

利用轉動的鏡子測聲音頻率的探討

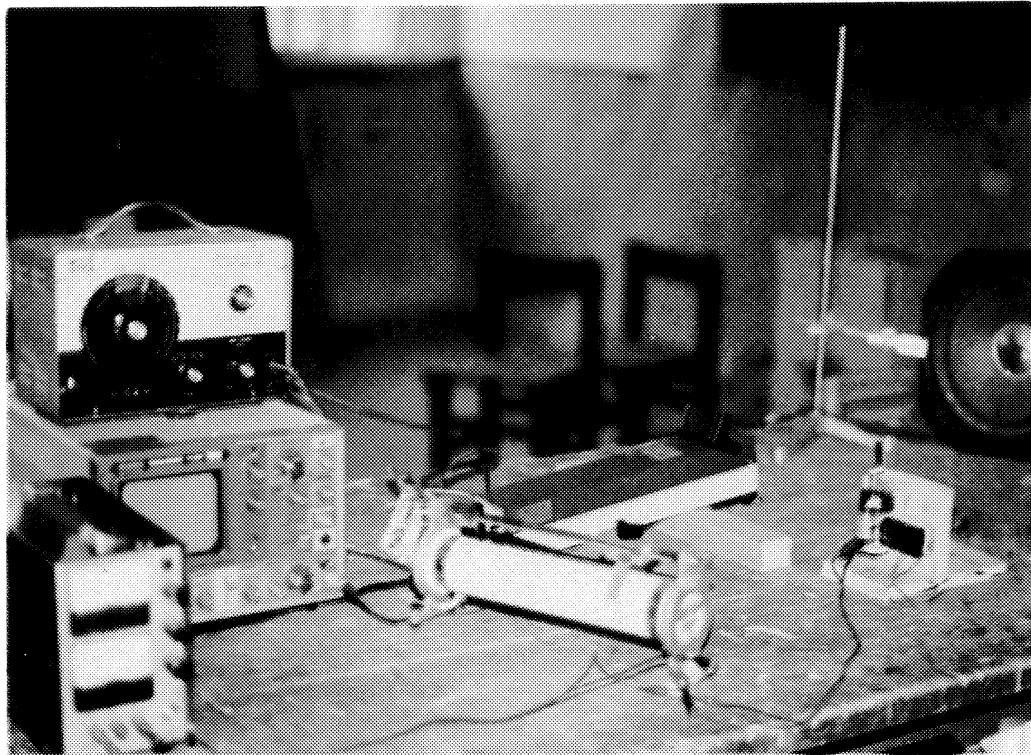
國中組物理科第一名

國立臺灣師範大學附屬高級中學

作者：柯政全·徐中宜

崔鴻聲·浦建東

指導教師：羅素貞



一、研究動機

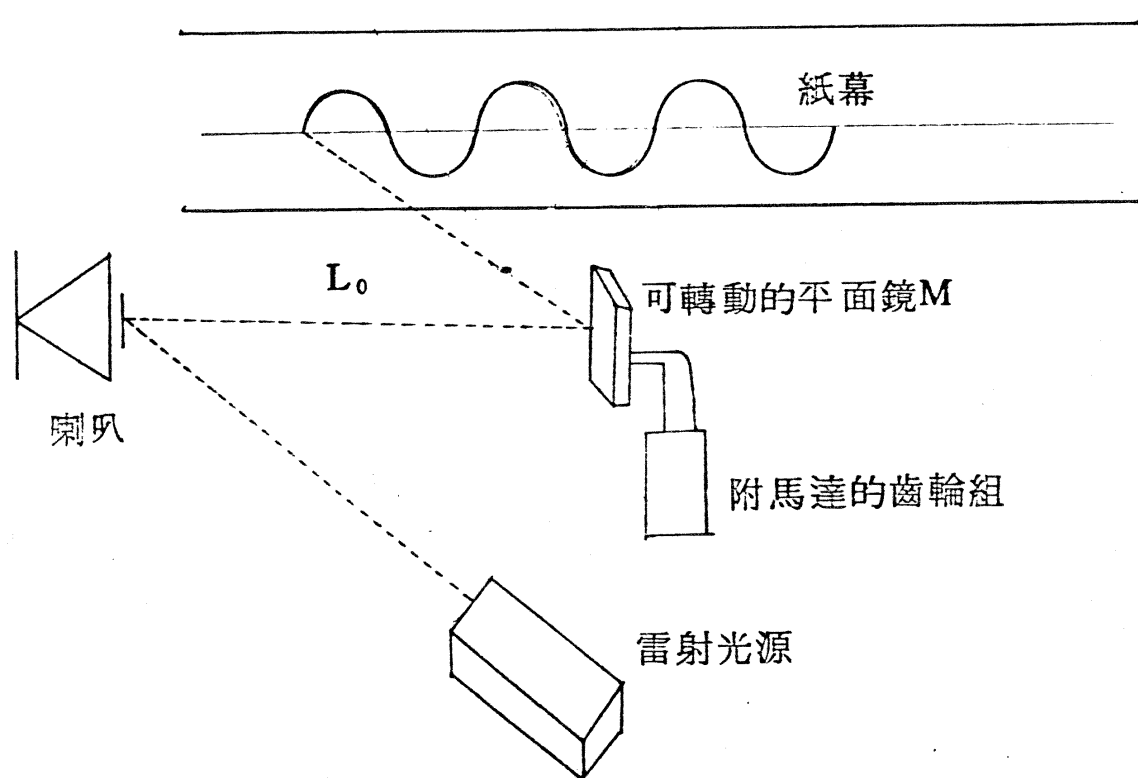
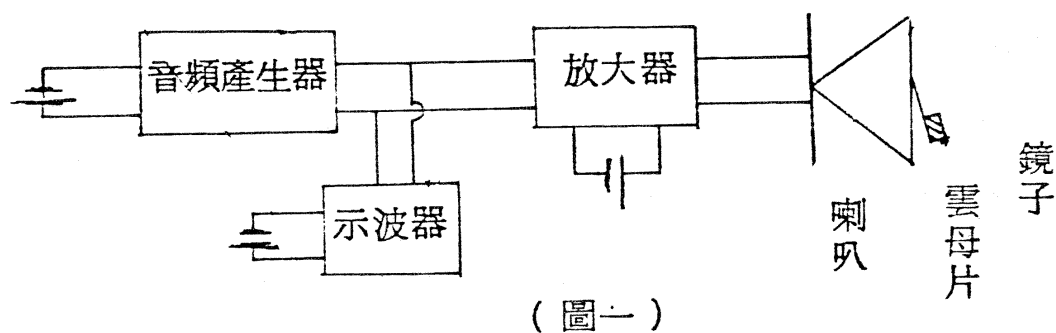
在一次的聯課活動中(自然科學社)，在物理實驗室後面的櫥櫃中放有許多音叉，有少數同學敲著音叉，浸入水中濺起水花，當時很多同學覺得新奇，紛紛問老師有關聲音的原理，其中我們印象最深刻的是：(一)、聲音的產生是由於物體的振動，(二)、聲音的高低是決定於振動頻率，像男人聲音低是聲帶振動頻率小，女人聲音較高是聲帶振動頻率較大，那時利用喇叭及示波器示範，當喇叭的聲音高時，示波

器上出現的頻率也較大，但是我們仍不了解示波器如何顯示波形再測頻率的道理，於是我們幾個同學利用圖書館時間查書、討論，看看有沒有其他更簡明的方法，測出聲音頻率，同時找課餘時間，試著做這個實驗。

