

中華民國第 56 屆中小學科學展覽會

作品說明書

高級中等學校組 物理與天文學科

最佳團隊合作獎

051804

音調的迷思-長笛管中駐波模式之探討

學校名稱：臺中市私立弘文高級中學

作者： 高一 陳映竹 高一 李則甫 高一 吳彤瑋	指導老師： 盧錦玲 張益瑞
---	-----------------------------

關鍵詞：駐波、基音、泛音

摘要

本以為：音調的高低取決於基音的頻率，泛音數目與強度決定音色（音品）。吹長笛時發現，有些音一樣的指法，但用力吹時會是高八度。本實驗結果更正「演奏樂器聽到的頻率是基音頻率」的講法。管樂用力吹時，泛音強度會大於基音，而聽到以泛音頻率為主之音調。長笛一端封閉且從側邊孔吹氣，那駐波的形式又是如何呢？是開管模式還是閉管模式？藉著不同規格的壓克力管，測量兩端開口、短邊封閉或長邊封閉的各種情況下之吹奏頻率，歸納出令人訝異的結果：長笛一端封閉但駐波卻是兩端開管模式。我們對於這種結果也做了推論解答，這種駐波模式也能解釋為何高八度是兩倍頻率的發生，為何不符合一端封閉的管之第一泛音頻率是基音頻率的三倍。

壹、研究動機

在課堂上老師教過：音調的高低取決於基音的頻率，泛音數目與強弱決定音色（音品）。但當我學吹長笛時，發現有些音，一樣的指法，但用力吹時會是高八度音，引發我的好奇。用力吹不是只增加聲音響度嗎？為何音調會改變？

貳、研究目的

長笛一端封閉從側邊孔吹氣，那駐波的形式是如何呢？是開管模式還是閉管模式的駐波，這是我們很想知道的。

參、研究設備及器材

實驗器材如圖 1 所示，安裝 Adobe Audition 測頻率軟體的電腦一部、長笛一支、不同長度及口徑並開有側吹氣孔之壓克力管數支、附有氣壓計及調節器的氧氣筒一組、空氣壓縮機。

