

中華民國第四十六屆中小學科學展覽會
作品說明書

國小組 自然科

佳作

081518

弦機妙算

學校名稱：高雄縣美濃鎮美濃國民小學

作者： 小五 李有庠 小五 曹展魁 小五 古清延	指導老師： 曾貴卿、林朝根
-----------------------------------	------------------

關鍵詞：絃樂器、雷射光、Goldwave

壹、摘要

我們利用雷射光測量微小位移的方法，配合太陽能板及電腦，組合成弦振動的量測系統，以 Gold Wave 軟體把訊號展開來分析聲音的頻率、音量、音色。我們驗證了弦振動頻率與弦長成反比，弦越緊、越細則弦振動頻率越高，藉由調整弦長可容易的找出音階。我們發現振幅越大音量越大，在相同力量撥弦下，弦越長、越鬆、越細所撥弦的振幅會越大，音量也就越大。此外，我們研究發現同樣的弦音色會相同，音色是由基音及幾個泛音所組成的。最後，我們利用研究結果，設計了一些光通訊系統裝置。

貳、研究動機

上學期經過電腦教室前，看見六年級的學長學姊在錄音，覺得很有趣！原來電腦不只可以上網查資料、打報告、打電玩，還可以把我們的聲音錄起來。只是我們有個疑問，既然電腦功能這麼強，那可不可以幫助我們分析聲音呢？另外，本學期上音樂課時，音樂老師為了介紹絃樂器，特地拿了一把吉他彈了幾首動人的歌曲，讓我們好佩服也覺得好神奇，為什麼只要幾根弦，加上手指頭快速的在弦上移來移去，就可以彈出如此美妙的聲音？所以，我們幾個科學研究社的同學，決定想要利用電腦來研究絃樂器的奧妙，解開絃樂器的機密。

作品與教材之相關性：南一版自然與生活科技第七冊--第三單元--聲音的探討

參、研究目的

我們以雷射光、太陽能面板、電腦組成弦振動的測量系統，並以 Gold Wave 軟體將訊號展開分析絃樂器的聲音，因此我們研究題目如下：

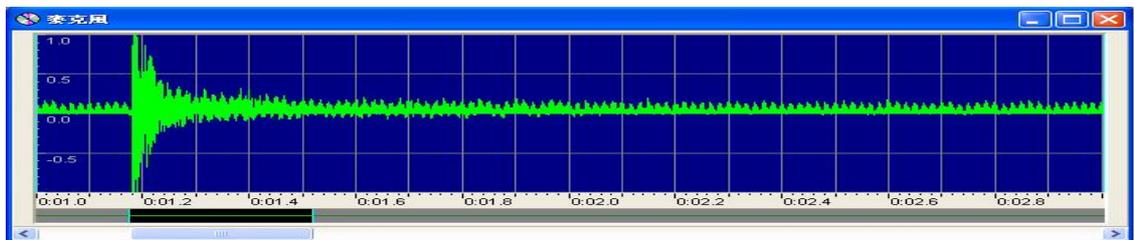
- 一、 利用電腦錄製絃樂器聲音，了解聲音的一些特點？
- 二、 探討吉他弦長與聲音的關係？
- 三、 找出快速彈出正確音階的方法？
- 四、 探討吉他弦的鬆緊與聲音的關係？
- 五、 探討吉他弦的粗細與聲音的關係？
- 六、 應用實驗結果，設計光學電子吉他、光學麥克風。

肆、研究設備及器材

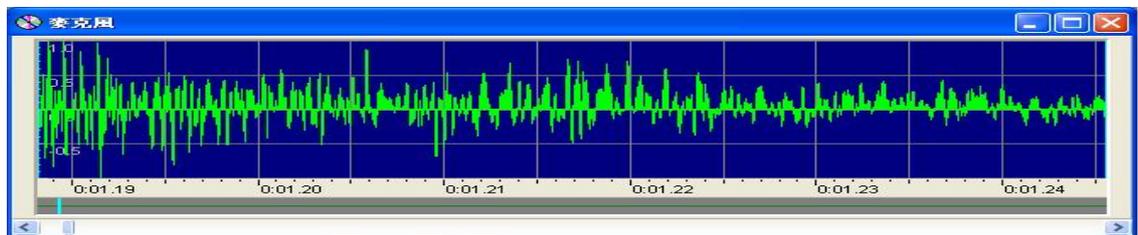
雷射筆 1 個、太陽能面板 1 塊、電腦 1 台、吉他弦(no.1-no.6 共六條)、礦泉水瓶 (5 公升 2 瓶)、三角積木 2 個、皮尺一條、鐵釘數個、磅秤 1 個、橡皮筋 2 條、燈泡 1 個、紙杯 1 個、錫箔紙 1 張、鐵絲 1 段、塑膠袋 1 個。

伍、研究過程及方法

- 一、為了分析吉他弦振動產生的聲音，我們以麥克風連接到電腦音效卡，利用 Gold Wave 軟體把聲音錄下來，結果所錄下的聲音波形如圖一，把它展開後如圖二，我們發現，它沒有比較規律的形狀，如果以我們現有的儀器不容易分析它的聲音特性。



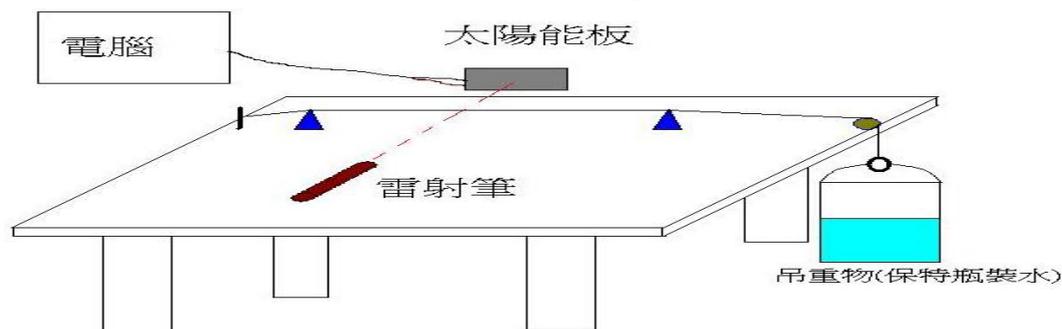
圖一 以麥克風錄下的吉他弦振動所發出的聲音波形



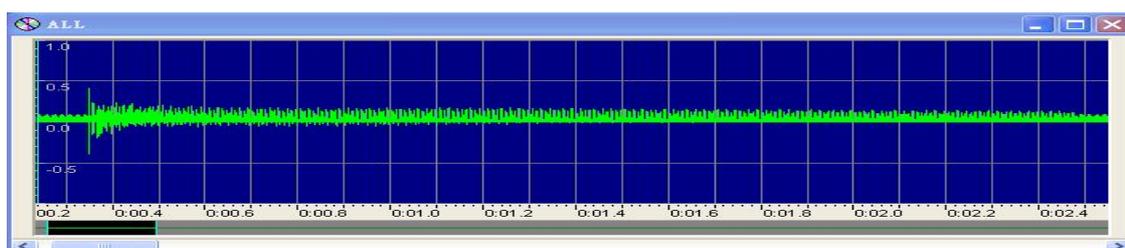
圖二 將波形展開後，發現波形比較沒有規律

- 二、我們觀摩歷屆科展作品中，發現可以用雷射光來分析微小位移，因此我們有個突發的構想，是否可以用雷射光來分析弦振動的情形，於是我們改良了測量裝置，如圖三；雷射光打到弦上，再投射到太陽能板，為了量取太陽能板產生的訊號，我們把麥克風剪掉，只留接頭接到太陽能板上的兩條電線，再把接頭插到電腦音效卡中的麥克風輸入端，當雷射光打到太陽能板上時，電腦喇叭會有聲音傳出，這樣就形成了雷射光接收器。同樣我們以 Gold Wave 軟體把實驗結果錄下來，測量的結果如圖四；把它展開後可以看出記錄下來的訊號，有固定的頻率可做分析，如圖五。因此，我們就以(一)雷射筆當作發射源(二)太陽能板當作接收端(三)電腦作為資料收

