

# 聲波的干涉與繞射

## 國中組教師物理第一名

台北市南門國民中學

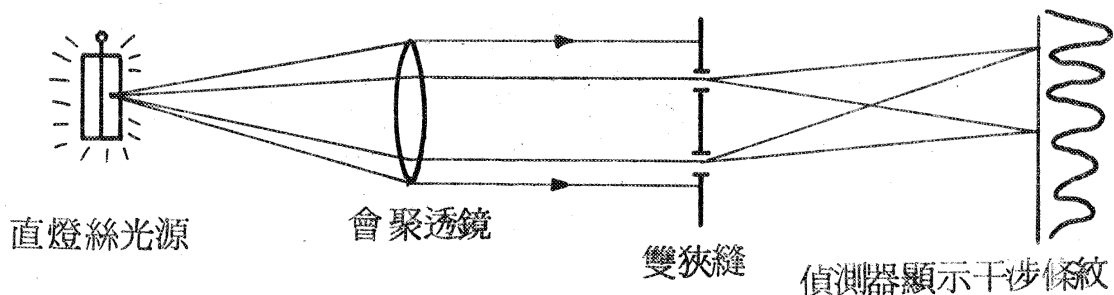
作者：賴晚鐘

### 一、前言

波動現象是所有物理現象中最為奇妙與可愛的一種，在一般的實驗中，如水波槽實驗，楊氏雙狹縫實驗，……等。我們可以很清楚地看見“橫波”的干涉或繞射現象；我們可曾見過縱波（聲波即是縱波）所具有之波動現象？似乎很少聽過能證明縱波亦具有所有光波之波動性質（偏極化特性為例外）的實驗，這引起我很濃厚的興趣，便設法找一方式能證明縱波亦具所與光波相同之波動性質。下面是悉心研究之結果，在此願拋磚引玉，供大家參考，希望有興趣的人士能夠加以改進創造，做出更完美的實驗以驗證縱波（聲波）之波動性質。

### 二、設計與製造過程：

由於聲波波動性質的實驗裝置與光波實驗者完全相似，所以參考光波實驗所需器材，很快的就可以決定出此實驗中所需要的一切，以楊氏雙狹縫干涉實驗為例（見圖 1）我們可以對應找出聲波雙狹縫干涉實驗之裝置。



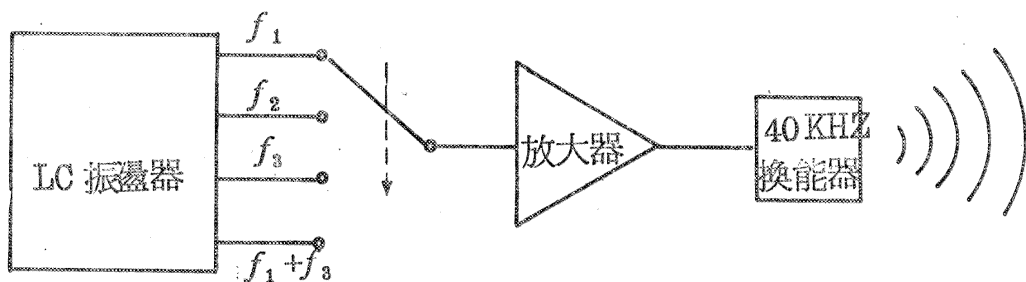
〔圖一〕楊氏雙狹縫實驗

由圖一我們知道，首先需要一直線狀波源，一聲波會聚裝置（可由此產生平面波），雙狹縫，與一套偵測設備，（在光波實驗中此偵測器常是用眼睛代之）。

根據物理上之理論推算得知，欲得明顯的干涉現象，必須要在雙狹縫之間的距離  $d$  約等於波長之數量級時，才能顯示出光之波動性質來，依據同樣的推算我們得知，聲波的波長  $\lambda$  在  $17\text{ m} \sim 17\text{ cm}$  之間，（可聽範圍  $20\text{ Hz} \sim 20\text{ KHz}$  ），由此判斷將需要很大的一個會聚裝置，與很大之屏蔽以保證是一個良好的雙狹縫（對聲波而言），而波源與偵測器則可由喇叭與麥克風來做成。這是一個可行的方式，但接着問題來了，我們的工作環境無時無刻不是充滿着或多或少之雜音，將會嚴重干擾了實驗結果的正確性，不過有一解決之道便是加強波源以壓抑背景雜音之干擾，但我們將會發現，我們的耳朵實在消受不起！這是個很嚴重的問題。

很幸運地，人類耳朵的巧妙構造使我們不致受到  $20\text{ Hz}$  以下及  $20\text{ KHz}$  以上之聲波的干擾，這使得實驗轉向超音聲頻方向進展，超聲波有適中的波長（指在空氣中之超聲波），可使裝置體積大大縮小，那將是很理想的。終於在電子零件找到了  $40\text{ KHz}$  超聲波換能器（Transducer）可兼發射或接收之用，其室溫時的波長為  $0.85\text{ cm}$  很適於此實驗之條件，不發出噪音，不受其他頻率聲波之影響，是很理想之單相波源（monochromatic source）。

