

實驗 23 氫原子光譜與浦朗克常數測量

最終修訂日期：2017.5.28，最終修改者：戴明鳳

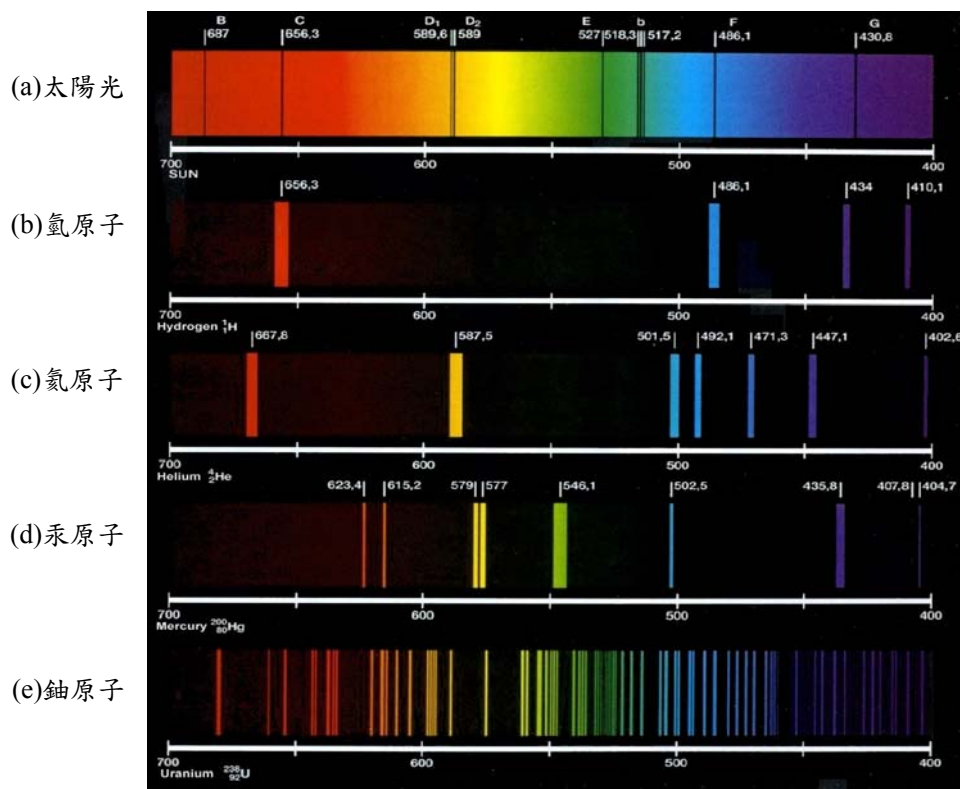


圖 1 各種光源的發光光譜，由上而下分別為(a)太陽光的連續光譜，(b)氫原子，(c)氦原子，(d)汞原子和(e)鈾原子等的不連續光譜。

(圖片來源：<http://library.thinkquest.org/19662/low/eng/model-bohr.html>)

學門領域：近代物理實驗

關鍵字(Keywords)：氫原子光譜、原子模型、原子能階、量子化、浦朗克常數(Planck's constant)、巴爾麥系(Balmer series)、多狹縫干涉

一、目的

經由觀測氫原子發光譜線中的巴爾麥系列(Balmer series)譜線中最明顯的幾條譜線，以探討下列兩項近代物理觀念：

- (1) 氫原子中電子能階和其電子能量的量子化現象。
- (2) 根據氫原子光譜線的實驗結果計算量子化常數“ h ”浦朗克常數(Planck's constant)的數值。

二、原理

1. 波爾模型與電子能階量子化

1913年，拉塞福(E. Rutherford)證實原子核的存在，於是假想氫原子內的電子會循半徑原為 r 的圓形軌道，繞原子核做圓周加速運動。根據當時的古典力學理論認為：「因原子核外圍帶負電荷的電子和原子核中帶正電荷的質子間具吸引的庫倫電性作用力，會使電

子做圓周變加速運動。並會放出與其軌道運動相同頻率的輻射波，導致電子能量逐漸輻射逸失變小，因而使電子沿著螺旋線路徑繞向原子核，致使電子繞行的軌道半徑逐漸縮小。」故推論氫原子所放出的輻射應為連續光譜，但實驗結果卻顯示如封面圖 1 照片所示的不連續光譜。

因當時的古典理論無法解釋(1)氫原子具有不連續光譜線，及(2)電子可以持續繞著原子核穩定地運動等兩個實驗現象；因此，波爾(N. Bohr)提出了“氫原子模型”。波爾假設：「電子的軌道運動參數必須滿足在某些不連續特定值之一的條件下，電子軌道才能穩定運行。」如同在一條具有張力的繩線上行進的力學波，若欲在繩上形成穩定的駐波現象，則須達到「繩波之半波長的整數倍剛好等於繩長」的特定條件，能符合此條件的繩波波長為一些不連續的特定數值。

物理量因特定條件，而無法具有連續性的變化值，僅能以特定的不連續值存在，這種情形即為“量子化(Quantization)”現象。波爾並進一步假設，氫原子只有在其電子由某一穩定態(E_i)轉移到另一穩定態(E_f)時，才會放出(或吸收)輻射，所放出(或吸收)的光子能量等於這兩個狀態的能量差 ΔE ：

$$\Delta E = E_i - E_f = hf = \frac{hc}{\lambda} \quad (1)$$

式中的 h 為浦朗克常數， c 為光速， λ 為波長， f 為頻率。

根據古典物理理論，電子繞氫原子核做圓周運動所需的向心力來自庫倫靜電力的作用；在此作用與運動下，電子軌道運動的各種物理量如表 1 所列[1]。因此，若電子繞行的軌道半徑 r 為已知，則軌道運動的其他物理量 K, U, E, v, f, p, L 均可根據表 1 公式計算得。同理，若其中任一物理量為量子化，則其餘各物理量也應全部都是量子化。

表 1 電子繞氫原子核做圓周運動時的相關物理量

物理量	物理量公式	物理量	物理量公式
所受向心力	$F = m \frac{v^2}{r} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2}$	速度	$v = \sqrt{\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 mr}}$
動能	$K = \frac{1}{2} mv^2 = \frac{1}{8\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r}$	圓周運動的繞行頻率	$f = \frac{v}{2\pi r} = \sqrt{\frac{e^2}{16\pi^3 \epsilon_0 mr^3}}$
位能	$U = V(-e) = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r}$	動量	$p = mv = \sqrt{\frac{me^2}{4\pi\epsilon_0 r}}$
總能量	$E = K + U = -\frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r}$	角動量	$L = mvr = \sqrt{\frac{me^2 r}{4\pi\epsilon_0}}$

