

A. 單狹縫的繞射實驗

目的

觀察光通過單狹縫時所產生的繞射現象，並測量亮、暗紋的位置和理論值相比較。

原理

當光通過一單狹縫時，如縫愈窄則光線會愈向兩旁擴張，此現象即所謂的繞射。一平行光源通過狹縫時所產生的繞射現象稱為，Fraunhofer 繞射，非平行光源通過狹縫時所產生的繞射現象我們稱為 Fresnel 繞射。繞射現象的產生我們可依據惠更斯原理(即波前上的每個點，可被當作二次子波的起始點)，獲得圓滿的解釋。簡單討論如下：令狹縫的寬度為 b ，中心點為 O 點，狹縫口被均分成若干點，如圖 1 所示。 P_0 點光程差為零，稱為中央亮區。 P_1 點至狹縫頂點的距離比到狹縫底點的距離大一波長 λ ，亦就是說 P_1 點到狹縫頂點的距離，比 P_1 點到 O 點的距離大半波長 ($\lambda/2$)，所以狹縫頂點發出的二次子波與由 O 點發出的二次子波在 P_1 點的光程差 ($\lambda/2$)，干涉結果強度為零。同理狹縫頂點以下第一點和 O 點以下第一點的光程差也為半波長，故在 P_1 點其強度亦為零。如此，兩兩相對，整個狹縫的二次子波在 P_1 點皆干涉為零，因此 P_1 點為一暗點。依此類推， P_3 點至狹縫頂、底兩端的光程為 2 倍波長，我們將狹縫寬分為四段，則可知全部效應又干涉為零，所以 P_3 點亦為一暗點。而 P_2 點至狹縫上、下兩端點的光程差是 $\frac{3}{2}\lambda$ ，將狹縫度分為三段，則兩段干涉為零，另一段的效果是強度相加，故 P_3 點為一亮區。綜合以上分析，得出當

光程差 $b\sin\theta_1 = n \cdot \lambda$ ， $n = 1, 2, 3, \dots$ 時為暗區；

光程差 $b\sin\theta_1 = (n + \frac{1}{2}) \cdot \lambda$ ， $n = 1, 2, 3, \dots$ 時為亮區。

因為 $\theta_1 \approx \theta_2$ 甚小， $\sin\theta_1 \approx \tan\theta_2$ 即 $\sin\theta_1 = \frac{y}{D}$ ，故

$$b \frac{y}{D} = n \cdot \lambda \quad \text{亦即} \quad y = \frac{n \cdot \lambda D}{b}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

$$b \frac{y}{D} = (n + \frac{1}{2}) \cdot \lambda \quad \text{亦即} \quad y = \frac{(n + \frac{1}{2}) \cdot \lambda D}{b}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (2)$$

以上僅是較粗略的說明。對一平行光源而言，較嚴謹的教學推導可參考 (Halliday, Fundamentals of Physics Extended, Fifth Edition, P931~936.)。

由其推導結果可知 (2) 式只是一趨近式，事實上繞射條紋的亮區是發生在 $y = 1.43 \frac{\lambda D}{b}$, $2.459 \frac{\lambda D}{b}$, $3.47 \frac{\lambda D}{b}$, $4.479 \frac{\lambda D}{b}$,等位置上。

