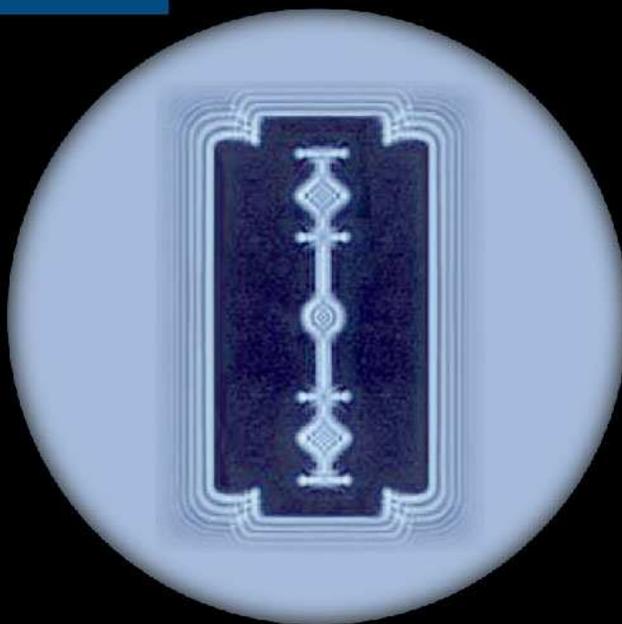


5-1 光的波動說

5-2 光的干涉現象

5-3 光的繞射現象



以藍色光照射刀片，刀片的邊緣因干涉和繞射而出現亮暗的條紋；光照射在球形肥皂泡沫上因干涉而產生彩色的條紋。兩者都顯示了光的波動性質。



All color is to light as pitch to sound.
The Human eye can see one octave's light,
But those that soar past violet abound -
And octaves still exist, though not to sight,
Below the red.

顏色之於光等如音調之於聲音
奈何人眼所見僅能涵蓋雙倍頻
雖則輕跨藍紫後便是光天亮地
遑論紅朱之下光譜已難窺其盡

—麥娜 (Virginia Scott Miner, 1901-1982)

上一章討論的幾何光學，即光的反射和折射現象，是利用光的直進性質、反射定律和折射定律為基礎，所得到許多現象和應用。可是對於光到底是什麼？也就是光的本質並沒有說明。

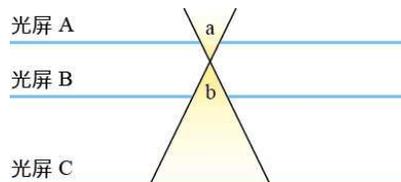
古希臘時代，著名學者柏拉圖（Plato, 427 - 347 BC）誤認光線是從眼睛發射出來，以直線行進，碰到物體時，物體才為人所看見。提倡原子論的德模克利圖斯（Democritus, 460 - 370 BC）認為視覺的產生是從物體發射出微小的粒子，進入人的眼睛而引起的。微小的粒子指的就是光的粒子，這可以說是光微粒說（corpuscular theory）的早期說法，獲得當時許多學者大力支持，畢氏學派也是依此說法教導學生。另一學者恩佩多克斯（Empedocles, 490 - 430 BC）認為光是一種擾動，在介質中傳播的現象，這種說法與後來的波動說（wave theory）頗為類似。不過這些看法都是形而上的，並未以實驗或理論來驗證或解釋。本章以波動性質為基礎來討論光的特有現象，這一部分的光學稱為波動光學或物理光學。

5-1 光的波動說

十七世紀時人們對於光的本質才開始做深入而有系統的探討，法國人笛卡兒（Ren 佻 Descartes, 1596 - 1650）認為實質上光是一種壓力造成的現象，在完全彈性而充滿空間中稱為以太（ether）的介質中傳播。可是另一方面，他又以粒子的碰撞模型解釋了反射定律和折射定律。似乎沒有完整而統一的理論。

義大利人格里馬迪（Francesco Maria Grimaldi, 1618 - 1663）在利用如圖 5-1 的實驗裝置，三個光屏互相平行，光屏 A 和光屏 B 分別挖有小孔 a 和 b，強光從最上面入射，光屏 C 上有一部分會被照亮。

格里馬迪利用兩開口的大小及各光屏的距離，計算出光屏 C 上照亮區域 c 的大小。他發現實際上光屏 C 上被照亮的範圍較計算所得要大些，顯然光線並非真正沿直線行進。他



▲圖 5-1 格里馬迪的實驗示意圖。

註曾創立世界是藉由土、空氣、火和水四元素組成的學說。

還發現被照亮的範圍並沒有銳利的邊界，甚至邊緣有類似彩虹的條紋。這令他想起達文西（Leonardo da Vinci, 1452-1519）曾經提過光的行徑應類似波動，他認為這正是波動具有繞射性質的表現，而繞射一詞正是格里馬迪首創的。

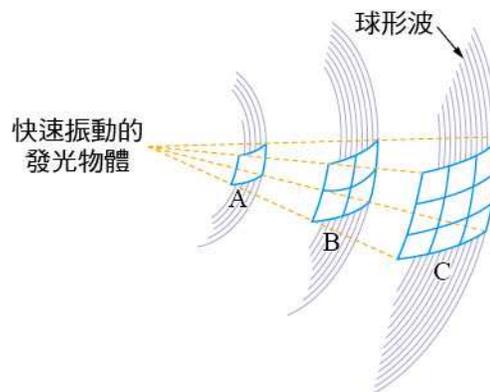
英國人虎克首度觀察到如肥皂泡泡或油浮在水面上所呈現的彩色效果，類似圖 5-2(a)和



(b)所示。他認為一般白色的光是由發光體的質

▲圖 5-2 (a)肥皂泡泡和(b)油漬膜兩者都是因為光的干涉現象造成彩色效果。

點快速振動所產生，而此振動就以發光體為中心朝各方向以球形波傳開來，前述的明暗條紋或彩色效果正是這些波互相干涉而產生，於是他認為光是一種波動的現象。如圖 5-3 所示。



