

CHAPTER 5

量子現象

物理不思議

在 5-2、5-3 我們將學習到物質的波粒二象性，也就是當物質（粒子）在運動的時候會伴隨著一種波動，這種波動其實是粒子位置的機率分布模式。當粒子的質量愈小的時候，它的物質波（機率性）就愈明顯。如果日常生活中的巨觀粒子，例如棒球、籃球也具有明顯的物質波，那麼這類球賽的進行會出現什麼奇特的現象呢？



參考答案

如果棒球、籃球也有明顯的物質波，那麼它們在飛行的時候便具有明顯的機率性，於是我們無法用平時熟悉的牛頓力學去預測它們在某個時刻將出現在某個精確位置。因此當棒球投手將球投出去後，球飛行到本壘板上空時，打擊者會找不到擊球點，而連裁判也會看不清楚球的進壘軌跡。至於籃球比賽，當球被準確地投出而飛向籃框時，由於物質波產生的機率性，使得籃球不一定會進框得分。像上述這些情景，球賽的勝負就會像賭博一樣，是由機率來決定的，那麼球員是不是就不必認真練球了？球賽是不是也會失去競爭的意義了？

5-1

光的粒子性——光電效應

概念 1 光電效應的意義與發現 (配合課本 p. 125)

- 早期的科學家，例如牛頓等人，根據光的直進、反射等特性推論：光是由粒子所組成。但是光粒子的想法在楊氏做出光的干涉實驗後，就因為無法解釋干涉現象而被放棄。20 世紀初，愛因斯坦為了解釋光電效應，重新提出光由粒子組成的可能性。仔細想想，就像水波雖然可以干涉，但是傳遞波動的介質卻是由水分子組成一樣；光波雖然可以干涉，但仍然有可能是由微小光粒子組成，只是光粒子數目太大，所以顆粒性不是很顯著。
- 光電效應是指金屬受到光的照射時，其表面電子吸收光能而脫離金屬的現象，如圖 5-1。這些逸出的電子又叫作光電子，被收集的光電子可在電路中形成光電流如圖 5-5。最早發現光電效應現象的科學家是赫茲。

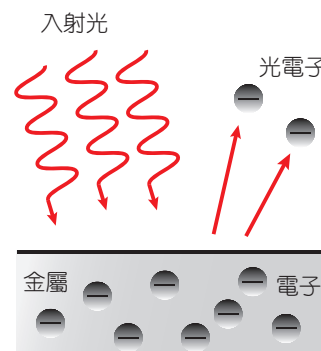


圖 5-1 ■ 光電效應示意圖。

概念 2 光電效應與古典物理的矛盾之處 (配合課本 p. 125)

- 赫茲的學生雷納 (Philipp Lenard, 1862–1947) 在深入研究光電效應後，整理出幾個重要結論如下：
 - 入射光的頻率必須高於某特定頻率 (稱為底限頻率 f_0 ，與金屬種類有關) 或波長小於某特定波長，才會使金屬產生光電效應。而且只要入射光的頻率達到上述條件時，即使照射光的強度很小，也會立即 (時間小於 10^{-9} 秒) 產生光電效應。反觀，如果入射光的頻率不夠高，即使光的強度再大，照射時間再久，也不會釋出光電子。
 - 光電子的動能與入射光的強度無關而與入射光的頻率有關，而且光電子的動能會隨著照射光的頻率增加而增大。
 - 當入射光的頻率在底限頻率之上時，入射光的強度愈強，單位時間釋出的光電子數愈多。

註：入射光的強度是指單位時間、通過單位面積的入射光能量。

- 雷納的上述結論(1)、(2)無法以古典物理解釋，說明如下：

- 要產生光電效應，金屬的表面電子必須吸收足夠的光能才能脫離金屬的束縛。電子脫離金屬的束縛所需的最小能量被稱為功函數，以 W 表示，與金屬種類有關如表 5-1。

表 5-1 某些金屬的功函數

金屬種類	功函數 W (eV)
Ag (銀)	4.26
Al (鋁)	4.28
K (鉀)	2.30
Na (鈉)	2.75

- (2)根據**古典物理**，光是電磁波，所以產生光電效應的原因是由於光波照射時，金屬表面的電子被光波中的**電場**晃動，就像船被波浪晃動一樣，電場晃動幅度（即振幅）夠大時，電子就可獲得足夠能量脫離原子的束縛而離開金屬表面。光的強度愈大，代表光波的電場晃動幅度愈大。因此若要產生光電效應，則照射光的強度要夠大。若照射光的強度不夠大，則照射時間只要夠久也可以使電子獲得足夠能量而產生光電效應。但是由**實驗結果**發現，能否產生光電效應的關鍵因素與照射光的**強度大小**及照射的**時間長短**都 無關，但卻與入射光的 頻率 大小有關，此實驗結果與古典物理顯然相違背。
- (3)根據**古典物理**，照射光的強度愈大，產生光電效應所需的時間愈短；照射光的強度愈弱，產生光電效應所需的時間愈長。但是由**實驗結果**發現，無論照射光的強度多少，只要頻率夠大都會 立即（時間小於 10^{-9} 秒）產生光電效應，也就是產生光電效應的時間與照射光的強弱 無關。
- (4)若照射光時可以產生光電效應，根據**古典物理**，照射光的強度愈大，產生的光電子之動能愈大。可是**實驗結果**並非如此，即光電子的動能大小與照射光的強度 無關，而是由照射光的 頻率 大小決定，也就是照射光的頻率愈高，產生光電子的動能愈大。

觀念小試 1

對一個特定材質的金屬而言，要產生光電效應，則入射光必須符合什麼條件？

- (A)強度要夠大 (B)照射的時間要夠久 (C)頻率要大於某個特定值 (D)只要有光源即可

答：C

觀念小試 2

有關光電效應的實驗，下列哪些違背古典物理？（應選 3 項）

- (A)降低入射光的強度，仍會立即產生光電子
 (B)增加入射光的強度，產生的光電子動能仍相同
 (C)入射光的頻率愈大，產生的光電子動能愈大
 (D)入射光的強度愈大，產生的光電流愈大

答：ABC

解析

(D)選項並不違背古典物理。按照古典物理，入射光的強度愈大，代表每秒入射的光能愈多，因此每秒產生的光電子數愈多，光電流就愈大。

概念 3 古典物理面臨困境的解決 (配合課本 p. 126)

1. 根據古典物理的電磁波理論，光波的能量與其振幅有關，而與頻率無關，所以很難理解光電子的產生與動能為何受光的頻率影響。為了解決這些矛盾，1905 年當時還默默無名的 愛因斯坦 (圖 5-2) 就大膽地提出「光量子」假說，說明如後。

2. 愛因斯坦認為光在空中傳播時，或是被物質吸收或發射時，光的能量可以是一份一份獨立而不連續的，即光的能量是 量子化 的，這點與古典物理所描述的「電磁波的能量是連續分布的」不同。

3. 愛因斯坦將每一份獨立的光能量，稱為 光量子 (light quantum)，後來被稱為 光子 (photon)。他並定義光子的能量如下：

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda}$$

E ：一個光子的能量，SI 單位為焦耳 (J)。
 h ：普朗克常數， $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ 。
 f ：光的頻率，SI 單位為赫茲 ($\text{Hz} = \frac{1}{\text{s}}$)。
 c ：光速， $c = 3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。
 λ ：光的波長，SI 單位：公尺 (m)。

以藍光為例，其頻率約為 7.0×10^{14} 赫茲，根據上式，其光子能量約為 4.6×10^{-19} 焦耳。由於普朗克常數非常小，即使微弱的光裡，也有數量龐大的光子。例如，聖誕樹上的一顆小型 LED 燈泡，每秒產生的光子數可以高達 10^{16} 個。

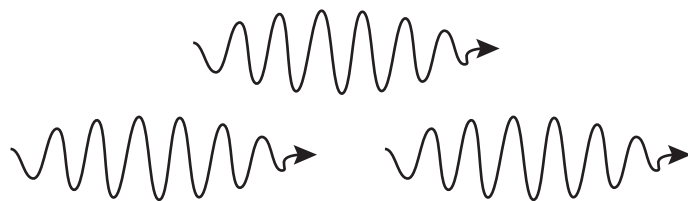


圖 5-3 ■ 光子示意圖。每一個光子代表「一份電磁能量」。

4. 光電效應就是金屬表面的電子吸收 光子 後逸出金屬表面的現象，這個過程光子會將能量轉移給電子，而且是一顆光子的能量轉移給一顆電子，即使照射光的強度很弱（每秒入射的光子數很少），也會立即產生光電效應。

5. 若光子的能量夠大（大於功函數 W ），即頻率夠高（高於底線頻率 f_0 ）或波長夠短時，則吸收光子的電子可以克服金屬表面的最小束縛能而飛離金屬。若光子能量不夠大，即頻率不夠高或波長不夠短時，則電子無法離開金屬。因此，產生光電效應的條件為： $hf > W = hf_0 \Rightarrow f > f_0$ 。

6. 根據能量守恆定律可得到：

$$\text{光子能量 } hf = \text{光電子的動能 } K + \text{電子脫離金屬的束縛能}$$

因此當照射光的頻率大於底限頻率時，光的頻率 f 愈高，光電子動能 K 愈大。

7. 若照射光（某單色光）可以產生光電效應，當其強度增大後，單一光子能量仍不變，所以產生的光電子動能並不會隨強度增加而變大，但是單位時間照射的光子總數目會增加，因此單位時

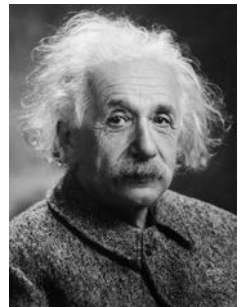


圖 5-2 ■ 愛因斯坦。

間產生的光電子數量會變多，造成光電流變大。

8. 現代實驗室裡的光偵測器，已經靈敏到可以偵測單一光子。因此，光是由光子所組成已經是事實，不再是假說。
9. 愛因斯坦的「光子假說」成功解決了某些光電效應的性質與古典物理之間的矛盾。他也因為此項貢獻而獲頒 1921 年諾貝爾物理學獎。

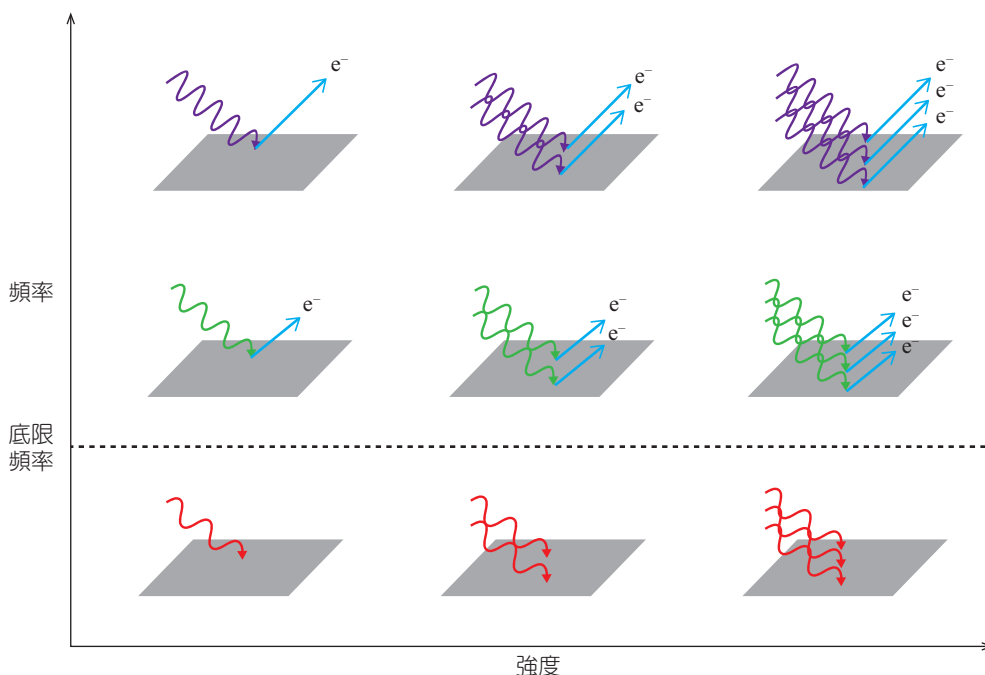


圖 5-4 ■ 光電效應裡，改變入射光強度或頻率時，光電子（以 e^- 表示）之數目與速度大小的示意圖，速度大小由箭頭長短表示。虛線高度為底限頻率，未達此頻率則無光電子產生。

