

# 台灣二〇〇五年國際科學展覽會

科 別：地球與太空科學

作品名稱：大氣層厚度光學測量法之研究及創新

得獎獎項：大會獎第一名

候補作品:加拿大 2005 年科學展覽會

學 校：臺北市立麗山高級中學

作 者：陳冠樺、林震豪

評語與建議事項：

本作品由基本光學主題，探討分子的散射及其對光徑的影響，作者自製雙導光筒觀測大氣層散射情形以估測大氣的厚度。本作品具有科學意義，作者亦有量測數據且自製雙導光筒，本作品在地球與太空科學組中屬上乘之作，作者表達能力亦佳。



我是陳冠樺(左)，從小就很喜愛地球科學的事物。國中時參加科展得到全國科展物理組第一名是最難忘的經驗，當實驗過程中經歷許多挫折，學習如何獨立分析判斷增加組織能力。上高中後藉由學校的專題課程，對大氣做更深一步的探討。希望將來進入大學就讀能繼續往這個方向研究下去。

我是林震豪(右)。小學時，就對自然科學特別喜歡，常參與科學性的活動〔如：天文營、昆蟲營〕。進入高中後，在學校的專題課，讓我體驗到大學寫論文的過程，從研究中可學到許多課本以外的知識，也讓我領悟了一件事—真正動手做所累積出來的知識和經驗要比課本所學來的有意義且深刻多了！

## **novel apparatus for estimating the thickness of atmosphere by light scattering**

### **Introduction**

The main idea of the experiment is to set a system in order to effectively estimate the thickness of the atmosphere. On the theory of “Rayleigh Scattering” (small air molecules sizing about  $10^{-4} \mu\text{m}$ ), we developed an equipment that has two tubes. The tubes lead the scattered lights from two paths. One is called “air light” scattered in the ground air, and the other “sky light” is scattered in the sky and reflected by a beam splitter. The two paths are on the same plane; the scattered lights are perpendicular to the direction of sunlight and 100% polarized. We could adjust and measure the distance “**d**” of the air light path. We simultaneously observe and compare the intensity of the lights from the two paths with the electronic instrument made by ourselves. By using the known distance “**d**” and the reflection “**x**” of the beam splitter, we can calculate the thickness of the atmosphere. The experiment is simple, novel and easy to do in an extensive field at school. Researchers don’t have to use a bloom, radar or satellite to discover the atmosphere, but you could use a simple equipment to observe the features of it.

# 地球大氣層厚度的光學測量法之研究及創新

## 壹、摘要

這個專題研究的目的是要發展出一套簡單可靠的方法和廉價自製的器材，在地面上即能有效估測大氣層的厚度。我們小組研究光學中雷氏(Rayleigh)散射的原理，針對空氣分子對光線散射作用和特定方向之偏極效應，利用一已知散射長度之路徑，測量其偏極光的強度，同時比對由大氣層散射而來，在同一偏極面上的散射光強度，即能估算大氣層的厚度，方法簡單新穎，自製器材經實際測量和改進，有發展和推廣的價值。

## 貳、研究動機

地球科學課本中有兩章介紹地球大氣層的結構，基礎物理課本也介紹了大氣壓力的成因和計算方法，但前者並未討論大氣層厚度而後者提到大約有 32 公里。上網收尋大氣相關的網站居然說法各不相同，大氣層厚度由十幾公里到數百甚至超過幾千公里的都有，怎會這樣呢？隨著科技的進步，人類已發展出許多觀測大氣的技術和儀器，但大多結構複雜且造價昂貴，我們是否可能藉由基本的光學原理，研究簡易可行的方法，自製有效可靠的儀器來測量大氣層的厚度呢？

## 參、研究目的

- 一.理論方面，由基本光學出發，向上探討大氣分子的散射行為及其對光徑的影響。
- 二.實作方面，發展一套簡單、合理而可靠的方法，並自製儀器測量大氣層的厚度。

## 肆、研究設備及器材

### 一.自製器材

- (一).空氣分子散射藍光的觀測儀，及其分析程式。
- (二).雙導光筒比較式大氣層散射光觀測儀及大氣層厚度估測系統。
- (三).電子直讀式同步光度比較器。

### 二.廠製器材

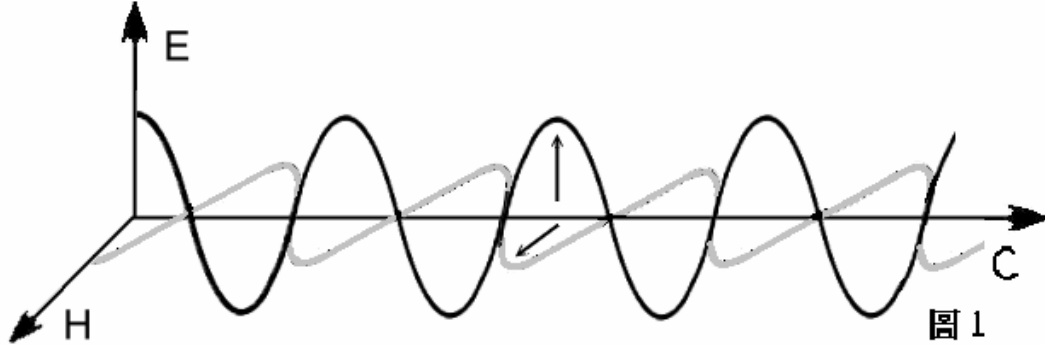
- (一).個人電腦及相關軟體。
- (二).示波器及數位電表等。

## 伍、研究過程或方法

### 一.回顧傳統大氣層的計測方法或實驗

- (一).人類對大氣層做有系統的探測最早始於 1749 年，在蘇格蘭地區即有學者使用風箏當作載具從事溫度的探空觀測，至 1895 年以後研究者利用無人氣球裝載感應儀器實施溫度、氣壓、濕度及風的觀測，探測高度可達 18 公里處。以飛機偵測大氣則始於 1925 年，同年亦開始使用無線電波作電離層探測，1928 年之後有雷達探空裝置，1935 年英國首先利用雷達從事高空大氣觀測，1946 年則用火箭來量測高層大氣，1970 年後衛星觀測技術成熟，人類對大氣層的瞭解更向前邁進。

(二).在查閱文獻時我們發現曾有學者 Wood[4]於 1920 年僅以圓筒和反射鏡配合光圈，即能測量及估算出大氣層的厚度，與現今所知的數據相差不多，他的實驗後經 Minaret[5]討論及 Vollmerl[6]重做；我們另外還參讀了幾本大氣光學的書籍[3,7,8]，整理出與我們研究主題相關的理論依據，並將前人的實驗裝置加以改進，使用精確的感測元件及雙導光管同步偵測大氣散射光強度，配合自行設計的分析程式完成實驗。



## 二.大氣散射及偏振的理論研究整理

### (一).光波的能量

1.在光學中，直線行進波的方程式可表示為

$$Y = Y_0 \sin(kx - \omega t) \text{-----(1)}$$

對一個向 +X 方向進行的光波我們可寫出

電場波為  $E = E_0 \sin(kx - \omega t) \text{-----(2)}$

磁場波為  $H = E_0 \sin(kx - \omega t) \text{-----(3)}$

其中  $E \perp H$ ，這是電磁磁波的通性，如圖 1

2.電場作用範圍內的單位體積之能量密度為

$$u = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2$$

磁場作用範圍內的單位體積之能量密度為

$$u = \frac{1}{2} \mu_0 H^2$$

因互相垂直的電場與磁場同時作用在一區則

$$u = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 + \frac{1}{2} \mu_0 H^2 = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 + \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 = \epsilon_0 E^2$$

由(2)式知  $E$  為弦式電場瞬時值，能量密度應計其平均值

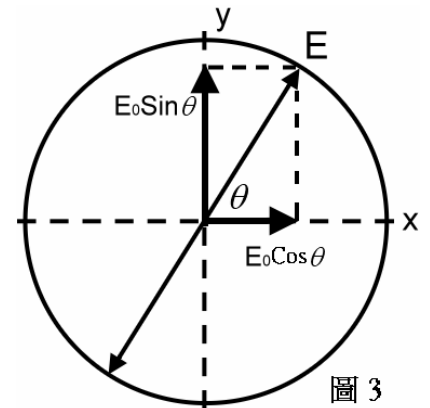
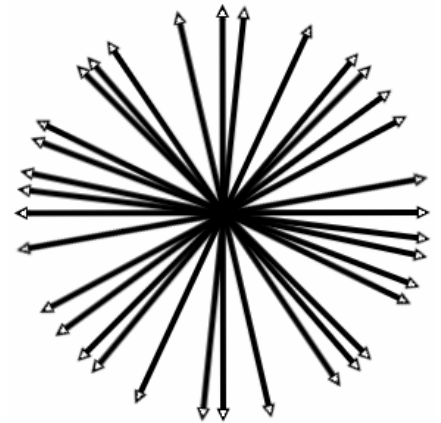
$$u = \epsilon_0 \frac{(E_0)^2}{2} \text{-----(4)}$$

3.由(4)式知電磁波能量可以只用電場能量來計量，而一般的光感測器主要是利用材料中電子所受的電場力而非磁場力，故我們對光波能量的討論均以電場表示即可。

4.光波的強度定義為每秒通過單位面積之能量：

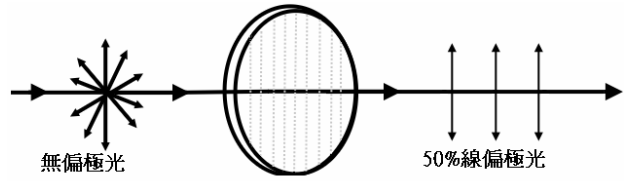
$$I = \epsilon_0 \frac{(E_0)^2}{2} \cdot C \propto E^2 \text{-----(5)}$$

故光波強度與電場振幅平方成正比，多數市售光電感測元件受光照射之輸出電流即正比於此光波強度。



(二).光的偏極

1.物質分子因熱運動而加速，其中帶電質點在加速時能輻射出電磁波，但熱運動是無規律的，故電磁波中電場的振動是各方向機會均等的，如圖 2 可視為無偏極光。



2.一電場振幅為  $E_0$  在單方向振動之偏極光可分解為沿  $x$  軸和  $y$  軸線偏振之兩分量的波，大小各為  $E_0 \cos \theta$  和  $E_0 \sin \theta$  如圖 3，由此自然光可看成 50% 為水平偏極，另 50% 為垂直偏極，如圖 4。

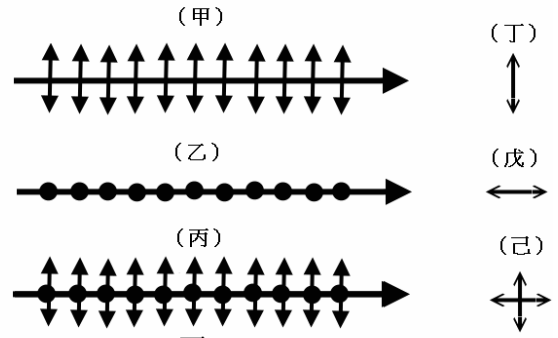


圖 4

3.自然光通過一片人造偏極板，可濾掉其中 50% 的偏極光，只有電場方向平行於偏極板之固有偏振方向的波才能通過，故光強度減半，即  $I = I_0/2$ 。

4.自然光中若混入單向線偏極光，則在此偏振方向上，混合光的強度將為最大值  $I_{\max}$ ，而在與其垂直方向上光的強度為最小值  $I_{\min}$ ，混合光波的百分偏振度定義為

$$P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \times 100\% \quad (6)$$

(三).反射的成因

1.光線照射物質時，其表面分子內的電荷將順著外來光波電場振動而加速，加速的電荷能重新輻射出電磁波，這即是反射光。

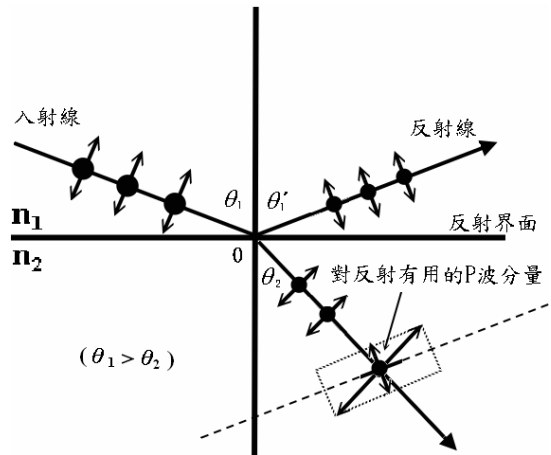


圖 5

2.反射光中電場的振動方向必與表面電荷振動方向相同，此與天線的輻射原理相同。

(四).反射光的成份

1.自然光入射於透明介質(如玻璃)上，入射光之電場振動可分解為與入射面垂直(稱為 S 光)及平行(稱為 P 光)方向各佔 50% 振動能量。

2.圖 5 入射點 O 同時為反射及折射光柱的起點，O 點電荷的 S 光能直接反射出去，但 P 光則必須計其在垂直於反射光柱方向的振動分量，反射光柱的 P 振動將少於 S 振動。

3.光線在兩介質界面上反射和折射，電場及磁場的變化是連續的， $E$  與  $H$  在與邊界相切的分量不會中斷，依據 Fresnel 折射定律和 Maxwell 電磁理論可推導得兩種振動波的反射率分別表之如下兩式且繪其圖形於次頁：

$$r_p = \left( \frac{E_{p1}'}{E_{p1}} \right)^2 = \left[ \frac{\tan(\theta - \sin^{-1}[\sin \theta/n])}{\tan(\theta + \sin^{-1}[\sin \theta/n])} \right]^2 \quad \text{-----}(6)$$

$$r_s = \left( \frac{E_{s1}'}{E_{s1}} \right)^2 = \left[ \frac{\sin(\theta - \sin^{-1}[\sin \theta/n])}{\sin(\theta + \sin^{-1}[\sin \theta/n])} \right]^2 \quad \text{-----}(7)$$

