



6

量子現象

- 6-1** 量子論的誕生 177
- 6-2** 光的粒子性 178
- 6-3** 物質的波動性 185
- 6-4** 波粒二象性 186
- 6-5** 原子光譜 188

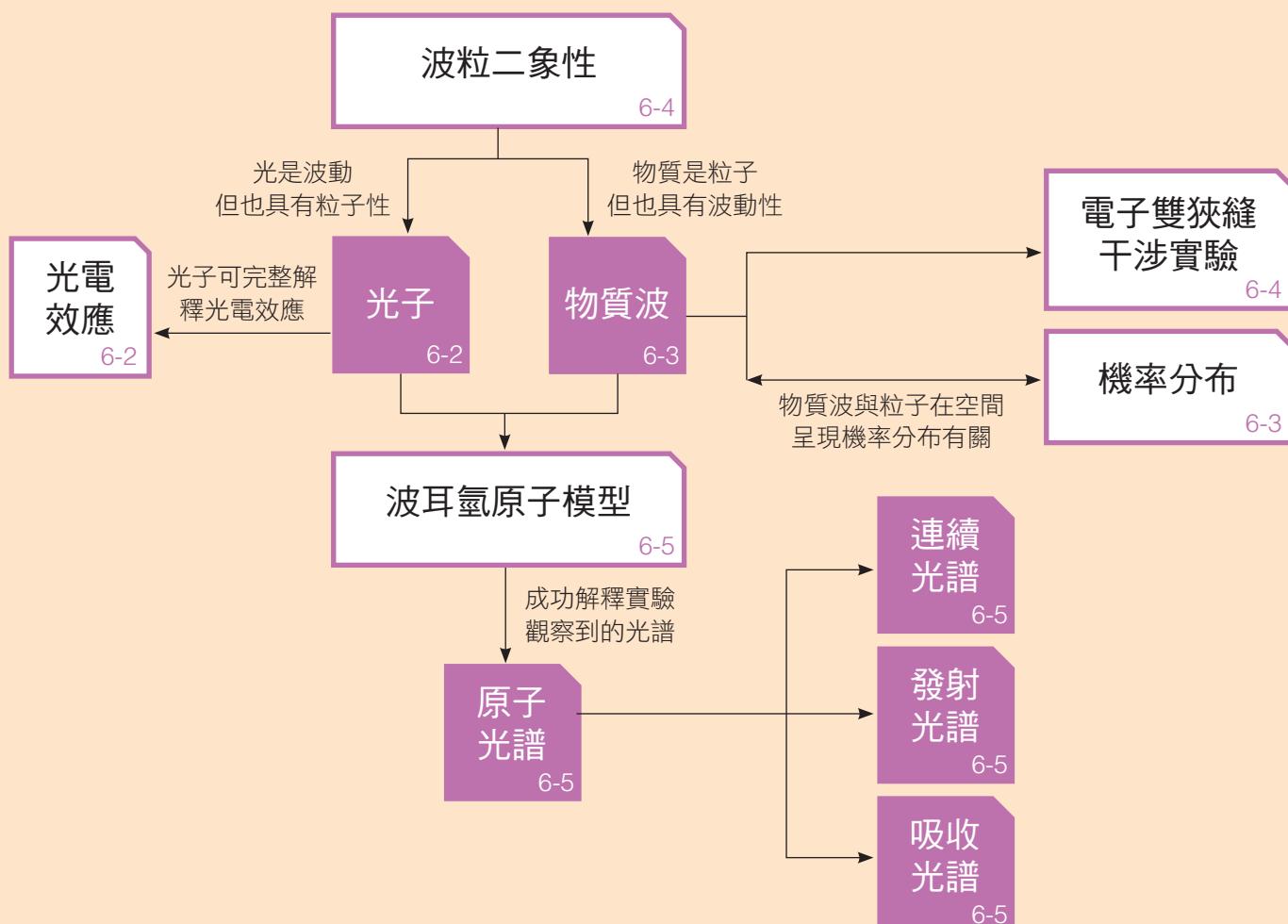


電子到底是粒子呢？還是波動呢？

科學家花了上百年的時間，好不容易了解光的本質就是電磁波。然而隨著種種量子現象浮現，愛因斯坦說光其實是粒子，德布羅意說所有物質都應該是波才對，但真相比這還詭譎。量子論指出無論電子或光子，乃至於所有物質，都具有波動與粒子的二象性（wave-particle duality）。

波動與粒子，擺明是兩個互斥的概念，物質如何具有波粒二象性呢？如果電子是粒子的話，那為何通過雙狹縫時，會產生干涉條紋？如果電子是波動的話，那又如何解釋屏幕上一顆一顆出現的亮點？科學家藉由量子力學描述波粒二象性，讓我們可以稍稍窺見量子世界的迷人風采 — 雖然愛因斯坦一點兒都不喜歡這背後的詮釋呢！

學習概念圖



6-1 量子論的誕生

當電流通過鎢絲燈泡時，燈絲內部的原子受熱振盪，會發出不同波長的電磁波。事實上，一般物體不論溫度高低，也都會發出電磁波，各個波長的強度呈現一定的分布，此現象稱為**熱輻射**（thermal radiation）。然而 19 世紀末的理論預測，如圖 6-1 所示，與實驗上測得的結果大不相同，令物理學家百思不解。在 1900 年 12 月 14 日，普朗克在德國物理學會發表論文，主張熱輻射來自物體內部帶電質點振盪所產生的電磁波，然而質點振盪的能量並非連續變化，而是呈現階梯狀的改變：

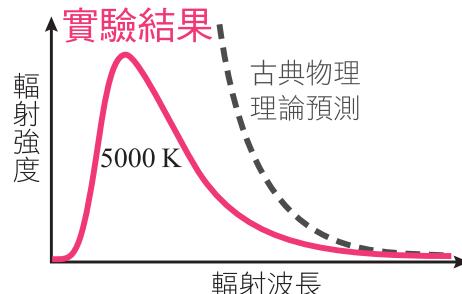
$$E = nhf \quad (n = 0, 1, 2, \dots)$$

上式中 f 為帶電質點的振盪頻率， h 稱為普朗克常數，定義為 $6.626\ 070\ 150 \times 10^{-34}\ \text{J}\cdot\text{s}$ 。這篇重要的論文，顛覆過往認定能量是連續的概念，揭開量子論發展的序幕。

普朗克的假說可由**能階**（energy level）的概念來理解。根據量子力學，只有在某些特定能量，系統方能穩定存在，這一系列像階梯狀的能量，稱為該系統的能階。系統能量的變化，來自不同能階間的轉變，由於能階並非連續，所造成的能力變化也不是連續的。在 1905 年，愛因斯坦進一步推廣能量不連續的概念，提出光量子的理論，並成功解釋光電效應。由於光量子一顆一顆的，所對應的能量自然是不連續的。如此一來，量子家族不僅止於物體的輻射能，到處可見的光也加入了。

◎ 習題 1

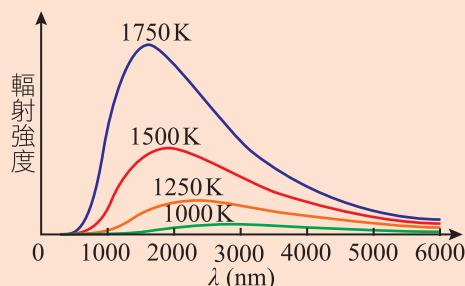
圖 6-1 普朗克提出量子論，解釋熱輻射現象



知識延長線

黑體輻射

如課文所述，物體的溫度皆大於絕對零度，因此都會有熱輻射現象，即會放射連續波長電磁波。由實驗結果得知，物體放出的電磁輻射分布與其溫度、材料與表面性質有關。科學家方便分析起見，引入一種理想的物體，能夠完全吸收外來輻射而不反射，稱為**黑體**（black body）。如下圖所示，其輻射強度在不同波長的分布，僅與黑體的溫度有關，與材料或是表面特性無關，稱為**黑體輻射**（black body radiation）。黑體輻射的強度隨波長不同，呈現連續的變化，這類的光譜稱為**連續光譜**（continuous spectrum）。



