

第 6 章 波

6-1 波速、頻率與波長

6-2 波的特性

6-3 都卜勒效應

6-4 光（示範實驗：楊氏雙狹縫干涉）

6-5 電磁波

本章教學理念

了解波的基本特性，再延伸到波的都卜勒效應，並知道光是電磁波的一種，光具有波的各種性質。

起伏的海浪、悠揚的聲音、炫麗的光線，讓世界顯得多采多姿，而這些都與波動有關連。

6-1 教學理念

說明波速、頻率、波長的基本概念與彼此之間的關係。

6-1 波速、頻率與波長

將一長直繩水平置於地面上，在繩之一端上下抖動一次後，可見到繩上有一凸起處，向前持續傳到末端（圖 6-1）；微風陣陣吹襲海面，海面會出現一道道波浪穩定向前推進，在中國杭州的錢塘江口可觀賞到。當這些波浪從外海進入狹窄的錢塘江後，形成高約 3 公尺、速度約 6 公尺／秒的波浪，且穩定地朝向岸邊行進約數公里長而不消失（圖 6-2）。這種受到外界干擾影響（如擺動、風吹）時，所產生的擾動或凸起的部分，稱為波；而這種擾動或波可向外傳播到他處的現象，稱為波動。

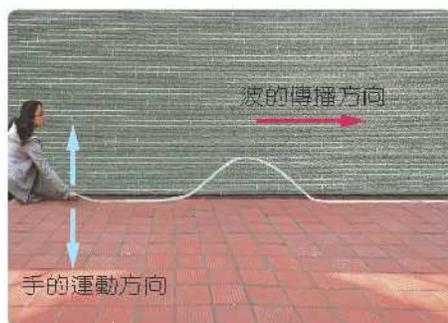


圖 6-1 上下擾動繩子形成繩波

圖 6-2 錢塘江上的波浪穩定地向前行進

就像說話時，我們聲帶的振動會引起空氣的擾動，這個擾動隨即向外傳播，也是一種波動現象，所傳播出去的波，則稱為聲波（圖 6-3）。又如在平靜的水面上投下一顆石頭，水面

會產生凹凸的擾動，這個擾動隨即向四周傳播，也是一種波動現象，所傳播出去的波稱為水波。其中凸起的最高點，稱為波峰，凹陷的最低點，稱為波谷。

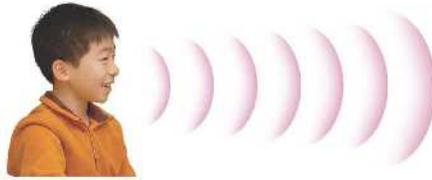


圖 6-3 聲波的示意圖

聲波小實驗、發聲原理

在平靜水面某處的上方，每間隔 0.25 秒就放下一顆小鋼珠，那水面就會每秒產生數個水波依序向外傳播（圖 6-4、圖 6-5）。此種有規律反覆所產生出的波，稱為週期波。其中水平面到波峰或波谷的高度稱為振幅（amplitude）；相鄰兩個波峰或波谷之間的距離，稱為波長（wavelength）；每單位時間所產生的波數，稱為頻率（frequency），單位為 1 / 秒，也稱為赫茲（記為 Hz）。

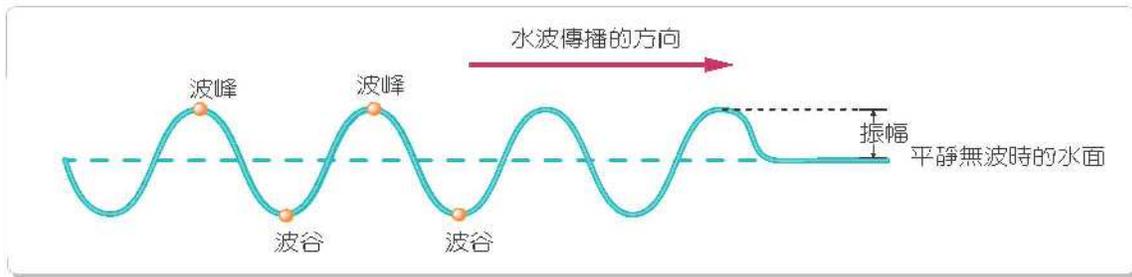


圖 6-4 水波側面圖：水面上所產生連續有規則的水波，為一種週期波。

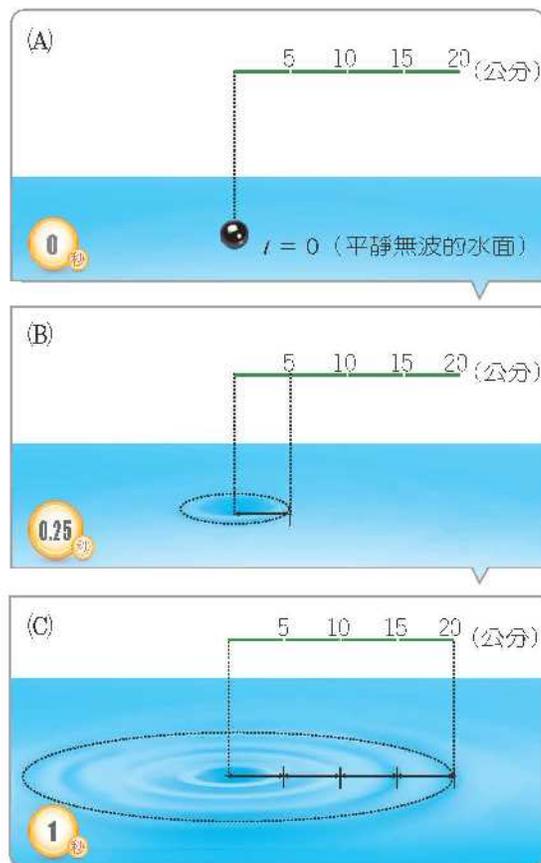


圖 6-5 (A)在平靜的水面投下一顆石頭。(B)水面產生向四周傳播的水波。(C)經 1 秒後水波前進 20 公分。

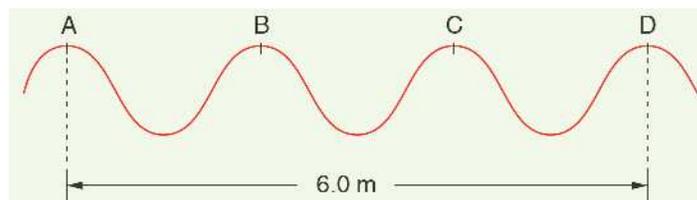
若從波源位置每秒發出 f 個完整波形，而每一個完整波的長度為 λ ，則水波每 1 秒前進距離為 $f\lambda$ ，即週期波傳播的速度或波速 v ，可由波長 λ 與頻率 f 表示為

$$v=f\lambda \quad (6.1)$$

例如每秒產生 4 個水波，波長為 5 公分，則 1 秒後水波前進了 $4 \times 5 = 20$ (公分)，即水波的波速為 20 公分 / 秒 (圖 6-5)。

範例 6-1

下圖所示為繩波在某一瞬間的波形，則：



- (1) 繩波的波長為何？
- (2) 波峰 A 在 1.5 s 之前，處於位置 D，則繩波的波速為何？
- (3) 此繩波的頻率為何？

【相關練習：習題 2】

分析 波長 λ 是相鄰兩波峰之間的距離。

$$\text{波的速度 } v = \frac{\text{波形移動的距離 } \Delta S}{\text{時間 } \Delta t} = \text{頻率 } f \times \text{波長 } \lambda$$

解 (1) $\frac{6.0}{3} = 2.0 \text{ (m)}$

(2) $v = \frac{6.0}{1.5} = 4.0 \text{ (m/s)}$

(3) $4.0 = f \times 2.0 \quad f = 2.0 \text{ (Hz)}$

6-2 教學理念

說明波的反射、折射、干涉與繞射現象，並介紹水波或聲波等簡單的例子，不推導任何數學公式，僅做定性的介紹。

6-2 波的特性

水波槽是研究水波性質的一種有用之簡單裝置(圖 6-6)。當槽中水面靜止時，水波槽正上方的平行光源所發出的光，可穿過水面到達下方的屏幕，而無陰影。當水面產生水波時，凸起的波峰可使光線會聚，在屏幕上呈現明亮的亮帶，凹陷的波谷可使光線發散，在屏幕上呈現陰暗的暗帶。