首先我參考電子學有關書籍設計出發射器，及接收器其工作方塊圖參考圖 2 和圖 3。



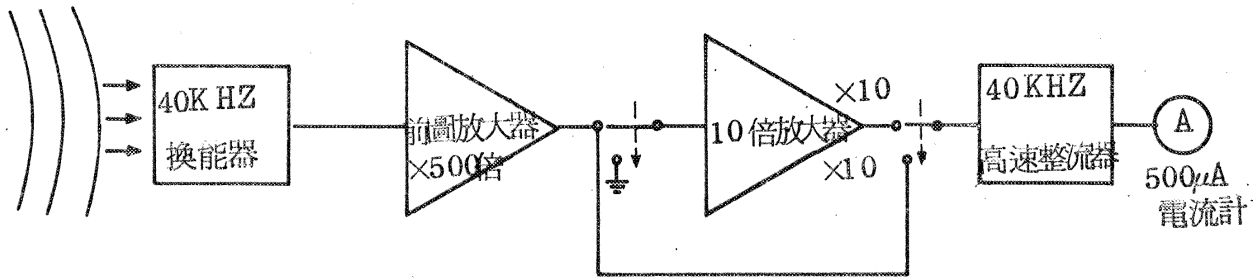
〔圖二〕  $40\text{ KHz}$  超聲波發射器工作方塊圖其中

$$f_1 = 39.5\text{ KHz} \quad \lambda_1 = 0.861\text{ cm} \quad (\text{在 } 15^\circ\text{C} \text{ 時})$$

$$f_2 = 40.0\text{ KHz} \quad \lambda_2 = 0.850\text{ cm} \quad (\text{在 } 15^\circ\text{C} \text{ 時})$$

$$f_3 = 40.5 \text{ KHZ}$$

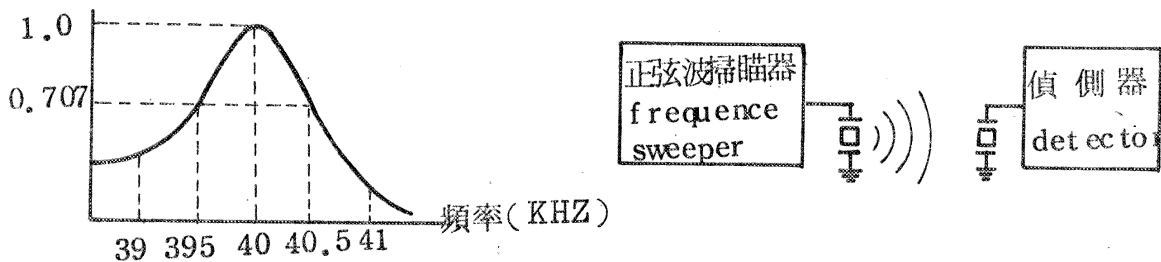
$$\lambda_3 = 0.840 \text{ cm} \quad (\text{在 } 15^\circ \text{C 時})$$



〔圖三〕 40 KHZ 超聲波偵測器工作方塊圖

指針之相對強度 (以 40 KHZ 時之指示為 100%)

指針之相對強度以 40 KHZ 時之指示為 100%



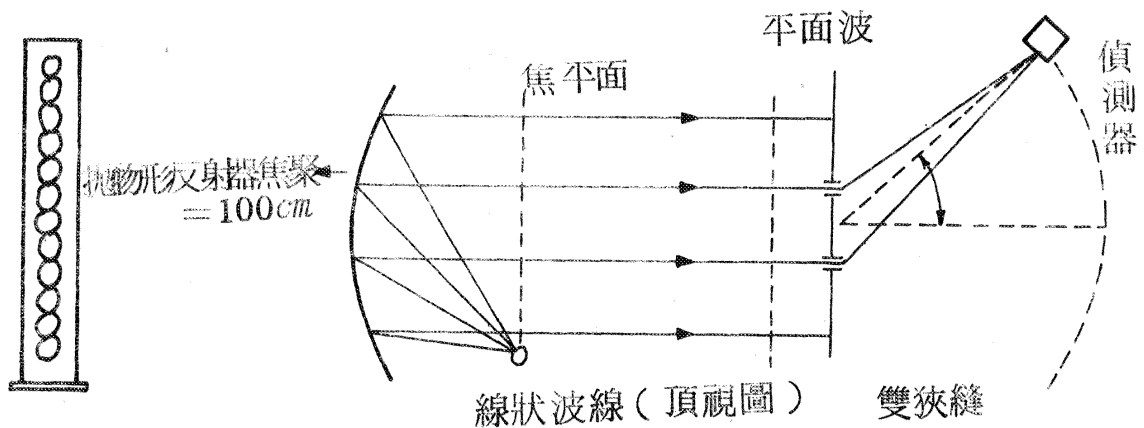
〔圖四〕 發射器和接收器系統頻率響應圖

發射器，接收器完成後，經測量其頻率響應知，在 40 KHZ 處最為靈敏，在 39.5 KHZ 和 40.5 KHZ 處，偵測器之有效指示下降為 40 KHZ 時的 70%，見圖 4，故知此 40 KHZ 換能器，對於  $f_1 = 39.5 \text{ KHZ}$  和  $f_3 = 40.5 \text{ KHZ}$  之發射和接收效率尚稱良好，可以配合下文中繞射柵實驗之用。

由於發射器所發出之波是球面波，而實驗中要求平面波，故必須利用拋物面鏡或聲透鏡來達成之，經測量試驗，結果發現對 40 KHZ 聲波而言密度甚低（如保麗龍板），或質量甚小（如單光紙一張）都是良好的反射物體，其反射率皆在 80% 以上，而透射量一般只有 5%~10% 左右，故唯一可行的方式是採用拋物面鏡，配合線狀波源即可產生實驗所需之平面波，見圖 5，另外並利用鋁板製成雙狹縫和多狹縫實驗所需之隔板數塊，並以五夾板為基座使得操作便捷迅速，非常方便。其規格見圖六，配合這些

