

光電實驗(一)

實驗報告

姓	名：
學	號：
組	別：
教	授：
日	期：

一、實驗名稱：幾何光學基本定律

二、實驗目的與原理：

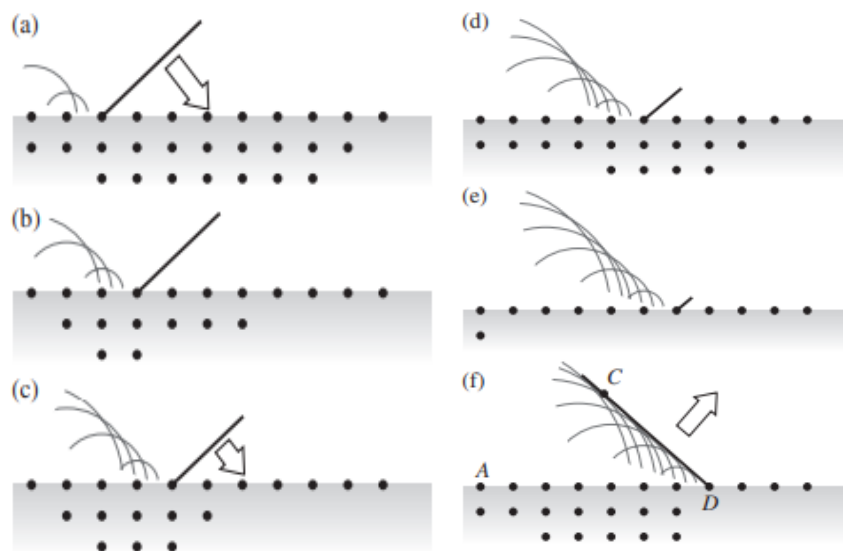
(1) 實驗目的：

以氦氖雷射作為光源，並透過反射鏡與旋轉台的調整驗證反射定律和光槓桿原理，且透過玻璃或壓克力與旋轉台的調整驗證折射定律。

(2) 實驗原理：

1. 反射原理

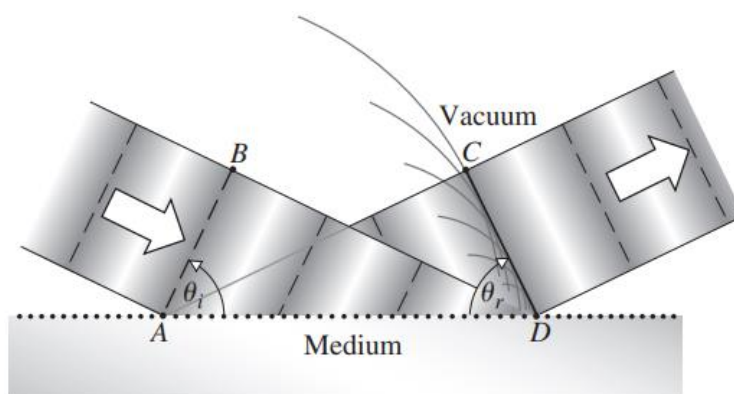
當光入射介質面時，我們可以將光視為許多朝著同一方向前進的波前，而當波前接觸到介質面時，介質面會對光進行散射，此時介質面上的質點將可視為許多的散射子，向外發射半球型的光波。而不同散射子所散射出的光會互相疊加，將大部分方向的光抵銷，最後僅剩下特定方向的散射光，即為反射光。



圖一 光在介質面的散射[1]

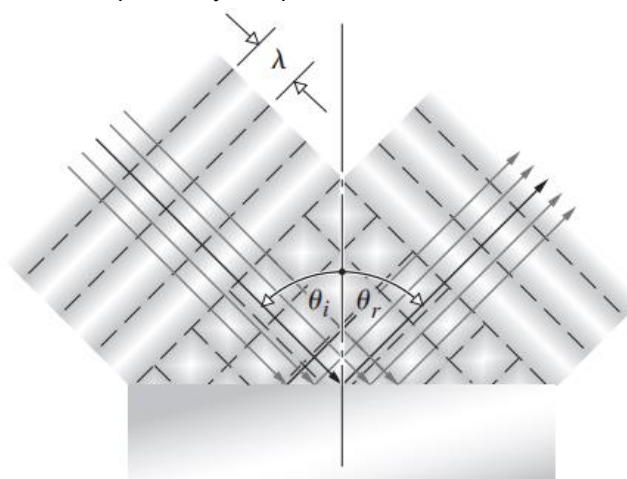
2. 反射定律

反射定律表示當光入射一光滑介質面時，會在介質面產生反射光，而反射光與入射光共面，且入射角等於反射角。由下圖二可發現， \overline{AB} 的波前透過反射後成為 \overline{CD} 的波前，接著觀察三角形ABD與三角形ACD，我們可得知兩個三角形共邊 \overline{AD} ，也因此 $\frac{\overline{BD}}{\sin \theta_i} = \overline{AD} = \frac{\overline{AC}}{\sin \theta_r}$ ，又因入射光與反射光皆行進在同介質，所以入射光的速度與反射光的速度相同， $v_i = v_r$ ，且從A點到C點的時間與從B點到D點的時間相同，皆為 Δt ，故 $\overline{BD} = v_i \Delta t = v_r \Delta t = \overline{AC}$ ，最後可得 $\sin \theta_i = \sin \theta_r$ ，故 $\theta_i = \theta_r$ 。

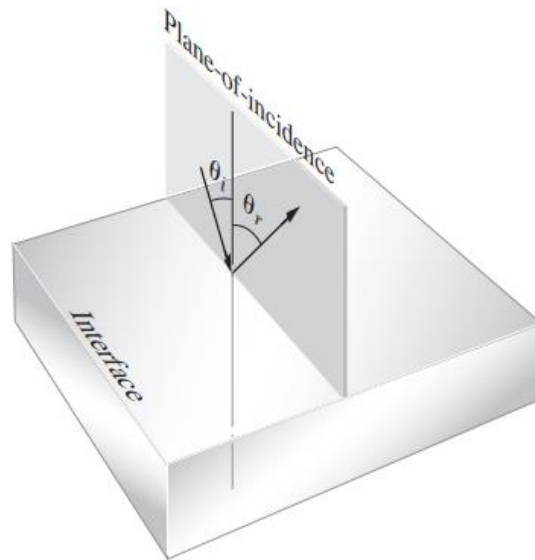


圖二 光在介質面的反射[1]

同時也可將光以垂直波前的射線表示，如下圖三，將垂直介質面的方向定義為法線，而入射光線和法線的夾角即為入射角 θ_i ，反射光線和法線的夾角即為反射角 θ_r ，而 $\theta_i = \theta_r$ 即為反射定律。



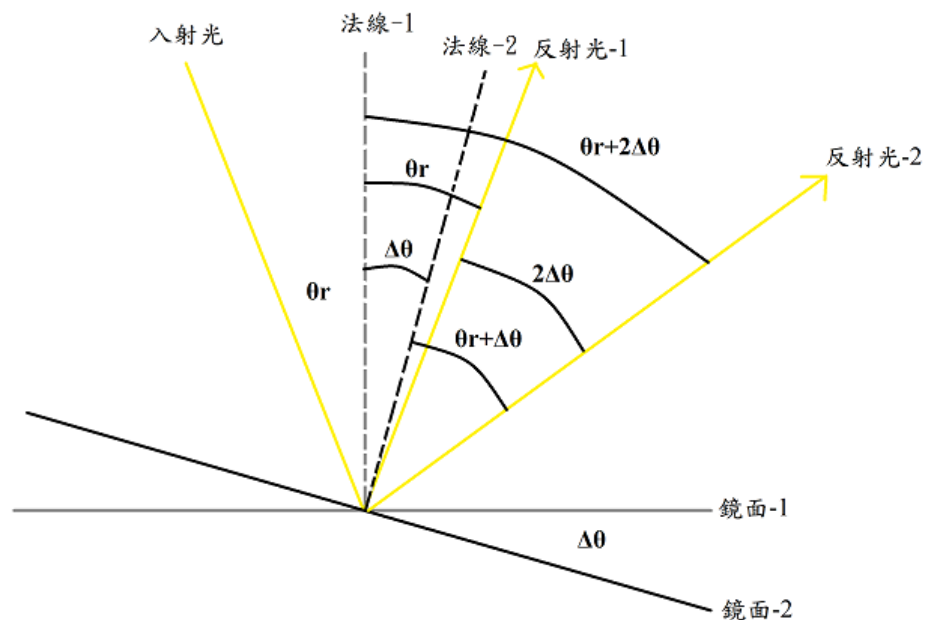
圖三 反射定律示意圖[1]



圖四 入射光線與反射光線共面[1]