圖 6-6 水波槽裝置

如果利用起波器有規則的連續不斷輕輕拍打水面，則水面可產生週期性的水波，在屏幕上就會出現明暗相間有規則的條紋。若起波器為小圓球，所呈現的將為明暗相間之同心圓(圖 6-7(A))；若起波器為水平木條，所呈現的則是明暗相間之直線條紋(圖 6-7(B))。

圖 6-7 (A)水波槽中，圓形波呈現明暗相間之同心圓。(B)水波槽中，線形波呈現明暗相間之直線條紋。

反 射 超聲波

以木條垂直拍擊水面一次，水面就會產生一個水波，穩定的向外傳播。若槽中放置有一個障礙物，可觀察到水波遇到障礙物後，行進方向將會發生改變，此現象稱為反射(reflection)(圖 6-8)。若產生連續的週期性水波，反射後水波的波長及頻率都維持相同，不會發生改變。

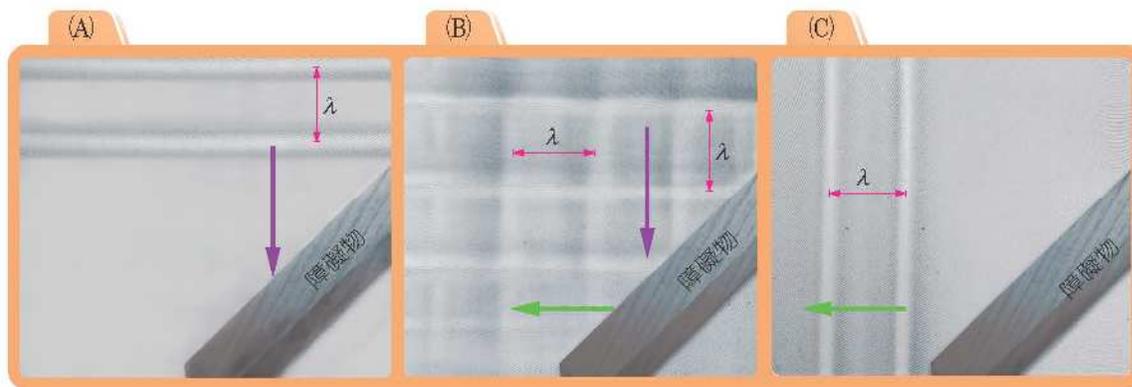


圖 6-8 (A)在水面上產生連續的水波。(B)水波遇障礙物後行進方向發生改變。(C)反射的水波。(→表示水波的

進入方向； \rightarrow 表示水波的反射方向)。

折 射 光的干涉與繞射、波的干涉

水波進入不同深度的區域時，會無法維持原來的前進方向，而會發生偏折，稱為折射 (refraction) (圖 6-9)。圖中可觀察到水波自深水區進入淺水區後，水波波長變短，由於每秒中所產生之水波，不論在何處，既不會消失，也不會停滯不前，換言之，在不同深淺區域中，每秒通過的水波數目仍然固定不變，即折射前後水波頻率恆定。由式 (6.1)，當頻率不變，波長變小時，波速會變小。即在折射進入淺水區後，波速也就會變小。若水波由淺水區進入至深水區，也會發生類似的折射現象，折射入深水區後，波長變長，波速也隨著變大。

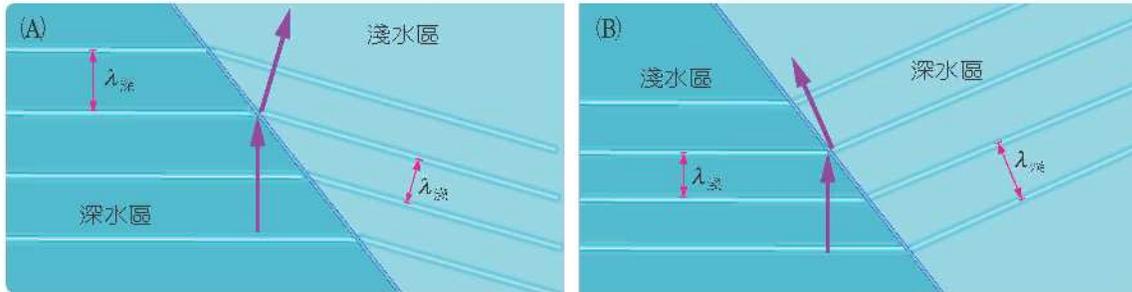


圖 6-9 (A)水波由深水區進入淺水區的示意圖。(B)水波由淺水區進入深水區的示意圖 (\rightarrow 表示水波的行進方向)。

干 涉

在水波槽中，若起波器為兩個靠近，可同時上下振動，且振動頻率相等的小圓球，起動後，產生的兩組圓形波相遇時，可形成很特殊現象，像這樣兩個（或兩個以上）波相遇，造成互相干擾的現象稱為干涉 (interference) (圖 6-10)，干涉時某些位置的振幅會增強、某些位置的振幅會減弱。圖中某些區域的水面沒有凹凸變化，因此屏幕上沒有明暗相間的條紋出現，稱為節線。在兩相鄰節線之間，則有明暗條紋交互出現。

圖 6-10 兩個振動頻率相同的水波，交會時所形成的干涉圖形。無明暗交互出現的區域，稱為節線（以紅色曲線 N 表示）。

註 書末附操作膠片，可供參考。

繞 射

在水波槽實驗中還可發現，當直線形的水波經過障礙物的邊緣時，波會擴散到障礙物後方，這種現象稱為繞射 (diffraction) (圖 6-11)。發生繞射時，波的速率、頻率和波長都保持不變。



圖 6-11 直線形水波遇到障礙物後，可看到波會擴散到障礙物後方，稱為水波之繞射。

線形水波通過隙縫時，由於在隙縫邊緣產生的繞射，會使通過隙縫之後的波形發生改變（圖 6-12(A)）。若以相同的水波波長進入不同寬度的隙縫，可發現隙縫愈小，所產生的繞射現象愈明顯，繞射後水波所涵蓋的區域遠大於隙縫的寬度（圖 6-12(B)）。水波所具有的上述這些反射、折射、干涉及繞射現象，可以具體地代表一般波動的特性。

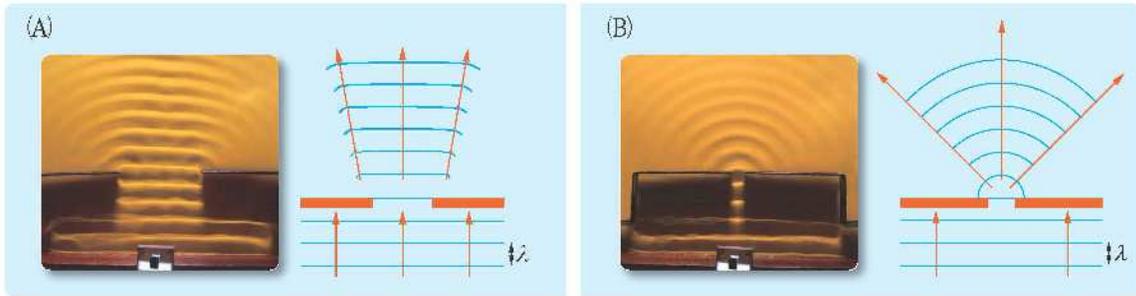
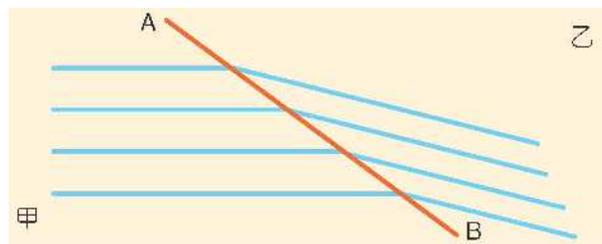


圖 6-12 線形波經過有隙縫的障礙物所產生的繞射現象：(A)通過寬隙縫時發生的繞射。(B)通過窄隙縫時發生的繞射，所涵蓋區域遠大於窄隙縫的寬度。

範例 6-2

右圖所示為水波在兩個不同深度區域中傳播的部分波形， AB 為不同深度的界線，可知 (A)乙為淺水區，波速較快 (B)乙為淺水區，波速較慢 (C)乙為深水區，波速較快 (D)乙為深水區，波速較慢。 【相關練習：習題 4.】



