

中華民國第 60 屆中小學科學展覽會 作品說明書

國小組 物理科

第三名

080106

觀其「舞」·知其「聲」

學校名稱：國立東華大學附設實驗國民小學

作者： 小六 許暢丰 小六 袁紹華 小六 張簡嘉品 小六 呂 安	指導老師： 李偲華 游時銘
--	-----------------------------

關鍵詞：單頻音、聲波振動顯現儀、

聲波振動模式檢測儀

摘要

本研究從傳統科學遊戲「雷射聲波筒」出發，自行研發出既安全又能精準量測聲源透過氣球皮振動而反射出圖形變化的【聲波振動顯現儀】，發現聲音的頻率、響度皆會影響投射至方格屏幕上紅點圖形的長度及形狀變化，其中尤以介於 140~300 Hz 的低頻音較容易使氣球皮產生大幅的振動，且響度越強圖形長度也會隨之變大。

而氣球皮的面積及緊繃程度亦會影響投射至方格屏幕上紅點圖形的變化，最後我們更成功研發出【聲波振動模式檢測儀】，能檢測氣球皮受聲波擾動位置及生成圖形間的關聯性。

我們用一整年的假日、週三下午等時間完成此研究，發現物理世界中聲與光的奧妙之處，付出再多的辛苦也值得！

壹、研究動機

有次自然課中，老師帶領我們進行「發現聲音在跳舞」的科學遊戲，我們利用紙筒、氣球皮、光碟片、雷射筆等簡易材料組合成一個「雷射聲波筒」，將嘴巴靠在餅乾罐的罐口端唱歌，投射至牆壁上的雷射光點，會隨著聲音產生各種圖形的變化，非常有趣！我和同學對此現象感到非常好奇，為了揭開「聲音在跳舞」的神秘面紗，我們決定著手進行更深入的研究。

貳、研究目的

- 一、研發既安全又能精準量測聲源透過氣球皮振動而反射出圖形變化的裝置。
- 二、探究影響聲源透過氣球皮振動而反射出圖形變化的可能因素。
- 三、研發出能檢測氣球皮受聲波擾動及生成圖形間關聯性的裝置。

參、研究設備及器材

- 一、材料：氣球皮、紙筒、塑膠水管、不同尺寸刺繡用塑膠繃框、透明膠帶、橡皮筋、鐵絲、光碟片、鏡面紙、紙張、耳塞、代針筆、棉繩、鐵片、鈦鐵硼磁鐵、黑色磁鐵、減速馬達。
- 二、工具：雷射筆、鐵架、450W 喇叭、手提電腦、攝影機、鏡子。
- 三、軟體：Audacity 軟體、Image-J 軟體、威力導演軟體。

肆、研究過程及結果

實驗一：文獻探討

一、組成「聲音」的三要素

人耳所感覺的聲音，主要由三個因素所構成，為**響度**、**音調**和**音色**，稱為樂音的三要素。

(一)響度：

1. 是指**聲音的大小、強弱程度**，也稱為「音量」。
2. 響度**和聲音振動幅度有關**，若聲音振動幅度愈大，聲波傳到耳膜時所引起的振動愈強烈，所感覺到的聲音也愈大聲。聲波雖看不見，但麥克風將聲波轉換成電流後，可在示波器上看得見。例如：彈吉他時，若用力撥動弦線，弦線來回振動的幅度大，吉他會產生比較大的聲音。
3. 聲音的響度通常**以分貝 (dB)【註 1】做為比較的單位**，可用「噪音計」來量測其分貝值。若分貝值愈大，表示聲音愈大聲。
 - (1)「零分貝」並不是沒有聲音，而是根據聽力正常的年輕人所能聽到最小聲音所得到的。
 - (2)「零分貝」的定義為在每秒鐘內，每平方公尺通過 10^{-12} 焦耳之聲能。
 - (3)分貝數是以「對數」方式計量，響度每增加 10 分貝，聲音強度即增強 10 倍。例如 70 分貝聲音強度是 60 分貝聲音的 10 倍，80 分貝則為 60 分貝的 100 倍。即使音量分貝數看起來增加不多，實際上耳朵承受的強度超乎想像，稍不注意就可能因音量過大而傷害我們的聽力。
 - (4)羅列幾種環境中常見的聲音之約略響度範圍如表 1-1。

表 1-1：環境中常見的聲音響度範圍一覽表

分貝值	感 受	類別
0-20 分貝	微弱	微風吹動的樹葉聲/自己呼吸聲
20-40 分貝	寧靜	低微的呢喃/手錶擺動音
40-60 分貝	日常聲音	鬧鐘鈴響/一般辦公室談話
60-80 分貝	喧鬧	電視機大音量/演講聲
80-100 分貝	非常喧鬧	機床聲/防盜器響鈴聲
100-120 分貝	震耳欲聾	火車的噪音/爆竹聲
120-140 分貝	感到痛苦	飛機的引擎聲

(二)音調：

1. 是指**聲音高低，和聲波的振動頻率有關**，若聲波振動頻率愈大，所感覺到的聲音愈高昂。
2. 振動頻率是指物體振動時，每秒鐘的振動次數，單位為「次數/秒」，通常以「赫茲」(Hz)表示。例如：某物體每秒鐘振動 10 次，其振動頻率即為 10 Hz【註 2】。
3. **發聲體的質量、厚薄、長短、鬆緊等因素都會影響其振動頻率**，輕、薄、短、緊的發聲體振動頻率快，音調則高；重、厚、長、鬆的發聲體振動頻率慢，音調則低。
4. 人耳可聽到頻率約介於 20~20000 Hz。超過 20000Hz 聲音稱為超音波，蝙蝠、海豚可發出超音波；低於 20 Hz 聲音稱為次音波，大象、長頸鹿可發出次音波，這些聲音是人耳聽不見的。
5. 羅列幾種常見樂器及人聲之發聲頻率範圍如圖 1-1。

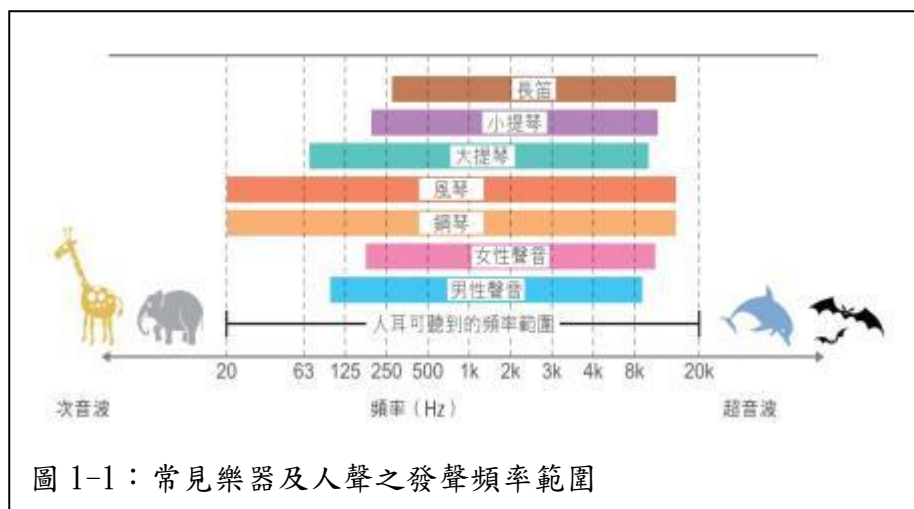


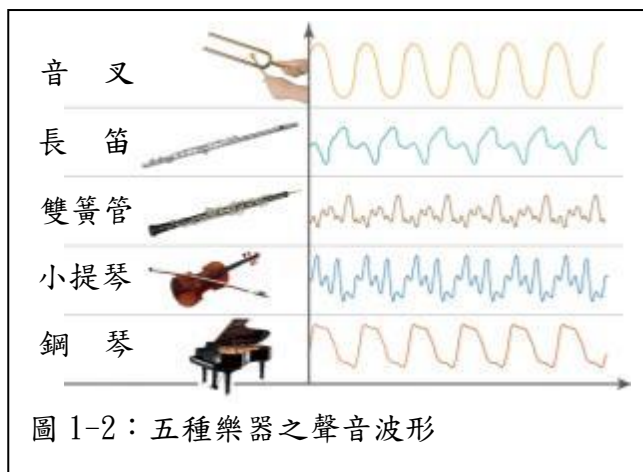
圖 1-1：常見樂器及人聲之發聲頻率範圍

【註 1】「分貝」是為了紀念電話的發明人「貝爾」而命名。

【註 2】赫茲 (Hertz) 是十九世紀的德國物理學家，他由實驗證實電磁波的存在，故現在把頻率單位稱為赫茲，以紀念他的貢獻。

(三)音品：

1. 是指**聲音獨特的發音特性**，也稱為「音色」。
2. 音色**主要決定於聲音的波形**，不同的發聲體產生不同的波形，而形成不同的音色。圖 1-2 中呈現五種樂器所發出的聲音波形，可看出音叉的波形最單純，因為音叉振動時，只發出單一的頻率，也由於這種發音特性，音叉可做為調音的工具。
3. 大部分樂器所發出之聲波都不是單純正弦波，而是由基音和多組不同頻率泛音複合而成的複合波。其中泛音的頻率必定為基音頻率的整數倍關係。
4. 對於**同一樂器所發出的聲音**，其響度、音調都可以調整，但是基音和各組泛音的強度比卻是固定的，因此**音色是無法改變的**；對於不同的樂器所發出的聲音，即使響度、音調都調成一樣，但是基音和各組泛音的強度比卻都不相同，因此音色也會不同。



二、關於「雷射聲波筒」的相關科展研究：

「雷射聲波筒」是利用聲源經由傳聲筒，振動氣球皮，使得氣球皮上的小光碟片因發生微小振動，使得所反射的雷射光點能投射在遠處屏幕上，產生一個聲波振動的放大圖形。在歷屆中小學科展中，有幾件「雷射聲波筒」的相關研究，依照其研究內容可分為兩大類型：

(一)對於「雷射聲波筒」所投射出的圖案變化進行簡單文字描述

1. 「聲音會跳舞」(全國科展第 47 屆)是將歌曲透過不同材質集音筒傳播以振動氣球皮，使得雷射光筆投射出不同的圖案，作品中以文字對雷射光產生的圖樣做簡單說明。
2. 「它真的看得見！---利用雷射光偵測微小位移之研究」(全國科展第 45 屆)是探究在不同屏幕距離下，光碟片反射鏡偏轉角度與反射雷射光點移動距離的關係。

(二)對於「雷射聲波筒」薄膜能產生微小振動原理的應用

「一聲未平，一聲又「響」(全國科展第 48 屆)作品中主要研究「殘響」是導致同學在新落成禮堂中聽不清楚教師宣導內容的主要因素，最後利用簡單材料設計出「殘響時間測量儀」，播放聲源讓氣球皮產生振動，雷射光筆投射出的光點經由氣球皮上光碟片反射至太陽能板，藉由測量太陽能板所得之電壓值變化測得殘響時間。

上述研究大多是將氣球皮套在集音筒上，又將雷射光筆黏貼在集音筒邊緣，使聲源經由集音筒讓氣球皮產生振動，藉此觀察投射在屏幕上雷射光點所反射的圖形(圖 1-3)。

但過往「雷射聲波筒」實驗裝置方式，雷射光筆有可能因為位置偏差而直射操作「雷射聲波筒」同學的眼睛，非常危險！

這些研究都有「集音筒」的裝置，集音筒的存在會使聲音在筒中因反射而產生能量加大的效果，便無法得知單純依靠不同特性的聲源是如何影響氣球薄膜振動所形成反射圖形的各種變化，且作品中也多以簡單文字敘述呈現所得結果。

因此本研究除了**想要改變雷射筆的擺放位置，而且還要除去傳聲筒的裝置，獨創安全又能精準進行實驗的設計，使其能更準確測得單純因聲源及氣球薄膜不同特性所造成的反射圖形的不同變化，並能設法以定性定量方式呈現實驗結果。**



實驗二：實驗環境布置

一、氣球框的選擇

為了要移除以往「雷射聲波筒」中「集音筒」的裝置，我們必須尋覓能使氣球皮直接套在框架上的材料，經過多方嘗試，最後我們選擇【紙筒框】、【PVC 塑膠水管框】、【塑膠繃框】這三種固定氣球皮的框架進行測試，其優缺點分析如表 2-1 所示：

表 2-1：三種固定氣球皮的框架其優缺點分析一覽表

框架名稱	紙筒框	PVC 塑膠水管框	 刺繡用塑膠繃框
框架照片			
框架長度	1cm	1cm	1cm
固定方式	將氣球皮套在紙筒框上，使用橡皮筋固定。	將氣球皮套在 PVC 塑膠水管框上，使用橡皮筋固定。	將氣球皮套在內繃框，再套上外框，轉緊螺絲固定氣球皮。
優點	<ul style="list-style-type: none"> ▶材料容易取得。 ▶紙筒容易裁切成實驗所需長度。 	<ul style="list-style-type: none"> ▶材料容易取得。 ▶框架堅固，不會因氣球的緊繃程度而變形。 	<ul style="list-style-type: none"> ▶框架堅固耐用，不會因氣球緊繃程度而變形。 ▶內外框及螺絲設計，使氣球皮完全不會鬆脫，可輕易改變氣球皮的鬆緊程度。 ▶市面上有許多不同直徑的框架，符合實驗需求。
缺點	<ul style="list-style-type: none"> ▶套上氣球皮後，框架易因氣球皮緊繃程度而變形。 ▶因紙筒耐受力差，若改變氣球皮鬆緊度進行實驗，得更換新紙筒框架。 	<ul style="list-style-type: none"> ▶PVC 塑膠水管材質堅硬，要小心的使用鋸子且費力的裁切成 1cm 長的框架，非常不容易。 ▶框架的裁切面非常銳利，容易刺破氣球皮，使得氣球皮的耗損快，也不易進行變因的控制。 	<ul style="list-style-type: none"> ▶需要購買。

經過測試，「刺繡用塑膠繃框」有堅固耐用、使氣球皮不會鬆脫、可輕易改變氣球皮的鬆緊程度、有多種直徑尺寸可選擇等多項優點，雖然需要購買，但是一個塑膠繃框單價約 30 元，堅固又耐用，CP 值非常高，因此決定使用它當成實驗中固定氣球皮的框架！

二、「聲波振動顯現儀」的設計

為改善雷射光筆有可能直射眼睛的危險，以及移除傳聲筒的設計為能單純觀測聲源及氣球薄膜不同特性所形成反射圖形的變化，我們嘗試組合過許多種實驗裝置進行測試，最後決定以最終版的「聲波振動顯現儀」進行實驗，以下是實驗環境布置介紹(圖 2-1~2-10)，本研究所有實驗皆在一個隔音非常好的天文教室進行。

方格屏幕

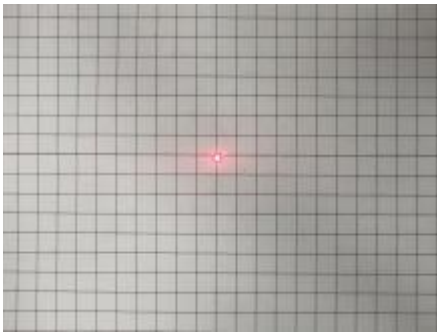


圖 2-2：以 1cm*1cm 方格紙當作雷射光筆反射的投影屏幕。每次實驗前會調整雷射光筆所反射的紅點位於方格紙的原點處。

攝影機



圖 2-3：以攝影機拍攝雷射光筆反射在投影屏幕上圖案的變化。

聲源播放處



圖 2-10：450W 喇叭連接電腦 Audacity 軟體播放聲源。

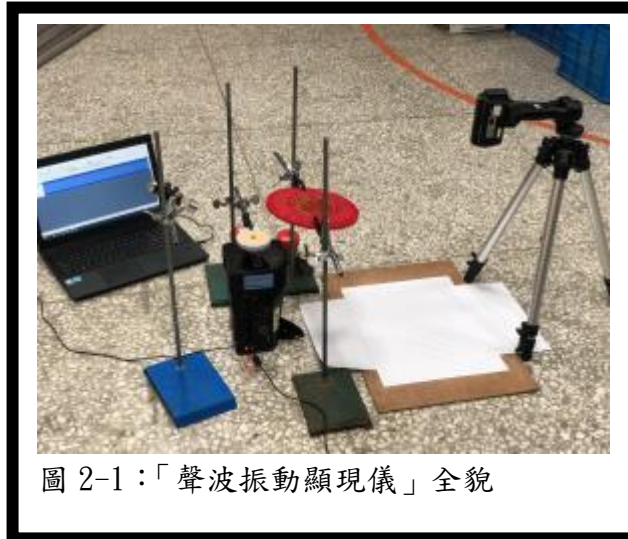


圖 2-1：「聲波振動顯現儀」全貌

平面鏡



圖 2-4：透過鏡子反射雷射光至方格屏幕。

聲源播放與氣球皮保持固定距離



圖 2-9：450W 喇叭距離氣球皮 5cm。

雷射光反射至方格屏幕路徑

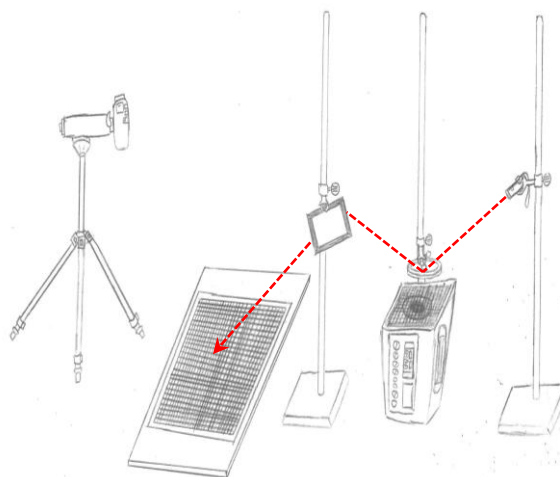


圖 2-7：雷射光照射氣球皮上鏡面紙，反射至鏡子，再透過鏡子反射至方格屏幕(紅色虛線 ----- 為雷射光反射路徑)。

氣球皮繃框



圖 2-5：使用特製繃框固定氣球皮，在氣球皮上黏貼鏡面紙，以反射雷射光之用。

雷射光筆



圖 2-8：以鐵架固定雷射光筆，並使雷射光筆朝斜下方角度，以避免直射眼睛的危險。

鏡面紙

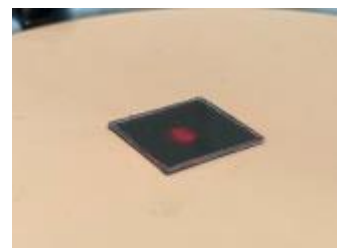


圖 2-6：在氣球皮上黏貼鏡面紙，以反射雷射光之用。

實驗三：音階如何影響方格屏幕上的圖案變化？

(一)實驗方法

1. 以錄音軟體分別錄製我們四個同學所唱的「Do，Re，Mi，Fa，Sol，La，Si」七個音階(圖 3-1)。
2. 將所錄製的音源檔經由電腦軟體由 450W 喇叭播放，音量固定 20%，氣球繃框尺寸內徑固定為 6cm，以「聲波振動顯現儀」觀察並錄製屏幕上雷射光筆反射的圖形變化。



圖 3-1 錄製「Do，Re，Mi，Fa，Sol，La，Si」七個音階。

(二)實驗結果

表 3-1：四位同學所唱的音階透過「聲波振動顯現儀」投射至方格屏幕上的圖形一覽表

受測者代號		Y	S	L	J
性別		男	男	女	女
不同音階所呈現的雷射光反射圖形	Do				
	Re				
	Mi				
	Fa				
	Sol				
	La				
	Si				

(三)實驗發現

1. 若受測者的聲波能振動「聲波振動顯現儀」上的氣球皮，進而影響雷射光筆經由氣球皮上的鏡面紙及鏡子的反射至方格屏幕的圖形，**因視覺暫留的原理，我們可以因氣球皮的振動模式不同，而在方格屏幕上看見不同的圖形變化，非常有趣！**
2. 受測者所錄製的音階聲音檔，透過「聲波振動顯現儀」，觀察投射至方格屏幕上的圓形紅點圖形變化：
 - (1) Y、J 受測者只有「Mi」、「Si」產生圖形變化：「Mi」音階呈「線狀」圖形，「Si」音階呈「略為變大的圓形紅點」圖形。
 - (2) L 受測者「Do」、「Re」、「Mi」、「Fa」、「Si」音階產生圖形變化：「Do」音階呈「線狀」圖形；「Mi」音階呈「中空長橢圓狀」圖形；「Re」、「Fa」音階呈「小小橢圓狀」圖形；「Si」音階位移呈「線狀」圖形。
 - (3) S 受測者七個音階都有產生變化：「Do」、「Fa」、「La」、「Si」音階呈「線狀」圖形；「Re」音階呈「中空長橢圓狀」圖形；「Mi」音階呈「8 字型狀」圖形；「Sol」音階呈「略為變大的圓形紅點」圖形。
3. 承 1，**沒有產生圖形變化的音階，表示其聲波無法使氣球皮產生振動**；產生「略為變大的圓形紅點」圖形，表示其聲波有使氣球皮產生極微小振動；**產生「線狀」、「中空長橢圓狀」、「8 字型狀」圖形則視其長度的多寡表示聲波使氣球皮產生多大的振動。**
4. 我們很好奇，受測者都唱同樣的七個音階，為什麼有些同學的唱法其聲波較容易使氣球皮產生較大的振動？尤其是四位受測者的「Do」、「Re」、「Mi」三個音階紅點圖形變化的差異最大！



以 Audacity 程式的頻率分析功能

分析四位受測者「Do」、「Re」、「Mi」三個音階的頻帶

我們知道人類說話或唱歌產生的聲音包含許多不同的頻率，為了研究歌聲所包含的頻率，可以用頻譜來表示某一時間的頻率分布，其呈現出頻率和聲壓間的關係。

若是單一頻率的聲波，其頻譜關係圖會是單一個峰值(圖 3-2)

，但如果是複合波，其頻譜就會出現兩個以上的峰值(圖 3-3)，因為波形來自兩個以上的頻率所產生。非周期性的語音沒有基頻和諧音，但常常可以有一較寬的頻帶，其振幅較周圍的頻率要大。

因此我們將 4 位受測者所唱的「Do」、「Re」、「Mi」這三個音階的錄音檔以 Audacity 程式的頻率分析功能分析其頻譜(如表-2)，再從頻譜分佈圖中可找出主要發聲頻帶範圍進行探究。

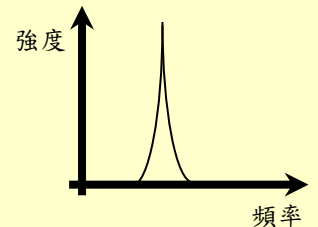


圖 3-2：單一頻率聲波之頻譜只有單一個峰值。

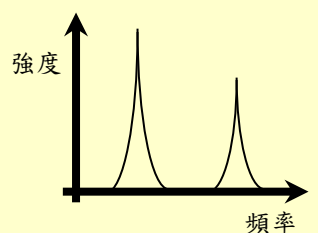


圖 3-3：複合波其頻譜會出現兩個以上的峰值。

表 3-2：4 位受測者所唱的「Do」、「Re」、「Mi」三個音階其光點圖、頻譜、頻帶一覽表

受測者代號		Y	S	L	J
性別		男	男	女	女
Do	光點圖				
	頻譜				
	頻帶	234~1399Hz	150~1064Hz	201~1429Hz	238~1209Hz
Re	光點圖				
	頻譜				
	頻帶	261~3121Hz	170~698Hz	233~1844 Hz	270~2967Hz
Mi	光點圖				
	頻譜				
	頻帶	288~4676Hz	194~3094Hz	261~2823Hz	298~3854Hz

- (1)將表 3-2 頻帶範圍製成圖 3-4~3-6，發現：在「Do」、「Re」、「Mi」音階中，紅點位移產生「粗線形」、「8 字形」或「中空橢圓形」等顯著圖形者，其頻帶範圍都相對較窄，且頻帶範圍中的最低頻率也比較小。
- (2)承(1)，發現聲音的頻率高低有可能對於投射至方格屏幕上的紅點圖形之變化有關聯，且疑似較低頻的聲音較容易使氣球皮產生振動。
- (3)具有絕對音感的人很少，本實驗四位受測者明明是唱出同個音階，但頻譜卻有相當大的差異。於是在下個實驗中將以 Audacity 程式播出更純粹、精準的「單頻音」，以探討某範圍的「單頻音」對投射至方格屏幕上紅點的圖形變化。

