4-3 折射現象

本章前言提過，光從一介質進入另一不同的介質時，在兩介質的界面上會發生部分反射和部分折射的現象。除了入射線的方向與界面垂直之外，光在透射時，其前進方向會發生偏折，這是日常生活中常見的現象，例如插入水中的吸管，看起來似是折成兩截（圖 4-38）。雨後出現的彩虹、夜晚星光的閃爍等自然現象都和光的折射有密切的關係。光的折射在生活上應用的例子尤多，例如眼鏡、照相機、顯微鏡、望遠鏡等。甚至於我們眼睛的視覺作用也與光的折射有關。

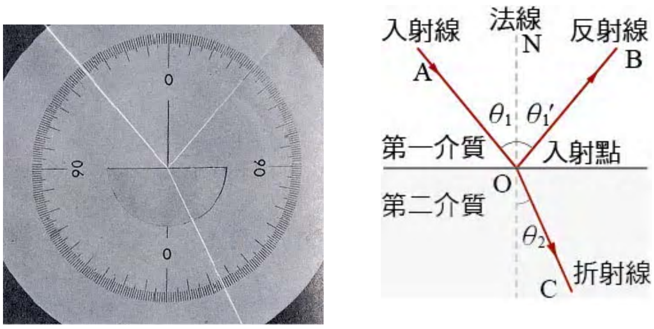
▲圖 4-38　由於光的折射現象，使得吸管看似折成兩截。

1. 司乃耳定律

在圖 4-39(a)中，光線從空氣射至半圓形玻璃板的圓心時，我們可以觀察到有部分光線反射，部分光線進入玻璃中。進入玻璃中的光線，並不沿著原來的方向行進，而有偏折的現象。

人折射現象

像這樣，光從一種介質進入另一種不同的介質時，行進方向發生改變的現象稱為**折射**。圖 4-39(b)為各光線的幾何關係圖，光從第一介質傳播進入第二介質，O 為入射點，AO 為入射線，ON 為法線，從入射點偏折進入第二介質的光線 OC，稱為折射線。θ_1為入射角，折射線與法線的夾角稱為**折射角**θ_2。



(a)　(b)

▲圖 4-39　(a)光從空氣射至半圓形玻璃板的圓心時，其行進方向並不沿著原來的方向行進，而有偏折的現象。光線從空氣進入玻璃中，其行進方向偏折。(b)入射線、反射線、折射線和法線的幾何關係圖，入射角 θ_1 等於反射角 θ_1'，而折射線行進方向與入射線方向不同。

2. 折射定律

當光從空氣進入水或玻璃中，實驗發現折射角 θ_2 小於入射角 θ_1，即折射線偏向法線。反過來，當光從水或玻璃進入空氣，折射線將偏離法線。若改變入射角 θ_1，則折射角 θ_2 也會改變。1621 年荷蘭人司乃耳（Willebrord Snell,1580-1626）實驗發現，光在折射時遵守**折射定律**（law of refraction)，或稱為司乃耳定律（Snell's law）。

1. 入射線、折射線和法線均在同一平面上，且入射線和折射線分別在法線的兩側。
2. 入射角和折射角的正弦比值為一定值，即

$$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = n = 常數 \qquad \textbf{4-4 式}$$

上式中的 *n* 為一常數，其值與介質有關。

3. 折射率

若光從真空中傳播進入某介質時，則（4-4）式中的 *n* 定義為該介質的折射率 絕對折射率（index of refraction）。按此定義，①真空的折射率即為 1。一般物質的折射率如表 4-1 所列。由表中可②知空氣的折射率為 1.00029，在 4 位有效數字的範圍內為 1，故在一般實驗中，常以光由空氣進入介質時，所測得的 *n* 值作為該介質的折射率。

③ 表 4-1　一般物質的折射率[註]

介質	折射率
✓ 空氣	1.00029
二氧化碳	1.00045
✓ 水	1.333
酒精	1.362
甘油	1.473
苯	1.501
二硫化碳	1.628
冰（0 ℃）	1.310
石英玻璃	1.459
塑膠玻璃	1.49（約）
冕牌玻璃	1.51（約）
窗玻璃	1.51（約）
食鹽	1.544
鉛玻璃	1.62～1.81
✓ 鑽石	2.419

4. n 的意義

由（4-4）式中可看出光自空氣進入一介質，入射角保持不變時，若物質的折射率愈大，則折射角就愈小（即偏折程度愈大），折射線愈偏向法線。換句話說，**折射率的量值可表示光折射方向的偏折程度**。