實驗裝置如圖 2 所示，以塑膠管連接氧氣筒，使塑膠管接近長笛吹風口時，開啟氧氣筒開關，讓長笛發出聲音，經由 Adobe Audition 軟體測量記錄聲音頻率。



圖 1：實驗器材

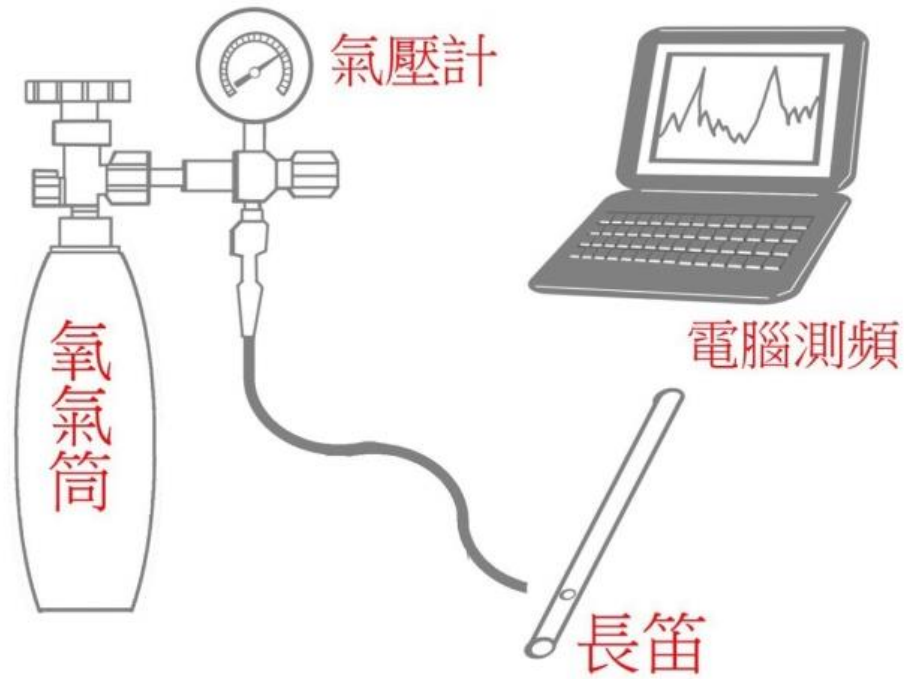


圖 2：實驗裝置

肆、研究過程

一、原理

如圖 3，若一管兩端開口，當縱波由開口傳入時，因開口端附近的空氣振動位移最大，故開口端為波腹。當聲音在管內形成駐波時，波長 λ 與管長 L 必有一關係式：

$$L = \frac{n}{2}\lambda \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

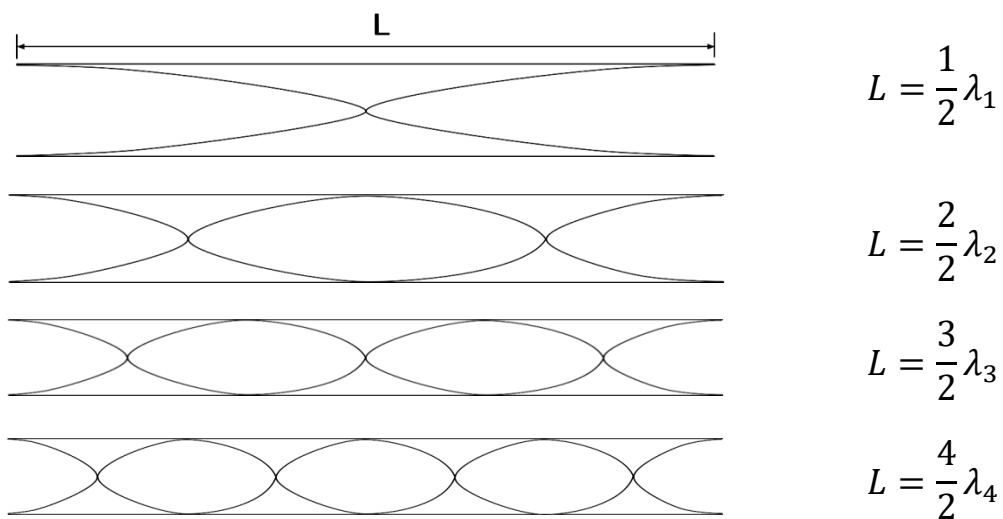


圖 3：開管內空氣柱振動所形成的駐波波形

如圖 4，如果只有一端開口，當縱波由開口傳入到達閉端時反射形成波節。當聲音在管內形成駐波時，波長 λ 與管長 L 必有一關係式：

$$L = m \frac{\lambda}{4}, (m = 1, 3, 5, 7, \dots)$$

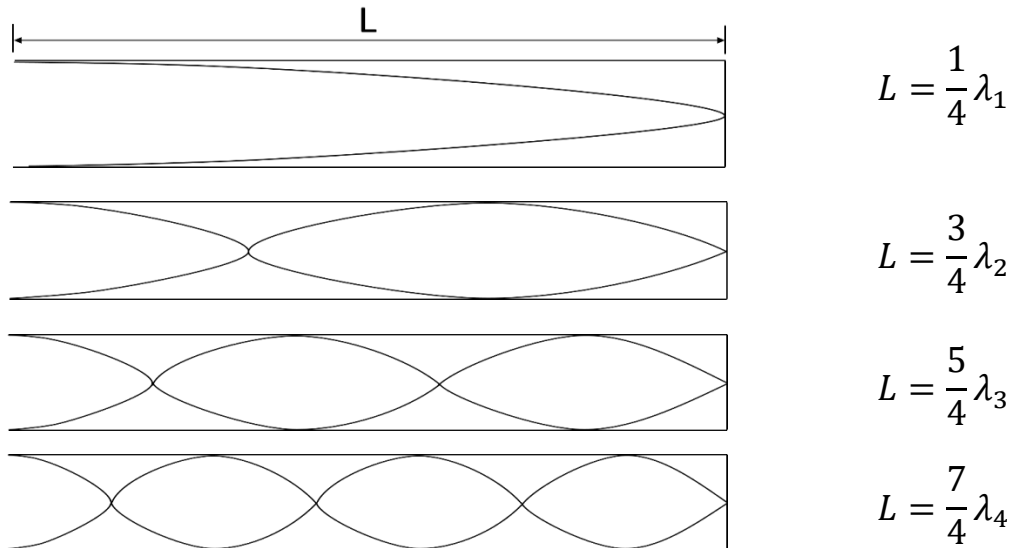


圖 4：閉管內空氣柱振動所形成的駐波波形

二、實驗步驟

(一)訂製相同口徑、側邊有吹氣孔的壓克力管，吹氣孔的位置偏一邊，以吹氣孔為分界，管子兩端離孔較近的稱為短邊，離孔較遠的稱為長邊。取同短邊長度但不同長邊規格的壓克力管吹奏，分別測量兩端皆不封閉、短邊封閉、長邊封閉時的吹奏頻率。

(二)以 Adobe Audition 軟體記錄聲音，讀取頻率數據如圖 5 所示。

(三)同步驟一和步驟二，但取同長邊長度但不同短邊規格的壓克力管，測量其在各情況下之吹奏頻率。

(四)以塑膠管對著長笛吹氣孔吹氣，當長笛發出聲音時，改變氧氣流量大小，測量氣流量與音調高低之關係。

(五)以相同指法吹奏長笛，測量 So、La、Si、Do 的中音域及高音域之聲調頻率，探討駐波型態。



圖 5：Adobe Audition 軟體之操作紀錄

伍、研究結果

一、側邊有吹氣孔的壓克力管，吹氣孔的位置離一端保持 7 公分（短邊），另一段（長邊）為 15 公分、17 公分、19 公分、21 公分和 26.5 公分...等五種規格的管子，分別以兩端開口、短邊封閉和長邊封閉的條件下，吹奏壓克力管，測量壓克力管發出的聲音頻率並求出波長，如表 1 所示。

代號	長邊長度	頻率 (Hz)					平均(Hz)	標準差百分比	波長(cm)
r15	15 cm	934.78	940.43	940.54	940.42	940.54	939.34	0.27%	36.54
r17	17 cm	871.07	856.88	868.70	862.97	857.25	863.37	0.75%	39.62
r19	19 cm	777.44	768.90	783.21	781.11	771.43	776.42	0.79%	44.18
r21	21 cm	707.89	713.04	718.72	716.12	717.45	714.64	0.61%	48.00
r26.5	26.5 cm	587.75	589.08	584.69	588.13	584.96	587.17	0.34%	58.41

(a) 兩端開口

代號	長邊長度	頻率 (Hz)					平均(Hz)	標準差百分比	波長(cm)
r15	15 cm	760.31	766.58	776.78	750.91	771.70	765.25	1.32%	44.66
r17	17 cm	730.41	734.22	736.59	728.87	735.57	733.13	0.46%	46.79
r19	19 cm	676.55	677.48	669.70	683.24	689.12	679.22	1.08%	50.50
r21	21 cm	640.36	647.31	653.59	648.41	646.58	647.25	0.73%	53.00
r26.5	26.5 cm	552.09	552.60	552.21	552.20	553.62	552.20	0.11%	62.10

(b) 短邊封閉

代號	長邊長度	頻率 (Hz)					平均(Hz)	標準差百分比	波長(cm)
r15	15 cm	1397.14	1385.18	1384.19	1385.28	1375.29	1385.51	0.56%	24.69
r17	17 cm	1292.12	1291.64	1298.34	1292.12	1292.36	1293.32	0.22%	26.52
r19	19 cm	1179.45	1186.94	1186.25	1179.45	1179.82	1182.38	0.33%	29.00
r21	21 cm	1094.34	1091.70	1097.65	1091.51	1098.58	1094.76	0.30%	31.33
r26.5	26.5 cm	889.74	897.36	894.17	891.64	892.85	893.76	0.32%	38.38

