

原子結構與原子核

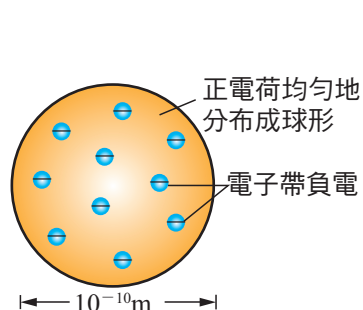
3-1

拉塞福的原子模型

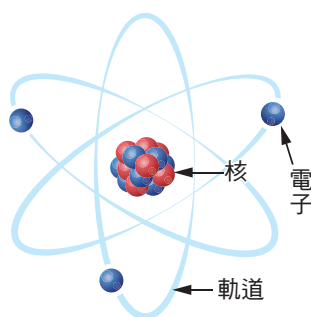
學習概念 1 原子模型 (配合課本 p.95)

1. 湯姆森的原子模型：葡萄乾－布丁模型

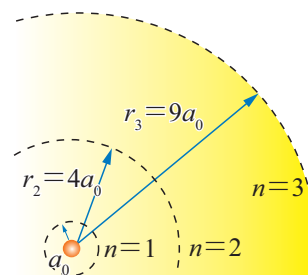
設想原子內的正電荷均勻分布成球狀，球的直徑數量級約為 10^{-10} m，而帶負電的微小電子均勻散布在正電荷中，就像葡萄乾均勻分布在布丁中，如下圖(a)所示。



(a)湯姆森的葡萄乾－布丁原子模型



(b)拉塞福的行星式原子模型



(c)波耳的氫原子模型

▲原子模型

2. 拉塞福的原子模型：

原子的中心存在有帶正電的原子核，原子的質量幾乎都集中在原子核上。電子在原子核的外圍環繞，類似太陽系的行星運動，如上圖(b)所示。

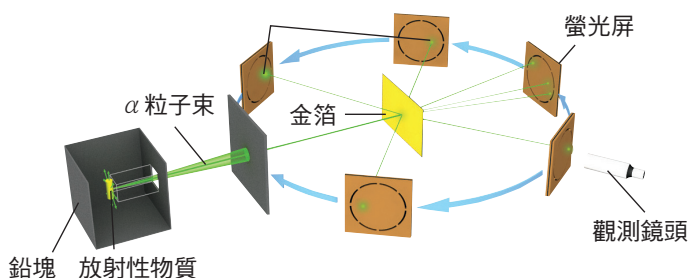
3. 波耳的氫原子模型：

修改拉塞福的原子模型，規範了電子的運行軌道，成功地解釋了氫原子光譜，如上圖(c)所示。

學習概念 2 拉塞福 α 射線散射實驗 (配合課本 p.95)

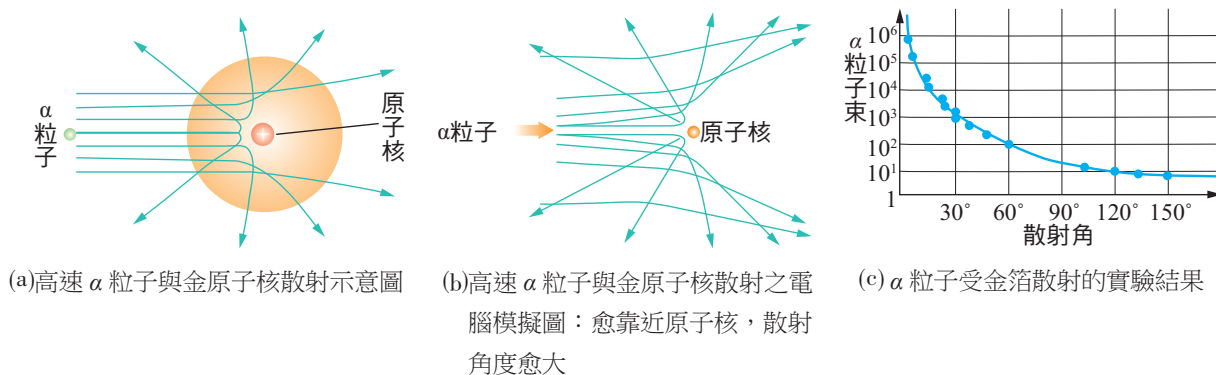
1. 實驗設計：

如右圖所示，以天然放射性元素鐳 (Ra) 所放出的 α 粒子，撞擊薄金箔 (約厚 10^{-6} 米)，以硫化鋅 (ZnS) 的螢光片接收散射後的 α 粒子，藉著高倍顯微鏡觀察散射角度和散射粒子數目的關係。



▲拉塞福的 α 粒子散射實驗

2. 實驗結果及推論：如下各圖所示



▲ α 粒子受金箔散射的實驗結果

- (1) 絕大部分 α 粒子筆直通過，運動方向無顯著改變。

【推論】原子內部之大部分空間必空無一物。

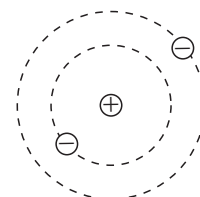
- (2) 極少數的 α 粒子偏向角很大，約 8000 個入射 α 粒子會有一個 α 粒子的散射角大於 90° ，甚至會有反方向彈回來的。

【推論】原子內部某處必有能與 α 粒子發生強烈作用之東西。

學習概念 3 拉塞福的（行星式）原子模型（配合課本 p.97）

基於 α 粒子散射實驗的結果，拉塞福於 1911 年提出有核的原子模型：

1. 原子是縮小的太陽系，以原子核為焦點，電子受核之庫侖靜電力作用繞核作橢圓軌道運動。
2. 原子為電中性，故原子核帶正電，其電荷數與電子數相等（此數目為原子序）。
3. 原子核為質量集中之點，且其體積很小，故原子核與外面電子間之空間，除了一些電子外空無一物，整個原子的大小約為 10^{-10} 公尺。
4. 原子核與軌道電子間形成一庫侖電場，故電子跑不出原子外。

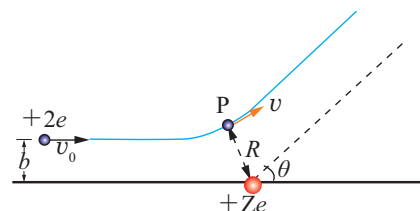


▲拉塞福視原子為帶正電的核被荷負電的電子所環繞

學習概念 4 α 粒子散射的基本理論

1. α 粒子掠過原子核時，僅受庫侖平方反比斥力之作用。
2. 散射前後系統角動量守恆。
由 $L = rmv \sin\theta$ $\xrightarrow{\vec{b} \perp \vec{v}, \theta = 90^\circ}$ $bm v_0 = Rm v$
3. 散射前後系統保持力學能守恆。

$$\text{由 } \frac{1}{2} m v_0^2 + 0 = \frac{1}{2} m \left(\frac{b}{R} v_0 \right)^2 + \frac{k (Ze) (2e)}{R}$$



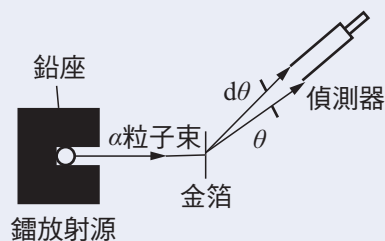
▲拉塞福散射的基本理論

範例 1

 α 粒子散射的基本理論

在拉塞福的 α 粒子散射實驗中，下列敘述哪些為正確的？

- (A) α 粒子的力學能恆為正
 (B) α 粒子的角動量守恆
 (C) α 粒子的散射角恆小於 90°
 (D) α 粒子的入射方向與力心的垂直距離越大，散射角越大
 (E) 由此一實驗之結果，證實了原子核的存在



答 (A)(B)(E)

解 (A) ○ (1) 粒子只受庫侖力作用，使 α 粒子動能與電位能的和為一正值。

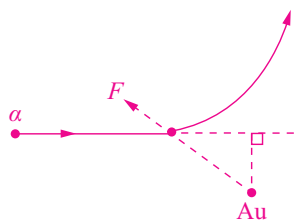
(B) ○ (2) 粒子所受的庫侖力 F_c 方向與 α 粒子、金原子核連線的方向平行，故 α 粒子所受的力矩為零，則 α 粒子的角動量守恆。

(C) × (3) α 粒子散射方向與入射方向的夾角稱為散射角，從 0° 至 180° 都有可能。

(D) × (4) α 粒子入射方向與力心的垂直距離越大，表示 α 粒子受到金原子核的影響愈小，所以散射角應愈小。

(E) ○ (5) 約每 8000 個 α 粒子才會有一個偏折、且偏折角度可大於 90° ，表示所有質量集中在一個很小的區域內。

故選(A)(B)(E)。



類題 以 α 粒子射入金箔，使 α 粒子產生散射的主要作用力為何？

- (A) α 粒子與原子核間的庫侖力
 (B) α 粒子與電子間的庫侖力
 (C) α 粒子與原子核間的萬有引力
 (D) α 粒子與原子核間的庫侖力以及 α 粒子與電子間的庫侖力，兩者都重要
 (E) α 粒子與原子核間的萬有引力及庫侖力，兩者都重要

答 (A)

(A) ○ α 粒子與原子核間的「庫侖力」是導致 α 粒子產生散射的主要作用力。故選(A)。

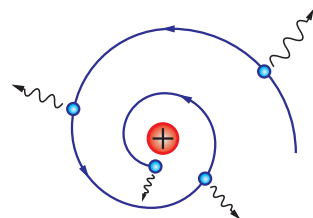
學習概念 5 拉塞福原子模型所遭遇的困難 (配合課本 p.97)

1. 無法解釋原子的穩定性：

依馬克士威的電磁理論，一個作加速運動的電荷，必會放射出電磁波，即不斷的輻射能量，故電子將作螺旋式的運動而墜落原子核上，無法構成穩定的原子，但事實上並沒有發生。

2. 無法解釋原子的光譜線：

電子繞原子核運轉，原子應放出連續光譜，事實上原子光譜為明線光譜。



▲拉塞福原子模型的缺點

範例 2 拉塞福原子模型所遭遇的困難

有關拉塞福原子模型所遭遇的困擾，下列各項敘述何者錯誤？

- (A) 以高能量之 α 粒子射擊原子，由實驗顯示，所得資料與理論推導不相符
- (B) 以低能量之 α 粒子射擊原子，實驗結果與理論不符合
- (C) 電子之迴轉運動為加速者，按電磁理論，應輻射能量，軌道半徑應減小，最後將跌入原子核上，與事實不符
- (D) 依電磁理論，原子發光應成連續光譜，此與事實不符
- (E) 矛盾之形成是應用牛頓力學所致

答 (B)

解 (B) × 拉塞福實驗所得極接近目前所接受的原子模型觀念，但有些理論尚有補充的地方。故選(B)。

類題 下列何者不是拉塞福原子模型所遭遇的困難？

- (A) 加速運動的電荷會輻射出電磁波，放出能量
- (B) 電子作圓周運動須不斷地輻射出能量並作螺旋運動，最後墜落於原子核
- (C) 無法解釋為何原子光譜為連續光譜
- (D) 拉塞福的行星軌道原子模型並非穩定的原子模型
- (E) 整個原子的質量幾乎集中於原子核

答 (C)

((C) × 原子光譜為不連續光譜。故選(C)。)

3-1

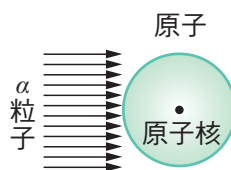
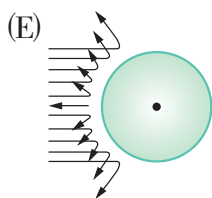
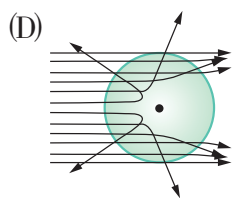
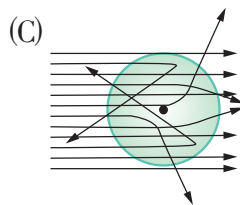
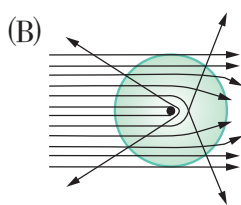
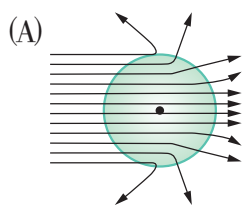
課後練習

單選題

(解析見解答本)

- (A) 1. 以 α 粒子入射金箔，使 α 粒子產生散射的主要作用力為何？
 (A) α 粒子與原子核間的庫侖力
 (B) α 粒子與電子間的庫侖力
 (C) α 粒子與原子核間的萬有引力
 (D) α 粒子與原子核間的庫侖力以及 α 粒子與電子間的庫侖力
 (E) α 粒子與原子核間的萬有引力以及庫侖力
- (E) 2. 下列有關拉塞福 α 粒子散射實驗的敘述何者錯誤？
 (A) α 粒子射擊極薄之金箔後，以不同的角度 θ 散射，打在硫化鋅螢光片上，每一個 α 粒子產生一次閃光
 (B) 有些 α 粒子的散射角度 θ 很大，甚至於有 $\theta > 90^\circ$ 的情況
 (C) 經分析後發現，能產生此散射現象之合理解釋是：原子之質量幾乎全部集中於半徑小於 10^{-14} 公尺的體積內，且帶正電
 (D) 原子內大部分空間是很空洞的
 (E) 此實驗的結果證實， α 粒子與電子之間的作用，不服從庫侖定律
- (E) 3. 在 α 粒子和原子核的散射實驗中，最靠近原子核的 α 粒子其散射方向為何？
 (A) 30° (B) 90° (C) 120° (D) 150° (E) 180°
- (C) 4. 拉塞福的 α 粒子散射實驗裡，粒子有大角度的散射原因為何？
 (A) α 粒子與原子作彈性碰撞
 (B) α 粒子與價電子有庫侖靜電力的交互作用
 (C) α 粒子與原子核有庫侖靜電力的交互作用
 (D) α 粒子的物質波發生繞射
 (E) α 粒子與原子間具有強大的萬有引力作用
- (C) 5. 使用金靶做兩種散射實驗：其一用質子束衝擊，另一則用氦核束（質量數 2，原子序 1）。設此兩種粒子束的速率相同，則氦核、質子可接近於金核的最短距離比為何？
 (A) 2 : 1 (B) 4 : 1 (C) 1 : 2 (D) 1 : 4 (E) 1 : 8

- (D) 6. 如右圖所示，為一群 α 粒子射向金原子，則 α 粒子被散射後的軌跡，下列哪一圖是正確的？



- (B) 7. 下列有關「原子構造」的各項實驗及發現何者不正確？

- (A) 陰極射線實驗：發現電子的荷質比，且電子的荷質比與電極材料、管內氣體種類無關，推定電子是原子的基本粒子
 (B) 原子模型：原子大小約為 10^{-15} 公尺
 (C) 油滴實驗：測得電子的電量
 (D) α 粒子散射實驗：發現原子中有一體積很小、質量集中，帶正電的原子核
 (E) α 粒子散射實驗：僅有極少數的 α 粒子會發生大角度散射

- (D) 8. 設靜電力常數為 k ，動能 K ，帶電量 $2e$ 的 α 粒子與氣體狀態的氦作正面碰撞時， α 粒子能接近氦原子核的最近距離為何？

- (A) $\frac{ke^2}{K}$ (B) $\frac{2ke^2}{K}$ (C) $\frac{4ke^2}{K}$ (D) $\frac{8ke^2}{K}$ (E) $\frac{16ke^2}{K}$

多選題

- (D E) 1. 拉塞福以 α 粒子對原子做散射實驗後，所得的結論為下列哪些？

- (A) 原子中正負電荷相等，故原子呈中性
 (B) 全部正電荷及幾乎全部的質量，集中在數量級為 10^{-10} 米為半徑的區域內（稱為原子核）
 (C) 原子就像縮小的太陽系，電子與原子核之間以距離平方反比的萬有引力相吸，使電子在軌道上運行
 (D) α 粒子與原子核之間的作用力是庫倫斥力
 (E) 散射角大於 60° 者佔很小比例

(C D) 2. 對於拉塞福原子模型所遭遇之困難，下列各項所述何者正確？

E

- (A) 拉塞福原子模型與庫侖定律相違背
- (B) 散射角極小的 α 粒子數目與散射規律不符
- (C) 拉塞福原子模型與電磁輻射原理相違背
- (D) 原子光譜為明線光譜與拉塞福原子模型所預期者不符
- (E) 依馬克士威電磁理論，拉塞福原子模型電子應落在原子核上

(A C) 3. α 粒子以動能 K 射擊靜止氦原子，如為正向彈性碰撞時，則下列各項哪些正確？

E

- (A) 兩者距離最近時貯存在電力場中的位能為 $\frac{K}{2}$
- (B) 兩者的最近距離為 $\frac{kq^2}{K}$ (q 為 α 粒子的帶電量)
- (C) 碰撞完成後的動能和為 K
- (D) 碰撞完成後 α 粒子的剩餘動能為 K
- (E) 碰撞完成後氦原子的動能為 K

混合題

「 α 粒子散射實驗」的探索

α 粒子的速率為 1.00×10^7 m/s，被一靜止之金原子核散射後，其散射角為 60° ，若金原子核被撞後獲得動能極少，則 α 粒子碰撞前後之速率大略相同。

(C) 1. 已知金原子核質量為 α 粒子的 49 倍， $Au=179$ ，試問金核所得速度量值為多少 m/s？(單選)

- (A) 10^5 (B) 10^6 (C) 2×10^5 (D) 3×10^6 (E) 4×10^5

(A) 2. 承 1.，金原子核與 α 粒子動能比為何？(單選)

- (A) 1 : 49 (B) 49 : 1 (C) 1 : 98 (D) 98 : 1 (E) 1 : 179

3. 假定 α 粒子以一定的速度前後兩次入射金原子核，第一次的入射方向恰正對金原子核，測得兩者之間的最接近距離為 r ；第二次的入射方向則偏離金原子核，當兩者最接近時 α 粒子的動能為初動能的 $\frac{15}{16}$ ，試問此時兩者之間相距多遠？

