

CH. 6

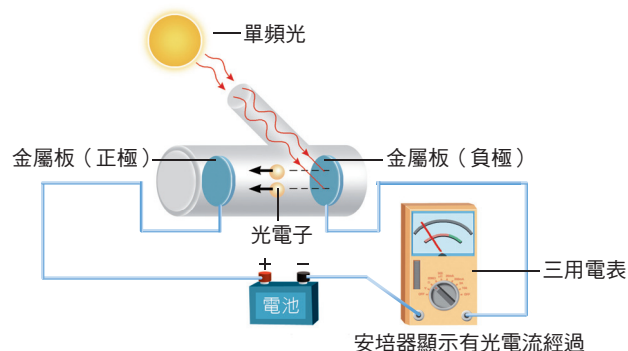
學習重點

量子論的起源

- 普朗克與熱輻射
- 愛因斯坦與光電效應
- 波耳的原子論

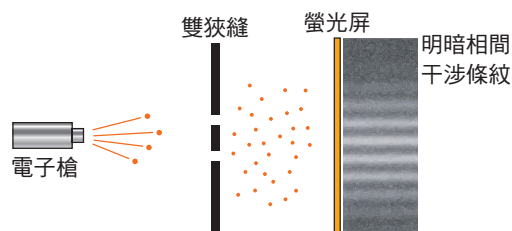
光電效應與光的波粒二象性

- 光電效應
- 愛因斯坦與光（量）子理論
- $E = h\nu$
- 光的波粒二象性



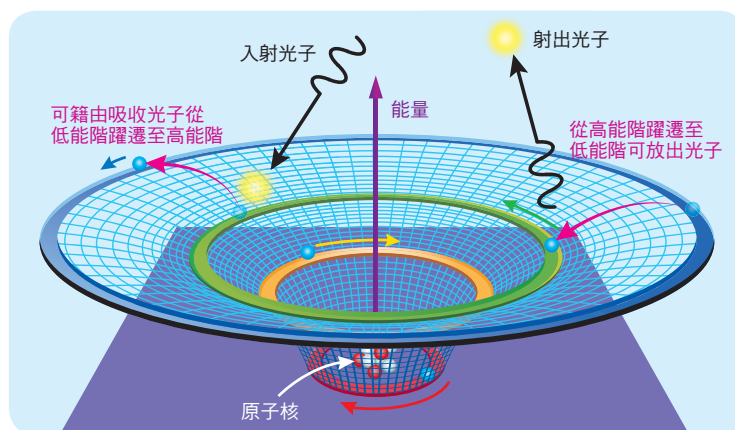
物質波與波粒二象性

- 德布羅意與物質波
- 電子的波粒二象性：
電子的繞射實驗與雙狹縫干涉實驗



原子能階與光譜

- 波耳的氫原子模型、能階、躍遷
- 原子光譜



普朗克與熱輻射
振子能量的量子化

1900



愛因斯坦與
光電效應
光能量的量子化

1905



波耳的原子論
原子能量的量子化
並結合光子理論

1913

6-1 量子論的起源

學習概念 1

熱輻射

配合課本 188 頁

1. 熱輻射：

(1) 19 世紀末，科學家發現**高溫物質可發射出電磁波**，這種電磁波的性質與溫度有關，稱為熱輻射。

(2) 熱輻射實例：

- ① 如右圖所示，從事金屬鍛造及冶煉的工匠，會根據火爐內的顏色判斷爐內溫度的高低。
- ② 白熾燈泡通電發光。
- ③ 人的體溫會發出紅外線電磁波。



◎ 熱輻射

2. 熱輻射的成因：

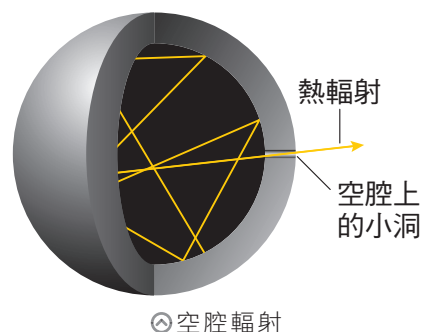
物體溫度升高後，內部帶電粒子來回振動，因具有加速度而發射電磁波。

3. 熱輻射實驗：

(1) 先取得一個理想的熱輻射源：

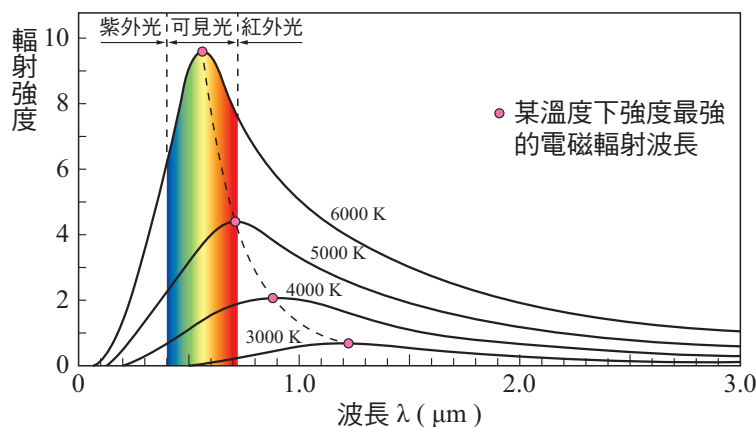
- ① 進行熱輻射實驗研究時，最先應取得一個不會與外界有熱交互作用的物體，即該物體必須完全吸收照在它上面的輻射，以確保來自它的輻射都是它所發出的熱輻射，這樣的物體稱為「黑體」。

② 1895 年，維因建議使用有小孔的受熱「空腔」來近似黑體，如右上圖所示。



◎ 空腔輻射

(2) 利用空腔小孔發出的光線，經由三稜鏡投射到熱輻射計，便可測出黑體所輻射出的能量強度與溫度和波長的關係曲線，如右圖所示。



◎ 空腔輻射強度與溫度和波長的關係曲線

4. 熱輻射的特性：

- (1) **溫度愈高，熱輻射中強度最大（峰值）的電磁波頻率愈大。**
- (2) 對同一溫度而言，頻率極高或極低的熱輻射強度均相當微弱。

學習概念 2

普朗克的量子論

配合課本 188 頁

1. 德國物理學家普朗克（Max Planck，1858～1947）於 1900 年發現，若將物體內部電荷振動時，所吸收或放出的能量視為某最小單位的整數倍，則由此假設推導所得理論將完全符合熱輻射實驗結果。而能量的最小單位 E 與電荷振動的頻率 ν 成正比，其比例常數稱為普朗克常數 h ，即 $E \propto \nu$ $\xrightarrow{\text{比例常數} = h}$ $E = h\nu$
2. 依普朗克的假設，物體內部電荷振動所吸收或放出的能量 E_n 須為 $h\nu$ 的正整數倍，只能具有特定數值，稱為能量量子化。

$$E = n \cdot h\nu, n = 1, 2, 3, \dots$$
3. 普朗克對於熱輻射的研究開啟了量子力學的大門，而其能量量子化的假設也被後來的愛因斯坦與波耳引用，針對光電效應與原子光譜提出合理的解釋。

範例 1 熱輻射

下列關於物質被加熱發出熱輻射的現象敘述，哪些正確？（應選 3 項）

- (A) 物體熱輻射是其內部帶電粒子振動而輻射出來的電磁波
 (B) 溫度不同，熱輻射的強度與頻率的分布亦相同
 (C) 實驗發現，頻率高的熱輻射強度通常較大
 (D) 熱輻射各頻率的強度分布無法用古典理論解釋
 (E) 普朗克發現必須假設物體內部電粒子振動時的能量是不連續的，與頻率成正比，才能解釋熱輻射的現象

答 (A)(D)(E)

解 (B) × 溫度愈高，熱輻射的總強度與強度最大的頻率愈高；

(C) × 對同一溫度而言，頻率極高或極低的熱輻射強度均相當微弱，故選(A)(D)(E)。

類題：小展以望遠鏡觀察夜空中的恆星，發現恆星 A 呈現紅色，恆星 B 呈現橙色，恆星 C 呈現黃色，恆星 D 呈現藍色，恆星 E 需以紫外線望遠鏡觀察，試問哪顆恆星的溫度可能最高？

(A) 恆星 A (B) 恆星 B (C) 恆星 C (D) 恆星 D (E) 恆星 E

答 (E)

(E) ○ 溫度愈高，熱輻射中強度最大的頻率愈高，愈易顯現該顏色。本題所述的 5 種主要輻射中，紫外線的頻率最高，故溫度可能最高，故選(E)。

範例 2 普朗克的量子論

下列敘述中，哪些具有「量子化」的概念？（應選 3 項）

- (A) 利用直尺畫線，可隨意畫出 0 ~ 10 cm 的長度 (B) 1 樓至 2 樓的樓梯共有 15 階，小明目前站立的位置為第 6 階 (C) 一包米袋裝載 50 kg 的米，米倉裡頭儲存米的總重量 (D) 游泳池長度 25 公尺，以自由式來回游完一趟的時間 (E) 密立坎油滴實驗中某個油滴的帶電量是電子電量的 5 倍

答 (B)(C)(E)

解 (A) × 可畫出任意的長度，無最小基本量的限制，故無量子化概念。

(D) × 需要的時間可能為任意值，無最小基本量的限制，故無量子化概念。
故選(B)(C)(E)。

類題 1：在普朗克「量子理論」中，質點振盪吸收或釋放的能量不可能為下列何者？

- (A) $\frac{1}{2} h\nu$ (B) $h\nu$ (C) $2 h\nu$ (D) $4 h\nu$ (E) $8 h\nu$

答 (A) ((A) × (1) 由普朗克分析熱輻射實驗結果，提出量子論的假設：「質點振盪的能量呈現階梯狀的改變，即 $E = n \cdot h\nu$ ， $n = 1, 2, 3 \dots$ 」。
(2) 質點振盪吸收或釋放的能量不可能為「非整數」。故選(A)。)