觀念小試 3

要解釋光電效應與古典物理的矛盾，可以用光的什麼現象或理論解釋？

- (A)反射 (B)折射 (C)干涉 (D)繞射 (E)光的能量量子化

答：E

範例 1 光子的能量

- (1) 波長為 400 nm 的紫光光子能量為多少焦耳？相當於多少電子伏特 (eV)？

(1 eV = 1.6×10^{-19} J)

- (2) 已知銀的功函數為 4.3 eV，將紫光光子照射在銀的金屬表面，是否可產生光電子？

答：(1) 5.0×10^{-19} J，3.1 eV (2) 否

解析 (1) $E = hf = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6.6 \times 10^{-34} \times 3.0 \times 10^8}{400 \times 10^{-9}} = 5.0 \times 10^{-19}$ (J)

$$\frac{5.0 \times 10^{-19}}{1.6 \times 10^{-19}} = 3.1 \text{ (eV)}。$$

- (2) 因為 $3.1 \text{ eV} < 4.3 \text{ eV}$ ，所以無法產生光電子。

類題 1



- (1) 要使光電子離開某金屬表面所需的最小能量為 4.0×10^{-19} 焦耳。則照射光的頻率最少為多少赫茲才能使該金屬產生光電效應？
- (2) 已知鈉的功函數為 2.4 eV，則照射光的波長最大不能超過多少奈米才能使鈉產生光電效應？(1 eV = 1.6×10^{-19} J)

答：(1) 6.1×10^{14} Hz (2) 520 nm

解析 (1) 由 $E = hf \Rightarrow 4.0 \times 10^{-19} = 6.6 \times 10^{-34} \times f \Rightarrow f = 6.1 \times 10^{14}$ (Hz)。

$$(2) \text{ 由 } E = hf = \frac{hc}{\lambda} \Rightarrow 2.4 \times 1.6 \times 10^{-19} = \frac{6.6 \times 10^{-34} \times 3.0 \times 10^8}{\lambda}$$

$$\Rightarrow \lambda = 5.2 \times 10^{-7} \text{ (m)} = 520 \text{ (nm)}。$$

概念 4 光電效應的應用 (配合課本 p. 127)

利用光電效應，可以把光能轉換為電流，如圖 5-5，進而控制電子裝置。現代生活裡，隨處可見光電效應的應用。分述如下：

1. 光電管 (phototube)

光電管是利用光電效應將光轉換成電流的裝置，可以應用於電路中的光控開關。例如自動門感測到有人接近時會自動打開，如圖 5-6 左圖。

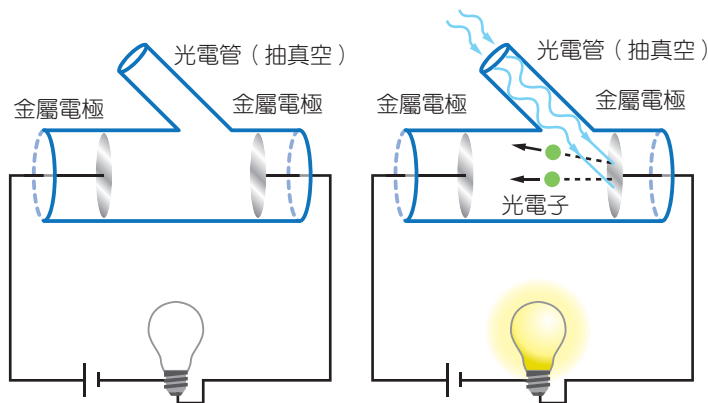


圖 5-5 ■ 利用光電效應，可以把光束轉換為電流。



圖 5-6 ■ 自動門的開與關，可用各種方法控制，其中左圖利用了光電效應的原理。

2. 照相用的光計 (light meter)

照相用的光計 (或稱曝光計)，如圖 5-7，可應用於相機的光圈控制。在照相時，環境的光照到光計的光電板時，會讓光電板放出光電子，形成**光電流**。光電流愈大，代表環境的光愈強。我們可利用光電流的大小來控制光圈的大小。

3. 太陽能電池 (solar cell)

太陽能電池，如下圖 5-8，是一種利用光電板被光照射時會產生**光電流**的發電裝置。

4. 電荷耦合元件 (charge-coupled device, CCD)

CCD 是一種感光晶片，如圖 5-9，可作為數位相機的底片功能。CCD 上劃分為數百萬個小方格 (像素)，當被拍攝物體發出的光子穿過相機的鏡頭打到 CCD 上，每個小方格因為受光而有**光電子**逸出並累積，累積的數目與光的強度成正比，便可依據所有像素的光強度資料而建立被拍攝物體的影像。



圖 5-7 ■ 照相用的光計。



圖 5-8 ■ 太陽能電池。

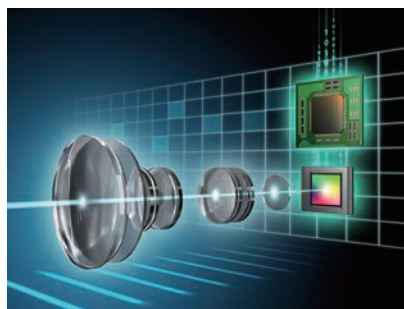


圖 5-9 ■ 相機的 CCD 感光元件是利用光電效應記錄影像。

觀念小試 4

下列哪些沒有應用到光電效應？(應選 2 項)

- (A) 照相用的光計 (B) 光學顯微鏡 (C) 手機感光裝置 (D) 發光二極體 (LED)
(E) 太陽能電池

答：BD

解析

(B) 光學顯微鏡的顯微原理與光的折射有關；(D) 發光二極體 (LED) 的發光原理是通電發光，與光電效應的照光生電不同。

小節練習

(一) 基礎演練

概念 2 光電效應與古典物理的矛盾之處

AE 1. 下列有關光電效應的敘述，哪些正確？(應選 2 項)

- (A)最早發現者是赫茲 (B)是電子發射光子的現象 (C)無論光的頻率多少，照射光的時間愈久，產生的光電子愈多 (D)入射光頻率與光電子的數目成正比 (E)雷納發現入射光的頻率低於某特定頻率無法產生光電效應 (F)可以由古典物理的電磁波理論圓滿解釋

C 2. 在光電效應中，用光照射若產生不出電子，則只需

- (A)將光的強度增加 (B)以更長波長的光來取代 (C)以更短波長的光取代 (D)將照光的時間增加

E 3. 下列有關光電效應的敘述，哪些正確？

- (A)最早發現光電效應的人是愛因斯坦
(B)首先提出光具有能量量子化理論的科學家是普朗克
(C)光電效應實驗中，不論入射光的頻率為何，只要強度不要太小，就可立即產生光電子
(D)光電效應實驗中，若照射光的頻率較小時，就需要照射一段時間，方能產生光電子
(E)光電效應的實驗結果無法完全以古典電磁波理論來解釋

CD 4. 有關照射光的強度與光電效應的關係，下列敘述哪些正確？(應選 2 項)

- (A)照射光的強度增大一定可以產生光電子
(B)若照射光可以使金屬產生光電子，則照射光的強度愈大，產生光電子的時間愈短
(C)若照射光可以使金屬產生光電子，則產生光電子的時間極短與照射光的強度大小無關
(D)若照射光可以使金屬產生光電子，則照射光的強度愈大，每秒產生光電子的數目愈多

概念 3 古典物理面臨困境的解決

B 5. 提出電磁波能量分布有量子化現象，並成功解釋光電效應的學者是

- (A)雷納 (B)愛因斯坦 (C)普朗克 (D)赫茲

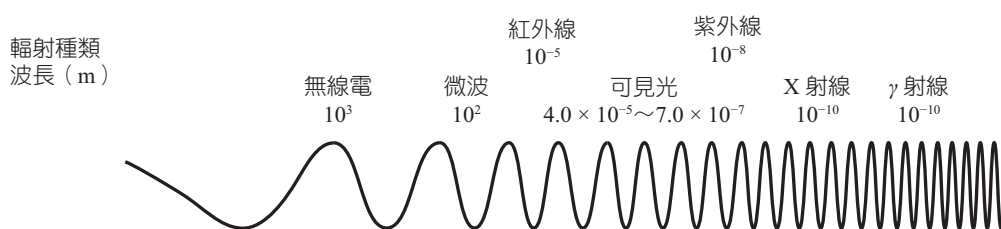
C 6. 愛因斯坦以光子的概念解釋光電效應。其中，光子的能量與下列何者有關？

- (A)光強度 (B)光速 (C)光的頻率 (D)照光的時間 (E)照光的面積

BD 7. 在光電效應實驗中，光子是否能激發電子產生光電流，與下列哪些因素有關？(應選 2 項)

- (A)入射光的強弱 (B)入射光的頻率 (C)入射光照射的時間長短
(D)金屬板的種類 (E)光子照射在金屬板的面積大小

8. 在第 4 章電與磁的統一中，說明光波是電磁波。下圖是各種電磁波的波長，從圖中選出以下六種電磁波：



(甲)從鈉蒸氣燈發出的黃光 (乙)從原子核衰變發出的 γ 射線 (丙) AM 收音機的無線電波
(丁)微波爐發射的微波 (戊)遙控器發射的紅外線 (己)陽光中的紫外線
比較以上六種電磁波的特性。

素養題

(1) 以上六種電磁波的頻率大小排序為何？ (1) 乙 > 己 > 甲 > 戊 > 丁 > 丙

(2) 以上六種電磁波的一個光子的能量大小排序為何？ (2) 乙 > 己 > 甲 > 戊 > 丁 > 丙

(3) 若以上六種電磁波的單位時間發出的光能量相同，則單位時間發出以上六種電磁波的光子數量排序。 (3) 丙 > 丁 > 戊 > 甲 > 己 > 乙

C 9. 普朗克常數的單位為何？

(A) 牛頓·秒 (B) 牛頓/秒 (C) 焦耳·秒 (D) 焦耳/秒

10. 某 γ 射線的頻率為 10^{21} 赫茲，則其光子能量是多少焦耳？相當於多少電子伏特？

(1 eV = 1.6×10^{-19} J) 6.6×10^{-13} J ; 4.1×10^6 eV

11. 光子 A 的能量是光子 B 的 3 倍，則光子 A 的頻率是光子 B 的 3 倍。

12. 一個波長 500 nm 的綠光光子與一個波長 700 nm 的紅光光子之能量比為何？ 7:5

BD 13. 在光電效應實驗中，光子是否能激發電子產生光電流，與下列哪些因素有關？(應選 2 項)

(A) 入射光的強弱 (B) 入射光的頻率 (C) 入射光照射的時間長短
(D) 金屬板的種類 (E) 光子照射在金屬板的面積大小

14. 用強度為 P 的單色光照射光電管的金屬時，可產生 2.3×10^{-7} 安培的光電流，改用強度為 $3P$ 的相同單色光照射同一個光電管的金屬時，可產生光電流的大小約為多少？ 6.9×10^{-7} 安培

▷ 15. 有一功率為 50 瓦的燈泡，已知其輻射出的可見光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 1.4×10^{18} 個。(假設可見光的平均波長為 5500 Å)