6-2 光的粒子性

一、光電效應

在 19 世紀末，科學家發現一個有趣的現象：當光照在金屬板上，如圖 6-2 所示，會使部分的電子脫離表面，產生電流，稱為光電效應 (photoelectric effect)。因為受光照射而脫離的電子，稱為光電子，而其形成的電流，稱為光電流。在 1902 年，科學家雷納 (Philipp von Lenard, 1862 - 1947, 德國人) 用類似圖中的裝置，對光電效應作詳細地研究，整理出以下的特性：

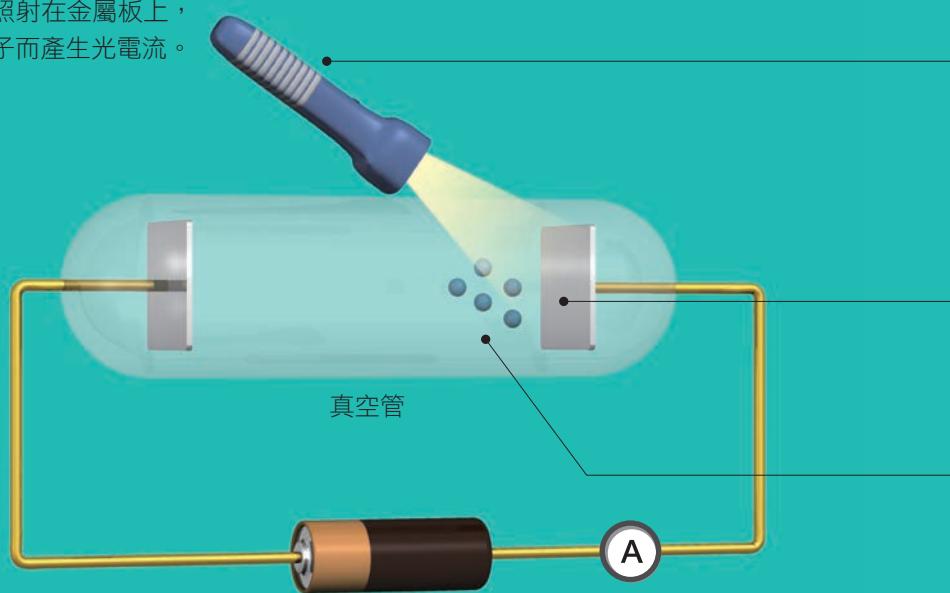
1. 入射光頻率必須大於底限頻率 f_c (threshold frequency)，才會產生光電流。

圖 6-2

光電效應

光電效應的實驗裝置示意圖

入射光照射在金屬板上，
打出電子而產生光電流。



1

入射光頻率

2

反應時間

3

光電子最大動能

不同金屬材料，具有不同的底限頻率。當入射光的頻率低於底限頻率時，光強度再強、照射再久，都不會有光電流產生。

2. 一經照射，光電流幾乎立刻產生，其大小與光強度成正比。

只要入射光頻率大於底限頻率，隨著光強度變強，所產生的光電流也隨之增加。

3. 光電子的最大動能與入射光頻率相關，但與光強度無關。

當入射光頻率大於底限頻率時，會打出光電子，光電子的動能有大有小，其最大值稱為光電子的最大動能。當入射光頻率越大，所產生的光電子的最大動能就越大。但光電子的最大動能，與入射光強度無關。

雖然馬克士威方程式統一了電磁學，十分強大，但如圖 6-2 所示，這些光電效應的特性，無法用古典電磁理論解釋。愛因斯坦洞察到光電效應背後的物理，提出光量子假說，成功解釋實驗觀察到的現象，我們將在下頁詳細解說。



由以下的矛盾可知，想用古典電磁理論解釋光電效應，有其根本性的困難。

古典電磁理論的失敗

沒有光電子

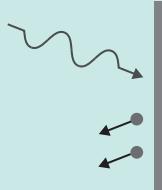
入射光頻率必須大於底限頻率，才會產生光電流。

沒有光電子

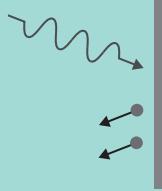
一經照射，光電流幾乎立刻產生，其大小與光強度成正比。

沒有光電子

光電子的最大動能與入射光頻率有關，但與光強度無關。



根據電磁波的理論，無論頻率高低，只要照射時間夠久，應可提供足夠的能量，產生脫離金屬表面的光電子，故無法解釋底限頻率的存在。



當入射光強度很微弱時，理應等待一段時間，累積的能量才足夠讓光電子脫離。但在光電效應的實驗裡，只要入射光頻率大於底限頻率，即便光強度十分微弱，也幾乎立刻產生光電流。



提高光的強度時，電磁波的振幅也隨之增大，金屬表面的電子受到較強的電磁力，光電子的最大動能也應該增加。但實驗結果顯示，當光強度增加時，光電流隨之增加，但是光電子的最大動能居然不變。

**想一想**

同樣波長的光，較明亮者，其光子的能量較高。反之，較黯淡者，其光子的能量較低。對嗎？

二、愛因斯坦的光量子

在 1905 年，愛因斯坦提出一個劃時代的概念：電磁波是由許多光量子 (light quantum) 所組成，後簡稱為光子 (photon)，每個光子的能量 E 與頻率 f 成正比，

$$E = hf$$

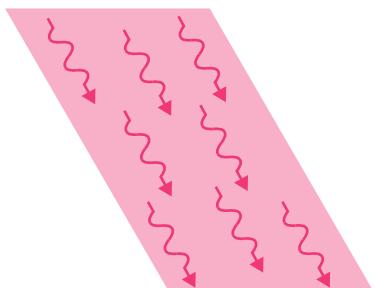
光子的能量 hf 無法再分割，是頻率為 f 電磁波的最小能量單位。 **習題 3**

如何用光子的概念，來解釋光電效應呢？首先，在金屬表面的電子，需吸收一定的能量，才能擺脫束縛而脫離金屬表面，此電子逸出所需的最小能量，此能量稱為該金屬的功函數 (work function)，通常以 W 表示， W 值與金屬特性有關，不同金屬產生光電效應所需的最小能量也不相同。如圖 6-3 所示，當入射光頻率過低時，光子能量 hf 太小，電子無法取得足夠的能量脫離金屬表面，此時沒有光電流。但當入射光頻率夠高時，光子能量大於鉻金屬的 W 值，電子吸收光子後，其能量足以脫離金屬表面而產生光電流。因此在實驗上會觀察到一特定的底限頻率 f_c ，其值與金屬特性有關，只有入射光頻率大於底限頻率時 ($f > f_c$)，才能產生光電流。