3. 光槓桿原理

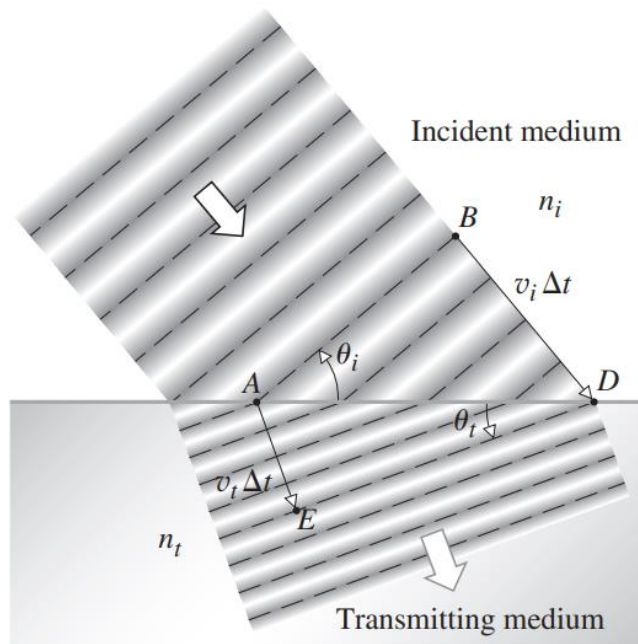
假設一光線以 θ_r 角度入射鏡面-1，則該光線同以 θ_r 角度出射鏡面-1，若此時將鏡面旋轉 $\Delta\theta$ 度，成鏡面-2，則此時入射光與鏡面-2 構成的法線-2 夾 $\theta_r + \Delta\theta$ 角，出射光-2 也將與法線-2 夾 $\theta_r + \Delta\theta$ 角，同時可發現，旋轉鏡面後的反射光-2 與旋轉鏡面前的反射光-1 夾 $2\Delta\theta$ 角，此即為光槓桿原理，如下圖五。



圖五 光槓桿原理示意圖

4. 折射定律

考慮一入射光入射介質，如下圖六，從圖中可發現，光由波前 \overline{AB} 行進至波前 \overline{DE} 皆須同樣的時間 Δt ，又 $\overline{AE} = v_t \Delta t$ ， $\overline{BD} = v_i \Delta t$ ， v_t 和 v_i 分別表示折射光和入射光的行進速度。考慮三角形 ABD 和三角形 ADE，由於兩個三角形共邊 \overline{AD} ，所以 $\frac{\overline{BD}}{\sin \theta_i} = \overline{AD} = \frac{\overline{AE}}{\sin \theta_t}$ ，則 $\frac{v_i}{\sin \theta_i} = \frac{v_t}{\sin \theta_t}$ ，因為在介質中光的速度為 $v = c/n$ ，所以 $\frac{c/n_i}{\sin \theta_i} = \frac{c/n_t}{\sin \theta_t}$ ，最後可得 $n_i \sin \theta_i = n_t \sin \theta_t$ ，即為折射定律。

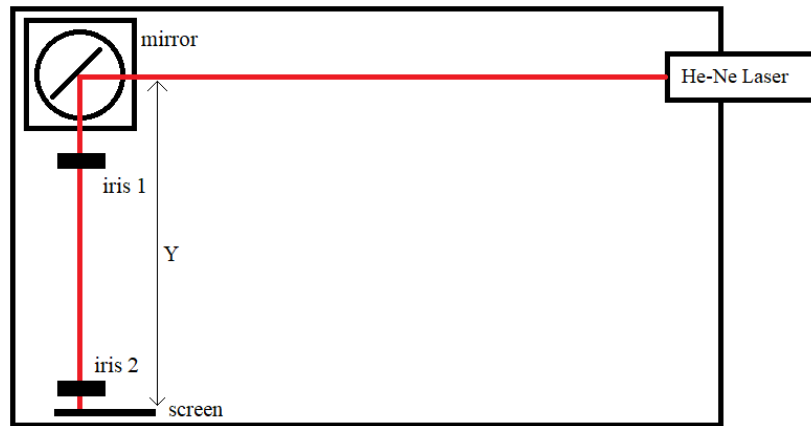


圖六 折射定律[1]

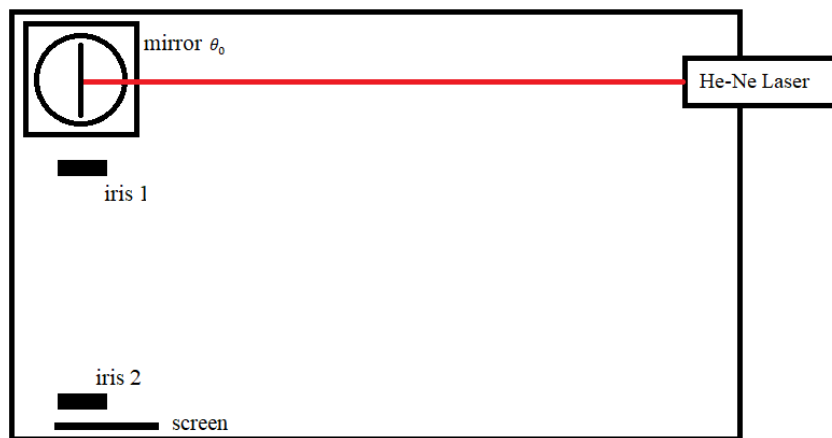
三、實驗步驟(含配置圖)：

(1) 光的反射

首先在光學桌板長邊建立平行桌邊的雷射水平，之後在光學桌板短邊建立平行桌邊的 2 個等高光圈，並將反射鏡架設在旋轉台上，且確認反射鏡位於旋轉台直徑上，再如圖七擺設反射鏡與屏幕。微調反射鏡與旋轉台位置使得雷射光路能穿過平行桌板短邊的 2 個等高光圈且須注意雷射入射光點須位於反射鏡中央，轉動反射鏡時入射光點不可偏移。如圖八轉動反射鏡，使雷射光點返回雷射管，並紀錄此時旋轉台上的刻度，標示為 θ_0 ，紀錄反射鏡上光點至屏幕的垂直距離 Y 。

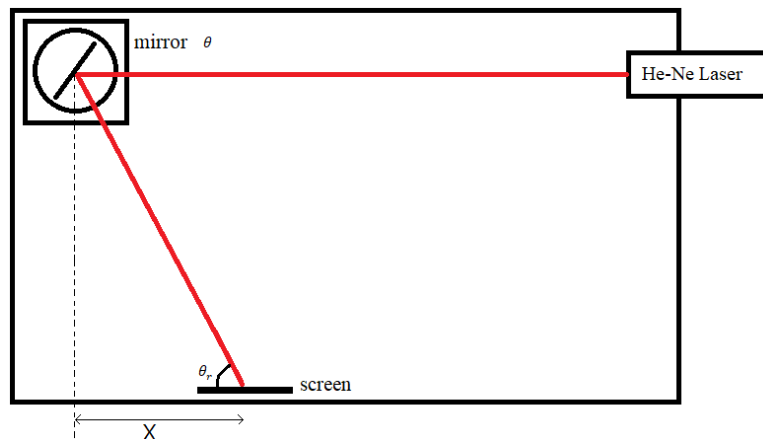


圖七 光的反射實驗光路架設示意圖



圖八 光的反射實驗光路架設示意圖

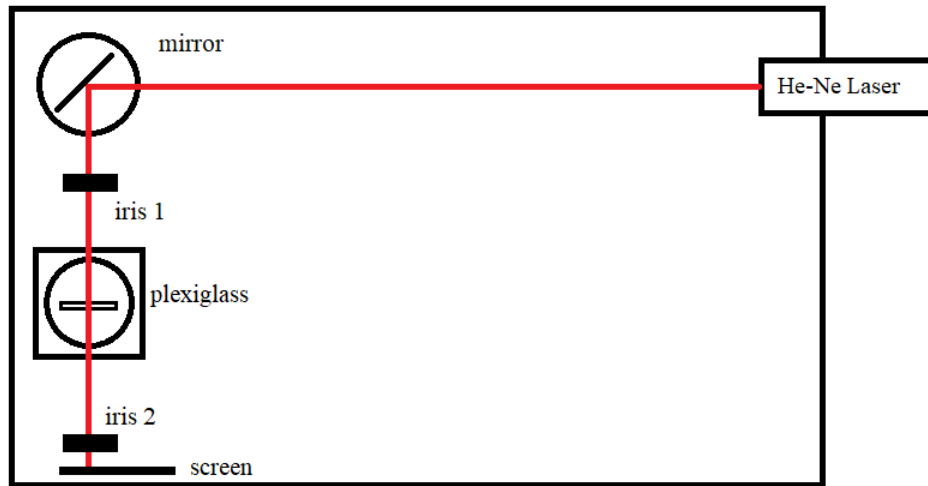
如圖九轉動旋轉台，紀錄旋轉台上的讀數 θ ，再記錄反射至屏幕上光點的水平距離 X 。使屏幕移動在不同的範圍區間中，記錄總共 10 筆不同的 X 和 θ 值。利用三角關係求得出射反射鏡的雷射和屏幕的夾角 θ_r ，且比較 θ_r 與 $\theta - \theta_0$ 的關係和計算誤差，以驗證反射定律。