分析 淺水區的波速較慢，深水區的波速較快。

解 折射時，頻率不變。乙區波長較小，故知乙區速度較慢，為淺水區，選(B)。

6-3 教學理念

僅定性的利用聲波介紹都卜勒效應。

6-3 都卜勒效應

當鳴著笛聲的消防車呼嘯而來時，除了笛聲的音量變大之外，笛聲的音調也較遠離時尖銳！觀察發現，當車子靠近人時，人所聽到的笛聲頻率會高於車子靜止時所發出的笛聲頻率；當車子遠離人時，頻率則變低。這種因為聲源（車子）與接收者（人）之間的相對運動，造成接收者所接收到的頻率，與聲源靜止時所發出的聲音頻率不同的現象，稱為都卜勒效應（Doppler effect）。

每當聲源（如圖 6-13 喇叭內的振動膜片）來回振動一次，造成膜片向右推動時，便會擠壓附近的空氣分子，使分子間距離變小，形成密部區；而當膜片向左收縮時，附近空氣分子的活動空間變大，而會形成疏部區。因此若聲源反覆週期性地振動，就可使空氣分子形成

連續有規則的疏密相間形式，而形成聲波，或稱為疏密波。而相鄰兩密部間之距離，稱為波長。由於聲波中空氣分子的振動方向與波前進方向平行，亦稱為縱波。

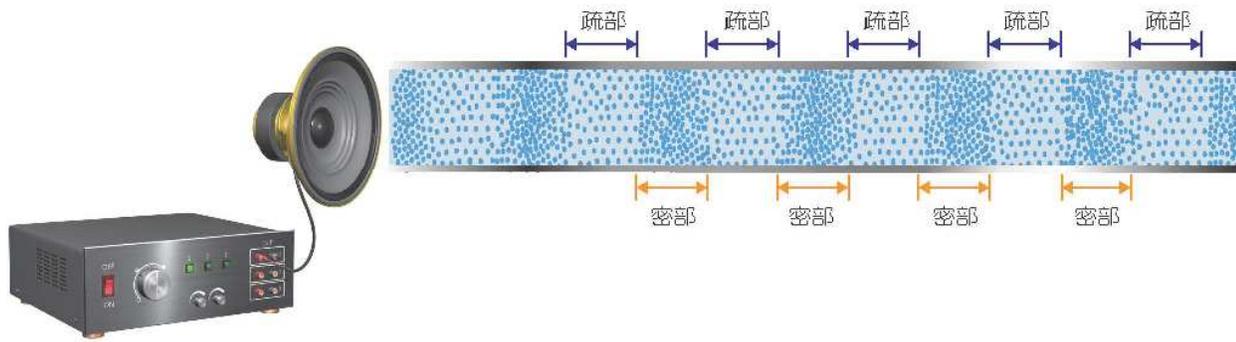


圖 6-13 若聲源反覆週期性振動，會使空氣分子形成連續的疏密分布。

音叉的波形

振動頻率固定的聲源，所發出聲波的波長也就固定。若聲源在空氣中向四處傳播，則所產生的各個密部將出現在以聲源為球心的同心圓上。如圖 6-14，當聲源靜止時，所發出聲音的密部位置可以同心球面 A、B、C、D 來表示。兩個靜止的聆聽者甲、乙，與聲源的距離雖不同，但會接收到相同波長的聲音，由關係式 $v=f\lambda$ [式 (6.1)]，若聲速維持不變，聲波波長相同，即代表甲、乙兩人會接受到相同頻率的聲音。也就是當聲源和觀測者相對靜止時，在任何位置的觀測者所接收到的聲音頻率，都等於聲源所發出的頻率。



圖 6-14 鋼琴演奏時，坐在不同位置的聽眾會聽到相同的演奏音調，這是因聲源靜止時，甲、乙聆聽到的聲波波長（圖中以 λ 表示），皆等於聲源發出的聲波波長；也表示甲、乙聆聽到的聲波頻率，等於聲源發出的聲波頻率。

當聲源移動，觀測者靜止時，由於聲源位置不固定，所產生聲波的密部不再是出現在固定圓心的同心球面上。如圖 6-15，等速移動的消防車所發出聲波的密部：A、B、C、D，是以聲源分別在 O_1 、 O_2 、 O_3 、 O_4 位置時發出聲波的密部。由於聲源靠近聽者甲，他所接收到的聲波波長變短，或頻率變高。另一方面，由於聲源遠離聽者乙，他所接收到的聲波波長變長，或頻率變低。換言之，當聲源靠近觀測者時，所接收到的聲波頻率會高於聲源靜止時的頻率。反之，當聲源遠離觀測者時，所接收到的聲波頻率會低於聲源靜止時的頻率。

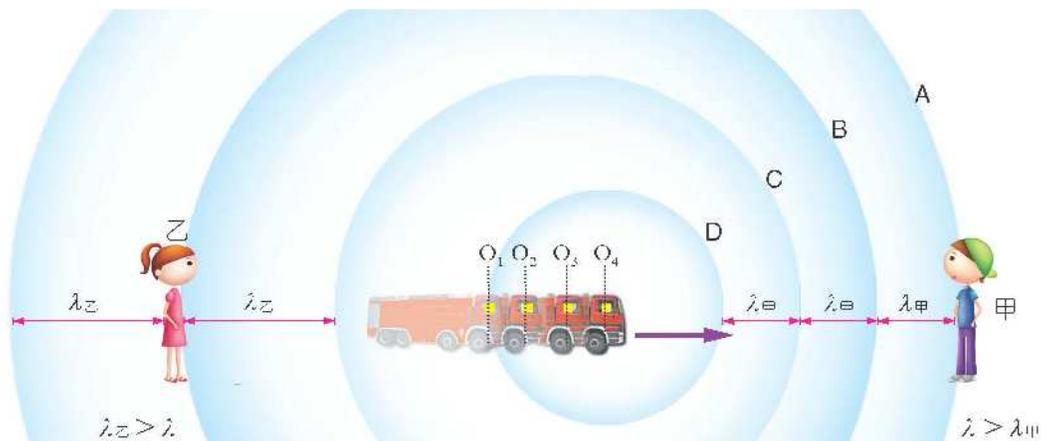


圖 6-15 聲源等速度移動時，甲測量到的聲波波長 ($\lambda_{甲}$) 較聲源發出的聲波波長 (λ) 短，所以甲聽到的聲波頻率高於聲源發出的頻率。乙測得的聲波波長 ($\lambda_{乙}$) 變長，所以聽到的聲波頻率低於聲源發出的頻率。

都卜勒

音爆 VS 震波

當聲源和觀測者都靜止時，觀測者所接收到聲音的頻率等於聲源發出聲音的頻率。而當觀測者向聲源靠近時，將會額外多接收到一些波數。例如圖 6-16(A)，1 秒內通過靜止觀測者 O_1 的聲波數為 n ，當她向聲源靠近時，假設她每秒前進的距離是波長的 2 倍，則 1 秒內通過她的聲波數增加了 2，成為 $n+2$ (圖 6-16(B))。即當觀測者靠近聲源時，所聽到的聲波頻率會高於聲源發出聲音的頻率。反之，當觀測者遠離聲源時，所聽到的聲波頻率會低於聲源發出聲音的頻率。