(c) 長邊封閉

表 1：吹氣孔離壓克力管一端保持 7 公分，測量不同長邊規格和條件下的吹奏頻率、波長

二、側邊有吹氣孔的壓克力管，吹氣孔的位置離一端保持 21 公分（長邊），另一段（短邊）為 7 公分、10 公分、12 公分和 14 公分...等四種規格的管子，分別以兩端開口、短邊封閉和長邊封閉的條件下，吹奏壓克力管，測量壓克力管發出的聲音頻率並求出波長，如表 2 所示。

代號	短邊長度	頻率 (Hz)					平均(Hz)	標準差百分比	波長(cm)
rc1	7 cm	707.89	713.04	718.72	716.12	717.45	714.64	0.61%	48.00
rc2	10 cm	715.95	725.19	716.28	716.07	716.01	717.90	0.57%	47.78
rc3	12 cm	694.96	696.03	700.32	694.92	698.58	696.96	0.34%	49.21
rc4	14 cm	660.57	669.20	667.01	683.70	677.10	671.52	1.34%	51.08

(a) 兩端開口

代號	短邊長度	頻率 (Hz)					平均(Hz)	標準差百分比	波長(cm)
rc1	7 cm	640.36	647.31	653.59	648.41	646.58	647.25	0.73%	53.00
rc2	10 cm	593.48	594.45	608.35	593.61	594.45	596.87	1.08%	57.47
rc3	12 cm	552.81	561.11	563.77	561.04	564.04	560.55	0.81%	61.19
rc4	14 cm	500.68	501.10	494.33	490.92	482.62	493.93	1.55%	69.44

(b) 短邊封閉

代號	短邊長度	頻率 (Hz)					平均(Hz)	標準差百分比	波長(cm)
rc1	7 cm	1094.34	1091.70	1097.65	1091.51	1098.58	1094.76	0.30%	31.33
rc2	10 cm	1043.90	1049.19	1045.58	1045.01	1045.89	1045.91	0.19%	32.79
rc3	12 cm	1005.88	1018.66	1020.53	1010.27	1020.53	1025.17	0.65%	33.46
rc4	14 cm	958.04	957.97	958.64	958.64	952.34	957.13	0.28%	35.84

(c) 長邊封閉

表 2：吹氣孔離壓克力管一端保持 21 公分，測量不同規格和條件下的吹奏頻率、波長

三、如表 3 所示，吹奏長笛測量 So、La、Si、Do 中音域及高音域的聲調頻率並計算波長，高八度音聲調頻率平均是增為 2.05 倍。

So	頻率 (Hz)					平均 (Hz)	頻率比	波長 (cm)
中音域	384.74	384.33	378.34	375.48	384.96	381.57	2.06	90.68
高音域	789.19	784.27	790.25	786.91	787.87	787.70		43.54

La	頻率 (Hz)					平均 (Hz)	頻率比	波長 (cm)
中音域	436.92	438.86	440.08	439.05	439.60	438.90	2.03	78.83
高音域	893.19	892.06	892.47	894.16	895.93	893.56		38.72

Si	頻率 (Hz)					平均 (Hz)	頻率比	波長 (cm)
中音域	488.20	490.17	491.36	485.75	486.21	488.14	2.05	70.88
高音域	1001.54	998.94	998.07	1000.62	1003.09	1000.45		34.58

Do	頻率 (Hz)					平均 (Hz)	頻率比	波長 (cm)
中音域	509.98	523.09	509.33	524.72	523.41	518.11	2.06	66.20
高音域	1066.99	1063.17	1069.85	1067.60	1069.53	1067.43		32.13

表 3：吹奏長笛測量 So、La、Si、Do 中音域及高音域的聲調頻率表

四、以塑膠管連接氧氣筒，由塑膠管接近長笛吹風口吹氣，當氣流增大時，可出現泛音的現象。但透過空氣壓縮機有更強氣流可得第二泛音。表 4 為兩端開口壓克力管透過空氣壓縮機吹氣所得到的基音和泛音之頻率。

共鳴聲音	短邊 長度	長邊 長度	頻率 (Hz)					平均 (Hz)	標準差 百分比	波長 (cm)
基音	7cm	26.5cm	592.72	594.76	592.88	589.84	588.03	591.65	0.45%	58.33
第一泛音	7cm	26.5cm	1185.58	1182.77	1177.71	1179.44	1179.8	1181.06	0.26%	29.04
第二泛音	7cm	26.5cm	1699.31	1690.24	1691.28	1703.47	1692.69	1695.40	0.34%	20.23

