

6

量子現象

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



6-1

量子論的誕生

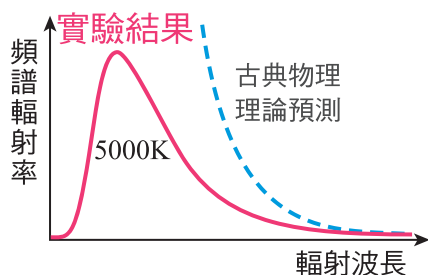


授課重點

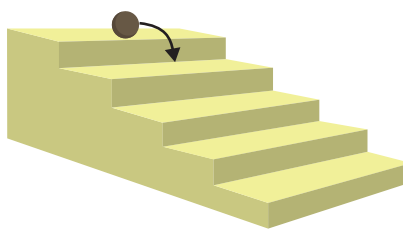
1. 物體不論溫度高低，都會發出電磁波，且有一定的強度分布，此現象稱為熱輻射。
2. 19 世紀物理學家所作的熱輻射理論預測，與實驗上測得的結果大不相同。
3. 1900 年，普朗克主張熱輻射來自物體內部帶電質點振盪所產生的電磁波，質點振盪的能量呈現階梯狀的改變：

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

f 為帶電質點的振盪頻率， h 為普朗克常數，其值為 $6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ 。



▲ 熱輻射曲線



▲ 能階示意圖

4. 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。
5. 1905 年，愛因斯坦提出光量子理論，成功解釋光電效應，進一步推廣能量不連續的概念。



教學策略

1. 說明物體以電磁輻射的方式將熱能向外散發，是熱的三種傳播方式（傳導、對流、輻射）之一，因為輻射與溫度有關，所以稱為熱輻射。任何物體只要溫度高於 0 K 就會釋放熱輻射，且熱輻射傳遞時不需要介質。

2. 在普朗克之前有關黑體輻射的研究，較著名的有符合短波長輻射的「維因定律」，和符合長波長輻射的「瑞立 - 京士定律」，但兩者都無法完整解釋黑體輻射現象。
3. 實際教學時，是否提「黑體輻射」這個名詞，由教師視教學現場狀況而定；若不提，則可用「熱輻射」暫時取代即可。
4. 普朗克在研究黑體輻射時，他做了一個有違古典物理中電磁波是連續能量的假設，他認為當電磁波與物質發生交互作用時，物質所放出或吸收的能量應有一最小的單位，而電磁波要放出或吸收的能量，也是以最小能量的整數倍來進行。因此在放出或吸收的交互作用過程中，能量不再是連續的，而是形成一個單位、一個單位的不連續現象，這種性質稱為能量量子化。
5. 愛因斯坦在 1905 年修正了普朗克的提議，認為電磁波的能量並不是只有在與物質發生交互作用時，才呈現量子化，而應該是電磁波的能量本來就呈現量子化，稱為電磁波量子化。
6. 可向學生說明，在微觀世界中，量子化是相當普遍的現象，例如物質、電荷等。

參考補充／普朗克

1858 年生於德國，在慕尼黑及柏林接受教育。普朗克對熱力學中的黑體輻射問題深入研究，發現黑體對能量的吸收及發射必須有能量的最小單位而非連續的，稱為能量量子，因而創立量子論。普朗克因量子論的貢獻，1918 年獲諾貝爾物理獎。

普朗克雖是量子論的創始人，但他生性相當保守，他一再提醒，引用此一假定要非常小心，只有在振子吸收或輻射能量時才適用，當輻射在空間傳播時是不適用的，這樣就可減低與大家所公認的馬克士威電磁波理論的衝突；當量子論已獲發展，並被引用解釋其他領域的物理現象時，普朗克自己仍在做調和量子論與古典理論的工作。1914 年他提出《量子假說的另一表述法》論文，企圖仍以連續性輻射的過程代替能量量子觀念，這種保守的態度使他在量子論的發展上沒有進一步重要的貢獻。普朗克後來曾說：「能量量子的觀念，在物理學中的地位，比我最初想像的要重要得多」。

參考補充／熱輻射

一般物體的輻射速率可以斯特凡 - 波茲曼定律（又稱斯特凡定律）描述：物體表面單位面積的輻射功率 P 與物體的絕對溫度 T 的 4 次方成正比：

$$P = \varepsilon \sigma T^4$$

其中 ε 為物體表面的輻射率，一般物體介於 0 ~ 1 之間，黑體的輻射率為 1； σ 稱為斯特凡 - 波茲曼常數，其值為 $5.6704 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ 。

另外黑體輻射的最大強度所對應的波長 λ_{max} 只和黑體的表面溫度 T 有關：

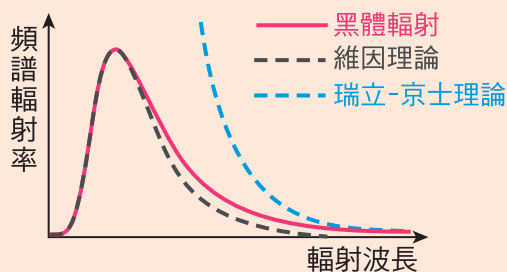
$$\lambda_{\text{max}} T = 2.897 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$$