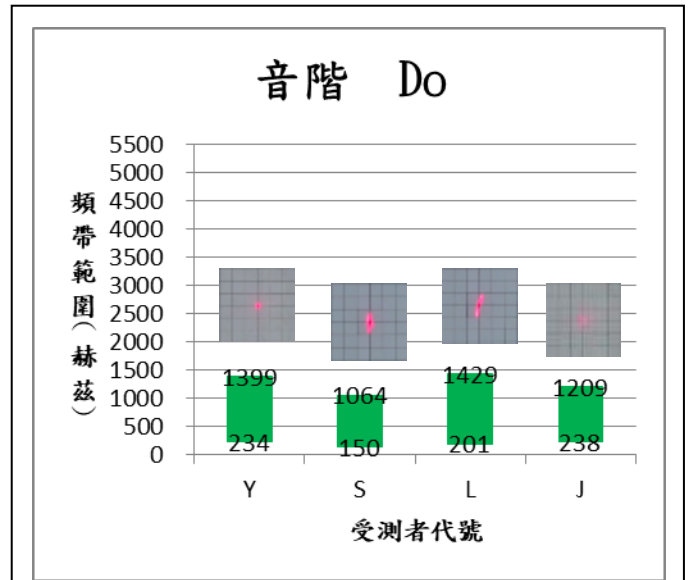


圖 3-4：四位受測者唱音階「Do」的頻帶範圍。

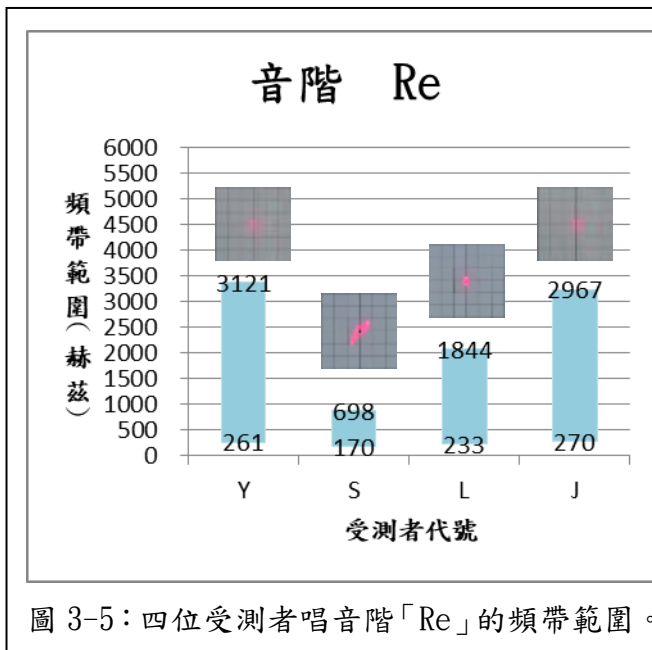


圖 3-5：四位受測者唱音階「Re」的頻帶範圍。

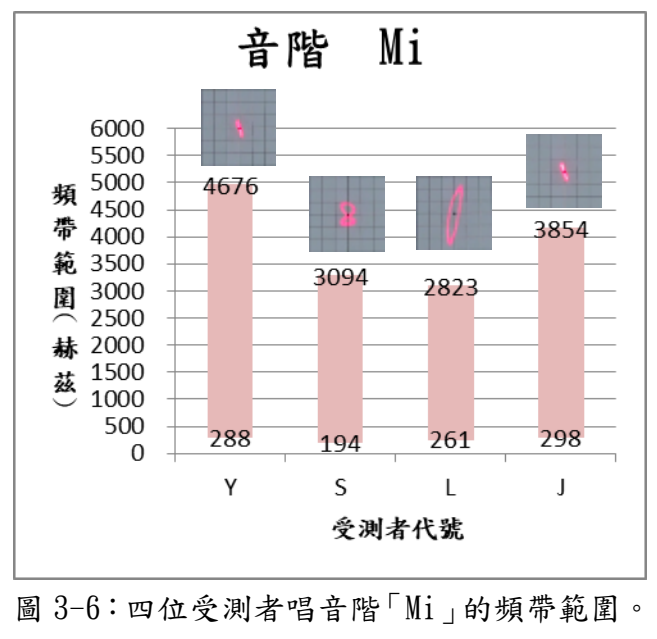


圖 3-6：四位受測者唱音階「Mi」的頻帶範圍。

實驗四：聲音的頻率如何影響方格屏幕上的圖案變化？



本實驗選擇 60~1200Hz 頻率範圍進行實驗分析

從文獻探究中得知男/女的聲帶振動基本頻率範圍(基準音區)為：男聲 64~523Hz/女聲 160~1200Hz，因此本子題以 60~1200Hz 的頻率範圍進行實驗分析。

(一)實驗方法

1. 以 Audacity 程式透過 450W 喇叭一一播放 60~1200Hz 的單頻音，電腦音量固定為 20%，氣球繃框尺寸固定為 6cm，以「聲波振動顯現儀」觀察並錄製方格屏幕上雷射光筆反射的圖形變化。
2. 擷取每個單頻音其投射在方格屏幕上的圖形，並以 Image-J 程式量測雷射光紅點圖形的長度變化。實驗反覆進行三次，求其平均值。

(二)實驗結果 表 4-1：單頻音 60~1200Hz，雷射光反射的紅點圖形之長度一覽表

頻率(Hz)	60~85	86	87	88	89	90	91	92	93	
圖形長度(cm)	0	0.7	0.9	1.1	1.5	2.7	3.0	3.1	3.1	
圖形描述	無變化	線形							8字形	
頻率(Hz)	94	95	96	97	98	99	100	101	102	
圖形長度(cm)	3.5	1.3	0.9	0.8	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7	
圖形描述	8字形		線形							
頻率(Hz)	103	104	105	106	107	108	109	110	111	
圖形長度(cm)	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
圖形描述	線形	無變化								
頻率(Hz)	112	113	114	115	116	117	118	119	120	
圖形長度(cm)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
圖形描述	無變化									
頻率(Hz)	121	122	123	124	125	126	127	128	129	
圖形長度(cm)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
圖形描述	無變化									
頻率(Hz)	130	131	132	133	134	135	136	137	138	
圖形長度(cm)	0.0	0.0	0.0	0.7	0.8	1.0	1.2	1.9	2.6	
圖形描述	無變化			線形						
頻率(Hz)	139	140	141	142	143	144	145	146	147	
圖形長度(cm)	3.9	5.5	6.2	4.3	3.7	3.0	2.7	2.6	2.3	
圖形描述	線形									
頻率(Hz)	148	149	150	151	152	153	154	155	156	
圖形長度(cm)	2.3	2.3	2.2	2.2	2.3	2.4	2.4	2.5	2.5	
圖形描述	線形									
頻率(Hz)	157	158	159	160	161	162	163	164	165	
圖形長度(cm)	2.6	2.7	2.9	3.2	3.5	3.7	3.8	4.1	4.3	
圖形描述	線形						葫蘆形			
頻率(Hz)	166	167	168	169	170	171	172	173	174	
圖形長度(cm)	4.8	5.2	5.6	5.8	6.1	6.2	6.2	6.2	6.0	
圖形描述	葫蘆形					8字形		葫蘆形		
頻率(Hz)	175	176	177	178	179	180	181	182	183	
圖形長度(cm)	5.8	5.7	5.8	3.7	3.3	3.5	4.5	5.6	7.6	
圖形描述	橢圓形									
頻率(Hz)	184	185	186	187	188	189	190	191	192	
圖形長度(cm)	9.0	9.1	10.8	14.0	17.5	20.3	23.0	25.0	24.8	
圖形描述	橢圓形									
頻率(Hz)	193	194	195	196	197	198	199	200	201	
圖形長度(cm)	12.6	9.7	8.5	7.5	6.8	6.3	6.0	5.7	5.3	
圖形描述	線形									
頻率(Hz)	202	203	204	205	206	207	208	209	210	
圖形長度(cm)	4.8	4.6	4.7	4.8	4.9	5.1	5.3	5.9	6.4	
圖形描述	線形									
頻率(Hz)	211	212	213	214	215	216	217	218	219	
圖形長度(cm)	6.9	7.4	8.4	9.2	10.2	10.6	5.3	3.2	2.6	
圖形描述	線形			橢圓形						
頻率(Hz)	220	221	222	223	224	225	226	227	228	
圖形長度(cm)	1.8	2.3	2.5	3.4	3.9	4.4	3.6	2.6	2.1	
圖形描述	線形									
頻率(Hz)	229	230	231	232	233	234	235	236	237	
圖形長度(cm)	1.5	1.4	1.7	2.0	2.1	2.3	2.4	2.6	2.8	
圖形描述	線形									

頻率(Hz)	238	239	240	241	242	243	244	245	246
圖形長度(cm)	2.8	2.9	2.9	3.2	3.5	3.8	4.1	4.6	5.1
圖形描述	線形		8字形						
頻率(Hz)	247	248	249	250	251	252	253	254	255
圖形長度(cm)	5.7	6.7	7.1	7.4	7.6	7.8	7.2	3.5	3.5
圖形描述	橢圓形						線形		
頻率(Hz)	256	257	258	259	260	261	262	263	264
圖形長度(cm)	3.5	3.5	3.4	3.9	4.3	4.3	4.3	4.2	3.6
圖形描述	線形				橢圓形				
頻率(Hz)	265	266	267	268	269	270	271	272	273
圖形長度(cm)	3.4	4.3	5.3	6.3	7.4	8.4	9.5	9.7	9.9
圖形描述	橢圓形					線形			
頻率(Hz)	274	275	276	277	278	279	280	281	282
圖形長度(cm)	10.2	10.2	8.4	7.0	4.6	3.8	3.5	2.9	2.5
圖形描述	線形								
頻率(Hz)	283	284	285	286	287	288	289	290	291
圖形長度(cm)	2.5	2.6	2.8	2.8	2.4	2.9	3.4	5.0	6.5
圖形描述	線形	橢圓形							
頻率(Hz)	292	293	294	295	296	297	298	299	300
圖形長度(cm)	7.6	6.6	5.5	4.7	4.2	4.0	3.8	3.6	3.7
圖形描述	橢圓形	線形							橢圓形
頻率(Hz)	301	302	303	304	305	306	307	308	309
圖形長度(cm)	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.5	3.5	3.2	2.8
圖形描述	橢圓形								
頻率(Hz)	310	311	312	313	314	315	316	317	318
圖形長度(cm)	2.3	1.7	1.3	1.2	1.1	1.1	1.0	1.0	1.0
圖形描述	橢圓形								
頻率(Hz)	319	320	321	322	323	324	325	326	327
圖形長度(cm)	1.0	1.1	1.1	1.2	1.4	1.6	1.8	2.1	2.3
圖形描述	線形								
頻率(Hz)	328	329	330	331	332	333	334	335	336
圖形長度(cm)	2.7	1.8	0.9	0.9	1.0	1.1	1.3	1.6	1.9
圖形描述	線形								
頻率(Hz)	337	338	339	340	341	342	343	344	345
圖形長度(cm)	2.3	2.4	2.4	2.0	1.7	1.3	1.2	1.1	1.0
圖形描述	線形								
頻率(Hz)	346	347	348	349	350	351	352	353	354
圖形長度(cm)	0.9	0.8	0.7	0.7	0.7	0.6	0.6	0.6	0.6
圖形描述	線形								
頻率(Hz)	355	356	357	358	359	360	361	362	363
圖形長度(cm)	0.6	0.7	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8
圖形描述	橢圓形					線形			
頻率(Hz)	364	365	366	367	368	369	370	371	372
圖形長度(cm)	0.8	0.8	0.9	0.9	1.0	1.1	1.2	1.4	1.3
圖形描述	線形						橢圓形		
頻率(Hz)	373	374	375	376	377	378	379	380	381
圖形長度(cm)	1.3	1.3	1.4	1.5	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9
圖形描述	橢圓形	圓形	橢圓形						
頻率(Hz)	382	383	384	385	386	387	388	389	390
圖形長度(cm)	2.0	2.1	2.2	2.4	2.6	2.8	2.8	2.8	2.4
圖形描述	橢圓形								

頻率(Hz)	391	392	393	394	395	396	397	398	399
圖形長度(cm)	1.9	1.9	2.0	2.0	2.0	1.9	1.7	1.5	1.3
圖形描述	橢圓形					線形			
頻率(Hz)	400	401	402	403	404	405	406	407	408
圖形長度(cm)	1.1	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8
圖形描述	線形								
頻率(Hz)	409	410	411	412	413	414	415	416	417
圖形長度(cm)	0.8	0.8	0.8	0.7	0.7	0.6	0.6	0.6	0.6
圖形描述	線形								
頻率(Hz)	418	419	420	421	422	423	424	425	426
圖形長度(cm)	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
圖形描述	圓形				線形				
頻率(Hz)	427	428	429	430	431	432	433	434	435
圖形長度(cm)	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
圖形描述	線形								
頻率(Hz)	436	437	438	439	440	441	442	443	444
圖形長度(cm)	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
圖形描述	線形	圓形							
頻率(Hz)	445	446	447	448	449	450	451	452	453
圖形長度(cm)	0.6	0.6	0.7	0.7	0.8	0.9	0.9	0.9	0.7
圖形描述	線形								
頻率(Hz)	454	455	456	457	458	459	460	461	462
圖形長度(cm)	0.6	0.6	0.5	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
圖形描述	線形				無變化				
頻率(Hz)	463	464	465	466	467	468	469	470	471
圖形長度(cm)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
圖形描述	無變化								
頻率(Hz)	472	473	474	475	476	477	478	479	480
圖形長度(cm)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.6	0.7	0.7
圖形描述	無變化					線形			
頻率(Hz)	481	482	483	484	485	486	487	488	489
圖形長度(cm)	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8	0.7	0.7
圖形描述	線形								
頻率(Hz)	490	491	492	493	494	495	496	497	498
圖形長度(cm)	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.7	0.7
圖形描述	線形								
頻率(Hz)	499	500	501	502	503	504	505	506	507
圖形長度(cm)	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9
圖形描述	線形								
頻率(Hz)	508	509	510	511	512	513	514	515	516
圖形長度(cm)	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
圖形描述	線形								
頻率(Hz)	517	518	519	520	521	522	523	524	525
圖形長度(cm)	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.6	0.6	0.6
圖形描述	線形								
頻率(Hz)	526	527	528	529	530	531	532	533	534~1200
圖形長度(cm)	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.6	0.6	0.5	0.0
圖形描述	線形								無變化

◎註：圖形描述列中不同的顏色區塊表示雷射光反射的紅點圖形樣式，標示粉紅色的為「線形」；標示粉藍色的為「橢圓形」；標示綠色的為「葫蘆形」；標示黃色的為「8字形」；標示橘色的為「圓形」；標示灰色的表示圖形維持一個紅點，沒有產生變化。

(三)實驗發現

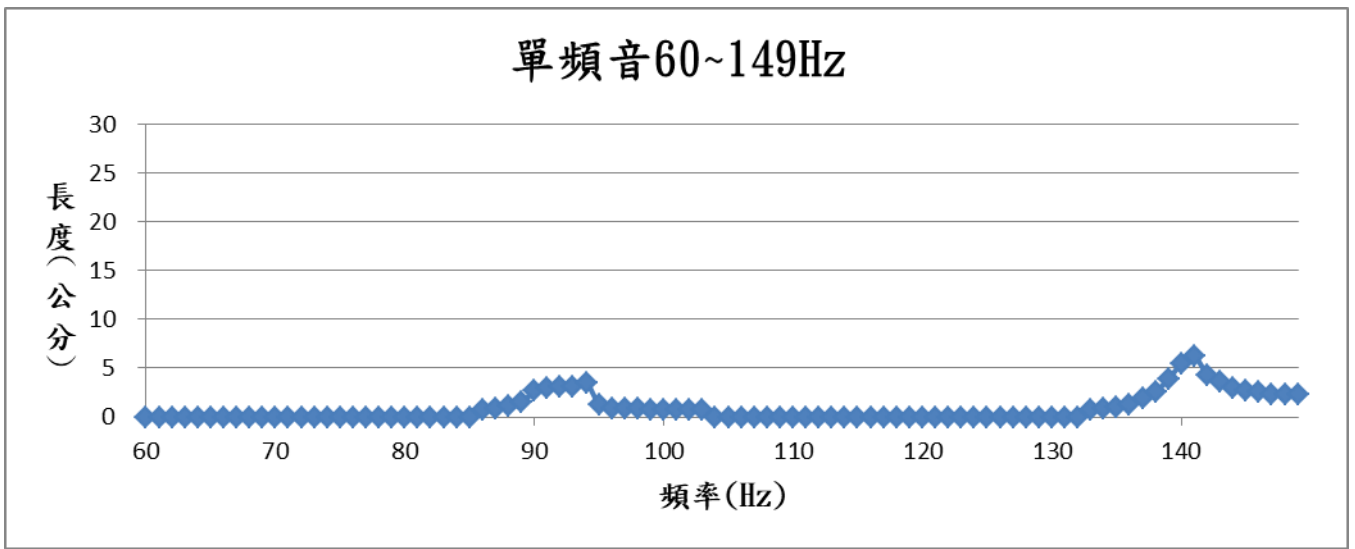


圖 4-1：單頻音介於 60~149Hz 間時，不同的單頻音與其雷射光反射的紅點圖形長度之關係圖

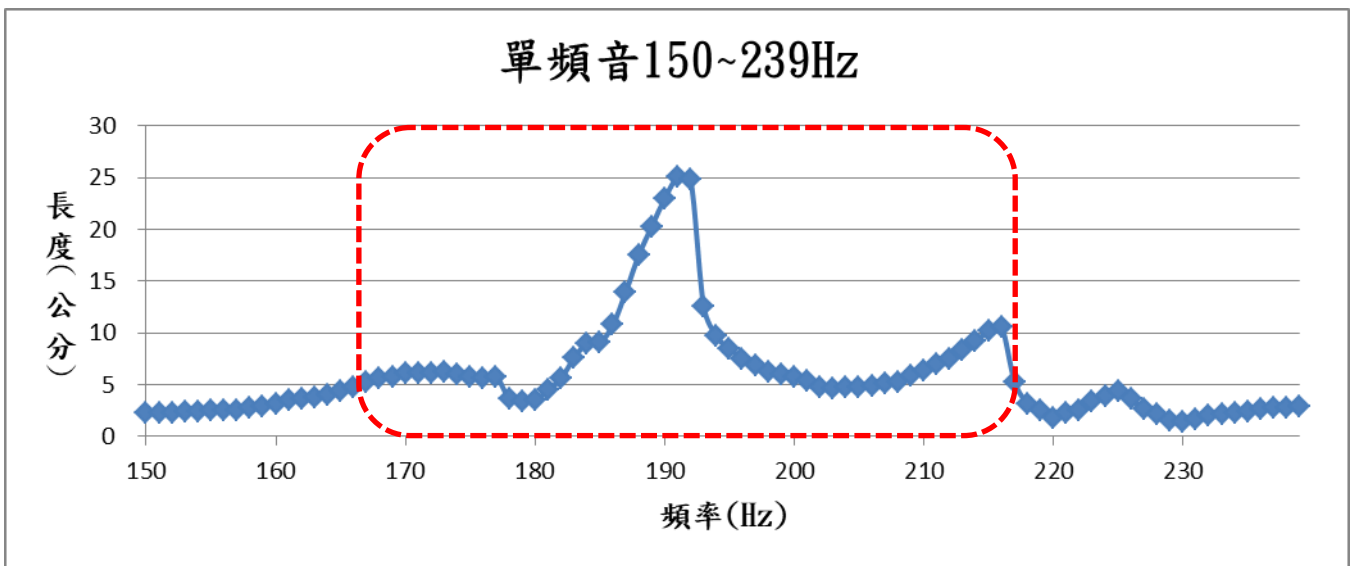


圖 4-2：單頻音介於 150~239Hz 間時，不同的單頻音與其雷射光反射的紅點圖形長度之關係圖

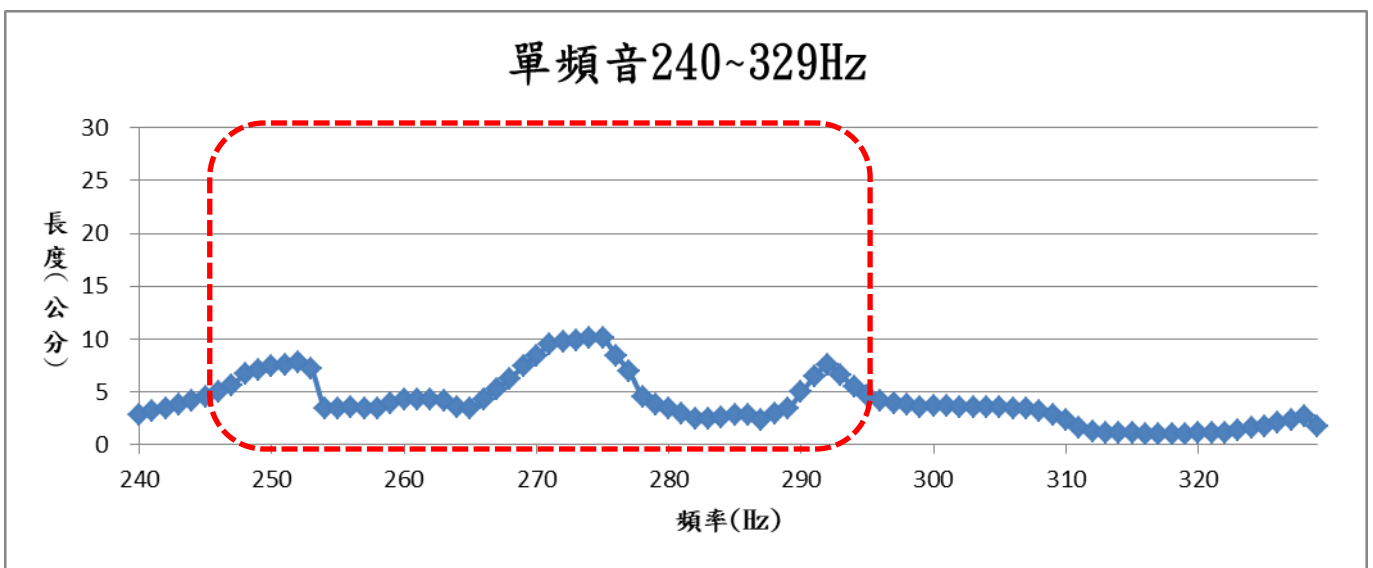


圖 4-3：單頻音介於 240~329Hz 間時，不同的單頻音與其雷射光反射的紅點圖形長度之關係圖

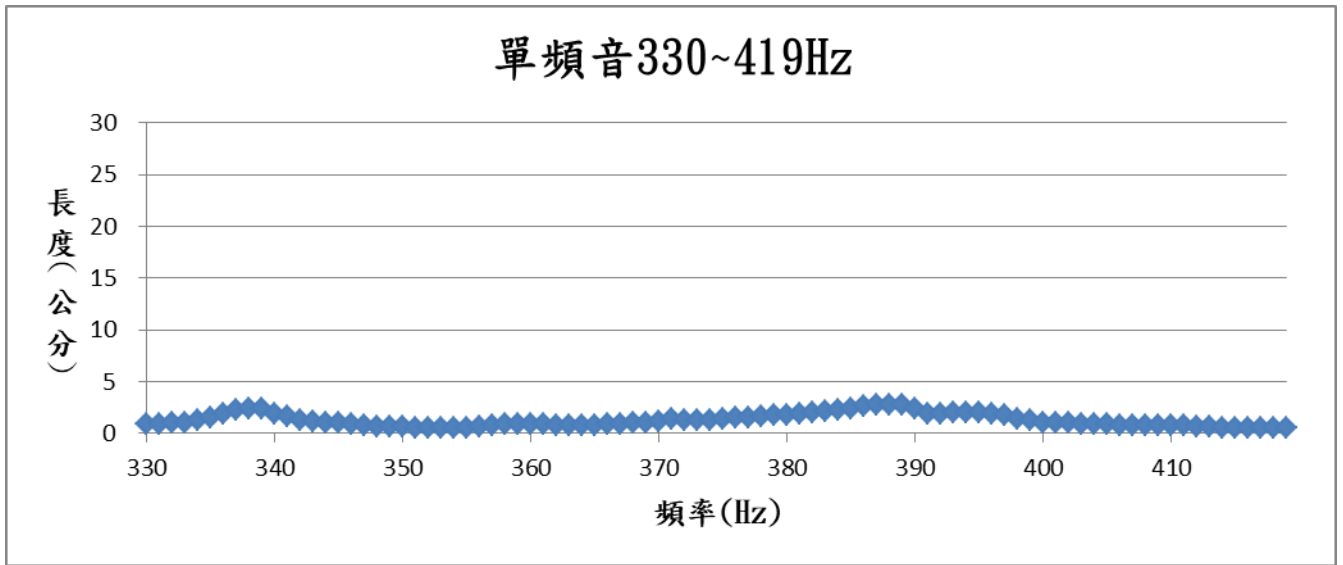


圖 4-4：單頻音介於 330~419Hz 間時，不同的單頻音與其雷射光反射的紅點圖形長度之關係圖

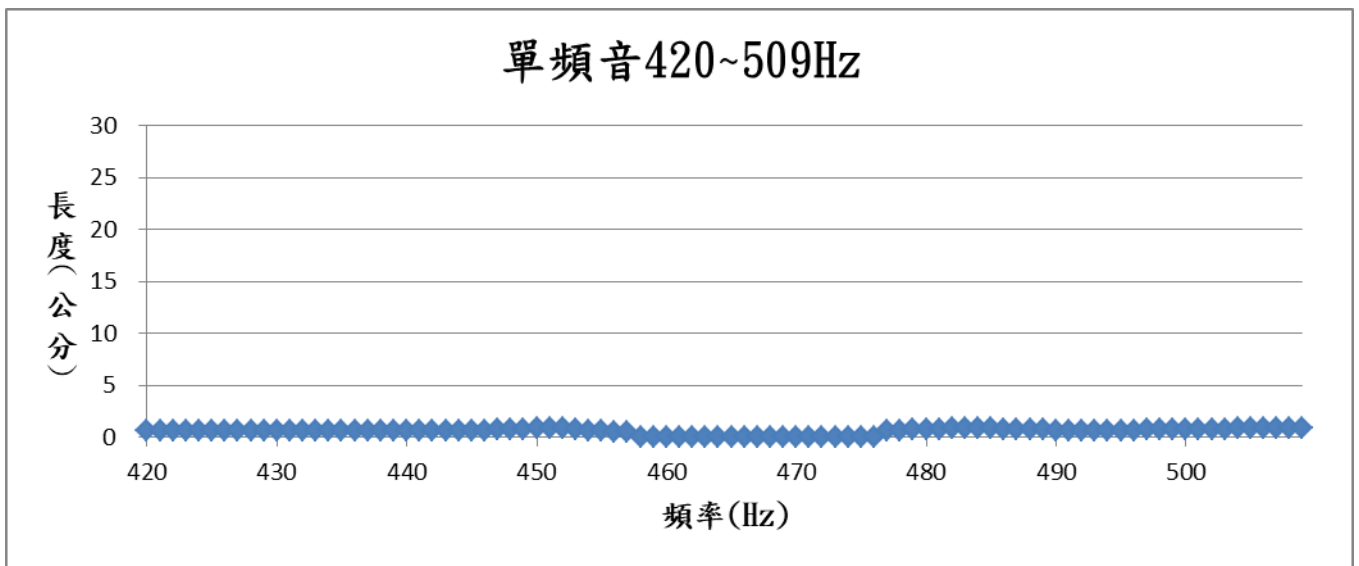


圖 4-5：單頻音介於 420~509Hz 間時，不同的單頻音與其雷射光反射的紅點圖形長度之關係圖

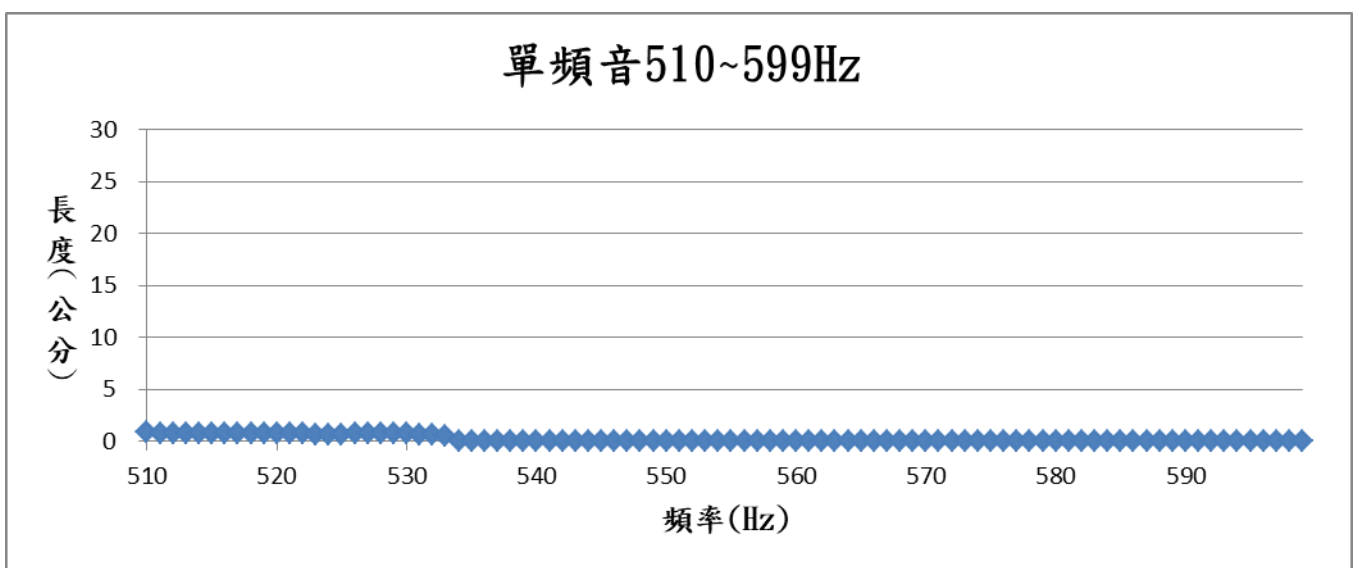


圖 4-6：單頻音介於 510~599Hz 間時，不同的單頻音與其雷射光反射的紅點圖形長度之關係圖

◎註：單頻音介於 600~1200Hz 間時，其雷射光反射的紅點圖形長度變化皆為 0cm，受限於頁數關係，將不呈現此頻率區間的關係圖。

1. 將表 4-1 製成圖 4-1~4-6 發現：

(1) 單頻音介於 165~215Hz 及 245~295Hz 區間時，雷射光筆反射的紅點圖形長度變化較為顯著(如圖 4-2 及圖 4-3 處)，表示介於這音頻區間的聲波會使氣球皮產生較大的振動。

