

4-4 全反射

1. 全反射的現象

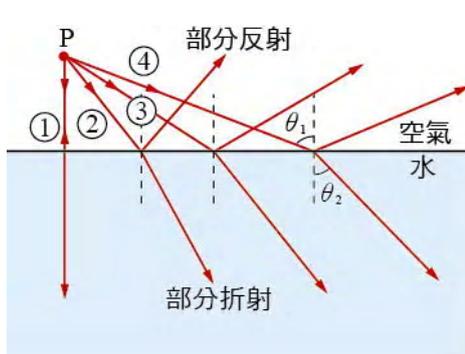
從光疏介質進入光密介質時，折射角 θ_2 較入射角 θ_1 小，折射線偏向法線。圖 4-46 所示為光線從空氣中入射水中時，產生部分反射和部分折射的現象。設水的折射率為 n ，由司乃耳定律可得 $1 \times \sin \theta_1 = n \sin \theta_2$ ，於是

$$\sin \theta_2 = \frac{\sin \theta_1}{n} = \frac{\sin \theta_1}{1.33}$$

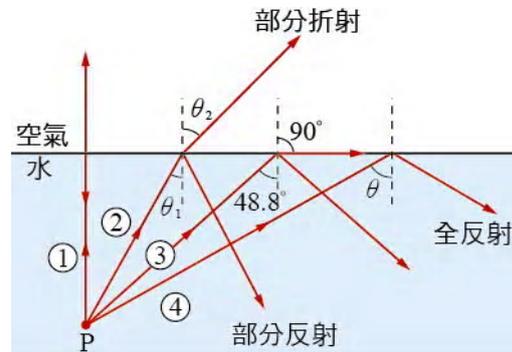
上式可以看出折射角 θ_2 隨入射角 θ_1 的增大而變大，但是 θ_2 有一最大值，即當 θ_1 達到最大值 90° 時， θ_2 亦達到最大值，其正弦值為

$$\sin \theta_2 = \frac{1}{1.33} = 0.752$$

可得最大的折射角為 48.8° 。



▲圖 4-46 當光從空氣進入水中時，光在界面處產生部分反射和部分折射的現象。折射角 θ_2 隨入射角 θ_1 的增大而變大。



▲圖 4-47 光從水中發出，射向空氣中時，由於折射角大於入射角，入射角達到 48.8° 時，折射角會成為 90° 。入射角大於 48.8° 時，光線不能進入空氣，此即全反射現象。

反過來，光從水中進入空氣時，如圖 4-47 所示，折射角較入射角大，折射線偏離法線。若入射角恰等於 48.8° ，則折射角成為 90° ，即折射光線沿水面傳播。當入射角大於 48.8° 時，光線無法進入空氣中，這時光線將依照反射定律全部反射回水中，此現象稱為**全內反射**（total internal reflection），簡稱為**全反射**。

2. 臨界角

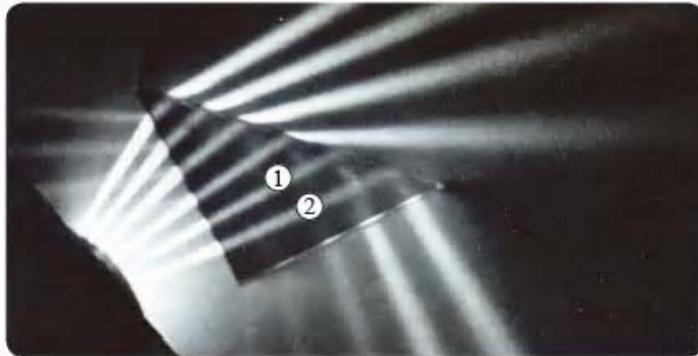
光從光密介質進入光疏介質時，使折射角成為 90° 的入射角稱為**臨界角**（critical angle），記為 θ_c 。以光自水進入空氣為例，參考圖 4-47，圖中的入射角 48.8° ，即為臨界角 θ_c 。