- ▶ 16. 已知波長 700 nm 的光子，能量約 2.8×10^{-19} 焦耳，則以波長 350 nm、強度 7.0 焦耳/公尺²·秒的入射光照射金屬板，金屬板受光照射面積為 8.0×10^{-3} 公尺²，則：
- (1) 每個入射光子的能量為 5.6×10^{-19} 焦耳。
- (2) 假定每個光子打出一個光電子，則金屬板表面每秒產生的光電子數目為 10^{17} 個。
- (3) 已知鈉的功函數為 2.4 eV，則入射光子能否使鈉產生光電效應？答：能
(普朗克常數 $h = 6.63 \times 10^{-34}$ J·s；1 eV = 1.6×10^{-19} J)

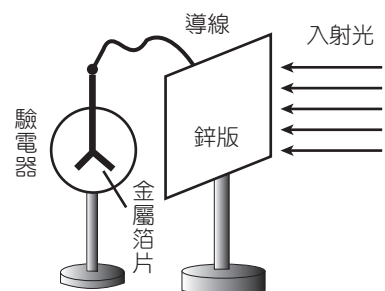
(二) 經典試題

- DE 17. 愛因斯坦在 26 歲時發表了三篇對現代物理產生深遠影響的論文。2005 年適逢論文發表 100 週年，聯合國特訂定 2005 年為世界物理年，以感懷愛因斯坦的創見及其對 21 世紀人類生活的影響，並在愛因斯坦逝世紀念日（4 月 18 日）當天發起物理年點燈活動，以紀念他的貢獻。下列哪些是愛因斯坦的重要貢獻？（應選 2 項）
- (A) 發現光的直進 (B) 發現光的色散現象 (C) 證明光是電磁波
(D) 提出光子說解釋了光電效應 (E) 提出質能互換 ($E = mc^2$) 的相關理論
- A 18. 在光電效應的實驗中發現，僅有頻率夠高的光照射到金屬表面才能打出電子，這是因為電子需要獲得足夠的能量，克服金屬的束縛才能從金屬表面逸出，設電子逸出所需最小的能量為 W 。今小明以同一單色光分別照射在不同的金屬板甲、乙上，皆能測量到光電流產生。已知金屬板甲的電子逸出所需最小能量為 $W_{\text{甲}}$ ，金屬板乙的電子逸出所需最小能量為 $W_{\text{乙}}$ ，且 $W_{\text{甲}} > W_{\text{乙}}$ 。該單色光的頻率為 ν ，普朗克常數為 h ，則 h 與 $W_{\text{甲}}$ 、 $W_{\text{乙}}$ 之間的關係，下列何者正確？
- (A) $h\nu > W_{\text{甲}}$ (B) $h\nu < W_{\text{甲}}$ (C) $W_{\text{甲}} > h\nu > W_{\text{乙}}$ (D) $h\nu = W_{\text{乙}}$ (E) $h\nu < W_{\text{乙}}$

99 學測

99 試題示例

- CDE 19. 右圖為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。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，則下列推論哪些正確？（應選 3 項）
- (A) 帶負電的光電子經導線由鋅板移至驗電器的金屬箔片
(B) 帶正電的光電子經導線由鋅板移至驗電器的金屬箔片
(C) 驗電器的金屬箔片張開是因為鋅板帶正電
(D) 紫外線無法穿透此玻璃片
(E) 使鋅板產生光電效應是入射光中的紫外線成分



99 指考

AC 20. 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

ADE 21. 19 世紀末，實驗發現將光照射在某些金屬表面，會導致電子自表面逸出，稱為光電效應，逸出的電子稱為光電子。下列關於光電效應的敘述，哪些正確？（應選 3 項）

- (A) 光電效應實驗結果顯示光具有粒子的性質
- (B) 愛因斯坦因首先發現光電效應的現象而獲得諾貝爾物理獎
- (C) 光照射在金屬板上，每秒躍出的光電子數目與光照射的時間成正比
- (D) 光照射在金屬板上，當頻率低於某特定頻率（底限頻率或低限頻率）時，無論光有多強，均不會有光電子躍出
- (E) 光照射在金屬板上，當頻率高於某特定頻率（底限頻率或低限頻率）時，即便光強度很弱，仍會有光電子躍出

103 學測

C 22. 下列所述光電效應中入射光與光電子之間的關係，何者證實了光具有粒子性？

- (A) 光電子的數目與照射在金屬表面的入射光頻率成正比
- (B) 光電子產生與否決定於照射在金屬表面的入射光強度
- (C) 照射於金屬表面的入射光頻率須大於某一特定值方能產生光電子
- (D) 照射於金屬表面的入射光波長須大於某一特定值方能產生光電子
- (E) 照射於金屬表面的入射光波長及強度均須大於某一特定值方能產生光電子

107 學測

D 23. 某生清晨被鬧鐘喚醒，以電動牙刷洗漱，早餐吃的是烤麵包機烤的吐司。出門搭公車上學時，遇到同學提起，猛然發現忘了整理昨天數學課的筆記，於是拿出手機內建的相機拍攝同學的筆記參考，再使用太陽能電池計算機輔助驗算。在上述過程所應用到的工具中，下列哪一選項中的組合最可能應用到光電效應？

- (A) 鬧鐘和電動牙刷
- (B) 電動牙刷和公車
- (C) 烤麵包機和手機內建的相機
- (D) 手機內建的相機和太陽能電池計算機
- (E) 烤麵包機和太陽能電池計算機

108 學測



24-25 為題組

科學家發現光碟表面的微結構能提升太陽電池吸收日光的效率。如果先利用高分子材料將光碟表面的結構轉印下來，再轉移至太陽電池上，此微結構的尺寸介於 150 至 250 nm 間，不但可讓入射光線在元件內部的移動距離增長，並且可使元件吸收幾乎全部波段的日光，進而提升光能轉換成電能的效率，相較於未使用光碟圖案的太陽電池，其元件吸收效率高出 22%，效果卓越。

108 學測

BD 24. 由上文可得知，哪些因素會影響太陽電池由光能轉換成電能的效率？（應選 2 項）

- (A) 電池的工作溫度 (B) 光在電池內部行經的路徑長 (C) 電池內外結構的電阻係數
(D) 電池吸收日光的波長範圍 (E) 太陽與電池之間的距離

D 25. 光碟面之微結構的尺寸，約為 1 個氫原子直徑的多少倍？

- (A) 0.1 (B) 1 (C) 10 (D) 1000 (E) 10000

D 26. 一群學生討論物理學發展史，初步整理出下列甲～己等 6 項資料的敘述。

甲：湯姆森經由實驗發現電子的存在。

乙：拉塞福提出原子的正電荷集中在核心、電子分布在核外圍的原子模型。

丙：首先發現載有電流的導線會在其周圍產生磁場的是厄斯特。

丁：首先推論光是電磁波的是赫茲。

戊：首先由實驗發現電磁感應現象的是法拉第。

己：首先提出能量具有量子化特性的是愛因斯坦。

在上述各項敘述中，正確的為下列何者？

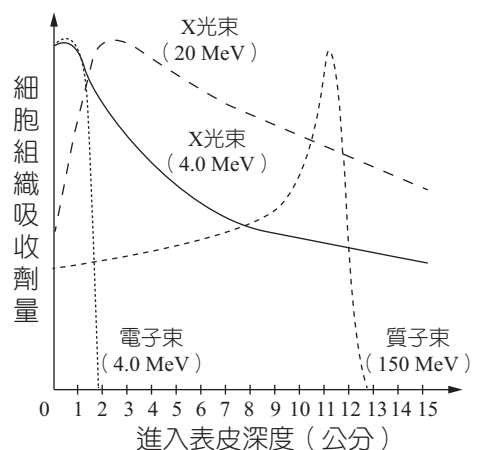
- (A) 甲丁戊 (B) 乙丙己 (C) 丙丁戊己 (D) 甲乙丙戊 (E) 甲乙丁己

112 學測

27-28 為題組

高能的粒子束或 X 光束可用於治療惡性腫瘤（癌症）。每單位質量的人體組織所吸收的射束能量稱為吸收劑量。射束通常對準腫瘤照射，癌細胞與正常細胞吸收射束的能量後，DNA 會遭到破壞，而癌細胞死亡的機率較正常細胞為高。右圖顯示的是電子、質子、和兩個能量不同的 X 光等四種射束之吸收劑量隨進入表皮深度的變化。圖中各射束名稱下，註明該射束中單一粒子或光子入射人體時的能量，其中 1.0 MeV 約為 $1.6 \times 10^{-13} \text{ J}$

113 學測



CE 27. 關於上述四種射束的敘述，下列哪些正確？(應選 2 項)

- (A) 質子射束的粒子與 α 射線的粒子相同
- (B) 質子的粒子數密度必為電子束粒子數密度的 37.5 倍
- (C) 20 MeV 之 X 光的光子頻率為 4 MeV 之 X 光的光子頻率的 5 倍
- (D) 150 MeV 之質子的速率和 4 MeV 之光子的速率相同
- (E) 四種射束中，只有 X 光束能夠穿透 15 公分厚的細胞組織

BD 28. 若有癌細胞存在於表皮下某處，則依據上面所提供的資訊，下列敘述哪些可以達到「儘量殺除癌細胞、保留正常細胞」的最佳效果？(應選 2 項)

- (A) 癌細胞在表皮下 10 公分處，應使用電子束
- (B) 癌細胞在表皮下 10 至 11 公分處，應使用質子束
- (C) 癌細胞在表皮下 0 至 2 公分處，應使用 4 MeV 之 X 光束
- (D) 癌細胞在表皮下 2 至 10 公分處，應使用 20 MeV 之 X 光束
- (E) 癌細胞在表皮下 3 至 8 公分處，可以結合電子束及質子束一起使用

5-2

粒子的波動性

概念 1 物質波假說的提出與證實 (配合課本 p. 129)

1. 法國物理學家 **德布羅意** (Louis de Broglie, 1892–1987, 圖 5-10) 於 1924 年在他的博士論文中提出一個大膽的假設, 他認為波粒二象性不應只有電磁波才有, 對所有的物質, 像電子、質子等都應該也有波的性質, 也就是**每一個粒子的運動都會伴隨著一個波**, 這種波稱為 **物質波** 或 **德布羅意波**。德布羅意的物質波假說後來被證實是對的, 他也因為這項成就獲頒 1929 年的諾貝爾物理學獎。



圖 5-10 ■ 德布羅意。

2. 德布羅意的想法一開始並無法被同儕接受, 但因為得到愛因斯坦的支持, 人們開始重視這個想法, 短短兩年內, 實驗學者 **戴維森** (Clinton Joseph Davisson, 1881–1958)、**革末** (Lester Halbert Germer, 1896–1971) 和 **G.P. 湯姆森** (George Paget Thomson, 1892–1975) 在研究電子束與晶體的散射實驗時, 發現**電子束經散射後具有類似電磁波的繞射**現象。粒子的波動性, 即物質波, 就此獲得證實。

註：G.P. 湯姆森的電子繞射實驗結果可參閱小節練習第 4 題圖(b)。

3. 要檢視電子的波動性, 還可以讓它們通過雙狹縫。若為粒子, 則電子落在屏幕的位置應該呈現雙峰式的分布。若為波動, 則會在屏幕上呈現明暗相間的**干涉**條紋。由於電子的波長往往比光波短得多, 所以狹縫間距必須極為細小, 因此這個困難的實驗到了 1961 年才有人做出來, 如圖 5-11、圖 5-12, 再次驗證電子的波動性。

