

用雷射光捕捉聲音的振動及研究

國中組物理科第一名

高雄市立壽山國民中學

作者：王智正、王蓋愷
楊士青、蔡欣龍

指導老師：邱俊義

一、研究動機

(一)在學校學習聲波時，做實驗只能聽見音叉的聲音，而看不見聲音的振動波形，而且在聲波的干涉現象提到：若兩相近頻率振動會出現干涉波的振幅呈週期性的變化，這就是所謂的節拍，經老師解說：這些聲音的波形可藉示波器將其轉變為電流訊號展現其波形，還是不懂（因示波器詳細結構我們無法深入了解）。

(二)試想若能將聲音的振動變成能可看見的光，那不是可以更讓我們容易了解聲波嗎？

二、研究目的

(一)設計實驗瞭解音叉的振動及研究。

(二)設計實驗瞭解干涉現象節拍的振動。

(三)設計實驗瞭解吉他弦樂器及鼓敲擊樂器的振動。

(四)設計實驗瞭解兩直交音叉的振動（二維振動）。

三、儀器設計及理由

(一)氦氖雷射光：為一束截面積很小的光源（使用黑色屏幕可以使雷射光源點看起來更小）直接射到振動體（如音叉、吉他弦……等）。

(二)X 軸掃描器（自行命名）

構造：為一多面鏡的圓柱形，接上馬達使其轉動，則可將上下

振動（即 y 軸）的雷射光點變成 x—y 軸，也就是振幅（y 軸）對時間（x 軸）的平振振動。

(三)捕捉音叉振動頻率及振動波形：（音叉須黏上一小鏡片）。

1. 此實驗全部採單眼照相機快門（ $1/30 \text{ sec}$ ， $1/60 \text{ sec}$ ， $1/125 \text{ sec}$ ， $1/250 \text{ sec}$ ）來捕捉，及使用高感度的照相底片攝取。
2. 校正快門的準確性：使用已知音叉頻率（ $f = 650 \text{ Hz}$ ）得振動波形（其過程操作手續如圖一）
3. 計算週期方法：先把攝取的振動波形放大，然後用浸過油脂的方格紙（成透明狀）蓋在方格紙上方，先求出每一小方格的時間，再算出一個波數的方格數目（使用放大鏡）
即 週期 = （快門秒數） \div （全部波數格數） \times （一個波數的方格數）

4. 得已知音叉振動波形：（如圖二、三、四略）

$$T_{\text{已知音叉}} = 1/125 \div 17.6 \times 3.4 = 1/647.1 \text{ (sec)}$$

$$f_{\text{已知音叉}} = 647.1 \text{ (Hz)} \dots\dots\dots \text{由圖二得}$$

$$T_{\text{已知音叉}} = 1/250 \div 10.2 \times 3.9 = 1/653.8 \text{ (sec)}$$

$$f_{\text{已知音叉}} = 653.8 \text{ (Hz)} \dots\dots\dots \text{由圖三得}$$

$$\text{所以已知音叉頻率爲 } (647.1 + 653.8) \div 2 = 650.45 \\ \cong 650 \text{ (Hz)} \text{ 誤差很小}$$

經以上實驗快門 $1/60 \text{ sec}$ 有誤差捨棄不用，快門 $1/30 \text{ sec}$ 捕捉的波數較接近邊緣部份較不明顯，所以僅作參考用，而快門 $1/125 \text{ sec}$ ， $1/250 \text{ sec}$ 捕捉的波數雖較少，但是很明顯誤差較小，所以振動頻率的計算實驗都以快門 $1/125 \text{ sec}$ 及 $1/250 \text{ sec}$ 為主。