圖九 光的反射實驗數據測量示意圖

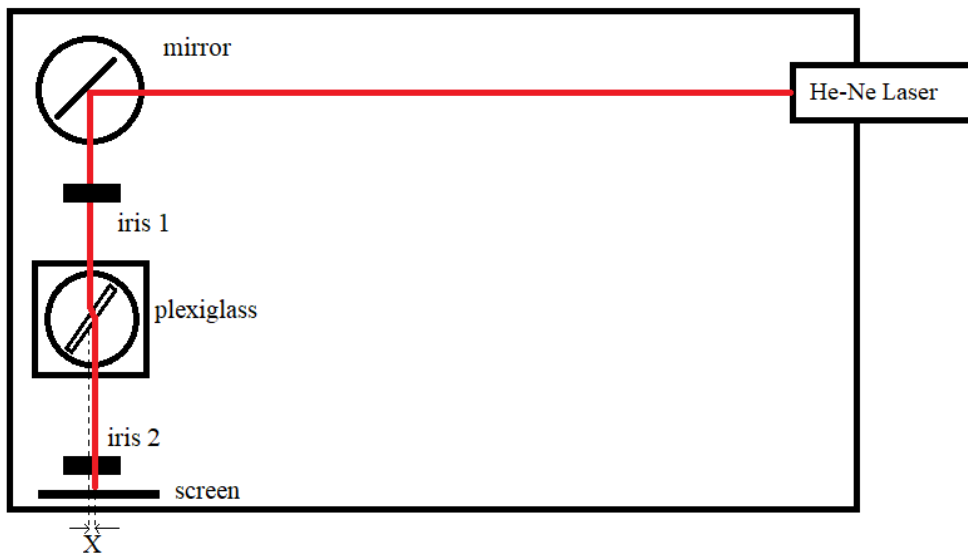
(2) 光的折射

首先在光學桌板長邊建立雷射水平，接著在光學桌板短邊架設 2 個平行短邊的光圈，並如圖十架設反射鏡，使得雷射光穿過平行短邊的 2 個光圈。接著將壓克力組裝在旋轉台上，並注意壓克力對雷射的入射面需置於旋轉台直徑上，以保證轉動旋轉台時入射光點不會偏移。接著架設壓克力，將壓克力垂直正對雷射，使得雷射不會偏移而保持原光路，並在屏幕上標記光點。



圖十 光的折射實驗光路架設示意圖

之後轉動旋轉台使雷射光路偏移，紀錄 9 組旋轉台旋轉角度 θ 對應光點在屏幕上的偏移量 X 的數據。其中需注意最大旋轉角度應可至 70 度而不使入射光點在壓克力產生偏移，且雷射都能在入射壓克力的平行面射出。蒐集 9 組數據後計算出介質折射率並作圖且與理論值作比較。



圖十一 光的折射實驗數據量測示意圖

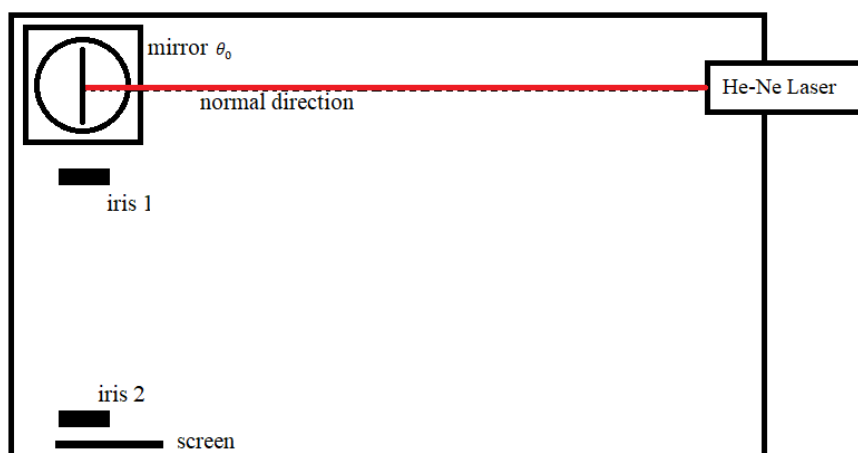
四、數據分析與討論：

(1) 實驗數據整理及分析

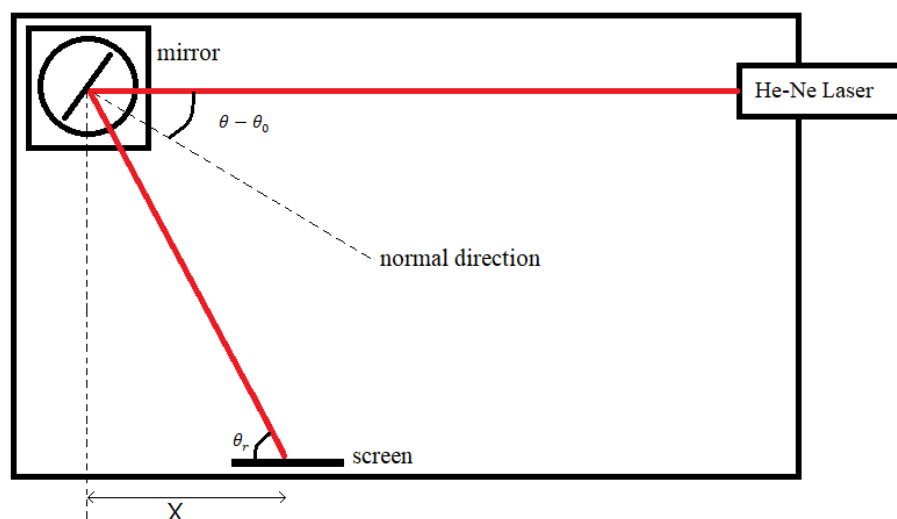
1. 光的反射

如圖十二，將垂直反射鏡的方向定為法線方向，則當雷射反射回雷射管時，反射鏡的法線方向即為雷射入射方向。而旋轉台轉動前後的角度差 $\theta - \theta_0$ 即為鏡面轉動的角度，也等同於法線轉動的角度，也為法線與入射光的夾角，即為入射角，而透過三角關係可得知反射鏡的出射光與屏幕的夾角 $\theta_r = \tan^{-1}(Y/X)$ ，接著如下圖十三，透過幾何關係可知，因入射反射鏡的雷射和桌面長邊平行，所以 θ_r 與反射鏡的入射光和出射光夾角互為內錯角，故 θ_r 與入射光和出射光夾角相等，又根據反射定律，入射角應等於反射角，故入射光和反射光夾角應為2倍入射角 $\theta - \theta_0$ ，所以可得知理論上 $\theta_r = 2(\theta - \theta_0)$ ，並根據實驗所得 θ_r 與理論值 $2(\theta - \theta_0)$ 比較，得誤

$$\text{差} \left| \frac{\theta_r - 2(\theta - \theta_0)}{2(\theta - \theta_0)} \right|。$$



圖十二 光的反射實驗分析



圖十三 光的反射實驗分析

表 1 反射定律數據

	$\theta_0 = 269^\circ 26'$; $Y = 50\text{cm}$					
	θ	$\theta - \theta_0$	$\theta - \theta_0$	X(cm)	θ_r	誤差(%)
第一個點	301° 20'	31° 54'	31.90°	24.10	64.49°	1.08
第二個點	300° 30'	31° 4'	31.07°	26.10	62.66°	0.84
第三個點	299° 34'	30° 8'	30.13°	28.15	60.86°	1.00
第四個點	298° 44'	29° 18'	29.30°	30.20	59.12°	0.89
第五個點	294° 8'	24° 42'	24.70°	42.75	49.75°	0.71
第六個點	293° 8'	23° 42'	23.70°	45.80	47.79°	0.82
第七個點	292° 30'	23° 4'	23.07°	48.00	46.45°	0.67
第八個點	287° 38'	18° 12'	18.20°	67.95	36.62°	0.61
第九個點	287° 2'	17° 36'	17.60°	70.70	35.54°	0.17
第十個點	286° 28'	17° 2'	17.03°	73.9	34.34°	0.82

