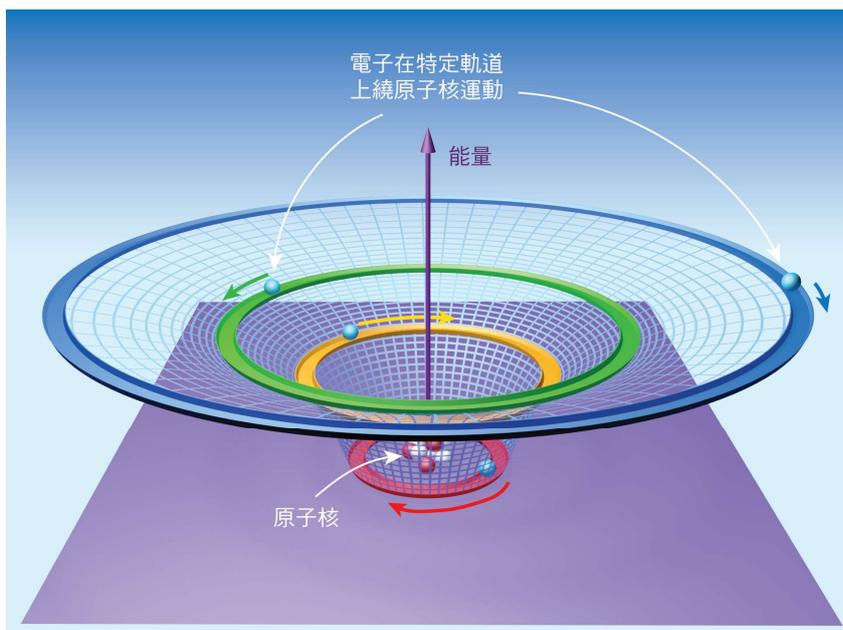


Key Point

• 原子中被束縛的電子只具有特定的能量，即能量不連續。

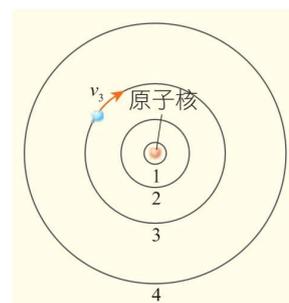


▲ 圖 11-7 拉塞福原子模型的缺點：由於電子在環繞原子核運動時，會不斷地輻射電磁波，導致能量減少，將沿螺旋狀的軌跡，墜落到原子核上。



但是正因為電子具有波動性，所以前述依據牛頓古典物理所獲得的結論是不對的。我們如果修改理論，把電子的波動性考慮進來，就會發現這個奇特的性質：電子在原子中只可以帶有某些特定的能量。我們可以約略想像，電子只能在某些特定半徑的軌道上運轉以理解這種情況（圖8-9）。