此等式稱為維因定律。

參考補充／ 普朗克之前的黑體輻射研究

1900 年，兩位英國物理學家瑞立（John William Strutt，1842 - 1919）與京士（Sir James Hopwood Jeans，1877 - 1946）根據古典熱力學與電磁學理論，計算出黑體輻射的「瑞立 - 京士定律」，但只符合長波長的部分，短波長部分出現迅速發散現象，與實驗有極大落差，在物理史上稱為「紫外光災難」。

在瑞立與京士提出「瑞立 - 京士定律」之前，維因（Otto Fritz Franz Wien，1864 - 1928，德國物理學家）在 1896 年曾用空腔模擬黑體輻射，並提出「維因定律」，但此定律與「瑞立 - 京士定律」恰好相反，只符合短波長的部分，不過卻比瑞立和京士的研究結果更貼近實際的輻射曲線。德國物理學家勞厄（Max von Laue，1879 - 1960，1914 年諾貝爾物理學獎）對維因的貢獻給予極高的榮耀：他引導我們前往量子物理的大門（He led us to the very gates of quantum physics）。



基本概念釐清

1. 所有的物體，在任何溫度下都會產生熱輻射而發射電磁波。

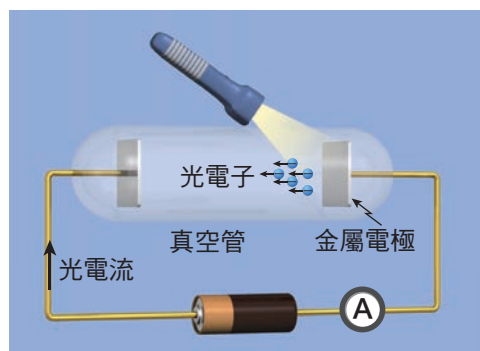
答對。物體的溫度高時，所發射的電磁波平均波長較短；溫度低時，所發射的電磁波平均波長較長。

6-2 光的粒子性

授課重點

一、光電效應

1. 光照在金屬板上，使部分電子脫離金屬表面而產生電流的現象，稱為光電效應。
2. 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。
3. 1902 年，德國科學家雷納，對光電效應作詳細地研究，整理出以下特性：



項目	雷納的研究	古典電磁理論的困難
入射頻率	入射光頻率必須大於底限頻率 f_c ，才有光電流。不同金屬材料，具有不同的底限頻率。	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的存在。
反應時間	一經照射，光電流幾乎立刻產生，其大小與光強度成正比。	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。實際實驗顯示，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。
最大動能	光電子的最大動能與入射光頻率相關，但與光強度無關。當入射光頻率愈大，所產生的光電子的最大動能就愈大。	提高光的強度，電磁波的振幅也隨之增大，金屬表面的電子受到較大的電磁力，光電子的最大動能也應該增加。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不變。

※說明光電子的最大動能，可能須配合光電方程式： $hf = W + K_{\max}$ 。但是課綱對於光電效應只須定性說明現象，而不涉及任何數學推導，因此在教學上若不精確說明光電效應的能量守恆，則最大動能可改為平均動能，以平均值的概念說明電子的動能與入射光頻率有關，而與光強度無關。



教學策略

1. 此單元主要說明雷納對光電效應的研究，同時點出研究結果與古典電磁理論的衝突所在。
2. 學生對於「入射光的頻率和強度對光電效應的影響」較無法立即了解，有必要再次強調和提醒：
 - (1) 入射光的頻率：
 - ① 入射光頻率必須大於底限頻率 f_c ，才有光電流。
 - ② 在入射光頻率大於底限頻率的前提下，頻率愈高，則光電子的最大動能就愈大。
 - (2) 入射光的強度：
 - ① 能否產生光電流，與入射光的強度無關。
 - ② 在入射光頻率大於底限頻率的前提下，強度愈大，則光電流就愈大。

參考補充／

赫茲與光電效應

1887 年，赫茲在馬克士威過世後七年，從一個簡單的實驗裡證實電磁波的存在。實驗過程中，赫茲無意間發現一個特殊現象，當有光照射時，電磁波似乎比較容易發出。赫茲把這個發現也寫成了論文發表。當時大家正欣喜於電磁波的發現，讓馬克士威的電磁理論更加圓滿成功，這個特殊現象並沒有引起太多人的注意。赫茲並不知他當時的發現是現今量子存在的重要證據。可惜因緣未臻成熟，一個重大的物理發展就此延後了二十多年。他一方面成功地捍衛了電磁理論，為古典電磁理論注入了生命；但另一方面，卻同時埋下了毀滅古典電磁理論的炸藥，但也為新的物理播下了種子。

幾年之後，赫茲的學生雷納（Philipp Lenard，1862 - 1947，德國人，1905 年諾貝爾物理獎）在探討赫茲的電磁波效應的過程中，發現到紫外光照射金屬時有電子從金屬表面逸出，這種電子叫做光電子。這種現象有點類似陽光把海面的水蒸發出來一樣，此現象後來稱作光電效應。



授課重點

二、愛因斯坦的光量子

1. 1905 年，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。

$$E = hf \quad h = 6.626\,070\,150 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}, \text{ 稱為普朗克常數}$$

