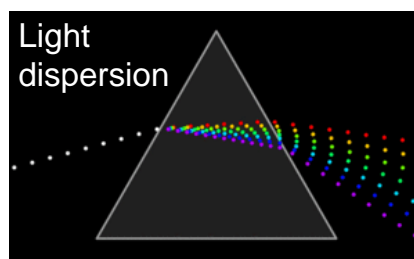


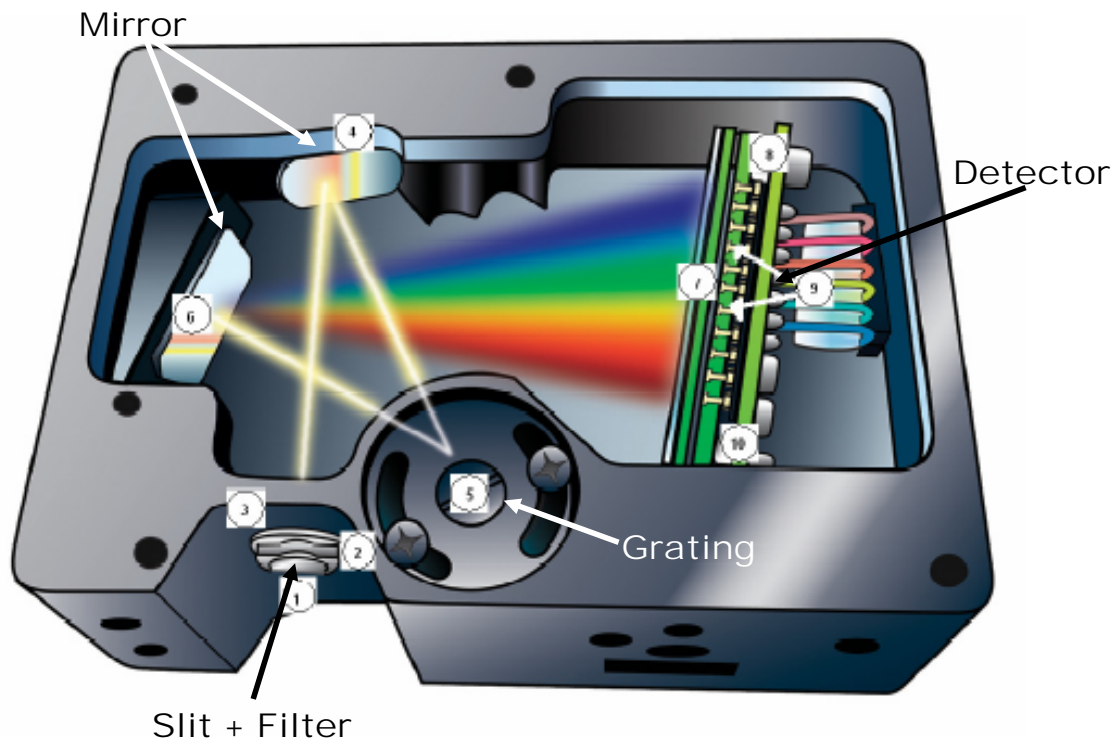
# Spectrometer

## ESS3271 Lecture

### Spectrometer

- An optical instrument used to measure properties of light over a specific portion of the electromagnetic spectrum
- The variable measured is most often the light's intensity
- A spectrometer is used in spectroscopy for producing spectral lines and measuring their wavelengths and intensities