類題 2：普朗克的「量子論」認為，電磁輻射的能量交換過程，是以哪些特性進行的？（應選 3 項）

- (A) 連續性的 (B) 不連續性的 (C) 量子化的 (D) 以某一最小能量單元的整數倍來轉移 (E) 猶如以直尺畫線一般，要畫多長就有多長

答 (B)(C)(D)

- (B) ○ 普朗克的「量子論」認為電磁輻射的能量是呈「不連續性的」、「量子化的」、「以某一最小能量單元的整數倍」來轉移。故選(B)(C)(D)。
(C) ○
(D) ○

類題 3：下列有關量子論的發展，何者正確？

- (A) 十九世紀末期，人類仍然可以利用能量連續的理論來解釋原子內部微觀的事實 (B) 牛頓是第一位提出量子概念的科學家 (C) 直至目前為止，人類仍無法證實自然界裡有量子現象的存在 (D) 熱輻射實驗結果是反駁量子化特性的最佳證據 (E) 普朗克勇於提出與舊有理論相反的解釋，以量子概念解釋熱輻射的實驗結果

答 (E) ((A) × (1) 利用「能量不連續」的理論可以解釋原子內部微觀的事實。
(B) × (2) 「普朗克」是第一位提出量子概念的科學家。
(C) × (3) 人類已證實「光」具有量子現象。
(D) × (4) 「熱輻射實驗」是開啟量子化特性的研究。故選(E)。)

6-1

課後練習



基礎題

概念 熱輻射

（解析見解答本）

1. 請回答下列有關「黑體」的問題：

- (1) 試簡述何謂「黑體」？
- (2) 為何研究熱輻射需要用「黑體」？
- (3) 完美的黑體可能存在嗎？請描述你的看法，以及你思考的依據。
- (4) 請設計一個近似「黑體」、可用來進行熱輻射研究的東西。

答 ▶ 詳見解析

2. 在空腔壁上的分子若以 5.0×10^{13} Hz 來回振盪，則在洞口測得的電磁波波長為何？

答 ▶ 6.0×10^{-6} m

概念 普朗克的量子論

(A) 3. 「量子論」標幟了近代物理的起點，量子論的提出是為了解決哪個實驗的衝擊？

- (A)熱輻射（黑體輻射） (B)楊氏雙狹縫干涉 (C)光電效應 (D)氫原子光譜
(E)電子繞射實驗

(B) 4. 下列哪一位科學家首先提出「能量」是不連續的量，而是一個一個孤立的「量子」？

- (A)愛因斯坦 (B)普朗克 (C)馬克士威 (D)楊氏 (E)惠更斯

(B) 5. 19 世紀前的電磁波理論認為電磁輻射的能量交換過程是以哪種特性進行的？

- (A)不連續性的 (B)連續性的 (C)量子化的 (D)以某一最小能量單元的整數倍來轉移 (E)猶如階梯數量一般，是 10 階、20 階等

(B) 6. 能量量子化， $E = nh\nu$ ， $n = 1、2、3\cdots$ ，其中普朗克常數 h 的單位為何？

- (A) $\text{N} \cdot \text{s}$ (B) $\text{J} \cdot \text{s}$ (C) N/s (D) J/s (E) $\text{N/J} \cdot \text{s}$

- (D) 7. 有關「量子論」的敘述，下列各項何者正確？
 (A)位置、能量、電流等物理量，都可以是任意值
 (B)當物理量有所變化時，都是連續地增加或減少
 (C)物質是連續的，可以無限制地分割
 (D)電磁波與物質發生交互作用時，物質吸收或放出能量是不連續的
 (E)熱輻射的實驗結果說明能量總是呈連續的特性
- (B D) 8. 下列物理量，哪些具有量子化特性？（應選 2 項）
 (A)力 (B)電量 (C)時間 (D)能量 (E)溫度
- (A C) 9. 普朗克於 1900 年創立量子論，試判別下列各選項哪些正確？（應選 3 項）
 E (A)用以解釋熱輻射的實驗結果
 (B)革命性的假設物質對輻射能的吸收（或放射）是連續的
 (C)同(B)，但為非連續的，且有一最小單位
 (D)輻射能的最小單位僅有一個可能值
 (E)同(D)，但有多種可能值且和頻率成正比
- (A C) 10. 下列有關「熱輻射」的敘述，哪些正確？（應選 3 項）
 E (A)熱輻射總能量和溫度有關
 (B)愛因斯坦解釋熱輻射能量呈現量子化現象
 (C)熱輻射能量是來自物體內部帶電質點振盪所產生的
 (D)熱輻射性質與能量連續性有關
 (E)量子論指出只有在某些特定能量，系統方能穩定存在，且能量成階梯狀，稱為該系統的能階

進階題

- (D) 1. 若以貓在階梯上的位能代表能量的量子化概念，貓從第一階跳到第五階，其位能變化為 $4E$ ，則貓由第十一階跳到第二十階，則其位能變化為何？
 (A) $3E$ (B) $4E$ (C) $6E$ (D) $9E$ (E) $12E$

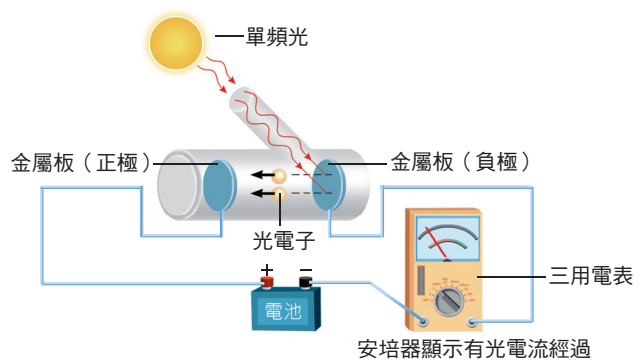
6-2 光電效應與光的波粒二象性

學習概念 1 光電效應

配合課本 190 頁

1. 光電效應的發現：

- (1) 19 世紀末，赫茲發現以紫外光照射線圈電極會使其放電，產生火花。其後經湯姆森確認金屬受光照射，會釋放出電子，這種現象稱為光電效應。
- (2) 電子欲脫離金屬表面，必須消耗能量以克服金屬原子核的束縛，剩餘的能量則成為脫離金屬後電子所具有的動能。
- (3) 金屬照光後釋出的電子稱為光電子，光電子形成的電流稱為光電流。



⊙ 光電效應的實驗示意圖

2. 光電效應的實驗：

1902 年雷納對光電效應進行實驗，提出以下各項結果：

- (1) 照射光的頻率必須大於某特定值（稱為底限頻率），會使金屬立即釋出光電子。
- (2) 若光的頻率小於底限頻率，則無論如何增加光強度或延長照光時間，均無法使金屬產生光電效應。
- (3) 當光的頻率大於底限頻率，則增加光強度會使金屬釋出的光電流量值增加。
- (4) 不同金屬具有其特定的底限頻率。

3. 光電效應的理論：

愛因斯坦建議將「光子」的理論，應用於雷納的光電效應實驗，成功解釋光電效應：

- (1) 當入射光頻率達底限頻率時，光子照射到金屬時，光子可將其能量全部轉移給電子，電子消耗部分能量克服原子核的束縛（能），剩餘的能量則成為光電子的動能。

【結論】光頻率愈高，光子能量愈大，克服束縛後剩餘的能量愈多，光電子動能也隨之愈大。

- (2) 若光子頻率小於底限頻率，單一個光子能量不足以克服原子核束縛，電子便不會吸收入射的光子。

【結論】一個電子僅能吸收一個光子的能量，電子無法累積多個光子的能量，故增加光強度或延長照射時間均仍無法產生光電效應。

！ 小提醒

	光電子動能
改變光的頻率 (> 底限頻率)	頻率變大 ⇒ 動能變大 頻率變小 ⇒ 動能變小
改變光的強度	無影響

- (3) 當光子頻率達底限頻率時，增加光強度會使單位時間內的光子數增加，光子能夠碰撞到的電子數也隨之增加，使光電流量值增加。

【結論】

	強度大	強度小
光子頻率達底限頻率	光電流大	光電流小
光子頻率未達底限頻率	無光電流	無光電流

- (4) 不同金屬的原子核對於電子的束縛能力不同，使電子脫離金屬所需的光子能量不同，故能夠讓不同金屬產生光電效應的底限頻率也因而不同。

【結論】① E_b = 不同金屬的原子核對於電子的束縛能（或稱為功函數）
= 產生光電效應的最低能量

$$\textcircled{2} E_b \xrightarrow{\text{對應於光子能量形式}} E_b = h\nu_0 = \frac{hc}{\lambda_0}$$

$$\text{式中} \begin{cases} \nu_0 = \text{底限頻率} \Rightarrow \text{產生光電效應之最低頻率} \\ \lambda_0 = \text{底限波長} \Rightarrow \text{產生光電效應之最長波長} \end{cases}。$$

範例 1 光電效應

下列有關「光電效應」所陳述的事實或現象，哪些正確？（應選 2 項）

- (A) 光電效應為普朗克發現，而由愛因斯坦提出解釋 (B) 光電效應顯示出光有粒子的性質 (C) 光子的波長小，則每個光子的能量大 (D) 光子的波長大，則光的振幅大 (E) 愛因斯坦提出的光子，其能量具有連續性

答 (B)(C)

解 (A) × 光電效應為赫茲於火花放電實驗中所發現；

(D) × 光的波長大則頻率小，與振幅無關；

(E) × 為不連續性，故選(B)(C)。

類題：光電效應是光具有粒子性的實驗證據，下列有關此「光電效應實驗」的敘述，哪些正確？（應選 2 項）

102 學測改

- (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

答 (A)(C)

- (A) ○ (1) 根據光量子論，光子能量為 $E = h\nu$ ，故光頻率愈高，能量愈大；
(B) × (2) 相同頻率時，入射光的強度愈大，單位時間產生的光電子愈多，與光電子動能無關；
(C) × (3) 電子吸收光子能量後，需克服金屬原子的束縛能，才能形成光電子，即光電子動能為光子能量減去金屬束縛能，而金屬種類會影響束縛能的量值。故光電子動能與金屬材料有關，故選(A)(C)。

