

中華民國第 59 屆中小學科學展覽會 作品說明書

高級中等學校組 環境學科

團隊合作獎

052603

不同散射源對相關色溫變化值之探討

學校名稱：高雄市立高雄高級中學

作者： 高二 黃增稜 高二 林柏喬 高二 何建茂	指導老師： 吳嘉鴻
---	------------------

關鍵詞：相關色溫、瑞利散射、PM2.5

摘要

我們透過研究光粒子對光線造成的散射影響下，分析散射光線對應的相關色溫值的變化幅度，去反推那團細懸浮微粒的濃度。若能建立出細懸浮粒子濃度對相關色溫變化值的數據分析的關聯，我們將可以用這套系統應用在各種需要測量空氣品質的情況。

本研究中，我們使用光譜儀所測得光線被散射前後相關色溫的變化，在實驗中藉由自然現象及製造不同波長的光源探討瑞利散射的性質，接著在實驗三中改變煙塵的濃度，與測得的相關色溫變化值比較，得到兩者呈現正相關，也就是說，當一個環境中細懸浮微粒越多，相關色溫的變化量就越大，最後，在實驗四中，我們延續實驗二的方法把散射源改成小水滴，觀察測得的數據得知相關色溫的變化量有一個可能的飽和點。

研究動機

每次在高速公路上經過那一根根排著或黑或白的廢氣的煙囪時，總是會 有個疑問？那些工廠到底排了多少濃度的煙？有沒有為了逃避空汙稅而在陰 雨天時偷排煙？我們曾在某文章中看到，雖然目前全台已有不少工廠的煙囪有裝設早已在 1993 年便引進的 CEMS，也就是所謂的固定污染源空氣汙染物連續自動監控設施(Continuous Emission Monitoring System)，但實際上，許多不肖業者往往為了避免超標，而使 CEMS 測到的數據“被消失”，使用的手段不乏假裝故障、外掛軟體或調整參數；讀完這篇文章之後，針對 CEMS 的效果不彰這個問題，我們認為最根本的原因便是 CEMS 這個系統本身沒有多少民眾知道，而且過於精密，使得此系統的程式極容易被篡改，而且即便被竄改了也不會有民眾發現，此外雖然煙囪的煙可被肉眼看到，但肉眼無法分辨工廠排放的到底是有害物質還是無害的水蒸氣，因此即使通報環保署 也常常如石沉大海杳無音訊，因此，我們決定要找出一個更簡單、且更大眾化的方法，來避免那些不肖業者繼續肆無忌憚的排放廢氣。後來，在偶然間得知了一些關於散射的知識後，認為這可能是一個分析工廠排放的廢氣種類很好的切入點，因此決定展開研究。

壹、 研究目的

- 一、探討線香煙粒對不同色光之散射效應。
- 二、探討煙粒濃度對散射效應之影響。
- 三、探討利用光源散射之相關色溫數值差作為煙囪排廢量偵測器之可能性。
- 四、探討小水滴對不同色光之散射效應。

貳、 研究設備與器材

一、研究器材：

1. 電腦
2. 光譜分析儀(群智科技光譜精靈 ASENSE ALP-01)
3. 箱子
4. 線香
5. 打火機
6. 攀藤科技煙霧偵測器(arduino PMS7003-G7)
7. 光源(Ronever PA-Q5-3)
8. 計時器
9. 超音波水霧產生器
10. 使用軟體：SPECTRUM GENIUS、PMS ARDUINO 1.8.8、EXCEL、小畫家



(a)光譜分析儀



(b)煙塵偵測器(型號 PMS 7003)