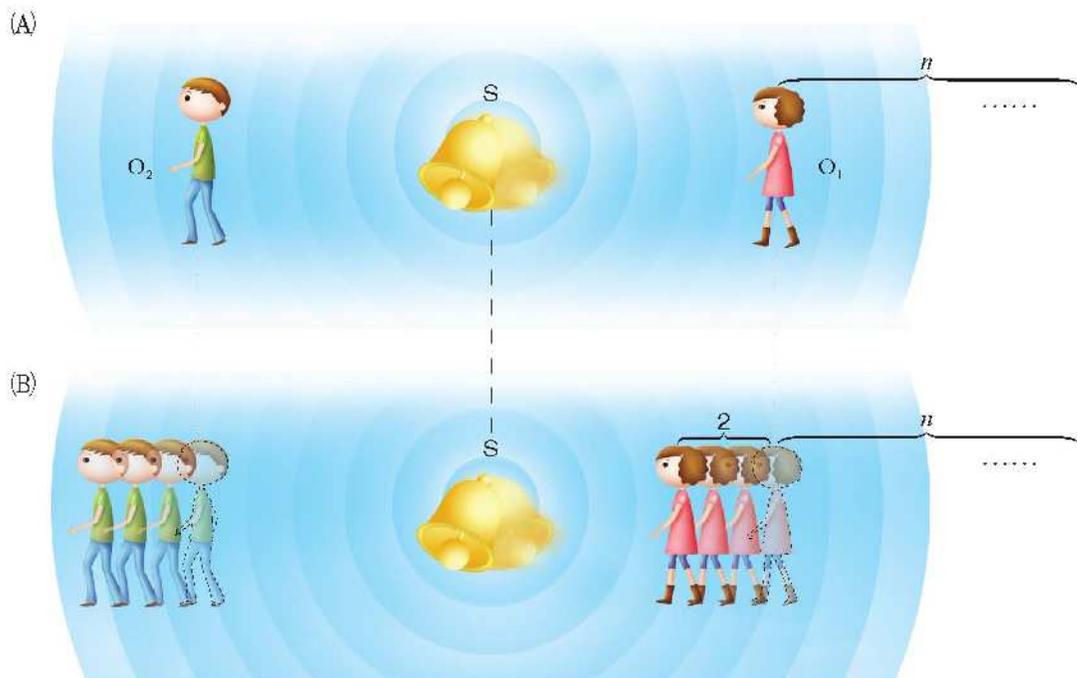


圖 6-16 (A)當觀測者靜止時，1 秒內通過觀測者 O_1 及觀測者 O_2 的聲波數，都等於聲源發出聲音的頻率 n 。(B)當觀測者靠近或遠離靜止的聲源時，所接收到的頻率與聲源發出聲音的頻率 n 不同。

綜合以上幾種情況可知，當聲源與觀測者有相對運動時，觀測者所接收到的聲音頻率，與聲源發出的頻率並不相同。當聲源與觀測者相對靠近時，觀測者接收到的聲音頻率，會高

於聲源發出的頻率；當聲源與觀測者相對遠離時，觀測者接收到的聲音頻率，會低於聲源發出的頻率（表 6-1）。事實上，所有的波動都具有都卜勒效應，都卜勒效應也可以說是波動的一種特性。

表 6-1 都卜勒效應

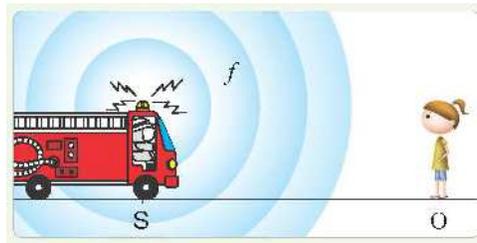
聲 源	觀測者	接收到的頻率
靜 止	靜 止	不 變
靠近觀測者	靜 止	變 高
遠離觀測者	靜 止	變 低
靜 止	靠近聲源	變 高
靜 止	遠離聲源	變 低

範例 6-3

如右圖，位在 S 點的消防車靜止時，發出頻率為 f 的笛音，在下列哪些情況下，位在 O 點的小美，聽到的笛音會較 f 為低？

- (A) 小美和消防車都靜止時
- (B) 小美靜止，消防車向右運動
- (C) 小美靜止，消防車向左運動
- (D) 消防車靜止，小美向右運動
- (E) 消防車靜止，小美向左運動。

【相關練習：習題 7.】



分析 都卜勒效應：當聲源與觀測者相對遠離時，觀測者所接收到的笛音頻率會低於聲源靜止時發出的頻率。

- 解**
- (A) 小美和消防車都靜止時，小美聽到的笛音頻率不變。
 - (B) 小美靜止，消防車向右運動，靠近觀測者，故她聽到的笛音頻率變高。
 - (C) 小美靜止，消防車向左運動，遠離觀測者，故她聽到的笛音頻率變低。
 - (D) 消防車靜止，小美向右運動，遠離聲源，故她聽到的笛音頻率變低。
 - (E) 消防車靜止，小美向左運動，靠近聲源，故她聽到的笛音頻率變高。
- 故選(C)(D)

6-4 教學理念

介紹歷史上關於光的兩個主要理論：微粒說與波動說。並介紹光的反射、折射、干涉、繞射現象及楊氏雙狹縫干涉實驗，不推導任何數學公式。

6-4 光

一、光的微粒說與波動說

沒有光，世界一片黑暗。透過光我們的視覺才能發揮功能，也才得以認識及體會周遭的人物與環境。自然界中由於光所產生的現象很多，像彩虹、日蝕等，人們很早對光的現象就產生高度興趣，並進行許多研究。到了牛頓時，他開始思考光的本質，並從自己所建立的力學觀點出發，發表了光的微粒說（*corpuscular theory*），認為光是由微小粒子組成，且遵守力學定律，由此可解釋光的直線傳播，並推導出光的反射與折射定律。同時也預測了光在介質中（如水或玻璃等）的光速比在空氣中快。但是惠更斯（*Christiaan Huygens*, 1629 ~ 1695，荷蘭人）因為察覺兩束光線可以互不干擾地交錯傳播，但粒子流動卻無法避免互相干擾，而反對光的微粒觀點，並首先提出了光的「波動說」，認為光是在介質中傳遞的一個擾動或波。他的理論可以解釋光的反射與折射現象，但他還不知道光的週期性，也沒有頻率與波長的概念。

光微粒理論受到最嚴格的挑戰是來自於科學家楊氏（*Thomas Young*, 1773 ~ 1829，英國人）（圖 6-17）。1802 年，他有名的雙狹縫干涉（兩個光波疊加時的現象）實驗，更清晰地揭露了光的波動性。

圖 6-17 光的干涉學說之創始者 —— 楊氏

到了二十世紀初，由於電磁波理論並無法解釋光電效應的一些結果，愛因斯坦乃提出光也具有粒子性的概念，他認為電磁波是由許多具有特定能量的「光子」組成，具有粒子性，而得以圓滿解釋光電效應（在第 8 章會有詳盡的介紹）。今天，我們認為光有時呈現波動性，有時呈現粒子性，需要視光與周遭所處狀況來決定其性質。光的粒子性與波動性須交互使用，才能完整地描述光的現象。

二、光的反射與折射現象 光的折射反射與全反射

反射定律 圓形水盤的折射及反射現象

光與水波相似，它可在均勻介質中直線前進，若遇到其他不同介質時，會在兩介質的界面上發生反射。例如將平面鏡貼於光盤中心的壓克力板上，取強光源將光束射向平面鏡中央（圖 6-18），從光盤上可讀取入射角與反射角。若改變入射角，測量反射角的變化，可知光發生反射時遵守以下規則，並稱為反射定律：

圖 6-18 反射定律實驗

圓形刻度盤的反射現象

1. 入射線、反射線位於與界面垂直的直線（法線）兩側，且三線在同一平面上。
2. 入射角等於反射角。

其中入射角是入射線與法線的夾角（圖 6-19 中角 A），反射角則為反射線與法線的夾角（圖 6-19 中角 B）。

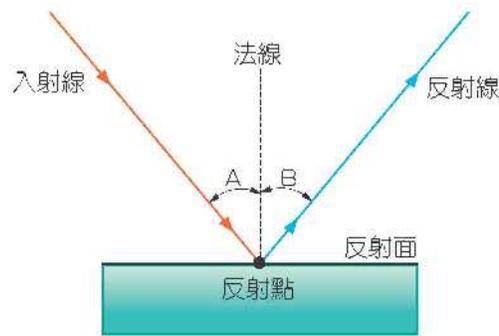


圖 6-19 入射線、反射線及法線的相關位置圖。

單向反射、漫射

鏡面反射與漫反射

平行光射向平面鏡時，反射光會反射到一特定方向上，這種平滑面的反射稱為**鏡面反射** (specular reflection)，鏡子、玻璃及平滑的表面都會產生鏡面反射，其成像是清晰的。如圖 6-20(A)，平靜無波的水面很平滑，燈泡經水面鏡面反射呈現清晰的倒影，如圖 6-20(B)。但當水面有波浪不平整時，則燈泡的倒影不規則，無法呈現原有形狀，如圖 6-20(D)。像這種平行光入射到不規則表面使反射光線反射至不同角度，或者說任意方向上都有反射光線 (圖 6-20(C))，稱此種反射為**漫反射** (diffuse reflection)。大部分物體的表面都不夠平滑，所以對入射光線的反射都屬於漫反射，如牆壁、教室的黑板、衣服等，由於漫反射的光線會散布在各方向，因此雖然物體本身不發光，卻如同發光體一般向四面八方射出光線，因此在任意方向都可以看到物體。

