

5-3 光的繞射現象

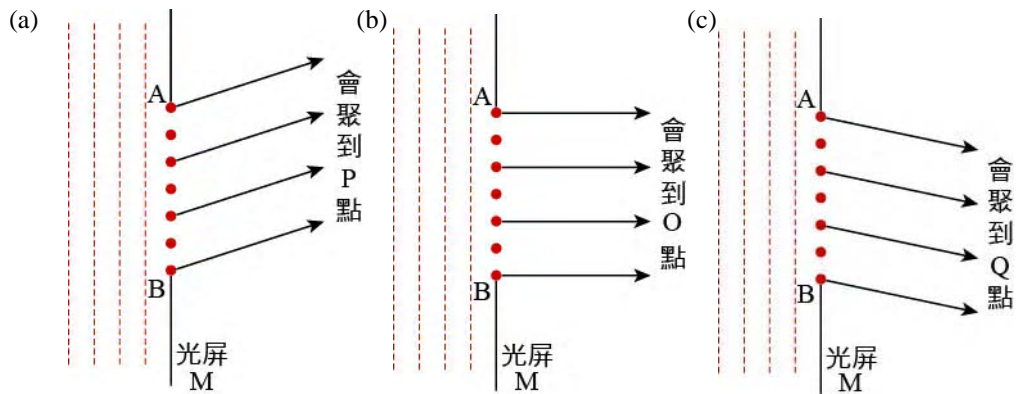
在上一節的圖 5-12 楊氏干涉實驗中，光線抵達狹縫 S_1 和 S_2 的波前視為點波源，分別往各方向發出光線，其實這就是繞射現象。最右邊的光屏 C 上各點均有來自 S_1 和 S_2 的兩光線，因疊加而產生干涉條紋。

如果在楊氏雙狹縫干涉實驗中，只有一個狹縫，但是狹縫有相當的寬度（即抵達狹縫的波前不僅是一點，不能只視為一個點波源），情況會怎樣呢？圖 5-20 的示意圖中，光屏 M 只有單一狹縫，其寬度較楊氏干涉實驗中的狹縫略大（約為 0.1 至 1 公釐）。為簡單起見，設波長為 λ 的單色光，以垂直於狹縫的方向入射。波前抵達狹縫開口的每一位置，都在同一波前上，每一點皆為子波源，往各方向發出光波，所以光屏 C 上的每一點皆有無限多條光線抵達。通常實驗中兩光屏 M 和 C 之間的距離約 1 公尺以上，遠大於狹縫的寬度。若 P 為光屏 C 上的任一點，從狹縫開口的每一子波源發出而會聚於 P 點的光可視為平行光。



▲圖 5-20 單狹縫繞射實驗示意圖，遠處光屏 C 上每一點均受無限多光線照射。

例如圖 5-21 的(a)、(b)和(c)中，各圖的平行光（只畫出四條光線作代表）分別會聚到圖 5-20 光屏 C 上的 P 、 O 和 Q 各點（ O 點位於狹縫寬的垂直平分線上，此垂直平分線稱為中央線）。