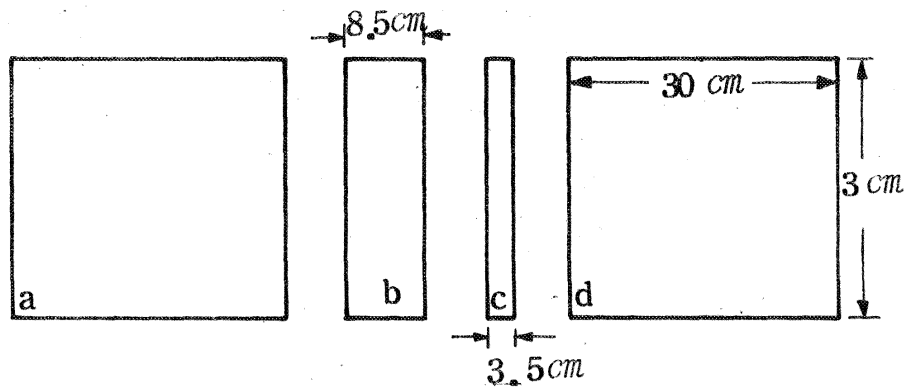
東西我們即可輕易做出聲波的雙狹縫和多狹縫的干涉現象。

除了上述之外，我又想到要如何模擬光經過光柵時之繞射現象呢？依據理論之推算，我們需要寬  $1\text{ cm}$  長  $30\text{ cm}$  的柵 40 條以上，由於鋁板精確切割不是，最後決定採用  $2\text{ mm}$  厚的壓克力板製成 45 條寬  $1\text{ cm}$  長  $30\text{ cm}$  之柵條以便裝作聲波繞射柵，由於凹光柵不須用到透鏡，故設計時採凹光柵模型，將柵條安置在一拋物形線上，如此省去了兩個拋物形會聚裝置，見圖七。

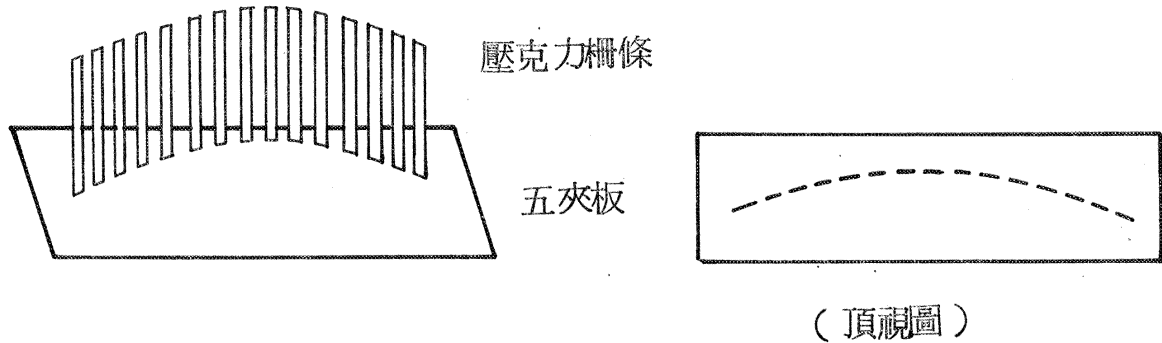


12 個 40 KHZ 換能器並列形成線狀波源 (側視圖)

[圖五] 平面波產生法注意圖中，12 個換能器彼此同相位操作

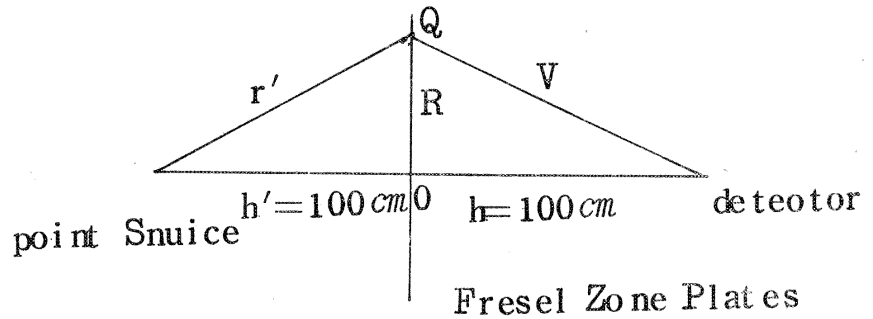
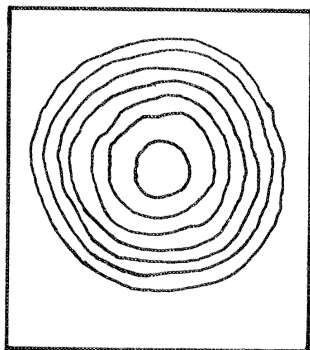


[圖六] 多狹縫鋁板規格，其中 a 與 d 相同，b 有一塊，c 有 4 塊



[圖七] 凹光柵模型 (繞射聲柵)