光子的能量 hf 無法再分割，是具有頻率 f 電磁波的最小能量單位。

2. 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，此能量為電子脫離金屬表面所需的最低能量，也稱為金屬的功函數，以 W 表示。
 - (1) $hf < W$ ：電子無法取得足夠的能量脫離金屬表面，此時沒有光電流。
 - (2) $hf = W$ ：電子吸收光子的能量後，恰可脫離金屬表面；此時光子的頻率恰等於底限頻率，即 $W = hf_c$ ，由於各個金屬產生光電效應所需的最小能量不同，所對應的底限頻率也不同。
 - (3) $hf > W$ ：電子吸收光子的能量後，可脫離金屬表面，其能量扣除脫離表面所需的最低能量，以及因碰撞而損失的能量後，剩餘的能量成為光電子的動能。
3. 入射光強度愈大，代表光子數目愈多，在可發生光電效應的情形下，能產生的光電子數目也愈多，因此光電流隨之增加。
4. 電子吸收光子後，其能量扣除脫離表面所需的束縛能，即為光電子的動能。因此入射光頻率愈高，光電子的最大動能也會隨之增加。



教學策略

1. 1905 年，愛因斯坦在德國的《物理年報 (Annalen der Physik)》發表一篇名為《關於光的產生和轉化的一個啟發性觀點 (On a Heuristic Viewpoint Concerning the Production and Transformation of Light)》，提出了光量子假說，這是歷史上第一次揭示微觀波粒二象性。
2. 老師可視教學現況，斟酌是否以能量守恆的觀點，補充光電子的最大動能以及光電方程式。光子的能量被金屬中的電子吸收後，部分用於光電子離開金屬表面所需的束縛能（功函數），若沒有再與其他金屬原子發生碰撞，此時光電子具有最大動能 K_{\max} 。因此愛因斯坦基於能量守恆，寫出光電方程式：

$$hf = W + K_{\max}$$

3. 光電效應發展過程中，4 位關鍵性人物：

- (1) 赫茲：發現光電效應。
- (2) 雷納：光電效應的突破性研究，凸顯古典電磁理論的困難。
- (3) 愛因斯坦：以能量守恆的觀點提出光量子論，理論解釋光電效應。
- (4) 密立坎 (Robert A. Millikan, 1868 - 1953, 美國人, 1923 年諾貝爾物理獎)：以實驗證實愛因斯坦的光量子論。

參考補充／ 光量子論

維因曾經對黑體輻射現象提出一個近似公式，但它只在短波長區或能量密度小的範圍內與實驗相合，愛因斯坦認為，這個相符的部分必然有其原因。於是他計算單頻輻射的熵（entropy）對體積的變化關係，得到以下式子：

$$W = \left(\frac{V}{V_0} \right)^{\frac{E}{hf}}$$

其中 E 是單頻輻射（頻率為 f ）被包圍在體積 V_0 中的總能量， W 是一個統計機率數值，可寫成 $W = \left(\frac{V}{V_0} \right)^n$ ，意即在給定的體積 V_0 中的所有 n 個彼此互不相關的運動質點，在偶然選擇的一個瞬間聚集在體積 V 內的機率有多大的意思。愛因斯坦認為能量密度小的單頻輻射，從熱學方面來看，就好像它是由一些互不相關的、大小為 hf 的能量子所組成。如果輻射好像是由大小為 hf 的能量子所組成的不連續的質點一樣，那麼，接著就會使人想去研究，是否光的產生和轉化的定律也具有這樣的性質，就像光是由這樣一種能量子所組成的一樣。

於是愛因斯坦在 1905 年發表一篇名為《關於光的產生與轉化的一個啟發性觀點（On a Heuristic Viewpoint Concerning the Production and Transformation of Light）》的論文，闡述關於光電效應的看法。「啟發性」（heuristic）意思是：這理論對於指導進一步的實驗工作是很有價值的，但並不一定能證實或根本無法證明。愛因斯坦之所以用這字眼稱呼自己的理論，是因為他的說法「與已知的光學理論不相容，恐難獲得支持」，頂多只會被當成是對光學現象的一個局部描述罷了。



授課重點

三、光電效應的日常應用

1. 數位相機或手機內的感光元件，利用光電效應可將光的訊號轉換為電的訊號，產生數位照片。
2. 太陽能電池由矽晶體做成，當光打在太陽能電池上，由於光電效應產生光電流，將光能轉換為電能，達到發電的效果。





教學策略

1. 擇要說明光電效應在日常生活中的應用，除了數位相機或手機內的感光元件、太陽能電池之外，其他像攝影專用的光度計（**photometer**）、夜晚用來觀測物體的夜視鏡，或用於防範電梯門夾傷人的安全設計中的光電管等，都是光電效應常見的應用。
2. 說明日常生活中的應用之外，應盡量避免記憶性的評量，免得流於片段性、記憶性的教學。

參考補充

太陽能電池

太陽能電池是一種將光能轉成電能的裝置。太陽能電池事實上並不是電池，原意為太陽能單元的意思。

太陽能發電是一種再生的發電方式，發電過程中不會產生溫室氣體，因此不會對環境造成汙染；但太陽能電池板的生產過程會排放大量有毒廢水，以及大面積裝設太陽能板時，可能造成環境生態的改變。