(c)手電筒



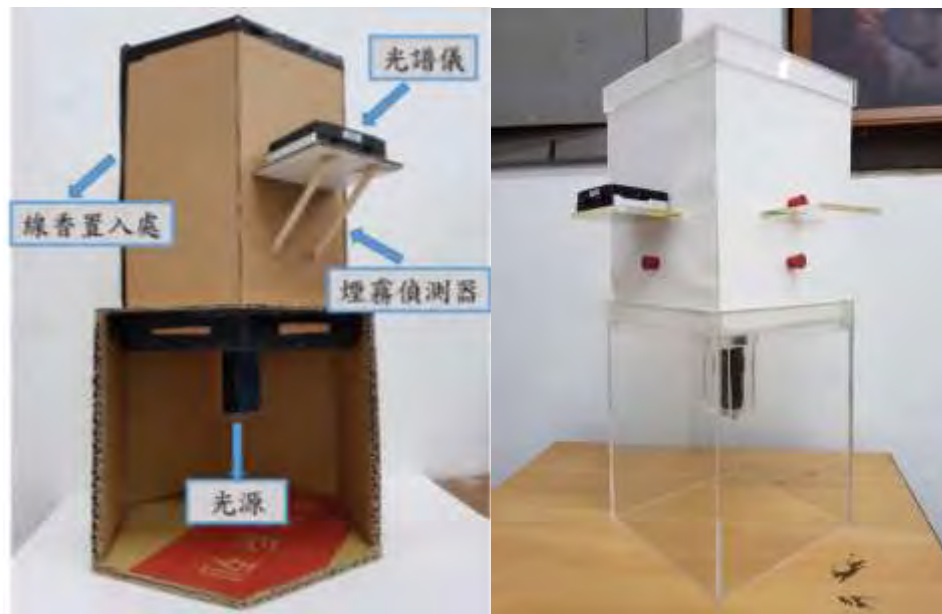
(d) 超音波水霧產生器

* 攀藤科技 PMS7003 G7 高精度雷射型粉塵感測器，上圖(b)，是一款使用鐳射散射原理的數位式通用顆粒物濃度感測器，可連續採集並計算單位體積內空氣中不同粒徑的懸浮顆粒物個數，即顆粒物濃度分佈，進而換算成為品質濃度，並以通用數位介面形式輸出。

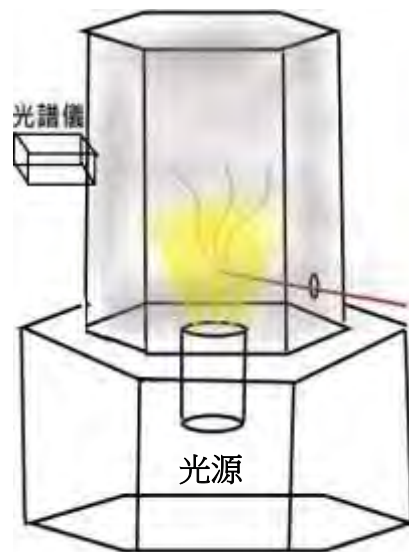
參數	指標	單位
顆粒物測量範圍	0.3~1.0；1.0~2.5；2.5~10	微米 (μm)
單次回應時間	<1	秒 (s)

二、研究裝置

由散射的特性我們可以知道被散射的光線將會偏離原本光束的路徑，若是我們要用光譜儀捕捉那些被散射的光線，光譜儀必須置於原本光線路徑的側面，因此，我們設計一個實驗裝置箱，如圖一。



圖一(1)實驗裝置箱(實驗二，三使用) 圖一(2) 實驗裝置箱(實驗四使用)



內部透視示意圖

(真實容積約 5715cm³)

參、 研究方法與過程

一、 實驗原理

(一) 散射現象

如果有物體跟光相互作用的時候，造成有一部分的光前進方向改變；從電磁波的角度來看，可以把它看成是入射光，跟原子分子裡面的電子相互作用被吸收，再重新放出來的這個過程，在這個過程裡面，光線的方向會因為吸收再重新放出來而改變，但是，光的頻率不會改變；若從光是粒子的角度來看，散射就像是光粒子跟原子分子的彈性碰撞，而我們知道在彈性碰撞的這個過程裡面，彈性碰撞只會改變方向但是不會改變它的能量，所以光的總顏色，也不會因此而改變，但是方向會改變，造成我們從不同角度看這個光源時，這束光線的顏色好像有改變，這就是散射現象。

1. 瑞利散射 (Rayleigh scattering)