答：16r

3-2

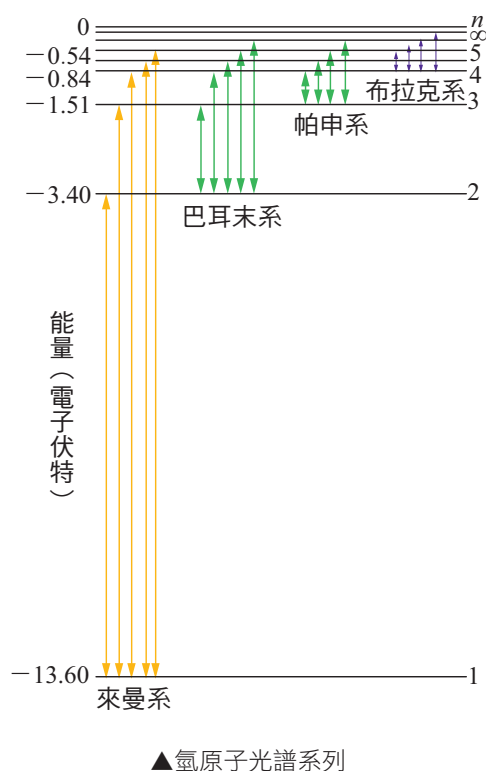
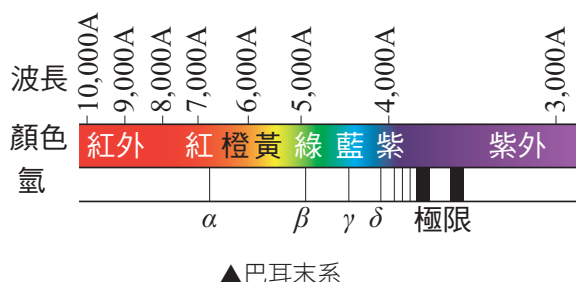
氫原子光譜與波耳的氫原子模型



學習概念 1 氫原子光譜 (配合課本 p.102)

1. 氫原子光譜的發現與整理：

- (1) 早期研究氫原子光譜的科學家們，統整發現如右圖所示之光譜系列。
- (2) 光譜學家巴耳末測定，在氫氣所產生的巴耳末系 (Balmer series)，如下圖所示。



- (3) 從各能階躍遷回到基態所需的能量為：

$$E_n = 13.6 - \frac{13.6}{n^2} \text{ eV}$$

- ① 式中 13.6eV 為軌道上電子之游離能。

- ② 當 $\begin{cases} n=1, E_1=0, \text{基態能量為 } 0 \\ n=2, E_2=10.2\text{eV}, \text{第一受激態能量為 } 10.2\text{eV}. \\ \vdots \end{cases}$

- ③ 若改以游離態能量為零， $E_\infty=0$ ，則

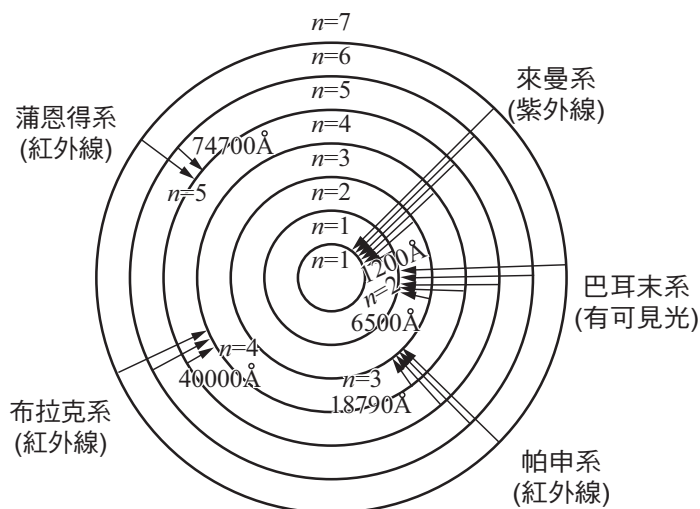
$$E_n = -\frac{13.6}{n^2} \text{ (eV)} \xrightarrow{\text{能階能量，背起來！}} \begin{cases} n=1 \xrightarrow{\text{基態}} E_1 = -13.6\text{eV} \\ n=2 \xrightarrow{\text{第一受激態}} E_2 = -3.4\text{eV} \\ n=3 \xrightarrow{\text{第二受激態}} E_3 = -1.5\text{eV} \\ n=4 \xrightarrow{\text{第三受激態}} E_4 = -0.85\text{eV} \\ n=5 \xrightarrow{\text{第四受激態}} E_5 = -0.54\text{eV} \\ \vdots \\ n=\infty \xrightarrow{\text{游離態}} E_\infty = 0 \end{cases}$$

在一個原子不同能階中，以基態之能態最為穩定。若其內能高於基態則呈不穩定，稱受激態，受激態下的電子會將其多出基態的能量以光能形式放出，而一次或逐次回到基態，即所謂釋放電磁波。

學習概念

2 氫原子光譜系列

氫原子光譜的實驗與光譜學的研究，強烈地支持波耳的氫原子理論。



▲氫原子躍遷時光譜系列

1. 來曼系 (Lyman Series)：1914 年發現

電子由高能階躍遷回到基態 ($n=1$) 所發出之光子，以 L 代表，且 $E_\infty=0$ 。

$$(1) \text{ 能量: } \boxed{\Delta E = E_i - E_f} \begin{cases} n = \infty \rightarrow n = 1 \xrightarrow{\text{釋出能量最大的電磁波}} (\Delta E)_{\max} = E_\infty - E_1 = 13.6\text{eV} \\ \vdots \\ n = 2 \rightarrow n = 1 \xrightarrow{\text{釋出能量最小的電磁波}} (\Delta E)_{\min} = E_2 - E_1 = 10.2\text{eV} \end{cases} .$$

$$(2) \text{ 波長: } \boxed{\lambda = \frac{12400}{\Delta E} \text{Å}} \begin{cases} \lambda_{\max} = \frac{12400}{(\Delta E)_{\min}} = \frac{12400}{10.2} = 1216 \text{Å} \\ \vdots \\ \lambda_{\min} = \frac{12400}{(\Delta E)_{\max}} = \frac{12400}{13.6} = 912 \text{Å} \end{cases}$$

\therefore 來曼系波長的範圍： $912 \text{Å} \leq \lambda \leq 1216 \text{Å}$ ，介於「紫外線」區內。

2. 巴耳末系 (Balmer Series)：1885 年發現

電子由高能階躍遷回到第一受激態 ($n=2$) 時所發出之光子，以 H 代表。

$$(1) \text{ 能量: } \boxed{\Delta E = E_i - E_f} \begin{cases} n = \infty \rightarrow n = 2 \xrightarrow{\text{釋出能量最大的電磁波}} (\Delta E)_{\max} = E_\infty - E_2 = 3.4\text{eV} \\ \vdots \\ n = 3 \rightarrow n = 2 \xrightarrow{\text{釋出能量最小的電磁波}} (\Delta E)_{\min} = E_3 - E_2 = 1.9\text{eV} \end{cases} .$$

$$(2) \text{ 波長: } \lambda = \frac{12400}{\Delta E} \text{ \AA} \quad \left\{ \begin{array}{l} \lambda_{\max} = \frac{12400}{(\Delta E)_{\min}} = \frac{12400}{1.9} = 6526 \text{ \AA} \\ \vdots \\ \lambda_{\min} = \frac{12400}{(\Delta E)_{\max}} = \frac{12400}{3.4} = 3647 \text{ \AA} \end{array} \right.$$

\therefore 巴耳末系波長的範圍： $3647 \text{ \AA} \leq \lambda \leq 6526 \text{ \AA}$ ，介於紫外線及可見光之間

3. 帕申系 (Paschen Series)：1908 年發現

電子由高能階躍遷回到第二受激態 ($n=3$) 所發出之光子，此系為紅外線區。

4. 布拉克系 (Brackett Series)：1922 年發現

電子由高能階躍遷回到第三受激態 ($n=4$) 所發出之光子，此系為紅外線區。

5. 蒲恩德系 (Pfund Series)：1924 年發現

電子由高能階躍遷回到第四受激態 ($n=5$) 所發出之光子，此系為紅外線區。

3

學習概念

3 激發原子的方法—原子由低能階吸收能量激發到高能階

1. 以光子激發：

- (1) 光子能量達不到第一受激態，能量不被吸收。
- (2) 光子能量雖超過某受激態，但不恰為另一受激態能量，亦不被吸收。
- (3) 光子若把原子的電子游離，即為光電效應，產生光電子。
- (4) 不管哪一種形式的激發，被游離的電子，能量可以連續。

2. 以電子激發：

- (1) 電子動能達不到原子之第一受激態，就沒辦法激發。
- (2) 若能超過某一受激態，則剩下的動能仍被原入射電子帶走。
- (3) 若把原子之最外層電子游離，則剩下的能量被入射電子帶走。
- (4) 電子可能不損失能量，作彈性散射。

3. 加熱激發：

因溫度升高使原子間的碰撞變激烈，可能使原子因碰撞而激發。

學習概念

4 波耳的氫原子模型 (配合課本 p.99)

1. 西元 1913 年，丹麥物理學家波耳，綜合了 $\left\{ \begin{array}{l} \text{拉塞福的〈有核原子〉理論} \\ \text{巴耳末的〈氫光譜〉規律} \\ \text{普朗克的〈量子論〉理論} \end{array} \right.$ ，

大膽的作了兩個基本假設，提出穩定態的氫原子模型：

(1) 第一基本假設（穩定態假定）：

電子以圓形軌道繞著原子核運轉時，其角動量 L 、軌道半徑 r 、質量 m 、速率 v ，若滿足下述條件時，這些圓形軌道是穩定的，即不會輻射電磁波，不會崩潰。

$$L = rmv = n \cdot \left(\frac{h}{2\pi} \right) \quad (n=1, 2, 3, \dots, \text{正整數 } n \text{ 稱為量子數})$$

(2) 第二基本假設（頻率假定）：

原子從某一穩定態 i 躍遷至另一穩定態 j ，原子會吸收或放出電磁輻射。

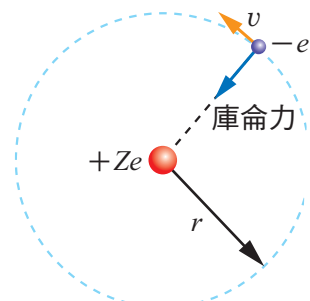
若 E_i 與 E_j 為狀態 i 及 j 時原子的能量，則原子吸收或放出電磁輻射的頻率 ν 為

$$\nu = \frac{\Delta E}{h} = \frac{|E_i - E_j|}{h} \quad (h \text{ 為普朗克常數})$$

2. 穩定態的物理量量子化：

如右圖所示，考慮單電子的原子模型，一個電子在以原子核為中心的圓形軌道上運動，原子核的質量遠大於電子，可視為固定不動，電子作圓周運動時所需的向心力，由電子和原子核之間的庫倫力所提供，

$$\text{即 } \frac{k \cdot Ze \cdot e}{r^2} = m \cdot \frac{v^2}{r} \Leftrightarrow mv^2 = \frac{kZe^2}{r} \dots\dots\dots ①$$



▲波耳的氫原子模型

(1) 角動量量子化：

$$\text{由穩定態的假定 } L = mrv = n \cdot \left(\frac{h}{2\pi} \right) \quad L \propto n \xrightarrow{\text{移項}} mv = \frac{nh}{2\pi r} \dots ②$$

(2) 速率量子化：

$$\text{由 } \frac{①}{②} \text{ 消去 } r, \text{ 得 } v = \frac{2\pi kZe^2}{nh} \quad v_n \propto \frac{1}{n}$$

(3) 軌道半徑量子化：

$$\text{由 } \frac{①}{②^2}, \text{ 消去 } v, \text{ 得 } r = \frac{n^2 h^2}{4\pi^2 m k Z e^2} \quad r_n \propto n^2$$

(4) 能量量子化：

$$\text{由 } E = K + U_e \quad E = \frac{kZe^2}{2r} + \left(-\frac{kZe^2}{r} \right) = -\frac{kZe^2}{2r} \quad (\text{令無窮遠處為零位面 } E_\infty = 0)$$

$$\text{將 } r \xrightarrow{\text{代入}} r_n, \text{ 得 } E_n = -\frac{2\pi^2 m k^2 Z^2 e^4}{n^2 h^2} \xrightarrow{\text{代入各相關數值}} E_n = -\frac{13.6}{n^2} \times Z^2 \text{ (eV)} \quad E_n \propto -\frac{1}{n^2}$$

$$\text{且 } \begin{cases} \text{動能: } K_n = -E_n = \frac{13.6}{n^2} \times Z^2 \text{ (eV)} \Rightarrow K_n \propto \frac{1}{n^2} \\ \text{電位能: } (U_e)_n = 2E_n = -\frac{27.2}{n^2} \times Z^2 \text{ (eV)} \Rightarrow (U_e)_n \propto -\frac{1}{n^2} \end{cases}$$

① 能量量子化的能量狀態呈現階梯跳躍的形式，稱為能階。

$$\text{② } \begin{cases} n=1 \xrightarrow{\text{能階}} E_1, \text{ 稱為基態} \\ n>1 \xrightarrow{\text{能階}} E_2, E_3, \dots, \text{ 稱為受激態 (分別稱為第一, 第二, } \dots \text{ 受激態)} \\ n=\infty \xrightarrow{\text{能階}} E_\infty, \text{ 稱為游離態} \end{cases}$$

$$\textcircled{3} \text{ 當 } n \gg 1 \text{ 時, } \Delta E = E_{n+1} - E_n \approx \frac{4\pi^2 m k^2 e^4}{n^3 h^2}$$

$$\Delta E \propto \frac{1}{n^3} \text{ (能階的間隔愈來愈小)}$$

3. 類氫原子之能量量子化條件：

單電子原子，如 He^+ ， Li^{2+} ， Be^{3+} ……等之量子化條件，只需將氫原子 ($Z=1$) 量子化條件中之 Z 代以該原子之原子序即可。故類氫原子之能階為

$$E_n = -\frac{13.6}{n^2} \times Z^2 \text{ (eV)}, n \in \mathbb{N} \xrightarrow{\text{He}^+ (Z=2)} E_n = -\frac{54.4}{n^2} \text{ (eV)}$$

4. 波耳原子模型不足之處：

- (1) 無法對「量子化」概念提出解釋。
- (2) 無法解釋光譜強度。
- (3) 只能解釋氫原子或單電子原子 (He^+ ， Li^{2+} ……) 之光譜，對於多電子之光譜則無完滿的解釋。
- (4) 海森堡 (Werner Heisenberg) 在 1927 年提出的測不準原理，證實電子在原子核周圍繞固定軌道運行之行星模型並不正確，應改以電子雲式 (即電子在空間出現完全是機率問題) 來描述較合理。

範例

1

氫原子光譜系列

有關「氫原子光譜」的敘述，下列各項何者錯誤？

- (A) 氫原子光譜中來曼系的光譜線位於紫外光區 (B) 氫原子光譜可見光區有光線發現
(C) 氫原子光譜紅外光區亦有光線發現 (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 $\lambda_{\min} = \frac{12400}{13.6} = 912 \text{ \AA}$ ，屬於紫外線，沒有 X 射線。故選(D)。

類題

關於「氫原子光譜」的敘述，下列各項哪些正確？

- (A) 氫原子光譜是明線光譜 (B) 氫原子光譜各光譜線的強度都相同
(C) 當溫度升高時，光譜的頻率不變 (D) 氫原子光譜為連續光譜
(E) 氫原子光譜有干涉的現象
- (A) ○ 氫原子光譜是明線光譜，為不連續光譜。
(D) × 各光譜線的強度不一定都相同。
(B) × 溫度升高氫原子光譜的頻率不變，但強度增強。
(C) ○ 氫原子光譜是色散現象，與干涉無關。
(E) × 故選(A)(C)。

答 (A)(C)

3

教師用書

貼心伴隨·敬請賜教

範例 2 氫原子光譜系列

氫原子的軌道電子從 A 能階躍遷到 B 能階時，輻射出波長 λ_1 的光子；從 B 能階躍遷到 C 能階時，輻射出波長 λ_2 的光子，則當電子從 A 能階躍遷到 C 能階時，可以輻射的光子波長 λ_3 為何？

- (A) $\lambda_1 + \lambda_2$ (B) $\lambda_1 \lambda_2$ (C) $\lambda_1 - \lambda_2$ (D) $\frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2}$ (E) $\frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2}$

答 (E)

解 (E) ○ 依波耳氫原子穩定態理論： $\nu = \frac{\Delta E}{h} = \frac{E_i - E_j}{h} (n: i \rightarrow j)$ 或 $\Delta E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$

$$e: n_A \rightarrow n_B \Rightarrow E_A - E_B = \frac{hc}{\lambda_1} \dots\dots\dots ①$$

$$n_B \rightarrow n_C \Rightarrow E_B - E_C = \frac{hc}{\lambda_2} \dots\dots\dots ②$$

$$n_A \rightarrow n_C \Rightarrow E_A - E_C = \frac{hc}{\lambda_3} \dots\dots\dots ③$$

$$\text{由①+②, 得 } E_A - E_C = hc \left(\frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} \right) = hc \left(\frac{\lambda_1 + \lambda_2}{\lambda_1 \lambda_2} \right) \dots\dots\dots ④$$

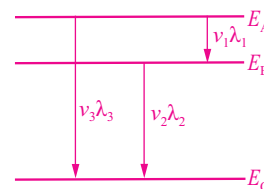
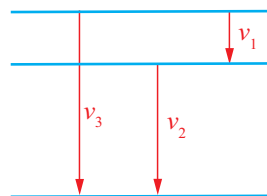
$$\text{又③=④, 得 } \frac{1}{\lambda_3} = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{\lambda_1 \lambda_2} \Rightarrow \lambda_3 = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} \text{。故選(E)。}$$

類題 已知右圖為氫原子的部分原子能階圖， ν 為頻率，則對應波長 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 三者之間的數學關係為下列何者？