(2) 承(1)，我們發現一件非常奧妙的事：雷射光筆反射的紅點圖形長度變化較為顯著的單頻音之音頻區間，竟然與實驗三中四位受測者在唱「Do」、「Re」、「Mi」三個音階時較為顯著的紅點圖形變化有高度相關！例如在 S、L 受測者在唱音階「Do」及「Mi」、S 受測者在唱音階「Re」時，其雷射光筆反射的紅點圖形長度變化較為顯著(如圖 4-7~4-9 處)，而分析受測者這些音階的頻譜都有落在 165~215Hz 及 245~295Hz 區間的頻帶。

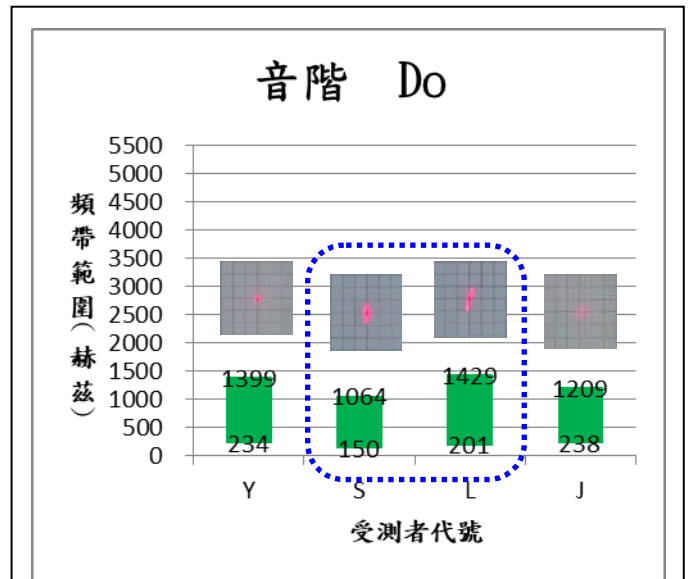


圖 4-7：四位受測者唱音階「Do」的頻帶範圍。

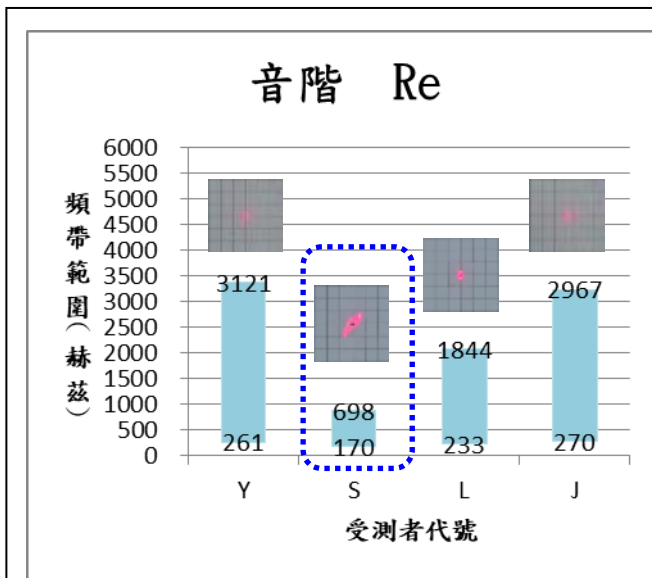


圖 4-8：四位受測者唱音階「Re」的頻帶範圍。

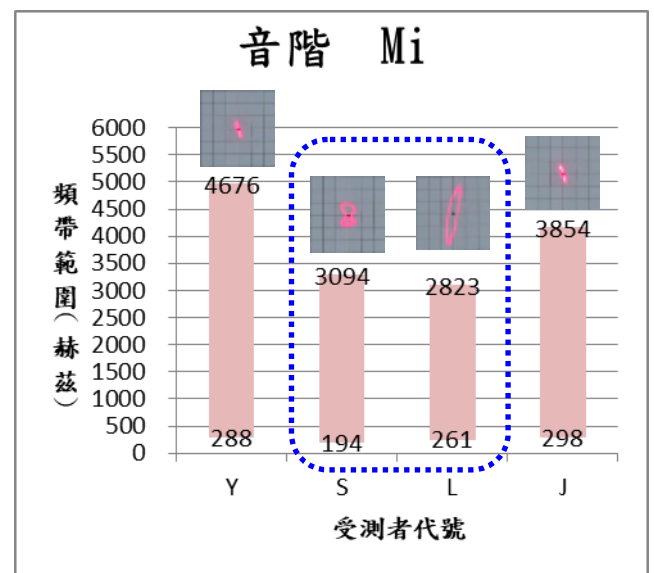


圖 4-9：四位受測者唱音階「Mi」的頻帶範圍。

2. 將雷射光反射的紅點圖形依據「長度變化」分類，如表 4-2，並計算其單頻音個數，可發現：

表 4-2：將紅點圖形長度依據「長度變化」範圍分類所得頻率區間一覽表

紅點圖形長度區間	單頻音之頻率區間					單頻音個數
紅點圖形長度=0cm	60~85Hz	104~132Hz	458~476Hz	534~1200Hz		740
0cm<紅點圖形長度<5cm	86~103Hz	133~139Hz	142~166Hz	178~181Hz	202~206Hz	332
	218~245Hz	254~266Hz	278~289Hz	295~457Hz	477~533Hz	
5cm≤紅點圖形長度<10cm	140~141Hz	167~177Hz	182~185Hz	194~201Hz	207~214Hz	56
	217Hz	246~253Hz	267~273Hz	276~277Hz	290~294Hz	
10cm≤紅點圖形長度<15cm	186~187Hz	193Hz	215~216Hz	274~275Hz		7
15cm≤紅點圖形長度	188~192Hz					5

- (1) 紅點圖形長度變化為 0cm 的單頻音總個數最多，有 740 個，表示這些單頻音無法使氣球皮產生振動。其中有 667 個單頻音落在 534~1200Hz，表示高頻音的聲波不容易使氣球皮產生振動。
- (2) 紅點圖形長度變化介於 0.1~4.9cm 的單頻音總個數次多，有 332 個，表示這些單頻音能使氣球皮產生微小振動。
- (3) 能使紅點圖形長度變化 ≥ 5.0 cm 的單頻音只有區區 68 個，其中 186~193Hz、215~216Hz、274~275Hz 等 12 個單頻音的紅點圖形長度可高達 10cm 以上，令人驚訝！(圖 4-10) 上述這些頻帶皆屬小於 300Hz 的低頻，顯示低頻音在空氣中傳播時，空氣分子振動小，摩擦比較慢，能量消耗少，所以傳播遠，通透力強，能使氣球皮輕易產生振動。

3. 將雷射光反射的紅點圖形會產生變化的 400 個單頻音依據「圖案類型」分成「線形」、「中空橢圓形」、「葫蘆形」、「8 字形」、「空心圓形」五大類，如表 4-3 所示：

- (1) 雷射光反射的紅點呈「線形」的單頻音最多，有 266 個，長度介於 0.5~12.6cm，線形長度最短的單頻音為 456、457、533Hz，長度最長的單頻音為 193Hz。
- (2) 雷射光反射的紅點呈「中空橢圓形」的單頻音次多，有 99 個，長度介於 0.6~25cm，橢圓形長度最短的單頻音為 355Hz，長度最長的單頻音為 191Hz。
- (3) 雷射光反射的紅點呈「葫蘆形」的單頻音個數有 10 個，長度介於 3.8~6.2cm，長度最短的單頻音為 163Hz，長度最長的單頻音為 173Hz。
- (4) 雷射光反射的紅點呈「8 字形」的單頻音個數有 12 個，長度介於 1.3~6.2cm，長度最短的單頻音為 95Hz，長度最長的單頻音為 171、172Hz。
- (5) 雷射光反射的紅點呈「空心圓形」的單頻音個數有 13 個，長度介於 0.6~1.3cm，除了長度最長的單頻音為 374Hz 外，其他單頻音的長度皆為 0.6cm。

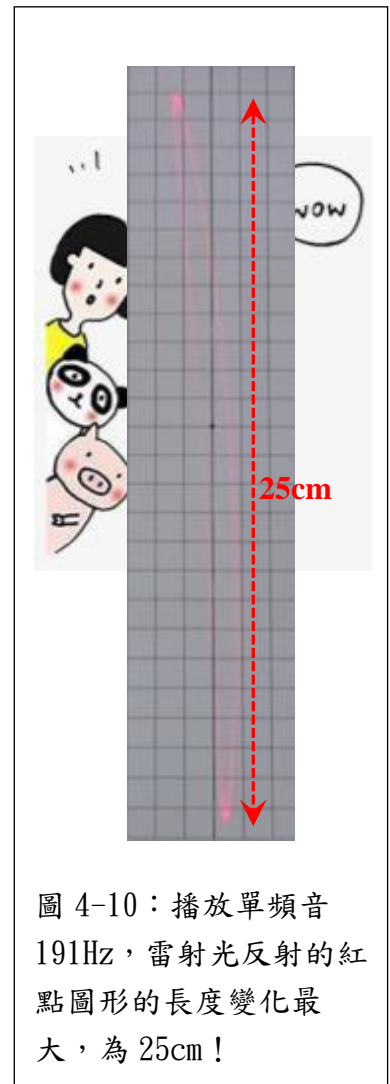
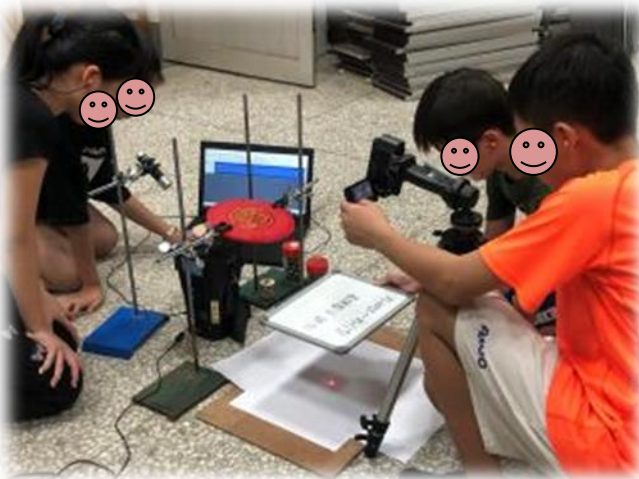


圖 4-10：播放單頻音 191Hz，雷射光反射的紅點圖形的長度變化最大，為 25cm！








▲ 實驗照片



▲ 為減少低頻或高頻聲音對耳朵的傷害，我們進行實驗時，都會配戴耳塞。

表 4-3：將紅點圖形長度依據「圖案類型」分類所得頻率區間一覽表

項目	圖案名稱	示例/單頻音頻率	單頻音之頻率區間				單頻音個數
1	線形		86-92Hz	96-103Hz	133-162Hz	193-213Hz	266
			220-239Hz	253-259Hz	270-283Hz	293-299Hz	
			319-354Hz	360-369Hz	397-417Hz	422-436Hz	
			445-457Hz	477-533Hz			
2	中空 橢圓形		175-192Hz	214-219Hz	247-252Hz	260-269Hz	99
			284-292Hz	300-318Hz	355-359Hz	370-373Hz	
			375-396Hz				
3	葫蘆形		163-170Hz	173-174Hz			10
4	8字形		93-95Hz	171-172Hz	240-246Hz		12
5	空心 圓形		374Hz	418-421Hz	437-444Hz		13

實驗五：聲音的響度如何影響方格屏幕上的圖案變化？



本實驗選擇 180~200Hz 之低頻範圍進行響度之實驗分析

從實驗四中得知雷射光反射的紅點圖形長度變化**超過 15cm 皆落在 188~192Hz 之低頻範圍**，因此本子題將據此擴充至 180~200Hz 的頻率範圍進行關於響度的變因分析。

(一) 實驗方法

1. 氣球繃框尺寸固定為 6cm，**改變電腦音量為 10%、15%、20%、25%、30%**，以 Audacity 程式透過 450W 喇叭一一播放 180~200Hz 的單頻音，透過「聲波振動顯現儀」觀察並錄製方格屏幕上雷射光筆反射的圖形變化。
2. 擷取每個單頻音其投射在方格屏幕上的圖形，並以 Image-J 程式量測雷射光紅點圖形的長度變化。
3. 實驗反覆進行三次，求平均值。

(二) 實驗結果(表 5-1)

(三) 實驗發現

1. 將表 5-1 製成圖 5-1 發現，**聲音的音量增強，雷射光反射的紅點圖形長度也會隨之變大**：音量 10~20%間圖形的長度增大情形非常顯著；音量 20%~25%間，192、193Hz 單頻音其圖形長度增大情形較顯著；音量 25~30%間圖形的長度差距極小。表示**音量增強，聲波振幅增大，能使氣球皮產生更大的振動**。
3. 受限於頁數，僅呈現 189、193、194Hz 單頻音在音量 10%~30% 間，雷射光反射的紅點圖形，如表 5-2，發現**音量從 10%增大至 30%時，雷射光反射的紅點圖形除了長度增加之外，圖案也從「線形」變成了「葫蘆形」或「橢圓形」**。
4. 實驗四曾以音量 20%進行不同頻率的圖形分析，由實驗五可推論音量為 20%時，出現「線形」的單頻音有可能因音量增大而變成「葫蘆形」或「橢圓形」；出現「葫蘆形」或「橢圓形」的單頻音有可能因音量減小而變成「線形」。

表 5-1：單頻音 180~200Hz，

不同響度下雷射光反射的紅點圖形之長度一覽表

圖形 單頻音 音量(%) 長度(cm)	10%	15%	20%	25%	30%
180Hz	1.6	2.3	3.5	4.4	5.0
181Hz	1.7	2.5	4.5	4.9	6.1
182Hz	1.8	3.0	5.6	6.6	7.5
183Hz	1.9	3.5	7.6	8.1	9.8
184Hz	2.1	4.0	9.0	10.1	12.0
185Hz	2.3	5.1	9.1	12.6	15.2
186Hz	2.6	6.6	10.8	13.0	15.4
187Hz	3.9	7.8	14.0	15.6	18.4
188Hz	5.8	11.3	17.5	18.5	20.9
189Hz	9.2	15.0	20.3	21.9	23.3
190Hz	8.5	18.1	23.0	24.2	26.0
191Hz	7.5	11.5	25.0	27.3	28.0
192Hz	4.6	7.9	24.8	29.7	30.3
193Hz	3.1	5.3	12.6	30.2	31.7
194Hz	2.7	4.5	9.7	11.3	13.9
195Hz	2.1	4.2	8.5	10.0	10.0
196Hz	1.9	3.7	7.5	8.7	8.7
197Hz	1.8	3.5	6.8	8.1	8.2
198Hz	1.6	3.3	6.3	7.4	7.4
199Hz	1.5	3.1	6.0	7.1	7.3
200Hz	1.4	2.9	5.7	6.5	7.2

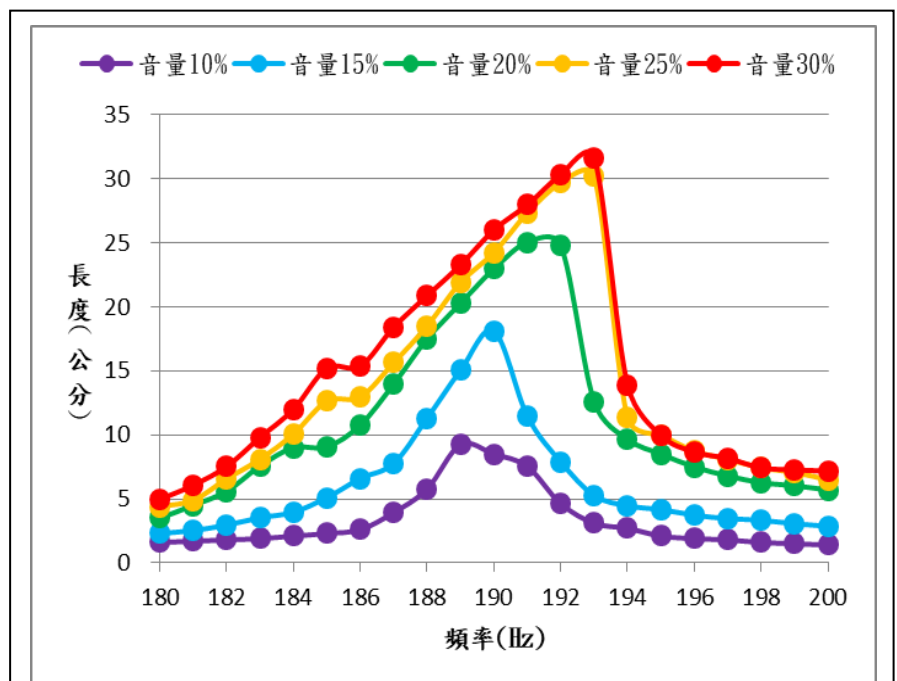
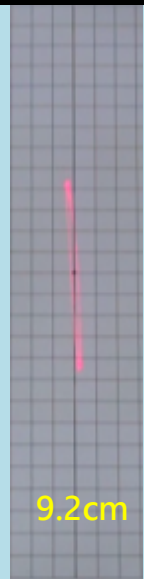
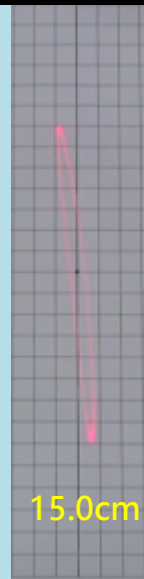
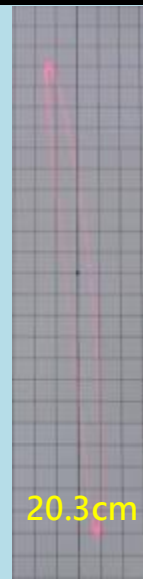
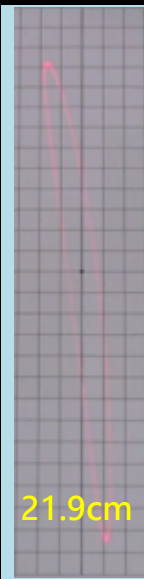




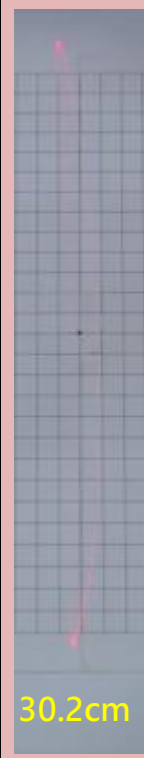



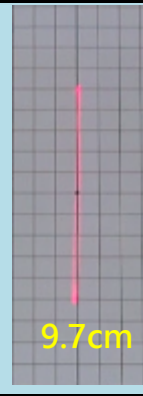
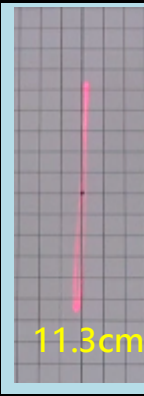
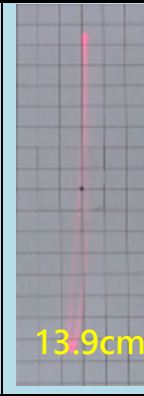


圖 5-1：不同的響度與雷射光反射的紅點圖形長度之關係圖

表 5-2：單音頻 189、193、194Hz 時，不同響度下雷射光反射的紅點圖形照片一覽表

圖形 頻率	音量 10%	15%	20%	25%	30%
189Hz	 9.2cm	 15.0cm	 20.3cm	 21.9cm	 23.3cm
193Hz	 3.1cm	 5.3cm	 12.6cm	 30.2cm	 31.7cm
194Hz	 2.7cm	 4.5cm	 9.7cm	 11.3cm	 13.9cm

實驗六：氣球皮的面積如何影響方格屏幕上的圖案變化？

(一)實驗方法

- 藉由更換直徑 6cm 及直徑 8cm 的氣球繃框尺寸，以改變「聲波振動顯現儀」中氣球皮面積分別為 28.26cm^2 、 50.24cm^2 。以 Audacity 程式透過 450W 喇叭一一播放 180~200Hz 的單頻音，音量固定為 20%，觀察並錄製方格屏幕上雷射光筆反射的圖形變化。
- 擷取每個單頻音其投射在方格屏幕上的圖形，並以 Image-J 程式量測雷射光紅點圖形的長度變化。
- 實驗反覆進行三次，求其平均值。

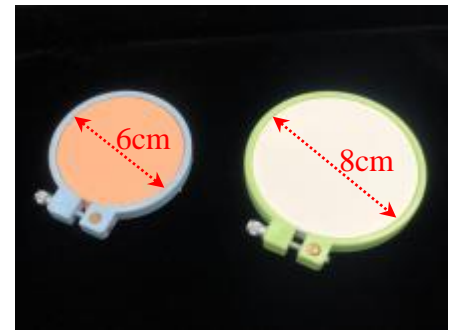


圖 6-1：二種氣球繃框尺寸分別為直徑 6cm 及直徑 8cm

(二)實驗結果

表 6-1：單音頻 180~200Hz，不同繃框尺寸下雷射光反射的紅點圖形之長度一覽表

圖形 長度(cm) 繃框尺寸	單頻音											
	180	181	182	183	184	185	186	187	188	189	190	
6cm	3.5	4.5	5.6	7.6	9.0	9.1	10.8	14.0	17.5	20.3	23.0	
8cm	3.3	3.8	4.1	6.0	7.6	8.2	10.2	12.8	15.1	17.2	19.3	
圖形 長度(cm) 繃框尺寸	單頻音											
	191	192	193	194	195	196	197	198	199	200		
6cm	25.0	24.8	12.6	9.7	8.5	7.5	6.8	6.3	6.0	5.7		
8cm	20.5	21.9	8.7	5.8	4.8	4.3	3.9	3.6	3.4	3.3		

(三)實驗發現

- 將表 6-1 製成圖 6-2 發現，繃框尺寸加大，連帶會使受聲波振動的氣球皮面積增大，任一單頻音其雷射光反射的紅點圖形長度稍變小。
- 以 187Hz、192Hz 單頻音為例，將其圖形長度變化、圖樣整理成表 6-2 後發現，受聲波振動的氣球皮面積增大後，不僅使紅點圖形長度變小，圖形也會發生改變，(187Hz 從「橢圓形」變成「線形」、192Hz 從「橢圓形」變成「長 8 字形」)，且紅點圖形顏色也變得比較深，這些結果都在顯示氣球皮面積

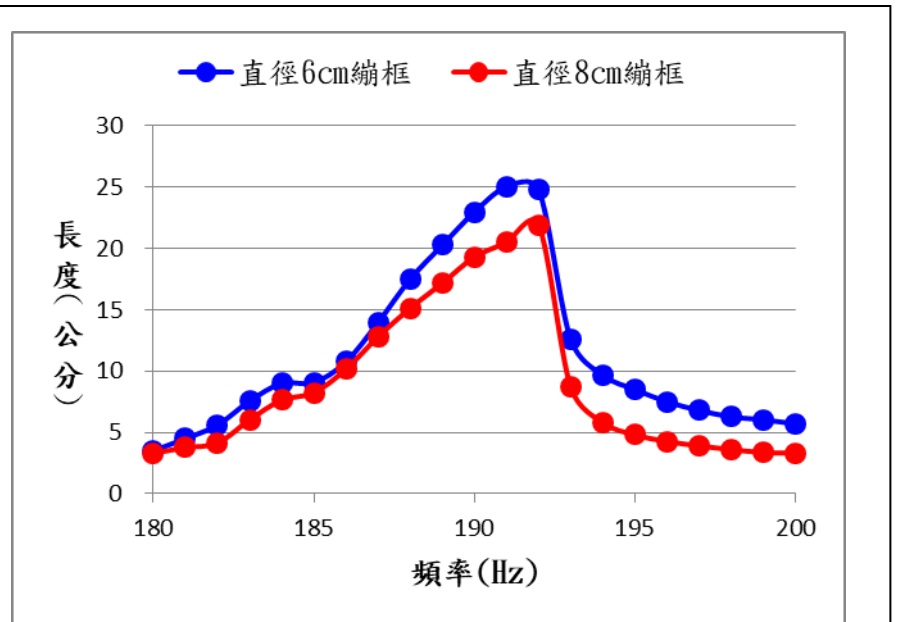


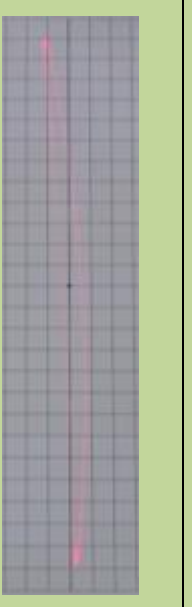



圖 6-2：不同氣球皮面積與雷射光反射的紅點圖形長度之關係圖

增大後，氣球皮雖受同一單頻音聲波影響，但振動幅度變小了。

表 6-2 繃框尺寸 6cm、8cm 時，其雷射光反射的紅點圖形之長度、圖樣一覽表

單頻音	187 Hz		192 Hz	
繃框尺寸	6cm	8cm	6cm	8cm
圖形長度	14.0	12.8	24.8	21.9
圖形照片				

實驗七：不同的氣球皮緊繃程度如何影響方格屏幕上的圖案變化？

(一) 實驗方法

- 以 Audacity 程式透過 450W 喇叭一一播放 60~500Hz 的單頻音，音量固定為 20%，氣球繃框尺寸固定為 6cm，改變氣球皮三種不同的緊繃程度，以「聲波振動顯現儀」觀察並錄製方格屏幕上雷射光筆反射的圖形變化，找出能使三種不同緊繃程度的氣球皮之雷射光筆反射最大圖形的頻率範圍。
- 改變氣球皮三種不同緊繃程度的方法：
 - (1) 在剪開的氣球皮上，以代針筆畫出 3 個同心圓，由內而外為命名 A、B、C 圓，分別距離圓心 2cm、2.5cm、3cm(圖 7-1)。
 - (2) 分別將 C、B、A 圓的圓周記號調整至繃框內框邊緣處，即可將框架上的氣球皮界定為「低度緊繃」、「中度緊繃」、「高度緊繃」等三種程度。