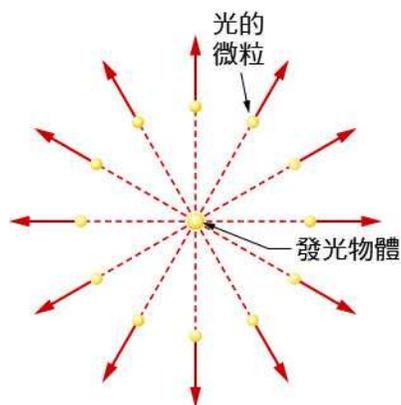
才華洋溢的惠更斯在數學、天文學、力學、光學、音樂等各

▲圖 5-3 光的波動說。發光物體發出球形波在介質中傳播。

方面都有傑出的貢獻，其中在光學方面，倡導光的波動說。他在 1678 年旅居法國時，向法國科學院提出有關光學的論文，後來做了一些修改和補述，在 1690 年出版《論光》一書。他認為光是一種波動，有如聲音是由物體振動使介質產生擾動而傳播的現象，認為光波也是縱波，傳遞光波的介質為以太（現在我們知道實際上光波是橫波，並且也不需要透過介質就可以在真空中傳遞）。他提出了現在我們所稱的「惠更斯原理」，本書第二章第六節就是利用惠更斯原理來說明水波的反射和折射現象。惠更斯利用此原理說明了光的直進性質以及光線交會時不會散開，交會後

仍然各自依原方向行進等重要且常見的現象，還解釋了光的反射和折射現象。光的干涉和繞射也是建立在其波動性質之上。

十七世紀的物理學巨人牛頓除了在數學和力學有巨大的貢獻之外，在光學方面也有傑出的成就。他做了許多精確的實驗，發現太陽光是各顏色的組合。在光的本質方面，基本上認為光線是由發光物體所射出的微粒所組成，也就是微粒說，如圖 5-4 所示。微粒說除了可以說明光的直進性質外，也可解釋反射和折射現象。牛頓還認為光的微粒能激發以太產生振動，不同的振動大小對人引起不同顏色的視覺。



▲圖 5-4 光的微粒說。發光物體發出微小光的粒子。

於是有關光的本質就有了兩種爭論：即微粒說與波動說。這兩種論說各有成功的一面，也有困難的地方。例如，兩光束交會前後互相不干擾、光進入另一介質時有部分反射和部分折射的現象等，這些現象對光的微粒說難以解釋。另一方面，生活中觀察聲波和水波的傳播時，都可以很清楚的看到波動具有繞射此一特有性質，是質點所沒有的。但是光在行進中遇到障礙物時，會在障礙物的後面形成陰影。因此許多人質疑如果光的本質是波動的話，為什麼不從障礙物邊緣繞到後面，就如同聲波或水波的繞射一樣？日常生活中為什麼看不到光的繞射現象呢？當時的波動說無法回答這個很重要的問題。

但是這兩種論點在光折射現象的推導中，可得到一個相反的結果：微粒說推得光在光密介質中的速率較光疏介質中的速率大；而波動說則相反，光在光密介質中的速率較光疏介質中的速率小。例如，根據微粒說，水中的光速大於真空中的光速；而波動說則得到水中的光速小於真空中的光速。當時礙於實驗技術上的困難，無法測出光在真空中和介質

中的速率孰大孰小，因此光的本質究竟是微粒還是波動不能決定。但是由於牛頓支持微粒說，因為他在學術界上的權威，使得光的微粒說主導了近一世紀之久，而光的波動說停滯不前。當然，期間也有一些個別的學者仍然支持波動說，例如瑞士大數學家歐拉（Euler, 1707-1783）。

直到十九世紀初，有關光的本質才出現一些決定性的發展，導致波動說逐漸為人們所接受。1801年英國人楊氏（Thomas Young, 1773-1829，圖 5-5）利用類似本書第二章第八節討論的水波槽中兩點波源的干涉實驗，但是改用光波，成功做出光的干涉實驗（此實驗的細節將於下一節詳述），但是這個實驗經過許多年後才為科學界所注意。法國人菲涅耳（Augustin Fresnel, 1788-1827，圖 5-6）和德國人夫朗何斐（Joseph von Fraunhofer, 1787-1826）也致力於光的繞射現象的研究，尤其是菲涅耳按照波動理論提出繞射的數學理論，向法國科學院提出，並進行實驗獲得證實。1850年法國人傅科（Lèon Foucault, 1819-1868）首次測量光在水中的傳播速率，發現水中的光速小於真空中的光速。這對於微粒說真是致命的一擊，至此，牛頓光微粒說的根本已經動搖。



▲圖 5-5 楊氏

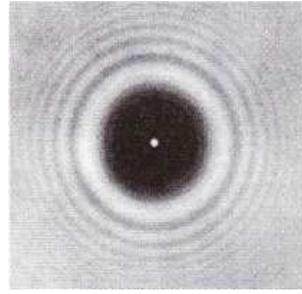


▲圖 5-6 菲涅耳



菲涅耳與繞射的研究

菲涅耳相信光是波動的現象，1815 年菲涅耳向法國科學院提交首次有關光的繞射現象理論的論文，文中以嚴格的數學來處理惠更斯原理，並應用到光的干涉現象。1817 年法國科學院舉辦光的繞射現象研究的最佳成果競賽，菲涅耳參加這次的競賽，於 1818 年提交論文。內容是結合了惠更斯原理和楊氏干涉實驗，並且建立繞射理論，對於光經圓孔和圓板等障礙物後的繞射圖樣做了數學處理。科學院的審查委員有支持波動說的阿拉戈（Francois Arago, 1786-1853，法國數學家及物理學家，為菲涅耳的好友），支持微粒說的拉普拉斯、必歐（Jean-Baptiste Biot, 1774 - 1862，法國物理學家）、帕松（Simeon Denis Poisson, 1781 - 1840，法國數學家及物理學家）以及持中立觀點的給呂薩克等人。開始時菲涅耳的波動理論遭受支持微粒說的人大力反對，尤其是帕松，他發現根據菲涅耳的計算，如果在光束傳播的路徑上，放置一個不透明的圓板，則圓板後方光屏上陰影的中央會出現亮斑。帕松認為這是荒謬且不可思議的結果。菲涅耳和阿拉戈立即以實驗檢驗這個預言，果真在陰影的中心看到了亮斑，計算結果和實驗數據一致，後來這個亮斑稱為「帕松亮斑」，如圖 5-7，當然最後菲涅耳獲得優勝獎。