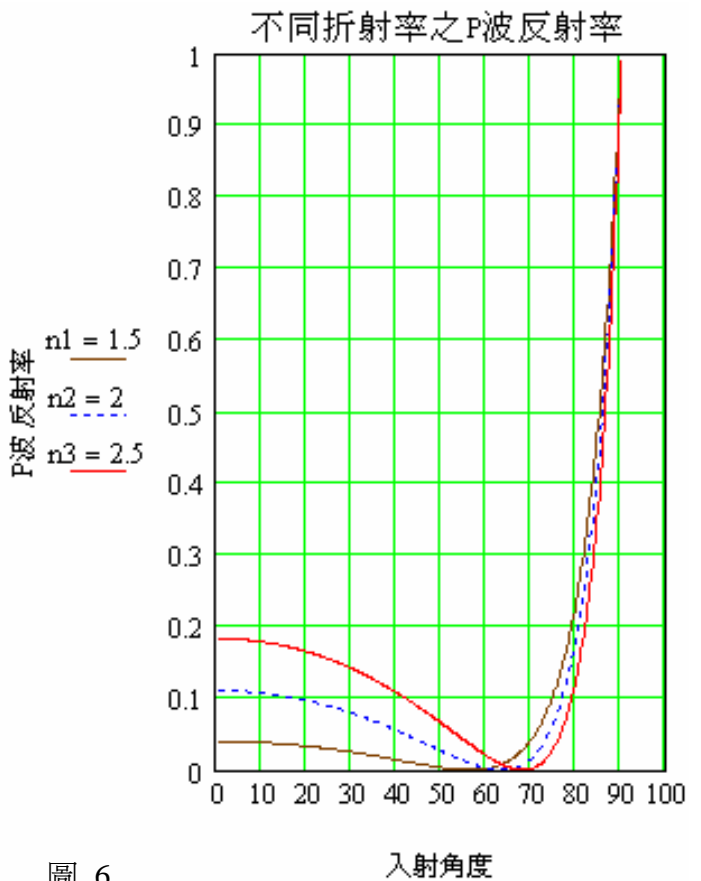
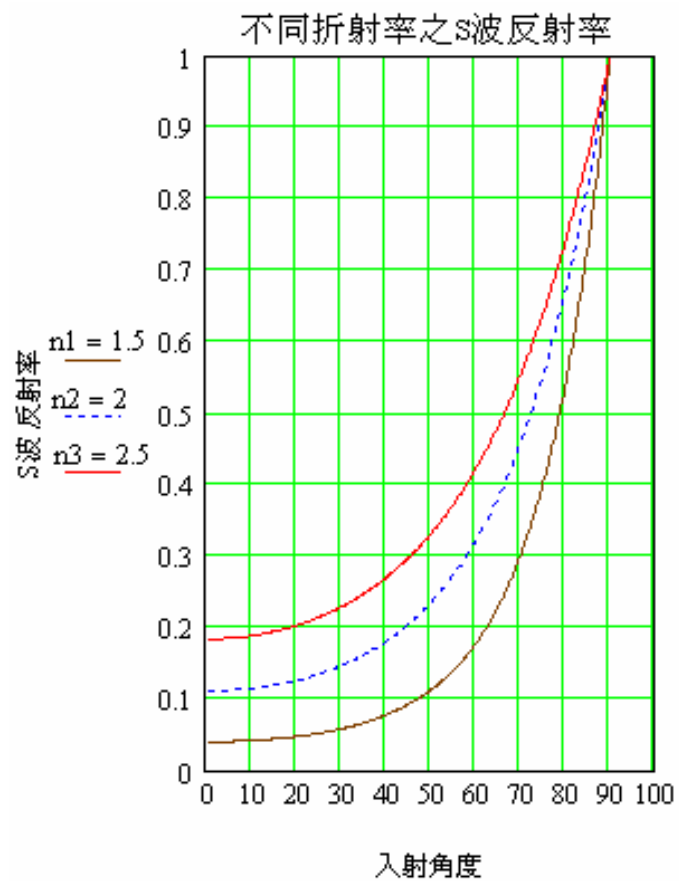
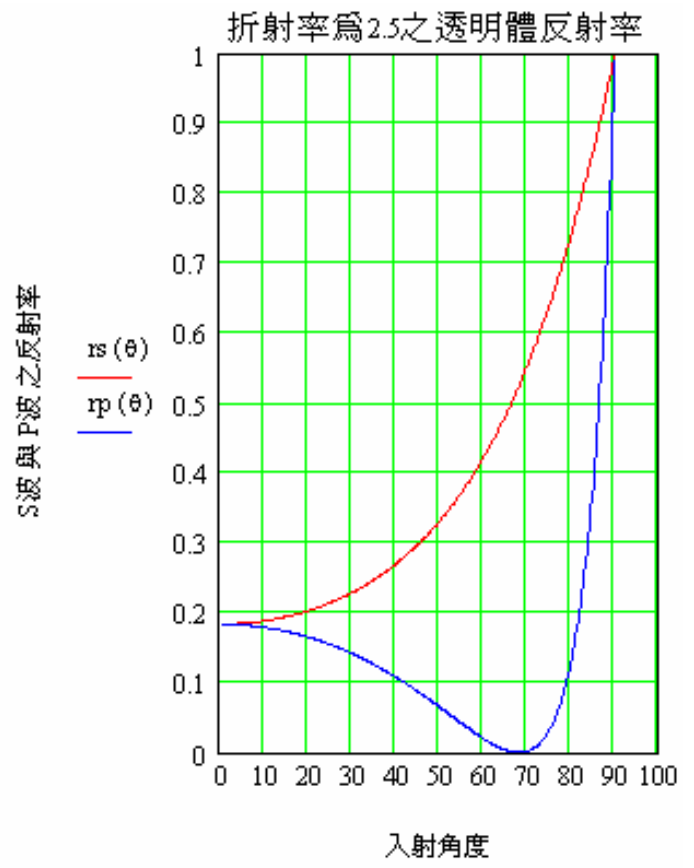
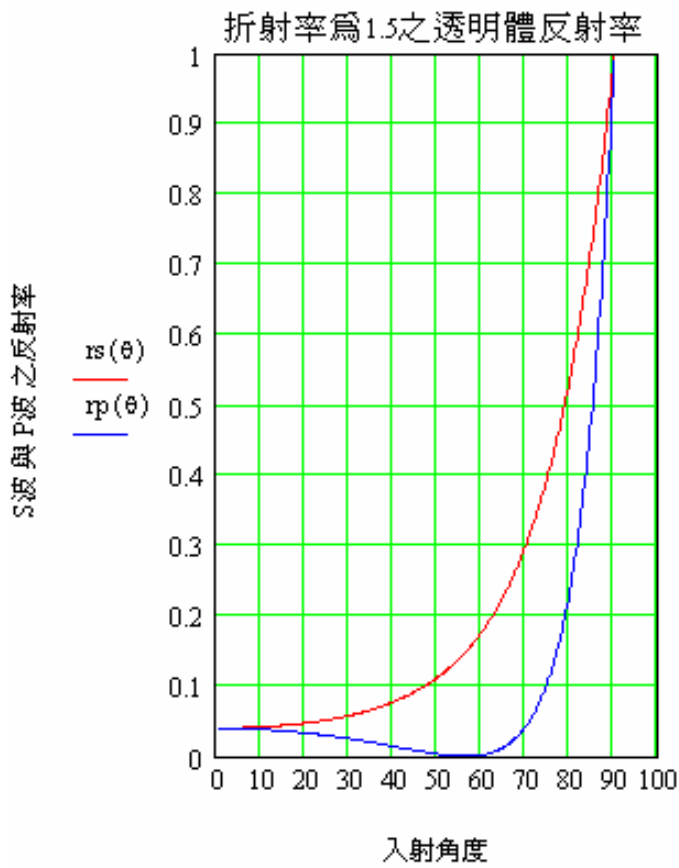


圖 6

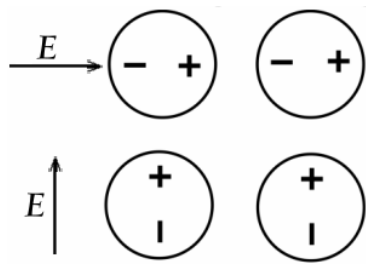


圖 7

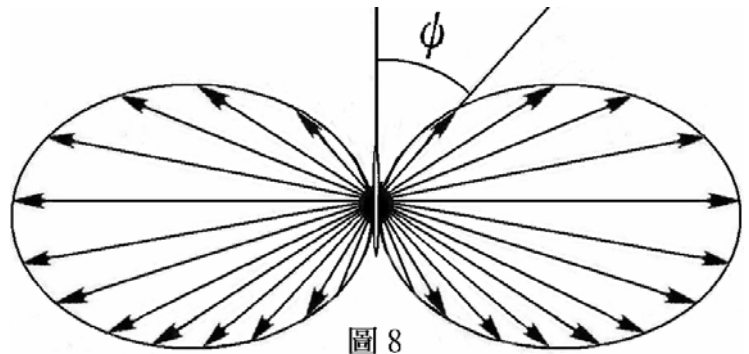


圖 8

(五).光的散射

- 1.日光入射至微小質點如空氣分子等，分子內的電子將隨光波電場振盪使其成為瞬間極化的分子(圖 7)，而電子振盪又將電磁波向周遭發射出去稱為散射光(圖 8)。
- 2.空氣分子遠小於可見光波長，可以雷用氏散射分析之，較大質點如灰塵或氣溶膠則應改以米式(Mie)散射[7]處理(圖 9)。
- 3.雷氏散射指出空氣分子散射之總能量與入射光波長  $\lambda$  的四次方成反比，而方向特性則依與入射方向所夾之散射角  $\theta$  決定之即:

$$I = I_0 \frac{8\pi^4 N \alpha^2}{R^2 \lambda^4} (1 + \cos^2 \theta) \quad (8)$$

上式中  $I_0$  與  $I$  分別代表入射與散射光強度， $R$  為散射分子與觀察者距離， $N$  為散射分子密度，而  $\alpha$  與散射氣體分子型狀及折射率有關。

- 4.散射光之偏極度可依(6)式求得

$$P = \frac{\sin^2 \theta}{1 + \cos^2 \theta} \quad (9)$$

- 5.:以程式畫出上兩式圖形(圖 10)可看出雷氏散射能量為類似啞鈴形狀分佈，散射角  $\theta = 90^\circ$  方向光強度最小，為原入射方向散射強度之半，但偏極度卻最大達 100%。

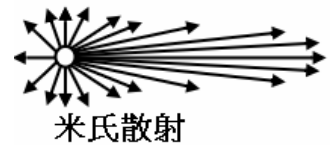
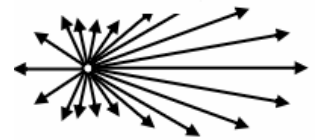


圖 9

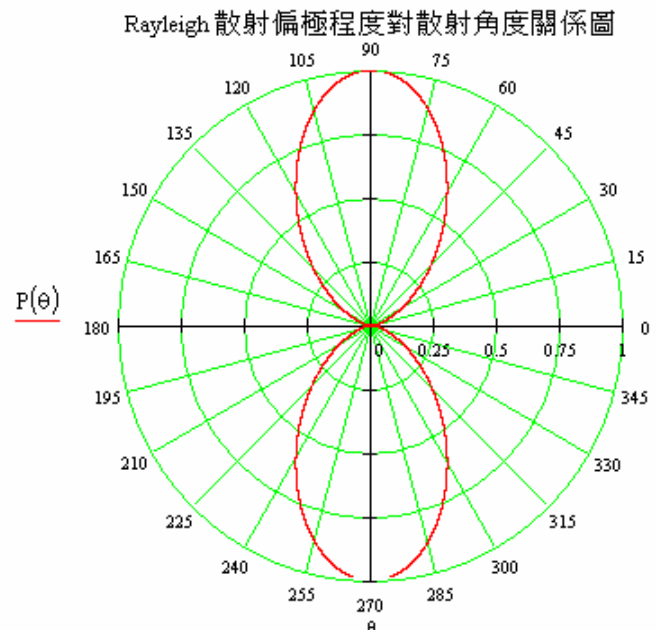
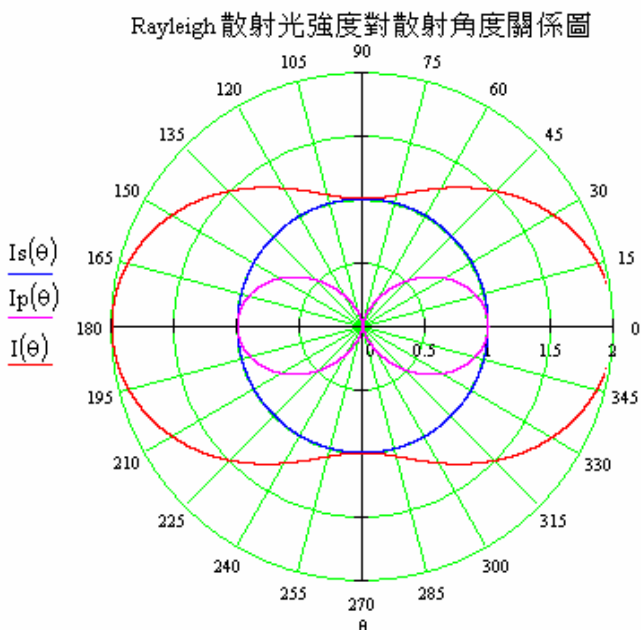


圖 10

6. 因  $I \propto (1/\lambda^4)$ ，故空氣分子散射的藍光較紅光多，此為天空呈現藍色的原因(圖 11, 12)。

7. 圖 13 顯示由地面和大氣層構成且與日光垂直的半圓面上，觀察者在地面上 O 點觀看天空，所有被半圓面上空氣分子散射的日光達到 O 點其散射角皆為  $\theta = 90^\circ$  亦皆為完全偏極，圖 14 也充分說明此現象，在垂直於原入射光方向之散射光皆為 100% 偏極的。

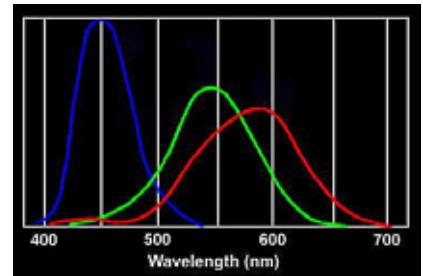


圖 11

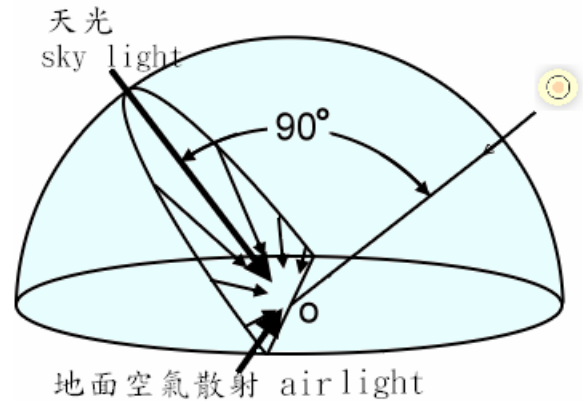
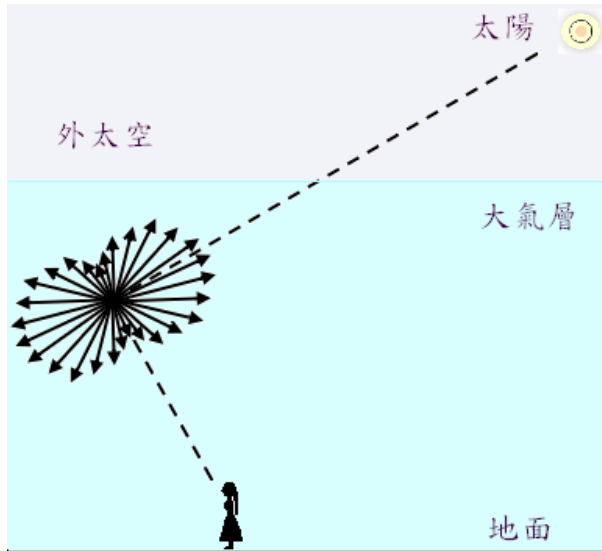


圖 13

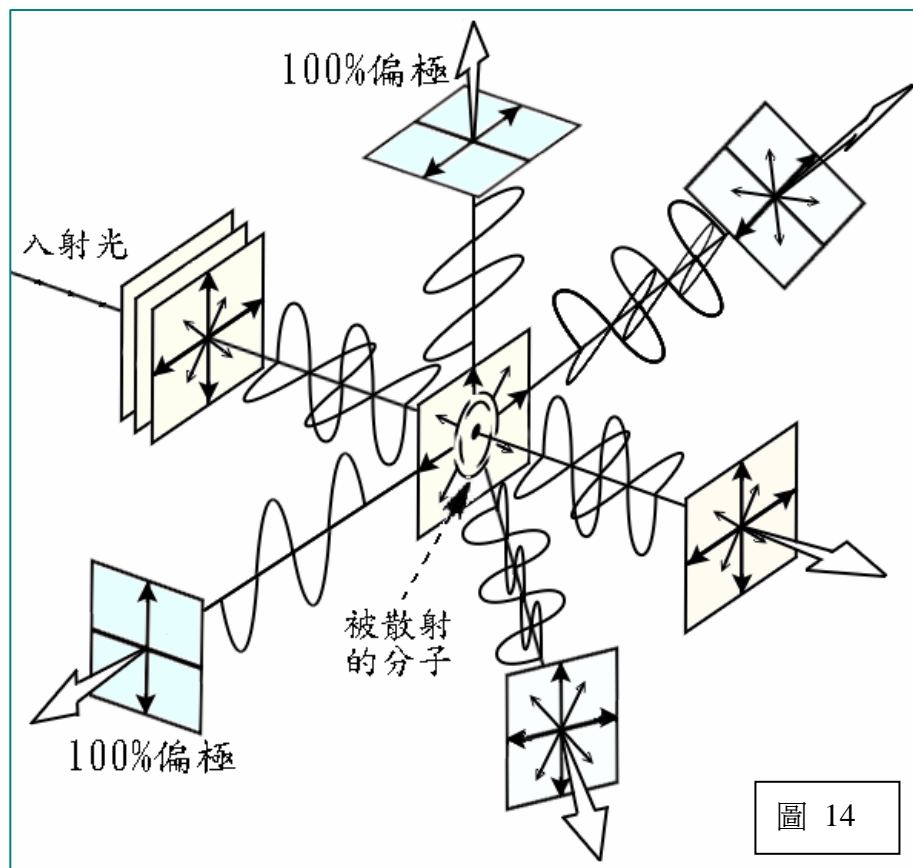


圖 14



8. 陽光穿越的大氣厚度隨太陽方位不同而異，若定地面正上方的氣層為一單位厚度，即  $AM = 1.0$ ，陽光斜射時穿越氣層厚度須乘一因子  $(1/\cos\phi_z)$ ，即  $AM = 1/\cos\phi_z$ ，如圖 15。當天頂角  $\phi_z \leq 75^\circ$  時可忽略地平線彎曲及大氣折射的微小誤差[8]。