圖 7-1：在剪開的氣球皮上，畫出三個等距的同心圓。

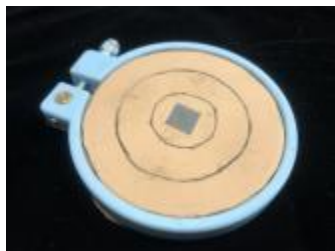


圖 7-2：將 C 圓的圓周記號調整至繃框內框邊緣處，即屬「低度緊繃」。



圖 7-3：將 B 圓的圓周記號調整至繃框內框邊緣處，即屬「中度緊繃」。



圖 7-4：將 A 圓的圓周記號調整至繃框內框邊緣處，即屬「高度緊繃」。

3. 擷取每個單頻音其投射在方格屏幕上的圖形，並以 Image-J 程式量測雷射光紅點圖形的長度變化。

4. 實驗反覆進行三次。

(二) 實驗結果

表 7-1：不同緊繃程度氣球皮能使雷射光筆反射出最大圖形的頻率範圍及其圖形長度一覽表

緊繃程度	項 目	能使雷射光筆反射出最大圖形的頻率範圍及其圖形長度								
低度	單 頻 音(Hz)	180	181	182	183	184	185	186		
	圖形長度(cm)	3.5	4.5	5.6	7.6	9.0	9.1	10.8		
	單 頻 音(Hz)	187	188	189	190	191	192	193		
	圖形長度(cm)	14.0	17.5	20.3	23.0	25.0	24.8	12.6		
	單 頻 音(Hz)	194	195	196	197	198	199	200		
	圖形長度(cm)	9.7	8.5	7.5	6.8	6.3	6.0	5.7		
中度	單 頻 音(Hz)	229	230	231	232	233	234	235		
	圖形長度(cm)	0.7	2.0	5.4	8.5	22.2	18.2	12.4		
	單 頻 音(Hz)	236	237	238	239	240	241	242		
	圖形長度(cm)	6.1	5.0	4.2	3.3	1.7	1.2	1.0		
	單 頻 音(Hz)	243								
	圖形長度(cm)	0.7								
高度	單 頻 音(Hz)	268	269	270	271	272	273	274		
	圖形長度(cm)	1.1	2.7	8.7	13.1	5.9	4.5	3.5		
	單 頻 音(Hz)	275	276	277	278	279	280			
	圖形長度(cm)	2.8	2.2	1.4	1.1	1.0	0.6			

(三) 實驗發現

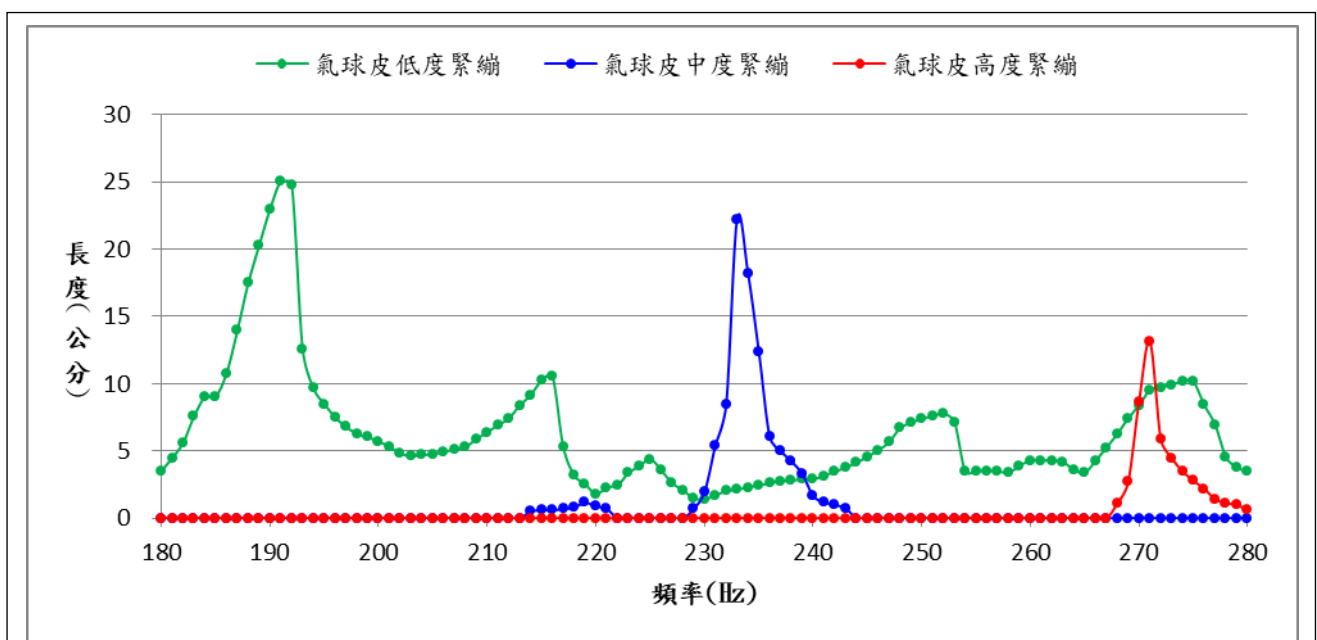


圖 7-5：不同緊繃程度氣球皮能使雷射光筆反射出最大圖形的頻率範圍及其圖形長度關係圖

1. 進行 60~500Hz 單頻音掃描的過程中，掃描到能使「中度」及「高度」緊繃的氣球皮產生振動的聲波頻率時，氣球皮上的鏡面紙會發生有趣的「線狀殘影」(圖 7-6)，還伴隨強烈「噹~噹~噹~」低沉的振動聲，這些現象都顯示**氣球皮越緊繃，受聲波影響而產生的振動速度越快！**
2. 承 1，從側面的兩種角度拍攝氣球皮的振動現象時，可以明顯看見氣球皮受聲波影響而劇烈的上下振動，因視覺暫留產生有趣的畫面！(圖 7-7)

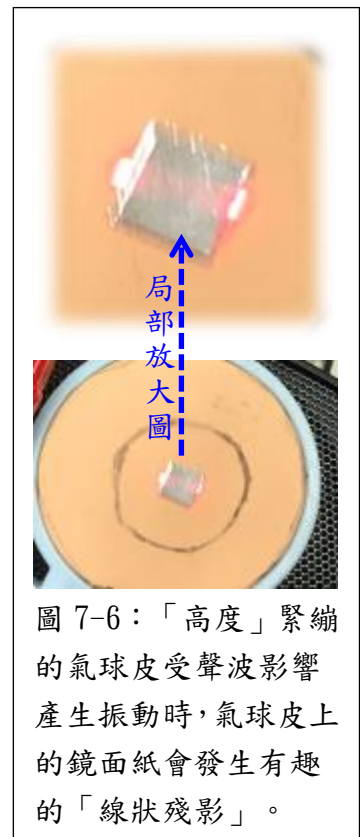


圖 7-6：「高度」緊繃的氣球皮受聲波影響產生振動時，氣球皮上的鏡面紙會發生有趣的「線狀殘影」。

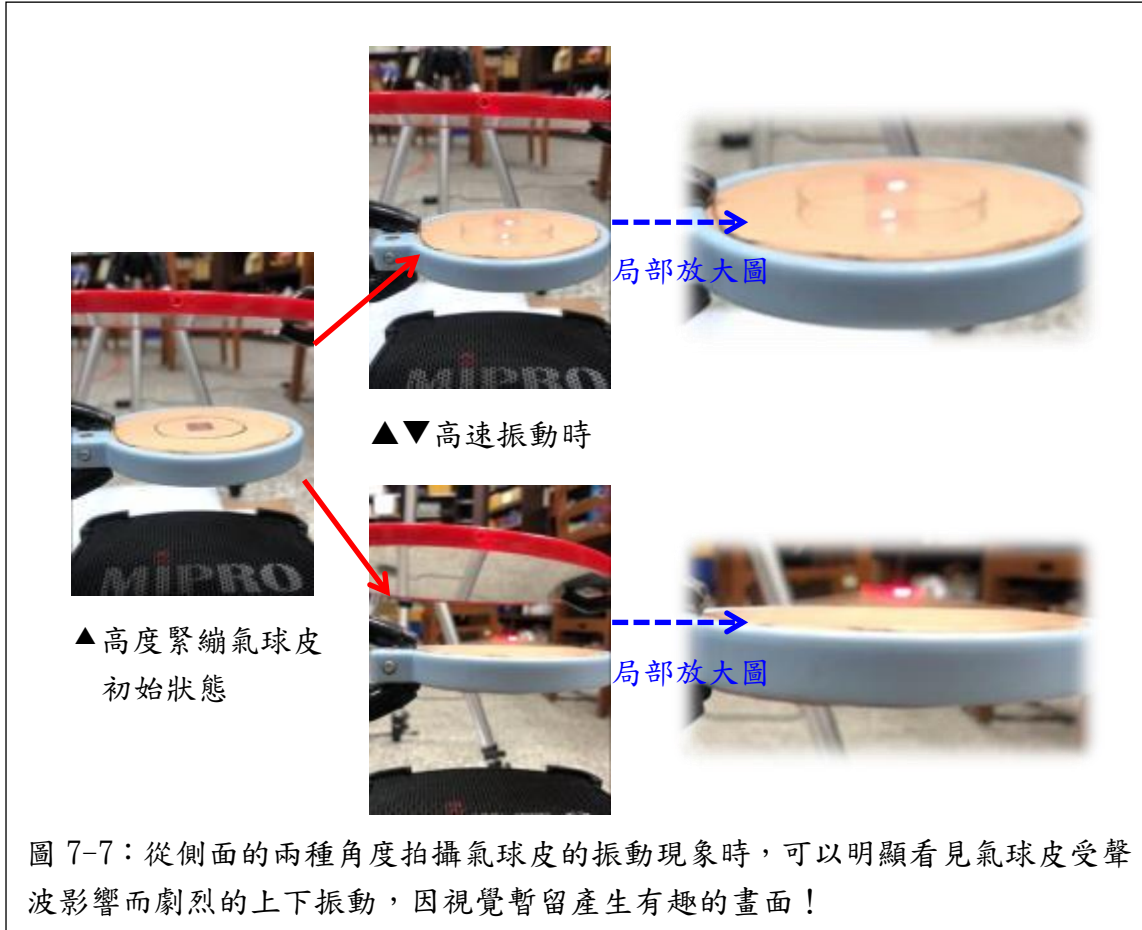


圖 7-7：從側面的兩種角度拍攝氣球皮的振動現象時，可以明顯看見氣球皮受聲波影響而劇烈的上下振動，因視覺暫留產生有趣的畫面！

3. 將表 7-1 製成圖 7-5 發現：

- (1) **氣球皮緊繃程度越高，要使其產生較大振動的頻率就越高**：能使「低度緊繃」、「中度緊繃」「高度緊繃」的氣球皮產生顯著圖形的單頻音分別介於 180~200Hz、229~243Hz、268~280Hz。
- (2) **氣球皮緊繃程度越高，雷射光筆反射所產生的最大圖形長度越小**：191Hz 能使「低度緊繃」的氣球皮產生最大圖形長度為 25cm(圖 7-8);233Hz 能使「中度緊繃」的氣球皮產生最大圖形長度為 22.2cm(圖 7-9);271Hz 能使「高度緊繃」的氣球皮產生最大圖形長度為 13.1cm(圖 7-10)。
- (3) **氣球皮緊繃程度越高，雷射光筆反射所生成的圖形會有較複雜的殘影！**推測這是因為氣球皮越緊繃，受聲波影響所產生的振動方向越複雜、越快速的關係。

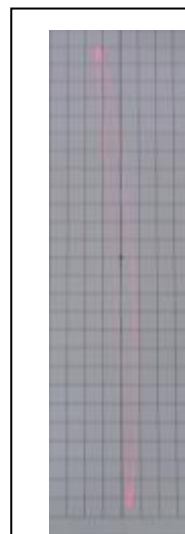


圖 7-8：「低度緊繃」氣球皮 191Hz 時最大圖形長度 25cm。



圖 7-9：「中度緊繃」氣球皮 233Hz 時最大圖形長度 22.2cm。

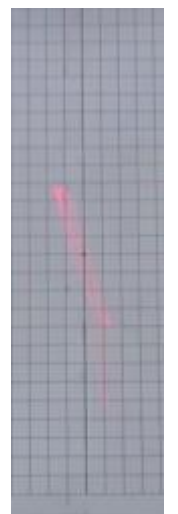


圖 7-10：「高度緊繃」氣球皮 271Hz 時最大圖形長度 13.1cm。

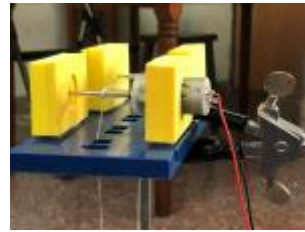
實驗八：研發「聲波振動模式檢測儀」以檢測氣球皮如何受聲波擾動而生成各式雷射光反射之圖形。

(一) 實驗方法

1. 研發「聲波振動模式檢測儀」：(圖 8-1~8-8)

長條狀氣球皮彈跳起動裝置

► 圖 8-3：用減速馬達、棉繩、鐵片、鈦鐵硼磁鐵組成可拉動 B 繃框上條狀氣球皮的裝置，使其能反覆彈動。



▲ 圖 8-4：減速馬達的設計可收放綁著鐵片的棉繩。



▲ 圖 8-5：鐵片與條狀氣球皮下方鈦鐵硼磁鐵相吸引。

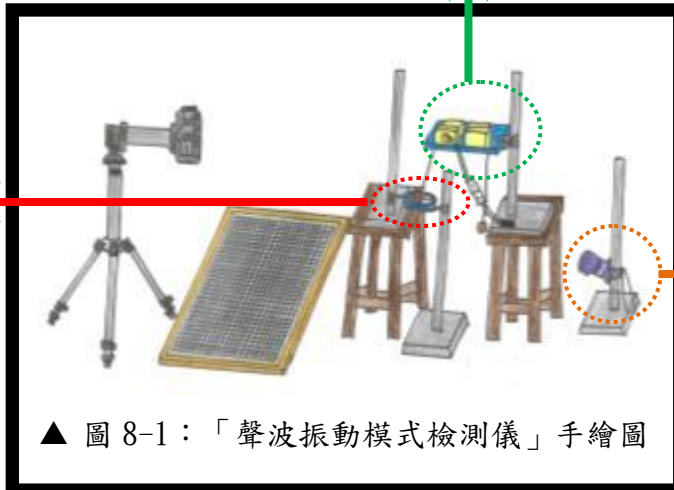
A、B 繃框設計



▲ 圖 8-6：B 繃框上黑色磁鐵彈跳時會敲擊 A 繃框上氣球皮，以模擬受聲波擾動的不同狀態。



▲ 圖 8-7：A 繃框氣球皮中間黏一鏡面紙，有鏡面紙那面朝下。

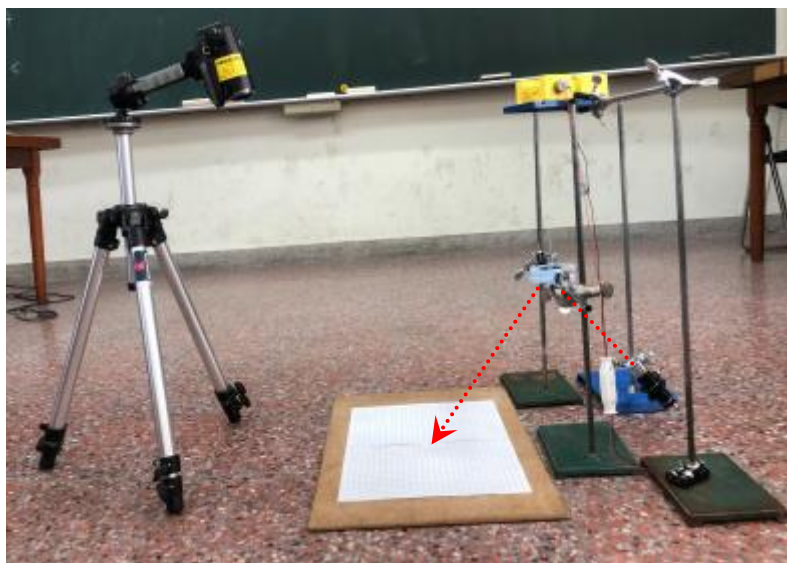


▲ 圖 8-1：「聲波振動模式檢測儀」手繪圖

雷射光筆



▲ 圖 8-8：以鐵架固定雷射光筆。



▲ 圖 8-2：雷射光線行進及反射路徑(如圖中紅色虛線處)

(1) 「聲波振動模式檢測儀」A、B 繃框裝置介紹：

- ①準備兩個繃框，命名為 A、B。
- ②氣球皮以「低度緊繃程度」固定於 A 繃框，氣球皮中間黏貼一鏡面紙，有鏡面紙那面朝下。
- ③取氣球皮裁剪成數段寬度 1cm 的長條狀氣球皮(圖 8-9)，將其依【一字形】、【十字型】、【X 字形】三種形式固定於 B 繃框上(圖 8-10)：



圖 8-9：裁剪成數段寬度 1cm 的長條狀氣球皮。



圖 8-10：將長條狀氣球皮分別以【一字形】、【十字型】、【X 字形】方式固定於 B 繃框上。



- ④B 繃框裝置於 A 繃框上，相互緊鄰，以鐵架固定。

(2) 利用減速馬達、棉繩、鐵片、鈹鐵硼磁鐵等組合成「長條狀氣球皮彈跳起動裝置」來拉動條狀氣球皮使其能反覆彈動：

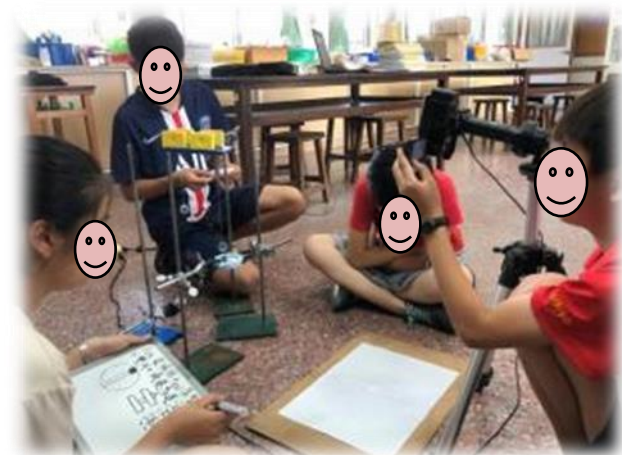
將一薄型鈹鐵硼磁鐵固定於 B 繃框長條狀氣球皮中間正下方，再以減速馬達、棉繩懸掛一鐵片與鈹鐵硼磁鐵相吸引，啟動減速馬達以拉動條狀氣球皮，待磁力不足以負荷條狀氣球皮彈力時，鐵片會與鈹鐵硼磁鐵脫離，此時條狀氣球皮會反覆彈動。

(3) 模擬 A 繃框上的氣球皮受聲波擾動的不同狀態：

- ①利用兩個黑色圓形磁鐵為一組的形式，將其固定於 B 繃框條狀氣球皮上的不同位置(表 8-7，藍色表示 B 繃框、紅色表示長條狀氣球皮位置、黑色圓圈表示圓形磁鐵位置)。
- ②當 B 繃框的條狀氣球皮發生彈跳時，條狀氣球皮上的黑色圓磁鐵組會反覆敲擊 A 繃框上該點氣球皮，使其反覆產生振動，藉以模擬 A 繃框上的氣球皮受聲波擾動的不同狀態，觀察雷射光反射至方格屏幕上圖形變化。

2. 各種不同擾動模式各進行三次實驗，錄影並擷取不同擾動模式其雷射光反射在方格屏幕上的圖形，分析擾動位置及生成圖形關聯性。

(二) 實驗結果



▲ 實驗照片



▲ 用攝影機記錄雷射光反射的圖形變化，

表 8-1：不同擾動模式的雷射光反射所生成圖形一覽表

擾動模式		照片	擾動 A 繃框位置示意圖	雷射光反射在方格屏幕上的圖形示例	說明
一字形	單點振動				<ul style="list-style-type: none"> ▶ 生成圖形呈「線形」 ▶ 生成圖形方向與條狀氣球皮同方向
	雙點振動				<ul style="list-style-type: none"> ▶ 生成圖形呈「長直線形」 ▶ 生成圖形方向與條狀氣球皮同方向
十字形	等距				<ul style="list-style-type: none"> ▶ 生成圖形呈「橢圓形」 ▶ 生成圖形方向與兩黑磁鐵連線呈垂直方向
	不等距				<ul style="list-style-type: none"> ▶ 生成圖形呈「8 字形」或「葫蘆形」 ▶ 生成圖形方向與兩黑磁鐵連線呈垂直方向
X 字形	銳角端等距				<ul style="list-style-type: none"> ▶ 生成圖形呈「橢圓形」 ▶ 生成圖形方向與兩黑磁鐵連線呈垂直方向
	銳角端不等距				<ul style="list-style-type: none"> ▶ 生成圖形呈「8 字形」或「葫蘆形」 ▶ 生成圖形方向與兩黑磁鐵連線呈垂直方向
	鈍角端等距				<ul style="list-style-type: none"> ▶ 生成圖形呈「橢圓形」 ▶ 生成圖形方向與兩黑磁鐵連線呈垂直方向
	鈍角端不等距				<ul style="list-style-type: none"> ▶ 生成圖形呈「8 字形」或「葫蘆形」 ▶ 生成圖形方向與兩黑磁鐵連線呈垂直方向

(三) 實驗發現

註：▣表示 A 繃框上的鏡面紙位置。

1. 透過「聲波振動模式檢測儀」可得知：

(1) 若 B 繃框上的條狀氣球皮為「一字形」，不論黑色圓形磁鐵是單點或雙點設置，使 A 繃框上的氣球皮產生振動，其雷射光反射所生成的圖形皆屬「線形」，生成的「線形」圖形會與條狀氣球皮同方向。

- (2)若 B 繡框上的條狀氣球皮為「**十字形**」或「**X 字形**」，當黑色圓形磁鐵與中心點等距設置，使 A 繡框上的氣球皮產生振動，其雷射光反射所生成的圖形皆屬「**橢圓形**」，生成的「**橢圓形**」方向與兩黑磁鐵連線呈垂直方向。
- (3)若 B 繡框上的條狀氣球皮為「**十字形**」或「**X 字形**」，當黑色圓形磁鐵與中心點不等距設置，使 A 繡框上的氣球皮產生振動，其雷射光反射所生成的圖形皆屬「**8 字形**」或「**葫蘆形**」，生成的「**8 字形或葫蘆形**」方向與兩黑磁鐵連線呈垂直方向。
2. 條狀氣球皮彈跳的力道越大，其雷射光反射所生成的圖形長度越長。
3. 由結果反推實驗三~七中，當某單頻音使雷射光反射所生成圖形呈「**線形**」時，是因氣球皮產生「**同方向的單點或雙點振動**」；當某單頻音使雷射光反射所生成圖形呈「**橢圓形**」時，是因氣球皮產生「**不同方向且距中心點等距的雙點振動**」；當某單頻音使雷射光反射所生成的圖形呈「**8 字形**」或「**葫蘆形**」時，是因氣球皮產生「**不同方向且距中心點不等距的雙點振動**」。

伍、結論

一、自行研發出既安全又能精準量測聲源透過氣球皮振動而反射出圖形變化的【**聲波振動顯現儀**】。

(一)使用【**刺繡用塑膠繡框**】固定氣球皮

以往研究都有集音筒的裝置，**集音筒的存在會使聲音在筒中因反射而產生能量加大的效果**，便無法得知單純依靠不同特性的聲源是如何影響氣球薄膜振動所形成反射圖形的各種變化。

因此在實驗二中，**為了要移除以往「雷射聲波筒」中「集音筒」的裝置，必須找出能使氣球皮直接套在框架上的材料**，經過多方嘗試後，我們選擇【**紙筒框**】、【**PVC 塑膠水管框**】、【**塑膠繡框**】三種固定氣球皮的框架進行測試。

透過測試後的優缺點分析，最後**選擇堅固耐用、使氣球皮不會鬆脫、可輕易改變氣球皮的鬆緊程度、且有多種直徑尺寸可選擇等多項優點的【刺繡用塑膠繡框】**(圖 9-1)來固定氣球皮。

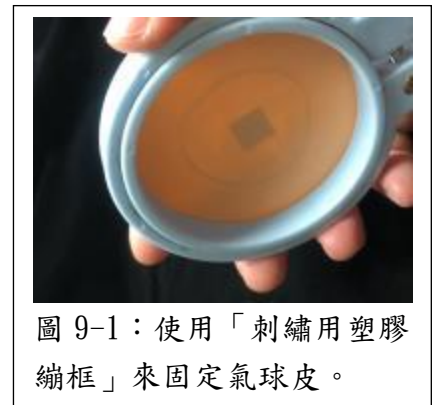


圖 9-1：使用「刺繡用塑膠繡框」來固定氣球皮。

(二)研發既安全又能精確量測實驗結果的【**聲波振動顯現儀**】裝置

過往研究多是將雷射光筆黏貼在集音筒邊緣，但雷射光筆極有可能因位置偏差而直射操作同學的眼睛，非常危險！經過我們反覆測試，終於**研發出【聲波振動顯現儀】**，雷射光由上往下照射至氣球皮上的鏡面紙，再反射至鏡子，最後透過鏡子反射至方格屏幕(圖 9-2)，**不僅達到避免雷射光筆直射眼睛的疑慮，而且也能輕易地透過攝影機錄製雷射光反射的圖形變化進行實驗分析。**

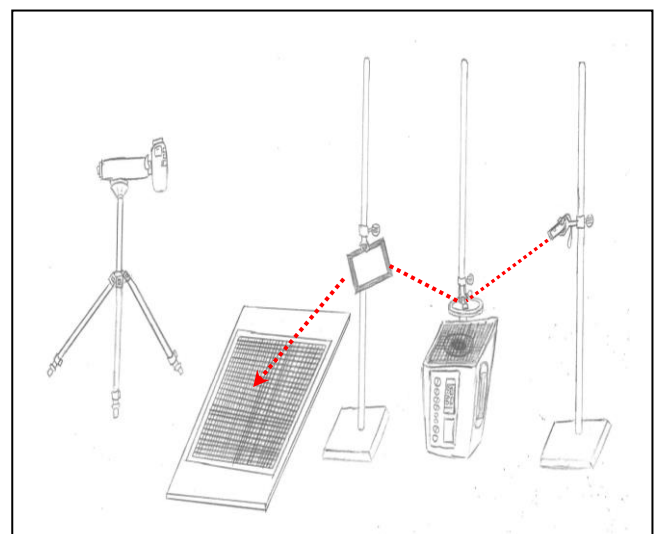


圖 9-2：「聲波振動顯現儀」全貌(紅色虛線顯示雷射光線反射路徑)。

二、聲音的頻率會影響投射至方格屏幕上紅點圖形的長度及形狀變化，其中尤以介於 140~300 Hz 的低頻音較容易使氣球皮產生大幅的振動。

(一) 實驗三透過分析四位同學唱的「Do」、「Re」、「Mi」的頻譜察覺雷射光紅點位移產生「粗線形」、「8 字形」或「中空橢圓形」等顯著圖形者，其頻帶範圍都相對較窄，且最低頻率也比較小。這與實驗四分析 60~1200Hz 單頻音得知 165~215Hz 及 245~295Hz 區間時，雷射光筆反射的紅點圖形長度變化大於 5cm (圖 9-6 處) 較為顯著的結果竟不謀而合!! 因為這四位同學所唱音階若有出現複雜且有顯著圖形變化的頻譜都有落在 165~215Hz 及 245~295Hz 區間的頻帶 (如圖 9-3~9-5 處) 喔!