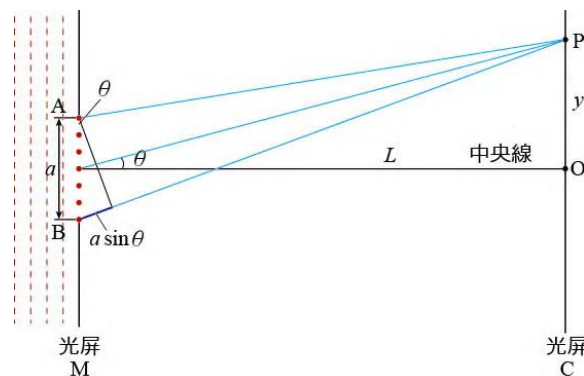


▲圖 5-21 從狹縫開口的每一子波源發出而會聚於屏上的光可視為平行光。(a)、(b)和(c)圖中的三組平行光線分別會聚於光屏上的 P、O 和 Q 點。

抵達光屏 C 上各點的光線會因為疊加而造成光強度加強或減弱，底下分別討論光屏 C 上各位置的亮暗情形。

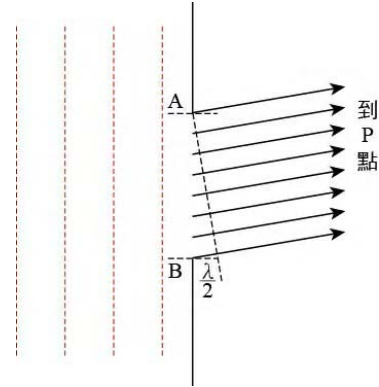
因為抵達狹縫開口的光為同一波前，而且狹縫與光屏的距離甚遠，所以考慮光屏上各位置的干涉情形僅需考慮各光線的路程差。設圖 5-22 中狹縫的寬度為 a ，狹縫中點至光屏 C 的距離為 L ，狹縫中心至光屏上某點 P 的方向與中央線的夾角為 θ （稱為繞射角），光屏上 P 點與中央 O 點的距離為 y 。狹縫開口兩端 A 和 B 至 P 點的路徑長分別為 \overline{AP} 和 \overline{BP} ，其路徑差為 $a \sin \theta$ 。P 與中央 O 點的距離可寫為 $y = L \tan \theta$ ，由於我們對光屏上有興趣的部分在中央位置附近，所以 θ 甚小， $\sin \theta \approx \tan \theta$ ，故可近似寫為

$$y = L \sin \theta。$$



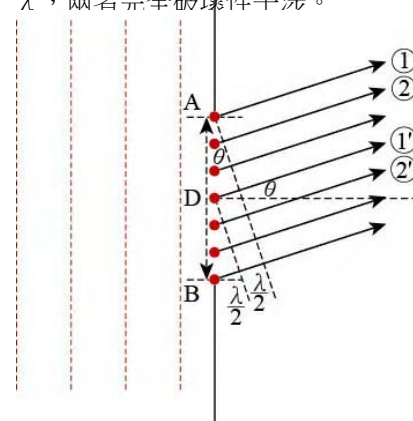
▲圖 5-22 單狹縫繞射實驗示意圖。

1. 光屏中央位置 O 點：若繞射角 $\theta = 0$ ，則對應光屏上的位置為中央 O 點，即 $y=0$ 。此情形即圖 5-21(b)所示，與狹縫垂直的平行光線會聚在 O 點，所有光線的路程都相同，同相到達，故疊加成為完全建設性干涉，應為光屏上最亮的位置。



2. 若光屏上 P 點所對應的繞射角 θ 符合 $a \sin \theta = \frac{1}{2} \lambda$ ，如圖 5-23 所示。從狹縫開口至 P 點的光線中，僅第一條光線 AP 和最後一條光線 BP 路程差為 $\frac{1}{2} \lambda$ ，會互相完全抵銷之外，其餘光線的路程差都沒有 $\frac{1}{2} \lambda$ 。雖然各光線不是同相抵達 P 點，並未作完全建設性或完全破壞性干涉，P 點仍有相當的亮度，其實是光屏上中心最亮位置 O 點附近亮紋的延伸。

▲圖 5-23 $a \sin \theta = \frac{1}{2} \lambda$ 時，從狹縫至 P 點的光線中，AP 和 BP 路程差為 $\frac{1}{2} \lambda$ ，兩者完全破壞性干涉。



3. 若 P 點所對應的繞射角 θ 符合 $a \sin \theta = \lambda$ 時，此時我們將狹縫 AB 分為 AD 和 DB 兩等分，如圖 5-24 所示。圖中標示①和①'兩光線的路程

▲圖 5-24 $a \sin \theta = \lambda$ 時，將狹縫 AB 分為 AD 和 DB 兩等分，這兩部分發出抵達 P 點的光線會完全抵銷。

差為 $\frac{\lambda}{2}$ ，形成完全破壞性干涉；圖中標示②和②'兩光線的路程差也

是 $\frac{\lambda}{2}$ ，也形成完全破壞性干涉；如此，在 AD 區域中發出繞射角為

θ 的任一光線，在 DB 區域中都存在一條繞射角同為

θ 且與之路程差為 $\frac{\lambda}{2}$ 的光線，兩者形成完全破壞性干涉而抵銷。所以 P 點光的強度為零，成為第一暗紋的中線，其與 O 點的距離為

$$y = L \sin \theta = \frac{L\lambda}{d}。$$

4. 若 P 點離中央點 O 更遠，其對應的繞射角 θ 符合 $a \sin \theta = \frac{3}{2} \lambda$ 時，此時我們將狹縫 AB 分為三等分，如圖 5-25 所示。其中第 1 和第 2 部分發出的光線互相做完全破壞性干涉抵銷，僅餘一部分的光未完全相消，而且抵達 P 點亦不同相，所以無法做完全建設性干涉，故 P 點的亮度較中央 O 點的亮度小甚多。此位置稱為第一亮紋中線（亮紋中線並非亮紋的最亮位置，亮紋的最亮位置需用較深的數學推導，超出高中程度，故省略），其