若光密介質和光疏介質的折射率分別為 n_1 和 n_2 ($n_1 > n_2$)，則 $n_1 \sin \theta_c = n_2 \sin 90^\circ$ ，故

$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1}$$

4-8 式

圖 4-48 為光線的路徑照片。光自左下方射入三稜鏡後，自稜鏡射出空氣時，圖中光線①與②的入射角大於臨界角，故無進入空氣的折射線，光線全部反射回稜鏡，成為全反射。



▲圖 4-48 光自左下方射入三稜鏡後，自稜鏡射出空氣時，圖中光線①與②為全反射。



反射線和折射線的強度

光從一介質進入另一介質時，通常反射線和折射線的強度並不相等，而與兩介質的折射率以及入射角有關。經由較深的理論可以計算出反射線和入射線的強度。若入射角增加，則反射光的強度隨之逐漸增強，而透射光會逐漸減弱；若光以等於或大於臨界角入射時，則入射光全部反射回原介質中。

範例 4-8

如圖 4-49 所示的直角三稜鏡，是由折射率為 2.00 的透明物質所製成，其邊角之一為 θ ，入射光的方向垂直於斜邊。試問

- (1) θ 角在什麼範圍內，入射光才會經由兩次的全反射而從斜邊射出？
- (2) 若整個稜鏡浸入折射率為 1.50 的透明液體中，則上一問題的答案為何？

[解答] (1) 參考圖 4-50，因入射光線垂直射入三稜鏡的斜邊，故折射時無偏折。光行進至稜鏡的直角邊時發生全反射，此時的入射角等於 θ 。若欲產生全反射，則 θ 必須大於臨界角 θ_c ，即

$$\sin \theta > \sin \theta_c = \frac{1}{n} = \frac{1}{2.00} \quad \theta > 30.0^\circ$$

又當光線行進至另一直角邊時，入射角為 $90^\circ - \theta$ 。若欲發生全反

$$\text{射，則須 } \sin(90^\circ - \theta) > \sin \theta_c = \frac{1}{2.00}$$

$$90^\circ - \theta > 30.0^\circ, \text{ 即 } \theta < 60.0^\circ$$

所以 θ 的範圍為 $30.0^\circ < \theta < 60.0^\circ$ 。

- (2) 若稜鏡外面為折射率 1.50 的液體，則第一次全反射的條件為

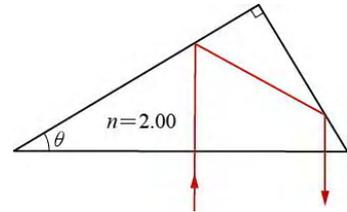
$$\sin \theta > \sin \theta_c = \frac{1.50}{2.00} = 0.750 \quad \sin \theta > 0.750, \text{ 或 } \theta > 48.6^\circ$$

第二次全反射的條件為

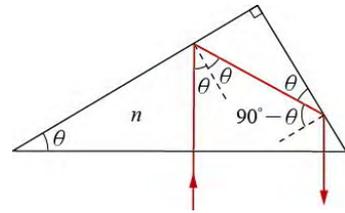
$$\sin(90^\circ - \theta) > \sin \theta_c = 0.750 \quad \cos \theta > 0.750, \text{ 或 } \theta < 41.4^\circ$$

以上兩式要同時成立是不可能的，這表示 θ 不存在，

即入射光不可能經由兩次的全反射而從斜邊射出。



▲圖 4-49 光線自垂直於稜鏡底邊的方向進入，經兩次全反射後垂直斜邊射出。

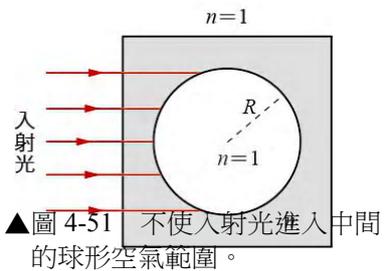


▲圖 4-50

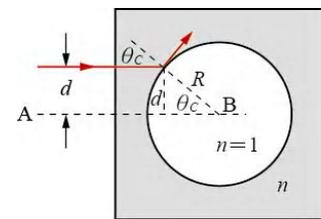
範例 4-9

圖 4-51 中，一正立方體透明介質的折射率為 n ，其內部有一半徑為 R 的球形空氣範圍。圖中平行光線以垂直於立方體左側的方向入射。為了不使光線進入中間的球形空氣範圍，入射光線必須在某一範圍之外，求此範圍的半徑。