► 圖 6-3 光子的能量與頻率

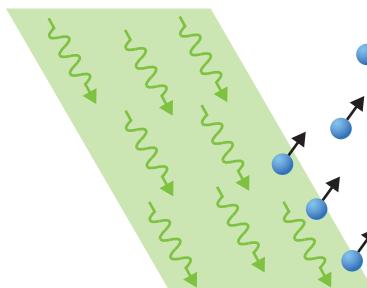
紅光光子

能量僅約 1.77 電子伏特，因此無法產生光電流。



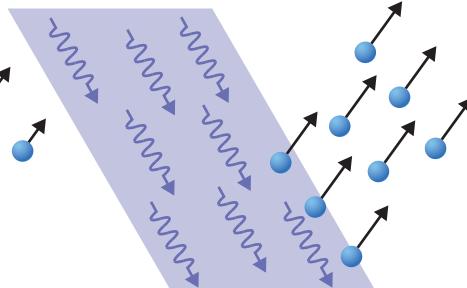
綠光光子

能量約為 2.25 電子伏特，比鉻的 W 值大，可以產生光電流。



紫光光子

能量約為 3.10 電子伏特，比綠光光子大，所撞出的光電子最大動能也比較高。



鉻金屬表面電子脫離束縛的最小能量 $W = 2.1\text{ eV}$

當電子吸收光子後，只要有足夠的能量脫離表面，即產生光電流。光強度越強，代表光子數目越多，能產生的光電子數目也越多，因此光電流隨之增加。電子吸收光子後，其能量扣除脫離表面所需的最低能量 W ，以及因碰撞而損失的能量後，即為光電子的動能。這說明了入射光頻率越高，光電子的最大動能也會隨之增加。

回到圖 6-2，古典電磁理論無法解釋光電效應，但光量子假說可提供簡潔的解釋。然而愛因斯坦所提出的光子概念，再度引發光到底是粒子，還是波動的爭議。在 20 世紀初，許多微觀的現象都悖離古典物理預測，必須用量子論才能解釋。在 6-4 節我們將指出，在量子的世界裡，**光同時具有粒子與波動的二象性**。光是粒子？也是波動？這聽起來真是瘋狂，但科學家發現除了光以外，像是電子，甚至所有的物質，都有這樣謎一般的波粒二象性。

知識延長線

光強度

光強度在古典與量子理論中，有不同的意義。根據馬克士威方程式，光是電磁波的一種，所攜帶的能量與電磁場振幅平方成正比。但根據愛因斯坦的光量子假說，光強度則是與單位時間單位面積的光子數目成正比。當光子數量龐大時，其統計行為有時可以藉由電磁波來理解，但有些實驗（如光電效應）必須由量子理論才能完整解釋。

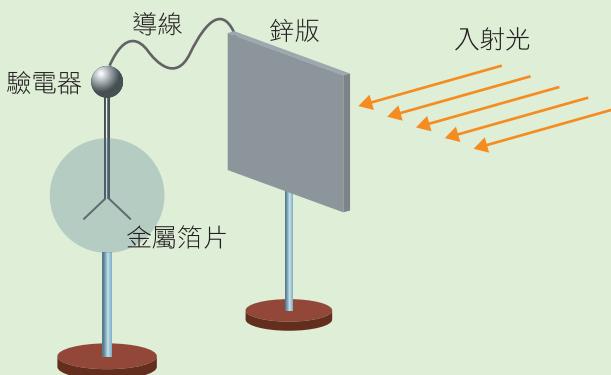
電子伏特

電子伏特（electron volt，符號為 eV）是常用的能量單位，代表 1 個電子經過 1 伏特電位差加速後，所獲得的能量。根據 SI 制，電子所帶電量定義為 $e = 1.602\ 176\ 634 \times 10^{-19}\ \text{A} \cdot \text{s}$ ，因此電子伏特與焦耳的換算關係約為 $1\ \text{eV} \approx 1.6 \times 10^{-19}\ \text{J}$ 。

範例 6-1 光電效應

習題 4、5

如圖為某生進行光電效應實驗裝置示意圖，其中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，則：



- (1) 使鋅板產生光電效應是何種電磁波？
- (2) 紅外線是否可產生光電效應？

分析

發生光電效應時，產生的光電子會逸出鋅板，使鋅板帶正電。因此，驗電器中的電子將會移動到鋅板，使金屬箔片帶正電而張開。

解答

- (1) 此玻璃片能讓可見光通過而阻絕了紅外線或紫外線，但通過的可見光無法產生光電效應，因此能夠產生光電效應的光子，其能量需大於可見光。由此可知，能夠讓鋅板產生光電效應的光子為紫外線。
- (2) 可見光無法產生光電效應，故能量較可見光低的紅外線亦無法產生光電效應。

範例 6-2 光電效應

小雷分別以不同的光照射某金屬表面。當照射光為 4 單位強度的藍光時，仍然無法產生光電流。試問下列哪一種照射光才有可能產生光電流？

- (A) 5 單位強度的藍光
- (B) 3 單位強度的紅光
- (C) 6 單位強度的綠光
- (D) 4 單位強度的黃光
- (E) 1 單位強度的紫光。

分析

照射光的頻率愈高，單一光子的能量也愈大，愈有可能產生光電流。而光強度與單位時間內通過單位面積的光子數成正比，無法決定光電流的產生與否。

解答

當藍光照射時仍無法產生光電流，則各選項中僅頻率大於藍光的紫光照射時，才有可能產生光電流，故答案選 (E)。

三、光電效應的日常應用

光電效應在日常生活的應用很廣，如圖 6-4 所示，現在人們藉由數位相機或是手機拍照，正是光電效應的應用。光通過鏡頭後，照射到後方的感光元件，藉由光電效應，將光的訊號轉換為電的訊號，產生數位照片。

另一個常見的應用是太陽能電池，目前主要由矽晶體做成，受到自然光或人造光照射時，其電子吸收光子後，雖未離開材料表面，但會產生電流或電壓，可視為廣義的光電效應。藉此太陽能電池可將光能轉換為電能，達到發電的效果。看來光子雖然難懂，卻已經為我們的生活帶來許多便利呢！

光電效應的應用

▼ 圖 6-4



6-3 物質的波動性

愛因斯坦用光子的概念，成功地解釋光電效應。當時還是博士生的德布羅意得知後，大膽猜想：既然原本以為是波動的光，居然有粒子性，那諸如電子這類的粒子，是否也具有波動性呢？在 1924 年的博士論文裡，德布羅意提出**物質波**（matter wave）的概念，主張所有的物質皆具有波動性，稱為物質波。

德布羅意提出物質波的假說時，並沒有任何實驗上的證據。一直到了 1927 年，科學家戴維森（Clinton Davisson，1881 - 1958，美國人）與革末（Lester Germer，1896 - 1971，美國人）利用鎳金屬晶體，進行電子繞射實驗，首次證實了德布羅意的假設。同年湯姆森（George Thomson，1892 - 1975，英國人，J.J. Thomson 之子）也利用類似實驗裝置，獲致電子繞射圖案。如圖 6-5 所示，比較同一晶體在 X 射線與電子束的照射下，所得的繞射圖案十分相似，故可以證明電子確實具有波動性。

雖然電子繞射實驗明白指出其波動性，但物質波到底是什麼呢？簡單來說，物質波是由於物質在空間的機率分布，藉由觀測所呈現出的現象。在 6-4 節波粒二象性中，會以電子為例，對物質波作進一步的完整說明。 **習題 6**