與 O 點的距離為 $y = \frac{3}{2} \left(\frac{L\lambda}{a} \right)。$

5. 若 P 點離中央點 O 再更遠，其所對應的繞射角 θ 符合 $a \sin \theta = 2 \lambda$ 時，此時我們將狹縫 AB 分為四等分，如圖 5-26 所示。與上一段的討論類似，圖中的 1 和 2 兩部分抵達 P 點的光線做破壞性干涉；3 和 4 兩部分抵達 P 點的光線也是破壞性干涉。所以 P 點處光的強度為零，成為第二暗紋的中線

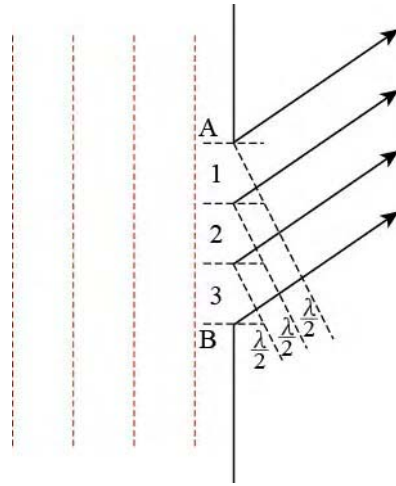
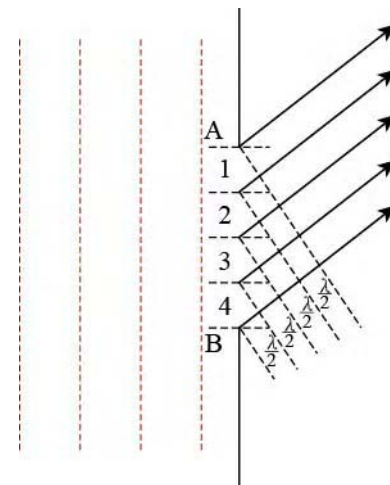


圖 5-25 $a \sin \theta = \frac{3}{2} \lambda$ 時，將狹縫開口分成三等分，圖中第 1 和第 2 部分發出的光線互相作完全破壞性干涉。



▲圖 5-26 $a \sin \theta = 2 \lambda$ 時，將狹縫 AB 分為四等分，這四部分發出抵達 P 點的光線會兩兩完全抵銷，使得 P 成為暗紋中心。

，其與 O 點的距離為 $y = 2 \left(\frac{L\lambda}{a} \right)$ 。

6. 根據上述處理的方式，我們可以繼續推論：

(1) 當 P 點所對應的繞射角 θ 符合 $a \sin \theta = \frac{5}{2} \lambda$ 、 $\frac{7}{2} \lambda$ 或其他半波長

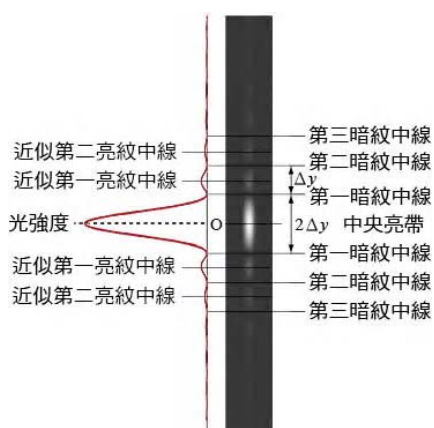
之奇數倍時，可利用與前面相同的方法，將狹縫分成奇數個等分。相鄰兩部分抵達 P 點的光作完全破壞性干涉，只剩下一個區域的光抵達 P 點，故 P 點為近似第二、第三等亮紋中線位置，但是亮紋強度愈來愈小，而其與 O 點的距離為 $y = \frac{5}{2} \left(\frac{L\lambda}{a} \right)$ 、 $\frac{7}{2}$