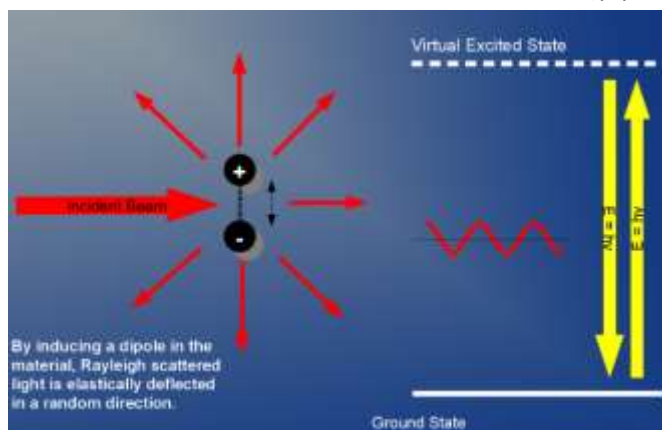
當跟光相互作用的那個粒子的大小遠小於波長的時候，散射的強度會跟波長的 4 次方成反比，也就是說，越短波長的光，散射強度會變得越強。瑞利散射公式表示式如下式(1)：

$$I = I_0 \frac{1 + \cos^2 \theta}{2R^2} \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^4 \left(\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \right)^2 \left(\frac{d}{2} \right)^6 \quad \text{式(1)}$$

I：光強度
R：光源與粒子間的距離
 θ ：散射角度
d：粒子的直徑
n：折射率
 λ ：波長

我們若將波長設為操縱變因，其他控制不變，可進而將公式簡化為式(2)

$$I(\lambda)_{\text{scattering}} \propto \frac{I(\lambda)_{\text{incident}}}{\lambda^4} \quad \text{式(2)}$$



圖二 瑞利散射示意圖(摘自 the physics mill)

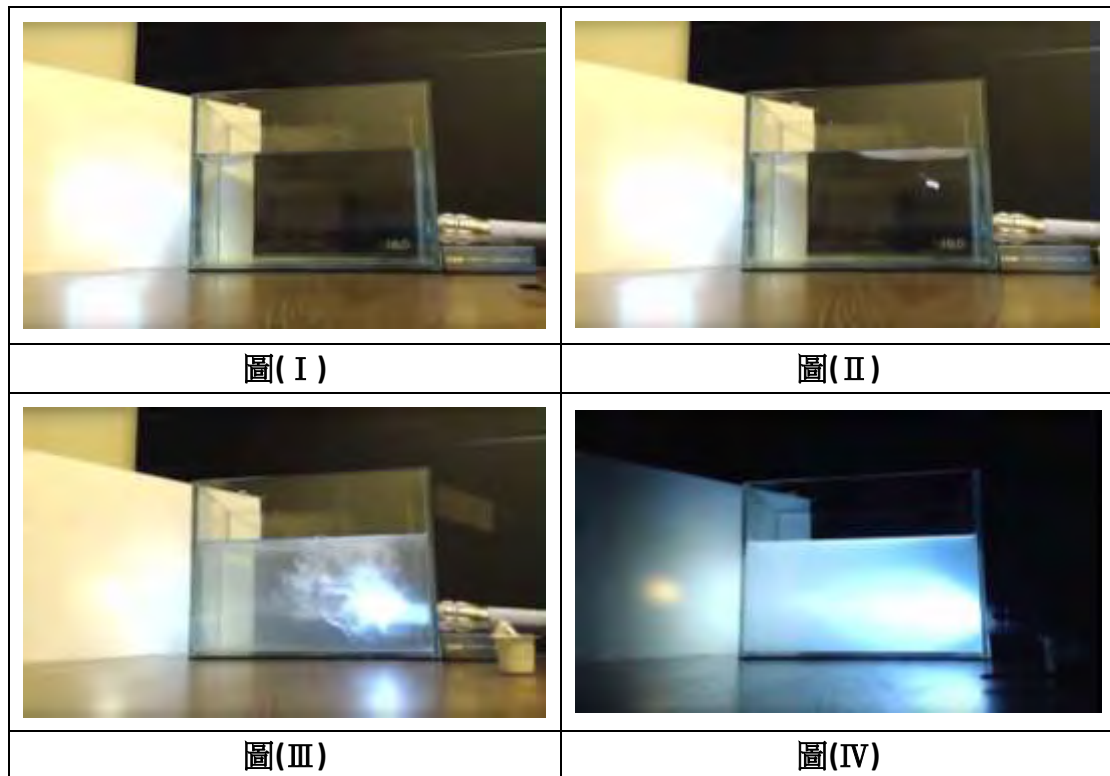
我們從台大物理系朱士維教授於網路教學網站 Coursera 的普通物理學課程的實驗了解到關於瑞利散射實驗如下：

