

# 教育部 106 學年度普通型高級中等學校數理及資訊學科能力競賽 物理科決賽實驗試題

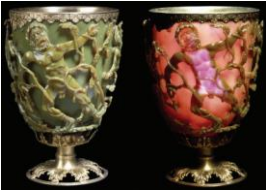
## 一、題目

1. 99 年學測-自然科第 59 題，大考中心公布的標準答案為(D)，全文如下：

大英博物館中收藏一只四世紀的羅馬酒杯，其獨特之處為：白天在光線照射下，酒杯的顏色是綠色的；晚上若燈光由內透射，則呈紅色。也就是說，它具有反射光與透射光為互補光的特徵。（兩道光為互補光的意義為此兩道光可合成為白色光。）分析這只酒杯的化學成分，發現和現代無色透明玻璃相近，主要成分均為二氧化矽。比較特別的是含有金、銀混合比例 3：7 的奈米顆粒，其粒徑約為 70 奈米。下列相關敘述，何者正確？ (A) 1 奈米等於  $10^{-9}$  公分 (B) 玻璃日夜顏色不同是二氧化矽的主要特徵 (C) 金屬奈米顆粒對紅光和綠光的反射能力約相同 (D) 羅馬酒杯中的金屬奈米顆粒對綠光的反射能力高於對紅光的反射能力 (E) 羅馬酒杯中的金屬奈米顆粒對綠光的吸收能力高於對紅光的吸收能力。

各位物理高手或許已發現，題目所說透射的”紅色”可能並非是指單純的紅色，否則就會與其”它具有反射光與透射光為互補光的特徵”的敘述不符。

此外，題目中所提到酒杯呈現的兩種顏色，如下左圖所示，但此圖的兩張照片(尤其是最左邊那張)，可能需在特殊採光下才能拍到這種效果。最右邊的圖則是在一般光線下所拍到的可能情況之一，從這張照片可發現題目中所提到的”白天在光線照射下，酒杯的顏色是綠色的”可能並不全然正確。



請注意，圖片僅供參考，其顏色可能因影印而略有失真。

Lycurgus Cup (British Museum; AD fourth century).

實驗器材中有一管奈米粒子溶液(請勿開啟瓶蓋)，與羅馬酒杯中的奈米粒子有類似的光學特性，

(1a) 請觀察奈米粒子溶液，並提出假設，說明其呈現目前你所看到顏色的可能原因。

(1b) 請利用相關實驗器材，設計實驗方法並驗證你所提出的想法。

(1c) 經過上述的親身實驗觀察，身為物理高手的你，對於上述學測試題的答案，是否有自己的一番見解，請用實驗結果詳述之。

2. 請利用相關實驗器材，量測光碟片之軌距。  
並利用所得軌距結果推估紅光雷射波長。

3. 請利用相關實驗器材，以光學方法量測細線線徑。  
並利用所得線徑結果推估紅光雷射波長。

4. 請利用相關實驗器材，分別量測壓克力材料對綠光雷射、紅光雷射及一般室內光線的折射率。

## 二、實驗器材

光碟片上有密集的同心圓凹槽軌道，凹槽間距(軌距)相同，請觀察並思考其照射光線後所呈現的效果及其可能機制，或許有些相關小題會需要用到這些現象及原理。

| 器材名稱   | 規格                                | 數量   |
|--------|-----------------------------------|------|
| 奈米粒子溶液 | 待測物(含比色管)                         | 1 管  |
| 空比色管   | 4.5 mL                            | 1 只  |
| 壓克力塊   | 待測物(求折射率)                         | 1 塊  |
| 光碟片    | 待測物(求軌距)                          | 2 片  |
| 紅光雷射   | 待測物(求波長)                          | 1 支  |
| 綠光雷射   | 波長 533 nm                         | 1 支  |
| 手電筒    | 白光，可調整聚光情況，<br>三種照明模式(強光，弱光，間歇模式) | 1 支  |
| 平面鏡    | 一般用                               | 1 塊  |
| 放大鏡    | 1.5 "                             | 1 支  |
| 漆包銅線   | 待測物(求線徑)                          | 1 條  |
| 縫衣針    | 一般用                               | 10 支 |
| 絕緣膠帶   | 一般用，黑色                            | 1 卷  |
| 紙尺     | 100 cm (最小刻度 1 mm)                | 1 條  |
| 鹼性電池   | AAA                               | 6 顆  |
| 偏振片    | 4.5 cm × 4.5 cm                   | 2 片  |
| 無塵紙    | 11 cm × 21 cm                     | 5 張  |
| 暖暖包    | 手握式，平均溫度 51°C 可持續 24 小時           | 1 包  |
| 雙面膠帶   | 一般用，含膠台                           | 1 卷  |
| 隱形膠帶   | 一般用，含膠台                           | 1 卷  |
| 剪刀     | 一般用                               | 1 支  |
| 小刀     | 一般用                               | 1 支  |
| 量角器    | 最小刻度為 1°，量測範圍 0° 至 180°           | 1 只  |
| 直尺     | 40 cm (最小刻度 1 mm)                 | 1 支  |
| 切割墊    | B5                                | 1 片  |
| 方格紙    | A4 大小，最小刻度 1 mm                   | 2 張  |
| 紙張     | 白色，A4                             | 5 張  |

|     |                |     |
|-----|----------------|-----|
| 珍珠板 | 白色，A4          | 3 片 |
| 珍珠板 | 黑色植絨，A4        | 4 片 |
| 水   | 600 ml         | 1 瓶 |
| 計算器 | 非記憶型科學用(參賽者自備) | 1 台 |

#### 注意事項

1. 以上器材不一定會全部使用到。
2. 請勿直視雷射。
3. 小心暖暖包可能產生高溫而燙傷。
4. 裝有奈米粒子溶液之比色管請勿傾倒放置及開啟蓋子，避免溶液漏出，影響實驗結果。
5. 手電筒按鈕重壓：手電筒開關。
6. 手電筒按鈕輕壓：切換照明模式，強光，弱光，間歇模式。
7. 手電筒旋轉伸縮鏡頭：調整燈光聚集情況。