- (A) $\lambda_1 + \lambda_2 = \lambda_3$ (B) $\lambda_1 \lambda_2 = \lambda_2 \lambda_3 + \lambda_1 \lambda_3$ (C) $\lambda_2 \lambda_3 = \lambda_1 \lambda_2 + \lambda_1 \lambda_3$
(D) $\lambda_1 \lambda_3 = \lambda_1 \lambda_2 + \lambda_2 \lambda_3$ (E) $\lambda_1 = \lambda_2 \lambda_3$

答 (B)

$$\begin{aligned} \text{(B) } \bigcirc \text{ 依 } \Delta E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \text{ 右圖 } \left\{ \begin{array}{l} E_A - E_B = h\nu_1 = \frac{hc}{\lambda_1} \dots\dots\dots ① \\ E_B - E_C = h\nu_2 = \frac{hc}{\lambda_2} \dots\dots\dots ② \\ E_A - E_C = h\nu_3 = \frac{hc}{\lambda_3} \dots\dots\dots ③ \end{array} \right. \\ \text{由①+②=③, 得 } \frac{hc}{\lambda_1} + \frac{hc}{\lambda_2} = \frac{hc}{\lambda_3} \Rightarrow \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} = \frac{1}{\lambda_3} \dots\dots\dots ④ \\ \therefore ④ \times \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \Rightarrow \lambda_2 \lambda_3 + \lambda_1 \lambda_3 = \lambda_1 \lambda_2 \text{。故選(B)。} \end{aligned}$$



範例 3 激發原子的方法

使用動能為 12.9 電子伏特的電子激發氫原子，下列各項敘述哪些正確？

- (A) 激發後，電子仍可保持的能量為 0.2，0.8，2.7 電子伏特等三種
 (B) 氫原子可被激發至第四受激態
 (C) 被激發的氫原子可輻射出六種不同能量的光子
 (D) 若以 12.9 電子伏特的光子代替電子，則氫原子無法被激發
 (E) 若以 12.1 電子伏特的光子激發氫原子，則可激發至第一、第二的兩個受激態

答 (C)(D)

解 (A) × 如右圖，激發後電子仍可保有的能量為

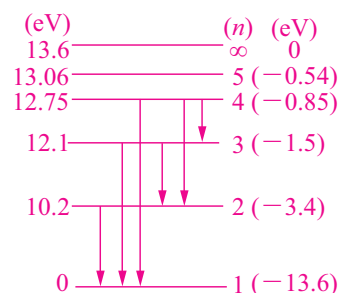
$$(12.9 - 10.2), (12.9 - 12.1), \\ (12.9 - 12.75) \text{ 及 } 12.9 \text{ 電子伏特四種。}$$

(B) × 氫原子可被激發至第一、第二、第三受激態。

(C) ○ 被激發的氫原子輻射出 E_{21} ， E_{31} ， E_{41} ， E_{32} ， E_{42} 及 E_{43} 六種不同能量的光子。

(D) ○ 當能量小於游離能的光子入射時，惟有合於某一受激態的能量時才能激發。

(E) × 若以 12.1 電子伏特的光子激發氫原子時，僅能激發至第二受激態。
 故選(C)(D)。



類題 以動能 12.5eV 的電子束射入處於基態的氫原子中。氫原子可能發射出的光的能量為何？

- (A) 4.9eV (B) 10.2eV (C) 12.1eV (D) 15.1eV (E) 1.9eV

答 (B)(C)(E)

$$\begin{aligned} & \begin{matrix} \text{(B)} \bigcirc \\ \text{(C)} \bigcirc \\ \text{(E)} \bigcirc \end{matrix} \text{ 由 } E_n = -\frac{13.6}{n^2} \text{ (eV)} \xrightarrow{\text{能階}} \begin{cases} n=1 \xrightarrow{\text{基態}} E_1 = -13.6\text{eV} \\ n=2 \xrightarrow{\text{第一受激態}} E_2 = -3.4\text{eV} \\ n=3 \xrightarrow{\text{第二受激態}} E_3 = -1.5\text{eV} \\ n=4 \xrightarrow{\text{第三受激態}} E_4 = -0.85\text{eV} \\ n=5 \xrightarrow{\text{第四受激態}} E_5 = -0.54\text{eV} \end{cases} \\ & \begin{cases} E_{1 \rightarrow 2} = 10.2\text{eV} \\ E_{2 \rightarrow 3} = 1.9\text{eV} \\ E_{3 \rightarrow 4} = 0.65\text{eV} \\ \vdots \end{cases} \therefore E_{\text{電子}} = 12.5\text{eV} > (10.2 + 1.9)\text{eV} \\ & \text{(1) 電子被激發所需的能量為} \\ & \text{(2) 電子躍遷發射出的光的能量可能有：10.2eV、1.9eV、(10.2 + 1.9 = 12.1)eV。故選(B)(C)(E)。} \end{aligned}$$

範例 4 波耳的氫原子模型

氫原子的電子繞原子核做圓周運動，經過由 $n=1$ 到 $n=3$ 的軌道躍遷之後，下列敘述哪些正確？

- (A)電子的電位能增加 (B)電子的動能增加
(C)電子的總能量增加 (D)電子的角動量增加為原來的 9 倍
(E)電子繞原子核運動的週期增長為原來的 27 倍

答 (A)(C)(E)

解 依波耳穩定態的理論：

$$\begin{cases} L = rmv = \frac{nh}{2\pi} \\ F_e = \frac{kZe \cdot e}{r^2} = \frac{mv^2}{r}, \quad \frac{kZe^2}{r} = mv^2 \end{cases} \xrightarrow{\text{聯立}} \begin{cases} r_n = \frac{n^2 h^2}{4\pi^2 m k Z e^2} \\ v_n = \frac{2\pi k Z e^2}{nh} \end{cases}$$

(A) ○ (2)電位能： $U_e(r) = -\frac{27.2}{n^2} \cdot Z^2$ $U_e(r) \propto -\frac{1}{n^2} \begin{cases} n \uparrow \\ U_e(r) \uparrow \end{cases}$

(B) × (1)動能： $K(r) = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{2\pi^2 m k^2 Z^2 e^4}{n^2 h^2} = \frac{13.6}{n^2} \times Z^2$ $K(r) \propto \frac{1}{n^2} \begin{cases} n \uparrow \\ K(r) \downarrow \end{cases}$

(C) ○ (3)力學能： $E_n = K(r) + U_e(r) = -\frac{13.6}{n^2} \times Z^2$ $E_n \propto -\frac{1}{n^2} \begin{cases} n \uparrow \\ E_n(r) \uparrow \end{cases}$

(D) × (4)角動量： $L = rmv = n \cdot \left(\frac{h}{2\pi}\right)$ $L \propto n \Rightarrow \frac{L_3}{L_1} = \frac{3}{1} \Rightarrow L_3 = 3L_1$

(E) ○ (5)週期： $T = \frac{2\pi r}{v}$ $T \propto \frac{r}{v} \propto \frac{n^2}{\left(\frac{1}{n}\right)} = n^3 \Rightarrow \frac{T_3}{T_1} = \left(\frac{3}{1}\right)^3 = 27 \Rightarrow T_3 = 27T_1$ 。

故選(A)(C)(E)。

類題 氫原子處於第一受激態與第二受激態時，試比較下列各項物理量的關係。

- (1)軌道半徑比為_____。(2)速率比為_____。
(3)動能比為_____。(4)動量比為_____。

答 (1) 4 : 9 ; (2) 3 : 2 ; (3) 9 : 4 ; (4) 3 : 2

(1) 由穩定態理論得知， $\begin{cases} r_n = \frac{n^2 h^2}{4\pi^2 m k Z e^2} \propto n^2 \Rightarrow \frac{r_2}{r_1} = \frac{2^2}{1^2} = \frac{4}{1} \dots\dots ① \\ v_n = \frac{2\pi k Z e^2}{nh} \propto \frac{1}{n} \Rightarrow \frac{v_2}{v_1} = \frac{1}{2} \dots\dots ② \end{cases}$

(3) 由 $K = \frac{1}{2}mv^2$ $K \propto v^2 \xrightarrow{\text{承}②} \frac{K_2}{K_1} = \left(\frac{1}{2}\right)^2 = \frac{1}{4}$

(4) 由 $p = mv$ $p \propto v \xrightarrow{\text{承}②} \frac{p_2}{p_1} = \frac{1}{2}$ 。

3-2

課後練習

單選題

(解析見解答本)

- (B) 1. 下列哪項陳述不能由波耳理論解釋之？
 (A) 氫的游離能 (B) 多電子原子的原子光譜的詳情
 (C) 氫光譜的波長 (D) 類似氫原子如 He^+ 及 Li^{2+} 的光譜
 (E) 氫原子的能階
- (B) 2. 恰能使氫原子由基態升至第一受激態之電磁波為下列何者？
 (A) γ 射線 (B) 紫外線 (C) 綠光 (D) 紅外線 (E) 無線電波
- (D) 3. 如一氫原子 (H) 的電子從 $n=2$ 的受激態躍遷至 $n=1$ 的穩定態時，所放出光子能量為 E 。試問一氦離子 (He^+) 的電子從 $n=3$ 能階躍遷至 $n=2$ 能階時，所放出光子的能量約為何？(提示： $\text{He}^+ : E_n = -\frac{54.4}{n^2} \text{ eV}$)
 (A) $0.37 E$ (B) $0.42 E$ (C) $0.53 E$ (D) $0.74 E$ (E) $0.84 E$
- (B) 4. 氫原子中，自 $n=8$ 移去一電子所須之能量至少為自 $n=4$ 移去該電子之能量的幾倍？
 (A) $\frac{1}{2}$ 倍 (B) $\frac{1}{4}$ 倍 (C) 2 倍 (D) 4 倍 (E) 1 倍
- (B) 5. 一處於基態的氫原子，在吸收光子後，其軌道半徑增大為原先的 4 倍，則所吸收的光子能量為多少？
 (A) 6.8 eV (B) 10.2 eV (C) 12.1 eV (D) 13.6 eV (E) 20.4 eV
- (B) 6. 氫原子光譜中，來曼系和巴耳末系譜線之最短波長比為何？
 (A) 1 : 2 (B) 1 : 4 (C) 2 : 1 (D) 4 : 1 (E) 1 : 8
- (B) 7. 氫原子由高能階 ($n=n_2$) 躍遷至低能階 ($n=n_1$) 時會放出光線，如果放出的光線在可見光範圍時，則 n_1 之值必須為多少？
 (A) 1 (B) 2 (C) 3 (D) 4 (E) 5
- (D) 8. 已知將氫原子基態的電子游離時，可用的最長波長的光為 913 埃的紫外光。那麼從各受激態至基態的來曼系統光譜，其波長可用下列各項何式表示？
 (A) $\lambda = 913 \frac{n-1}{n+1} \text{ \AA}$ (B) $\lambda = 913 \frac{n+1}{n-1} \text{ \AA}$ (C) $\lambda = 913 \frac{n^2+1}{n^2-1} \text{ \AA}$
 (D) $\lambda = 913 \frac{n^2}{n^2-1} \text{ \AA}$ (E) $\lambda = 913 \frac{n^2+1}{n^2} \text{ \AA}$

- (C) 9. 在波耳的氫原子模型中，若 E 為電子的總能量， f 為電子作圓軌道運動的頻率， h 為普朗克常數，則當量子數為 n 時，下列 E 與 f 的關係式，何者正確？
 (A) $E = -n^2 hf$ (B) $E = -nhf$ (C) $E = -\frac{1}{2}nhf$ (D) $E = nhf$ (E) $E = n^2 hf$
- (A) 10. 1868 年法國天文學者發現來自太陽的光譜有幾道特殊的暗紋，推斷是新元素的特性光譜，這個新元素就以太陽的希臘文命名為氦。已知太陽光譜會出現上述暗紋的原因，是因為氦原子會吸收特定頻率的入射光子所造成的，則下列敘述何者正確？ **【112.分科】**
 (A)某元素光譜的暗紋頻率和氦原子光譜的暗紋頻率相同，則此元素一定是氦
 (B)會出現暗紋是因為氦原子會將特定頻率光子繞射到不同的方向
 (C)氦原子光譜的暗紋頻率和氫原子光譜的暗紋頻率完全相同
 (D)氦原子光譜的暗紋頻率和氖原子光譜的暗紋頻率完全相同
 (E)會出現暗紋其實就是因為氦原子會被入射光游離

多選題

- (A C) 1. 在波耳的氫原子模型中，氦離子 (He^+) 中的電子以圓形軌道繞行原子核。設此電子自基態躍遷至某一受激態，下列有關電子的物理量中，躍遷後大於躍遷前的是哪些？
 (A)位能 (B)動能 (C)物質波波長 (D)軌道運動之週期 (E)所受向心力之量值
- (A B) 2. 波耳在氫原子結構的理論中，引入了量子數 n 。在此理論中，下列各物理量與 n 的關係哪些正確？
 (A)電子的軌道半徑與量子數 n 的平方成正比
 (B)電子在軌道中的運動速率與量子數 n 成反比
 (C)電子在軌道中的角動量與量子數 n 成反比
 (D)電子的位能與量子數 n 的平方成正比
 (E)當 $n \gg 1$ 時，電子在相鄰兩能階間的能量差約與 n 的立方成反比
- (C D) 3. 汞原子之激發能階為 4.9，6.7，8.8 電子伏特。今以電子打擊汞原子時，發現所測光譜中有能量為 1.8 電子伏特之光子。則入射電子之能量可能為何？
 (A) 2.1 電子伏特 (B) 4.9 電子伏特 (C) 6.7 電子伏特
 (D) 7.5 電子伏特 (E) 8.8 電子伏特

- (A D) 4. 依據波耳的氫原子模型，若兩個處於量子數 $n=1$ 的基態氫原子，在發生正向碰撞後停止不動，接著都只發出同一種單頻光，其光子的能量均為 10.204 eV ，則下列敘述哪些正確？（氫原子的質量為 $1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$ ，氫原子的能量為 $E_n = -13.606 \text{ eV}/n^2$ ， $1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$ ）【111.分科】
- (A) 碰撞後兩個氫原子都被激發到 $n=2$ 的能階
 (B) 在碰撞前每個氫原子的動能都為 3.4 eV
 (C) 在碰撞前兩個氫原子的總動量大於零
 (D) 在碰撞前每個氫原子的速率大於 30 km/s
 (E) 兩個氫原子發出的都是可見光

混合題

「波耳氫原子模型」的探索

1913 年，波耳大膽地引進普朗克和愛因斯坦的量子論，結合牛頓力學，針對氫原子和類氫原子正式發表了新的氫原子模型，稱為波耳原子模型（Bohr atom model）。

- (C) 1. 若普朗克常數以 h 表示，當氫原子中之電子由基態躍至第一受激態時，其角動量值將增加若干？（單選）
- (A) $\frac{h}{\pi}$ (B) $\frac{2h}{\pi}$ (C) $\frac{h}{2\pi}$ (D) 2π (E) $2h\pi$
- (A) 2. 已知氫原子的電子從量子數 $n=3$ 能階躍遷至 $n=1$ 能階時，發射波長 λ_1 的電磁波，從 $n=4$ 能階躍遷至 $n=1$ 能階時，發射波長為 λ_2 的電磁波。試問電子從 $n=4$ 能階躍遷至 $n=3$ 能階時，發射的電磁波波長為何？（單選）
- (A) $\frac{\lambda_1\lambda_2}{\lambda_1-\lambda_2}$ (B) $\frac{\lambda_1-\lambda_2}{\lambda_1\lambda_2}$ (C) $\frac{\lambda_1\lambda_2}{\lambda_1+\lambda_2}$ (D) $\frac{\lambda_1+\lambda_2}{\lambda_1\lambda_2}$ (E) $\frac{\lambda_1+\lambda_2}{\lambda_1-\lambda_2}$
3. 關於氫原子的電子從 $n=5$ 的能階降到基態（即 $n=1$ ）的過程中，試問：
- (1) 共可產生幾種不同頻率的光線？
 (2) 當中屬於萊曼系統者有幾條？
 (3) 當中屬於巴耳末系列有幾條？
 (4) 所放出光譜線中頻率最大者為由 $n=$ _____ 跳到 $n=$ _____。
 (5) 所放出光譜線中波長最長者為由 $n=$ _____ 跳到 $n=$ _____。
- 答：(1) 10；(2) 4；(3) 3；(4) $5 \rightarrow 1$ ；(5) $5 \rightarrow 4$

3-3 物質波



學習概念

1 德布羅意的物質波假設 (配合課本 p.105)

電子、原子、甚至一般的物質粒子，運動時也有波動性質。

西元 1924 年，法國科學家德布羅意提出物質波假設：「運動中的所有物質（粒子），都附帶有一種波，稱之為物質波（matter wave）。」

1. 內容：

物質波的頻率 ν 、波長 λ ，與物質（粒子）的動能 K 、動量 p 、速率 v 的關係如下所列：

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} = \frac{h}{\sqrt{2mK}}$$

(1) 由於普朗克常數 $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ 甚小，而一般常見物質粒子的動量太大，造成物質波波長 λ 太短，故無法以儀器測量出來，因此粒子的波動性質不明顯。

(2) 說明例：

質量為 100 g 的小石頭以 40.0 m/s 向前運動，則計算其物質波波長為

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{6.63 \times 10^{-34}}{0.1 \times 40} = 1.66 \times 10^{-34} \text{ m} \approx 0$$

2. 推論：

(1) 質量 m ，帶電量 q 的粒子經電位差 V 加速後（動能為 K ）的物質波波長為

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2mK}} \xrightarrow{K=qV} \lambda = \frac{h}{\sqrt{2mqV}}$$

① 若為電子粒子 $\xrightarrow{m_e = 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}} \lambda_e \approx \frac{12.3}{\sqrt{V}} (\text{\AA})$

② 若為質子粒子 $\xrightarrow{m_p = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}} \lambda_p \approx \frac{0.287}{\sqrt{V}} (\text{\AA})$

(2) 帶電量 q 的粒子在均勻磁場 B 中作半徑 r 的等速圓周運動時，其物質波波長為

$$r = \frac{mv}{qB} \xrightarrow{mv=qBr} \lambda_q = \frac{h}{p} = \frac{h}{qBr}$$

(3) 質量 m ，溫度 T 的單原子分子理想氣體的物質波波長為

$$v_{\text{r.m.s.}} = \sqrt{\frac{3kT}{m}} \xrightarrow{mv = \sqrt{3mkT}} \lambda = \frac{h}{\sqrt{3mkT}} \quad (\text{波茲曼常數 } k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K})$$