表 4：透過空氣壓縮機吹氣所得到的基音和泛音之頻率

實驗數據主要是由壓克力管依序分別吹出基音和第一泛音，由 Adobe Audition 測頻率軟體錄音，處理分析頻率數據所得到的實驗結果，如圖 6 所示。

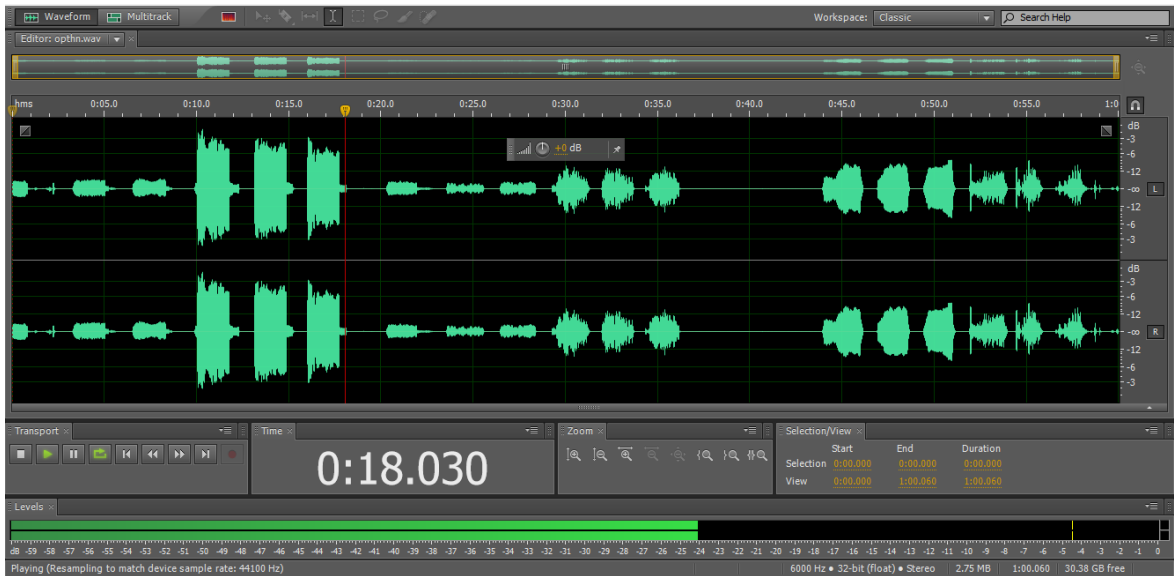
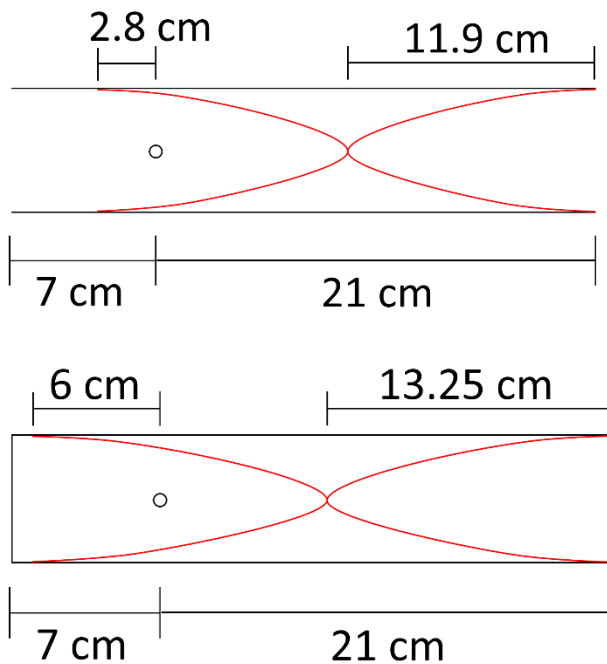


圖 6：Adobe Audition 測頻率軟體錄音

五、圖 7 為壓克力管兩端皆開口與短邊封閉之駐波圖形比較，兩端開口駐波的波腹離開口端較遠、離吹氣孔較近；而短邊封閉的駐波波腹離封閉端較近、離吹氣孔較遠。由實驗結果發現，兩端開口時，有效長度變短很多。



兩端皆開口之駐波波形：

$$\frac{1}{4}\lambda = 11.9 \text{ cm}$$

短邊封閉之駐波波形：

$$\frac{1}{4}\lambda = 13.25 \text{ cm}$$

圖 7：兩端皆開口和短邊封閉之駐波波形比較

六、如圖 8 所示，當用力吹奏長邊封閉之壓克力管時，泛音強度大於基音，管中出現第一泛音之駐波波形。而當更用力吹奏時，管中出現第二泛音之駐波波形，此時管長 L 和波長 λ 的關係為 $L = \frac{5}{4}\lambda$ ，如圖 9 所示。