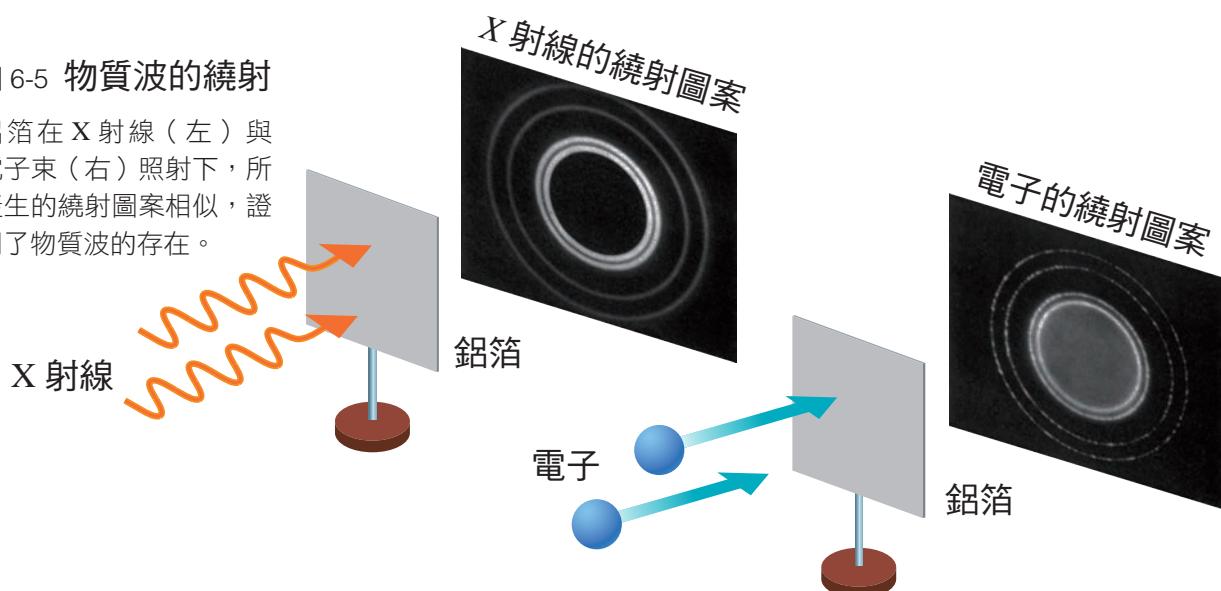


想一想

要證明物質或未知射線是否具有波動性，最好的方法是什麼？

► 圖 6-5 物質波的繞射

鋁箔在 X 射線（左）與電子束（右）照射下，所產生的繞射圖案相似，證明了物質波的存在。

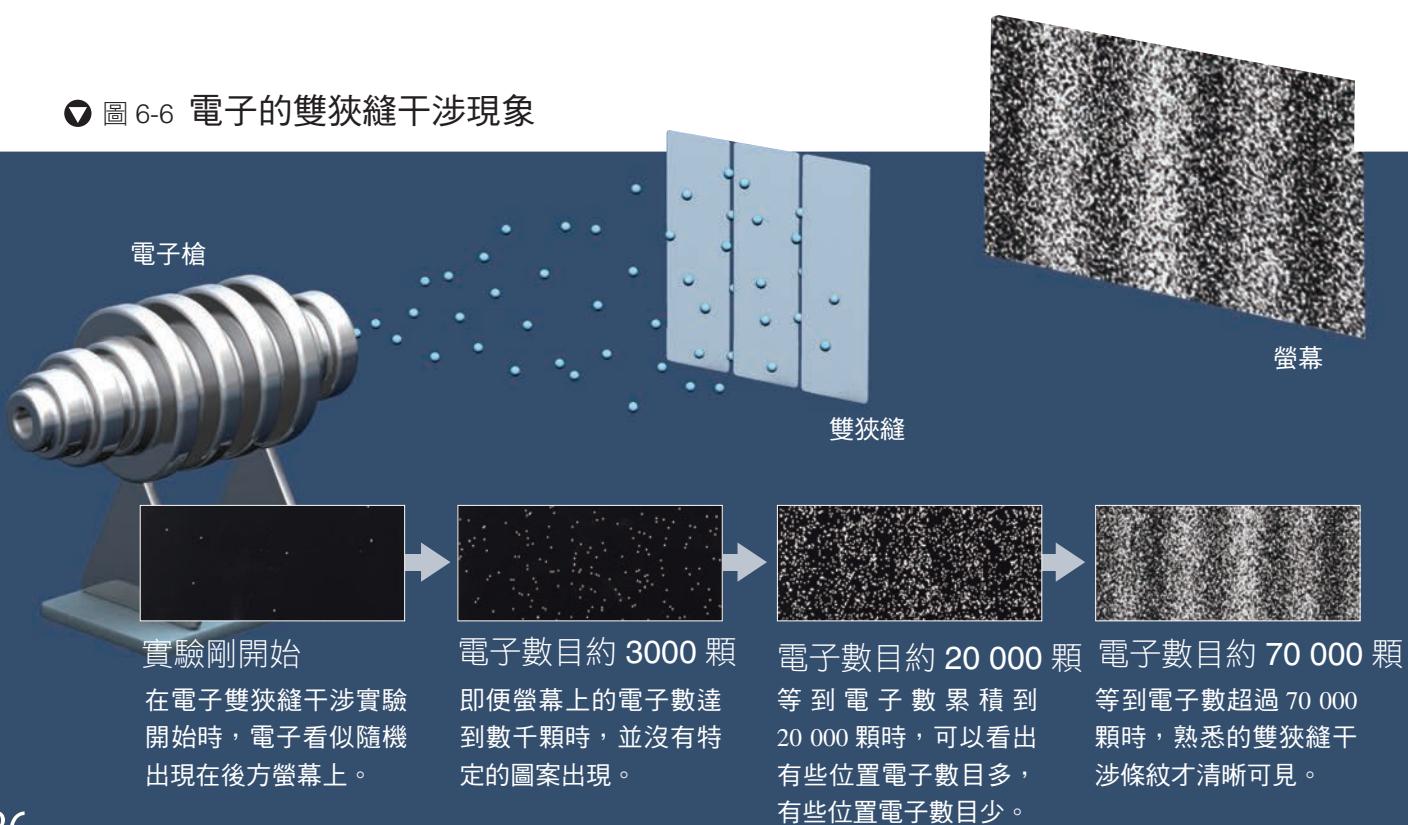


6-4 波粒二象性

光電效應凸顯了光的粒子性，然而在雙狹縫干涉實驗中，光的波動性質卻又不容置疑。光到底是粒子還是波動的爭議，再次浮上檯面。而在電子繞射實驗中，我們發現明明是粒子的電子，也具有波動性。藉由一連串實驗與理論的進展，科學家發現不論是光或是電子，乃至於所有的物質，都具有波粒二象性：在某些測量下像是粒子，在另一些測量下則像是波動。 習題 7

為了解波粒二象性，物理學家設計精巧的電子雙狹縫干涉實驗，如圖 6-6 所示，不只可以觀察到電子的干涉條紋，還可知道干涉條紋是如何逐步浮現的。在進行電子雙狹縫干涉實驗時，干涉條紋並不是一下子就出現的。電子依照一定的機率分布，隨機在螢幕上一點一點地出現，直到電子數累積夠多時，干涉條紋的樣貌才清楚地顯現出來：電子一點一點出現，點出其粒子性，最後干涉條紋的浮現，顯示其波動性。在此實驗中，電子的粒子性與波動性，以不同的面貌呈現出來。

▼ 圖 6-6 電子的雙狹縫干涉現象



電子的雙狹縫實驗極具意義，點出物質波的干涉現象，跟水波或是聲波的干涉，有根本性的差異。站在古典物理的角度，粒子與波動確實是互斥的概念。根據牛頓運動定律，電子的軌跡是確切可預測的，怎麼會出現雙狹縫干涉條紋呢？而從馬克士威方程式出發，分明只有光是電磁波的解，怎麼也看不出光子的存在？但根據量子論，光子與電子都是不可分割的粒子：因此我們從未測量到半顆電子的電量，或是半顆光子的能量。古典的粒子有確切的軌跡運動，但是光子與電子的運動，並沒有確切的軌跡，只能採用機率分布來描述。而物質波與光波就是用來描述物質或光子在空間出現的機率分布，並可藉由適當的實驗設計（如雙狹縫干涉），展現其波動性。這樣的機率詮釋，愛因斯坦不喜歡也不願接受，直呼：「上帝是不會擲骰子的。」但至目前為止，所有的實驗結果都與量子論的預測吻合，是科學史上最成功的理論之一。 習題 8