四、實驗過程及結果

(一)實驗一：

1. 實驗目的：用自行設計的 x 軸掃瞄器及氦氖雷射光，觀察音叉的振動波形，如果可以並計算出頻率（f）。
2. 實驗設計及操作手續：

(1)裝置：如圖一。

(2)使用同一支音叉改變輸入外力只會影響振動的振幅大小經

快門 $1/125 \text{ sec}$

捕捉結果頻率相

同（因為捕捉到

波的數目相同）

但是聲音響度不

同（耳朵聽）圖

略。

(3)取 5 組音叉（編

號 1, 2, 3,

4, 5）：

說明：選用 1

, 2 號

音叉事先曾用共鳴箱校正共鳴後而採用。

3 號音叉乃音叉 1 號加上小鐵片改變頻率之音叉

。

4 號音叉乃音叉 2 號加上小鐵片改變頻率之音叉

。

裝置：為節省換音叉裝置時間，把音叉 1, 2, 5 號三

組用三個固定架夾好如圖八（圖略），再經 x 軸

掃瞄器掃到屏幕上依次敲擊音叉 1，得振動波形

，依序……（如圖九～廿三）圖略，※（計算音

叉頻率時，照相片放大如前已知音叉）。

(4)結果：振動波形如下（圖九～圖廿三）圖略。

$$T_1 = 1/125 \div 18.5 \times 5.5 = 1/420.5 \text{ (sec)},$$

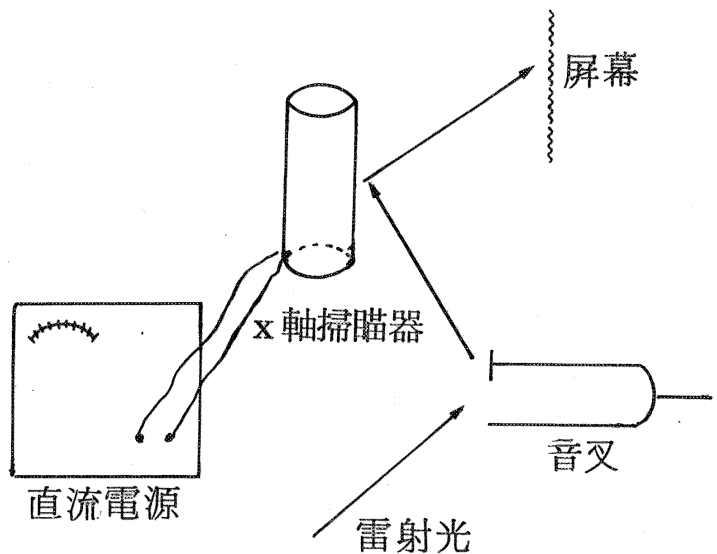
$$f_1 = 420.5 \text{ (HZ)} \dots\dots \text{由圖九得。}$$

$$T_2 = 1/250 \div 7.3 \times 4.3 = 1/422.4 \text{ (sec)},$$

$$f_2 = 422.4 \text{ (HZ)} \dots\dots \text{由圖十得。}$$

$$\text{所以音叉 1 頻率 } f = (420.5 + 424.4) \div 2$$

$$= 422 \text{ (HZ)}$$



(圖一)