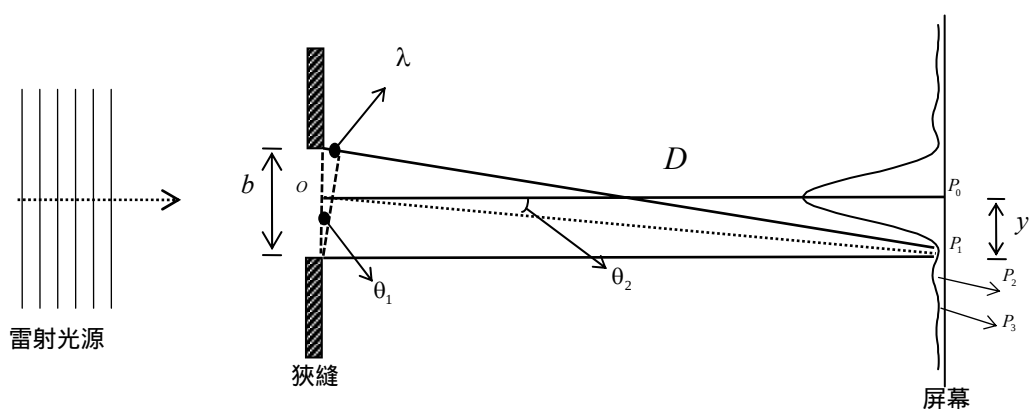


圖 1

儀器與裝置

雷射光源、單狹縫片、底座和支架 (×2)、紙屏幕、15 cm 短尺、捲尺。



圖 2 儀器裝置圖

步驟

注意事項：

- 不可將雷射光照射眼睛。
- 進行光學實驗之前應將身上會反射物品取下，如：手錶、項鍊、戒指.....
- 實驗前仔細清點整理盒內各狹縫等之數目，若有短少馬上回報助教。
- 將狹縫置於支架上，或取下時要小心，以防止狹縫片破損，且實驗前後值日生應仔細檢查是否有破損現象。（狹縫單價很貴，請小心使用）

1. 將實驗器材配置如圖 2 所示。
2. 移開狹縫片使光直接照射在紙屏上，並用鉛筆在紙屏上的亮點寫上“ P_0 ”記號。
3. 置放狹縫片於雷射前，且左右移動狹縫，使雷射光源正射於狹縫上。
4. 用鉛筆把紙屏上的亮、暗條紋的位置畫記號。
5. 以捲尺量出狹縫至紙屏的距離 D 。
6. 利用 15 cm 的短尺量出各亮、暗條紋中心至 P_0 點的距離 y ，並用 (1)、(2) 式計算出 y 之理論值。
7. 以兩刀片代替狹縫，並調整狹縫寬度，觀察其繞射條紋的變化。

預習問題

1. 產生 Fraunhofer 繞射的條件是什麼？
2. 產生 Fresnel 繞射的條件是什麼？

記錄

1. 狹縫寬 $b =$ _____ ； $D =$ _____ ； $\lambda =$ _____。
- 2.

區域	使用公式（代入 n 值）	y 理論值	y 實驗值
右第一暗區中心			
右第一亮區中心			
左第一暗區中心			
左第一亮區中心			

思考問題

1. 中央亮區之寬度是否等於第一亮區寬度的 2 倍？為什麼？
2. 當狹縫寬度改變時，繞射條紋有何變化？
3. 繞射之亮、暗紋位置 y 之理論值與實驗值之誤差為何？
4. 若雷射光之波長改變，則繞射條紋有何變化？

B. 邊緣繞射實驗

目的

觀察光入射在障礙物邊緣時所產生的繞射現象。

原理

幾何光學中認為光是沿直線前進，但若仔細觀察光在障礙物後面所造成的陰影時，就會發現光也有繞射的現象，亦即光亦應具有波動性。如用一個銳利的刀口擋住雷射光束的一部分，則被刀口擋住部分的後面並不是完全黑暗，仍然有一部分光未被擋住而繞射進去；且在未被擋住部分的附近一帶，光也因繞射現象強度變得不相同形成繞射條紋，詳細見圖 3 所示。因其理論太繁雜在此不予討論，有興趣者可參考【Francis A. Jenkins and Harvey E. White (1976), Fundamentals of Optics, Fourth Edition, P388~396.】。