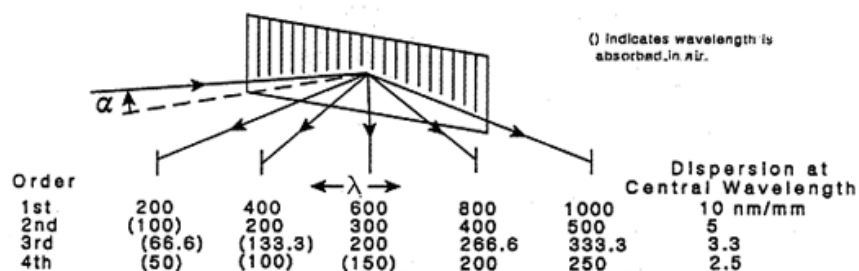


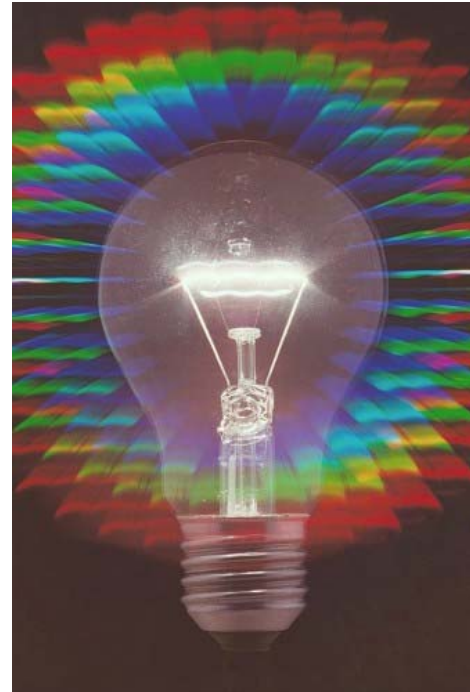


USB4000 Spectrometer with Components

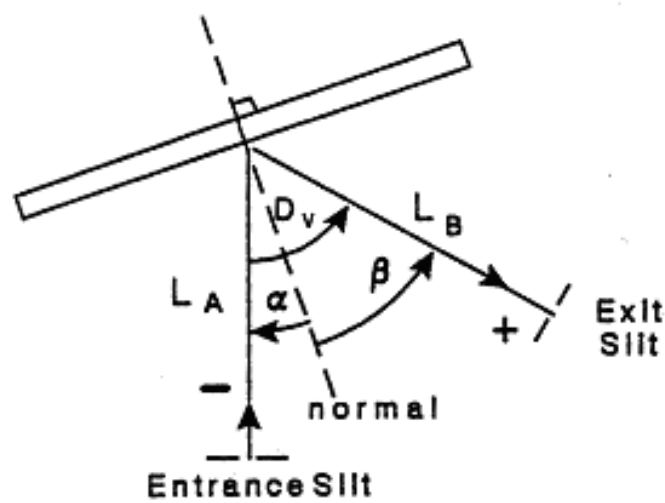
## Diffraction Grating

- An optical component with a surface covered by a regular pattern of parallel lines, typically with a distance between the lines comparable to the wavelength of light
- Light rays that pass through such a surface are bent as a result of diffraction, related to the wave properties of light
- This diffraction angle depends on the wavelength of the light





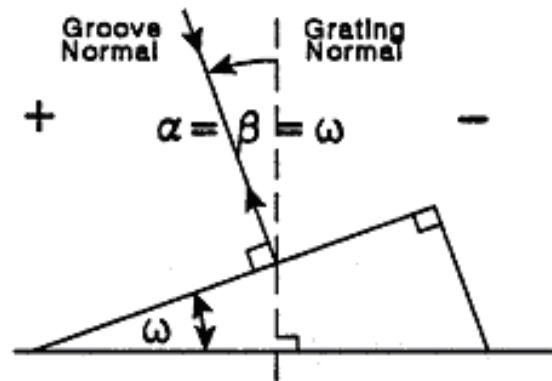
## Grating Equation



$$\sin \alpha + \sin \beta = 10^{-6} kn\lambda$$

k: diffraction order and n: groove density (g/mm)

# Littrow Condition



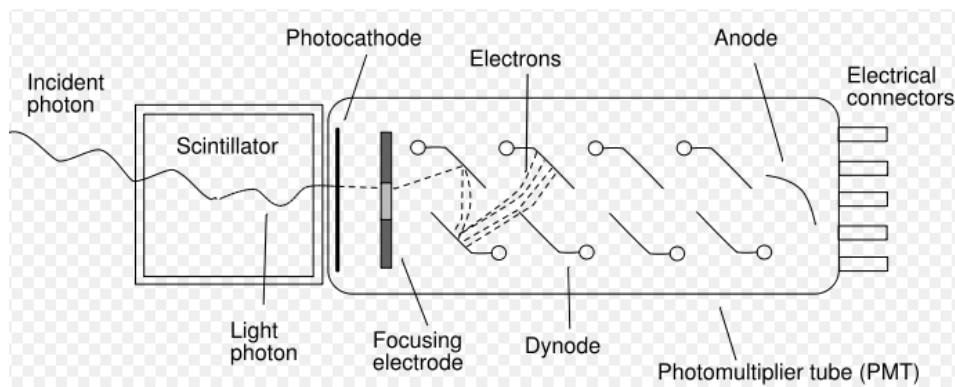
$$\sin \alpha + \sin \beta = kn \lambda_B 10^{-6}$$

$\omega = \alpha = \beta$  where  $\omega =$  the blaze angle

$$2 \sin \omega = kn \lambda_B 10^{-6}$$

## Photomultiplier Tube (PMT)

- Extremely sensitive detectors of light in the ultraviolet, visible and near infrared
- Multiply the signal produced by incident light by as much as  $10^8$ , from which single photons can be resolved



# PMT

- Photomultipliers are constructed from a glass vacuum tube which houses a photocathode, several dynodes, and an anode
- Incident photons strike the photocathode with electrons being produced as a consequence of the photoelectric effect
- These electrons are directed by the focusing electrode towards the electron multiplier, where electrons are multiplied by the process of secondary emission
- Each dynode is held at a more positive voltage than the previous one

## 光譜實驗 v2.0

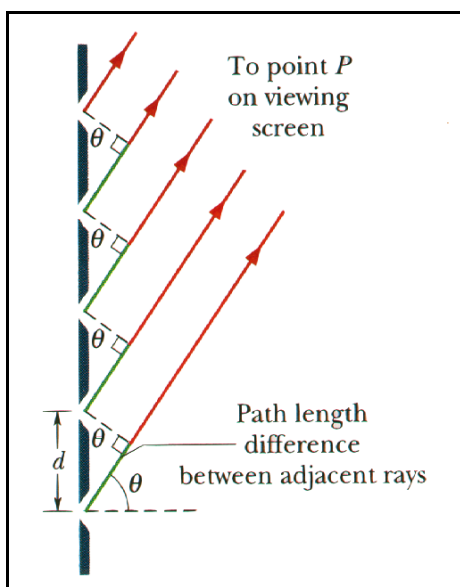
### 目的：

觀察雷射光及可見光光譜以及多狹縫(光柵)、稜鏡的繞射以及分光色散情形，並瞭解其原理。

### Part 1 實驗原理

#### 光柵分光：

繞射光柵為一極種要的光學儀器，且經由其形成的光譜遠較由稜鏡形成者為佳，原因是光柵鑑別率較高。在高中物理或大一普物的干涉與繞射實驗中，都曾經討過單狹縫、雙狹縫乃至多狹縫的干涉現象。