太陽能電池的優劣最重要的是能量轉換效率，目前各種材料的能量轉換效率普遍在 20 % 上下，因此太陽能發電的成本仍舊是高於火力發電。



基本概念釐清

1. 若不改變入射光的頻率，只增加入射光的強度，則光電子的最大動能以及光電流都會隨之增加。
答 錯。增加入射光的強度，表示每秒入射的光子數增加，因此光電流隨之增加；但光電子的最大動能與入射光的強度無關，所以光電子的最大動能不變。
2. 增加入射光的強度，會縮短產生光電流的時間。
答 錯。產生光電流的時間與入射光的強度無關。
3. 電子脫離金屬表面所需的束縛能愈大，則產生光電流的底限頻率也愈大。
答 對。電子脫離金屬表面所需的束縛能愈大，則產生光電流所需的光子能量也隨之增大，因此底限頻率也愈大。

6-3 物質的波動性



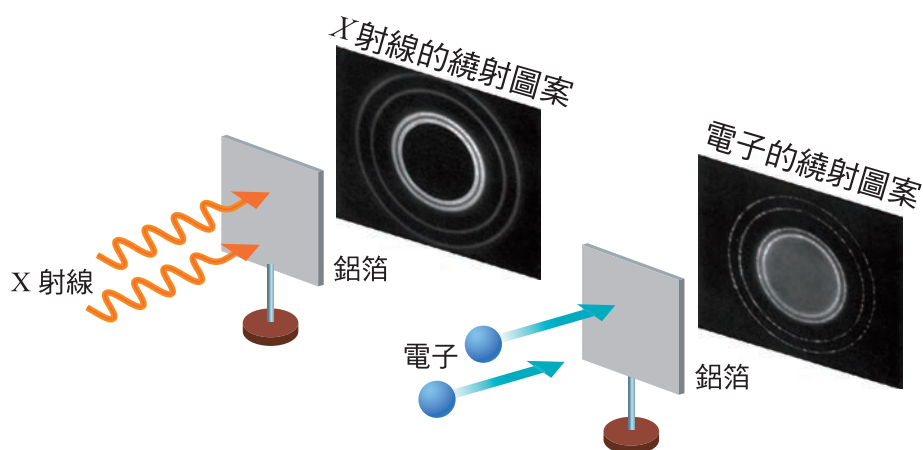
授課重點

1. 1923 年，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。

2. 物質波的實驗證明：

(1) 1927 年，美國科學家戴維森與革末利用鎳金屬晶體，進行電子繞射實驗，首次證實了德布羅意的假設。

(2) 1927 年，湯姆森利用電子束照射鋁箔，得到電子繞射圖案，與 X 射線的繞射圖案十分相似，證明電子確實具有波動性。



3. 物質波的物理內涵：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。



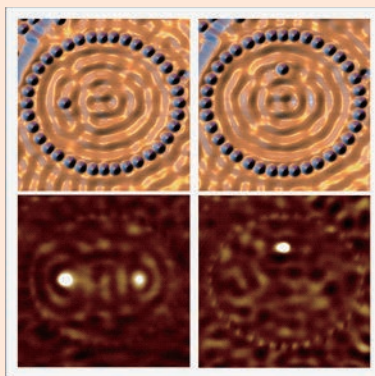
教學策略

1. 德布羅意（法語：Louis de Broglie，1892 - 1987，法國人）在大學時代原是專攻科學史，他的哥哥是著名的 X 射線專家，他受到哥哥的影響轉而對物理發生興趣。他在博士論文中提出每一個粒子都伴有一定的波，稱為物質波。
2. 有關物質波的實驗證明，戴維森與革末和湯姆森的實驗方式雖異，但結果卻都顯示電子有繞射現象，而證實物質波確實存在。
 - (1) 戴維森與革末利用電子射向鎳金屬晶體，測量電子反射後的繞射現象。
 - (2) 湯姆森利用電子束照射鋁箔，測量透射後電子的繞射圖案。
3. 德布羅意因為物質波理論，獲頒 1929 年諾貝爾物理獎，戴維森和湯姆森則因為實驗發現電子的晶體繞射現象，而一同獲頒 1937 年諾貝爾物理獎。

參考補充

物質波現形記

物質波聽起來很抽象，雖然可以從電子繞射實驗，確認其波動的性質，但科學家也試著用其他方式讓物質波現形。在西元 2000 年時，美國 IBM 公司的科學家利用 36 顆鈷原子，在銅表面上蓋起橢圓形的量子圍欄（quantum corral）。如圖中所示，若在橢圓的左焦點上，放置一顆鈷原子，則發現空無一物的右焦點上，居然出現了量子分身。如果將鈷原子移離焦點的位置，則量子分身就消失了。這個奇特的現象，與點光源在橢圓面鏡中的成像特性相同，是物質波最直接的實驗證明。（圖片來源：NATURE | VOL 403 | 3 FEBRUARY 2000 | www.nature.com）