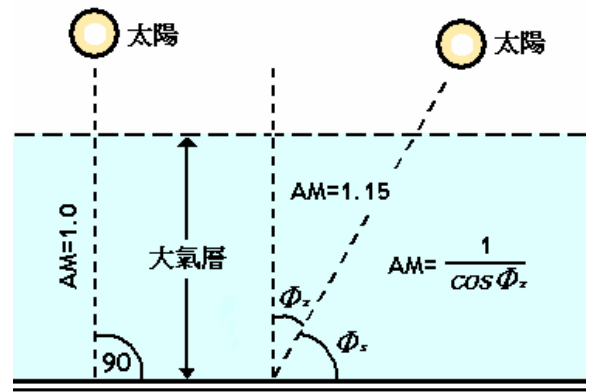


圖 15

9. 仰望天空，若視線與天頂夾角為  $\phi_z$ ，在我們的視線方向上的光徑長度須同樣地乘一因子  $(1/\cos\phi_z)$ ，當視線的  $AM$  值不大於 2 時可忽略空氣分子的多重散射量而僅以單一散射來計量散射強度即可[7]。

#### (六). 大氣光學的三種模型

大氣層雖結構複雜但以光學角度研究其散射特性時，常以分子密度、溫度、氣壓、高度及溫度衰退率將大氣分成三個分析模型[8]，各有其方便及適用的範圍。

##### 1. 固定密度模型

若將大氣視為密度不變的均質氣體，海平面氣壓為單位面積向上延伸的空氣柱重量，依流體靜力學在離海平面高度  $z$  處氣壓為  $P_z = P_0 - \rho_0 g Z$ ， $P_0$  及  $\rho_0$  分別為海平面大氣壓及密度，在大氣層頂端處應有

$$P_z = 0, \text{ 故 } Z_{top} = \frac{P_0}{\rho_0 g}, \text{ 其中 } Z_{top} \text{ 即為大氣層的等效}$$

厚度，以標準狀況大氣常數代入上式計算可得厚度約為  $8km$ ，我們可以說空氣柱長  $8km$  而密度固定的氣體壓力與  $76cm$  水銀柱的壓力是相等的，皆為一大氣壓。

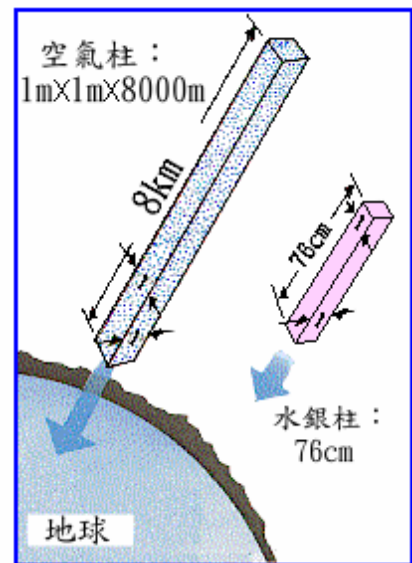


圖 16

##### 2. 等溫模型

右圖中由高度  $Z$  至  $Z + dZ$  區間內氣壓變化為

$$dP = -\rho g dZ$$

空氣分子接近理想氣體，其氣體方程為

$$P = \rho RT$$

其中  $R$ : 理想氣體常數  $T$ : 大氣絕對溫度，若大氣為等溫即  $T = T_0 = T_z$ ，合併上兩式可得

$$dP = -P g dZ / RT$$

積分上式可求得氣壓隨高度分佈的函數

$$P_z = P_0 \exp\left(-\frac{gZ}{RT}\right) \quad (10)$$

上式是廣為採用的氣壓-高度方程式，若令

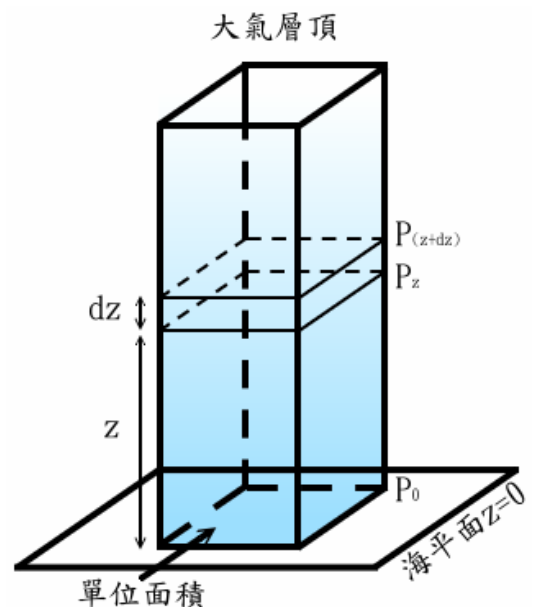


圖 17

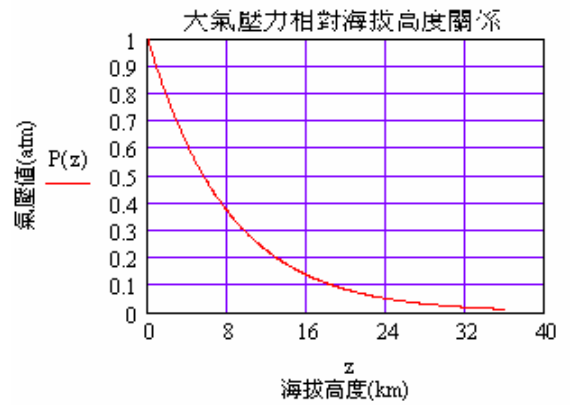
$$H = RT/g \quad (11)$$

大氣的氣壓、密度、分子濃度可分別表示成

$$P_z = P_0 \exp\left(-\frac{Z}{H}\right) \quad (12)$$

$$\rho_z = \rho_0 \exp\left(-\frac{Z}{H}\right) \quad (13)$$

$$N_z = N_0 \exp\left(-\frac{Z}{H}\right) \quad (14)$$



由第(10)式可看出大氣層是沒有邊界的，由海平面可向上延伸至無限遠，(11)中的  $H$  被稱為標記高度(scale height)，以標準狀況  $T = 273K$  計算(11)中  $H$  值可得  $H \approx 8km$ ，當高度  $Z = H$  時  $P_z = P_0 \exp(-1) = P_0 \times 36.8\%$ ，即於此高度下大氣中無論氣壓、密度、分子濃度皆降至海平面處的36.8%，有了這個標記，大氣層像是豎立了一支標尺，高度每增加一個單位標記  $H$ ，氣壓即有一段相同的衰退率(36.8%)，同時此高度亦為固定密度模型中大氣的等效厚度，在描述大氣厚度時為極重要的指標。

### 3. 複帶模型(Polytropic Model)

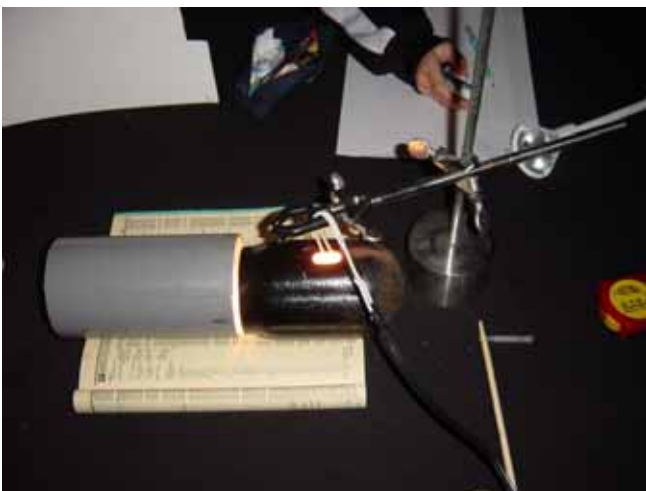
此模型中一般假設大氣溫度有固定的衰退率，並以較嚴謹的熱力學公式推導大氣壓力分佈，可求得標準狀況下大氣標記高度為8.44km [8]，此值與(11)式所得相去不遠，除非精確度要求甚高，一般估算大氣層厚度時只以前述兩模型處理即可。

## 三. 實驗設計

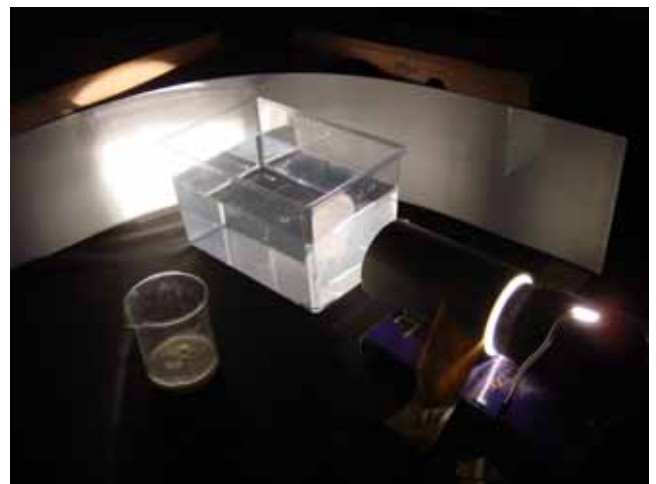
### (一). 液體微粒散射光線的實驗

在一般實驗室中觀察微小粒子散射多以液體為之，我們做了一些實驗上的改進：

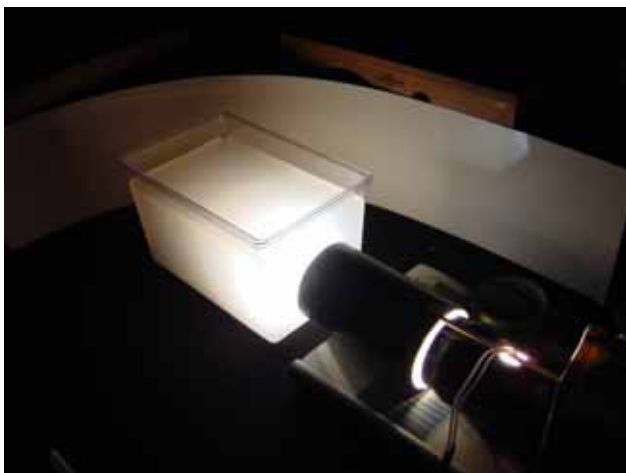
1. 採用高功率鹵素燈源，以確保足夠的透光距離及散射區域。
2. 自製導光管及透鏡調焦器，方便觀察濃度較高的液體散射情形。
3. 自行發展程式分析散色光中顏色比率和變化。
4. 改變液體種類及濃度分別記錄散射狀況及顏色變化。