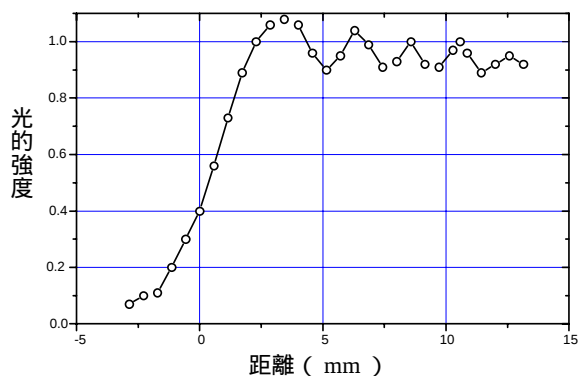


圖 3 光通過障礙物邊緣後其強度分佈圖

儀器與裝置

雷射光源、刀片、底座和支架、紙屏幕。

步驟

注意事項：

- 不可將雷射光照射眼睛。
- 進行光學實驗之前應將身上會反射物品取下，如：手錶、項鍊、戒指……

- 將雷射光源與紙屏幕相距約 1.3 米。
- 把一片刀片置於支架上，然後置於雷射光前方，並左右移動位置使雷射光束被刀口擋住一半。

3. 觀察紙屏上的繞射現象，並用筆畫下它的大概圖形。

預習問題

1. 各舉一例說明光具粒子性或波動性。

記錄

在實驗報告紙上畫出邊緣繞射的圖形。

思考問題

1. 你是否能由肉眼判斷出光通過障礙物邊緣後，在未被障礙物遮蔽射附近的繞射現象。若不能則應如何驗證呢？

C. 楊氏雙狹縫之干涉及繞射實驗

目的

觀察光通過雙狹縫後所產生的繞射及干涉條紋，並利用此條紋之測量出雷射光源的波長。

原理

楊氏雙狹縫干涉實驗為提供光是波動最直接有力的實驗證據。早期由於缺乏同調光源(coherent light source)，為了確保實驗在空間同調長度(spatial coherent length)之內進行，其採用之方法為在光源與雙狹縫之間再放置一個單狹縫，如此做法的缺點是使得光源強度減弱，不易觀測到清晰之干涉條紋。現在改以同調性高且亮度極大的雷射光作為實驗光源後，使得實驗極易進行，因而在屏幕上的干涉條紋明暗對比大為增加。

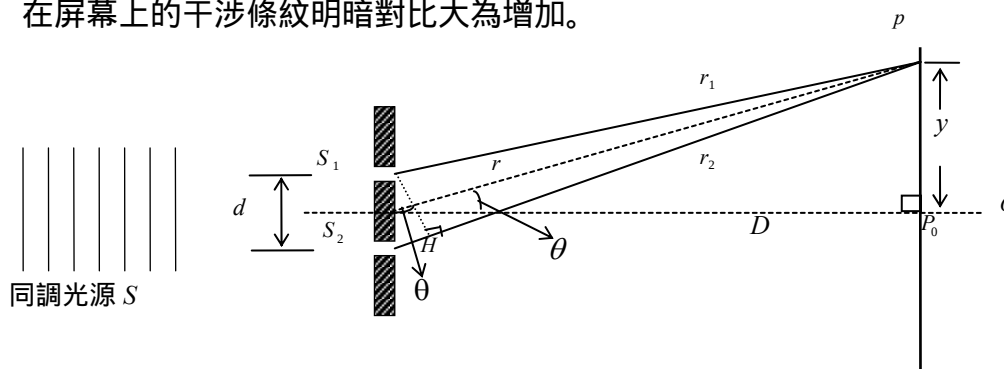


圖 4 雙狹縫實驗

在雙狹縫干涉實驗中，我們將兩狹縫之間的干涉效應與狹縫自身的繞射效應分開。首先先考慮雙狹縫效應，考慮此二點光源在屏幕上的光波疊加即可。圖 4 表示以平行光入射雙狹縫，二狹縫間距為 d ，狹縫至屏幕之距離為 D 。二狹縫可視為點光源 S_1 與 S_2 。從 S_1 及 S_2 發射出球面波，在屏幕上任意之觀察點 P 產生干涉。由於 $D \gg d$ ，二光線 S_1 與 S_2 之光波到達 P 點可視為兩平行光，因此其光程差為 $r_2 - r_1 \cong d \sin \theta$ 。

若光程差為波長的整數倍時可在螢幕上觀察到 n 階建設性干涉 (constructive interference) 亮紋。

$$d \sin \theta_n = n\lambda \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$$

若光程差為半波長的奇數整數倍時可在螢幕上觀察到 n 階破壞性干涉 (destructive interference) 亮紋。

$$d \sin \theta_m = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$$

因為 θ_n 之角度很小，所以， $\sin \theta_n \cong \tan \theta_n = \frac{y}{D}$

$y = n \frac{D}{d} \lambda$ $n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ ，則在螢幕上為建設性干涉