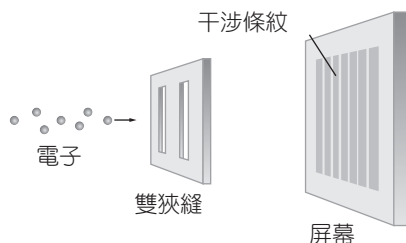


圖 5-11 ■ 電子的雙狹縫干涉示意圖。

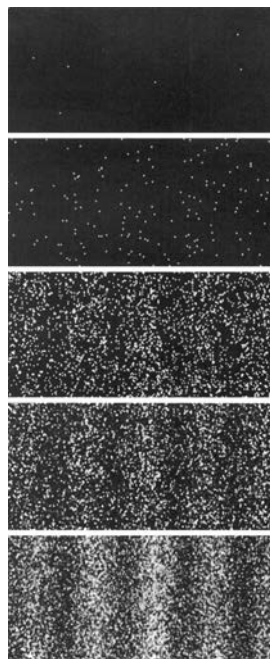


圖 5-12 ■ 電子雙狹縫干涉實驗, 一個電子造成屏幕上一個亮點。照射時間由上到下逐漸增長, 電子數逐漸增加, 形成干涉條紋。

觀念小試 1

從電子的干涉與繞射現象可以證明

(A)電子帶負電 (B)電子具有質量 (C)電子具有粒子性 (D)電子具有波動性

答：D

概念 2 物質波的性質 (配合課本 p. 130)

1. 粒子的物質波波長，與其質量和速率有關，即

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

λ ：粒子的物質波波長。
 h ：普朗克常數。
 m ：粒子的質量。
 v ：粒子的速率。

	氫原子中的電子	10 nK 的 ^{87}Rb 原子	棒球
質量 (kg)	9.1×10^{-31}	1.4×10^{-25}	0.15
速率 (m/s)	2.2×10^6	0.001	40
波長 (m)	3.3×10^{-10}	4.7×10^{-6}	1.1×10^{-34}

2. 當粒子的質量與速率的乘積愈小，其物質波波長愈長，波動性愈明顯。例如電子、質子因質量小而具有較明顯的波動性。
3. 當粒子的質量與速率的乘積愈大，其物質波波長愈短，波動現象愈不容易觀測。例如棒球因質量大所以物質波波長小到測不出來。
4. 並非像電子、質子這樣的微小粒子才有波動性，例如 C_{60} 或更重的有機分子也已被證實具有波動性，如圖 5-13。理論上，一個病毒或更龐大的顆粒也可以有波動性，只是極難偵測。科學家為了看到氣態鈉原子的干涉條紋，曾將其溫度降至極低（即其分子移動速率降至極小），使波長放大，再把兩團氣體混合，而得到干涉條紋，如圖 5-14。

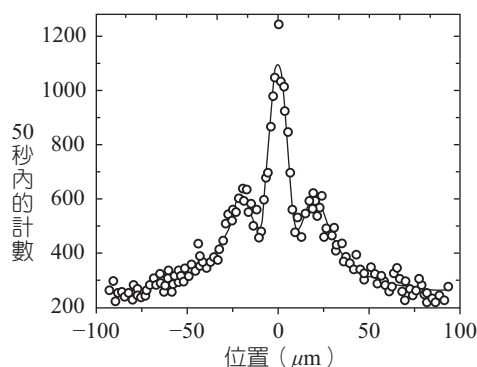


圖 5-13 ■ 左圖為足球狀的 C_{60} 結構示意圖， C_{60} 的直徑約 1 奈米。右圖為以 C_{60} 作單狹縫繞射實驗所形成的繞射圖案。

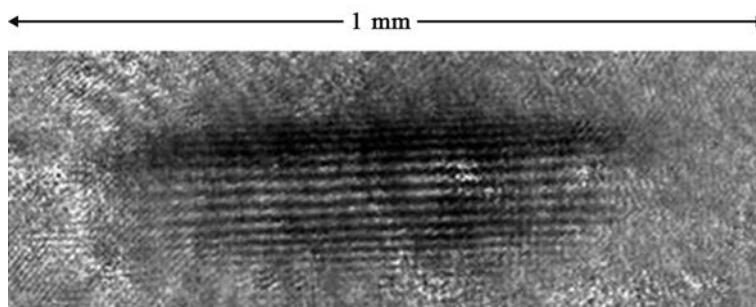


圖 5-14 ■ 在 10^{-6} K 極低溫的環境中，分別來自上方與下方的兩團鈉原子氣體，疊加後形成干涉條紋。

5. 事實上物質波與古典物理的機械波或電磁波都不同。德國物理學家**玻恩** (Max Born, 1882–1970, 圖 5-15) 提出, 物質波的強度代表粒子在空間出現的 **機率**, 因此物質波又被稱為**機率波**。
6. 在電子的雙狹縫干涉圖樣中, 亮紋的產生代表通過兩狹縫的物質波在該位置產生**建設性**干涉, 因此物質波在該位置的**強度大**, 電子出現的 **機率** 高 (即數目多); 暗紋的產生代表通過兩狹縫的物質波在該位置產生**破壞性**干涉, 因此物質波在該位置的**強度小**, 電子出現在該位置的 **機率** 低 (即數目少)。



圖 5-15 ■ 玻恩。

觀念小試 2

有關電子經過雙狹縫後在螢光屏上形成亮、暗相間的干涉條紋之敘述, 下列哪些正確? (應選 3 項)

- (A) 產生亮紋的原因是電子釋放的電磁波在亮紋位置形成建設性干涉
- (B) 產生暗紋的原因是電子釋放的電磁波在暗紋位置形成破壞性干涉
- (C) 產生亮紋的原因是電子的物質波在亮紋位置形成建設性干涉
- (D) 產生暗紋的原因是電子的物質波在暗紋位置形成破壞性干涉
- (E) 電子經雙狹縫後, 在亮紋位置出現的機率較暗紋高

答：CDE **解析：** (A) 產生亮紋的原因是很多電子累積到在該區位置；
(B) 產生暗紋的原因是很少甚至沒有電子跑到在該區位置。

範例 1 各種質量不同的物體其物質波波長的比較

若有汽車、電子、細胞、質子、棒球、氦原子核、跳蚤等七種物體。若七種物體具有相同速率, 則上述各物體的物質波波長大小順序為何?

答：電子 > 質子 > 氦原子核 > 細胞 > 跳蚤 > 棒球 > 汽車

解析： 七種物體的質量大小順序為：汽車 > 棒球 > 跳蚤 > 細胞 > 氦原子核 > 質子 > 電子

依據 $\lambda = \frac{h}{mv}$, 若七種物體有相同的速率 v , 則其物質波波長 λ 與質量 m 成反比, 因此七種物體的物質波波長大小順序為：電子 > 質子 > 氦原子核 > 細胞 > 跳蚤 > 棒球 > 汽車。

類題 1

承範例 1, 若七種物體具有相同動能, 則上述各物體的物質波波長大小順序為何? 已知動能 $K = \frac{1}{2}mv^2$ 。

答：電子 > 質子 > 氦原子核 > 細胞 > 跳蚤 > 棒球 > 汽車

解析： $K = \frac{1}{2}mv^2 \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2K}{m}} \Rightarrow \lambda = \frac{h}{mv} = \frac{h}{m\sqrt{\frac{2K}{m}}} = \frac{h}{\sqrt{2Km}} \propto \frac{1}{\sqrt{m}}$, 依據上式, 具有相同動能時, 物質

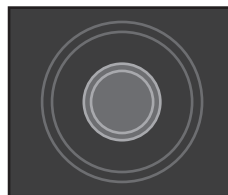
波波長與物體質量開根號成反比, 因此七種物體的物質波波長大小順序為：電子 > 質子 > 氦原子核 > 細胞 > 跳蚤 > 棒球 > 汽車。

小節練習

(一) 基礎演練

概念 1 物質波假說的提出與證實

- E** 1. 關於物質波的敘述，下列何者正確？
 (A)物質波是橫波 (B)物質波是縱波 (C)物質波會發光
 (D)中子不帶電，沒有物質波 (E)飛行的子彈也有物質波
- E** 2. 物質具有波動特性，最早由哪一位科學家提出？
 (A)赫茲 (B)雷納 (C)湯姆森 (D)玻恩 (E)德布羅意
- CE** 3. 下列哪些現象可顯示「物質波」的存在？(應選 2 項)
 (A)水波的繞射 (B)光電效應 (C)電子束經雙狹縫的干涉現象 (D) X 射線經晶體薄膜的繞射
 (E)電子束經晶體薄膜的繞射現象
- D** 4. 從右圖(a)與(b)的比較可發現，電子束的繞射圖形與 X 射線的繞射圖形非常相近。因此可得下列哪一結論？
 (A) X 射線的粒子性 (B)電子的粒子性
 (C) X 射線就是電子 (D)電子的波動性



(a) X 射線的繞射圖形



(b) 電子束的繞射圖形

概念 2 物質波的性質

- D** 5. 下列有關物質波理論的敘述，何者錯誤？
 (A)首先由德布羅意提出
 (B)主張粒子也有波動性
 (C)玻恩提出，物質波的強度代表粒子在空間出現的機率
 (D)電子束通過雙狹縫產生干涉的實驗中，我們可以確定每個電子經由哪一個狹縫到達屏幕
- CDE** 6. 下列有關「物質波」的敘述，哪些是正確的？(應選 3 項)
 (A)靠介質振動傳播的波就是物質波
 (B)物質波無法在真空中傳播
 (C)物質波又被稱為機率波，其內涵為粒子在空間的機率分布類似於波動的強度分布
 (D)物質波和光波同樣可以產生干涉或繞射的現象
 (E)巨觀物體的物質波波長極短，因此其波動性質不明顯

B 7. 下列關於電子物質波的敘述，何者正確？

- (A) 電子物質波是一種電磁波 (B) 一束電子經過雙狹縫會有干涉現象 (C) 電子的物質波是一種橫波
(D) 電子的物質波是力學波 (E) 電子的物質波波長與電子的電荷有關

E 8. 下列關於物質波的敘述，何者正確？

- (A) 只有小於原子尺寸的粒子才有物質波 (B) 只有大於原子尺寸的粒子才有物質波
(C) 物質波的波長小於原子尺寸 (D) 物質波的波長大於原子尺寸
(E) 溫度愈低，同一粒子的物質波波長愈長

(二) 經典試題

B 9. 下表所列各科學家與其在物理學上主要貢獻(甲)至(戊)的對應，何者最為恰當？

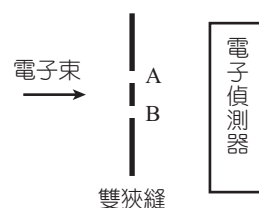
- (甲) 發現造成月亮繞地球運行與造成地球上自由落體的力，是同一來源。
(乙) 首位提出物質波新學說。
(丙) 發現不僅電流會產生磁場，隨時間變化的磁場也能產生電流。
(丁) 發現兩帶電質點間的作用力與距離的關係和萬有引力的形式相同。
(戊) 提出光子假說解釋光電效應。

物理學家	庫倫	法拉第	德布羅意	牛頓	愛因斯坦
(A)	甲	乙	丙	丁	戊
(B)	丁	丙	乙	甲	戊
(C)	丙	甲	戊	丁	乙
(D)	戊	乙	甲	丁	丙
(E)	乙	丙	戊	甲	丁

108 學測

D 10. 右圖為水平射出的電子束通過雙狹縫 A、B 的實驗示意圖，圖形不依比例繪製。結果顯示偵測器測得的電子數目分布為干涉條紋狀的圖樣。關於上述實驗結果，下列敘述何者正確？

- (A) 落在干涉條紋暗帶的電子，其通過狹縫時的速率均比落在亮帶的電子為小
(B) 電子數目出現干涉條紋狀的分布，是電子之間的靜電力所造成
(C) 本實驗結果闡釋了電子具有粒子性
(D) 電子的速度不同會造成干涉條紋圖樣的改變
(E) 可確定每個電子由哪一個狹縫通過

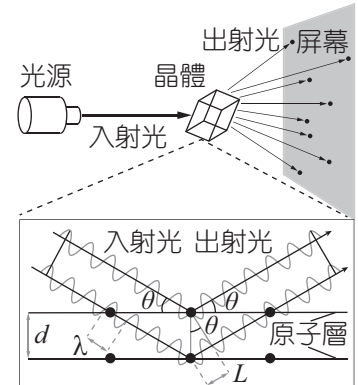


110 學測

11 – 12 為題組

實驗上常利用 X 光來測定原子結構。一晶體內部的原子排列如圖下方的放大圖所示，相鄰兩原子層間距為 d ，X 光束射向該晶體後，經兩層原子反射的兩道光波，會有路徑差 $2L$ 而發生干涉，這與可見光通過雙狹縫的干涉類似。