數據計算所用公式：

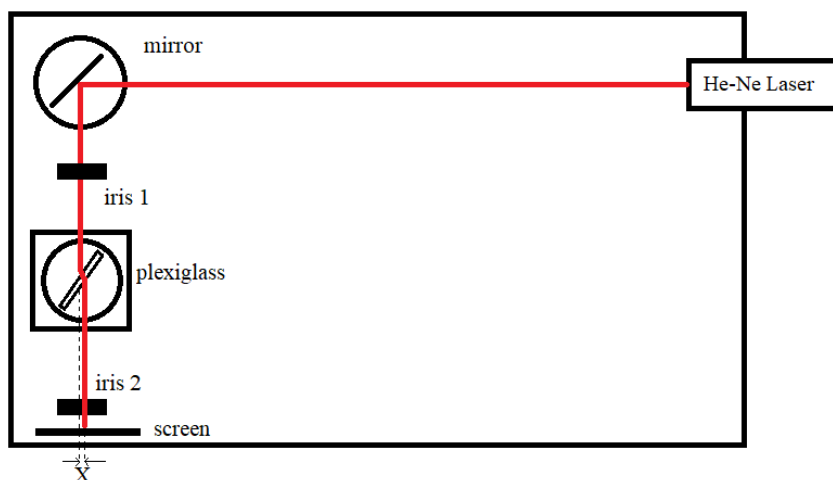
i. $\theta_r = \tan^{-1}(Y/X)$

ii. 誤差 = $\left| \frac{\theta_r - 2(\theta - \theta_0)}{2(\theta - \theta_0)} \right|$

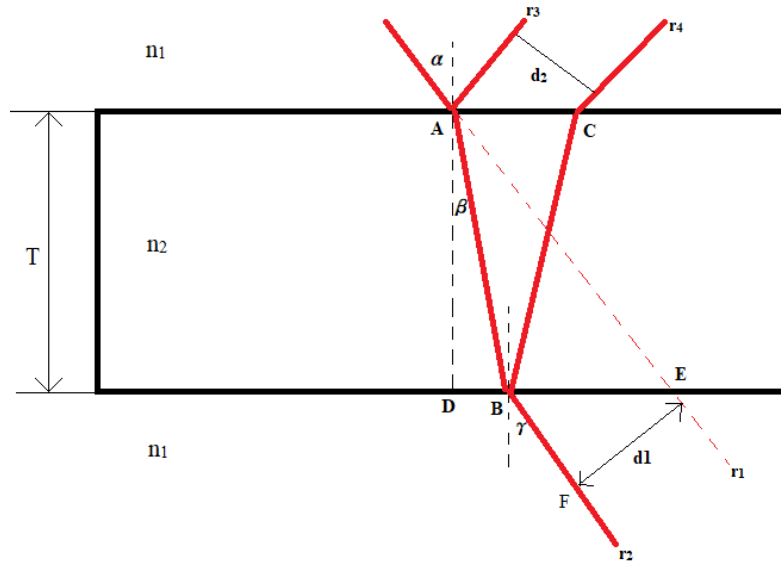
根據以上數據可得知 2 倍的反射鏡轉動角度 $2(\theta - \theta_0)$ 約等於 θ_r ，且誤差皆約小於 1%，驗證了反射定律，此外，也可解釋為反射鏡擺放不同角度時的 2 倍角度差，約等於 θ_r 的角度差，例如若取第五個點與第六個點，反射鏡的擺放角度差為 $294^\circ 81' - 293^\circ 8' = 1^\circ$ ，而相對應 θ_r 的差為 $49.75^\circ - 47.79^\circ = 1.96^\circ$ ，約為兩倍關係，而這驗證了光槓桿原理。

2. 光的折射

在實驗中，當光如下圖十四入射壓克力時，能夠以下圖十五解釋光在塊材中的行進路徑並且進行推導。



圖十四 光的折射實驗數據量測示意圖



圖十五 光在塊材中的折射

首先在實驗中，光的入射路徑不變，而是對塊材擺放角度進行調整，因此上圖十五可視為將塊材的擺放角度改變，當光垂直入射塊材時，光的路徑不產生偏移，故出射塊材的路徑為 r_1 ，而當改變塊材角度時，入射光與入射表面的法線夾有一入射角 α ，並以 β 角在塊材中行進至 B 點，在出射塊材時再次進行折射，以 γ 角出射塊材，最後形成路徑 r_2 ，此外， T 表塊材厚度， n_1 與 n_2 分別代表環境與塊材折射率。

在實驗中進行量測時，屏幕擺放與入射塊材的光呈垂直，故折射後光點在屏幕上的位移量 X 即為圖十五中 d_1 值。而透過圖十五可發現 $\overline{DB} = T \tan \beta$ ，而 $\angle DAE = \alpha$ ，故 $\overline{DE} = T \tan \alpha$ ，因此可得下式。

$$\overline{BE} = \overline{DE} - \overline{DB} = T(\tan \alpha - \tan \beta)$$

接著考慮折射定律，在折射處可得 $n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta = n_1 \sin \gamma$ ，因

此 $n_2 = n_1 \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$ ，且 $\alpha = \gamma$ 。觀察三角型 BEF，可發現 $\angle BEF = \gamma = \alpha$ ，

故得下列推導：

$$d_1 = \overline{BE} \cos \angle BEF = T(\tan \alpha - \tan \beta) \cos \alpha,$$

$$T \tan \beta \cos \alpha = T \tan \alpha \cos \alpha - d_1,$$

$$\tan \beta = \frac{\sin \alpha - d_1/T}{\cos \alpha},$$

$$\beta = \tan^{-1} \frac{\sin \alpha - d_1/T}{\cos \alpha}.$$

最後可整理出下列公式：

$$\text{i. } n_2 = n_1 \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$$

$$\text{ii. } \beta = \tan^{-1} \frac{\sin \alpha - d_1/T}{\cos \alpha}$$

表二 折射定律數據

	旋轉台初始角度 = 172° 32' 塊材厚度 T = 3.79cm			
	旋轉台刻度	入射角度 α	螢幕上位移 X	折射率
第一個點	182° 32'	10°	2.2mm	1.489
第二個點	192° 32'	20°	4.5mm	1.479
第三個點	202° 32'	30°	7.4mm	1.506
第四個點	212° 32'	40°	11.0mm	1.537
第五個點	222° 32'	50°	14.6mm	1.503
第六個點	232° 32'	60°	19.1mm	1.477
第七個點	242° 32'	70°	25.2mm	1.500
第八個點	240° 32'	68°	24.3mm	1.528
第九個點	244° 32'	72°	26.9mm	1.545

平均折射率：1.507

數據計算所用公式：

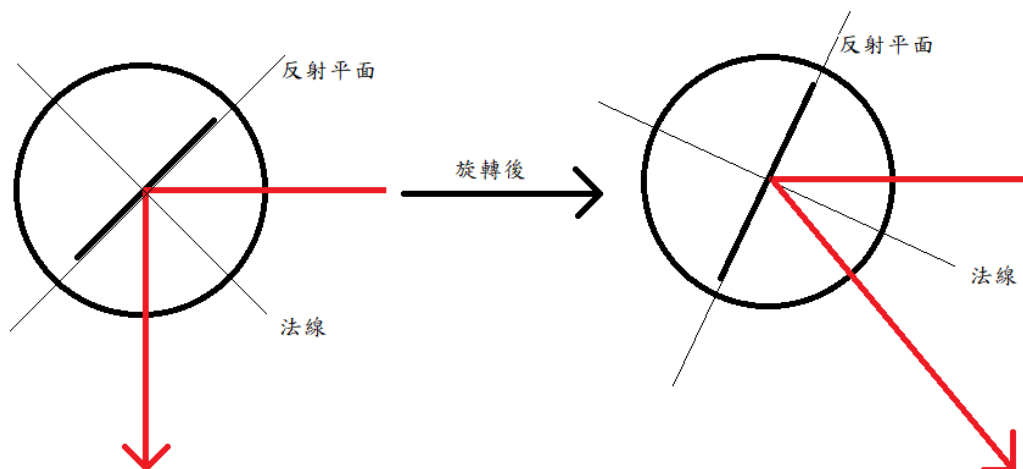
$$i. \quad \beta = \tan^{-1} \frac{\sin \alpha - X/T}{\cos \alpha}$$

$$ii. \quad n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$$

將九個數據點計算所得之折射率取平均可得平均折射率為 1.507，約符合 BK7 在波長為 632.8 的光場下之折射率 $n = 1.5151$ ，實驗誤差為 0.535%。

(2) 預報題目作答

1. 參考「實驗內容」，在光的反射實驗中，為甚麼反射鏡放在旋轉台上時，其反射平面須包含旋轉台的旋轉主軸(中心)？可參考下圖，若反射平面不在旋轉台的主軸上時，則結果為何？在實驗中，要如何確定反射平面在旋轉主軸上？