$\left(\frac{L\lambda}{a} \right)$ 、……等。

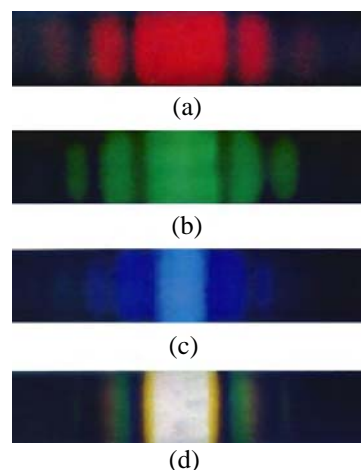
(2) 若 P 點所對應的繞射角 θ 符合 $a \sin \theta = 3\lambda$ 、 4λ 或其他整數倍的波長（即 $n\lambda$ ， n 為正整數）時，利用與前面相同的方法，可以將狹縫分成偶數個等分。相鄰兩部分抵達 P 點的光作完全破壞性干涉，所以 P 點為第三、第四、……等暗紋中線，而其與 O 點的距離 y 為

$y = 3 \left(\frac{L\lambda}{a} \right)$ 、 $4 \left(\frac{L\lambda}{a} \right)$ 、……等。

7. 光屏上亮暗條紋上下對稱於中央點 O。



▲圖 5-27 單狹縫繞射實驗的強度分布。中央亮帶光強度最大，兩邊的亮紋強度迅速遞減，而中央亮帶寬度是其餘亮紋寬度的兩倍。



▲圖 5-28 在同一單狹縫繞射實驗裝置中，分別以單色光(a)紅色；(b)綠色；(c)藍色以及(d)白光照射所得的繞射圖樣。

綜合以上的討論，得知若令 $\Delta y = \frac{L\lambda}{a}$ ，則相鄰暗紋之間間隔為 Δy ，中央亮帶的寬度為其他亮紋寬度的兩倍，即 $2\Delta y$ ，如圖 5-27 所示，圖中顯示亮紋的強度以中央亮帶最大，兩側亮紋的強度迅速減弱。

圖 5-28 中為使用同一單狹縫繞射實驗裝置，但是分別以紅光、綠光和藍光照射，得到(a)、(b)和(c)三圖的結果，圖 5-28(d)則是以白色光照射的實驗結果。



想一想

1. 在圖 5-28 的(a)、(b)和(c)圖中，為什麼紅光的中央亮帶最寬？藍光的中央亮帶最窄？
2. 檢視以白光照射所得的圖 5-28(d)，發現中央是白色的，白色的兩旁為什麼最先出現的顏色是黃色的？（提示：這四張照片的中央位置是對齊的。已知光的三原色是紅、綠和藍。作一垂直的直線通過第四張的黃色部分，向上延伸到第一張照片，觀察這一直線通過上面三張照片中，是否上面兩張顯示紅和綠光為亮的而第三張的藍光為暗的？紅光和綠光合成為什麼顏色？或者，藍光的互補色是什麼顏色？）



做一做

併攏五指，使指縫的方向與日光燈管平行，透過指縫觀察發亮的日光燈（如圖 5-29），是否能看到亮暗條紋？是彩色的嗎？

註：如果效果不明顯，可試著利用兩直條狀物體，例如兩枝鉛筆或一雙筷子，將兩者靠攏（需有極小的縫隙），以取代手指。



▲圖 5-29 觀察光繞射的簡易方法。

範例 5-5

在單狹縫的繞射實驗中，以波長為 630 nm 的平行紅色光照射寬度為 0.100 mm 的狹縫，光屏和狹縫之間的距離為 2.00 m，試求

(1) 第一暗紋的位置在哪裡？

(2) 中央亮帶的寬度為何？

[解答] 由題意 $\lambda = 630 \text{ nm}$ ， $a = 0.100 \text{ mm}$ ， $L = 2.00 \text{ m}$

(1) 第一暗紋的位置中央位置兩側 $\frac{L\lambda}{a}$ 處，

$$\text{即 } y = \frac{L\lambda}{a} = \frac{(2.00 \text{ m})(630 \times 10^{-9} \text{ m})}{0.100 \times 10^{-3} \text{ m}} = 12.6 \text{ mm}$$