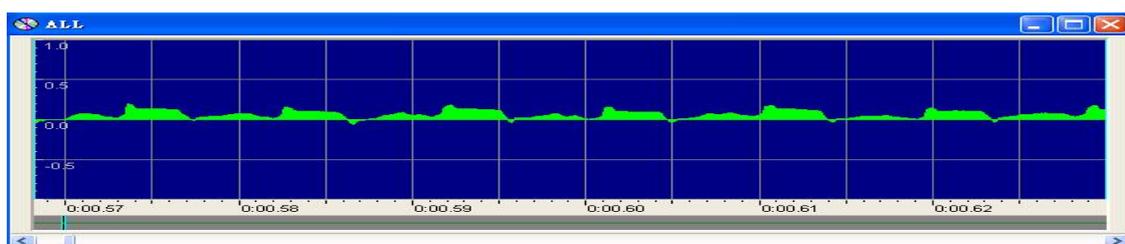
集分析，組成我們的量測系統，來進行後續的實驗。



圖三 實驗裝置圖



圖四 以雷射光打到弦上再由太陽能板記錄下來的波形

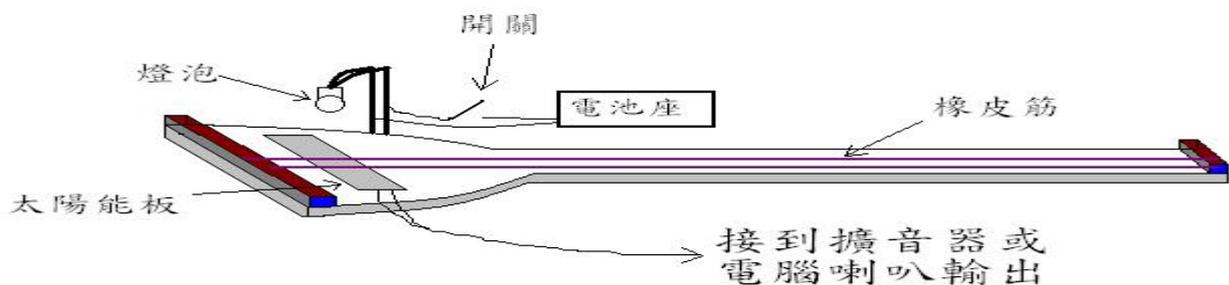


圖五 把上圖波形展開，發現波形較有規律性

- 三、為了探討絃樂器的聲音特性---音量、音調、音色三要素，我們在弦的下方墊上兩個三角積木，距離為 60 cm，撥弦的位置固定在 5 cm 處，雷射筆測量點固定在 10 cm 處，固定懸吊 4.5 kg 的水，手撥弦十次，用 Gold Wave 軟體錄下聲音。然後透過喇叭分析聲音的音量、音色；用 Gold Wave 軟體量取不同波段的各十個波，計算頻率分析聲音的音調，並觀看波形、頻譜，分析聲音的音色。
- 四、為了探討弦的長度跟聲音的關係，我們撥弦的位置固定在 5 cm 處，雷射筆測量點固定在 10 cm 處，固定懸吊 4.5 kg 的水；在弦的下方也墊上兩個三角積木，但第一個三角積木固定在 60 cm 處，第二個三角積木的位置則不固定，以改變弦的長度；手撥弦十次，用 Gold Wave 軟體錄下聲音，測量分析不同長度的弦，它的頻率、音量、音色變化。我們利用 Gold Wave 取十個波，計算量出弦振動的頻率變化，用音量表測出音量變化，透過喇

叭、波形、頻譜分析音色變化。

- 五、為了找出快速彈出正確音階的方法，我們撥弦的位置固定在 5 cm 處，雷射筆測量點固定在 10 cm 處，固定懸吊 4 kg 的水，然後依序測量弦長 30 ~15 cm 間距 2 cm 的頻率，排成音階圖（不同頻率聲波圖形依聲音高低排成一行）用喇叭播放，將太高或太低的音替換、保留合適的音，來回測試多次以找到正確音階；接著利用此音階圖分析弦長與頻率的關係，找到 Do、Re、Mi、Fa、Sol、La、Si、高八度音與 Do 之間的弦長比例，及一組此弦長比例的最簡分數的數列。
- 六、為了探討弦的鬆緊與聲音的關係，我們撥弦的位置固定在 5 cm 處，雷射筆測量點固定在 10 cm 處，改變弦的鬆緊，依序懸吊 1~8 kg 的水（每次增加 1 kg 的水），測量分析不同鬆緊的弦，它的頻率、音量、音色變化。我們利用 Gold Wave 取十個波，計算量出弦振動的頻率變化，用音量表測出音量變化，透過喇叭、波形、頻譜分析音色變化。
- 七、為了探討弦的粗細與聲音的關係，我們撥弦的位置固定在 5 cm 處，雷射筆測量點固定在 10 cm 處，固定懸吊 4 kg 的水，依序使用 no.1 至 no.6 等六種不同的弦，測量分析不同粗細的弦，它的頻率、音量、音色變化。我們利用 Gold Wave 取十個波，計算量出弦振動的頻率變化，用音量表測出音量變化，透過喇叭、波形、頻譜分析音色變化。
- 八、由前面實驗，我們了解弦的振動可以經由雷射光及太陽能板來轉變成聲音，藉由這方法，我們試著製作光學的電子吉他，構造圖如圖六

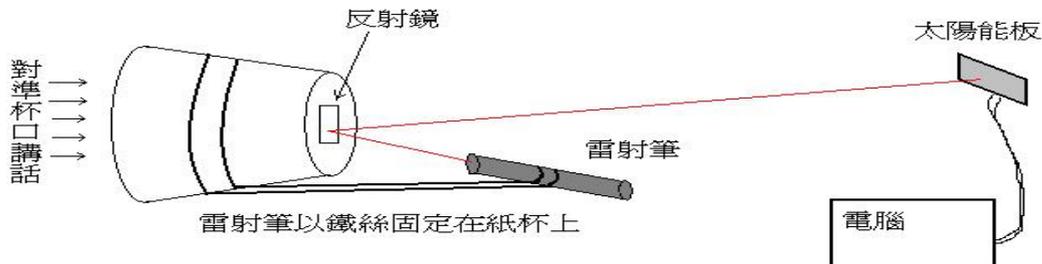


圖六 自製的光學電子吉他構造圖

為了方便製作，我們以橡皮筋當作光學電子吉他的弦，以一般燈泡取代原先的雷射筆，主要是為了同時能照射到兩條橡皮筋弦，手撥弦時可以從喇叭中

聽到聲音。由於產生的聲音太小聲，必須把喇叭調到最大或是加擴音器，才能聽到較明顯的聲音，但是這樣一來同時也會把背景光線所產的雜音也放大，而造成不悅耳的聲音。因此，如果要讓光學電子吉他取代傳統電子吉他，這方面必須要加以克服才行。

九、光學麥克風的製作：構造圖如圖七



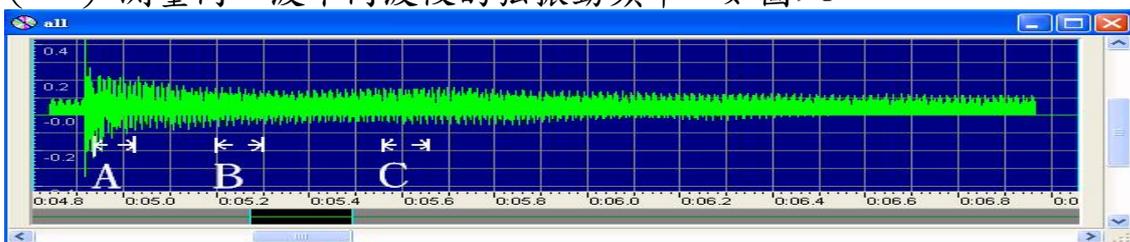
圖七 自製的光學麥克風構造圖

首先，我們把杯底換成繃緊的塑膠袋膜，對著杯口講話時，會使杯底的膜產生振動；然後，我們在杯底貼上反射鏡，雷射筆的光線照到反射鏡後，會反射到太陽能板上；最後，再把太陽能板接到電腦由喇叭輸出聲音。實驗過程中，講話者必須把反射的光線對準到太陽能板上才会有聲音產生，這也就是光學麥克風所帶來不方便的地方；但是用這樣簡單的設備，可以用來說明聲音的振動、光學通訊，也容易引起我們小學生的學習興趣。

