

實驗三 光的干涉與繞射

實驗目的：

本實驗藉由單(雙)狹縫、圓孔及光柵觀察光的干涉與繞射現象，進而由屏幕上所產生的干涉或繞射條紋計算雷射光波長。

實驗儀器：

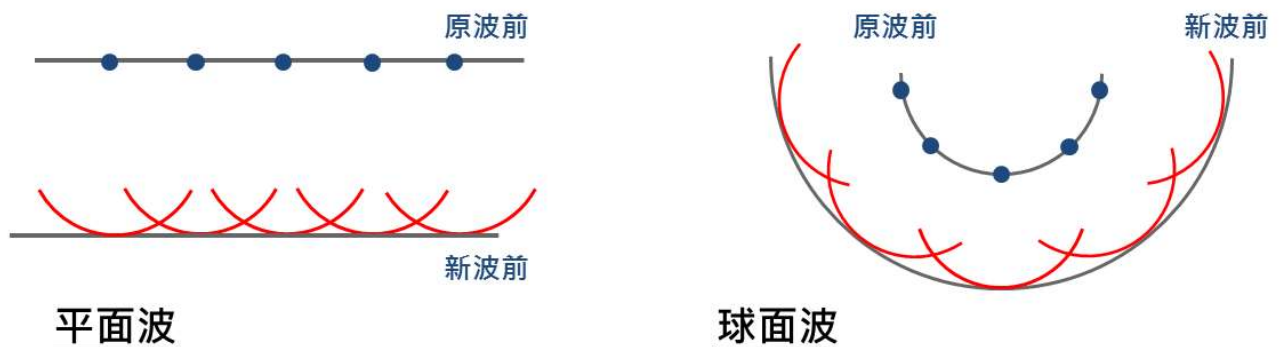
光學軌道，二極體雷射，光感應器(含屏幕)，轉動感應器，數位感應裝置，類比感應裝置，單狹縫模組，雙狹縫模組，光柵，光柵座，方格紙，直尺

實驗原理：

A. 惠更斯原理

西元 1678 年荷蘭物理學家惠更斯(Christiaan Huygens)提出波在傳遞的過程中，波前上任何一點皆可視為一個新的點波源，而這些新的點波源將會往波前進的方向產生新的波，故於下一時刻所形成的波形即為這些點波源疊加合成的結果。