波爾假設中，認為電子的軌道半徑應為量子化，而其量子化的條件是由角動量的大小 L 為 $h/2\pi$ 的整數倍所決定[1]，即

$$\text{電子軌道量子化條件： } L = pr = n \frac{h}{2\pi} \quad (2)$$

式中 n 為主量子數，必為正整數；其它各常數意義及在 SI 單位制下的數值分別為[2、3]

$$e = \text{電子的電荷量} = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$$

$$m = \text{電子質量} = 9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$$

$$\epsilon_0 = \text{真空中的介電係數} = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$$

$$h = \text{浦朗克常數} = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$$

因電子的軌道角動量子化，**氫原子的總能量值也應是量子化**，故根據表 1 公式及(2)式可推導出能量量子化的關係式為[1]：

$$E_n = -\frac{me^4}{8\epsilon_0^2 h^2} \frac{1}{n^2} \quad (3)$$

當 $n = 1$ ，則 $E_1 = -13.6 \text{ eV}$ ($1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$) 為能量最低的狀態，稱為氫原子的基態能量； $n = \infty$ 時， $E_\infty \rightarrow 0$ ，則為氫原子中的電子完全脫離原子束縛後，不具動能時的總能量值。故原子中電子的**束縛能(binding energy)**或**游離能(ionization energy)**定義為「將電子由基態游離至自由且不具動能的狀態所需供給的能量」；**氫原子的游離能為 13.6 eV**。氫原子的量子化能階雖然可以根據波爾模型粗略地計算得，但是精確的能階值應該根據量子力學，經由電子的波函數才能算出其精確的能階，有興趣的同學可參考資料[4]。

2. 量子化能階躍遷與不連續發光譜線間的關係

原子中的電子若處於高能量狀態，則為不穩定態，通常僅能短暫地存在，故屬暫存態。因此，電子會很快地由高能量軌道 n_1 躍遷(transit)至較低的能量軌道 n_2 ($n_1 > n_2$)，同時放出「具特定頻率」的光子。所放出之特定光子的能量剛好是電子變遷前後所處的兩個能階 E_{n_1} 和 E_{n_2} 的能量差

$$\Delta E = hf = \frac{hc}{\lambda} = E_{n_1} - E_{n_2} \quad (4)$$

式中， $c \sim 3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$ (定義值為 $2.99792458 \times 10^8 \text{ m/s}$) 為光速， λ 為所放出之光子的波長。將(3)式代入(4)式，可得：

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{me^4}{8\epsilon_0^2 h^3 c} \left(\frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2} \right) = R \left(\frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2} \right) \quad (5)$$

式中，常數 $R \equiv me^4/(8\epsilon_0^2 h^3 c)$ 稱為雷得堡常數(Rydberg constant)。躍遷後之能階的量子數 n_2 不同的話，可獲得不同系列的譜線組；科學家特別給予這些系列譜線不同的名稱，如

(1) $n_2 = 1$ 的線譜稱作萊曼系(Lyman series)，

(2) $n_2 = 2$ 者則稱巴爾麥系(Balmer series)，

(3) $n_2 = 3$ 者為帕申系(Paschen series)，

(4) $n_2 = 4$ 者布拉開系列(Brackett series)

如表 2 所列和圖 2 與圖 3 所示之能階變遷示意圖。表 3 則列出氫原子發射光譜圖中的巴爾曼系列譜線圖和相關物理量之數據。

表 2 氫原子發光光譜中常見的譜線系列

躍遷後之能階量子數 $n_2 (< n_1)$	譜線系列名稱	譜線波長範圍
$n_2 = 1$	萊曼系列(Lyman series)	紫外光
$n_2 = 2$	巴爾麥系列(Balmer series)	可見光+紫外光
$n_2 = 3$	帕申系列(Paschen series)	紅外光
$n_2 = 4$	布拉開系列(Brackett series)	紅外光
$n_2 = 5$	普芬德系列(Pfund series)	紅外光

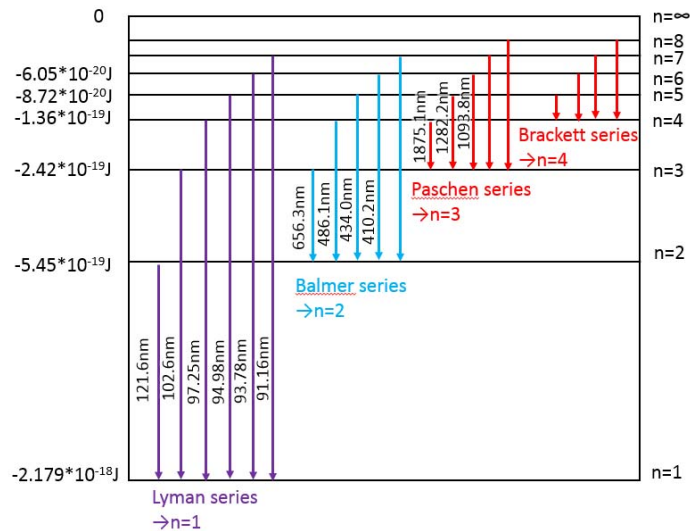
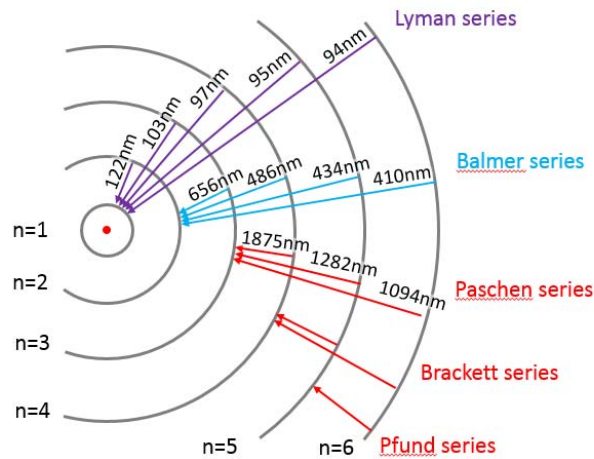


圖 2 氫原子能階與電子躍遷的能量量子化圖。變遷後的能階主量子數 $n_2 = 1$ 時為萊曼譜線系； $n_2 = 2$ 為巴爾麥譜線系； $n_2 = 3$ 帕申譜線系； $n_2 = 4$ 布拉開譜線系； $n_2 = 5$ 普芬德譜線系。