$$T_2 = 1/125 \div 2.7 \times 8 = 1/421.8 \text{ (sec)},$$

$$f_2 = 421.8 \text{ (HZ)} \dots\dots \text{由圖十二得。}$$

$$T_2 = 1/250 \div 7.6 \times 4.5 = 1/422.2 \text{ (sec)},$$

$$f_2 = 422.2 \text{ (HZ)} \dots\dots \text{由圖十三得。}$$

所以音叉 2 頻率為 $(421.8 + 422.2) \div 2 = 422 \text{ (HZ)}$

$$T_3 = 1/125 \div 14.3 \times 4.3 = 1/415.6 \text{ (sec)},$$

$$f_3 = 415.6 \text{ (HZ)} \dots\dots \text{由圖十五得。}$$

$$T_3 = 1/250 \div 6.5 \times 3.9 = 1/416.7 \text{ (sec)},$$

$$f_3 = 416.7 \text{ (HZ)} \dots\dots \text{由圖十六得。}$$

所以音叉 3 頻率為 $(415.6 + 416.7) \div 2 = 416 \text{ (HZ)}$

$$T_4 = 1/125 \div 25 \times 7.5 = 1/416.6 \text{ (sec)},$$

$$f_4 = 416.6 \text{ (HZ)} \dots\dots \text{由圖十八得。}$$

$$T_4 = 1/250 \div 11.5 \times 6.9 = 1/416.7 \text{ (sec)},$$

$$f_4 = 416.7 \text{ (HZ)} \dots\dots \text{由圖十九得。}$$

所以音叉 4 頻率為 $(416.6 + 416.7) \div 2 = 417 \text{ (HZ)}$

$$T_5 = 1/125 \div 13.1 \times 4 = 1/409.3 \text{ (sec)},$$

$$f_5 = 409.3 \text{ (HZ)} \dots\dots \text{由圖廿一得。}$$

$$T_5 = 1/250 \div 9 \times 5.5 = 1/409 \text{ (sec)},$$

$$f_5 = 409 \text{ (HZ)} \dots\dots \text{由圖廿二得。}$$

所以音叉 5 頻率為 $(409.3 + 409) \div 2 = 409 \text{ (HZ)}$

3. 實驗討論：

ㄅ. 音叉的振動只有單一頻率的振動

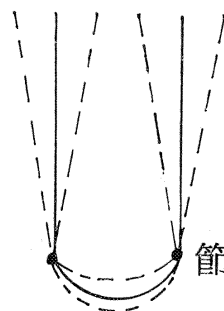
，振動波形簡單圓滑原理如圖右

。

ㄆ. 波數的捕捉經照片放大後由方格

紙顯示(以小方格為準)再求出

一個波數的時間(週期)。



(二) 實驗二：

1. 實驗目的：觀察聲波的干涉現象(節拍)。

2. 實驗設計及操作手續：

(1) 裝置：(如圖一)由上頻率顯示選用音叉 2 和音叉 3 為一組

，音叉 3 和音叉 5 爲一組，音叉 2 和音叉 5 爲一組。

(2)用雷射光照射音叉 2，再反射到音叉 3，再經 x 軸掃瞄器反射到屏幕。

(3)先敲擊音叉 2，瞬間再敲擊音叉 3，由於振幅的相重疊成作用得如(圖廿五~廿八)圖略。

(4)得“節拍”振動波形：圖略。

(ㄅ)音叉 2 + 音叉 3： $f_2 = 422$ (HZ) $f_3 = 416$ (HZ)

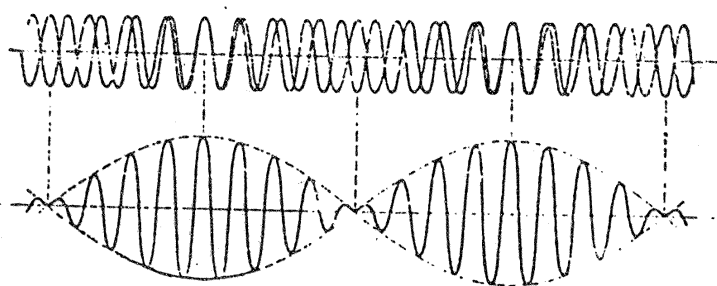
(ㄆ)音叉 3 + 音叉 5： $f_3 = 416$ (HZ) $f_5 = 409$ (HZ)

(5)三支音叉的干涉現象：同理瞬間敲擊音叉 2，音叉 3，音叉 5 得干涉波形。

(ㄅ)音叉 2 + 音叉 3 + 音叉 5：圖略。

3. 實驗討論：

(1)由以上實驗討論要有干涉現象“節拍”必須要相近頻率的兩音叉才可以獲得(音叉 2 和音叉 5 經



(干涉現象原理)參考圖

實驗也出現“拍”的干涉現象。

(2)音叉 1 和音叉 2 幾乎是同頻率，實驗結果沒有節拍出現。

(3)三支音叉 2，3，5 由實驗波形圖顯示也有節拍出現，但不一定如二聲波干涉的節拍明顯。

(4)此實驗須使用快門 $1/8$ sec， $1/15$ sec，來捕捉，方可得完整的振動波形。

(5)若我們設計的 x 軸掃瞄器轉動速度能調整且控制同步，我想要驗證每秒所產生的節拍數爲兩音叉頻率 $f_1 - f_2 =$ 拍數並不難。

(6)音叉要擺正，則產生的振動波形會比較圓滑。

三、實驗三：

1. 實驗目的：捕捉弦樂器吉他弦，敲擊樂器鼓膜之振動波形。

2. 實驗設計及操作手續：

(1) 裝置：在弦上黏小鏡片（或鼓膜），然後以雷射光照射其上，再反射到 x 軸掃瞄器至屏幕，依次依弦 1, 2, 3, 4。

(2) 得振動波形圖：（弦單位質量由粗至細，編號 1, 2, 3, 4）如下圖卅~圖卅六，圖略。

3. 實驗討論：

(1) 弦的振動組成除基本頻率外（基音），還有為基音頻率整數倍的泛音頻率（且不只一種）而構成一諧音系，若基音頻率為 f ，那第二泛音頻率則為 $2f$ ……餘類推，最後重疊合成如上實驗圖，呈週期性的複音振動波形。