陸、研究結果

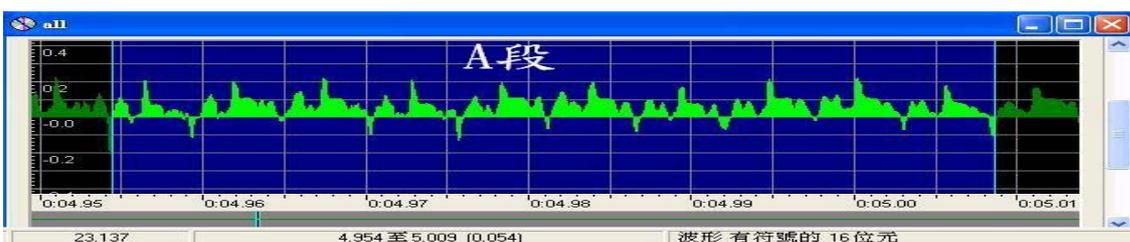
一、絃樂器聲音的特點

(一) 測量同一波不同波段的弦振動頻率，如圖八。

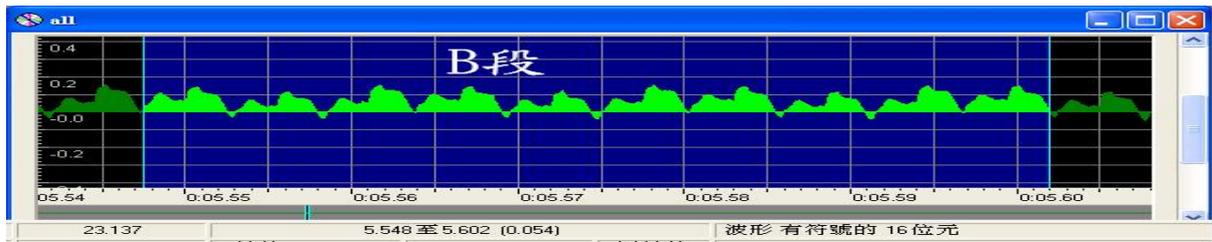


圖八 不同波段頻率比較

將 A、B、C 三段展開如下圖九~十一。



圖九 前段頻率



圖十 中段頻率

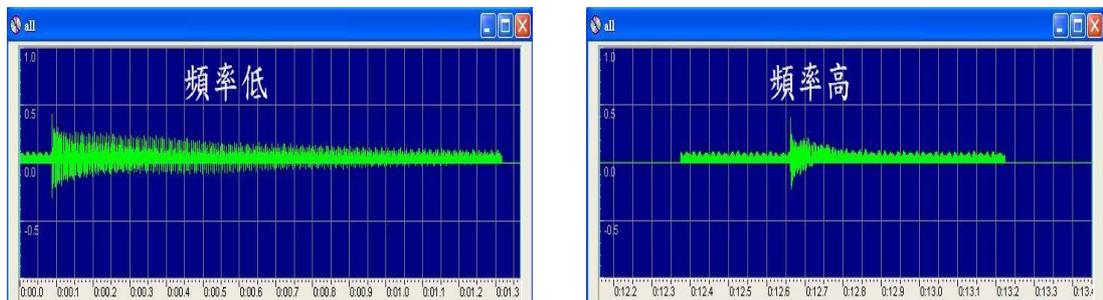


圖十一 後段頻率

實驗發現：1. 各個波段其頻率均相同，即頻率不會隨波的振動時間改變。

2. 各個波段波形不同音色也不同，剛開始波形較複雜、吵雜，然後部分泛音消失後會較悅耳。

(二) 利用小算盤計算聲音頻率高低後，將大小不同頻率的聲波接上喇叭播放，並同步觀看 Gold wave 的聲波圖形，如圖十二。



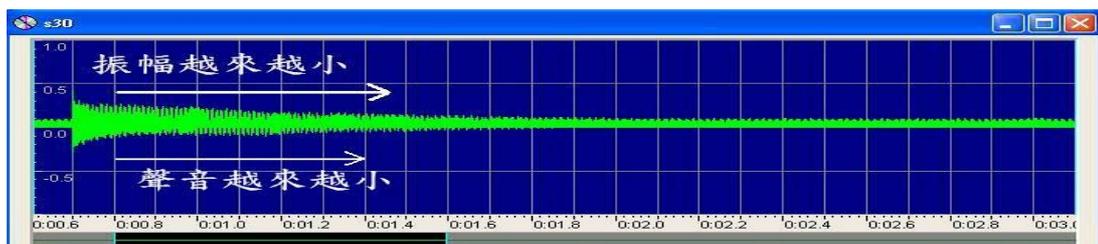
圖十二 不同頻率音高及波形比較

實驗發現：1. 頻率越高，聲音音高越高。

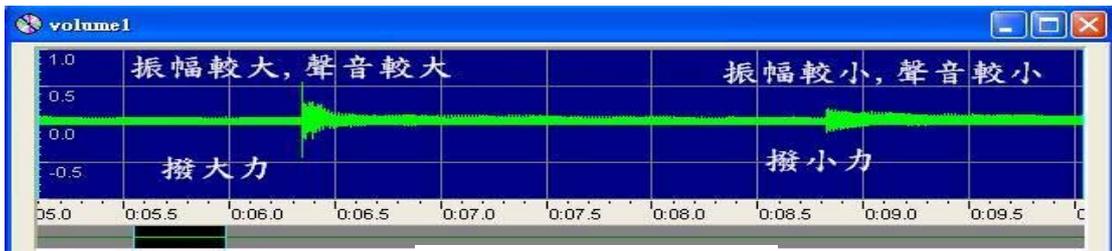
2. 聲音越高封包越緊縮，聲音越低封包越擴張。

3. 聲音越高越快平靜。

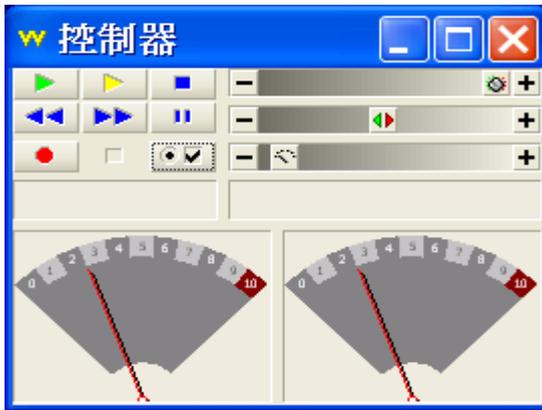
(三) 將不同振幅的聲波接上喇叭播放，並同步觀看 Gold wave 的聲波圖形，如圖十三、十四及音量表如圖十五、十六。