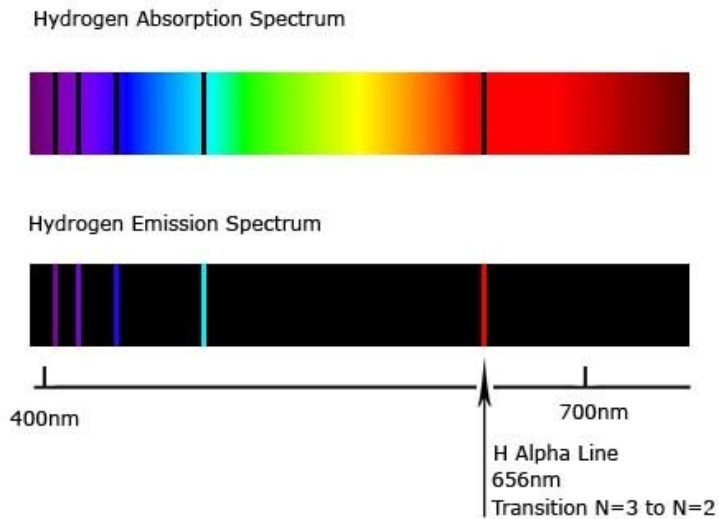


圖 3 呈現於可見光區段的氫原子吸收和發射光譜線圖。下圖的發射光譜線是巴爾麥譜線系列，是被激發到高能階的電子因不穩定，而從不同的高能階態躍遷回到主量子數 $n_2 = 2$ 的低能階態時，所發出之單色光的光譜線。自右到左，分別為

- (1) $n_1 = 3 \rightarrow n_2 = 2$ 的 H_α 譜線， $\lambda = 656.3 \text{ nm}$ 紅光；
- (2) $n_1 = 4 \rightarrow n_2 = 2$ 的 H_β 譜線， $\lambda = 486.1 \text{ nm}$ 淺藍光；
- (3) $n_1 = 5 \rightarrow n_2 = 2$ 的 H_γ 譜線， $\lambda = 434.0 \text{ nm}$ 藍光；和
- (4) $n_1 = 6 \rightarrow n_2 = 2$ 的 H_δ 譜線， $\lambda = 410.2 \text{ nm}$ 紫光。

表 3 氫原子發射光譜圖中的巴爾曼系列譜線圖和相關物理量之數據彙整

氫原子發射光譜圖中的巴爾曼系列譜線			
Hydrogen Emission Spectrum			
譜線名稱	主量子數變化	譜線波長 λ	譜線顏色
H_α	$n_1 = 3 \rightarrow n_2 = 2$	656.3 nm	紅色光
H_β	$n_1 = 4 \rightarrow n_2 = 2$	486.1 nm	淺藍色光
H_γ	$n_1 = 5 \rightarrow n_2 = 2$	434.0 nm	藍光
H_δ	$n_1 = 6 \rightarrow n_2 = 2$	410.2 nm	紫光

3. 浦朗克常數測量

因 $n_2 = 2$ 的巴爾麥系譜線的波長範圍均在可見光範圍內，如圖 1(b)所示的譜線組，故可以簡單地使用光柵，將此系列譜線所發出的混合光源，進行分光；再以肉眼直接判讀每一譜線的顏色及鑑定其波長。取 $n_2 = 2$ ，將所測得的波長值代入(5)式中，即可算出浦朗克常數。

以光柵測定譜線波長是利用多狹縫干涉分光的功能(參考光學實驗)。當一束光通過兩鄰近狹縫，到達空間某一點(如觀測螢幕上)的光程差若為波長的整數倍時，光線會在此空間點(螢幕上的某一點)產生建設性的干涉亮點，通常將這種干涉紋稱為“主干涉紋”。

常用的光柵可分為穿透式與反射式兩種，本實驗使用穿透式光柵。假設平行光垂直射入光柵片，則產生主干涉紋的條件為[5]：

$$\Delta x = d \sin \theta = m\lambda \quad (6)$$

式中 Δx 為入射光經相鄰的兩狹縫後，所得之相鄰兩光束的光程差， d 為相鄰兩狹縫中央點間的距離。 θ 為光譜線與入射線間的夾角。正整數 m 的定義為由光柵正前方開始測量同一個光譜線出現的次序； $m=1$ 稱為第一級光譜， $m=2$ 稱為第二級光譜，餘此類推。

光柵每單位長度的狹縫數(狹縫密度)越多，則觀測到的分光譜線愈清晰、明亮。一般以鑑別率(resolution)描述光柵片的品質，其定義為[6]：

$$\frac{\lambda}{\Delta\lambda} = mN \quad (7)$$

式中 m 指第 m 級光譜， N 為受光範圍內的狹縫總數。鑑別率高表示可以分辨很小的波長差值 $\Delta\lambda$ ，意即可以分辨波長很接近的兩條譜線。

三、儀器

- (1) 光譜儀機台：一座
- (2) 氫氣放電燈管含高壓電源供應器：一組
- (3) 木塊：一片，用以墊高放電管的高度，以使光譜儀機台上的物鏡鏡頭能對準到放電管內中段發光強度較強且均勻的光源部分。
- (4) 三稜鏡：一個
- (5) 三稜鏡固定夾：一個
- (6) 玻璃材質光柵片：光柵線密度 600 lines/mm 一片
- (7) 塑質光柵膜：光柵線密度分別為 500 lines/mm 和 1000 lines/mm 各一片
- (8) 放大鏡：讀取光譜儀機台上之角規游標尺刻度用
- (9) 白光 LED 小桌燈：含 USB 轉接頭