(2) 中央亮帶寬度為 $2\Delta y = 2\frac{L\lambda}{a} = 2 \times 12.6 \text{ mm} = 25.2 \text{ mm}$

範例 5-6

一平行單色光垂直照射在寬度為 1.00 mm 的單狹縫，在距離狹縫 2.00 m 遠的光屏上，發現中央亮帶寬度為 2.50 mm，求

(1) 入射光的波長。

(2) 第二亮線中線的近似位置。

[解答] (1) 中央亮帶寬度為 $2\Delta y = 2\frac{L\lambda}{a} = 2.50 \text{ mm}$ ，

由已知 $a = 1.00 \text{ mm}$ ， $L = 2.00 \text{ m}$ ，故

$$2\frac{L\lambda}{a} = 2\frac{(2.00 \text{ m})\lambda}{1.00 \times 10^{-3} \text{ m}} = 2.50 \times 10^{-3} \text{ m}$$

解得 $\lambda = 6.25 \times 10^{-7} \text{ m} = 625 \text{ nm}$

(2) 第二亮線中心的位置為

$$y = \frac{5}{2} \left(\frac{L\lambda}{a} \right) = \frac{5}{2} \left(\frac{2.50 \text{ mm}}{2} \right) = 3.13 \text{ mm}$$

範例 5-7

以波長為 λ 的光照射在寬度為 a 的單狹縫，在後面放一光屏，希望光屏上繞射條紋的中央亮帶寬度恰等於狹縫寬度。

(1) 光屏要放在哪裡？

(2) 如果實驗中所使用光的波長為 500nm，狹縫的寬度為 1.0mm，求光屏的位置。

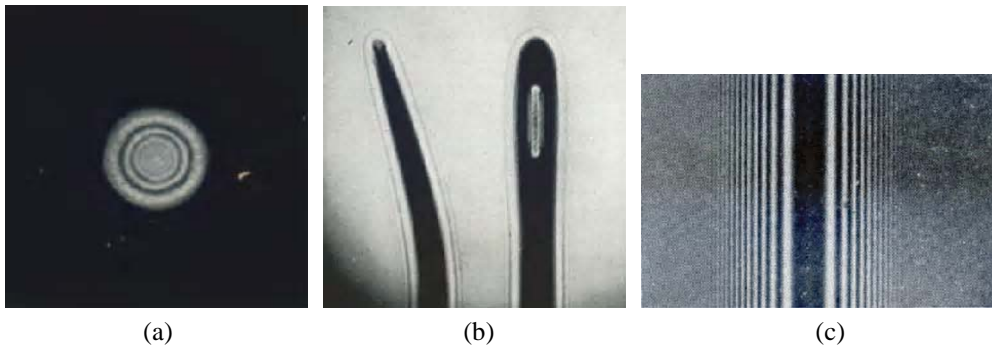
[解答] (1) 因為中央亮帶寬度 $= 2\Delta y = 2\frac{L\lambda}{a}$ ，

$$\text{根據題意 } 2\Delta y = a, \text{ 即 } 2\frac{L\lambda}{a} = a, \text{ 得 } L = \frac{a^2}{2\lambda}$$

(2) 若使用波長 500 nm 的單色光作實驗，狹縫寬度為 $a = 1.0 \text{ mm}$ ，則光屏與狹縫的距離 L 為

$$L = \frac{a^2}{2\lambda} = \frac{(1.0 \times 10^{-3} \text{ m})^2}{2(500 \times 10^{-9} \text{ m})} = 1.0 \text{ m}$$

可見光的波長較日常生活中的尺度小很多，所以光的繞射現象若不特別注意，則難以察覺。以下數例為使用特殊裝置，仔細拍攝所得單色光的繞射現象。圖 5-30(a) 為光經過黑色障礙物中央的小孔後形成的圓形明暗繞射條紋；圖 5-30(b) 為光經過針尖及針頭（含針孔）後，邊緣形成繞射條紋；圖 5-30(c) 則為光通過直電線時，線的兩側呈現明暗的繞射條紋。



▲圖 5-30 (a) 光經過小孔後的繞射現象；(b) 光經過針尖及針孔後的繞射現象；(c) 光經過直電線後的繞射現象。