▲圖 5-7 光經過圓板後，形成的繞射圖樣。

1864 年英國的馬克士威（James C. Maxwell,

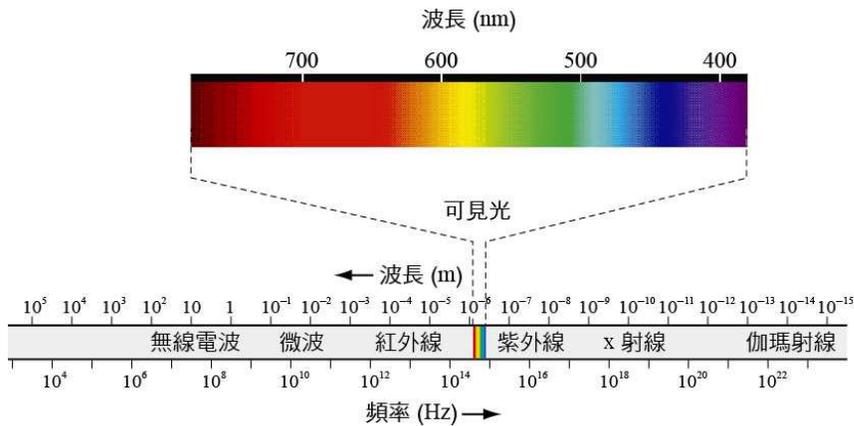
1831-1879，圖 5-8）規撫當時各科學家對於電磁學所做的研究，並加上他獨自創見的概念，得到一組方程式（現在稱為馬克士威方程式），建立了電磁場的數學理論。可以由這組方程式推導出電磁波的存在，並且由電磁波方程式中的電磁學常數來計算出電磁波的傳播速率。驚



▲圖 5-8 馬克士威

人的是，計算結果顯示真空中電磁波的傳播速率正與真空中測得的光速相等！這意謂著光的本質是波動，且為電磁波的一部分。1887 年德國人赫茲（Heinrich R. Hertz, 1857-1894）由實驗證實了電磁波的存在。圖 5-9 中顯示電磁波的範圍，波長由長到短，波段則由無線電波到 γ 射線。光波（也就是常說的可見光）僅為其中一小範圍，其波長的範圍則由

生物神經學的研究，以及考慮到不同的人對引起視覺的光波波長的差異性，而取最大的範圍，約為 780 nm（紅光）至 380 nm（紫光）。各單色光的頻率和波長都不相同，而在真空中的傳播速率都相同。可是在介質中，各色光的波長改變了，波速也不同，但是各色光各自的頻率仍然不變；而光的顏色則與頻率有關。



▲圖 5-9 電磁波的範圍。不同的波段有不同波長的範圍，光波（可見光）僅是其中的一個小範圍。

若將光的本質視為波動，由於波動在傳播時需要介質，波動說將光的傳播介質稱為以太。科學家們費盡心思找尋以太的蹤跡，皆無所獲。1887 年美國科學家邁克生（Abert A. Michelson, 1852-1931）和莫立（Edward Morley, 1838-1923）精心設計並進行實驗，原本的目的是要找到以太存在的證據，實驗結果卻明確地證明了以太並不存在（邁克生還因此實驗獲得 1907 年諾貝爾物理獎）。光的波動說是認為光與力學波一樣，需要介質才能傳播，現在因為證實以太並不存在，於是把光從力學波分出來，傳播時可不需介質，但有介質存在時，其傳播速率會受介質的影響。

光在真空中和介質中傳播時速率有怎樣的不同的呢？由第二章第七節的討論可知，波從介質 1 進入介質 2 時，其入射角 θ_1 和折射角 θ_2 正弦的比值為 $\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{v_1}{v_2}$ ，式中的 v_1 和 v_2 分別為波在介質 1 和介質 2 中的

速率。因為光具有波動性質，由此可推得若光從真空中進入介質時，入射角 θ_1 和折射角 θ_2 正弦的比值即為介質的折射率 n ，即 $n = \frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2}$ 。故

若光在真空中和介質中的速率分別為 c 和 v ，則 $n = \frac{c}{v}$ 。實驗顯示介質的折射率大於 1，所以光在介質中的速率較在真空中的速率小，即 $v < c$ 。

更進一步，利用光從一介質進入另一介質時頻率不會改變的重要事實，由波的速率 v 、頻率 f 和波長 λ 三者之間的關係： $v = f\lambda$ ，我們可以知道光在介質中速率較在真空中小是因為波長變短了，即若某單色光在真空中和介質中的波長分別為 λ 和 λ' ，則介質的折射率也可以寫為

$$n = \frac{\lambda}{\lambda'}$$

很明顯地，光的波動性質已經被確定了，那光的微粒說和波動說之爭落幕了嗎？其實還有後續情節。十九世紀末到二十世紀，科學家陸續發現光電效應和其他現象（其細節將於選修物理下冊討論），這些效應無法用光的波動說來解釋，反而強烈地顯示出光的粒子性質。1905 年愛因斯坦延伸了光是電磁波的認識，提出「光子」的新概念。他認為電磁波是由許多「光子」所組成，光子的傳播不需要依靠介質。所以光具有粒子和波動的雙重性質，而愛因斯坦的理論促成了二十世紀物理學革命性的進展。不過在此要注意的是光子與牛頓時代光微粒說的微小質點，其性質在許多方面並不相同，有關此部分也將於下冊討論。

下兩節我們將以光的波動說來討論波動的兩種特性，即光波的干涉和繞射現象。

範例 5-1

1. 若水的折射率為 1.33，則真空中波長為 589 nm 的黃光在水中的波長為何？
2. 參考圖 5-9，此黃色光在水中是否呈現藍色？

[解答] 1. 由 $n = \frac{\lambda}{\lambda'}$ 得 $\lambda' = \frac{\lambda}{n} = \frac{589 \text{ nm}}{1.33} = 443 \text{ nm}$