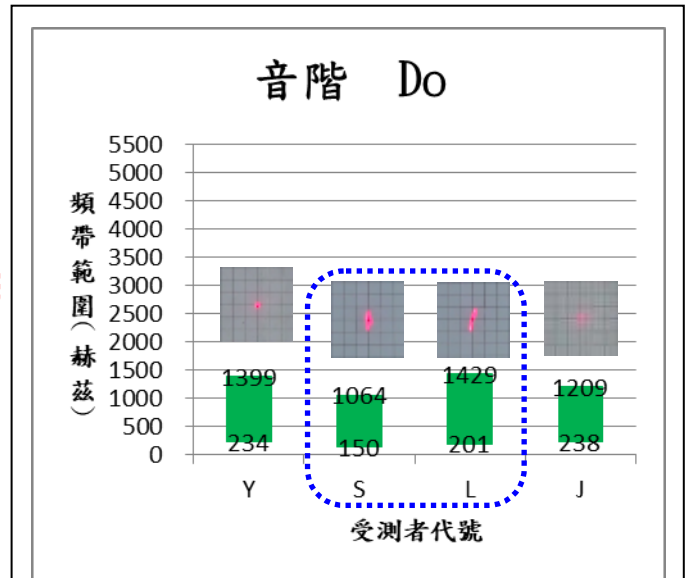


圖 9-3：四位受測者唱音階「Do」的頻帶範圍。

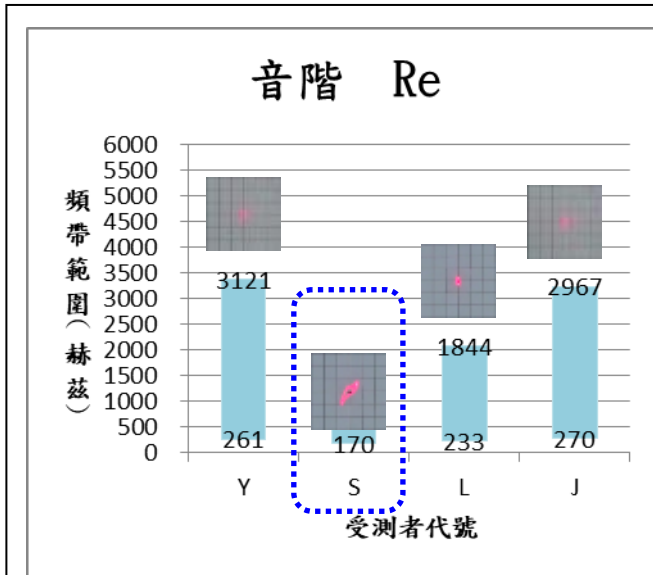


圖 9-4：四位受測者唱音階「Re」的頻帶範圍。

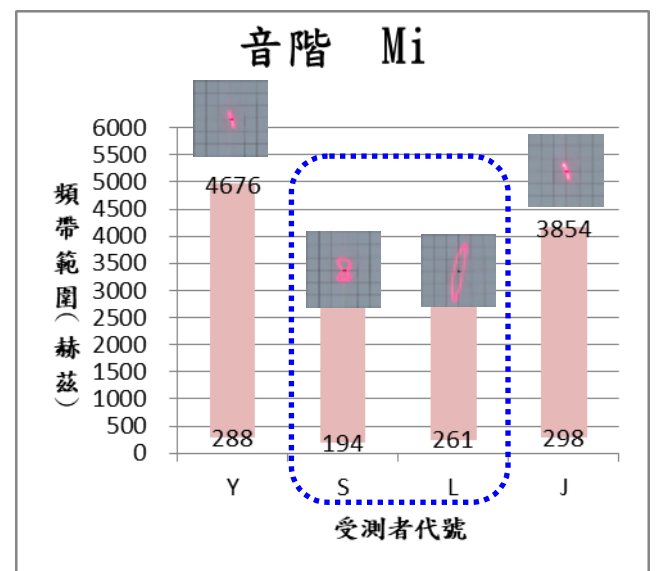


圖 9-5：四位受測者唱音階「Mi」的頻帶範圍。

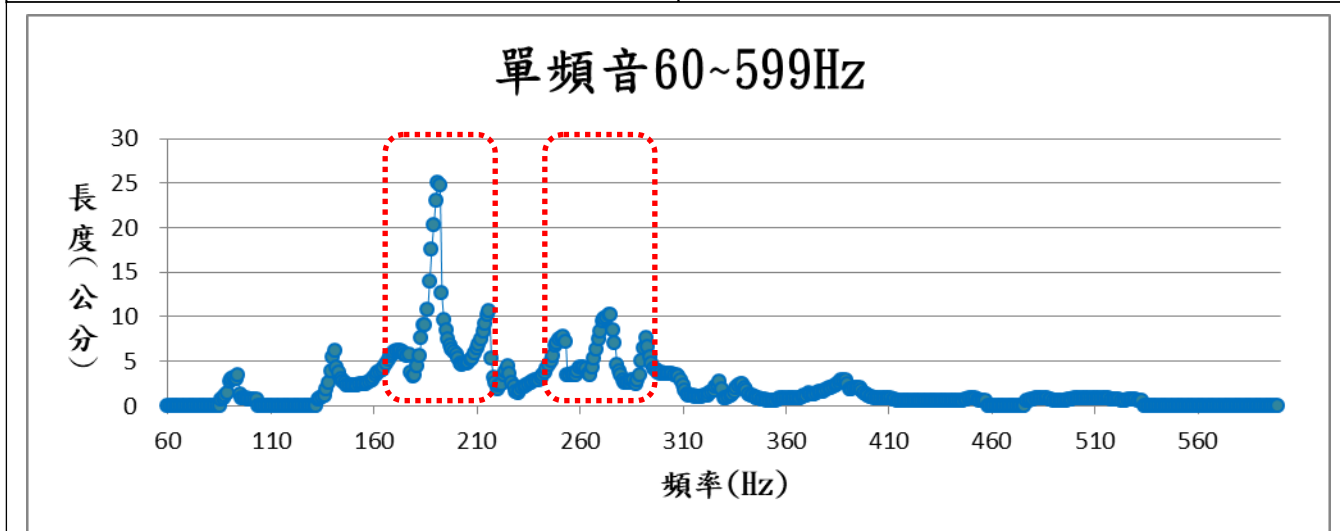


圖 9-6：單頻音介於 60~599Hz 間時，不同的單頻音與其雷射光反射的紅點圖形長度之關係圖

(二)實驗四中將雷射光反射的紅點圖形依據「長度變化」分類(表 4-2),有 667 個落在 534~1200Hz 單頻音其圖形長度變化為 0cm,表示高頻音的聲波不容易使氣球皮產生振動。能使紅點圖形長度變化 ≥ 5.0 cm 的單頻音只有 68 個(如表 9-1 處),皆屬介於 140~294Hz 的低頻帶,顯示低頻音在空氣中傳播時,空氣分子振動小,摩擦比較慢,能量消耗少,所以傳播遠,通透力強,能使氣球皮輕易產生振動。

表 9-1:將紅點圖形長度依據「長度變化」範圍分類所得頻率區間一覽表

紅點圖形長度區間	單頻音之頻率區間					單頻音個數
紅點圖形長度=0cm	60~85Hz	104~132Hz	458~476Hz	534~1200Hz		740
0cm<紅點圖形長度<5cm	86~103Hz	133~139Hz	142~166Hz	178~181Hz	202~206Hz	332
	218~245Hz	254~266Hz	278~289Hz	295~457Hz	477~533Hz	
5cm \leq 紅點圖形長度<10cm	140~141Hz	167~177Hz	182~185Hz	194~201Hz	207~214Hz	56
	217Hz	246~253Hz	267~273Hz	276~277Hz	290~294Hz	
10cm \leq 紅點圖形長度<15cm	186~187Hz	193Hz	215~216Hz	274~275Hz		7
15cm \leq 紅點圖形長度	188~192Hz					5

(三)實驗四將紅點圖形會產生變化的 400 個單頻音依「圖案類型」分成「線形」、「中空橢圓形」、「葫蘆形」、「8 字形」、「空心圓形」五大類(圖 9-7,詳細頻率配對請參閱表 4-3),其中較為有趣的「8 字形」出現於 93-95Hz、171-172Hz、240-246Hz 等 12 個單頻音。

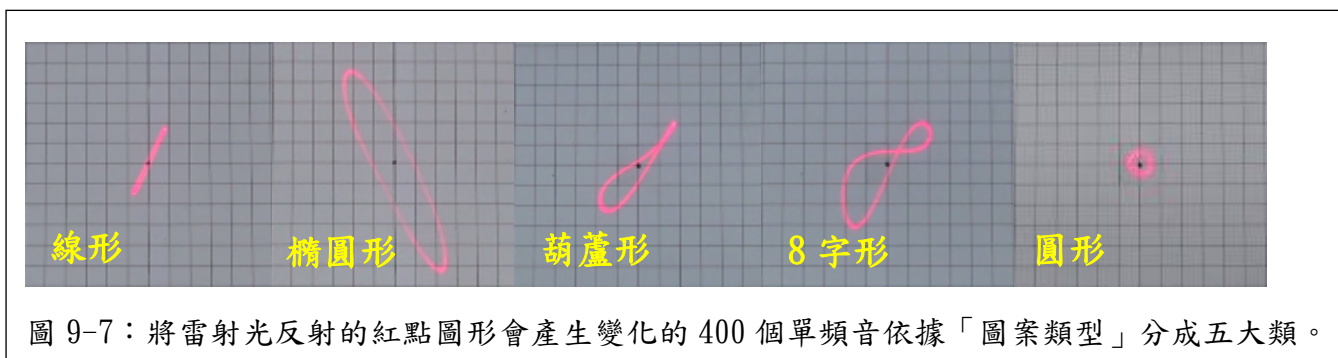


圖 9-7:將雷射光反射的紅點圖形會產生變化的 400 個單頻音依據「圖案類型」分成五大類。

三、聲音的響度會影響投射至方格屏幕上紅點圖形的變化，響度越強雷射光反射的紅點圖形長度也會隨之變大。

(一)實驗五中發現改變電腦音量為 10%、15%、20%、25%、30%播放 180-200Hz 單頻音,聲音的音量增強,雷射光反射的紅點圖形長度也會隨之變大(圖 9-8),表示音量增強,聲波振幅增大,能使氣球皮產生更大的振動。但音量 25~30%間圖形的長度差距極小,說明音量增強至某個程度,雷射光反射的紅點圖形長度趨於穩定。

(二)音量從 10%增大至 30%時,雷射光反射的紅點圖形除了長度增加之外,圖案也從「線形」變成了「葫蘆形」或「橢圓形」。而實驗四曾以音量 20%進行不同頻率的圖形分析,由實驗五可推論音量為 20%時,出現「線形」的單頻音有可能因音量增大而變成「葫蘆形」或「橢圓形」;出現「葫蘆形」或「橢圓形」的單頻音有可能因音量減小而變成「線形」。

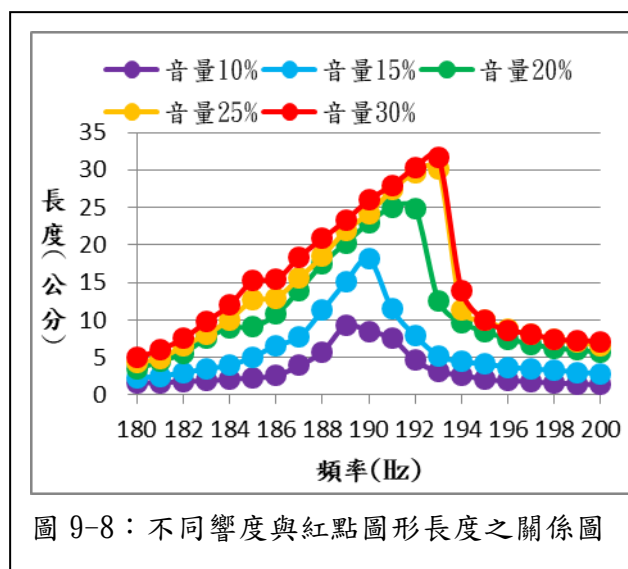


圖 9-8:不同響度與紅點圖形長度之關係圖

四、氣球皮的面積及緊繃程度會影響投射至方格屏幕上紅點圖形的變化，

(一)氣球皮面積增大，任一單頻音其雷射光反射的紅點圖形不僅長度會變小，生成圖形也會發生改變。

實驗六中藉由改變氣球皮繃框尺寸來增大受聲波振動的氣球皮面積，發現紅點圖形不僅長度變小(圖 9-9)，形狀也會發生改變，例如 187Hz 單頻音圖形從「橢圓形」變成「線形」，且紅點圖形顏色也變得比較深，顯示**氣球皮面積增大後，氣球皮雖受同一單頻音聲波影響，但振動幅度變小了。**

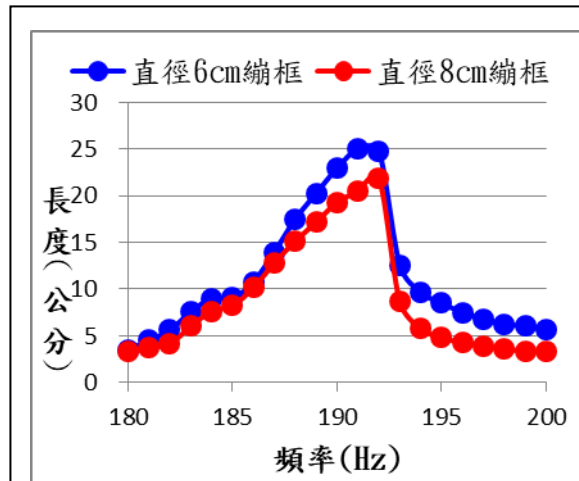


圖 9-9：不同氣球皮面積與雷射光反射的紅點圖形長度之關係圖

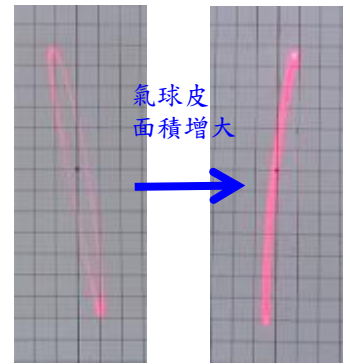


圖 9-10：氣球皮面積增大後，187Hz 單頻音圖形從「橢圓形」變成「線形」，紅點顏色也變得比較深。

(二)氣球皮緊繃程度越高，要使其產生顯著振動的頻率就越高，雷射光筆反射所產生的圖形長度越小，也會有較複雜的殘影！

實驗七分別以三種緊繃程度氣球皮進行 60~500Hz 單頻音掃描，發現氣球皮緊繃程度越高：

1. 要使其產生顯著振動的頻率就越高(圖 9-11)，且從側面角度拍攝氣球皮振動現象時，可明顯看見氣球皮受聲波影響而劇烈上下振動，還會伴隨著強烈「噹~噹~噹~」低沉的振動聲。
2. 生成圖形長度越小，也會有較複雜的殘影！推測**這是因為氣球皮越緊繃，受聲波影響所產生的振動方向越複雜、越快速的關係。**
3. **我們可以利用上述發現檢測鼓皮的鬆緊程度，班上學打爵士鼓的同學和我們分享，鬆緊度適中的鼓皮其振動頻率必須與鼓桶身的振動頻率相呼應，才能產生最佳的共鳴，但他對於鼓皮鬆緊程度的調整常常覺得困擾，因此我們建議他可以在鼓皮上黏貼一鏡面紙，藉由打擊鼓面觀察雷射光反射出的圖形，用以判斷鼓皮是否鬆弛。**

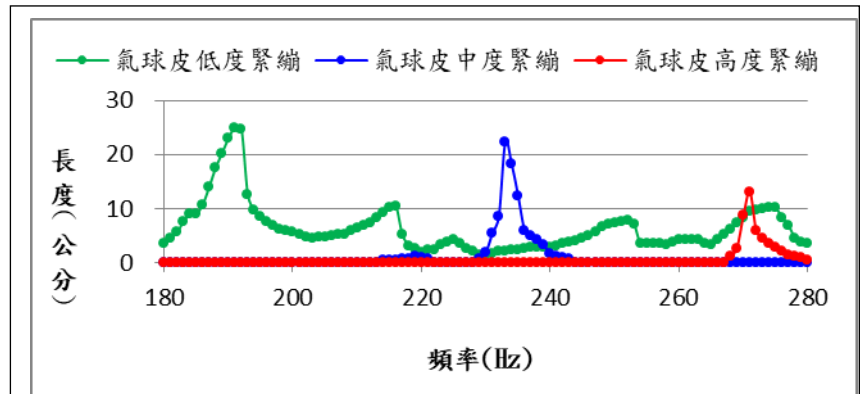


圖 9-11：不同緊繃程度氣球皮能使雷射光筆反射出最大圖形的頻率範圍及其圖形長度關係圖

五、研發「聲波振動模式檢測儀」能成功檢測氣球皮受聲波擾動位置及生成圖形間的關聯性。

實驗八中透過「聲波振動模式檢測儀」實驗結果可以反推實驗三~七中，當某單頻音使雷射光反射所生成圖形呈「線形」時，是因氣球皮產生「同方向的單點或雙點振動」；當某單頻音使雷射光反射所生成圖形呈「橢圓形」時，是因氣球皮產生「不同方向且距中心點等距的雙點振動」；當某單頻音使雷射光反射所生成的圖形呈「8 字形」或「葫蘆形」時，是因氣球皮產生「不同方向且距中心點不等距的雙點振動」。

陸、參考資料

- 一、全國第 47 屆科展國小組物理科作品-聲音會跳舞。
- 二、全國第 45 屆科展國小組物理科作品-它真的看得見！~利用雷射光偵測微小位移之研究。

【評語】 080106

本作品主題為雷射聲波筒，探究影響聲源透過氣球皮振動而反射出圖形變化的可能因素。

本作品的優點為：

1. 自行改良設計出聲波振動顯現儀，比之前科展作品的雷射聲波筒更穩定且精確。
2. 控制變因做得非常完整。
3. 現象觀察記錄得非常仔細，有定量的分析。
4. 自行設計的聲波振動模式檢測儀能檢測氣球皮受聲波擾動位置及生成圖形間的關聯性。

另，本作品提出低頻音在空氣中傳播時，空氣分子振動小，摩擦比較慢，能量消耗少，所以傳播遠，通透力強，以解釋氣球皮輕易產生振動，是否波長也扮演部分的角色？除此之外，自行設計的聲波振動模式檢測儀來模擬雷射光點圖案相當有創意，此件作品是一件相當完整且具有參考價值的研究。

壹、研究動機

有次自然課中，老師帶領我們進行「發現聲音在跳舞」的科學遊戲，我們利用紙筒、氣球皮、光碟片、雷射筆等簡易材料組合成一個「雷射聲波筒」，將嘴巴靠在餅乾罐的罐口端唱歌，投射至牆壁上的雷射光點，會隨著聲音產生各種圖形的變化，非常有趣！我和同學對此現象感到非常好奇，為了揭開「聲音在跳舞」的神秘面紗，我們決定著手進行更深入的研究。

貳、研究目的

- 一、研發既安全又能精準量測聲源透過氣球皮振動而反射出圖形變化的裝置。
- 二、探究影響聲源透過氣球皮振動而反射出圖形變化的可能因素。
- 三、研發出能檢測氣球皮受聲波擾動位置及生成圖形間關聯性的裝置。

參、研究方法、結果與發現



圖 1-1：以往「雷射聲波筒」雷射光筆裝置方式可能因位置偏差而直射操作同學的眼睛，非常危險！

實驗一：文獻探討

- 一、組成「聲音」的三要素：**響度**、**音調**和**音色**，稱為樂音的三要素。
- 二、關於「雷射聲波筒」的相關科展研究：在歷屆中小學科展有幾件「雷射聲波筒」相關研究，依其研究內容可分為兩大類型：

(一)對於「雷射聲波筒」所投射出的圖案變化進行簡單文字描述 (二)對於「雷射聲波筒」薄膜能產生微小振動原理的應用

過往「雷射聲波筒」中，雷射光筆可能因位置偏差而直射操作同學的眼睛，非常危險！(圖 1-1)且「集音筒」會使聲音在筒中因反射而產生能量加大效果，無法得知單純依靠不同特性聲源是如何影響氣球薄膜振動所形成反射圖形，且作品中也多以簡單文字敘述呈現所得結果。因此本研究除了**想要改變雷射筆擺放位置，且還要除去集音筒裝置，獨創安全又能精準進行實驗的設計，使其更準確測得單純因聲源及氣球薄膜不同特性所造成反射圖形的不同變化，並能設法以定性定量方式呈現實驗結果。**

實驗二：實驗環境佈置

- 一、氣球框的選擇：為了要移除以往「雷射聲波筒」中「集音筒」的裝置，我們必須尋覓能使氣球皮直接套在框架上的材料，經過多方嘗試，最後我們**選擇【紙筒框】、【PVC 塑膠水管框】、【塑膠繃框】**(圖 2-1)這三種固定氣球皮的框架進行測試，最後發現「刺繡用塑膠繃框」有**堅固耐用、使氣球皮不會鬆脫、可輕易改變氣球皮的鬆緊程度、有多種直徑尺寸可選擇**等多項優點，雖然需要購買，但是一個塑膠繃框單價約 30 元，堅固又耐用，CP 值非常高，因此決定使用它當成實驗中固定氣球皮的框架！
- 二、「聲波振動顯現儀」的設計