- ◀ 在橢圓形的量子圍欄內，放置於焦點上的原子，會在另一處的焦點產生分身。但若放在其他位置，量子分身就消失了。



基本概念釐清

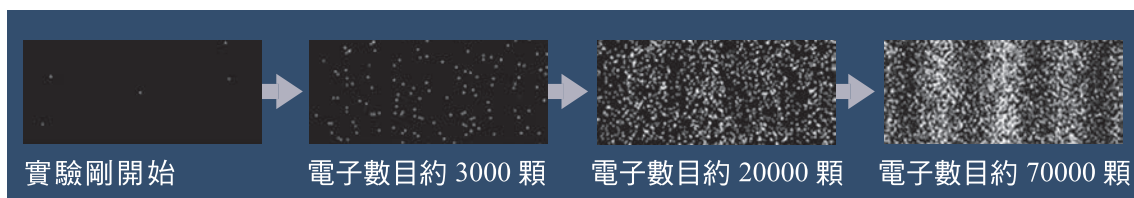
1. 物質波的本質就是電磁波。
- 答 錯。**電磁波以電磁場的振動將能量傳遞出去，而物質波則是物質在空間的機率分布，兩者的本質並不相同。

6-4 波粒二象性



授課重點

1. 光是電磁波，而光電效應則凸顯了光的粒子性；電子是粒子，而電子的繞射實驗則顯示電子的波動性。
2. 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。
3. 電子雙狹縫干涉實驗：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。
 - (1) 電子一點一點出現，點出其粒子性。
 - (2) 最後干涉條紋浮現，顯示其波動性。



4. 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。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。唯有量子論，才能完整理解波粒二象性。



教學策略

1. 電子的雙狹縫干涉是一個特殊的實驗，在此實驗中，可以先後呈現出電子的粒子性與波動性。費曼曾說：「電子的雙狹縫干涉是量子力學的核心關鍵。在這個真實世界裡，它包含的就是那唯一的謎。」

2. 2002 年 9 月物理學家為歷史學家選出有史以來最美麗的十大物理實驗，並刊登在《物理世界》（Physics World）科學雜誌上，其中榮登第一名的實驗就是電子的雙狹縫干涉（Young's double-slit experiment applied to the interference of single electrons）。
3. 以電子取代光為波源，仿造 1801 年楊氏所作的雙狹縫實驗，遲至 1961 年才由瓊森（Claus Jönsson，1931 -，德國人）成功觀測到電子的干涉條紋，這是因為電子的波長遠比光子還短、更不易觀察所致。
4. 對於強度低到一次只有一個光子或電子入射，依然會產生干涉的情況，應是最不容易理解的部分。根據量子論，光子與電子的運動可由機率分布描述，我們無法知道光子或電子是從哪一個狹縫通過或射向哪一方向，僅能知道光子或電子通過每一狹縫及在該處飛行方向的機率。換言之，即使是一個光子或是電子，本身已經具有機率性質，這又是觀念上的一大轉變。要特別注意的是，「電磁波」或「物質」都是古典物理中慣用的語言，其實二者都是具有波與粒子的二象性，無論是哪一種波（電磁波或是物質波），其波強度都是代表一種機率的分布。

參考補充／ 最美麗的十大物理實驗

《物理世界》（Physics World）雜誌所刊前十名最美麗的物理實驗，大多是個人進行的實驗，最多只有幾名助手幫忙而已，也就是物理學家眼中的美指的是簡單的美。獲選前十名最美麗的物理實驗如下：

1. 楊格雙狹縫干涉實驗應用於單一電子的干涉（Young's double-slit experiment applied to the interference of single electrons）
2. 伽利略之自由落體實驗（Galileo's experiment on falling objects）
3. 密立坎之油滴實驗（Millikan's oil-drop experiment）
4. 牛頓用三稜鏡作陽光之色散（Newton's decomposition of sunlight with a prism）
5. 楊格之雙狹縫干涉實驗（Young's light-interference experiment）
6. 卡文迪西之扭桿實驗（Cavendish's torsion-bar experiment）
7. 厄拉托西尼之測量地球圓周（Eratosthenes' measurement of the Earth's circumference）
8. 伽利略在傾斜平面上作滾球實驗（Galileo's experiments with rolling balls down inclined planes）
9. 拉塞福之發現原子核（Rutherford's discovery of the nucleus）
10. 傅科擺（Foucault's pendulum）