二、研究目的

光線先投射到振動的喇叭上，反射後投到一轉動的鏡子上再反射到一紙幕上看聲音的波形並測頻率。

三、裝置



四、原 理

(一)因聲音由振動而生，故喇叭上反射出來的光是振動的，再反射至轉動的鏡子，最後光線投射至布幕時呈現波形。

(二)喇叭上的雲母片若每秒振動 f 次（這也是聲源的頻率），則由於平面鏡 M 的轉動在紙幕上每秒出現 f 個波形，所以可利用平面鏡 M 的轉速求 f 。

1 若兩個波形的範圍，反射光移動角度 θ ，則平面鏡 M 轉動的角度為 $A = \theta / 2$ 。

證明：（見圖三）

L_0 : λ 射光線

L_1 : 鏡子未轉動時反射光線

N_1 : 鏡子未轉動時鏡面法線

L_2 : 鏡子轉動後反射光線

N_2 : 鏡子轉動後鏡面法線

由反射定律 $\theta_1 = \theta_2 \dots \dots \dots (1)$

$\theta_3 = \theta_4 \dots \dots \dots (2)$

因為鏡面轉動角度 A 時，法線也轉動角度 A

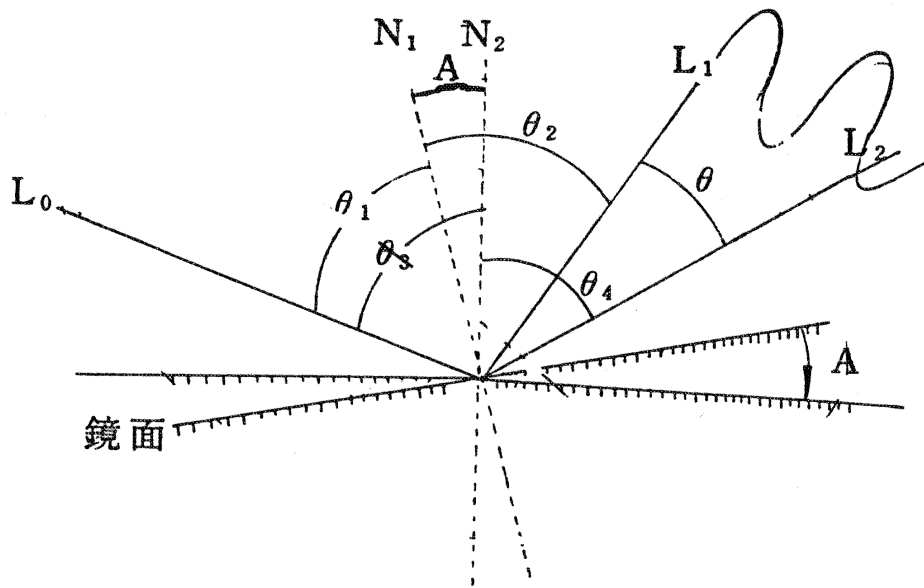
所以 $\theta_3 = \theta_1 + A$ (見圖) $\dots \dots \dots (3)$

由圖 $\theta_3 + \theta_4 = \theta_1 + \theta_2 + \theta$

(1), (2) 代入得 $2\theta_3 = 2\theta_1 + \theta$,

(3) 代入上式得 $2(\theta_1 + A) = 2\theta_1 + \theta$

$\therefore A = \theta / 2$



(圖三)

2. 若平面鏡每轉動 1 圈須時 t_1 秒，則轉動 A 角度須時 t 為

$$t = t_1 \times \frac{A}{360} = t_1 \times \frac{\theta/2}{360} = t_1 \times \frac{\theta}{720}$$

又因為在此時間內 (t 秒)，紙幕上出現 2 個波形 (見 1)

所以
$$t = \frac{2}{t} = \frac{2 \times 720}{t_1 \times \theta}$$

(三) 平面鏡轉 1 圈所須時間 t_1 的測定：

1. 利用變速齒輪組，讓平面鏡快速且穩定的旋轉，但我們可目測低速轉動齒輪之轉速。
2. 有五個齒輪，A 齒輪固定在馬達的轉軸上，D 齒輪固定在 P 軸上，同時平面鏡固定在此軸上，E 齒輪固定在 Q 軸上，同時此軸貼有一個可數轉速的紙片。
3. 當馬達轉動時，A 齒輪帶動 B 齒輪，B 齒輪帶動 C 齒輪，C 齒輪帶動 D 齒輪 (轉速與平面鏡相同) D 齒輪帶動 E 齒輪 (轉速與紙片相同)。