2. 可見光的顏色與頻率有關。此黃光在水中的波長雖然變小了，但是頻率還是相同，所以顏色不變。

範例 5-2

已知水的折射率為 1.33，光在真空中的速率為 $3.00 \times 10^8 \text{ m/s}$ ，則

- (1) 依據光的微粒說和波動說，水的折射率分別是多少？
- (2) 依據光的波動說，光在水中行進的速率是多少？
- (3) 依據光的微粒說，光在水中行進的速率大於或小於 $3.00 \times 10^8 \text{ m/s}$ ？
- (4) 1850 年傅科做了水中光速測定的實驗得出光在水中的光速是大於或小於 $3.00 \times 10^8 \text{ m/s}$ ？

[解答] (1) 物質的折射率是入射角和折射角正弦的比值，與光的本質無關，故仍為 1.33。

(2) 由 $n = \frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{c}{v}$ ，式中的 c 和 v 分別為光在真空中和水中的速率，

此比值即水的折射率 n ，故

$$1.33 = \frac{c}{v} = \frac{3.00 \times 10^8 \text{ m/s}}{v}$$

得 $v = 2.26 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。

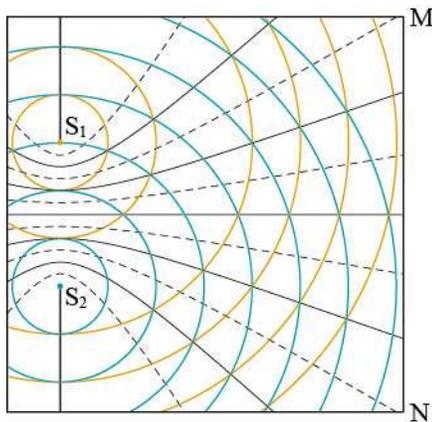
- (3) 大於 $3.00 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。
- (4) 小於 $3.00 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。因此光呈現出波動的性質。

5-2 光的干涉現象

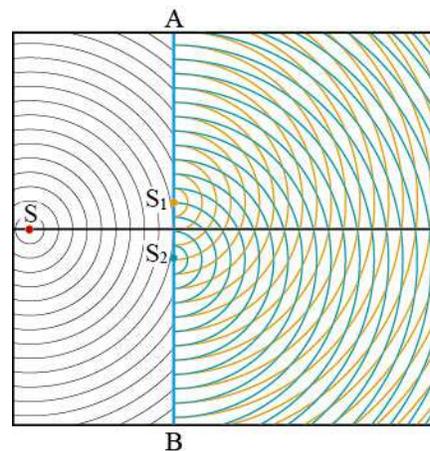
如果光的本質真的是波動的話，則應該如第二章所討論的，會有干涉及繞射等現象。但是在室內點燃兩隻蠟燭或打開兩盞燈，我們卻看見牆壁幾乎被均勻照亮，並未出現亮暗的條紋或區域，與第二章第八節所討論兩點波源的水波干涉的情況頗不一樣。是否另有其他的條件未被注意到？

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。

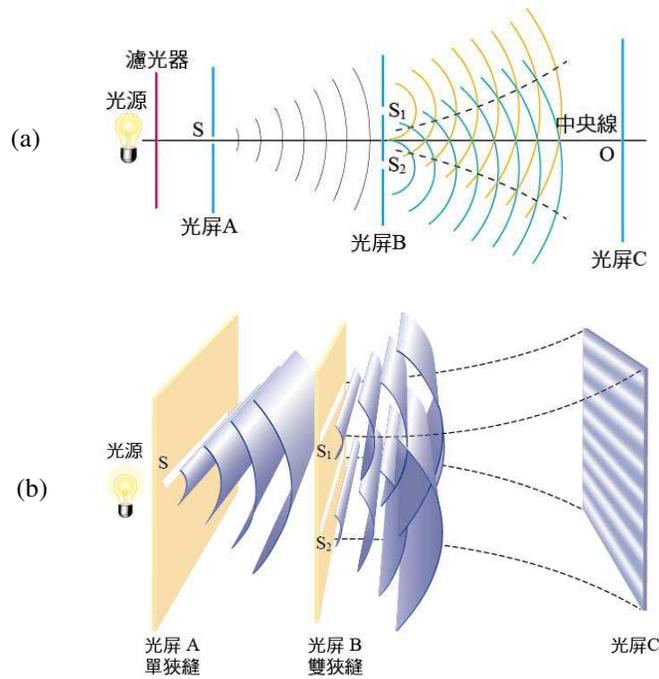
現象。其實，兩波源不一定要同相，只要頻率相同，相位差固定，就可以造成清晰穩定的干涉現象。

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。



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。

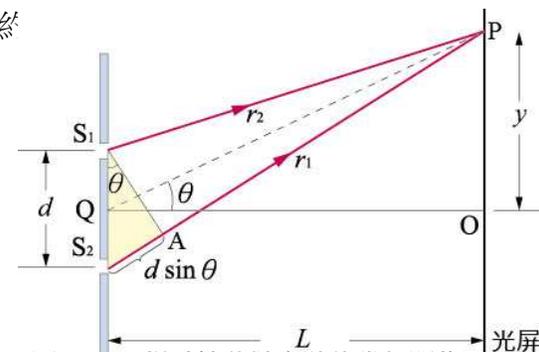


▲圖 5-13 以雷射光作光源進行雙狹縫干涉實驗。

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 僅為 1 公釐左右，所以

$L \gg d$ ，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



▲圖 5-14 楊氏雙狹縫實驗的幾何關係圖， $L \gg d$ ，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。

$$r_2 - r_1 \approx d \sin \theta$$

5-1 式



想一想

證明圖 5-14 中兩個 θ 角的確相等。

【提示】圖中 $L \gg d$ ，三線段 $\overline{S_1P}$ 、 $\overline{S_2P}$ 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

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

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

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

（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。

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

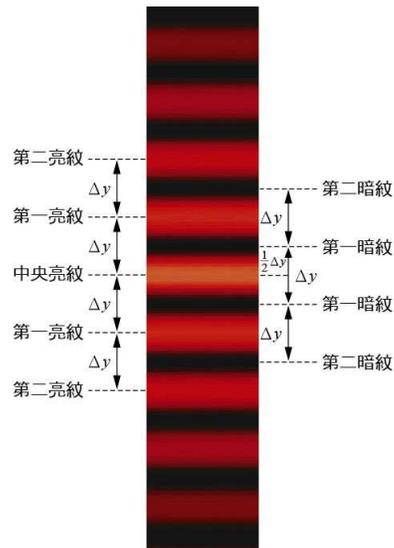


圖 5-15 以紅色光作楊氏雙狹縫干涉實驗時，光屏上的干涉條紋。

亮紋的位置對應的角度適合 $\sin \theta = \frac{\lambda}{d}$ ，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 $y_{\text{亮}}$ 可寫為

