

2-1

聲波的傳播

學習概念

1 聲波的本質 (配合課本 p.61)

1. 聲波產生條件：

(1) 波源的振動。(2) 介質傳送聲波能量。

2. 聲波的基本性質：

(1) 聲波是一種力學波，它是靠介質受擾動後所展現出來的彈性來傳送能量。

(2) 聲波在不同介質狀態中的傳播方式：

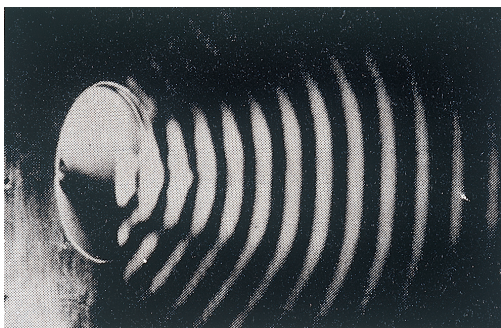
- ① **流體** —— 縱波形式：氣體藉由碰撞而影響其他氣體分子，因聲波的傳播方向和氣體分子集體的振動方向一致。故為縱波；而液體與氣體中的傳遞方式一樣。
- ② **固體** —— 縱波與橫波形式均有：當外界是對一小塊物質施以平行於其表面的作用力時，流體僅能順勢流動、完全無法產生彈力，而固體卻能以橫向的彈力反抗，從而產生橫波。根據進一步的理論計算顯示，固體中橫波之傳播速率恆小於縱波速率。例如在普通玻璃中的縱波速率為 $5.2 \times 10^3 \text{ m/s}$ ，橫波速率為 $3.0 \times 10^3 \text{ m/s}$ 。

學習概念

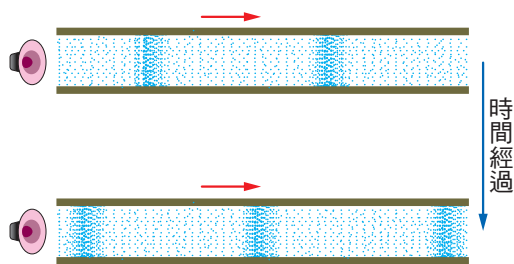
2 聲波的傳播 (配合課本 p.62)

1. 聲波在空氣中的波形：

假設我們在一個兩端開口的長管內充滿空氣，左端開口以一個喇叭頂住，當喇叭開啟後，振動體來回的震動，使得鄰近空氣的密度及壓力產生週期性的變化。藉由這種壓力及密度的變化將聲音經由波動的形式傳遞出去，因此管內會形成疏密相間且向右行進的脈波，如下圖(一)、(二)所示。



▲圖(一) 利用特殊技巧拍攝的揚聲器振動時所發出的聲音波形。波紋的亮暗程度代表空氣密度（或壓力）的大小。



▲圖(二) 空氣中聲波是一種縱波。

2. 空氣分子在聲波擾動下的位置與位移、密度、壓力之關係：

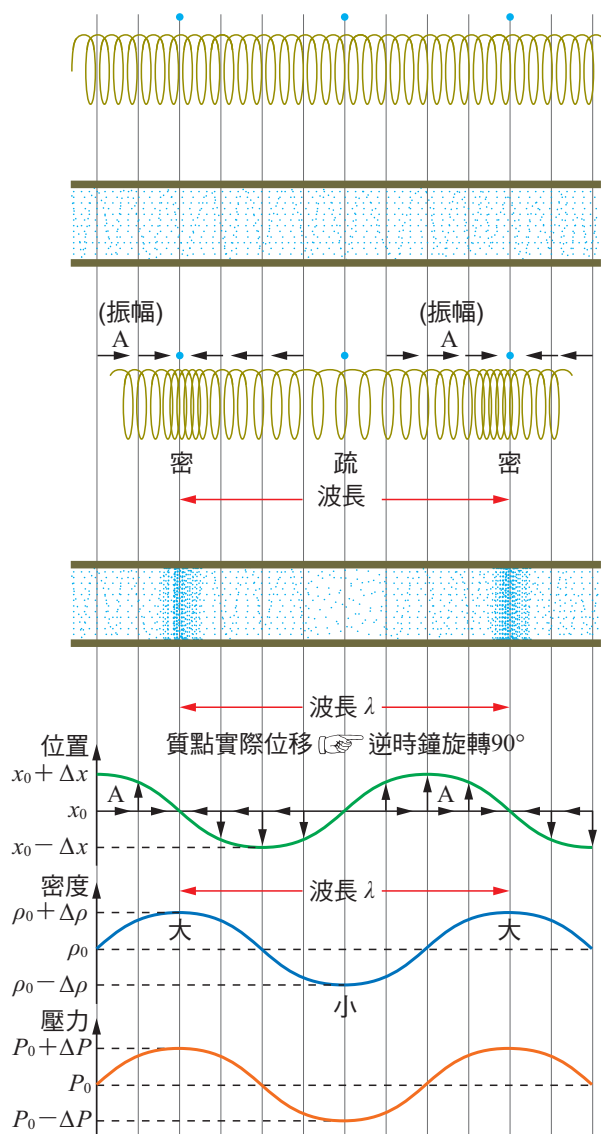
右圖為當聲波沿 x 軸傳播時，一小塊空氣的縱向位移和壓力位置變化的關係圖。圖中位移向右為正， λ 為波長， Δx 是空氣位移與其平衡處 x_0 間之最大變化量， $\Delta \rho$ 是空氣壓力與其平衡值 ρ_0 間之最大變化量， ΔP 是空氣壓力與其平衡值 P_0 間之最大變化量。

(1) 密部中心處：

- ① 空氣分子密度最大。
- ② 空氣壓力最大（空氣壓力變化為極大）。
- ③ 分子位移為零。
- ④ 介質振動速度最大。

(2) 疏部中心處：

- ① 空氣分子密度最小。
- ② 空氣壓力最小（空氣壓力變化為極大）。
- ③ 分子位移為零。
- ④ 介質振動速度最大。



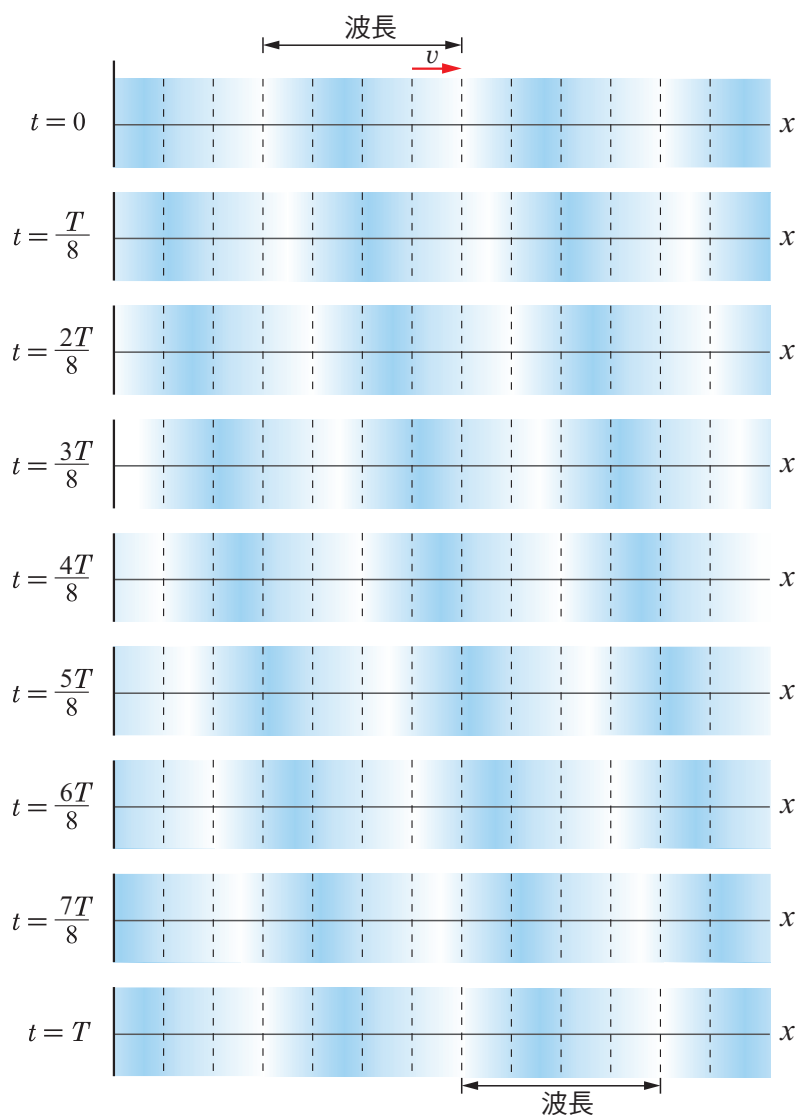
前述內容整理如下表：

物理量 \ 位置	密部中央	密到疏的中央 (密部右邊)	疏部中央	疏到密的中央 (密部左邊)
密度	極大	同壓縮前的空氣	極小	同壓縮前的空氣
壓力	極大	同壓縮前的空氣	極小	同壓縮前的空氣
位移	0	向左位移極大	0	向右位移極大
振動速率	極大	極小	極大	極小

3. 聲波在空氣中的波速：

下圖為向右行進的聲波在不同時刻的波形，可看出經過一個週期的時間，波形向右移動

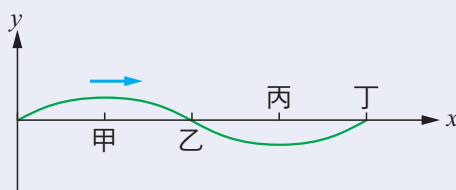
了一個波長的距離。故聲波的傳播速度 $v = \frac{\text{波形位移 } \Delta x}{\text{時間 } \Delta t} = \frac{\text{波長 } \lambda}{\text{週期 } T} = (\text{頻率 } f) \times (\text{波長 } \lambda)$ 。



範例 1

聲波的性質

右圖為空氣柱縱波在某一時刻的振動位移 (y) 與位置 (x) 的函數圖, x 向右為正, 介質位移 y 向右亦為正, 下列敘述何者正確?



- (A) 位置甲為密部 (B) 位置乙的介質位移為零 (C) 位置丙的介質振動速度為零 (D) 位置丁為疏部 (E) 位置丙的空氣壓力最小

答 (B)(C)(D)

解 (1) 乙處位移為 0, 為密部, 壓力最大; 丁處位移為 0, 為疏部, 壓力最小, 兩者振動速率皆最大。

(2) 甲、丙位移最大, 振動速率皆為零。

綜上所述, 應選(B)(C)(D)。

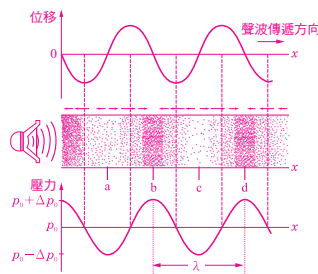


類題 1. 有關空氣中之聲波的敘述, 下列哪些正確?

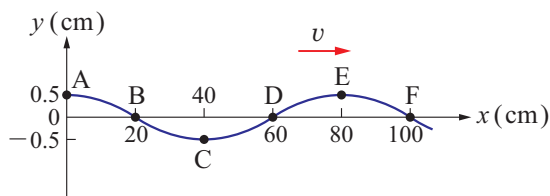
- (A) 是縱波 (B) 疏部中央之位移最大 (C) 密部中點之振動速率最大 (D) 聲波向右行進時, 與密部中央相鄰之右側空氣分子向右位移 (E) 聲波之壓力最大處, 領先位移最大處 $\frac{1}{4}$ 波長

答 (A)(C)(E)

(B) 由右圖可知疏部中央之位移為零; (C) 密部中點為平衡點, 所以速率最大; (D) 聲波向右行進時, 與密部中央相鄰之右側空氣分子向左位移, 故選(A)(C)(E)。



類題 2. 一聲波向右行進時, 若將各介質質點離開其原有平衡位置的位移記為 y , 並定向右為正, 向左為負, 且假設波的行進方向為 x 方向, 波速為 50 cm/s , 此波在某一時刻時, 質點位移 y 對位置 x 的函數圖如右圖所示, 則:



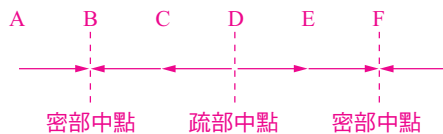
- (1) 在圖上 A、B、C、D、E、F 中, 何者為密部中點? 何者為疏部中點?
(2) 在圖上 A、B、C、D、E、F 中, 何者壓力最小?
(3) 此聲波的頻率為何?