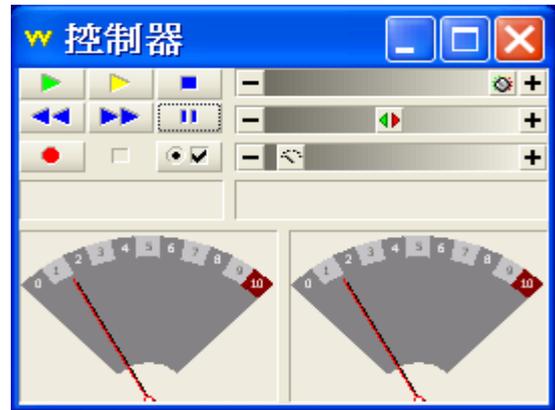
圖十三 振幅分析



圖十四 振幅比較



圖十五 振幅大時音量表



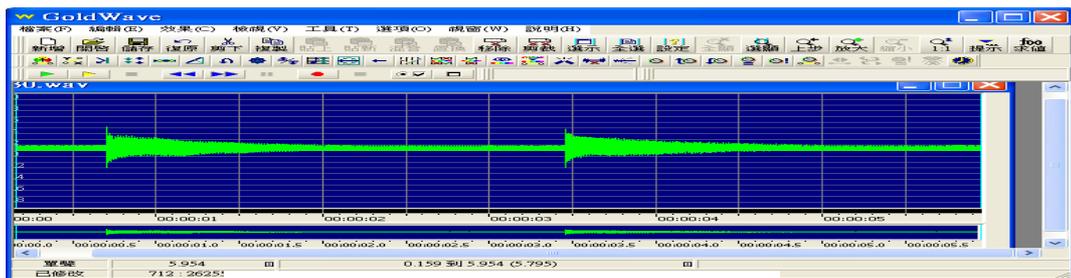
圖十六 振幅小音量表

實驗發現：1. 振幅越大，聲音越大聲。

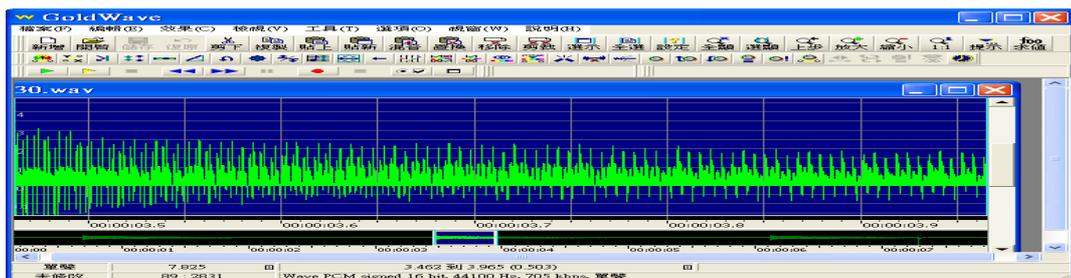
2. 振幅會隨著時間越來越小，聲音則跟著振幅越來越小，最後會沒有聲音。

(四) 在相同弦下撥弦二次，用喇叭播放、分析波形，並參考師大物理教學動畫及 Gold wave 頻譜分析，分析弦樂器的音色，如圖十七~圖二十二。

用喇叭播放及觀看波形

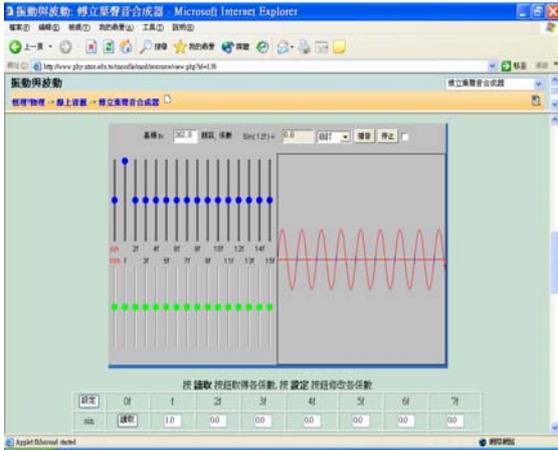


圖十七 相同弦的音色及波形

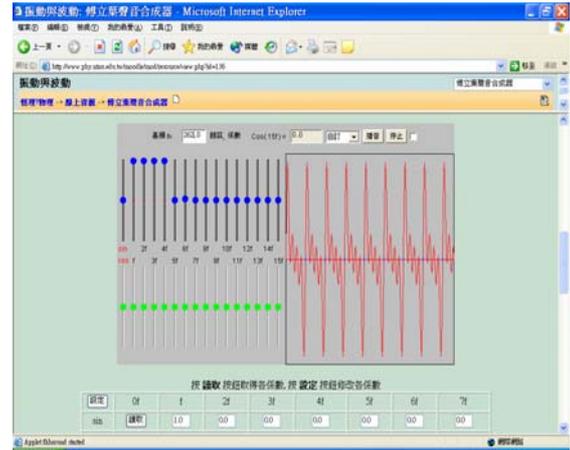


圖十八 波形展開

教學動畫實驗畫面

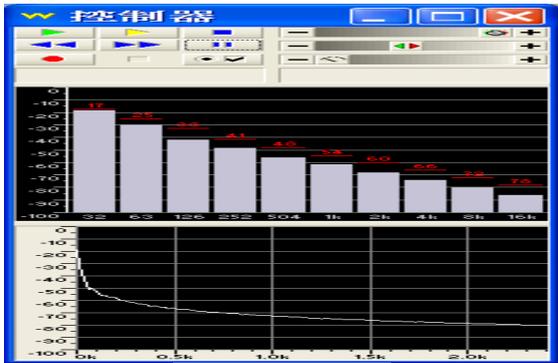


圖十九 (基頻 262 Hz 時波形)

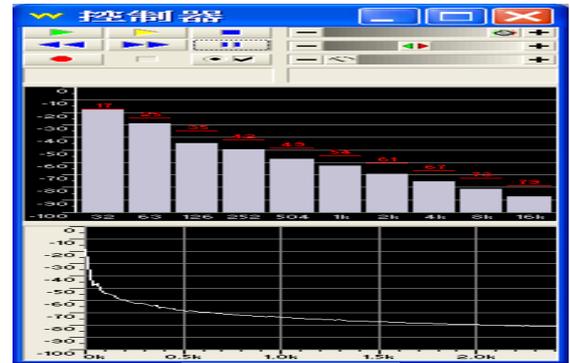


圖二十 (基頻 262 Hz 及 3 個泛音時波形)

頻譜分析



圖二十一



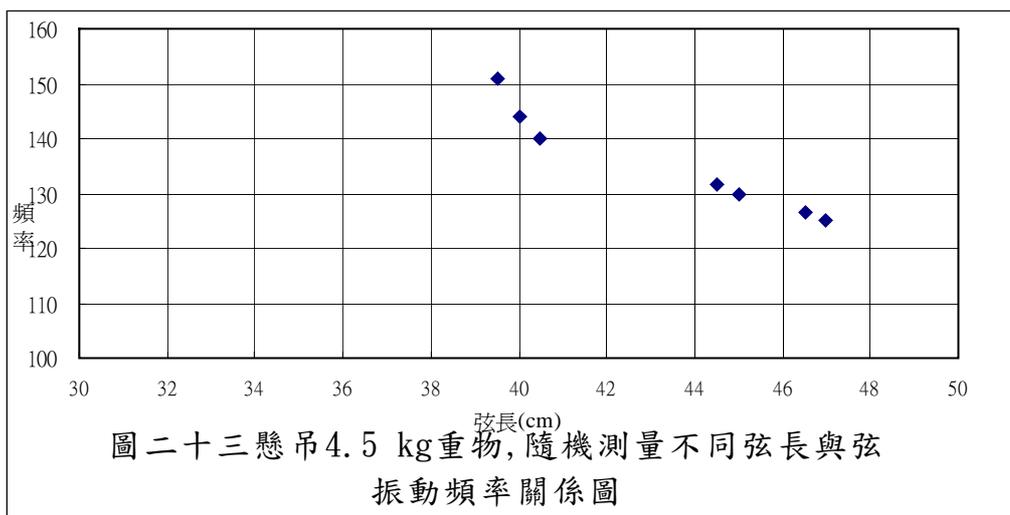
圖二十二

- 實驗發現：
1. 相同的絃樂器撥弦 2 次，聽起來音色相同，波形看起來也一樣。
 2. 波是由很多不同的頻率合成而成，分別是由一個基頻與數個泛音所組成。
 3. 同樣的弦撥弦 2 次，用頻譜分析，會很接近。

二、吉他弦長與聲音的關係

(一) 隨機測量不同弦長的頻率，所測得的弦振動頻率如圖二十三與表一

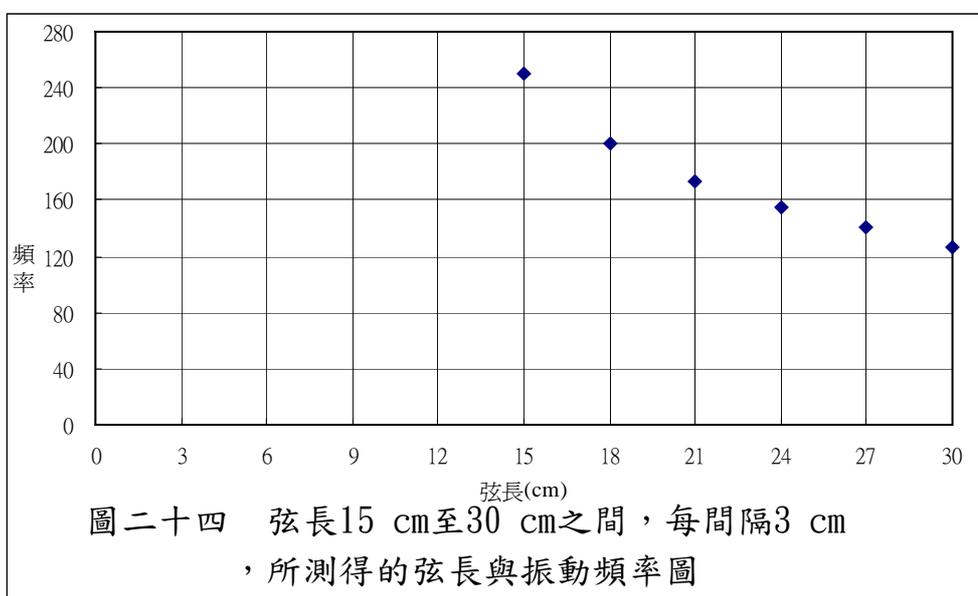
表一懸吊 4.5 kg 重物，隨機改變不同弦長所測得弦振動頻率							
弦長 (cm)	47 cm	46.5 cm	45 cm	44.5 cm	40.5 cm	40 cm	39.5 cm
頻率 (Hz)	125	126.5	130	131.5	140	144	151



實驗發現：吉他弦長越長音越低

(二) 懸吊 4.5 kg 重物，弦長 15 cm 至 30 cm，所每隔 3 cm，測量弦振動頻率如圖二十四與表二

弦長 (cm)	15 cm	18 cm	21 cm	24 cm	27 cm	30 cm
頻率 (Hz)	250	200	173	155.3	141.2	126.6