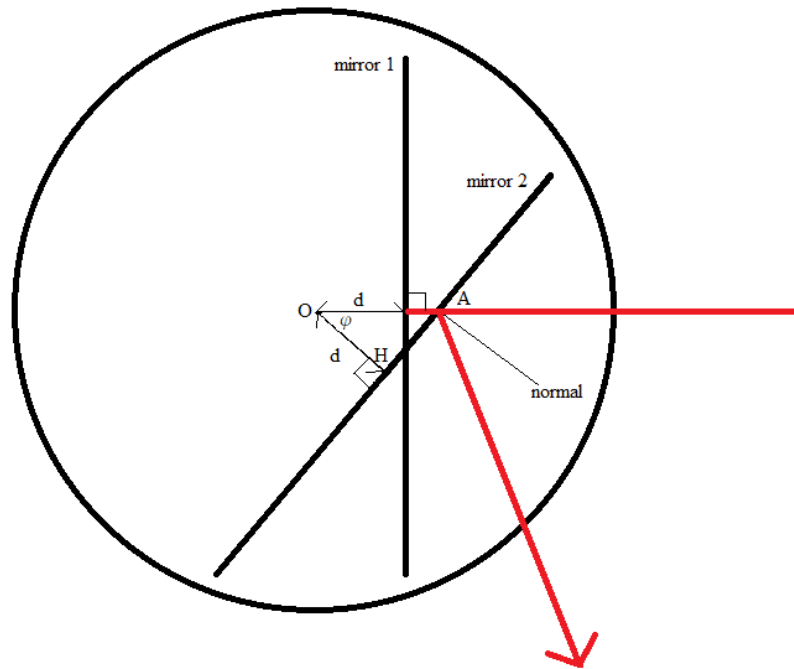


圖十六 反射平面包含旋轉台主軸之旋轉前後情形

答：由上圖十六可知，當反射平面包含旋轉主軸時，入射光的光點於反射鏡面上街在同一位置，將不會產生偏移，即可避免誤差。

倘若反射鏡的反射平面未在旋轉台主軸上，則可參考下圖十七，如圖，鏡面未架設在旋轉台主軸上，而與主軸具一距離 d ，鏡面一與入射光垂直，為實驗中將入射光反射回雷射管的鏡面位置，而鏡面二則是將鏡面一旋轉 φ 度後的位置，可透過觀察三角形 OAH 發現， $\overline{OA} = d \sec \varphi$ ，故鏡面二與鏡面一的光點位置在空間上即相差 $\overline{OA} - d = d(\sec \varphi - 1)$ 。

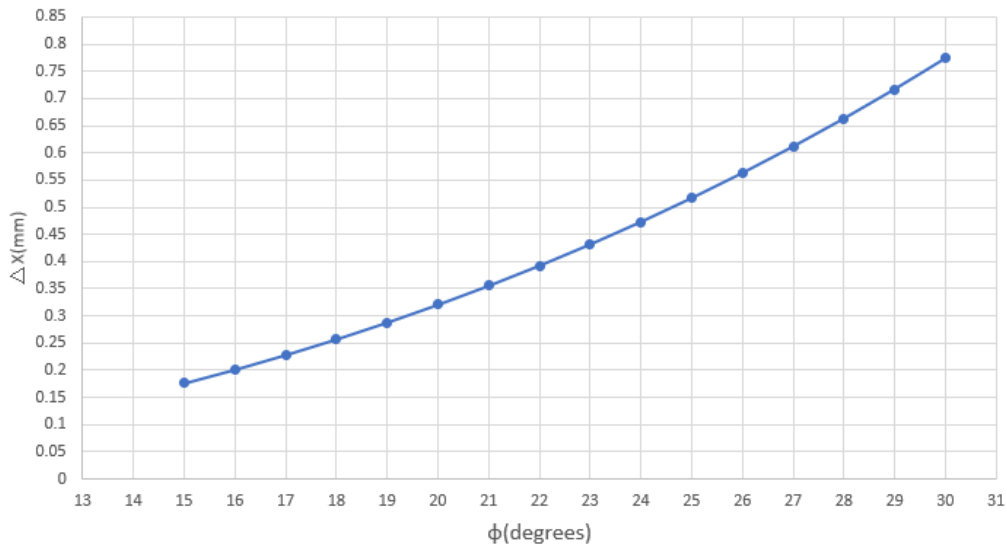
故可得結論，在光的反射實驗中，各數據點之 $(\theta - \theta_0)$ 即為下圖十七中鏡面二與鏡面一之夾角 φ ，故若反射鏡面未位於旋轉台主軸，則光的反射點位置在空間上將會平行雷射方向以遠離旋轉台的方向偏移 ΔX 值， $\Delta X = d(\sec(\theta - \theta_0) - 1)$ ， d 為反射鏡與旋轉台主軸偏移量， θ 為各數據點旋轉台讀數， θ_0 為將雷射反射回雷射管之旋轉台讀數。



圖十七 反射平面未包含旋轉台主軸之旋轉前後情形

以上述結論做假設，若 $d = 5\text{mm}$ ， φ 為一從 $15^\circ \sim 30^\circ$ 之變量，則可將 ΔX 與 φ 作圖，得下圖十八。透過下圖可發現當鏡面旋轉角度越大時，偏移量 ΔX 將會越大，且成長速率大於線性成長，在 $d = 5\text{mm}$ 的條件下，若鏡面旋轉角度達 30° ，則偏移量 ΔX 約為 0.774mm 。

ΔX 與 φ 之關係圖



圖十八 ΔX 與 φ 之關係圖

除了直接造成數據的偏移，反射鏡面若未包含旋轉台主軸，則鏡面旋轉時雷射光點將會出現在鏡面的不同位置上，由於反射鏡中央與周圍的曲率和反射效果也有些微差異，這也可能會導致原先鏡面上的曲率不均、平整程度等因素被額外納入誤差中，導致反射角出現差異。

在實驗中，要組裝反射鏡面至旋轉台上時，首先應先以肉眼由上至下觀察反射平面是否位於旋轉台主軸上，並在安裝旋轉台時，轉動旋轉台，檢查雷射光點在鏡面上的位置是否偏移，若旋轉中發現雷射光點自鏡面中央偏移至周圍，則代表反射平面未包含旋轉台主軸，需要重新校正安裝。

2. 請找出玻璃、BK7、ZnSe、矽(silicon)、壓克力(Plexiglas)在本實驗中所使用之氦氖雷射發光波長的折射率，請列出參考的書籍與頁碼(不接受網頁上之資料)。

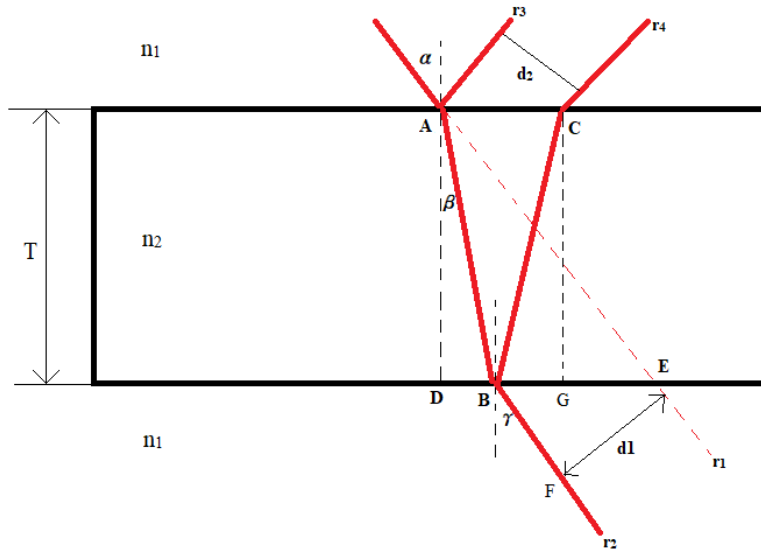
答：

- i. 玻璃：1.46
- ii. BK7：1.51509
- iii. ZnSe：2.66
- iv. 矽：3.8827
- v. 壓克力：1.51

資料來源：

- i. Schott, Optical Glass Datasheet ,
https://refractiveindex.info/download/data/2017/schott_2017-01-20.pdf
- ii. D. E. Aspnes , A. A. Studna, “Dielectric functions and optical parameters of Si, Ge, GaP, GaAs, GaSb, InP, InAs, and InSb from 1.5 to 6.0 eV”, 1983
- iii. Douglas C. Giancoli ,普通物理 下冊, 第 32-4 章
- iv. 桑嶋幹, 透鏡, 第 151 頁

3. 參考下圖，求出 α 與 γ 的關係，並求兩光束的距離 d_1 。另外，證明經由 A 點反射的光與經由 B 點反射後再於 C 點折射的光相互平行，並求兩者間的距離 d_2 ，若我們於 n_2 下方接連疊放數個折射率不同且厚度不一的透明物體，出射光與入射光的關係為何？



圖十九 光在塊材中的折射

答：考慮上方的介面，可透過折射定律得知 $n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta$ ，又透過幾何分析，可得知光在塊材內行進時，從塊材內對下方接觸面的入射角與上方接觸面的折射角互為內錯角，故下方介面由 n_2 折射至 n_1 的入射角也為 β ，接著以折射定律討論下方介面，可得 $n_2 \sin \beta = n_1 \sin \gamma$ ，合併兩式得 $n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta = n_1 \sin \gamma$ ，故 $\alpha = \gamma$ 。