學習概念 2 物質波和量子論的比較

類別		光子（量子論）	粒子（物質波）
粒子性	動能（ K ）	$E=mc^2$	$K=\frac{1}{2}mv^2$
	動量（ p ）	$p=mc=\frac{E}{c}$	$p=mv$
波動性	頻率（ ν ）	$\nu=\frac{E}{h}$	$\nu=\frac{K}{h}$ （補充資料）
	波長（ λ ）	$\lambda=\frac{h}{p}$	$\lambda=\frac{h}{p}$
行進速度		$c=\lambda \cdot \nu$	$v \neq \lambda \cdot \nu$ （補充資料）

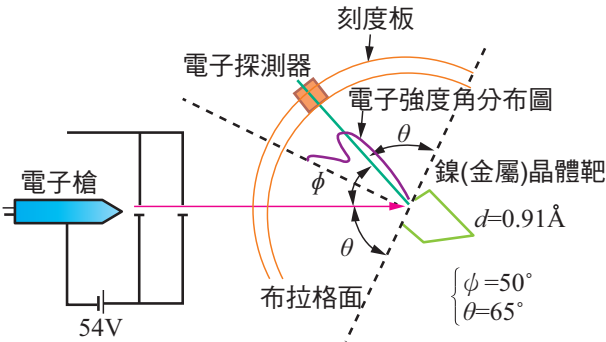
3

學習概念 3 物質波的實驗驗證（配合課本 p.106）

1. 戴維森—革末的實驗驗證：1927 年

(1) 裝置：

如下圖所示，讓電子經由電壓加速後具有 54eV 的動能，當電子束射擊表面規則排列的鎳晶體表面，沿不同的散射角度偵測由晶體表面散射的電子束強度。



▲戴維森—革末物質波實驗裝置圖

(2) 結果：

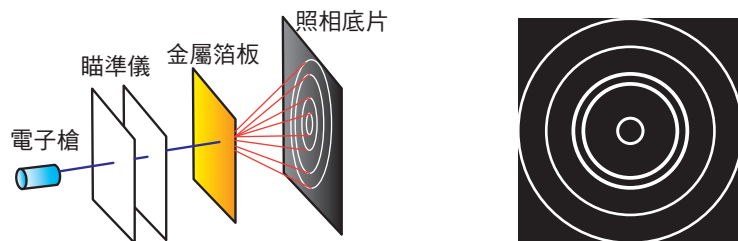
電子束的散射強度和散射角度之間，呈現和 X 射線同樣的散射特性，在某些角度的電子束散射強度會突然增強，這種結果只有用波動的建設性干涉才能解釋。

- ① 理論預測值： $\lambda = \frac{12.3}{\sqrt{V}} \text{ (Å)}$ $\xrightarrow{\text{加速的電位差, } V=54 \text{ V}}$ $\lambda = \frac{12.3}{\sqrt{54}} = 1.67 \text{ Å}$
- ② 實驗測量值： $\lambda = 1.67 \text{ Å}$ （與 X 射線的波長相當）
- 由①、②得知，表示電子的確具有波動的性質，亦即證實運動電子的物質波確實存在。

教師用書
貼心伴隨·敬請賜教

2. G.P. 湯姆森之實驗驗證：

G.P. 湯姆森仿照芬·勞厄之實驗，以單一能量之電子束（100 eV）射透金屬薄膜，在金屬箔背後之屏上形成繞射條紋，證實了物質波之存在，如下圖所示。



▲ 100eV 的電子束通過金箔形成的繞射圖形

範例

7

德布羅意的物質波假設

當電子的動能為 81.0 電子伏特時，其物質波的波長為 1.36 埃；當其動能為 324 電子伏特時，其物質波的波長為若干埃？

答 0.68

解 依 $\lambda = \frac{h}{\sqrt{2mK}}$ $\xrightarrow{h, m = \text{const.}}$ $\lambda \propto \frac{1}{\sqrt{K}} \Rightarrow \frac{1.36}{\lambda'} = \frac{\sqrt{324}}{\sqrt{81}}$, $\lambda' = 0.68 \text{ \AA}$

類題 如果某粒子以 10^4 m/s 的速率運動，其物質波波長為 10^{-10} m 。如果速率降為 10^3 m/s ，則其物質波波長變為若干公尺？

答 10^{-9} m

(依 $\lambda = \frac{h}{mv}$ $\xrightarrow{h, m = \text{const.}}$ $\lambda \propto \frac{1}{v} \Rightarrow \frac{10^{-10}}{\lambda'} = \frac{10^3}{10^4}$, $\lambda' = 10^{-9} \text{ m}$ 。)

範例 2 物質波的實驗驗證

下列哪些現象可顯示「物質波」的存在？

- (A) 戴維森和革末的鎳晶體散射實驗
- (B) 光電效應的現象
- (C) G.P. 湯姆森看到電流隨電壓之改變而成波狀起伏
- (D) 單一能量的電子束射入金屬晶體薄膜時的繞射現象
- (E) X 射線的布拉格繞射現象

答 (A)(D)

解 (A) ☐ (D) ☐

物質波存在的驗證有二：

- (1) 戴維森—革末進行鎳晶體散射實驗。
- (2) G.P. 湯姆森進行電子束金箔的繞射實驗。

故選(A)(D)。

類題 一束動能為 1.00 eV 的電子射向兩狹縫，可在狹縫後 10.0 m 處，用探測器測出電子密度分布，若測出相鄰兩個密度最小的間隔為 1.23 mm 時，此兩狹縫間的距離為若干？

答 0.01 mm

$$(1) \text{ 依 } \lambda = \frac{12.3}{\sqrt{V}} \xrightarrow{K=1.00 \text{ eV, 對應加速電壓為 } 1.00 \text{ V}} \lambda = \frac{12.3}{\sqrt{1}} = 12.3 \text{ \AA}$$

(2) 物質波經雙狹縫繞射干涉，探測器上顯示的相鄰兩密度最小的間隔為 Δy 。

$$\text{依 } \Delta y = \frac{r\lambda}{d} \quad 1.23 \text{ mm} = \frac{(10.0 \times 10^3 \text{ mm}) \cdot (12.3 \times 10^{-7} \text{ mm})}{d} \Rightarrow d = 0.01 \text{ mm} \circ)$$

學習概念

4

物質波在波耳原子模型的應用

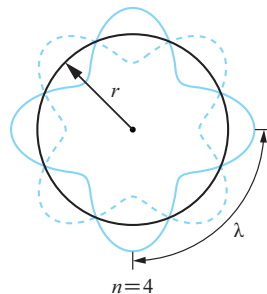
(配合課本 p.108)

1. 以駐波說明波耳的原子穩定態假設(電子的角動量量子化):

當電子繞原子核作圓周運動,其物質波形成駐波時,電子不會輻射電磁波,因而可以形成原子的穩定態。

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{駐波條件: } 2\pi r = n\lambda \\ \text{物質波波長: } \lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} \end{array} \right. \xrightarrow[\text{角動量量子化條件式}]{\text{聯立}} L = rmv = n \cdot \frac{h}{2\pi}$$

上式即波耳對氫原子理論的第一基本假設,穩定態假設。



▲圓周上的駐波

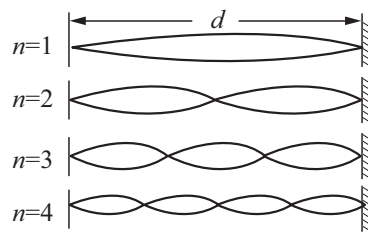
2. 在兩面反射壁之間來回穩定運動的質點,其物質波形成駐波的條件:

質點 m , 在距離為 d 的兩反射壁間來回穩定的運動,質點的物質波在反射壁間形成駐波。

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{駐波條件: } d = n \cdot \frac{\lambda}{2} \dots\dots\dots(1) \\ \text{物質波波長: } \lambda = \frac{h}{p} \dots\dots\dots(2) \end{array} \right.$$

聯立(1)、(2),得質點動能量子化條件式為

$$E_n = \frac{p^2}{2m} = \frac{h^2}{2m\lambda^2} = \frac{n^2 h^2}{8md^2} \quad (n \in N)$$



▲兩固定壁間的駐波

範例 3

物質波在波耳原子模型的應用

質量為 m 的帶電粒子,在相距 d 的兩個固定牆壁間運動,因而產生輻射。此粒子由第一受激態躍遷回基態時的輻射頻率為何?

(A) $\frac{h}{2md^2}$ (B) $\frac{h}{4md^2}$ (C) $\frac{h}{8md^2}$ (D) $\frac{3h}{8md^2}$ (E) $\frac{2h}{md^2}$

答 (D)

解 (D) ○ (1)質點在兩壁間作往返運動,當其物質波在兩壁間形成駐波時,可成為穩定狀態。

$$\text{由 } d = n \cdot \left(\frac{\lambda}{2} \right) \left\{ \begin{array}{l} \text{基態 } (n=1) : \lambda_1 = 2d \\ \text{第一受激態 } (n=2) : \lambda_2 = d \end{array} \right.$$

$$(2) \text{由 } \Delta E = E_2 - E_1 \quad E_n = \frac{h^2}{2m\lambda^2} \quad \Delta E = \frac{h^2}{2m\lambda_2^2} - \frac{h^2}{2m\lambda_1^2} = \frac{3h^2}{8md^2} = h\nu \Rightarrow \nu = \frac{3h}{8md^2} \text{。故選(D)。}$$

類題 質量為 m 的電子在長為 d 之兩壁間振動，形成駐波，則下列各項哪些正確？

- (A) 最長波長為 $2d$
 (B) 第三受激態時之波長為 $3d$
 (C) 電子的最小能量為 $\frac{3h^2}{8md^2}$
 (D) 第三受激態時電子的能量為 $\frac{2h^2}{md^2}$
 (E) 電子自第三受激態躍遷到第一受激態，輻射光子的頻率為 $\frac{3h}{2md^2}$

答

(A)(D)(E)

(A) ○ (1) 物質波在兩壁間形成駐波的條件： $d = n \cdot \frac{\lambda}{2}$

$$\therefore \lambda = \frac{2d}{n} \xrightarrow{n=1 \rightarrow \lambda_{\max}} \lambda_{\max} = 2d$$

(B) × (2) 承(1)，第三受激態 ($n=4$) 之波長為 $\lambda = \frac{2d}{n} = \frac{d}{2}$

(C) × (3) 電子能量量子化條件為 $K = \frac{n^2 h^2}{8md^2} \xrightarrow{n=1 \rightarrow K_{\min}} K_{\min} = \frac{h^2}{8md^2}$

(D) ○ (4) 承(3)，第三受激態 ($n=4$) 之能量為 $K_4 = \frac{4^2 h^2}{8md^2} = \frac{2h^2}{md^2}$

(E) ○ (5) ①由 $K = \frac{n^2 h^2}{8md^2} \begin{cases} \text{第一受激態：} K_2 = \frac{h^2}{2md^2} \\ \text{第三受激態：} K_4 = \frac{2h^2}{md^2} \end{cases}$

$$\therefore \text{電子躍遷釋放光譜 } \Delta E = K_4 - K_2 = \frac{3h^2}{2md^2}$$

$$\text{②由 } E = h\nu \xrightarrow{\text{光子頻率：}\nu} \nu = \frac{3h}{2md^2}$$

故選(A)(D)(E)。

學習概念

5

波粒二象性

(配合課本 p.108)

光子與物質運動時，同時具有波動和粒子的性質，稱為波粒二象性。

1. 光兼具波動及粒子兩種性質：

- (1) 由干涉、繞射等實驗根據及偏振現象，顯示出光具有波動的性質。
- (2) 由光電效應實驗的成功，顯示光具有粒子性（能量、動量）。

2. 互補原理 (principle of complementarity)：

1927 年波耳提出；光的「波動性」與「粒子性」不會同時顯現在同一實驗中，兩者是種互補而不矛盾的現象。在物理的測量中只能出現一種性質，表現波動時隱藏了粒子性，表現粒子時隱藏了波動性。

- (1) 光波長愈大（能量愈小）：波動性愈顯著，粒子性不顯著。
- (2) 光波長愈小（能量愈大）：波動性愈不顯著，粒子性顯著。

3. 物質兼具波動及粒子兩種性質：

- (1) 由電子干涉、繞射等實驗的成功，顯示出電子具有波動的性質。
- (2) 物質具質量，運動時具有粒子性（能量、動量）。

學習概念

6 物質波的物理意義 (補充資料)

1. 源起：

在德布羅意提出物質波的概念後，物理學家們開始思索最令人難以想像的兩個問題：

- (1) 所謂的物質波究竟是什麼波？
- (2) 物質波的傳播遵守什麼定律？

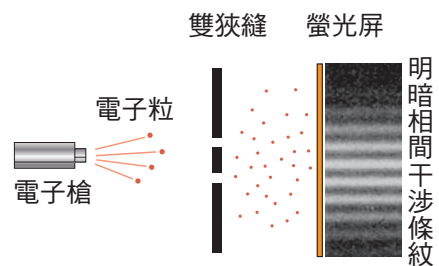
2. 解決：

- (1) 1926 年薛丁格（獲 1933 年諾貝爾獎）寫出了物質波傳播時所依據的「薛丁格波動方程式」，解決了第二個問題。
- (2) 半年後，波恩（獲 1954 年諾貝爾獎）提出物質波是一種空間中出現粒子（電子）機率的分布，不同於力學波（物質的位置在空間隨時間的分布），也不同於電磁波（電磁場隨空間和時間的變化）。

3. 電子的雙狹縫干涉實驗：

(1) 裝置：

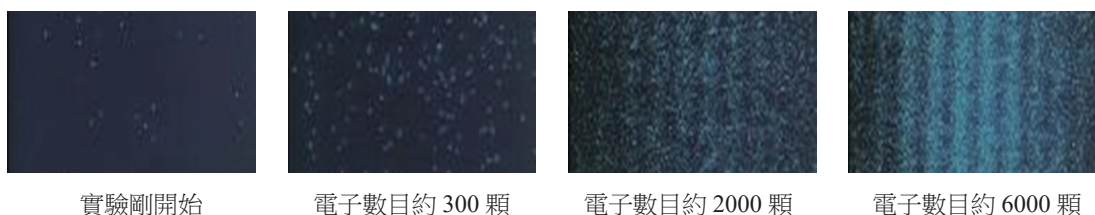
如右圖所示，使用電子束發射器對著雙狹縫發射電子粒，藉此實驗的進行，不只可以觀測到電子（物質波）的干涉條紋，還可知道干涉條紋是如何逐步浮現的。



▲電子的雙狹縫干涉實驗

(2) 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。



▲電子的雙狹縫干涉條紋

- ① 實驗剛開始：電子看似隨機出現在後方螢幕上，散亂無章。
- ② 電子數目約 300 顆：螢幕上的電子數達到數百顆時，並沒有特定的圖案出現。
- ③ 電子數目約 2000 顆：可以看出螢幕上有些位置電子數目多，有些位置電子數目少。
- ④ 電子數目約 6000 顆：螢幕上出現了清晰可見與光的雙狹縫干涉實驗類似的干涉條紋。

(3) 結論：

- ① 物質波所代表的物理涵義是一種「機率（波）」。
- ② 依照「電子雙狹縫干涉實驗」的結果：
 - 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。

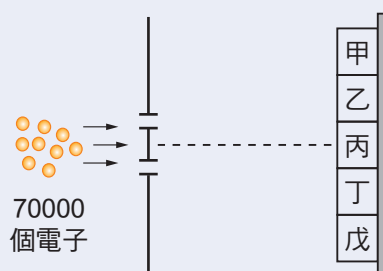
學習概念 7 近代物理的最偉大成就 —— 量子力學的發明 (補充資料)

德布羅意提出物質波的概念，薛丁格據此發展波動力學，海森堡提出矩陣力學，合稱量子力學，為近代物理學的最偉大的成就之一。

範例 4 物質波的物理意義

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 下列有關「物質波」意涵的敘述，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，均具有靜止質量，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時會發出強光
 (D) 物質波與光波同是橫波
 (E) 物質波的波函數可表示電子在空間出現的機率分布

答 (E)

- (A) × (1) 物質是粒子，也具有波動性 —— 物質波，不是光波。
 (B) × (2) 光子不具有靜止質量。
 (C) × (3) 為電子出現機率較高處，且不會發光。
 (D) × (4) 物質波不是橫波。
 故選(E)。

3-3

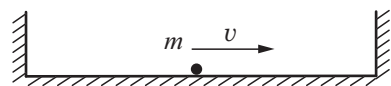
課後練習

單選題

(解析見解答本)

- (D) 1. 氫原子在 20°C 時因熱運動而產生的物質波波長為多少 \AA ? (氫原子質量為 $1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$)
(A) 3.0 (B) 8.0 (C) 6.0 (D) 1.5 (E) 0.5
- (D) 2. 電子自靜止經 V 伏特的加速電壓後，測得其物質波波長為 λ ，若將加速電壓增為 $4V$ ，則其物質波波長將變為何？
(A) 4λ (B) 2λ (C) 0.25λ (D) 0.5λ (E) $\frac{\sqrt{2}}{2}\lambda$
- (A) 3. 質子與靜止的 α 粒子作正面彈性碰撞，則碰撞前後質子的物質波波長比為何？
(A) 3 : 5 (B) 4 : 5 (C) 4 : 3 (D) 5 : 3 (E) 5 : 47
- (E) 4. 能量皆為 100 eV 之光子與電子的波長比約為何？
(A) 1 : 1 (B) 20 : 3 (C) 155 : 3 (D) 235 : 4 (E) 100 : 1
- (A) 5. 波耳的氫原子模型中，第一受激態與第二受激態的物質波波長比為多？
(A) 2 : 3 (B) 4 : 9 (C) 3 : 2 (D) 9 : 4 (E) 9 : 16
- (C) 6. 有一質量 m 帶電 e 之電子垂直射入一均勻磁場 B 中作半徑 r 之圓周運動，若電子之物質波形成駐波，則此圓周運動半徑之最小值為何？
(A) $\frac{h}{2\pi eB}$ (B) $\frac{2\pi eB}{h}$ (C) $(\frac{h}{2\pi eB})^{\frac{1}{2}}$ (D) $(\frac{2\pi eB}{h})^{\frac{1}{2}}$ (E) $(\frac{h}{2\pi eB})^{\frac{1}{3}}$
- (D) 7. 若 r 為波耳氫原子模型中第一受激態的圓形軌道半徑，則第二受激態的氫原子中在圓形軌道上運行之電子的物質波波長為何？
(A) $4\pi r$ (B) $\frac{4}{9}\pi r$ (C) πr (D) $\frac{3}{2}\pi r$ (E) $\frac{5}{2}\pi r$

