

第十七章 光的干涉和繞射

幾何光學：利用光的直進性質 反射、折射定律，可以得知光經由 各式面鏡反射、透鏡折射後的行進路徑，由此可得知物和像之間的幾何關係，稱為幾何光學。

物理光學：光照射在肥皂泡膜上所產生的彩色條紋、水面油污色彩瑰麗、課本 P111、112 圖中之彩色條紋，都無法以光的直進性質或反射、折射等定律解釋，得經由波動理論才能說明。所以物理光學亦稱波動光學。

§17-1 光的本質：粒子或波動？

1 光到底是什麼？

1. 日常生活中對光的認知

現在的一般人通常都認為光是波動，而且是橫波。我們如何知道光是波動呢？光真的一定是波動嗎？

2. 早期人們對於光並沒有特殊的認識，因為光是如此的熟悉。聖經創世紀記載 「上帝說：『要有光』就有了光。」你看，一切是這樣的自然，簡單與美妙。

3. 曾經有一度人們認為"光"是從眼睛發出的「射線」，此射線碰到物體，反射回去，於是人們查覺物體的存在。

4. 且看一段故事：

①牛頓提出光的粒子說（1704 年）：認為光是由一束直線運動，而且具有完全彈性的微小粒子所組成，這些小粒子由發光體發出，可穿過透明物質，若遇不透明體，則被反射或吸收。

②牛頓的微粒說，可以解釋許多光的現象，例如光的反射定律、司乃耳定律、光壓、照度定律等等，而且會得到一重要結果：光在介質中的速率比在真空中速率大。（當時光速無法測定）

③同時代的海更士（1629~1695）而牛頓（1642~1727）卻提出光波動說，認為光是波動。他以波動理論為基礎，也可以成功地解釋反射、折射等重要現象。但是有下列幾點值得注意：

(a)可推得光在介質中的速率比在真空中慢。這與牛頓的微粒說的結論相反。（由於當時技術不足，無法決定牛頓與海更士的主張誰對誰錯）

(b)如果光是一種波動的話，那光波如何從太陽傳到地球？因為波動需要介質來傳播，而途中絕大部份是真空呢！似乎沒有介質。

(c)一般的波都有繞射現象。譬如聲波，把教室的門窗關起來，仍然可以聽到外面的人的喊叫聲。雖然門窗關起來，直接擋住了聲波的行進，但是聲波仍可經由門縫、間隙傳進來，繞進來，鑽進來，這就叫做繞射現象。如果光是波動的話，怎麼會沒有繞射現象呢？日常生活所見幾乎都是光的直進，尤其是月蝕、月蝕，完全是光的直進造成的影子而形成的現象。

④由以上可知，在當時，牛頓的粒子說佔上風，尤其是牛頓在力學、光學（光的色散、反射式天文望遠鏡）頗有成就，名氣比海更士大，使得大部分的人都相信牛頓的說法。

⑤十九世紀起，由於下列幾個事件，使得情況有顯著的改觀

(a)1801年英國的楊格發現了光的干涉現象，這也是波動現象的特性之一。

(b)繞射現象雖早在十七世紀意大利科學家發現光經過尖銳邊緣時有繞射現象，但不為大眾所認知。直到十九世紀初年，法國的夫瑞奈及德國的佛朗何斐才加以研究。

(c)1850年法國富可首先測出光在水中的速度的確比在真空中小，這項結果對光的微粒說真是致命的一擊，至此光的波動說乃正式受到確認。(至於光在真空中的傳播的困擾，聰明的人們，乃創立了以太的學說，真空中還有以太存在，負責傳遞光波。

(d)1864年英國的馬克斯威在電磁學方面甚有研究，他綜合電磁現象的安培定律、法拉弟定律等，建立了他的電磁場的數學理論，並由這個理論推算出真空中電磁波的速度，與真空中的光速相等。20年後德國的赫茲以實驗證實了馬克斯威的理論。

至此，光的粒子說被看成一文不值，而波動說則大獲全勝。

⑥風水輪流轉，十年河東，十年河西：一一一一世事變化多端。

(a)1887年美國的邁克生—莫來以實驗證明了以太根本不存在。光如何在真空中傳播呢？聰明的人們又發明奇招了，以太不存在，沒關係，乾脆說，原來電磁波的傳播與一般波動不同，電磁波是不需要介質的。需要介質的波是力學波如 繩波、聲波、水波等。