[解答] 若不使光線進入中間的球形空氣範圍，則光線射至空洞邊緣時，必須發生全反射。參考圖 4-52， AB 為通過球心的光線，與 AB 距離愈遠的光線，射至空洞邊緣時的入射角愈大。當入射角大到成為臨界角 θ_c 時，光線就無法進入空洞了。設入射角為臨界角的光線與 AB 線的距離為 d ，而與 AB 線的距離小於 d 的入射光線，就會進入空洞。故入射光線需避開以 d 為半徑的圓形區域



▲圖 4-51 不使入射光進入中間的球形空氣範圍。

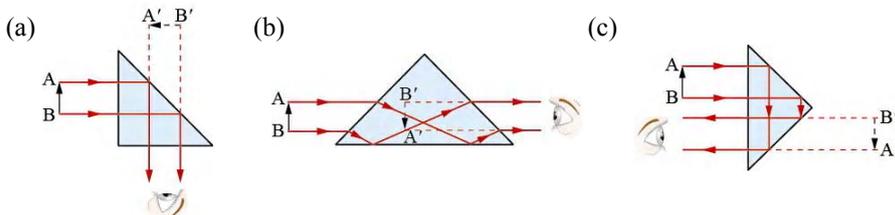


▲圖 4-52

因為 $\sin \theta_c = \frac{1}{n}$ 且由圖可看出 $\sin \theta_c = \frac{d}{R}$ ，故 $\frac{d}{R} = \frac{1}{n}$ ，可得半徑 $d = \frac{R}{n}$ 。

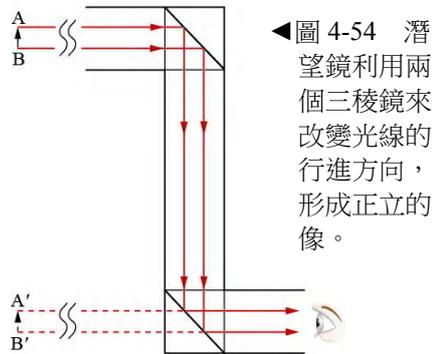
3. 全反射的應用

玻璃的折射率約為 1.5，其與空氣界面的臨界角約等於 42° ，因此當光從玻璃中射向空氣時，若入射角為 45° ，則光將在玻璃和空氣的界面處發生全反射。我們可藉此利用如圖 4-53 所示的三稜鏡，來改變光線行進的方向，或使看到的物體變為倒立。



▲圖 4-53 利用三稜鏡，可以(a)改變光線行進的方向，(b)使看到的物體變為倒立，(c)同時改變光線行進的方向，使看到的物體變為倒立。

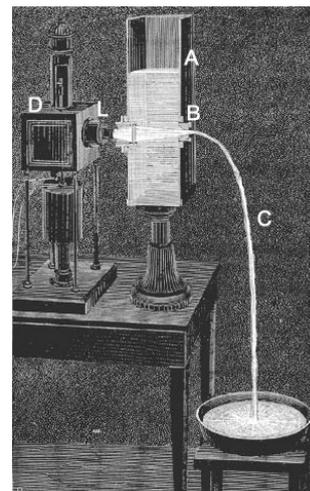
如圖 4-54 所示潛艇所用的潛望鏡內有兩個三稜鏡，用於改變光線行進的方向。水面上的物體，如圖中的 AB，在潛望鏡中所見者為正立的虛像 A'B'。