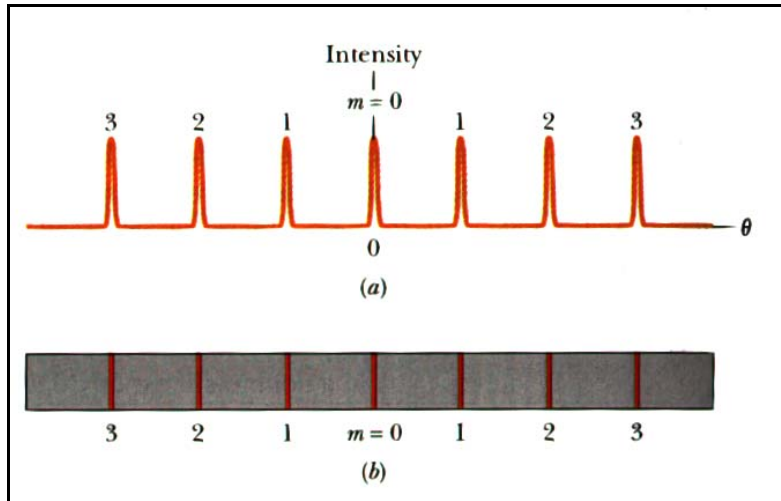


圖一多狹縫的干涉

光柵則為一狹縫數  $N$  極大之多狹縫，因此可得到一系列寬度極窄的譜線。當波長為之單色光垂直入射於光柵後，於繞射角滿足

$$m \lambda = d \sin \theta ; m = 0, 1, 2, 3 \dots \dots \dots \quad (1)$$

處，必可得到一極大的亮紋【如圖二所示】，其中  $n$ ：級數， $d$  為光柵中狹縫的距離。亦即當入射光之波長改變時，所見譜線的位置亦隨之而異。吾人即利用此特性，來研究光譜。



圖二

由於汞燈的光譜線，在可見光的範圍有幾條很清楚的譜線，很容易可以經由光柵的干涉觀察到。

### 光譜理論

我們在此用簡單的波爾原子模型解釋氫光譜的理論。而本實驗我們使用的光源為汞光源。

首先假設原子中的電子在庫倫力下，以圓形軌道繞著固定的原子核做圓周運動，電子運動的軌道被量子化，也就是其角動量  $L$  等於  $n\hbar$ ，在一個穩定的軌道中，雖然電子被加速，但不輻射能量，也就是等於一個常數，如果電子由一個高

能態跳至低能態，會放出電磁波，其頻率為  $\nu = \frac{E_f - E_i}{h}$ 。根據以上的模型我們可以知道電子繞原子核的向心力剛好等於庫倫力，所以

$$\frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{e^2}{r^2} = \frac{mv^2}{r}$$

其中電子質量為  $m$ ，速度為  $v$ ，軌道半徑為  $r$

$$\text{而 } L = mvr = \frac{nh}{2\pi} \quad n = 1, 2, 3, 4, \dots$$

$$\text{所以 } E_n = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{e^2}{r}$$

$$\Rightarrow E_n = -\frac{me^4}{8\varepsilon^2 h^2} \frac{1}{n^2}$$

上式表原子的能階，在  $n=1$  時  $E_1$  稱之為基態，在  $n=\infty$  時  $E_\infty=0$  是代表電子完全脫離原子核的影響，此時稱為游離態。

所以很容易得到氫原子的游離能：

$$\Delta E = |E_1 - E_\infty| = \frac{me^4}{8\varepsilon^2 h^2} \approx 13.6 \text{ eV}$$

今將氫原子兩個能階之間的躍遷，所幅射出電磁波的能量可以寫成

$$E_{n_2} - E_{n_1} = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (n_2 > n_1)$$

上式中  $c$  為光速， $\lambda$  為光子的波長， $n_2$  為大於  $n_1$  之正整數

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{me^4}{8\varepsilon^2 h^3 c} \left( \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right) = R_H \left( \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$$

$R_H$  稱之為雷得堡常數(Rydberg constant)等於  $1.09678 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$

一般在原子光譜中可得到 3 個光譜系列：

(一) (一)來曼系列(Lyman series)

$$n_1 = 1 \quad n_2 = 2, 3, 4, \dots$$

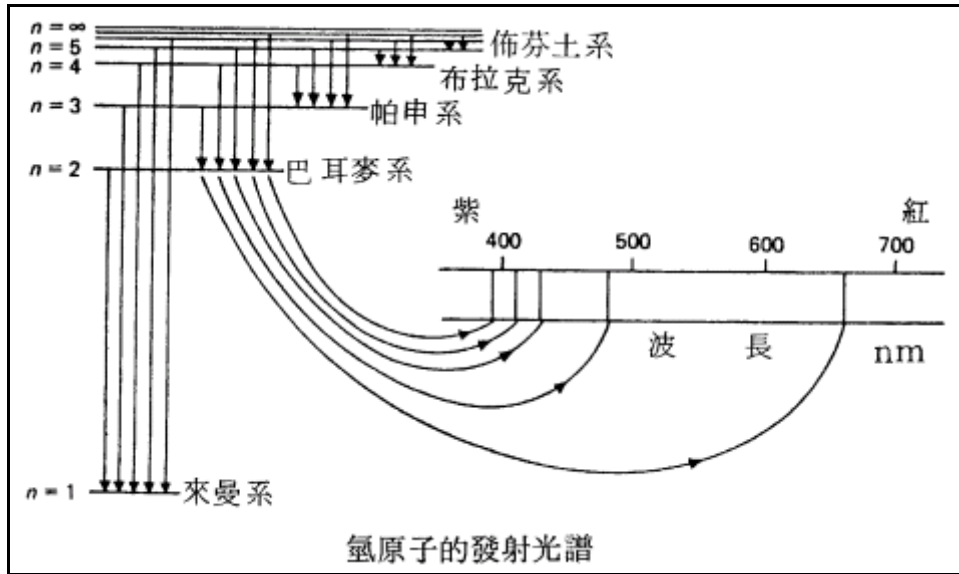
(二) (二)巴耳麥系列(Balmer series)