4. 只有 A 齒輪為單齒，齒數為 n_A 其餘四個齒輪均為雙齒，大輪齒數分別為 n_{B1} ， n_{C1} ， n_{D1} ， n_{E1} ，小輪齒數分別為 n_{B2} ， n_{C2} ， n_{D2} ， n_{E2} ，當 A 齒輪與 B 之大輪嚙合時。

$$\frac{n_A}{t_A} = \frac{n_{B1}}{t_B}$$

則 $t_A = \frac{n_A}{n_{B1}} \times t_B$

$\therefore n_A < n_{B1}$

t_A : A 齒輪轉一圈
所須時間

$\therefore t_A < t_B$ t_B : B 齒輪轉一圈所須時間
因此以小齒輪帶動大齒輪時轉速變慢。

5. 同理：

$$\frac{n_{B2}}{t_B} = \frac{n_{C1}}{t_C} \quad t_C : C \text{ 齒輪轉一圈所須時間}$$

則 $t_B = \frac{n_{B2}}{n_{C1}} \times t_C$ $\therefore n_{B2} < n_{C1} \quad \therefore t_B < t_C$

$$\frac{n_{C2}}{t_C} = \frac{n_{D1}}{t_D} \quad t_D : D \text{ 齒輪轉一圈所須時間}$$

則 $t_C = \frac{n_{C2}}{n_{D1}} \times t_D$ $\therefore n_{C2} < n_{D1} \quad \therefore t_C < t_D$

$$\frac{n_{D2}}{t_D} = \frac{n_{E1}}{t_E} \quad t_E : E \text{ 齒輪轉一圈所須時間}$$

$$\text{則 } t_D = \frac{n_{D2}}{n_{E1}} \times t_E \quad \because n_{D2} < n_{E1} \quad \therefore t_D < t_E$$

從以上分析可知 t_E 最大，也就是 E 齒輪轉速最慢。

當 t_E 可利用紙片目測轉速時， t_D ， t_C ， t_B ， t_A 就可換算出來。

6. 當平面鏡固定在 P 軸上時 $t_1 = t_D$ ，若平面鏡固定在馬達的轉軸上時 $t_1 = t_A$ ，當平面鏡固定在 Q 軸上時 $t_1 = t_E$ ，視波形穩定狀況安裝平面鏡的位置。

(四) θ 值的測定：

方法(一)：

當幕上出現明顯的波形時，微微的移動可變電阻，使得波峰固定的出現在同一位置，由於視覺暫留，會覺得波形很穩定，那麼在幕上直接記下兩個波形的範圍，用直尺及量角器測量 θ 。

方法(二)：

當出現的波形不十分穩定時，在紙幕上先用色筆畫好刻度及編號，且定好旋轉鏡子與紙幕間之位置，最後照相，將相片放大後，看兩個波形範圍的刻度，再用紙幕、直尺、量角器測量 θ 。

五、實驗步驟

- (一) 在雲母片 (1 cm × 3 cm) 的一端貼上小鏡片 (4mm × 5mm)，另一端貼在喇叭上的中央位置。
- (二) 將音頻產生器、放大器、示波器、喇叭的線路連接如 (圖一) 並使雷射光源射出的光線對準(1)中之小鏡片，並調整高度使反射出來的光線 L_0 ，大約是水平的。
- (三) 裝配一齒輪組最初以馬達帶動，後面均以小齒輪帶動大齒輪。
- (四) 在齒輪 D 的軸上固定一螺絲並夾緊一平面鏡 (1 cm × 3 cm) 並在齒輪 E 的軸上，貼上一個有記號的紙片以便數轉速。
- (五) 以低壓可變電源及可變電阻將馬達線路接通。並調整齒輪組至適當位置，使光線 L 。正好射至平面鏡 M 的中央。
- (六) 調整可變電阻至 E 齒輪的轉速，使我們的眼睛可數為止，測轉