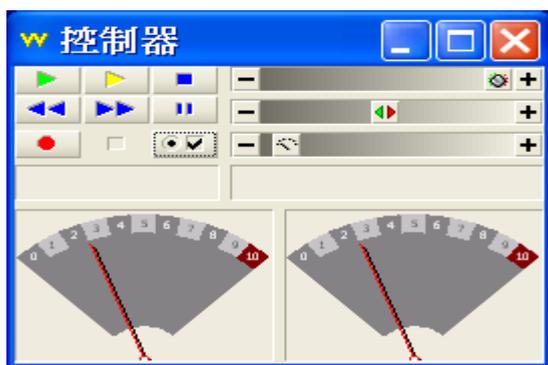
$$15 * 250 = 3750 \quad 24 * 155 = 3720$$

$$18 * 200 = 3600 \quad 27 * 141 = 3807$$

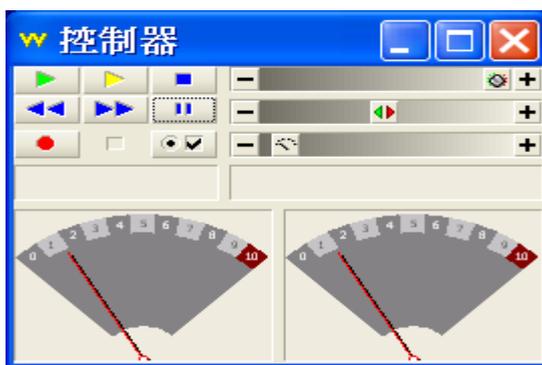
$$21 * 173 = 3633 \quad 30 * 126 = 3780$$

實驗發現：吉他弦長與頻率成反比

(三) 測量不同弦長的音量，並且接上喇叭播放同步觀看 Gold wave 的聲波音量表，如圖二十五、二十六。



圖二十五 弦長 60 cm 音量表

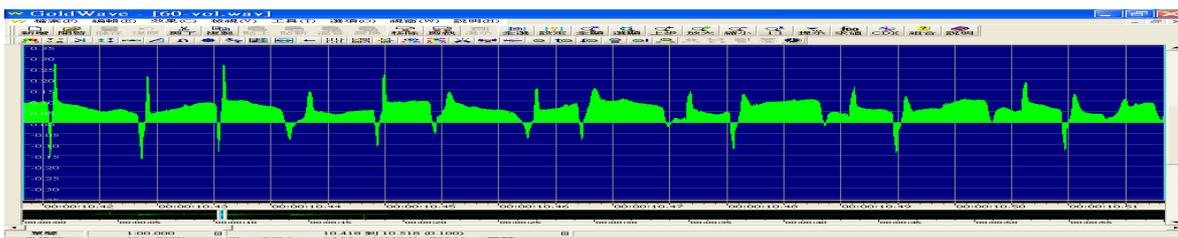


圖二十六 弦長 30 cm 音量表

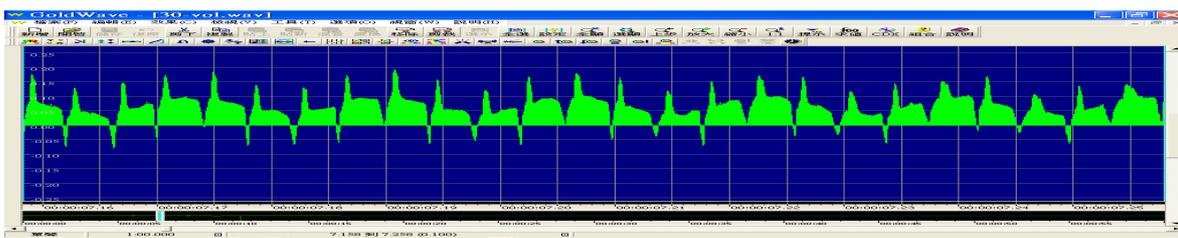
實驗發現：1. 使用相同力量，弦長越長音量越大，弦長越短音量越小。

2. 弦長越長越容易撥弦、改變振幅，弦長越短越不容易撥弦、改變振幅。

(四) 測量不同弦長的音色，接上喇叭播放聽音色、並觀看 Gold wave 的波形(如圖二十七、二十八)及頻譜(如圖二十九、三十)。



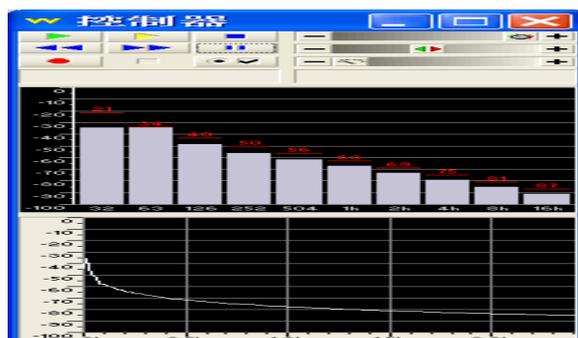
圖二十七 弦長 60 cm 波形



圖二十八 弦長 30 cm 波形



圖二十九弦長 60 cm 頻譜



圖三十弦長 30 cm 頻譜

實驗發現：1. 弦長越長聽起來音色越悅耳、柔和，弦長越短聽起來音色越刺耳、清脆。

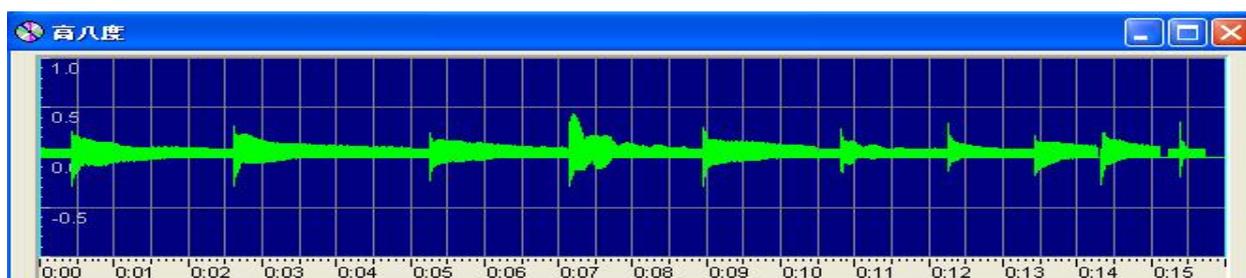
2. 弦長越長波形較瘦長，弦長越短波形較寬短。

3. 弦長越長頻譜曲線較接近 0，不管低、中、高頻的值都較小，弦長越短頻譜曲線較遠離 0，不管低、中、高頻的值均較大。

三、快速彈出正確音階的方法

(一) 測量弦長 30~15 cm 的頻率，用喇叭播放並找出一組音階的頻率，並同步觀看 Gold wave 波形圖，如圖三十一、表三

弦長(cm)	30	27	24	22.5	20	18	16	15
頻率(Hz)	133	151	164	175	200	222	250	263
音高	Do	Re	Mi	Fa	Sol	La	Si	高音Do
與全長比	30/30=1	27/30=9/10	24/30=4/5	22.5/30=3/4	20/30=2/3	18/30=3/5	16/30=8/15	15/30=1/2



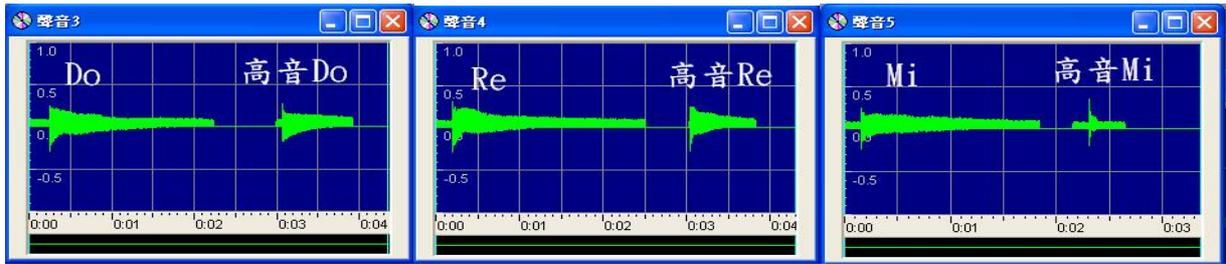
圖三十一 音階

實驗發現：1. Do、Re、Mi、Fa、Sol、La、Si、高音 Do 弦長比為 1、9/10、4/5、3/4、2/3、3/5、8/15、1/2。

2. 高音 Do 的弦長為 Do 的一半弦長。

(二) 測量 Re 與 Mi 的 1/2 弦長 (13.5 cm、12 cm) 的頻率，並用喇叭播放是否為高八度音，所測得的弦振動頻率如圖三十二與表四

	Do 與高音 Do		Re 與高音 Re		Mi 與高音 Mi	
弦長(cm)	30 cm	15 cm	27 cm	13.5 cm	24 cm	12 cm
頻率(Hz)	133	263	151	303	164	333
音高	Do	高音Do	Re	高音Re	Mi	高音Mi
弦長比	2	1	2	1	2	1