學習概念 2

愛因斯坦的光（量）子理論

配合課本 192 頁

1. 愛因斯坦的假設：

- (1) 由於電磁波理論無法解釋光電效應，愛因斯坦引入德國科學家普朗克的能量量子理論，對光電效應提出完整而恰當的解釋。
- (2) 電磁波同時具有粒子與波動性，稱為光量子，簡稱光子。
- (3) 光子與金屬交互作用時，一個電子只能吸收一個光子的能量，且光子只能完全提供或完全不提供能量。
- (4) 光的強度正比於每秒鐘通過單位面積的光能量。故光子頻率固定時，光強度愈大，每秒鐘通過單位面積的光子數愈多，光的總能量愈大。

2. 光子的能量：

- (1) 不同的光其光子能量不相同，每個光子的能量根據其頻率而定，即

$$E = h\nu \begin{cases} E: \text{光子能量 (J)} \\ h: \text{普朗克常數 (其值定義為 } h = 6.62607015 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}) \\ \nu: \text{光子頻率 (Hz)} \end{cases}$$

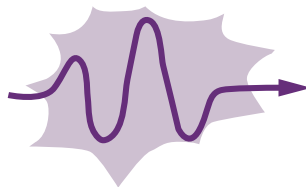
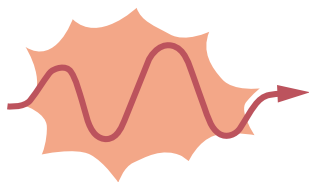
- (2) 光子能量 (E) 與波長 (λ) 的關係：

$$E = h \cdot \nu \xrightarrow{c = \lambda \cdot \nu} E (\text{J}) = \frac{hc}{\lambda (\text{m})} \quad \text{或} \quad E (\text{eV}) = \frac{12400}{\lambda (\text{\AA})}$$

$$\textcircled{1} \quad 1 \text{ m} = 10^{10} \text{\AA}, \quad 1 \text{ J} = 6.25 \times 10^{18} \text{ eV}, \quad 1 \text{ eV} = (1.6 \times 10^{-19} \text{ C}) \cdot \text{J/C} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}。$$

$$\textcircled{2} \quad hc = (6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}) \cdot (3 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}) \cdot (10^{10} \frac{\text{\AA}}{\text{m}}) \cdot (6.25 \times 10^{18} \frac{\text{eV}}{\text{J}}) \\ \approx 12400 \text{ eV} \cdot \text{\AA}$$

- (3) 實例：



(a) 紅光光子頻率低，波長長，能量小

(b) 紫光光子頻率高，波長短，能量大

☉ 可見光的光子

範例 2 光電效應

下列兩表分別為部分電磁波的波長與頻率，以及移去金屬表面電子所需能量等資料，請根據兩表格的資料回答以下問題：（普朗克常數為 $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ）

部分電磁輻射的波長與頻率								
	紫外線	紫光	藍光	綠光	黃光	橙光	紅光	紅外線
波長 (nm)	小於 紫光	380 ~ 450	450 ~ 495	495 ~ 570	570 ~ 590	590 ~ 620	620 ~ 750	大於 紅光

移去金屬表面電子的最小能量						
金屬	鉀	鈉	鈣	鋅	錳	銅
能量 ($\times 10^{-19} \text{ J}$)	3.30	3.70	4.79	5.84	6.56	7.48

- (1) 如果我們以波長為 520 nm 的綠光照射下列金屬，哪些可以產生光電效應？（應選 2 項）
 (A)鉀 (B)鈉 (C)鈣 (D)鋅 (E)錳 (F)銅
- (2) 用下列哪些光線來照射，無法使金屬鈉產生光電效應？（應選 2 項）
 (A)波長為 300 nm 的紫外光 (B)波長為 400 nm 的紫光 (C)波長為 480 nm 的藍光
 (D)波長為 500 nm 的綠光 (E)波長為 550 nm 的黃光 (F)波長為 650 nm 的紅光

答 (1)(A)(B)；(2)(E)(F)

解 (1)(A) ○ (B) ○ 依 $E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$ $\xrightarrow{\lambda = 520 \text{ nm}}$ $E = \frac{(6.63 \times 10^{-34}) \times (3 \times 10^8)}{(520 \times 10^{-9})}$
 $= 3.8 \times 10^{-19} \text{ J} > E_b$ ，於上表中得知，以此光照射時，鈉、鉀可產生光電效應，故選(A)(B)。

(2)(E) ○ (F) ○ 依 $E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$ (移去鈉金屬表面電子的最小能量為 $3.70 \times 10^{-19} \text{ J}$)
 $\lambda_0 = \frac{hc}{E} = \frac{(6.63 \times 10^{-34}) \times (3 \times 10^8)}{(3.70 \times 10^{-19})} = 5.38 \times 10^{-7} \text{ m} = 538 \text{ nm}$ (最長波長)
 因波長愈大，光子能量愈低，故波長大於 538 nm 的光將無法使金屬鈉產生光電效應，故選(E)(F)。

- 類題：假設一個 10 瓦的省電燈泡把所有電能均轉換為光子，為了方便估計，並將光子的波長近似為 600 奈米（橘黃色光），試問燈泡每秒鐘會射出多少光子？（假設真空中光速 $c = 3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$ ，普朗克常數 $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ）
 (A) 3.0×10^{18} (B) 3.0×10^{19} (C) 3.0×10^{20} (D) 3.0×10^{21} (E) 3.0×10^{22}

答 (B)

(B) ○ 光束的能量為 $E = nh\nu = \frac{nhc}{\lambda}$ 。
 由 瓦特 = 焦耳/秒，則在 1 秒內，燈泡發出的光能 E 為 10 焦耳，且
 $10 = \frac{n \times (6.63 \times 10^{-34}) \times (3 \times 10^8)}{(600 \times 10^{-9})} = n \times 3.32 \times 10^{-19} \Rightarrow n = \frac{10}{(3.32 \times 10^{-19})}$ (個)，故選(B)。

範例 3 愛因斯坦的光（量）子理論

依據愛因斯坦的光量子理論，試回答下列各問題：

- (1) 波長約為 500 nm 之綠光，其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 $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$ ，試問 500 nm 之綠光的光子能量為多少 eV？

答 (1) $4.0 \times 10^{-19} \text{ J}$ ；(2) 2.48 eV

解 (1) 依 $c = \lambda \cdot \nu$ $\xrightarrow{\lambda = 500 \text{ nm} = 5 \times 10^{-7} \text{ m}}$ $\nu = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \times 10^8}{5 \times 10^{-7}} = 6 \times 10^{14} \text{ Hz}$

又 $E = h\nu \Rightarrow E = (6.63 \times 10^{-34}) \cdot (6 \times 10^{14}) = 4.0 \times 10^{-19} \text{ J}$

(2) 依 $E = \frac{12400}{\lambda (\text{\AA})} (\text{eV})$ $\xrightarrow{\lambda = 500 \text{ nm} = 5000 \text{ \AA}}$ $E = \frac{12400}{5000} = 2.48 \text{ eV}$

類題：紅光之波長約為 6500 埃。試求：

- (1) 頻率；(2) 紅光中每一光子之能量（分別以焦耳、電子伏特表之）。

答 (1) $4.6 \times 10^{14} \text{ Hz}$ ；(2) $3.0 \times 10^{-19} \text{ J}$ ，1.9 eV



(1) 依 $c = \lambda \cdot \nu \Rightarrow \nu = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{6500 \times 10^{-10} \text{ m}} = 4.6 \times 10^{14} \text{ Hz}$

(2) 依 $E = \frac{12400}{\lambda (\text{\AA})} (\text{eV}) \Rightarrow E = \frac{12400}{6500} = 1.9 \text{ eV}$ ，又 $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J} \Rightarrow E = (1.6 \times 10^{-19}) \cdot 1.9 = 3.0 \times 10^{-19} \text{ J}$ 。

學習概念 3 光電效應的應用

配合課本 196 頁

在光電效應中，光照射金屬後，金屬會釋出光電子形成光電流，而電流可做為能源、訊號傳遞等功能，因此光電效應在日常生活中的應用範圍相當廣泛，如以下舉例：

光電效應的應用	生活中常見實例
產生能源	太陽能電池、太陽能光電板等，如右圖所示。  ☉ 掌上型計算器
感測訊號	控制電路開關的光電管，可應用於自動門等感測裝置，如右圖所示。  ☉ 紅外線收發控制器
呈現影像	數位相機中的感光元件、條碼掃描器、將微弱光訊號放大的夜視鏡等。
產生靜電	雷射印表機藉由光電效應使半導體帶電而吸附碳粉。

範例 4 光電效應的應用

百貨公司入口大門頂端設置有一個電子眼偵測器，當顧客靠近或離開時均會啟動聯絡的電路，操縱大門的開與關。偵測器長得很像三明治，是在兩片電極板間夾著半導體，可以用來感應光線，藉著光線強度的變化，造成偵測器裡產生的電流隨著改變。搭配適當的開、關電路後，就可以啟動大門。請問電子眼偵測器主要是基於下列何種物理原理設計而成的？

(A)光電效應 (B)歐姆定律 (C)牛頓定律 (D)電流磁效應 (E)電磁感應

答 (A)

解 (A) ○ 電子眼偵測器是「光電效應」的設計應用。故選(A)。

類題：下列各項為日常生活中常見的裝置或設備，相關的敘述何者正確？（應選3項）

(A)太陽能電池，利用光電效應原理，將光能轉變為電能 (B)手機拍照，利用光電效應原理，將光引入鏡頭後，打到後方的感光元件，光的訊號則轉換為電的訊號，產生數位照片 (C)太陽能電板，利用光電效應原理，在正午的太陽光照射，會產生較大的光電流 (D)太陽能電板，利用光電效應原理，產生電能的功率為光電流與電壓之比值 (E)太陽能電池，利用光電效應原理，至今對減輕全球暖化完全沒有任何幫助

答 (A)(B)(C)