(b)十九世紀末、二十世紀初期又陸陸續續發現了許多無法用光的波動說解釋的現象，例如光電效應、康普頓效應等等，如果用光的微粒說來解釋反而順暢。(這些在近代物理會討論)

(c)人們迷惑了！光到底是什麼呢？有人打趣說，星期一、三、五光是波動，星期二、四、六光是微粒，而星期天則丟銅板決定吧！愛因斯坦說：「上帝不會跟人們擲骰子玩遊戲的。」

5. 爭了半天，原來是瞎子摸象：

① 瞎子甲摸到象的肚子，說象原來是牆壁，瞎子乙摸到象的腿，說象原來是柱子。兩個瞎子爭吵不休。明眼人在旁竊笑。

②人們發現了光的干涉與繞射現象，說光原來是波動。另一批人發現了光電效應、康普頓效應，說光原來是微粒。這兩批人無法協調，上帝則在天上竊笑。

③突然，聰明的人們覺悟了：象不是牆壁，也不是柱子，而是具有牆壁的性質，也具有柱子的性質。光也是一樣，光同時兼具波動與微粒的雙重性質，稱為光的二元性（雙重性）。

2 光的微粒說：

1. 牛頓對光的微粒所賦予的性質：

①體積很小，分佈很稀疏。

②光顆粒彼此之間不相作用。

③與物質碰撞而反射時為彈性碰撞。

④質量很小，但仍會受到重力和鄰近物質分子之引力作用。

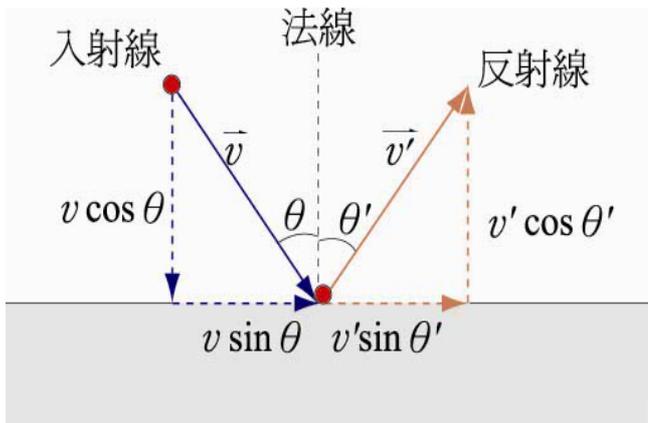
2. 解釋下列現象：

①光的直進：由於光的顆粒質量小，所受重力小，而且速度很大，重力對光顆粒的路徑影響甚小，所以光保持直線前進。

②兩光柱交錯通過時，因為光的粒子體積極小，分佈稀疏，所以兩光柱各自分別進行，互不相擾。

③反射定律：光在物體表面的反射，是因為這些粒子和物體作完全彈性碰撞所產生的結果。彈性碰撞前後光顆粒動能相等，得碰撞前後的速率相等。

彈性碰撞時，在平行於碰撞面的方向沒有作用力。(因為，如果有，則平行於此面的力是摩擦力，有摩擦力作用就不是彈性碰撞。)