照片 1 高功率鹵素燈須加散熱裝置、電源及固定架



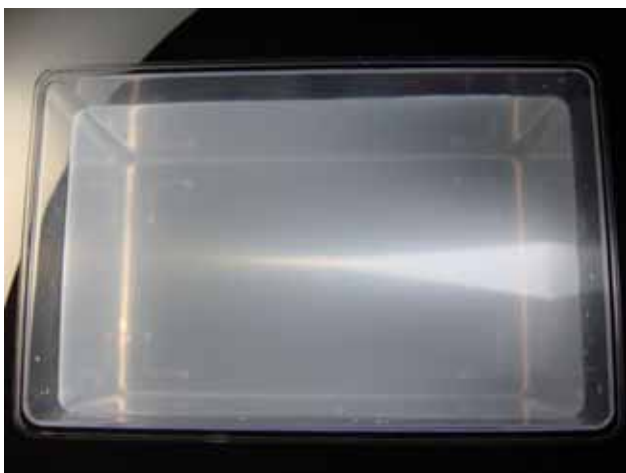
照片 2 先以純水做實驗，將燈源位置亮度調整妥當



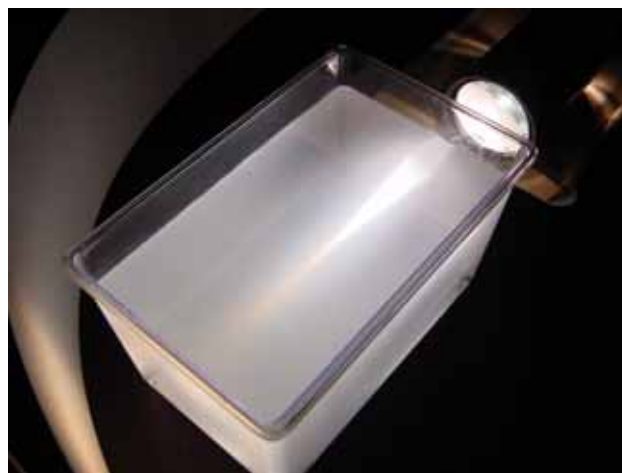
照片 3 純水中加入鮮奶並記錄其混合體積比值



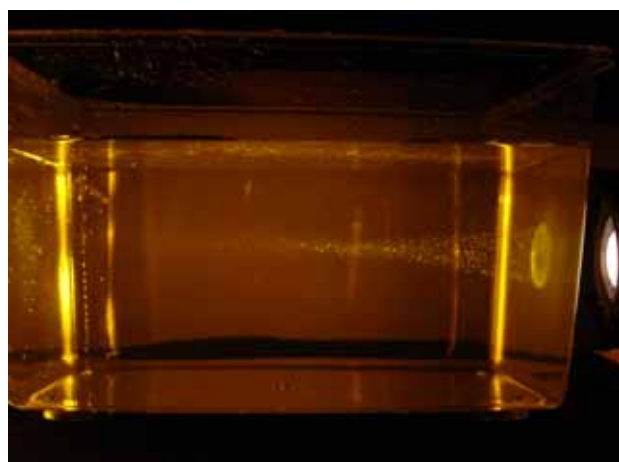
照片 4 右端藍光散射極強，左端藍光散盡餘較多紅光



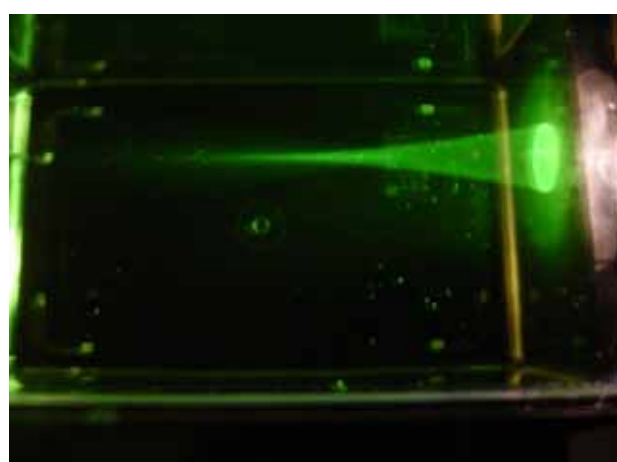
照片 5 加入透鏡，光錐所經路徑散射明顯



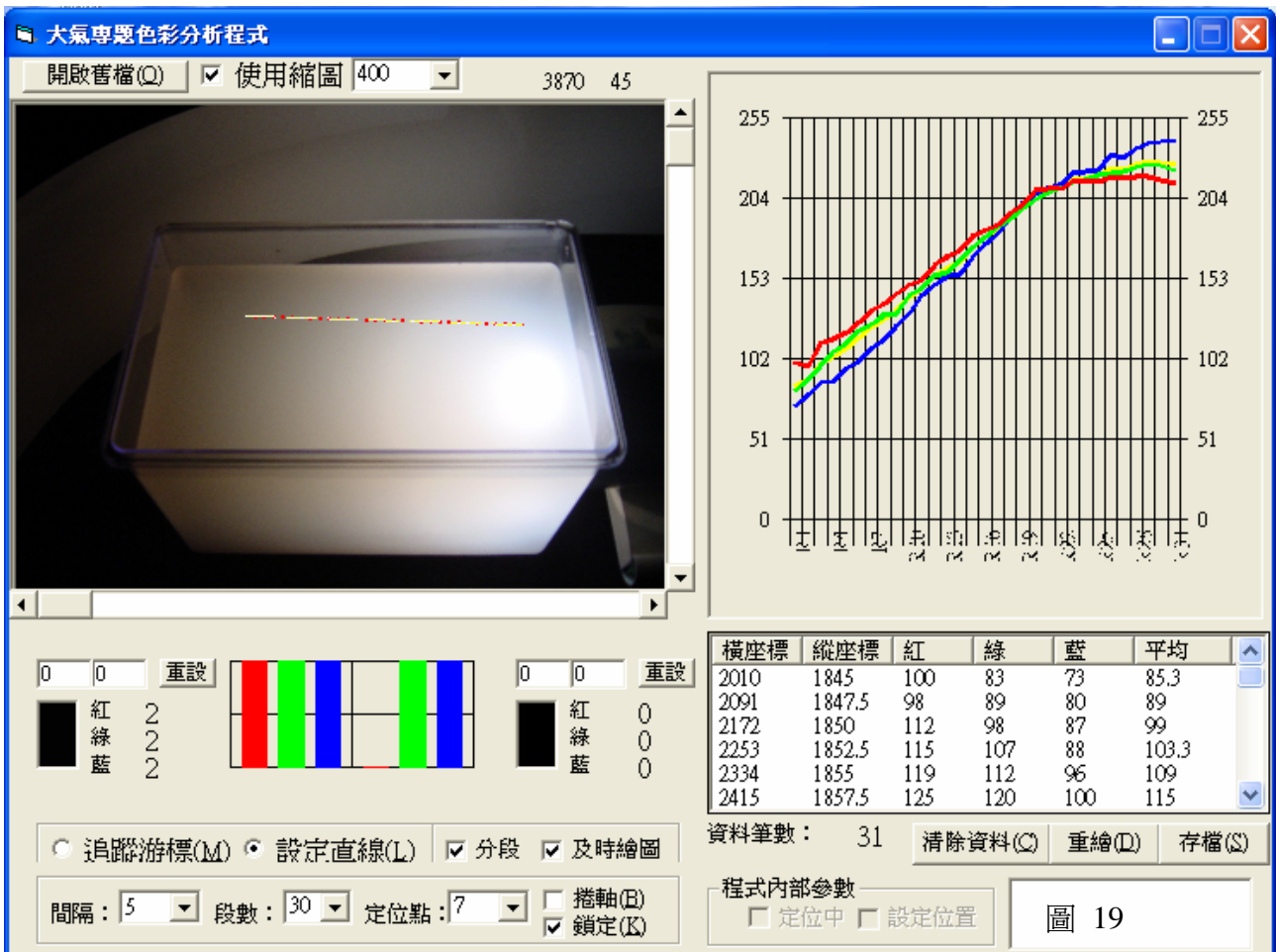
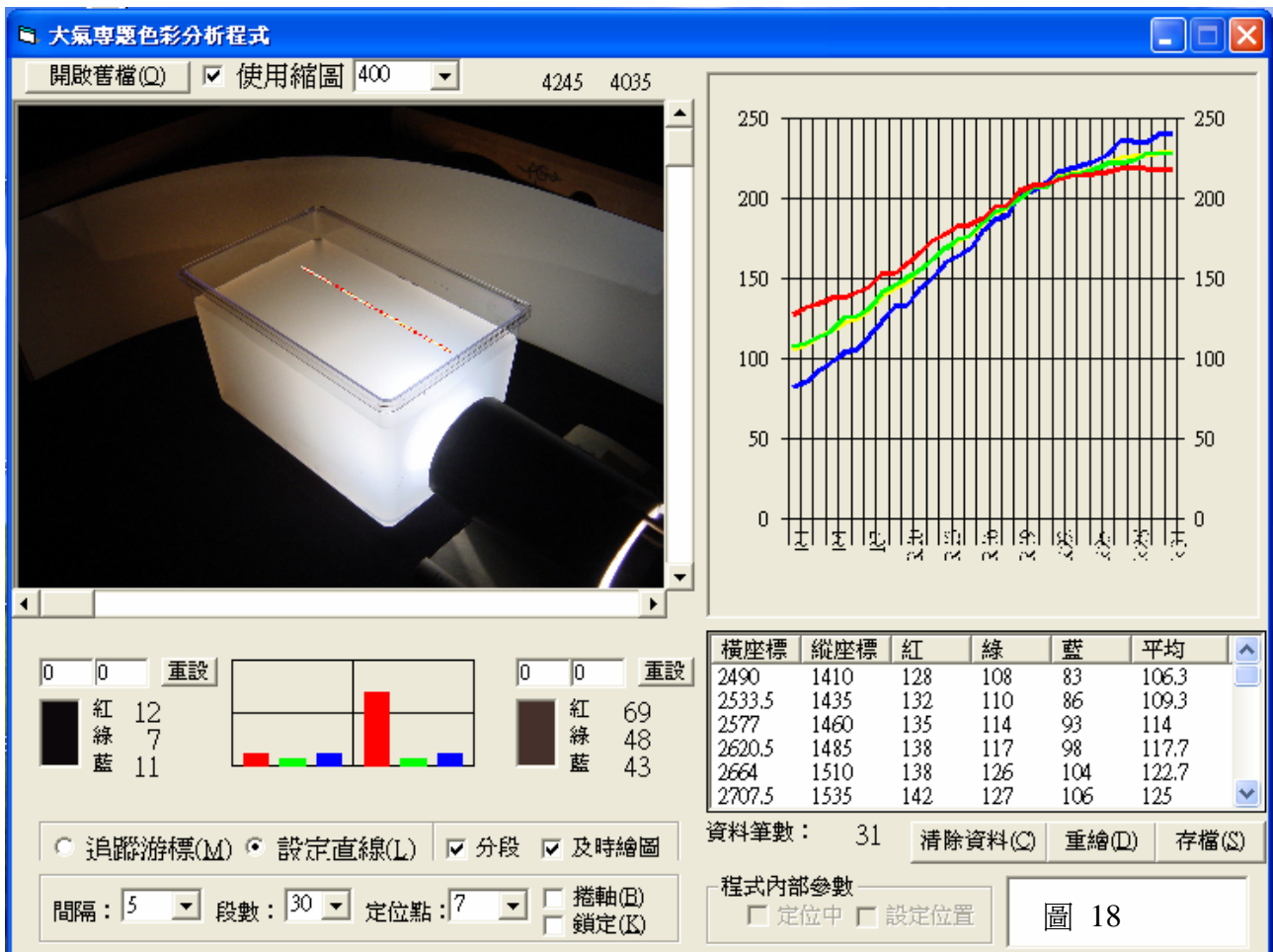
照片 6 透鏡在水中焦距變長，須調整亮度及距離



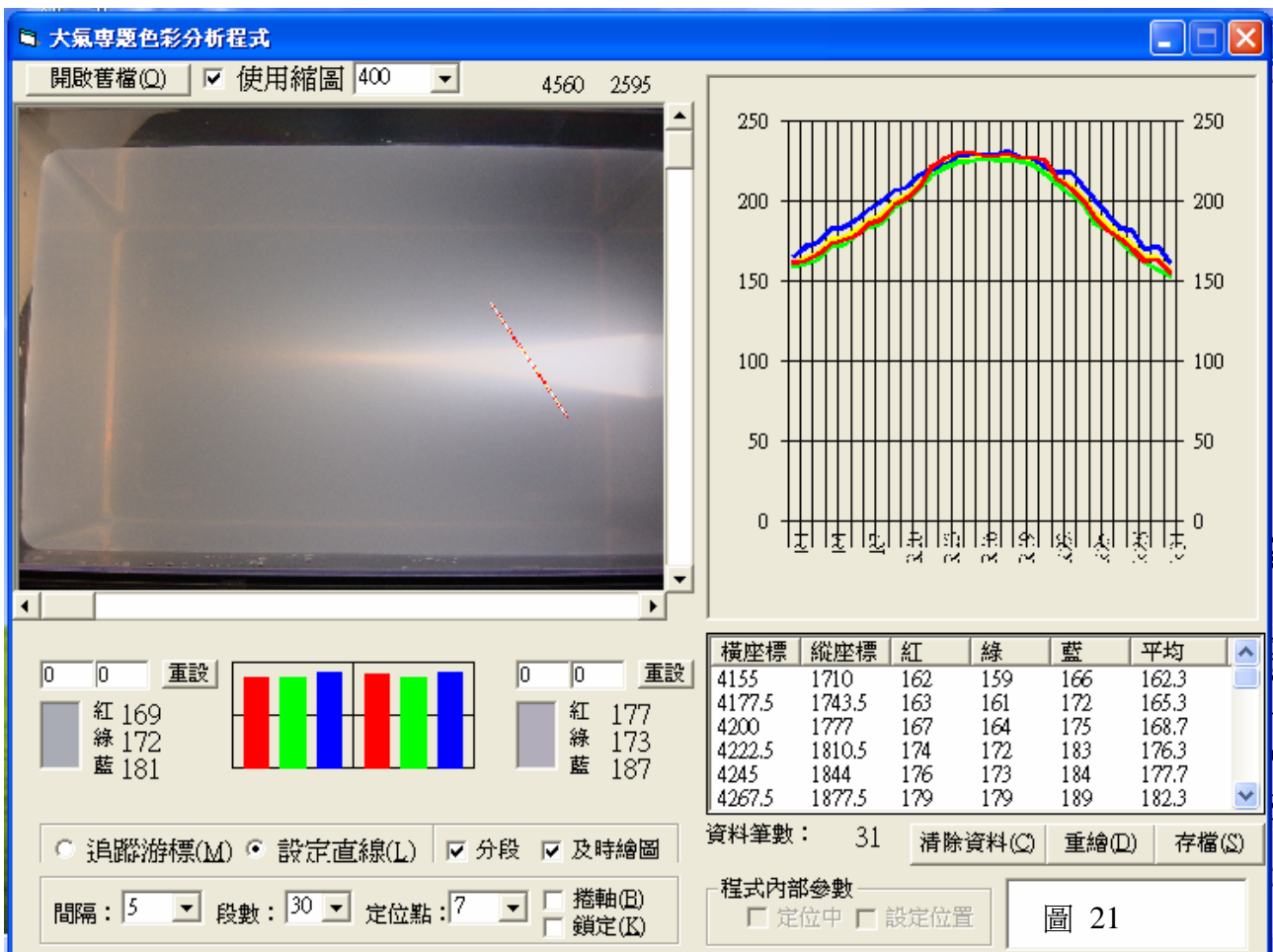
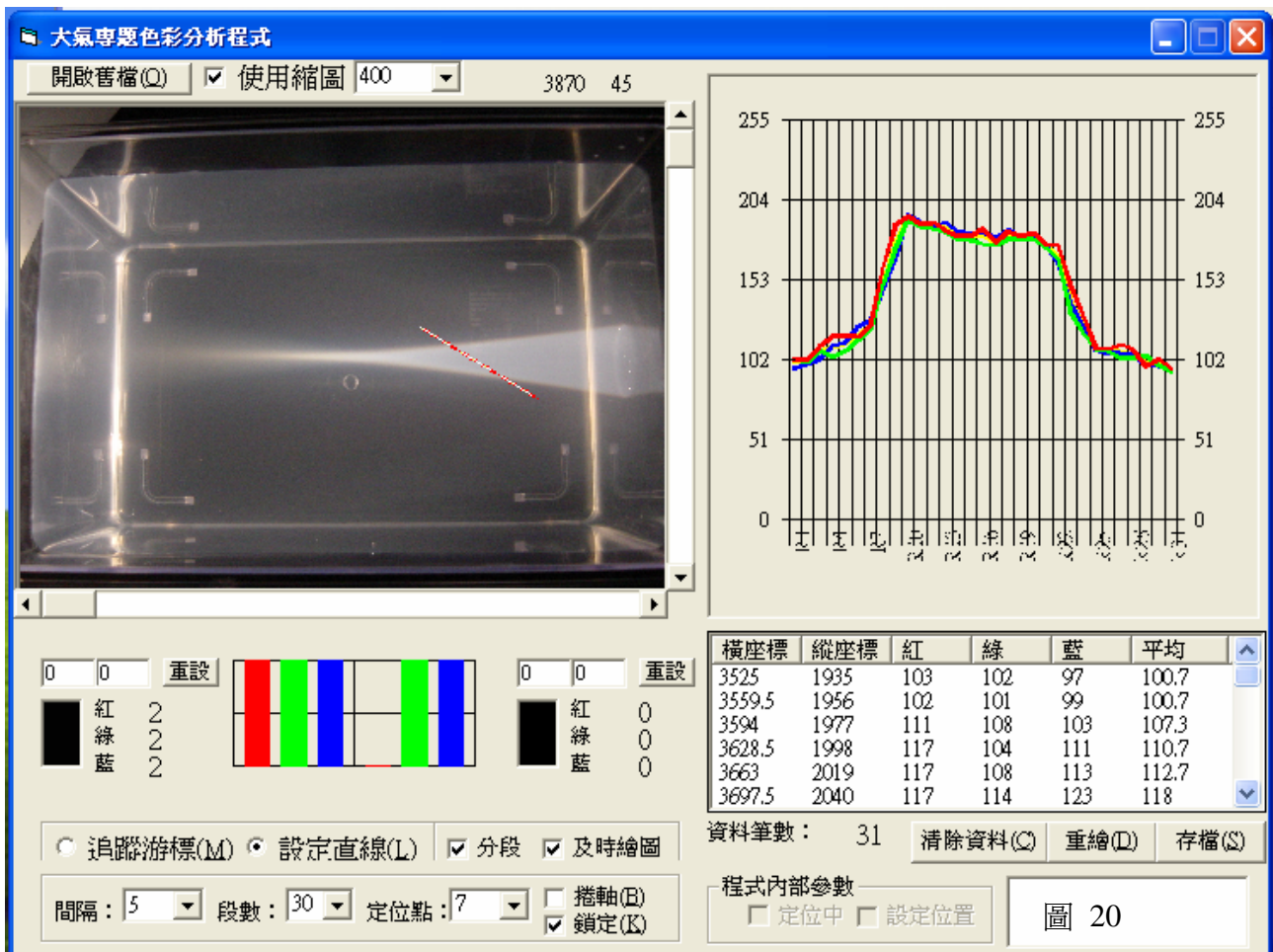
照片 7 水中含較大微粒時，有米氏散射發生，如霧和靄般