$$n_1 = 2 \quad n_2 = 3, 4, 5, \dots$$

(三) 帕申系列(Paschen series)

$$n_1 = 3 \quad n_2 = 4, 5, 6, \dots$$



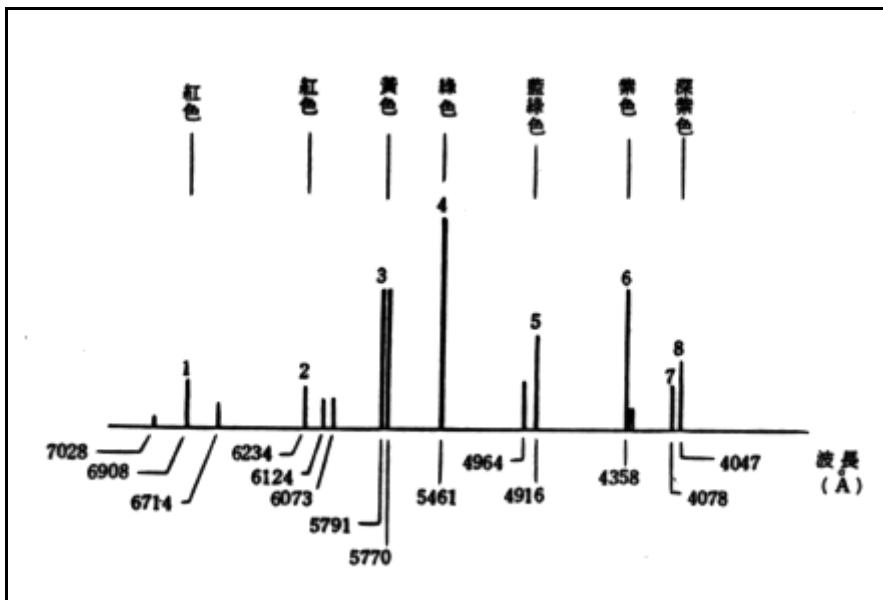


在以上的三個光譜系列中，巴耳末系列的波長範圍，在可見光之中，所以可以利用肉眼加以測定。

以上為氫光譜的簡介，另外，本實驗使用的汞光源在可見光中有多條明顯的譜線，而在紫外光中的兩條譜線被應用在半導體製程的曝光過程中。

附錄：

### 汞燈光譜



## Part 2 實驗流程

### 實驗注意事項：

1. **雷射光會造成視網膜永久受損**，注意直射以及經光柵散射出的雷射光，絕對不可用眼睛直視。盡可能站著讀取數據，以免有人因為撞到雷射而使雷射光直射到眼睛。
2. 汞燈紫外光強，避免長時間直視。
3. 光碟片反射層具有毒性，實驗完畢請清理，並洗手。
4. 光柵面相當脆弱，請小心使用，並注意不要用手碰觸。

### 實驗 11-1 - 光譜量測

#### 實驗步驟

1. 將 USB 分光儀接上電腦，並開啓 OOIBase32 軟體(開始->程式集->Ocean Optics->OOBase32)。
2. 將雷射光源對準桌面，量測桌面光點的雷射光光譜，**讀出雷射光光譜的波長並列印記錄之**。

#### 說明與實驗技巧-

雷射光源相當強，可將雷射光對準紙張，再以光纖對準紙張上的光點進行量測，可較容易讓光譜的 Intensity 保持在 4000 以下，較易正確讀出光譜的波長。

讀取到訊號後，按下左上角照相機的小圖示，可暫停偵測。以滑鼠點選譜線，光譜的波長會顯示在左下角。

3. 量測**日光燈及汞燈光譜**，並列印，記錄其主要譜線。

#### 說明與實驗技巧-

請將最強譜線的 Intensity 保持在 4000 以下，並紀錄最主要的幾根譜線。

4. 以**三種不同顏色玻璃紙**遮住汞燈，並觀察其光譜變化情形，紀錄下**哪些波段的訊號強度相對的衰減了**。

#### 說明與實驗技巧-

本實驗步驟在觀察白光通過不同顏色的玻璃紙時，不同波段的光強度衰減(被過濾)的情形。汞燈的兩個波長(I-line 與 G-line)被應用在半導體製程的曝光過程。在此步驟中，我們必須使用特殊的濾光片(filter)將其他波長的光過濾掉。

### 實驗 11-2 - 光柵的繞射

#### 原理簡述：

光透過一系列寬度相同，互相平行且距離相等的狹縫後，形成一系列相同的繞射紋。若狹縫之間的距離很小，這一系列的光束會重疊，且互相干涉，使繞射

紋裡出現非常狹窄的干涉亮紋。當狹縫數目極多時，主要干涉亮紋也會變的狹窄而明亮，次要干涉亮紋會變的微弱而不可見。也就是說，這時候光被集中到狹窄的亮紋上，這個特性可以用來分析光譜。