### 三、說明

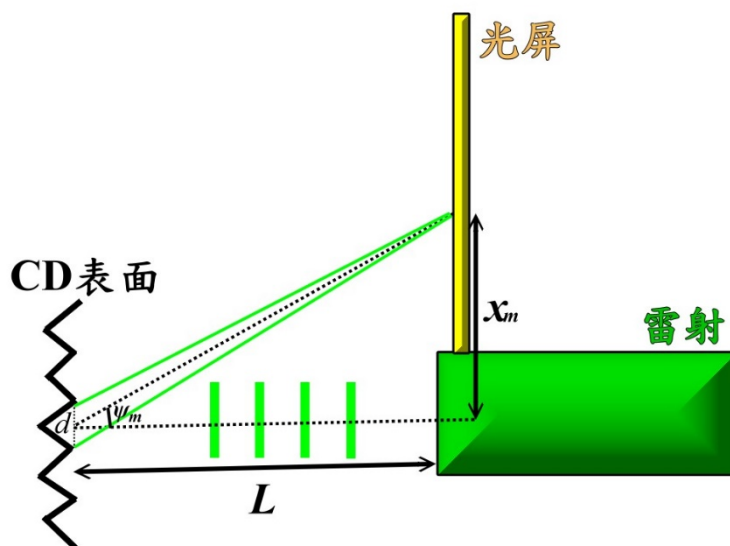
1. 請先核對試題及答案卷上之編號與您的編號是否相同，若不同請立即報告。
2. 請立即清點器材，如有短缺請立即告知。
3. 可使用非可程式工程用計算機。
4. 實驗報告請書寫於答案卷上，內容必須包含
  - (1) 實驗設計之理論基礎
  - (2) 實驗步驟
  - (3) 數據紀錄
  - (4) 數據分析(不必考慮誤差傳遞，要注意有效數字)
  - (5) 討論(例：可能的誤差來源)
5. 實驗操作過程之評審，主要依據實驗報告，所以務必在報告中詳細記載。
6. 實驗完畢後，請將所有器材還原，桌面收拾乾淨。
7. **試題、答案卷與所有實驗數據圖表**必須一併繳回。
8. 器材中含玻璃製品，務必小心使用，並注意安全。操作過程中，如有器材破損請立即報告。因操作疏失造成器材毀損，導致無法使用，必須自行負責。

物理科決賽實驗試題參考解

實驗原理

光碟干涉現象：

波長  $\lambda$  的雷射出射光徑與光屏垂直，且當雷射光垂直入射至光碟之凹槽軌道，軌距  $d$  相鄰的軌道再反射其光波，其反射角度為  $\psi_m$ ，與光碟片距離為  $L$  之光屏上可發現其反射之光波產生的干涉亮紋，其亮紋與雷射光出射點距離為  $x_m$ ， $\psi_m = \tan^{-1}(\frac{x_m}{L})$ 。當亮紋發生時，造成干涉的光波其光程差為  $m\lambda = d\sin\psi_m$ ， $m$  為正整數。離雷射光出射點最近的干涉亮紋為  $m=1$ ，並量測其  $x_1$ 、 $L$ ，可得其光碟軌距為  $d = \frac{\lambda}{\sin(\tan^{-1}(\frac{x_1}{L}))}$ 。



圖一、光碟干涉的示意圖

透光材料的呈色

不透光材料的呈色，一般來說為此材料所吸收色光的互補色(反射光)。

透光材料的呈色，則為透射光顏色(吸收光的互補色)。

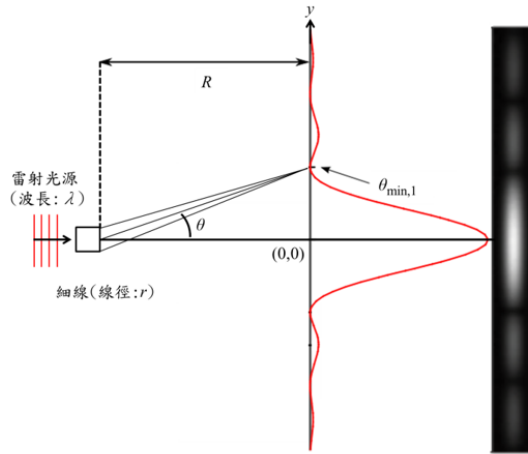
自製簡易分光儀：

根據光碟干涉的原理，可知亮紋位置與波長有關，波長越長離中心越遠，因此對入射光可產生色散的分光效果，可分析入射光的是由哪些色光所組成。如將混色白光照射奈米粒子溶液後的透射光，經過自製簡易分光儀進行分析，並與單純混色白光之光譜結果比較，可了解到相較於其他色光，綠光較不易穿透奈米粒子溶液。

### 細線繞射現象：

當波長為  $\lambda$  的雷射光束中心被線徑為  $r$  的細線阻擋，此時細線兩旁的邊界可視為兩個點波源，與單狹縫繞射中的狹縫兩邊緣的點波源相同，當這兩個點波源出射的光波在屏幕上強度疊加，因兩光波相位不同，而產生不同光強度的條紋。當在相距為  $R$  的光屏上之  $y$  位置發生第  $n$  暗紋發生，此時代表兩光波形成完全破壞干涉，其光程差為  $\frac{r}{2n} \sin\theta = \frac{\lambda}{2}$ 。因  $\theta$  很小， $\sin\theta \cong$

$\tan\theta = \frac{y}{R}$ ；可得第  $n$  暗紋之位置  $y = \frac{n\lambda R}{r}$ ，且相鄰兩暗紋間距為  $\Delta y = \frac{\lambda R}{r}$ 。

