

圓孔繞射

【目的】

1. 學習光的繞射現象和繞射的基本原理。
2. 藉由觀察圓孔繞射在不同距離下的花紋狀態，學習測量 He-Ne 雷射波長的方法。
3. 學習利用圓孔繞射現象測量 He-Ne 雷射波長的方法來產生平行光。
4. 觀察和比較單狹縫在不同的狹縫寬度和觀測距離下的繞射花紋，並說明其差異和原因。

【原理】

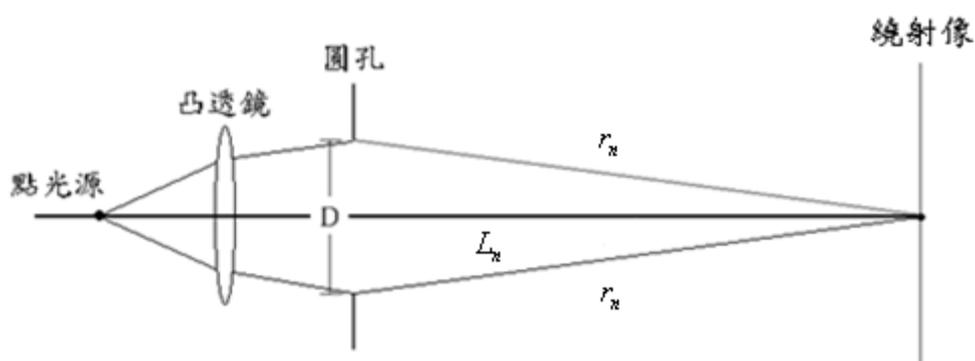
凡是不能用反射、折射或散射來解釋的光偏離直線傳播的現象稱為光的繞射 (diffraction)。即光可繞過障礙物，傳播到障礙物的幾何陰影區域中，並在障礙物後的觀察屏上呈現出光強的不均勻分佈。通常將觀察屏上的不均勻光強分佈稱為繞射圖樣。

Huygens 在 1690 年發表的《論光》一書中提出了可以解釋繞射現象的重要原理——Huygens principle：光波擾動（波前）所到達的每一點都起著一個次級波源（子波源）的作用，每一個次級波源發出次級球面波（子波），它向四面八方擴展，所有這些次級波的包絡面便是新的波前。Huygens principle 可以決定光波從一個時刻到另一個時刻的傳播，確定波的傳播方向，也可以說明繞射現象的存在。但不能說明繞射過程及其強度分佈。

1818 年，Fresnel 在研究了光的干涉現象後，認為次級波源來自於同一光源，是彼此相干的，故綜合 Huygens principle 和干涉原理，得到 Huygens - Fresnel principle：波前上任何一個未受阻擋的點，都可以看作為一個次級波源，在其後空間任一點的光振動則是這些次級波源產生的次級波相干疊加的結果。

光的繞射現象與光的干涉現象就其實質來講，都是干涉光線波疊加引起光強的重新分佈。不同之處在於，干涉現象是有限個干涉光線波的疊加，而繞射現象則是無限多個干涉光線波的疊加結果。

1. 圓孔繞射 (diffraction by a circular aperture)



圖一 圓孔繞射原理示意圖

圓孔繞射原理示意圖如圖一所示，點光源經凸透鏡聚焦後，再通過圓孔產生繞射現象，在幕上形成一圈一圈亮暗相間的繞射環紋，隨著圓孔到繞射像之間的距離不同，看到的繞射環紋圈數也不同。

由圖一可知：當出現第 n 個繞射環紋時（第 n 階），光程差 $\Delta = r_n - L_n = n\lambda$

$$\sqrt{L_n^2 + \left(\frac{D}{2}\right)^2} = L_n + n\lambda, \quad L_n^2 + \left(\frac{D}{2}\right)^2 = L_n^2 + 2n\lambda L_n + n^2\lambda^2, \quad \left(\frac{D}{2}\right)^2 = 2n\lambda L_n + n^2\lambda^2$$