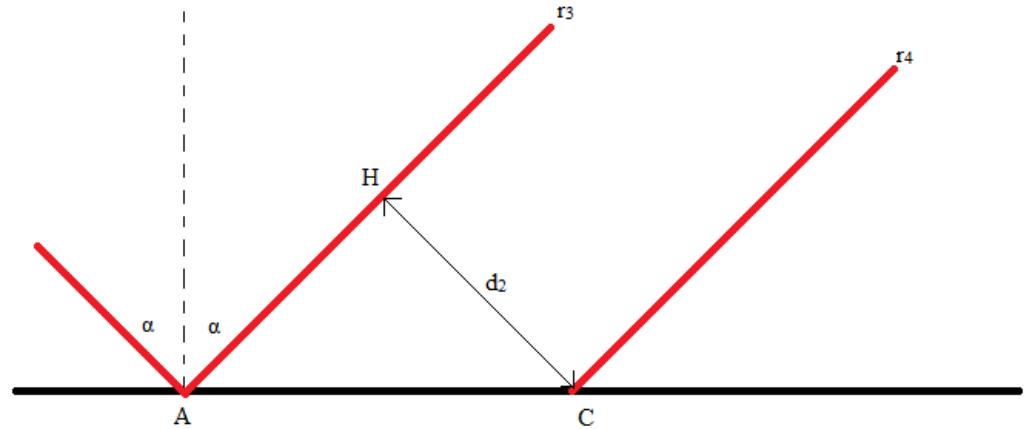
觀察上圖，可得知 $\overline{DB} = T \tan \beta$ ，而 $\angle DAE = \alpha$ ，故 $\overline{DE} = T \tan \alpha$ ，因此可得 $\overline{BE} = \overline{DE} - \overline{DB} = T(\tan \alpha - \tan \beta)$ 。並觀察三角型 BEF，可發現 $\angle BEF = \gamma = \alpha$ ，故得 $d_1 = \overline{BE} \cos \angle BEF = T(\tan \alpha - \tan \beta) \cos \alpha$ 。

此外又 $n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta$ ，所以 $\beta = \sin^{-1} \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \alpha \right)$ 。合併兩式，可得

$$d_1 = T(\tan \alpha - \tan(\sin^{-1} \frac{n_1}{n_2} \sin \alpha)) \cos \alpha = T(\tan \alpha - \frac{\frac{n_1}{n_2} \sin \alpha}{\sqrt{1 - (\frac{n_1}{n_2} \sin \alpha)^2}}) \cos \alpha。$$

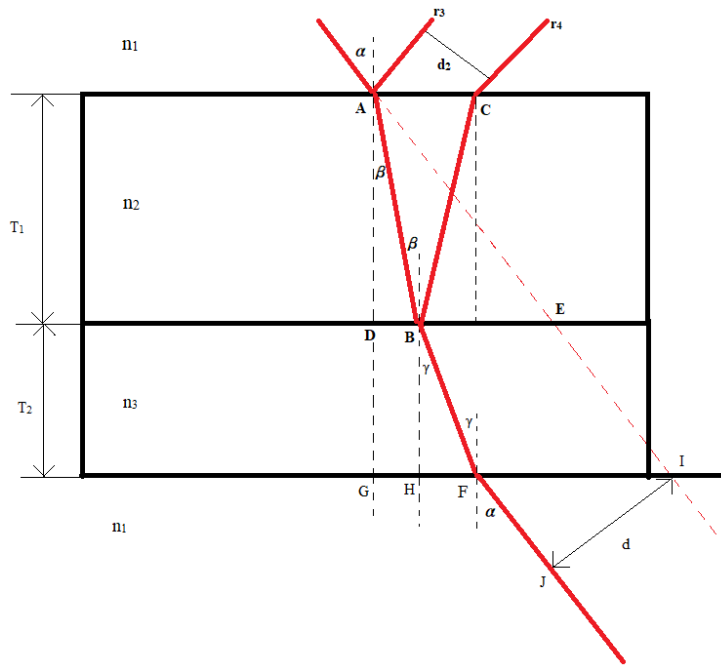
觀察上圖，將從 A 點反射的光定義為 r_3 ，將從 C 點折射的光定義為 r_4 ，可發現 r_3 與上方界面的法線夾 α 角。而 A 點的折射光將行進至 B 點，並在 B 點處部分反射，而塊材內部的光將與下方界面的法線夾 β 角，又透過反射定律可知從 B 點反射的光也與法線夾 β 角，再根據幾何分析，可發現經 B 點反射的光在行進至 C 點進行折射時，C 點的折射角與 B 點的反射角互為內錯角，故 C 點的折射角為 β ，最後在 C 點處透過折射定律可知， $n_2 \sin \beta = n_1 \sin \alpha$ ，所以 r_4 也與法線夾 α 角， r_3 與 r_4 平行。

觀察上圖，可知 $\overline{DB} = T \tan \beta$ ，且透過上述推導，可知在塊材內部的光對 C 點的入射角為 β ，故 $\overline{BG} = T \tan \beta$ ，而 $\overline{AC} = \overline{DG} = 2T \tan \beta$ 。如下圖二十，觀察三角形 AHC，發現 $\angle ACH = \alpha$ ，則 $d_2 = \overline{AC} \cos \angle ACH$ ，即 $d_2 = 2T \tan \beta \cos \alpha$ 。



圖二十 塊材上方界面的討論

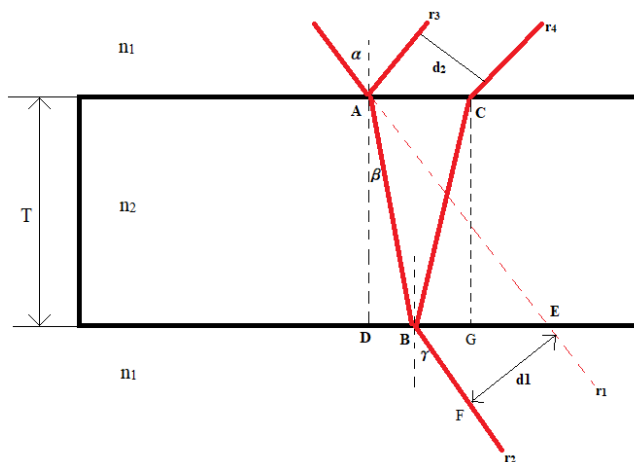
首先討論下圖二十一兩種塊材的情況，經上述討論，可知 $\overline{DB} = T \tan \beta$ ，故 $\overline{GH} = \overline{DB} = T_1 \tan \beta$ ，接著觀察下圖，可發現 $\overline{HF} = T_2 \tan \gamma$ ，又觀察三角形 AGI，可發現 $\overline{GI} = (T_1 + T_2) \tan \alpha$ ，故 $\overline{FI} = \overline{GI} - (\overline{GH} + \overline{HF})$ ，即 $\overline{FI} = (T_1 + T_2) \tan \alpha - (T_1 \tan \beta + T_2 \tan \gamma)$ ，最後透過三角形 IFJ，可知 $\angle FIJ = \alpha$ ，故入射光與出射光之間的偏移量 $d = \overline{FI} \cos \angle FIJ$ ，即為 $d = ((T_1 + T_2) \tan \alpha - (T_1 \tan \beta + T_2 \tan \gamma)) \cos \alpha$ 。



圖二十一 光在兩種塊材中的折射

再由兩種塊材推廣至多種塊材，假定現環境折射率為 n_e ，以 α 角入射第一塊塊材，有 m 種塊材，各自具折射率 n_j 、厚度 T_j 與折射角 θ_j ， j 為 1 至 m 的整數。首先透過折射定律在各個介面的情況，可合併各式得 $n_e \sin \alpha = n_1 \sin \theta_1 = \dots = n_m \sin \theta_m$ ，即 $n_j \sin \theta_j = \text{const.}$ 。接著透過上述推導可知，最終出射光與原入射光的偏移量 d 與光線在各塊材中的橫向貢獻總合相關，而方程式為 $d = (\sum_{j=1}^m T_j (\tan \alpha - \tan \theta_j)) \cos \alpha$ ，且其中 $\theta_j = \sin^{-1}(n_e \sin \alpha / n_j)$ 。

- 將「實驗預習 3」查到的折射率當作下圖二十二中的 n_2 ， $n_1=1$ 為空氣， $T=20\text{mm}$ ，畫出五條入射角 α 相對於位移 d_1 的關係圖(請將 α 在 0 度到 80 度間至少改變 9 個不同角度)。