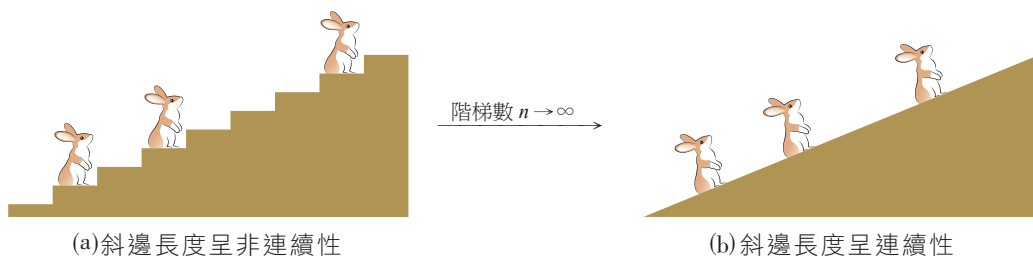
(A) ○ (1)太陽能電池 $\xrightarrow{\text{採光電效應原理}}$ $\begin{cases} \text{①將光能轉變為電能} \\ \text{②可有效減緩全球暖化問題。} \end{cases}$
 (E) ×
 (B) ○ (2)手機拍照 $\xrightarrow{\text{採光電效應原理}}$ 光入射鏡頭，刺激感光元件，產生數位照片。
 (C) ○ (3)太陽能電板 $\xrightarrow{\text{採光電效應原理}}$ $\begin{cases} \text{①正午光強度大，產生的光電子（流）多（大）} \\ \text{②電功率 } P = I \times V \end{cases}$ 。故選(A)(B)(C)。
 (D) ×

學習概念 4 光的波粒二象性

配合課本 197 頁

1. 連續性與量子性：

- (1) 某些自然現象看似連續不斷，實則由許多小單元組成，但因小單元過於微小，便難以發現這些組成單元。
- (2) 說明例：
 - ① 水雖由許多水分子組成，但流動時並不會察覺分子造成的不連續性。
 - ② 如下頁圖(a)所示，當樓梯的總階數不大時（ $n = 8$ ），兔子每跳上一階我們可以明顯感覺階梯量子化現象；若在等斜長的階梯上階梯數呈極大時（ $n \rightarrow \infty$ ），我們便無法感受到階梯量子化現象，此時兔子站立於階梯上就好像滑行於斜坡上，如下頁圖(b)所示。



◎ 連續性與量子化

2. 光同時具有波動和粒子的性質，稱為光的波粒二象性。

- (1) 楊氏雙狹縫干涉實驗與馬克士威電磁波理論已證實光的波動性質，而愛因斯坦光子論對於光電效應的解釋又確認了光的粒子性質，因此愛因斯坦認為，**光同時具有波動與粒子的雙重性質**，稱為光的波粒二象性。
- (2) 光的波動與粒子性質並不會同時展現出來，在特定場合僅會呈現其中一種性質。光會表現何種性質取決於實驗設計與觀測方式，一般而言：
 - ① 光的強度較小、光子數較少，或光頻率較大、波長較短時，較易觀察到光的粒子性。
 - ② 光的強度較大、光子數較多，或光頻率較小、波長較長時，較易觀察到光的波動性。

範例 5 光的波粒二象性

光可以看成是由光子所組成，下列哪些有助於讓我們觀察到光的粒子性質？（應選 2 項）

- (A) 使光的速度減慢 (B) 使光的強度減小 (C) 使光的強度增加 (D) 觀察頻率較大的光
(E) 觀察顆粒較大的光

答 (B)(D)

解 (B) ○ (D) ○ 欲觀察到光子的顆粒，應盡可能將光強度減小，減少光源在單位時間內發出的光子數。反之，光強度較大時單位時間內光子數目較多，不易觀察到光子顆粒，故選(B)(D)。

類題：對於「光的粒子性與波動性」，下列敘述哪些正確？（應選 2 項）

- (A) 牛頓提出光同時具有粒子性與波動性 (B) 光電效應顯示可見光具有粒子性
(C) 光的雙狹縫干涉顯示光具波動性 (D) 光子數量越少，越容易觀察顯現出其波動性
(E) 我們可以在任何時刻同時觀察到光的波動性和粒子性

答 (B)(C)

- ((A) × 是愛因斯坦提出光同時具有粒子性與波動性；
(D) × 光子數量越多，越容易觀察顯現出其波動性；
(E) × 無法同時觀察到光的波動性和粒子性，每一個實驗或現象中僅能顯出其特性，故選(B)(C)。)

6-2

課後練習

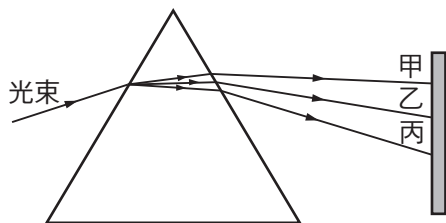
基礎題

概念 光電效應

(解析見解答本)

- (D) 1. 由「光電效應」實驗可知，當照射光的頻率小於底限頻率時，結果如何？
 (A)必須照射較久的時間，才會產生光電子
 (B)必須以較大強度的光來照射，才會產生光電子
 (C)必須以較大強度的光且照射較久的時間，才會產生光電子
 (D)不管光的強度多大或照射時間多久，都無法產生光電子
 (E)必可產生光電子

- (B) 2. 有一光束經過三稜鏡的色散之後，區分成三條單色光的光線甲、乙、丙，其折射路徑如圖所示。已知將乙光照射某一金屬表面時，可以產生光電子，則下列有關甲、丙兩種色光照射該金屬表面能否產生光電子的敘述，何者正確？（註：已知太陽光通過三稜鏡時，紅光偏折角度最小）
 (A)甲光可以產生光電子 (B)丙光可以產生光電子 (C)甲光無法產生光電子
 (D)丙光無法產生光電子 (E)無法判斷甲、丙兩色光能否產生光電子



- (A C E) 3. 在光電效應的實驗中，五位學生分別以不同強度、不同色光來照射同一金屬表面。已知用強度為 3 單位的綠光照射時，金屬表面恰可產生光電子。五位學生的操作情形如右表，試問哪幾位學生的操作方式可以使金屬表面產生光電子？（應選 3 項）
 (A)甲 (B)乙 (C)丙 (D)丁 (E)戊

操作者	入射光強度	入射光
甲	1 單位	綠光
乙	5 單位	黃光
丙	5 單位	藍光
丁	5 單位	紅光
戊	1 單位	紫外光

概念 愛因斯坦的光（量）子理論

- (A) 4. 依據愛因斯坦的「光量子論」，試計算頻率為 $4 \times 10^{14} \text{ Hz}$ 的光子，其所對應的能量為多少 J？（普朗克常數 $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ）
 (A) 2.65×10^{-19} (B) 5.30×10^{-19} (C) 6×10^{-19} (D) 2.65×10^{-18}
 (E) 5.30×10^{-18}

- (E) 5. 下列各項有關「光子」的敘述，何者正確？
 (A)光子又稱為「光電子」 (B)每個光子的能量和其波長成正比
 (C)每個紅光光子的能量大於紫光光子 (D)真空中紅光的速度大於紫光
 (E)相同頻率的光，強度愈強代表光子數愈多
- (A E) 6. 根據愛因斯坦的「光量子論」，下列敘述哪些正確？（應選 2 項）
 (A)光束是由為數眾多的光量子所組成
 (B)光子可將其能量給予多個電子
 (C)強度相同的光，光子的能量也相同
 (D)電子可累積多個光子的能量再脫離金屬
 (E)每個光子的能量與其頻率之比值等於普朗克常數
- (A D) 7. 愛因斯坦提出「光量子論」，若 A 光子的能量為 4 電子伏特、B 光子的能量為 8 電子伏特，有關 A、B 兩光子的性質比較，下列各項哪些正確？（應選 3 項）
 (A)頻率比 1：2 (B)頻率比 2：1 (C)波長比為 1：4 (D)波長比為 2：1
 (E)速率比 1：1
8. 波長 7000 \AA 的紅光光子與波長 4000 \AA 的紫光光子，以相同強度發射時，紅光光子數與紫光光子數比為何？

答 7：4

進階題

- (C) 1. 一個消耗功率為 100 瓦特的 LED 燈管，發出波長 440 奈米的紫色光，若消耗功率的 90% 會轉變為光能，則此燈管每秒所發射的光子數約為多少個？（已知真空中光速 $c = 3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$ ，普朗克常數 $h = 6.6 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ）
 (A) 2.0×10^{18} (B) 2.0×10^{19} (C) 2.0×10^{20} (D) 2.0×10^{21} (E) 2.0×10^{22}
2. 以波長 5000 埃之單色光垂直照射在一光電管之金屬板上，假定每個光子打出一個光電子，光之強度為 $100 \text{ 焦耳/米}^2 \cdot \text{秒}$ ，而金屬板受光照射面積為 $2.5 \times 10^{-3} \text{ 米}^2$ ，則產生之光電流約為若干安培？

答 0.1 A

6-3 物質波與波粒二象性

學習概念 1

物質波

配合課本 198 頁

1. 德布羅意的物質波學說：

- (1) 法國科學家德布羅意注意到光兼具波動與粒子的特性，因此認為運動中的物質也能表現出波動的特性，稱為物質波。
- (2) 物質波不是電磁波，也不是力學波，粒子運動的速度也不是物質波的速度，物質波是一種新的波，代表粒子出現機率分布的函數，所對應的波長 λ ，定義為

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} \quad \left\{ \begin{array}{l} h: \text{普朗克常數} (h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}) \\ m: \text{粒子的質量 (kg)} \\ p: \text{粒子的動量 (kg} \cdot \text{m/s)} \\ v: \text{粒子的運動速率 (m/s)} \end{array} \right.$$

- (3) 依理論推算顯示，物體的質量愈大、速率愈大，其物質波的波長愈短。因此一般生活中的物體，其物質波的波長極小，不易觀察到物質的波動性。

2. 物質波的證據：

「電子」質量甚小，是最佳觀測物質波的對象。

- (1) 戴維森與革末於 1927 年以鎳晶體完成電子繞射實驗。
- (2) 湯姆森於 1927 年以多晶薄膜完成電子繞射實驗。
- (3) 瓊森於 1961 年完成電子的雙狹縫干涉實驗。