一小粒子以速度 v 入射物體的表面，其入射角為 θ ；反射後的粒子速度為 v' ，反射角為 θ' 。

由於在水平方向上，粒子沒有受到力的作用，故在此方向上的速度分量不變，
即 $v \sin \theta = v' \sin \theta'$

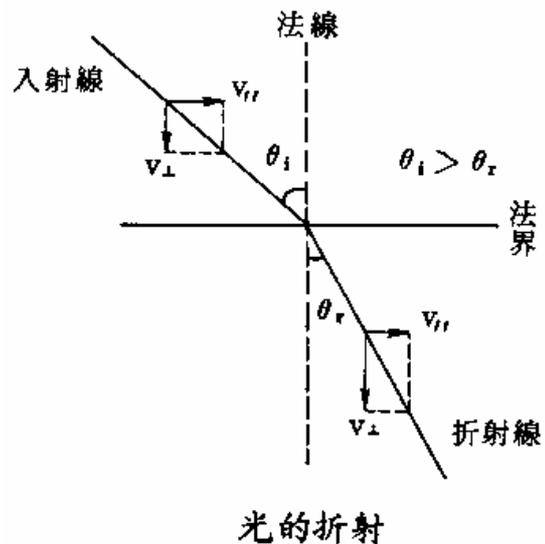
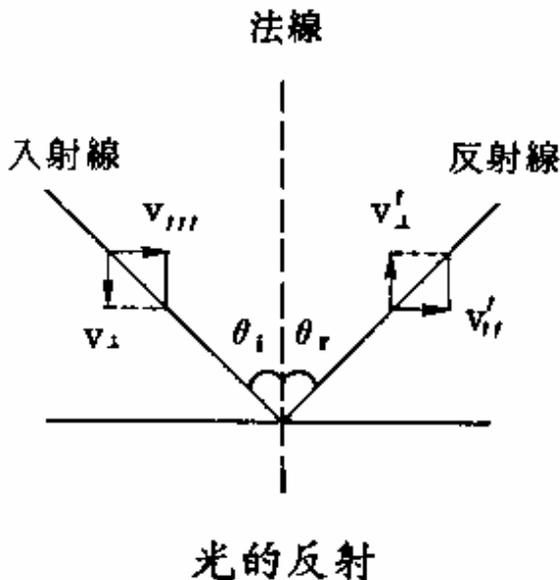
在垂直方向上，由於為完全彈性碰撞，
故 $v \cos \theta = v' \cos \theta'$

由上兩式可得 $v = v'$ ， $\theta = \theta'$ ，即入射角等於反射角，符合反射定律。

④折射司乃耳定律：光的折射，是因為入射到介質界面的粒子，受到折射物質的吸引而進入物質內。

以粒子模型來模擬光的折射

(參考課本 P114 圖 17-3)



(請注意圖中，速度水平分量、鉛直分量之變化，並思考原因，及牛頓的想法)

光的折射：

當光質點自真空以速率 C 抵達一介質表面，並穿入介質內繼續前進時，其速率變為 V ，如上圖所示。

(a) 平行界面方向：因光粒子未受力作用，故其水平方向的速度分量不變，

$$c \sin i = v \sin r \Rightarrow \frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v}{c} = \text{定值} \quad \text{滿足司乃耳折射定律。}$$

(b) 垂直界面方向：光粒子受介質分子的引力，因引力的方向垂直於介質表面，乃使其在垂直於表面方向上的速率增大，即 $v > c \Rightarrow i > r$ 與實際折射現象符合。

討論：由介質折射率 $n = \frac{\sin i}{\sin r} > 1$ ，且由 (a) $\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v}{c} \Rightarrow v > c$

即根據光之微粒說說，光在介質中的傳播速率顯較真空中為大。

因此粒子在下方水平面上的速度增快變為 \vec{v}_2 ，其行進方向偏向法線。

請再參閱課本 P115 之攝影圖。——從圖中可看出當小球的入射角減小時，其折射角隨之減小。

- ⑤光粒子說的不足：光的粒子說固然可輕易地解釋光的直進特性，以及反射和折射定律，但仍存在有缺點。由實驗得知光入射在不同介質的界面時，會同時發生反射和折射，但是根據粒子說，同樣入射在界面的光粒子，為什麼有的經由完全彈性碰撞而發生反射，有的卻受到吸引力的作用而發生折射呢？

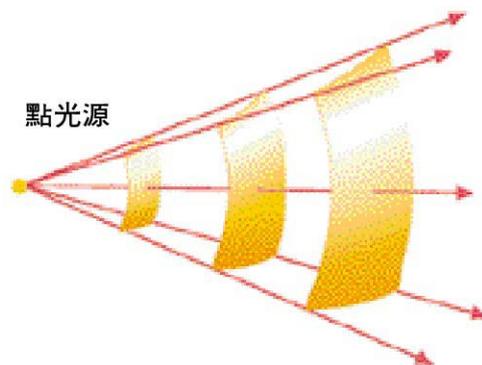
補充說明：

1. 司乃耳定律只敘述 $\sin \theta_1$ 與 $\sin \theta_2$ 的比值為常數，沒有牽涉到光速的問題。我們所熟悉的介質中光速比在真空中小，這是光的波動說的推論，當然也是後來實驗所得的結果。
2. 根據光的粒子說的理論推導，光在介質中行進得比在真空中行進得快，與百年後之實驗結果不符