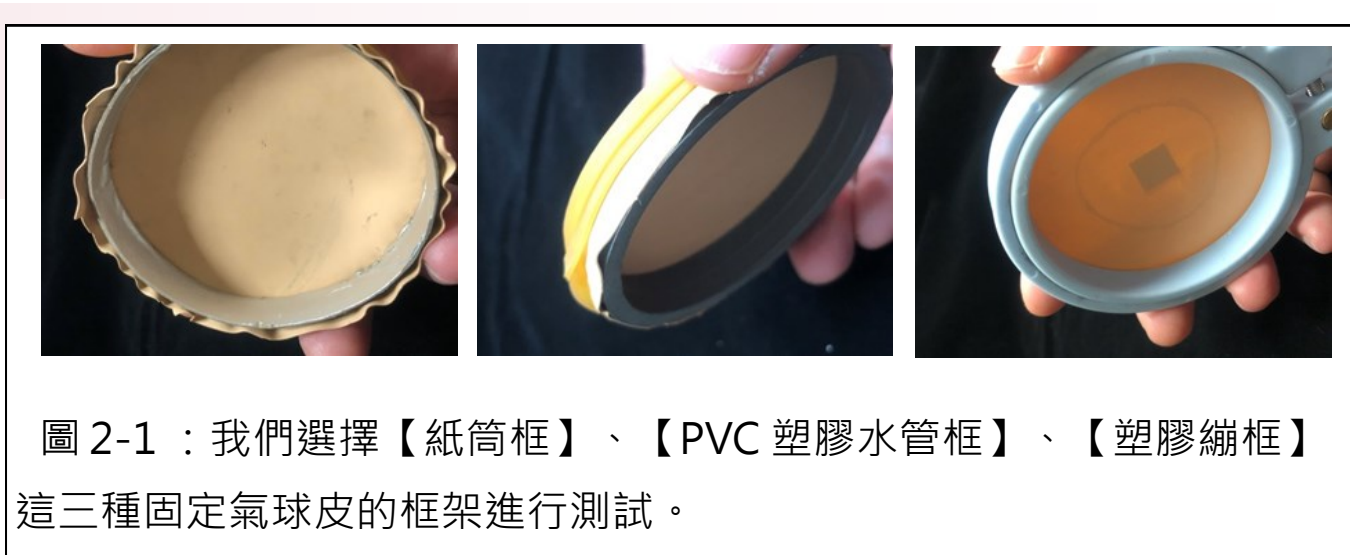


圖 2-1：我們選擇【紙筒框】、【PVC 塑膠水管框】、【塑膠繃框】這三種固定氣球皮的框架進行測試。

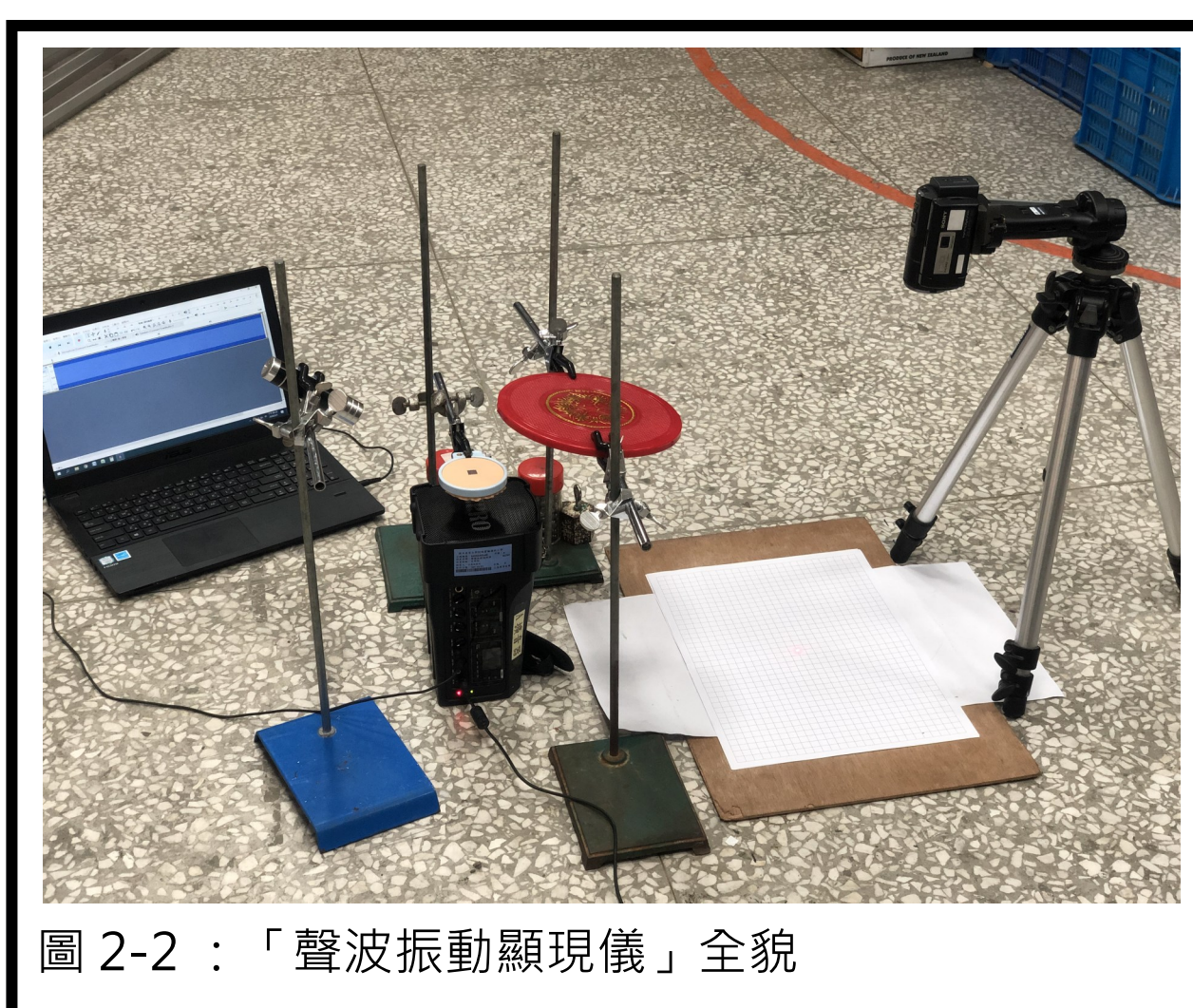


圖 2-2：「聲波振動顯現儀」全貌

方格屏幕 圖 2-3：以 1*1cm ² 方格紙當雷射光反射的投影屏幕。每次實驗前調整雷射光所反射的紅點位於方格紙原點處。	氣球皮繃框 圖 2-4：使用特製繃框固定氣球皮。	聲源播放與氣球皮間距離固定 圖 2-5：450W 喇叭距離氣球皮 5cm	雷射光反射至方格屏幕路徑 圖 2-10：雷射光照射氣球皮上鏡面紙，反射至鏡子，再透過鏡子反射至方格屏幕(紅色虛線.....為反射路徑)。
平面鏡 圖 2-6：透過鏡子反射雷射光至方格屏幕。	雷射光筆 圖 2-7：以鐵架固定雷射光筆，使其朝斜下方，以避免直射眼睛的危險。	鏡面紙 圖 2-8：在氣球皮上點貼鏡面紙，以反射雷射光之用。	聲源播放處 圖 2-9：450W 喇叭連接電腦 Audacity 軟體播放聲源。

實驗三：音階如何影響方格屏幕上的圖案變化？

(一)實驗方法：分別錄製我們四個同學所唱的「Do · Re · Mi · Fa · Sol · La · Si」七個音階(圖 3-1)，將所錄製的音源檔經由 450W 喇叭播放，音量固定 20%，氣球繃框尺寸固定為 6cm，以「聲波振動顯現儀」觀察並錄製屏幕上雷射光筆反射圖形。

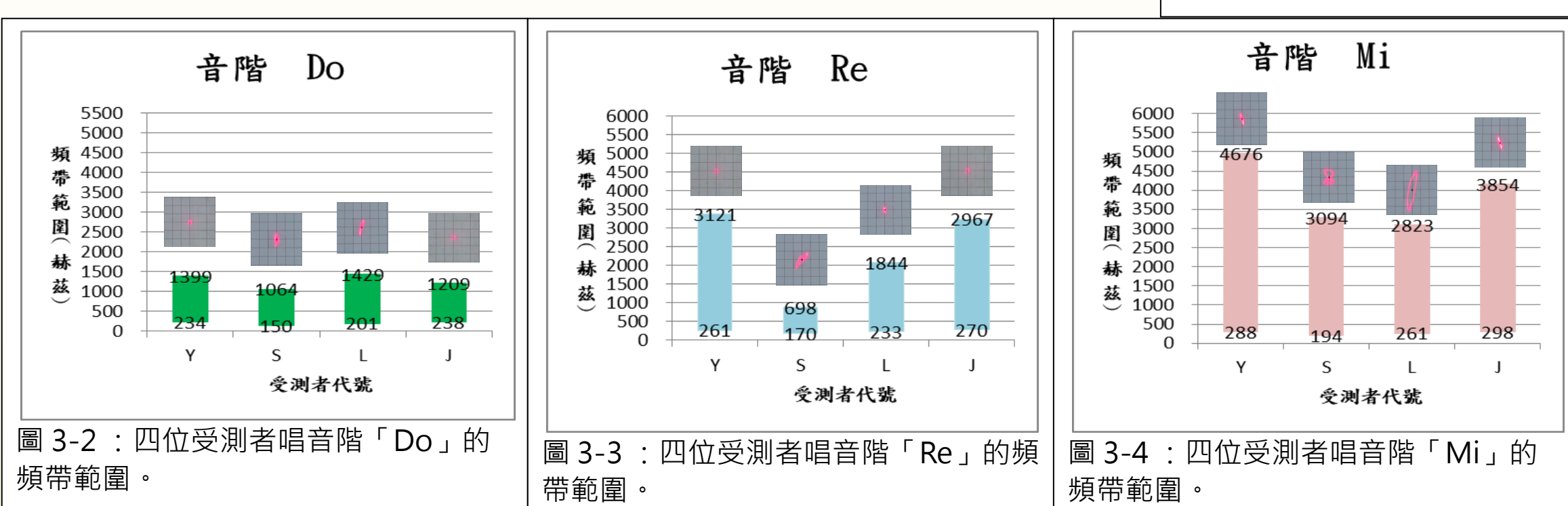
(二)實驗結果：(如展示板所示)

(三)實驗發現：

- 1.若受測者聲波能振動「聲波振動顯現儀」的氣球皮，進而影響雷射光經由氣球皮上鏡面紙及鏡子反射至方格屏幕的圖形，**因視覺暫留原理，可以因氣球皮振動模式不同，而在屏幕上看見圖形變化，非常有趣！**
- 2.我們很好奇，受測者都唱同樣七個音階，為什麼有些同學唱法其聲波較容易使氣球皮產生較大的振動?尤其是四位受測者的「Do」、「Re」、「Mi」三個音階紅點圖形變化的差異最大！



圖 3-1 錄製「Do · Re · Mi · Fa · Sol · La · Si」七個音階。



以 Audacity 程式分析四位受測者「Do」、「Re」、「Mi」三個音階的頻帶

我們知道人類說話或唱歌產生的聲音包含許多不同的頻率，為了研究歌聲所包含的頻率，可以用頻譜來表示某一時間的頻率分布，其呈現出頻率和聲壓的關係。因此我們將 4 位受測者所唱的「Do」、「Re」、「Mi」這三個音階的錄音檔以 Audacity 程式的頻率分析功能分析其頻譜，再從頻譜分佈圖中找出主要發聲頻帶範圍進行探究。

- 3.將表 3-2 頻帶範圍製圖 3-2~3-4，發現「Do」、「Re」、「Mi」中，紅點位移產生「粗線形」、「8 字形」或「中空橢圓形」等顯著圖形者，頻帶範圍都相對較窄，且頻帶範圍中的最低頻率也比較小。
- 4.承 3，發現聲音頻率高低可能對於投射至屏幕上圖形變化有關聯，且疑似低頻音易使氣球皮產生振動。
- 5.具絕對音感的人很少，四位受測者明明是唱出同音階，但頻譜卻有相當大差異。於是下個實驗中將以 Audacity 程式播出更純粹、精準的「單頻音」，以探討某範圍「單頻音」對投射至屏幕上的圖形變化。

實驗四：聲音的頻率如何影響方格屏幕上的圖案變化？

本實驗選擇 60~1200Hz 頻率範圍進行實驗分析

文獻探究得知男/女的聲帶振動基本頻率範圍為：男聲 64 ~ 523Hz/女聲 160 ~ 1200Hz，因此本子題以 60~1200Hz 的頻率範圍進行實驗分析。

(一)實驗方法：以 Audacity 程式透過 450W 喇叭——**播放 60~1200Hz 的單頻音**，音量固定為 20%，氣球繃框尺寸固定為 6cm，以「聲波振動顯現儀」**觀察並錄製方格屏幕上雷射光筆反射的圖形**，以 Image-J 程式量測雷射光紅點圖形長度變化。

(二)實驗發現：

- 1.**單頻音介於 165~215Hz 及 245~295Hz 區間時，雷射光筆反射的紅點圖形長度變化較為顯著**(圖 4-1 處)，表示介於這音頻區間的聲波會使氣球皮產生較大的振動。
- 2.**我們發現一件非常奧妙的事：雷射光筆反射的紅點圖形長度變化較為顯著的單頻音之音頻區間，竟然與實驗三中四位受測者在唱「Do」、「Re」、「Mi」三個音階時較為顯著的紅點圖形變化有高度相關！**

- 3.將雷射光反射的紅點圖形依據「長度變化」分類(表 4-1)並計算其單頻音個數，可發現：
- (1)圖形長度變化為 0cm 單頻音總個數最多，有 740 個，表示這些單頻音無法使氣球皮產生振動。其中 667 個單頻音落在 534~1200Hz，表示高頻音聲波不易使氣球皮產生振動。
 - (2)能使圖形長度變化 $\geq 5.0\text{cm}$ 單頻音只有區區 68 個，其中 186~193Hz、215~216Hz、274~275Hz 等 12 個單頻音的紅點圖形長度可高達 10cm 以上，令人驚訝！(圖 4-10)上述這些頻帶皆屬小於 300Hz 的低頻音，顯示低頻音在空氣中傳播時，空氣分子振動小，摩擦比較慢，能量消耗少，所以傳播遠，通透力強，能使氣球皮輕易產生振動。
- 4.將會產生變化 400 個單頻音依「圖案類型」分成「線形」、「中空橢圓形」、「葫蘆形」、「8 字形」、「空心圓形」五大類(圖 4-2)

表 4-1：將紅點圖形長度依據「長度變化」範圍分類所得頻率區間一覽表

紅點圖形長度區間	單頻音之頻率區間					單頻音個數
紅點圖形長度 = 0cm	60~85Hz	104~132Hz	458~476Hz	534~1200Hz		740
0cm < 紅點圖形長度 < 5cm	86~103Hz	133~139Hz	142~166Hz	178~181Hz	202~206Hz	332
	218~245Hz	254~266Hz	278~289Hz	295~457Hz	477~533Hz	
5cm \leq 紅點圖形長度 < 10cm	140~141Hz	167~177Hz	182~185Hz	194~201Hz	207~214Hz	56
	217Hz	246~253Hz	267~273Hz	276~277Hz	290~294Hz	
10cm \leq 紅點圖形長度 < 15cm	186~187Hz	193Hz	215~216Hz	274~275Hz		7
15cm \leq 紅點圖形長度	188~192Hz					5

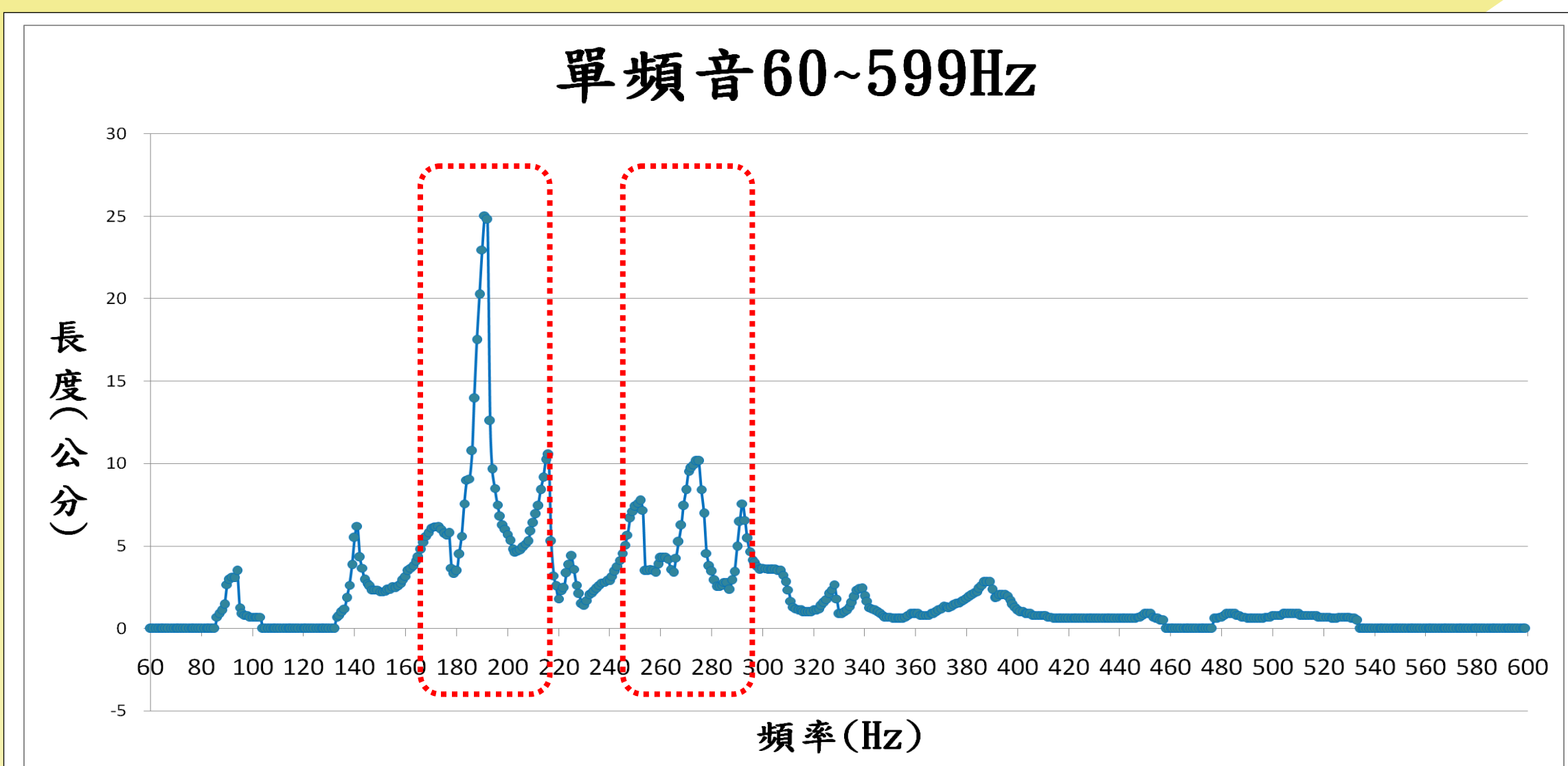


圖 4-1：單頻音介於 60~599Hz 間時，不同的單頻音與其雷射光反射的紅點圖形長度之關係圖

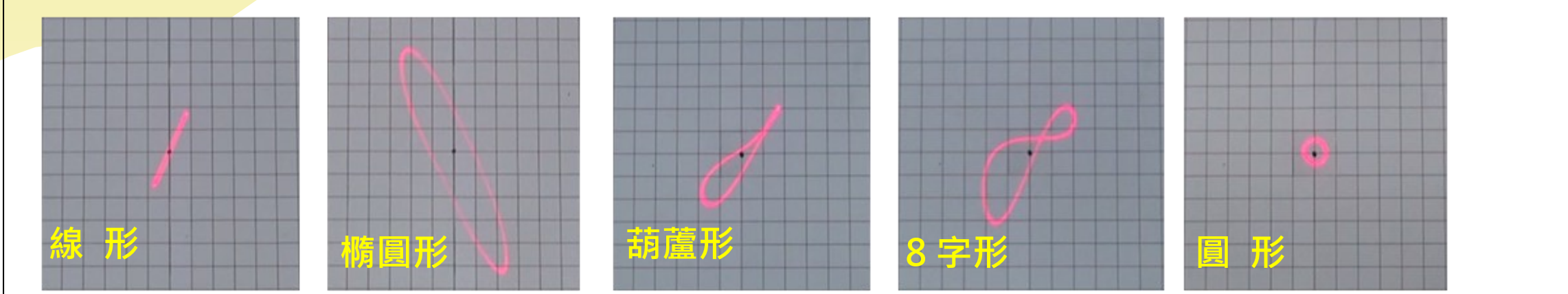


圖 4-2：將雷射光反射的紅點圖形會產生變化的 400 個單頻音依據「圖案類型」可分成五大類。

實驗五：聲音的響度如何影響方格屏幕上的圖案變化？

本實驗選擇 180~200Hz 之低頻範圍進行響度之實驗分析

實驗四得知雷射光反射的圖形長度變化超過 15cm 皆落在 188~192Hz 之低頻範圍，因此本子題將據此擴充至 180~200Hz 頻率範圍進行響度變因分析。

- (一)實驗方法:氣球繃框尺寸固定為 6cm，改變音量為 10%、15%、20%、25%、30%，以 Audacity 程式透過 450W 喇叭播放 180~200Hz 的單頻音，透過「聲波振動顯現儀」觀察並錄製方格屏幕上雷射光筆反射的圖形變化。
- (二)實驗發現:
 - 1.將表 5-1 製成圖 5-1 發現，聲音的音量增強，雷射光反射的紅點圖形長度也會隨之變大，表示音量增強，聲波振幅增大，能使氣球皮產生更大的振動。
 - 2.在展示板上呈現 189、193、194Hz 單頻音在音量 10%~30% 間，雷射光反射的紅點圖形，發現音量從 10% 增大至 30% 時，雷射光反射的紅點圖形除了長度增加之外，圖案也從「線形」變成了「葫蘆形」或「橢圓形」。

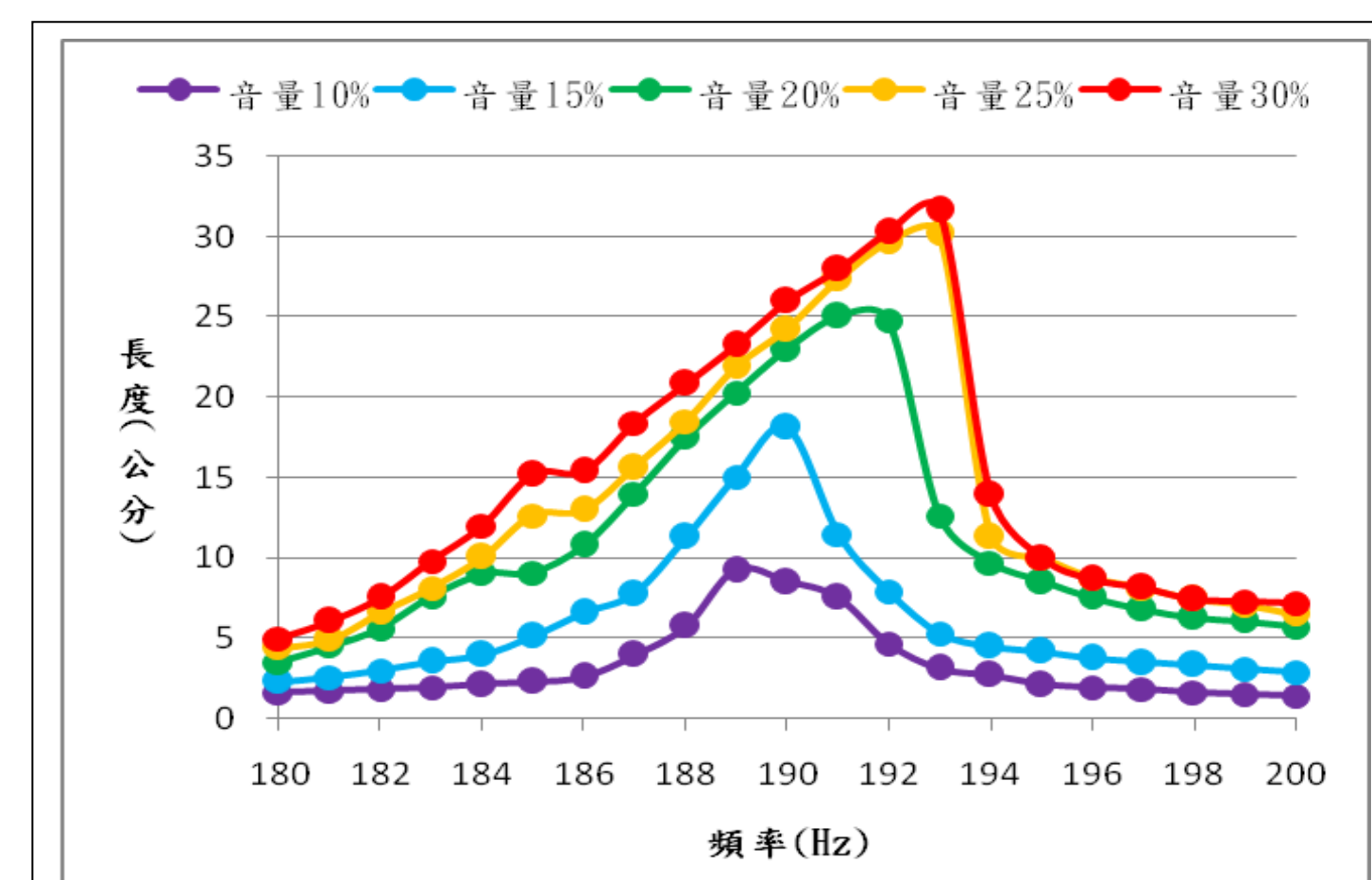


圖 5-1：不同的響度與雷射光反射的紅點圖形長度之關係圖

實驗六：氣球皮的面積如何影響方格屏幕上的圖案變化？

- (一)實驗方法:更換直徑 6cm 及 8cm 繃框尺寸，以改變「聲波振動顯現儀」中氣球皮面積為 28.26cm²、50.24cm²(圖 6-1)。播放 180~200Hz 的單頻音，音量固定為 20%，觀察並錄製屏幕上雷射光反射圖形的變化。
- (二)實驗發現:

- 1.圖 6-2 發現繃框尺寸加大，連帶會使受聲波振動的氣球皮面積增大，任一單頻音其雷射光反射的紅點圖形長度稍變小。
- 2.以 187Hz、192Hz 單頻音為例，將其圖形變化整理成表後發現，受聲波振動氣球皮面積增大，不僅使紅點圖形長度變小，圖形也會發生改變，(187Hz 從「橢圓形」變成「線形」、192Hz 從「橢圓形」變成「長 8 字形」)，圖形顏色也變得較深，這些結果都在顯示氣球皮面積增大後，氣球皮雖受同一單頻音聲波影響，但振動幅度變小了。