波耳氫原子模型



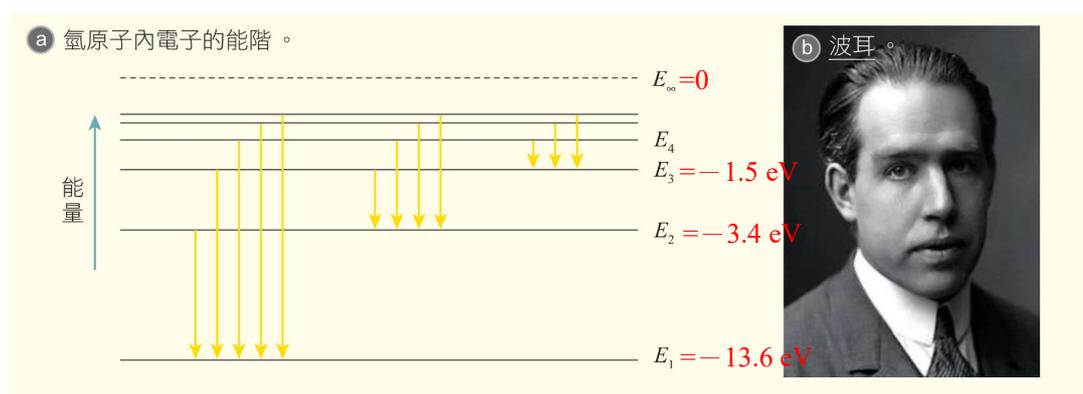
▲ 圖8-9 氫原子電子軌道半徑示意圖。

2. 氫原子內電子能階

以氫原子為例，電子在氫原子中，只能帶有如圖8-10(a)所示的特定能量 E_1 、 E_2 、 E_3 …… E_∞ 等等。 E_1 是最低能量，這時電子處於半徑最小的軌道上，電子離原子核愈遠能量就愈高，而電子剛可脫離原子核束縛時的能量為 E_∞ 。電子的能量如果在 E_∞ 之上，就會成為自由電子，此時電子的能量便可以連續的。 E_∞ 與最低能量 E_1 的差為13.6電子伏特（1電子伏特 = $1\text{eV} = 1.6 \times 10^{-19}$ 焦耳），這個能量稱為氫原子的游離能。我們稱 E_1 、 E_2 、 E_3 ……等能量為能階 (energy level)。由於被束縛在原子核附近的電子，只能具有某些（離散的）特定能量，我們說氫原子電子的能譜有量子化 (quantization) 的現象。除了氫原子，其他原子中的電子也一樣，只能具有某些特定的能量，不過各原子會有其各自不同的能階。

指紋

能階的概念是波耳（圖8-10(b)）在1913年所提出來的，這是革命性的工作，因為能階的存在與電子的波動性有密切關聯，完全無法從古典物理推論出來。



▲ 圖8-10 能階的概念是由波耳所提出的。

躍遷的能量為何？

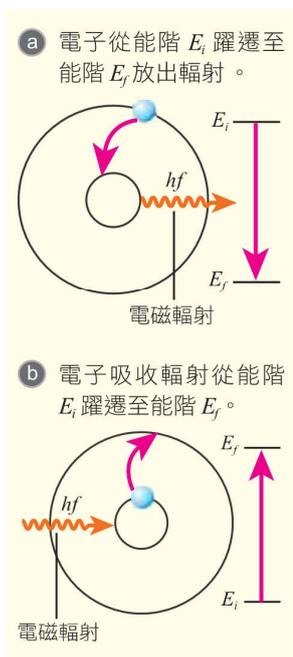


圖 8-11 電子放射與吸收電磁輻射示意圖。

● 電子放射或吸收電磁輻射時，其在原子內的能階會改變。

Key Point

你知道嗎？

連續譜

在離散譜之外，還有一類光譜線稱連續譜 (continuous spectrum)，我們在第六章已見過，例如：~~太陽~~或白熾燈泡所發出的白光在通過光譜儀之後即會呈現連續譜，因為這類白光是由眾多各種頻率的光所組成的。

仔細看太陽光其實是暗線吸收光譜

翁斯傳的標準太陽光譜圖表 $10^{-8} \text{ cm} = 1 \text{ \AA}$

二、發射譜與吸收譜

1. 電子可放射或吸收電磁輻射

前一節介紹了能階的意義，我們接著要說明如何在實驗上證實這個想法。關鍵的現象是原子會發射或吸收電磁輻射這回事。波耳在提出能階的假設之後，進一步設想電子可以從能量較高的能階，躍遷至能量較低的能階，而放出特定能量的電磁輻射。譬如說：如圖 8-11 (a) 所示，電子從能量為 E_i 的軌道，躍遷到能量為 E_f 的軌道，放射出頻率為 f 的電磁輻射， f 可從能量守恆定律與 $E=hf$ 公式求得：