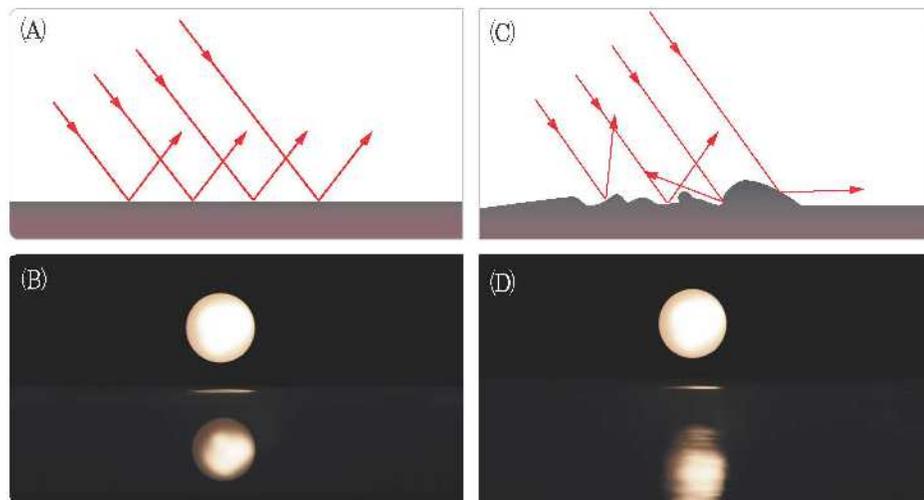


圖 6-20 (A)為鏡面反射，如(B)中燈泡在平靜水面的倒影清晰；(C)為漫反射，如(D)中水面起伏不平，由遠至近皆有燈泡的部分光線反射至觀察者眼中，故看起來為長條狀光影。

平面鏡成像

我們幾乎每天都會照鏡子 (圖 6-21)，平面鏡成像具備哪些性質呢？



圖 6-21 平面鏡的成像

圖 6-22 中一平面鏡鉛直放置，若光自 S 點向四面八方射出（ S 點可能是個點光源，也可以是光經物體上某處漫射後），反射後的光線無論從何處觀察，有如從 S' 點發出。故觀察者在鏡前任意位置，彷彿都感覺到有一固定位置的點光源位於 S' 。若進一步利用幾何關係，可得到下列結果：

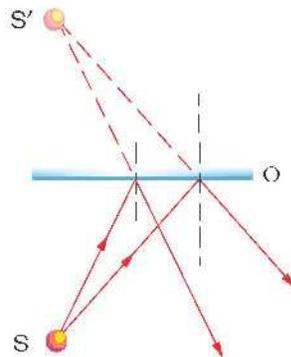


圖 6-22 平面鏡成像光路徑圖

1. 像與原物體大小相等。
2. 像與原物體相較上下不顛倒。
3. 像到鏡面的距離，等於物到鏡面的距離。

像由實際光線的反向延伸決定位置，成像位置在鏡後，光線實際上並未通過像的位置，光線也未實際自像射出，此種像稱為虛像。

當兩面平面鏡垂直放置時（圖 6-23），最多可同時看到三個像，兩側的像為一次反射所造成（圖 6-23(B)中的甲、丙），而中間的像則為光線經兩次反射所造成（圖 6-23(B)中的乙）。

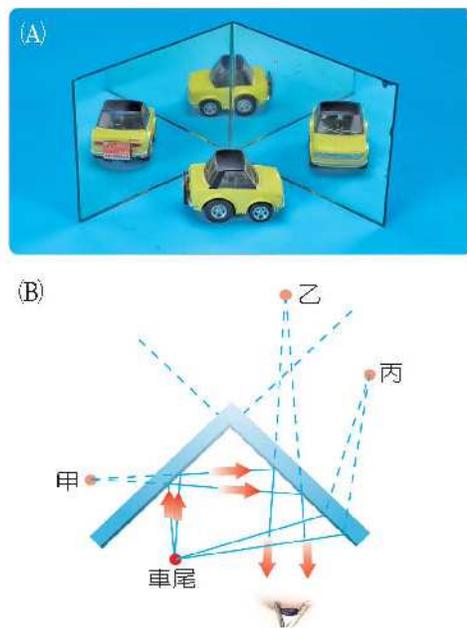


圖 6-23 物體在兩面鏡子中的成像

光反射的應用 用水做的光纖

除了平面鏡之外，曲面鏡對光的反射之應用也很廣泛。在叉路或彎路的轉角，常可看到如圖 6-24 的設置，這是利用大型凸面鏡的反射，得以看到比平面鏡反射時大的視野，但看到的影像將比原來實物小。化妝時所用的化妝鏡具有放大臉部影像的功能，則是使用凹面鏡裝置（圖 6-25）。

探照燈、汽車前燈的反射板則都是拋物面鏡，將燈泡置於拋物面的焦點，此時焦點所發出的光線射向鏡面反射後，會平行射出，而可照射至遠處，達到照明目的（圖 6-26）。

凹面鏡像的變化



圖 6-24 馬路轉角的凸面鏡

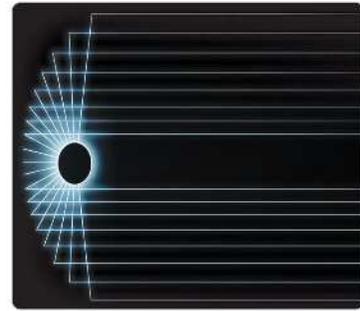


圖 6-26 拋物面鏡的反射，光源置於焦點上，反射光線會平行射出，不易分散。

圖 6-25 具有放大功能的化妝鏡

折射現象 光的折射之生活實例

光從一介質進入到另一介質時，在交界面會有部分反射及部分穿透。也就是說有部分的光可進入第二介質，在進入第二介質後，光的行進方向會偏離原入射方向，這種現象稱為光的折射（圖 6-28）。觀察折射現象可得知入射線、折射線、法線及反射線皆會位於同一平面

上（此平面稱入射面），其中折射线與法線之夾角稱為折射线角（圖 6-29）。

圖 6-27 光從水中進入空氣時，在水面同時發生部分反射及部分折射线。

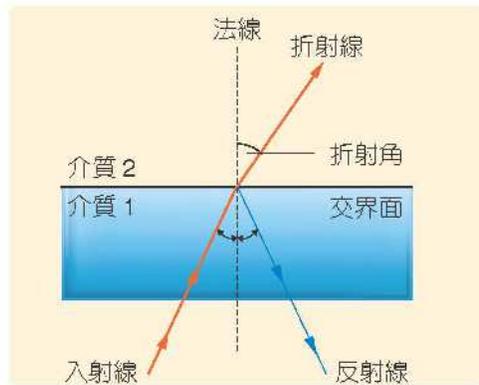


圖 6-28 光的入射線、法線、折射线和反射線皆在同一平面上。

光從介質射向空氣、光從液體射出空氣

由於折射线後造成光的前進方向改變，會使得觀察者誤認物體的實際位置。插入水中的吸管看起來會向上彎折（圖 6-29）；清澈小河看起來會較實際深度為淺；從水面上看魚，眼睛所見魚的位置會比實際魚的位置上升一些。所以若想用魚叉叉魚，就不能對著眼睛所見到魚的位置叉去！

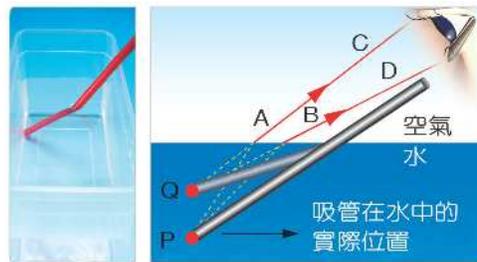


圖 6-29 插入水中的吸管看起來有彎折，是由於光的折射线所致。

光從空氣射入液體

圖 6-29 光的入射線、法線、折射线和反射線皆在同一平面上。夕陽西下彷彿仍看到太陽在地平線上，其實太陽的實際位置早已落至地平線以下了，這是因為大氣層對太陽光的折射线所造成的（圖 6-30）。