答 (1) 密部中點: B、F, 疏部中點: D; (2) D; (3) 0.625 Hz

(1) B、F 為密部中點; D 為疏部中點。

(2) 疏部中點 D 壓力最小。

(3) 可知 $\lambda = 80 \text{ cm}$, $v = \lambda \times f \Rightarrow f = \frac{50}{80} = 0.625 \text{ (Hz)}$ 。



學習概念 3 聲波在介質中的傳播速度 (配合課本 p.63)

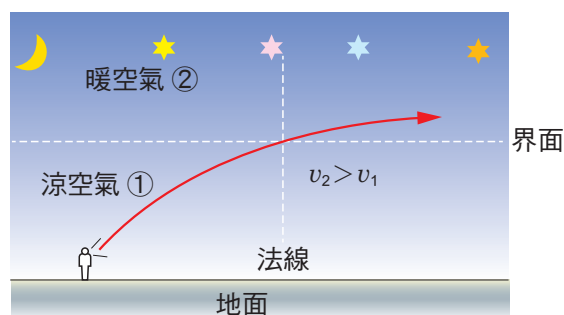
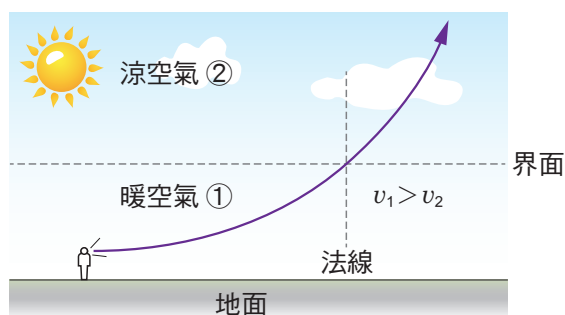
1. 影響聲波傳播速率的主要因素：

(1) 介質的種類：一般而言，聲波波速大小為固態 > 液態 > 氣態。

▼ 各種介質中的聲速。

氣體		液體 (25 °C)		固體	
介質	聲速 (m/s)	介質	聲速 (m/s)	介質	聲速 (m/s)
氫氣 (0 °C)	1286	甘油	1904	鋁	6420
氮氣 (0 °C)	972	海水	1533	鐵	5950
空氣 (20 °C)	343	水	1493	耐熱玻璃	5640
空氣 (0 °C)	331	汞	1450	銅	5010
氧氣 (0 °C)	317	煤油	1324	青銅	4700
		甲醇	1143	金	3240
		四氯化碳	926	鉛	1960
				橡膠	1600

(2) 溫度：在乾燥無風的空氣中，0 °C 的聲速為 331 m/s，氣溫每升高 1 °C，聲速約增加 0.606 m/s，所以 t °C 時，空氣中的聲速可寫為 $v \approx 331 + 0.6t$ 。



▲ 聲波在不同溫度的空氣介面會產生偏折的現象。

(3) 溼度：聲速隨溼度增大而增快。

(4) 風向：順風聲速大於逆風聲速。

2. 討論：

(1) 聲波波速依然滿足波速 $v = \frac{\lambda}{T} = f\lambda$ 。

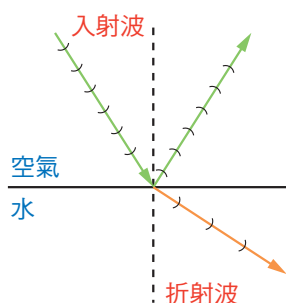
(2) 聲波頻率由波源振動模式決定。

(3) 聲速由介質的性質和狀態決定，與質點振動的速度及波源頻率無關，在同一均勻介質中的波速為定值。

3. 聲波的傳播特性：反射現象、折射現象、干涉現象、繞射現象……。

(1) **反射現象**：聲波遇障礙物時會返回原介質的現象。【遵守反射定律】

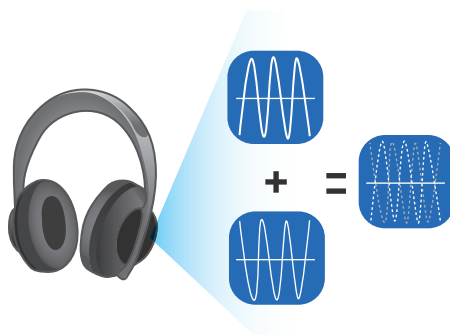
(2) **折射現象**：聲波在不同介質傳播時，會在界面產生偏折的現象（如下圖）。【遵守折射定律】



▲聲波在不同介質的傳播。

(3) **干涉現象**：兩聲波到達同一點時，會互相疊加的現象。

- ① 在吵雜的環境中欣賞音樂，為了掩蓋住這些噪音，往往耳機的音量會提高，這麼做只會讓耳朵承受更大的傷害。
- ② 主動式抗噪耳機系統（下圖）於耳機內的電子晶片裝置可以感應環境背景噪音，接著使喇叭產生一個相位相反的聲波訊號，經由破壞性干涉消除原本所能聽到之外界噪音，這時候便可以完全沉浸在音樂的篇章中。



▲抗噪耳機的原理。

(4) **繞射現象**：聲波遇到障礙物或小孔時，聲波能量可繞到障礙物或小孔後方的現象。

範例 2 聲波的傳播

國樂音階的五音與頻率的對應如下表所示。經測得「角」音在室溫空氣中傳播時的波長約為 103 公分。若五音的聲波都在相同狀況的空氣中傳播，則下列有關表中國樂五音的敘述，哪些正確？（應選 2 項） **【108. 學測】**

國樂音階	宮	商	角	徵	羽
頻率 (Hz)	262	294	330	392	440

(A)「宮」音聲波的傳播速率最慢 (B)「商」音聲波不會發生干涉現象 (C)五音的聲波均會發生繞射現象 (D)在室溫空氣中傳播時，「徵」音的聲波波長較「角」音為長 (E)在室溫空氣中傳播時，「羽」音聲波的波長約為 77.3 公分

答 (C)(E)

解 (A)聲波在同狀態的介質中傳播時，其波速不變， $v = \lambda \times f = 103 \times 330 = 33990$ (cm/s)。

(B)(C)干涉和繞射都是波動共有的特性。

$$(D) \lambda_{\text{徵}} = \frac{v}{f_{\text{徵}}} = \frac{33990}{392} \approx 86.7 \text{ (cm)} < \lambda_{\text{角}}。$$

$$(E) \lambda_{\text{羽}} = \frac{v}{f_{\text{羽}}} = \frac{33990}{440} \approx 77.3 \text{ (cm)}。$$

故選(C)(E)。

類題 下列有關聲波的敘述，哪些正確？

【109. 指考】

(A)探測魚群的聲納主要是利用聲波的反射性質來探測水中魚群的位置 (B)聲波由水中傳入空氣中時，其波長變長 (C)若月球上空有東西爆炸，在爆炸處附近的太空人聽不到爆炸聲 (D)甲的聲音低沉但較大聲，乙的聲音尖銳但較小聲。在無風的環境，兩人站在與丙等距離的兩個地點同時向丙喊話，丙會先聽到甲的聲音再聽到乙的聲音 (E)日常生活中聲波的繞射現象比可見光的繞射現象容易顯現，主要原因是聲波的波長與一般物體的尺度較為接近，而可見光的波長太短

答 (A)(C)(E) ((B)因頻率不變，由 $v = \lambda \times f \propto \lambda$ ，聲速在水中較快，其波長較長，故由水中傳入空氣中時，其波長變短；(C)聲波需要介質才能傳播，月球上沒有空氣，故太空人聽不到爆炸聲；(D)聲波傳遞速度由介質及溫度決定，與頻率無關，故丙會同時聽到甲和乙的聲音；(E)當障礙物（或狹縫）與波的尺度愈接近時，繞射現象愈明顯。故選(A)(C)(E)。)

2-1

課後練習

單選題

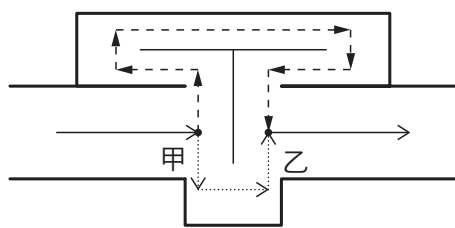
- (C) 1. 某人站在一面大磚牆前 80 公尺處，以木槌敲擊木塊，每當聽到磚牆反射的回聲時，立即再次敲擊。若第 1 次敲擊與第 21 次敲擊的時間間隔為 10.0 秒，則當時的聲速約為多少公尺/秒？

【91. 學測補考】

(A) 160 (B) 180 (C) 320 (D) 340 (E) 360

(1. 第 1 次敲擊與第 21 次敲擊的時間內，聲音來回 20 次，因此聲速 $v = \frac{20 \times 160}{10} = 320 \text{ (m/s)}$ ，故選(C)。)

- (D) 2. 機車在排放廢氣時，常伴隨很大的噪音。利用干涉型消音器可以減低此類噪音，其設計概念如右圖所示。當聲波抵達甲點時使其分為兩股不同路徑，分別行經上方虛線與下方點線，最後在排氣管的乙點會合。假設某機車排氣管內的主要噪音波長為 1.0 公尺，則下列選項中，兩路徑的長度相差為多少公尺時可以最有效減低噪音？



【112. 分科】

(A) 2.0 (B) 1.0 (C) 0.75 (D) 0.50 (E) 0.25

(2. 要相差半個波長的奇數倍，才能產生完全相消性干涉，即為 0.50 m、1.50 m、2.50 m、…。故選(D)。)

3.、4. 題為題組

已知聲波在銅管中傳播的速率約為 5000 m/s，某人在銅管的一端重重的敲一下，另一端的聽者卻聽到兩響，一為在管壁內行進的聲波，另一為在管內空氣行進的聲波。該聽者分辨出這兩個響聲的時間差為 0.1 s，若當時聲速為 340 m/s。

- (C) 3. 當時的氣溫為多少°C？

(A) 5 (B) 10 (C) 15 (D) 20 (E) 30

(3. 聲速 $v = 331 + 0.6t = 340 \text{ m/s}$ ， $t = 15^\circ\text{C}$ ，故選(C)。)

- (B) 4. 銅管的長度約為多少 m？

(A) 17.5 (B) 36.5 (C) 17.5 (D) 175 (E) 1750

(4. 設管長為 ℓ ，因兩個響聲的時間差為 0.1 s，故 $\frac{\ell}{340} - \frac{\ell}{5000} = 0.1$ $\therefore \ell = 36.48 \approx 36.5$ 公尺，故選(B)。)

- (C) 5. 某人可以清楚看到火車的最遠距離為 1 km，若火車距離某人 3 km 遠時人耳朵貼著鐵軌、眼睛看著遠處時，耳朵聽到火車聲音時，約經過多少秒後才會看到火車駛近？(假設聲音在鐵中的傳遞速率為 5950 m/s、火車速率保持 40 m/s)

(A) 150 (B) 75 (C) 49.5 (D) 37.8 (E) 22.4

(5. 3 km 遠的火車藉由鐵軌傳遞聲波至某人所需的時間 $\Delta t_1 = \frac{3000}{5950} \approx 0.5 \text{ (s)}$ 。距人 3 km 處的火車移至距人

1 km 處所需的時間 $\Delta t_2 = \frac{2000}{40} \approx 50 \text{ (s)}$ ，兩者的時間差 $\Delta t = \Delta t_2 - \Delta t_1 = 49.5 \text{ (s)}$ ，故選(C)。)

多選題

- (C E) 1. 具週期性的聲波在靜止空氣中傳播，下列有關其性質的敘述，哪些正確？

(A)此聲波為波動，不能傳播介質與能量 (B)空氣分子會隨此聲波傳播的方向一直前進 (C)空氣分子在原來的位置，與此聲速相同方向來回振動 (D)空氣分子在原來的位置，與此聲速垂直方向來回振動 (E)此聲波所到之處，空氣的壓力與密度均會呈現週期性變化

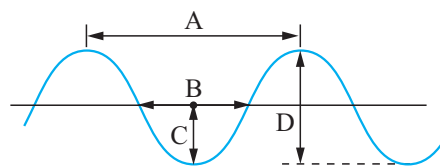
【100. 學測】

(1. (A)(B)聲波是波動，因介質只在原處振動不隨波前進，故不能傳播介質，但可以傳播能量；(C)(D)(E)空氣中的聲波是縱波（又稱「疏密波」），空氣分子振動方向與聲波的前進方向平行。空氣中的稠密部壓力與密度都較大，稀疏部壓力與密度都較小。故應選(C)(E)。)

- (B C) 2. 右圖代表頻率為 120 Hz 的聲波在空氣中傳遞

D
(2. (A) C 表示
壓力變化；
(B)聲波行經
A 的距離所
經歷的時間
為一週期，
即 $T = \frac{1}{f} =$

時，在某一時刻空間各點之氣壓變化波形，已知聲速為 360 m/s，則：



(A) C 表示波的振幅 (B)聲波行經 A 的距離所經歷的時間為 120 分之 1 秒 (C) B 點的位置恰為疏部的中央 (D) A = 3 公尺 (E)波源完成一次完整的振動，聲波前進一個 D 的距離

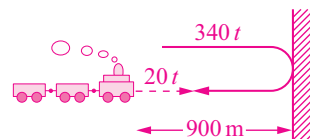
$\frac{1}{120}$ 秒；(C) B 點的壓力最小，所以為疏部的中央位置；(D) A 為一波長， $\lambda = \frac{v}{f} = \frac{360 \text{ (m/s)}}{120 \text{ (1/s)}} = \frac{3}{1} = 3 \text{ (m)}$ ；(E)應為前進一個 A (波長) 的距離，故選(B)(C)(D)。)

- (B C) 3. 有一列火車以 20 公尺/秒等速接近一座山洞，駛至距山洞 900 公尺時鳴放汽笛，

D
經若干秒後，火車上的人聽到經山壁反射之回聲，關於此聲音之傳播，下列敘述哪些正確？（設當時聲音在空氣中速度為 340 公尺/秒）

(A)汽笛發出之聲音以 (340 + 20) 公尺/秒之速率接近山洞 (B)經山洞上石壁反射之聲音以 340 公尺/秒之速率反射回來 (C)石壁反射之聲音波長與入射波長相同 (D)火車駕駛在鳴放汽笛 5 秒後聽到回音 (E)石壁反射後之聲波頻率與原聲波相同

(3. (A)聲源運動不會改變聲速，故仍為 340 m/s；(B)反射聲速 = 入射聲速 = 340 m/s；(C)因為頻率及速率不變，所以波長不變；(D) $20 \times t + 340 \times t = 900 \times 2$, $t = 5$ ；(E)因都卜勒效應，故人所接受反射波頻率與原波頻率不同，故選(B)(C)(D)。)



- (A E) 4. 當氣溫升高時，一振動物體在空氣中傳播的聲波，則：

(A)波速變大 (B)頻率變大 (C)振幅變大 (D)波長變短 (E)波長變長

(4. 空氣中聲速隨氣溫升高而變快： $v = 331 + 0.6t$ ，又 $v = f\lambda$ ，因頻率不變，故波長 λ 隨之增大，故選(A)(E)。)

- (A B) 5. 某聲波在空氣中傳播時的頻率為 f_1 、波長為 λ_1 、入射角為 θ_1 ，當折射進入水中傳播時的頻率為 f_2 、波長為 λ_2 、折射角為 θ_2 ，則下列的關係，何者正確？

D

(A) $f_1 = f_2$ (B) $\lambda_2 > \lambda_1$ (C) $\lambda_2 < \lambda_1$ (D) $\theta_1 < \theta_2$ (E) $\theta_1 > \theta_2$

(5. 令聲音在空氣中波速為 v_1 ，在水中波速為 v_2 ，則 $v_1 = f_1 \cdot \lambda_1$, $v_2 = f_2 \cdot \lambda_2$ ， $\therefore v_1 < v_2$ 且 $f_1 = f_2$ ，故 $\lambda_1 < \lambda_2$ 。

又 $\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{v_1}{v_2} < 1 \Rightarrow \theta_1 < \theta_2$ ，故選(A)(B)(D)。)

混合題

1. ~ 2. 題為題組

聲波和光波一樣，在通過狹隘的開口往前傳播時都會出現繞射現象，而適用相同的繞射公式。右圖的矩形喇叭筒擴音器，是瑞立發明的，目的是在起大霧時，使喊話或警報能傳播到海岸邊一個大角度扇形水平區域內的船隻，避免將聲波能量浪費於向上或向下的傳播， w 與 h 分別代表矩形開口的寬度與高度。當波發生繞射時，波強度出現極小值的角度 θ ，與波長 λ 和狹縫寬度 a 的關係為

$$a \sin \theta = n \lambda \quad (0 \leq \theta \leq 90^\circ, n = 1, 2, 3, \dots) \quad (1) \text{式}$$