112 學測



- C 11. 經兩層原子反射後的 X 光波在屏幕上疊加後，因建設性干涉會在屏幕上出現點狀圖樣，如圖所示。若以米 (m) 為長度單位，則最適合用來檢測該晶體的 X 光，其波長的數量級接近下列何者？

(A) 10^{-4} (B) 10^{-7} (C) 10^{-10} (D) 10^{-13} (E) 10^{-16}

- CD 12. 關於可見光與粒子的雙狹縫干涉，下列敘述哪些正確？(應選 2 項)

- (A) 通過雙狹縫的光波，只有波峰會抵達干涉亮紋處
- (B) 通過雙狹縫的光波，只有波谷會抵達干涉暗紋處
- (C) 通過雙狹縫的光波，波峰與波谷同時抵達干涉暗紋處
- (D) 原子為粒子，但經過適當縫距的雙狹縫也會有干涉現象
- (E) 電子為粒子，故經過任何的雙狹縫一定不會有干涉現象

5-3

波粒二象性

概念 1 電磁波與粒子都具有波粒二象性 (配合課本 p. 131)

1. 電磁波具有波粒二象性

- (1) 在干涉與繞射的實驗中，電磁波會展現出明顯的波動性，此時它的粒子性就隱晦不明；在光電效應的實驗中，電磁波會展現明顯的粒子性，此時它的波動性就消失不見。
- (2) 上述電磁波可以在不同實驗條件下分別展現波動與粒子的性質，被稱為波粒二象性。
- (3) 表 5-3 中，列出光（電磁波）的各種現象分別可用哪一種學說來合理解釋。

表 5-3 以波動性解釋光的行為，或是以粒子性解釋光的行為，兩者都無法涵蓋光的所有性質

現象	以波動性來解釋	以粒子性來解釋
直進	○	○
反射	○	○
折射	○	×
干涉	○	×
繞射	○	×
光電效應	×	○

2. 粒子具有波粒二象性

在過去的觀念中，電子是一顆顆獨立的粒子。但是從電子的繞射與干涉實驗結果中，我們發現電子的運動確實伴隨有物質波的存在，因此我們可以做出結論：電子具有波粒二象性。

3. 無論是物質粒子還是電磁波，當它們的波長愈長，則波動性愈明顯；波長愈短，則粒子性愈明顯。例如：在光電效應實驗中，電磁波的波長愈短，愈容易讓金屬產生光電效應，粒子性愈明顯。

概念 2 牛頓力學無法解釋波粒二象性 (配合課本 p. 132)

1. 描述微觀粒子的波粒二象性——量子力學

(1) 由於巨觀物體的物質波波長極短，波動性質不明顯，因此我們可以同時確定物體的位置與速度，也就是可以確定它的運動軌跡。因此牛頓力學適用於描述巨觀物體的運動情況。

(2) 在微觀的尺度下，微觀粒子（例如電子、質子、中子、原子、分子等）會展現出明顯的波粒二象性，由於其物質波的機率特性，我們無法確定微觀粒子的運動軌跡，此時牛頓力學並不適用，必須以量子力學才能成功描述微觀粒子的波粒二象性。

2. 物理學家在找到新的規律後，就有辦法掌握微觀的自然現象。例如，量子通訊裡藉著產生及操控光量子，就可以傳輸機密資訊，不易被人截獲解讀；在奈米級的電子元件裡，也得考慮電子的波動性，才能精確設計元件。

觀念小試 1

下列有關波粒二象性的敘述，哪些正確？（應選 2 項）

- (A) 所有粒子都有波粒二象性
- (B) 只有基本粒子才有波粒二象性
- (C) 巨觀粒子的波粒二象性很明顯
- (D) 牛頓的運動定律可以描述微觀粒子的波粒二象性
- (E) 微觀粒子的波粒二象性質必須用量子力學來解釋

答：AE

解析

(C) 巨觀粒子的粒子性明顯，但波動性不明顯；

(D) 微觀粒子的波動性明顯，也就是其運動展現明顯的機率性，因此牛頓的運動定律無法描述其運動軌跡。

小節練習

(一) 基礎演練

概念 1 電磁波與粒子都具有波粒二象性

- D** 1. 下列哪一個現象必須用光的粒子性才能圓滿解釋？
(A)干涉 (B)繞射 (C)色散 (D)光電效應
- CD** 2. 下列哪些實驗事實，無法以光的波動說解釋？(應選 2 項)
(A)光的雙狹縫干涉現象
(B)光的單狹縫繞射現象
(C)要使某一金屬發射光電子，入射光的頻率必須超過某一定值
(D)入射光之波長較某一定值為小時，則雖為極弱之光也能立即產生光電子
(E)光的強度愈大，每秒所放出的光電子愈多
- D** 3. 當電子束通過單狹縫後，並投射於能夠探測電子的屏幕上，在屏幕上電子位置的分布呈現繞射條紋。關於此現象，下列敘述何者最適當？
(A)需用到光子的波動性
(B)需用到電子的粒子性
(C)自由電子的能量有粒子性
(D)電子的波動性呈現在出現位置的機率
(E)電子的電量有波動性
- BCD** 4. 有關「電磁波」與「物質波」的比較，下列哪些正確？(應選 4 項)
E (A)前者為法拉第所提出
(B)後者為德布羅意所提出
(C)兩者皆能產生干涉、繞射現象
(D)兩者都具有波粒二象性
(E)後者的強度分布代表粒子出現的機率分布
- C** 5. 關於電子與光子的波粒二象性的敘述，何者正確？
(A)光電效應實驗與愛因斯坦的光量子理論證實光的能量有波動性
(B)電子的干涉與繞射實驗證實電子的粒子性
(C)湯姆森的陰極射線實驗證明電子的粒子性
(D)光的電磁波特性是光的粒子性

(二) 經典試題

AC 6. 下列選項所陳述的事實或現象，哪些與「光電效應」有關？(應選 2 項)

- (A) 此效應可用愛因斯坦提出的理論解釋
- (B) 利用靜電感應分離電荷
- (C) 可驗證光的波粒二象性
- (D) 雷雨中的閃電現象
- (E) 蝙蝠捕捉昆蟲

104 學測

C 7. 將光投射在金屬表面使其產生光電子，再利用磁場引導並選出具有相同速度之電子，使其通過單狹縫後，投射於能夠探測電子的屏幕上，經過一段時間的紀錄，發現在屏幕上各點累積的電子數目，其分布呈現繞射條紋。欲解釋上述的實驗現象，下列敘述何者最適當？

- (A) 需用到光及電子的波動性
- (B) 需用到光的波動性及電子的粒子性
- (C) 需用到光的粒子性及電子的波粒二象性
- (D) 需用到光的粒子性，不需用到電子的粒子性或波動性
- (E) 需用到電子的粒子性，不需用到光的粒子性或波動性

105 學測

ABE 8. 20 世紀初葉發現光具有波與粒子二象性，為近代光電科技的重要基礎。下列有關光之波粒二象性的敘述，哪些正確？(應選 3 項)

- (A) 光的頻率愈高，則光量子的能量愈大
- (B) 楊氏雙狹縫實驗，驗證了光的波動性質
- (C) 入射光的波長愈長，愈容易產生光電效應
- (D) 波與粒子二象性乃光子特性，其他物質並無波粒二象性
- (E) 愛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

5-4

原子光譜與能階

概念 1 原子光譜 (配合課本 p. 133)

1. 光譜的意義

(1) 1672 年，牛頓在倫敦皇家學會上發表的一篇論文《光和色的新理論》中，將日光經過三稜鏡所產生的彩虹色帶命名為**光譜**，如圖 5-16。形成彩虹色帶的原因是由於日光中的各種色光對稜鏡的折射率不同，因此通過三稜鏡時會被色散開來。

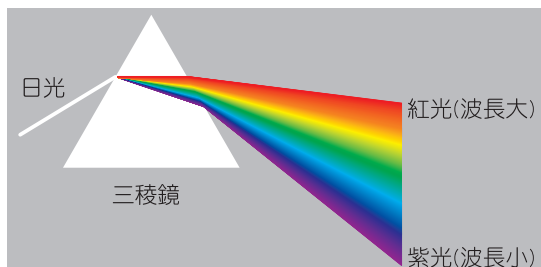


圖 5-16 ■ 日光被三稜鏡分色後形成的光譜。

(2) 光譜的意義就是複色光通過色散系統（如稜鏡）

進行分光後，依照光的波長（或頻率）之大小順序排列而形成的分布圖案。

(3) 如果光譜中的波長連續分布而沒有間斷，則稱為**連續光譜**。

2. 氫原子的光譜

(1) 氫原子的發射光譜

將高溫的氫原子氣體所輻射出的光通過稜鏡光譜儀，並投射在感光底片上，如圖 5-17，會發現底片上只有**某些特定的位置會曝光**，表示氫原子只發射這些特定位置所對應波長的光。此種**不連續的發射光譜**又稱為 明線光譜。

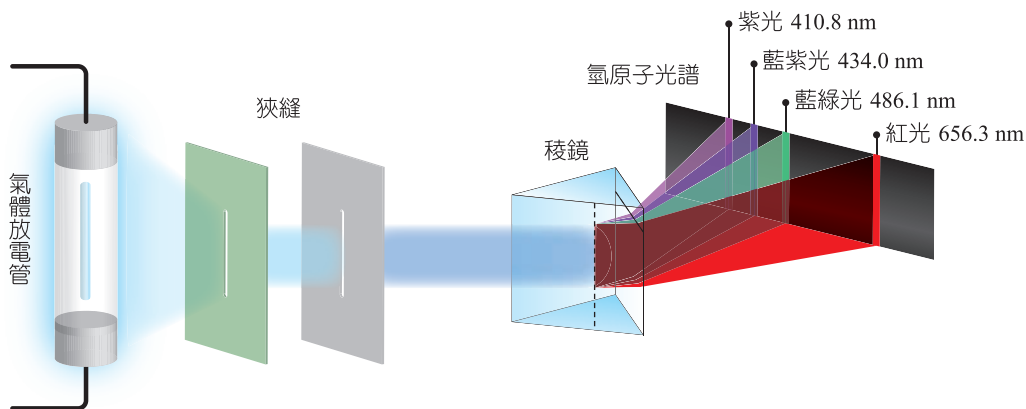


圖 5-17 ■ 光譜實驗示意圖。氣態氫原子發射光，通過稜鏡後會產生不連續的亮紋。

(2) 氫原子的吸收光譜

讓白光先通過低溫的氫原子氣體再通過稜鏡光譜儀，之後再投射在感光底片上，便可以得到底片上的連續光譜中在**某些特定的位置出現暗線**，此種**不連續的吸收光譜**又稱為 暗線光譜。例如圖 5-18 (b) 中，氫原子會吸收特定位置所對應波長的光。比較圖 5-18 (a) 與 (b) 可以發現，氫原子的吸收光譜之波長分布與發射光譜之波長分布**完全一致**。