8-2式

$$f = \frac{E_i - E_f}{h}$$

反之，電子也可以吸收特定能量的電磁輻射，從較低能量的能階躍遷至較高能量的能階 (圖 8-11 (b))。在波耳的設想之中，由於原子有不連續的能階，因此它只能發射或吸收某些特定頻率的電磁輻射。所以我們只要測量出原子發射或吸收的電磁波譜，就可以驗證能階的講法。請注意，電子處於 E_i 能階時，是最穩定的狀態。因它只能吸收電磁輻射，不會放射電磁輻射，這樣就避開了在古典拉塞福原子模型中，電子會不停地輻射能量，最後墜落到原子核上的命運。

2. 發射譜

我們如何知道原子發射出什麼頻率的電磁波？在可見光波長範圍內，可使用三稜鏡光譜儀 (spectrometer)。這個裝置利用折射現象，讓光在通過三稜鏡後，不同波長的光往不同的方向色散開來 (圖 8-12 (a))，我們便可在屏幕上看到清楚的亮線，這些亮線稱為光譜線 (spectral line)，這些光譜線即是原子的發射譜 (emission spectrum)。每一條光譜線都代表某特定波長的光，這些光的波長可從條紋的位置分析出來。這些不連續的光譜線構成了離散譜 (discrete spectrum)。圖 8-12 (b) 顯示了氫、汞及氖這三種不同元素在可見光波長範圍所放射的電磁波，在經過光譜儀的解析之後，所呈現的離散譜。

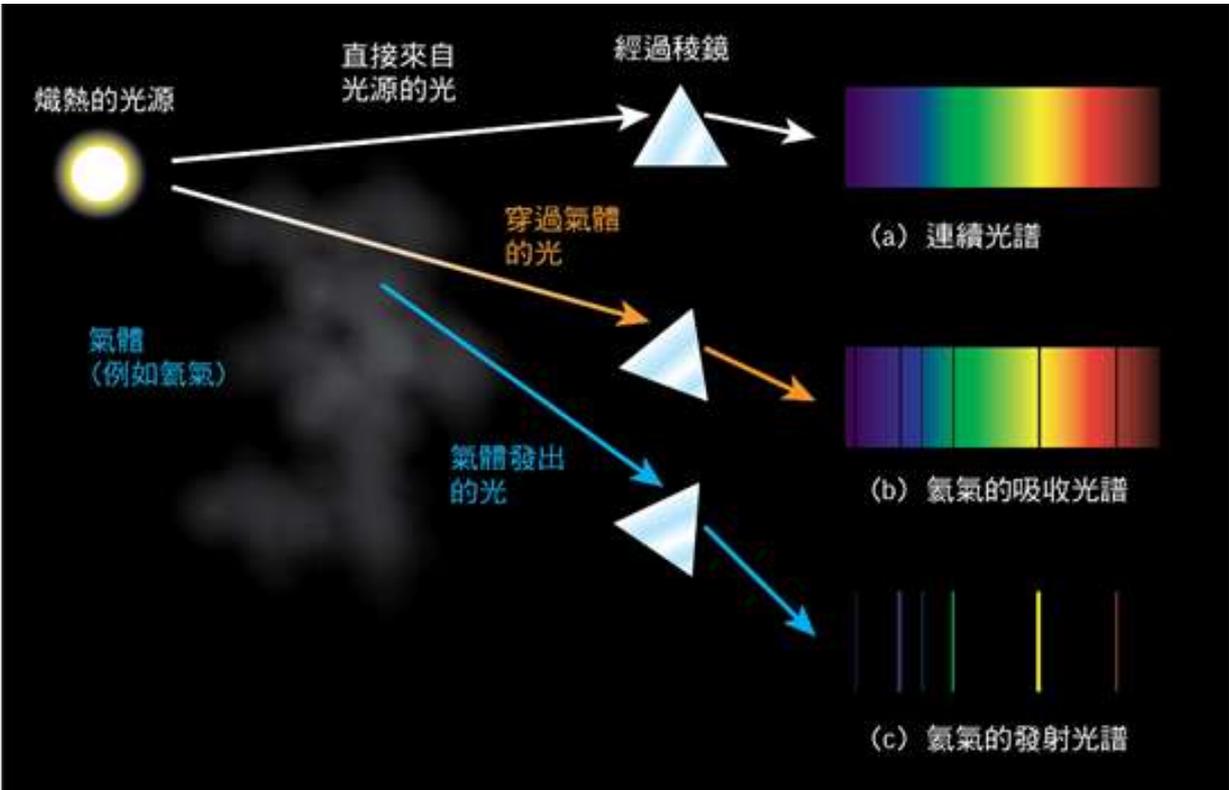
發射光譜
明線光譜



偵探伽...