$y = (n + \frac{1}{2}) \frac{D}{d} \lambda$ $n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ ，則在螢幕上為破壞性干涉

所以，相鄰兩亮紋中心之間距 Δy 為： $\Delta y = \frac{D}{d} \lambda$

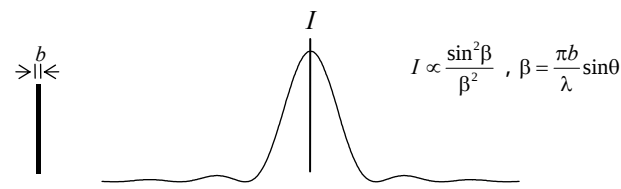
干涉光譜的光強度 $I' = 4I_0^2 \cos^2 \gamma$

而各個單狹縫又會有繞射效應，最終觀察到的結果是繞射效應與干涉效應相加

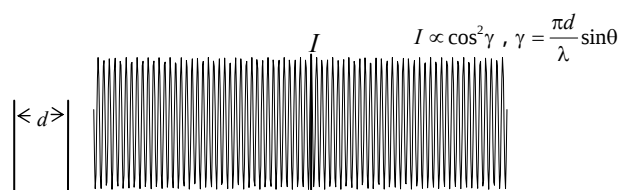
的結果，則 P 點的光強度 $I = 4A_0^2 \frac{\sin^2 \beta}{\beta^2} \cos^2 \gamma$

其中 $\beta = \frac{\pi}{\lambda} b \sin \theta$ ， $\gamma = \frac{\pi}{\lambda} d \sin \theta$ ，詳細推導參考 (Halliday, Fundamentals of Physics Extended, Fifth Edition, P940~941.)

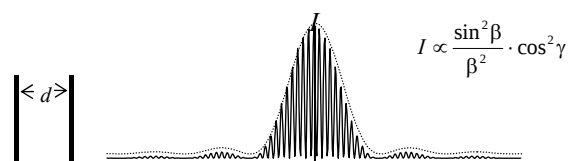
光譜圖如圖 5 所示。



(a) 單狹縫的繞射



(b) 雙狹縫的干涉



(c) 雙狹縫的繞射與干涉

圖 5 光通過雙狹縫後的繞射

儀器與裝置

雷射光源、雙狹縫片、紙屏幕、底座和支架（×2），15 cm 短尺捲尺。

步驟

注意事項：

- 不可將雷射光照射眼睛。
- 進行光學實驗之前應將身上會反射物品取下，如：手錶、項鍊、戒指
- 實驗前仔細清點整理盒內各狹縫等之數目，若有短少馬上回報助教。
- 將狹縫置於支架上，或取下時要小心，以防止狹縫片破損，且實驗前後值日生應仔細檢查是否有破損現象。（狹縫單價很貴，請小心使用）

- 將屏幕置放在雷射光源前方約 1.0 m 處。
- 打開雷射光源，使雷射光打在屏幕中央，然後用鉛筆在屏幕上的亮點中央記上“ P_0 ”記號。
- 把雙狹縫放置於雷射光源前方使狹縫與光行進方向重疊，並在左右移動雙狹縫位置，使屏幕上出現明顯的干涉、及繞射條紋，將此一圖形記錄下來。
- 用捲尺量出雙狹縫到屏幕的距離 D 。
- 用短尺量出各亮暗條紋到 P_0 點的距離 y 。
- 計算雷射光的波長 λ 。

預習問題

- 何謂繞射？何謂干涉？它們之間的區別為何？

記錄

- 畫出雙狹縫干涉圖形

2. $b =$ _____ mm ; $d =$ _____ mm ; $D =$ _____ mm ; λ 平均值 = _____ nm

區域		y 值 (mm)	使用公式 (代入 m 值)	雷射光波長 λ (nm)
中央亮區內的 干涉條紋	右邊第一亮區			
	左邊第一亮區			
	右邊第二暗區			
	左邊第二暗區			
外包跡右邊第一暗區				
外包跡左邊第一暗區				