- (B) 8. 設普朗克常數為 h ，一個電子質量為 m ，被限制於一長度為 L 的一維空間內往返作等速率運動，如右圖所示。依據德布羅意的想法，在穩定運動態時此電子的物質波在此一維空間內形成駐波（視運動的兩端點為節點），則此電子的第一受激態（ $n=2$ ）的能量為何？



(A) $\frac{h^2}{4mL^2}$ (B) $\frac{h^2}{2mL^2}$ (C) $\frac{h^2}{mL^2}$ (D) $\frac{3h^2}{2mL^2}$ (E) $\frac{2h^2}{mL^2}$

- (A) 9. 探究光兼具「波粒二象性」性質，如下所述：一束波長為 λ 的 X 射線被一原先靜止的自由電子散射，散射後的 X 射線沿原入射方向返回，但波長變為 λ' ，則散射後電子的物質波波長為何？（以 λ, λ' 表示）。

(A) $\frac{\lambda\lambda'}{\lambda+\lambda'}$ (B) $\frac{\lambda+\lambda'}{\lambda\lambda'}$ (C) $\frac{\lambda\lambda'}{\lambda-\lambda'}$ (D) $\frac{\lambda-\lambda'}{\lambda\lambda'}$ (E) $\frac{\lambda\lambda'}{\sqrt{\lambda^2+\lambda'^2}}$

多選題

- (B C) 1. X 射線管中，電子經 2500 伏特電位差加速後撞擊陽極靶產生 X 射線，若加速電位差增加為原來的 10 倍，則下列有關 X 光子與電子的敘述，哪些正確？

(A) 電子動量增為原來的 10 倍 (B) 電子物質波波長為原來的 $\frac{1}{\sqrt{10}}$

(C) 光子動量增為原來的 10 倍 (D) 光子波長減為原來的 $\frac{1}{10}$

(E) 光子頻率增為原來的 $\sqrt{10}$ 倍

- (A B) 2. 以電壓 V_0 加速一些質量 m 的靜止電子，下列敘述哪些正確？

C

(A) 每一電子獲得動能 $\frac{1}{2}mv^2 = eV_0$ (v 為電子獲得的速率)

(B) 此時電子的波長為 $\lambda = \frac{h}{\sqrt{2meV_0}}$

(C) 將這些電子照射在金屬上，即可產生各種不同波長的 X 射線，但是波長有一最短極限

(D) 其所能產生的 X 射線中，波長最短者為 λ_s ，其值可由類似光電方程式的一方

程式 $eV_0 = h \cdot \frac{c}{\lambda_s} + B$ 求之，式中 B 為金屬的功函數

(E) 當加速電壓增倍時，電子的波長則減半

- (B C) 3. 一質子和一 α 粒子分別在一相距為 d 的兩固定壁間以駐波形式來回運動，而產生輻射，試依下列各項比較質子和 α 粒子兩者的差異結果，哪些正確？
- (A) 在基態時波長比為 1 : 4
 (B) 在基態時動量比為 1 : 1
 (C) 在基態時能量比為 4 : 1
 (D) 由第一受激態回到基態時輻射能量之比為 1 : 1
 (E) 由第一受激態回到基態時輻射頻率之比為 4 : 1

非選題

探索「電子粒子在磁場中的運動」

一質量 m ，電量 e 的電子以 v 的速度在均勻且不隨時間變化的磁場 B 內，垂直於磁場而運動。

1. 試證明此電子的角動量 $L = \frac{(mv)^2}{eB}$ ，其中 e 為電子電量的絕對值。

答： $e : \vec{v} \perp \vec{B} \xrightarrow{\text{等速率圓周運動}} r = \frac{mv}{eB} \xrightarrow{\text{角動量：} L = rmv} L = mv \cdot \frac{mv}{eB} = \frac{(mv)^2}{eB}$ 。

2. 假設電子的運動也遵守波耳對氫原子結構所作的一個假設，即電子的角動量 $L = \frac{nh}{2\pi}$ ， n 為正整數， h 為普朗克常數；則此電子由第一受激態 ($n=2$) 躍遷至基態 ($n=1$) 時，若發射出電磁波，則其頻率為若干？

答： $\frac{eB}{4\pi m}$

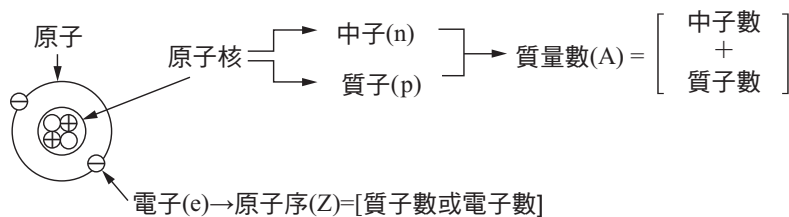
3. 若電子之物質波形成駐波，則此圓周運動半徑之最小值若干？

答： $\sqrt{\frac{h}{2\pi eB}}$

3-4 原子核

學習概念 1 原子核的組成 (配合課本 p.112)

1. 原子核 (又稱核子, Nucleus) 的構造:



▲原子核的組成

原子核由質子和中子所組成，質子帶正電，中子不帶電，質子和中子的質量約略相等。

(1) 質子 (${}_1^1\text{p}$, proton) : 帶一基本單位正電荷, $+e$, 質量 $1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$, 拉塞福發現。

(2) 中子 (${}_0^1\text{n}$, neutron) : 不帶電, 質量約與質子相同, 查兌克發現。

(3) 電子 (${}_{-1}^0\text{e}$, electron) : 帶一基本單位負電荷, $-e$, 質量 $9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$, 湯姆森發現。

2. 原子核的大小:

(1) 拉塞福從 α 粒子的散射實驗數據中, 推論原子核的直徑約為 10^{-15} m (原子的大小約為 1 埃)。

(2) 多數原子核的形狀接近球形, 它們的半徑 R 和質量數 A 之間, 有下列的近似關係

$$R = R_0 A^{\frac{1}{3}} \quad (R_0 \approx 1.2 \times 10^{-15} \text{ m} = 1.2 \text{ fm}, 1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m})$$

3. 原子核內的質子數目, 以 Z 表示, 稱為原子序; 中子數目以 N 表示; 質子數和中子數的和, 以 A 表示, 稱為原子質量數或簡稱質量數, 即 $A = Z + N$ 。

4. 原子核的種類, 簡稱為核種, 表記為 ${}_Z^A\text{X}$, 其中 X 為化學元素的符號。

例如: ${}_1^1\text{H}$ 、 ${}_{11}^{23}\text{Na}$ 、 ${}_8^{16}\text{O}$...

範例

1 原子核的組成

已知鈉 (Na) 的原子序是 11, 質量數是 23, 則一個中性的鈉原子中的中子數和電子數應該是多少? (每欄各選一項, 共應選二項)

中子數	電子數
(A) 11	(E) 11
(B) 12	(F) 12
(C) 23	(G) 23
(D) 34	(H) 34

答 (B)(E)

解 (B) ☐ (E) ☐ (1) 原子序 = 質子數 = 電子數 = 11

(2) 質量數 = 質子數 + 中子數 = 23 $\xrightarrow{\text{承(1)}}$ 中子數 = 12。故選(B)(E)。

類題 目前已知原子序最大的元素是在西元 1998 年，由俄羅斯科學家利用一個鈣原子與一個鐳原子融合而成的 ${}_{114}^{289}\text{Uuq}$ 。下列有關此最新元素的敘述，何者正確？

- (A) Uuq 的原子序為 175 (B) Uuq 的電子數目為 289
(C) Uuq 的原子核中有 423 個中子 (D) Uuq 的原子核中有 114 個質子
(E) Uuq 原子總計有夸克 289 個

答 (D)

(A) ×
(B) ×
(C) ×
(D) ○
(E) ×

(1) ${}_{114}^{289}\text{Uuq}$: $\begin{cases} \text{質子數 } p = 114 = \text{原子序} \\ \text{中子數 } n = 289 - 114 = 175 \\ \text{電子數 } e = 114 \end{cases}$

(2) $\begin{cases} \text{質子 } p = 114 : \begin{cases} \text{上夸克} = 228 \\ \text{下夸克} = 114 \end{cases} \\ \text{中子 } n = 175 : \begin{cases} \text{上夸克} = 175 \\ \text{下夸克} = 350 \end{cases} \end{cases}$
 \therefore 總計夸克數 $228 + 114 + 175 + 350 = 867$ (個)。
 故選(D)。

範例 2 原子核的組成

原子核之半徑可表示為 $R = 1.2 A^{\frac{1}{3}} \times 10^{-13} \text{ cm}$ ，其中 A 為該原子核之核子數。設核子之質量為 $1.6 \times 10^{-24} \text{ g}$ ，則原子核密度 (g/cm^3) 之數量級為何？

- (A) 1 (B) 10^6 (C) 10^{14} (D) 10^{24} (E) 10^{37}

答 (C)

解 (C) ○ 依 $R = 1.2 A^{\frac{1}{3}} \times 10^{-13}$ $\xrightarrow{\text{體積: } V = \frac{4}{3}\pi R^3}$ $V = \frac{4}{3}\pi (1.2 A^{\frac{1}{3}} \times 10^{-13})^3 \approx 7.2 A \times 10^{-39} \text{ cm}^3$

又 $D = \frac{M}{V}$ $\xrightarrow{M = A \times m}$ $D = \frac{Am}{V} = \left(\frac{1}{7.2 \times 10^{-39}} \right) \cdot (1.6 \times 10^{-24})$
 $\approx 2.2 \times 10^{14}$ 取 $D = 10^{14} \text{ g/cm}^3$ 。故選(C)。

類題 試求 ${}_{13}^{27}\text{Al}$ 的原子核半徑約為若干 fm？(1 fm = 10^{-15} m)

答 3.6

(依 $R = 1.2 A^{\frac{1}{3}} \times 10^{-13}$ $\xrightarrow{A=27}$ $R = 1.2 (27)^{\frac{1}{3}} \times 10^{-13} = 3.6 \times 10^{-13} \text{ cm} = 3.6 \text{ fm}$ 。)

學習概念 2 湯川秀樹的介子理論 (補充資料)

原子核內部就是靠核力（近程力、強作用力）來束縛質子或中子。

原子核可以穩定地存在，這是由於核內的質子與質子間，質子與中子間，中子與中子間，都有一種強交互吸引的作用力（以「介子」為媒介）存在。在距離約 $10^{-15}\text{m} \sim 10^{-14}\text{m}$ 時，遠比電荷間的庫倫作用力強，但稍大的距離（大於 10^{-14}m ）時即減弱至零；此作用力稱之為「核力」，由日本人湯川秀樹提出。

範例 3 湯川秀樹的介子理論

下列有關「核力」的性質敘述，哪些正確？

- (A) 質子與質子之間的核力與中子與中子間的核力性質不同
- (B) 核力的作用範圍可擴及原子核外的電子
- (C) 核力的量值與庫倫力相近
- (D) 一核子只能與鄰近少數幾個核子作用
- (E) 強交互作用的理論首由日本人湯川秀樹提出

答 (D)(E)

解 (A) × (1) 質子與質子之間的核力與中子與中子間的核力均為「強力」。

(B) × (2) 核力的作用範圍為「原子核」。

(C) × (3) 核力較庫倫力約大 100 倍。

故選(D)(E)。

類題 比較核力與電力之不同，下列各項敘述何者正確？

- (A) 核力比電力強，但有效作用距離很短
- (B) 核力比電力弱，因其只能影響到其核外之電力
- (C) 核力比電力弱，但其作用範圍較大
- (D) 核力比電力強，且其作用範圍可達於另一個原子核
- (E) 核力由庫倫提出，電力由湯川秀樹提出

答 (A)

(A) ○

(B) ×

(C) ×

(D) ×

(E) ×

故選(A)。

(1) 核力比電力強約 100 倍，且有效作用距離很短約 10^{-15}m 。

(2) 核力由湯川秀樹提出，電力由庫倫提出。

3

教師用書

貼心伴隨·敬請賜教

學習概念 3 同位素 (配合課本 p.113)

原子週期表中占同一位置的原子稱為同位素 (isotope iso=相同; tope=位置)。

1. 意義：

- (1) 原子序相同而質量數不同的元素。
- (2) 質子數相同而中子數不同的元素。
- (3) 化學性質相同而物理性質不同的元素。

2. 實例：

$$\text{氫的同位素：}\left\{\begin{array}{l}\text{氫}({}_1^1\text{H}) \\ \text{氘}({}_1^2\text{H}) \\ \text{氚}({}_1^3\text{H})\end{array}\right. \quad \text{氧的同位素：}\left\{\begin{array}{l}{}^{16}_8\text{O} \\ {}^{17}_8\text{O} \\ {}^{18}_8\text{O}\end{array}\right. \quad \text{碳的同位素：}\left\{\begin{array}{l}{}^{12}_6\text{C} \\ {}^{13}_6\text{C} \\ {}^{14}_6\text{C}\end{array}\right.。$$

3. 在週期表上所列各元素的原子量，是該元素所有同位素的原子質量的自然界含量的加權平均值。

範例 4 同位素

查得某元素於自然界有三種同位素，資料如右表：

- (1) ${}^{20}\text{X}$ 中的 20 表示什麼？
- (2) 已知 ${}^{22}\text{X}$ 之原子序為 10，則 X 中有幾個中子？
- (3) 20.99396 表示哪一個同位素之質量？
- (4) X 元素之平均原子量應為多少？（要算到小數點後第四位）

${}^{20}\text{X}$	19.99244	90.92%
${}^{21}\text{X}$	20.99396	0.257%
${}^{22}\text{X}$	21.99138	8.823%

答 (1) 質量數；(2) 12；(3) 質量數 21 同位素之質量；(4) 20.1714

解 (1) 元素 ${}_a^b\text{X}$ 中之 a 表示原子序，而 b 表示質量數。

(2) 中子數 = 質量數 - 質子數 = $22 - 10 = 12$

(3) 由表知 20.99396 為質量數 21 同位素的質量。

(4) 一元素之平均原子量 = (構成元素之所有同位素質量) × (在自然界中存在的百分比之和)

∴ 平均原子量 = $19.99244 \times 0.9092 + 20.99396 \times 0.00257 + 21.99138 \times 0.08823 \approx 20.1714$

類題 銅的原子量為 63.54，已知它由兩種穩定同位素組成，組成比例為原子量 65 的同位素占 30%，則另一同位素的原子質量為何？

- (A) 61 (B) 62 (C) 63 (D) 64 (E) 65

答 (C)

(C) ○ 若另一同位素的原子質量為 X ，則 $X \times 0.7 + 65 \times 0.3 = 63.54 \Rightarrow X \approx 63$ 。故選(C)。

學習概念 4 原子核的放射性 (配合課本 p.114)

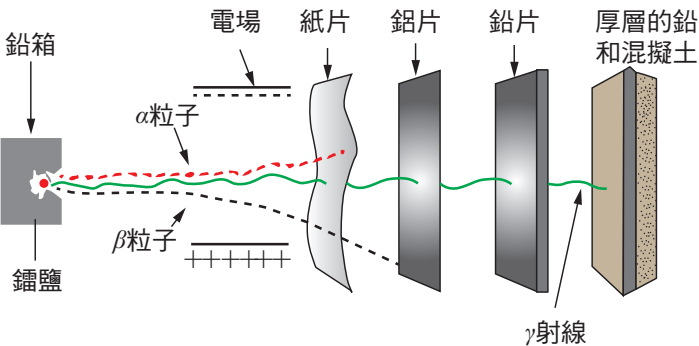
1. 放射性元素的發現：

- (1) 1896 年，法國貝克勒發現鈾礦可放出一種使照像底片感光的射線。
- (2) 1897 年、1898 年，法國居里夫婦陸續發現釷礦、釷、鐳等都具有放射性，他們倆可稱為放射性元素的發現和鑑定者。

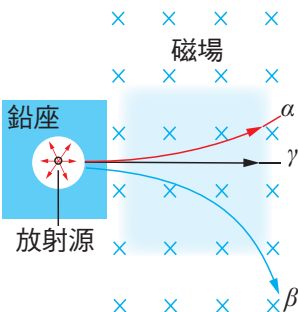
2. 放射線的發現：

- (1) 1898 年拉塞福使放射線通過磁場，結果分成兩種不同偏向的放射線，顯示它們是帶電的粒子，他分別命名為 α 射線和 β 射線。
 - ① 拉塞福確認 β 射線的本質為高速的電子束。
 - ② 拉塞福證明 α 射線的本質為帶正電的氦原子核所組成。
- (2) 1900 年，法國維拉得發現另一種不受磁場偏折，而且穿透力極強的放射線，之後，由拉塞福命名為 γ 射線。

放射線	α 射線	β 射線	γ 射線
本質	氦原子核 (${}^4_2\text{He}$)	電子 (${}^0_{-1}\text{e}$)	電磁波 ($\lambda < 1\text{ \AA}$)
電荷	$+2e$	$-e$	不帶電
質量	約 4 a.m.u.	約 0.00055 a.m.u.	無靜止質量
速率	低於 $0.1\text{ }c$	$0.4\text{ }c \sim 0.6\text{ }c$	c (光速)
游離氣體能力	最強	其次	最弱
感光能力	最弱	其次	最強
穿透能力	最弱，一張紙片即可阻止	其次，2 mm 厚鉛板可以阻止	最強，可穿透 1 cm 厚的鉛板
電場影響	向負極偏折	向正極偏折	不會偏折