惟有藉由量子論，才能完整描述波粒二象性。在電子雙狹縫實驗中，我們就已經知道，單單用粒子或是波動，無法說明實驗的全貌。如果用粒子來描述電子，則無法解釋干涉條紋的出現；但若僅局限於波動的角度，干涉條紋不會一點一點地出現。實驗上觀察到一點一點的亮光（粒子性），逐漸形成干涉條紋（波動性），正說明了波動與粒子的二象性，雖然詭譎難解，但缺一不可。波粒二象性與常識違背，確實難以理解，這是因為我們的常識多建構在古典物理，才會造成這樣的困境。或許我們該學會戴上量子的眼鏡，重新認識這熟悉又有點陌生的自然界！



想一想

物質波屬於橫波或縱波？

範例 6-3 波粒二象性

根據量子論的內容，下列敘述哪些正確？（應選 2 項）

- (A) 光子和電子都是不可分割的粒子
- (B) 光子和電子的運動，都是機率性的
- (C) 只有光子能產生繞射現象，電子則否
- (D) 只有電子能產生繞射現象，光子則否
- (E) 每一個光子的能量與其頻率成反比。

分析

根據量子論，光子和電子都具有波粒二象性，其中波動性指的是粒子在空間中出現的機率分布。

解答

- (A)(B) 對；光子和電子都是不可分割的粒子；且由繞射實驗可知，光子和電子的運動，都是機率性的。
- (C)(D) 錯；光子和電子，皆能產生繞射現象。(E) 錯；由 $E = hf$ 可知，每一個光子的能量與其頻率成正比。

6-5 原子光譜

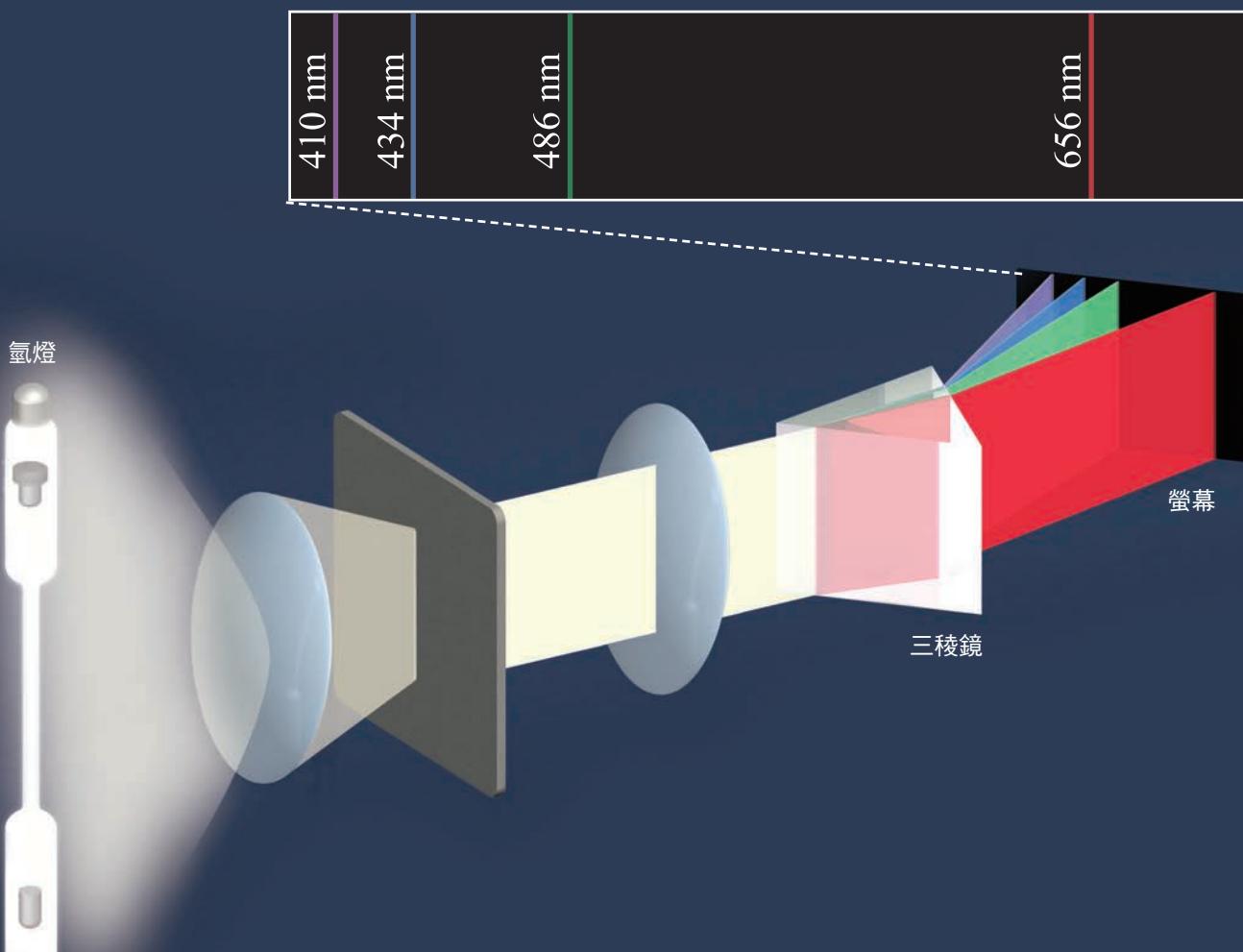
一、原子光譜的獨特性

在第3章提到拉塞福發現原子核的存在，但仍然無法解釋原子的穩定性。除此之外，當時科學家對於氣體發光現象，也感到十分困惑。舉例來說，圖6-7(1)管中氫氣加熱後發光，通過光學儀器與三棱鏡後，產生一系列的譜線，分別對應到特定的波長。若在管中更換不同氣體，光譜線的位置也隨之不同。

▼ 圖 6-7

原子光譜

1 光譜量測的示意圖





光譜依產生的方式不同，可分成連續光譜、發射光譜、吸收光譜三大類。如圖 6-7(2) 所示，若光源為白熾燈泡，發出的白光通過三稜鏡後，所得光譜呈現連續的分布，稱為**連續光譜**（continuous spectrum）。若是光源為加熱後的元素氣體，光譜僅在特定波長處出現亮線，稱為**發射光譜**（emission spectrum）。若是讓白光通過此元素氣體，則原本連續的光譜，會在該元素發射光譜光線處出現暗線，稱為**吸收光譜**（absorption spectrum）。

如圖 6-7(3) 所示，不同的元素氣體，有截然不同的發射（吸收）光譜，猶如各個原子的身分證。舉例來說，從沒有人到太陽採樣，我們如何知道其主要成分是氫與氦呢？太陽所發出的光，經過表層溫度較低的氣體時，會吸收特定波長的光，使得光譜出現暗線。利用精密的稜鏡分析，將這些暗線所產生的吸收光譜，與已知元素的譜線比對，才得知太陽主要由氫與氦組成。