圖一即是利用惠更斯原理來說明平面波與球面波傳遞情形。

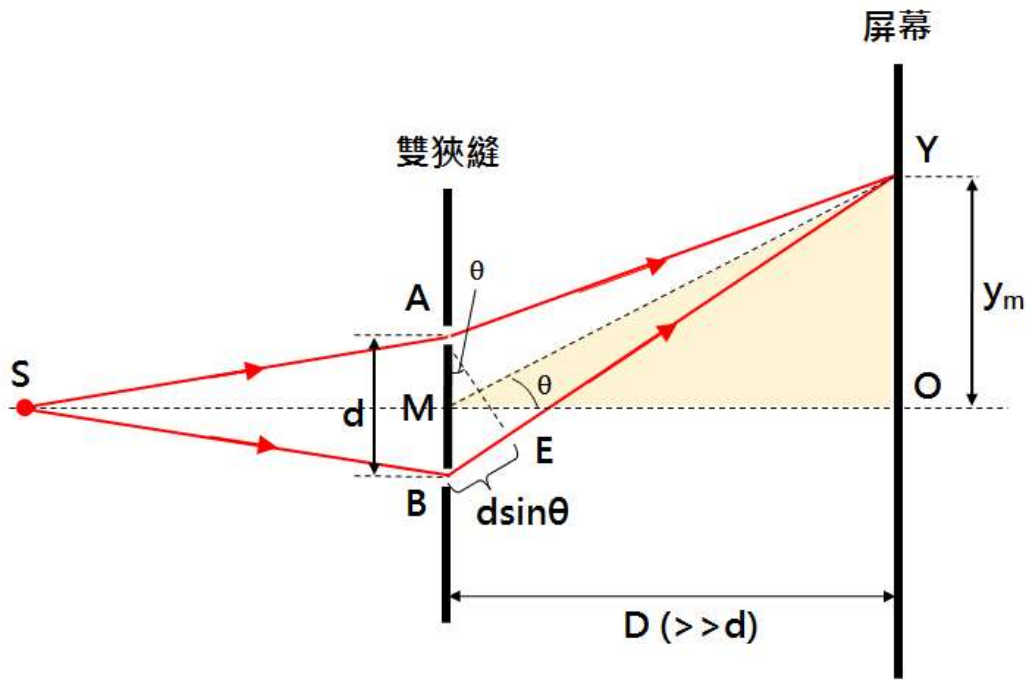


圖一 平面波與球面波傳遞示意圖。

B. 雙狹縫干涉

楊氏雙狹縫干涉(Young's double-slits experiment)為 19 世紀跨世紀的光學巨作，藉由光波通過兩個狹縫後，即可於遠端屏幕上觀察到波的干涉條紋的實驗，奠基了光為波動的「光波學說」，也給予後來「物質波」定性觀察之準則。

如圖二所示，於不透明平板上切割兩個狹縫 A 與 B，再將同調光源 S 置於兩狹縫之前，當光波分別穿過兩狹縫後，即可於遠處屏幕上產生明暗相間的條紋，此即光波干涉所造成的現象，由此可證明光具有波動性。楊氏於西元 1801 年首先進行光干涉實驗，從而證實惠更斯的波動理論，故又稱為楊氏實驗。



圖二 雙狹縫干涉示意圖。

如圖二所示，屏幕上任一點 Y 至兩狹縫距離分別為 \overline{AY} 與 \overline{BY} 。在 \overline{BY} 上取一線段 \overline{EY} 使 $\overline{EY} = \overline{AY}$ ，則 $\overline{BY} - \overline{EY} = \overline{BY} - \overline{AY} = \overline{BE}$ 。 \overline{BE} 為光分別由 A 與 B 兩狹縫到 Y 點之光程差(path difference)。

假設屏幕至狹縫距離 D 遠大於兩狹縫間距 d (即 $D \gg d$)，則三角形 AYE 頂角 $\angle AYE$ 極小，再由等腰三角形的性質可知 \overline{YA} 、 \overline{YM} 、 \overline{YB} 均與 \overline{AE} 近乎垂直，故 \overline{YA} 與 \overline{YB} 兩光波之光程差 \overline{BE} (path difference) 可表示為

$$\overline{BE} \sim d \sin \theta \sim a \tan \theta = a \frac{y_m}{D}, \quad (\theta \ll 1 \approx 0)$$

1. 建設性干涉

當兩光波於屏幕上形成亮紋時，其光程差表示如下：

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

其中 λ ， λ 為光波波長， $m = 0$ 為中央亮紋， $m = 1$ 為第一級亮紋，以此類推。

承上，已知屏幕上第 m 條亮紋到中央亮紋 ($m = 0$) 間距離為 y_m ，代入公式(1)即可求得光波波長 λ 。

$$m \lambda = d \sin \theta \sim d \tan \theta = d \frac{y_m}{D}$$

$$\lambda \sim \frac{d y_m}{m D}$$

2. 破壞性干涉

當兩光波於屏幕上形成暗紋時，其光程差表示如下：

$$d\sin\theta = (m - \frac{1}{2})\lambda, \quad m = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (2)$$

其中， λ 為光波波長， $m = 1$ 為第一級暗紋， $m = 2$ 為第二級暗紋，以此類推。

承上，已知屏幕上第 m 條暗紋到中央亮紋($m = 0$)間距離為 y_m ，代入公式(2)即可求得光波波長 λ 。

$$(m - \frac{1}{2})\lambda = d\sin\theta \sim d\tan\theta = d\frac{y_m}{D}$$
$$\lambda \sim \frac{dy_m}{(m - \frac{1}{2})D}$$

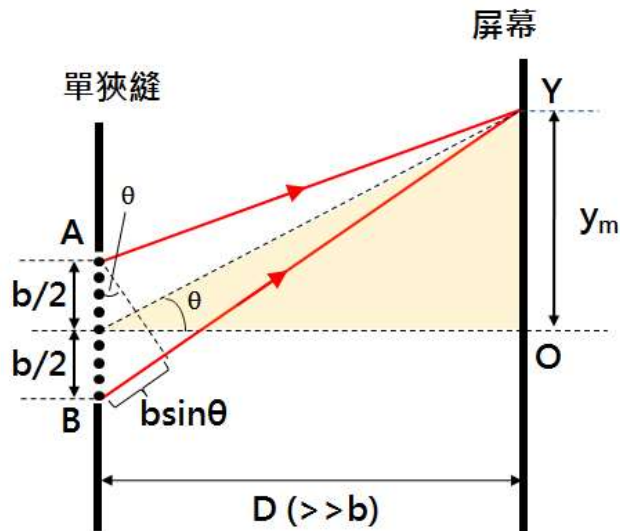
綜合上述，當光波通過雙狹縫後會於後端屏幕產生明暗相間的干涉條紋，且此干涉條紋會於屏幕上 O 點往兩側相互對稱。