100 圈所須時間 t_3 ，則每轉 1 圈須時 $t_E = \frac{t_3}{100}$ 。

(七) 數 D 小齒輪齒數 n_{D2} 及 E 上大輪齒數 n_{E1} 。

則 D 齒輪轉一圈的時間 t_D 為 (這也是平面鏡 M 的軸轉 1 圈所

須時間) $t_D = \frac{n_{D2}}{n_{E1}} \times t_E$ 。

(八) 在離平面鏡 M 約一米處置一紙幕，使經過 M 反射的光線能在幕上出現清楚的波形 (見圖二)。

(九) 調整音頻產生器上的頻率至幕上波形最穩定 (波峰或波谷都出現在同一位置) 時，測量兩個波形的範圍至 M 的夾角 θ (見圖三)。

(十) 調整示波器至波形穩定時，記錄 Sweep time t_s (sec/cm) 及兩個波的寬度 d (cm)，則示波器上顯示的頻率 f_s 為

$$f_s = \frac{1}{d/2 \times t_s} = \frac{2}{d \times t_s} \quad (\text{次/秒})。$$

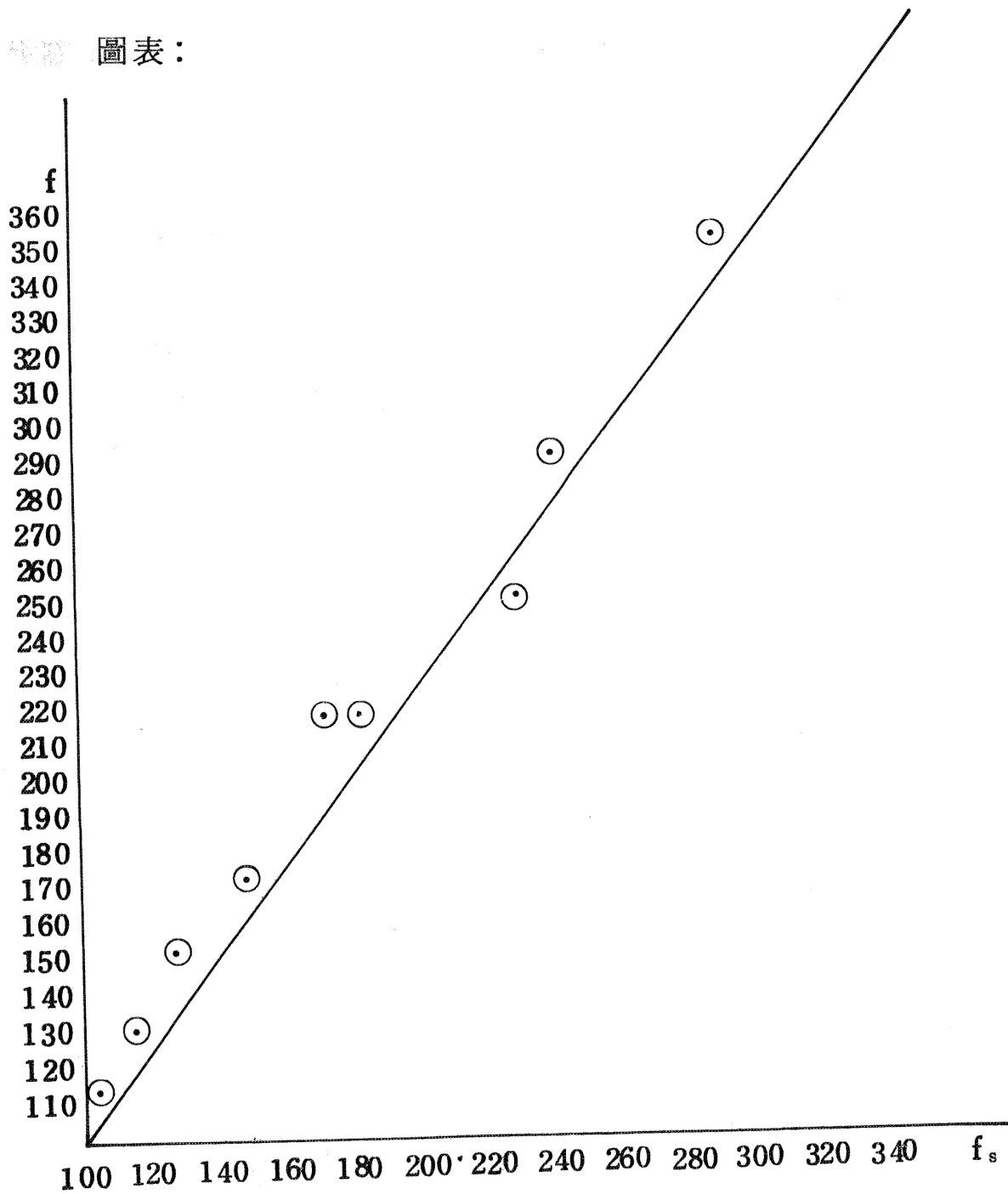
(十一) 記錄 t_3 ， n_{D2} ， n_{E1} ， θ ， d ， t_s ，求出 f 及 f_s 。