圖二十二 光在塊材中的折射

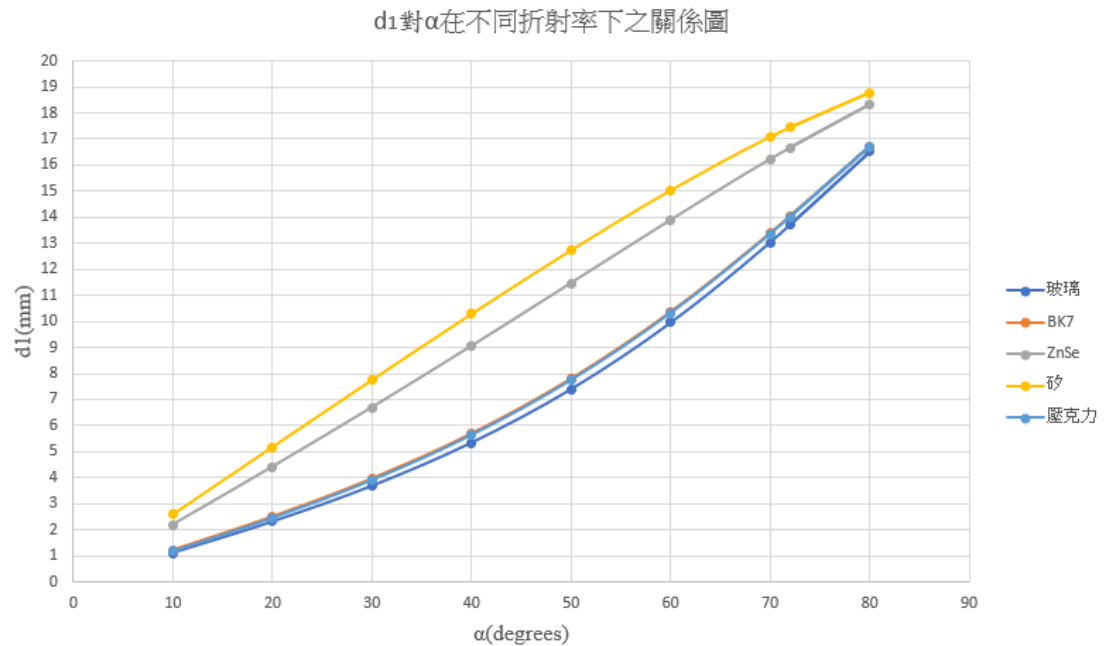
答：

- i. 玻璃：1.46
- ii. BK7：1.51509
- iii. ZnSe：2.66
- iv. 矽：3.8827
- v. 壓克力：1.51

透過上述推導可得知， $d_1 = T \left(\tan \alpha - \frac{\frac{n_1}{n_2} \sin \alpha}{\sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \alpha\right)^2}} \right) \cos \alpha$ ，代入題目

條件，得 $d_1 = 20 \left(\tan \alpha - \frac{\frac{1}{n_2} \sin \alpha}{\sqrt{1 - \left(\frac{1}{n_2} \sin \alpha\right)^2}} \right) \cos \alpha$ ，故可透過此關係得下圖二

十三。

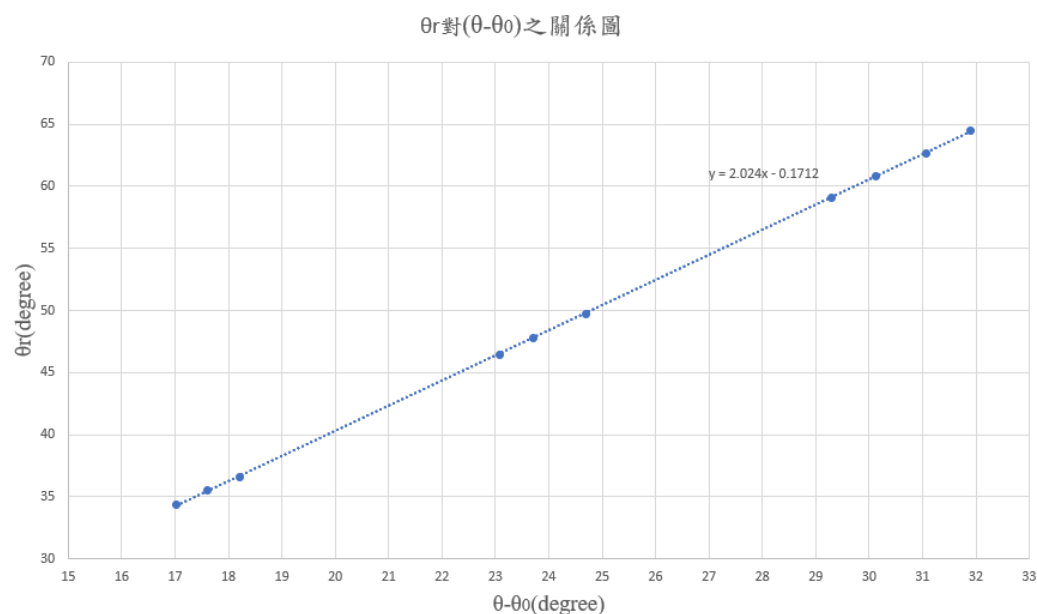


圖二十三 d₁對α在不同折射率下之關係圖

(3) Q&A 題目作答

1. 在光的反射定律實驗裡，請將量出的 $(\theta - \theta_0)$ 及其相對的 θ_r 數據，以最小平方方法(linear least square fit)，求出一條直線，並將此直線的斜率與理論值相比較。

答：



圖二十四 θ_r 對 $(\theta-\theta_0)$ 之關係圖

趨勢線的斜率為 2.024，令 $\varphi = (\theta - \theta_0)$ ，根據反射定律與光槓桿原理，可知理論上當鏡面角度差為 $\Delta\varphi$ 時，法線角度差同為 $\Delta\varphi$ ，而反射角差將為 $2\Delta\varphi$ ，入射光與反射光夾角的角度差也為 $2\Delta\varphi$ ，故 θ_r 的角度差為 $2\Delta\varphi$ ，故可知理論上斜率 $m = \frac{\Delta\theta_r}{\Delta(\theta-\theta_0)} = \frac{\Delta\theta_r}{\Delta\varphi} = 2$ ，而實驗值與理論值誤差為 1.2%。

2. 上題中所求出的直線方程式，理論值為 $y = ax + b$ ($a \neq 0, b = 0$)，若實驗所得知方程式中 $b \neq 0$ ，造成 b 值不為 0 之主要可能因素為何？若反射平面不在旋轉台主軸上，對 a 或 b 的影響何者較大，為甚麼？

答：造成 b 值不為 0 的主要可能因素為反射平面不在旋轉台主軸上，當反射鏡不在旋轉台主軸上時，旋轉台的轉動將造成光點水平平移 $\Delta X = d(\sec(\theta - \theta_0) - 1)$ ， d 為反射平面與旋轉台主軸的垂直距離，然而，由於反射定律依然成立，故 $(\theta - \theta_0)$ 與 θ_r 仍呈兩倍關係，因此當轉動鏡面角度差為 $\Delta\varphi$ 時， θ_r 的角度差仍為 $2\Delta\varphi$ ，使得直線方程式斜率依舊為 2，但光點水平平移造成的數據 X 增量將使斜直線無法通過原點，故 b 值不為 0，也因此若反射平面不在旋轉台主軸上，對 b 的影響較大。

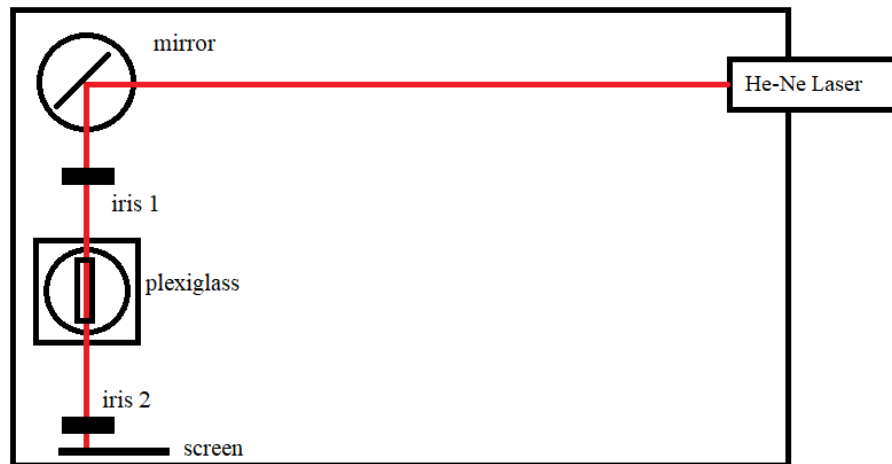
3. 在光的反射定律實驗中，我們使用精密旋轉台來調整入射角度，請問旋轉台上此次實驗中轉一最小刻度的角度為何？

答：此旋轉台的最小刻度為 2 角分，即 $2' = \left(\frac{2}{60}\right)^\circ = \left(\frac{1}{30}\right)^\circ$ ，為 $\frac{1}{30}$ 度。