C. 單狹縫繞射

由惠更斯原理可知(如圖一所示)，當平面波進入狹縫時，狹縫上之各點可視為一系列彼此相同之新波源。由此新波源所發出之光波，必然依照波的重疊原理相互干涉，而於遠端屏幕上產生干涉條紋。

假設屏幕至狹縫距離 D 遠大於單狹縫寬度 b (即 $D \gg b$)，則三角形 AYB 頂角 $\angle AYB$ 極小。已知單狹縫的寬度為 b ，屏幕上 Y 點與狹縫中心的連線對中心線夾角為 θ ，則 \overline{AY} 與 \overline{BY} 兩光波之光程差(path difference)可表示為

$$b\sin\theta \sim b\tan\theta = b\frac{y_m}{D}, \quad \theta \approx 0$$



圖三 單狹縫繞射示意圖。

1. 破壞性干涉

當光波於屏幕上形成暗紋時，其光程差表示如下：

$$b \sin \theta = m \lambda, \quad (m = 1, 2, 3, 4, \dots) \quad (3)$$

其中， λ 為光波波長， $m = 1$ 為第一暗紋， $m = 2$ 為第二暗紋，以此類推。

承上，已知屏幕上第 m 條暗紋到中央亮帶($m = 0$)間距離為 y_m ，代入公式(3)即可求得光波波長 λ 。

$$m \lambda = b \sin \theta \sim b \tan \theta = b \frac{y_m}{D}$$

$$\lambda \sim \frac{b y_m}{m D}$$

2. 建設性干涉

當光波於屏幕上形成亮紋時，其光程差表示如下：

$$b \sin \theta = (m - \frac{1}{2}) \lambda, \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (4)$$

其中， λ 為光波波長， $m = 0$ 時為中央亮帶， $m = 1$ 為第一亮紋，以此類推。

承上，已知屏幕上第 m 條暗紋到中央亮帶($m = 0$)間距離為 y_m ，代入公式(4)即可求得光波波長。

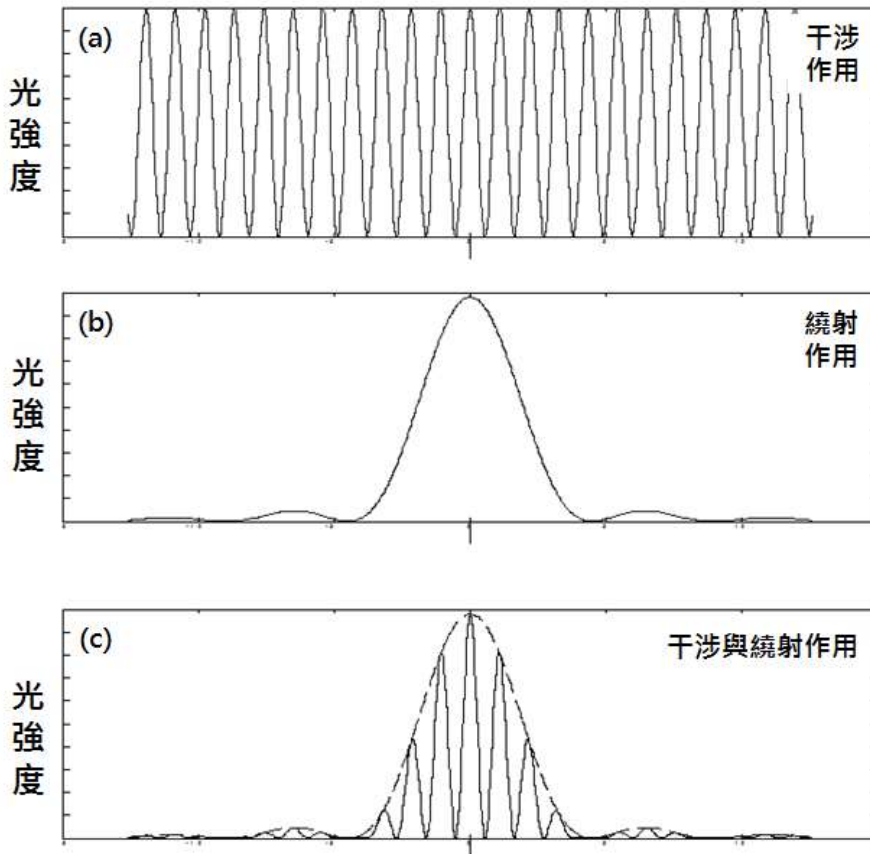
$$(m - \frac{1}{2})\lambda = b\sin\theta \sim b\tan\theta = b\frac{ym}{D}$$