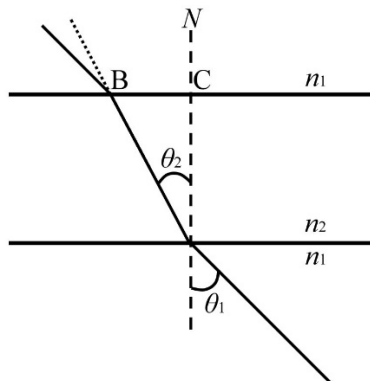


圖二、細線繞射原理示意圖

### 折射現象：

當單色光從折射率較小( $n_1$ )的第一介質入射至折射率較大( $n_2$ )的第二介質，因光在折射率大的介質中行進較慢，所以光線會在第二介質折射偏向法線，代表入射角( $\theta_1$ )大於折射角( $\theta_2$ )。在第一介質時其單色光波長為  $\lambda_1$ ，而入射至第二介質時，其波長改變為  $\lambda_2$ 。此光學現象可用司乃耳定律表示：

$$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{v_1}{v_2}$$

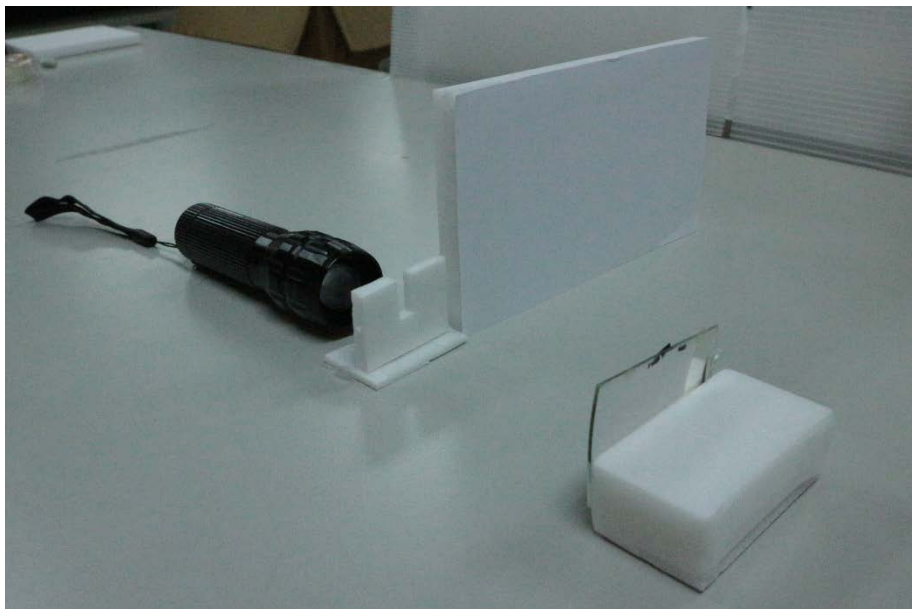
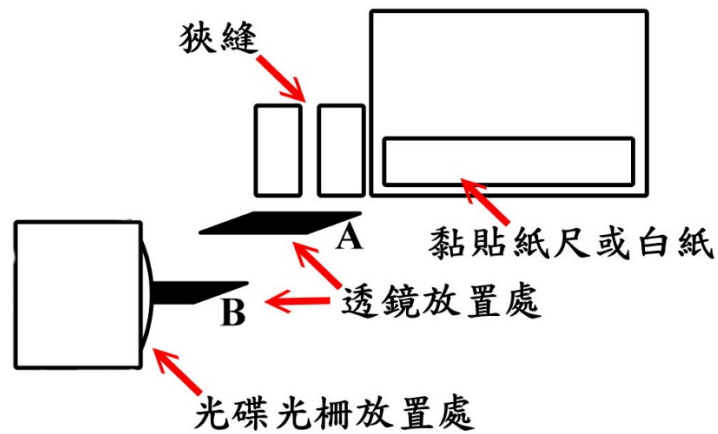


圖三、折射光徑示意圖

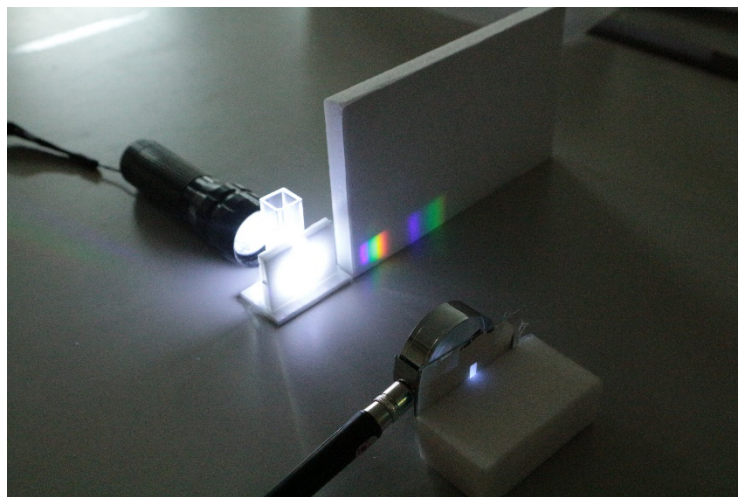
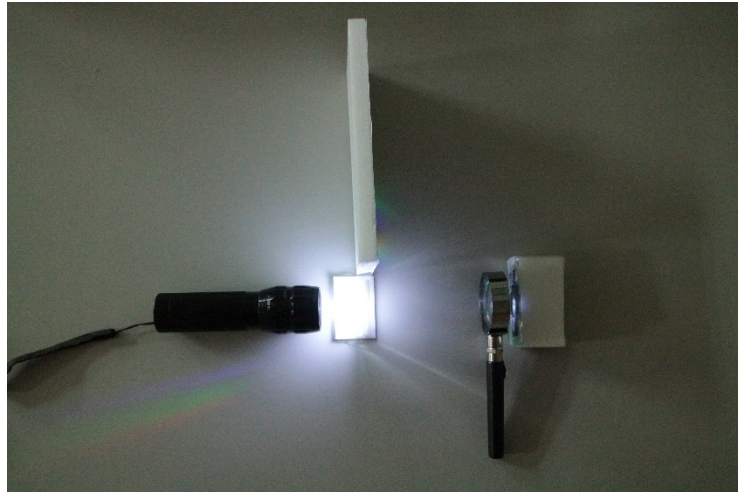
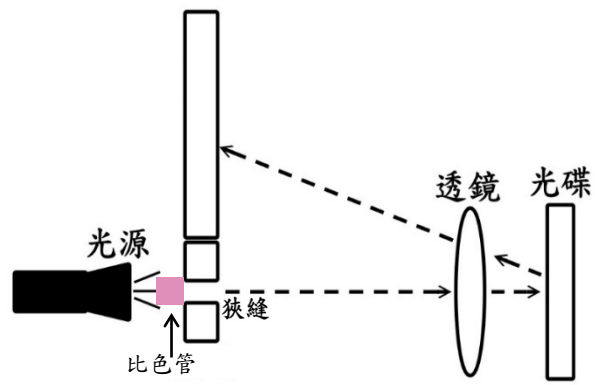
## 實驗步驟