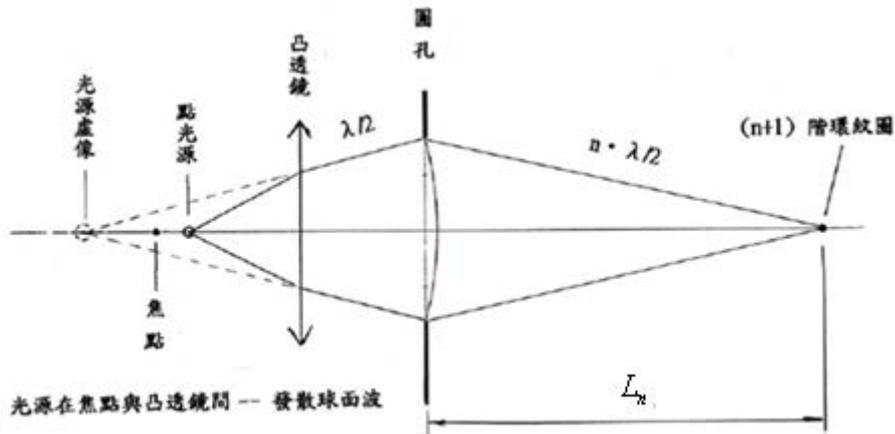
$$2n\lambda L_n = \left(\frac{D}{2}\right)^2 - n^2\lambda^2, \quad \lambda = \frac{\left(\frac{D}{2}\right)^2}{2nL_n} - \frac{n\lambda^2}{2L_n}, \quad \text{又 } L_n \gg \lambda^2, \quad \text{故 } \lambda = \frac{\left(\frac{D}{2}\right)^2}{2nL_n} \dots\dots (1)$$

D：圓孔直徑，n：第n次暗點， L_n ：第n階繞射環紋與圓孔的距離

2. 平行光的修正

(1) 入射光為‘發散光’

凸透鏡的焦點若不精準的安置在空間濾波器上，就無法造出一個完美的平行光。非平行光打入圓孔時，到達圓孔中心與圓孔邊緣的光二者間已存在有光程差。如圖二所示，當點光源落在凸透鏡與焦點間時，由圓孔向凸透鏡看，可看到點光源的放大虛像，可知照入圓孔的是‘發散光’。



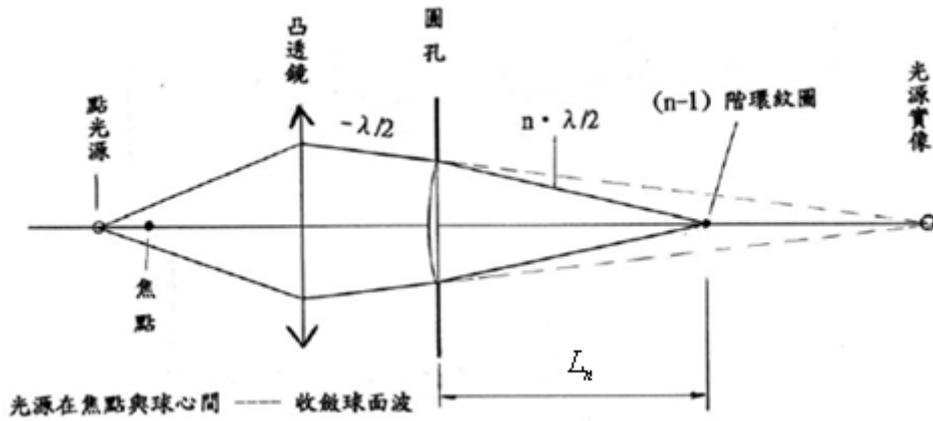
圖二 發散光成像圖

設到達圓孔中心與圓孔邊緣的光二者間存在有光程差 $\frac{\lambda}{2}$ ，在距離圓孔 L_n 處的觀測點上，將看到 (n+1) 階的繞射花紋，代入公式 (1) 中計算波長時，因為看到的是 (n+1) 階的繞射花紋，很自然的會用 (n+1) 取代 n，造成實驗值全面偏小（階數愈低小愈多），且因光具座不夠長，因而看不到第一階繞射花紋（位於孔後無限遠處）。

由上述可知：當 λ 的實驗值由小變大且全面偏小，就要用螺旋測微器調整凸透鏡位置，離空間濾波器遠些。

(2) 入射光為‘收斂光’