$$\lambda \sim \frac{bym}{(m-\frac{1}{2})D}$$

D. 雙狹縫干涉及繞射

圖四為雙狹縫干涉實驗中，干涉與繞射作用光強度與位置關係圖。理想上我們是假設狹縫寬度趨近於零，但實際上狹縫都會有一定的寬度，故此除了兩狹縫因光程差所造成干涉外，仍會受狹縫繞射作用影響而使光強度產生變化。因此雙狹縫干涉實驗於屏幕上所產生的條紋綜合了干涉和繞射。

- (a) 理想雙狹縫干涉圖形。
- (b) 理想單狹縫繞射圖形。
- (c) 實際雙狹縫實驗所得圖形(含干涉與繞射)。



圖四 雙狹縫受干涉與繞射作用中光強度與位置關係圖。

E. 圓孔繞射

如圖五所示，光波通過圓孔時也會於屏幕產生環形且明暗相間的繞射條紋。假設圓孔直徑為 b 且圓孔至屏幕距離 D 遠大於圓孔直徑 b ，經由 Airy 於 1835 年以雙重積分法可推導出環形且明暗相間的繞射條紋應滿足下列關係式：

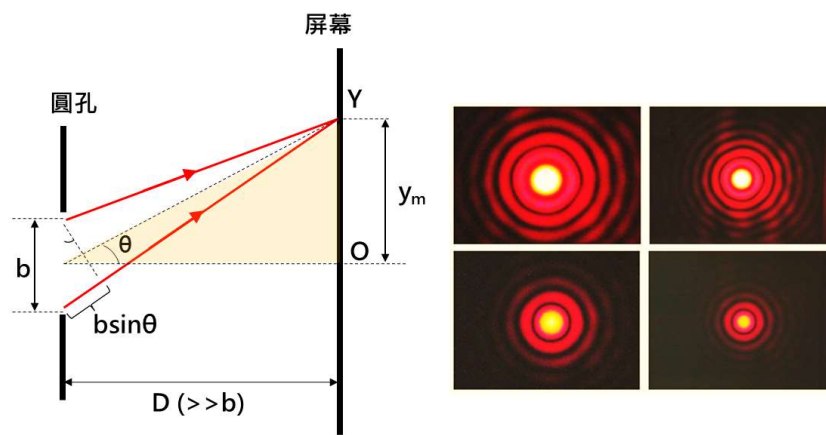
$$m\lambda = b\sin\theta \sim b\tan\theta = b\frac{y_m}{D}$$

$$\lambda \sim \frac{dy_m}{mD}$$

其中， λ 為光波的波長， y_m 為亮(或暗)環條紋至環心的距離。

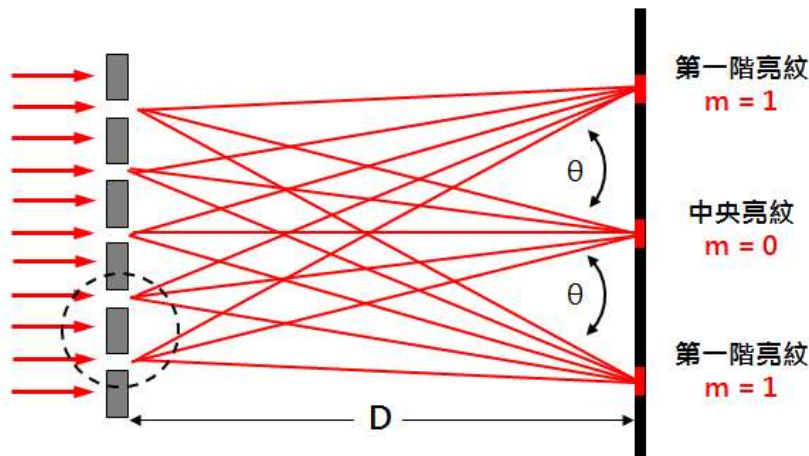
$m = 0$ 為中央亮盤； $m = 1.220$ 為第一暗環； $m = 1.635$ 為第一亮環