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

由 (5-3) 式，暗紋位置 $y_{\text{暗}}$ 可寫為

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

相鄰兩亮紋或暗紋的間隔 Δy 為

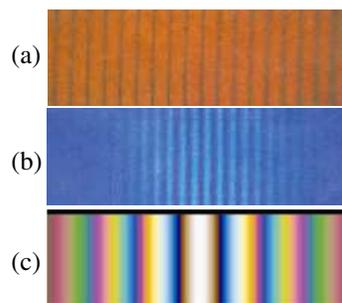
$$\Delta y = \frac{L \lambda}{d} \quad \text{5-6 式}$$



做一做

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

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。



▲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。

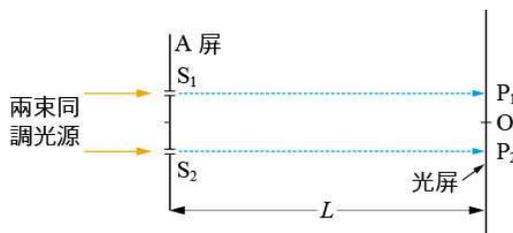
[解答] (1) 相鄰兩亮紋或暗紋的間隔為 $\Delta y = \frac{L\lambda}{d}$ ，

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

$$\begin{aligned} \text{(2) 第二暗紋的位置為 } y_{\text{暗}} &= \left(2 - \frac{1}{2}\right) \frac{L\lambda}{d} = \frac{3}{2} \Delta y \\ &= 1.5 \times 6.4 \times 10^{-4} \text{ m} = 9.6 \times 10^{-4} \text{ m}。 \end{aligned}$$

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



▲圖 5-17

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？

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

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

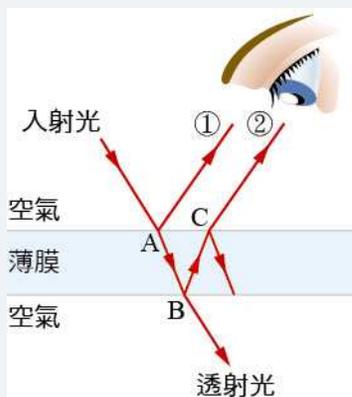
$$L = \frac{1.4}{(2n' - 1)} \text{ m}，\text{故當 } n' = 1 \text{ 時，} L \text{ 為最大，其值為 } 1.4 \text{ m}。$$

薄膜干涉

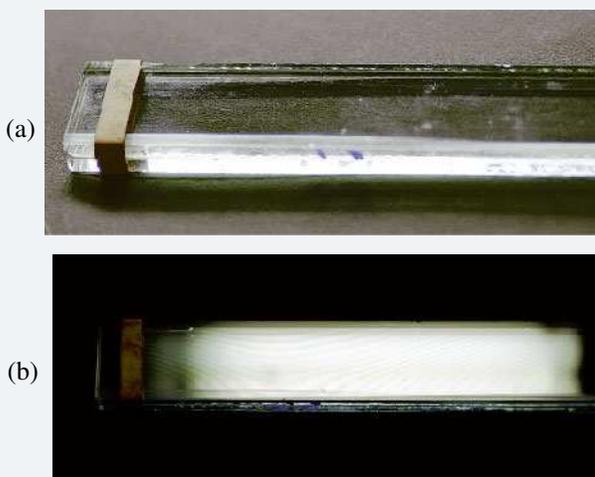
光的干涉現象除了本節所討論的楊氏雙狹縫實驗外，生活中也能觀察到某些干涉現象。例如在陽光的照射下，我們常可見到肥皂泡膜、水面上的油膜、眼鏡鏡片上的鍍膜、……等薄膜的表面呈現彩色。本章第一節圖 5-2 的(a)、(b)兩照片即為生活中常見薄膜干涉的照片。

薄膜干涉的主要原理如下，在圖 5-18 中，光線自空氣進入薄膜時，有部分反射部分折射的現象，入射點為 A，圖中的①為其反射線。折射線進入薄膜，然後在 B 點進入空氣時有部分反射，此反射線從 C 點進入空氣，以②標示為進入空氣的光線。光線①和②在適當的條件下會造成建設性或破壞性的干涉而出現亮暗條紋。如果原入射光是白光，則呈現彩色的干涉條紋。

圖 5-19(a)是將兩片玻璃緊疊在一起，圖 5-19(b)則以白光從上方照射。由於玻璃的表面並非完全光滑，兩玻璃之間仍有厚度不等的空隙，空隙之間的空氣就如同上面所述的「薄膜」，因此白光照射時，表面會出現彩色的干涉條紋。



▲圖 5-18 光線自空氣進入薄膜時，經多次部分反射和部分折射後，圖中的①和②在適當的條件下會造成建設性或破壞性的干涉而出現干涉條紋。



▲圖 5-19 (a)兩片玻璃緊疊在一起；(b)以白光照射，表面出現彩色的干涉條紋。

5-3 光的繞射現象

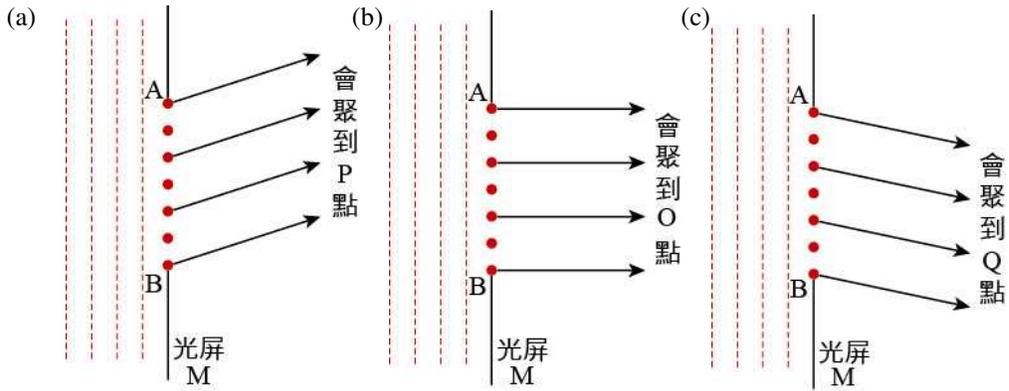
在上一節的圖 5-12 楊氏干涉實驗中，光線抵達狹縫 S_1 和 S_2 的波前視為點波源，分別往各方向發出光線，其實這就是繞射現象。最右邊的光屏 C 上各點均有來自 S_1 和 S_2 的兩光線，因疊加而產生干涉條紋。