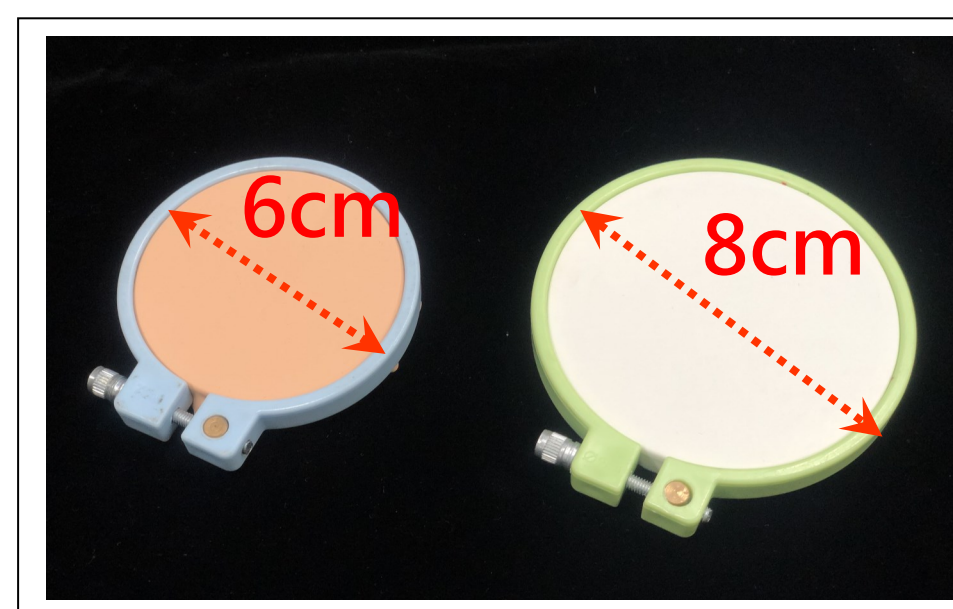


圖 6-1：二種氣球繃框尺寸分別為直徑 6cm 及直徑 8cm

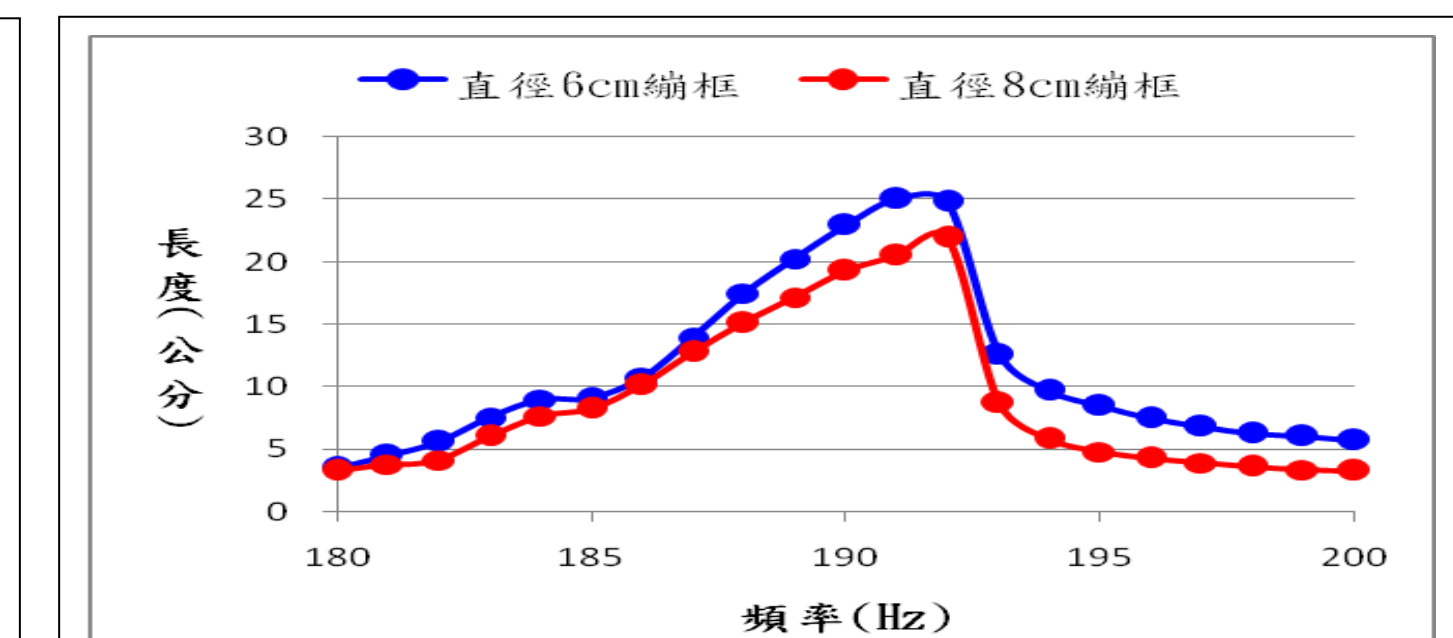


圖 6-2：氣球皮面積與雷射光反射圖形長度之關係圖

實驗七：不同的氣球皮緊繃程度如何影響方格屏幕上的圖案變化？

- (一)實驗方法:
 - 1.以 Audacity 程式透過 450W 喇叭一一播放 60~500Hz 的單頻音，音量固定為 20%，氣球繃框尺寸固定為 6cm，改變氣球皮三種不同的緊繃程度，以「聲波振動顯現儀」觀察並錄製方格屏幕上雷射光筆反射的圖形變化，找出能使三種不同緊繃程度的氣球皮之雷射光筆反射最大圖形的頻率範圍。
 - 2.改變氣球皮三種不同緊繃程度的方法:

- (1)在剪開的氣球皮上，以代針筆畫出 3 個同心圓，由內而外為命名 A、B、C 圓，分別距離圓心 2cm、2.5cm、3cm(圖 7-1)。
- (2)分別將 C、B、A 圓的圓周記號調整至繃框內框邊緣處，即可將框架上的氣球皮界定為「低度緊繃」、「中度緊繃」、「高度緊繃」等三種程度(圖 7-2~圖 7-4)。



圖 7-1：在剪開的氣球皮上，畫出三個等距的同心圓。

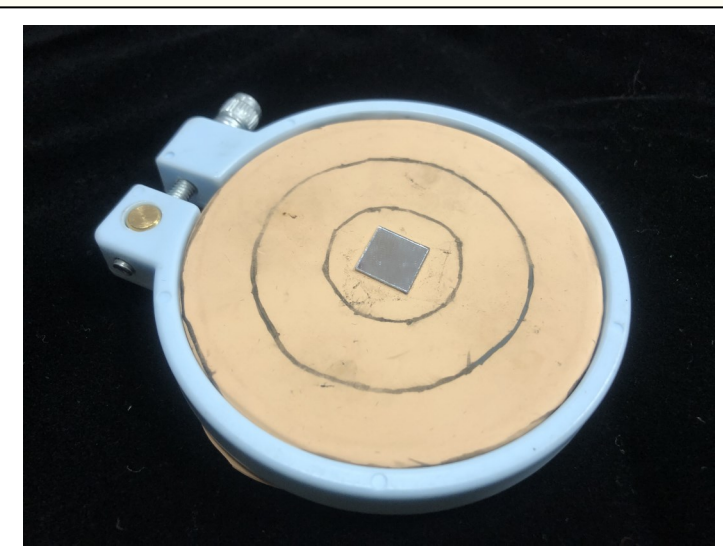


圖 7-2：將 C 圓周記號調整至內框邊緣，即「低度緊繃」。

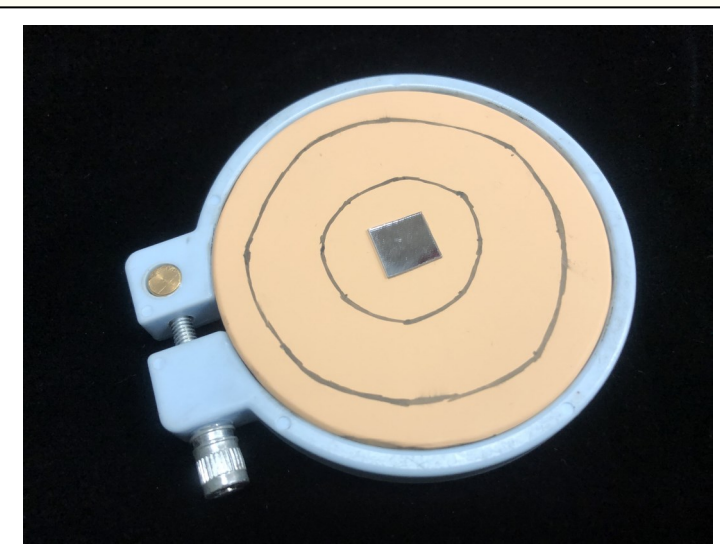


圖 7-3：將 B 圓周記號調整至內框邊緣，即「中度緊繃」。

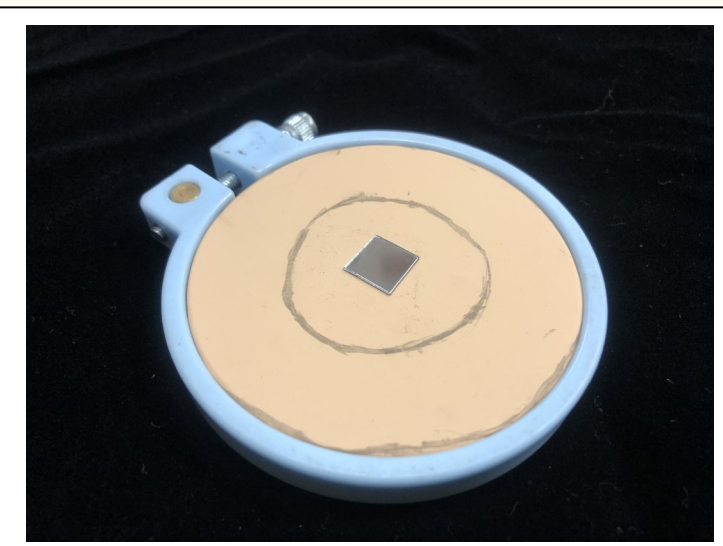


圖 7-4：將 A 圓周記號調整至內框邊緣，即「高度緊繃」。

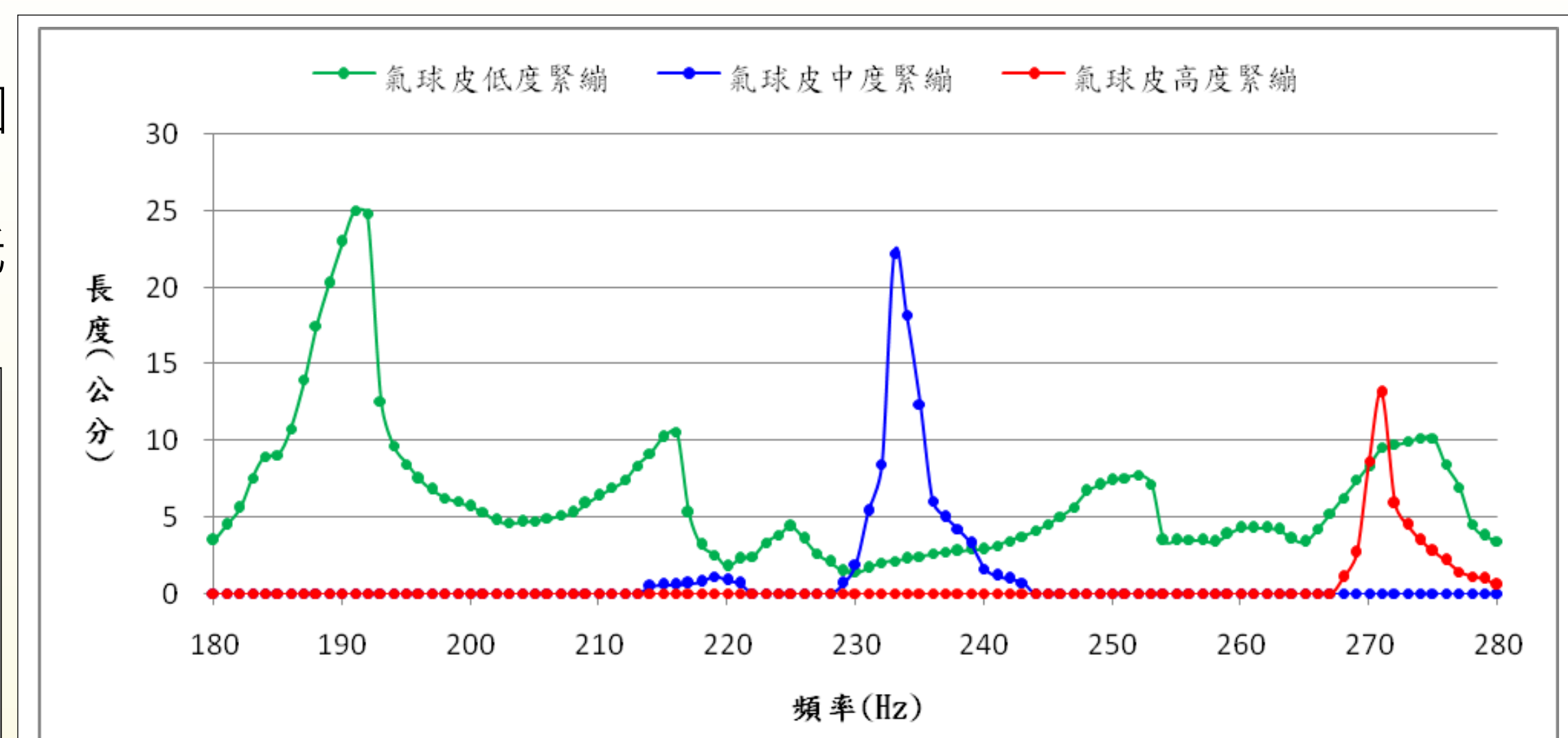


圖 7-5：不同緊繃程度氣球皮能使雷射光筆反射出最大圖形的頻率範圍及其圖形長度關係圖

- (二)實驗發現:
 - 1.60~500Hz 單頻音掃描過程，能使「中度」及「高度」緊繃氣球皮產生振動的聲波頻率時，氣球皮上鏡面紙會發生有趣的「線狀殘影」(圖 7-6)，還伴隨強烈「嗡嗡~嗡嗡~」低沉振動聲，顯示氣球皮越緊繃，受聲波影響而產生振動速度越快！
 - 2.承 1，從側面兩種角度拍攝氣球皮的振動現象時，可以明顯看見氣球皮受聲波影響而劇烈的上下振動，因視覺暫留產生有趣的畫面!(圖 7-7)
 - 3.氣球皮緊繃程度越高，要使其產生較大振動的頻率就越高(圖 7-5)，雷射光筆反射所產生的最大圖形長度越小，所生成的圖形會有較複雜的殘影!推測這是因為氣球皮越緊繃，受聲波影響所產生的振動方向越複雜、越快速的關係。



圖 7-6：「高度」緊繃的氣球皮受聲波影響產生振動時，氣球皮上的鏡面紙會發生有趣的「線狀殘影」。

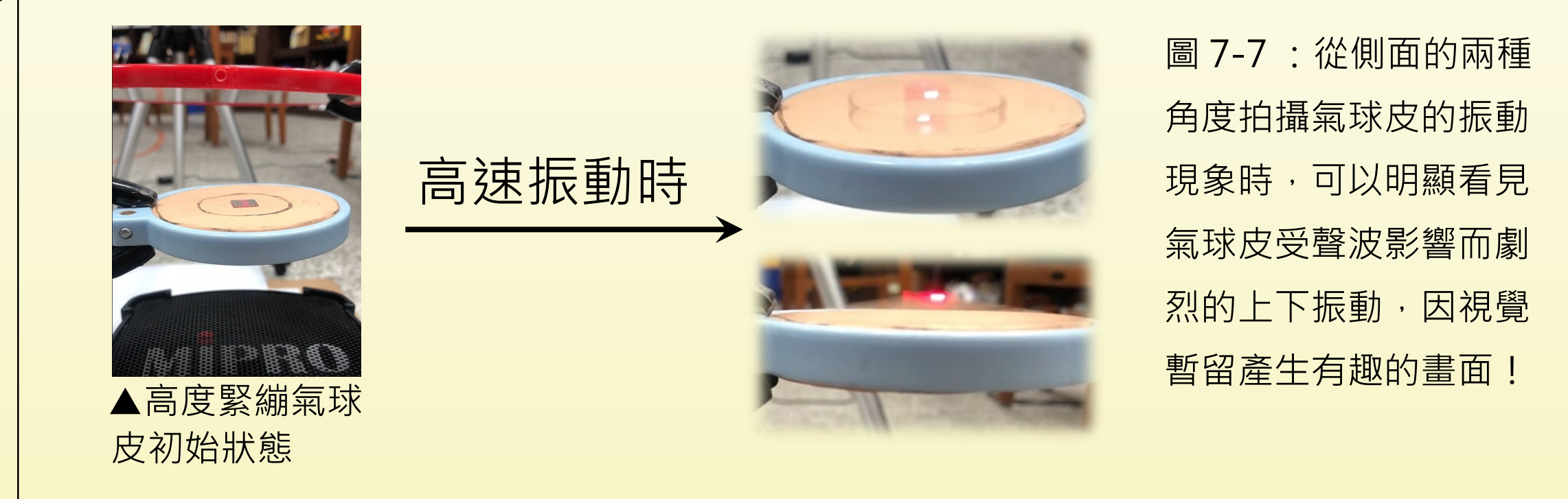


圖 7-7：從側面的兩種角度拍攝氣球皮的振動現象時，可以明顯看見氣球皮受聲波影響而劇烈的上下振動，因視覺暫留產生有趣的畫面!

實驗八：研發「聲波振動模式檢測儀」檢測氣球皮如何受聲波擾動而生成圖形。

- (一)實驗方法:1.研發「聲波振動模式檢測儀」:
- 2.「聲波振動模式檢測儀」A、B 繃框裝置介紹:

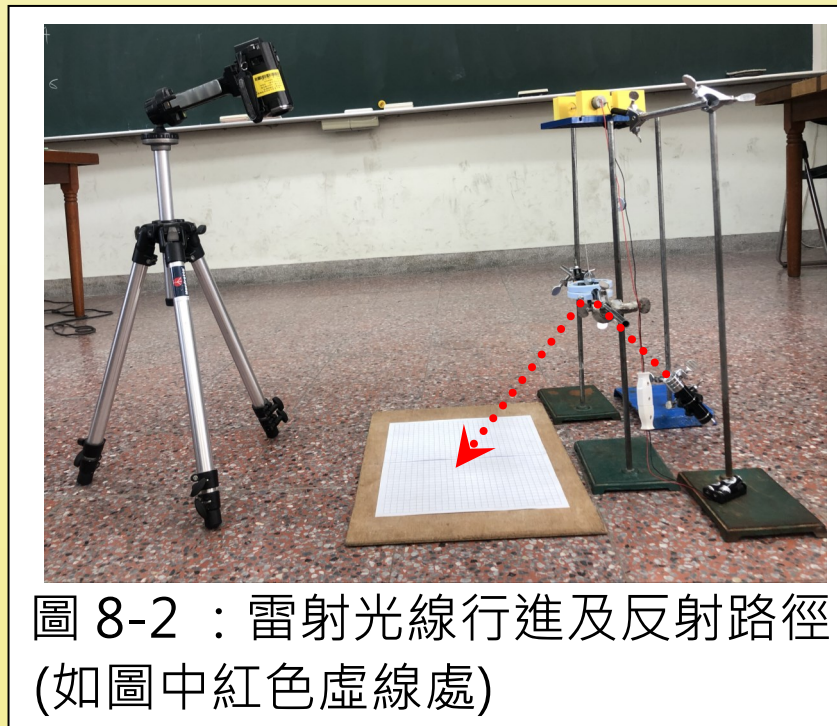


圖 8-2：雷射光線行進及反射路徑(如圖中紅色虛線處)

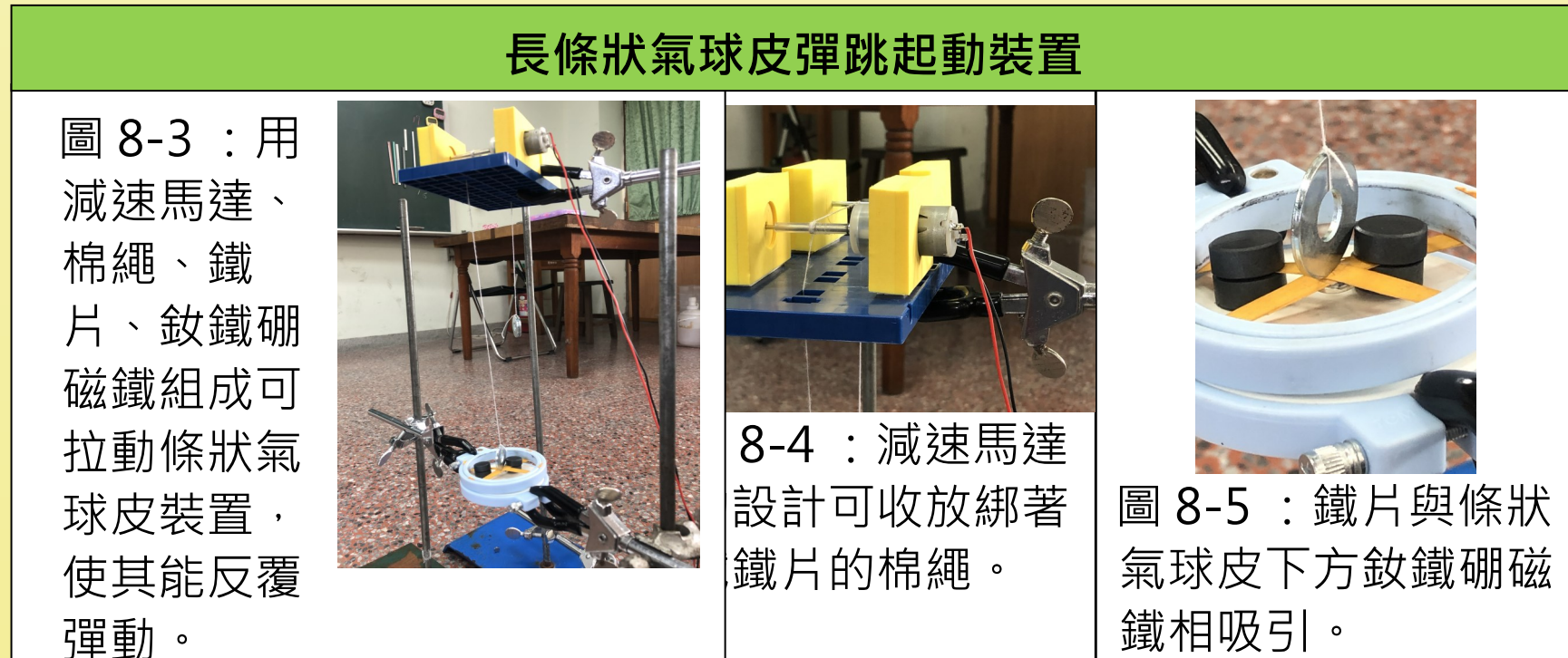


圖 8-3：用減速馬達、棉繩、鐵片、鉚鐵磁鐵組成可拉動條狀氣球皮裝置，使其能反覆彈動。
圖 8-4：減速馬達設計可收放綁著鐵片的棉繩。
圖 8-5：鐵片與條狀氣球皮下方鉚鐵磁鐵相吸引。

- 準備 A、B 繃框，氣球皮以「低度緊繃程度」固定於 A 繃框，中間黏貼一鏡面紙，有鏡面紙那面朝下。將裁剪成數段寬度 1cm 長條狀氣球皮，依【一字形】、【十字型】、【X 字形】三種形式固定於 B 繃框上(圖 8-9)。



圖 8-9：將長條狀氣球皮分別以【一字形】、【十字型】、【X 字形】方式固定於 B 繃框上。

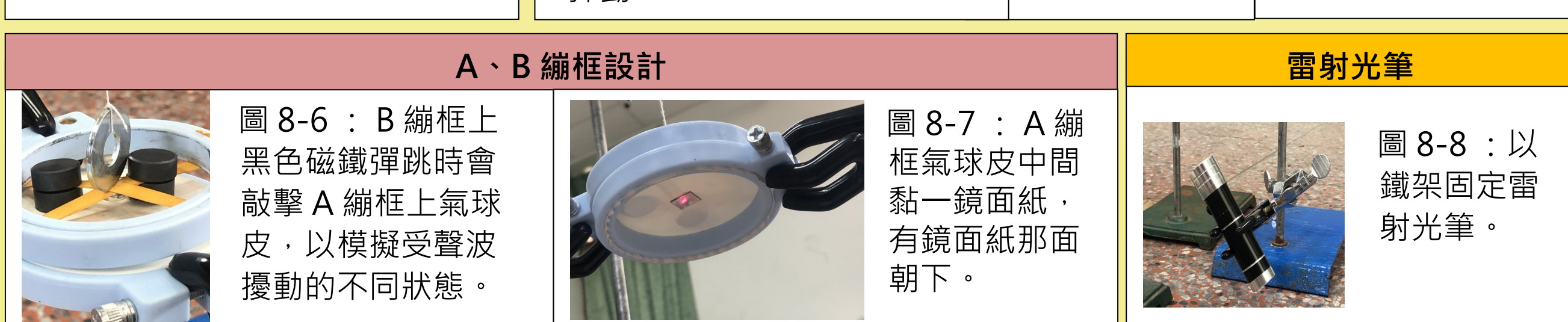


圖 8-6：B 繃框上黑色磁鐵彈跳時會敲擊 A 繃框上氣球皮，以模擬受聲波擾動的不同狀態。
圖 8-7：A 繃框氣球皮中間黏一鏡面紙，有鏡面紙那面朝下。
圖 8-8：以鐵架固定雷射光筆。

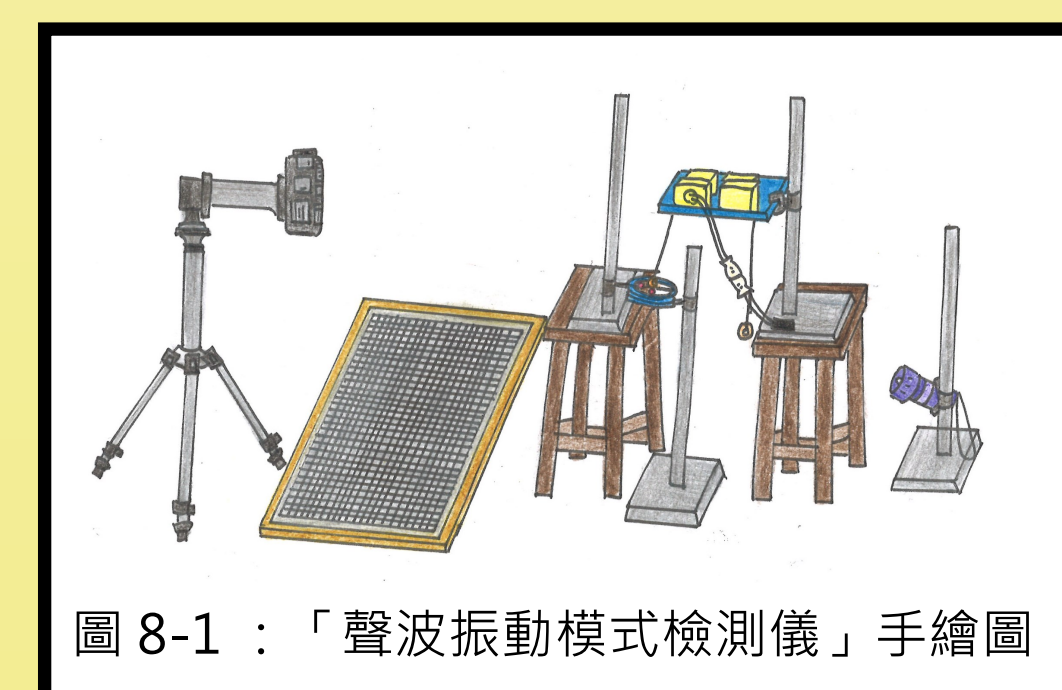


圖 8-1：「聲波振動模式檢測儀」手繪圖



圖 8-10：「聲波振動模式檢測儀」實驗現場

(二)實驗發現:(如展示表 8-1)