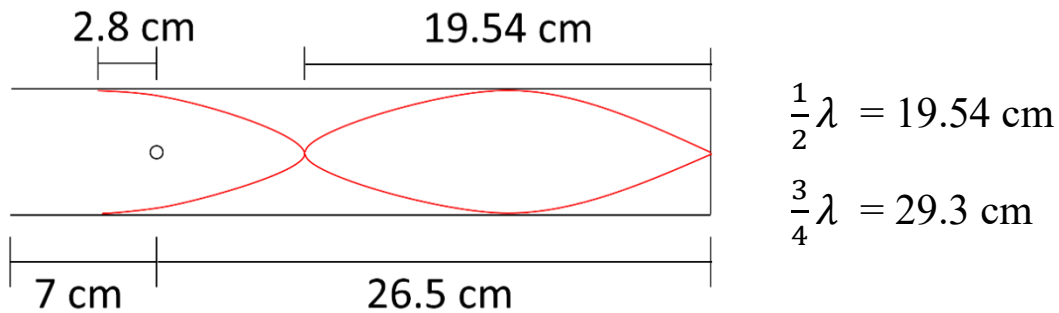


圖 8：長端封閉管出現第一泛音之駐波波形。

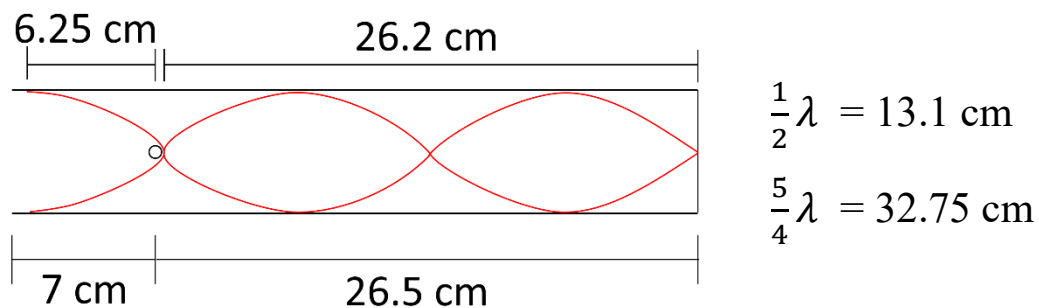


圖 9：長端封閉管出現第二泛音之駐波波形

七、由表 4 所列之數據結果，得到基音、第一泛音和第二泛音的駐波波形如圖 10 所示。

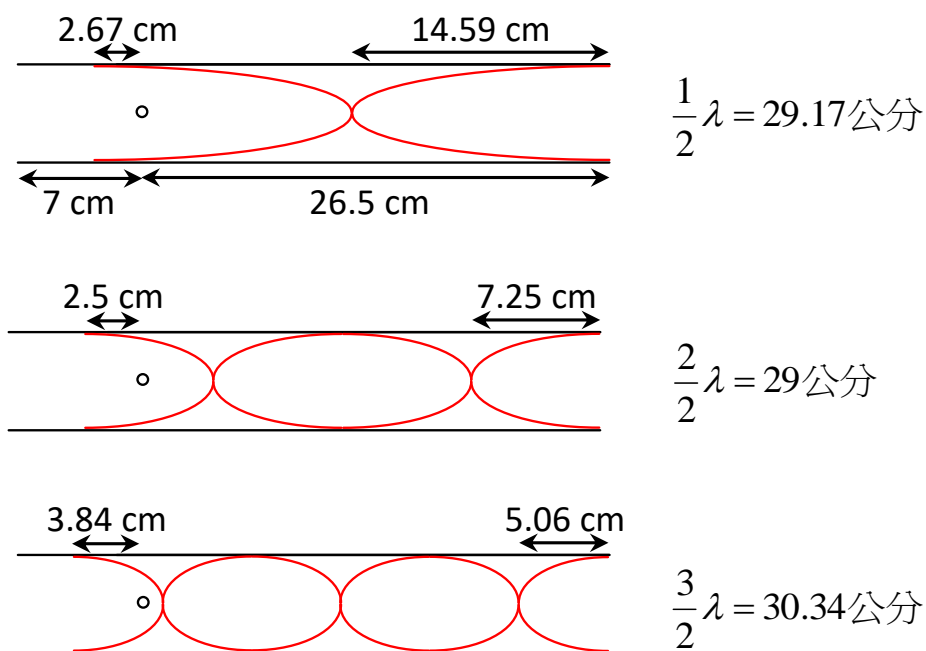


圖 10：兩端開口的壓克力管，發出的基音、第一泛音和第二泛音之波形

八、使用長笛吹奏音調 Si 之中音域及高音域的聲調駐波波形圖，如圖 11 所示。

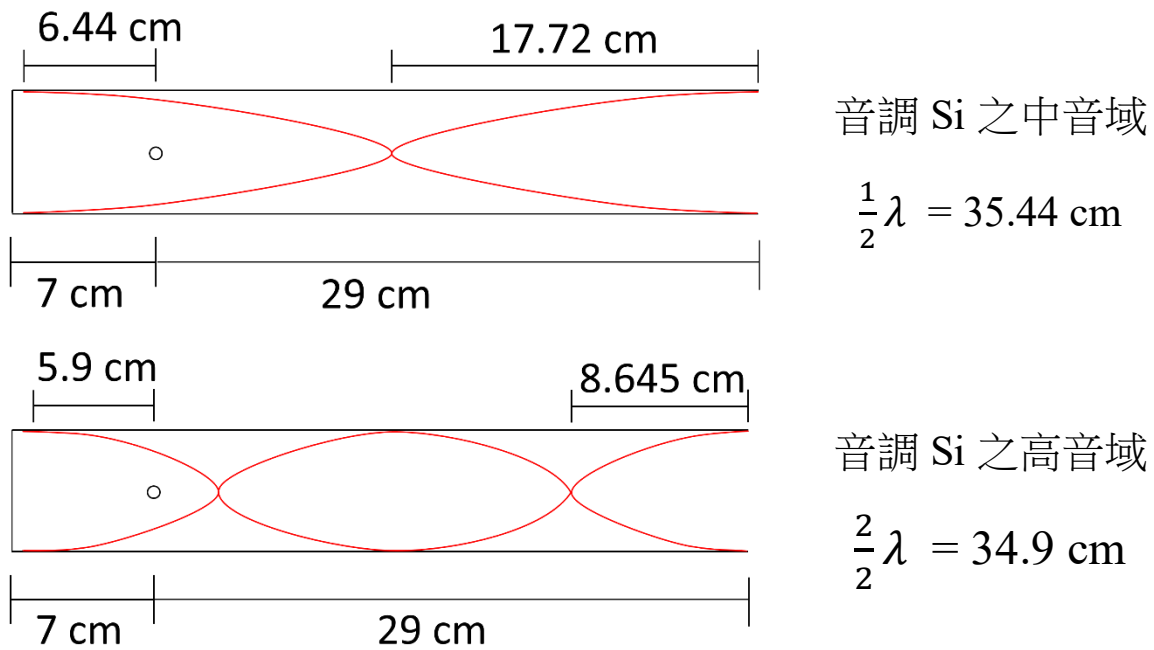


圖 11：中音域 Si 音調之駐波波形和高音域 Si 音調高八度之駐波波形

九、短邊皆為 7 公分，但長邊不同時，在不同條件下發出的聲音波長與管長之關係圖，如圖 12 所示之線性關係。

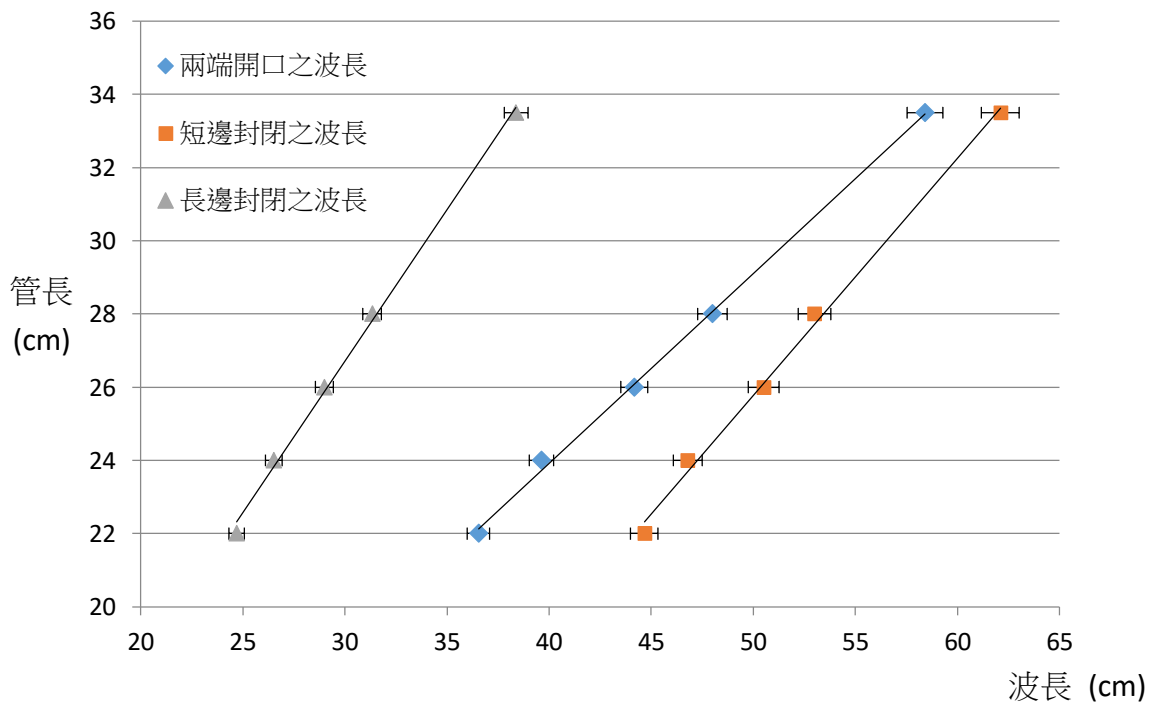
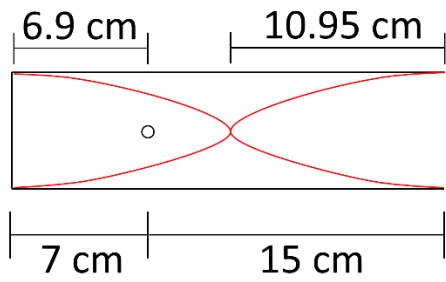
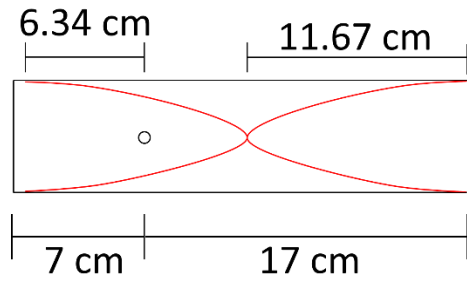


圖 12：短邊皆為 7 公分，但長邊不同時，不同條件下的聲音波長與管長之關係圖

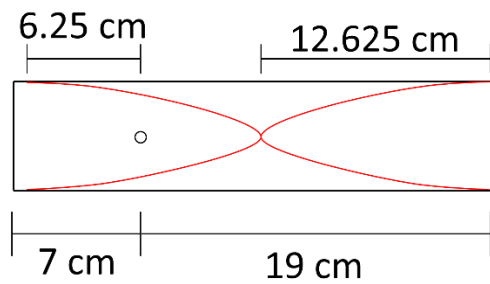