思考問題

1. 若雷射光的波長改變，則繞射及干涉條紋有何變化？
2. 波長 $6500 \times 10^{-10} \text{ m}$ 的光，入射在兩縫中心相距 0.02 mm 的雙狹縫上，且雙狹縫距屏幕的距離為 80.0 cm ，求干涉帶之寬度。
3. 利用雙狹縫實驗所求出的雷射光波長，與雷射光之實際波長的百分誤差為何？

D.多狹縫及光柵繞射實驗

目的

觀察多狹縫及光柵的繞射現象，並利用光柵繞射求出雷射光的波長。

原理

光柵為光學上廣為應用於分析吸收或螢光光譜的元件，而其基本原理為一多狹縫干涉的現象。首先考慮三狹縫的例子，若狹縫間的距離皆為 d ，則當鄰近狹縫到同一紙屏位置所形成的光程差為波長的整數倍時，會形成建設性的干涉。所以當實驗條件滿足(參考雙狹縫干涉之示意圖-圖 4)

$$d \sin \theta = m\lambda \quad , \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

會在紙屏上形成一亮紋。於雙狹縫實驗時我們得知當鄰近狹縫到紙屏位置所形成的光程差為半波長在加波長的整數倍時，會形成破壞性干涉。也就是說於

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

的位置應該是暗紋，但是在三狹縫的情況中(如圖 6(a)所示)，卻會是個較微弱的亮紋。以一簡化的直觀概念來理解：由雙狹縫實驗結果得之，經過其中任兩個鄰近狹縫之光會因破壞性干涉而相互抵銷，故所剩餘經過第三狹縫的光會因無其他干涉效應而於紙屏上呈現一較為微弱的亮紋。由簡單的三角函數相加可知，若三狹縫間兩鄰近狹縫的光程差為 $1/3$ 或 $2/3$ 波長，則其總合將為零。所以三狹縫干涉圖形將如圖 6(a)所示，於兩個較大干涉亮紋之間會有一較微弱的亮紋。

四狹縫的干涉圖形可經由類似以上推論的方式來了解。當狹縫間的距離同樣皆為 d 時，則鄰近狹縫到紙屏位置所形成的光程差為波長的整數倍時，一樣的會形成建設性的干涉。亦即產生最強干涉亮紋的實驗條件仍為

$$d \sin \theta = m\lambda \quad , \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

同樣的由基本的三角函數相加可知，當四狹縫間兩鄰近狹縫的光程差為 $1/4$ 、 $2/4$ 或 $3/4$ 波長，其總合都將為零。所以可推導得知，四狹縫干涉形成破壞性干涉的條件將為

$$d \sin \theta = (m \pm 1/4)\lambda \quad \text{或} \quad d \sin \theta = (m + 1/2)\lambda \quad , \quad \text{其中 } m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

