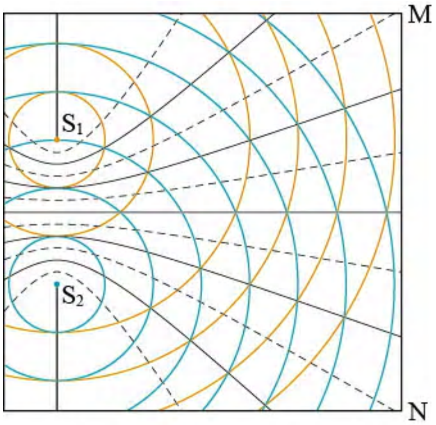
5-2 光的干涉現象

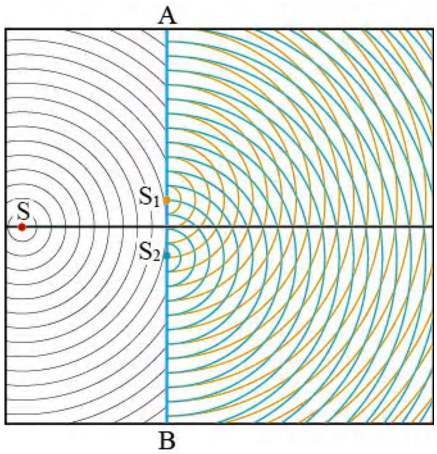
如果光的本質真的是波動的話，則應該如第二章所討論的，會有干涉及繞射等現象。但是在室內點燃兩隻蠟燭或打開兩盞燈，我們卻看見牆壁幾乎被均勻照亮，並未出現亮暗的條紋或區域，與第二章第八節所討論兩點波源的水波干涉的情況頗不一樣。是否另有其他的條件未被注意到？

我們先觀察水波的干涉現象，稍後再討論光波和水波有何不同。圖 5-10 所示水波干涉示意圖中，兩點波源為同時上下振動（稱為同相），可以形成干涉現象。如果這兩個點波源的振動快慢不同，它們產生的水波無法在水面上某些區域形成始終加強或始終減弱的情形，因此不能形成穩定的干涉條紋。

為確保兩點波源可以同時上下振動，我們將裝置改為圖 5-11 所示，S 為水波槽的點波源，AB 為擋板，其間的 S_1 和 S_2 為兩個小開口，S 位於 S_1 和 S_2 的垂直平分線上。由 S 發出的波抵達 S_1 和 S_2 兩開口時，為同一波前，必是同相。由惠更斯原理知道，到達 S_1 和 S_2 的波前上的點可視為兩個新的點波源。也就是水波經 S_1 和 S_2 後可因繞射而造成干涉



▲圖 5-10　兩點波源的水波干涉示意圖。圖中的 S_1 和 S_2 為兩同相的點波源。



▲圖 5-11　點波源 S 發出的波經過兩個開口 S_1 和 S_2 後，由於波的繞射，可將 S_1 和 S_2 視為點波源，確保它們可以同時上下振動。

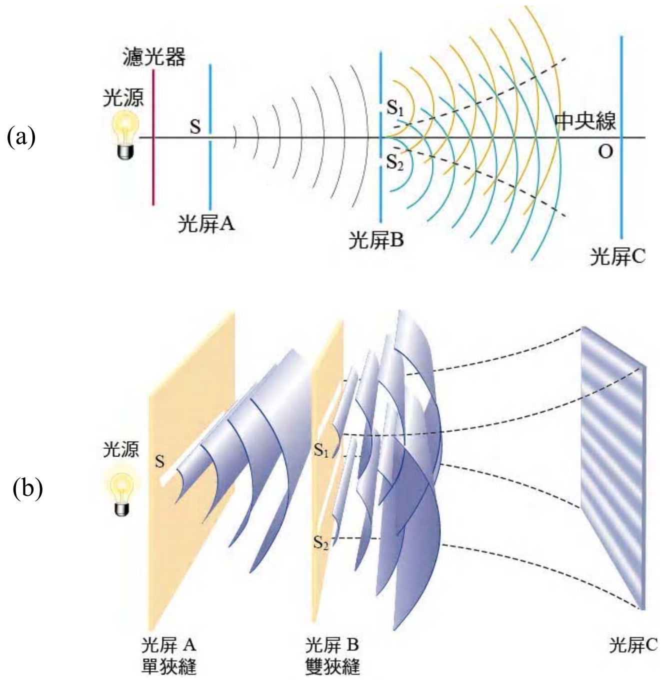
現象。其實，兩波源不一定要同相，只要頻率相同，相位差固定，就可以造成清晰穩定的干涉現象。