### 1. 自製簡易分光儀

- 1-1. 以珍珠板製作，如圖四所示。
- 1-2. 實驗儀器架設如圖五所示。
- 1-3. 將裝有奈米粒子溶液的比色管放置在光源與狹縫中間，需注意通過狹縫的光線完全是經過奈米粒子溶液的透射光。
- 1-4. 可將透鏡與光碟前後移動，調整至適當的位置；並可使用剩餘的珍珠板遮蔽外界光線，使光譜更清晰。



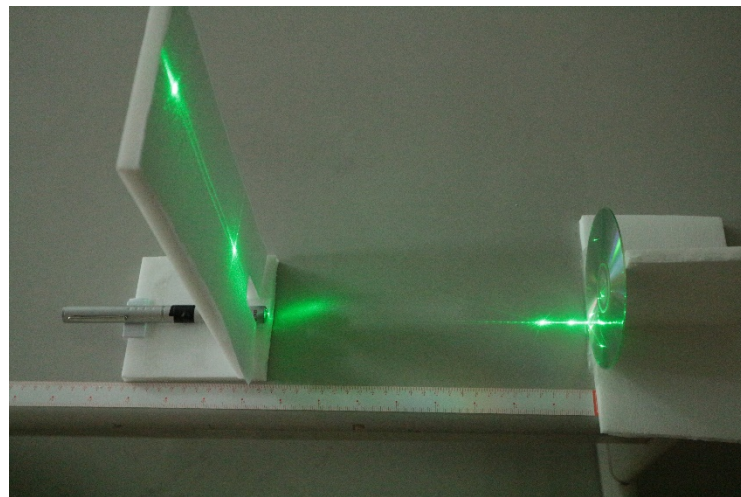
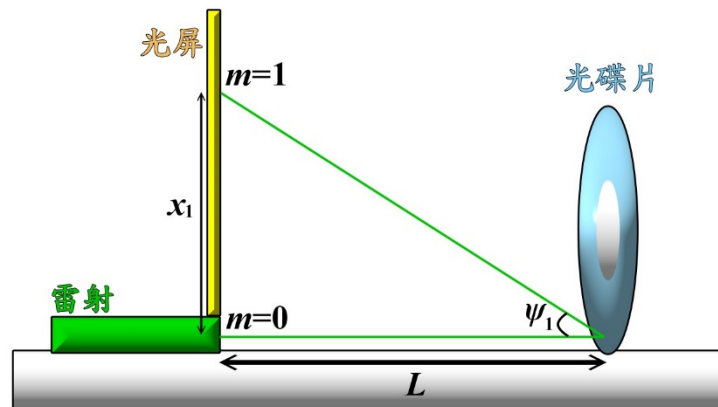
圖四、簡易分光儀示意圖



圖五、簡易分光儀架設示意圖(透鏡放置處為 B)

## 2. 光碟干涉

2-1. 將設備架設如圖六所示

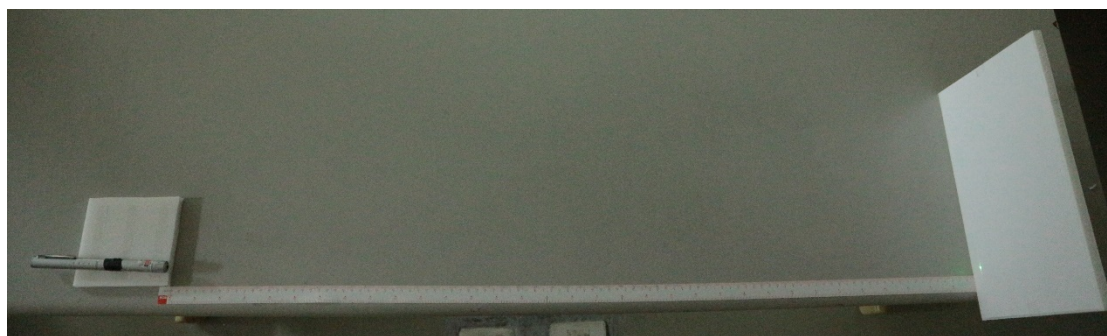
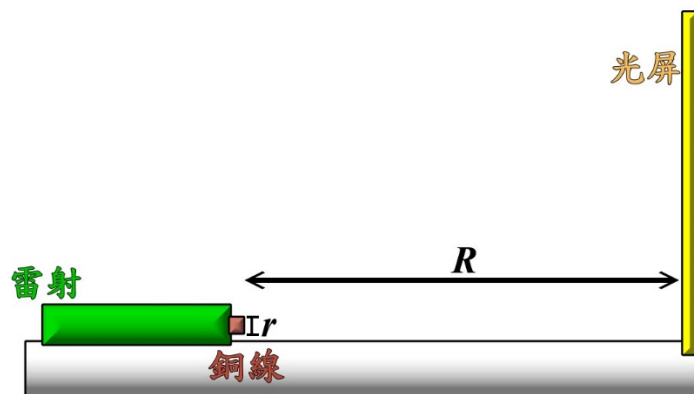


圖六、光碟干涉實驗裝置示意圖

- 2-2. 先在光碟片前放置垂直於桌面的平面鏡，將反射光可回到發射點位置，確定入射的綠光雷射可垂直光碟表面(其光碟也是垂直於桌面架設)。
- 2-3. 雷射在光碟上的反射點必須要在光碟片的圓心到桌面之法線上，可確實打到真正相鄰的軌道上。
- 2-4. 光屏亦架設垂直於桌面，可在光屏上觀察到  $m=1$  之干涉亮點，並量測  $m=1$  到  $m=0$  之距離  $x_1$  及光屏到光碟之距離  $L$ 。
- 2-5. 利用公式推算光碟軌距  $d$ 。
- 2-6. 將綠光雷射改成紅光雷射，重複步驟 2-1.~2-4.，並利用 2-5.之結果推算紅光雷射波長。