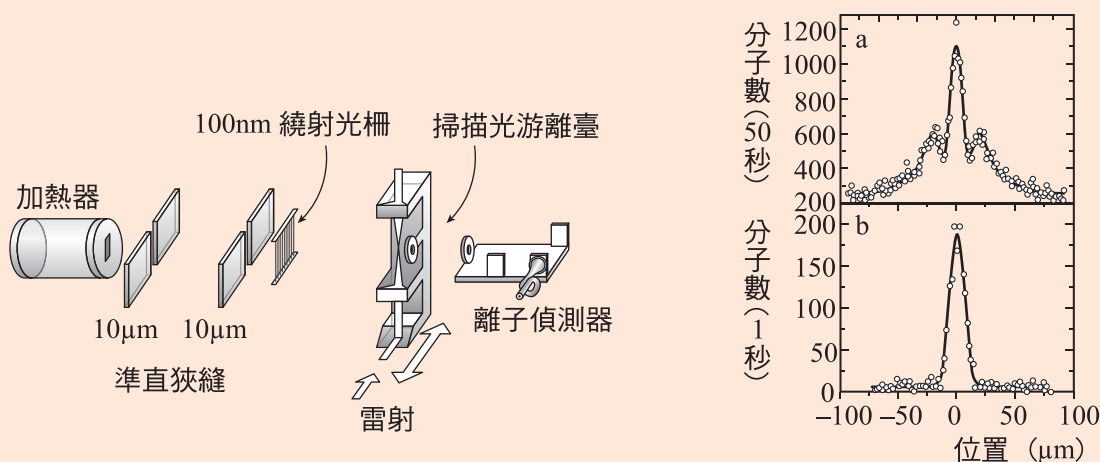
參考補充／通過雙狹縫的光子

課文中電子通過雙狹縫的干涉實驗，點出了電子具有波與粒子的二象性。量子力學的創始人之一海森堡（Werner Heisenberg，德國人，1901 - 1976）在《物理與哲學》一書中，以光子的角度，重新闡釋光的雙狹縫干涉現象，並指出古典想法是行不通的。

「若採用古典的想法，在雙狹縫干涉實驗中，光子由其中一個狹縫穿過，才到達後方的螢幕產生光點。對穿過第一個狹縫的光子而言，第二個狹縫是開或關，並不會影響其到達螢幕的機率分布。故其結果應與僅有第一個狹縫的狀況相同。同樣地，對通過第二個狹縫的光子來說，其機率分布與僅有第二個狹縫打開的結果相同。由於光子必通過其中一個狹縫，螢幕上所觀測到的結果，應等於這兩種狀況的機率分布相加。但如此一來，就不會有干涉條紋了。」

「我們知道上面古典的論述是錯的，因為螢幕上確實有干涉條紋。因此光子必定從第一個狹縫或是第二個狹縫通過的說法，是有問題的。所謂『發生』一詞，僅止於實驗設計所能觀察到的，強問光子通過哪一個狹縫的說法，只會導致矛盾的結果。」

電子或光子都具有波與粒子的二象性，科學家為確認巨大的分子也有相同的特性，於1999年利用 C_{60} 分子束通過狹縫，看是否也能產生繞射的現象。由圖中的實驗結果可知，即使是如 C_{60} 般巨大的分子（與電子相比），也有明顯的量子繞射現象，再一次確認物質具有波與粒子的二象性。



▲ C_{60} 分子干涉實驗的示意圖。當 C_{60} 分子通過狹縫後，即產生繞射的圖案（右上圖），而若將狹縫移除，繞射的條紋也隨之消失（右下圖）。



基本概念釐清

1. 作電子的雙狹縫干涉實驗時，根據電子的速度以及運動方向，就可以決定電子通過哪一個狹縫。

答錯。根據量子論，電子的運動可由機率分布描述，我們無法知道電子是從哪一個狹縫通過，僅能知道電子通過每一狹縫的機率。

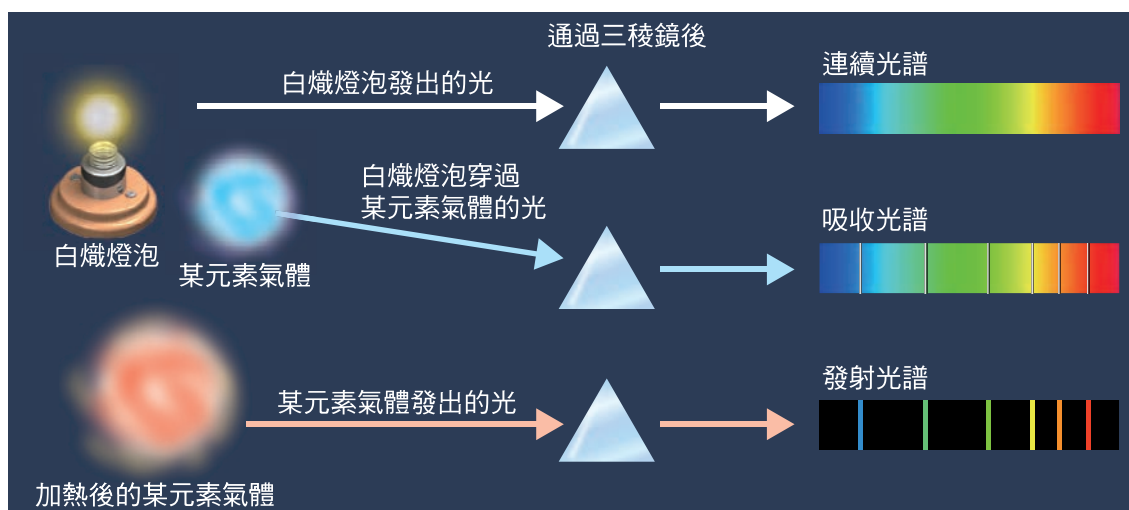
6-5 原子光譜

授課重點

一、原子光譜的獨特性

1. 光譜依產生的方式不同，可分成三大類：

- (1) 連續光譜：光源為白熾燈泡，發出的白光通過三稜鏡後，所得光譜呈現連續分布。
- (2) 發射光譜：光源為加熱後的元素氣體，光譜僅在特定波長處出現亮線。
- (3) 吸收光譜：白光通過元素氣體，原本連續的光譜，會在特定波長處出現暗線。