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）。

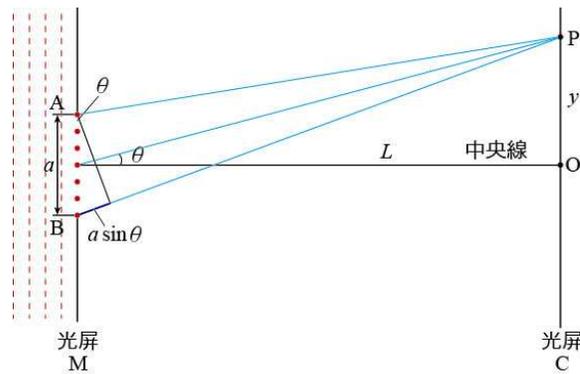


▲圖 5-21 從狹縫開口的每一子波源發出而會聚於屏上的光可視為平行光。(a)、(b)和(c)圖中的三組平行光線分別會聚於光屏上的 P、O 和 Q 點。

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。

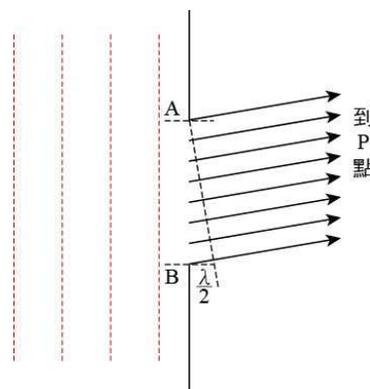
1. 光屏中央位置 O 點：若繞射角 $\theta = 0$ ，則對應光屏上的位置為中央 O 點，即 $y=0$ 。此情形即圖 5-21(b)所示，與狹縫垂直的平行光線會聚在 O 點，所有光線的路程都相同，同相到達，故疊加成為完全建設性干涉，應為光屏上最亮的位置。

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。

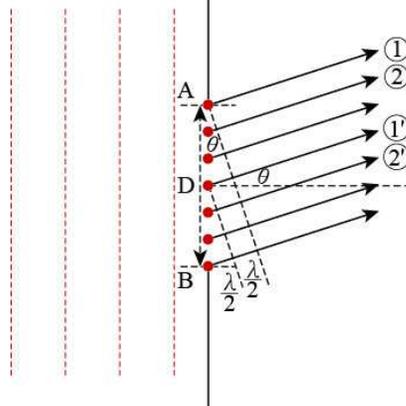
3. 若 P 點所對應的繞射角 θ 符合 $a \sin \theta = \lambda$ 時，此時我們將狹縫 AB 分為 AD 和 DB 兩等分，如圖 5-24 所示。圖中標示①和①'兩光線的路程

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



▲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。



▲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。

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

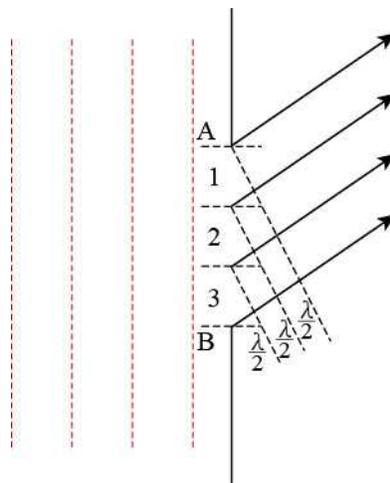
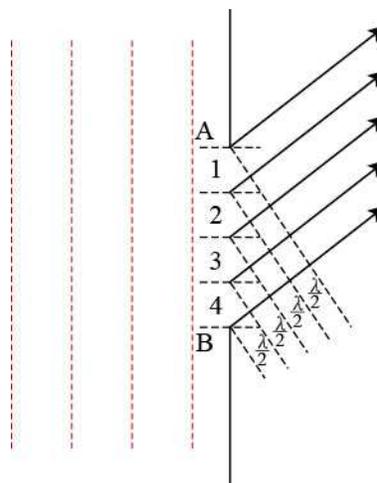


圖 5-25 $a \sin \theta = \frac{3}{2} \lambda$ 時，將狹縫開口分成三等分，圖中第 1 和第 2 部分發出的光線互相作完全破壞性干涉。



▲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 $y = \frac{5}{2} \left(\frac{L\lambda}{a} \right)$ 、 $\frac{7}{2}$

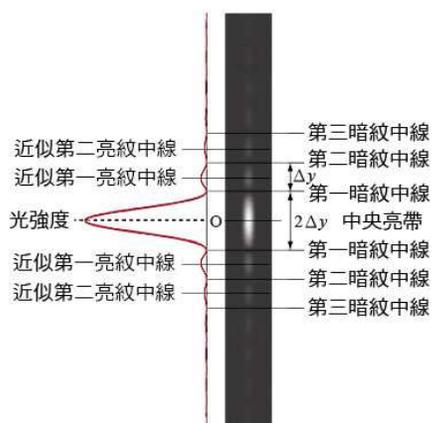
$\left(\frac{L\lambda}{a} \right)$ 、 $\frac{7}{2}$