比起光波，聲波的波長 λ 與狹縫寬度 a 的比值通常較接近於 1，因此上式不易出現 $n > 1$ 的情況，以致聲波由開口向外傳播時主要會分布在張角為 $2\theta_1$ 的角度內，此處 $\sin \theta_1 = \lambda / a$ ，而張角是指以開口為頂點所張的角度。當 $\lambda / a > 1$ 時，(1)式無解，表示開口就近似於一個點，其向外傳播之聲波在開口前方的分布範圍（即張角），可達到 180° 。

【111. 分科】

- (E) 1. 已知人大力喊話時，主要不是透過基頻而是透過頻率約 3 kHz 的泛音與噪音傳送資訊。而近似為矩形擴音器時，人的嘴巴相當於寬度約 6 cm 的開口。若聲速為 340 m/s，則人張口大力喊話時，在其前方可涵蓋的水平扇形區域，其張角最接近下列何者？（單選）

(A) 20° (B) 30° (C) 50° (D) 90° (E) 180°

(1. $\lambda / a = \frac{340}{\frac{3 \times 10^3}{6 \times 10^{-2}}} = 1.89 > 1$ ，故其向外傳播之聲波在開口前方的分布範圍，可達到 180° 。故選(E)。）

2. (1) 依據瑞立矩形開口擴音器的目的與聲波傳播的特性，建構一個關於瑞立矩形開口擴音器如何工作的理論模型，亦即說明該擴音器的寬度 w 與高度 h ，各與聲波波長 λ 具有什麼關係（需列出關係式），並預測要使聲波在水平方向的分散角度大於垂直方向的分散角度， w 與 h 的大小關係應為何。

- (2) 承(1)，若要驗證該擴音器可達到聲音在水平與垂直方向的分散效果，在固定擴音器寬度 w 與高度 h 的情況下，需要測量何種數據？答題時若用到數學式或圖形，須說明所用各符號的定義。

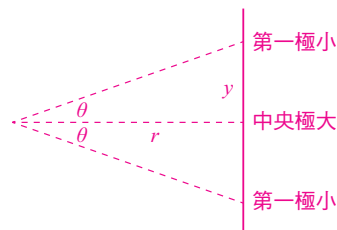
- (2. (1) 若視此擴音器的寬度或高度為不同方向的狹縫寬度，則擴音器的寬度會影響水平方向的分散角度 $\theta_{\text{水平}}$ ，而擴音器的高度會影響鉛直方向的分散角度

$$\theta_{\text{垂直}} : \sin \theta_{\text{水平}} = \lambda / w, \sin \theta_{\text{垂直}} = \lambda / h$$

由於要使聲波在水平方向的分散角度大於垂直方向的分散角度：

$$\theta_{\text{水平}} > \theta_{\text{垂直}}, \text{ 所以 } \lambda / w > \lambda / h \Rightarrow w < h$$

- (2) 固定與擴音器的水平距離 r 處（為中央極大處），分別向水平方向移動或向鉛直方向移動，以分貝計測量聲音大小至第一極小處。記錄第一極小處與中央極大處之間距離 y 。水平移動時的 $y_{\text{水平}}$ 與垂直移動的 $y_{\text{垂直}}$ 比較大小，視何者較大，即能驗證何方向分散效果好。）



2

教師用書

貼心伴隨・敬請賜教

2-2

空腔中的聲音



學習概念

1

長直空氣柱的發聲原理 (配合課本 p.65)

1. 聲波形成駐波的原理：當聲波傳到介質的界面時，會有能量反射回來而形成反射波；當入射波與反射波互相干涉時，若滿足某些特殊條件，則兩波會形成**駐波**。
2. 常見管弦樂器的粗略分類：弦樂器、開管樂器、閉管樂器。

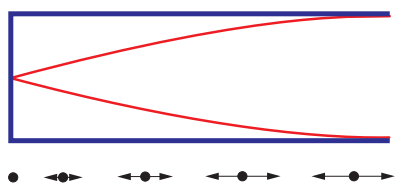
學習概念

2

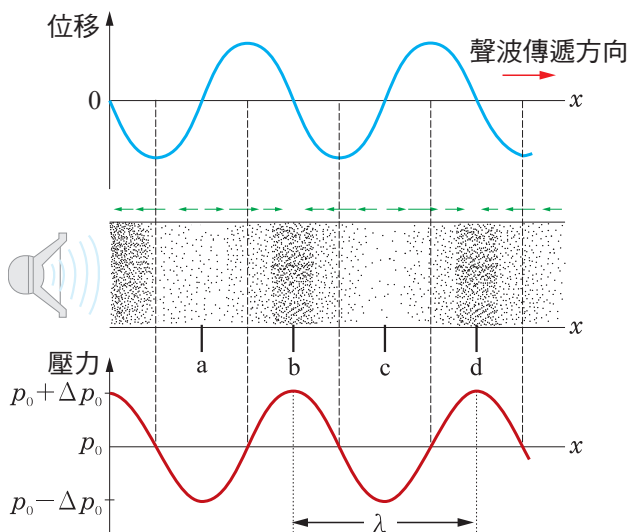
管樂器的諧音 (配合課本 p.67)

1. 管樂器兩端的節、腹點的判定：

- (1) 管樂器的一端封閉或開口處很小：
該處空氣分子位移幾乎為零，可視為壓力的腹點，即位移的節點（固定端）。如圖(-)。



▲圖(-)



▲圖(二)

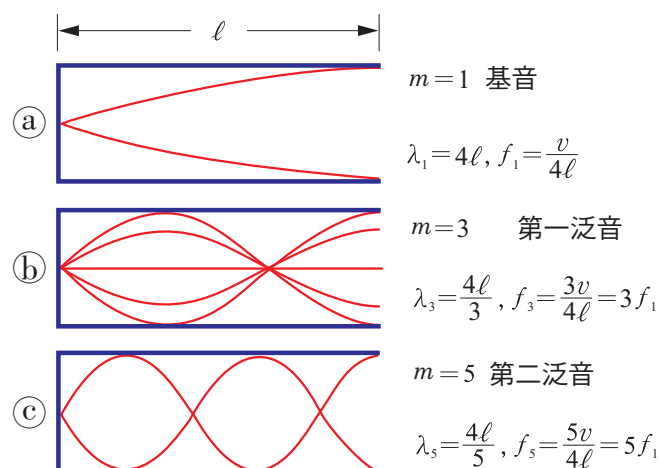
- (2) 管樂器的開口處較大：

與管外空氣連接，其壓力約等於大氣壓力，可視為壓力的節點（ p_0 ），即位移的腹點（自由端）。如圖(二)。

2. 閉管樂器中的駐波頻率：

(1) 一端開口（腹點）、一端接近封閉（節點）：滿足 $\ell = m \frac{\lambda_m}{4}$ ， $m = 1、3、5 \dots\dots$

(2) 駐波頻率： $f_m = \frac{v}{\lambda_m} = \frac{mv}{4\ell}$ ， $m = 1、3、5 \dots\dots$



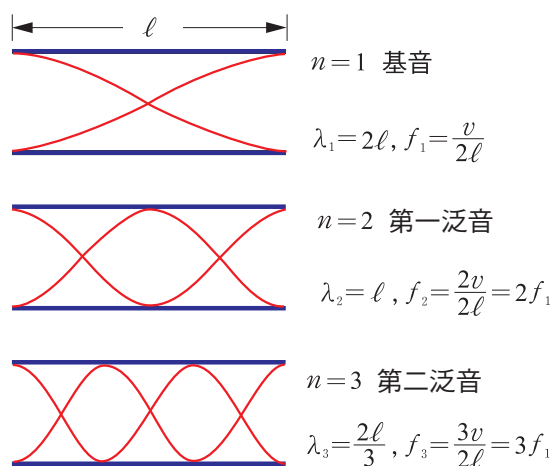
▲閉管內空氣柱振動時可能產生的頻率最低之三種駐波位移模式以及對應的聲音名稱。

3. 開管樂器中的駐波頻率：

(1) 兩端均開口：因兩端均為位移的腹點，故滿足

$$\ell = n \frac{\lambda_n}{2}, n = 1、2、3 \dots\dots$$

(2) 駐波頻率： $f_n = \frac{v}{\lambda_n} = \frac{nv}{2\ell}$ ， $n = 1、2、3 \dots\dots\dots$



▲開管內空氣柱振動時可能產生的頻率最低之三種駐波位移模式以及對應的聲音名稱。

4. 諧音與基音、泛音：

- (1) **基音**：在物體或樂器所形成的各種駐波模式中，其頻率最低者（ $n = 1$ 對應的振動），稱為基頻或基音。
- (2) **諧音**：在物體或樂器所形成的各種駐波模式中所對應的聲音，稱為諧音。其頻率為第一諧音的 n 倍，則稱第 n 諧音。
- (3) **泛音**：除基音外，其餘頻率較高者稱為泛音，按由低而高的次序，分別命名為第一泛音、第二泛音、第三泛音，以此餘類推。

種類	波長與管長的關係	駐波頻率	諧音		基音和泛音
開管	$\ell = n \frac{\lambda_n}{2}$ $n = 1, 2, 3, \dots$	$f_n = \frac{nv}{2\ell}$	$f_1 = \frac{v}{2\ell}$	第一諧音	基音
			$f_2 = \frac{2v}{2\ell}$	第二諧音	第一泛音
			$f_3 = \frac{3v}{2\ell}$	第三諧音	第二泛音
			$f_4 = \frac{4v}{2\ell}$	第四諧音	第三泛音
閉管	$\ell = m \frac{\lambda_m}{4}$ $m = 1, 3, 5, \dots$	$f_m = \frac{mv}{4\ell}$	$f_1 = \frac{v}{4\ell}$	第一諧音	基音
			$f_3 = \frac{3v}{4\ell}$	第三諧音	第一泛音
			$f_5 = \frac{5v}{4\ell}$	第五諧音	第二泛音
			$f_7 = \frac{7v}{4\ell}$	第七諧音	第三泛音

範例

1

管樂器的諧音

某樂器以開管空氣柱原理發聲，若其基音頻率為 680 Hz、音速為 340 m/s，則：

- (1) 其對應的空氣柱長度約為幾 cm ? 【102. 指考修】
- (A) 12.5 (B) 20 (C) 25 (D) 30 (E) 50
- (2) 離管口最近的位移節點與管口距離為幾 cm ?
- (A) 12.5 (B) 20 (C) 25 (D) 30 (E) 50
- (3) 下列哪些頻率可以從此樂器發出？
- (A) 170 (B) 340 (C) 1020 (D) 1360 (E) 2720 Hz

答 (1) (C) ; (2) (A) ; (3) (D)(E)

解 (1) 兩端開口共鳴空氣柱基頻 $f_1 = \frac{v}{2L} \Rightarrow 680 = \frac{340}{2 \times L} \Rightarrow L = 0.25 \text{ m} = 25 \text{ cm}$ 。故選(C)。

(2) 因管口為位移腹點，離管口最近的位移節點與管口的距離為

$$\frac{\lambda}{4} = \frac{1}{4} \frac{v}{f} = \frac{1}{4} \times \frac{340}{680} = \frac{1}{8} = 0.125 \text{ (m)} = 12.5 \text{ (cm)}, \text{ 故選(A)。}$$

(3) 開管基音頻率 $f_1 = \frac{v}{2L} = 680 \text{ Hz}$ ，其他諧音頻率 $f_n = \frac{nv}{2L} = nf_1$ ， $n = 1, 2, 3 \dots$ ，故選(D)(E)。

類題 一聲波在一長 0.5 公尺的管中傳播，管的一端封閉一端開放，若聲速為 344 公尺/秒。則：

- (1) 振動的基頻為多少 Hz？離開管端最近的位移節點與開管端距離多少 cm？
- (2) 下列哪些頻率可以從此樂器發出？
- (A) 86 (B) 172 (C) 344 (D) 516 (E) 688 Hz
- (3) 如閉端打開，則其基頻變成若干赫？

答 (1) 172 Hz，50 cm；(2)(B)(D)；(3) 344 Hz

(1) ① 閉管的頻率為 $f_m = \frac{mv}{4L}$ ，振動的基頻 $m = 1$ ， $f_1 = \frac{v}{4L} = \frac{344 \text{ m/s}}{4 \times 0.5 \text{ m}} = 172 \text{ (Hz)}$ 。

② 因開管處為位移腹點，故該處與最近的位移節點之距離為

$$\frac{\lambda}{4} = \frac{1}{4} \frac{v}{f} = \frac{1}{4} \times \frac{344}{172} = 0.5 \text{ (m)} = 50 \text{ (cm)}$$

(2) 振動的基頻 $f_1 = \frac{v}{4L} = 172 \text{ (Hz)}$ ，閉管的諧音頻率為 $f_m = \frac{mv}{4L}$ ， $m = 1, 3, 5 \dots$ ，故選(B)(D)。

(3) 如將閉端開啟即成開管，則頻率為 $f_n = \frac{nv}{2L}$ ， $n = 1, 2, \dots$ ，

$n = 1$ 為開管的基頻，故 $f_1 = \frac{v}{2L} = \frac{344 \text{ 公尺/秒}}{2 \times 0.5 \text{ 公尺}} = 344 \text{ (Hz)}$ 。

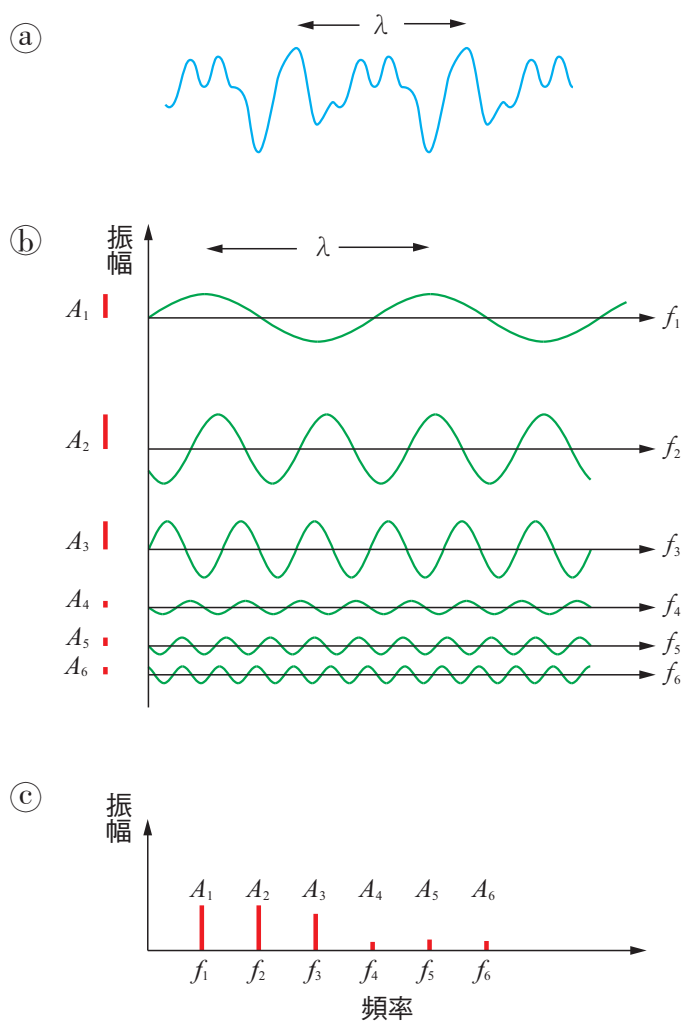
2

教師用書

貼心伴隨·敬請賜教

學習概念 3 樂器的音色 (補充資料)