### 3. 細線繞射

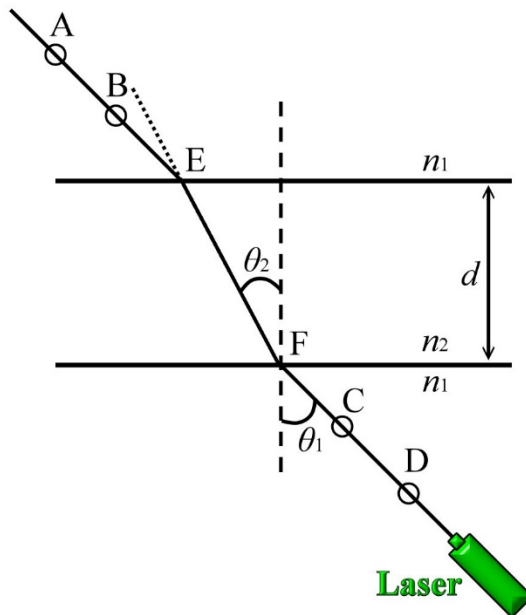


圖七、細線繞射架設示意圖

- 3-1. 在未裝上銅線之前，注意綠光雷射光徑必須垂直於光屏；校正後，將銅線裝上雷射輸出孔上，並將裝置架設如圖五所示。
- 3-2. 可在光屏上觀察到繞射現象，並在光屏上的紙紀錄最亮亮紋或最暗暗紋位置。
- 3-3. 量測銅線到光屏之距離  $R$ 。
- 3-4. 取下光屏上的紙，量測相鄰暗紋之間距(或亮紋間距)  $\Delta y$ 。
- 3-5. 利用已知綠光雷射波長以及量測到的  $R$  及  $\Delta y$  代入公式，求得細線線徑  $r$ 。
- 3-6. 將綠光雷射改為紅光雷射，並重複 3-1 至 3-4 之步驟；利用已知公式求得紅光雷射波長。

### 4. 利用插針法及雷射求壓克力折射率

- 4-1. 將白紙或方格紙貼黏固定至珍珠板上。
- 4-2. 固定綠光雷射位置並使用平面鏡確定雷射光可平行桌面射入壓克力平面。
- 4-3. 待測物的透明面垂直於紙面上，並固定待測物位置。
- 4-4. 利用縫衣針將 A、B 兩點確認雷射出射光線位置。
- 4-5. 在待測物另一側再利用縫衣針確定入射光路，其所標示為 C、D 兩點。
- 4-6. 將  $\overline{AB}$  及  $\overline{CD}$  的延伸光線畫出，與待測物的邊緣交點為 E、F，得待測物內的折射光路  $\overline{EF}$ 。
- 4-7. 量測不同入射角  $\theta_1$  及對應之折射角  $\theta_2$ ，利用其角度的正弦值作圖求趨近線  $\sin\theta_1 = A + B \sin\theta_2$ ，其斜率 B 為待測物之折射率  $n_{g2}$ 。
- 4-8. 將綠光雷射換成紅光雷射，重複 4-1~4-7 方式，求出其折射率  $n_{red}$ 。



圖八、雷射的插針法求折射示意圖

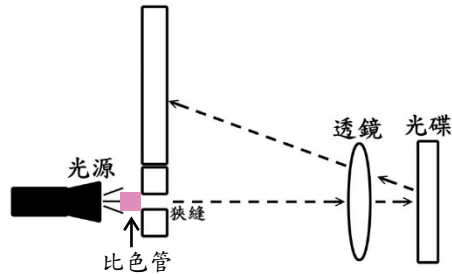
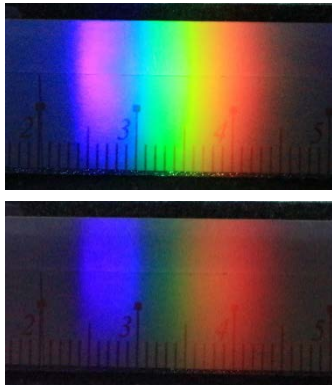
- 4-9. 如在一般室內光源下作插針法，則是利用縫衣針將 A、B 兩點確認固定，決定入射光線位置。
- 4-10. 在待測物另一側觀測 A、B 之大頭針的影像重疊，並在另插入大頭針與其影像重疊，此點為 C、D 兩點，可決定從待測物的出射光線位置。
- 4-11. 將  $\overline{AB}$  及  $\overline{CD}$  的延伸光線畫出，與待測物的邊緣交點為 E、F，得待測物內的折射光路  $\overline{EF}$ 。
- 4-12. 量測其入射角  $\theta_1$  及折射角  $\theta_2$ ，利用作圖及公式求出待測物之折射率  $n_2$ 。

## 實驗結果

### 1. 自製簡易分光儀

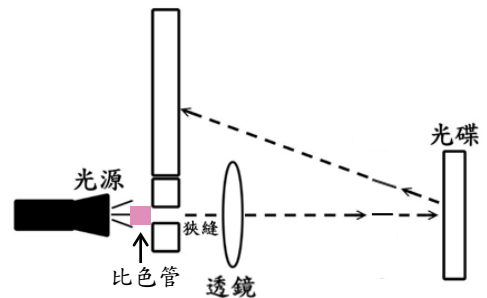
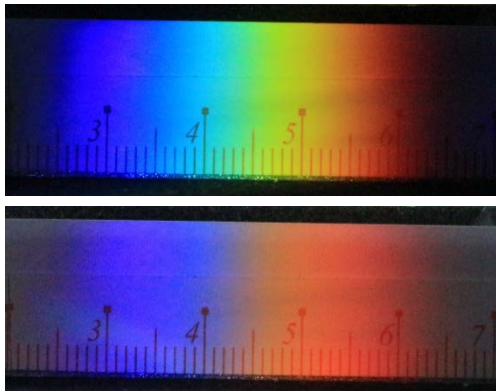
方法一：入射光與干涉光皆經過雙凸透鏡(透鏡放置處為 B)

由上而下：白光先經空比色管再射入簡易分光儀、白光先經裝有奈米粒子溶液的比色管再射入簡易分光儀



方法二：入射光經由雙凸透鏡聚焦在光柵上(透鏡放置處為 A)

由上而下：白光先經空比色管再射入簡易分光儀、白光先經裝有奈米粒子溶液的比色管再射入簡易分光儀



從以上實驗的觀察，經過奈米粒子溶液之透射光，各色光分光的狀況，發現綠光波段比其他色光有更明顯的減弱，根據一般透光材料之呈色原理，代表奈米粒子溶液有吸收綠光的情形。肉眼看到的透射光顏色為其他未被吸收之色光的合成顏色，也就是綠光的互補色。