若將圖 5-10 中的 S_1 和 S_2 改為兩支點燃的蠟燭或發亮的燈泡，圖中的 MN 為光屏（或牆壁）。結果如前所述，並未在光屏上呈現出亮暗的干涉條紋。其原因是光波較水波複雜。現在我們知道，蠟燭或燈泡等普通光源，例如燈絲發光是由燈絲的許許多多原子此起彼落各自發出光波，這些光波的頻率不盡相同，相位差也無法維持固定，所以即使是同一燈泡所發出的光並沒有同調性，更何況是兩個燈泡所發出的光。所以兩燈泡所發的光要形成清晰穩定的干涉現象或干涉條紋是不可能的，以致無法形成清晰穩定的干涉現象。

另外一個很重要的關鍵就是光波的波長較水波小太多了，若改用類似圖 5-11 的裝置來做光的干涉實驗，則會因為 S_1 和 S_2 兩開口寬度遠大於光波的波長，光經過開口後繞射的效果不明顯，以致無法疊加形成干涉現象。

1801 年楊氏做了有名的雙狹縫干涉實驗，其裝置的示意圖類似圖 5-12(a)。光源發出的光先經過濾光器成為單色光，接著經過光屏 A 上的細長狹縫 S（長的部分與頁面垂直），形成線光源，發出圓柱形波，如圖 5-12(b)所示，其橫截面為圓弧，再經光屏 B 上的兩平行細長狹縫 S_1 和 S_2（亦與頁面垂直）後，在光屏 C 產生亮暗的干涉條紋。裝置中的狹縫寬度小於 0.1 mm（約略為刮鬍刀片尖銳部分的寬度），狹縫 S_1 和 S_2 的間隔也大約僅 1 mm。圖 5-12(a)中 SO 為 S_1 和 S_2 連線的垂直平分線稱為中央線，S 在中央線上。

由圖 5-12（ａ）中可以看出，抵達 S_1 和 S_2 兩狹縫的光為同一波前，故為同相。即使抵達 S_1 和 S_2 兩狹縫的光不是同一波前，但如果能保持固定的相位差，也可形成穩定而清晰的干涉現象。兩光源頻率相同，其間的相位差保持固定，兩光源稱為**同調源**（coherent source），所發出的光為**同調光**（coherent light）。同調光才能造成穩定的干涉現象，所以我們稱同調光具有**同調性**或**相干性**（coherence）。



▲圖 5-12　楊氏雙狹縫干涉實驗示意圖。(a)光源發出的光先經過濾光器形成單色光，接著通過光屏 A 狹縫後，再經 B 屏的兩狹縫，然後在光屏 C 上形成干涉條紋。(b)顯示圖(a)中狹縫的安置情形，圖中的圓柱面為光波的波前。

小知識

用雷射光作楊氏雙狹縫干涉實驗的光源

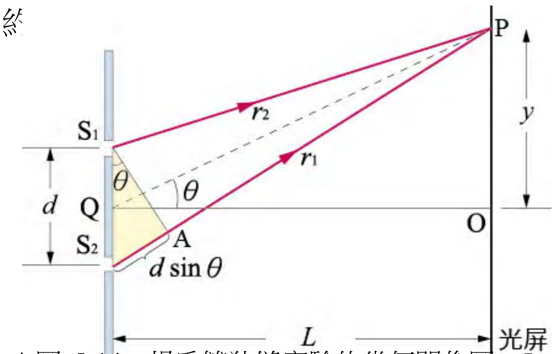
在楊氏雙狹縫干涉實驗中使用一般的燈泡，如圖 5-12(a)所示，光源發出的光經過濾光器及光屏 A 後，抵達光屏 B 上的狹縫 S_1 和 S_2 的光波為同相，在光屏 C 上能產生明暗相間的干涉條紋。

現在的實驗室中，常利用雷射光具有準直、光度強、光束的發散極小（即波前幾乎為平面）的特性，作為實驗的光源，如圖 5-13 所示，抵達的光即為同相，可使實驗裝置較為簡易，效果更明顯。