1. 人耳所聽到樂器的音調：由基音的頻率決定。
2. 人耳所聽到樂器的音色：由所有諧音疊加起來的波形決定。
3. 人耳所聽到樂器的響度：由振幅的大小決定。

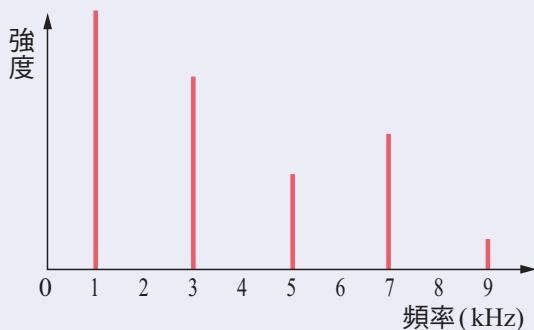


▲小提琴的(a)波形(b)基音與諧音及(c)頻譜。

範例 2 管樂器的音色

當聲速為 340 m/s 時，對一長度固定之空氣柱發出的聲音，進行頻率對強度的量測實驗，其結果如右圖所示，則下列敘述哪些正確？

- (A) 此空氣柱所發聲音的音色，完全由頻率 1 kHz 的聲音決定
 (B) 此空氣柱發出基頻聲音的波長為 34 cm
 (C) 此空氣柱為一端開口一端閉口
 (D) 此空氣柱的長度為 17 cm
 (E) 若空氣溫度降低，則空氣柱發聲的頻率亦會降低



【104. 指考】

答 (B)(C)(E)

解 (A) 此空氣柱所發聲音的音色，是由所有的諧音共同決定的；

(B) 此空氣柱所發出的基頻波長 $\frac{340}{1000} = 0.34 \text{ m} = 34 \text{ cm}$ ；

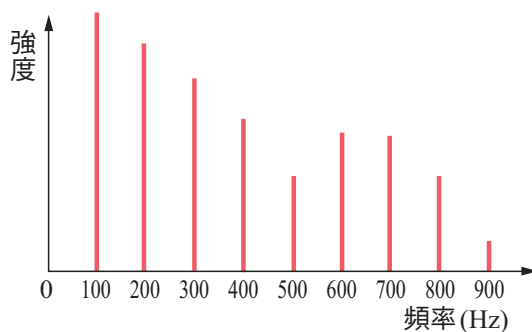
(C) 由於諧音比為奇數比，表示此空氣柱應為一端開口一端閉口；

(D) 此空氣柱長度為 $\frac{1}{4}$ 倍基頻波長 $= \frac{34}{4} = 8.5 \text{ cm}$ ；

(E) 閉管空氣柱的駐波頻率 $f_m = \frac{mv}{4L}$ ， $m = 1, 3, 5, \dots \propto v$ ，空氣中聲速 $v = 331 + 0.6t$ 會隨氣溫而變。當空氣溫度降低，由於聲速變慢，則空氣柱發聲的頻率會降低。故選(B)(C)(E)。

類題 當聲速為 340 m/s 時，對一長度固定之空氣柱發出的聲音，進行頻率對強度的量測實驗，其結果如右圖所示，則：

- (1) 此空氣柱為開管還是閉管？
- (2) 此空氣柱的長度為多少 m ？
- (3) 若空氣溫度升高，則空氣柱發聲的頻率會如何變化？



答 (1) 開；(2) 1.7；(3) 增加

(1) 此空氣柱所發聲音的頻率滿足開管空氣柱的駐波頻率 $f_n = \frac{nv}{2L} \propto v$ ， $n = 1, 2, 3, \dots$

(2) $f_1 = \frac{v}{2\ell} \Rightarrow 100 = \frac{340}{2\ell} \Rightarrow \ell = 1.7 \text{ (m)}$

(3) 開管空氣柱的駐波頻率 $f_n = \frac{nv}{2L} \propto v$ ，空氣中聲速 $v = 331 + 0.6t$ 會隨氣溫而變。
 (當空氣溫度升高，由於聲速 v 變快，則空氣柱發聲的頻率 f 會增加。)

2-2

課後練習

單選題

- (E) 1. 長度為 L_A 的閉管（一端閉口，另一端開口），其基音頻率為 f_A ；長度為 L_B 的開管（兩端開口），其基音頻率為 f_B 。已知 f_A 等於 f_B ，則 L_A 對 L_B 的比值為下列哪一項？

(A) 4 (B) 2 (C) $3/2$ (D) 1 (E) $1/2$

【98. 指考】

(1. 假設空氣速度為 v ，則：

$$f_A = \frac{v}{4L_A} \quad f_B = \frac{v}{2L_B}$$

$$\because f_A = f_B \Rightarrow \frac{v}{4L_A} = \frac{v}{2L_B} \Rightarrow \frac{L_A}{L_B} = \frac{1}{2}, \text{故選(E)。}$$

- (C) 2. A、B 兩樂器，A 為開管，B 為閉管，已知 A 的第 3 諧音和 B 的第 5 諧音頻率相同，則 A 和 B 的管長比值為：

(A) $\frac{3}{4}$ (B) $\frac{4}{3}$ (C) $\frac{6}{5}$ (D) $\frac{5}{6}$ (E) $\frac{9}{11}$

(2. 開管 A 的第 3 諧音 $f_{A3} = \frac{v}{2\ell_A} \times 3$ ；閉管 B 的第 5 諧音 $f_{B5} = \frac{v}{4\ell_B} \times 5$

$$\text{因 } f_{A3} = f_{B5} \Rightarrow \frac{v}{2\ell_A} \times 3 = \frac{v}{4\ell_B} \times 5 \Rightarrow \ell_A : \ell_B = 6 : 5, \text{故選(C)。}$$

3. ~ 5. 題為題組

一閉管風琴管的基音頻率為 340 赫，有一開管風琴管的第一泛音與此閉管風琴管的第一泛音相同，則：（假設聲速為 340 公尺/秒）

- (C) 3. 閉管風琴管的空氣柱長度為多少公尺？

(A) 0.125 (B) 0.20 (C) 0.25 (D) 0.30 (E) 0.33

$$(3. \text{閉管空氣柱的駐波頻率 } f_1 = \frac{v}{4\ell} \Rightarrow 340 = \frac{340}{4\ell} \Rightarrow \ell = 0.25 \text{ (m)}, \text{故選(C)。}$$

- (E) 4. 開管風琴管的第一泛音的頻率為多少赫？

(A) 170 (B) 340 (C) 510 (D) 680 (E) 1020

(4. 開管風琴管的第一泛音頻率 = 閉管風琴管的第一泛音 = 第三諧音頻率 $f_3 = 3f_1 = 1020 \text{ (Hz)}$ ，故選(E)。

- (E) 5. 開管風琴管長度為多少公尺？

(A) 0.125 (B) 0.20 (C) 0.25 (D) 0.30 (E) 0.33

$$(5. \text{開管空氣柱第一泛音頻率 } f_2 = \frac{2v}{2\ell'} \Rightarrow 1020 = \frac{340}{\ell'} \Rightarrow \ell' = \frac{1}{3} \text{ (m)} = 0.33 \text{ (m)}, \text{故選(E)。}$$

6.、7. 題為題組

A、B 兩種管樂器之基音相同，若它們僅有基音頻率之 3 倍、5 倍、7 倍、9 倍及 11 倍的泛音，但其振幅不同，其中僅有基音頻率 3 倍的 A、B 這兩種樂器其振幅比為 2：1，其他則為 3：1，則：

(B) 6. 管樂器為哪一種樂器？

- (A) 均為開管 (B) 均為閉管 (C) A 為開管、B 為閉管 (D) A 為閉管、B 為開管
(E) 無法判斷

(6. 僅有基音頻率之 3 倍、5 倍、7 倍、9 倍及 11 倍的泛音，滿足閉管空氣柱的駐波頻率，故選(B)。)

(C) 7. 有關 A、B 兩種管樂器的音調、音色及響度的敘述，下列何者正確？

- (A) 音調、音色及響度三者均相同 (B) 音調、音色及響度三者均不同 (C) 只有音調相同，音色及響度均不相同 (D) 音調及音色相同，而響度不同 (E) 只有音色相同，音調及響度均不相同

(7. 兩發聲體因頻率相同，但振幅和合成波形不同，故僅音調相同，但響度和音色均不相同，故選(C)。)

(B) 8. 長笛與單簧管為常見的管樂器，長笛的管柱兩端皆為開口，單簧管的管柱一端封閉而另一端開口。吹奏時，透過按壓管柱的音孔，可改變管內空氣柱長度，當吹氣通過簧片或管口產生聲音的頻率與空氣柱振動頻率相同時，會發生共振並在管內空氣柱形成駐波。若忽略聲音駐波的管口修正量，當長笛吹奏出基音的頻率與單簧管第一泛音的頻率相同時，此時長笛空氣柱長度為單簧管空氣柱長度的幾倍？

- (A) $\frac{1}{2}$ (B) $\frac{2}{3}$ (C) $\frac{3}{4}$ (D) $\frac{4}{3}$ (E) $\frac{3}{2}$

【109. 指考】
(8. 開管長直空氣柱駐波頻率 $f_n = \frac{nv}{2\ell}$ ($n = 1, 2, 3, \dots$)，
閉管長直空氣柱駐波頻率 $f_m = \frac{mv}{4\ell'}$ ($m = 1, 3, 5, \dots$))

$$\begin{cases} \text{長笛為開管樂器，基音 } n=1 \Rightarrow f_{\text{笛}1} = \frac{1 \times v}{2\ell} = \frac{v}{2\ell} \\ \text{單簧管為閉管樂器，第一泛音 } m=3 \Rightarrow f_{\text{簧}3} = \frac{3 \times v}{4\ell'} = \frac{3v}{4\ell'} \end{cases}$$

因長笛吹奏出基音的頻率與單簧管第一泛音的頻率相同

多 選 題

(A C) 1. 閉管的基頻是 450 赫茲，下列哪些正確？

D E

- (A) 若氣體溫度上升，基頻變高 (B) 第一泛音的頻率為 900 赫茲 (C) 閉口端為波節 (D) 有相同基頻的開管的長度應為閉管的兩倍 (E) 相同長度的開管與閉管，開管的基頻為閉管基頻的兩倍

(1. 閉管： $f_n = \frac{(2n-1)v}{4\ell}$ ；開管： $f_m = \frac{mv}{2\ell}$ 。(A) 溫度上升，波速 v 增大，所以基頻 f_1 增大；(B) 第一泛音， $n=3$ ， $f_3 = \frac{v}{4\ell} \times 3 = 450 \times 3 = 1350$ (Hz)；(D) 開管基頻 $\frac{v}{2\ell'}$ = 閉管基頻 $\frac{v}{4\ell}$ ；當兩管基頻相同， $\ell' = 2\ell$ ；(E) 開管基頻 $f' = \frac{v}{2\ell}$ ；閉管基頻 $f = \frac{v}{4\ell}$ ， $f' = 2f$ ，故選(A)(C)(D)(E)。)

(B E) 2. 下列有關聲波的駐波之概念，哪些正確？

- (A)開管的駐波，其基音有 2 個波節、1 個波腹 (B)無論是開管的駐波或是閉管的駐波，當 n 值愈大，其頻率愈高 (C)對一固定長度的開管，所能發出的共振頻率是基頻的奇數倍，即各頻率比為 $1:3:5:7:\dots$ (D)對一固定長度的閉管，所能發出的共振頻率是基頻的整數倍，即各頻率比為 $1:2:3:4:\dots$ (E)對相同長度的開管與閉管，在相同環境下作實驗，開管的基頻比閉管基頻高，兩者基頻比值等於 2

(2. (A)開管的駐波，其基音為 1 個波節、2 個波腹；(C)開管共振頻率 $f_n = \frac{v}{2\ell} \times n, n \in N$ ；(D)閉管共振

頻率 $f_m = \frac{mv}{4\ell}, m = 1, 3, 5, \dots$ ，故選(B)(E)。)

(A C) 3. 若樂器的空氣共振腔，為一端閉口，另一端開口之圓柱型空管，而圓柱型空管內之聲速為 v ，其長度為 L ，則下列哪些敘述正確？ 【97. 指考】

- (A)這樂器基音的頻率為 $\frac{v}{4L}$ (B)這樂器可演奏出頻率為 $\frac{v}{8L}$ 與 $\frac{v}{12L}$ 的泛音 (C)空氣分子在開口端的縱向（聲波傳遞方向）最大位移比閉口端的縱向最大位移大 (D)空氣分子在開口端的縱向（聲波傳遞方向）最大位移與閉口端的縱向最大位移相等 (E)若改用兩端都開口之空管，則基音的頻率會升高

(3. 閉管的共振頻率 $f_m = \frac{mv}{4L}, m = 1, 3, 5, \dots \therefore f_1 = \frac{v}{4L}$ 。(B)樂器可演奏出的頻率為 $\frac{v}{4L}$ 的奇數倍；

(C)開口端空氣分子位移最大；(D)閉口端空氣分子位移為零；(E)開管的共振頻率 $f_n = \frac{nv}{2L}$

非選題

$\therefore f_1 = \frac{v}{L}$ ，故選(A)(C)(E)。)

1. 在乾燥無風且溫度為 15°C 的空氣中，若將一長度為 50 cm 的空管的一端封閉，對其另一開口端吹氣，並假設該管所發出的聲音對應於管內空氣柱之駐波，則：

- (1) 其基頻為何？
(2) 若將另一端的管口打開，則其基頻為何？

答：(1) 170 Hz；(2) 340 Hz

(1. (1) $v = 331 + 0.6 \times 15 = 340$ (m/s)

閉管基頻： $f_1 = \frac{v}{4\ell} = \frac{340}{4 \times 0.5} = 170$ (Hz)