四狹縫的干涉圖形將如圖 6(b)所示。同樣的推理方式可適用於預測五狹縫、六狹縫以致多狹縫的干涉圖形。

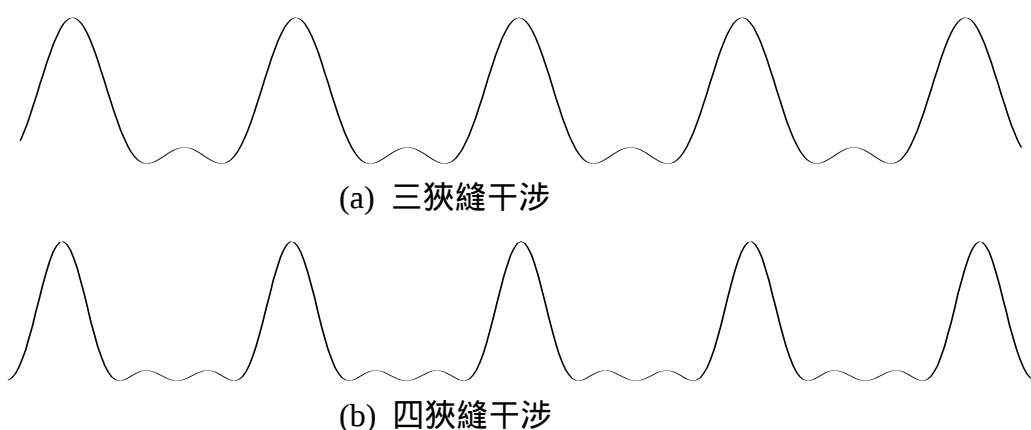


圖 6 (a)三狹縫干涉(b)四狹縫干涉圖

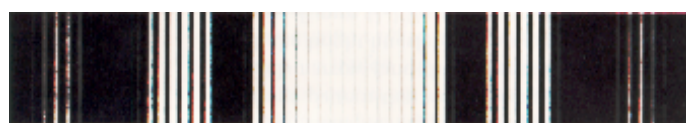
當狹縫的數目極多時，主要的干涉亮紋會變得非常狹窄而明亮次要干涉亮紋會變得微弱而不可見，如圖六所示。也就是說，這時候光被集中到狹窄的亮紋上，這個特性可以利用來分析光譜。而主要亮紋的位置可由下面公式來推算，詳細請參考 (Halliday, Fundamentals of Physics Extended, Fifth Edition, P942~946.)。

$$d \sin \theta = m \cdot \lambda \quad , \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \quad (10)$$

其中 d 是鄰近兩狹縫的中心相距之距離， θ 是第 m 條主要干涉亮紋與光柵中央的連線和入射光之間的夾角。



(a)單狹縫繞射



(b)雙狹縫繞射



(c)多狹縫干涉

圖7 光通過各種狹縫時的繞射及干涉圖形

儀器與裝置

雷射光源，三狹縫、四狹縫、五狹縫、六狹縫、80 lines/mm 與 300 lines/mm 光柵，底座及支架（×2）。

步驟

注意事項：

- 不可將雷射光照射眼睛。
- 進行光學實驗之前應將身上會反射物品取下，如：手錶、項鍊、戒指
- 實驗前仔細清點整理盒內各狹縫等之數目，若有短少馬上回報助教。
- 將狹縫置於支架上，或取下時要小心，以防止狹縫片破損，且實驗前後值日生應仔細檢查是否有破損現象。（狹縫單價很貴，請小心使用）

- 將雷射光直射到約 1.0 米遠的紙屏上，並作“ P_0 ”記號。
- 將三狹縫置於雷射光前方。
- 調整三狹縫位置使牆上的繞射、干涉條紋非常清晰。
- 觀察並記錄其圖形。
- 依次更換 4~6 狹縫，並重複步驟 1~4。
- 更換多狹縫為光柵，並使紙屏與雷射光源間距離約為 1.0 米且定出 P_0 點。
- 觀察圖形，並量出光通過光柵時，其亮點中心至 P_0 點的距離。
- 利用捲尺測量光柵至紙屏的距離 D 。
- 利用公式 (10) 求出雷射光的平均波長。

預習問題

- 當光通過的狹縫數愈多時，其繞射及干涉條紋有何變化？

記錄

- 請記錄 3-6 狹縫繞射的圖形
- 請記錄兩片光柵的圖形並完成下列表格：

a) 光柵：80 條/mm

$d =$ _____ mm : $D =$ _____ mm

亮點名稱	y 值(mm)	使用公式 (代入 m 值)	雷射光波長 λ (nm)
左第一亮點			
左第二亮點			
右第一亮點			
右第二亮點			

b) 光柵：300 條/mm

$d =$ _____ mm : $D =$ _____ mm

亮點名稱	y 值(mm)	使用公式 (代入 m 值)	雷射光波長 λ (nm)
左第一亮點			
左第二亮點			
右第一亮點			
右第二亮點			

公式：

單狹縫繞射公式	亮紋： _____ $n =$ _____	暗紋： _____ $n =$ _____
雙狹縫干涉公式	亮紋： _____ $m =$ _____	暗紋： _____ (干涉項) $m =$ _____ _____ (繞射項) $m =$ _____
光柵公式		亮點： _____ $m =$ _____

思考問題

1. 利用光柵所求出的雷射光平均波長，與雷射光的實際波長其百分誤差為何？