(2) 此實驗因緊張弦的振動時間太短，照相機在捕捉振動波形確實不易，所以有時須多次的撥弄弦，以致振動波形由圖中顯示稍為零亂（如弦 4），但是還可以確認弦是呈週期性的複音波形。

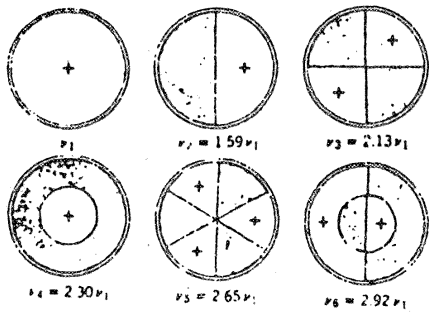
(3) 若能改良控制馬達轉速，使 x 軸掃瞄器更能穩定旋轉，或者達同步效果，將可以計算出弦的頻率和長度、張力及單位長度質量之關係。

(4) 膜的振動波形，因膜之周圍為固定必為波節（是線不是點）由理論顯示它也和緊張弦一樣有一基音頻率，在某瞬時膜某部份上升，另外某部份下降，而出現第一泛音頻率，第二泛音頻率……，唯一不同點，膜的振動頻率泛音不是頻率基因的整數倍，也就是膜振動並不是一個諧音系，但是膜振動也可以形成一呈週期性的振動波形（如圖卅四略）。

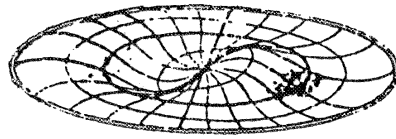
(5) 膜振動也是因為振動時間太短不易捕捉，所以也必須多次的敲擊（在膜中心點處），所以振動波形捕捉後稍為零亂，但由屏幕因視覺暫留關係可以確認膜振動確實呈週期性變化。

(6) 由（圖卅六）顯示，若敲擊不良則形成不規則零亂，形成噪音（其他樂器也是一樣。）圖略

(a:)



(b:)



(參考資料)

(膜振動模式圖)

(四)實驗四：

1. 實驗目的：設計實驗瞭解兩音叉成直交時振動之振動波形（二維振動）

2. 實驗過程及操作手續：

(1) 裝置：取音叉 1 和音叉 2 ($f_1 = 422 \text{ Hz}$, $f_2 = 422 \text{ Hz}$ 同頻率) 置音叉 1 為 y 軸振動，音叉 2 為 x 軸振動。

(2) 同時敲擊音叉 1 和音叉 2 得振動波形（如圖卅七～圖四六略）。

(3) 改置音叉 1 和已知音叉 ($f_1 = 422 \text{ Hz}$, $f_{\text{已知}} = 650 \text{ Hz}$ 不同頻率)。手續如前，得振動波形（如圖四七～圖四九）圖略。

(ㄅ) 音叉 1 + 音叉 2 (同頻率) 振幅不同：圖略

(ㄆ) 音叉 1 + 已知音叉 (不同頻率)：圖略

原理：設兩音叉同頻率，則在 x 方向和 y 方向之振動可表示為 $x = A \sin \omega t$ 及 $y = B \sin (\omega t + \delta)$ (δ 為 x, y 座標之相位差)，振幅 A 不一定等於振幅 B，故振動限制於 $x = \pm A$ 與 $y = \pm B$ 直線範圍內。

選取特殊值 δ 來討論

(ㄅ) 同相時， $\delta = 0$ ， $y = B \sin \omega t$ ，得 $y = B/A x$ (為直線振動)

(ㄆ) 異相時， $\delta = \pi$ ， $y = -B \sin \omega t$ ，得 $y = -B/A x$

x (爲直線振動)

(Γ) $\delta = \pi/2$ 時， $y = B \cos wt$ ，得 $x^2/A^2 + y^2/B^2 = 1$ (爲橢圓)

(C) $\delta = 3\pi/2$ 時， $y = -B \cos wt$ ，得 $x^2/A^2 + y^2/B^2 = 1$ (爲橢圓)