2. 相同的元素氣體，其發射光譜的亮線與吸收光譜的暗線，會出現在相同波長處。
3. 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。利用光譜分析，與已知元素的譜線比對，可以得知物體的組成物質為何。

**教學策略**

1. 發射光譜中所呈現的亮線，是原子本身所發射出來的光形成的；而吸收光譜中所呈現的暗線，是原子吸收白光中特定波長的光形成的。
2. 說明不同的原子有不同的光譜；經由測量一個物體發出的原子光譜，我們可以推論出它的組成成分。
3. 說明太陽光譜：太陽內部的核融合反應發出強光，經過外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。利用精密的光譜分析，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。

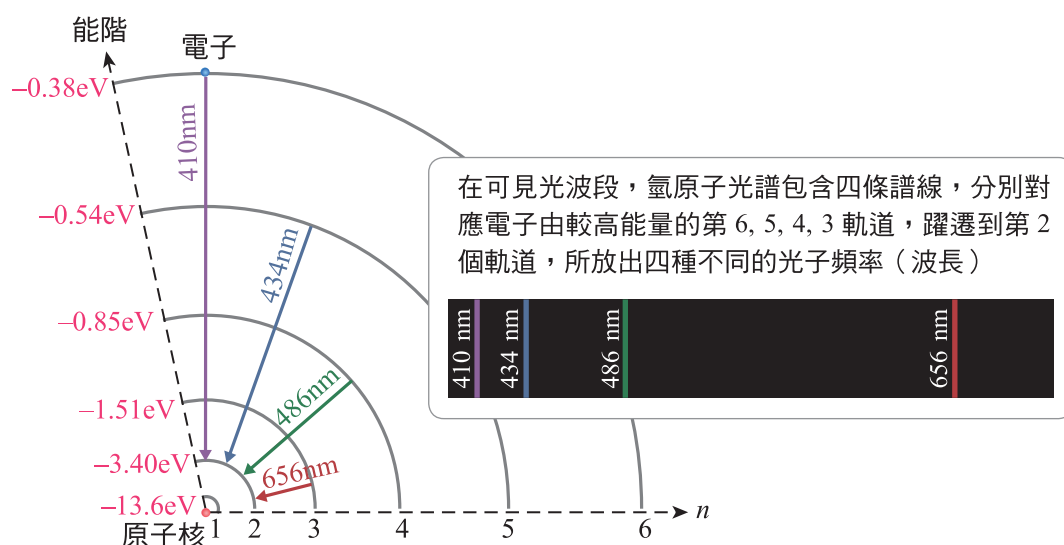
參考補充／

太陽光譜

牛頓曾用三稜鏡觀測太陽光，太陽光因色散而形成光譜，當時認定太陽光為連續光譜。1802年，英國化學家沃拉斯頓首先注意到太陽光譜中有一定數量的暗線，隨後夫朗和斐（Joseph von Fraunhofer, 1787 - 1826，德國物理學家）開始有系統地研究與測量這些譜線。他一共畫出 570 條譜線，這些譜線後來便命名為「夫朗和斐譜線」。

**授課重點****二、波耳的氫原子模型**

1. 1913 年，波耳（Niels Bohr, 1885 - 1962，丹麥人）基於拉塞福的原子模型，加入兩個重要的假設，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，對應到一個特定能量，原子的能量因而呈現量子化的現象；當電子處於這些軌道時，不會放出電磁波。這些特定的能量，稱為該原子的能階。
 - (2) 若電子由較高能階 E_H ，躍遷到較低能階 E_L ，會放出光子，根據能量守恆，光子的能量為兩能階的能量差： $hf = E_H - E_L$ 。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。

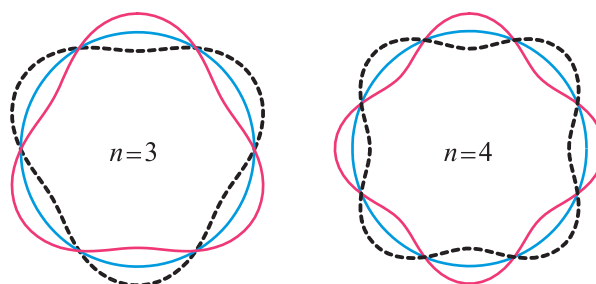


2. 波耳藉由原子模型的兩個假設，算出能階躍遷所產生的氫原子光譜，與實驗觀測到的氫原子光譜相符。因此進一步推論，不同原子具有不同的能階，因此產生不同的光譜，解釋了原子光譜的獨特性。



教學策略

1. 說明原子外圍的電子只能具有特定的能量，稱為能階。
2. 簡單指出能階的存在與電子的波動性有密切關聯。德布羅意曾經用物質波解釋原子的穩定性：電子繞行原子核運動時，物質波形成穩定的駐波，電子才不會輻射能量，由此得出電子軌道的周長應為物質波波長的整數倍，即 $2\pi r = n\lambda$ 。