P207_S...



3. 吸收譜

至於原子吸收什麼頻率的電磁波，我們也可以利用相同的原理來得知：讓頻率連續的白光通過（氣態的）原子，然後用光譜儀來分析穿透的光，我們發現有幾條暗線會出現在背景的連續譜中，這表示這些暗線所代表的光被部分吸收了，所以強度較弱。這幾條暗線就是該氣體元素的吸收譜 (absorption spectrum)。圖 8-13 是氫原子的吸收譜。

由於各元素有其特殊的原子能階，所以不同的元素有不同的（發射與吸收）譜線，因此我們可以利用光譜儀來區分不同的元素。我們也可利用同樣的概念來分析分子光譜，以區分不同的分子。總之，我們只要分析一個物體所發出的光譜線，便可推論它的組成成分。天文學裡常以此來得知遠處恆星所含的元素。

我們在這一節先介紹了能階，然後才說明光譜線的意義。真實的歷史發展其實是倒過來的，也就是說物理學家先發現原子有離散譜，然後分析各光譜線的波長，得到這些波長間的一些規律，最後才由波耳設想出能階的概念來解釋光譜線的成因。以氫原子為例，波耳的能階模型極為成功，不僅能說明已發現的光譜線，甚至能預測出還有哪些光譜線有待發現（圖 8-14）。在波耳



• 不同元素有不同發射譜與吸收譜。

Key Point

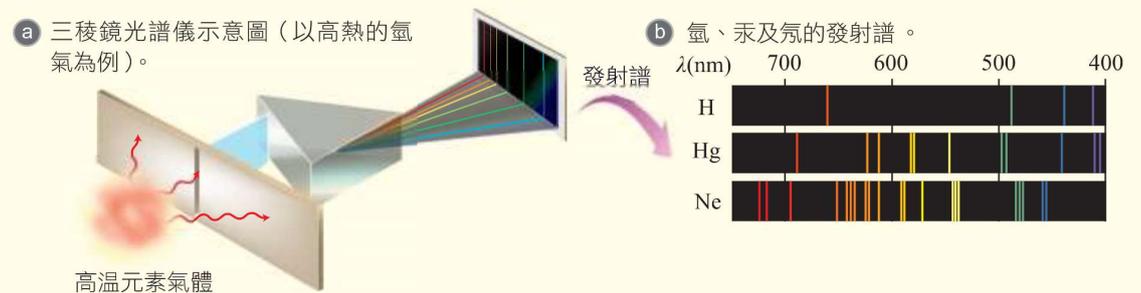
• 分析物體發出的光譜線，可以判斷其組成。

1885 巴耳末光譜波長公式

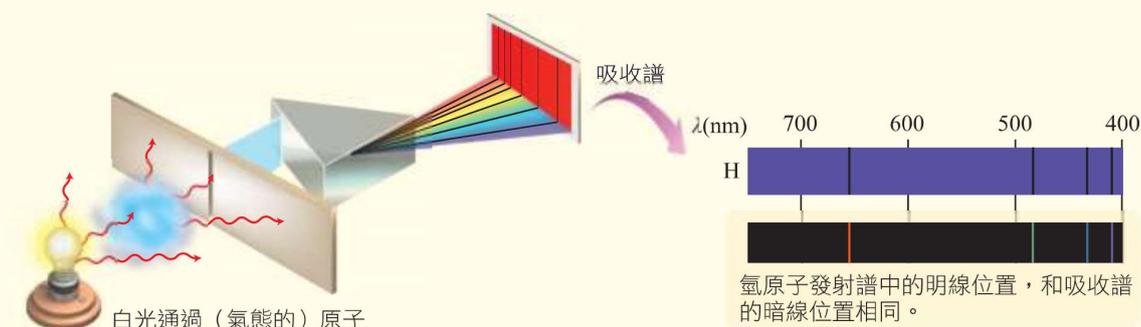
1913 波耳氫原子模型

1923 德布羅意物質波(粒子的波動性)