範例 1 物質波

在傳統概念中，以下哪一個現象是波才具有，粒子不具有的特性？之後，科學家發現電子也能具有此特性，使科學家認為，電子在某一些場合也具有波動性。

- (A) 光電效應 (B) 都卜勒效應 (C) 雙狹縫干涉產生明暗條紋 (D) 具有直進性
(E) 遵守反射定律

答 (C)

解 (C) ○ 粒子具有「雙狹縫干涉」現象，是物質波存在的印證；平時因粒子質量過大而不易察覺。故選(C)。

類題：從電子束干涉實驗的成功，可證明何種理論是對的？

- (A) 物質波理論 (B) 光的波動說 (C) 波耳原子模型 (D) 光的微粒說 (E) 量子論

答 (A)

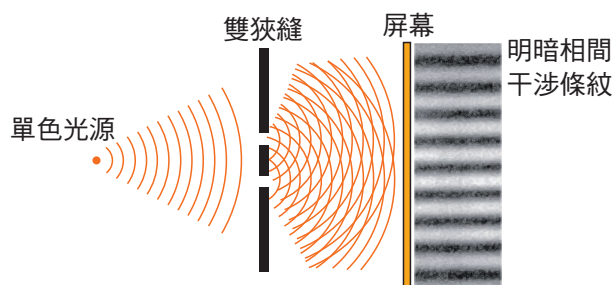
((A) ○ 電子的繞射現象證明「物質波理論」是對的。故選(A)。)

學習概念 2

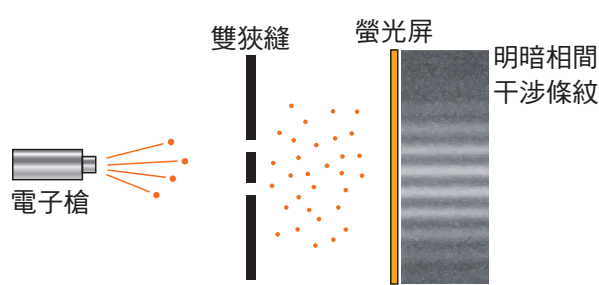
電子的雙狹縫干涉實驗

配合課本 198 頁

1. 如下圖所示，科學家們進行電子的干涉實驗結果，與光的干涉實驗相當接近，顯示電子具有波動性，證實物質波的存在。



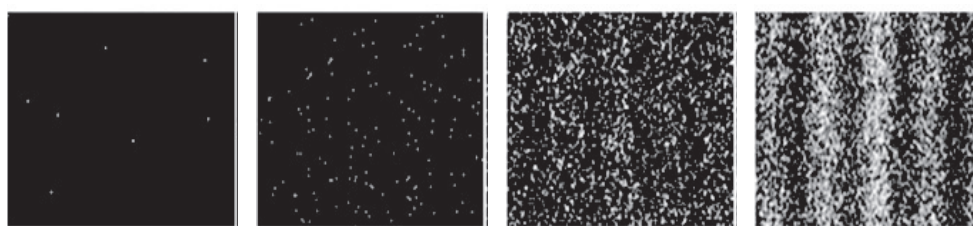
⊙ 光的干涉實驗



⊙ 電子的干涉實驗

(1) 電子的雙狹縫干涉實驗分析：

進行電子束雙狹縫干涉實驗時，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，如下圖所示。



實驗剛開始

電子數目約 300 顆

電子數目約 2000 顆

電子數目約 6000 顆

⊙ 電子的雙狹縫干涉條紋

(2) 結論：

- ① 物質波所代表的物理涵義是一種「機率（波）」。
- ② {
 - a. 條紋中電子粒分布「稀疏處」表示電子出現機率小。
 - b. 條紋中電子粒分布「密集處」表示電子出現機率大。

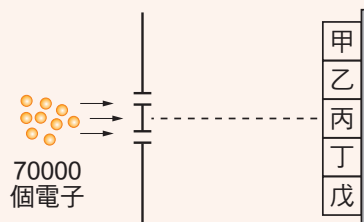
! 小提醒

物質波代表物質在空間中的機率分布。

範例 2 電子的雙狹縫干涉實驗

Dr. Jonsson 準備了一片雙狹縫及一個螢光屏電子偵測器，同時在屏上劃分五個區域，如右圖所示。現將 70000 個電子一次一個射向狹縫，經過漫長的時間後，偵測螢光屏上擊中各區域的電子數目，如下表所列。下列各項敘述何者正確？

區域	甲	乙	丙	丁	戊
擊中數目	21620	1585	23744	1415	21636



- (A) 擊中甲、丙、戊區的電子數目較多，呈現暗區
 (B) 擊中甲、丙、戊區的電子數目較多，呈現亮區
 (C) 擊中乙、丁區的電子數目較少，呈現亮區
 (D) 此實驗可以用牛頓力學來解釋
 (E) 此實驗電子清楚地呈現了粒子性

答 (B)

解 (B) ○ 當電子擊中螢光屏的數目愈多，表示電子出現在該區域的機率較高，致該區域顯現出亮區；反之，擊中螢光屏的數目愈少，表示電子出現在該區域的機率較低，致該區域顯現出暗區。故選(B)。

類題 1：進行電子束雙狹縫干涉實驗，電子束打中屏幕，並在螢光屏上形成干涉條紋。下列何者是產生亮、暗干涉條紋的主因？

- (A) 電子釋放電磁波，電磁波經狹縫後形成干涉
 (B) 電子只會朝幾個特定方位前進
 (C) 電子通過狹縫後，落在屏上某些位置的機會較小
 (D) 電子通過狹縫後，有些位置產生反射（暗紋），有些位置產生折射（亮紋）
 (E) 電子通過狹縫後，有些位置產生干涉（暗紋），有些位置產生繞射（亮紋）

答 (C)

((C) ○ 物質波為「機率波」，代表物質（例如電子）運動時，在空間中出現位置的機率分布。屏上的亮紋，表示電子通過狹縫後，落在屏上該位置的機會較其他位置高，屏上的暗紋，則反之。故選(C)。)

類題 2：從「電子的繞射」現象可以證明什麼？

- (A) 物質波的理論 (B) 光的波動說 (C) 物質的原子說
 (D) 普朗克的量子論 (E) 光的微粒說

答 (A)

((A) ○ 電子的繞射現象是顯現電子的波動性（物質波）。故選(A)。)

學習概念 3

電子的波粒二象性

配合課本 199 頁

電子的質量與電荷均集中在一個很小的點上，實驗室探測儀器上可以清楚看到它的粒子性，又從電子的干涉實驗中也清楚顯示它具有波動性，故電子具有波動性與粒子性的雙重特性，稱為電子的波粒二象性。

範例 3 電子的波粒二象性

有關「電子的波粒二象性」，下列各項敘述何者正確？

- (A) 電子運動時，遵守牛頓運動定律
- (B) 電子運動時，其位置是呈現機率分布的
- (C) 電子運動時，其位置會作規律性的週期變化
- (D) 電子運動時，會製造電磁波輻射
- (E) 電子運動時，保有其原來的粒子性

答 (B)

解 (B) ○ 物質波為一「機率波」，指物質運動時，在空間中出現在某位置的機率分布。故選(B)。

類題 1：關於「光」的波粒二象性，下列敘述何者錯誤？

- (A) 光電效應顯示光的粒子性
- (B) 一單色光束的強度愈大，表示其中所含光子的能量愈大
- (C) 光的雙狹縫干涉實驗顯示光具有波動性
- (D) 承(C)，屏幕上的亮紋及暗紋是光子分布不均的結果
- (E) 光的頻率愈高，每個光子的能量就愈大

答 (B)

((B) × 一單色光束的強度愈大，表示其中所含光子的數目愈多。故選(B)。)

類題 2：有關「波」的性質，下列敘述哪些正確？（應選 3 項）

- (A) 聲波是一種物質波
- (B) 物質波與光波一樣可產生干涉、繞射
- (C) 質量愈小的粒子波動性愈明顯
- (D) 物質波以光速傳遞
- (E) 不論光或粒子皆具有粒子與波動的二象性

答 (B)(C)(E)

((A) × (1) 聲波不是物質波。

((D) × (2) 物質波是隨伴運動粒子運動而生。故選(B)(C)(E)。)

6-3

課後練習



基礎題

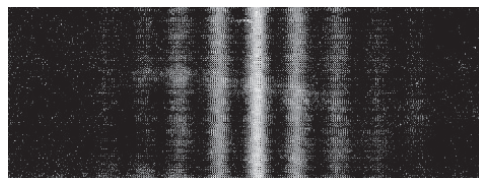
概念 物質波

(解析見解答本)

- (D) 1. 1924 年法國物理學家德布羅意提出一劃時代的理論為何？
(A)能量守恆 (B)質能守恆 (C)光的粒子性 (D)物質的波動性 (E)質量守恆
- (C) 2. 20 世紀偉大科學家戴維森和革末利用鎳金屬晶體，進行電子繞射實驗的重大意義為何？
(A)探索鎳（金屬）晶體的結構 (B)證明 X 射線具有粒子性
(C)應證電子束具有波動性 (D)驗證 X 射線是電子撞擊鎳金屬所造成的
(E)測量 X 光的波長
- (A) 3. 德布羅意提出「物質波理論」，認為單一的電子、質子、原子、分子與鋼珠等一些物質，除了粒子的特性外，也都兼具有波動的性質。今假設上述物質以相同速率運動時，哪一種物質的「波動性」最顯著？
(A)電子 (B)質子 (C)原子 (D)分子 (E)鋼珠
- (C) 4. 具有相同物質波波長的質子與 α 粒子，其行進的速率比為何？
(A) 1 : 2 (B) 2 : 1 (C) 4 : 1 (D) 1 : 4 (E) 1 : 1