若振幅 $A =$ 振幅 B 時，該爲圓振動。

3. 實驗結果及討論：

(1) 直交兩振動音叉剛好同相或異相即 $\delta = 0$ 或 π 時，干涉的結果造成如圖四十四和圖四六(圖略)，形成直線諧和振動。

(2) 當相位差或 $\pi/2$ 時，干涉結果如圖卅七(圖略)成一橢圓振動($A \neq B$)，且兩主軸在兩座標上，且運動方向由圖顯示出爲順時針，若 $\delta = 3\pi/2$ 時，干涉結果也爲一橢圓振動如圖四三(略)。

(3) 若振幅 $A = B$ 時，且 $\delta = \pi/2$ 或 $3\pi/2$ 時，該爲一圓振動(如圖五十，圖五一略)。

(4) 當 x 和 y 相位差，不剛好上述幾個特殊值，也是一個橢圓振動，且橢圓形狀和軸的偏向應該決定於 B/A 比值和 x ， y 的相位差，如圖卅八、卅九、四一、四二、四四、四五(圖略)，且 $0 < \delta < \pi$ 時振動應該是順時針，反之 $\pi < \delta < 2\pi$ 振動應該是逆時針。

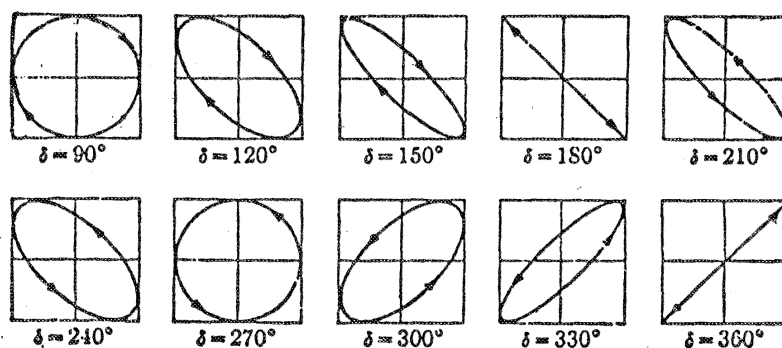
(5) 由圖顯示所得的直線和圓振動應該都是橢圓振動的極限結果。

(6) 若兩不同頻率音叉交振動，由圖四七、四八、四九顯示較爲複雜，因音叉頻率不同，振動較密，雷射光線與光線之間幾乎重合在一起，若加大振幅或加長屏幕之距離，效果會較好(顯示出波形較密集)，經老師解說較爲複雜故放棄研究。

五、結 論

- (一)由實驗一經由雷射光透過 x 軸掃瞄器，直接可以看見音叉的振動是個單一頻率圓滑的波形。
- (二)由實驗二經由雷射光掃瞄，直接可以看見兩相近頻率音叉振動的干涉現象“節拍”。
- (三)由實驗三經由雷射光掃瞄，直接可以看見弦振動（吉他弦）、膜振動（鼓）的振動波形，進而瞭解基音加泛音合成複音波形。
- (四)兩直交同頻率的音叉振動，經由雷射光捕捉，經老師原理解說指導，讓我們瞭解二維振動的干涉結果（且為週期振動），可惜我們數學基礎（三角函數）還不夠，但是我們能藉雷射光的捕捉輕而易舉的得到振動波形。不然的話聽老師說：要產生此類型振動，可由示波器為之，讓器內電子被二相互垂直之電場彎曲，電場以相同頻率作正弦函數交互變換其相位及振幅均能變換，此種方法可使電子在螢光幕上刻出各種不同波動圖案，如參考圖：

(參考資料圖)



各個相位差下，合位移的軌跡為旋轉性

- (五)設計生動，具有聲光效果，惟 x 軸掃瞄器轉盤不穩，造成很多困擾，以致以上實驗都在低轉速狀況下完成捕捉，今後再力求改進，進一步探討。

六、參考資料

- (一)國中物理課本。
- (二)基本物理學（中譯本）HALLIDAY & RESNICK。

評 語

利用雷射光的聚束性，重複反射的放大性及旋轉鏡對光線的水平掃瞄，顯示音叉振動及波的干涉等現象。操作精細、思慮周全。