另一個可能性為：未穿透的綠光是因為沿途陸陸續續被奈米粒子散射掉。即使此種只散射綠光的情況為真，從上述的實驗結果來看，也應可排除瑞利散射(散射強度與波長四次方反比)，否則透射光中的藍光應減弱更多。

在一般光線下，奈米粒子溶液的顏色呈現洋紅色(紅+藍)，幾乎與所觀察到的透射光色散結果相同，顯示即使奈米粒子會散射綠光，進入眼睛的綠光量相較於透射的紅、藍光卻是極微弱的。意即，進入眼睛的綠光量遠小於未穿透的綠光量，這現象顯示，當綠光從某一方向入射，被奈米粒子散射後的方向卻是四面八方。

若將奈米粒子溶液比色管的上下兩面與四個側面貼上不透光的黑色膠帶，僅在其中一個側面留一小觀測窗，然後將白光(手電筒+偏振片)斜向照射觀測窗，當眼睛前方的另一偏振片調整至適當偏振方向時，可觀察到觀測窗呈較明顯綠色。顯示奈米粒子會散射綠光。



眼前未加偏振片



眼前加偏振片並調整偏振方向

從實驗結果來看，學測試題中的(D)選項雖可能是正確答案，但其敘述有瑕疵，因奈米粒子尺寸遠小於紅綠光波長，所以”反射”應改為”散射”。而(E)選項，也有可能為正確答案。

**補充:** A. 究竟未穿透的綠光是被奈米粒子”吸收”或是”散射”呢? 其實都對。

奈米金屬粒子會與特定頻率電磁波發生侷域性表面電漿子共振的現象，以此例來說，奈米金屬粒子與綠光發生吸收→共振→散射的情況，但因粒子散射的綠光往四面八方，且有部分又會被周遭粒子吸收→共振→散射，所以能繼續往原穿透方向的綠光相對其他色光的比例較低。如同上述的實驗分光觀察。

#### B. 學測題相關資料

科學月刊

1. 2011 年 1 月號 493 期 68 頁

“出錯的標準答案—國王之杯成色原理，王崇人 教授”

2. 2011 年 12 月號 504 期 950 頁 “

“關於 99 學測的爭議題目—國王之杯成色原理，紀延平 老師”

3. 2011 年 12 月號 504 期 952 頁

“99 學測爭議題目有關國王之杯成色原理之回應，王崇人 教授”

4. 2012 年 11 月號 515 期 870 頁

“99 學測羅馬酒杯顏色變化試題之說明，大學入學考試中心”

5. 2012 年 11 月號 515 期 873 頁

“評論大考中心「99 學測羅馬酒杯顏色變化試題之說明」，王崇人 教授”

6. 2012 年 12 月號 516 期 939 頁

“論羅馬酒杯試題—談考試誤導教學，劉廣定 教授”

## 2. 光碟干涉

2-1.

已知綠光雷射波長  $\lambda_g$  為 533 nm，

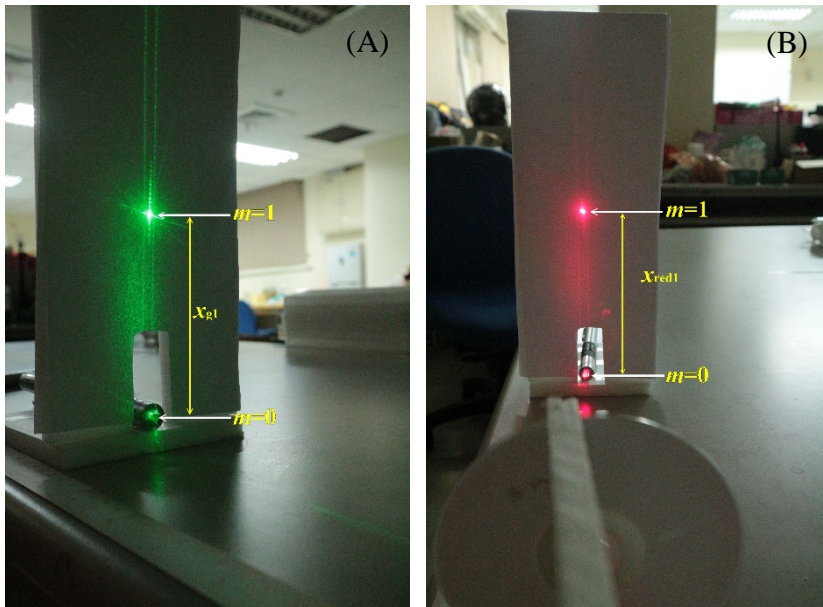
其光屏至 CD 之距離  $L_g$  為 25.45 cm，

$m=1$  之亮紋至雷射射出點( $m=0$  位置)之距離  $x_{g1}$  為 9.80 cm，

$$d = \frac{\lambda_g}{\sin(\tan^{-1}(\frac{x_{g1}}{L_g}))}$$

求得軌距  $d$  為 1483.24 nm

(由實驗室原子力顯微鏡量測結果，軌距約為 1503 nm)



(A) 綠光雷射和(B)紅光雷射的光碟干涉條紋位置

2-2.

再利用紅光雷射照射 CD 產生干涉條紋，

其光屏至 CD 之距離  $L_{red}$  為 29.50 cm，

$m=1$  之亮紋至雷射射出點( $m=0$  位置)之距離  $x_{red1}$  為 14.65 cm，

可求得紅色雷射波長  $\lambda_{red} = d \sin\left(\tan^{-1}\left(\frac{x_{red1}}{L_{red}}\right)\right) = 659.72 \text{ nm}$ ，

(由實驗室分光光譜儀量測雷射波長為 661 nm)