(十二) 改變可變電阻，重覆 (6) 至 (11) 的步驟，並用方格紙繪圖，而且平均誤差。

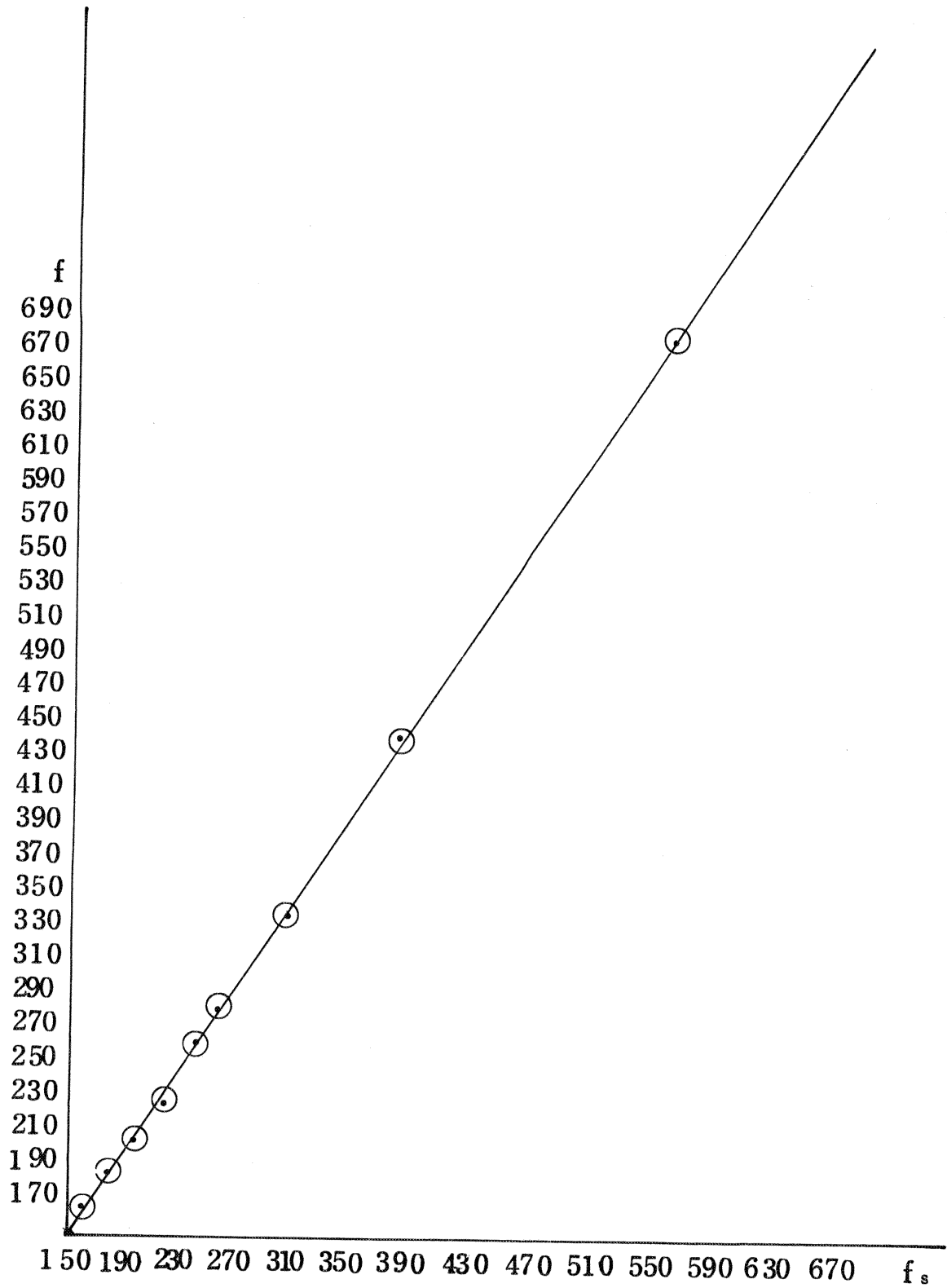
六、結果

(-) 平面鏡固定在 θ 軸上時，即 $t_1 = t_E = t_3 / 100$

圖表：



(二) 平面鏡固定在 P 軸上時， $n_{E1} = 24$ ， $n_{D2} = 10$ ， $\therefore t_D = \frac{t_E}{2.4}$
 圖表：



㊦結果：

1. 圖中的對角線代表準確值，所標的點代表實驗值，由圖可知實驗值分佈在準確值的兩側，表示精確度高。
2. 高頻時較低頻時準確，原因是高頻時馬達轉速較大(t_s 較小)較穩之故，準確度高，所以馬達是否能穩定轉動，是這個實驗能否準確的關鍵所在。

七、討 論

㊦一開始時，我們將小鏡片直接貼在喇叭上，但紙幕上出現的波形振幅極小，不易觀察，幾經思考加上雲母片後，振幅顯著增加。但後段實驗由於雲母片容易剝落，喇叭振動一次時，薄又軟的雲母片就振動好多次，這時紙幕上出現的波形，往往上下端為鋸齒狀，不易確定波長，所以使用厚又堅硬的雲母片，波形畫一又容易觀察。

㊦剛開始時，我們以 100 W 燈泡及透鏡聚光當光源，但發現光線很弱，必須在暗室作。而且光線在短距離內很快減弱，剛好高中部有雷射光源，光線強又射得遠，可以克服前面兩個缺點。

㊦每次實驗之初，先作兩項準備工作：

1. 接通喇叭線路，但不要讓平面鏡轉，只令光線 L。對準平面鏡 M，則紙幕上應出現約 5 公分長的縱線，否則就應調整喇叭的放大器或齒輪組的高低或紙幕與 M 的距離，甚至雲母片的方向。
2. 讓平面鏡旋轉，但喇叭不要振動，則 λ 射光經 M 反射後在紙幕上應呈現一水平線，否則就應調整齒輪組的方向。

㊦當我們在紙幕上見到波形時，已知掃出一個波的時間相當短暫，但帶動平面鏡的馬達轉速又那麼快，無法目測，如何測掃出一個波形所須的時間，曾困擾我們一段時間，後來羅老師給我們兩點提示：(1)短時間的測量像測光速可以查 PSSC 物理，(2)馬達轉的雖快，但總可想辦法轉換至慢速而且可數，對前者，