▲ α 、 β 、 γ 射線之相對的穿透力



▲ α 、 β 、 γ 射線在磁場中之情況

學習概念

5 衰變（亦稱蛻變，Decay）（配合課本 p.115）

1. 意義：

一個不穩定的原子核種，常常放出 α 或 β 或同時放出 γ 射線而形成更穩定的核種。這種從一種核種轉化成另一種核種的過程叫做衰變。會發射前述放射線的原子核之元素稱為放射性元素。

2. 方式：

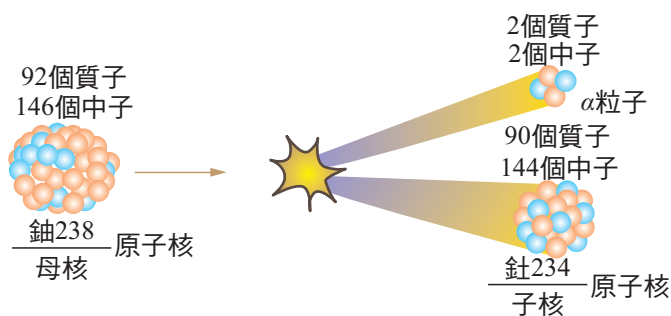
在衰變過程中之核反應式必須滿足兩個條件： $\begin{cases} \text{總質量數守恆。} \\ \text{總電荷數守恆} \end{cases}$

(1) α 衰變： ${}_Z^AX \rightarrow {}_{Z-2}^{A-4}Y + {}_2^4\alpha$ （ A ：質量數， Z ：原子序）

① 每放出一個 α 粒子，原子核的原子序減 2，質量數減 4。

② ${}_Z^AX$ 為衰變前的放射性原子核，稱為母核； ${}_{Z-2}^{A-4}Y$ 為衰變後形成的新原子核，稱為子核。

③ 說明例： ${}_{92}^{238}\text{U} \rightarrow {}_{90}^{234}\text{Th} + {}_2^4\text{He}$



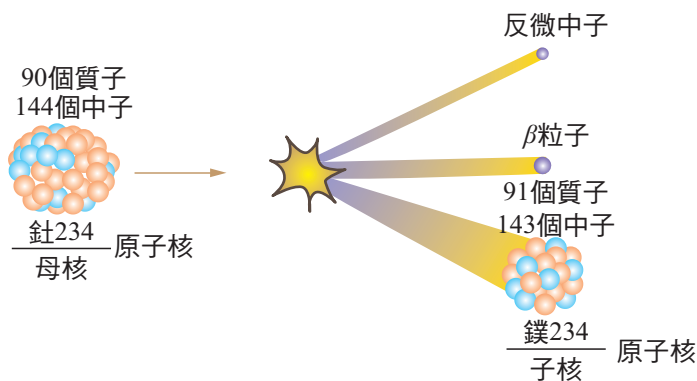
▲鈾 238 的 α 衰變示意圖

(2) β 衰變： ${}_Z^AX \rightarrow {}_{Z+1}^AY + {}_{-1}^0\beta + {}_0^0\bar{\nu}$

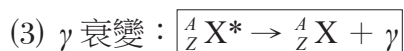
① 每放出一個 β 粒子，原子核的原子序加 1，質量數不變。

② β 衰變來自於原子核的中子反應 ${}_0^1n \rightarrow {}_1^1p + {}_{-1}^0e + {}_0^0\bar{\nu}$ 。

③ 說明例： ${}_{90}^{234}\text{Th} \rightarrow {}_{91}^{234}\text{Pa} + {}_{-1}^0e + {}_0^0\bar{\nu}$



▲釷 234 的 β 衰變示意圖

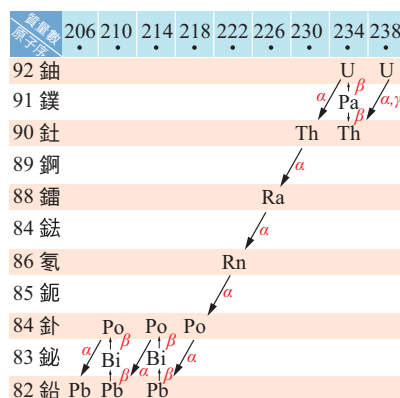


- ① 每放出一個 γ 光子，原子核的原子序不變，質量數不變。
- ② 原子核的能階以 MeV 為單位，躍遷時釋出 γ 光子，常伴隨 α 衰變或 β 衰變而產生。
- ③ 說明例： ${}^{238}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{234}_{90}\text{Th}^* + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{234}_{90}\text{Th} + {}^4_2\text{He} + \gamma$
 (式中 ${}^{234}_{90}\text{Th}^*$ 表示處於受激態的鈷原子核，帶有較高的能量。)

3. 自發衰變 (Spontaneous Decay)：

原子序大於 82 (鉛) 的元素，由於原子核內的質子數眾多，質子間的強大靜電斥力會使得原子核呈現不穩定，而產生衰變，因此這些元素皆為放射性元素，具有天然放射性。這種自然產生的衰變作用，稱為自發衰變。

- (1) 天然放射性系列，連續蛻變後，皆生穩定鉛的同位素。
- (2) α 、 β 射線不同時發生，但皆伴隨著的產生。
- (3) 如右圖所示，為鈷 238 的自發衰變成穩定的鉛 206 的過程。



▲放射性元素的衰變

範例 5 同位素

${}^{218}_{84}\text{Po}$ 逐步放射一個 β 粒子，2 個 α 粒子，再放出 1 個 β 粒子即變為新元素 E_1 。 E_1 慢慢放射 1 個 β 粒子後再逐步放射 1 個 α 粒子及 1 個 β 粒子變為穩定的元素 E_2 ，下列各項哪些正確？

- (A) E_2 是 E_1 的同位素 (B) E_2 不是 E_1 的同位素 (C) E_1 的質量數為 210
 (D) E_1 的質量數為 212 (E) E_2 的質量數為 206

答 (A)(C)(E)

解 (A) ○ (C) ○ 核反應： $\begin{cases} {}^{218}_{84}\text{Po} \rightarrow 2 {}^0_{-1}\text{e} + 2 {}^4_2\text{He} + E_1 \text{ (即 } {}^{210}_{82}\text{E}_1\text{)} \\ {}^{210}_{82}\text{E}_1 \rightarrow 2 {}^0_{-1}\text{e} + 2 {}^4_2\text{He} + E_2 \text{ (即 } {}^{206}_{82}\text{E}_2\text{)} \end{cases}$
 (E) ○

$\therefore E_1$ 、 E_2 為同位素 (\because 原子序皆 82)，而 E_1 的質量數為 210， E_2 的質量數為 206。

故選(A)(C)(E)。

類題 金屬錫之同位素中，其中一同位素有 50 個質子和 63 個中子，下列敘述中哪一個為錫的另一個同位素？

- (A) 中子 63 個，質子 113 個 (B) 中子 63 個，質子 63 個 (C) 中子 13 個，質子 60 個
 (D) 中子 62 個，質子 50 個 (E) 中子 50 個，質子 63 個

答 (D)

(D) ○ 同位素是「質子數相同而中子數不同的元素」。故選(D)。

範例 6 衰變

關於原子核的 α 、 β 、 γ 衰變，下列各項敘述哪些是正確的？

- (A) 若三種射線同時垂直射入一磁場，則 α 射線和 β 射線沿相反方向作圓周運動， γ 射線沿原方向直進
- (B) α 射線係氦 4 的原子核，發生 α 衰變時，原子核的原子序減少 2，質量數減少 4
- (C) β 射線為質子，故發生 β 衰變時，原子序少 1
- (D) γ 射線即中子，所以 γ 衰變時，原子序不變，而質量數少 1
- (E) 衰變後產物的總質量、總動量均比反應物小

答 (A)(B)

- 解** (A) \bigcirc (1) α 為氦原子核， β 為電子，兩者電性相反，垂直射入磁場中，沿相反方向作圓周運動。
 γ 射線不帶電，沿原方向直線前進。
- (B) \bigcirc (2) 產生 α 衰變時，子核較母核的原子序少 2，質量數少 4。
- (C) \times (3) β 射線是電子，發生 β 衰變時，子核的原子序增加 1。
- (D) \times (4) γ 射線是高能量的電磁波，不影響子核的原子序及質量數。
- (E) \times (5) 衰變後產物的總質量比反應物小、「總動量守恒」。
- 故選(A)(B)。

類題 有關 α 、 β 、 γ 衰變，下列何項敘述正確？

- (A) α 射線之穿透力最強 (B) α 射線在磁場中之偏折度大於 β 射線
- (C) α 射線為氦的原子核所成 (D) γ 射線之放射速率與光速相等
- (E) γ 衰變僅伴隨 β 衰變的產生

答 (C)

(A) \times (1) 「 γ 射線」之穿透力最強。

(B) \times (2) 依 $\boxed{F=F_n} \xrightarrow{F=qvB} qvB=ma_n \Rightarrow a_n = \frac{qvB}{m} \propto \frac{1}{m} \begin{cases} m_\beta (\beta \text{ 質量}) \rightarrow \min \\ (a_n)_\beta (\text{偏折度}) \rightarrow \max \end{cases}$

(C) \bigcirc (3) α 射線即為氦的原子核， ${}_2^4\text{He}$ 。

(D) \times (4) 「 γ 射線」為中性電磁波，放射速率與光速相等。

(E) \times (5) 「 γ 衰變」常伴隨 α 、 β 衰變。

故選(C)。

範例 7 衰變

${}_{90}^{232}\text{Th}$ 經過一系列 α 、 β 衰變成為 ${}_{82}^{208}\text{Pb}$ ，下列敘述哪些正確？

- (A) 共經歷 4 次 α 衰變和 6 次 β 衰變 (B) 共經歷 6 次 α 衰變和 4 次 β 衰變
 (C) 鉛原子核比釷原子核少 8 個質子 (D) 鉛原子核比釷原子核少 16 個質子
 (E) 核反應前後，質量守恒

答 (B)(C)

解

(A) \times (B) \circ (1) 核反應： ${}_{90}^{232}\text{Th} \xrightarrow[\beta \text{ 衰變: } y \text{ 次}]{\alpha \text{ 衰變: } x \text{ 次}} {}_{82}^{208}\text{Pb}$

$$\begin{cases} \text{質量數: } 232 - 4x = 208 \\ \text{原子序: } 90 - 2x - (-y) = 82 \end{cases} \xrightarrow{\text{聯立, 求解}} \begin{cases} x = 6 \\ y = 4 \end{cases}$$

(C) \circ (D) \times (2) 由原子結構知： $\boxed{\text{原子序} = \text{質子數}}$ $p_{\text{Th}} - p_{\text{Pb}} = 90 - 82 = 8$

(E) \times (3) 核反應前後，質量不守恒，質量數守恒。

故選(B)(C)。

類題 鉛的放射性同位素 ${}_{82}^{214}\text{Pb}$ 衰變為 ${}_{82}^{206}\text{Pb}$ 的過程之中，會產生 x 次 α 衰變， y 次 β 衰變，則 x 、 y 各為何？

答 $x=2$ 、 $y=4$

(核反應： ${}_{82}^{214}\text{Pb} \xrightarrow[\beta \text{ 衰變: } y \text{ 次}]{\alpha \text{ 衰變: } x \text{ 次}} {}_{82}^{206}\text{Pb}$)

$$\begin{cases} \text{質量數: } 214 - 4x = 206 \\ \text{原子序: } 82 - 2x - (-y) = 82 \end{cases} \xrightarrow{\text{聯立, 求解}} \begin{cases} x = 2 \\ y = 4 \end{cases} \text{。}$$

學習概念 6 放射性元素的半衰期 (配合課本 p.119)

1. 半衰期 (Half-life)：亦稱半生期

從統計上來看，當原子核的數目很大，則每隔一定的時距，將有半數的原子核發生衰變。這個時間間隔稱為半衰期或半生期，通常以 $T_{1/2}$ 或 τ 表示之。

$$\boxed{\frac{N}{N_0} = \frac{m}{m_0} = \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T_{1/2}}}} \xrightarrow{\text{放射性元素}} \begin{cases} m_0, N_0: \text{蛻變前之質量, 核子數目} \\ m, N: \text{蛻變後之質量, 核子數目} \\ t: \text{蛻變時距} \\ \tau, T_{1/2}: \text{半衰期} \end{cases}$$

2. 衰變的特性：

- (1) 放射線是由原子核所放出，其衰變率遵守一個機率性的規則，屬於原子核本身的特性，不受化學作用、溫度、壓力等影響。
- (2) 放射性元素放射的快慢（半衰期），無法控制或改變。每一個放射性元素，都有固定不變的半衰期。
- (3) 我們無法預知或控制某原子在某一時刻進行衰變。
- (4) 放射性元素的放射強度，與實際所含放射性元素的密度有關，而與其狀態（固態、液態、氣態）、溫度、壓力，結合狀態（元素或化合物）無關。

學習概念 7 放射性定年法 (配合課本 p.120)

1. 目的：

測量標本內放射性元素現存濃度與起始濃度的比值，便可以求出標本所經歷的時間。

2. 原理：

- (1) 大氣中的 ^{14}N 受宇宙射線的照射，會轉變為 ^{14}C ， $^{14}_7\text{N} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^{14}_6\text{C} + {}^1_1\text{H}$ 。
- (2) 地球大氣中的同位素 ^{14}C 與 ^{12}C 含量的比值約保持為 $\frac{{}^{14}\text{C}}{{}^{12}\text{C}} = 1.3 \times 10^{-12}$ 。
- (3) 有機生物體經由光合作用或呼吸作用，使體內碳同位素的濃度與大氣環境者相同。
- (4) 當有機生物體死亡，其體內 ^{14}C 的濃度會逐漸衰減，測得現存濃度，就可斷定該有機生物體死亡的時間。

3. 數學式：

$$N = N_0 \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{t}{T_{1/2}}}$$

$\left\{ \begin{array}{l} N: \text{待測標本內 (放射性元素) 現存的濃度} \\ N_0: \text{活的生物體內 (放射性元素) 起始的濃度} \\ t: \text{經過的時間 (年代)} \\ \tau, T_{1/2}: \text{半衰期} \end{array} \right.$

4. 說明例：

自然界活體中的 ^{14}C 與 ^{12}C 的含量比值恆為 1.3×10^{-12} ，已知 ^{14}C 的半衰期為 5730 年，某考古學者在考古遺蹟中採得一樣品，測得此樣品的年代約為 22920 年，則此樣品中 ^{14}C 與 ^{12}C 的含量比值為何？

【解】依 $N = N_0 \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{t}{T_{1/2}}}$ $\xrightarrow{N = \frac{{}^{14}\text{C}}{{}^{12}\text{C}} \text{ (現存比值)}}$ $N = (1.3 \times 10^{-12}) \cdot \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{22920}{5730}} \approx 8.1 \times 10^{-14}$

範例 8 放射性定年法

放射性同位素碳 14 之半衰期約為 6000 年，碳 14 之量減少至原來 $\frac{1}{8}$ 所需的時間為何？

(A) 480000 年 (B) 36000 年 (C) 18000 年 (D) 9000 年 (E) 750 年

答 (C)

解 (C) ○ 依物質的半衰期公式： $\frac{N}{N_0} = \frac{m}{m_0} = \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T_{1/2}}}$ $\frac{N}{N_0} = \frac{1}{8} = \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{6000}} \Rightarrow t = 18000$ (年)。

故選(C)。

類題 某放射性元素 81 克，經放射 45 天後，剩餘質量為原來 $\frac{1}{3}$ ，待其放射至剩餘質量為 1 克時，歷時若干天？

答 180 天

$$\left(\text{依 } \frac{m}{m_0} = \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T_{1/2}}} \right) \begin{cases} \frac{1}{3} = \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{45}{T_{1/2}}} \\ \frac{1}{81} = \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T_{1/2}}} \end{cases} \xrightarrow{\text{聯立}} t = 180 \text{ 天。}$$

範例 9 放射性定年法

在活的生物體內，同位素 ^{14}C 與 ^{12}C 含量的比值為 10^{-13} 。現有一古生物，其 ^{14}C 與 ^{12}C 含量之比值為 1.25×10^{-14} 。已知 ^{14}C 的半衰期為 5730 年，則此古生物死時距今約為若干年？

答 17190 年

解 依 $N = N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T_{1/2}}}$ $1.25 \times 10^{-14} = 10^{-13} \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{5730}} \Rightarrow t = 17190$ 年

類題 有一項理論認為所有比鐵重的元素都是超新星爆炸時形成的。已知 ^{235}U 和 ^{238}U 的半衰期分別為 0.704×10^9 年和 4.47×10^9 年，若地球上的鈾來自 5.94×10^9 年前的恆星爆炸，且爆炸時產生相同數量的 ^{235}U 和 ^{238}U ，則目前地球上兩者的數量比 $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ 約為下列何者？

(A) 2^{-9} (B) 2^{-7} (C) 2^{-5} (D) 2^{-3} (E) 2^{-1}

答 (B)

$$\left(\text{目前地球上兩者的數量比 } ^{235}\text{U}/^{238}\text{U} = \frac{\frac{1}{2} \left(\frac{5.94 \times 10^9}{0.704 \times 10^9}\right)}{\frac{1}{2} \left(\frac{5.94 \times 10^9}{4.47 \times 10^9}\right)} \approx 2^{-7} \text{。故選(B)。} \right)$$

3-5

守恆定律的普適性



學習概念

1

物體及物質間的交互作用遵循守恆律 (配合課本 p.124)

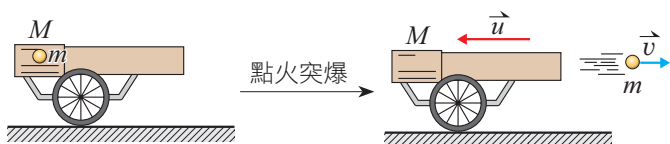
自然界中的物體因為各種交互作用而產生變化，作用前後，孤立系統的某些物理量總是保持守恆不變。

1. 總動量守恆：

若系統所受的外力和為零，則系統的總動量守恆。

例如：如下圖(a)所示，安裝在砲座內的子彈點火突爆。

$$\vec{p}_i = \vec{p}_f \quad 0 = m\vec{v} + M\vec{u} \Rightarrow \vec{v} = -\frac{M}{m}\vec{u} \quad (\text{兩者速度方向相反})$$