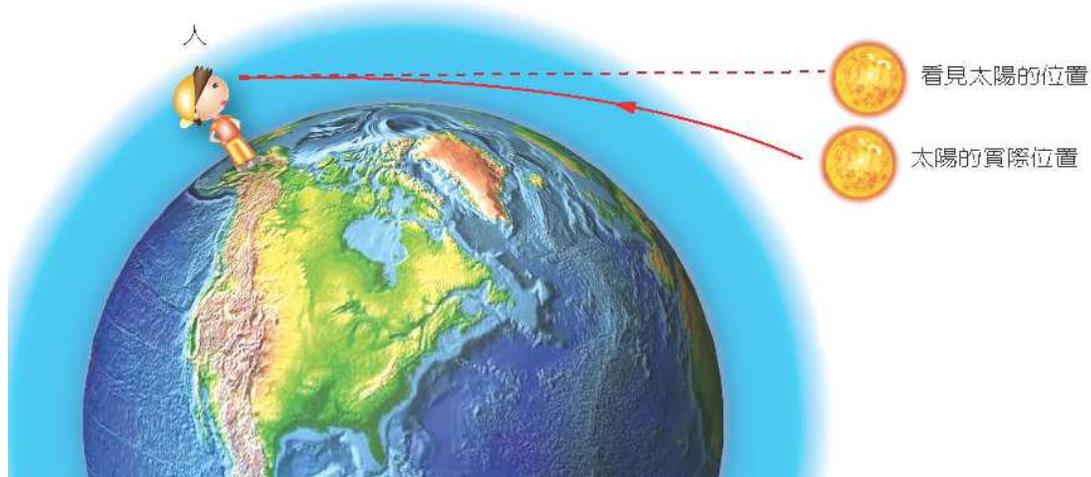
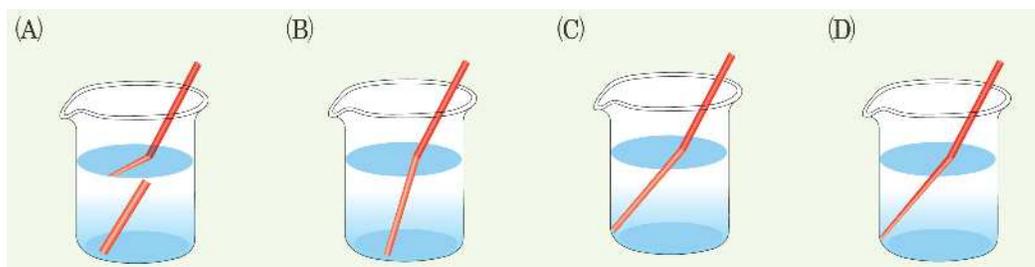


圖 6-30 由於大氣層的折射，夕陽的實際位置會比看到的高度低。

範例 6-4

將粗細均勻的紅色吸管插入盛水之圓形透明玻璃杯內。當人眼由杯外略高於水面的位置，透過水面與杯子側面觀看水中的吸管時，吸管看似折斷，粗細也不均勻。若以淺紅色線段代表看到的水中吸管，則下列哪一個圖是人眼所看到的景象？【相關練習：習題 12.】



- 分析
1. 水平面的折射使物體看起來深度變淺。
 2. 凸面的折射使物體變粗變大。

解 實際景像如右圖，從水面上看下去，吸管看起來的深度比實際淺，所以影像向上偏折，而從側面看時，杯中水有如凸透鏡，看起來吸管變粗了，故選(A)。



三、光的干涉與繞射

當白光照射一不透明物，其上有兩條平行的直線縫口，則在物體後方之屏幕上，一如日常所經驗的，可看到兩道平行的白光（圖 6-31(A)）。但當每條直縫寬度愈來愈細，且兩條直縫間距愈來愈靠近時，可看到非常特殊明暗相間的條紋、或帶狀圖案（圖 6-31(B)）。此種在光通過兩個細縫，於後方屏幕所造成明暗相間條紋的現象，稱為光的干涉。

若不透明物上有一條寬直縫，讓藍光照射此物，在後方屏幕上中央，可看到一道寬的藍光（圖 6-32(A)）。但當直線寬度愈來愈細時，屏幕中央的藍色光帶也會隨之變窄，且兩側會出現很多條明暗相間的條紋，感覺藍光可向外擴散到兩側（圖 6-32(B)）。就像水波經過障礙物的邊緣時，波形會擴散到障礙物後方一樣。此種在光通過一條細縫後，所造成的明暗相間條紋的現象，稱為光的繞射。

干涉圖案所呈現的是均勻且明暗相間條紋，繞射圖案則是中間亮帶特別的寬。無論是雙狹縫的干涉現象，或是單狹縫的繞射現象，都無法以光的粒子說來解釋，而必須以光的波動

性質才能夠解釋。這兩個現象是支持光波動理論的有力證據。

圖 6-31 (A)以白光照向有兩條平行縫口之不透明物，後方屏幕上顯示之圖案並無干涉現象發生。(B)隙縫變細、且隙縫間距變小後，屏幕上所顯示的干涉圖案。

圖 6-32 (A)以藍光照向有一條寬直縫之不透明物，後方屏幕上的圖案沒有繞射現象發生。(B)直縫寬度變細後，在屏幕上所顯示的繞射圖案。圖中中央亮紋強度相較其他條紋強很多，以致底片該處曝光過度呈白亮顏色，實際仍為藍色。

示範實驗 楊氏雙狹縫干涉

1. 如圖 6-33 所示，將雷射筆對準雙狹縫（見書末所附操作膠片），在學生可以清楚看見的距離處放置屏幕。
2. 打開雷射筆，觀察屏幕上產生條紋的圖樣。

圖 6-33 雙狹縫的實驗裝置示意圖

6-5 教學理念

簡要說明電場、磁場之交互感應，所以電磁場可以在空間中傳播。利用馬克士威方程式可計算出電磁波在真空中傳播的速度，認知到光即是電磁波。並介紹電磁波譜及在日常生活中的應用。

6-5 電磁波

靜止的電荷在空間中產生穩定的電場，穩定的電流在空間中產生穩定的磁場，另一方面，電磁感應則說明了，隨時間變化的磁場亦可產生電場，接著馬克士威基於方程式數學對稱性的考量，進一步推論得隨時間變化的電場可產生磁場，如此交互感應所產生的電場、磁場可在空間中作規則性的變化向外傳播出去，而形成電磁波（圖 6-34）。馬克士威並計算出電磁波在真空中的傳播速率為 3×10^8 公尺 / 秒，而此值正是當時所量測到光在真空中傳播的速率，因而可推論光波是一種電磁波。

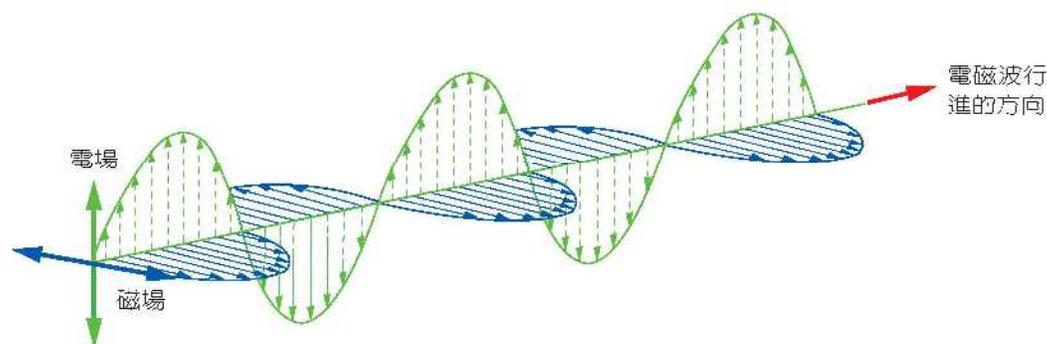


圖 6-34 電磁波的傳播

物理學家赫茲（Heinrich Rudolph Hertz, 1857 ~ 1894，德國人）於 1888 年在實驗室以

簡單的電荷裝置發射出電磁波。1901 年馬可尼 (Guglielmo Marconi, 1874 ~ 1937, 義大利人) 成功的傳送無線電報, 開啟無線通訊的時代。