▲圖 5-13　以雷射光作光源進行雙狹縫干涉實驗。

楊氏實驗與水波槽兩點波源的干涉原理是類似的，但是水波是平面的，而且實驗中可以看到水面的起伏與水面上的節線，但是楊氏實驗則是光在空間中傳播疊加並干涉，空間中看不見光的干涉，所以需有光屏（即圖 5-12 中的光屏 C）來呈現干涉形成的亮暗條紋。兩線光源 S_1 和 S_2 所發出的光波交會於光屏上同一點時，若兩波同相，則產生建設性干涉，形成亮點；若兩波 180°異相，則產生完全破壞性干涉，形成暗點。但因使用線光源，相當於有許多點光源排列在一條線上，因此在光屏上產生的亮點連結成一條亮紋，而暗點則相連成一條暗紋，成為亮暗相間的條紋。

光屏上的干涉條紋位置，可利用圖 5-14 所示的幾何關係求得。為求清楚簡便起見，圖中的尺寸未按照比例作圖，d 為兩狹縫 S_1 和 S_2 的間距，L 為狹縫至光屏的距離，$\overline{QO}$ 為 $\overline{S_1S_2}$ 的中垂線。P 為光屏上的一點，位於 O 點上方 y 處。S_1 和 S_2 分別發出光線 $\overline{S_1P}$ 和 $\overline{S_2P}$ 到達 P 點。θ 為兩直線 $\overline{QP}$ 和 $\overline{QO}$ 之間的夾角。設 $\overline{S_1P}=r_1$，$\overline{S_2P}=r_2$。在 $\overline{S_2P}$ 上取 $\overline{AP}=r_1$。在一般實驗中，L 約



▲圖 5-14　楊氏雙狹縫實驗的幾何關係圖，$L>d$，光波從兩狹縫出發至 P 點的路程差約等於 $d\sin\theta$。圖中各物尺寸未按比例畫圖。

僅為 1 公釐左右，所以 $L>>d$，於是從兩狹縫所發出的光線 $\overline{S_1P}$ 和 $\overline{S_2P}$ 幾乎為平行線，因此圖中的黃色小三角形近似於直角三角形。光波從兩狹縫發出至 P 點的路程差為

$$r_2-r_1\approx d\sin\theta \qquad \textbf{5-1 式}$$

想一想

證明圖 5-14 中兩個 θ 角的確相等。

【提示】圖中 $L>>d$，三線段 $\overline{S_1P}$ 、 $\overline{S_1P}$ 和 $\overline{QP}$ 視為互相平行，皆與 $\overline{S_1A}$ 垂直

若路程差為波長的整數倍，則兩光線作建設性干涉，P 為亮紋上的點，即光屏上形成亮紋的條件為

$$d\sin\theta=\pm n\lambda$$　（實際為亮紋的中線）　**5-2 式**

上式中 n 為 0 或正整數，$n=0$ 時，表示對應的 P 點為圖中的 O 點，此亮紋稱為中央亮紋。$n=1$ 時，表示中央亮紋兩側的第一亮紋；$n=2$ 時，則為中央亮紋兩側的第二亮紋；其餘類推。若 P 點在中央線的上方，則 θ 為正，等號右邊取正號；若 P 點在中央線的下方，則 θ 為負，等號右邊取負號。（以下（5-3）式至（5-5）式的正、負符號意義均相同）

若路程差為半波長的奇數倍，則兩光線作破壞性干涉，此時 P 為暗紋上的點，即光屏上形成暗紋的條件為

$$d\sin\theta=\pm\left(n'-\frac{1}{2}\right)\lambda$$　**5-3 式**

（實際為暗紋的中線）

上式中 n' 為正整數，$n'=1$ 時，表示中央亮紋兩側的第一暗紋；$n'=2$ 時，則為中央亮紋兩側的第二暗紋；其餘類推。圖 5-15 中的照片為以紅色光作實驗，在光屏上呈現的干涉條紋。

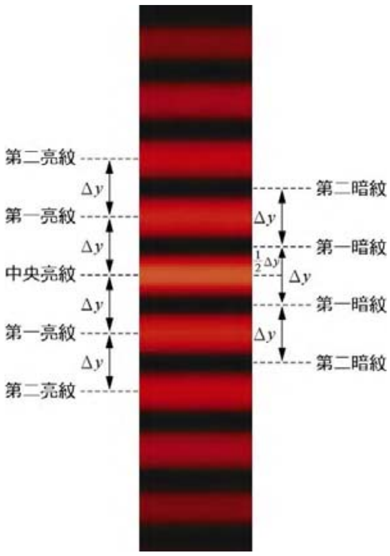


圖 5-15　以紅色光作楊氏雙狹縫干涉實驗時，光屏上的干涉條紋。

前面提過兩狹縫的間隔 d 約 1 公釐，而光波的波長約為 380 nm 至 780 nm 之間，根據（5-2）式，第一

亮紋的位置對應的角度適合 $\sin\theta=\dfrac{\lambda}{d}$，若取波長 λ 為 500 奈米來估計，θ 僅約 0.03°。由於 θ 非常小，所以