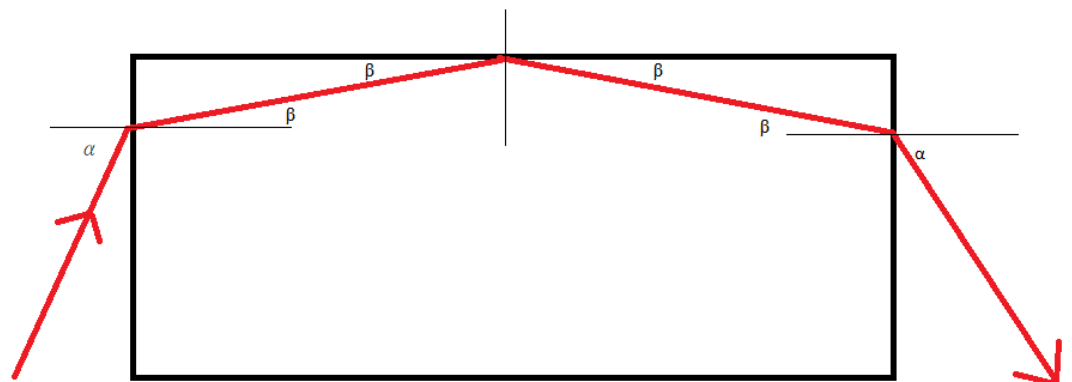
4. 在光學課本上提到的全反射，就現有的實驗設備該怎麼設計實驗才可量測到全反射角？請列出所需要之器材與實驗步驟。

答：需準備氦氖雷射、三個光圈、一面反射鏡、旋轉台與塊材。

首先在光學桌板長邊建立雷射水平，接著在光學桌板短邊架設 2 個平行短邊的光圈，並如下圖二十五架設反射鏡，使得雷射光穿過平行短邊的光圈。接著將壓克力組裝在旋轉台上，並注意壓克力對雷射的入射面需置於旋轉台直徑上，以保證轉動旋轉台時入射光點不會偏移。接著架設壓克力，將壓克力垂直正對雷射，紀錄旋轉台讀數。開始轉動旋轉台使得雷射從壓克力的側邊出射，持續調整旋轉台角度使得雷射入射角漸大，直到雷射無法從壓克力側邊出射即為雷射在壓克力中進行全反射，紀錄旋轉台讀數，減去原先旋轉台讀數即為雷射入射角。最後推導全反射相關公式以即壓克力折射率 n 與雷射入射臨界角 α 和全反射臨角 β 的關係。



圖二十五 全反射實驗光路架設

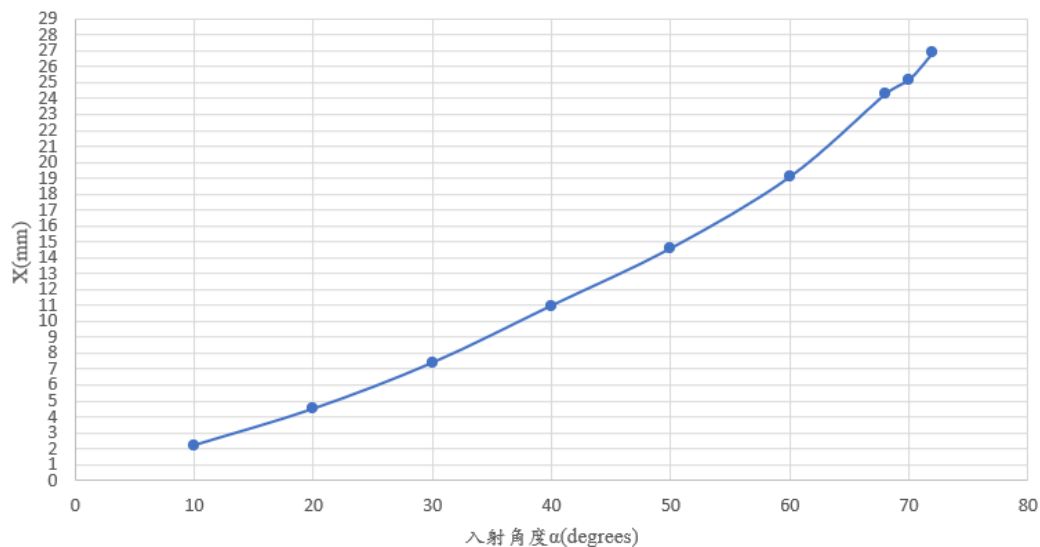


圖二十六 全反射實驗示意圖

5. 在光的折射定律實驗中，請畫出光點於屏幕上位移量 d_1 與入射角度之關係圖，並與「實驗預習 5」比較。請說明差異的原因。

答：將光的折射實驗數據作圖如下：

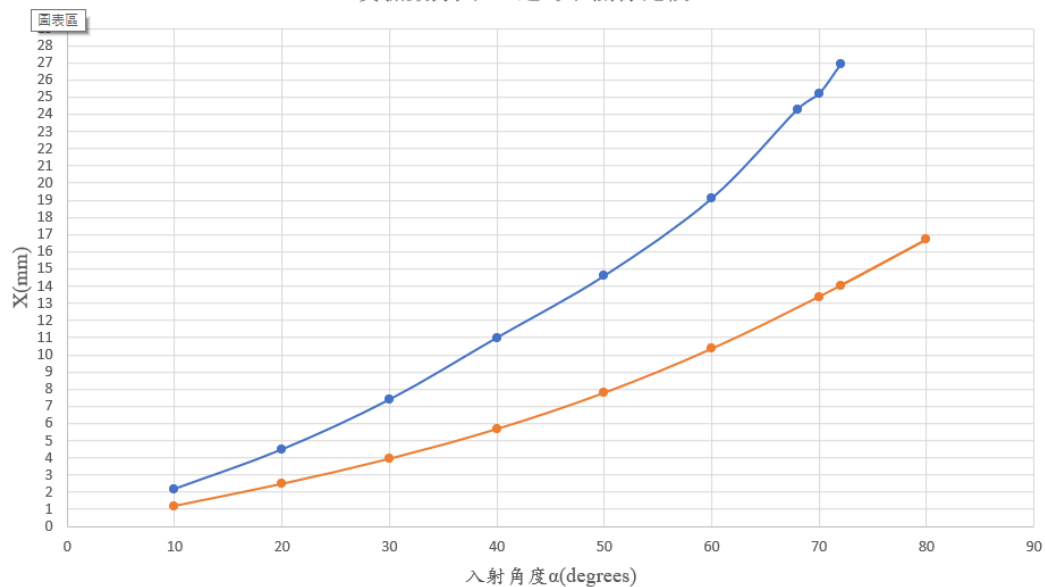
實驗數據中入射角度 α 對光點在屏幕位移量 X 之關係圖



圖二十七 入射角度 α 對光點在屏幕位移量 X 之關係圖

而將上圖與 BK7 關係圖做比較得下圖：

實驗數據與 BK7 之 α 與 X 關係比較



圖二十八 實驗數據與 BK7 之關係比較

由上圖可見兩者有著一定的誤差，其可能來自於塊材的表面平整不一，導致在折射時造成干擾，且屏幕上的雷射光點過大，尤其在大角度下雷射光點照射到屏幕時將造成投影扭曲，光點被拉長，造成難以用肉眼判讀，此外屏幕上的紙張是否完全貼齊屏幕，屏幕

是否平行桌板也將影響數據。

(4) 實驗結果討論

本次實驗透過反射鏡的調整與塊材角度的調整驗證反射定律與折射定律，且找出塊材折射率。在光的反射實驗中，應注意反射鏡平面需包含旋轉主軸，且當鏡面轉動時光點不可在鏡面上偏移，否則將導致將最終數據 $(\theta - \theta_0)$ 與 θ_r 繪圖時直線方程式 $y = ax + b$ 偏離理論值 $a = 2$ 、 $b = 0$ 。而在光的折射實驗中，需特別注意數據的判讀與估計值，因此實驗數據較為精密，因此估計值、光點中數據的選擇等等數據中微小的差異將會影響整體實驗的結果。

五、參考資料及文獻：

- [1] Eugene Hecht, *Optics*, 5th ed. (Pearson Education, 2017), Chapter 4.3-4.4, pp.104-111.
- [2] Frank L. Pedrotti, Leno S. Pedrotti, Leno M. Pedrotti, *Introduction to Optics*, 3th ed. (Addison-Wesley, 2006), Chapter 2.4-2.5, pp.22-25.
- [3] Schott, *Optical Glass Datasheet*,
https://refractiveindex.info/download/data/2017/schott_2017-01-20.pdf
- [4] D. E. Aspnes, A. A. Studna, "Dielectric functions and optical parameters of Si, Ge, GaP, GaAs, GaSb, InP, InAs, and InSb from 1.5 to 6.0 eV", 1983
- [5] Douglas C. Giancoli, *普通物理 下冊*, 第 32-4 章
- [6] 桑鳴幹, *透鏡*, 第 151 頁