除了可見光之外, 還有許多其他形式的電磁波存在, 電磁波的頻率範圍很廣。各種電磁波的頻率或真空中的波長之分布, 稱為電磁波譜 (electromagnetic spectrum) (圖 6-35)。以下按電磁波頻率的範圍由低至高, 介紹在不同波段時的名稱及其在日常生活中的應用。

圖 6-35 各種不同頻率的電磁波之分布圖

1. 無線電波 (radio wave): 主要應用於無線電視、無線廣播、無線電通訊、雷達、行動電話的訊號傳播。
2. 微波 (microwave): 衛星通訊、家用微波爐。
3. 紅外線 (infrared ray): 家用電器用品遙控器、物理治療、紅外線觀測與攝影。
4. 可見光 (visible light): 刺激人類產生視覺。
5. 紫外線 (ultraviolet ray): 紫外線可用來殺菌消毒。太陽輻射有很多紫外線, 而過量的紫外線對人體有害。
6. X 射線 (X-ray): 可穿透肌肉, 常用來作為醫學上診斷牙齒、骨骼的工具, 另外也常用於晶體結構的研究。
7. γ 射線 (gamma ray): 具有極高的穿透力, 常用於醫學治療上。

要點整理

重要概念

- 波 動: 擾動或波可向外傳播到他處的現象。
- 振幅、波長與頻率: 在水波中水平面到波峰或波谷的高度稱為振幅; 相鄰兩個波峰或波谷之間的距離, 稱為波長; 每單位時間內產生的波數, 稱為頻率。
- 波的反射: 波遇到障礙物後, 行進方向將會發生改變, 此現象稱為反射。若產生連續的週期性水波, 反射後水波的波長及頻率都和入射波相同。
- 波的折射: 水波進入不同深度的區域時, 會無法維持原來的前進方向, 而發生偏折, 稱為折射。
- 干 涉: 兩個振動頻率相同的小圓球起波器, 產生兩組圓形水波, 當此兩組水波相遇時, 所產生清晰的亮帶暗帶區域現象, 稱為干涉。
- 繞 射: 直線形的水波經過障礙物的邊緣時, 波會擴散到障礙物後方, 這種現象稱為繞射。

基本原理

- 光的反射定律
 - (1) 入射線、反射線位於法線兩側, 且三線在同一平面上。
 - (2) 入射角等於反射角。
- 都卜勒效應: 當聲源與觀測者相對靠近時, 觀測者接收到的聲音頻率, 會高於聲源發出的頻率; 當聲源與觀測者相對遠離時, 觀測者接收到的聲音頻率, 會低於聲源發出的頻率。

分析應用

- 平面鏡的成像

- (1) 像與原物體大小相等。
- (2) 像與原物體相較上下不顛倒。
- (3) 像到鏡面的距離，等於物到鏡面的距離。

■凹、凸面鏡的成像：利用凸面鏡反射得以看到比平面鏡反射時更大的視野，影像將比原來實物小；具有放大臉部影像的是凹面鏡。

■光的干涉與繞射：光是一種波動，在雙狹縫或單狹縫後方可擴展到很大的範圍，而非只局限在狹縫後的狹小區域。

■電磁波：電磁波在真空中的傳播速率為 3×10^8 公尺 / 秒。其頻率範圍由低至高：無線電波、微波、紅外線、可見光、紫外線、X 射線、 γ 射線。

名詞術語

波動、水波、振幅、波長、頻率、波速、反射、折射、干涉、繞射、都卜勒效應、光的粒子說、波動說、反射定律、漫射、全反射、電磁波

迷思概念辨析



概念錯誤

都卜勒效應和波源與觀測者之間的距離有關。

漫反射不遵守反射定律。

光由於有反射與折射現象，所以是一種波。

電磁波需要靠介質傳播，無法在真空中傳播。



概念正確

都卜勒效應和波源與觀測者之間的相對速度有關，和距離無關。

所有的光線皆遵守反射定律。

光由於呈現出所有的波動性質，包含干涉與繞射現象，所以是一種波。

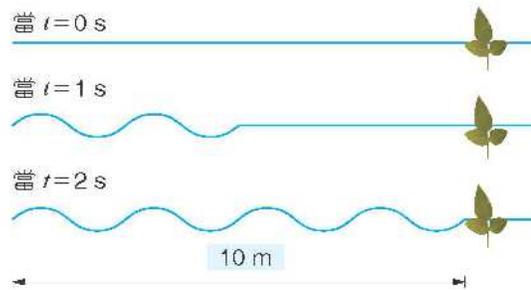
電磁波為電場、磁場在空間中作規則性的變化，不需要靠介質傳播，在真空中也能傳播。

習題

6-1 波速、頻率與波長

- () 1. 在水中產生頻率 0.5 赫茲的水波時，其波長為 4 公尺。當頻率增為 2 赫茲時，則波長變為若干？
(A) 1 公尺 (B) 2 公尺 (C) 4 公尺 (D) 8 公尺 (E) 16 公尺。
- () 2. 把一塊石頭投進池塘裡，1 s 內產生兩個完整的波。如果水波 2 s 後傳到 10 m 外

樹葉的位置，此水波的週期、速率及波長各為何？

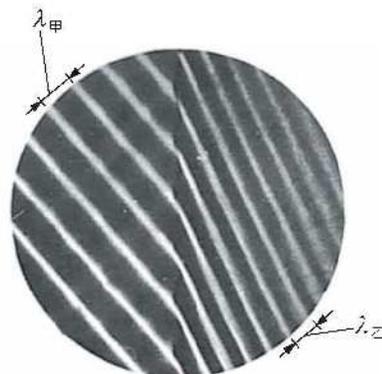


選項	週期 (s)	速率 (m/s)	波長 (m)
(A)	0.5	10	5
(B)	0.5	5	2.5
(C)	1	5	5
(D)	1	10	10
(E)	2	5	10

- () 3. 岸上教練對潛入水中的學生大聲下達指令，在聲波由空氣傳入水中的過程中，下列有關聲波性質的敘述，何者正確？
- (A) 聲波的強度在水中較空氣中強
 (B) 聲波的頻率在水中與空氣中相同
 (C) 聲波的速率在水中較空氣中小
 (D) 聲波的波長在水中與空氣中相同
 (E) 聲波前進的方向在水中與空氣中相同。
- 【101.學測】

6-2 波的特性

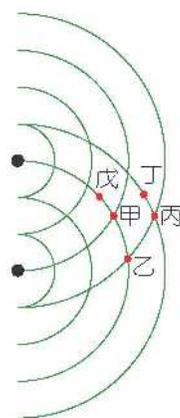
- () 4. 如右圖，水波由甲區進入乙區時，若波長分別為 $\lambda_{\text{甲}}$ 及 $\lambda_{\text{乙}}$ ，頻率為 $f_{\text{甲}}$ 及 $f_{\text{乙}}$ ，且 $\lambda_{\text{甲}} > \lambda_{\text{乙}}$ ，則 $f_{\text{甲}}$ 與 $f_{\text{乙}}$ 之大小關係為何？何區為深水區？



選項	$f_{\text{甲}}$ 與 $f_{\text{乙}}$ 之大小關係	深水區
(A)	$f_{\text{甲}} > f_{\text{乙}}$	甲
(B)	$f_{\text{甲}} > f_{\text{乙}}$	乙
(C)	$f_{\text{甲}} < f_{\text{乙}}$	甲
(D)	$f_{\text{甲}} = f_{\text{乙}}$	乙
(E)	$f_{\text{甲}} = f_{\text{乙}}$	甲

- () 5. 兩波源發出相同頻率、相同振幅，同時向上或向下振動的水波，使其產生干涉現象。右圖弧線所示為某瞬間兩波的波峰，則甲、乙、丙、丁、戊各點中，振幅比單一水波小的有幾個？

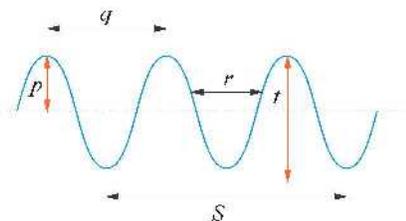
(A) 5 (B) 4 (C) 3 (D) 2 (E) 1。



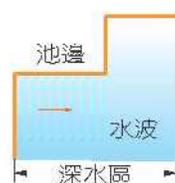
6. 某泳池內設有「波浪機」，這部機器在泳池一端的深水區製造直線波，直線波從深水區傳播到另一端的淺水區。