主要亮紋的位置可由下面公式推算：

$$d \sin \theta = m\lambda \quad (2-1)$$

上式中， $d$  是狹縫中央線之間的距離， $\theta$  是第  $m$  條主要干涉亮紋與光柵中央線連線和入射光的夾角。

### 實驗儀器與配置圖

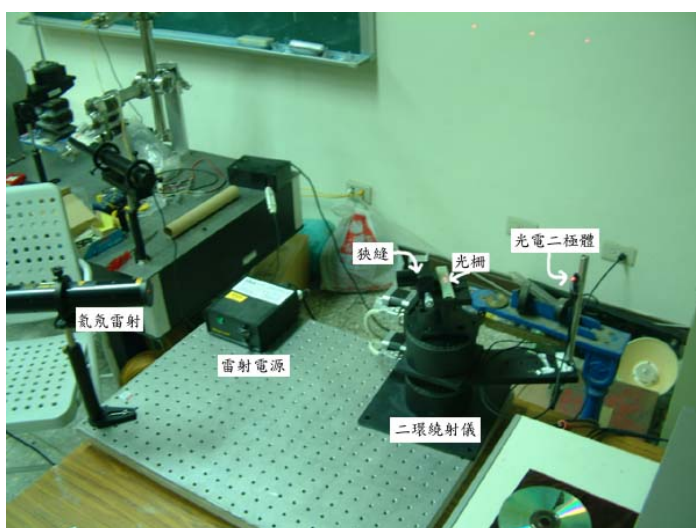


圖 2-1



圖 2-2

### 實驗步驟：

1. 將實驗儀器相對配置如圖 2-1，關閉實驗區域日光燈。
2. 將光柵放置於二環繞射儀中心，將狹縫全開，並調整雷射光至通過二環繞射儀中心。此時可看到一系列的干涉光點。
3. 開啓電表與 stage controller(圖 2-2)，移動  $2\theta$  環(光電二極體)，量測並

**紀錄各繞射光點的強度以及所在角度**。干涉光點請細掃。

說明與實驗技巧-

$2\theta$ 環移動的角度可由 stage controller 上的讀值看出，如何移動以及控制移動速度將由助教在課堂上說明。光點強度可由電表的值看出，注意電表單位 nA 跟 kA 的變化以及 stage controller 的單位(為 1/10 度，就是說，畫面顯示 300.0，就是移動了 30 度)。

因為光電二極體面積小，在移動一段距離後雷射光也許會偏離位置，建議先量測一半的干涉光點，稍微調整位置後再量測另一半光點。

在干涉光點處，請將二環繞射儀速度放慢，一個干涉亮點請至少紀錄三個位置的強度。

4. **計算光柵狹縫中央線之間的距離  $d$ ，並估算此光柵有多少狹縫(使用式 2-1)。**
5. 將光柵換成光碟片，重複上述步驟，**計算光碟片軌道之間的距離**。

說明與實驗技巧-

將光碟片剪開，反射層剝除，可視為穿透式光柵。

### **實驗 11-3- 光柵的分光現象**

原理簡述：

對於不同波長的光，光柵產生亮帶的位置各不相同，如對白光而言，就會產生彩色的光譜，這和稜鏡的作用相似，都具有分光的作用。本實驗利用二環繞射儀觀察此分光現象，並熟悉分光儀裝置。

實驗儀器與配置圖



圖 2-3

實驗步驟：

1. 將實驗器材配置如上圖。汞燈稍微墊高，出光口緊靠狹縫。

2. 使光光源經由狹縫入射通過二環繞射儀中心線。並將光柵置於二環繞射儀中心處。
3. 將紙板放置於光柵後方，觀察色散效果，並調整入射狹縫至色散現象清晰可見的大小。

#### 說明與實驗技巧-

汞燈光源不像雷射光那麼強，色散出的光相當弱，此時可用紙箱將器材遮蓋，並儘可能降低背景的亮度。

4. 紀錄可清楚觀察到的各色光角度位置，並計算光波之波長。
5. 將光柵換成稜鏡，觀察稜鏡對汞燈分光色散的情形，並比較兩者分光的能力(簡單文字敘述即可)。

#### 問題與討論

1. 光柵的鑑別率和什麼有關？為什麼？
2. 當光通過的狹縫數愈多時，其繞射及干涉條紋有何變化？
3. 在實驗 11-1 汞燈的光譜上，標示出 I-Line、G-Line 兩條光譜線。
4. 畫出雷射光與光柵干涉實驗中(實驗 11-2)，角度與光點強度的對應圖。
5. 估計本實驗的各種誤差，以及此誤差對實驗結果的影響。
6. 寫下對本次實驗的心得，感想以及建議。

您的結報必須有實驗以及計算的數據(用 X X X X 框起來的地方都是要紀錄，繳交的)，以及問題與討論的部分。

祝您修課愉快。

## 光學頻譜分析(二)

### 注意事項

1. 請勿將雷射直射自己或他人眼睛。
2. 實驗進行中請站著量測數據，以避免坐著時同學不小心撞到雷射，雷射光會直射眼睛。
3. 實驗中請戴眼鏡操作實驗，戴隱形眼鏡者，請帶上護目鏡。