1926 玻恩物質波的機率解釋

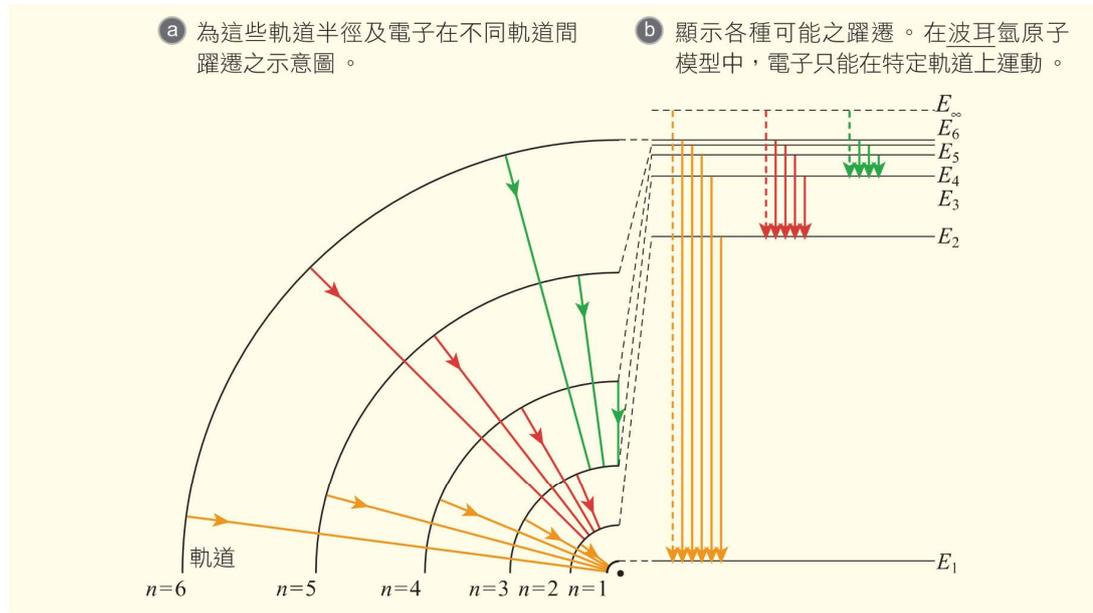


▲ 圖 8-12 發射譜的觀察。



▲ 圖 8-13 氫原子的吸收譜，暗線的位置和發射譜中明線位置相同。

之後，物理學家的工作就變成尋找一完備的理論來推導波耳的能階假設。這項工作最後由海森堡、薛丁格、狄拉克等人完成。



▲ 圖 8-14 電子從氫原子之高能階躍遷至低能階可放出特定頻率之電磁輻射

例題 8-2

某一氫原子的電子由高能階軌道躍遷至低能階軌道，放出能量為 1.9 電子伏特的光子，則

- (1) 此光子的頻率為多少？
- (2) 此光子為可見光嗎？（請查圖 6-28）

分析

光子的能量、頻率的關係式為 $E = hf$ 。

解 (1) 此光子頻率為 $f = \frac{E}{h} = \frac{(1.9 \text{ eV}) \times (1.6 \times 10^{-19} \text{ J/eV})}{6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}} = 4.6 \times 10^{14} \text{ Hz}$