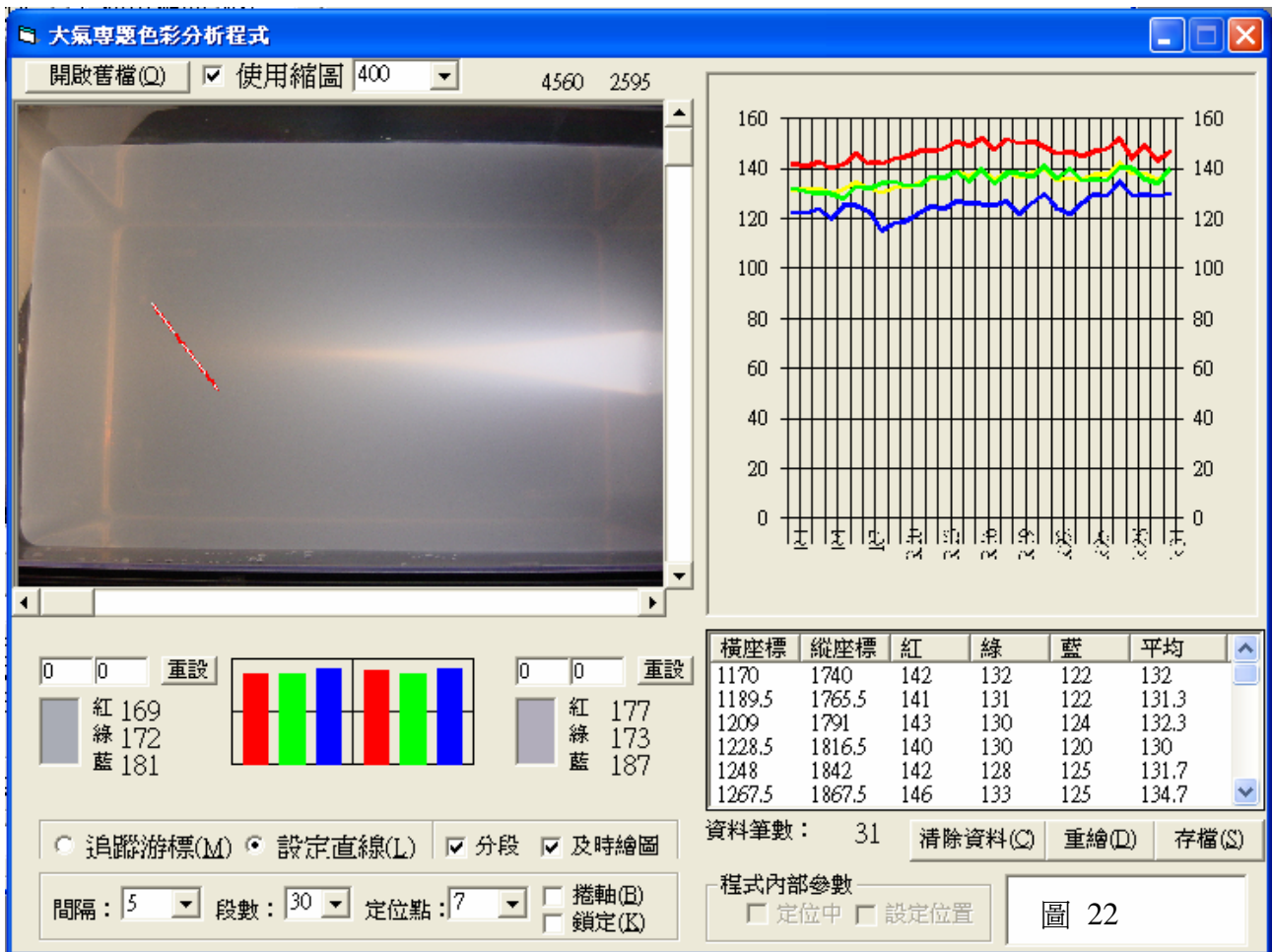


照片 8 水中混入綠色色素時，光徑上的散射情形攝影





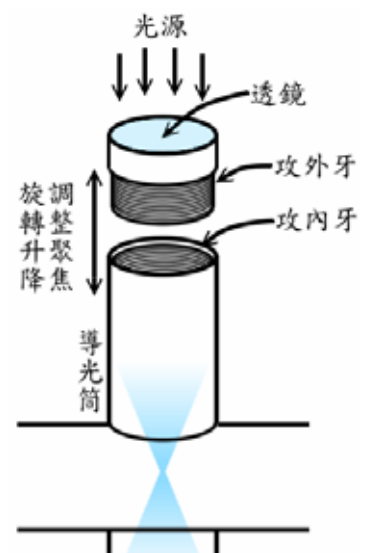
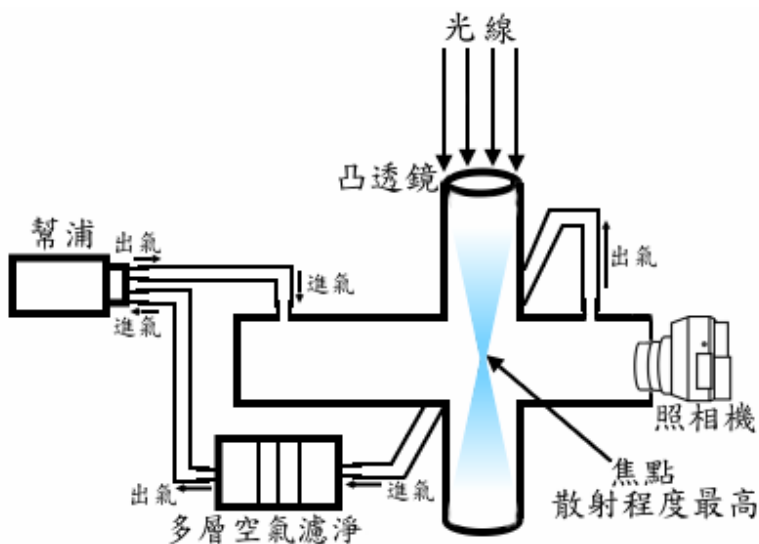


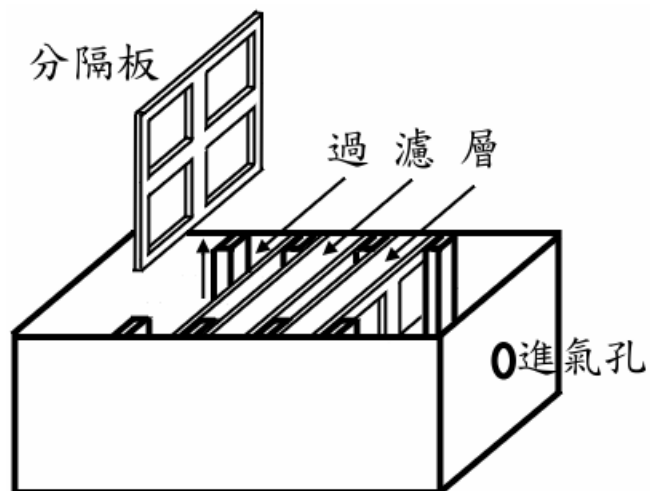
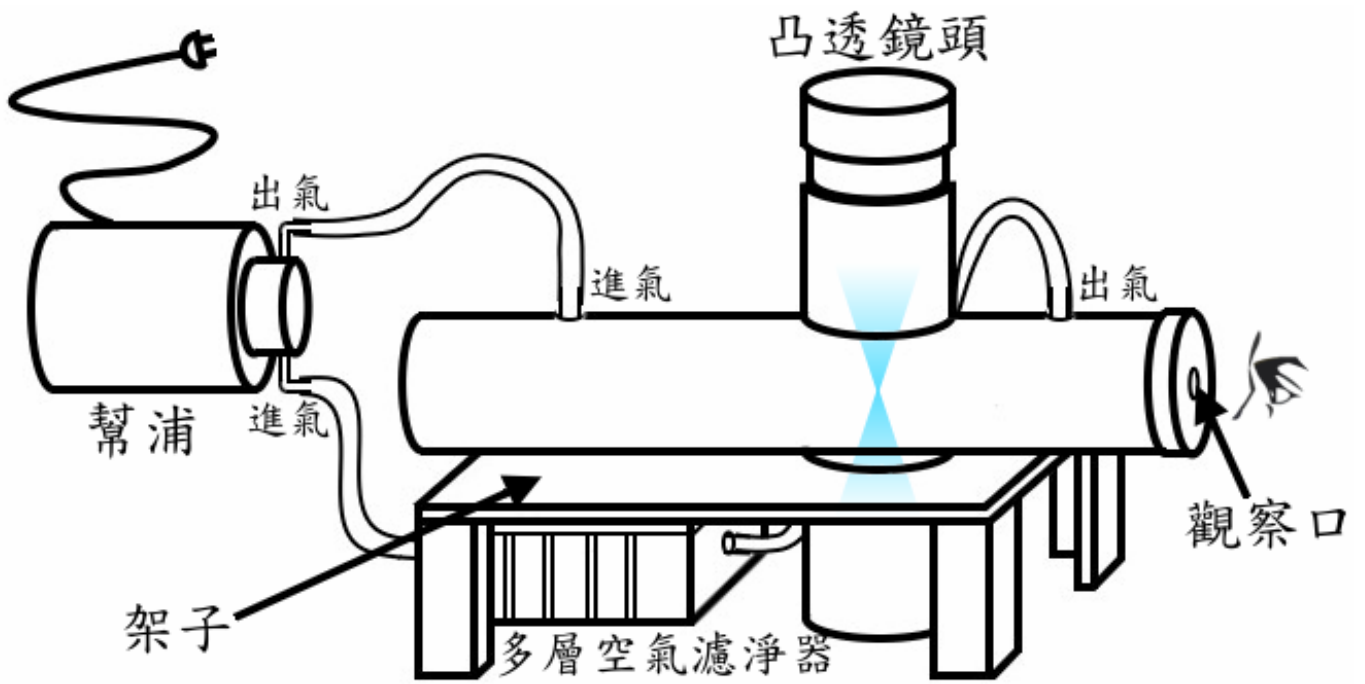


## (二).空氣分子散色藍光的實驗

氣體散射實驗是非常困難及少見的，我們設計了以下實驗觀察空氣分子散色藍光:

- 1.自製十字型光導管，內部完全塗黑並黏入黑色毛毯避免反射。
- 2.製作多層空氣濾淨(清)器，內部填滿活性炭濾網及高密度脫脂綿。
- 3.以幫浦循環抽送空氣，使導管內空氣極為純淨。
- 4.以透鏡聚集日光，導管頂部攻牙以調整透鏡的聚焦位置。
- 5.右端觀測孔為活動旋轉可替換式設計，方便人眼觀看或替換相機攝影。
- 6.自行發展程式分析空氣散射光中各顏色的成分比率。