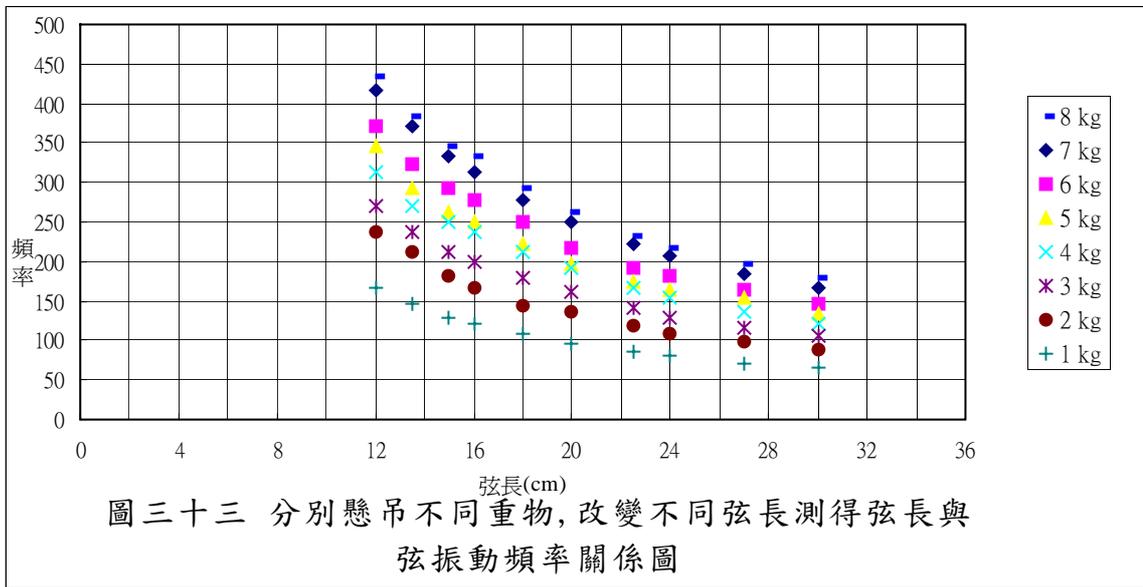


圖三十二 高低音比較

實驗發現：Do、Re、Mi 高八度音與 Do、Re、Mi 的弦長比大致為 $1/2$ 。

四、弦的鬆緊與聲音的關係

(一) 將懸吊 1~8 kg 的重物，每隔 1 kg 測得弦長與弦振動頻率的關係圖，如圖三十三。

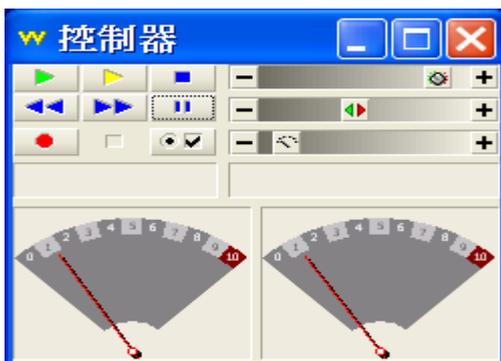


圖三十三 分別懸吊不同重物，改變不同弦長測得弦長與弦振動頻率關係圖

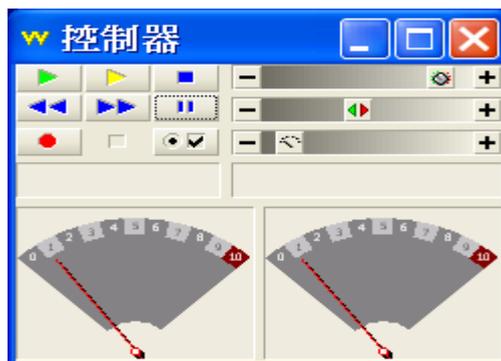
實驗發現：1. 以同樣的弦長來看，弦愈鬆，弦振動的頻率愈低，弦愈緊，弦振動的頻率愈高。

2. 從各曲線不平行的情況來分析，其似乎不是成正比，應該呈另外一種相關性。

(二) 依序懸吊 4 kg、8 kg 的重物，並且接上喇叭播放同步觀看 Gold wave 的聲波音量表，測量弦的鬆緊與音量關係，如圖三十四~三十五



圖三十四 懸吊 4 kg 公斤音量表



圖三十五懸吊 8 kg 公斤音量表

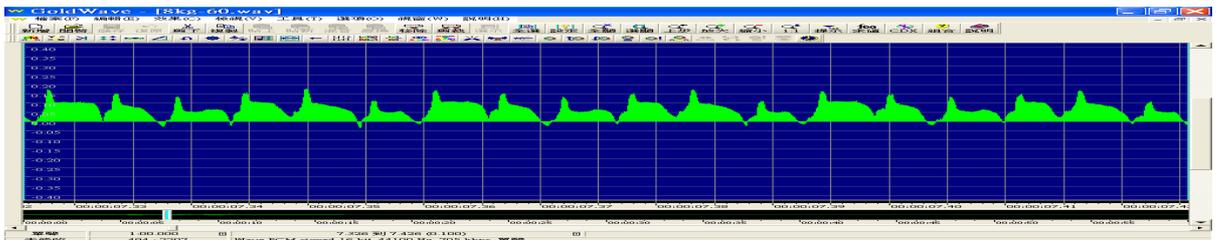
實驗發現：1. 使用相同力量撥弦，弦越鬆音量越大，弦越緊音量越小。

2. 弦越鬆越容易撥弦、改變振幅，弦越緊越不容易撥弦、改變振幅。

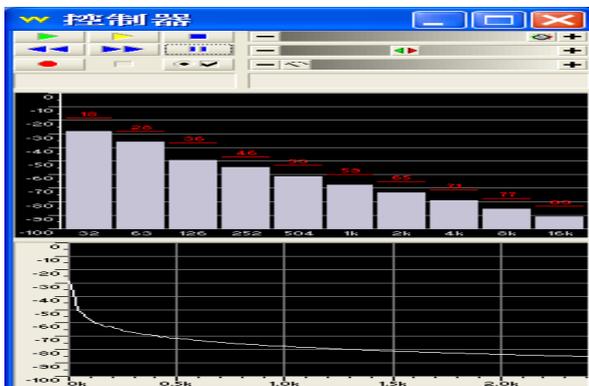
(三) 依序懸吊 4 kg、8 kg 的重物測量，觀測弦不同鬆緊時的音色，並接上喇叭播放聽音色、觀看 Gold wave 的波形（如圖三十六、圖三十七）及頻譜（如圖三十八、圖三十九）。