想一想

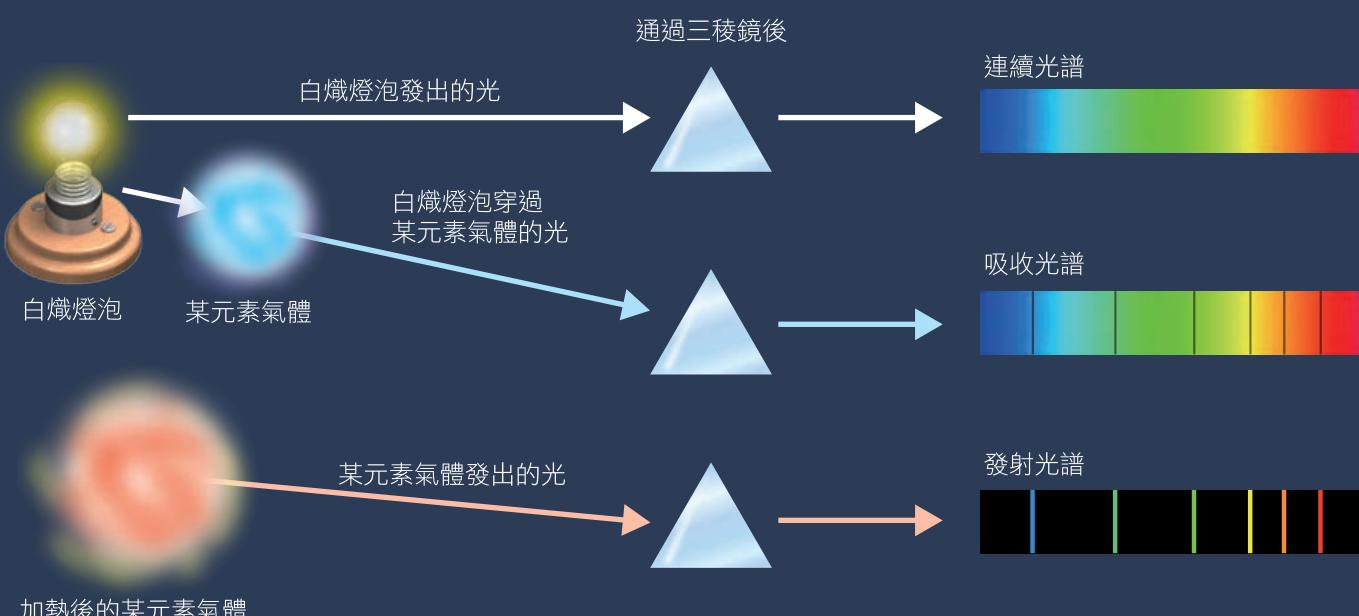
在觀察太陽的光譜時，我們發現有許多條暗線的存在。試問：

- (1) 太陽光譜是連續光譜還是吸收光譜？
- (2) 這些暗線代表著什麼意義？



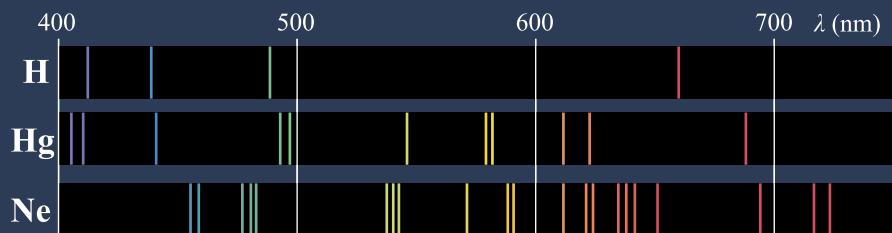
2 三大類光譜

連續光譜、發射光譜與吸收光譜是由不同的發光方式造成的。



3 原子的身分證

不同的元素氣體，有截然不同的發射光譜。因此我們可藉由測量發射光譜，確認發光的元素氣體為何。



二、波耳的氫原子模型

回顧拉塞福的原子行星模型，繞行原子核的電子由於加速度不為零，會產生電磁輻射而逐漸喪失能量，這顯然是不穩定的。到底該如何解釋核外電子的穩定存在呢？又該如何解釋原子發光的謎團呢？在 1913 年，年輕的波耳（Niels Bohr，1885 - 1962，丹麥人）決定繞過這個問題，基於拉塞福的原子模型，加入兩個重要的假設，來解釋觀察到的氫原子光譜：

1. 電子僅能沿著特定的圓形軌道，環繞原子核運行。每一個圓形軌道，對應到一個特定的能量，當電子處於這些軌道時，不會放出電磁波。這些特定的能量結構，即為該原子的**能階**。
2. 電子可以藉由放出或吸收光子，由一個能階**躍遷**（transition）到另一個能階。根據能量守恆，若電子由較高的能階 E_{high} ，躍遷到較低的能階 E_{low} ，會放出光子，其能量為兩能階的差： $hf = E_{\text{high}} - E_{\text{low}}$ 。反之，當吸收一個光子時，可使電子由低能階躍遷到高能階，而兩能階的能量差，恰好等於吸收光子的能量。

嚴格來說，波耳並沒有說明原子為何是穩定的，而是直接假設電子只能沿著特定的圓形軌道運行：只有這些軌道是穩定的，其他都不行！如圖 6-8(1) 所示，每個特定的圓形軌道，只會對應到特定的能量，原子的能量因而呈現量子化的現象。這些特定離散能量的結構，即為該原子的能階。

波耳的第二個假設很精彩，結合能量守恆與光子的概念，推論電子在不同能階躍遷時，會放出或吸收特定頻率（能量）的光子。如圖 6-8(2) 所示，當電子由能量較高的能階 E_5 ，躍遷到較低的能階 E_2 時，多出的能量藉由放出光子帶走。根據能量守恆定律，可算出光子的能量是 $hf = E_5 - E_2$ 。嚴格來說，波耳也沒有解釋原子為何會放光（我們為何對波耳如此嚴格呢？），而是建立原子能階與光子能量間的關係，直接算給你看！❷ 習題 9、10

如圖 6-8(3) 所示，藉由波耳氫原子模型的兩個假設，可以算出能階躍遷所產生的原子光譜，與實驗觀測到的氫原子光譜相比，波耳的理論預測相當準確。我們可以進一步推論，不同的原子具有不同的能階，因此產生不同的光譜，解釋了原子光譜的獨特性。波耳基於物理直覺，大膽提出假設，帶來量子論初期的巨大勝利，但電子與光子間的交互作用，必須等到量子力學完整的架構浮現後，才能得到充分的了解。