(a) (子彈+砲座) 的總動量守恆



(b) 花式溜冰表演者的總角動量守恆

▲總動量與總角動量守恆

2. 總角動量守恆：

若系統所受的外力矩和為零，則系統的總角動量守恆。

例如：如上圖(b)所示，花式溜冰表演者變換姿勢來改變身體旋轉速度。

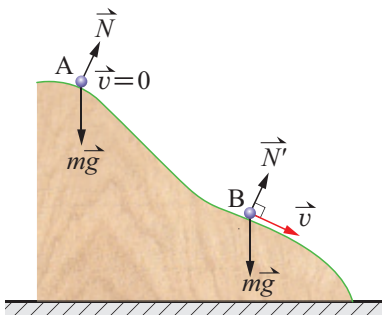
$$\vec{L}_i = \vec{L}_f \quad mr_1^2 \vec{\omega}_1 = mr_2^2 \vec{\omega}_2 \Rightarrow \vec{\omega}_2 = \frac{r_1^2}{r_2^2} \vec{\omega}_1 \quad \begin{cases} r_1 > r_2 \\ \omega_2 > \omega_1 \end{cases}$$

3. 總力學能守恆：

若系統僅受保守力作功，則系統的總力學能守恆。

例如：如圖(c)所示，小球在光滑曲面軌道上滑行，自位置 A → B，高度降低、速度增快。

$$ME_i = ME_f \quad \frac{1}{2}mv_A^2 + mgh_A = \frac{1}{2}mv_B^2 + mgh_B \quad \begin{cases} h_A > h_B \\ |\vec{v}_A| < |\vec{v}_B| \end{cases}$$



(c) 小球在光滑曲面軌道上滑行的總力學能守恆

▲總力學能守恆

4. 總能量守恆：

考慮所有形式的能量，能量存在的形式可能變來變去，或由一系統轉移到另一系統，但宇宙間的總能量保持不變，稱為能量守恆定律。

例如：如圖(d)所示，子彈射擊木塊，子彈嵌入木塊內，子彈的動能轉移為合體的動能與熱能。

$$E_i = E_f \quad \frac{1}{2} m_1 v_1^2 = \frac{1}{2} (m_1 + m_2) u^2 + H_{\text{熱能}}$$



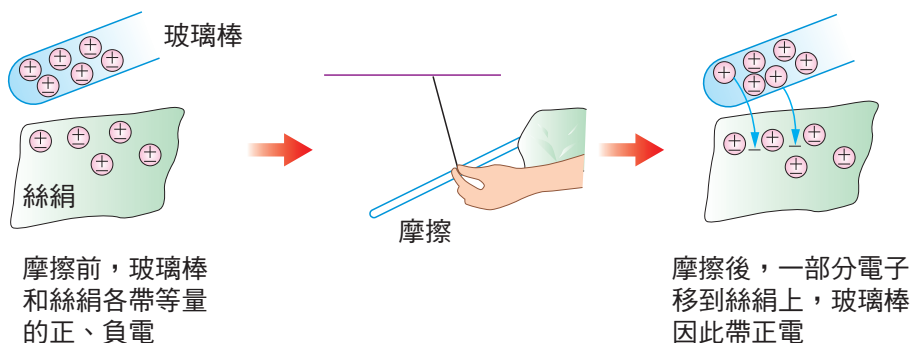
(d) (子彈+木塊) 的總能量守恆

▲總能量守恆

5. 總電荷數守恆：

若系統與外界無電荷交換，則系統的總電荷數守恆。

例如：如下圖所示，絲絹摩擦玻璃棒，絲絹得到電子帶負電，玻璃棒失去電子帶正電。



▲ (絲絹+玻璃棒) 的總電荷數守恆

$$Q_i = Q_f \quad 0 = (+2q) + (-2q)$$

6. 質能守恆：

「狹義相對論」中指出，質量也是能量的一種形式，在適當的情形下，質量 m 與能量 E 亦可互換，其關係式為 $E=mc^2$ (c 為真空中之光速)，稱為質能守恆。

例如：核反應過程中反應物有 1 公克的質量虧損，轉化成 9×10^{13} 焦耳的能量。

$$E = m \times c^2 \quad E = \left(\frac{1}{1000} \right) \times (3 \times 10^8)^2 = 9 \times 10^{13} \text{ J}$$

上述 1.~6. 這些守恆現象，是奠定科學的基石，更是自古以來科學家們的信念、信仰。

學習概念

2

守恆律對判讀實作結果之助益 (配合課本 p.124)

1. 適當利用守恆律，可以在進行實驗操作前，對可能結果做合理的推論。

例如：三個質量相等、大小相同的鋼球構成一組牛頓擺，進行正向完全彈性碰撞。開始時，偏移左側兩個鋼球，以初速度 v 入射碰撞右側一靜止的鋼球。

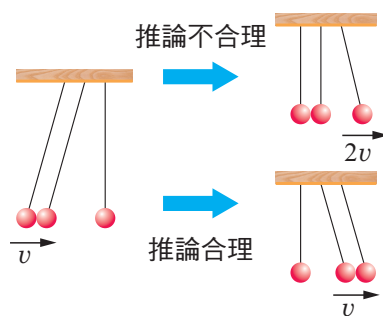
(1) 若推論「入射的兩鋼球最後呈靜止狀態，而被撞的鋼球則以速度 $2v$ 彈開。」

$$\textcircled{1} \text{ 根據動量守恆, } \begin{cases} p_i = m \cdot v + m \cdot v = 2mv \\ p_f = m \cdot 2v = 2mv \end{cases}$$

$$\therefore p_i = p_f \text{ (合理)}$$

$$\textcircled{2} \text{ 根據能量守恆, } \begin{cases} E_i = \frac{1}{2} m \cdot v^2 + \frac{1}{2} m \cdot v^2 = mv^2 \\ E_f = \frac{1}{2} m \cdot (2v)^2 = 2mv^2 \end{cases}$$

$$\therefore E_i \neq E_f \text{ (不合理)}$$



▲牛頓擺操作的推論

(2) 若推論「入射的兩鋼球最後其一呈靜止狀態，而另外兩個以速度 v 彈開。」

$$\textcircled{1} \text{ 根據動量守恆, } \begin{cases} p_i = m \cdot v + m \cdot v = 2mv \\ p_f = m \cdot v + m \cdot v = 2mv \end{cases}$$

$$\therefore p_i = p_f \text{ (合理)}$$

$$\textcircled{2} \text{ 根據能量守恆, } \begin{cases} E_i = \frac{1}{2} m \cdot v^2 + \frac{1}{2} m \cdot v^2 = mv^2 \\ E_f = \frac{1}{2} m \cdot v^2 + \frac{1}{2} m \cdot v^2 = mv^2 \end{cases}$$

$$\therefore E_i = E_f \text{ (合理)}$$

2. 利用守恆律，可以對某些實驗結果迅速做出判讀。

例如：科學家在探究 β 衰變的過程中，首先觀察到產生電子能量呈現「連續」分布。

(1) 假設衰變方程式為 ${}_Z^AX \rightarrow {}_{Z+1}^AY + {}_{-1}^0\beta$ (電子)

$$(2) \text{ 依 } \begin{cases} \text{能量守恆: } E_{{}_{Z+1}^AY} + E_{{}_{-1}^0\beta} = \text{const.} \\ \text{動量守恆: } 0 = p_{{}_{Z+1}^AY} + p_{{}_{-1}^0\beta} \Rightarrow p_{{}_{Z+1}^AY} = -p_{{}_{-1}^0\beta} \end{cases}$$

$$\text{又 } \boxed{p = \sqrt{2mK}} \xrightarrow{\text{粒子: } p \text{ 與 } K \text{ 有一定對應關係}} p_{{}_{-1}^0\beta} = \sqrt{2m \cdot K_{{}_{-1}^0\beta}} \Rightarrow \text{電子具單一動能值。}$$

\therefore 觀察有誤。

後來，科學家於 1930 年依據理論判斷，滿足該衰變方程式中必須還要有另一個質量很輕、無帶電的粒子，伴隨 β 衰變發生才能滿足質能守恆與動量守恆，最後的確發現此種新粒子，即反微中子 ${}_0^0\bar{\nu}$ 。

3-4、5

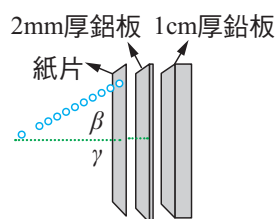
課後練習

單選題

(解析見解答本)

- (B) 1. 在右圖中，我們利用不同射線照射不同厚度的鉛板、鋁片和薄紙，目的為何？

- (A) 利用厚度來測定不同放射線的射程和速度
(B) 比較不同放射線的能量大小
(C) 觀察一共有哪幾種放射線
(D) 分辨哪一種放射線可以和鉛產生反應
(E) 檢測放射線的反射效果



- (A) 2. 一自南向北的射線束，穿過一自東向西的磁場，射線往上偏，則此射線為何？

- (A) α 射線 (B) β 射線 (C) γ 射線
(D) 中子射線 (E) 電子粒

- (C) 3. ${}_{90}^{231}\text{Th}$ 經 β 衰變成 X_1 ， X_1 經 α 衰變成 X_2 ， X_2 經 β 衰變成 X_3 ， X_3 又經 α 衰變成 ${}_{88}^{223}\text{Ra}$ ，則下列何組原子具有相同的化學性質？

- (A) ${}_{90}^{231}\text{Th}$ ， X_1 (B) ${}_{90}^{231}\text{Th}$ ， X_2 (C) ${}_{90}^{231}\text{Th}$ ， X_3
(D) ${}_{88}^{223}\text{Th}$ ， X_2 (E) ${}_{88}^{223}\text{Th}$ ， X_1

- (C) 4. 鐳原子核 (${}_{88}^{226}\text{Ra}$) 經一系列 α 衰變和 β 衰變後，最後變成穩定的鉛原子核 (${}_{82}^{206}\text{Pb}$)。已知當原子核發生 β 衰變時，必定伴生一個反微中子 ${}^0_0\bar{\nu}$ ，整個過程的核反應可以合寫成下式： ${}_{88}^{226}\text{Ra} \rightarrow {}_{82}^{206}\text{Pb} + x\alpha + y\beta + z{}^0_0\bar{\nu}$ ，式中 x 和 y 皆為正整數，則下列何者正確？

- (A) $x=6$ (B) $y=6$ (C) $2x-y=6$
(D) $2x+y=6$ (E) $2x-y=20$

- (C) 5. 核磁共振 (NMR) 技術已被廣泛應用於複雜分子結構的測定與醫學診斷等領域。已知只有質子數或中子數為奇數的原子核才有 NMR 現象，則下列哪組原子均可產生 NMR 現象？

- (A) ${}^{18}\text{O}$ 、 ${}^{31}\text{P}$ 、 ${}^{119}\text{Sn}$ (B) ${}^{27}\text{Al}$ 、 ${}^{19}\text{F}$ 、 ${}^{12}\text{C}$
(C) 週期表中 5A 族元素的原子 (D) 週期表中第一週期元素的原子
(E) ${}^{24}_{11}\text{Na}$ 放射一 β 粒子後所得的新原子核

- (B) 6. 當放射性質之放射強度減小至原來之 $\frac{1}{16}$ 時，所經過之時間是其半衰期的若干倍？
(A) 2 (B) 4 (C) 6 (D) 8 (E) 16
- (E) 7. 某放射性元素蛻變 $\frac{1}{3}$ 需時 30 天，今有此元素 1 莫耳，試問經過 10 天後尚剩下此元素若干莫耳？
(A) $(\frac{1}{3})^{1/3}$ (B) $\frac{1}{\sqrt{3}}$ (C) $\frac{1}{9}$ (D) $\frac{1}{27}$ (E) $(\frac{2}{3})^{1/3}$
- (C) 8. 放射性元素 A 衰變為 B 的半衰期為 4 秒，而 B 衰變為 C 的半衰期為 15 天，C 衰變為穩定的 D 半衰期為 1 秒，即 $A \xrightarrow{4 \text{ 秒}} B \xrightarrow{15 \text{ 天}} C \xrightarrow{1 \text{ 秒}} D$ ，若現有 100 克的 A，30 天後 B、D 各為幾克？
(A) 0 克、100 克 (B) 75 克、25 克 (C) 25 克、75 克
(D) 60 克、40 克 (E) 50 克、50 克

多選題

- (A B) 1. 下列關於「原子結構」之敘述，哪些正確？
E (A) 原子中大部分質量集中於核內
(B) 同位素之原子具有相同之核電荷
(C) 原子可獲得或失去電子，隨即改變其核電荷量值
(D) 中子為原子核中正電的質點
(E) 中子數與質子數之總和稱為核的質量
- (A C) 2. 下列對於「放射線」的敘述，哪些不正確？
D (A) 產生任何放射線唯一方法為元素進行核反應
(B) 放射線具電荷，也有呈中性者
(C) 放射線通過電場或磁場均產生偏移或偏轉
(D) 放射線均為高速荷電質點之流束
(E) γ 射線之速率等於光速，穿透物體的能力最大
- (B C) 3. 一放射性元素 A，經下列蛻變： $A \xrightarrow{\alpha} B \xrightarrow{\beta} C \xrightarrow{\alpha} D \xrightarrow{\beta} E \xrightarrow{\beta} F \xrightarrow{\alpha} G$ ，則下列各組哪些為同位素？
D (A) A、D (B) B、E (C) C、F (D) D、G (E) A、E

- (C E) 4. 某靜止原子核 ${}_Z^AX$ 經 β 衰變為另一原子核 ${}_{Z+1}^AY$ ，觀察到產生的電子動能並非定值。若假設衰變後的產物僅有原子核 ${}_{Z+1}^AY$ ，針對此衰變過程，大雄召集幾位同學進行結論解析：

大雄：如果靜止原子核 ${}_Z^AX = {}_0^1n$ （中子），則核反應式為 ${}_0^1n \rightarrow {}_1^1p + {}_{-1}^0\beta$ 。

宜靜：以動量守恆定律而言，產物 ${}_{Z+1}^AY$ 與產生的電子，動量量值相等、方向相反，而電子的動量有其對應的動能值，因此推論觀察電子動能並非定值，是錯誤的。

胖虎：實驗觀察電子動能並非單一值，依質能守恆定律，應當有另一尚未發現的粒子產生。

小夫：依據高一必修物理內容所述，承胖虎論述，該未知粒子就是微中子。

鐵雄：如果靜止原子核 ${}_Z^AX = {}_0^1n$ （中子），則核反應式為 ${}_0^1n \rightarrow {}_1^1p + {}_{-1}^0\beta + {}_0^0\bar{\nu}$ 。

有關各位同學的敘述，哪些正確？

(A)大雄 (B)宜靜 (C)胖虎 (D)小夫 (E)鐵雄

混合題

「放射性元素」的探索

碘是人體合成甲狀腺素的重要元素，如果體內碘含量不足，將造成甲狀腺功能低下。碘的原子序是 53，碘元素有多種同位素，但是只有碘-127 是穩定的，其他都具有放射性。若在甲狀腺中累積沒有放射性的碘，則會阻絕放射性碘進入人體積存在甲狀腺之中。碘-131 是人工核分裂產物，半衰期約 8 天，會經由衰變形成穩定的氙-131（原子序為 54），並放出 x 粒子與反微中子。各國核電廠會儲備碘片，並對電廠周邊住民發放碘片備用，一旦核災發生後，儘速服用碘片以減少甲狀腺對放射性碘-131 的吸收。



- (B) 1. 根據上文敘述，碘-131 經由衰變形成穩定的氙-131，放出的 x 粒子為何？
(A) α (B) β (C) γ (D) 質子 (E) 中子 (單選)
- (E) 2. 碘-131 的放射性強度與其原子核數量成正比，根據上文敘述，約需經歷多久時間，碘-131 的放射性強度會減弱為 $1/8$ ？（單選）
(A) 1 天 (B) 2 天 (C) 8 天 (D) 16 天 (E) 24 天
3. 碘片的成分是碘化鉀，根據上文判斷，碘化鉀的碘元素是碘-127 還是碘-131？並說明判斷理由為何。

答：

碘元素	判斷理由
<input checked="" type="checkbox"/> 碘-127 <input type="checkbox"/> 碘-131	服用碘-127，可以「阻絕放射性碘進入人體積存在甲狀腺之中」。

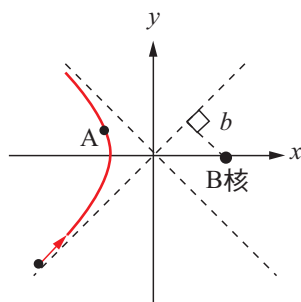
學習成效診斷

單選題

- (C) 1. 如右圖所示， α 粒子自遠處以速率 v 偏向入射金原子核 B，試問當 α 粒子最接近金原子核時（圖中 A 點），其速率為何？（A、B 兩點間距離為 L ）

(A) v (B) $\frac{L}{b} v$ (C) $\frac{b}{L} v$ (D) $\frac{b^2}{L} v$ (E) 0

（解析見解答本）



- (E) 2. 以 α 粒子及質子分別做散射實驗，其與金原子核最接之距離分別為 d_1 及 d_2 。若 α 粒子與質子均由靜止開始經相同之電位差加速後進行實驗，則 $\frac{d_1}{d_2}$ 比值為何？

(A) 4 (B) $\frac{1}{4}$ (C) $\frac{1}{2}$ (D) 2 (E) 1

- (E) 3. 承 2.，若 α 粒子與質子具相同之動量，則 $\frac{d_1}{d_2}$ 比值又為何？

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

- (A) 4. 在波耳氫原子模型中，電子由量子數 $n=3$ 躍遷到 $n=1$ 的基態時，其角動量減少若干？

(A) $\frac{h}{\pi}$ (B) $\frac{2h}{\pi}$ (C) $\frac{h}{2\pi}$ (D) $\frac{3h}{\pi}$ (E) $\frac{4h}{\pi}$

- (B) 5. 下列關於原子的敘述，何者最符合拉塞福模型或波耳模型的原始主張？

(A) 原子中有正電荷和負電荷 (B) 原子中的正電荷集中於原子核
(C) 原子質量的 10% 集中於原子核 (D) 原子核主要是由質子和中子構成
(E) 氫原子的光譜為不連續，是因為光具有粒子的特性