想一想

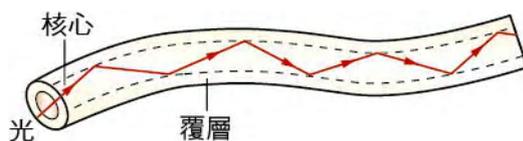
圖 4-54 中的潛望鏡使用了兩個等腰直角三稜鏡。若改為兩個一般的平面鏡來反射光線，效果有何不同？

1854 年英國人廷得（John Tyndall, 1820 - 1893）在英國皇家協會的一次演講中，在所有成員的面前，展示類似圖 4-55 的裝置，利用光的全反射原理，使得光線在水柱中彎曲。圖中 A 為裝有水的水槽，B 處有一小孔可以讓水流出。D 為光源裝置，光束從 L 射出，進入 B 孔的水流。光進入水流後，欲射出空氣時，由於入射角大於臨界角，形成全反射而沿著水柱行進。



▲圖 4-55 利用光的全反射原理，使光線在水柱中彎曲的實驗裝置。

光纖（optical fiber）就是類似的應用，如圖 4-56 所示。光纖是細如頭髮的玻璃纖維，內有核心，外面由覆層包住，核心的折射率較覆層大。當光射入核心後，由於全反射，光被限制在核心內部，沿著光纖的長度方



▲圖 4-56 光利用全反射在可彎曲的光纖內行進。

向傳播前進。光纖可應用於醫療診病用的內視鏡（endoscope），以及光纖通訊等。

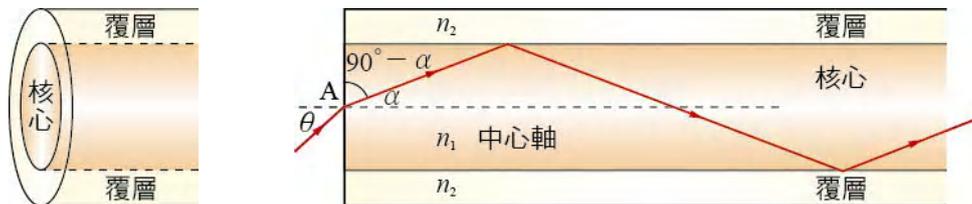
其實光纖在通訊上實際應用的構想最早由華裔科學家高錕（1933-，圖 4-57）首先提出，他認為可以利用纖維材料利用全反射來傳遞光束，並作深入的研究且獲致實質的成果，導致今天光纖廣泛的運用在許多領域。高錕被譽為光纖通訊之父，並且由於此偉大的成就獲得 2009 年諾貝爾物理學獎。



▲圖 4-57 高錕。

範例 4-10

圖 4-58(a)為光纖的外觀示意圖，(b)為剖面圖， n_1 和 n_2 分別為核心和覆層物質的折射率（ $n_1 > n_2$ ）。欲使光線自空氣中以入射角 θ 進入纖芯後，依靠全反射傳遞，則 $\sin \theta$ 有何限制？



▲圖 4-58 (a)光纖的結構示意圖；(b)為剖面圖。

[解答] 光線從圖 4-58(b)圖中的 A 點進入核心時，設折射角為 α ，則由折射定律可得

$$\sin \theta = n_1 \sin \alpha \quad \text{即} \quad \sin \alpha = \frac{\sin \theta}{n_1} \tag{1}$$

光線進入核心後，在核心和覆層的界面處作全反射，每次的入射角皆等於 $(90^\circ - \alpha)$ ，必須大於臨界角 θ_c ，即

$$\sin (90^\circ - \alpha) > \sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1} \quad \text{即} \quad \cos \alpha > \frac{n_2}{n_1} \tag{2}$$

由上①②兩式可得 $1 = \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha > \left(\frac{\sin \theta}{n_1}\right)^2 + \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2$

故得 $\sin \theta$ 的限制為 $\sin \theta < \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$