圖 4 呈列出本實驗器材的實體照片。**注意：放電管是以高壓電激發燈管內的氣體產生高強度發光光源；故啟動放電管時，請勿觸摸到放電管的高電壓電極及灼熱的氣管。**

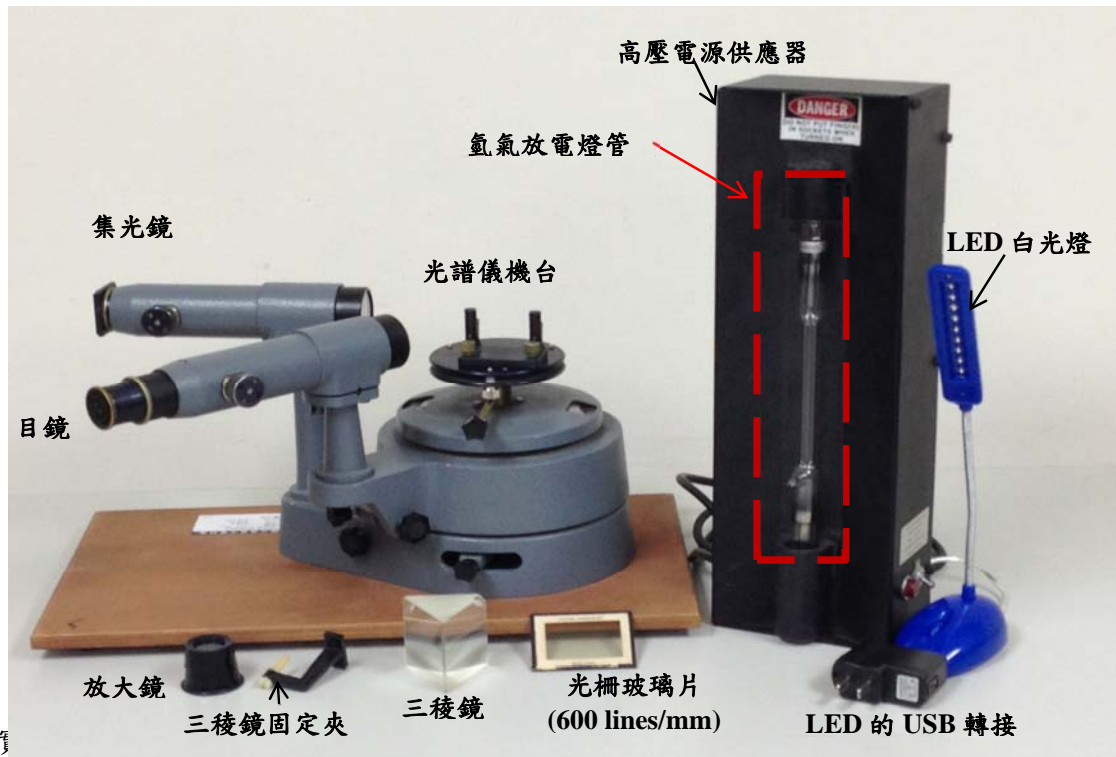


圖 4

熱的氣管。

四、實驗前預報需先估算的實驗數據

1. 實驗前，請先利用下列光柵繞射公式，估算每一譜線的繞射角度：

$$d \sin \theta = m \lambda \Rightarrow \sin \theta = m \lambda / d \Rightarrow \theta = \sin^{-1}(m \lambda / d)$$

式中 d 為相鄰兩狹縫中央點間的距離???, $m = 1, 2, 3 \dots$ 則表示不同級的繞射。如表 2 氫原子巴爾莫譜線系列(Balmer series)中 $H_{\alpha}, H_{\beta}, H_{\gamma}, H_{\delta}$ 譜線的波長分別為 656.3, 486.1, 434.0, 410.2 nm，將之帶入光柵繞射公式中，即可計算出。以利實驗時，預先知道可在哪些角度範圍內，快速找到正確的繞射角度，以期能縮短實驗時間。

2. 實驗中，仔細觀測應可以看到下列九條譜線：參見表 1，表 2，圖 3，和圖 5 的氫原子光譜線圖。

- (1) 第一級繞射($m = 1$)中的 $H_{\alpha}, H_{\beta}, H_{\gamma}, H_{\delta}$ 四條譜線組；
- (2) 第二級繞射($m = 2$)中的 $H_{\alpha}, H_{\beta}, H_{\gamma}$ 三條譜線組；
- (3) 第三級繞射($m = 3$)中的 H_{α} 和 H_{β} 兩條譜線組。

若探討的繞射級別 m 越高，則可觀察到的 $H_{\alpha}, H_{\beta}, H_{\gamma}, H_{\delta}$ 四條光譜線的繞射角度 θ ，也隨之較大；導致部分短波長的譜線在 $m = 2$ 和 3 較高級的繞射情況下，因繞射角 θ 大於 $\pm 90^\circ$ ，以致無法於光譜儀觀察囉。

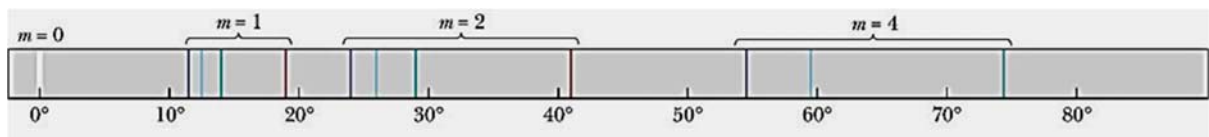


圖 5 氫原子的發射光譜(H-atomic emission spectrum)譜線

3. **預習問題：**假如光柵的線條密度為 1000 條/mm，請估算一下利用繞射公式中 $m=1$ 的繞射譜線，波長為 500nm 及 600nm 光波分開的角度，假設入射方向均和光柵平面垂直。假如光柵密度加倍，二者分開的角度變成多少？
4. **思考問題：**利用汞燈光譜實驗中所得已知光譜譜線波長對應光譜儀本體上的角度，求出未知氫燈譜線的波長並計算其誤差。