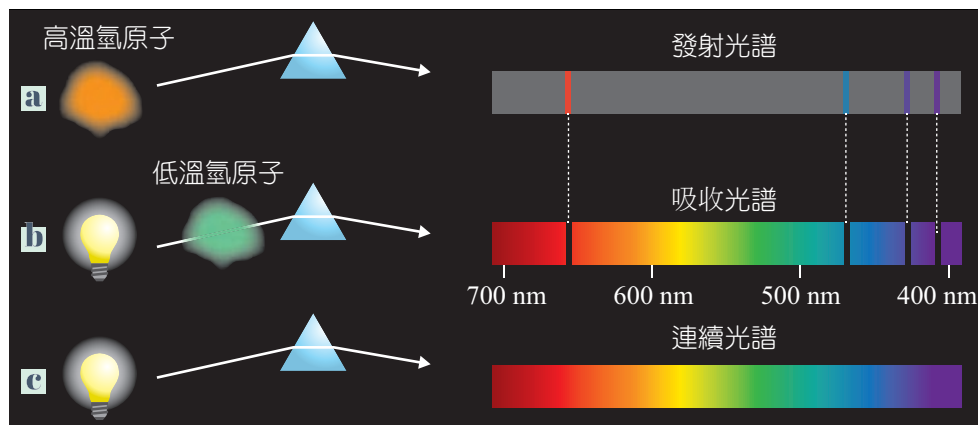


圖 5-18 ■ (a)高溫氫原子通過稜鏡產生明線光譜，或稱發射光譜。
 (b)鎢絲燈泡的光通過低溫氫原子再經過稜鏡形成暗線光譜，或稱吸收光譜。
 (c)鎢絲燈泡因高溫熱輻射所發出之光，經過稜鏡會形成連續光譜。

觀念小試 1

氫原子光譜是屬於

(A)連續光譜 (B)不連續光譜

答：B

概念 2 原子能階 (配合課本 p. 134)

1. 氫原子產生不連續光譜的原因，正是 19 世紀末與 20 世紀初的科學家所想要解答的熱門課題。因為原子光譜和**原子結構**有密切關係，因此原子光譜是獲知原子結構的重要線索。
2. 在第 2 章曾經提過的**拉塞福原子模型**中，電子因庫侖力而繞原子核作圓周運動。根據馬克士威的電磁理論，電子因加速運動會持續發射電磁波並失去能量而墜落於原子核上，如圖 5-19。因此**原子無法維持穩定狀態**，而且電子所發射的電磁波可**形成連續光譜**。這些推論都與「原子是穩定的」以及「光譜是不連續」的**事實不符**，顯然拉塞福的原子模型並不能圓滿解釋實際的物理現象。

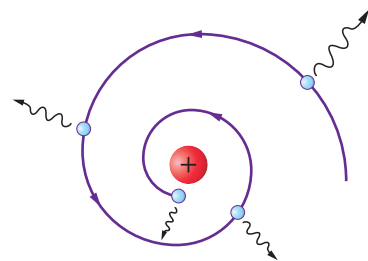


圖 5-19 ■ 拉塞福的原子模型，原子無法維持穩定狀態且會發射連續光譜。

3. 波耳的氫原子模型

為了解決拉塞福原子模型所面臨的困境，波耳（Niels Bohr, 1885–1962，圖 5-20）以拉塞福的原子模型為基礎，提出革命性的假設，成功解釋了氫原子的不連續光譜現象。波耳也因提出新的原子結構而獲得 1922 年諾貝爾物理學獎。波耳的假設如下：



圖 5-20 ■ 波耳。

- (1) 氫原子中，電子只能在某些特定的軌道上運動，也就是電子的軌道半徑不是任意值，如圖 5-21。此種特性被稱為軌道量子化。
- (2) 當電子在上述某一特定軌道上運動時，並不會輻射電磁波，稱為穩定態，其總能量 E 保持某一定值。不同的軌道各有其特定能量，這些特定的能量，我們稱之為能階，如圖 5-22。此特性也被稱為能量量子化。

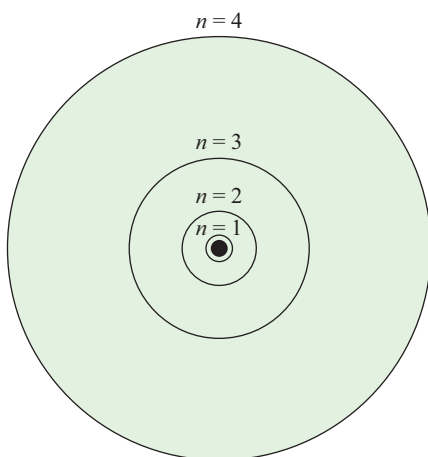


圖 5-21 ■ 氫原子的軌道示意圖。

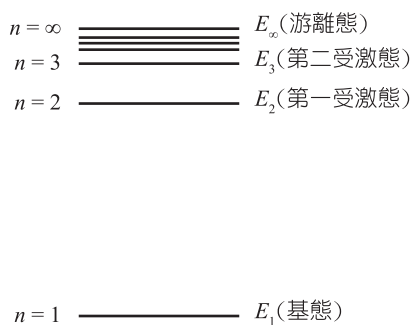


圖 5-22 ■ 氫原子的能階。

- (3) 當電子從能量較高的 E_h 之軌道躍遷到能量較低的 E_l 之軌道時，它會發射光子，如圖 5-23、5-24。所發射的光子能量為 $hf = E_h - E_l$ ，因此被發射的光子頻率可由 $f = \frac{E_h - E_l}{h}$ 求得。藉由各種能階差所發射的電磁波，就形成了特定頻率（或特定波長）的不連續發射光譜，圖 5-25 為氫原子的一些光譜系列。

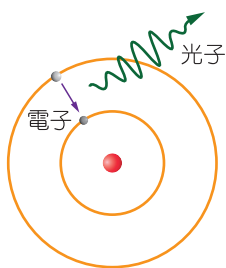


圖 5-23 ■ 電子從能量較高的軌道躍遷到能量較低的軌道時，會發射光子。

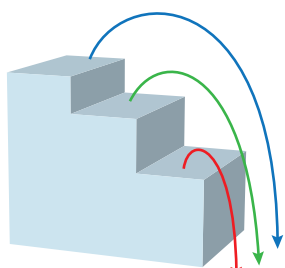
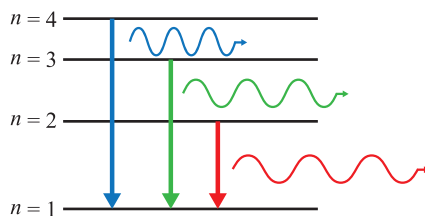


圖 5-24 ■ 電子由高能階躍遷到低能階時，會放出光子。圖左的樓梯為能階類比圖。



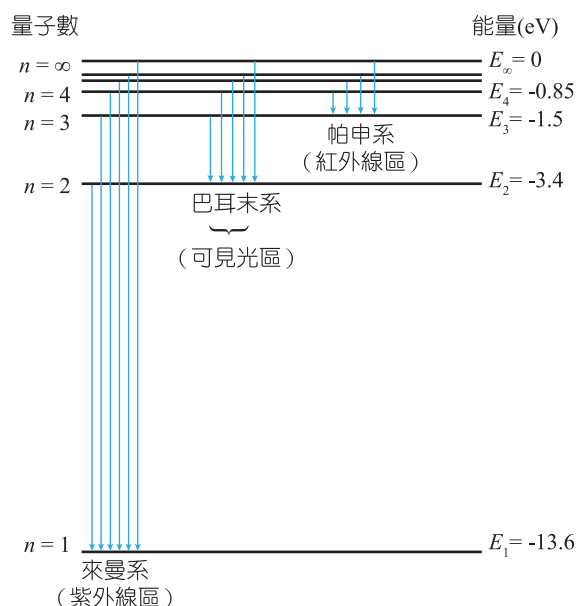


圖 5-25 ■ 氫原子的一些光譜系列。

- (4) 若電子從能量較低的 E_ℓ 之軌道躍遷到能量較高的 E_h 之軌道時，它會 吸收光子，如圖 5-26、5-27。所吸收的光子能量為 $hf = E_h - E_\ell$ ，因此被吸收的光子頻率可由 $f = \frac{E_h - E_\ell}{h}$ 求得。藉由各種能階差所吸收的電磁波，就形成了特定頻率（或波長）的不連續吸收光譜。

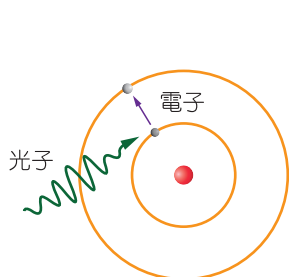


圖 5-26 ■ 電子從能量較低的軌道躍遷到能量較高的軌道時，會吸收光子。

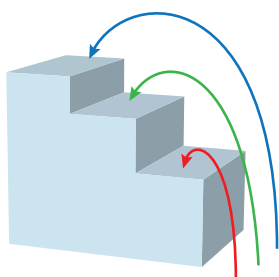
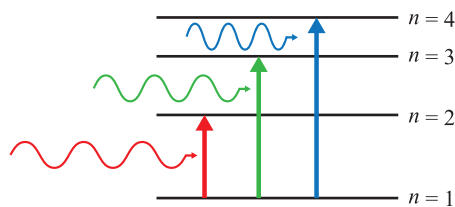


圖 5-27 ■ 電子吸收光子後，會自低能階激發到高能階。圖左的樓梯為能階類比圖。



註：讓電子由低能階躍遷至高能階，除了吸收特定頻率的光子外，也可以自外界獲得熱能或電能來達成。

- (5) 由(3)、(4)可得知，氫原子的發射光譜與吸收光譜的頻率都遵守相同的數學式子，因此發射光譜與吸收光譜會對應相同的頻率（或波長）。

觀念小試 2

下列關於氫原子光譜與原子能階的敘述，哪些正確？(應選 2 項)

- (A) 不連續的光譜是因為原子的能階所造成
- (B) 各光譜線的形成原因，是由於氫原子在同一個穩定態且未躍遷時會發射或吸收特定頻率的電磁波
- (C) 原子能量有量子化的現象
- (D) 位於高能階的電子，可以靠躍遷到低能階而吸收電磁波
- (E) 氫原子所發出之光譜線全部在可見光範圍

答：AC

解析

(B) 各光譜線的形成原因，是由於電子在不同穩定態間「躍遷」而發射或吸收特定頻率的電磁波所致。在穩定態時，並不會發射或吸收特定頻率的電磁波；(D) 吸收電磁波應改為發射電磁波；(E) 除了可見光範圍外，還有紫外線與紅外線。

範例 1 氫原子的能階

從圖 5-25 的氫原子能階圖中，請計算電子從 $n=3$ 到 $n=2$ 的躍遷過程所發射的光子頻率 = ? 此頻率對應的波長 = ? 是否在可見光的範圍？(1 eV = 1.6×10^{-19} J)

答： 4.6×10^{14} Hz；650 nm；是

解析 由 $hf = E_3 - E_2 \Rightarrow 6.6 \times 10^{-34} \times f = [-1.5 - (-3.4)] \times 1.6 \times 10^{-19} \Rightarrow f = 4.6 \times 10^{14}$ (Hz)

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3.0 \times 10^8}{4.6 \times 10^{14}} = 6.5 \times 10^{-7} \text{ (m)} = 650 \text{ (nm)}, \text{ 在 } 400 \text{ nm} \sim 700 \text{ nm} \text{ 的可見光波長範圍內。}$$

類題 1

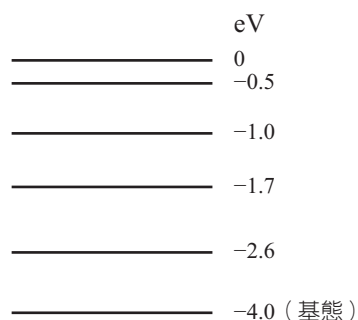
某原子的能階能量如右圖所示。若要讓該原子從基態受激到第一受激態所吸收的光子波長是多少埃？