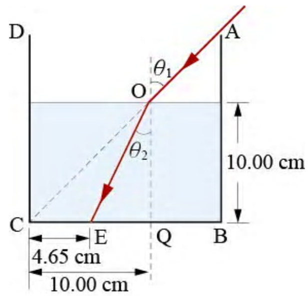
做一做

由圖 4-39(a)中光線的路徑圖，計算半圓形玻璃的折射率。

註 1.表中數值為在 1 大氣壓下，溫度範圍在 0℃至 20℃內，以波長為 589 nm 的黃色鈉光所測得。
2.來源 Handbook of Physics（Published by Springer，2002）

範例 4-5

如圖 4-40 所示的正立方體容器，未注入液體時，一束雷射光沿一正方形截面的對角線方向，由 A 點射向 C 點。若在容器中注入深 10.00 cm 的某液體，發現射至容器底部的雷射光自 C 點向右偏移 4.65 cm 至 E 點，求光在此液體中的折射率。



▲圖 4-40

[解答]　由圖中的幾何關係可知

$$\sin\theta_2=\frac{\overline{QE}}{\overline{OE}}$$

$$=\frac{10.00\text{ cm}-4.65\text{ cm}}{\sqrt{(10.00\text{ cm})^2+(10.00\text{ cm}-4.65\text{ cm})^2}}=0.472$$

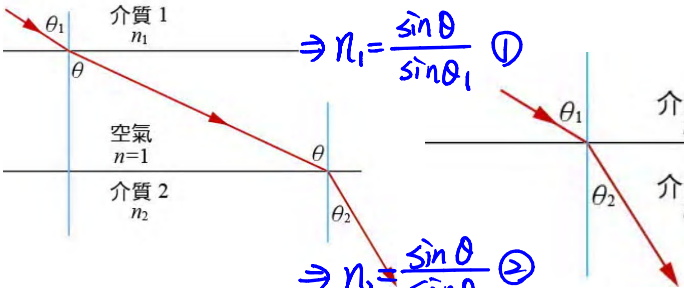
由於入射角 θ_1 等於 45°，利用司乃耳定律得該液體的折射率為

$$n=\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2}=\frac{\sin 45^\circ}{0.472}=1.50$$

2. 相對折射率

在圖 4-41(a)中，光從折射率為 n_1 的介質 1 進入空氣，再由空氣進入折射律為 n_2 的介質 2 中。設光從介質 1 進入空氣的入射角為 θ_1，折射角為 θ，由折射定律得

1、
$$n_1\sin\theta_1=1\times\sin\theta$$



$\Rightarrow n_1=\frac{\sin\theta}{\sin\theta_1}$ ①

$\Rightarrow n_2=\frac{\sin\theta}{\sin\theta_2}$ ②

① ÷ ②

$\Rightarrow \frac{n_1}{n_2}=\frac{\sin\theta_2}{\sin\theta_1}$

$\Rightarrow n_1\sin\theta_1=n_2\sin\theta_2$

(a)　(b)

▲圖 4-41　(a)光介質 1 進入空氣再進入介質 2（各界面）互相平行；(b)空氣層的厚度趨近於 0 時，相當於光直接從介質 1 進入介質 2。

若圖中兩界面互相平行，則接著光由空氣進入介質 2 時的入射角為 θ 。設進入介質 2 的折射角為 θ_2，則

$$1\times\sin\theta = n_2 \sin\theta_2$$

由以上兩式可得

2. Snell's law:

$$\boxed{n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2} \qquad \textbf{4-5 式}$$

如果圖中空氣層的厚度趨近於零時，則相當於光直接從介質 1 進入介質 2，如圖 4-41(b)。此時（4-5）式為光從介質 1 進入介質 2 的折射定律，也稱為司乃耳定律的一般形式。亦可寫為

3. 相对折射率

$$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{n_2}{n_1} = n_{12} \qquad \textbf{4-6 式}$$

上式中 n_2 和 n_1 的比值記為 n_{12}，即

$$n_{12} = \frac{n_2}{n_1} \qquad \textbf{4-7 式}$$

n_{12} 稱為介質 2 對介質 1 的**相對折射率**（relative index of refraction），或光由介質 1 進入介質 2 的相對折射率，而前面所討論物質的折射率有時也稱為**絕對折射率**（absolute index of refraction）。

5、 光從一介質進入另一介質時，兩介質的折射率較小者，光在該介質中的速率較大，稱為**光疏介質**（optically thinner medium），折射率較大的介質稱為**光密介質**（optically denser medium）。以空氣和水兩者為例，水為光密介質；而水和冕牌玻璃兩者而言，水則為光疏介質。光從光疏介質進入光密介質時，折射角較入射角小，故折射線偏向法線；光從光密介質進入光疏介質時，折射角較入射角大，故折射線偏離法線。