$m = 2.233$ 為第二暗環； $m = 2.679$ 為第二亮環； $m = 3.238$ 為第三暗環



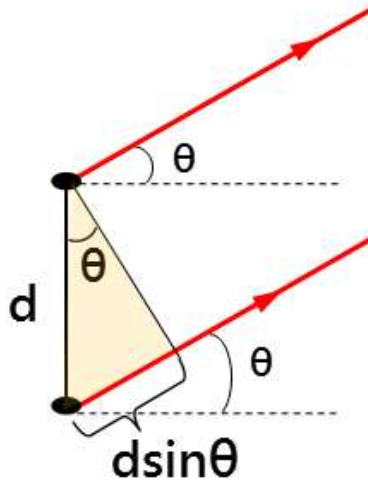
圖五 圓孔繞射示意圖。

F. 光柵繞射



圖六 光柵繞射示意圖。

如圖六所示，當平行光入射光柵時會受繞射作用影響而於屏幕上產生繞射條紋。假設屏幕至光柵距離 D 遠大狹縫寬度，則當光波通過相鄰兩狹縫至屏幕上某一點所產生的光程差如圖八所示。光程差可表示為 $d\sin\theta$ ，其中， d 為相鄰兩狹縫間距



圖七 相鄰兩狹縫光程差示意圖 (圖六虛框放大)。

假設光波通過相鄰狹縫於屏幕上 P 點所造成的光程差為波長 λ 為的整數倍，則光波會於屏幕上 p 點產生亮紋，即為建設性干涉，表示如下：

$$d \sin \theta = m \lambda, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots \quad (5)$$

$m = 0$ 中央亮紋 (zero-order maximum)

$m = \pm 1$ 第一階亮紋 (first-order maximum)

$m = \pm 2$ 第二階亮紋 (second-order maximum)