**補充:** 此小題亦可直接用第一小題的自製簡易分光儀來完成  
(不加透鏡且光屏處貼紙尺)

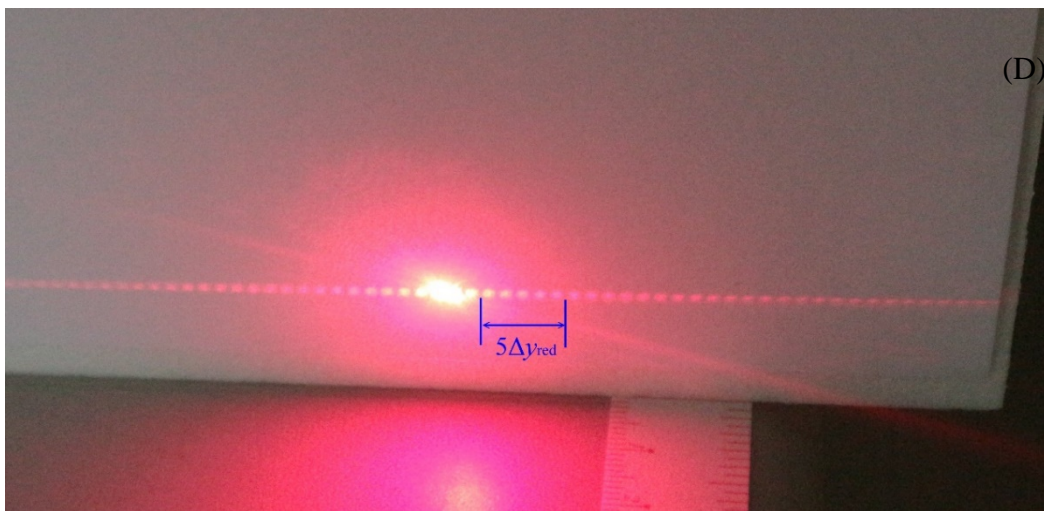
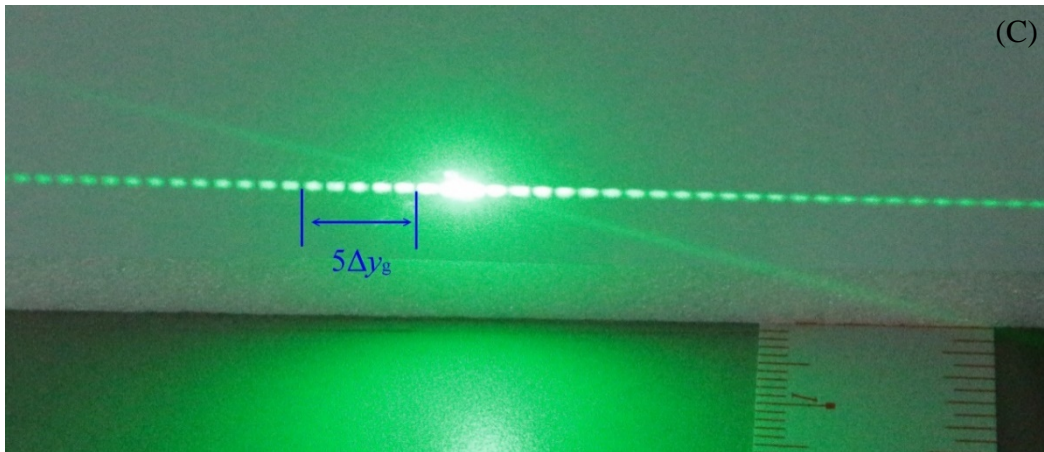
### 3. 細線繞射

3-1.

已知綠光雷射波長  $\lambda_g$  為 533 nm，  
其細線至光屏之距離  $R_g$  為 100.00 cm，  
光屏上暗紋平均間距  $\overline{\Delta y_g}$  為 0.213 cm，

細線線徑為  $r = \frac{\lambda_g R_g}{\overline{\Delta y_g}} = 0.025023$  cm

(利用游標尺量測線徑為 0.025 cm)



(B) 綠光雷射與(D)紅光雷射的細線繞射條紋之暗紋間距

3-2.

再利用紅光雷射做細線繞射，  
其細線至光屏之距離  $R_{red}$  為 99.00 cm，  
光屏上暗紋平均間距  $\overline{\Delta y_{red}}$  為 0.256 cm，

可求得紅光雷射波長  $\lambda_{red} = \frac{r \overline{\Delta y_{red}}}{R_{red}} = 647.06$  nm，

(由真實分光光譜儀量測雷射波長為 661 nm)

#### 4. 利用折射現象求壓克力之折射率

4-1.

綠光雷射：

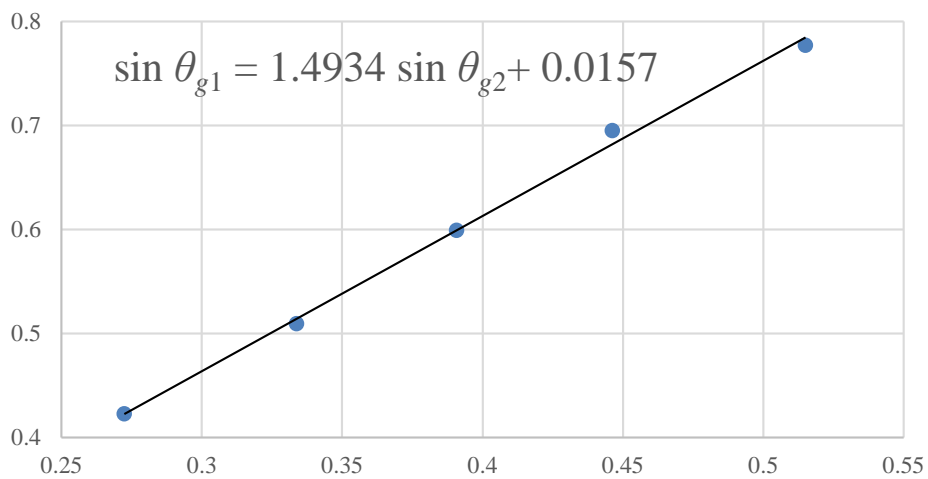
假設空氣折射率  $n_0$  為 1

綠光雷射由空氣照射壓克力塊時，公式為  $\frac{\sin\theta_{g1}}{\sin\theta_{g2}} = \frac{n_{g2}}{n_0} = n_{g2}$

| 入射角 $\theta_{g1}$ (°) | 折射角 $\theta_{g2}$ (°) | $\sin \theta_{g1}$ | $\sin \theta_{g2}$ |
|-----------------------|-----------------------|--------------------|--------------------|
| 44.0                  | 26.5                  | 0.694658           | 0.446198           |
| 36.8                  | 23.0                  | 0.599024           | 0.390731           |
| 25.0                  | 15.8                  | 0.422618           | 0.272280           |
| 51.0                  | 31.0                  | 0.777146           | 0.515038           |
| 30.6                  | 19.5                  | 0.509041           | 0.333807           |

將  $\sin \theta_{g2}$  對  $\sin \theta_{g1}$  作圖求其趨近線

綠光雷射



由趨近線斜率得知綠光雷射在壓克力的折射率  $n_g=1.4934$ 。

4-2.