答：8800 Å

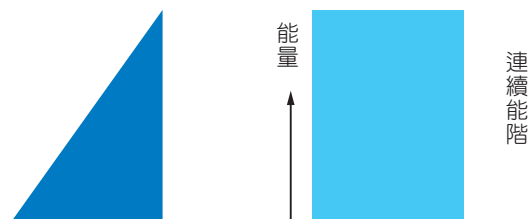
解析 由 $hf = \frac{hc}{\lambda} = E_2 - E_1$

$$\Rightarrow \frac{6.6 \times 10^{-34} \times 3.0 \times 10^8}{\lambda} = [-2.6 - (-4.0)] \times 1.6 \times 10^{-19}$$

$$\Rightarrow \lambda = 8.8 \times 10^{-7} \text{ (m)} = 8800 \text{ (Å)}。$$



4. 我們知道行星繞太陽的軌道半徑可以連續變動，其能量（力學能）也會隨之連續改變。但氫原子中，電子繞原子核的軌道半徑是不連續變動的，所以電子的能量（力學能）只能在不連續的能階間改變，如圖 5-28。



5. 穩定態的形成原因

(1) 波耳研究氫原子光譜時，雖然給出電子能階的正確位置，但並不清楚背後的原因，因為古典物理並無法解釋能階現象。

(2) 德布羅意則根據電子具有波動性，對於穩定態的存在得到一個簡單而合理的解釋。他認為，就像吉他弦的振動，弦長為半波長的整數倍時才會形成穩定的駐波，如圖 5-29。因此當電子環繞原子核時，軌道周長如果不是電子波長的整數倍，電子狀態並不穩定。只有在軌道周長是電子波長的整數倍時，電子的物質波才會形成穩定的駐波（圖 5-30）。德布羅意根據這個想法，成功解釋了波耳氫原子能階的成因。

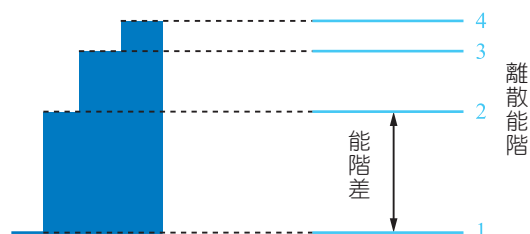


圖 5-28 ■ 原子的軌道電子能量無法連續變動，形成不連續的能階。圖左的斜坡與樓梯類比能量的連續與不連續。

註：駐波的能量不會向外傳遞，駐波的完整概念在高三課程才會深入介紹，同學們目前只要接受「原子具有穩定態及能階的特性是因為電子的波動性所造成的」即可。



圖 5-29 ■ 當吉他弦長為半波長的整數倍時，才會形成駐波。

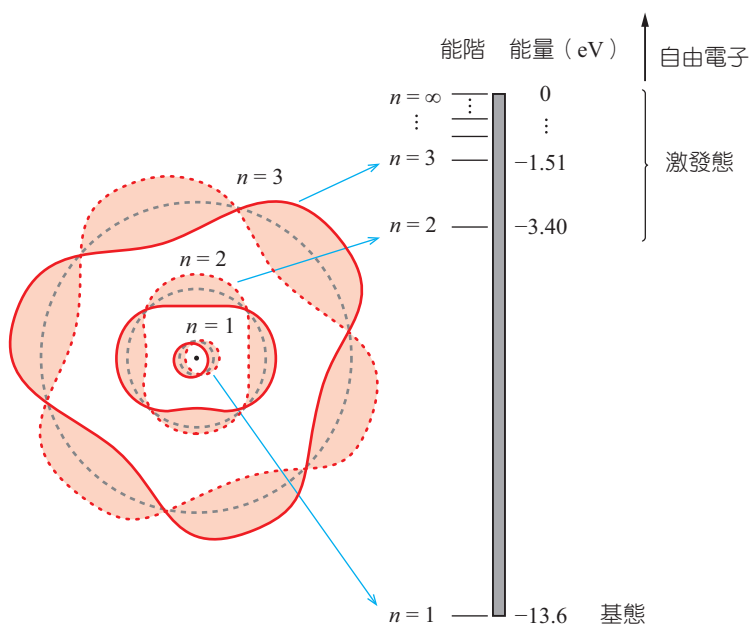


圖 5-30 ■ 在氫原子軌道上的電子，其物質波會形成不同波長的駐波，對應不同的能階。

6. 原子光譜的應用

- (1) 由於不同元素的原子有各自的**特定能階**，可以產生各自的**特定光譜**，如圖 5-31。因此光譜就像原子的指紋或身份證一樣。
- (2) 我們可以透過光譜來鑑定物質中的**成分元素**，這就是光譜分析技術。例如從太陽來到地球的光必須穿過太陽周遭比較冷的氣體，因此我們可以藉由分析太陽的**吸收光譜**來辨識太陽外層氣體中所含的元素，氫與氦元素最初就是從太陽光譜中發現。我們以望遠鏡觀測遙遠的恆星，即使距離非常遙遠，仍然可以從元素光譜得知恆星的成分。

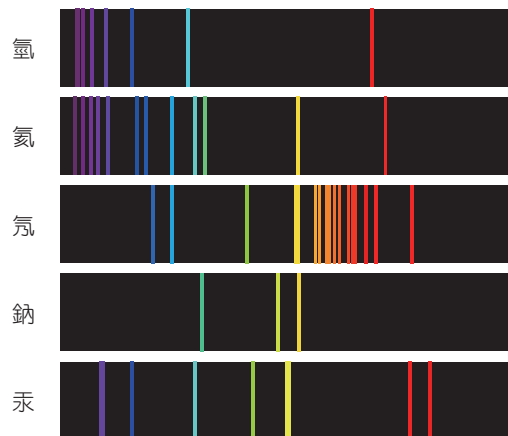


圖 5-31 不同的氣態原子會產生不同的光譜線。光譜線如同原子的指紋。

範例 2 氫原子中電子在穩定態的物質波波長與速率

圖 5-30 中的氫原子電子軌道圖與能階圖呈現不同軌道的物質波波長與不同能階的電子能量高低。根據此圖回答以下問題：

- (1) 排序不同軌道的電子物質波波長。
- (2) 根據(1)推論，不同軌道電子的速率快慢順序為何？

答：(1) 愈外圍電子的物質波波長愈長 (2) 愈外圍電子的速率愈慢

解析 (1) 從圖中可觀察到愈外圍電子的物質波波長愈長。

- (2) 依據 $\lambda = \frac{h}{mv}$ ，由於電子的質量不變，愈外圍軌道的電子的物質波波長愈長，因此愈外圍電子的速率愈慢。

小節練習

(一) 基礎演練

概念 1 原子光譜

- B** 1. 下列有關於原子光譜的敘述，何者正確？
- (A) 氫原子的發射光譜是連續光譜
 - (B) 氫原子的發射光譜是不連續光譜
 - (C) 氫原子的吸收光譜是連續光譜
 - (D) 氫原子的吸收光譜是不連續光譜
 - (E) 原子光譜的發現晚於原子能階概念的發現

概念 2 原子能階

- BD** 2. 下列有關氫原子能階的敘述，哪些是正確的？（應選 2 項）
- (A) 電子在穩定態軌道時，因有加速度而會發射輻射能
 - (B) 電子在某特定能階（或穩定態）時不會發射輻射能
 - (C) 氫原子只有一個電子，故氫原子光譜只有一條譜線
 - (D) 電子由低能階躍遷至高能階時，會吸收一定頻率的光子
 - (E) 必須不斷的供給原子能量，才能維持電子在穩定態軌道運動
- E** 3. 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) 正電荷的分布
 - (B) 原子核的存在
 - (C) 原子核的電量
 - (D) 電子的運動方式
 - (E) 穩定態與能階的觀念
- AD** 4. 在下列氫原子的躍遷中，哪些會產生吸收譜線？（應選 2 項）
- (A) $n = 3$ 至 $n = 5$
 - (B) $n = 4$ 至 $n = 1$
 - (C) $n = 4$ 至 $n = 3$
 - (D) $n = 2$ 至 $n = 3$
5. 某原子由第二受激態 $n = 3$ 躍遷至基態 $n = 1$ ，最多可以產生幾種不同頻率的發射譜線？ **3 種**
6. 鈉原子被加熱激發後可發射黃光，此黃光波長約為 590 奈米，求產生黃光的兩能階間的能量差為多少焦耳？ **$3.4 \times 10^{-19} \text{ J}$**
- C** 7. 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) 由於原子能階是一條一條的平行線而非其他形狀
 - (B) 此原子所發射之光為單頻光
 - (C) 由於光是從直線型的狹縫穿出來的
 - (D) 由於此光強度較弱
 - (E) 當光從原子發射出來時，所有電磁輻射都是平行發射出來的

- C** 8. 有關原子能階與原子光譜的敘述，下列何者錯誤？
(A) 原子光譜是原子能階的實驗證據
(B) 每一種原子都有自己的特定譜線
(C) 古典電磁學理論可導出原子穩定態的存在
(D) 原子穩定態的存在可以用量子力學的物質波理論來解釋
- ABC** 9. 下列物理量，哪些具量子化的性質？(多選)
D (A) 粒子所帶的電荷 (B) 光的能量 (C) 氫原子的軌道半徑 (D) 氫原子的能量
- ACE** 10. 下列有關氫原子光譜的敘述，哪些錯誤？(應選 3 項)
(A) 電子在穩定態時會發射特定頻率的電磁波
(B) 電子在穩定態時，不會發射電磁波
(C) 電子從半徑大的軌道躍遷到半徑小的軌道時，會吸收能量
(D) 原子因電子的躍遷而放出能量時，是以電磁波的形式放出
(E) 氫原子光譜中，同一譜線系的各相鄰譜線的間隔相等
- CD** 11. 下列有關原子光譜的敘述，哪些錯誤？(應選 2 項)
(A) 不同的原子，有不同的光譜
(B) 是由電子在不同能階間的躍遷所產生
(C) 光譜皆為可見光的範圍
(D) 屬於連續光譜
(E) 可用來檢驗物質組成的種類與成分
- ACE** 12. 下列哪些現象或實驗屬於近代物理的量子現象？(應選 3 項)
(A) 光的波粒二象性 (B) 赫茲以實驗證實電磁波的存在 (C) 電子的波粒二象性
(D) 拉塞福以 α 粒子穿過金箔的散射實驗 (E) 原子的不連續光譜
- CDE** 13. 下列有關近代物理的重要發現與發現者之配對，哪些正確？(應選 3 項)
(A) 光能量的量子性——赫茲 (B) 氫原子的能階概念——湯姆森 (C) 相對論——愛因斯坦
(D) 物質波——德布羅意 (E) 物質波的強度代表粒子在空間出現的機率——玻恩
- D** 14. 下列關於電子能階的敘述，何者正確？
(A) 物理學家先得知氫原子中，電子能量不連續的性質，進而推論出氫原子有明線光譜
(B) 自由運動的電子其能量也有能階之性質
(C) 電子的能階數量與原子內的電子數量相同
(D) 明線光譜中某光譜線的能量，可以對應兩電子能階之能量差所發出的光子能量
(E) 若氣體中的電子吸收能量之後，電子躍遷至高能量狀態，當電子跳回低能量狀態時，便會發出各種波長的光波，稱為連續光譜

A 15. 下列關於物質波與電子能階的敘述，何者正確？

- (A) 利用電子物質波理論可以解釋電子能階
- (B) 電子能階愈高，物質波波長愈短
- (C) 電子軌道半徑愈小，物質波波長愈長
- (D) 電子軌道半徑愈大，電子的速率愈快

E 16. 下列關於氫原子光譜的敘述，何者正確？

- (A) 氫原子光譜的明線光譜線，代表氫原子內每個電子，從低能階躍遷到無窮遠處所吸收的光子
- (B) 氫原子光譜全為可見光
- (C) 兩相鄰的氫原子明線光譜線的波長差為定值
- (D) 兩相鄰的氫原子明線光譜線的頻率差為定值
- (E) 隨著原子內電子的能階愈高，相鄰的電子能階能量差愈小

(二) 經典試題

A 17. 下列有關電子能階的敘述，哪一項錯誤？

- (A) 電子由高能階降至較低能階時，放出的光具有連續頻率
- (B) 氫原子的電子距離原子核愈遠，其能階愈高
- (C) 原子受適當的熱或照光，可使電子躍遷到較高能階
- (D) 霓虹燈的發光係來自原子核外電子的躍遷
- (E) 煙火的焰色來自電子的躍遷