在其他許多有趣的繞射現象中，以 Fresnel Zone Plate 的繞射現象最易了解而且易於觀察，故如圖八，以透明壓克力板做成了 Fresnel Zone Plate 中最初的七個圓環，其中  $R_n = \sqrt{n\lambda L}$  見圖八，以上即是所有器材設計製作過程。



$$R_1 = 6.5 \text{ cm}$$

$$R_2 = 9.2 \text{ cm}$$

$$R_3 = 11.3 \text{ cm}$$

$$R_4 = 13.0 \text{ cm}$$

$$R_5 = 14.6 \text{ cm}$$

$$R_6 = 16.0 \text{ cm}$$

$$R_7 = 17.25 \text{ cm}$$

$$R_n = \sqrt{n\lambda L}$$

$$L = \left( \frac{1}{h} + \frac{1}{h'} \right)^{-1} = 50 \text{ cm}$$

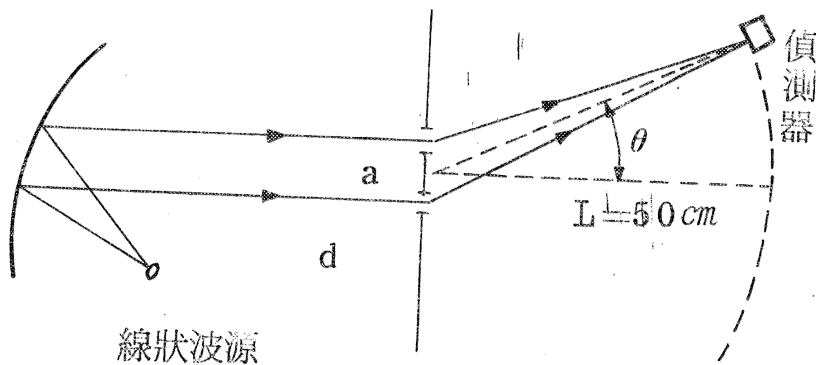
$$\lambda = 0.85 \text{ cm}$$

[圖八] Fresnel Zone Plate 規格

### 三、原理和實驗裝置

#### 1 雙狹縫的干涉：

- (1)裝置如圖九， $d = 4.5 \text{ cm}$ ， $a = 3.5 \text{ cm}$ ，根據光學原理  
 $d \sin \theta = n \lambda$ ， $n = 0, 1, 2, \dots$ 時為干涉之極大，即在  
 $\theta = 10.9^\circ, 22.2^\circ, 34.5^\circ \dots$ 之方向會產生極大值，測  
量之結果見下(肆)中之數據  
 $f = 100 \text{ cm}$ 反射器



[圖九] 雙狹縫的干涉現象裝置圖

- (2)改變 $d = 9.6 \text{ cm}$ ， $a = 8.5 \text{ cm}$ ，測量結果見(肆)中數據  
[註]：詳見附錄(3) P121 — P125.