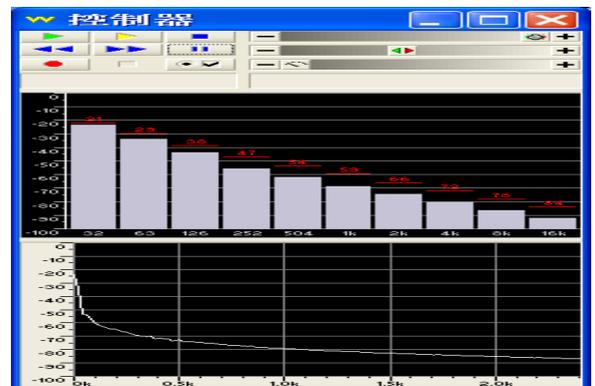
圖三十六懸吊 4 kg 波形



圖三十七懸吊 8 kg 波形



三十八懸吊 4 kg 頻譜



圖三十九懸吊 8 kg 頻譜

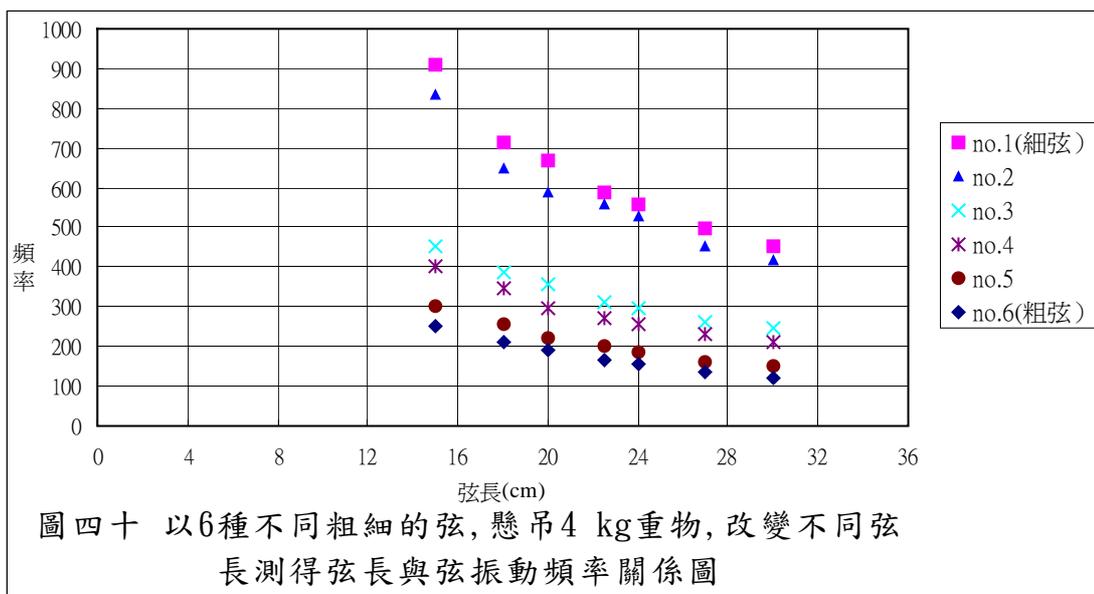
實驗發現：1. 弦越緊聽起來音色越高揚、清脆，弦越鬆音色越低沉、混濁。

2. 弦越緊鬆形較瘦長、弦越鬆波形較寬短。

3. 弦越鬆頻譜曲線較接近 0，大部分的頻率值都較小，弦越緊頻譜曲線較遠離 0，大部分的頻率值均較大。

五、弦的粗細與聲音的關係

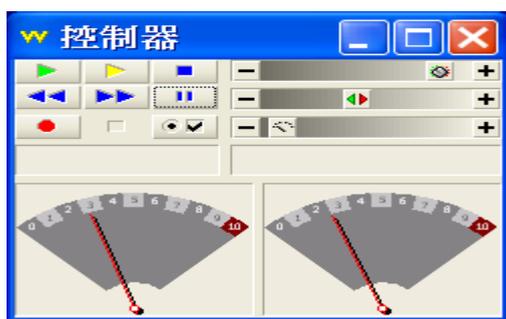
(一) 以不同粗細的弦(no.1 至 no.6，號次越小越細)，懸吊 4 kg 的重物，改變不同弦長，測得頻率（音高）結果如圖四十



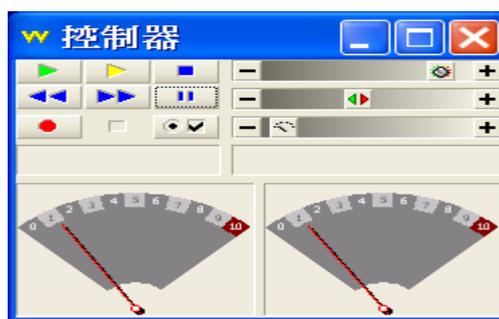
實驗發現：1. 弦越細振動頻率越高，弦越粗振動頻率越低。

2. 從各曲線不平行的情況來分析，其似乎不是成反比，應該呈另外一種相關性。

(二) 以不同粗細的弦，懸吊4 kg的重物，測量不同粗細弦的音量，並且接上喇叭播放同步觀看 Gold wave 的聲波音量表，如圖四十一、四十二。



圖四十二 細弦音量表

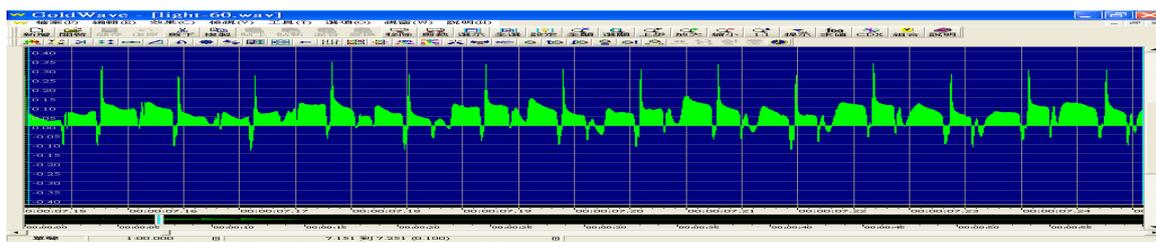


圖四十三 粗弦音量表

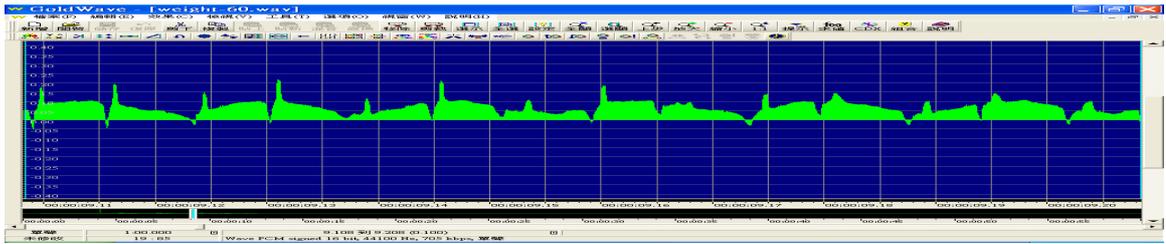
實驗發現：1. 使用相同力量，弦越細音量越高，弦越粗音量越低。

2. 弦越細越容易撥弦改變振幅，弦越粗越不容易撥弦改變振幅。

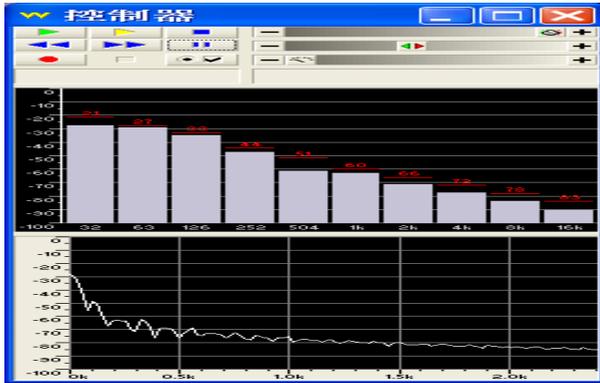
(三) 以不同粗細的弦，懸吊4 kg的重物，觀測弦不同粗細時的音色，並接喇叭播放聽音色、觀看 Gold wave 的波形（如圖四十三~四十四）及頻譜（如圖四十五、圖四十六）。



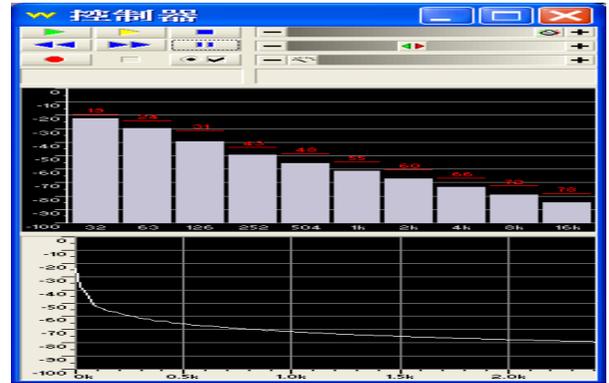
圖四十三 細弦的波形



圖四十四 粗弦的波形



圖四十五 細弦



圖四十六 粗弦

- 實驗發現：
1. 弦越粗聽起來音色越悅耳、低沉，弦越細音色越刺耳、清脆。
 2. 弦越細波形較寬短，弦越粗波形較瘦長。
 3. 弦越粗頻譜曲線較接近 0，大部份頻率值都較小，弦越細頻譜曲線較遠離 0，大部份頻率的值均較大。

六、應用實驗原理，設計光學電子吉他、光學麥克風。

(一) 光學電子吉他



圖四十七

- 實驗發現：
1. 光學電子吉他可以彈出音符，並且轉成電腦聲音檔，透過電腦播放或網路傳輸。
 2. 光學電子吉他可以透過網路 live 即時傳送，不必到現場也能聽到音樂。

(二) 光學麥克風



圖四十八

- 實驗發現：
1. 光學麥克風可以傳遞聲音，但因雷射光經錫箔紙反射後光點會散開，聲音會比較模糊。
 2. 雷射光入射角較小時，光點比較不會散開，聲音會較清楚。
 3. 靠近麥克風講話時，聲音會比較清楚、比較大聲。