五、實驗步驟

A. 實驗前的儀器注意事項

1. 光譜儀機台的安裝與校準：光譜儀實驗機台如圖 6 所示

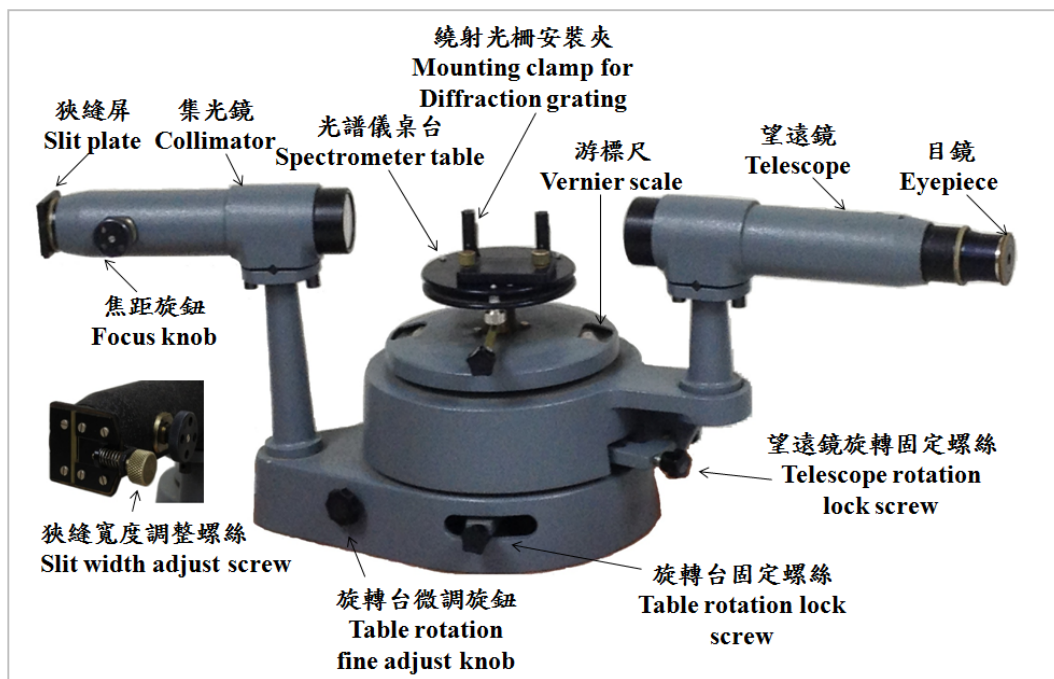


圖 6 光譜儀實驗機台各組件名稱。

- (1) 調整「目鏡」(eyepiece)，使能清楚看到鏡內的十字標記。
- (2) 透過「望遠鏡」(telescope)觀看前方遠物，調整焦距旋鈕(Focus knob)移動目鏡的位置，使能清楚看到遠方景象。
- (3) 調整「狹縫寬度調整螺絲」(Slit width adjust screw)使「集光鏡」前的狹縫寬度達到適當值。
- (4) 旋轉望遠鏡直接面對集光鏡，即使兩鏡相互為180度。
- (5) 調整集光鏡的焦距(必要時可旋轉望遠鏡)，直至透過望遠鏡可看清處地瞄準鏡內的狹縫為止。**注意：此時不可再變動望遠鏡的焦距。**
- (6) 旋緊望遠鏡的旋轉「固定螺絲」，使用「微調旋鈕」旋轉望遠鏡，使得十字標記的垂直線(或中心)與狹縫的某一邊緣切齊。調整狹縫的寬度，以便得到清晰明亮的影像。
- (7) 之後的實驗測量繞射角時，建議調整十字標記與狹縫的固定邊緣切齊，因此太狹窄的狹縫是沒有必要的。

2. 架設氫氣放電管及調整入射光譜儀內的光束

- (1) 如圖7所示，將氫氣放電管置於光譜儀機台之集光鏡管(物鏡)的狹縫裝置前。可以木塊墊高放電管高度，以使物鏡鏡頭能水平地對準放電管內中段發光強度較強且均勻的光源部

分。

- (2) 將放電管安裝在高壓電源器上，打開電源開關(注意高電壓!千萬不可觸摸到電極及放電管)，氫氣管逐漸發亮，即得氫的放射光源。
- (3) 將光譜儀的望遠鏡調整至狹縫的正前方，即光譜儀上標示角度 180° 處的位置。
- (4) 調整光源位置，並使光源儘量靠近狹縫入口，使入射光水平地射入準直狹縫內。
- (5) 調整狹縫寬度，準直透鏡及望遠鏡的目鏡，直到在望遠鏡中可看到清晰的狹縫像。



圖 7 氫原子光譜實驗儀器架設圖

B. 熟悉光譜儀上之角規游標尺結構和判讀法：

(1) 角規游標尺結構：光譜儀機台上的角度測量儀為使角度測量能夠提供更高的精準度和準確位數，故如圖 8 所示使用角規游標尺，其設計原理和使用方法類似一般的直尺式游標尺和螺旋測微器。故角規游標尺結構也分主尺和副尺：

- (a) 主尺：位於下方，固定不能移動；總共有 720 格一長一短交互配置的刻度，每一刻度為 $30'$ (角分)，即 0.5° ，角規繞一圈總計為 360° 。
- (b) 副尺：位於上方，可游動；共 30 格刻度，副尺從標示 0 刻度位置移動到 30 的刻度時，則主尺會隨之移動 1 格刻度；意即副尺 30 格的移動相當於 0.5° 。故副尺一格相當於 $1'$ (角分)。

總結：角規 1° (度) = $60'$ (角分)； $1'$ (角分) = $60''$ (角秒)；角規上可移動的副游尺，則每一小格為 $1'$ (角分)，故 30 格為 $30'$ (角分)，即為 0.5° (度)。

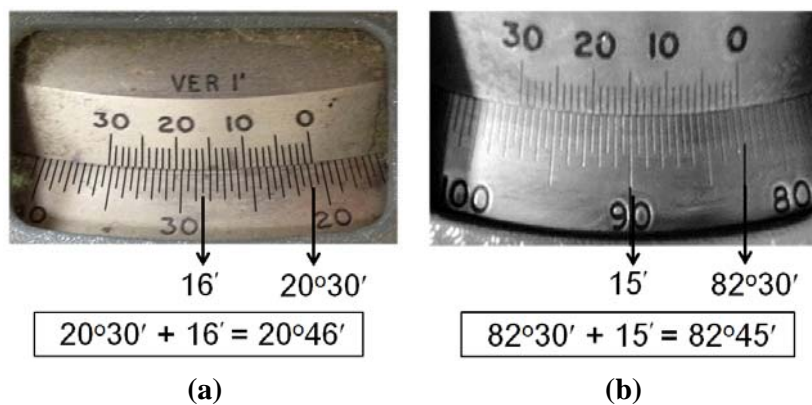


圖 8 光譜儀基座上的角規游標尺。

(2)角規游標尺的角度判讀法：和直式游標尺與螺旋測微器的讀取方法相同，若不易觀察角規上的刻度，可以藉由所附的「放大鏡」幫助讀取刻度，

(a) 先觀察角規副尺標示零的刻度線位於下方主尺角度盤上哪兩個度數之間，如果零刻度是介於兩條線之間，則讀取較小的度數。以圖 8(a)為例，游標副尺的零刻度位於角度盤的 $20^{\circ}30'$ 和 21° 之間，因此讀取角度值為 $20^{\circ}30'$ 。圖 8(b)的副游尺位在 $82^{\circ}30'$ 和 83° 之間，故取 $82^{\circ}30'$ 。

(b) 再觀察副尺上哪一條刻度線和主尺的刻度線最對齊。圖 8(a) 為 $16'$ ，圖 8(b)為 $15'$ 。

(c) 最後，將(a)和(b)步驟所讀取的刻度值相加，即得精確的角度。

圖 8(a)例子所得角度為 $20^{\circ}30' + 16' = 20^{\circ}46'$ 或 $20.50 + 16 \times 1/60$ 度 = 20.77° ；

圖 8(b) 則為 $82^{\circ}30' + 15' = 82^{\circ}45' = 82.75^{\circ}$ 。

C. 手持光柵片直接觀測氫原子的發光譜線

1. 開始測量前，請務必依上述所列實驗步驟調整光譜儀和放電管的位置。
2. 先直接手持 600 lines/mm 玻璃光柵片，將之擺放在眼睛前，即可以直接觀察氫氣放電管的發光譜線。通常放電管中段的粉紅區域才能觀察到比較完整的氫原子光譜。
3. 接著請以氫氣放電管為軸心，讓光柵片對著軸心旋轉，以不同角度觀察光譜的變化，及不同的光譜線。旋轉方式有二：
 - (1) 以光柵面的法線為軸線旋轉光柵片：視對應於光譜儀的光柵平台是否正確；
 - (2) 平行光柵狹縫旋轉：對應於光線是否垂直入射光柵。
4. 利用光柵光譜儀觀察氫原子光譜時，如果發現左右兩邊的繞射光高度不一樣，可以調整光柵平台，使左右兩邊的繞射光高度相同。
5. 手機的照相機通常對紫光的感光度較人眼靈敏，故可利用手機幫忙找 H_{δ} 的紫色譜線。