(2)開管基頻： $f_1 = \frac{v}{2\ell} = \frac{340}{2 \times 0.5} = 340$ (Hz)。

2. 一開管內之空氣振動形成駐波，當產生 n 及 $n + 1$ 個波節時，測量得相鄰兩波節間的距離分別為 24 公分及 18 公分，則管長為多少公分？

答：72

(2. 開管產生 n 個波節： $\ell = \frac{\lambda_n}{2} \times n = 24 \times n$ ，

開管產生 $n + 1$ 個波節： $\ell = \frac{\lambda_{n+1}}{2} \times (n + 1) = 18 \times (n + 1) \Rightarrow 24n = 18(n + 1)$

$\therefore n = 3$ ，管長 $\ell = 24 \times 3 = 72$ (cm)。

2-3

聲音的共鳴



學習概念

1

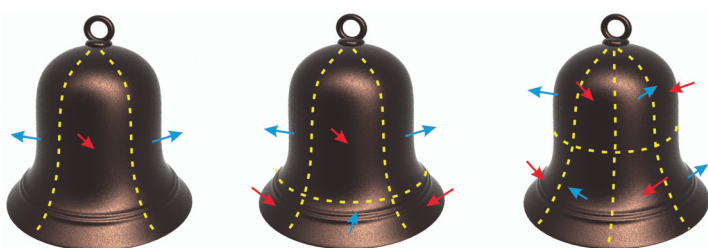
固有頻率與共振 (配合課本 p.71)



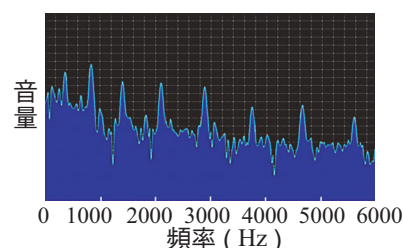
共鳴

1. 固有頻率：

- (1) 如圖(一)，物體若受到外界微小擾動後，會以固定的頻率振動，稱為物體的固有頻率，或稱為自然頻率 (natural frequency)。物體可形成駐波的頻率即為自然頻率。
 - (2) 固有頻率成簡單整數比關係者：音叉、弦、空氣柱的振動……
 - (3) 固有頻率成非簡單整數比關係者：木板、定音鼓的鼓膜、提琴與吉他的音箱……
- 圖(二)中數個突出的峰值均為此鐘的自然頻率。



▲圖(一) 於某一瞬間，鐘的數種可能擺動方式（藍色箭頭代表鐘面往外凸出，紅色箭頭代表鐘面往內凹入，黃色虛線則為節線）。



▲圖(二) 某教堂的鐘所發出聲音頻率之分布。

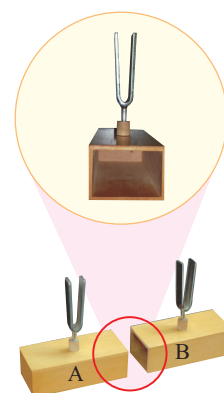
2. 共振現象與原理：

- (1) **共振現象**：外界傳入的驅動力的作用頻率恰等於物體的固有頻率，可使物體振動產生明顯增大的現象，稱為共振現象。
- (2) **共振原理**：當外來驅動力的作用頻率，與物體的固有頻率不同時，外力有時作正功，有時作負功，所以物體獲得的平均能量幾乎等於零，即物體振動幅度不會明顯改變。但若驅動力頻率與物體固有頻率相同，外力可跟隨物體的振動，一直作正功輸入能量，而增加物體的振動幅度。

(3) 共振現象的生活例子：

- ① **鞦韆的共振**：在小朋友往後盪到最高點時，再用力將他們推送，如此可使小朋友愈盪愈高。
- ② **音叉的共鳴**：如右圖，敲擊 A 音叉時，則我們可聽到 B 音叉發出強得多的嗡嗡響聲。這是由於兩個因素造成的：
 - (a) 因為音叉振動時會帶動音箱隨之振動，使擾動空氣的面積變大，故產生較強的空氣壓力變化，使我們聽到較強的聲響。
 - (b) 音叉的振動頻率恰等於音箱的某固有頻率，這使得音箱的振動因共振的關係變得比較劇烈，所以更能大幅度增強共鳴點所造成的音量。

►聲音的共鳴實驗。A 和 B 為兩相同的音叉。當 A 被敲擊振動時，B 因共振作用也會隨之振動發出聲音。



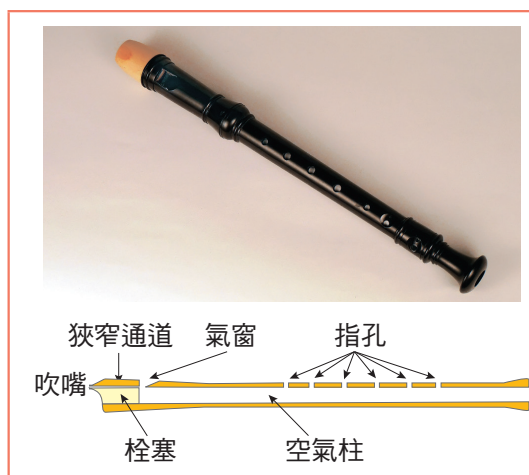
- ③ **地震引起建築物的共振**：1999 年 9 月 21 日臺灣南投縣集集鎮發生芮氏規模 7.3 的逆斷層型地震，造成臺灣全島均感受到嚴重搖晃，共持續約 102 秒，但只造成特定高度的建築物倒塌（如東星大樓）。

學習概念 2 樂器的共鳴 (配合課本 p.74)



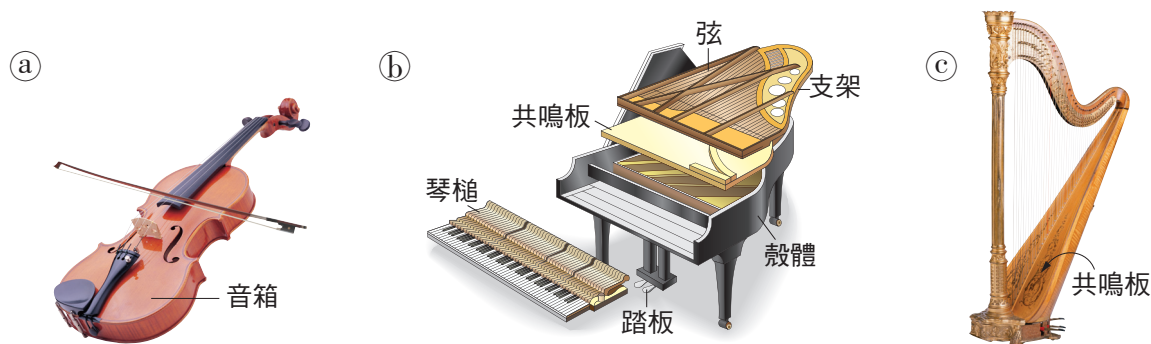
氣柱的共鳴

1. **聲音的強度（音量）**：聲音強度取決於振動體所能擾動的空氣量。
2. **聲音的共鳴**：對於聲波而言，共振的作用是將物體的振動能量有效地轉換為聲波的能量而使音量變大，故又稱為共鳴。
3. **樂器的共鳴**：
 - (1) **管樂器發聲的原理**：



吹氣所引發的空氣振動，包含許多不同的頻率，只有與樂器管內空氣柱的固有頻率相等時，才會發生共鳴而被放大，成為我們聽到的樂音。

- (2) **弦樂器的共鳴**：如下圖，長度與張力固定的弦線（兩端固定），擁有一系列的固有頻率 $f_n = \frac{nv}{2\ell}$ 。弦樂器因利用琴弦的振動而發音，故單憑弦的振動，其所能擾動的空氣量很少，發出的聲音將非常微弱，因此通常都要藉著安裝一個音箱或共鳴板來透過共振的原理將聲音放大。



▲弦樂器的共鳴裝置：①小提琴的音箱；②鋼琴的共鳴板；③豎琴的共鳴板。

範例 1 共鳴

一端開口，另端封閉的玻璃管，在開口端外有長 0.5 公尺、質量為 50 公克、兩端固定且張力為 40 牛頓的弦。已知弦的第五諧音和玻璃管的第一泛音恰能產生共鳴，當時聲速為 340 公尺/秒，則：

- (1) 弦的第五諧音為多少赫？
- (2) 玻璃管的長度為多少公尺？

答 (1) 100；(2) 2.55

解 (1) 兩端固定弦的駐波頻率 $f_n = \frac{nv}{2\ell}$ ， $n = 1, 2, 3, \dots$

$$\text{第五諧音：} n = 5 \Rightarrow f_n = \frac{5v}{2\ell} = \frac{5}{2\ell} \sqrt{\frac{F}{\mu}} = \frac{5}{2 \times 0.5} \times \sqrt{\frac{40}{\frac{50 \times 10^{-3}}{0.5}}} = 100 \text{ (Hz)}；$$

(2) 閉管空氣柱的駐波頻率 $f_m' = \frac{mv}{4L}$ ， $m = 1, 3, 5, \dots$

$$\text{玻璃管的第一泛音：} n = 3 \Rightarrow f_3' = \frac{3v}{4L} = \frac{3}{4L} \times 340。$$

因弦的第五諧音和玻璃管的第一泛音恰能產生共振，

$$\text{故 } f_5 = f_3' \Rightarrow \frac{3}{4L} \times 340 = 100 \Rightarrow L = 2.55 \text{ (m)}。$$

類題 如右圖所示，將一揚聲器置於一管狀物的一端開口處， ? 

連續改變揚聲器發出的聲頻，發現當頻率為 400 Hz、500 Hz 及 600 Hz 時都會產生共鳴。關於此管狀物的敘述，下列何者可能為正確？

【96. 指考】

- (A) 另一端為閉口，基頻為 100 Hz (B) 另一端為閉口，基頻為 200 Hz (C) 另一端為開口，基頻為 100 Hz (D) 另一端為開口，基頻為 200 Hz (E) 另一端可以為開口，也可以為閉口

答 (C)

(1) 若空氣柱為閉式（一端開口，一端封閉）： $f = \frac{mv}{4L}$ ， $m = 1, 3, 5, \dots$

$$f = f_1, 3f_1, 5f_1, \dots \xrightarrow{\text{〈相鄰〉頻率差}} \Delta f = 2f_1 = 100 \text{ Hz}, f_1 = 50 \text{ Hz}$$

$\therefore (400 \text{ Hz}, 500 \text{ Hz}, 600 \text{ Hz}) = (8f_1, 10f_1, 12f_1) \dots\dots$ 與駐波條件式不合

(2) 若空氣柱為開式（兩端均為開口端）： $f = \frac{nv}{2L}$ ， $n = 1, 2, 3, \dots$

$$f = f_1, 2f_1, 3f_1, \dots \xrightarrow{\text{〈相鄰〉頻率差}} \Delta f = f_1 = 100 \text{ Hz}$$

$\therefore (400 \text{ Hz}, 500 \text{ Hz}, 600 \text{ Hz}) = (4f_1, 5f_1, 6f_1) \dots\dots$ 符合駐波條件，故選(C)。

2-3

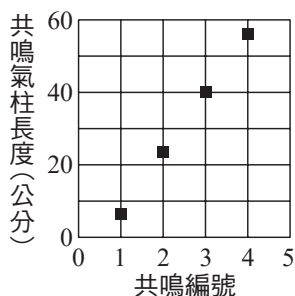
課後練習

單選題

- (D) 1. 在聲速為 350 m/s 的環境中，進行音叉與氣柱的共鳴實驗。從零開始，逐漸增加氣柱長度，並將測得共鳴時的氣柱長度，依時間的先後順序編號為 1、2、3、4，四次測得之共鳴氣柱長度對編號作圖，如右圖所示。實驗所用的音叉頻率，最接近多少 Hz？

【110. 指考】

(A) 350 (B) 525 (C) 700 (D) 1050 (E) 2000



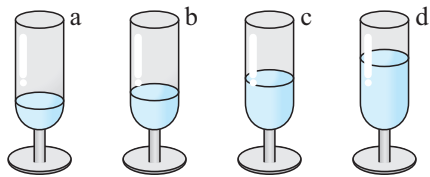
(1. 由於相鄰兩個共鳴點相距為 $\frac{1}{2} \lambda$ ，所以得知波長 $\lambda \approx 41 - 8 = 33 \text{ cm} = 0.33 \text{ m}$ ，故音叉頻率 $f =$

$\frac{350}{0.33} \approx 1060 \text{ Hz}$ ，最接近 1050 Hz，故選(D)。)

2.、3. 題為題組

柯南為了要打開一個音調為 Mi、Sol、Si、Re 的音樂鎖，他取得了四個大小相同的酒杯，倒了四杯酒如右圖。

- (A) 2. 若以嘴唇貼著瓶口吹氣，而得到這四個音調，終於將鎖打開，請問他必須按照什麼順序對酒杯吹氣？



(A) bcda (B) abcd (C) dcba (D) adcb (E) cdba

(2. 空氣柱愈短，所發出的聲音頻率愈高，頻率由低到高為 Re、Mi、Sol、Si，所對應的杯子為 a、b、c、d，根據音調為 bcda。故選(A)。)

- (C) 3. 若以木槌輕敲杯身而得到這四個音調，請問他必須按照什麼順序敲擊杯身？

(A) bcda (B) abcd (C) cbad (D) adcb (E) cdba

(3. 酒杯愈輕，敲擊所發出的聲音頻率愈高，頻率由低到高為 Re、Mi、Sol、Si，所對應的杯子為 d、c、b、a，根據音調為 cbad。故選(C)。)

4.、5. 題為題組

如右圖所示，將一揚聲器置於一管狀物的一端開口處，連續改 ？ 變揚聲器發出的聲頻，發現當頻率為 300 Hz、500 Hz 及 700 Hz 時才會產生共鳴。



- (B) 4. 此管狀物左端屬於？

(A)開管 (B)閉管 (C)無法判定

- (D) 5. 管狀物的基頻為多少 Hz？

(A) 10 (B) 20 (C) 50 (D) 100 (E) 200

(4.、5. 因揚聲器發出連續的聲頻，且僅頻率 300 Hz、500 Hz 及 700 Hz 才會產生共鳴，當基頻為 100 Hz 時，300 Hz 為第三諧音、500 Hz 為第五諧音及 700 Hz 為第七諧音，

滿足閉管駐波頻率 $f_n = \frac{mv}{4\ell}$ ， $m = 1、3、5 \cdots$ ，故 4. 選(B)；5. 選(D)。)

多選題

(A E) 1. 下列有關共鳴的敘述，哪些正確？

- (A)大部分的樂器都有共鳴箱，其目的在藉箱內空氣的共鳴，增強聲音的強度
 (B)在同一介質中，改變聲音的頻率，則波速亦改變 (C)聲音在空氣中傳播時，其傳播方向是朝單一方向 (D)兩發音體要發生共鳴現象必須兩者振動幅度相同
 (E)轉動收音機的調諧盤時，可收到某一電臺的播音，這是應用電波的共鳴
 (1. (B)聲速只跟介質有關；(C)向外散開；(D)振動頻率相同才能共鳴，故選(A)(E)。)