圖(I)水箱右側以手電筒作為光源，在未加入奶精的時候無法看出手電筒的光線經過水箱的光束；

圖(II)在水箱中倒入奶精；

圖(III)攪拌奶精，光束就越來越明顯；

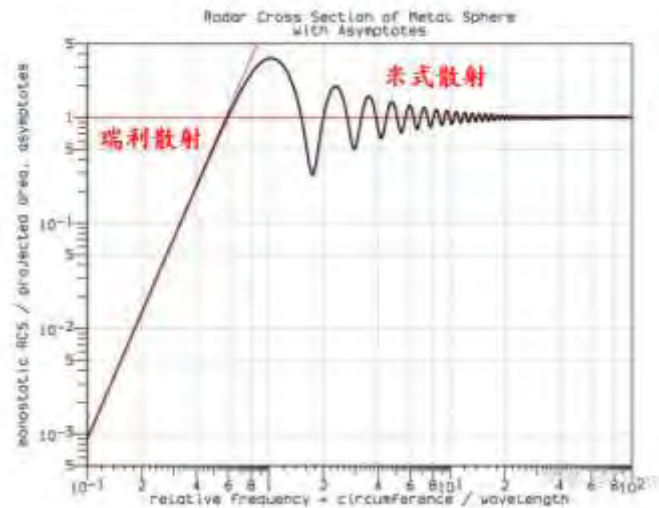
圖(IV)我們可以看到手電筒這個光源所產生的光線，分別在光束的路徑方向和路徑的側面產生了不同的光線顏色，在路徑的側面是大量的藍光，而在路徑方向的白紙上可以看到一個小小的橘點，這表示當光線通過充滿微小粒子(奶精)的水箱時，波長較短的藍光會被散射到側面，只剩下波長較長的紅光繼續前進，打在紙上形成那個橘點。



2. 米氏散射(Mie Scattering)

若產生散射的粒子比波長還要大的時候，各個波長的散射的強度會大致相等，此為米氏散射現象。

如圖三所示，橫軸是波長，縱軸是散射強度，當波長很短的時候，就是所謂的瑞利散射，所以它會有一個斜率的變化，算出來這個散射的強度，與波長的 4 次方的反比的關係。而圖三的最右邊，就是所謂的米氏散射，這個時候散射的強度跟波長就沒有什麼太大的關係，也就是說各個波長的散射強度大致相等。



圖三 瑞利及米氏散射發生的區間示意圖

(摘自台大物理系朱士維教授於網路教學網站 Coursera 的普通物理學)

(二) 相關色溫(Correlated Color Temperature, CCT)

色溫是通過對比它的色彩和理論的熱黑體輻射體來確定的。熱黑體輻射體與光源的色彩相匹配時的凱爾文溫度(K)就是那個光源的色溫，從下圖一可以看出色溫值愈高，光線顏色愈偏向藍色



圖四 相關色溫對應的光線顏色 (摘自群智科技網頁)

(三) 細懸浮微粒

漂浮在空氣中像灰塵的粒狀物稱為懸浮微粒(particulate matter, PM)，懸浮微粒依照不同氣動粒徑區分成 PM10 跟 PM2.5、PM1.0，其中 PM10 為氣動粒徑小於或等於 10 微米之懸浮微粒又稱之為粗微粒，而 PM2.5 則被稱作為細懸浮微粒。懸浮微粒在空氣中具有很強的光散射效應。