3 光的波動說：

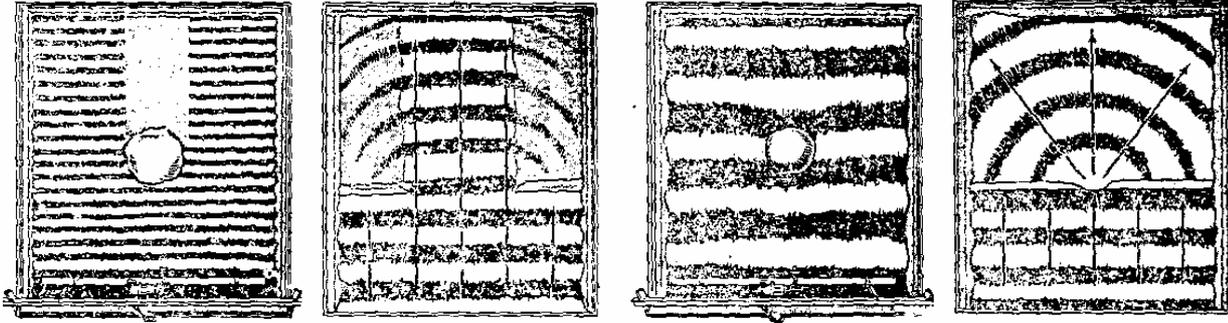
在十九世紀中葉以前，科學家們只知道光速極大，但尚不知道如何在地面上測量光速，無從比較光在空氣中和水中的速率，孰大孰小。由於牛頓的崇高學術地位和聲望，粒子說一直佔有上風，波動說受到貶抑。

1. 荷蘭人海更士，在 1678 年提出了「波動說」，認為光是一種波動，就像水波或聲波的傳播一樣，也能夠圓滿解釋光的直進、反射、折射等現象，但預測光在一般介質中的速率要比在空氣中慢。
2. 海更士原理：海更士如此解釋波的前進：波前上的每一點皆可視為一個新的點波源，以各點波源為中心各自發出球面波（即子波），所有子波的包跡面形成新的波前，因此波動可以自



行前進，其能量也藉此傳遞。

3. 遭遇之困難：（1）在日常所遇到的現象，光總是以直線前進，而並未顯示繞射（改變方向，如聲音可傳至別間教室）的性質，顧假設光係以微粒子直線傳播的理論，似乎較為合理。
（2）日常水波、繩波、聲波等傳播皆需要介質，光速自遙遠星系、太陽等傳來，並未有任何介質存在。——海更士假設在宇宙中存在有一種稱為「以太」（ether）的介質，光倚靠該介質傳播。



問：波一定有明顯可見的繞射嗎？波產生明顯可見繞射的條件是什麼？

4. 波動說也可以解釋光的直進、反射和折射定律。（前面十三章波動學已提過）
 5. 早在 1500 年時，達文西（1452-1519）已提到光的繞射，後來格里馬迪（1618-1663）又作過實驗的證明，可惜不為當時的科學家所週知及承認。
 6. 1801 年英國人楊格（Thomas Young, 1773 - 1829）發表了雙狹縫的實驗結果，顯示光的干涉和繞射現象，這是波動獨有的特性，粒子說無法解釋，因此動搖了粒子說的地位，波動說轉居上風。（這發現經過二十多年才被科學界所注意）
 7. 約在楊格致力於光的干涉實驗的同時，法國的夫瑞奈（Fresnel, 1788-1827）及德國的佛朗何斐（Fraunhofer, 1787-1826）二氏也正在研究光的繞射現象，夫瑞奈更按照波動理論提出繞射的數學理論。
 8. 1850 年法國人菲左（Fizeau, 1819 - 1896）和佛科（Foucault, 1819 - 1868）分別獨立地在地面上精確測出光在空氣中和水中的傳播速率。他們發現光在水中的速率比在空氣中小，至此牛頓的粒子說以經根本動搖。
 9. 1864 年英國人馬克士威（1831 - 1879）從理論上證明光是一種電磁波，不需要靠介質來傳遞。原先波動說所謂的介質振動位移，就光而言，指的是光所具有的電場和磁場的強度。電磁波以光速傳播，因此認為光只是電磁波的一種，不需介質即可傳播。
 10. 1888 年，德國人赫茲由實驗首次產生了馬克士威所預測的電磁波，隨即由實驗證明這電磁波具備了反射、折射、聚焦及偏振等光的特性。理論和實驗的進展完全建立了光的波動理論。
- 1881 年美國人邁克生（Michelson, 1852 - 1934）和毛立（Morley, 1838 - 1923）從實驗中證明所謂的「以太」是不存在的。