紅光雷射：

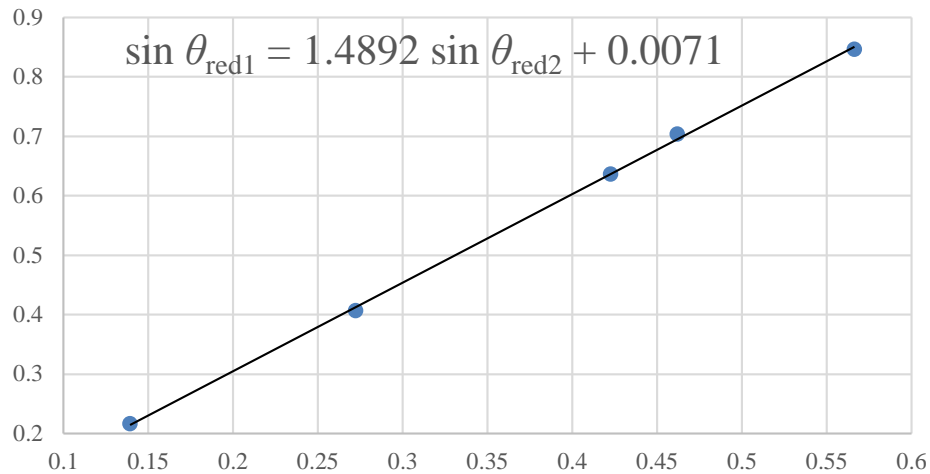
假設空氣折射率  $n_0$  為 1

紅光雷射由空氣照射壓克力塊時，公式為  $\frac{\sin\theta_{\text{red1}}}{\sin\theta_{\text{red2}}} = \frac{n_{\text{red2}}}{n_0} = n_{\text{red2}}$

| 入射角 $\theta_{\text{red1}}$<br>(°) | 折射角 $\theta_{\text{red2}}$<br>(°) | $\sin \theta_{\text{red1}}$ | $\sin \theta_{\text{red2}}$ |
|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 44.7                              | 27.5                              | 0.703395                    | 0.461749                    |
| 12.5                              | 8.0                               | 0.21644                     | 0.139173                    |
| 39.5                              | 25.0                              | 0.636078                    | 0.422618                    |
| 57.8                              | 34.5                              | 0.846193                    | 0.566406                    |
| 24.0                              | 15.8                              | 0.406737                    | 0.27228                     |

將  $\sin \theta_{\text{red2}}$  對  $\sin \theta_{\text{red1}}$  作圖求其趨近線

紅光雷射



由趨近線斜率得知紅光雷射在壓克力的折射率  $n_g=1.4892$ 。



4-3.

一般室內光線：

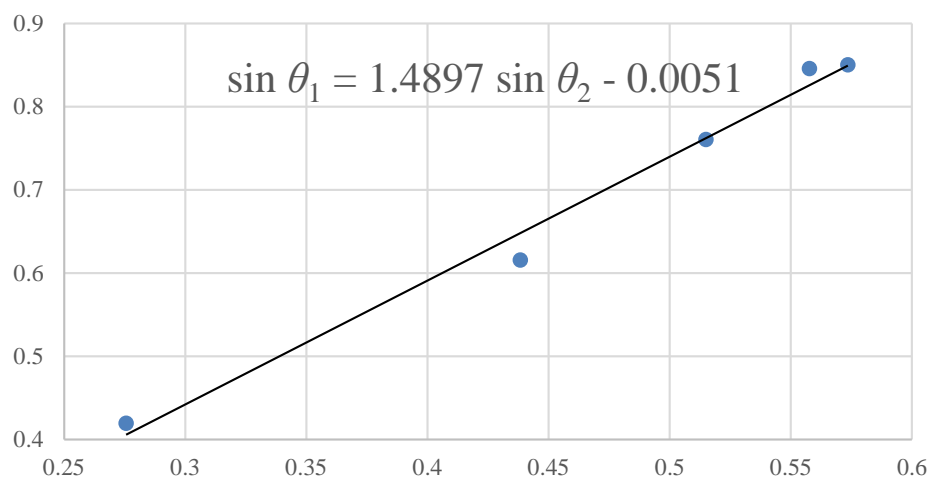
假設空氣折射率  $n_0$  為 1

一般光線由空氣照射壓克力塊時，公式為  $\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{n_2}{n_0} = n_2$

| 入射角 $\theta_1$ (°) | 折射角 $\theta_2$ (°) | $\sin \theta_1$ | $\sin \theta_2$ |
|--------------------|--------------------|-----------------|-----------------|
| 44.0               | 26.5               | 0.694658        | 0.446198        |
| 36.8               | 23.0               | 0.599024        | 0.390731        |
| 25.0               | 15.8               | 0.422618        | 0.272280        |
| 51.0               | 31.0               | 0.777146        | 0.515038        |
| 30.6               | 19.5               | 0.509041        | 0.333807        |

將  $\sin \theta_2$  對  $\sin \theta_1$  作圖求其趨近線

一般室內光線



由趨近線斜率得知一般室內光線在壓克力的折射率  $n_g=1.4897$ 。

## 討論

1. 當使用雷射時，可多利用平面鏡來確保垂直入射 CD 表面或屏幕。
2. 干涉或繞射實驗中，選擇適當的雷射、屏幕或 CD 之距離，可減少紀錄或量測亮紋或暗紋間距之誤差。
3. 繞射實驗中，可量測多個暗紋間距再求其平均值，可增加量測準確度。
4. 插針法時，要確實固定放置紙、珍珠板及壓克力，以免插針時造成誤差
5. 插針時，雖然兩點可決定入射或出射光線路徑，但可在光路上利用多個插針點標示，避免插針時造成誤差。
6. 插針時要確實垂直插入紙及珍珠板上，減少作大頭針疊影的誤差。
7. 畫入射光或出射光路時，要統一通過各孔洞相同位置，例如：孔洞的中心點。
8. 幾何光學的光路是可逆的，故可先確定出射光路，再求入射光路。
9. 選擇適當的光路角度，可避免因量測角度的誤差造成更多的折射率誤差。