十、不同長邊，短邊封閉聲調駐波波形圖，如圖 13 所示。



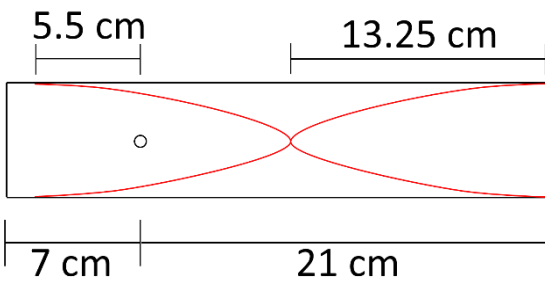
$$\frac{\lambda}{4} = 10.95 \text{ cm}$$



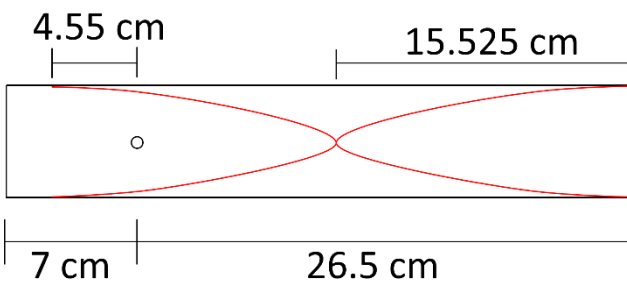
$$\frac{\lambda}{4} = 11.67 \text{ cm}$$



$$\frac{\lambda}{4} = 12.625 \text{ cm}$$



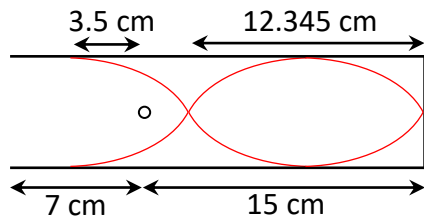
$$\frac{\lambda}{4} = 13.25 \text{ cm}$$



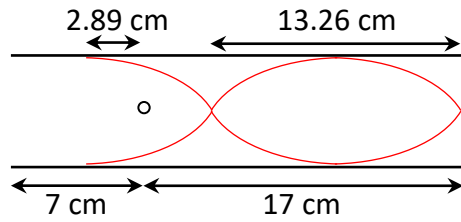
$$\frac{\lambda}{4} = 15.525 \text{ cm}$$

圖 13：不同長邊，短邊封閉的壓克力管基音駐波波形圖

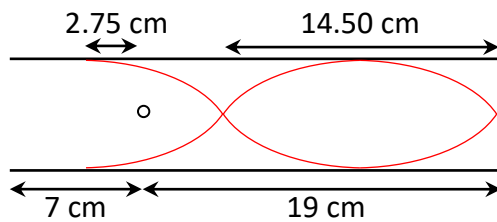
十一、不同長邊，長邊封閉聲調駐波波形圖，如圖 14 所示。



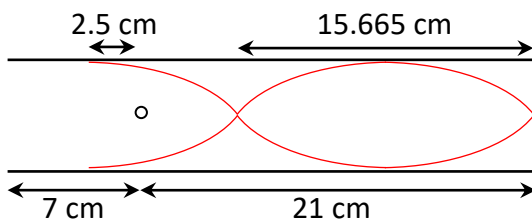
$$\frac{\lambda}{2} = 12.345 \text{ cm}$$