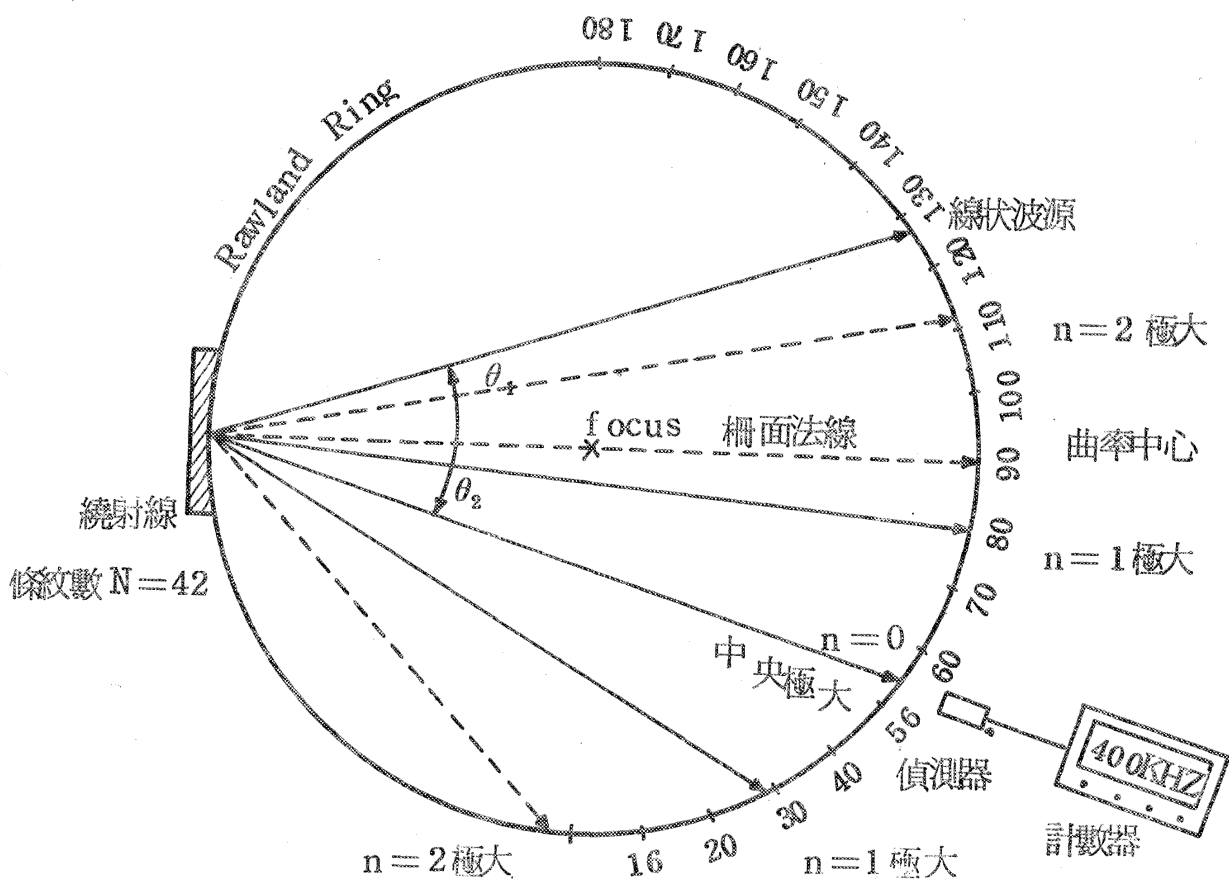
### 2. 三狹縫的干涉

裝置同圖九，但將雙狹縫板換成三狹縫， $d = 4.3 \text{ cm}$   
 $a = 3.5 \text{ cm}$ ，依據 $d \sin \theta = n \lambda$ 知在 $\theta = 11.4^\circ; 23.3^\circ,$   
 $36.4^\circ \dots$ 之方向會產生干涉之極大值，在這些主極大之中間  
會產生一次極大，測量圖形及數據見下(四)。

### 3. 聲柵的繞射

模仿光柵的原理，我們可以利用聲柵來分析出各種不同頻  
率之聲音來，對應於光柵可將不同頻率(或說不同波長)之光  
分析出來，主要裝置是一凹面柵，見圖十，若線狀波源放在  
Rowland Ring 上，則所有繞射之極大將成像在此 Rowland  
Ring 上。

[註]：詳見附錄(2) P370 ~ P374 或附錄(4)



〔圖十〕凹面柵之繞射現象

在此實驗中  $\lambda \cong 0.85 \text{ cm}$ ，凹面柵之曲率半徑  $3.0 \text{ m}$ ，故此 Rowland Ring 之半徑為  $1.5 \text{ m}$ （等於此凹面柵之焦距）柵間距  $1 \text{ cm}$ ，柵條寬  $1 \text{ cm}$ 。

(1) 將波源置於如圖十所示，置於  $125^\circ$  之位置（此為任定者）

然後將偵測器沿著 Rowland Ring 移動，記錄接收訊號強度即可得  $n = 0$  之極大和  $n = 1$  之極大； $n = 2$  之極大由於繞射作用而成爲 missing order。

〔註〕 missing order 詳見附錄(2) P342 或附錄(4)

依理論推算  $d \sin \theta = n \lambda$   $n = 0, 1, 2, 3 \dots$  時爲繞射之極大，此實驗中  $d = 2 \text{ cm}$ ， $\lambda \cong 0.85 \text{ cm}$ ， $\theta = \theta_1 + \theta_2$  依推算繞射極大應出現在 Rowland Ring  $29.8^\circ$ ； $55^\circ$ ； $80.2^\circ$ ； $113^\circ$ ，( missing order ) 但其中  $113^\circ$  方向是單狹縫繞射之極小，在單狹縫中  $d \sin \theta = m \lambda$ ， $m = 1, 2 \dots$  時爲繞射之極小

方向，代入上列數據知  $\theta = 58^\circ$  時為第一極小，故凹面柵之  $n = 2$  極大消失，觀測量結見(四)中數據與此甚為相符。

(2)利用發射器同時發出 39.5 KHZ 和 40.5 KHZ 之聲波，配合計數器，我們發現可在  $n = 1$  之繞射極大處分析出 39.5 KHZ 和 40.5 KHZ 的譜線，此類比於光柵可分離出不同頻率之色光一樣， $f_1 = 39.5 \text{ KHZ}$   $\lambda_1 \doteq 0.861 \text{ cm}$ ，

$f_3 = 40.5 \text{ KHZ}$   $\lambda_3 = 0.840 \text{ cm}$ ， $\Delta\lambda = 0.021 \text{ cm}$ ，即

$\frac{\lambda}{\Delta\lambda} = 40$ ，依光柵原理知，一柵之鑑別率 ( Resolving

Powex )  $R.P. = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = Nm$ ，其中  $N$  為光柵刻痕總數  $m$  為繞射之階數，此實驗中  $N = 42$ ， $m = 1$ ，故恰可鑑別之在  $n = 1$  附近之計數結果如下表

Rowland Ring 角度 $\theta$	$78^\circ$	$79^\circ$	$80^\circ$
計數器顯示 ( KHZ )	$40.49 \pm 0.02$	$40.49 \pm 0.01$	不穩定
	$81^\circ$	$82^\circ$	$85^\circ$
	$39.48 \pm 0.01$	$39.48 \pm 0.02$	訊號太弱

由上表測量知在  $78^\circ \sim 79^\circ$  間是 40.5 KHZ 之譜線，在  $81^\circ \sim 82^\circ$  間是 39.5 KHZ 之譜線與理論預測值甚接近

$$\Delta\theta = \frac{m\Delta\lambda}{d\cos\theta} \rightarrow m = 1, \Delta\lambda = 0.021 \text{ cm} \quad d = 2 \text{ cm},$$

$$\theta = 29.8^\circ$$

$$\rightarrow \Delta\theta = 0.012 \text{ rad} = 0.5 \text{ degree}$$

#### 4. Fresnel Zone Plate 之繞射

裝置如圖八

(1) 40 KHZ 單頻率測定，固定 source 至 Zone Plate 間為 100cm，移動偵測器，可在  $h^1 = 100 \pm 1 \text{ cm}$  處看見繞射之極大現象。