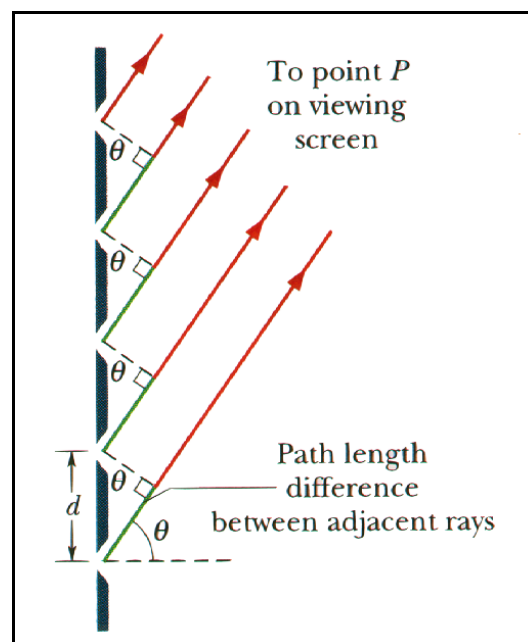
### 目的

瞭解汞燈的光譜，並且利用汞燈來校準光譜儀（以光柵做為分光元件）。接著測量氫燈的光譜。

### 原理

#### 光柵分光：

繞射光柵為一極種要的光學儀器，且經由其形成的光譜遠較由稜鏡形成者為佳，原因是光柵鑑別率較高。在干涉與繞射實驗中，我們曾經討過多狹縫的干涉現象（見干涉與繞射實驗）。



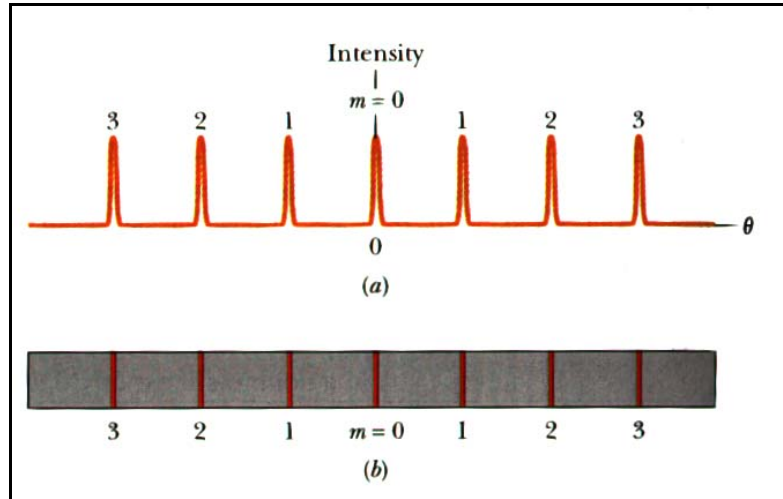
圖一多狹縫的干涉

而光柵則為一狹縫數  $N$  極大之多狹縫，因此可得到一系列寬度極窄的譜線。

當波長為之單色光垂直入射於光柵後，於繞射角滿足

$$m \lambda = d \sin \theta ; m = 0, 1, 2, 3 \dots \dots \dots \quad (1)$$

處，必可得到一極大的亮紋【如圖二所示】，其中  $n$ ：級數， $d$  為光柵中狹縫的距離。亦即當入射光之波長改變時，所見譜線的位置亦隨之而異。吾人即利用此特性，來研究光譜。



圖二

由於汞燈的光譜線，在可見光的範圍有幾條很清楚的譜線，所以很容易用他來校準光譜儀，用的方法與光學頻譜分析(一)相同，差別只是本實驗是用光柵來做分光。校準光譜儀之後，我們將測量出氫燈的光譜，與理論上氫光譜做驗證。

**氫光譜：**

我們從簡單波爾的原子模型來解釋氫原子光譜，首先假設原子中的電子在庫倫力下，以圓形軌道繞著固定的原子核做圓周運動，電子運動的軌道被量子化，也就是其角動量  $L$  等於  $n\hbar$ ，在一個穩定的軌道中，雖然電子被加速，但不輻射能量，也就是等於一個常數，如果電子由一個高能態跳至低能態，會放出電磁波，其頻

率為  $\nu = \frac{E_f - E_i}{h}$ 。根據以上的模型我們可以知道電子繞原子核的向心力剛好等於庫倫力，所以

$$\frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{e^2}{r^2} = \frac{mv^2}{r}$$

其中電子質量為  $m$ ，速度為  $v$ ，軌道半徑為  $r$

而 
$$L = mvr = \frac{nh}{2\pi} \quad n = 1, 2, 3, 4, \dots \dots$$

所以 
$$E_n = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{e^2}{r}$$

$$\Rightarrow E_n = -\frac{me^4}{8\varepsilon^2 h^2} \frac{1}{n^2}$$

上式表原子的能階，在  $n=1$  時  $E_1$  稱之為基態，在  $n=\infty$  時  $E_\infty=0$  是代表電子完全脫離原子核的影響，此時稱為游離態。

所以很容易得到氫原子的游離能：

$$\Delta E = |E_1 - E_\infty| = \frac{me^4}{8\varepsilon^2 h^2} \approx 13.6 \text{ eV}$$

今將氫原子兩個能階之間的躍遷，所幅射出電磁波的能量可以寫成

$$E_{n_2} - E_{n_1} = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (n_2 > n_1)$$

上式中  $c$  為光速， $\lambda$  為光子的波長， $n_2$  為大於  $n_1$  之正整數

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{me^4}{8\varepsilon^2 h^3 c} \left( \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right) = R_H \left( \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$$

$R_H$  稱之為雷得堡常數(Rydberg constant)等於  $1.09678 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$