102 學測

A 18. 下列哪一個實驗可以最精確地判斷某一混合氣體中是否有氫氣存在？

- (A) 觀察氣體的光譜
- (B) 觀察氣體壓力隨溫度的變化
- (C) 用肉眼辨識氣體的顏色
- (D) 測量常溫常壓下氣體的密度
- (E) 測量常溫常壓下氣體的折射率

103 學測

AE 19. 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。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



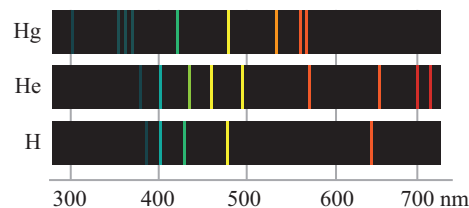
- D** 20. 右圖為氫、氦、汞原子的發射光譜，三位同學觀察後發表見解如下：

甲生：正如條碼可用來辨識不同商品，不同原子產生的譜線，可用來辨識原子的種類

乙生：不同原子產生的譜線波長不同，是物質呈現不同顏色的主因

丙生：原子僅發射特定波長的光譜線，這是原子具有不連續能階的證據
哪幾位同學的說法是正確的？

(A)僅有甲 (B)僅有乙 (C)僅有丙 (D)僅有甲丙 (E)僅有乙丙



108 學測

- E** 21. 下列甲、乙、丙三個敘述為原子內部結構探究的三個過程，依發生時間先後排序何者正確？甲：夸克的發現。乙：電子只在特定軌道運行。丙：利用 α - 粒子撞擊金箔，發現原子核的存在。

(A)甲乙丙 (B)甲丙乙 (C)乙丙甲 (D)乙甲丙 (E)丙乙甲

109 學測

- CE** 22. 下列關於「量子現象」的敘述，哪些正確？(應選 2 項)

- (A)電子的雙狹縫干涉現象是因為電子具有粒子性
- (B)氫原子的發射光譜是屬於連續光譜
- (C)光電效應的實驗結果顯示光具有粒子性
- (D)量子現象皆可用古典物理中的電磁理論解釋
- (E)實驗觀測到的氫原子光譜特徵可用氫原子能階模型來解釋

109 學測

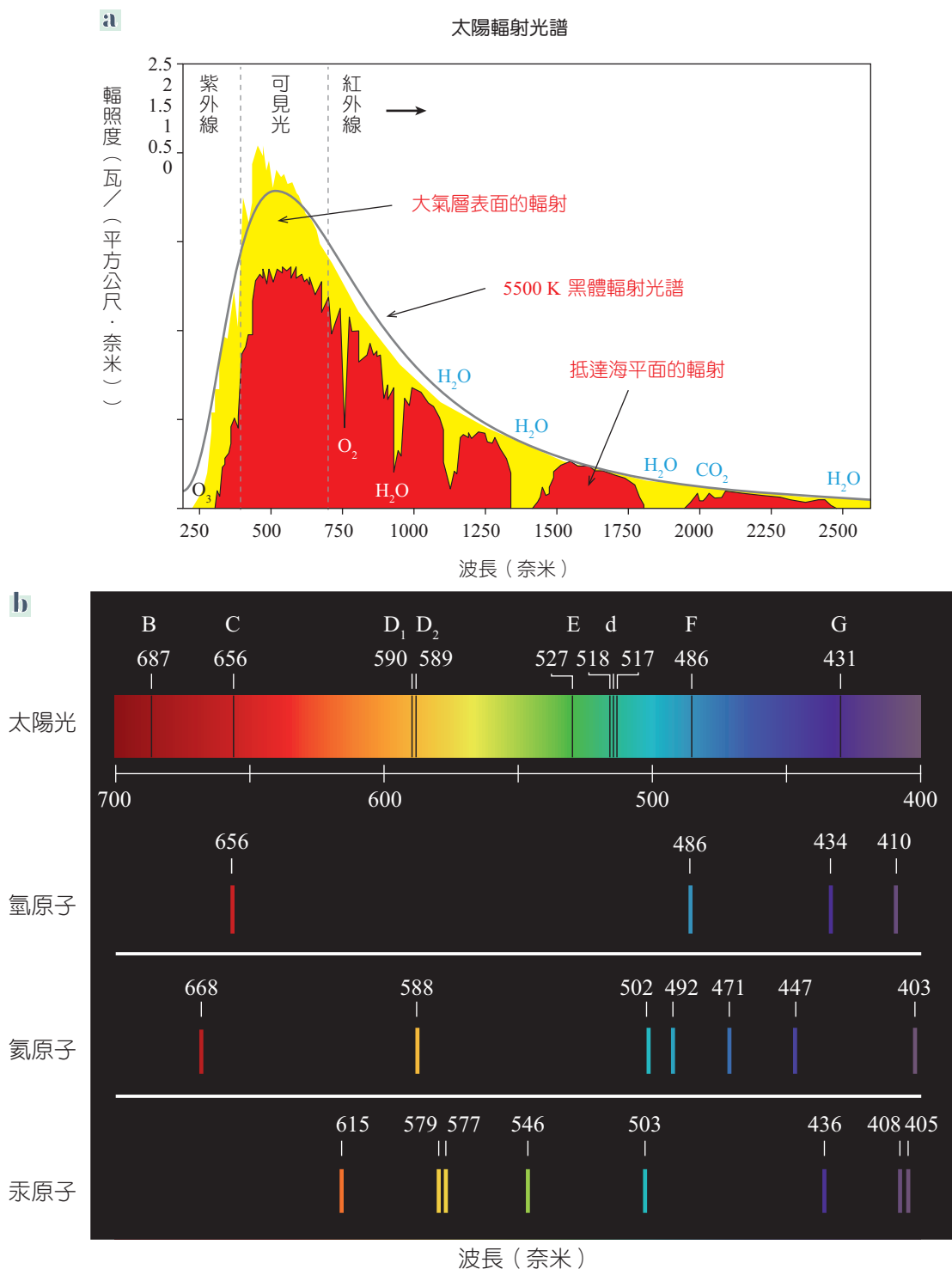
- B** 23. 下列關於科學史實敘述，何者正確？

- (A)馬克士威以馬克士威方程式解釋光電效應
- (B)愛因斯坦以光子模型解釋光電效應
- (C)拉塞福利用電子撞擊氫原子探究原子結構
- (D)波耳首先觀測到氫原子光譜
- (E)波耳氫原子模型的建構比拉塞福的原子模型來得早

111 學測

素養混合題

如果太陽是 5500 K 的黑體，其光譜輻射照度（或稱光強度）與波長的關係如下圖(a)的實線。太陽光實際抵達地球大氣層表面的輻射平均照度約為 1353 千瓦/公尺²，其光譜輻射照度與波長的關係為下圖(a)黃色區域。太陽光在穿過大氣層之後其輻射會因大氣（臭氧、氧氣、水氣、二氧化碳等）吸收而減弱，抵達地面時其光譜輻射照度與波長的關係為下圖(a)的紅色分布：



▲(a)光譜輻射照度與波長之關係。

(b)最上圖為地面接受到的輻射，其中黑色部分代表吸收線，而下方為各原子的發射譜線。

(1)從圖(a)判斷，哪種氣體分子吸收太陽輻射單一光子的能量最大？

(A)氮氣 (B)氧氣 (C)臭氧 (D)二氧化碳 (E)水氣

(1) C

臭氧吸收太陽輻射的波長最短，頻率最高，單一光子的能量最大。

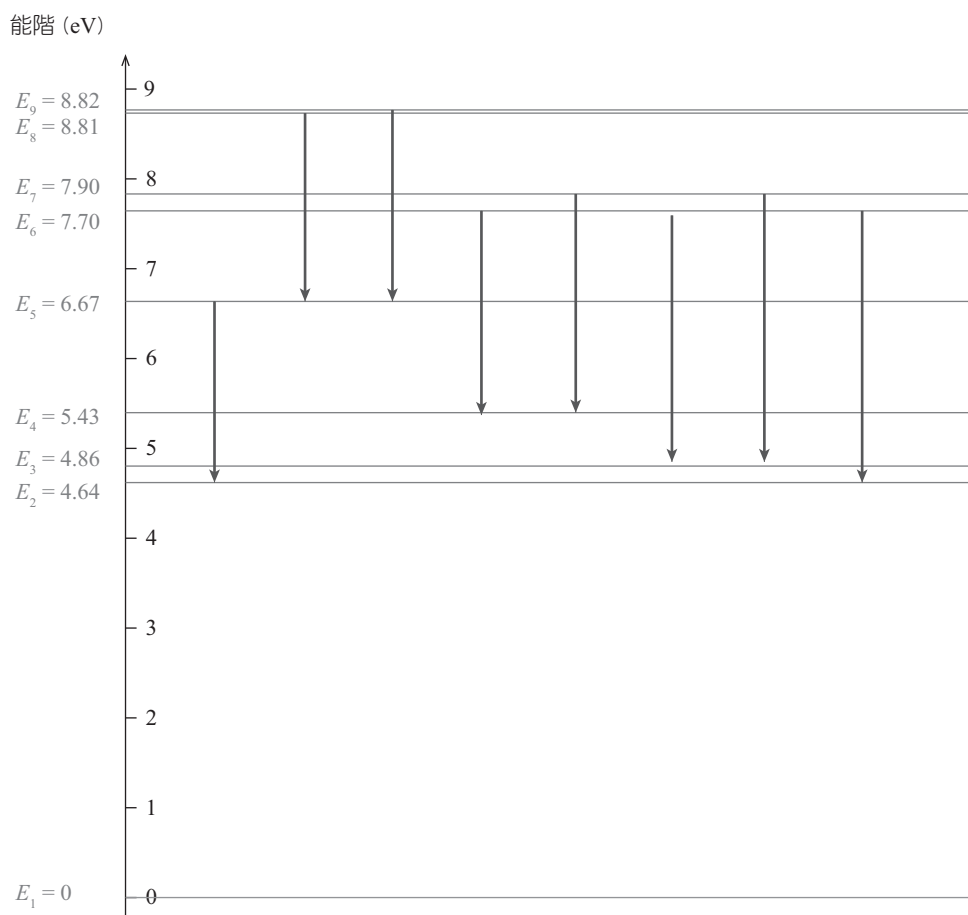
(2)光從太陽抵達地球的途中，因為太空中物質很稀薄，幾乎不會被吸收。理論上太陽光光譜應該為連續光譜，如圖(a)的實線所示，但使用精密的光譜儀分析，仍然會有一些被吸收的暗線，如圖(b)所示，試著推測暗線形成的原因。

(2)光譜中的暗線，與氫原子、氦原子的不連續光譜位置有相同之處，因此可知道有些特定波長的光是被氫與氦吸收，可推測太陽表面的有氫與氦的原子。

(3)圖(b)中汞原子的 8 條光譜線，可對應下圖中，汞原子在不同能階的躍遷，其中綠光波長為 546 奈米，試推測此條光譜線是從哪個能階躍遷至哪個能階所產生？(提示：光子的能量與波長之關係為

$$E \text{ (eV)} = \frac{1240 \text{ (eV} \cdot \text{nm)}}{\lambda \text{ (nm)}}, \text{ 可得 } \lambda \text{ (nm)} = \frac{1240 \text{ (eV} \cdot \text{nm)}}{E \text{ (eV)}}$$

燈源	波長 (nm)
汞	546.074 0
	435.835 0
	404.656 1
	366.327 6



(3) E_6 至 E_4

波長為 546 奈米的光子能量 $E = \frac{1240}{546} = 2.27 \text{ eV}$ ，而從能階圖可知 $E_6 = 7.70 \text{ eV}$ 與 $E_4 = 5.43 \text{ eV}$ 的能階差即為 2.27 eV ，故可推知此波長的光是由電子從 E_6 能階躍遷至 E_4 能階所產生。