如圖三所示，當點光源落在焦點外側時，點光源在凸透鏡後（因像距很大也在圓孔後）成放大實像，可知照入圓孔的是‘收斂光’。



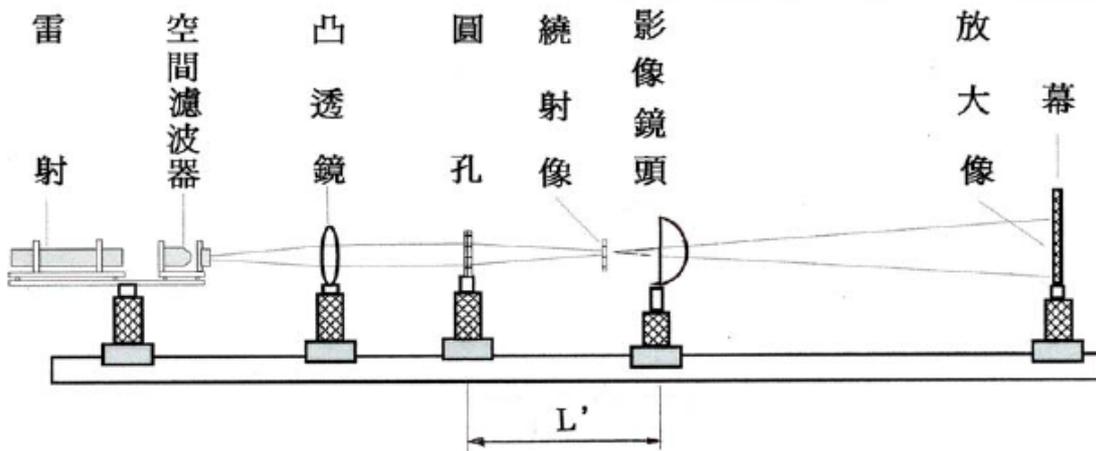
圖三 收斂光成像圖

設到達圓孔中心與圓孔邊緣的光二者間存在有光程差 $-\frac{\lambda}{2}$ ，在距離圓孔處的觀測點上，將看到 $(n-1)$ 階的繞射花紋，因為看到的是 $(n-1)$ 階的繞射花紋，代入公式(1)中計算波長時，很自然的會用 $(n-1)$ 取代 n ，造成實驗值全面偏大（階數愈低大愈多）。

由上述可知：當 λ 的實驗值由大變小且全面偏大，就要用螺旋測微器調整凸透鏡位置，靠空間濾波器近些。

【實驗器材與裝置】

光具座組、He-Ne 雷射(波長=632.8nm)、空間濾波器(20倍顯微物鏡+孔徑 $10\mu\text{m}$ 微孔)、凸透鏡、圓孔片(孔徑 $D=2\text{mm}$)、影像鏡頭($f=62.5\text{mm}$)、幕、可調式單狹縫、捲尺、30cm直尺



圖四 圓孔繞射實驗裝置圖

【注意事項】

1. 因為時間的關係，雷射及空間濾波器的準直調整於實驗開始前已調整妥當，請勿隨意調整。違者該實驗成績零分計算，並請自行調整。
2. 微孔是極敏感的高價器材，嚴禁碰觸、擦拭、吹氣。
3. 影像鏡頭務必鎖緊，避免緩慢下滑導致成像偏離或消失，影響繞射像的觀察。

【實驗步驟】

1. 利用圓孔繞射現象測量 He-Ne 雷射的波長

(1) 仔細調整各實驗器材間的光軸準直及雷射前的空間濾波器，利用凸透鏡造就出一個完美的平行光。

註：助教會作雷射及空間濾波器的準直調整，讓雷射光通過空間濾波器後，有非常純淨的零級亮點。實驗中只需依照圖四所示，放置儀器，並微調其位置，使原光路不變。

註：用眼睛判斷是不準的，實驗進行中需要再修正。

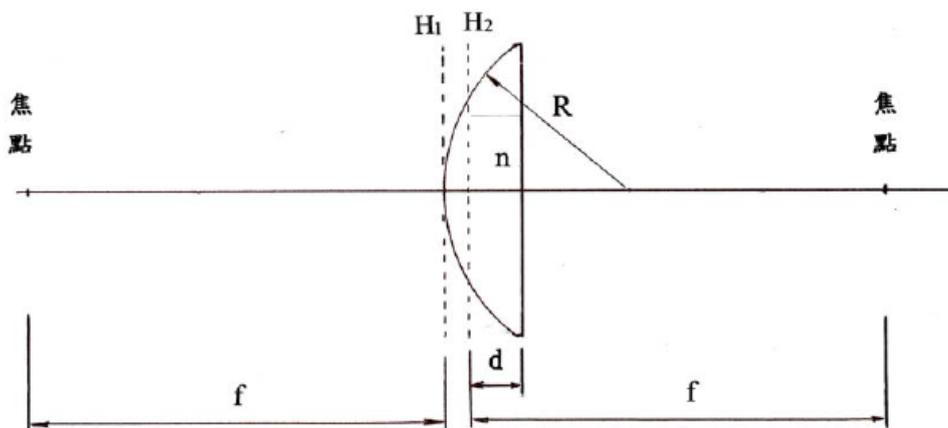
(2) 2 mm 圓孔安放在凸透鏡前（不要太遠），圓孔位於雷射光的正中央（很重要），經由影像鏡頭的放大作用，即可在幕上看到圓孔繞射花紋的放大像。