D. 以光柵片精準地觀測氫原子的發光光譜

1. 將玻璃光柵片安置于光譜儀機台上，調整光柵位置，使光柵面與準直管互相垂直，實驗架設如圖 7。
2. 轉動望遠鏡，尋找巴爾麥系譜線(如圖 9)。由於光源強度的限制，第一、二級線譜可看到三條譜線，第三級只能看到一條。
3. 準確讀出第一級氫光譜巴爾麥譜線與入射線的夾角 θ ，角度讀值應準確至 $1/60$ 度。
4. 讀出第二級氫光譜巴爾麥譜線與入射線所夾的角度。
5. 在狹縫正前方，向左、右方向各重覆測量兩次。每次望遠鏡再調整至狹縫正前方時，必須檢查光譜儀上的刻度。
6. 由所測得之角度計算巴爾麥系各譜線之波長，並與封面照片所附波長值作比較。
7. 將各譜線之波長值代入(5)式算出 R 值，並計算實驗平均標準差，然後由 R 之平均值算出浦朗克常數(及其平均標準差)。
8. 以白光 LED 燈取代氫光源，觀察白光經光柵繞射之後所形成的光譜

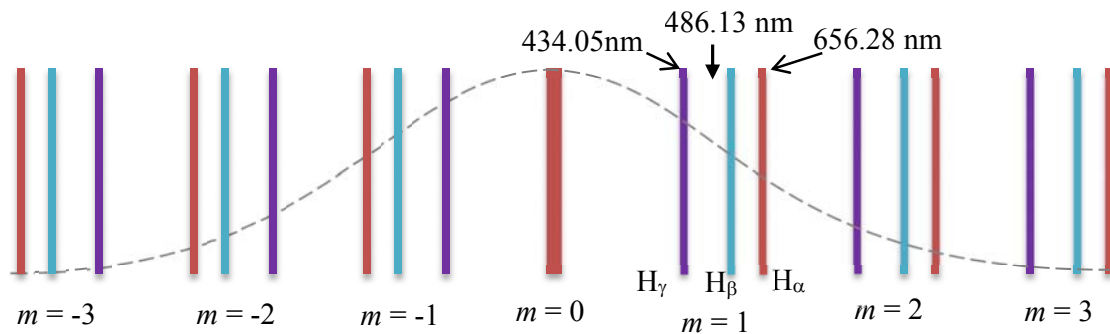


圖 9 氫原子之巴爾麥譜線

E. 運用三稜鏡觀察氫原子光譜

1. 請改以三稜鏡取代光柵片觀察氫原子光譜。但此時必須將接近放電管的狹縫寬度調小，即應可觀察到 H_{α} ， H_{β} ， H_{γ} ， H_{δ} 四條光譜線。
2. 以白光 LED 燈取代氫光源，觀察白光經光柵繞射之後所形成的光譜和白光經過三稜鏡折射後所形成的光譜之異同。
3. 若有別的氣體，可以觀察其他元素之可見光譜。

F. 使用不同密度的光柵膜觀察其他原子之放電管的放射光譜線

1. 請到公用實驗桌前，使用不同密度的光柵膜觀察 He, Ne, Hg 三種原子之放電管的放射光譜線。請參考圖 10-12 各種常見之原子光譜線圖和圖 3 的汞原子光譜線。
2. 請用手機的拍照功能，記錄下所觀測到的譜線結果。
3. 比較不同光柵密度之光柵片對所觀察的原子光譜線之實驗結果，會有何不同。

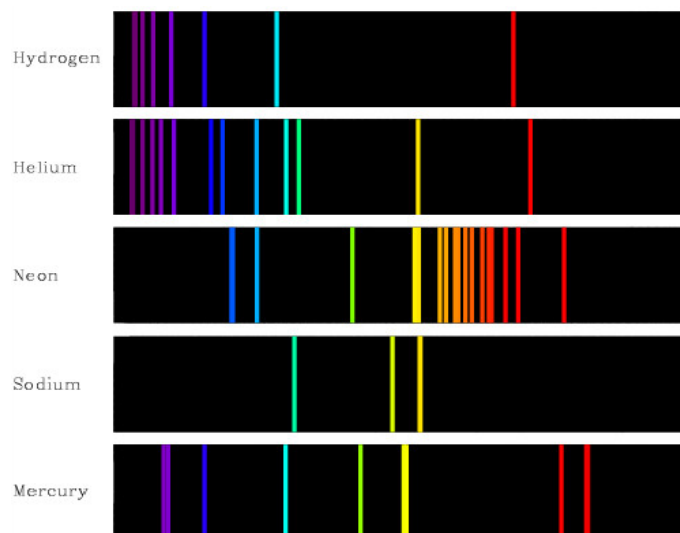


圖 10 H, He, Ne, Na, 和 Hg 元素的放射光譜(Emission spectra of some common elements)
(credit: NMSU, N. Vogt, <http://www.open.edu/openlearncreate/mod/page/view.php?id=53133>)



圖 11 汞 Hg 原子光譜，用 600 lines/mm 繞射光柵片(diffraction grating)觀測。
(https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/29/Mercury_Spectra.jpg)