- (2) 此光子為可見光。

類題

下列有關氫原子光譜的敘述何者正確？（多選）(A) 氫原子光譜為連續光譜 (B) 氫原子發射光譜中有四條可見光譜線，吸收光譜中也會有四條完全對應的暗線 (C) 氫原子光譜可以顯示原子內部有能階（能量不連續）的存在 (D) 波耳解釋氫原子光譜，必須利用光子的能量關係式 $E = hf$ (E) 放射光譜中，電子由較高能階躍遷至低能階，產生紅色光譜線能階差為 ΔE_1 、產生綠色光譜線的能階為 ΔE_2 ，則 $\frac{\Delta E_1}{\Delta E_2} > 1$ 。

答 (B)(C)(D)



重點複習

第一節 波粒二象性

1. 光照射到金屬表面時，會有電子從金屬表面跑出來的現象，稱為光電效應。跑出來的電子稱為光電子。
2. 光電效應的特性：
 - (1) 入射光強度愈大，金屬表面所放出的光電子數量就愈多。
 - (2) 每個光電子所帶的動能和入射光的強度無關，但會隨入射光的頻率提高而增加。
 - (3) 入射光的頻率必須大於某一特定頻率，才會出現光電子。
3. 頻率為 f 之光子具有 $E = hf$ 的能量。
4. 光電效應顯示光具有粒子性，電子的雙狹縫干涉現象顯示了電子也具有波動性，即光與電子皆具有波粒二象性。

第二節 原子光譜

1. 原子裡的電子能階有量子化的現象，電子在能階間躍遷時會發射或吸收電磁輻射。
2. 原子發射（或吸收）電磁輻射時，是以量子或電磁輻射的形式進行，其頻率為 $f = \frac{E_i - E_f}{h}$ 。
3. 原子光譜為離散譜。原子由高能階躍遷至低能階時，會產生發射譜。原子吸收輻射，由低能階躍遷至高能階時，會產生吸收譜。顯示能量的不連續性。
4. 不同的元素具有不同的原子光譜，我們可以利用光譜儀來區分不同的元素。

習題



一、基本題

第一節 波粒二象性

1. 光子 A 的能量是光子 B 的兩倍，則光子 A 的頻率是光子 B 的 _____ 倍。
2. 在光電效應中，欲增加光電子的動能，應該（多選） (A) 增加入射光的波長 (B) 增加入射光的強度 (C) 增加入射光子的數目 (D) 選用能量較大的光子 (E) 選用波長較短的光子。
3. 頻率一定的單色光在真空中的波長為 λ ，波速為 c ，則
 - (1) 單色光的頻率為何？
 - (2) 單色光的光子能量為何？
4. 下列有關光子與波粒二象性的敘述何者正確？ (A) 光子的能量大小，紅光 $<$ 藍光 $<$ 綠光 (B) 馬克士威的電磁理論說明光具有粒子性 (C) 光子理論是愛因斯坦提出的 (D) 牛頓力學可以說明電子的干涉現象 (E) 微觀粒子具有波粒二象性只是一種假設（理論）。
5. 光電效應與電子雙狹縫干涉的實驗結果，何者能支持光的粒子性？何者能支持電子的波動性？

第二節 原子光譜

6. 下列關於氫原子光譜與原子能階之說明，哪些正確？（多選） (A) 氫原子所發出之光譜線為離散譜 (B) 各光譜線相當於氫原子所發出之某一特殊頻率的電磁輻射 (C) 原子能階有量子化的現象 (D) 位於低能階的電子，可以靠躍遷到其他能階放出電磁波 (E) 氫原子所發出之光譜線全為可見光。
7. 波耳的氫原子模型與拉塞福的原子行星模型，其最大的差異為何？ (A) 電子的運動方式 (B) 核的位置 (C) 量子化的觀念 (D) 核的電量 (E) 電子的質量。
8. 下列哪些敘述才是波耳在氫原子模型中所提出的假設？（多選） (A) 原子核所帶正電量的量值等於原子內所有電子電量總和的量值 (B) 電子所被允許存在的軌道是特定而且不連續的 (C) 電子由一個定態躍遷至另一個定態時，才會釋放電磁輻射 (D) 電子繞原子核運行，類似行星繞太陽運行 (E) 原子核具有整個原子絕大部分的質量。