概念 電子的雙狹縫干涉實驗

- (A) 5. 早在 1927 年科學家由電子的晶格繞射實驗已經確認了電子的波動性質，但是仍然嘗試進行電子的雙狹縫干涉實驗，藉以檢驗電子是否有干涉現象。直到 1961 年德國科學家瓊森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，如右圖所示，與楊氏雙狹縫光干涉圖形的結果，幾乎完全相同。此實驗在二十一世紀初，被物理學家評為最美麗的十個歷史實驗中之第一名。依現代科技，下列哪一物質通過狹縫後，科學家仍無法得到很清晰的干涉條紋？
(A)夸克 (B)質子 (C)中子 (D)氦核 (E)電子



(C D) 6. 下列有關「物質波」的敘述，哪些正確？（應選 2 項）

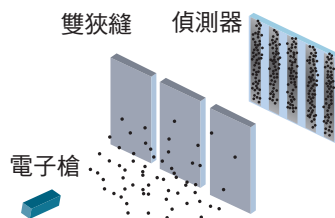
- (A)物質波的概念為愛因斯坦所提出 (B)物質波指的是靠物質傳播的波 (C)物質波代表粒子在空間中的分布機率 (D)電子雙狹縫干涉實驗可佐證物質波存在 (E)質量愈大的物體，其物質波波長愈長，波動性愈明顯

概念 電子的波粒二象性

(E) 7. 下列有關光與電子的敘述，何者正確？

- (A)光是波動，但有粒子的性質；物質是粒子，也可以看成是可見光
(B)光子和電子均具有粒子和波動的性質，均具有質量，且速度可為任意值
(C)電子抵達屏幕時，若其物質波發生建設性干涉，會發出強光
(D)物質波與光波均為橫波，也都不需介質即可傳播
(E)物質波與光波同樣具有干涉與繞射的現象

(D E) 8. 如右圖所示，為物理學家進行電子雙狹縫干涉實驗的示意圖。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。下列相關的實驗敘述，哪些是正確的？（應選 2 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)此實驗可證明電子具有都卜勒效應 (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

進階題

1. 設有一低速電子在非彈性碰撞中損失一半的動能，則碰撞後此電子之物質波波長變為原波長的若干倍？

答 ▶ $\sqrt{2}$ 倍

2. 一子彈質量為 40 克，以 1000 米/秒的速率前進。

- (1) 子彈的相關波長為若干？
(2) 為何子彈的波動性不經繞射作用而顯露？

答 ▶ (1) $1.7 \times 10^{-35} \text{ m}$ ；(2) 波長太短

6-4 原子能階與光譜

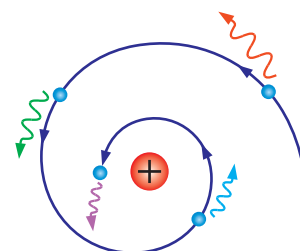
學習概念 1 波耳氫原子模型

配合課本 200 頁

1. 拉塞福基於 α 粒子散射實驗的結果，提出行星式原子模型，這個模型遭遇以下的困難：

(1) 原子呈穩定狀態，如何解釋？

根據電磁學理論，作加速度運動的帶電質點會輻射出電磁波，因而放出能量。若電子環繞原子核作圓周運動，則電子必會放出電磁波而不斷釋出能量，最終電子會因損失能量而墜落至原子核上，如右圖所示。



◎ 電子的繞核圓周運動

【質疑】行星式原子模型中的電子與原子核如何組成穩定的原子？

(2) 原子光譜呈不連續性，如何解釋？

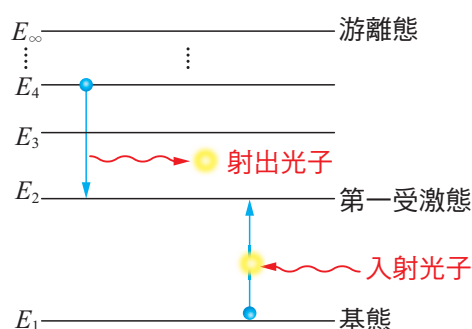
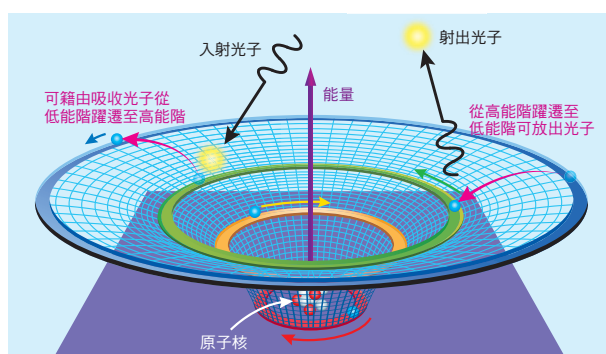
行星式原子模型的電子可在任意半徑的軌道上繞核旋轉，因此當電子改變軌道半徑時，其得失能量可為任意值，產生的光波長應為任意值，故原子光譜應為連續光譜。

【質疑】實驗結果發現電子躍遷時發出不連續光譜，與當時理論不符，怎麼會這樣？

2. 西元 1913 年，丹麥科學家波耳綜合了拉塞福的有核原子理論，氫原子光譜的規律及量子理論的發展（能量量子化），大膽的作了兩個假設，提出「穩定態躍遷的原子模型」。

(1) 原子穩定態（即量子化條件）的假定：

- ① 電子可以在特定軌道繞核旋轉而不輻射電磁波，電子在這些軌道上具有特定能量，呈現不連續，可以想像為階梯，稱為能階。
- ② 電子在不同軌道或能階之間移動稱為躍遷，電子由低能階躍遷至高能階會吸收特定能量，高能階躍遷至低能階會放出特定能量，此特定能量為兩能階之間的能量差 ΔE 。



◎ 波耳提出穩定態躍遷的原子模型（量子化原子模型）

(2) 不連續原子光譜的假定：

- ① 基於能階的概念，電子位於低能階時，狀態較為穩定，故自然狀態下電子具有自高能階躍遷至低能階的趨勢。
- ② 電子位於最低能階時的狀態稱為基態（以量子數 $n = 1$ 表示），位於其餘較高的能階稱為受激態（當 $n = 2$ 時稱為第一受激態，當 $n = 3$ 時則稱為第二受激態，以此類推）。
- ③ 當電子自高能階躍遷至低能階時，電子損失的特定能量會以光子的形式發射， $\Delta E = h\nu$ ，根據愛因斯坦光子論，發射出的光子也具有特定頻率，成為不連續的發射光譜。

範例 1 波耳氫原子模型

有關波耳「氫原子模型」的敘述，下列哪幾項是正確的？（應選 2 項）

- (A) 波耳研究氫原子模型提出了電子在特定軌道繞核運轉
 (B) 原子的能量為不連續的狀態，而具有能階的概念
 (C) 電子在環繞原子核時，能量較高的狀態比較穩定
 (D) 氫原子在任兩能階間躍遷時，每次躍遷所輻射的光子能量都相同
 (E) 光電效應是波耳氫原子模型的直接證據之一

答 (A)(B)

- 解 (C) × 電子位於較低能階時，狀態較為穩定；
 (D) × 任兩能階之間的能量差並非相同值；
 (E) × 光電效應與波耳氫原子模型無直接關係，故選(A)(B)。

類題：波耳在其提出的原子模型中，做了哪些假設？（應選 2 項）

- (A) 電子軌道是連續分布的
 (B) 原子處於穩定態的能量狀態時，雖然電子作加速運動，但並不向外輻射能量
 (C) 電子從一個軌道躍遷到另一軌道時，輻射或吸收一定頻率的光子
 (D) 電子躍遷時，輻射的光子頻率等於電子繞原子核作圓周運動的頻率
 (E) 電子從一個軌道躍遷到另一軌道時，輻射或吸收光子的能量並無量子化的現象

答 (B)(C)

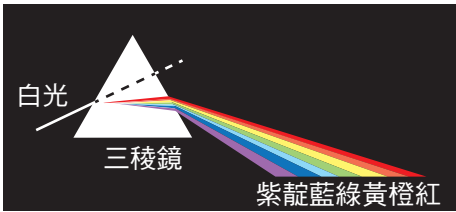
- ((A) × 波耳氫原子模型中，電子只能在特定軌道上運行，其繞轉半徑不可為任意值；
 (D) × 電子躍遷時輻射的光子頻率與繞核圓周運動的頻率無關；
 (E) × 輻射或吸收的光子能量具有特定值，為量子化現象，故選(B)(C)。)

學習概念 2 原子光譜

配合課本 202 頁

1. 光譜學：

- (1) 如右圖所示，將白光通過光譜儀（如三稜鏡）時，因為偏折程度不同，會在屏幕上形成按照波長量值排列的光譜。
- (2) 科學家可以利用光譜儀分析光源中含有的各種色光與其波長，進而推論出物質的組成成分，稱為光譜學。