註：將 $\lambda = 632.8\text{nm}$ 、 $n = 3$ 、 $D = 2\text{mm}$ 代入公式 (1) 中，得 $L = 26.34\text{cm}$ 。

(3) 影像鏡頭精確的安置在圓孔前 26.34 cm 上（注意支架位置的換算）。凸透鏡滑台上螺旋測微器置於 4.00，仔細調整凸透鏡滑台前後位置，當幕上看到圓孔繞射環紋的中央第三次由亮轉暗時，固定凸透鏡滑台。（利用第三階繞射花紋、第一次修正平行光）

(4) 由幕前向圓孔移動影像鏡頭，連續記錄 8 次中央亮點由亮轉暗的 L 測量值。

註：中央黑點全黑的範圍不小，測 $n = 2$ 中央黑點位置時，由 $n = 1.5$ 中央亮點方向靠近 $n = 2$ ，當中央亮點剛好全黑時記錄距離 A ；再由 $n = 2.5$ 中央亮點方向靠近 $n = 2$ ，當中央亮點剛好全黑時記錄距離 B 。 L ：支架中心的距離， $L = \frac{A+B}{2}$ 將是可信任的測量值。



圖五 成像透鏡圖

球面半徑 $R = 30.0\text{mm}$ ，折射率 $n = 1.48$ ，焦距 $f = 62.5\text{mm}$

主平面 H_1 、 H_2 ，主平面 H_2 與鏡底距離 $d = 7.5\text{mm}$

(5) 在幕上看到的繞射花紋是經由影像鏡頭放大的像，影像鏡頭的焦距 $f = 62.5\text{mm}$ ，實際的圓孔繞射環紋落在影像鏡頭的焦點前方。由圖四和圖五可知：圓孔與其繞射環紋間的距離 L 與兩支架中心的距離 L' 的關係： $L = L' - 55.0\text{mm}$ 。

(6) 將數據代入公式 (1)，算出 $n = 1 \sim n = 8$ 的 He-Ne 雷射波長，並求平均值。

(7) 觀察 $n = 1 \sim n = 8$ 的波長結果，判斷凸透鏡應該遠離或靠近空間濾波器後，調整螺旋測微器，再重複步驟 (4) 的測量。

註：務必記錄螺旋測微器的位置，方便後續的判斷。

(8) 重複步驟 (7)，當測量值沒有特別偏小或偏大時，移開圓孔和成像透鏡，仔細看看真正的平行光是什麼樣子。

2. 觀察單狹縫的繞射花紋

(1) 將可調式單狹縫取代圓孔的位置，分別利用狹縫寬度 D 和觀測距離 L 二變數，組合出三個 $\frac{L}{D}$ 的比值，分別代表觀測距離‘近’、‘適中’、‘遠’。

註：建議將觀測距離 L 固定，改變狹縫寬度 D ，較容易看到繞射花紋的變化。

(2) 將狹縫寬度與影像鏡頭位置調整到所選取的數值上來觀察繞射花紋。

註：可調式單狹縫的旋鈕有刻度，可用來大略估計狹縫寬度 D 。

(3) 畫出三個 $\frac{L}{D}$ 的比值下所看到的繞射花紋，比較三者之間主要的不同點，並試由繞射理論來說明三個繞射花紋不同點產生的原因。

【問題】

1. 何謂平行光？如何產生？（圓孔繞射除外）
2. 何謂遠場繞射（Fraunhofer Diffraction）？何謂近場繞射（Fresnel Diffraction）？二者的分界點在那裡？
3. 何謂 Fresnel zone plate？

【參考資料】

1. 幾何光學，葉玉堂、饒建珍、肖峻編著，郭浩中校訂，台北市，五南圖書出版股份有限公司，2008年12月，CH 6.1、6.2.1、6.3.4、6.7。
2. 現代光學，劉繼芳編著，張勝雄、梁財春編修，台北縣中和市，新文京開發出版股份有限公司，2006年9月，CH 3.3。
3. Optics, by Eugene Hecht, 4th Edition, Ch 10.2.5。