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

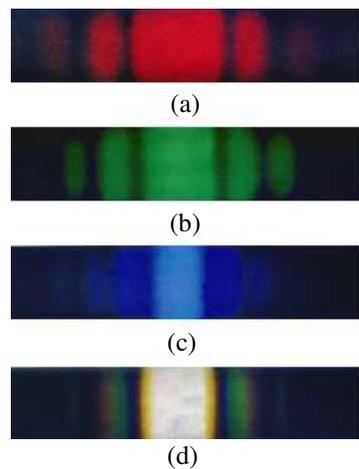
(2) 若 P 點所對應的繞射角 θ 符合 $a \sin \theta = 3 \lambda$ 、 4λ 或其他整數倍的波長（即 $n \lambda$ ， n 為正整數）時，利用與前面相同的方法，可以將狹縫分成偶數個等分。相鄰兩部分抵達 P 點的光作完全破壞性干涉，所以 P 點為第三、第四、……等暗紋中線，而其與 O 點的距離 y 為

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

y ，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。

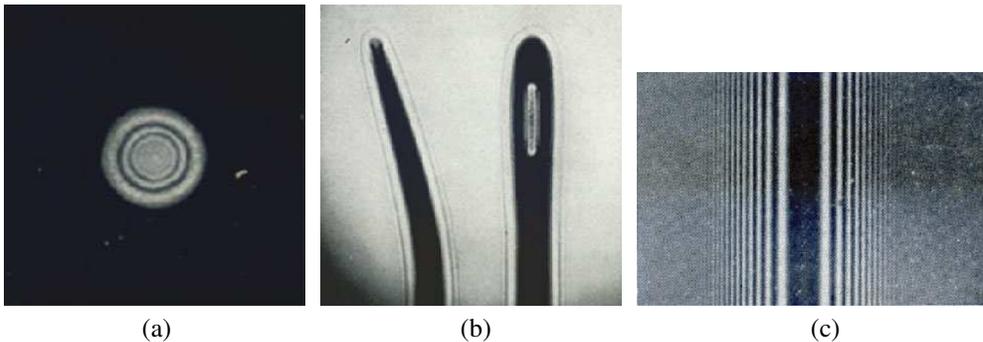
[解答] (1) 因為中央亮帶寬度 $= 2\Delta y = 2\frac{L\lambda}{a}$ ，

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

(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。

本章學習重點

Chapter Summary

5-1 光的波動說

1. 牛頓提出光的「微粒說」，認為光是由很多極為微小的粒子所組成。根據微粒說的預測，水中的光速 v 應大於在空氣中的光速 c 。
2. 惠更斯提出「波動說」，認為光是一種波動。波動說指出光從空氣射入水中時，光速減小，和微粒說的預測剛好相反。
3. 楊氏成功做出光的雙狹縫干涉實驗，顯示波動的特性。菲涅耳按照波動理論提出繞射的數學理論，獲得實驗的證實。傅科測出光在水中的速率比在空氣中小，光微粒說的根本已經動搖。
4. 英國的馬克士威研究電磁學，預測電磁波的存在，並由電磁學常數來計算出電磁波的傳播速率。計算結果顯示真空中電磁波的傳播速率正與測得真空中的光速相等，這意謂著光的本質是波動，且為電磁波的一部分。
5. 赫茲由實驗證實了電磁波的存在。光的波動性質已獲確認。
6. 可見光在真空中的波長的範圍約為 380 nm（紫光）至 780 nm（紅光），光的顏色與頻率（或真空中的波長）有關。
7. 光是橫波，可不需藉由介質傳播，但有介質存在時，其傳播速率會受介質的影響。
8. 若光在真空中和介質中的速率分別為 c 和 v ，波長分別為 λ 和 λ' ，則介質的折射率

$$n = \frac{c}{v} = \frac{\lambda}{\lambda'}$$

5-2 光的干涉現象

9. 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，所發出的光為同調光。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。
10. 在楊氏雙狹縫干涉實驗中，在光屏上亮紋上的點與兩狹縫的路程差為波長的整數倍 $n\lambda$ ，其與中央線的距離 y 為 $y_{\text{亮}} = n \frac{L\lambda}{a}$ ($n=0, 1, 2, \dots$) 而暗紋上的點與兩狹縫的路程差為半波長的奇數倍 $= (n' - \frac{1}{2})\lambda$ ，其與中央線的距離 y 為

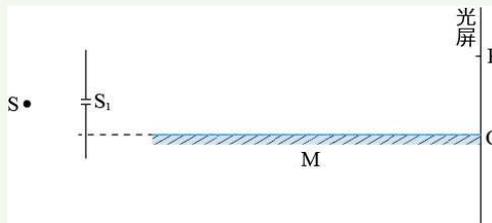
$$y_{\text{暗}} = (n' - \frac{1}{2}) \frac{L\lambda}{a} \quad (n'=1, 2, \dots)$$

5-3 光的繞射現象

11. 在單狹縫的繞射實驗中，如果以平行光照射狹縫的，且從狹縫透出後，沿任一方向射抵光屏的光線皆可視為彼此平行，在此情況下，各光線的路程差易於分析，可用簡單的數學來分析。
12. 單狹縫繞射的實驗中，若光屏上的 P 點與中央線的距離為 $\frac{3}{2} \left(\frac{L\lambda}{a} \right)$ 、 $\frac{5}{2} \left(\frac{L\lambda}{a} \right)$ 、 $\frac{7}{2} \left(\frac{L\lambda}{a} \right)$ 等，則 P 點為近似第一、第二、第三等亮紋中線位置，但是亮紋強度愈來愈小。中央部分最亮，中央亮帶寬度為 $2 \left(\frac{L\lambda}{a} \right)$ 。
13. 單狹縫繞射的實驗中，若光屏上的 P 點與中央線的距離為 $\left(\frac{L\lambda}{a} \right)$ 、 $2 \left(\frac{L\lambda}{a} \right)$ 、 $3 \left(\frac{L\lambda}{a} \right)$ 等，則 P 點為第一、第二、第三等暗紋中線位置。