(2) 將發射器轉至同時發射 39.5 KHZ & 40.5 KHZ 處則可在



95 ± 1 cm處測得一個極大，在 105 ± 1 cm處測得另一個極大利用頻率分析器（即計數器）測知在 95 cm處為 39.5 KHZ 在 105 cm處為 40.5 KHZ 與推算值符合。

[註] 詳細分析請參附錄(2) P385；附錄(3) P126，或附錄(4)。

1—(1)雙狹縫干涉實驗數據： $d = 4.5\text{ cm}$        $a = 3.5\text{ cm}$

向右角度 $\theta$	0°	2°	4°	6°	8°	10°	13°	15°	18°	21°	25°	28°	30°	33°
接收強度 I	390	265	70	15	200	330	280	150	20	180	250	60	10	120

向左角度 $\theta$	0°	2°	4°	6°	8°	10°	13°	15°	18°	21°	24°	28°	30°	33°
接收強度 I	390	260	80	10	160	350	300	220	30	150	240	90	10	100

附圖（見方格紙 P.1）

1—(2)雙狹縫干涉實驗數據： $d = 9.6\text{ cm}$        $a = 8.5\text{ cm}$

向右角度 $\theta$	0°	2.5°	3.5°	4°	5°	6.5°	7.5°	8°	9°	10°	11.5°	12.5°	13.5°	14°
接收強度 I	360	20	90	170	280	320	180	20	120	240	310	220	50	210
向右角度 $\theta$	15°	17°	17.5°	18°	19°	20°	22°	23.5°	24.5°	26°	27°			
接收強度 I	270	200	140	40	170	210	160	40	160	200	140			

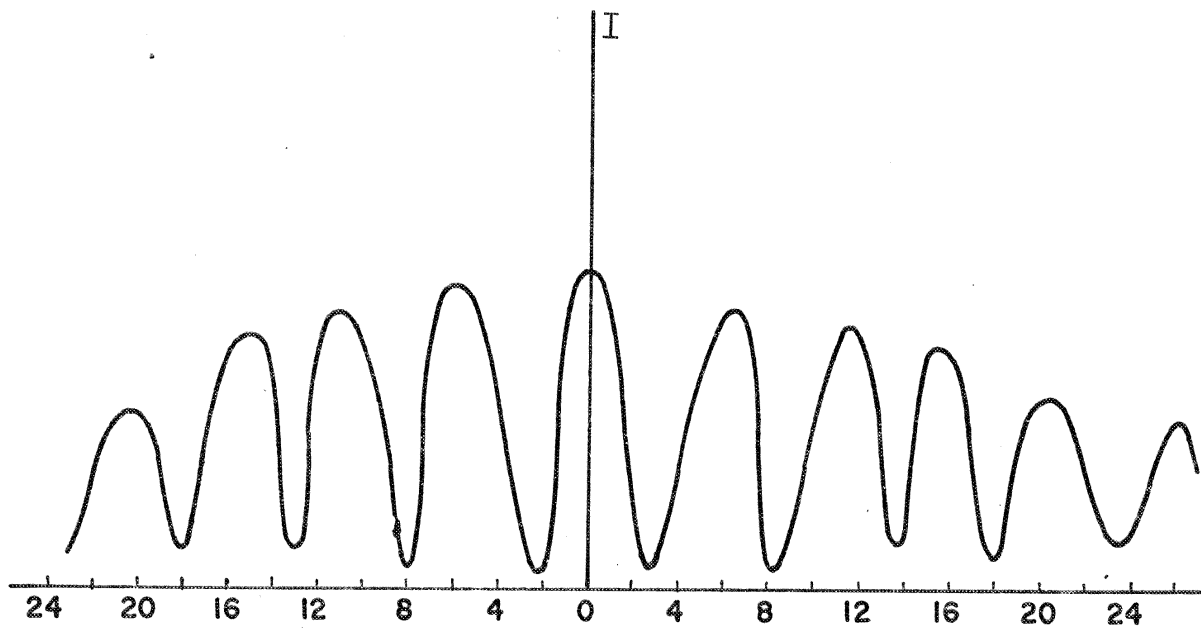
向左角度 $\theta$	$0^\circ$	$2.5^\circ$	$3.5^\circ$	$4^\circ$	$5^\circ$	$6.5^\circ$	$7.5^\circ$	$8^\circ$	$9^\circ$	$10^\circ$	$11.5^\circ$	$12.5^\circ$	$13^\circ$	$14^\circ$
接收强度 I	360	20	100	190	300	340	200	20	160	250	300	210	40	240
向左角度 $\theta$	$15^\circ$	$17^\circ$	$18^\circ$	$19^\circ$	$20^\circ$	$22^\circ$	$23^\circ$	$24.5^\circ$	$26^\circ$	$27^\circ$				
接收强度 I	270	210	40	170	200	150	40	160	220	140				

附圖 ( 見方格紙 P. 2 )