(A D) 2. 某音叉振動可產生 170 Hz 的聲音且聲音波速為 340 m/s，下列哪些管子可與音叉產生共鳴？

- (A) 1 m 的開管 (B) 1 m 的閉管 (C) 1.5 m 的開管
 (D) 1.5 m 的閉管 (E) 2 m 的閉管

$$(2. \text{音叉振動聲音的波長 } \lambda = \frac{v}{f} = \frac{340}{170} = 2 \text{ (m)},$$

因振動頻率相同才能共鳴且聲音波速固定，

$$\text{所以共鳴條件：開管空氣柱長度 } \ell = n \times \frac{\lambda}{2} = n \times \frac{2}{2} = n, n = 1、2、3 \cdots$$

$$\text{閉管空氣柱長度 } \ell = m \times \frac{\lambda}{4} = m \times \frac{2}{4} = \frac{m}{2}, m = 1、3、5 \cdots, \text{故選(A)(D)。}$$

非選題

1. 在一端封閉的玻璃管口上，置一擴音器，並逐次將聲音的頻率調高。則：

- (1) 當頻率為 100 赫時，可發生第一次共鳴，則發生第二次共鳴的頻率應為何值？
 (2) 若空氣中的聲速為 340 公尺/秒，則玻璃管的長度為何？

答：(1) 300 Hz；(2) 0.85 m

$$(1. (1) \text{閉管駐波頻率 } f_n = \frac{mv}{4\ell}, m = 1、3、5 \cdots。$$

$$\text{第一次共鳴：基頻 } f_1 = \frac{v}{4\ell} = 100 \text{ (Hz)}$$

$$\text{第二次共鳴：第一泛音 } f_3 = \frac{3v}{4\ell} = 3f_1 = 300 \text{ (Hz)}$$

$$(2) \text{基頻 } f_1 = \frac{v}{4\ell} \Rightarrow 100 = \frac{340}{4\ell} \Rightarrow \ell = 0.85 \text{ (m)。}$$

2. 共鳴空氣柱實驗時，聲速為 340 公尺/秒，音叉頻率為 340 赫，若僅能找到兩個共鳴點，則玻璃管長之範圍為何？

答：75 cm ≤ ℓ < 125 cm

$$(2. \text{聲音波長 } \lambda = \frac{v}{f} = 1, \text{因為只有兩個共鳴點，故 } \frac{3}{4}\lambda \leq \ell < \frac{5}{4}\lambda \Rightarrow 0.75 \text{ m} \leq \ell < 1.25 \text{ m} \\ \Rightarrow 75 \text{ cm} \leq \ell < 125 \text{ cm。})$$



一、實驗目的

由管內空氣柱的共鳴現象，測定聲波在空氣中行進的速率。

二、實驗說明

本實驗是利用音叉或電子式的聲源產生某一單頻 f 的聲波，並使此聲波與管內適當長度的空氣柱形成駐波，產生聲音加強的共鳴現象。

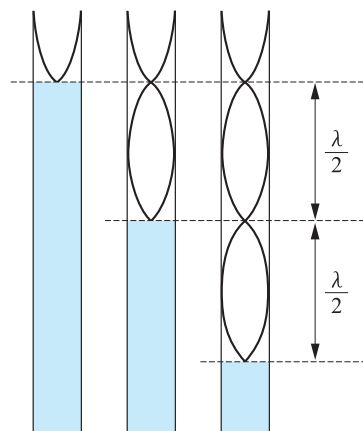
如右圖所示，調整圓柱形玻璃管內的水面高度（或共鳴管內活塞的位置），當聽到聲音產生明顯加強的共鳴現象時，表示此時聲波在管內已形成駐波。測量相鄰的兩個產生明顯共鳴聲音的水面高度，應恰等於聲波波長的二分之一。由聲源的頻率 f 以及實驗測得聲波的波長 λ ，即可得知聲波的波速 v 為

$$v = f\lambda \quad (2-1)$$

已知在溫度 $t^{\circ}\text{C}$ 時，空氣中聲速的理論值為

$$v = (331 + 0.60t) \text{ m/s} \quad (2-2)$$

請以實驗所測得的聲速與理論值做比較，並估計其實驗誤差為何？



▲管長與駐波的關係。

三、實驗步驟

本實驗可以選擇其中一種作為示範實驗，另一種作為學生分組實驗，視學校設備及教學需求選定之。

【方法一】

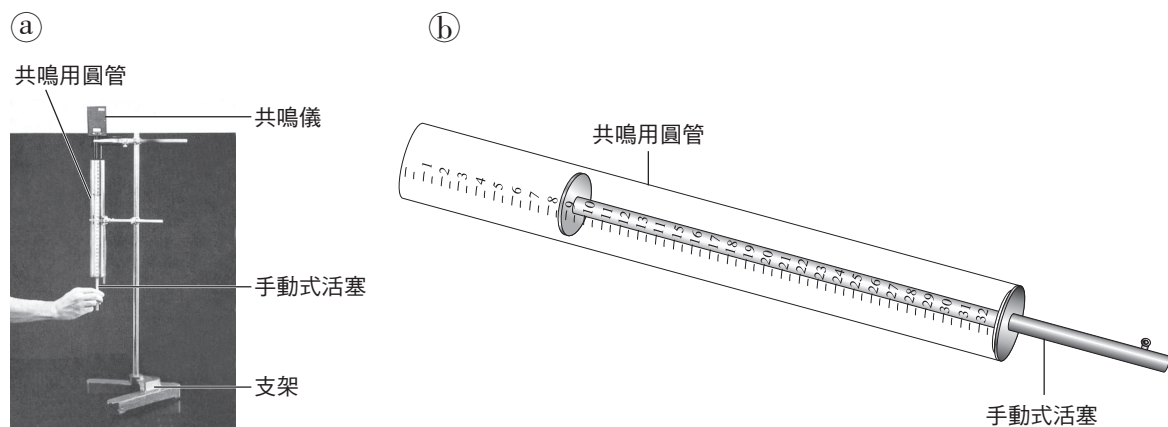
- (1) 將數條橡皮圈事先套在圓柱玻璃管上，作為記錄水面高度之用。
- (2) 置蓄水器於支架上的最低位置，然後將蓄水器裝滿水，再慢慢提高蓄水器，直至玻璃管內的水面接近管口的零刻度處。
- (3) 手持音叉與玻璃管保持適當距離，用橡皮槌敲擊音叉，使其振動（避免敲擊音叉時，不慎衝撞玻璃管而將其敲破）。
- (4) 隨即將音叉移近玻璃管口上方約 1 至 2 公分處，如右圖所示，並使音叉振動的方向與管長方向平行。
- (5) 手持蓄水器緩緩下降，則管內的水面也隨之緩緩下降，即可使管內空氣柱的長度慢慢增加。當聽到共鳴聲音為最大時，用橡皮圈標記此水面的位置（建議在此位置附近升降水面數次，以定出精確的共鳴位置）。



- (6) 再將蓄水器降低，按照方法(5)找尋其他的共鳴位置，直至管內的水面下降至最低為止。
- (7) 記錄所有的共鳴位置，求出聲波的波長 λ ，並由(2-1)式計算聲速。記錄當時的溫度，利用(2-2)式算出當時聲速的理論值，與實驗結果相互比較。
- (8) 以不同頻率的音叉重複實驗步驟(2)至步驟(7)。

【方法二】

- (1) 將共鳴用的塑膠圓筒和電子式音源安裝在支架上，如下圖所示，並使電子式音源發聲口的末端置於塑膠圓筒的開口處。



▲共鳴管的實驗：①共鳴管實驗儀器的裝配圖；②共鳴用圓管的放大圖。

- (2) 拉動共鳴管內的手動式活塞，使其上升至接近筒口的零刻度處。
- (3) 按下電子式音源的切換開關，使之發出聲波。這時將共鳴管內的活塞慢慢拉下，使圓筒內的空氣柱長度慢慢地增加。當找到共鳴聲音最大時，記錄此位置（建議在此位置附近升降活塞數次，以定出精確的共鳴位置）。
- (4) 再將活塞往下拉，按照同樣的方法找尋其他的共鳴位置，直至活塞降至最低點為止。
- (5) 記錄所有的共鳴位置，求出聲波的波長 λ ，並由(2-1)式計算聲速。記錄當時的溫度，利用(2-2)式算出當時聲速的理論值，與實驗結果相互比較。

四、實驗問題回答

問題 2-1 就實驗中所使用的共鳴管而言，能使其產生共鳴現象時，所使用音叉的最低可能頻率為何？

答：當水面降至最低處時，共鳴管的空氣柱長度約為 1.0 m，故在最低頻率時，管中空氣柱的長度約等於波長 λ 的四分之一，因此 $\lambda = 4.0 \text{ m}$ 。已知在氣溫 15°C 時的聲速 v 為 340 m/s ，故能使音叉產生共鳴的最低頻率為 $f = \frac{v}{\lambda} = \frac{340 \text{ m/s}}{4.0 \text{ m}} = 85 \text{ Hz}$ 。

問題 2-2 如何利用本實驗的結果，來測知一未知音叉的頻率？

答：先利用已知頻率 f_0 的音叉與共鳴管產生共鳴後，求得所生駐波的波長 λ_0 。再以未知頻率 f 的音叉與共鳴管產生共鳴後，求得駐波的波長 λ 。由於聲速相同，故可以利用 $v = f\lambda$ ，得 $f_0\lambda_0 = f\lambda$ ，則未知音叉的頻率為 $f = \frac{f_0\lambda_0}{\lambda}$ 。

問題 2-3 實驗中，為何音叉振動時不可碰及玻璃管？

答：實驗的目的是觀察音叉發出的聲音與管內空氣柱產生共鳴的現象，若在實驗中音叉振動撞擊玻璃管，玻璃管也會產生振動而發聲，將會影響實驗的觀察。此外也可避免敲擊音叉時，可能會不慎撞擊到玻璃管口而將其敲破。

問題 2-4 就實驗中所使用的共鳴用塑膠圓筒而言，能使其產生共鳴，電子式音源的最低可能頻率為何？

答：將活塞拉至最底端時，圓筒內的空氣柱長度即為管長 L 。故在最低頻率時，筒中空氣柱的長度約等於波長 λ 的四分之一，即 $\lambda = 4L$ 。若聲速為 v ，則能使其產生共鳴的電子式音源的最低頻率為 $f = \frac{v}{\lambda} = \frac{v}{4L}$ 。

問題 2-5 本實驗的聲源不使用音叉，而改使用電子式音源，有何優點？

答：其優點為可產生連續不中斷的聲波，而且有些電子式音源可以調整其發聲頻率。

問題 2-6 若使用頻率較高的音源，則所得共鳴的位置將會如何改變？

答：在溫度不改變的情況下，聲速亦不改變，由 $v = f\lambda$ 可知，當使用頻率較高的音叉時，波長會變短，相鄰兩波節間的距離會變小，故所得共鳴的位置會提高，且共鳴位置可能會增多。

實驗

2

實驗試試看



單選題

- (D) 1. 在「共鳴空氣柱」實驗中，下列敘述何者正確？

(A)蓄水器注水時，應把蓄水器置於最高位置，將蓄水器充滿水 (B)實驗時，音叉要輕觸透明管之管口 (C)判斷空氣柱是否產生共鳴的方法，是觀察水面是否產生劇烈振盪 (D)改用頻率較高的音叉做實驗時，共鳴點的個數可能增多，不可能減少 (E)對於同一頻率的音叉，測得的共鳴點位置應與實驗室溫度無關

(1. (A)蓄水器注水時，應把蓄水器置於最低位置將其充滿水後再將蓄水器往上移；(B)音叉碰觸玻璃管口，可能撞裂玻璃管；(C)以聽聲音的大小判斷共鳴與否；(D) f 增加，波長 λ 減少，節點增加；(E) $v = 331 + 0.6t$ ； $331 + 0.6t = f \times \frac{4\ell}{2n-1}$ 。所以溫度改變，共鳴氣柱長度 ℓ 改變，共鳴點的位置也改變，故選(D)。)

- (D) 2. 某生以直立、盛水的共鳴管進行空氣中聲波速率測量之實驗。當共鳴管中水面接近管口時，在管口外敲擊音叉，並逐漸降低水面。當水面降至與管口距離為 H_1 、 H_2 、 H_3 的時候，分別聽到第一、第二、第三次的共鳴聲響，則下列何者最接近當時聲波的波長？

【104. 指考】

(A) H_1 (B) $2H_1$ (C) $H_2 - H_1$ (D) $H_3 - H_1$ (E) $\frac{H_3 - H_1}{2}$

(2. 由於共鳴空氣柱內兩次共鳴位置相差約為半個聲波波長，故 $H_3 - H_1$ 最接近當時聲波的波長，故選(D)。)

- (D) 3. 在作「共鳴空氣柱」實驗時，使用音叉頻率 450 Hz，水面由管口開始下降至離管口 18 cm 時，出現第一次共鳴響聲，當水面下降至離管口 56 cm 時，出現第二次的共鳴響聲，則當時音速為多少 m/s？

(A) 324 (B) 333 (C) 337 (D) 342 (E) 350

(3. $\frac{\lambda}{2} = 56 - 18 \therefore \lambda = 76 \text{ (cm)} = 0.76 \text{ (m)}$ ， $v = 0.76 \times 450 = 342 \text{ (m/s)}$ ，故選(D)。)

- (D) 4. 聲波在空氣柱內重疊時，可以形成駐波。考慮聲波在一端開口、一端閉口的空氣柱內所形成的駐波，並將聲波視為傳遞空氣分子位移變動的縱波時，下列關於駐波特性的敘述，何者正確？

【108. 指考】

(A)開口處為波節 (B)在閉口處發生建設性疊加 (C)相鄰兩波節的間距為一個波長 (D)相鄰波節與波腹的間距為 $\frac{1}{4}$ 波長 (E)該駐波是由沿相同方向前進的兩波互相重疊而成

(4. (A)在開口處附近為波腹；(B)因在閉口介質無法振動，故發生破壞性疊加；(C)相鄰兩波節的間距為 $\frac{1}{2}\lambda$ ；(E)駐波是由沿相反方向前進的兩波互相重疊而成。故選(D)。)

多選題

- (B C) 1. 在「共鳴空氣柱」的實驗中，假定所使用的玻璃管長為 80 公分，音叉頻率為 680 赫。實驗當時的聲速為 340 公尺/秒，則下列敘述哪些正確？