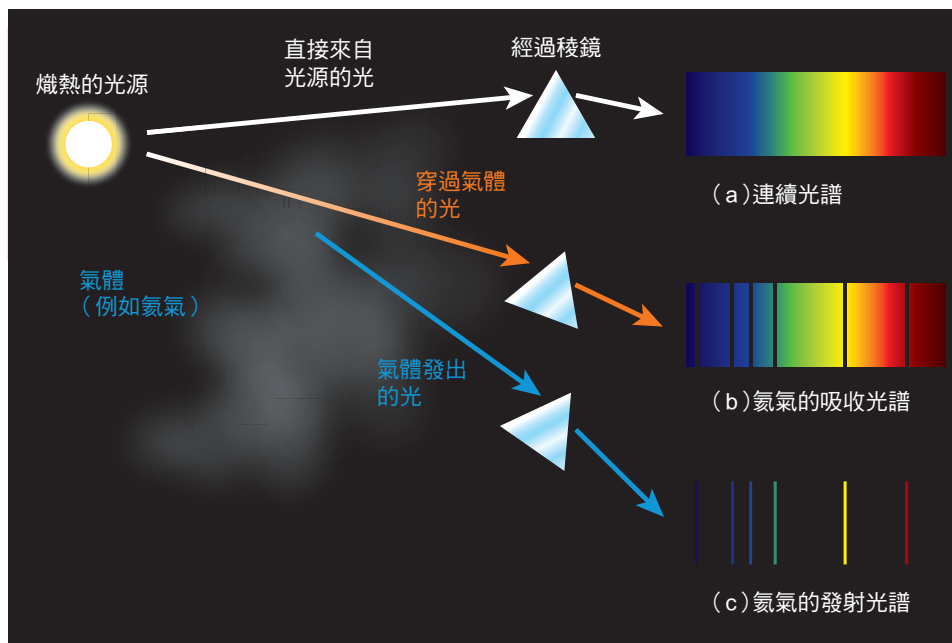


◎ 白光通過三稜鏡產生連續光譜

2. 光譜的分類：自然界的光源可依光譜特性與產生方式分類

種類	連續光譜	不連續光譜	
		吸收光譜 (暗線光譜)	發射光譜 (明線光譜)
原理	熱輻射	原子能階躍遷	原子能階躍遷
光源與產生方式	溫度高時，物質內的電荷作不規則振動，發射出各種頻率的電磁波。	低能量的原子，電子位於低能階，吸收特定頻率的光後躍遷至高能階，使連續光譜缺少特定譜線。	吸收能量（光、電或熱）後的原子，電子位於不穩定的高能階，短時間後電子躍遷至低能階，減少的能量以光子形式釋出。
光譜特性	各種頻率的連續光譜。	在連續光譜中缺少特定頻率光譜線，形成暗線，和明線光譜位置對齊。	具特定頻率的光譜明線。
舉例	白熾燈泡、炭火、太陽光譜	通過大氣層後的太陽光譜	焰色反應、霓虹燈

3. 科學家發現，各種原子的不連續光譜有其各自特定的頻率譜線，猶如各種元素的指紋。因此我們只要發現某光源的光譜具有某元素的譜線，便可推論此光源具有該元素。



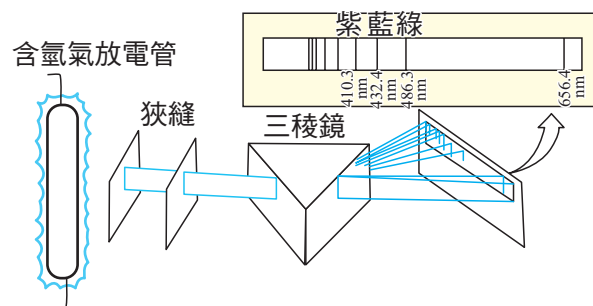
◎ 光譜的分類

學習概念 3 氫原子光譜

補充資料

1. 如何產生氫原子的發射光譜（明線光譜）？

放電管中放入低氣壓之氫氣，外接高電壓（ $\sim 10^4 \text{ V}$ ），氫分子被電子束分解為氫原子，同時放電管放出肉眼可見之紫紅色光，此輻射光經狹縫、三稜鏡分散（折射），投射在照相底片，得到一系列譜線（明線），如下圖所示。



◎ 氫原子光譜產生示意圖

2. 氫原子光譜的特性：

- (1) 氫原子光譜為不連續的明線光譜，每一條譜線代表某一特殊頻率。
- (2) 主要有三群，分別在「紫外光區」、「可見光區」、「紅外光區」。
- (3) 隨頻率的增加，間隔呈有規律的接近，即間隔愈小。

範例 2 原子光譜

下列有關「原子光譜」的敘述哪些正確？（應選 3 項）

- (A) 原子的光譜是因電子在能階之間躍遷所產生
- (B) 原子的光譜可以驗證原子具有能階
- (C) 同一種原子的發射光譜譜線位置會與其吸收光譜譜線位置互相對齊
- (D) 太陽上有氦的成分，地球上也有氦氣，兩者的發射光譜譜線位置並不相同
- (E) 我們可藉由分析火星的發射光譜來分析火星的組成成分，有利於將來登陸火星

答 (A)(B)(C)

解 (D) × (1) 同一種元素的光譜譜線位置均相同（不考慮光的都卜勒效應）。

(E) × (2) 地球上觀察到火星的發光為火星表面的反射光，無法以光譜分析得知其成分，故選(A)(B)(C)。

類題 1：關於光譜和光譜分析，下列何者敘述正確？

- (A) 白熾燈泡為不連續光譜
- (B) 藉由分析物質的不連續光譜譜線，可以得知組成物質的元素
- (C) 不同金屬鹽類火焰的光譜分析發現，所呈現的光譜線幾乎相同
- (D) 藉由觀察月亮的發射光譜，可以得知月球的組成礦物
- (E) 明線光譜與暗線光譜都屬於發射光譜

答 (B)

(A) × (1) 為連續光譜。

(C) × (2) 不同的鹽類所含的元素不同，光譜譜線各自不同。

(D) × (3) 地球上觀察到月球的發光為月球表面的反射光，無法以光譜分析得知其成分。

(E) × (4) 發射光譜又稱明線光譜，吸收光譜又稱暗線光譜，故選(B)。

類題 2：右圖為根據波耳的原子能階概念所畫的氫原子

能階示意圖。當此原子躍遷回 $n = 1$ 狀態的過

程中，可能由 $n = 4$ 的狀態直接回到 $n = 1$ ；

也可能由 $n = 4$ 的狀態先躍遷到 $n = 3$ ，再由

$n = 3$ 回到 $n = 1$ ；或者由其他的路徑最終回到

$n = 1$ 的狀態。每一次躍遷都發出一個光子。

此原子可能發出幾種能量不同的光子？

答 6 種

(自 $n = 4$ 躍遷回 $n = 1$ 狀態的各種可能中：

(1) 跨越一階的光子有： $n = 4 \rightarrow 3$ 、 $n = 3 \rightarrow 2$ 、 $n = 2 \rightarrow 1$ ，共 3 種；

(2) 跨越兩階的光子有： $n = 4 \rightarrow 2$ 、 $n = 3 \rightarrow 1$ ，共 2 種；

(3) 跨越三階的光子有 $n = 4 \rightarrow 1$ ，共 1 種。故共有 6 種可能的光子。)

$n = 4$ ————— 5.5 eV

$n = 3$ ————— 4.5 eV

$n = 2$ ————— 3.0 eV

$n = 1$ ————— 0.0 eV

範例 3 氫原子光譜

下列有關「氫原子光譜」的敘述，何者錯誤？

- (A) 氫原子光譜最高能階在紫外光區
- (B) 氫原子光譜可見光區有光線
- (C) 氫原子光譜紅外光區亦有光線
- (D) 氫原子發射光譜中有 X 射線發射
- (E) 氫原子發生能量遷移而有特定頻率之發生

答 (D)

解 (D) ○ 氫原子光譜最短波長屬紫外線，沒有 X 射線。故選(D)。

類題 1：關於「氫原子」光譜，下列敘述何者錯誤？

- (A) 電子可在穩定狀態的特定能階之一存在而不輻射
- (B) 電子在穩定軌道上運動時，不會輻射出電磁波
- (C) 電子從一個大的軌道躍遷到另一個小的軌道時，一定會吸收能量
- (D) 原子因電子的躍遷而放出能量時，係以電磁波的形式放出
- (E) 電子在穩定軌道上運動時，具有一定的能階，是量子化的表現

答 (C)

(C) × 電子從一個大的軌道（外能階）躍遷到另一個小的軌道（內能階）時，會「釋放」能量。故選(C)。

類題 2：下列關於氫原子光譜與原子能階之說明，哪些正確？（應選 3 項）

- (A) 氫原子所發出之光譜線為不連續光譜
- (B) 各光譜線相當於氫原子所發出之某一特殊頻率
- (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

答 (A)(B)(C)

(D) × (1) 電子由內層躍遷到外層 \Rightarrow 原子吸收輻射能。

(E) × (2) 氫原子所發出之光譜線主要有三群，分別在「紫外光區」、「可見光區」、「紅外光區」。故選(A)(B)(C)。

6-4

課後練習



基礎題

概念 波耳氫原子模型

(解析見解答本)

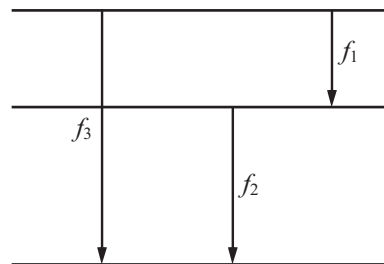
- (C) 1. 拉塞福的行星軌道模型與波耳的氫原子模型，其中最大的差異為何？
 (A) 電子的運動方式 (B) 原子核在原子中的位置 (C) 電子運行軌道的限制
 (D) 原子核的帶電量 (E) 電子的質量
- (C) 2. 當頻率為 ν 的單色光照射一團氫原子組成的氣體時，發現單色光被吸收了，則在氫原子的能階中必存在某兩個能階的能量差為下列何值？(h 為普朗克常數)
 (A) $\frac{1}{4} h\nu$ (B) $\frac{1}{2} h\nu$ (C) $h\nu$ (D) $2 h\nu$ (E) $3 h\nu$
- (C D) 3. 下列有關波耳與其氫原子模型的敘述，哪些正確？(應選 3 項)
 E (A) 波耳首先提出原子內部類似太陽系，而電子繞原子核運行
 (B) 波耳藉由 α 粒子散射實驗，首先確立原子核的存在
 (C) 波耳規定電子在原子中只存在於特定軌道上運行
 (D) 波耳認為藉由電子躍遷的方式，原子只能吸收或放出特定的能量
 (E) 仍無法完善解釋為何電子作加速運動不會放出電磁波
- (B C) 4. 一原子具有 0.0 eV、4.0 eV 與 9.0 eV 三個最低能階的定態，當該原子躍遷至激發態時，所吸收的光子能量各需多少 eV？(應選 3 項)
 D (A) 0.0 (B) 4.0 (C) 5.0 (D) 9.0 (E) 13.0