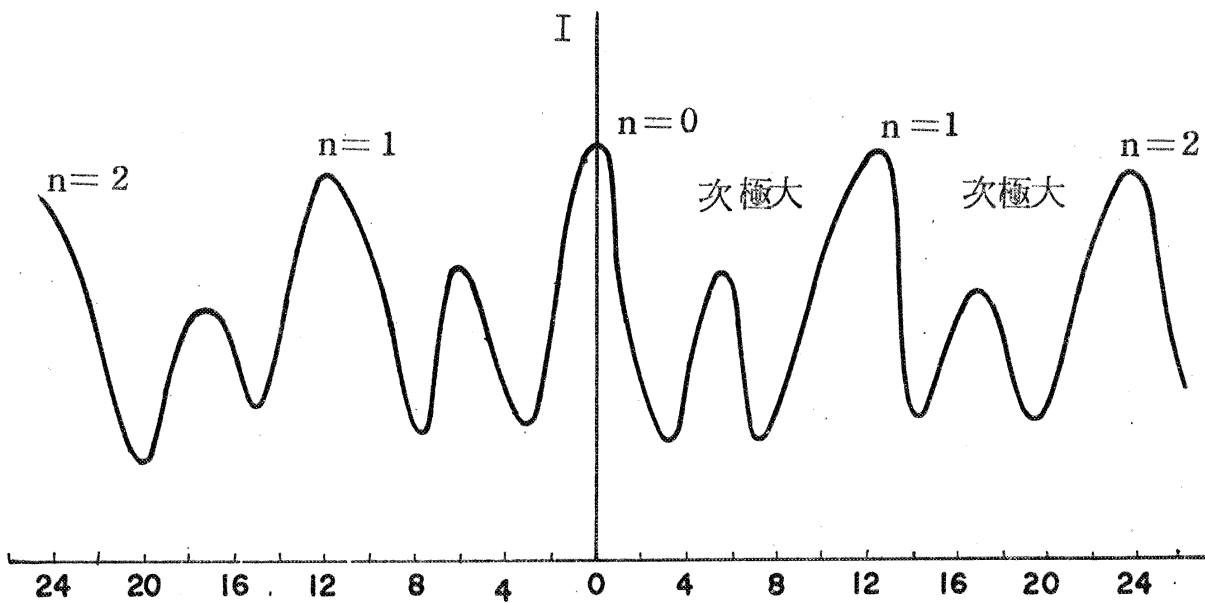
2 三狹縫干涉實驗數據 :  $d = 4.3 \text{ cm}$

$a = 3.5 \text{ cm}$

向右角度 $\theta$	$0^\circ$	$1.25^\circ$	$2^\circ$	$2.5^\circ$	$3^\circ$	$3.7^\circ$	$4.5^\circ$	$5^\circ$	$6^\circ$	$7^\circ$	$7.5^\circ$
接收强度 I	480	340	250	205	140	250	300	320	340	140	190
向右角度 $\theta$	$8.5^\circ$	$9.5^\circ$	$10^\circ$	$11.2^\circ$	$11.8^\circ$	$12.5^\circ$	$13^\circ$	$13.8^\circ$	$15^\circ$	$16.2^\circ$	$17^\circ$
接收强度 I	250	305	350	400	480	380	360	170	190	300	275
向右角度 $\theta$	$18^\circ$	$19^\circ$	$20^\circ$	$21^\circ$	$22^\circ$	$23^\circ$	$24.2^\circ$	$26^\circ$			
接收强度 I	250	150	170	300	380	445	275	200			



(雙狹縫繞射圖樣)



(三狹縫干涉圖形)

向左角度 $\theta$	$0^\circ$	$1.25^\circ$	$2^\circ$	$2.5^\circ$	$3^\circ$	$3.7^\circ$	$5^\circ$	$6^\circ$	$7^\circ$	$7.5^\circ$	$8.7^\circ$	$10^\circ$
接收强度 I	480	320	270	200	170	250	310	355	170	200	240	285
向左角度 $\theta$	$10.8^\circ$	$11.5^\circ$	$12^\circ$	$12.5^\circ$	$13.7^\circ$	$15^\circ$	$16^\circ$	$17.5^\circ$	$19^\circ$	$20^\circ$	$20.7^\circ$	$22^\circ$
接收强度 I	420	450	385	330	270	190	250	280	240	150	125	250
向左角度 $\theta$	$22.7^\circ$	$24^\circ$	$24.7^\circ$	$25^\circ$	$26^\circ$							
接收强度 I	330	370	420	310	245							

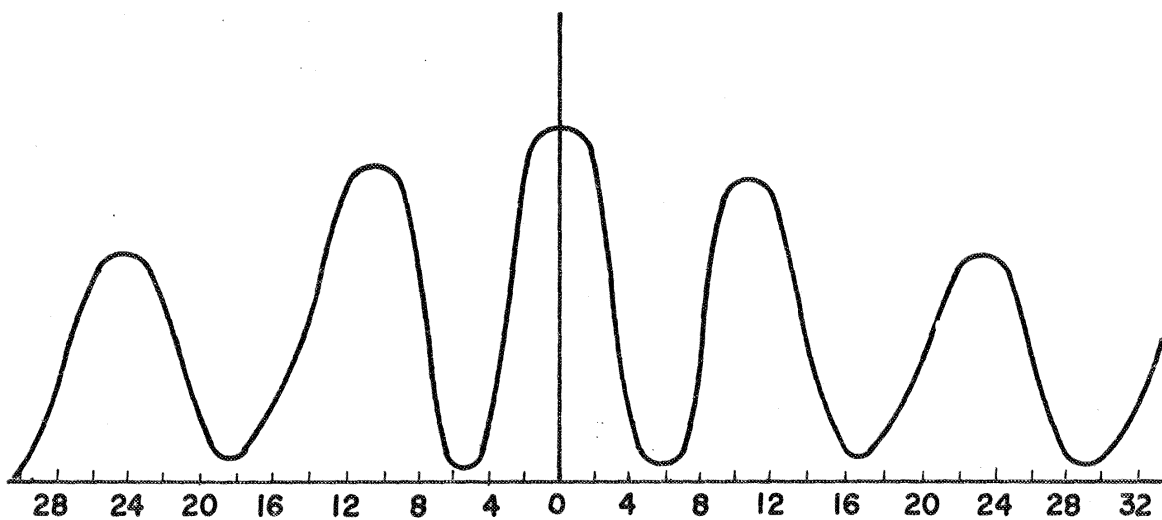
附圖 ( 見方格紙 P.3 )