二、實驗設計

【實驗一】 散射現象與相關色溫(CCT)之關係

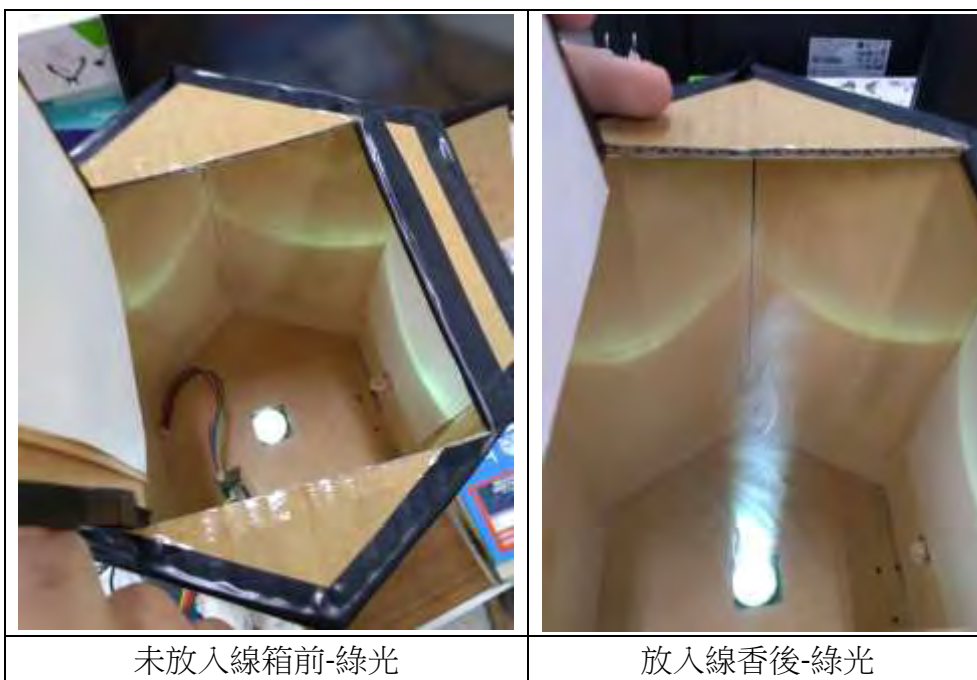
- 實驗步驟：(1)使用光譜分析儀測量「晴空」時的相關色溫，並記錄。
(2)使用光譜分析儀測量「夕陽」時的相關色溫，並記錄。



圖五 在學校頂樓測量晴天時的相關色溫

【實驗二】 分析線香煙粒對不同色光之散射效應

- 實驗步驟：(1)在實驗裝置箱中，測量光源光色分別為黃光、綠光、白光之初始相關色溫數值。
(2)放入燃燒的線香一段時間再抽出，使實驗裝置箱中充滿某濃度煙粒。
(3)分別測量黃光、綠光、白光經散射光源之相關色溫數值。
(4)改變實驗裝置箱內線香煙粒濃度，再測量一次。