概念 原子光譜

- (E) 5. 原子光譜為不連續的線狀光譜，原因為下列何者？
 (A) 光為一粒粒的光子，而非連續波動 (B) 光經過雙狹縫的干涉而成線狀條紋
 (C) 眾多原子不會同時發光而分隔 (D) 是由不同原子同時發光而分隔
 (E) 原子僅具有特定的原子能階
- (A D) 6. 有關「原子光譜」的敘述，下列哪些正確？(應選 3 項)
 E (A) 三稜鏡可做為簡易的光譜儀 (B) 元素的焰色反應屬於連續光譜
 (C) 炭火發出的光屬於吸收光譜 (D) 氖氣霓虹燈的紅光屬於發射光譜
 (E) 藉由光譜結構的分析可鑑定材料的成分

概念 氫原子光譜

- (A) 7. 已知右圖為氫原子的部分原子能階圖， f_1 、 f_2 、 f_3 為發射光譜的頻率，則對應波長 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 三者之間的量值關係為下列何者？
- (A) $\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3$ (B) $\lambda_3 > \lambda_2 > \lambda_1$
 (C) $\lambda_2 > \lambda_3 > \lambda_1$ (D) $\lambda_1 > \lambda_3 > \lambda_2$
 (E) $\lambda_2 > \lambda_1 > \lambda_3$

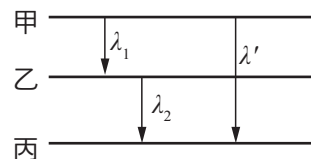


8. 依光譜學的分類，「氫原子光譜」是屬於連續或不連續光譜？

答 不連續光譜

進階題

1. 如右圖，氫原子中電子由甲能階躍遷到乙能階，輻射波長 λ_1 光子，由乙能階躍遷到丙能階輻射波長 λ_2 光子，則欲將電子由丙能階激發至甲能階，需吸收光子波長為何？



答 $\frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2}$

2. 氫原子各能階的能量如右圖所示（令 $n = \infty$ 時的能階 $E_\infty = 0$ ，eV 為電子伏特，是能量單位），試回答下列各問題：
- (1) 當氫原子電子由 $n = 1$ 躍遷到 $n = 2$ ，需若干電子伏特的能量？（請註明能量是為吸收或釋放）
- (2) 當氫原子電子由 $n = 4$ 躍遷到 $n = 3$ ，需若干電子伏特的能量？（請註明能量是為吸收或釋放）
- (3) 請問任兩能階的能量差是否符合量子化的關係？

n	E_n (eV)
∞	0.00
4	-0.85
3	-1.51
2	-3.40
1	-13.6

答 (1)吸收 10.2 eV；(2)釋放 0.66 eV；(3)詳見解析

- (C) 1. 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？



56% 答對率 (105 學測)

- (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

- (C) 2. 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？



58% 答對率 (107 學測)

- (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

- (D) 3. 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？



74% 答對率 (108 學測)

- (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

- (C D) 4. 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）



56% 全對率 (112 學測)

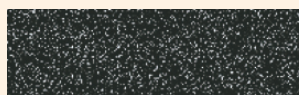
- (A)通過雙狹縫的光波，只有波峰會抵達干涉亮紋處
(B)通過雙狹縫的光波，只有波谷會抵達干涉暗紋處
(C)通過雙狹縫的光波，波峰與波谷同時抵達干涉暗紋處
(D)原子為粒子，但經過適當縫距的雙狹縫也會有干涉現象
(E)電子為粒子，故經過任何的雙狹縫一定不會有干涉現象



波粒二象性的探索

十九世紀物理學家證實了光是一種能量（Energy），以波動的方式自近而遠地傳播，而證明光之波動性的關鍵實驗，便是楊格的雙狹縫干涉實驗。

二十世紀初期愛因斯坦提出光（量）子論，成功解釋光電效應實驗，證實光波行進時具粒子（Particle）的行為。如今科學家們認定光是兼具波動與粒子的特性，稱為波粒二象性（Wave-Particle Duality）。



(a) 曝光 0.1 秒



(b) 曝光 1 秒



(c) 曝光 120 秒

解釋光的雙狹縫干涉實驗的關鍵就在於光子的數目。上圖(a)~(c)的實驗照片顯示，當光子的數目夠多時，整體光子表現出來的行為就會自原來雜亂的亮點逐漸累積變成干涉條紋，呈現出波動的特性。

光這種既是波動卻又表現出粒子特性的行為，早期科學家也曾陷入迷思中。以 X 光繞射研究固體晶體結構而獲得諾貝爾獎的布拉格爵士，曾以非常誠實但逗趣的方式在公開演講中無奈地承認：我們在每周的一、三、五採用光的波動理論，但是到了二、四、六就把它想成是一群高速翱翔的粒子。依據以上短文，試回答下列各問題：

- (C D) 1. 關於可見光與粒子的雙狹縫干涉，下列各項敘述哪些是正確的？（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。
- (C) 2. 西元 2024 年是物質波理論提出的 100 週年，下列有關物質波的敘述，何者正確？
- (A) 法國物理學家德布羅意提出物質波理論，並以實驗證實物質波的確存在
 - (B) 德國物理學家侖琴發現 X 射線的繞射圖案，證實物質波的存在
 - (C) 英國物理學家湯姆森發現電子的繞射圖案，證實物質波的存在
 - (D) 德國物理學家雷納以可見光照射金屬表面產生光電效應現象，證實物質波的存在
 - (E) 紐西蘭物理學家拉塞福以 α 粒子入射金箔產生散射現象，證實物質波的存在

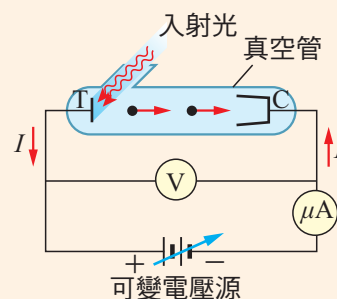
- (A D) 3. 光的雙狹縫干涉實驗可以利用「光子 (Photon)」來解釋。進行實驗時，下列各項操作哪些有助於觀察到光的粒子性質？（應選 2 項）
 (A)將曝光時間盡量減短 (B)使光的速度減慢 (C)觀察顆粒較大的光 (D)使光的強度減小 (E)觀察頻率較高的光
4. 電磁波譜中 γ 射線的波長甚短，約在 10^{-12} m。若某 γ 射線的波長為 1.24×10^{-12} m，試問其光子能量是多少焦耳？（普朗克常數 $h = 6.63 \times 10^{-34}$ J · s）

答： 1.60×10^{-13} J

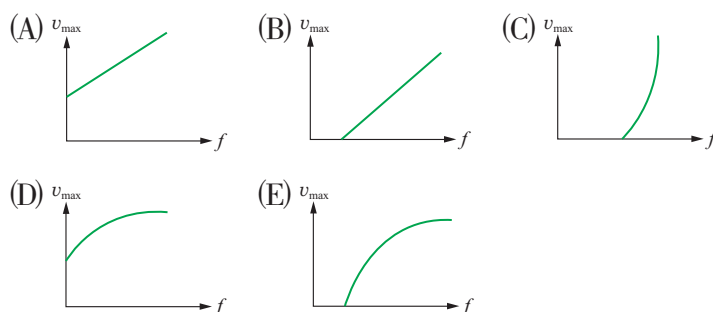
光電效應的探索

1902 年德國物理學家雷納 (Lenard) 研究光電效應，即利用光子去撞擊原子中的電子，被撞離的電子（光電子 Photoelectrons），會形成光電流（Photocurrent）。

他裝置一套實驗器材來探索光電效應，如右圖所示。以紫外光入射真空玻璃管內，並照射到連接電池負極的金屬板 T（稱為發射極）上，則電子被激發而逸出 T 外，並奔向連接電池正極的金屬板 C（稱為收集極）上。光電流可用微安培計讀出。透過連接兩電極 T 和 C 的可變電壓源，調整電壓量值，當反向電壓達到某一臨界值，光電流降為零，此時的反向電壓稱為截止電壓（cut-off voltage），以 V_s 表示。此時，具有最大動能的光電子亦無法到達 C 極，光電子所增加的電位能 U_e 恰等於光電子原本擁有的最大動能 K_{\max} ，即 $K_{\max} = \frac{1}{2} m v_{\max}^2 = U_e$ 。



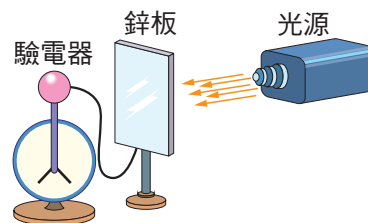
- (E) 5. 頻率為 f 的入射光可使金屬靶放出光電子，下面哪一個圖最適於表達光電子最大速率 v_{\max} 與頻率 f 之關係？



- (D) 6. 將電子從金屬鋁表面移出需要 4.2 eV 的能量。若以波長為 200 nm 的光照射鋁的表面，試問釋出的光電子其最大動能為何？

(A) $9.9 \times 10^{-19} \text{ J}$ (B) $6.4 \times 10^{-19} \text{ J}$ (C) $4.3 \times 10^{-19} \text{ J}$ (D) $3.2 \times 10^{-19} \text{ J}$ (E) 0 J

- (C) 7. 如右圖所示亦是一組「光電效應」實驗裝置，發現用一定頻率的 A 單色光照射光電材料—鋅板，發現鄰側的驗電器金屬箔片會張開，而用另一頻率的 B 單色光照射時金屬箔片則不張開，下列各項相關敘述何者正確？



- (A) A 光的波長、頻率、光速等均大於 B 光
 (B) 同時採用兩組 B 光照射鋅板，金屬箔片就可以張開
 (C) 驗電器的金屬箔片張開是因為鋅板帶正電
 (D) 帶負電的光電子經導線由鋅板移至驗電器的金屬箔片
 (E) 帶正電的光電子經導線由鋅板移至驗電器的金屬箔片

8. 以波長 5000 埃 之單色光垂直照射在一光電管之金屬板上，光之強度為 $100 \text{ 焦耳/米}^2 \cdot \text{秒}$ ，假定每個光子打出一個光電子，而金屬板受光照射面積為 $2.5 \times 10^{-3} \text{ 米}^2$ ，試問光電流約為何？

答： 0.1 A