【107.指考】

- (B) 6. 假設波耳的氫原子模型中電子角動量量子化的描述，也適用於自由電子以不同速率在一個半徑固定之微小圓形金屬線圈中的運動。若自由電子沿此圓形金屬線圈運動的最低動能為 ε ，則自由電子在第一受激態時所具有的動能為下列何者？

(A) 2ε (B) 4ε (C) 6ε (D) 9ε (E) 12ε

- (E) 7. 在波耳的氫原子模型中，假設 E 為電子繞原子核的力學能， K 為電子的動能， L 為電子的角動量， n 為主量子數， h 為普朗克常數，下列關係式何者正確？

(A) $E=K$ (B) $E=2K$ (C) $E=-\frac{1}{2}K$ (D) $L=(n+1)\frac{h}{2\pi}$ (E) $L=n\frac{h}{2\pi}$

【103.指考】

- (B) 8. 依照波耳的氫原子模型，電子繞質子作等速率圓周運動。若已知電子的質量為 m ，氫原子在基態時，電子的角動量的量值為 h' ($h'=\frac{h}{2\pi}$ ， h 為普朗克常數)，其軌道半徑為 a_0 ，則下列敘述何者正確？

(A) 氫原子在基態時，電子的角速率為 $\frac{h'}{ma_0}$

(B) 氫原子在基態時，電子的靜電位能為 $-\frac{(h')^2}{ma_0}$

(C) 氫原子在基態時，電子的總能量為 $+\frac{(h')^2}{2ma_0}$

(D) 氫原子在第一受激態時，電子的總能量為 $+\frac{(h')^2}{ma_0}$

(E) 作等速率圓周運動的電子在質子處產生的磁場為零

- (A) 9. 質子與靜止的 α 粒子進行正向彈性碰撞，試問碰撞前後質子的物質波波長比為何？

(A) 3 : 5 (B) 4 : 5 (C) 4 : 3 (D) 5 : 3 (E) 5 : 6

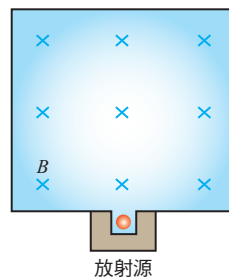
- (C) 10. 在波耳的氫原子模型中，電子可視為以質子為中心作半徑為 r 的等速圓周運動。考量物質波模型，當電子處於容許的穩定狀態時，軌道的周長必須符合圓周駐波條件。軌道半徑也隨著主量子數 n 而越來越大。設普朗克常數為 h ，當電子處於主量子數為 n 的穩定軌道的情形之下，電子的動量 p 量值為何？

(A) $p=\frac{nh}{2r}$ (B) $p=\frac{nh}{2\pi}$ (C) $p=\frac{nh}{2\pi r}$ (D) $p=\frac{nh}{2\pi}$ (E) $p=\frac{h}{2nr}$

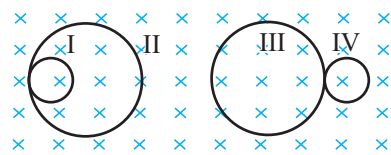
【102.指考】

- (B) 11. 在放射性元素前方加一均勻磁場 (B)，如右圖所示。當放射性元素放射出 α 射線與 β 射線後垂直射入均勻磁場中，測得 α 射線與 β 射線在均勻磁場中運動的曲率半徑分別為 R_1 和 R_2 ，則 α 射線與 β 射線的物質波波長比為多少？

(A) $R_2 : R_1$ (B) $R_2 : 2R_1$ (C) $2R_2 : R_1$
(D) $R_1 : R_2$ (E) $2R_1 : R_2$



- (D) 12. 如右圖所示，在垂直紙面向內的均勻磁場 B 中，若一個靜止的鐳核 ${}^{226}_{88}\text{Ra}$ 發生 α 衰變，其反應式為 ${}^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86}\text{Rn} + {}^4_2\text{He}$ ，則氡核 ${}^{222}_{86}\text{Rn}$ 和 α 粒子在此磁場中的路徑分別為何？



- (A) 氡核路徑是 I， α 粒子是 II
(B) 氡核路徑是 II， α 粒子是 I
(C) 氡核路徑是 III， α 粒子是 IV
(D) 氡核路徑是 IV， α 粒子是 III
(E) 氡核路徑是 IV， α 粒子是 II

- (E) 13. 已知某些遮蔽物對一般放射源所射出的粒子會造成如下的效果：

- (1) 若僅射出 α 粒子，則不能穿過一張紙。
(2) 若僅射出 β 粒子，則需用 5 mm 厚的鋁板才能完全擋住。
(3) 若僅射出 γ 射線（可視為粒子），則即使擋以 25 mm 厚的鉛板，也只能將粒子數約減少一半。

今將一個待測放射源放在一個偵測器的感應口前，此偵測器可量測 α 、 β 及 γ 的總粒子數，然後分別用一張紙、5 mm 厚的鋁板及 25 mm 厚的鉛板，擋在放射源和感應口

遮蔽物	每分鐘測得的總粒子數
無	402
紙（1 張）	362
鋁板（5 mm）	362
鉛板（25 mm）	178

的中間，各次測得的總粒子數如上表所示。則下列何者最有可能為此放射源所放出的粒子？

【104.指考】

- (A) α 粒子 (B) β 粒子 (C) α 及 β 粒子 (D) β 及 γ 粒子 (E) α 及 γ 粒子

- (B) 14. 在已知的 37 種碘的同位素中，只有碘-127 是穩定的，其他都具有放射性，例如碘-138 原子核可衰變成為氙原子核，並放出一未知粒子 X 及反微中子 $\bar{\nu}$ ，其核反應式為： ${}^{138}_{53}\text{I} \rightarrow {}^m_{54}\text{Xe} + {}^p_q X + \bar{\nu}$

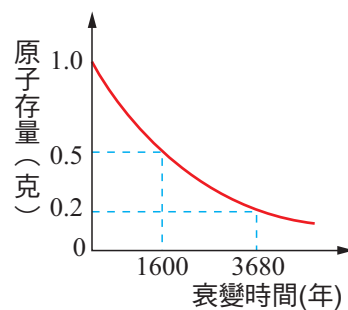
已知 ${}^{138}_{53}\text{I}$ 的質量數為 138，所帶基本電荷數為 53，則 $m+p+q$ 等於下列何數？

- (A) 136
(B) 137
(C) 138
(D) 139
(E) 140

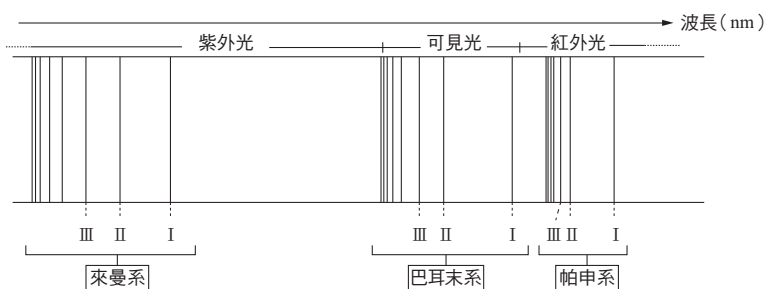
【107.指考】

- (D) 15. 某放射性元素其原子核之衰變關係線如右圖所示，下列各項有關「衰變」的敘述，何者正確？

(A) 半衰期為 3680 年 (B) 若經 4800 年，則重量減少量為最初之 $\frac{1}{8}$ (C) 經 6400 年，重量剩下為最初之 $\frac{1}{32}$ (D) 變為最初 $\frac{1}{10}$ 時，衰變時間為 5280 年 (E) 變為最初 $\frac{2}{5}$ 時，衰變時間為 1840 年



- (B) 16. 如右圖為氫原子光譜譜線的波長相對位置示意圖（波長絕對位置未依實際刻度繪製），並以 I、II、III 標示來曼系、巴耳末系、



帕申系中波長最長的三條光譜線，例如來曼系標示 I 處為電子從主量子數 $n=2$ 軌域躍遷至 $n=1$ 軌域所發射的譜線。下列何者為電子從主量子數 $n=5$ 軌域躍遷至 $n=3$ 軌域所發射的譜線？

【113.分科】

- (A) 帕申系標示 I 處 (B) 帕申系標示 II 處 (C) 巴耳末系標示 II 處 (D) 巴耳末系標示 III 處 (E) 來曼系標示 III 處

多選題

- (A D) 1. 若一靜止的原子核 ^{212}Bi 發生一次 α 衰變，則下列有關此次衰變的敘述，哪些正確？

【104.指考】

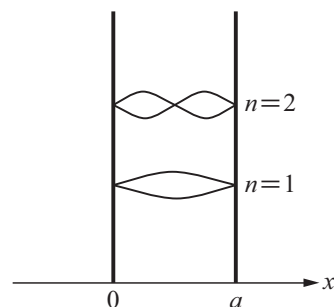
(A) 衰變前後，系統總動量守恆 (B) 衰變前後，系統總力學能守恆 (C) 衰變後所射出之 α 粒子與衰變後原子核的速率比值約為 1 (D) 衰變後所射出之 α 粒子與衰變後原子核的速率比值約為 52 (E) 衰變後所射出之 α 粒子與衰變後原子核的速率比值約為 105

- (A C) 2. 下列關於電子或中子行經雙狹縫而在屏幕上產生干涉條紋現象之敘述，哪些正確？

【112.分科】

(A) 電子通過雙狹縫而使屏幕上出現干涉條紋，證明運動中的電子具有波動性 (B) 把雙狹縫的其中之一縫封住時，電子的干涉條紋不可能發生變化 (C) 要使越高能的電子造成干涉條紋，所需雙狹縫的間距越小 (D) 電子是因為帶有電荷，所以才會產生干涉 (E) 以不帶電的中子入射，一定不會產生干涉

- (B D) 3. 一自由電子被侷限在位置坐標 $x=0$ 與 $x=a$ 之間作直線運動，而 a 為奈米尺度，因此該電子的物質波形成兩端為節點的駐波，右圖為 $n=1$ 與 $n=2$ 的駐波狀態。設 h 為普朗克常數、 m 為電子質量，則下列有關該電子物質波性質的敘述，哪些正確？ 【101.指考】



- (A) 該電子的物質波為電磁波
- (B) 該電子處於第 n 個駐波狀態時的物質波波長 $\lambda = \frac{2a}{n}$
- (C) 該電子處於第 n 個駐波狀態時的物質波波長 $\lambda = \frac{na}{2}$
- (D) 該電子處於第 n 個駐波狀態時的動能 $K = \frac{1}{2m} \left(\frac{nh}{2a} \right)^2$
- (E) 該電子處於第 n 個駐波狀態時的動能 $K = \frac{1}{2m} \left(\frac{2h}{na} \right)^2$
- (A C) 4. 動能為 E 的 α 粒子 ($Z=2$, $A=4$) 由無限遠處，向固定不動的金原子核 ($Z=79$, $A=196$) 作正面彈性碰撞，設 r 為碰撞過程中， α 粒子與金原子核的距離， k 為庫倫常數， e 為基本電荷的電量，並取 $r=\infty$ 時的電位能為零，若忽略重力，則下列敘述哪些是正確的？
- (A) α 粒子在碰撞過程中，在 r 處受到 $\frac{158ke^2}{r^2}$ 的排斥力
- (B) α 粒子在碰撞過程中，在 r 處的電位能為 $\frac{158ke^2}{r^2}$
- (C) α 粒子在碰撞後，其運動方向與原入射方向相反
- (D) α 粒子在碰撞過程中的最小動能為 $\frac{1}{2} E$
- (E) α 粒子在碰撞過程中的最小距離為 $\frac{158ke^2}{E}$
- (B D) 5. 釷 (Po) 是具有放射性的元素，其質量數 $A=210$ ，原子序 $Z=84$ ，它放射出的 α 粒子的動能 (百萬電子伏特)，其衰變式可寫成為 $\text{Po} \rightarrow \text{Y} + \alpha$ 。下列敘述中哪些正確？

- (A) Y 的 $A=208$, $Z=80$
- (B) Y 的 $A=206$, $Z=82$
- (C) 衰變前 Po 原子的質量等於衰變後 Y 原子的質量與 α 粒子的質量之和
- (D) 衰變後 Y 與 α 的質量中心的位置與衰變前 Po 的質量中心位置相同
- (E) 對 Po 的質量中心而言，衰變後 Y 是靜止的

非選題

波耳的氫原子模型假設電子以質子為圓心作等速率圓周運動，已知氫原子的電子在基態時，圓周運動的半徑為 $5.3 \times 10^{-11} \text{ m}$ 。試計算下列各問題：

1. 此電子所受靜電力的量值。

答： $8.2 \times 10^{-8} \text{ N}$

2. 此電子作圓周運動的速率。

答： $2.2 \times 10^6 \text{ m/s}$

3. 此電子作圓周運動所產生的電流。

答： $1.1 \times 10^{-3} \text{ A}$

4. 此電子作圓周運動所產生的電流在圓心形成的磁場量值。

答： 13 T

混合題**兩氦核之間的「核融合反應」**

氦核對氦核的融合反應式為 ${}^2_1\text{H} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^3_2\text{He} + {}^1_0\text{n}$ 兩氦核之間的距離必須小於 10^{-14} m ，兩者之間的核力才能克服庫倫斥力。

- (B) 1. 試問在此距離時，兩者之間的電位能為何？（單選）

(A) 1.15×10^{-14} (B) 2.3×10^{-14} (C) 4.6×10^{-14} (D) 2.3×10^{-15} (E) 4.6×10^{-15}

- (D) 2. 兩氦核需有足夠的動能以克服此位能，若每個氦核的動能以 $\frac{3}{2}kT$ 來估算，則所需的溫度為若干？（單選）

(A) 5600 (B) $5.6 \times 10^4 \text{ K}$ (C) $5.6 \times 10^6 \text{ K}$ (D) $5.6 \times 10^8 \text{ K}$ (E) $5.6 \times 10^{10} \text{ K}$

3. 現今科學家們研發極具可能的核融合反應是 D-T 反應： ${}^2_1\text{H} + {}^3_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^1_0\text{n} + 2.8 \times 10^{12} \text{ J}$ 。依照目前地球上的含量粗估，大約有 10^{17} kg 的 D 及 10^{12} kg 的 T，而 D、T 的原子量分別為 2、3。假設台電公司估算一個家庭一年用電量約 4000 度，試問以地球上的資源含量計算，大約可以供應多少戶家庭一年用電？

答： $3.89 \times 10^{16} \text{ 戶}$



夜裡的美麗精靈——磷光

家中臥室的床頭櫃上常擺放一具夜光效果的鬧鐘，鬧鐘的指針會在晚間熄燈後繼續散發綠色的光輝（其實白天也發出，只是白天太亮，看不到而已），藉此，臥室主人在黑暗中仍看得到時間，隨後亮光將逐漸轉暗。



▲ 常見的夜間磷光現象



▲ 磷光現象的應用

具夜光效果的物質於照光之後仍會在黑暗中繼續發光，此現象叫做磷光（phosphorescence）。生活中常使用的磷光物質有硫化鋅（ ZnS ）及鋁酸鋇（ SrAl_2O_4 ）兩種，而後者在發光亮度及持久性上都遠勝於前者，所以應用層面較廣，唯其價格也高出不少。鬧鐘的指針及刻度上因為塗有一層磷光物質，故具有夜光效果。

科學家對磷光現象的觀察，深入研究，發現透過「量子論」可以獲得圓滿解釋：磷光物質吸收短波長輻射（如游離輻射）後，會放出長波長輻射（如可見光）。

科學的研究與發展不只滿足了人們對於大自然的好奇心，也帶來了生活上的便利與改進。某些磷光物質與氧分子特別「投緣」，所以每當氧分子登門造訪時，磷光物質常常會很大方地將暫時儲存的過渡能階能量直接送給氧分子，讓它帶走。如此，就使得其本身的磷光亮度變暗，而且也縮短了磷光持續發光的時間。這看似是缺點，卻引領科學家想出了一個全新的應用點子：將之用於檢測傷口的癒合程度！

當傷口癒合良好時，身體會在該處提供較多氧氣進行新陳代謝，磷光就比較暗；反之，傷口癒合不佳時，該處的供氧量較少，磷光相對比較強。醫學上藉由檢視磷光的亮度，可予以評估傷口的癒合程度。

（ A B ） 1. 下列有關「磷光現象」的敘述，哪些正確？

E

(A)磷光就是電子躍遷，發出電磁波的現象 (B)磷光物質並非主動發光體，而是光致發光的現象，又本身並不放出熱量，是一種冷發光 (C)磷光物質極易與空氣中的氮分子結合 (D)磷光現象就是俗稱的螢光現象 (E)磷光現象必須以量子論予以解釋

(B C) 2. 下列有關「磷光現象」的應用，哪些錯誤？

- (A) 夜間行路時常會身穿一件具有發光作用的衣服，這是磷光現象的應用
- (B) 小民有一刀傷傷口，幾天後發現傷口呈黯淡顏色，醫生判定傷口癒合不佳
- (C) 墳墓區常見有鬼火，是屍骨發出硫化鋅或鋁酸鋇
- (D) 白天在太陽下曬製鹹魚，到了晚上，也可以看到魚身上發出暗綠色的磷光
- (E) 鬧鐘的指針塗有一層磷光物質，白天亦會有亮光

3. 螢光棒的放光，是螢光分子處於受激態釋放電磁波躍遷回到基態的現象。不過螢光棒的放光是吸收化學反應的能量升至受激態，這種機制稱為「化學放光」。假定一個螢光分子經化學反應產生的能量為 3.6×10^{-19} 焦耳，試問螢光棒放光分子的波長約為若干？又螢光是否為可見光？

答：(1) 5511 Å；(2) 是可見光

4. 依據內文所述，試以「量子論」解釋磷光現象。

答：(1) 當周遭環境光線充足時，磷光物質的電子會吸收環境中的光子而躍遷至受激態，接著躍遷到一個能量稍低的過渡能階，並停留一段時間。
(2) 承(1)，電子從過渡能階躍遷回到基態，並放出磷光光子。

NOTE