承上，已知屏幕上第 m 階亮紋至中央亮紋的距離為 y_m ，代入公式(5)即可求得波長 λ 。

$$m \lambda = d \sin \theta \sim d \tan \theta = d \frac{y_m}{D}$$

$$\lambda \sim \frac{d y_m}{m D}$$

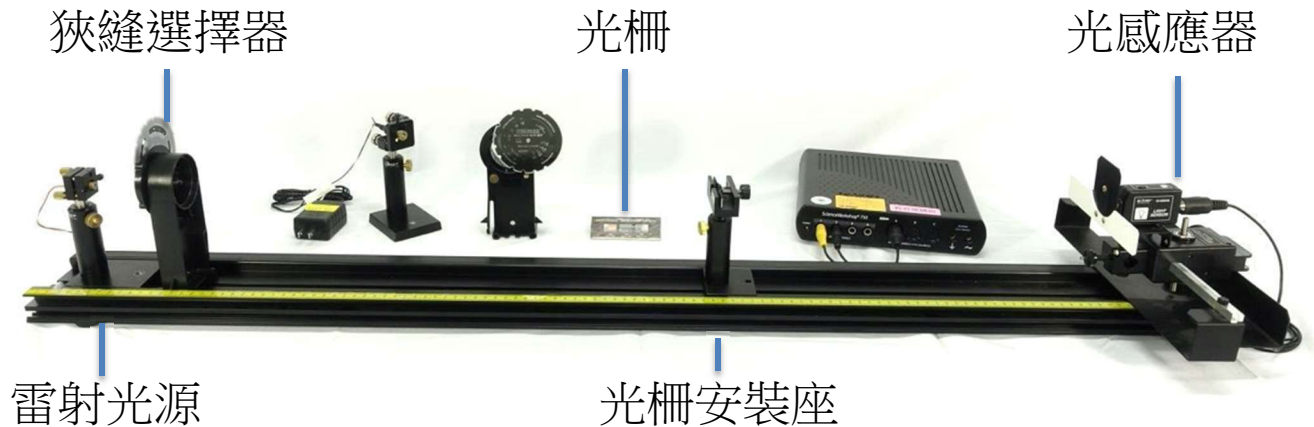
其中， λ 為波長。

注意事項(違反下列任一事項者，並情節重大者，本學期總分直接以零分計算)：

1. 切勿用眼睛直視雷射光源，實驗時請留意周遭同學與助教，以防實驗過程中因雷射光掃射而傷害眼睛。
2. 切勿徒手觸摸光學元件鏡面或反覆開關雷射。
3. 實驗過程若需移動雷射；應先關閉雷射；或將雷射光遮蔽。
4. 應將雷射光適當遮蔽，切勿使雷射光不預期射出實驗桌。

實驗步驟：

- 實驗前準備



實驗裝置如圖八所示。其中，轉動感應器(含光感應器與屏幕)應與光學軌道垂直。

圖八 實驗裝置圖。

A. 雙狹縫干涉

5. 將雙狹縫模組置於光學軌道中，調整雙狹縫模組位置使其與屏幕間距至少大於或等於 80.00 cm。
6. 打開雷射，同時調整雷射光高度與傾角以及雙狹縫模組位置，使雷射光垂直入射雙狹縫並於屏幕清楚呈現水平干涉條紋。
[註 1] 干涉條紋應由中央向兩側對稱呈現。
[註 2] 移動轉動感應器時，干涉條紋均可通過屏幕上方狹縫。
7. 移動轉動感應器，使光感應器可偵測到不同位置所對應的光強度訊號。
8. 分別測量各亮暗紋至中央亮紋間的距離 y_m ，再代入公式計算雷射光波長 λ 。
9. 更換不同規格雙狹縫，重覆上述步驟。

B. 單狹縫繞射

1. 將單狹縫模組置於光學軌道中，調整單狹縫模組位置使其與屏幕間距至少大於或等於 80.00 cm。

2. 打開雷射，同時調整雷射光高度與傾角以及單狹縫模組位置，使雷射光垂直入射單狹縫並於屏幕清楚呈現水平繞射條紋。
[註 1] 繞射條紋應由中央向兩側對稱呈現。
[註 2] 移動轉動感應器時，繞射條紋均可通過屏幕上方狹縫。
3. 移動轉動感應器，使光感應器可偵測到不同位置所對應的光強度訊號。
4. 測量各暗紋至中央亮紋間的距離 y_m ，再代入公式計算雷射光波長 λ 。
5. 測量中央亮帶與其他亮帶寬度。
6. 更換不同規格單狹縫，重覆上述步驟。

C. 圓孔繞射

1. 將單狹縫模組置於光學軌道中，調整單狹縫模組位置使其與屏幕間距至少大於或等於 80.00 cm。
[註] 圓孔附於單狹縫模組上。
2. 打開雷射，同時調整雷射光高度與傾角以及單狹縫模組位置，使雷射光垂直入射圓孔並於屏幕清楚呈現環形繞射條紋。
[註] 移動轉動感應器時，繞射條紋均可通過屏幕上方狹縫。
3. 移動轉動感應器，使光感應器可偵測到不同位置所對應的光強度訊號。
4. 分別測量各亮暗環至環心的距離 y_m ，再代入公式計算雷射光波長 λ 。
5. 更換不同規格圓孔，重覆上述步驟。

D. 光柵繞射

1. 將光柵片(含支撐架)置於光學軌道內，再將方格紙固定於屏幕前方。
2. 打開雷射並調整光柵位置與雷射光高度，使雷射光垂直入射光柵。
3. 標示方格紙上繞射條紋位置。
4. 測量各亮紋到中央亮紋距離 y_m ，再代入公式計算雷射光波長 λ 。
5. 更換不同規格光柵，重覆上述步驟。

實驗問題：

1. 若雷射光非垂直入射狹縫，屏幕上呈現的干涉或繞射條紋是否會改變？試說明之。
2. 在不改變實驗架構下(含狹縫規格，狹縫至屏幕距離)，僅改變雷射光波長，所測得的干涉或繞射條紋將如何改變？試說明之。
3. 楊氏當初進行實驗時並無雷射光源，他是如何透過實驗驗證光具有波動性？試說明之。