▼ 圖 6-8

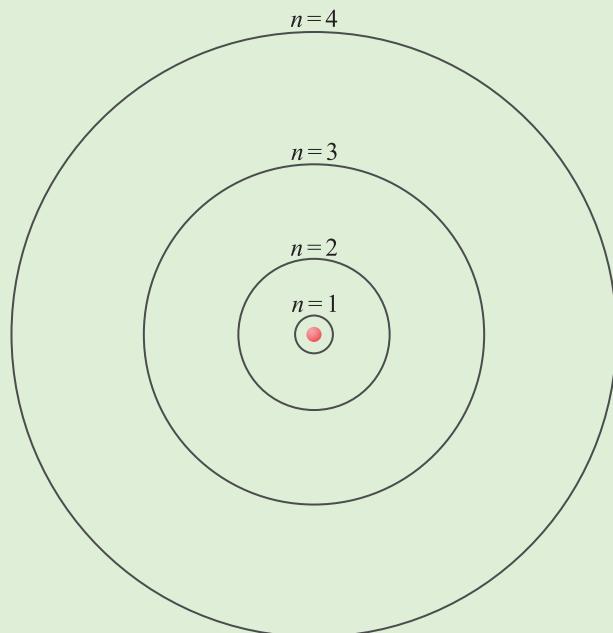
氫原子模型



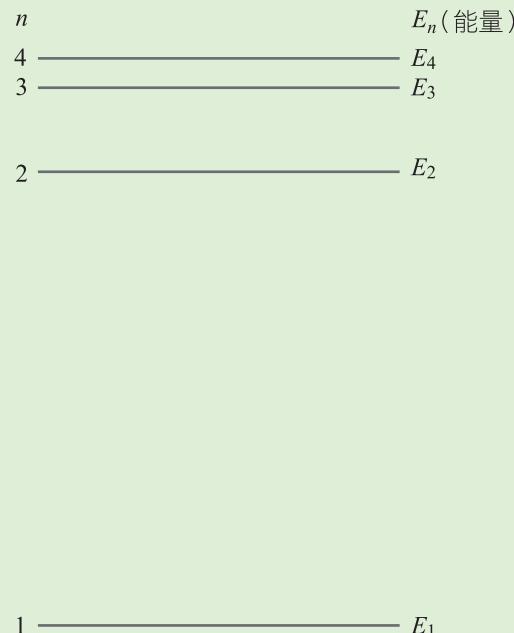
範例 6-4 氢原子能階

下圖左所示為波耳氫原子模型的軌道示意圖，而氫原子電子在各能階的能量值，如下圖右的 E_n 所示，已知普朗克常數為 h ，試問：

1. 當電子由 $n = 4$ 跳遷至 $n = 3$ 時所釋放的電磁波，其光子的頻率為多少？
2. 承上題，氫原子中的電子自 $n = 4$ 回到基態的過程中，可能放射出電磁波頻率最多有幾種？



▲波耳氫原子模型的軌道示意圖



▲電子在各能階的能量值

分析

電子由高能階躍遷回低能階時，會釋放出特定頻率的光子，其能量差： $\Delta E = hf$ 。

解答

$$(1) \Delta E = E_4 - E_3 = hf \Rightarrow f = \frac{E_4 - E_3}{h}.$$

(2) 共有 6 種可能的頻率，分別為

$$\begin{aligned} n=4 &\rightarrow n=3, n=4 \rightarrow n=2, n=4 \rightarrow n=1, \\ n=3 &\rightarrow n=2, n=3 \rightarrow n=1, \\ n=2 &\rightarrow n=1. \end{aligned}$$

重點整理

6-1 量子論的誕生

- 一般物體不論溫度高低，都會發出電磁波，各個波長的強度呈現一定的分布，此現象稱為熱輻射。
- 普朗克為了解決科學家對熱輻射強度分布的疑惑，主張質點振盪的能量並非連續變化，顛覆過往認定能量是連續的概念，揭開量子論發展的序幕。
- 量子論指出只有在某些特定能量，系統方能穩定存在，稱為能階。系統能量的變化，來自不同能階間的轉變，由於能階並非連續，能量變化自然也是不連續的。

6-2 光的粒子性

- 當光照射在金屬板上，會使部分的電子脫離表面，產生電流，稱為光電效應。
- 雷納整理出光電效應有以下的特性：
 - 入射光頻率必須大於底限頻率，才有光電流。
 - 一經照射，光電流幾乎立刻產生，其大小與光強度成正比。
 - 光電子的最大動能與入射光頻率相關，但與光強度無關。
- 愛因斯坦提出電磁波是由許多光量子所組成，後簡稱為光子，每個光子的能量 E 與頻率 f 成正比， $E = hf$ (h 為普朗克常數)。
- 在金屬表面的電子，需吸收一定的能量，才能擺脫束縛而脫離金屬表面。
- 電子吸收光子後，若沒有再與其他金屬原子發生碰撞，此時的光電子具有最大的動能 $hf - W$ 。

- 古典電磁理論無法解釋光電效應，但愛因斯坦的光量子假說，提供簡潔的解釋。

6-3 物質的波動性

- 德布羅意提出物質波的概念，主張所有的物質皆具有波動性，稱為物質波。
- 簡單來說，物質波是由於物質在空間的機率分布，藉由觀測所呈現出的現象。

6-4 波粒二象性

- 不論是光或是電子，乃至於所有的物質，都具有波粒二象性：在某些測量下像是粒子，在另一些測量下則像是波動。
- 物質波與光波都是用來描述物質或光子在空間出現的機率分布。

6-5 原子光譜

- 光譜依產生的方式不同，可分成連續光譜、發射光譜、吸收光譜三大類。
- 波耳的兩個重要假設：
 - 電子僅能沿著特定的圓形軌道，環繞原子核運行。
 - 電子可以藉由放出或吸收光子，由一個能階躍遷到另一個能階。
- 若電子由較高的能階 E_{high} ，躍遷到較低的能階 E_{low} ，會放出光子，其能量為兩能階的差： $hf = E_{\text{high}} - E_{\text{low}}$ 。反之，當吸收一個光子時，可使電子由低能階躍遷到高能階，而兩能階的能量差，恰好等於吸收光子的能量。

習題

6-1 量子論的誕生

- () 1. 1900 年，普朗克在德國物理學會發表論文，提出物體的能量變化並非連續，量子論因此而誕生。下列關於量子論的敘述，哪些正確？（應選 3 項）

- P.177 (A) 只有在原子尺度下的物體，其能量變化才是不連續的
(B) 根據量子論，物體的能量呈現階梯狀改變
(C) 愛因斯坦將普朗克的理論延伸，提出光量子的理論，並成功解釋光電效應
(D) 量子論中能量不連續的假說，可以用能階的概念來理解
(E) 後來量子現象被科學家證明是錯誤的。

6-2 光的粒子性

- () 2. 下列有關光電效應之敘述，哪些正確？（應選 3 項）

- P.179 (A) 將光照射在金屬表面，使其釋放出電子的現象，稱為光電效應
(B) 入射光的頻率必須大於某特定頻率時，方能產生光電效應
(C) 當入射光的頻率低於底限頻率時，需增加照射時間，方能產生光電效應
(D) 當入射光的頻率高於底限頻率時，需等待一段時間，方能產生光電效應
(E) 依古典型理論將光視為電磁波時，無法解釋光電效應，必須將光視為粒子方能圓滿解釋光電效應。

- () 3. 依據愛因斯坦於 1905 年所提出的「光量子論」，下列敘述哪些正確？（應選 2 項）

- P.180 (A) 光子具有粒子性
(B) 光子不具有電磁波的性質
(C) 光子的能量越大，其速率越快
(D) 光子能量與頻率成正比
(E) 光子能量與波長成正比。

- () 4. 已知金屬板甲表面電子脫離束縛的最低能量為 $W_{\text{甲}}$ ，金屬板乙表面電子脫離束縛的最低

- P.182 能量為 $W_{\text{乙}}$ 。小龍做光電效應實驗時，以頻率為 f 的單色光分別照射甲、乙，發現甲可發生光電效應，但乙沒有光電效應。設普朗克常數為 h ，則下列敘述何者正確？
(A) $hf > W_{\text{乙}}$
(B) $W_{\text{甲}} > W_{\text{乙}}$
(C) 甲的光電子之最大動能 = $W_{\text{甲}} - hf$
(D) 慢慢增加入射光的強度，當到達某個強度時，乙亦能產生光電效應
(E) 慢慢增加入射光的頻率，當到達某個頻率時，乙亦能產生光電效應。

() 5. 以能量為 3.1 電子伏特的光入射到下表中的金屬，可讓哪些金屬產生光電效應？

P.182

元素	鉀	鈉	鋰	鋁	鐵	金
表面電子脫離束縛的最低能量 (eV)	2.3	2.8	2.9	4.3	4.7	5.1

- (A) 鉀、鈉
- (B) 鉀、鈉、鋰
- (C) 鉀、鈉、鋰、鋁
- (D) 鉀、鈉、鋰、鋁、鐵
- (E) 鉀、鈉、鋰、鋁、鐵、金。

6-3 物質的波動性

() 6. 下列有關物質波的敘述，哪些正確？（應選 2 項）

P.185

- (A) 物質波是一種需要靠物質傳播的波動
- (B) 聲波需要介質才能傳播，故聲波是物質波的一種
- (C) 物質波屬於橫波
- (D) 物質波說明粒子具有波動性
- (E) 物質波是粒子在空間中出現的機率分布。