一、問答題

- 光具有波動性質，當一束單色光由空氣射入水中時，光的速率、頻率和波長三項中，何者發生變化？
- 惠更斯原理可以用水波和聲波嗎？
- 同一單色光在光疏介質和光密介質中，此光在哪一介質中的波長較大？
- 若將同一楊氏雙狹縫干涉實驗置於水中進行，形成的亮暗干涉條紋間隔有何變化？
- ※第二章曾經學過水波槽中，兩點波源振動形成干涉的實驗。如果改為兩個同調光源在空間中發光形成光的干涉。兩者相比較，判斷下列各敘述是否正確？
 - 兩個光源同相時稱為同調光，如果兩光源有相差，就無法形成固定的干涉條紋。
 - 水波的干涉中，腹線位置在底下的白紙顯示出的區域為明暗相間，向外擴張；而光波的干涉中，腹線則為亮線。
 - 水波的節線是雙曲線；光波則為雙曲線繞兩波源連線旋轉 360° 形成的雙曲面。
 - 水波的干涉實驗中，我們可以直接在水面上看到節線和腹線；而光波的干涉則無法在空間中看到明暗相間的雙曲面。
 - 水波的干涉實驗中，水面上某一點若到兩波源的波程差為半波長的奇數倍，則此點在節線上；而在光波的干涉中則相反。
- 在楊氏雙狹縫干涉實驗中，光先經過一個單狹縫再進入雙狹縫。其中單狹縫需與雙狹縫平行嗎？其作用為何？
- 圖 5-31 中， S 為光源， S_1 為一狹縫， M 為平面鏡，平面鏡的右邊有一光屏。光源 S 發出單色光。
 - 說明光屏上為什麼會出現干涉條紋。
 - 光屏上的干涉條紋的範圍為何？
- 圖 5-32 中 S 為線光源， S_1 和 S_2 為雙狹縫，進行楊氏實驗， O 為光屏上的中央位置。
 - 若將光源 S 移至圖中 S' 處，則干涉條紋的位置有何變化？
 - 若將光源 S 移至圖中 S'' 處，則干涉條紋的位置有何變化？



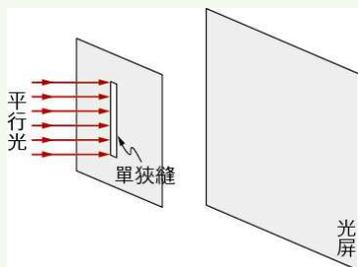
▲圖 5-31



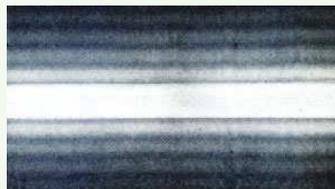
▲圖 5-32

9. 圖 5-33 是單狹縫繞射實驗的示意圖，試問

- (1) 我們討論的狹縫寬度是指哪一段？
- (2) 光屏上繞射圖樣類似圖 5-34 還是訴所示？



(a)



(b)

▲圖 5-33

▲圖 5-34

二、計算題

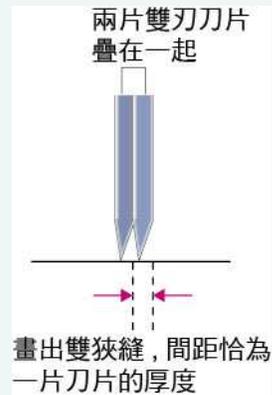
5-1 光的波動說

10. 光波和聲波都是波動，但是日常生活中聲音的繞射現象較光的繞射現象明顯。這主要是因為聲波的波長與日常生活物品等的尺度較接近，而光波則小甚多。
 - (1) 可見光在空氣中的波長範圍為 380 nm 至 780 nm，其對應的頻率範圍為何？
 - (2) 比較鋼琴中央 C（頻率為 262 Hz）的波長和波長為 500 nm 的黃綠光兩者波長比之數量級。
11. 氦氖雷射所發出的紅光波長為 630 nm，將之射入水中。
 - (1) 此光的波長變為若干（水對紅光的折射率為 1.33）？
 - (2) 此光在水中還是紅色的嗎？
 - (3) 又此光在水中傳播的速率為何？

5-2 光的干涉現象

12. 某人作楊氏干涉實驗，所用的單色光波長為 640 nm，兩狹縫的間隔為 0.20 mm，光屏與狹縫的距離為 1.0 m，求
 - (1) 亮紋寬度。
 - (2) 第二暗線的位置。

13. 以波長為 500 nm (藍綠光) 的平行光垂直地照射雙狹縫，在距狹縫 1.00 m 的光屏上，量得中央亮紋和第五亮紋之間的距離為 2.50 cm ，則兩狹縫的間隔為何？
14. 某人作楊氏雙狹縫實驗時，使用厚度為 0.10 mm 的雙刃刀片，將兩片刀子夾緊，在以蠟燭燻黑過的玻璃片上，劃下雙狹縫，以單色光源照此雙狹縫如圖 5-35 所示，發現距離 1.0 m 外的光屏上的干涉條紋中，相鄰兩暗線的距離為 0.40 cm ，求入射光的波長。
15. 在「楊氏干涉實驗」中，兩狹縫的間隔為 0.50 mm ，光屏與狹縫的距離為 2.00 m ，以波長為 600 nm 的可見光垂直狹縫照射，若光屏上 P 點為第二亮紋中線上的點，則
- (1) P 點到兩狹縫的路程差是多少？
 - (2) P 點與兩狹縫之間中點連線與中央線所成的角為 θ ，求 $\sin \theta$ 。



▲圖 5-35

5-3 光的繞射現象

16. 以汞光燈所發出波長為 546 nm 的綠光垂直地照射單狹縫，在光屏上所生繞射圖樣的中央亮帶的寬度為 9.1 mm ，已知光屏和狹縫之間的距離為 2.00 m ，試求狹縫的寬度為何？
17. 以一未知波長的平行單色光，垂直地照射寬度為 0.50 mm 的單狹縫，在距狹縫 2.00 m 的牆壁上形成繞射圖樣。測得中央亮帶兩側的光強極小值位置的距離為 4.8 mm 。試求該光的波長？
18. 以波長為 490 nm (藍光) 的平行單色光，垂直地照射單狹縫，量得在光屏上繞射圖樣的中央亮帶寬度為 0.49 cm 。現改用 630 nm 的紅光照射之，則中央亮帶的寬度為何？
19. 在單狹縫繞射實驗中，入射單色光的波長為 λ ，其所形成第二暗紋，恰與另一波長為 λ' 的單色光所形成第一亮紋重合，則 λ' 與 λ 的關係為何？
20. 在單狹縫繞射實驗中，測得第一亮紋的中線位置的繞射角 $\theta = 5.0^\circ$ ，則狹縫寬度和波長的比值是多少？