麥克爾遜的光速測定中，利用八面鏡迴轉測短時間給我們很大啟示。對後者，剛上完的第一冊物理提到齒輪組有轉換速率的功用，給我們很意外的幫助。

- (五)測低頻率聲音時 ($f = 150$ 1/秒左右)，平面鏡轉速要慢一些，而在寬一米的紙幕上，才能出現約 2 個波形，(若轉太快，幕寬不到一個波長的話，無法測 θ)，但若直接把平面鏡安裝在馬達軸上，低速轉動的馬達，轉速時快時慢非常不穩，所以我們用變速齒輪組，讓馬達快速平穩的轉動，而把平面鏡安裝在較慢且可數轉速的齒輪軸上。
- (六)測高頻率聲音 ($f = 400$ 1 / 秒以上)時，平面鏡轉速要大些，在紙幕上的波形才不會太密，減少所測 θ 值的誤差，但這時肉眼數不出平面鏡的轉速，所以將平面鏡安裝在快速轉動的齒輪軸上，在慢速轉動的齒輪上貼一紙片便計轉速，再換算出平面鏡轉速。(見原理(一)之 5 和 6)
- (七)利用示波器的原因是，頻率產生器上頻率的刻度不夠精細，而示波器上 Sweep time 到達 10^{-3} 秒 / 厘米，所以 f 準確度可達到 0.1 1/sec 以上。
- (八)得到穩定的波形是我們一直想達到的目標，但卻困難重重，最大的原因有二：1 馬達旋轉不夠穩定，這一點我們從兩方面改進：一是盡量用精製的馬達，二是馬達的電源之電壓盡量穩定而且取適用電壓的中間值，如適用電壓在 0 ~ 1.5 V 之間，我們常用 0.8 V 左右。2 齒輪組中各齒輪不勻稱或各小齒大小不一所致，我們也一一檢查，最後仍不十分穩定，但測量上已不成問題。
- (九)本實驗 θ 值的測量先用方法(一)，得到前述兩組數據，由於很難調至穩定的波形，所以再用方法(二)測 θ 值，當平面鏡轉速慢時，相機容易捕捉到幕上波形，效果很好。但是如果鏡子轉得快時，波形在幕上出現時間太短，相機不易捕捉到幕上波形，只好請教老師裝配一自動快門的電路圖。令光線過光敏電阻時，

照相機快門被按下，隨即波形出現於紙幕上，正好被相機捕捉到。

(+)自動快門當光敏電阻接受光線時，電路 I 成通路，使 k 被線圈吸引，致電路 II 成斷路，所以鐵塊掉落按到快門，這一部分的裝配，我們覺得很有趣，目前仍繼續在進行，到時對 θ 值的精確測量一定有不少幫忙。

八、參考文獻

1. 國中物理（第一冊）p. 86 國立編譯館 主編
2. 國中物理（第三冊）p.112 國立編譯館 主編
3. 國中物理（第四冊）p. 75 國立編譯館 主編
4. PSSC 物理學全譯本（上册）p. 408
吳友仁 編譯 東華書局印行
5. 那惠實用物理（第五冊）p. 92
黃振麟 譯 徐氏基金會出版
6. 實用測量學 p.25,p.23 嚴炳英 著 環球書局出版
7. 電動機 p.7-14,p.7-61 朱堯倫 譯 徐氏基金會出版
8. 工專物理 p.186 作統：John E. Betts.

評語

1. 以反射鏡將聲源的振動變成可見的橫波，雖然並不是新的想法，但此作品却能以標準的振動頻率聲源來校正，對測示工具的可用性及準確性加以研究分析。
2. 本作品在分析上仔細。
3. 能由課內、外所學之知識予以統整並有效應用。
4. 最後加上繼電器，其功能可疑。