9. 波耳的氫原子模型不同於古典原子模型的是下列哪幾項？（多選） (A) 電子繞核運轉所需的向心力「是否等於庫侖力」 (B) 電子繞核運轉時「是否輻射電磁波」 (C) 電子繞核運行的頻率「是否會連續變動」 (D) 原子「是否是不穩定的」 (E) 原子光譜「是否為連續譜」。
10. 某一氫原子的電子從高能階軌道躍遷至低能階軌道時，降低的能量10.2電子伏特，則
- (1) 放出的光子能量為何？
 - (2) 放出的光子波長為何？
 - (3) 放出的光子是否為可見光？（請查圖6-28）

二、進階題

第一節 波粒二象性

11. 波長60奈米的紫外光：
- (1) 光子在真空中的傳播速率為何？
 - (2) 光子的頻率為多少赫？
 - (3) 每一個光子的能量為多少焦耳？合多少電子伏特？（1電子伏特 (eV) = 1.6×10^{-19} 焦耳）
12. 若一功率為100瓦特的燈泡，已知其輻射出的光子，在可見光範圍內的功率為總功率的百分之一，則此燈泡每秒所發射的可見光之光子數為_____個。（假設可見光的平均波長為550奈米）

第二節 原子光譜

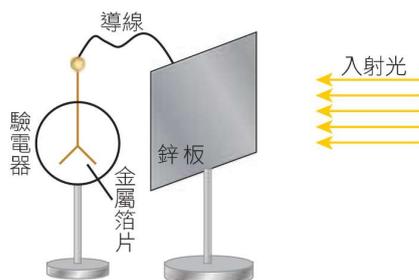
13. 通常在照片上見到的原子光譜線都是一條一條的細長直線，而非其他形狀，其原因為何？ (A) 由於光是從直線型的狹縫穿出來的 (B) 由於原子能階是一條一條的平行線而非其他形狀 (C) 此原子所輻射之光為單頻光 (D) 由於此光強度較弱 (E) 當光從原子輻射出來時，所有電磁輻射都是平行發射出來的。

三、閱讀題

14. 二十世紀的偉大物理學家愛因斯坦，由於成功解釋光電效應，獲得1921年諾貝爾物理獎，而光子產生電子這個概念，則深深地影響當代的科技發展，在我們周遭的電子產品，常常能尋得它的蹤跡。如圖是光電效應的實驗裝置的示意圖：鋅板與驗電器以導線連接，兩者底座均為絕緣體，入射光包含紅外線、可見光與紫外線；未照光時，驗電器的金屬箔片原本閉合。在光源與鋅板間加入一特殊處理的玻璃片，此玻璃片能讓可見光通過但會阻絕特定頻率的電磁波。以光源透過此玻璃片照射鋅板，驗電器之金屬箔片不會張開。若將此玻璃片移開，金屬箔片會張開，試回答下列問題。

[99年指考修改]

- (1) 驗電器的用途為何？當入射光照射鋅板，而驗電器的金箔張開時，鋅板與驗電器分別帶什麼電性？
- (2) 紅外線、可見光與紫外線，何者的光子能量較大？
- (3) 紅外線、可見光與紫外線，何者能使鋅板產生光電效應？



解答

1. 2 2. (D)(E) 3. (1) $f = \frac{c}{\lambda}$; (2) $E = hf = \frac{hc}{\lambda}$ 4. (C)
5. 光電效應、電子雙狹縫干涉實驗 6. (A)(B)(C) 7. (C) 8. (B)(C)
9. (B)(C)(D)(E) 10. (1) 10.2 電子伏特；(2) 120 奈米；(3) 否
11. (1) 3.0×10^8 公尺/秒；(2) 5.0×10^{15} 赫；(3) 3.3×10^{-18} 焦耳、21 電子伏特
12. 2.78×10^{18} 13. (A)
14. (1) 檢查鋅板是否帶電、鋅板帶正電、驗電器帶正電；(2) 紫外線；(3) 紫外線