一般在原子光譜中可得到 3 個光譜系列：

(一) 來曼系列(Lyman series)

$$n_1 = 1 \quad n_2 = 2, 3, 4, \dots$$

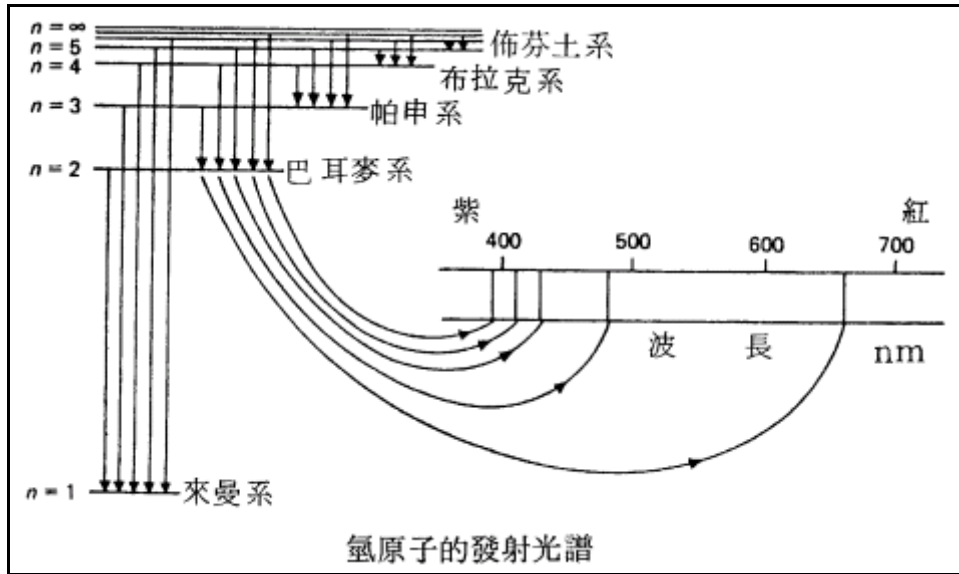
(二) 巴耳麥系列(Balmer series)

$$n_1 = 2 \quad n_2 = 3, 4, 5, \dots$$

(三) 帕申系列(Paschen series)

$$n_1 = 3 \quad n_2 = 4, 5, 6, \dots$$



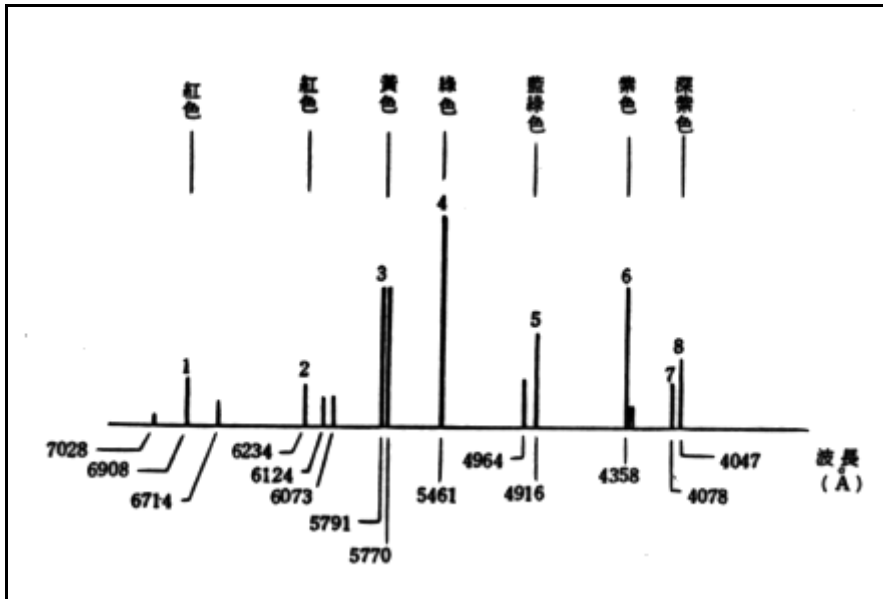


氫原子的發射光譜

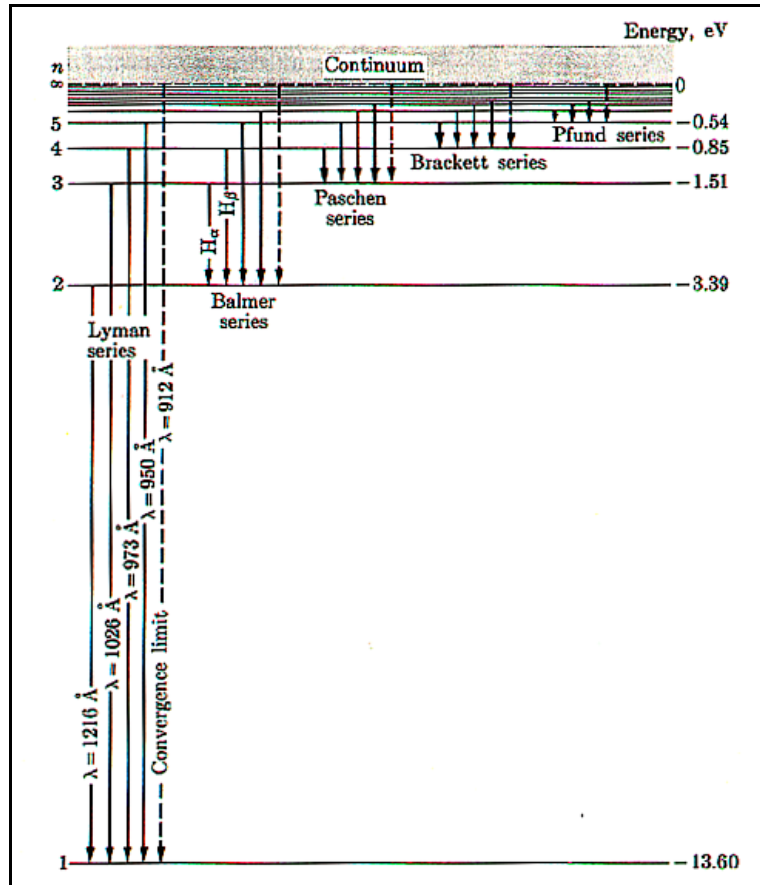
在以上的三個光譜系列中，巴耳末系列的波長範圍，在可見光之中，所以可以利用肉眼加以測定。在本實驗中，我們將以光柵使氫光燈分光，而得到巴耳末系列。