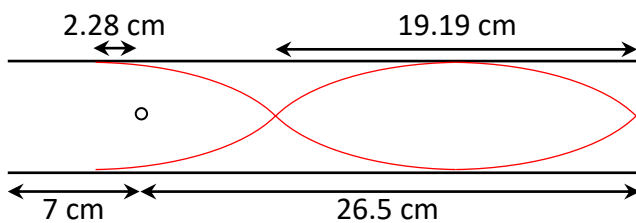
$$\frac{\lambda}{2} = 13.26 \text{ cm}$$



$$\frac{\lambda}{2} = 14.50 \text{ cm}$$



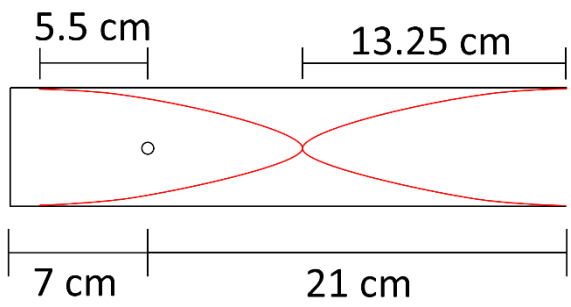
$$\frac{\lambda}{2} = 15.665 \text{ cm}$$



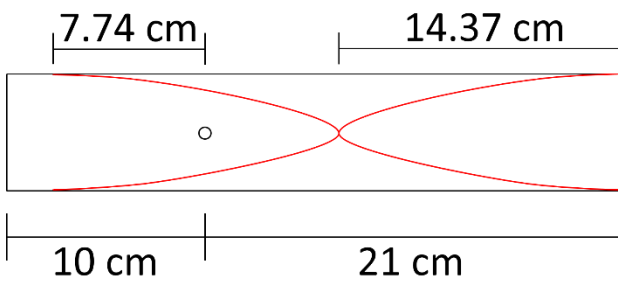
$$\frac{\lambda}{2} = 19.19 \text{ cm}$$

圖 14：不同長邊，長邊封閉的壓克力管基音駐波波形圖

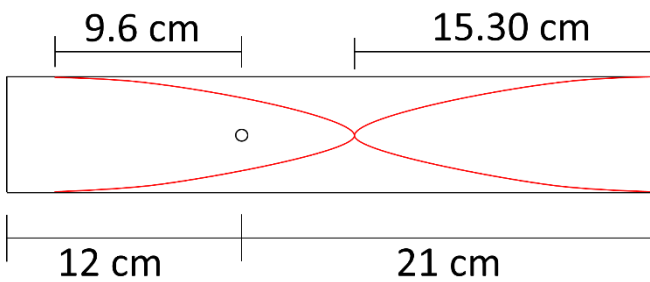
十二、不同短邊，短邊封閉聲調駐波波形圖，如圖 15 所示。



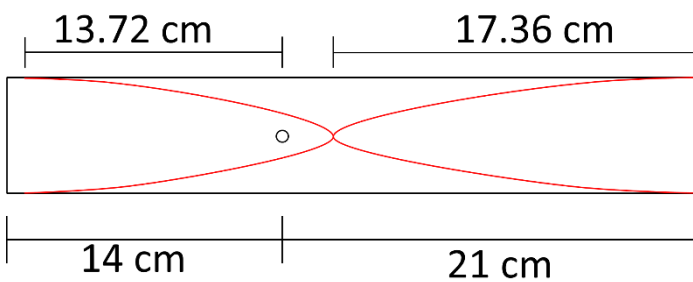
$$\frac{1}{4}\lambda = 13.25 \text{ cm}$$



$$\frac{1}{4}\lambda = 14.37 \text{ cm}$$



$$\frac{1}{4}\lambda = 15.30 \text{ cm}$$



$$\frac{1}{4}\lambda = 17.36 \text{ cm}$$

圖 15：不同短邊，短邊封閉管吹奏基音駐波波形圖

陸、討論

一、如圖 16，長笛的一端是封閉的，內有一調音用軟木塞，軟木塞一端黏有金屬片，是很好的反射端。

二、一端封閉之管卻合乎 $L = n\frac{\lambda}{2}$ ，封閉端駐波卻變成開口端駐波模式。為了證明這個說法，我們測量許多不同規格，兩端開口、短邊封閉或長邊封閉的壓克力管吹奏，終於歸納得到結論。

三、從所繪駐波圖中可看出駐波不是佈滿全管，有所謂有效長度，只有短邊封閉時有效長度較接近實際長度。

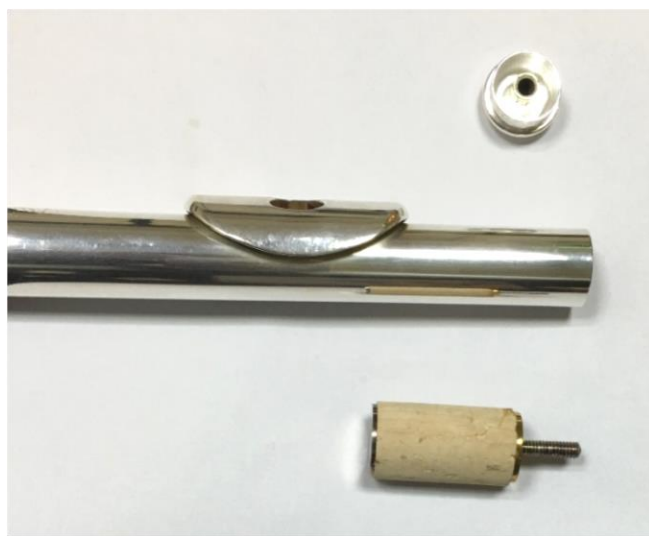


圖 16：長笛的短邊內部構造

四、因為壓克力管長度固定，所以吹奏時聽到的頻率隨室溫會有些微變化。

五、空氣壓縮機可供給更高的氣壓。低壓吹氣時壓克力管發出基音，隨著吹氣的氣壓增大，壓克力管會出現第一泛音和第二泛音。

六、離吹氣孔近的一端若是封閉，則受吹氣孔吹氣之影響，封閉端變成類似開口端不再是駐波節點。離吹氣孔較遠的一端不受吹氣孔影響，若未封閉則為駐波腹點，若封閉即是駐波節點，此結果與課本所言相同。