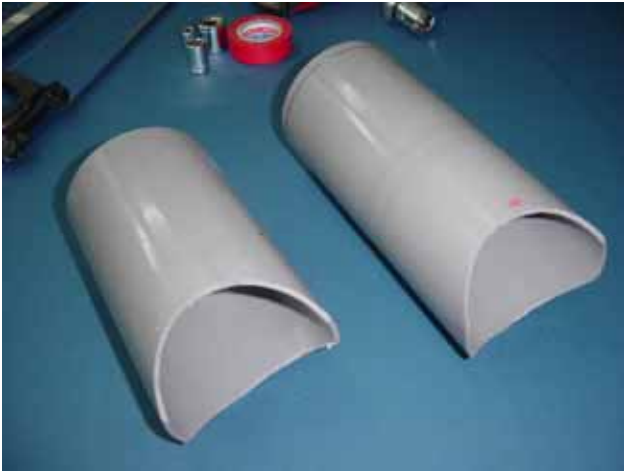


照片 9 導光管頂須攻牙以便旋轉透鏡調整上下位置



照片 10 十字形導光管中央相接合處要密接處理





照片 11 上下兩導光管與中央導接合口已磨妥備用



照片 12 水平導光管中央相接合孔完成圖



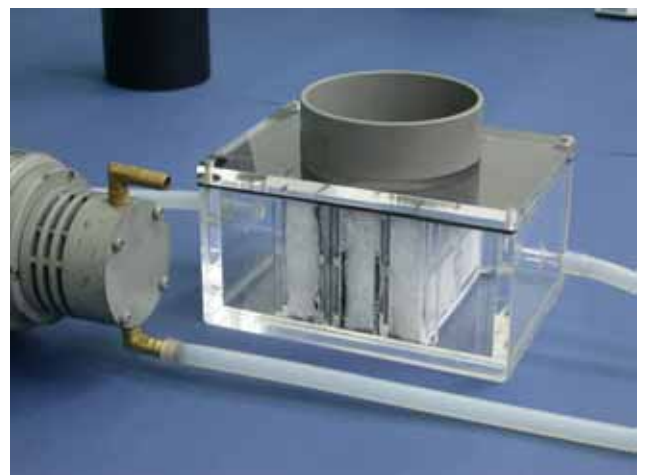
照片 13 固定透鏡之墊圈須磨至與透鏡恰能密合



照片 14 十字型導光管密接完成



照片 15 用活性炭及脫脂棉製作空氣過濾網

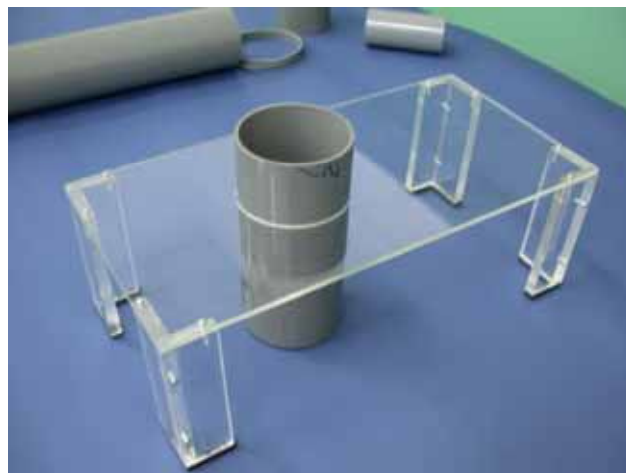


照片 16 自製的多層空氣濾清器





照片 17 舊貨攤買到的循環吸放式抽氣機



照片 18 製作承載十字導管的基座台



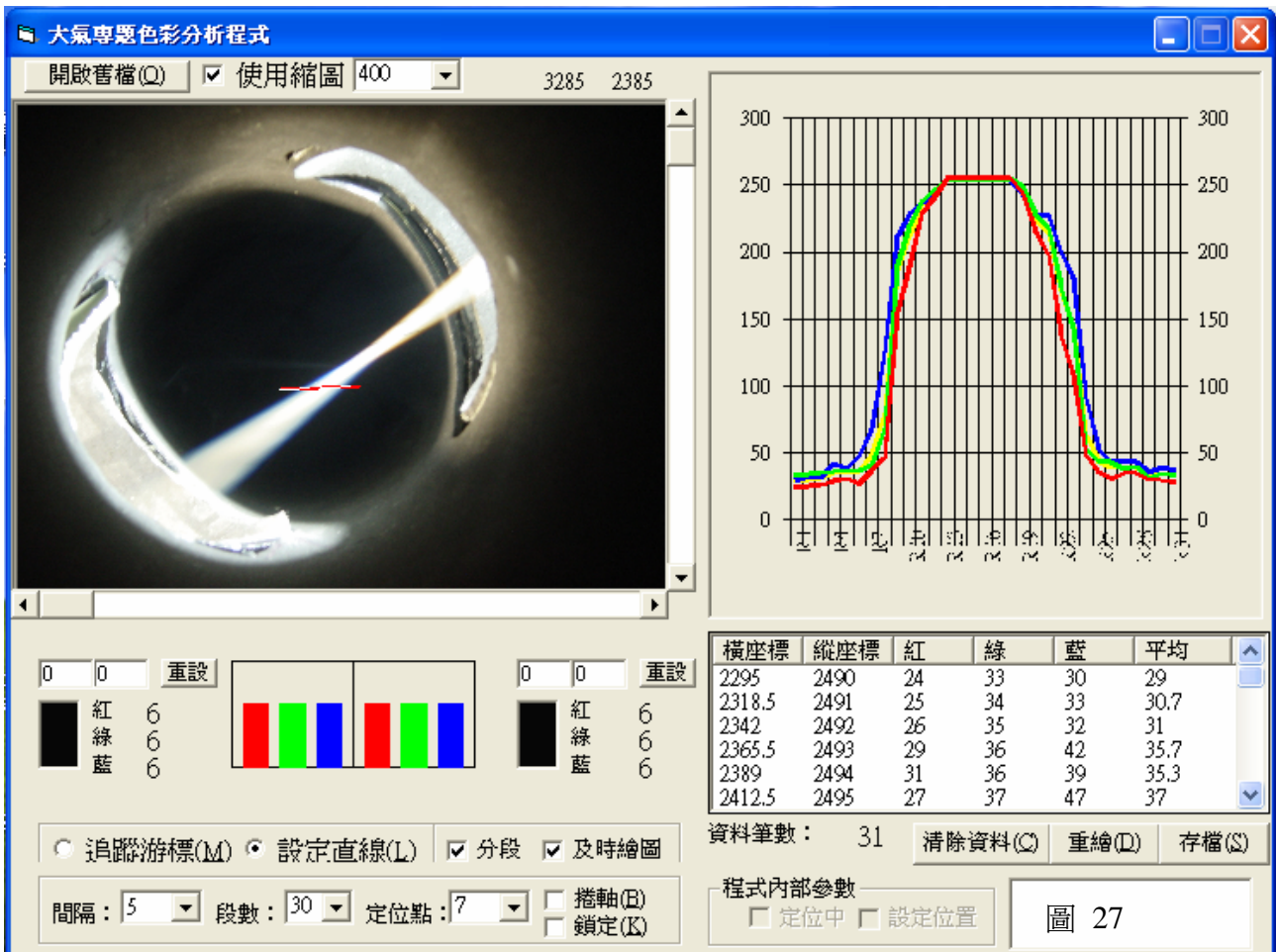
照片 19 導光管的進氣和出氣孔須與濾氣器相接合

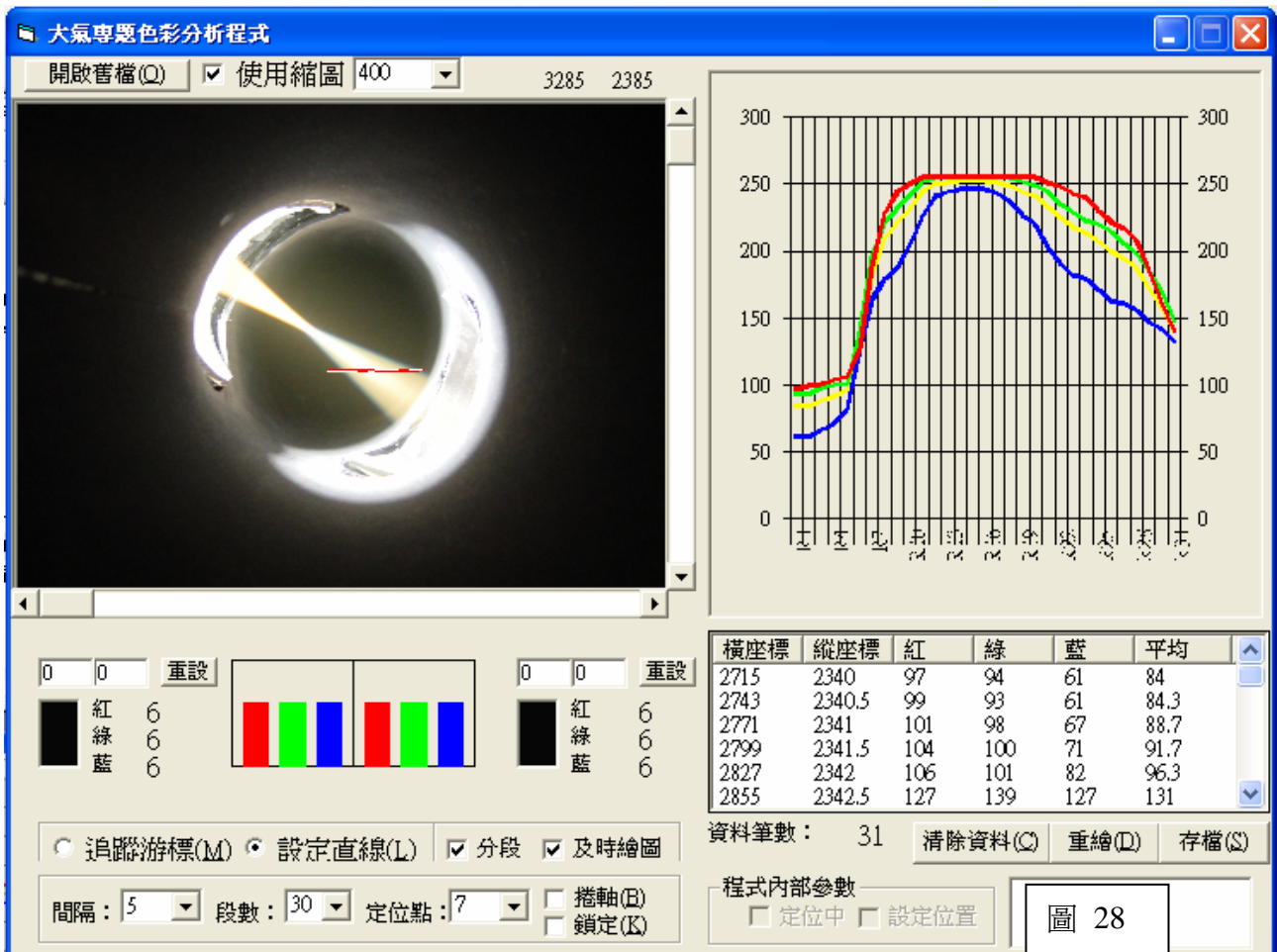
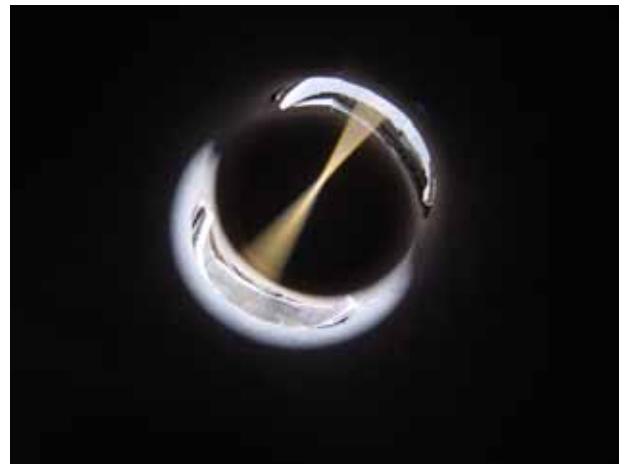
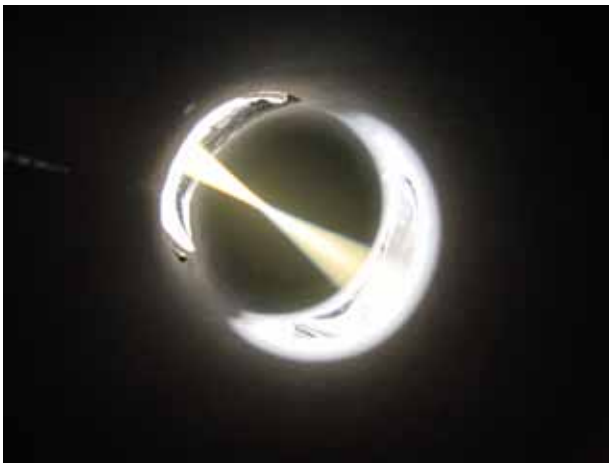


照片 20 導光管內外塗黑並黏貼黑色毛毯去除反射



照片 21 系統完成圖





### (三).光學法測量大氣層厚度的實驗設計

照片 30顯示遠山看起來較近山明亮，山的亮度隨著山到觀察者的距離減少而變暗，由圖 29也可看出遠山和觀察者間有較多空氣分子被陽光散射，達到人眼的散射光量較多所以亮度較高，我們以自行發展的程式分析照片 30時可發現 3 層山巒交疊，各色光亮度由遠而近呈現 3 波段下降，我們後面的實驗將要充分運用此一特性來測量大氣層厚度，分項說明如下。



照片 30 遠山亮度較高，山越近亮度依序減弱

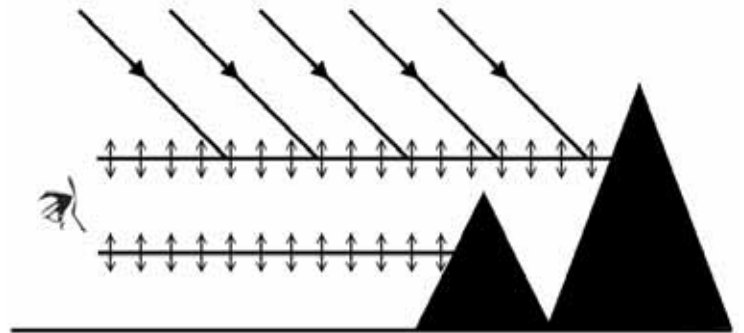


圖 29 遠山至人眼間，視線所經歷的路程較長，散射的空氣分子也較多

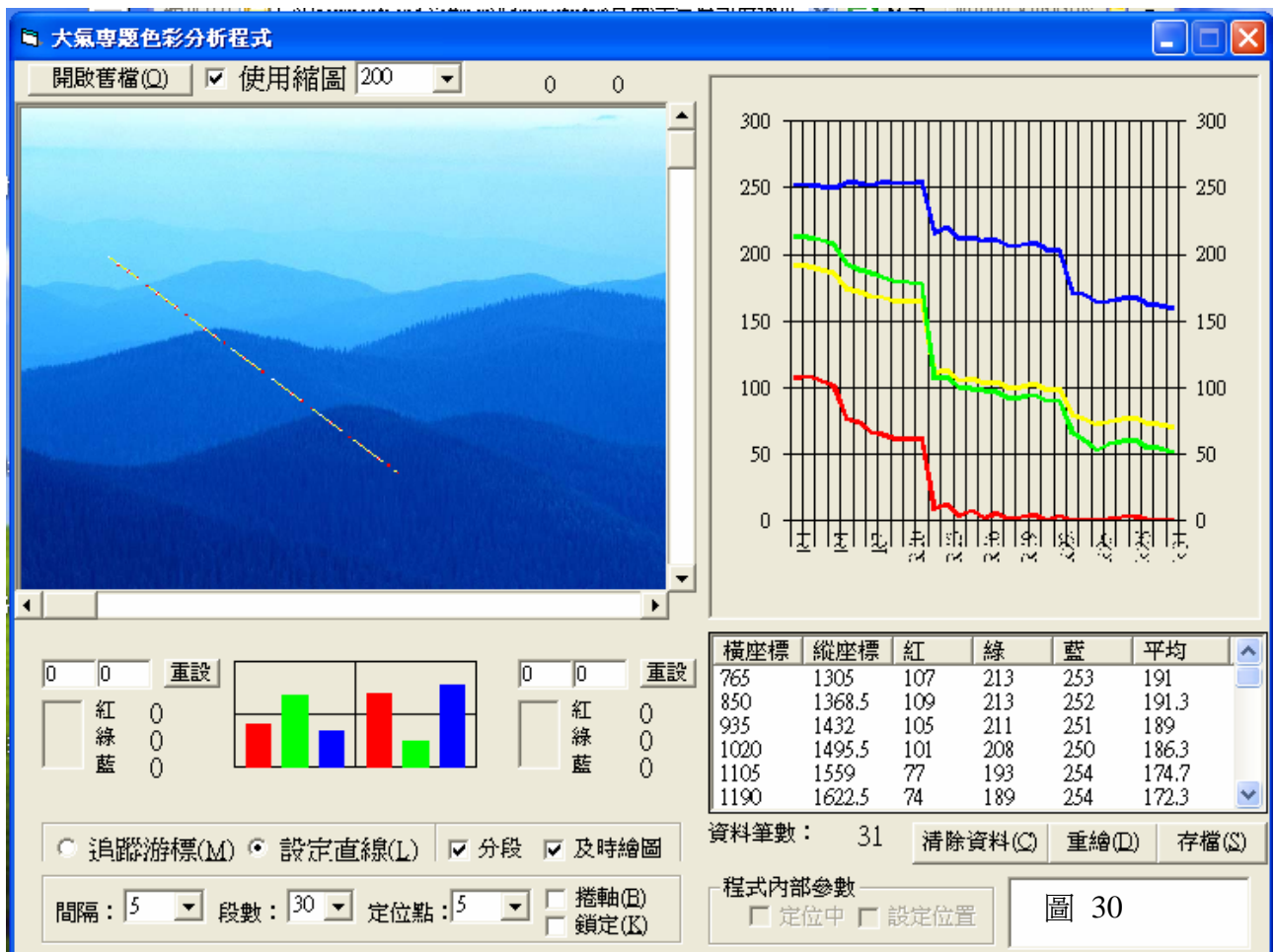


圖 30 三層山巒交疊，各色光亮度由遠而近呈現 3 波段下降，人眼對亮度變化相當敏感，與程式分析的結果相當吻合



1. 我們設計兩根導光管，其中一支導光管開口朝上垂直於日光方向，另一支則與地面平行對準遠處黑色目標物，分別監視天光和目標物到導光管間地面空氣分子散射光的強度，導光管與目標物間的連線也與日光方向垂直。
2. 黑色目標物的體積需大至超過觀察者眼睛經導光管口至目標物所張開的視角，使其發揮黑體的作用，確保除了地面空氣散射的光不會有任何雜光進入導光管。
3. 觀察地面散射的導光管長 1 米，口徑為 5.5cm，觀察天光散射的導光管口徑相同且以 T 型連接管接合陷光管及觀測孔，且可自由調整觀測角度。

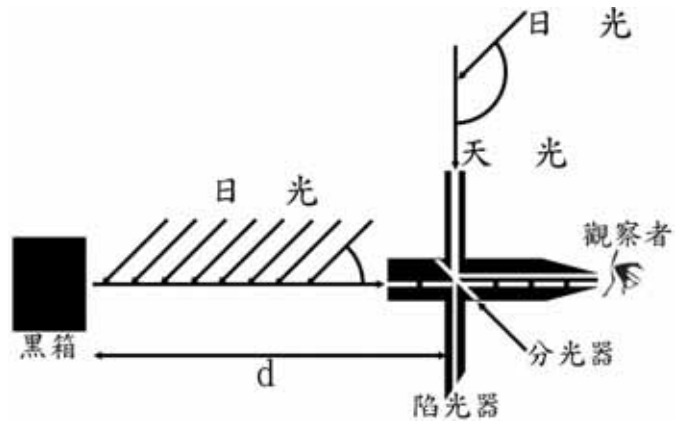


圖 31 簡圖，當天光與地面散射光亮度相等時散射分子數相等



圖 32 天光與地面散射光之導光管設計圖，操作時可立即比較兩者的散射強度

4. 反射天光的透明壓克力須與導光管成 45 度角黏著固定，可以將天光反射至觀測管內，透射的光則導引至陷光室內吸收掉。
5. 導光管內部須完全塗黑並黏入黑色毛毯避免反射，觀察孔鑽有合適的圓孔，兩眼分別觀察兩孔可即時比較進入兩管的散射光強度，亦可分別攝影留待程式分析。



照片 31 一般玻璃無法用雷射切割，改用透明壓克力分光鏡



照片 32 橢圓形壓克力分光鏡能以 45 度角與 T 形連接管密合



照片 33 雙導光管設計初步，估計和嘗試排列設置



照片 34 改裝攝影器材的專用架，改變鎖孔以固定導光管



照片 35 導光管與方向刻度盤及專用架固定妥當



照片 36 兩個長 2.2 米寬 1.3 米的暗箱內外皆塗黑並黏以黑色布料

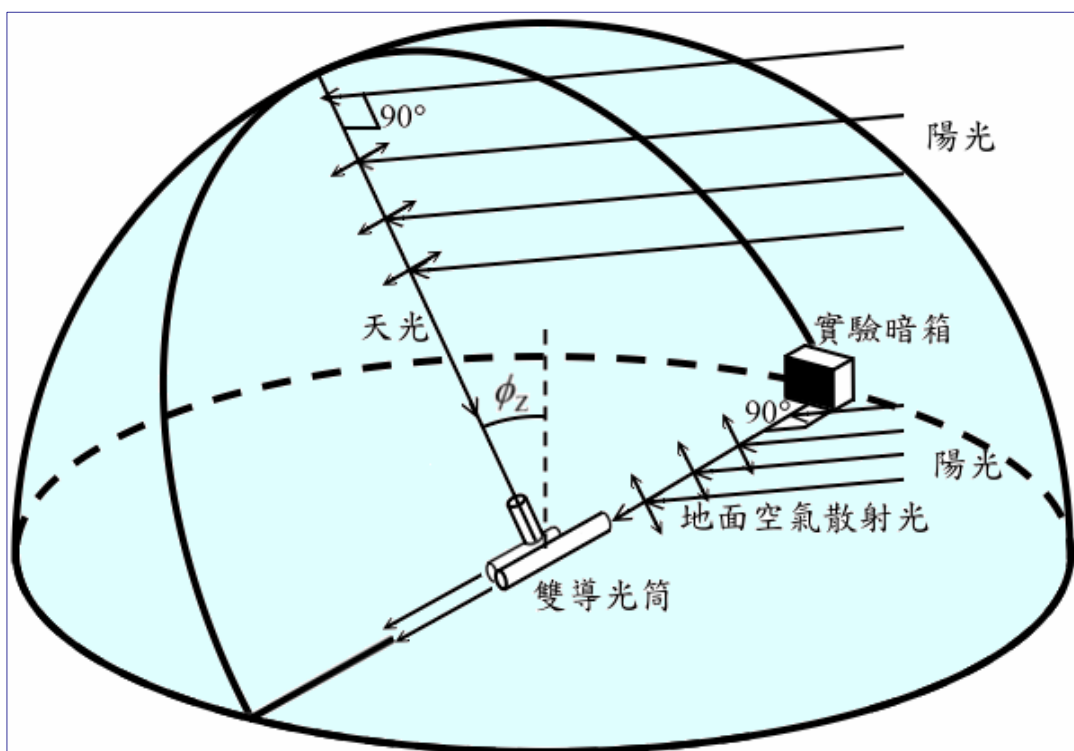


圖 33 天光與地面散射光皆與陽光垂直，為 100% 偏極光，改變暗箱距離，比較兩管內散射光強度，直到亮度相等

- 6.圖 33 說明了實驗的方法，調整導光管角度及方位，使天光與地面散射光皆與陽光垂直，為 100%偏極光，逐次改變導光管至實驗暗箱的距離，比較兩管內散射光強度，直到亮度相等為止如圖 34，記錄此一距離  $d$ 。
- 7.在實驗室先測量壓克力反射鏡的折射率為  $n = 1.48$ ，天光射向反射鏡的只有平行於入射面的 P 波，將折射率  $n$  及入射角  $45^\circ$  代入 (6) 式計算反射率得  $R_p \approx 0.8\%$ ，但因透明鏡片有內外兩個反射面，皆會反射入射的天光故實際的總反射率將達 1.6%。
- 8.實驗時太陽在  $60^\circ$  天頂方位上，調整導光管角度與天頂成  $30^\circ$  方向，由  $AM = 1/\cos\phi_z = 1/\cos 30^\circ = 1.15$  此為天光的光徑修正因子。
- 9.若地表空氣分子數密度為  $N(0)$ ，延著天光方向而上與導光管相距  $r$  處的分子數密度為  $N(r)$ ，依 (14) 式知

$$N(r) = N(0)\exp\left(-\frac{r\cos\phi_z}{H}\right)$$

從導光管至該處之間單位面積的空氣分子總數  $N_T$  為

$$N_T = \int_0^r N(r)dr = \int_0^r N(0)\exp\left(-\frac{r\cos\phi_z}{H}\right)dr$$