6-4 波粒二象性

() 7. 20 世紀初發現光具有波粒二象性，為近代光電科技的重要基礎。下列有關光之波粒二象

P.186

性的敘述，哪些正確？（應選 3 項）

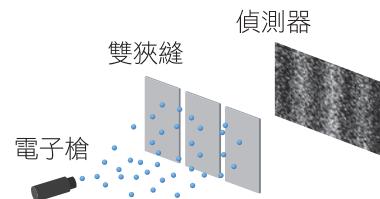
- (A) 光的頻率越高，則光量子的能量越大
- (B) 楊氏雙狹縫實驗，驗證了光的波動性質
- (C) 入射光的波長越長，越容易產生光電效應
- (D) 波粒二象性乃光子特性，其他物質並無波粒二象性
- (E) 爱因斯坦以光能量的量子化，解釋光電效應，驗證了光的粒子性質。 【106 學測】

習題

() 8. 如圖所示為物理學家進行電子雙狹縫干涉實驗的示意

P.187 圖。將電子自電子槍發射，使電子通過雙狹縫，在狹縫後方的屏幕上裝設偵測器，結果屏幕上可觀察到明確的干涉條紋。下列敘述哪些正確？（應選 3 項）

- (A) 干涉條紋是電子在行進過程中發射的電磁波所造成
- (B) 暗紋代表電子在該處出現的機率較高
- (C) 干涉條紋一點一點地出現，顯示電子的粒子性
- (D) 此實驗可證明電子具有波動性
- (E) 此實驗可證明電子具有二象性。



6-5 原子光譜

() 9. 科學家已經了解光源與光譜的關係，所以藉由觀測遙遠天體的光譜，可以獲得其訊息。

P.190 下列有關光譜的敘述，哪些正確？（應選 2 項）

- (A) 白熾燈泡發出的光譜為連續光譜
- (B) 如果在白熾燈泡四周有一團低溫的氣體，氣體會吸收能量而產生發光的明線
- (C) 只有少數幾種原子才可能有發射光譜或吸收光譜
- (D) 太陽的可見光光譜為發射光譜
- (E) 如果氣體中的電子吸收了能量之後，電子躍遷至高能量狀態，當電子跳回低能量狀態，便會發出特定波長的明線，稱為發射光譜。

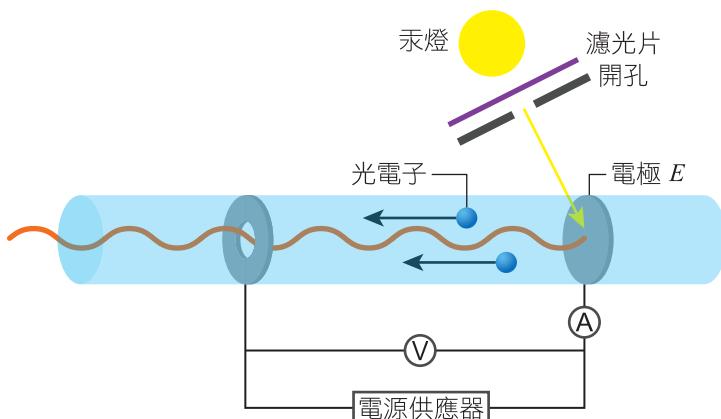
【103 學測】

() 10. 在 1913 年，波耳提出他的氰原子模型，可準確地預測和驗證氰原子光譜。下列關於波耳

P.190 氢原子模型的敘述，哪些正確？（應選 3 項）

- (A) 電子可以在任意的圓形軌道上，環繞原子核運動
- (B) 電子以圓形軌道繞行原子核時，因為電子作加速運動，所以會向外輻射能量
- (C) 當電子從較高能階，躍遷至較低能階時，會放出光子，其能量為兩能階的能量差
- (D) 電子躍遷時，可輻射出特定波長的光子，此為光譜線的成因
- (E) 電子亦可藉由吸收能量為兩能階能量差的光子，而由低能階躍遷至高能階。

小智翻開哥哥「普通物理學實驗」的大學用書，看到一篇利用光電管來進行「光電效應」的實驗，光電管的構造示意圖，如圖所示。其中電極 E 為金屬靶，當它受到不同波長的色光照射時，如果有光電子溢出，則會形成光電流。



實驗用書上載明：本實驗利用不同的濾光片來遮罩汞燈光源，以產生所需之不同波長的照射光，共計使用 400 奈米、500 奈米、600 奈米三種波長的濾光片，分別標示為甲、乙、丙。另外在濾光片外安排一開孔，以開孔大小來控制照射的光量。假設電極 E 的材質固定，試回答下列問題。

1. 使用甲、乙、丙濾光片所產生的三種照射光中，每一光子的能量之比為多少？
2. 若甲、乙、丙濾光片所產生的三種照射光皆能打出光電子，則哪一種濾光片所產生的照射光，打出的光電子之最大動能最大？
3. 如果乙濾光片所產生的照射光能打出光電子，則甲、丙兩濾光片所產生的照射光，是否可以打出光電子？
4. 如果乙濾光片所產生的照射光不能打出光電子，此時將開孔加大，是否可以打出光電子？

素養題

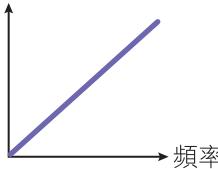
光的真面貌是光子，一顆一顆的，其能量與頻率成正比，且讓我們藉由光電效應的實驗，進一步了解光子與古典電磁理論的差異。將固定強度的光照射在金屬上，但改變入射光的頻率，此時金屬中的電子吸收光子能量後，脫離金屬表面產生光電流，就是所謂的光電效應。由於電子脫離金屬表面，至少需要一定的能量，藉由能量守恆定律，可由入射光子能量（頻率），預測光電子最大動能為何。

由此可知，光電效應中光電子的最大動能，應該跟入射光子的能量息息相關。但若是從古典電磁理論出發，電磁波對電子的平均功率與光強度成正比，但是與頻率無關。實驗結果顯示，愛因斯坦提出光子的假設是正確的，在偃兵息鼓多年後，光究竟是粒子還是波動的老問題，又再次浮現迷惑科學家們。

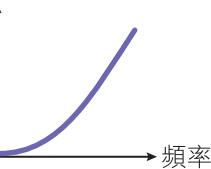
【混合題】

- () 1. 若從古典理論出發，將固定強度的光照射在金屬上，則預期觀測到光電子的最大動能，與入射光頻率間的關係為何？

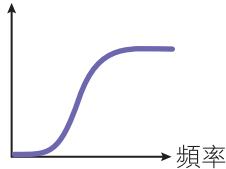
(A) 光電子
最大動能



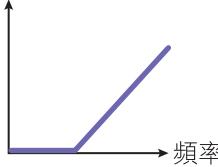
(B) 光電子
最大動能



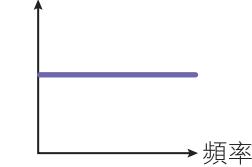
(C) 光電子
最大動能



(D) 光電子
最大動能



(E) 光電子
最大動能



2. 實驗結果必須用光子的概念，方能完整解釋，因此光電子最大動能與入射光頻率的關係，應為上題 (A) 至 (E) 五個選項中的哪一個？試簡要說明理由。

光的真面貌是光子，
一顆一顆的，其能量
與頻率成正比。