4. 光在介質中的速率 v 與折射率 n

(1) 根據波動說，光從空氣(I)進入介質(II)時

① $\dfrac{\sin\theta_{air}}{\sin\theta_{介質}} = \dfrac{v_{air}}{v_{介質}} = \dfrac{c}{v}$

② $\dfrac{\sin\theta_{air}}{\sin\theta_{介質}} = n$

$\Rightarrow n = \dfrac{c}{v} \Rightarrow$ ① $\theta_{介質} < \theta_{air}$ ② $n > 1$

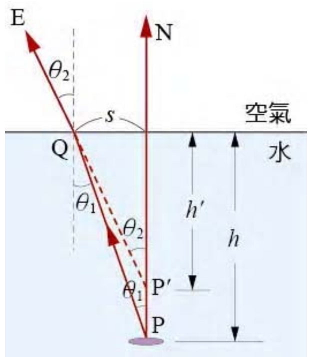
(2) 一般 $\dfrac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \dfrac{v_1}{v_2} = \dfrac{\frac{c}{n_1}}{\frac{c}{n_2}} = \dfrac{n_2}{n_1} \Rightarrow n_1\sin\theta_1 = n_2\sin\theta_2$

Snell's law ※

範例 4-6

一游泳者站在游泳池畔，不小心把蛙鏡掉到游泳池內邊緣的底部。他發現水深刻度顯示的深度為 1.0 公尺，但是他看到掉在水底的蛙鏡似乎比較淺。為什麼呢？如果他在蛙鏡正上方附近觀察，會覺得蛙鏡的深度是多少（已知水的折射率為 1.33）？

[解答] 這是因為水中物體發出的光線射出水面時，會因折射偏離法線，使得觀察者看到的物體似乎變淺了。在圖 4-42 中，從物體 P 所發出的光線中，若與水面垂直者（圖中的 PN），因入射角為零，故進入空氣中時，折射角亦為零，光的行進方向無偏折。另一光線 PQ 以入射角 θ_1 射至水面時，其折射角為 θ_2，由於水的折射率大於空氣，故折射光線偏離法線。



▲圖 4-42　由於光線的折射，原來在位置 P 的物體，從界面上方看起來，物體的位置在 P'。

設水的折射率為 n，由司乃耳定律得

$$n\sin\theta_1 = \sin\theta_2 \qquad ①$$

若觀察者在物體正上方附近觀察，光線 QE 反方向延長線和 PN 的交點 P'，即觀察者看到的深度，稱為視深 h'，則角度 θ_1 和 θ_2 均甚小，其正弦值近似等於正切值，即

$\sin\theta_1 \approx \tan\theta_1 = \dfrac{s}{h}$ 和 $\sin\theta_2 \approx \tan\theta_2 = \dfrac{s}{h'}$。故式可寫成

$$n \times \frac{s}{h} \approx 1 \times \frac{s}{h'}$$

故得視深與實深的關係式為 $h' = \dfrac{s}{h}$　②

由上式可知，若 $n>1$，則 $h'<h$，因此從空氣中看水中的物體時，會覺得物體似是浮了起來，顯得較淺。

現在，此人掉入水中蛙鏡的深度（實深 h）為 1.0 m，而水的折射率為 1.33，由②式得視深 h' 為

$$h' = \frac{1.0\ \text{m}}{1.33} = 0.75\ \text{m}$$

6.視深與實深(圖4-42)…正上方看

(1) $\tan\theta_1 = \dfrac{s}{h}$，$\tan\theta_2 = \dfrac{s}{h'}$，$\theta_1, \theta_2$ 很小

$\Rightarrow \dfrac{\tan\theta_1}{\tan\theta_2} \approx \dfrac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \dfrac{h'}{h}$

$\Rightarrow \dfrac{h'}{h} = \dfrac{n_2 \to n'}{n_1 \to n}$

$\Rightarrow \dfrac{\text{視深}\,h'}{\text{實深}\,h} = \dfrac{n'(\text{眼})}{n(\text{物})}$

(2)若從空氣中看介質

$\Rightarrow \dfrac{h'}{h} = \dfrac{1}{n} \Rightarrow h' = \dfrac{h}{n} < h$

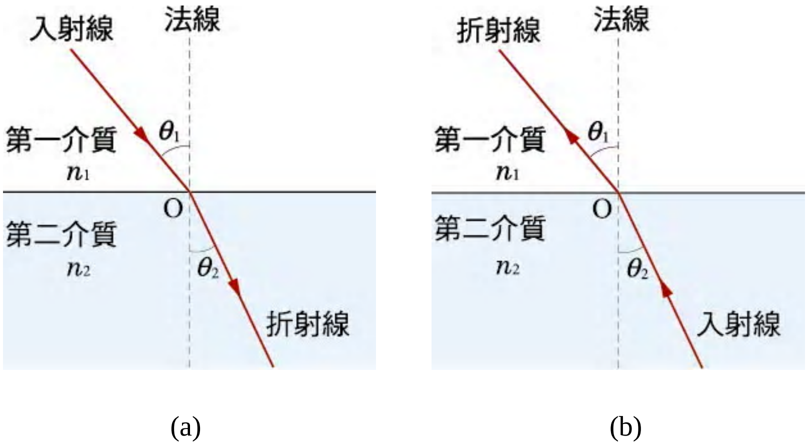
(3) 若數層介質 n' 視深 h'