柒、討論：

- 一、太陽能板照到光可以產生電，照射的光越多，它所產生的電越大。雷射光照到弦再投射到太陽能板上，如果弦沒振動，那麼它所產生的訊號，都是一個固定值，頻率大約 60 Hz，這與一般交流電頻率相吻合；當弦振動時，雷射光因為受到弦的擾動，投射在太陽能板上光的強度，就會有時強有時弱，所以我們量到波形就會有高高低低的現象。
- 二、撥弄弦時整條弦都是在振動，它所產生的聲音經由空氣傳播出來，當用麥克風量取聲音時，所量到的聲音是整條弦振動產生聲音加上背景聲音的混合；而以雷射光量到的是弦上的測量點振動所產生的訊號加上背景光線的混合，比較圖一與圖四波形圖，我們發現弦振動產生的聲音其實是很複雜，但經由我們以雷射光測試弦上單一點的振動來把它簡化，而可以用來分析弦振動情形。
- 三、實驗中我們發現，振動頻率越低時，它從撥弄後開始振到回復平靜的時間較長，相反的振動頻率越高，它從開始振到回復平靜的時間較短，這可能是因弦的振動時會跟空氣產生摩擦，而消耗掉弦的能量，頻率高時振動速度快，能量消耗的也快，因此很快的就回復到平靜狀態。
- 四、通常在聽音樂時，要讓人聽了舒適悅耳，以麥克風來錄製效果可能會較好，但若在實驗室中，研究聲波時，又不希望其他雜音來干擾，以光學的雷射來測量也許較適合。
- 五、我們發現絃樂器的弦長、鬆緊、粗細，不只跟聲音的音高有關，也跟音量有關。可能是在使用相同力量彈弦時，弦長較長可把弦壓得較低，弦較鬆時比較容易壓弦，弦較細時比較輕容易振動，致使振幅可改變較大，音量

較大。

- 六、聲音的音色即是波形，限於我們的能力與設備，很不容易分析，因此分析時我們只做性質的描述（定性）。我們先採用我們的耳朵進行判別，然後大家一起討論歸納音色聽起來如何？接著，把波形展開以長寬來分析波形；再採用頻譜來分析，頻譜可把一些雜亂曲線變成幾組長條圖或方塊形（FFT 模式），但頻譜對我們小學生實在太難，我們只分析它的曲線偏向，不詳細說明頻率高低的數量分佈。
- 七、從本實驗中，我們把弦的振動轉成光訊號，再把這光訊號經由太陽能板變成電的訊號，輸出成聲音，這個過程就類似一個小型的光通訊系統，可以把它發展成光學電子吉他、小型對講機或雷射麥克風，這樣對我們小學生產生很大的學習動機。
- 八、分析聲音的軟體很多，如 Gold wave、Adobe audition 等，但對於我們小學生來說，似乎以 Gold wave 較佳，除較易學以外，中文化程式取得方便，網路教學檔也很多，很適合我們國小學生用來分析聲音；若有一定程度了解後可採 Adobe audition，因其功能較多，相對的也較複雜。

捌、結論

以雷射光來測試弦的振動，不同於傳統錄聲音用麥克風的方式，雷射光的方法所錄下來的訊號，比較容易分析弦的聲音。實驗中我們驗證了弦的長度、鬆緊、粗細跟頻率、音量、音色的關係，同時利用這些關係找出彈正確音階的方法；絃樂器製作的方法也是考慮並控制這些變因，而形成可以發出悅耳聲音的樂器。另外，我們的實驗系統，就是一個光通訊系統，美中不足的地方是接收端的電腦軟、硬體設備不足，不容易分析音色。最後，我們應用實驗的結果設計了光學吉他與麥克風，但效果較差且有侷限性，如果要把它應用在日常生活中，必須還要改進才行。

玖、參考資料及其它

- 一、師大物理系 物理教學示範實驗教室 <http://www.phy.ntnu.edu.tw/demolab/>
- 二、中華民國第四十二屆中小學科學展覽會參展作品專輯
國中組物理科 「會唱歌的空氣」 國立台灣科學教育館
- 三、中華民國第四十四屆中小學科學展覽會參展作品專輯
國中組 物理科 「聲音現形記—瞧一瞧聲音的 Do Re Mi」 國立台灣科學教育館
- 四、中華民國第四十五屆中小學科學展覽會參展作品專輯
國小組 生活與應用科學科 「它真的看的見—利用雷射光偵測微小位移之研究」 國立台灣科學教育館

五、 聲聲入耳----音質的探討

http://www.ccs.hk.edu.tw/equipment/science_research/92_link/phy2.pdf

六、 高爾夫 1 號木桿頭打擊聲響品質之頻譜分析研究

<http://www.sportol.idv.tw/golfscience/pp26-39.pdf>

七、 音箱(Speaker)篇 -- 音質評測參數

http://www.haoyah.com/computer_net/hardware/speakers2.asp

八、 記錄自然聲韻—臺灣大學動物博物館典藏數位化計畫

http://www.ndap.org.tw/1_newsletter/content.php?uid=1089

九、 聲響設計

<http://web.hku.hk/~jkbchan/P/Articles/SoundDesign.htm>

十、 南 e 網—自然與生活科技線上教室

http://www.nani.com.tw/big5/node/2005-01/03/node_3440.htm

十一、 自然與生活科技第七冊教師手冊 南一書局 94.7 出版

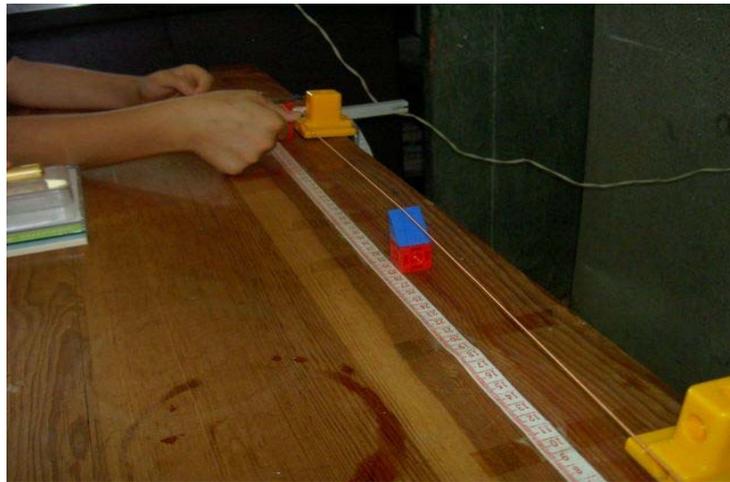
十二、 實驗過程相片



相片一、實驗裝置(弦及雷射筆裝置)



相片二、實驗裝置(太陽能板及電腦)



相片三、以手撥動弦(一)



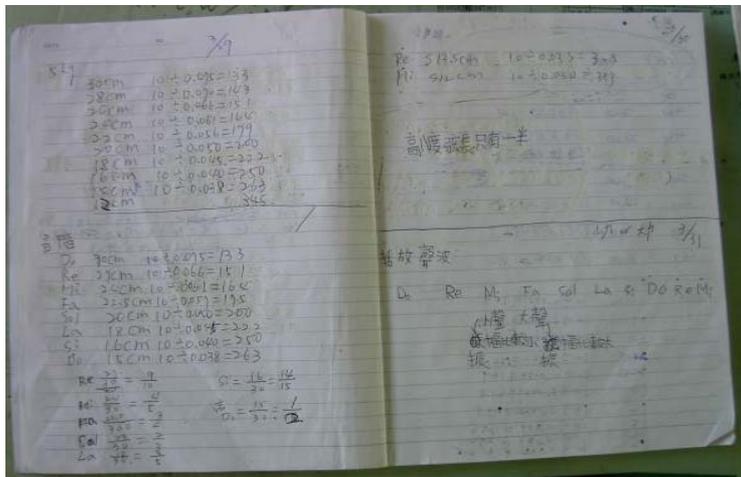
相片四、以手撥動弦(二)



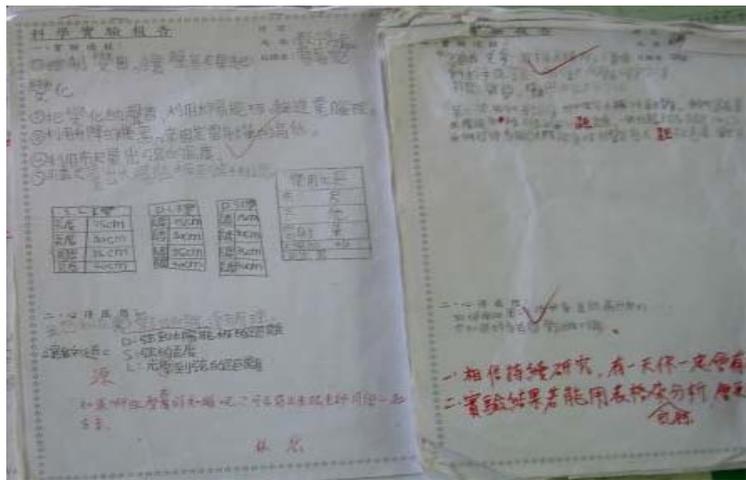
相片五、自製光學電子吉他圖



相片六、自製光學麥克風圖



相片七、實驗記錄簿圖



相片八、實驗報告圖

評 語

081518 弦機妙算

1. 能用雷射應用來解決測量問題，創意頗佳。
2. 用電腦來分析資料，科學方法不錯。
3. 表達能力不錯。
4. 實驗內容，步驟可再加強。