3. 繞射柵 ( diffraction grating ) 測量數據 :

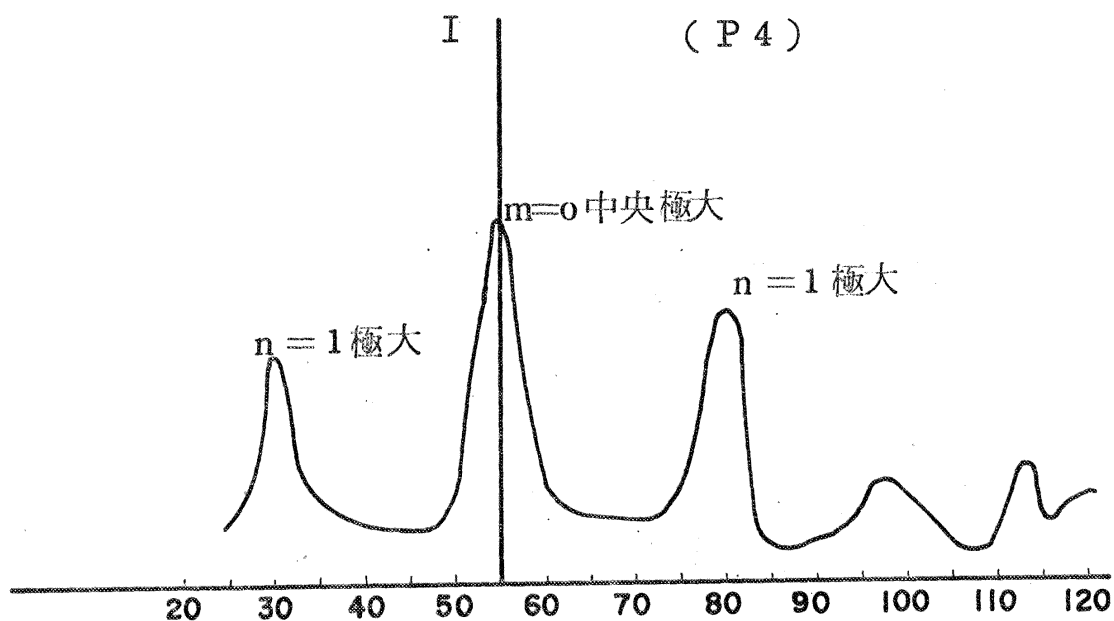
波源位置在  $125^\circ$  ( 參見 Rowland Ring 圖示位置 )

接收角度 $\theta$	$25^\circ$	$27.5^\circ$	$30^\circ$	$32.5^\circ$	$35^\circ$	$37.5^\circ$	$40^\circ$	$42.5^\circ$	$45^\circ$	$47.5^\circ$	$50^\circ$	$52.5^\circ$	$55^\circ$
接收强度 I	80	150	250	150	120	150	60	20	80	70	170	300	390
接收角度 $\theta$	$57.5^\circ$	$60^\circ$	$62.5^\circ$	$65^\circ$	$67.5^\circ$	$70^\circ$	$72.5^\circ$	$75^\circ$	$77.5^\circ$	$80^\circ$	$82.5^\circ$	$85^\circ$	$87.5^\circ$
接收强度 I	230	120	200	30	40	120	50	150	240	300	150	20	40
接收角度 $\theta$	$90^\circ$	$92.5^\circ$	$95^\circ$	$97.5^\circ$	$100^\circ$	$102.5^\circ$	$105^\circ$	$107.5^\circ$	$110^\circ$	$112.5^\circ$	$115^\circ$	$117.5^\circ$	$120^\circ$
接收强度 I	20	50	100	120	70	70	40	20	30	150	50	80	100

附圖 ( 見方格紙 P.4 )



(雙狹縫繞射圖樣(a))



(P 4)

$m=0$  中央極大

$n=1$  極大

$n=1$  極大

(凹光柵繞射圖樣)

## 五、結 論：

由上述之分析及我們所見之測量結果和圖形，我們可以很肯定的說聲波雖然是縱波，但在此實驗中所觀察到的一切現象都和橫波（光波和水波）的性質別無二致，唯一縱波與橫波不同點是，光具有極化特性而已，尚有許多方式可證明聲波的特性，但時間有限，只好在此停筆。

## 六、應 用：

1. 可利用保麗龍球，直徑  $1\text{ cm}$ ，排成晶格模，利用  $40\text{ KHZ}$  聲波照射後，可在不同方向得到晶格繞射花樣（Pattern）而模擬和驗證 X-ray 晶格繞射之結果是否正確。
2. 可以分析各種樂器中之超聲頻頻譜，我們知道任何物體發出聲音都含有多量之諧波（higher order harmonics）但要如何分析呢？利用凹面聲柵，將可輕易分析出其成分比。
3. 是中學或大專物理實驗中，極佳之教學示範儀器，且價格低廉，易於大量生產。

評語：利用新式器材，完成簡易裝置，新穎實用，實驗結果甚佳，數據完整適合數學之用。