七、音色決定於基音與泛音組合的相對強度。全華版本高中物理教科書中提到，各種樂器雖然演奏相同頻率的聲音，但基音和泛音組合的相對強度不同，故產生不同的音色，如圖 17 所示。圖中可看到樂器的基音強度大於泛音，所以老師會有「演奏樂器聽到的頻率是基音頻率」的講法，只是我們要強調有例外。

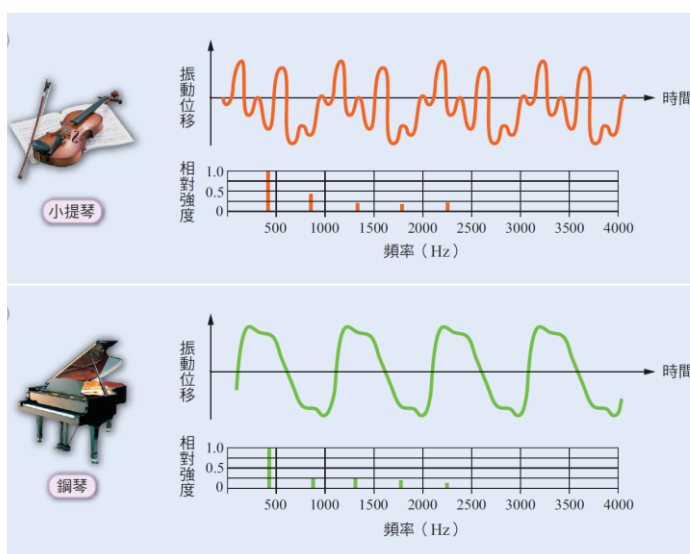


圖 17：樂器演奏時的基音與泛音組合相對強度不同

柒、結論

- 一、長笛一端封閉且從側邊孔吹氣，聲波產生的駐波的形式由實驗歸納出的結果是：長笛一端封閉但駐波卻是兩端開管模式。適用 $L = n \frac{\lambda}{2}$ 公式，所以基音是 $L = \frac{\lambda}{2}$ ，同樣指法用力吹時發出的第一泛音 $L = \lambda$ ，頻率加倍，變成高八度。對此我們在結論二有進一步推論。
- 二、實驗中發現壓克力管的短邊（離吹奏孔較近的那一段）無論是否封閉，管子的有效長度皆有變短的情形，如圖 7 所示，推測可能因吹奏孔有強大氣流吹入，形成氣壓較高而旁邊氣壓較低，因壓力不同讓兩邊分屬不同介質，在中間形成界面而變成聲波類似自由端的反射，如圖 17 所示。針對短邊封閉的管子我們實驗數據得到的有效長度較長，推測是氣壓較高區延伸較長，一樣因壓力不同讓兩邊分屬不同介質，在界面處形成自由端的反射，而非靠管子封閉端的反射面反射，所以封閉端不再是駐波節點。

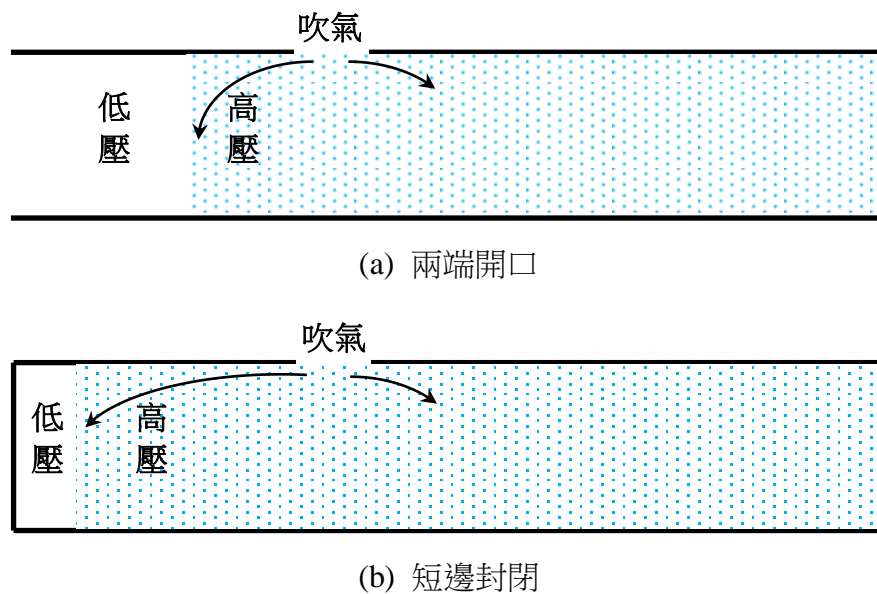


圖 17：從吹奏孔進入的氣流讓管內因壓力不同而形成一反射介面

- 三、本實驗要更正「演奏樂器聽到的頻率是基音頻率」的講法。因為笛子用力吹時，泛音強度會大於基音，而聽到以泛音頻率為主之音調。

捌、參考資料

- 一、傅昭銘、陳義裕 主編 (2014) 選修物理[上] 第三章 南一書局
- 二、楊宗哲 主編 (2014) 選修物理[上] 第三章 全華圖書股份有限公司
- 三、陳錫桓 (1985) 熱學，聲學－大學物理學之二 中央圖書出版社

【評語】 051804

作品探討長笛發聲的物理原理，利用高中物理中駐波的理论解釋，非常有創意，展現出的團隊合作也很棒，在發聲機制的探討應更深入研究，數據的分析可以再更注意與理論的配合，那會是一個更好的作品。