其中  $H$  為大氣層等效厚度或標尺高度，由導光管至黑箱間單位面積可散射的空氣分子數為  $N(0) \cdot d$ ，當天光與地面空氣散射光亮度相等時

$$N(0) \cdot d = x \cdot \int_0^\infty N(0)\exp\left(-\frac{r\cos\phi_z}{H}\right)dr = x \cdot AM \cdot H \quad (15)$$

注意上式積分上限為  $\infty$ ，積分值代表延伸天光方向至大氣層頂每單位面積的總散射分子數， $x$  則為前述分光鏡的反射率，化簡 (15) 式可得  $d = x \cdot AM \cdot H$ ，或寫成

$$H = \frac{d}{x \cdot AM} \quad (16)$$

天光方向  $\phi_z$  確定時 (16) 式右端分母為常數，調整黑箱距離  $d$  使兩導光管亮度相等即可依 (16) 式求出大氣層的等效厚度或標尺高度  $H$ 。

#### (四).光學法測量大氣層厚度的實驗改進

以上所述實驗結果有一些缺點，首先是導光管內雖經塗黑處理仍有少許反射光四竄 (見照片 37) 影響亮度判定；人眼對於亮度變化有極高的靈敏度，雙導光管的設計是模仿雙筒望遠鏡使實驗者輕鬆觀察，但許多人的左右兩眼視覺並不一致使得實驗結果因人而異，我們試過若將雙管分別攝影再以程式分析亮度差異 (見圖 36)，可得較高的解析度，但影像檔案須經擷取、輸入、合併然後載入程式分析，這樣不僅費時費力，而且若發現兩導光管亮度不同，欲重新調整黑箱距離時，此刻太陽方位已有變動，須再次調整天光角度非常麻煩，綜合以上缺點我們做了如下改進：

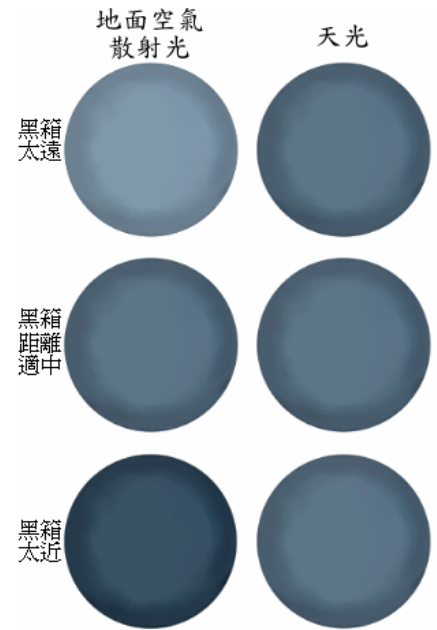


圖 34 改變暗箱距離，直到亮度相等

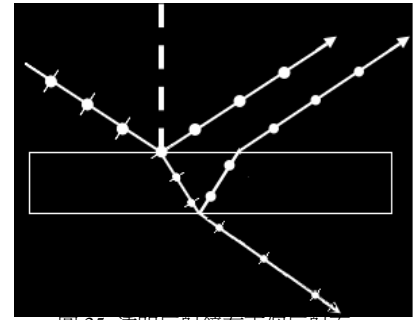


圖 35 透明反射鏡有兩個反射面



照片 37 導光管雖經塗黑處理朝向強光時漫射仍強



照片 38 天光管內經分光鏡反射，亮度大為下降

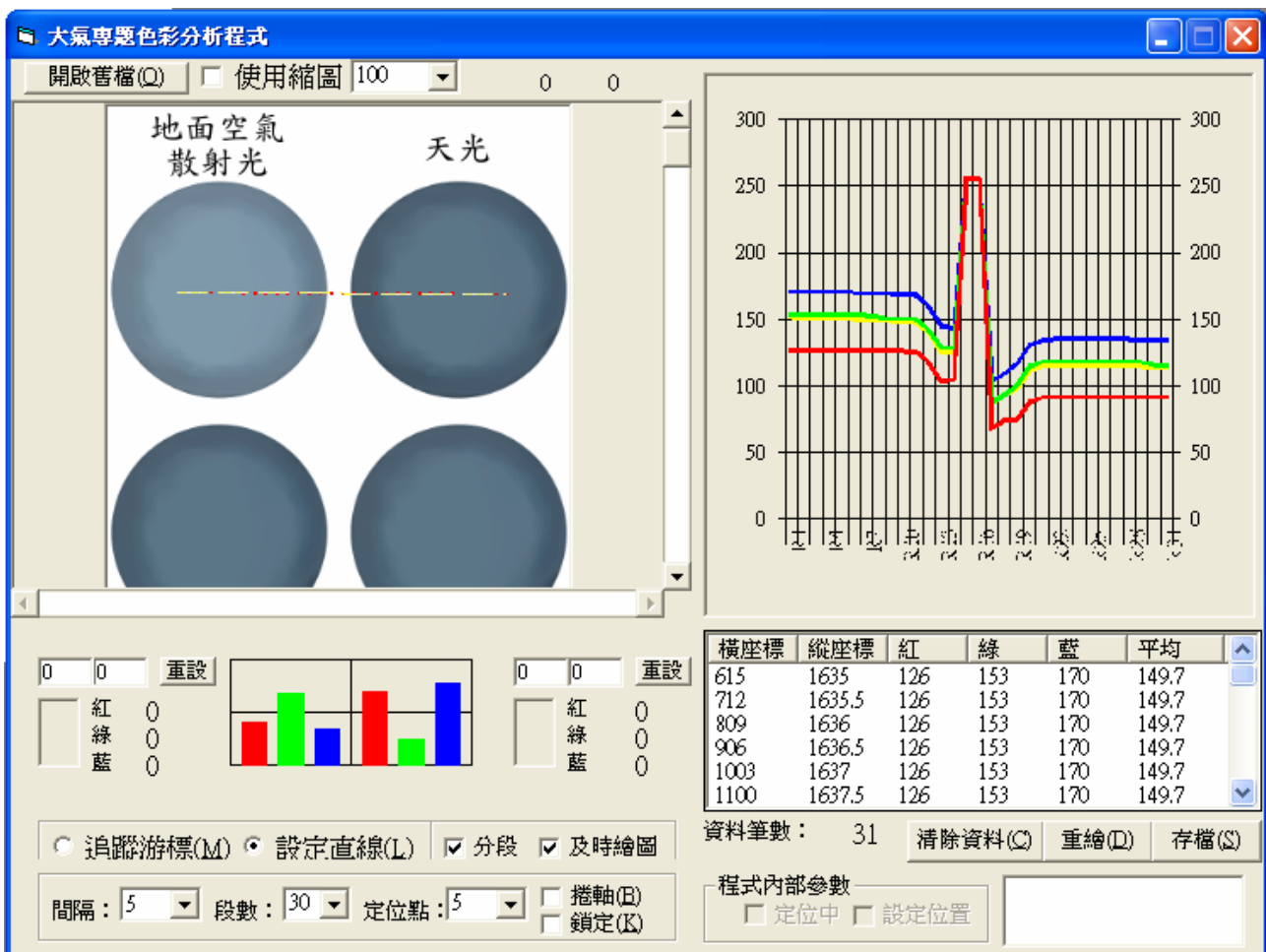


圖 36 天光與地面散射光，經擷取、輸入並到載入分析程式，左右兩導光管亮度差異可準確比較出來，但無法於測量時即刻得知

1. 導光管內設計環形光欄，阻止迷走及漫射的雜光。
2. 亮度比較我們以電子式光度偵測器擔任，以取代人眼或程式分析，可即時讀出雙導光管的亮度及分辨其間差異，市售光度計因形狀及光度範圍不適合本實驗使用，且需兩套完全相同的測量電路同時工作，必須自行研究製作：
  - (1) 使用極高靈敏度、高線性及頻率響應與人眼極為接近的光感測元件。
  - (2) 感測的光度經放大及校正後以數字型式即時而直接讀出兩組測量值，非常方便。
3. 為了有效濾除複散射光(multiple scattering)，在導光管入口均加上了線性偏光鏡。



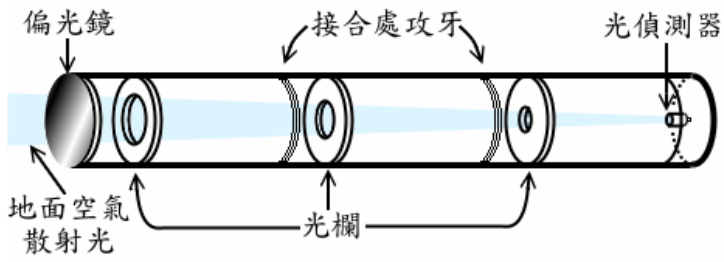
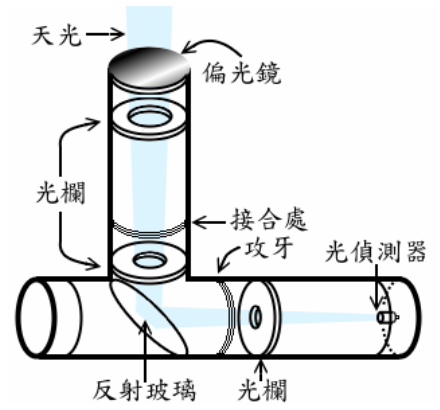


圖 36 天光與地面散射光導光管內加上光欄濾除迷走光，偏光鏡則阻止複散射光進入



照片 39 用雷射刀精準切出環狀光欄以阻止管壁反射



照片 40 環狀光欄之孔徑依導光管幾何長度次第減小



照片 41 線性偏光鏡能濾除複散射光(multiple scattering)