附錄：

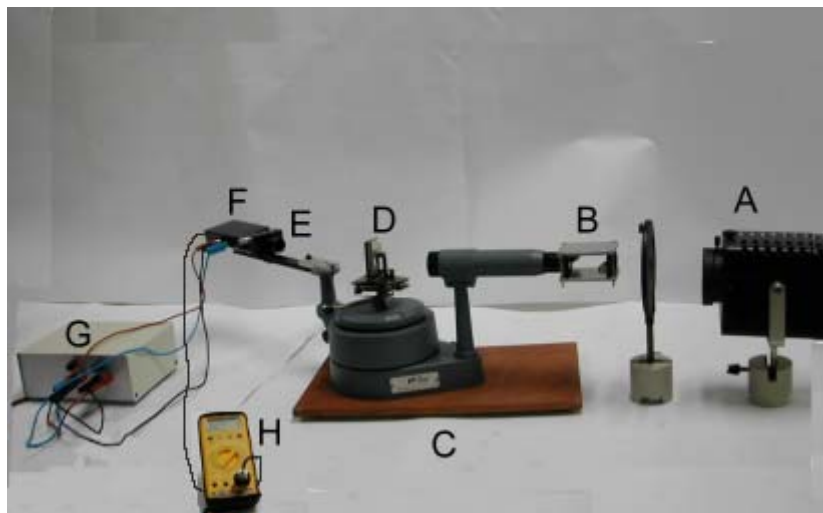
汞燈光譜



氫光譜

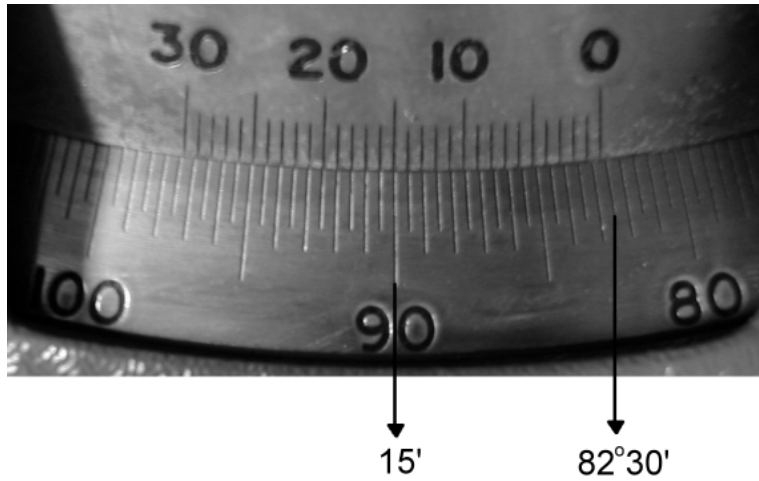


### 儀器架設



(A) (A) 光源 (汞燈、氫燈) (B) 狹縫組 (C) 光譜儀本體 (D) 光柵 (E) 可調寬度的狹縫 (F) 光偵測器 (G) 電源供應器 ( $\pm 15 \text{ V}$ ) (H) 電錶

### 角規副尺的判讀



$$82^{\circ}30' + 15' = 82^{\circ}45'$$

角規副尺上一小格為  $1'$  (角分)。 $1^{\circ}$  (度) =  $60'$  (角分)； $1'$  (角分) =  $60''$  (角秒)

### 實驗步驟

#### 一. 光譜儀校準 (以汞燈當光源)

1. 1. 將光柵 (穿透式光柵 300 條/mm) 小心置於平臺上，並固定之。【拿取光柵時，勿弄髒光柵表面，手指可握在外框處】。
2. 2. 調整兩個狹縫至適當寬度，打開汞燈，以紙片當螢幕觀察分光的情形，確定光可以經過光偵測器前的狹縫，打在光偵測器的中心處。若無法達成，請重新調整光柵或其它光學元件。
3. 3. 調整光偵測器前狹縫，使其打開寬度約為 0.2mm，移動光偵測器每隔  $0.25^{\circ}$  (即  $15'$ ) 量測一次，記錄光偵測器的角度，並讀取電錶上的值，利用內、外差法將上表角度轉成波長，畫出偵測器輸出電壓-波長的關係圖。  
(光偵測器詳細資料於參考資料網頁，光偵測器需正負 15V 工作電壓，請正確接線，若將光偵測器燒壞需自行修復)
4. 4. 由於汞燈有好幾條明顯的可見光譜，選擇兩條以上的譜線來校準，並同時以其校正結果確認其它條譜線的位置是否正確 (見附錄)。
5. 5. 將光源改成氫燈【**注意：請勿更動狹縫與稜鏡**】，重複步驟 3，再與實際的氫光譜線比較 (見附錄)。

### 預習問題

1. 1. 假如光柵上的線條密度為 1000 條/mm，請估算一下利用式(1)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？

### 思考問題

1. 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。