請參閱圖 12 所有已知化學元素的可見光指紋「原子光譜」，每個原子發射和吸收這些獨特的顏色組合-使我們能夠加以識別。

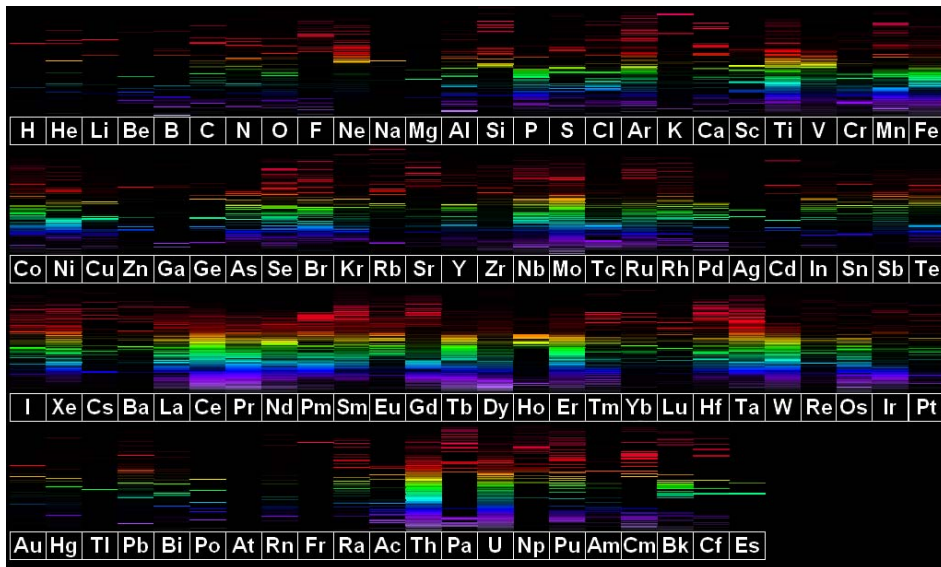


圖 12 所有已知化學元素的可見光指紋「原子光譜」，每個原子發射和吸收這些獨特的顏色組合-使我們能夠加以識別。[圖片資料來源：泛科學網頁 <http://pansci.asia/archives/32191>，「一睹眾哲神采」，2012/12/05 刊登，原文作者 Shane L. Larson, 譯者：Angela M.H.，原文發表於 [Write Science](#), 2012-11-21 發刊]

G. 計算普郎克常數(Planck constant)

1. 以觀察到的 9 條光譜線實驗結果(至少要測量出 6 條譜線，即兩邊共 12 條)計算普郎克常數。
2. 計算所得的 Planck constant 的不準度應該可以很容易達到 2% 以下。

七、問題

1. 如何確定實驗中觀察到的光譜為氫原子光譜，而非氫分子光譜？請說明氫原子和氫分子光譜有何差異[7]？
2. 第一級光譜與第二級光譜，那一組的實驗結果比較容易觀察？請說明理由。
3. 在步驟 6 中，如果光柵與準直管不是垂直，在實驗分析中應如何修正？
4. 通常第三級光譜只能看到一條譜線，原因何在？

三稜鏡的折射率(Refraction of Triangular Prism)測定

一、目的：熟悉三稜鏡，並利用三稜鏡會對光產生折射的現象，測量稜鏡的折射率。

二、原理

(a) 三稜鏡簡介用和應用：

三稜鏡的外觀上呈現幾何三角形，是光學稜鏡中的一種光學元件。因稜鏡的折射率會隨光源的波長不同而有變化，故對非單光光源會有分光的**色散效應**，也就是可將含有不同波長的光線分解成不同的**光譜成分**。當光線穿過稜鏡，在射入稜鏡和出稜鏡時，會發生兩次折射；不同波長的光線會被折射效應，偏轉成不同的角度，因而造成光的色散現象。若一束白光以適當角度射入三稜鏡，則經稜鏡兩次折射後，從稜鏡另一側射出的光線會

被分出不同顏色的彩色光譜，通常可分出七種顏色，即紅、橙、黃、綠、藍、靛和紫，如下圖 B-1 所示

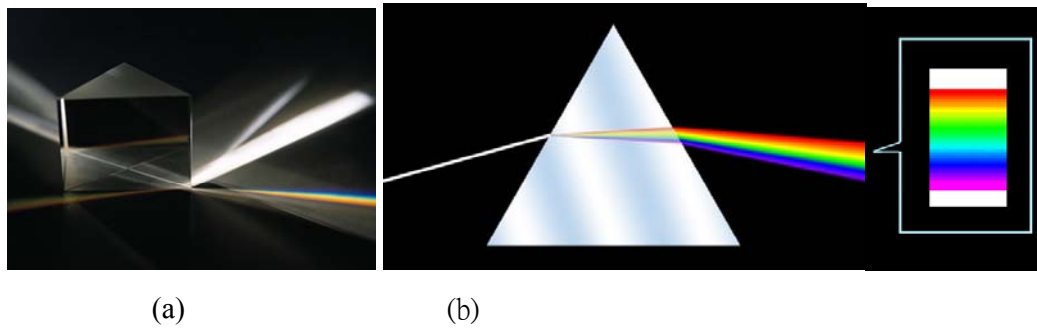


圖 B-1 三稜鏡的色散效應。圖片來源：左圖：developer.hanluninfo.com；右圖：<http://www.twiki.com/wiki/%E5%85%89%E7%9A%84%E8%89%B2%E6%95%A3>。

決定色散效應的影響參數有下列幾項：

- (1) 稜鏡的折射率：取決於稜鏡的製作材質，物質對不同波長的光會有不同的折射效應，有些物質的折射角度變化隨波長的變化比其他物質強烈，意即色散特別明顯，如常用於製作三稜鏡的材料。
- (2) 稜鏡頂角 α ：如圖 B-1(b)中，稜鏡示意圖上面的頂角角度大小也會影響稜鏡色散的效果。
- (3) 適當的入射角度 θ ：適當地選擇光線射入稜鏡的角度，使穿射過稜鏡後，光線不僅得以射出，且射出後的角度，與原入射線間有較明顯的偏折現象。
- (4) 當角度接近所謂的布儒斯特角(Brewster angle)時，對折射造成的損耗最小。

稜鏡不僅使用其色散功能，有時也利用稜鏡內部的全反射現象，作為反射面。如在稜鏡內部，若光線抵達稜鏡與空氣接觸的表面時，入射角度如果過大(大於兩介質面折射的臨界角度)，則光線便會在稜鏡內部產生全反射現象，意即所有的光線都會被反射回內部。在一些無法使用一般平面鏡子做反射的特殊情況下，即可用稜鏡取代平面式的反射鏡片。

(b)利用三稜鏡精密測定材料的折射率

稜鏡對不同波長的光線會產生不同角度的折射偏轉效應，此現象常被用來作為測定透光材料折射係數的精密方法之一。如圖6所示，光束射入三稜鏡後，會在左右兩側的稜鏡面各產生一次折射，然後從另一邊鏡面射出。入射光徑方向的延伸線與出射方向之間的夾角稱為“偏折角”，轉動稜鏡角度或入射光束的入射角度，可以改變偏折角 ϕ 的大小。

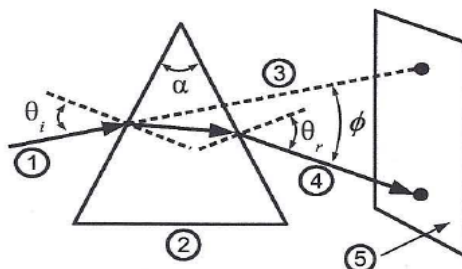


圖6 光經過三稜鏡折射的光徑圖：①入射光，②三稜鏡，③入射光光徑延伸光徑，④出射光，⑤遠處牆面或紙板。

若稜鏡的頂角為 α 和稜鏡的折射率為 n ，則偏折角必會大於一最小值，意即“最小偏折角” ϕ_m ，此角度與頂角 α 和稜鏡折射率 n 之間的關係為：

$$n = \frac{\sin\left(\frac{\alpha + \phi_m}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \quad (2)$$