n_1 h_1
n_2 h_2
n_3 h_3

$\frac{h'}{n'}=\frac{h_1}{n_1}+\frac{h_2}{n_2}+\frac{h_3}{n_3}$ (補充)

3. 光在折射時路徑的可逆性

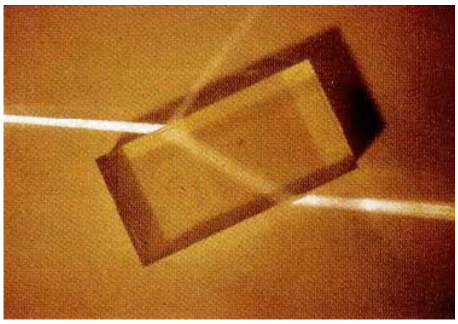
在圖 4-43(a)中，當光從折射率為 n_1 的第一介質以入射角 θ_1 射入折射率為 n_2 的第二介質時，若折射角為 θ_2，則 $n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$。而在圖 4-43(b)中，光線改從第二介質以入射角 θ_2，反向射入第一介質時，則因其入射角和折射角必須遵守同樣的折射公式，故折射角必等於 θ_1，即光沿著同一路徑反方向行進，表示光在折射時，其路徑具有可逆性。



▲圖 4-43　光的折射路徑具有可逆性。(a)光由介質 1 進入介質 2 時入射角為 θ_1，折射角為 θ_2；(b)光由介質 2 進入介質 1 時，若入射角為 θ_2，則折射角必等於 θ_1，即光循原路徑反方向行進。

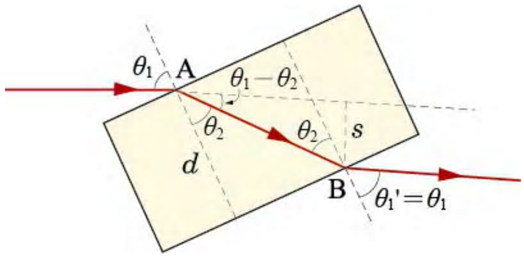
範例 4-7　橫向位移 or 旁位移

圖 4-44 所示為光線入射平行玻璃塊後的折射情形，照片顯示入射光線和射出光線互相平行，兩者之間有橫向位移。若玻璃塊的折射率為 n，厚度為 d，入射角為 θ_1，求橫向位移。



▲圖 4-44　光線入射平行玻璃塊的折射情形，入射光線和射出光線互相平行，但兩者之間有橫向位移。

[解答] 參考圖 4-45，設光線在 A 點從空氣中射入玻璃塊內，入射角為 θ_1，折射角為 θ_2，則由折射定律得 $\sin\theta_1 = n\sin\theta_2$。當光線在 B 點處從玻璃塊射出時，入射角等於 θ_2，設其折射角為 θ_1'，則 $n\sin\theta_2 = \sin\theta_1'$，所以 $\theta_1 = \theta_1'$，即入射光線和射出光線平行。由圖中的幾何關係可得橫向位移 s 為



▲圖 4-45　光線路徑的分析圖。

$$s = \overline{AB}\sin(\theta_1 - \theta_2) = \overline{AB}(\sin\theta_1\cos\theta_2 - \cos\theta_1\sin\theta_2)$$

玻璃塊的厚度 $d = \overline{AB}\cos\theta_2$，即 $\overline{AB} = \dfrac{d}{\cos\theta_2}$，以之代入上式可得

$$s = d(\sin\theta_1 - \cos\theta_1\tan\theta_2)$$

因為 $\sin\theta_2 = \dfrac{1}{n}\sin\theta_1$，所以 $\tan\theta_2 = \dfrac{\sin\theta_1}{\sqrt{n^2 - \sin^2\theta_1}}$，故

$$s = d\sin\theta_1\left(1 - \frac{\cos\theta_1}{\sqrt{n^2 - \sin^2\theta_1}}\right)$$

① $s \propto d$
② n 愈大 ⇒ s 愈大
③ s 與入射角 θ_1 有關