3. 說明電子可以經由吸收或發射特定能量（頻率）之光子由一個能階躍遷到另一個能階，從而引入原子光譜之概念。
4. 氫原子的電子最穩定狀態為在最低能量態，此稱為基態，在基態上的電子吸收能量時會躍遷至高能態，稱為激發態，激發態上電子較不穩定，當降至較低能量的軌道上時，把多餘的能量以光的形式放出，形成氫原子的發射光譜。實際教學時，不必提出基態、激發態或量子數等名詞，但需建立能量守恆的重要觀念。
5. 不論是發射光譜或是吸收光譜，任一條光譜線所對應的光子能量 hf ，必等於氣體原子兩個能階的能量差 $E_H - E_L$ 。
6. 根據波耳的氫原子模型，電子的軌道半徑呈現量子化：即 $r = r_0 n^2 \propto n^2$ ，其中 $r_0 = 0.53$ 埃，稱為波耳半徑。因此氫原子的大小（直徑）大約 1 埃或 0.1 奈米，且各能階的軌道半徑之比為 1 : 4 : 9 : 16...



基本概念釐清

1. 原子的發射光譜是由電子在特定的圓形軌道上運動時，所輻射出來的電磁波造成的。

答錯。電子從較高能階躍遷至較低能階時，把多餘的能量以光的形式放出，形成原子的發射光譜。

2. 在地球上測到的太陽可見光光譜是連續光譜。

答錯。太陽內部因核融合反應所發出的光，雖然原本發出來的光是連續光譜，但是經過外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，因此地表處所觀察的太陽可見光光譜，為吸收光譜。

3. 當原子的溫度升高時，原子的每一條發射光譜線的頻率將隨之增加。

答錯。原子每一條發射光譜線都有特定的頻率和波長，這些特定的頻率與原子的能階結構有關，而溫度升高並不會改變原子的能階結構，因此發射光譜線的頻率不變。

第 6 章

試題探究



光的強度

一般在物理上有關光的強度可能有兩種不同的含意，一是指「發光強度」（luminous intensity），用來表示光源在某一方向上單位時間、單位立體角內的光的能量，國際單位為燭光（cd）；另一是指光波的「強度」（intensity），用來表示被照射物體在單位時間、單位面積上接受到光的能量，國際單位為瓦特 / 公尺²（W/m²）。在光電效應的實驗中，光強度的意義應該是指後者。

可是就光子的角度，要如何以光子來描述光強度呢？有些書籍用「單位時間內照射的光子數」或「單位時間、單位面積上照射的光子數」說明光強度，就強度的原始定義來說，前者的說法缺了照射面積，而後者的說法比較接近，但也不盡正確。例如底下的問題：

◎若以相同強度的藍光和綠光分別照射同一金屬，假設兩色光都可以產生光電效應，則哪一色光所測到的光電流比較大？

如果光強度是「單位時間、單位面積上照射的光子數」，那麼相同強度的藍光和綠光，若照射面積相同，則金屬表面每秒照射到的光子數也就相同，兩者測到的光電流應該一樣。可是每一顆藍光光子的能量大於綠光光子的能量，所以相同強度的藍光和綠光（照射面積仍相同），藍光每秒的光子數會較少，假如兩者產生光電效應的效率相同（即每秒產生的光電子數與每秒的光子數之比值相同），則綠光測到的光電流應該較大。

因此如果只提到增加照射光的強度，是否也會提高測到的光電流，答案可能也是否定的，因為增加照射光的強度，有可能單位時間內的光子數反而較少（例如使用頻率為原先的 2 倍、強度為原先 1.5 倍的入射光，則單位時間內的光子數變為原先的 0.75 倍）。所以在光電效應中要適當描述光強度 I ，比較理想的方式應該是兼具單位時間內的光子數 n ，以及入射光的頻率 f ，亦即：

$$I = \frac{nhf}{A}$$

上式中的 A 為光的照射面積。如此一來，只增加單位時間內的光子數，或是只增加入射光的頻率，都應該會增加照射光的強度。

雖然這樣的定義，看起來似乎在古典物理和近代物理之間有了共通點，但卻讓許多試題有了爭議，這樣的爭議都是源自於光強度的說明不清。例如 102 年學測題：

◎光電效應是光具有粒子性的實驗證據，今以單色光照射金屬表面後，金屬表面的電子吸收入射光的能量，部分能量用於克服金屬表面對電子的束縛，剩餘能量則轉為電子動能，自金屬表面逸出，成為光電子。下列有關此光電效應實驗的敘述，哪些正確？（應選 2 項）

- (A) 入射光子的能量由頻率決定，頻率愈高，能量愈大
- (B) 入射光子的能量由光強度決定，強度愈大，頻率愈高
- (C) 入射光子的頻率愈高，光電子的動能會隨之增加
- (D) 入射光的強度愈大，光電子的動能會隨之增加
- (E) 以同一單色光照射時，光電子的動能與被照金屬材料的種類無關 [102 學測]

參考答案 AC

其中 (D) 選項，如果入射光強度的增大是因為入射光頻率增加，那麼光電子的動能的確會隨之增加；如果強度增大是因為每秒光子數的增加，則光電子的動能不變，因此就產生了爭議。當然因為光電子的動能不一定隨入射光強度的增大而增加，所以 (D) 選項也不能算正確，只是題意如果想以每秒的光子數用來表達光的強度，最好加上「入射光頻率不變的情況下」之條件，可以避免可能發生的爭議。