可利用遠距離的幾何三角法測量出稜鏡的最小偏折角 ϕ_m ，在根據上式，即可精確地測出稜鏡的折射率 n 。

三、實驗步驟

1. 裝置儀器如圖7(a)所示。
2. 調整雷射位置使光束通過轉盤中心點，並記錄此時光束通過轉盤上的刻度 ϕ_1 。

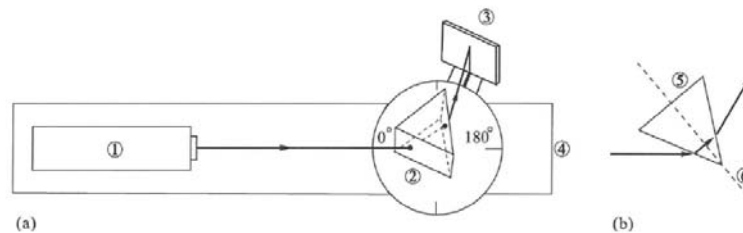


圖7 測量三稜鏡最小偏折角

(a)實驗裝置:①氦氖雷射 ②三稜鏡 ③角度調整台 ④光學台;

(b)三稜鏡的放置方式，需使底邊中垂線通過轉盤中心: ①三稜鏡底邊 ②三稜鏡底邊中垂線

3. 將三稜鏡放在轉盤中央處附近並使三稜鏡底邊的中垂線通過轉盤中心。旋轉轉盤並記錄在最小偏折角時光束通過的刻度 ϕ_2 ，算出最小偏折角 $|\phi_2 - \phi_1| = \phi_m$ 。
4. 改變三稜鏡位置及方向，但仍須保持三稜鏡底邊的中垂線通過轉盤中心。重複步驟2, 3。
5. 量測稜鏡的頂角 α (如何量測?)。
6. 將上述各步驟所得結果代入公式(2)，求出稜鏡的折射率 n 。

四、問題：

1. 如果用藍光雷射做此實驗，量得的最小偏折角會如何改變?
2. 實驗步驟3, 4，為何一再強調需使三稜鏡底邊的中垂線需通過轉盤中心?請解釋之。
3. 試證明：光經三稜鏡後，出射光成最小偏折角時，光線必對稱地通過稜鏡，即 $\theta_i = \theta_r$ ，(圖6)，而且折射率如(2)式所示。
4. 在本實驗中，測量 ϕ_1 、 ϕ_2 與 ϕ_m 的誤差有多大?對折射率的準確度有何影響?(提示：按照實驗1及 $\sin\theta = \theta - \frac{1}{3!}\theta^3 + \frac{1}{5!}\theta^5 - \dots$ 可以估計 $\sin\theta$ 的百分誤差)。如何減少 ϕ_1 、 ϕ_2 與 ϕ_m 的的誤差?
5. 在本實驗中?測量 α 的誤差有多大?對折射率的準確度有何影響?如何減少其誤差?
6. 如何利用最小偏折角測量液體的折射率?

附錄：其他低壓氣體放電管和煙火應用



Fig. 13 Six gas discharge tubes are enclosed glass tubes filled with a gas at low pressure through which an electric current is passed. Electrons in the gaseous atoms first become excited, and then fall back to lower energy levels, emitting light of a distinctive color in the process. Shown are gas discharge tubes of helium, neon, argon, krypton, and xenon.

[<https://courses.lumenlearning.com/cheminter/chapter/atomic-emission-spectra/>]

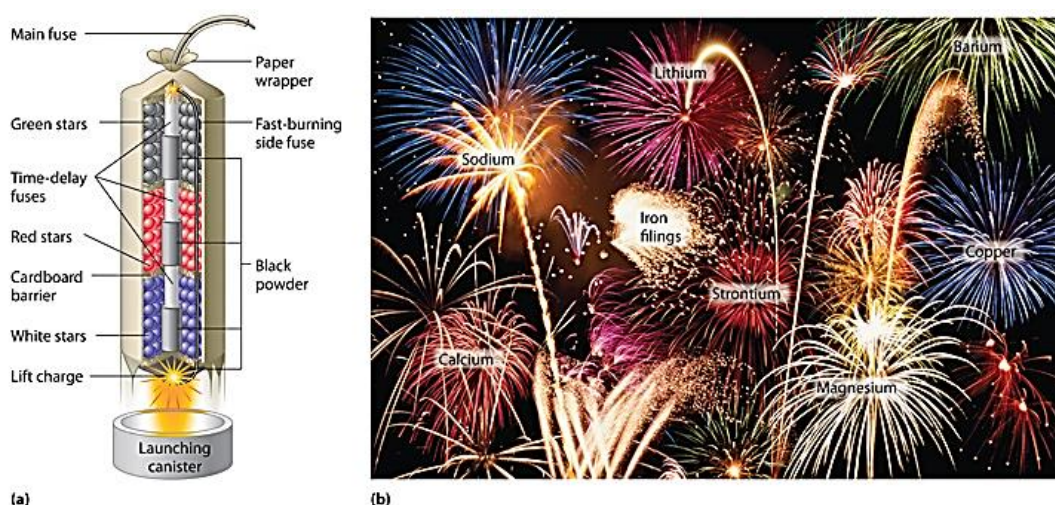


Fig. 14 The Chemistry of Fireworks. (a) In the “multibreak” shell used for fireworks, the chambers contain mixtures of fuels and oxidizers plus compounds for special effects (“stars”) connected by time-delay fuses so that the chambers explode in stages. (b) The finale of a fireworks display usually consists of many shells fired simultaneously to give a dazzling multicolor display. The labels indicate the substances that are responsible for the colors of some of the fireworks shown.

[http://catalog.flatworldknowledge.com/bookhub/4309?e=averill_1.0-ch06_s03]

參考資料

1. Halliday & Resnick : Fundamentals of Physics, 8th ed., Chapter 39-8, 1807-2007
2. Halliday & Resnick : Fundamentals of Physics, 8th ed., Appendix B, 1807-2007
3. The 1998 CODATA recommended values from www.physics.nist.gov
4. Halliday & Resnick : Fundamentals of Physics, 8th ed.,Chapter 39-9, 1807-2007
5. Halliday & Resnick : Fundamentals of Physics, 8th ed.,Chapter 35-4, 1807-2007
6. Halliday & Resnick : Fundamentals of Physics, 8th ed.,Chapter 36-9, 1807-2007
7. C. Zafiratos : Physics (John Wiley & Sons Inc. ,New York,1977), 封底內頁照片