照片 42 在導光管口攻牙以順利旋轉調校偏光鏡角度



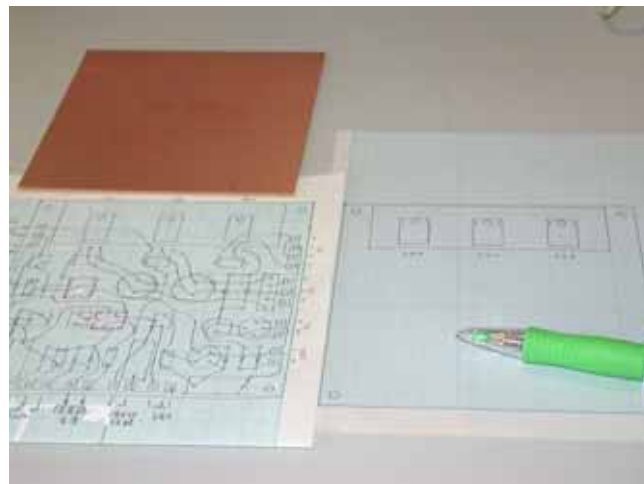
照片 43 使用極高零敏度、高線性度的光感測元件



照片 44 備妥機殼及周邊開關插頭等零件



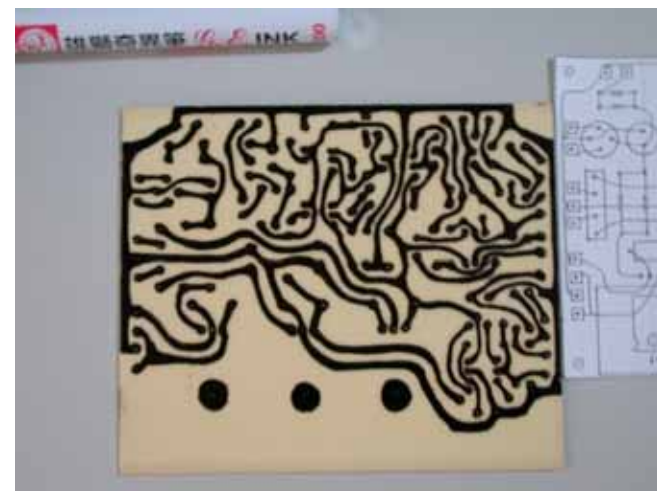
照片 45 購齊感測器放大及顯示電路所需的電子零件



照片 46 在方格紙上排列零件位置，過程中請老師指導與協助



照片 47 依方格紙設計圖以油性筆繪出零件連線圖案



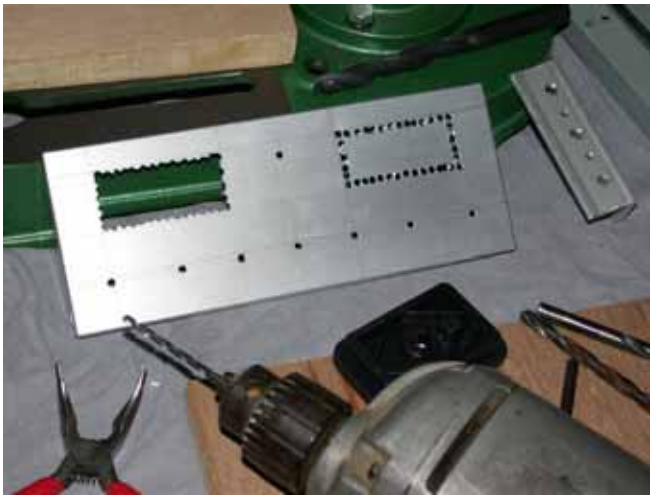
照片 48 PC 銅箔面清洗完成，只留下連線圖案



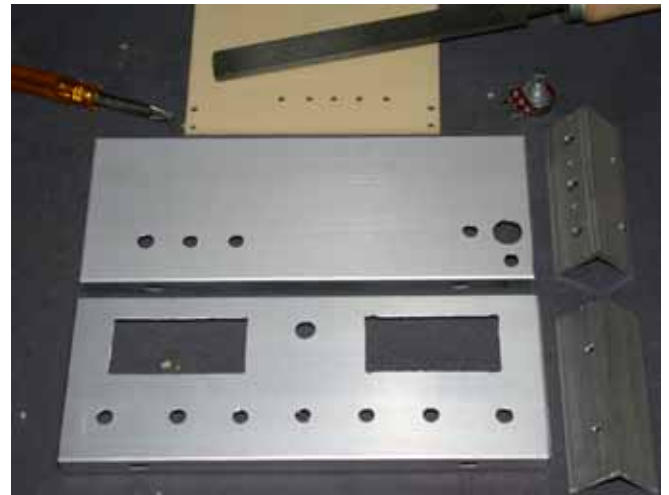
照片 49 PC 鑽孔後開始小心焊接零件



照片 50 散熱片及 PC 板零件全部焊妥完成



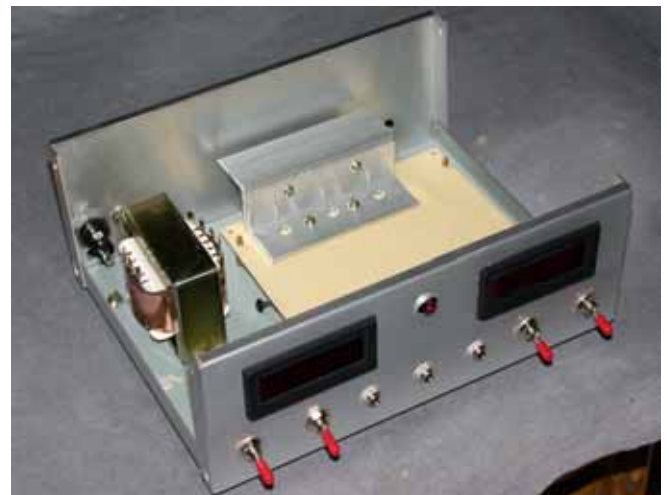
照片 51 機殼面板鑽孔處理過程攝影



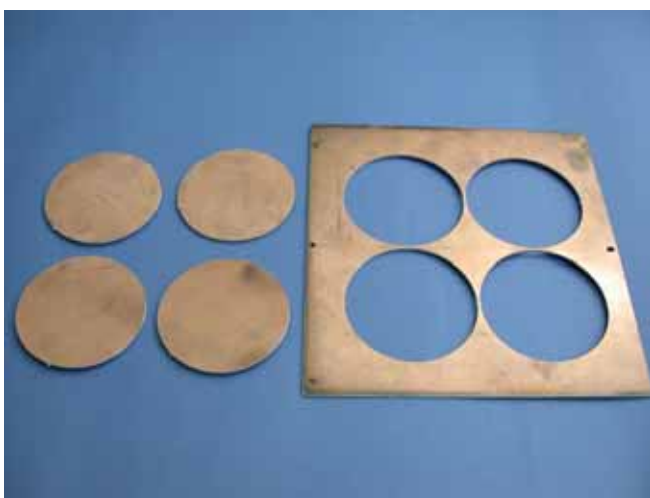
照片 52 正面的光度顯示器須以銼刀小心磨成矩形孔位



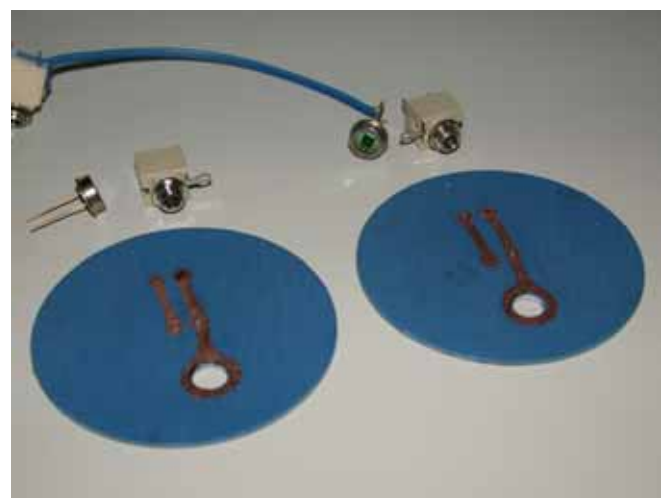
照片 53 機殼面板及背板鑽孔處理完成，與底盤組成一體



照片 54 鎖上所有開關和插頭並將電路板及散熱器置入



照片 55 導光管亮度不再用目測，自製固定光感測器的基板



照片 56 光感測器捕捉的信號以插頭連線傳至放大器方便好用







照片 59 實驗暗箱與導光管間距離以滾筒式皮尺精確測量



照片 60 導光管與暗箱相距約 21cm 地面散射光已有讀數，非常靈敏



照片 61 實驗暗箱與導光管間距離 60 米時天光讀數仍大於地面散射光



照片 62 導光管退至與暗箱相距 110 米時兩導光管散射光強度完全相同

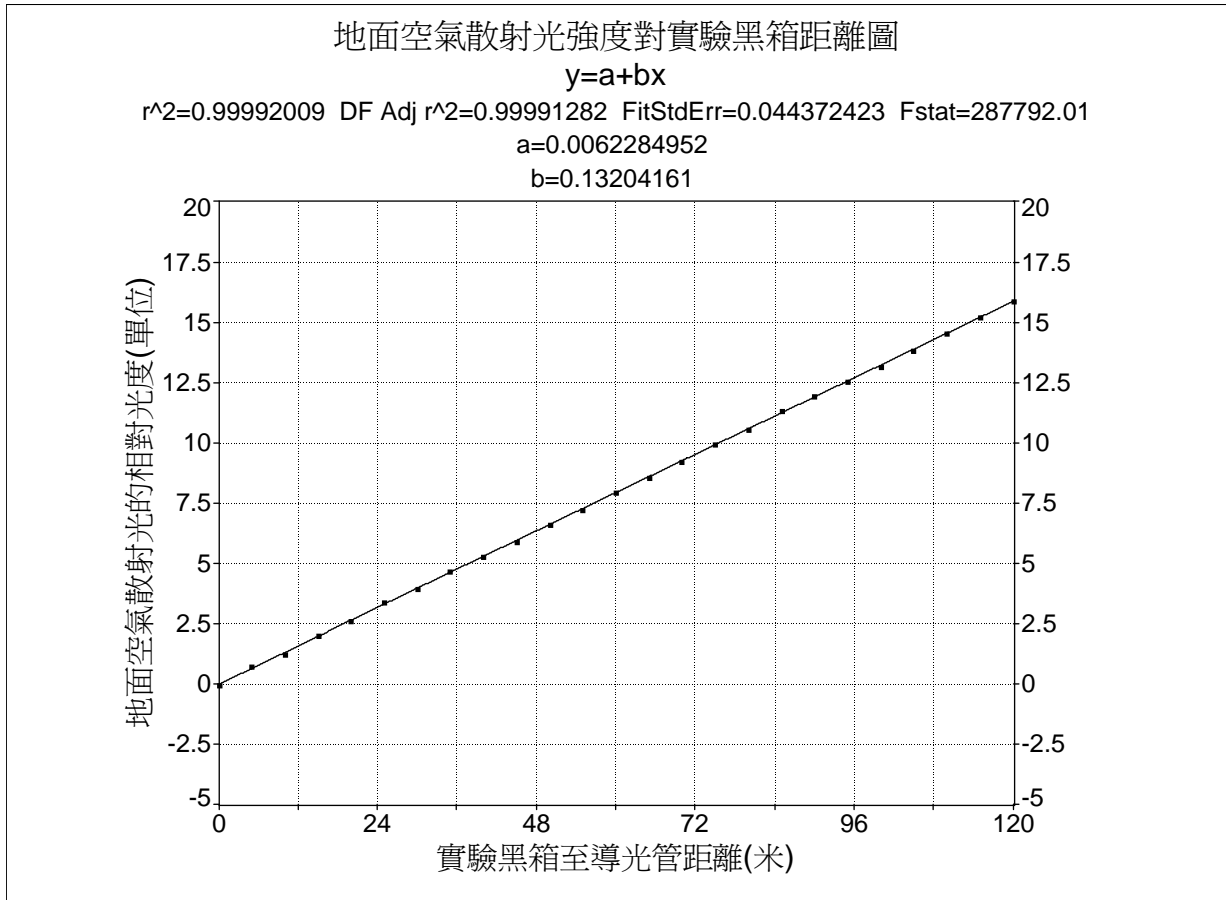
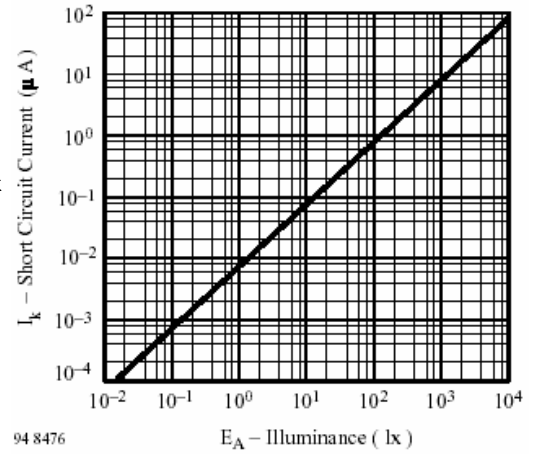
## 陸、研究結果及討論

### 一.自製儀器的性能評估

- (一).我們選用的感光元件依據原廠公佈資料(下頁右圖)為高靈敏度高線性度之感測器，而最重要的是其頻率特性與人眼極為吻合。實驗時我們發現當導光管與實驗黑箱相距 20cm 時散射光已開始有微小讀數，距離每增加 5 米我們記錄散射光強度一次，將數據製圖可看出呈線性關係，(15)式中地面空氣散射光強度  $\propto N(0)d$  充分得證。
- (二).測量時兩支導光管口的偏光鏡都要旋轉至光度讀數最大，如此進入導光管的散射光

將是 100% 偏極的，且偏振方向正好與圖 33 中的入射面平行，複散射的微弱光幾乎全數阻隔在導光管外，可提高實驗的精確度。

- (三). 實驗時若太陽天頂角取在  $60^\circ$  方位，則導光管需與天頂成  $30^\circ$ ，使用大型量角器定準天光管傾斜角度，以 GPS 衛星定位找到學校的經度和緯度，利用天體位置軟體求出太陽天頂角於  $60^\circ$  的正確時刻，架設好實驗器材，依據天頂角相對於時間的變化，讀取數據並且記錄之。



照片 64 以 GPS 全球衛星定位系統找到學校正確經緯度



圖 40 天體位置自動估算程式求得太陽方位時刻

## 雙導光管測量大氣層標尺高度實驗數據

實驗日期	實驗時測候站更新的氣象資料			亮度讀數		修正數	黑箱距離	計算標尺高度
	年/月/日	天氣	海面氣壓(mb)	能見度(km)	天光管			
92/11/15	晴	1015.7	22	16.9	16.9		137.1	7.45
92/12/20	晴	1018.2	24	17.2	17.2		135.4	7.36
93/02/10	晴	1023.4	25	17.4	17.4	1.15	139.3	7.57
93/02/11	晴	1023.2	20	17.0	17.0		134.7	7.32
93/02/26	晴	1018.4	15	16.5	16.5		132.9	7.22

(我們以VB語言撰寫程式全天候自動對台北測候站擷取每2小時更新一次的最新天氣資料存檔)

### 二.測量的時機與結果討論

- (一).大氣散射專題是研究空氣分子的光學行爲，地面或空中若有塵霾或氣溶膠及霧氣，都會嚴重影響測量結果，測量的時機必須選擇晴朗無雲的天氣，天空呈現一片深藍色，最好是經過連續幾天大雨沖刷後天氣突然放晴的日子，陽光清澈及蔚藍的天空並且萬里無雲的情況下實驗數據才有意義。
- (二).從去年 11 月底至今年 3 月間我們共等到了 5 次較佳的天候狀況(見上表及實驗日誌)合適進行實驗，其中最佳的實測值爲  $H = 7.6km$ ，與理論的大氣層等效厚度及等溫模式下的大氣標尺高度數值極爲接近，相差未超過 5%，實驗結果令人振奮。

### 柒、研究結論

- 一.在這個專題中我們發展了三個實驗，前兩種液體及微量純化空氣的散射實驗，主要是屬於定性的實驗，讓我們可以清楚觀察和瞭解微小質點對於光的散射現象，配合自行撰寫的色彩分析程式，更能看出散射後光的顏色和亮度的變化及分佈；第三個實驗則利用與陽光呈垂直方向的地面空氣散射偏極光來測量相同條件下的天光，原理簡單、方法可靠，並自製儀器測量大氣層的厚度，得到可以接受的實驗數據。
- 二.在液體散射實驗中我們觀察到了牛奶散射藍光的現象，這與大氣分子散射藍光造成藍色天空的原理相近，但是散射是會損失入射能量的，圖 18、19 可看出光前進的路徑較長時藍光能量逐漸散盡，剩餘者多爲波長較長的色光，因此牛奶漸呈現橙紅色，此與黃昏時美麗夕陽染紅天邊的道理一致，大氣散射陽光形成了天空景色的萬千變化。
- 三.空氣散射是很難在實驗室中看到的，網站和書本上都沒有看過，僅文獻[4]有略述，我們利用強力光源加上透鏡聚集，且純化空氣後僅使用少量空氣分子即能散射出淡淡藍光(圖 27)，最初曾經過無數次的失敗，差點想放棄這個實驗，經驗和實驗技巧是在多次失敗中累積出來的，最後終於看到純淨空氣中散射出美麗的淡藍色光時真是令人雀躍。可是當我們故意在十字形光導管內灌入燃燒廢棄物後的灰煙時，散射光居然呈現紅褐雜色(圖 28)，藍光消失殆盡...所以我們若想保有地球美麗的藍色大氣層，減少空氣汙染真的是當務之急！這也是每個人無可推諉的責任。



四.雷氏散射只發生在極微小的粒子上，對於可見光波長，粒子直徑需小於100A 才有比較對稱而合於(8)式的散射，粒子尺寸大於此值則須以米氏散射處理，空氣分子的直徑[8]約為 $10^{-4}\mu\text{m}$ ，即1A 左右，我們上網查詢牛奶微粒的大小，發現牛奶中最小的微粒是酪蛋白膠粒約為 $0.03\mu\text{m}$  [10]，酪蛋白膠粒常會將環繞於其四圍的次酪蛋白膠粒脫落，這種微粒極小只有(30A)，此即為牛奶能夠散射藍光的主要原因，我們也對麵粉及玉米粉做過同樣的實驗，卻完全無法散射藍光，光徑在液中只呈現白霧狀的米氏(Mie)散射。

五.)整個實驗最精華之處，就是以能夠任意調整及精確測量、且與陽光方向垂直的一段地面距離，測量其間完全偏振的散射光強度，利用其結果來比對相同偏振狀況的散射天光，再以(15)式即能簡單求出大氣層的等效厚度，不需使用高空氣球、探空飛機或是氣象衛星，在學校中即可進行實驗，相當具有教育及實用上的價值。

六.大氣層結構複雜且變化多端，但人類以幾種簡單的光學模型即可近似地描述大氣層的散射特性，整個大氣可視為約8km的均勻氣柱壓在單位面積地面上，這與76cm水銀柱底部造成的壓力完全相同，8km常被視為大氣的等效厚度，但其實大氣是沒有邊界的，依(12)式我們知道高度每上升一個標尺距離8km，大氣壓力會下降成原初的36.8%，高度越高空氣就越稀薄，氣壓也就越低，能測出這個標尺高度，就好像在大氣層豎立了一支標尺，高度每增加一個單位標記H，氣壓即有一段相同的衰退率(36.8%)，這樣可以明確且具體的知道大氣是如何隨高度變化分佈的。事實上大氣是無邊無界的，只能說其主要的氣體分子還是集中在十數公里高度以下，它們是決定氣候及天空顏色的主要角色。

## 捌、參考資料及其他

### 中文資料

- 1.毛松霖 基礎地球科學 修訂四版 康熙圖書 p83
- 2.褚德三 基礎物理 最新修訂本 台北縣 龍騰文化 p44
- 3.劉明揚 大氣測計學 一版 台北市 國立編譯館 p291

### 西文資料

- 4.R. W. Wood,"Light scattering by air and the blue colour of the sky," philos. Mag.39(232), 423-433 1920
- 5.M. G. J. Minaret, Light and color in the outdoor (Springer, Berlin,1993).
- 6.M. Vollmer,"A simple method for estimating the thickness of the atmosphere by light scattering," Am. J. Phys. 71(10),2003 p979
- 7.C. F. Bohren, "Atmosphere optics," in Encyclopedia of Applied Physics, Vol. 12, 405-434.
- 8.EARL J. McCARTNEY "Optics of the Atmosphere" John Wiley and Sons,New York.

### 網路資料

- 9.<http://anka.livstek.lth.se:2080/microscopy/f-milk.htm>
- 10.[http://www.env.leeds.ac.uk/envi1280/lecture\\_notes\\_carlaw2/sld001.htm](http://www.env.leeds.ac.uk/envi1280/lecture_notes_carlaw2/sld001.htm)