$$\sin\theta\approx\tan\theta=\frac{y}{L}$$

由（5-2）式，亮紋位置 $y_{亮}$ 可寫為

$$y_{亮}=\pm n\frac{L\lambda}{d} \qquad \text{5-4 式}$$

由（5-3）式，暗紋位置 $y_{暗}$ 可寫為

$$y_{暗}=\pm\left(n'-\frac{1}{2}\right)\frac{L\lambda}{d} \qquad \text{5-5 式}$$

相鄰兩亮紋或暗紋的間隔 Δy 為

$$\Delta y=\frac{L\lambda}{d} \qquad \text{5-6 式}$$

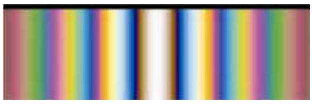
做一做

證明相鄰兩亮紋的間隔 $\Delta y=\dfrac{L\lambda}{d}$ 。

由（5-6）式可知相鄰兩亮紋或暗紋的間隔與光的波長成正比。圖 5-16(a)和(b)所示分別為紅光和藍光的雙狹縫干涉條紋圖，由於紅光的波長較藍光長，所以前者兩相鄰條紋的間隔較後者寬。若光波的波長不同，則同一級亮紋的位置將有差異。由於不同顏色的光，其波長相異，因此若以白光照射雙狹縫，則光屏上將出現彩色的干涉條紋，如圖 5-16(c)所示。

(a)

(b)

(c)


▲圖 5-16　(a)以紅光作實驗；(b)以藍光作實驗，干涉條紋間隔較紅光小；(c)以白光作實驗則產生彩色的干涉條紋。

範例 5-3

作楊氏實驗時，所用的單色光波長為 640 nm，兩狹縫的間隔為 0.080 cm，光屏與狹縫的距離為 0.80 m，求

(1) 相鄰兩暗紋中線的距離。

(2) 第二暗紋的中線位置。

[解答]　(1) 相鄰兩亮紋或暗紋的間隔為 $\Delta y=\dfrac{L\lambda}{d}$，

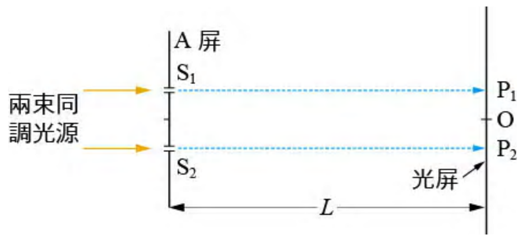
故 $\Delta y=\dfrac{(0.8\text{ m})(640\times10^{-9}\text{ m})}{0.80\times10^{-2}\text{ m}}=6.4\text{x}10^{-4}\text{ m}$

(2) 第二暗紋的位置為 $y_{\text{暗}}=\left(2-\dfrac{1}{2}\right)\dfrac{L\lambda}{d}=\dfrac{3}{2}\Delta y$

$=1.5\text{x}6.4\text{x}10^{-4}\text{ m}=9.6\text{x}10^{-4}\text{ m}$。

範例 5-4

圖 5-17 中有兩束波長同為 442 nm 且同相的光垂直入射於 A 屏上兩狹縫，兩狹縫相距 0.80 mm。若無繞射，這兩束光分別直射在光屏上的 P_1 和 P_2 兩點。這兩點上下對稱於中央點 O。欲使 P_1 和 P_2 兩點成為暗紋中線的位置，則圖中的 A 屏和光屏之間的距離 L 最大為多少？



▲圖 5-17

[解答]　設 $\overline{P_1O}=\overline{P_2O}=y=\dfrac{d}{2}=0.40\text{ mm}$，由題意知 P_1 和 P_2 為暗紋中線的位置，故 $y=\left(n'-\dfrac{1}{2}\right)\dfrac{L\lambda}{d}$　（n'為正整數）

得 $0.40\text{x}10^{-3}\text{ m}=\left(n'-\dfrac{1}{2}\right)\dfrac{L(442\times10^{-9}\text{ m})}{0.80\times10^{-3}\text{ m}}$

$L=\dfrac{1.4}{(2n'-1)}\text{ m}$，故當 $n'=1$ 時，L 為最大，其值為 1.4 m。