D

- (A)作實驗時，音叉要貼著管口 (B)如果實驗情況良好，至少可找到 3 處共鳴點
(C)相同的儀器設備，在不同的時間作實驗，由於溫度變化的關係，共鳴點的位置會有改變 (D)同一時間同一地點，不同儀器設備所測得的聲速應相等 (E)管口處一定是駐波的波腹位置

(1. (A)音叉不可太近管口，以免觸及玻璃管而破裂，約距管口 1 ~ 2 公分左右；(B) $\lambda = \frac{340}{680} = 0.5 \text{ m} = 50 \text{ cm}$ ， $\frac{\lambda}{4} (2n - 1) \leq 80 \quad \therefore n = 1, 2, 3$ ；(C)共鳴點的位置會隨溫度而變；(E)若音叉距管口一段距離，此時管口處就不是駐波的波腹位置，故選(B)(C)(D)。)

非選題

1. (1) 在「共鳴空氣柱」的實驗中，決定共鳴位置時，音叉振動的方向最好為何？為什麼？
(2) 若共鳴管的長度為 1.2 公尺，則所使用音叉的最低頻率為多少？
(設聲速為 336 公尺/秒)

答：(1)與玻璃管平行，因為聲音為縱波；(2) 70 Hz

(1. (1)音叉振動方向需與玻璃管平行，因為聲音為縱波。

(2)因管口腹點至水面節點的最短距離為 $\frac{\lambda}{4}$ ，故管長 $\ell \geq \frac{\lambda}{4}$

$\therefore \lambda \leq 4\ell \Rightarrow \text{音叉頻率 } f = \frac{v}{\lambda} \geq \frac{v}{4\ell} = \frac{336}{4 \times 1.2} = 70 \text{ (Hz)}。$)

學習成效診斷

單選題

- (D) 1. 已知音階上中央 C 的頻率為 262 Hz，每升高 n 個八度音，聲音頻率就變為原來的 2^n 倍。當聲速為 340 m/s 時，若欲用兩端開口的管子作成管風琴，在僅考慮基音頻率的情況下，其能彈奏的最高音為中央 C 升高兩個八度音，則最短管子的長度最接近多少 cm？ 【107. 指考】

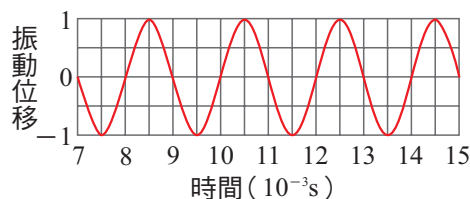
(A) 28 (B) 24 (C) 20 (D) 16 (E) 12

(1. 若由兩端開口的管子作成管風琴基音頻率 $f_1 = \frac{v}{2\ell} \Rightarrow 262 = \frac{340}{2\ell} \Rightarrow \ell = 0.649 \text{ (m)} = 64.9 \text{ (cm)}$ 。

因升高兩個八度音，聲音頻率就變為原來的 $2^2 = 4$ 倍，且基音頻率 $f_1 = \frac{v}{2\ell} \propto \frac{1}{\ell}$ ，

2. ~ 5. 題為題組 故開管的長度變成原來的 $\frac{1}{4}$ 倍，即 $\ell' = \frac{1}{4} \ell = \frac{1}{4} \times 64.9 = 16.225 \approx 16 \text{ (cm)}$ ，故選(D)。

某音叉振動所產生的聲波在大氣中傳播時，空氣分子的振動位移隨著時間的變化如右圖所示，利用此音叉可於兩端開口的開管空氣柱中形成共鳴。若波速為 340 m/s，則：



- (D) 2. 音叉在大氣中的聲波波長為多少 m？

(A) 0.17 (B) 0.34 (C) 0.51 (D) 0.68 (E) 0.85

(2. 由圖可知音叉週期 $T = 2 \times 10^{-3}$ 秒，故音叉頻率 $f = 500 \text{ Hz}$ ，空氣中的音波頻率也是 500 Hz；

大氣中聲波波長 $\lambda = \frac{v}{f} = \frac{340}{500} = 0.68 \text{ (m)}$ ，故選(D)。

- (B) 3. 在開管空氣柱中，相鄰兩位移波腹的間距為多少 m？

(A) 0.17 (B) 0.34 (C) 0.51 (D) 0.68 (E) 0.85

(3. 在開管空氣柱中，相鄰兩波腹的間距 = 半波長長度 = 0.34 m，故選(B)。

- (B) 4. 要形成共鳴，開管的長度最短可為多少 m？

(A) 0.17 (B) 0.34 (C) 0.51 (D) 0.68 (E) 0.85

(4. 因開管的兩端附近為波腹，若要形成共鳴，則開管的管長 $L = n \frac{\lambda}{2}$ ，所以最短為 0.34 (m)，故選(B)。

- (C) 5. 下列有關此空氣柱的敘述，何者正確？

(A)兩端均為空氣介質位移的波節 (B)一端為空氣介質位移的波節、一端為空氣介質位移的波腹 (C)兩端均為空氣介質位移的波腹 (D)兩端均為空氣介質壓力變化的波腹 (E)一端為空氣介質壓力的波節、一端為空氣介質壓力的波腹

(5. 開口處空氣振動的最劇烈，故為振動的波腹處；開口處的氣壓等於環境的大氣壓，故為壓力的波節處，故選(C)。

6. ~ 8. 題為題組

下表為聲波在不同介質的速率，若聲波速率在液體與固體中隨溫度的變化極小。

▼各種介質中的聲速。

氣體		液體（25℃）		固體	
介質	聲速（m/s）	介質	聲速（m/s）	介質	聲速（m/s）
氫氣（0℃）	1286	甘油	1904	鋁	6420
氮氣（0℃）	972	海水	1533	鐵	5950
空氣（20℃）	343	水	1493	耐熱玻璃	5640
空氣（0℃）	331	汞	1450	銅	5010
氧氣（0℃）	317	煤油	1324	青銅	4700
		甲醇	1143	金	3240
		四氯化碳	926	鉛	1960
				橡膠	1600

（ E ） 6. 聲波波長在煤油中大約是 0℃ 空氣的多少倍？

(A) 0.25 (B) 0.5 (C) 1

(D) 2 (E) 4

（ 6. $\frac{\lambda_{\text{煤油}}}{\lambda_{\text{空氣}}} = \frac{v_{\text{煤油}}}{v_{\text{空氣}}} = \frac{1324}{331} = \frac{4}{1}$ ，故選(E)。 ）

（ E ） 7. 今將 100 Hz 的聲波由 0℃ 空氣環境進入 25℃ 煤油中，則聲波在煤油中的波長約為多少公尺？

(A) 3.3 (B) 6.6 (C) 8.8

(D) 10.2 (E) 13.2

（ 7. $\lambda_{\text{煤油}} = \frac{v_{\text{煤油}}}{f_{\text{空氣}}} = \frac{1324}{100} = 13.24 \approx 13.2$ （m），故選(E)。 ）

（ B ） 8. 承 7.，理論上若聲波入射角的正弦值為 $\frac{1}{8}$ ，則折射的角度為何？

(A) 15° (B) 30° (C) 37°

(D) 53° (E) 60°

（ 8. $\frac{\sin \theta_{\text{煤油}}}{\sin \theta_{\text{空氣}}} = \frac{v_{\text{煤油}}}{v_{\text{空氣}}} = \frac{1324}{331} = \frac{4}{1} \Rightarrow \sin \theta_{\text{煤油}} = 4 \sin \theta_{\text{空氣}} = 4 \times \frac{1}{8} = \frac{1}{2} \Rightarrow \theta_{\text{煤油}} = 30^\circ$ ，故選(B)。 ）

9.、10. 題為題組

兩端固定的一條鋼琴線長 50 公分，質量為 5 克，線上之張力為 100 牛頓，若其基音可與某一開管的第一泛音恰能產生共振（聲速為 340 公尺/秒），則：

(B) 9. 琴弦的波速為多少 m/s ？

(A) 50 (B) 100 (C) 150 (D) 200 (E) 400

$$(9. \text{ 琴弦波速 } v = \sqrt{\frac{F}{\mu}} = \sqrt{\frac{100}{\frac{5 \times 10^{-3}}{0.5}}} = 100 \text{ (m/s)}, \text{ 故選(B)。})$$

(E) 10. 共鳴管的長度為多少 m/s ？

(A) 0.5 (B) 1 (C) 1.7 (D) 2 (E) 3.4

$$(10. \text{ 兩端固定之弦可成駐波頻率 } f_n = \frac{nv}{2\ell} \Rightarrow \text{基音 } f_1 = \frac{1 \times 100}{2 \times 0.5} = 100 \text{ (Hz)},$$

$$\text{開管的駐波頻率 } f_m' = \frac{mv'}{2\ell} \Rightarrow \text{第一泛音 } f_2 = \frac{2 \times 340}{2 \times \ell},$$

$$\text{兩者頻率相同時產生共振，所以 } \frac{2 \times 340}{2 \times \ell} = 100 \Rightarrow \ell = 3.4 \text{ m, 故選(E)。})$$

11.、12. 題為題組

共鳴空氣柱實驗時，聲速為 340 公尺/秒，音叉頻率為 340 赫，若玻璃管長為 125 公分，則：

(D) 11. 實驗過程中，改變水面的位置，最多能找到幾個共鳴位置？

(A) 0 (B) 1 (C) 2 (D) 3 (E) 4

$$(11. \frac{n}{4} \lambda \leq \ell \Rightarrow n = \frac{4\ell}{\lambda} = \frac{4 \times 1.25}{1} = 5$$

因 n 為奇數，即 $n = 1, 3, 5$ ，共三個共鳴位置，故選(D)。)

(C) 12. 下列哪一個音叉頻率，可以與完全無水的空氣柱產生共鳴現象？

(A) 17 (B) 34 (C) 68 (D) 85 (E) 170 Hz

$$(12. f = \frac{nv}{4\ell} = \frac{n \times 340}{4 \times 1.25} = 68n, n = 1, 3, 5, \dots, \text{ 故選(C)。})$$

13. ~ 15. 題為題組

一管樂器，今測得管內空氣僅有 258 赫、430 赫、602 赫三個共鳴頻率，但此三頻率均非空氣振動基頻。若空氣聲速為 344 公尺/秒，則：

(D) 13. 下列哪一個有可能是管樂器的基頻？

(A) 17 (B) 34 (C) 43 (D) 86 (E) 129

(13. ~ 15.

$$\begin{array}{r|l} 2 & 258, 430, 602 \\ 43 & 129, 215, 301 \\ \hline & 3, 5, 7 \end{array}$$

13. 由上式可知，滿足題目條件的基頻為 86Hz；

14. 因為 n 為奇數，故為閉管樂器；

$$15. \because f_1 = 86 = \frac{344}{4\ell} \Rightarrow \ell = 1 \text{ (m)}.$$

故 13. 選(D)；14. 選(B)；15. 選(B)。)

(B) 14. 此管樂器屬於_____管樂器？

(A)開 (B)閉

(B) 15. 此管樂器的管長為多少公尺？

(A) 0.5 (B) 1.0 (C) 1.5 (D) 2.0 (E) 2.5

多選題

- (B C) 1. 一孤立在空氣中的點波源，發出固定頻率的聲波，每週期輸出的平均功率不變。
E

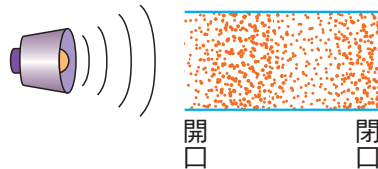
假設聲波能量沒有轉換為其他形式的能量，則對於球心均位於點波源，但半徑分別為 R 與 $2R$ 的甲、乙兩個球面而言，下列敘述哪些正確？ 【101. 指考】

- (A)在甲、乙兩球面處的聲波波長比為 1:2 (B)在甲、乙兩球面處的聲波波長比為 1:1 (C)每週期內通過甲、乙兩球面的聲波總能量相等 (D)甲、乙兩球面單位面積通過的聲波能量，彼此相等 (E)甲、乙兩球面單位面積通過的聲波能量，其比為 4:1

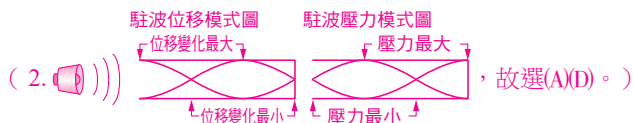
(1. (A)(B)聲波在同一介質中的速率相同，由 $\lambda = \frac{v}{f}$ 可知在甲、乙兩球面處的聲波波長比為 1:1；

(C)(D)(E)通過甲、乙兩球面的頻率(週期)相同，所以甲乙兩平面每週期所接收到的總能量 E 相同，但是單位面積所接收到的能量 $\varepsilon = \frac{E}{4\pi r^2} \propto \frac{1}{r^2}$ ，因此甲乙兩球面單位面積通過的聲波能量，其比為 4:1，故選(B)(C)(E)。)

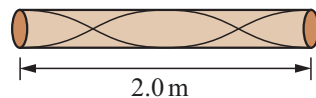
- (A D) 2. 取一內有空氣，長 ℓ 的管子（如右圖中管內的小點代表空氣質點），管的左端開口，右端封閉，有一固定頻率 f 的揚聲器，使管內空氣振動發生共鳴時，某瞬間的管內氣體分布如右圖所示。下列敘述哪些正確？



- (A)此時左端開口處壓力最小 (B)此時左端開口處壓力最大 (C)此時右端閉口處壓力最小 (D)此時右端閉口處壓力最大 (E)此時左端開口處氣體分子位移最大



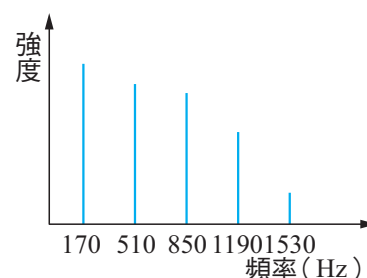
- (A E) 3. 一長度 2.0 m 的細管，若管內空氣柱的位移波產生駐波的波形如右圖所示，當時室溫 15 °C，試問下列何者正確？



- (A)細管的兩端均為開口 (B)細管的一端為開口、另一端為閉口 (C)產生圖中駐波的聲波，其頻率為 340 Hz (D)圖中聲波波長為 1.0 m (E)在此細管中產生駐波的最低頻率為 85 Hz

(3. (A)(B)細管的兩端均為波腹，故為兩端均為開口；(C)(D)聲速 $v = 331 + 0.6 \times 15 = 340$ (m/s)，由圖知 $\lambda = 2.0$ m， $\therefore f = \frac{340}{2} = 170$ (Hz)；(E)基頻為 $f_1 = \frac{v}{2\ell} = \frac{340}{2 \times 2.0} = 85$ (Hz)，故選(A)(E)。)