1.透過「聲波振動模式檢測儀」可得知：

(1)若 B 繃框上的條狀氣球皮為「一字形」，不論黑色圓形磁鐵是單點或雙點設置，使 A 繃框上的氣球皮產生振動，其雷射光反射所生成的圖形皆屬「線形」，生成的「線形」圖形會與條狀氣球皮同方向。

(2)若 B 繃框上的條狀氣球皮為「十字形」或「X 字形」，當黑色圓形磁鐵與中心點等距設置，使 A 繃框上的氣球皮產生振動，其雷射光反射所生成的圖形皆屬「橢圓形」，生成的「橢圓形」方向與兩黑磁鐵連線呈垂直方向。

(3)若 B 繃框上的條狀氣球皮為「十字形」或「X 字形」，當黑色圓形磁鐵與中心點不等距設置，使 A 繃框上的氣球皮產生振動，其雷射光反射所生成的圖形皆屬「8 字形」或「葫蘆形」，生成的「8 字形或葫蘆形」方向與兩黑磁鐵連線呈垂直方向。

2.條狀氣球皮彈跳的力道越大，其雷射光反射所生成的圖形長度越長。

肆、結 論

一、自行研發出既安全又能精準量測聲源透過氣球皮振動而反射出圖形變化的【聲波振動顯現儀】。

(一)使用【刺繡用塑膠繃框】固定氣球皮

實驗二中為了要移除以往「雷射聲波筒」中「集音筒」裝置，以得知單純依靠不同特性的聲源是如何影響氣球薄膜振動所形成反射圖形的各種變化，必須找出能使氣球皮直接套在框架上的材料，經過多方嘗試後選擇堅固耐用、氣球皮不易鬆脫、可輕易改變氣球皮鬆緊程度、多種尺寸可選擇等優點的【刺繡用塑膠繃框】(圖 9-1)來固定氣球皮。

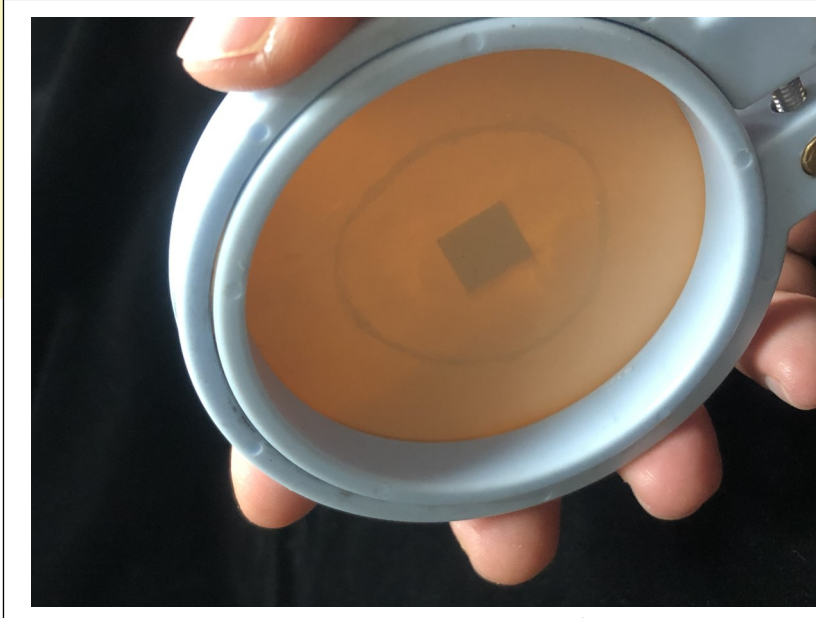


圖 9-1：使用「刺繡用塑膠繃框」來固定氣球皮。

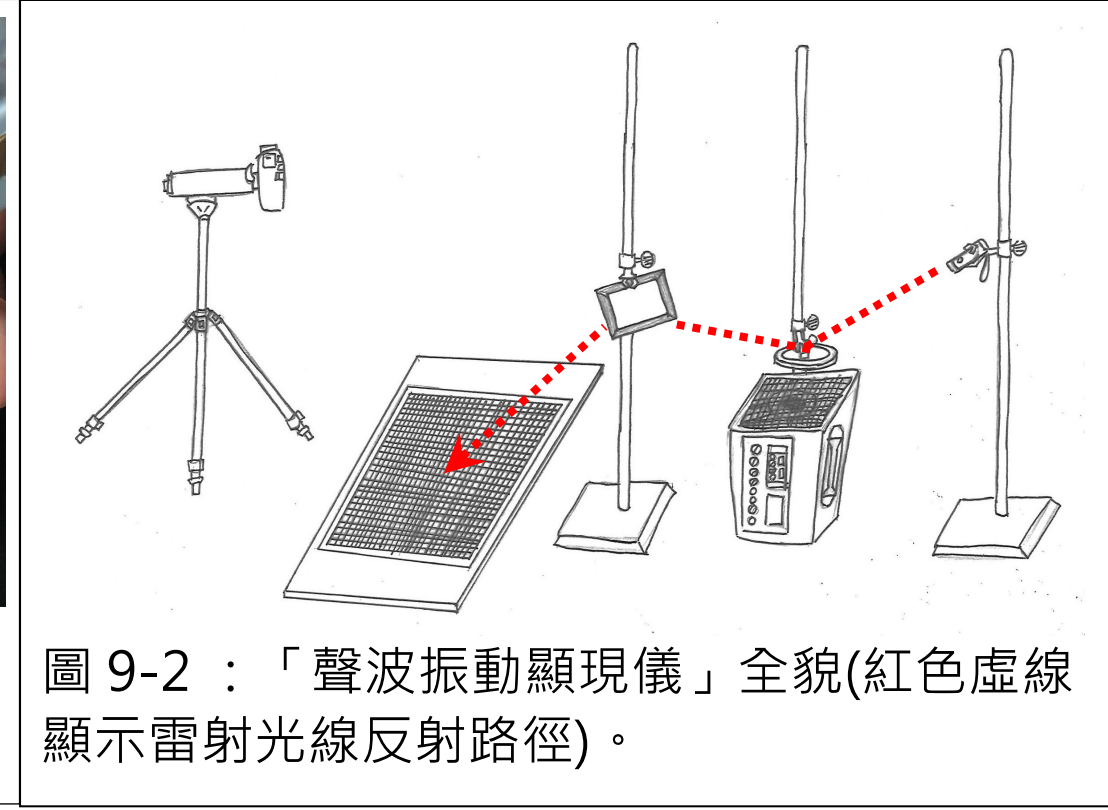


圖 9-2：「聲波振動顯現儀」全貌(紅色虛線顯示雷射光線反射路徑)。

(二)研發既安全又能精確量測實驗結果的【聲波振動顯現儀】裝置

過往研究多是將雷射筆黏貼集音筒邊緣，但可能因位置偏差而直射操作同學眼睛，非常危險！經我們反覆測試終於研發出【聲波振動顯現儀】，雷射光由上往下照射至氣球皮上的鏡面紙，再反射至鏡子，最後透過鏡子反射至方格屏幕(圖 9-2)，不僅達到避免雷射光直射眼睛，且也能輕易透過攝影機錄製雷射光反射的圖形變化進行實驗分析。

二、聲音的頻率會影響投射至方格屏幕上紅點圖形的長度及形狀變化，其中尤以介於 140~300 Hz 的低頻音

較容易使氣球皮產生大幅的振動。

(一)實驗三透過分析四位同學唱的「Do」、「Re」、「Mi」的頻譜察覺雷射光紅點位移產生「粗線形」、「8 字形」或「中空橢圓形」等顯著圖形者，其頻帶範圍都相對較窄，且最低頻率也比較小(圖 9-3~9-5 處)。這與實驗四分析 60~1200Hz 單頻音得知 165~215Hz 及 245~295Hz 區間時，雷射光筆反射的紅點圖形長度變化大於 5cm(圖 9-6 處)較為顯著的結果竟不謀而合!!

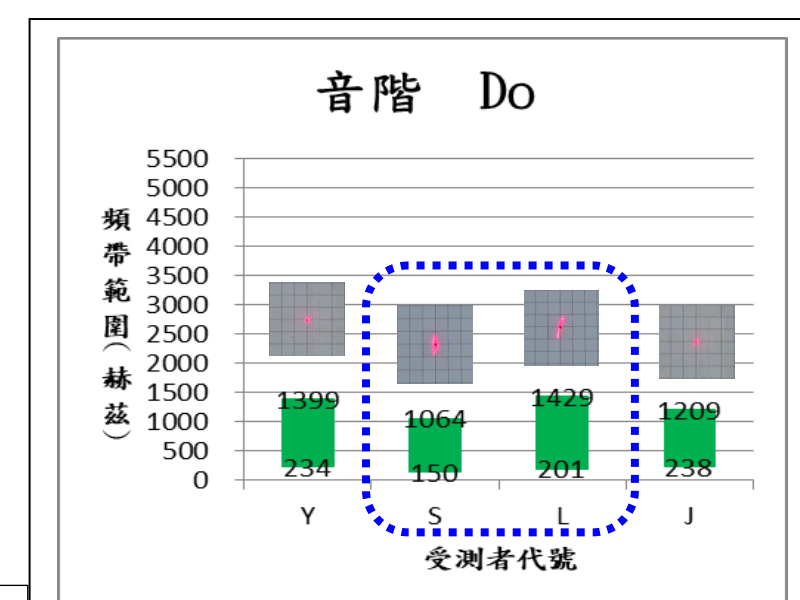


圖 9-3：四位受測者唱音階「Do」的頻帶範圍。

(二)實驗四中將雷射光反射的圖形依據「長度變化」分類(表 4-1)，有 667 個落在 534~1200Hz 單頻音其圖形長度變化為 0cm，表示高頻音聲波不易使氣球皮振動。能使圖形長度變化≥ 5.0cm 單頻音只有 68 個，皆屬介於 140~294Hz 的低頻帶，顯示低頻音在空氣中傳播時，空氣分子振動小，摩擦比較慢，能量消耗少，所以傳播遠，通透力強，能使氣球皮輕易產生振動。

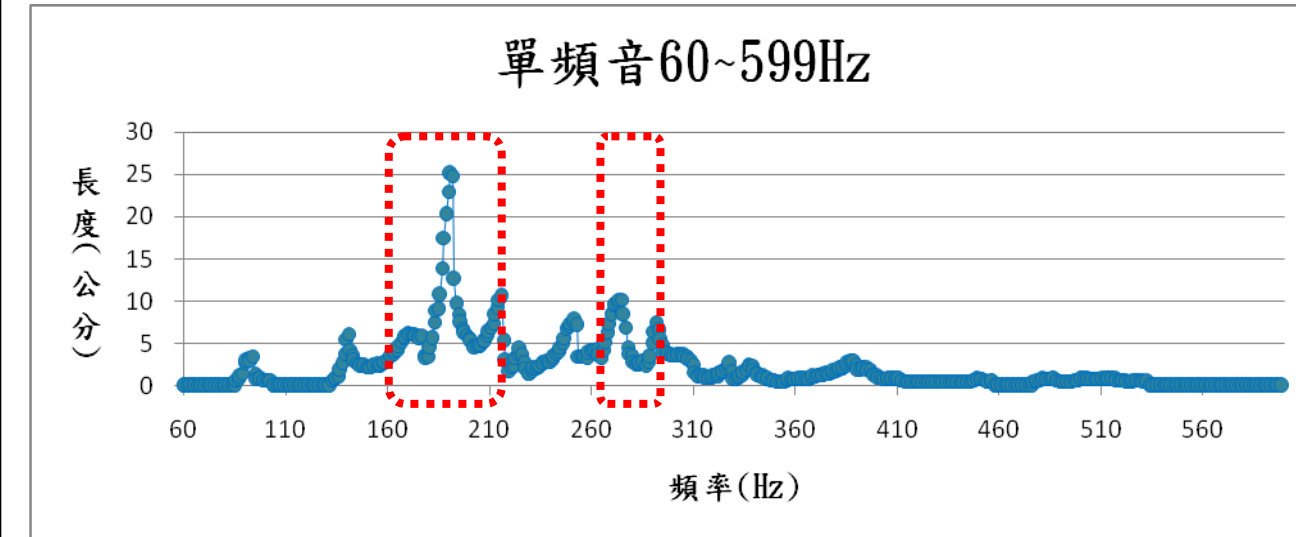


圖 9-6：單頻音介於 60~599Hz 間時，不同的單頻音與其雷射光反射的紅點圖形長度之關係圖

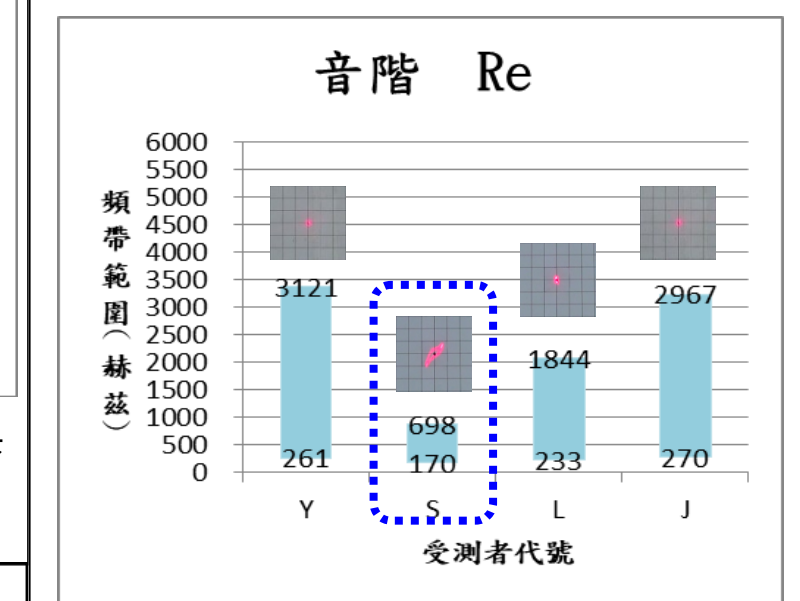


圖 9-4：四位受測者唱音階「Re」的頻帶範圍。

(三)實驗四將產生圖形變化的 400 個單頻音依「圖案」分成「線形」、「中空橢圓形」、「葫蘆形」、「8 字形」、「空心圓形」五大類(圖 9-7)，其中有趣的「8 字形」出現於 93-95Hz、171-172Hz、240-246Hz 等 12 個單頻音。



圖 9-7：將會產生圖形變化的 400 個單頻音依據「圖案類型」可分成五大類。

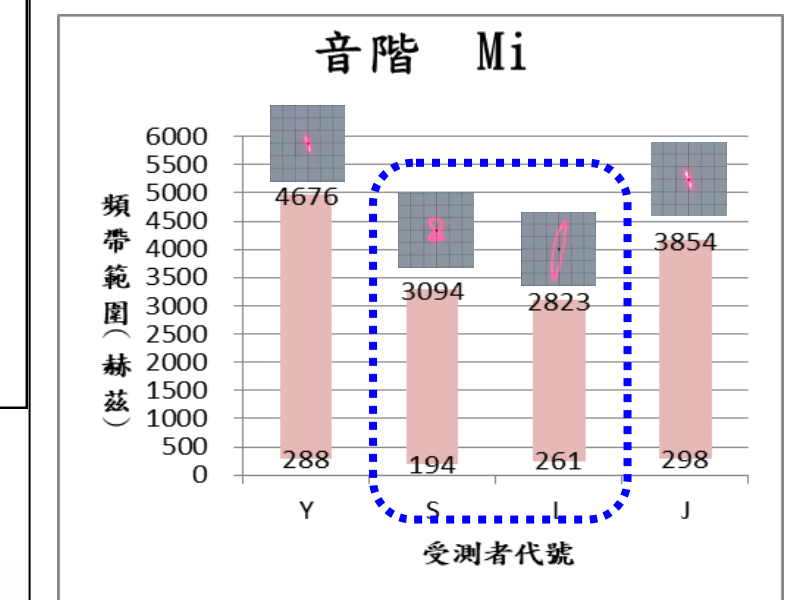


圖 9-5：四位受測者唱音階「Mi」的頻帶範圍。

三、聲音響度越強，雷射光反射的紅點圖形長度也會隨之變大。

(一)實驗五發現改變音量為 10%、15%、20%、25%、30%，播放 180-200Hz 單頻音，音量增強，雷射光反射的圖形長度也隨之變大(圖 9-8)，表示音量增強，聲波振幅增大，能使氣球皮產生更大的振動。但音量 25~30%圖形長度差距極小，說明音量增強至某個程度，雷射光反射的紅點圖形長度趨於穩定。

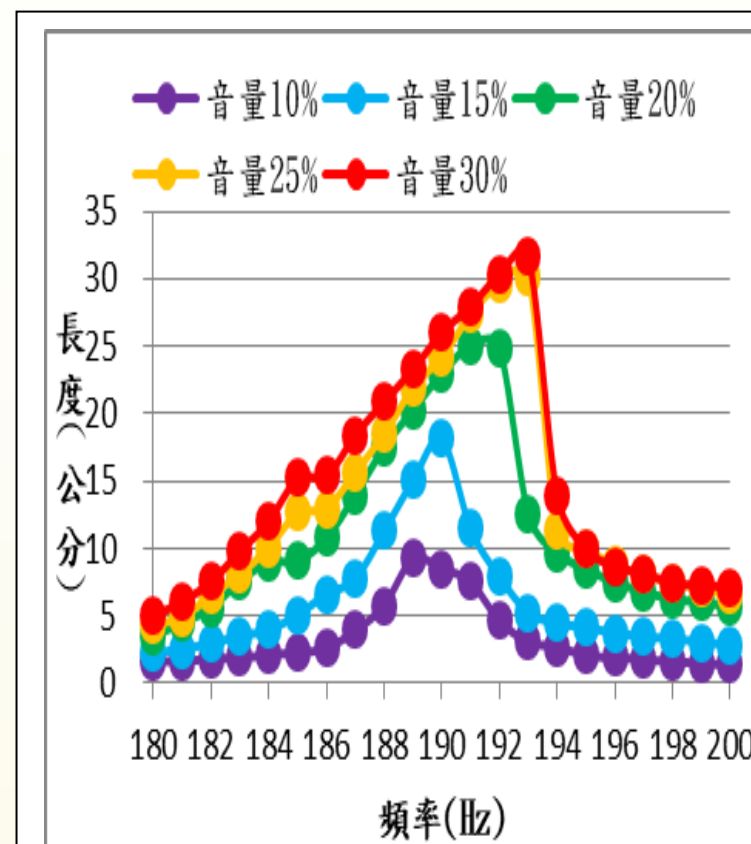


圖 9-8：響度與紅點圖形長度之關係圖

(二)音量從 10%增至 30%時，雷射光反射圖形除長度增加外，圖案也從「線形」變成「葫蘆形」或「橢圓形」。而實驗四以音量 20%進行不同頻率的圖形分析，由實驗五可推論音量 20%時，出現「線形」單頻音有可能因音量增大而變成「葫蘆形」或「橢圓形」；「葫蘆形」或「橢圓形」單頻音有可能因音量減小而變成「線形」。

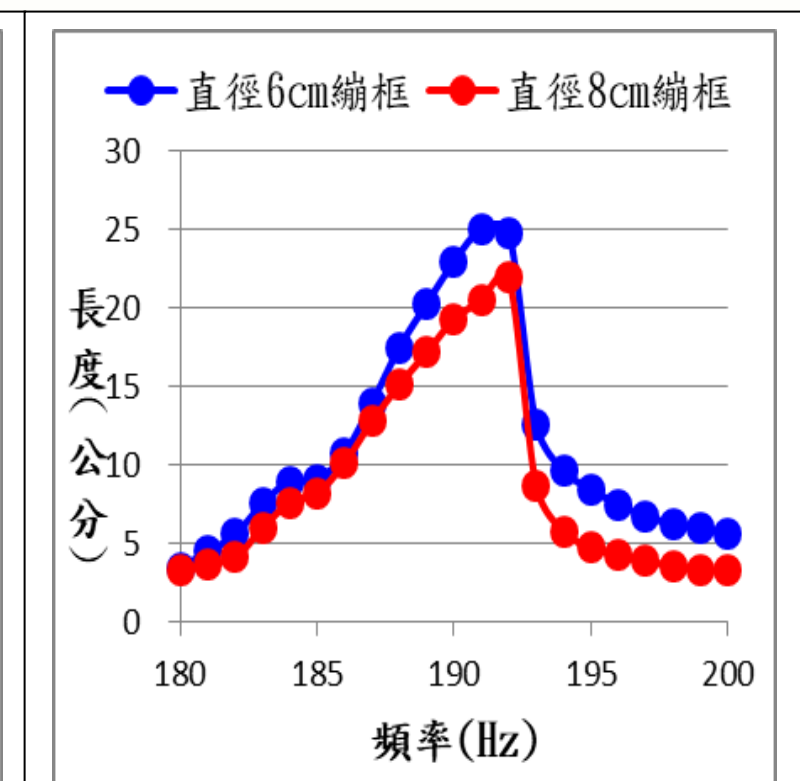


圖 9-9：氣球皮面積與雷射光反射的紅點圖形長度之關係圖

四、氣球皮面積及緊繃程度會影響投射至方格屏幕上紅點圖形變化。

(一)氣球皮面積增大，任一單頻音其雷射光反射的圖形不僅長度變小，生成圖形也會改變。

實驗六藉由改變氣球皮繃框尺寸增大受聲波振動氣球皮面積，發現圖形不僅長度變小(圖 9-9)，形狀也會發生改變，如 187Hz 單頻音圖形從「橢圓形」變成「線形」，且圖形顏色也變得比較深，顯示氣球皮面積增大後，氣球皮雖受同一單頻音聲波影響，但振動幅度變小了。

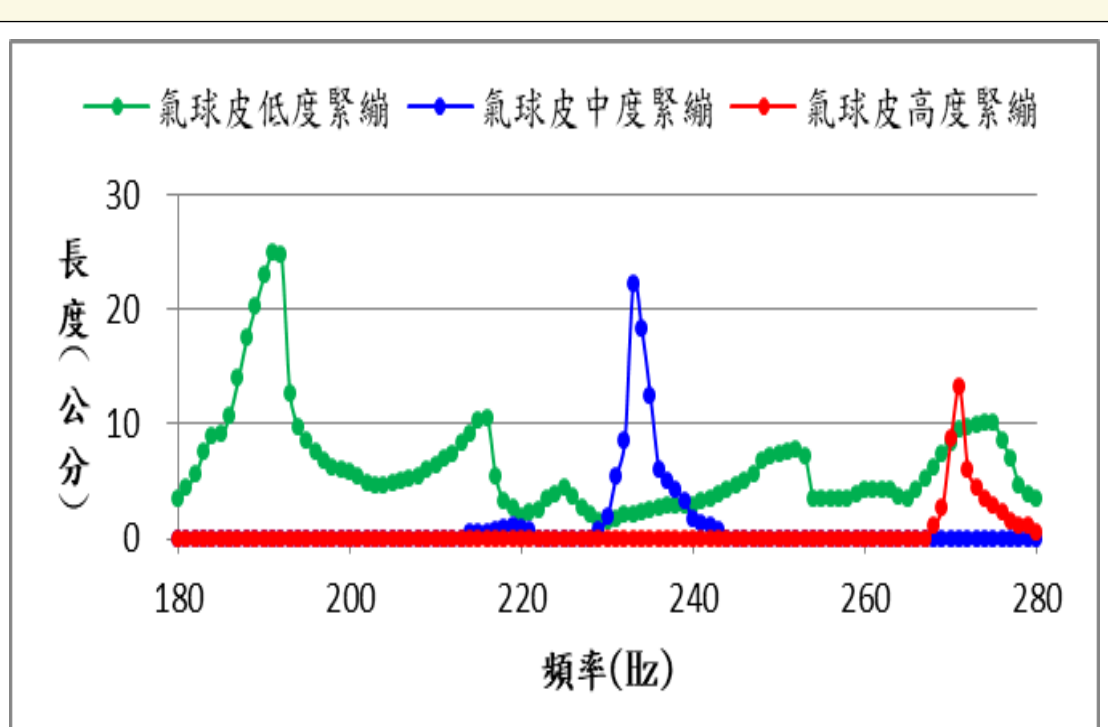


圖 9-10：不同緊繃程度氣球皮能使雷射光筆反射出最大圖形的頻率範圍及其圖形長度關係圖

(二)氣球皮緊繃程度越高，要使其產生顯著振動的頻率就越高，雷射光筆反射所產生的圖形長度越小，也會有較複雜的殘影！

1.實驗七分別以三種緊繃程度氣球皮進行 60~500Hz 單頻音掃描，發現氣球皮緊繃程度越高，要使其產生顯著振動的頻率就越高(圖 9-10)，且從側面角度拍攝氣球皮振動現象時，可明顯看見氣球皮受聲波影響而劇烈的上下振動，還會伴隨著強烈「嗡嗡~嗡嗡~」低沉的振動聲。

2.生成圖形長度越小，也有較複雜殘影！推測這是因為氣球皮越緊繃，受聲波影響所產生的振動方向越複雜、越快速的關係。

3.我們可以利用上述發現檢測鼓皮的鬆緊程度，班上學打爵士鼓的同學和我們分享，鬆緊度適中的鼓皮其振動頻率必須與鼓桶身的振動頻率相呼應，才能產生最佳的共鳴，但他對於鼓皮鬆緊程度的調整常常覺得困擾，因此我們建議他可以在鼓皮上黏貼一鏡面紙，藉由打擊鼓面觀察雷射光反射出的圖形，用以判斷鼓皮是否鬆弛。

五、研發「聲波振動模式檢測儀」能成功檢測氣球皮受聲波擾動位置及生成圖形間的關聯性。

實驗八中透過「聲波振動模式檢測儀」

表 8-1：不同擾動模式的雷射光反射所生成圖形一覽表

實驗結果可以反推實驗三~七中，當某單頻音使雷射光反射所生成圖形呈「線形」時，是因氣球皮產生「同方向的單點或雙點振動」；當某單頻音使雷射光反射所生成圖形呈「橢圓形」時，是因氣球皮產生「不同方向且距中心點等距的雙點振動」；當某單頻音使雷射光反射所生成的圖形呈「8 字形」或「葫蘆形」時，是因氣球皮產生「不同方向且距中心點不等距的雙點振動」。

擾動模式	一字形		十字形		X 字形			
	單點振動	雙點振動	等距	不等距	銳角端等距	銳角端不等距	鈍角端等距	鈍角端不等距
照片								
雷射光反射在方格屏幕上的圖形示例								