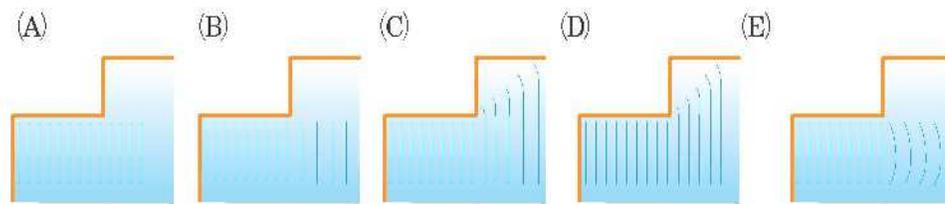
() (1) 右圖顯示了水波的一部分，哪段代表振幅？

(A) p (B) q (C) r (D) s (E) t 。



() (2) 在深水區內有一轉角，右圖所示為水波傳播到轉角時的俯視圖，水波經過轉角後的情形可能為下列何者？





- () (3) 若波浪機每分鐘製造 30 個水波，深水區中波速為 1.25 公尺 / 秒，則下列何者可能為淺水區中波浪的頻率及波長？

選項	頻率 (赫茲)	波長 (公尺)
(A)	30	0.02
(B)	30	0.03
(C)	0.5	2.5
(D)	0.5	2.0
(E)	0.5	3.0

6-3 都卜勒效應

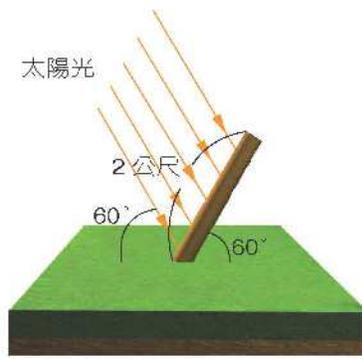
- () 7. 如右圖，向前急駛的消防車發出頻率為 f 的笛音，位在不同位置的甲、乙兩人，聽見的笛音頻率分別為 $f_{甲}$ 及 $f_{乙}$ ，下列何者正確？
 (A) $f_{甲} > f_{乙} > f$ (B) $f_{乙} > f > f_{甲}$ (C) $f_{甲} > f > f_{乙}$ (D) $f_{乙} > f_{甲} > f$
 (E) $f_{甲} = f_{乙} = f$ 。



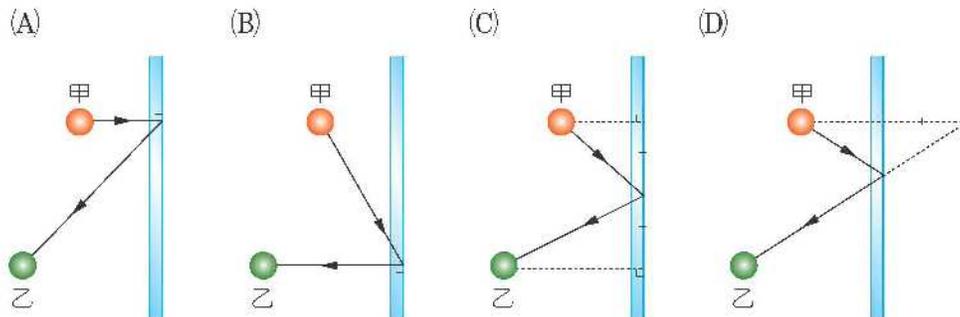
- () 8. (甲)反射；(乙)折射；(丙)干涉；(丁)繞射；(戊)都卜勒效應。以上有幾項為波動具有的共同特性？
 (A) 1 (B) 2 (C) 3 (D) 4 (E) 5。

6-4 光

- () 9. 水平地面上有一根長 2 公尺之木棒，與地面呈 60° 斜插於地上，如右圖所示。若此時陽光與地面呈 60° 入射，則該木棒在地面上的影長為多少？
 (A) 2 公尺 (B) $2\sqrt{2}$ 公尺 (C) $2\sqrt{3}$ 公尺 (D) 3 公尺 (E) 4 公尺。

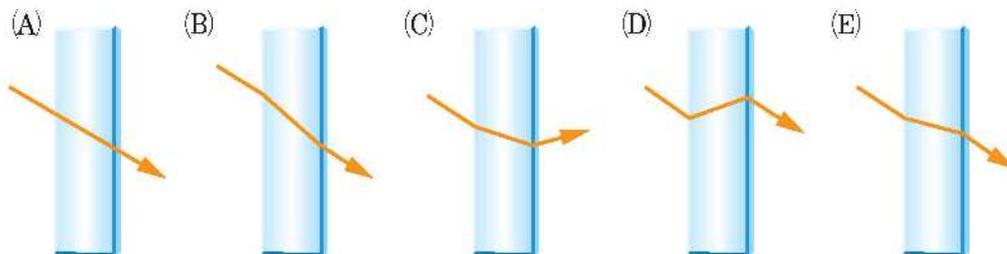


- () 10. 右圖中，入射光線經過甲點，再經平面鏡反射後，經過乙點，下列何者為光的路徑圖？



(E) 以上皆有可能。

- () 11. 一束可見光在空氣中由左向右通過一片實心平行玻璃板，可能的光徑為何？



- () 12. 游泳戲水是炎夏消暑的良方之一，但因無法準確判斷水深，有時會導致溺水事件。若站在戶外游泳池旁估計池水的深度，總會覺得池水比實際深度淺。此一錯覺主要源自於下列哪一項原因？

- (A) 陽光進入水中的折射現象
(B) 池底的反射光在水面的折射現象
(C) 目光在水面的反射現象

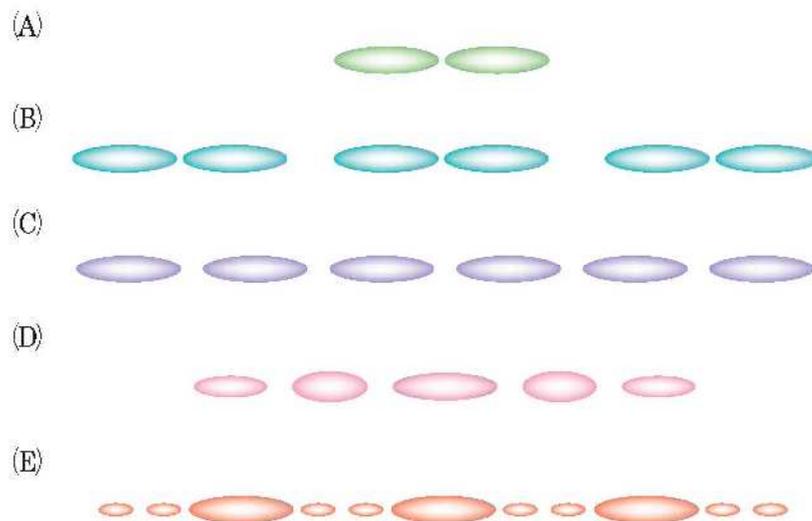
(D)陽光在水面的反射現象

(E)池底的反射光在水面的反射現象。

- () 13. 在河邊用雷射光筆照射魚及用魚叉叉魚時，應分別瞄準何處？

選項	雷射光筆照魚	魚叉叉魚
(A)	魚所在位置	魚所在位置
(B)	魚所在位置	魚的上方
(C)	魚所在位置	魚的下方
(D)	魚的上方	魚所在位置
(E)	魚的下方	魚所在位置

- () 14. 以雷射光照射雙狹縫時，何者為在狹縫後方的屏幕上呈現之圖案？



6-5 電磁波

- () 15. 下列敘述何者正確？（應選兩項）

(A) α 粒子是一種電磁波

(B)電磁波在所有介質的傳播速率均為 3×10^8 m/s

(C)紅外線為不可見光，所以不是電磁波

(D) γ 射線是電磁波中，頻率最大

(E) β 粒子帶負電。

- () 16. 下列電磁波的頻率大小順序，何者正確？（應選三項）

(A) γ 射線 > 微波 (B) 紫外線 > X 射線 (C) 紫光 > 紫外線

(D) 紅光 > 紅外線 (E) 可見光 > 無線電波。