- (A B) 4. 某管狀樂器所產生的聲音，不同頻率的強度分布（頻譜）如右圖。則下列何者正確？



- (A)由圖可推論該樂器屬於閉管
(B)若聲速為 340 米/秒，則管子的長度約為 0.5 米
(C) 510 Hz 為樂器的第二諧音
(D)此管樂器所發出的音色，僅是由頻率 170 Hz 的聲音所決定
(E)若溫度不變，此樂器亦可能發出頻率 1700 Hz 的聲音

(4. (A)因其基頻為 170 Hz，泛音分別是 510 Hz，850 Hz，1190 Hz，1530 Hz，恰為 1 : 3 : 5 : 7 : 9，故必為一端開口，一端封閉的管子；

$$(B) f_1 = \frac{v}{4\ell} \Rightarrow \frac{v}{4f_1} = \frac{340}{4 \times 170} = \frac{1}{2} \text{ (m)} ;$$

(C)應為第一泛音（第三諧音）；

(D)音色是由基頻與所有的泛音一起決定的；

(E) 1700 Hz 是基頻 170 Hz 的 10 倍，此泛音不可能出現，故選(A)(B)。)

- (B C) 5. 在共鳴空氣柱實驗中，下列敘述哪些錯誤？

E

- (A)蓄水器注水時，應把蓄水器置於最低位置，將蓄水器充滿水
(B)實驗時，音叉要輕觸透明管之管口
(C)判斷空氣柱是否產生共鳴的方法，是觀察水面是否產生劇烈振盪
(D)改用頻率較高的音叉做實驗時，共鳴點的個數可能增多，不可能減少
(E)對於同一頻率的音叉，測得的共鳴點位置應與實驗室溫度無關

(5. (A)若將蓄水器充滿水，置於最高位置，蓄水器下移時，水會溢出；

(B)音叉若觸及管口，音叉的振動會造成玻璃管破裂；

(C)共鳴時會產生極大的聲響，故與水面是否劇烈振盪無關；

$$(D) \text{一端封閉、一端開口的共鳴頻率 } f = \frac{v}{4\ell} (2n - 1), f \text{ 增大, } n \text{ 會增加；}$$

(E)溫度升高，聲速增大；

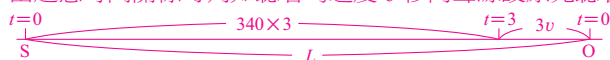
由 $f = \frac{v}{4\ell} (2n - 1)$ ，在相同的頻率下，可得知 v 增大，共鳴點數目 n 會減少，故選(B)(C)(E)。)

非選題

1. 一個在聽者西邊的聲源沿 x 軸向東以 40 m/s 作等速運動，在時刻 $t = 0.0 \text{ s}$ 與 $t = 7.0 \text{ s}$ 發出的聲波，經靜止空氣傳播，分別於時刻 $t = 3.0 \text{ s}$ 與 $t = 9.0 \text{ s}$ 時，到達沿 x 軸以等速度 v 運動的聽者。若空氣中的聲速為 340 m/s ，則聽者的速度為何？

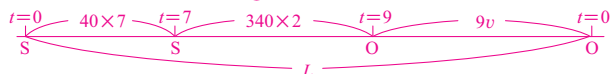
答： 10 m/s (向西)

(1. 由題意時間關係可判知聽者的速度 v 移向聲源設原先聽者和聲源相距 L



$t = 0$ 秒發出的聲波，聽者於 $t = 3$ 秒接收到，則

$$L = 340 \times 3 + 3v \cdots \textcircled{1}$$



$t = 7$ 秒發出的聲波，聽者於 $t = 9$ 秒接收到， $L = 40 \times 7 + 340 \times 2 + 9v \cdots \textcircled{2}$

由①及②得 $v = 10 \text{ m/s}$ ($-x$ 方向)，即 $v = -10 \text{ m/s}$ 。負號代表向西。)

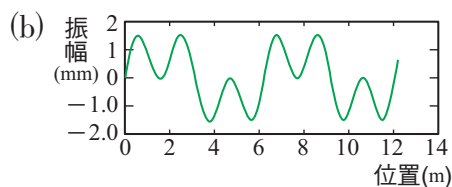
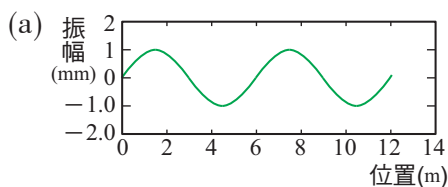
2. 某生作「共鳴空氣柱」實驗時，玻璃管的長度為 0.50 公尺，今某生先取頻率 300 Hz 的音叉 A 做實驗，測得只有當空氣柱長為 0.40 公尺時，共鳴音量最大。再取音叉 B 作實驗，測得只有當空氣柱長為 0.20 公尺時，共鳴音量最大，則 B 音叉的頻率為何？(設管口處恰為駐波波腹)

答： 600 Hz

(2. 因管口處恰為駐波波腹且僅有一個共鳴位置，故 $\ell_A = \frac{1}{4} \lambda_A$ 且 $\ell_B = \frac{1}{4} \lambda_B$

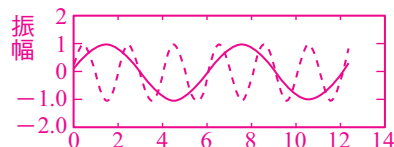
$$\text{因聲速不變，故 } \frac{f_B}{f_A} = \frac{\lambda_A}{\lambda_B} = \frac{4\ell_A}{4\ell_B} \Rightarrow \frac{f_B}{300} = \frac{0.4}{0.2} \Rightarrow f_B = 600 (\text{Hz})$$

3. 圖(a)為小提琴發出基音頻率 $f = 100 \text{ Hz}$ 的位置與振幅關係圖，圖(b)為此樂器的某一泛音與圖(a)基音混合合成波形，若此未知泛音的振幅與基音的振幅相同，求此泛音為此樂器的第幾泛音？



答： 第二泛音

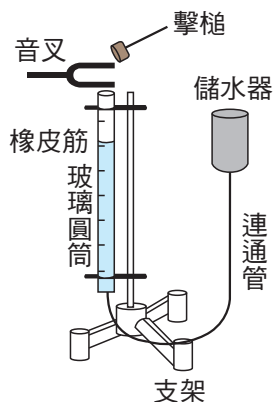
- (3. 由圖(b)混合波形可判斷泛音的波長為基音的 $\frac{1}{3}$ 倍，由 $f = \frac{1}{T} = \frac{v}{\lambda}$ 知，泛音頻率為基音的 3 倍，即此泛音為此樂器的第二泛音。)



混合題

某生在物理實驗室做「氣柱的共鳴」實驗，儀器裝置如右圖所示，包括鉛直豎立的細玻璃圓筒、儲水器、連通管、支架、音叉、擊槌、橡皮筋等。細玻璃圓筒的管長約 75 cm，其上並附有刻度尺，且玻璃圓筒的管口位置刻度為零。將頻率為 620 Hz 的振動音叉置於管口上方，再上下移動儲水器以調整玻璃圓筒中的水面高低，實驗上測得產生共鳴的水面刻度有三，分別為 13.0、41.0 與 69.0 cm。

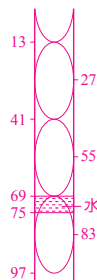
【100. 指考改】



1. 依據短文中所給定產生共鳴時水面刻度的實驗數據，畫出玻璃圓筒中空氣分子的位移出現波腹與波節的位置，並標示其刻度。

答：如解析圖所示

(1. 波節出現的位置為管口下方 13.0、41.0 與 69.0 cm 處，波腹出現的位置為管口下方 27.0、55.0 cm 處。)



- (D) 2. 依據短文中所給定產生共鳴時水面刻度的實驗數據，當時的聲速約為多少 m/s？
(單選)

(A) 330 (B) 336 (C) 340 (D) 347 (E) 366

(2. 由數據知 $\frac{\lambda}{2} = 41 - 13 = 69 - 41 = 28 \text{ (cm)} \Rightarrow \lambda = 56 \text{ (cm)}$ ，
 $v = f\lambda = 620 \times 0.56 = 347.2 \text{ (m/s)}$ 。故選(D)。)

3. 承 2.，物理實驗室的溫度約為 _____ °C。

答：27

(3. $v = 347.2 = 331 + 0.6t$ ， $t = 27 \text{ °C}$ 。)

4. 若使用某一音叉卻始終無法找到任何共鳴的位置，應該是什麼原因造成的？

答：見解析

(4. 管口腹點至水面節點最短距離為 $\frac{\lambda}{4}$ ，空氣柱太短或音叉頻率太低時，無法形成共鳴。)

科學素養新焦點



地震時會同時產生 P 波與 S 波，P 波是縱波，其波速約為 9000 m/s，S 波是橫波，其波速約為 5000 m/s。1999 年 9 月 21 日在臺灣中部山區發生芮氏規模 7.3 的逆斷層型地震，造成臺灣全島均感受到嚴重搖晃，共持續約 102 秒，乃臺灣自二戰後傷亡損失最大的自然災害。震央位於北緯 23.85 度、東經 120.82 度，處於南投縣集集鎮境內，震源深度約 8.0 公里。該地震肇因於車籠埔斷層的錯動，並在地表造成一長達 85 公里的破裂帶，俗稱「921 大地震」。

- (D) 1. 若震源正上方的居民會感受到兩次震動，則其時間差大約多少秒？（單選）

(A) 0.22 (B) 0.43 (C) 0.58 (D) 0.71 (E) 0.96

(1. 時間差 $\Delta t = \frac{d}{v_s} - \frac{d}{v_p} = \frac{8000}{5000} - \frac{8000}{9000} = 0.71 \text{ (s)}$ ，故選(D))

- (D) 2. 某觀測站 A 在此次大地震中測得 P 波抵達後的 12 秒，S 波也抵達，若這兩種波沿著同一直線路徑由震源傳到觀測站，則震源與觀測站 A 的距離約為多少公里？（單選）

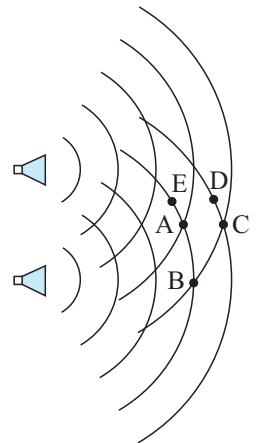
(A) 8 (B) 60 (C) 90 (D) 135 (E) 255

(2. 令震源與觀測站的距離為 x ， $\frac{x}{5000} - \frac{x}{9000} = 12 \Rightarrow x = 135000 \text{ (m)} = 135 \text{ (km)}$ ，故選(D))

- (D E) 3. 若觀測站 A 偵測到大地震的 P 波時，可立即發出地震警報，提醒居民緊急疏散。假設觀測站 A 有兩個高功率的地震警報器（相距 100 公尺），且兩地震警報器同時以同方式發出同頻率、同強度的同相聲波。圖中弧線表示某瞬間由波峰所形成的波前，而 A、B、C、D、E 代表五個住家的位置。那些住家比較無法順利接收到地震警報？（多選）

(A) A (B) B (C) C (D) D (E) E

(3. A、B、C 三點為腹點，屬建設性干涉，聲音極強。D、E 兩點為節點，屬破壞性干涉，聲音極弱。故選(D)(E))



- (A C) 4. 承 3.，若聲音的速率為 340 公尺/秒，且地震警報的頻率為 68 Hz，則無法順利接收到地震警報的住家（聲波涵蓋區）到兩警報器的距離差可能為多少公尺？（多選）

(4. 聲波波長 $\lambda = \frac{v}{f} = \frac{340}{68} = 5 \text{ (m)}$ ；無法順利接收到地震警報，即住家在完全破壞性干涉的位置，故波程差 $|PS_1 - PS_2| = (n - \frac{1}{2})\lambda = (n - \frac{1}{2}) \times 5$ ， $n = 1, 2, 3, \dots$ ，故選(A)(C))

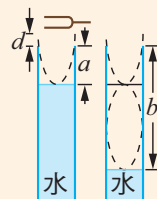
5. 會造成某些住家無法順利接收到地震警報的情形，為波的哪一種特性所形成？

答：波的干涉現象

(5. 波的干涉特性會造成建設性干涉的極強聲音
較強與破壞性干涉的極弱聲音。)

在進行空氣柱共鳴實驗時，管口端並非波腹位置，而第 1 個波腹實際位置在管口上方一小段距離 d 處，為了正確找出 d 的值，我們可以不同頻率 f 之音叉作實驗，由管口量到第 1 個共鳴位置距離是 a 。

音叉頻率 f	$f_1 = 85 \text{ Hz}$	$f_2 = 170 \text{ Hz}$	f_3
管口到第 1 個共鳴位置距離 a	90 cm	40 cm	15 cm



6. 請列出 a 、 d 、 v 與 f 之間的關係式。

答： $a + d = \frac{v}{4f}$

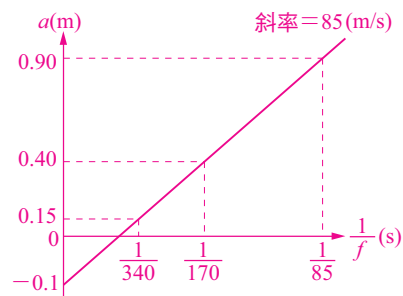
(6. 因相鄰腹點到節點的距離為 $\frac{\lambda}{4}$ ，故 $a + d = \frac{\lambda}{4} = \frac{v}{4f}$ 。)

7. 請畫出 a 與 $\frac{1}{f}$ 之關係圖，並標示斜率與縱軸截距的值。

答： a 與 $\frac{1}{f}$ 之關係圖為直線；斜率為 85 (m/s) ；縱軸截距為 -0.1 m

(7. 如右圖 a 與 $\frac{1}{f}$ 之關係圖為直線；斜率為 $\frac{v}{4} = \frac{0.4 - 0.15}{\frac{1}{170} - \frac{1}{340}} = 85 \text{ (m/s)}$ ；

將 $f = 85 \text{ Hz}$ ， $a = 0.9 \text{ m}$ 代入 $a + d = \frac{v}{4f}$ ，可得縱軸截距為 -0.1 m 。)



8. 利用 7. 的結果，求波腹實際位置與管口的距離 d 。

答：10 cm

(8. 由 6. 可知，波腹實際位置與管口的距離 d 等於縱軸截距的負值。
由 7. 的結果可知 $d = 0.1 \text{ (m)} = 10 \text{ cm}$ 。)

9. 利用 7. 的結果，求當時的溫度。

答：15 °C

(9. 由 7. 的結果可知 $\frac{v}{4} = 85 \Rightarrow v = 340 \text{ (m/s)}$ ，

又聲速 $v = 331 + 0.6t \Rightarrow 340 = 331 + 0.6t \Rightarrow t = 15 \text{ °C}$ 。)