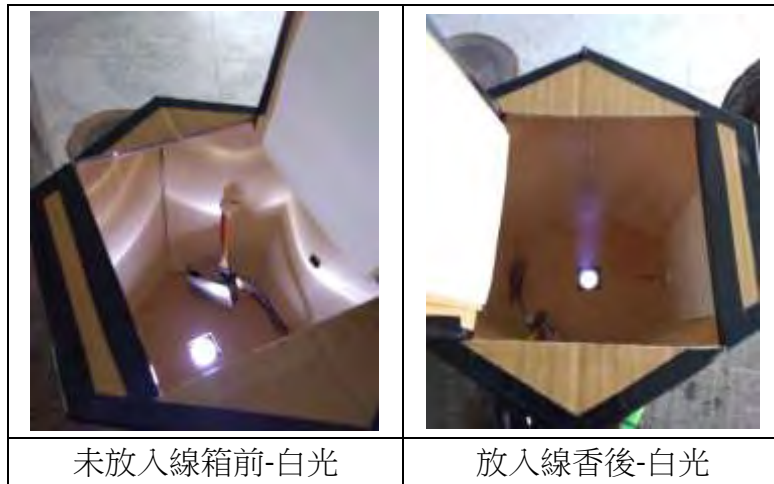
【實驗三】分析煙粒濃度對散射效應之關係

實驗步驟：(1)在實驗裝置箱中，以白光為光源，測量初始相關色溫數值。

(2)放入燃燒的線香某段時間再抽出，使實驗裝置箱中充滿某濃度煙粒。

(3)測量經散射光源之相關色溫數值。

(4)改變實驗裝置箱內線香煙粒濃度，反覆測量。



肆、 研究結果

【實驗一】 散射現象與相關色溫(CCT)之關係

白天時，太陽在頭頂，當太陽光經過大氣層時，與空氣分子發生瑞利散射，因為藍光比紅光波長短，經瑞利散射作用，被散射的藍光布滿了整個天空，從而使天空呈現藍色。當日落時，太陽幾乎在我們視線的正前方，此時太陽光在大氣中要走相對很長的路程，所看到的直射光中的藍光大量都被散射了，只剩下紅橙色的光，這就是為什麼日落時太陽附近呈現紅色，而雲也因為反射太陽光而呈現紅色。

我們分別在上午及傍晚夕陽時，量測天空的色溫，使用 ASENSE ALP-01 光譜儀連續測量的功能連續測量 10 次，每次間隔約 8 秒，從這十組數據中，去掉最大以及最小值後將其餘 8 組取平均作為相關色溫數值，如圖六所示。

時間名稱	CCT1	CCT2	相關色溫(CCT)	散射指數(CU)	散射指數(CU)
08:00:00	0.3421	0.3421	3427	98	97
0.3421	0.3421	0.3421	3427	98	97
0.3421	0.3421	0.3421	3427	98	97
0.3421	0.3421	0.3421	3427	98	97
0.3421	0.3421	0.3421	3427	98	97
0.3421	0.3421	0.3421	3427	98	97
0.3421	0.3421	0.3421	3427	98	97
0.3421	0.3421	0.3421	3427	98	97
0.3421	0.3421	0.3421	3427	98	97
0.3421	0.3421	0.3421	3427	98	97
最大值	0.3421	0.3421	3427	98	97
最小值	0.3421	0.3421	3427	98	97
均值	0.3421	0.3421	3427	98	97
平均值	0.3421	0.3421	3427	98	97

圖六 ASENSE ALP-01 光譜儀連續測量圖

(一)實驗數據分析：

	晴天	夕陽晚霞
圖片		
相關色溫	5845 K	4063K

表一

(二)討論：

1. 從瑞利散射的特性中我們得知到晴天時，大氣散射了較短波長的藍光，使天空看起來是藍色的。而夕陽晚霞呈現偏紅的顏色，是因為陽光穿過的大氣層較厚，過程中短波長的藍光被散射掉，如實驗原理中圖(IV)，最後進入人眼的太陽光以波長較長的紅光為主，所以我們看到火紅的夕陽。
2. 觀察晴天與夕陽的相關色溫值發現，我們在晴天測得的相關色溫值大於夕陽晚霞，可知相關色溫較高時，代表短波長光線散射較多；相關色溫較低時，代表短波長光線散射較少。

【實驗二】分析線香煙粒對不同色光之散射效應

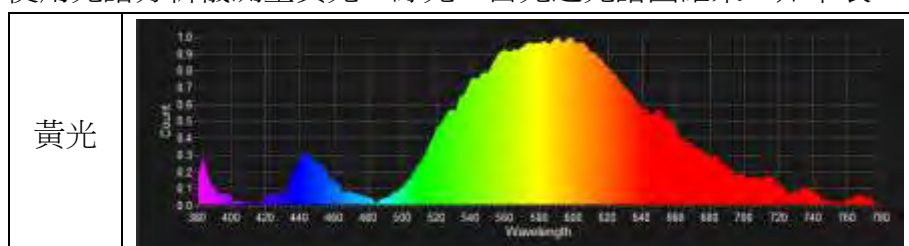
由前述實驗原理可知，散射現象與懸浮微粒的粒徑及光的波長有關。我們首先在 Ronever PA-Q5-3 手電筒上套上單層綠色或黃色玻璃紙，以及沒有套上任何玻璃紙的手電筒，產生了白光，綠光和黃光三種光源，安裝在實驗裝置箱中，使用 ASENSE ALP-01 光譜分析儀連續測量的功能測量 5 次，每次間隔 8 秒，從這 5 組數據中取平均值作為原始相關色溫數值。

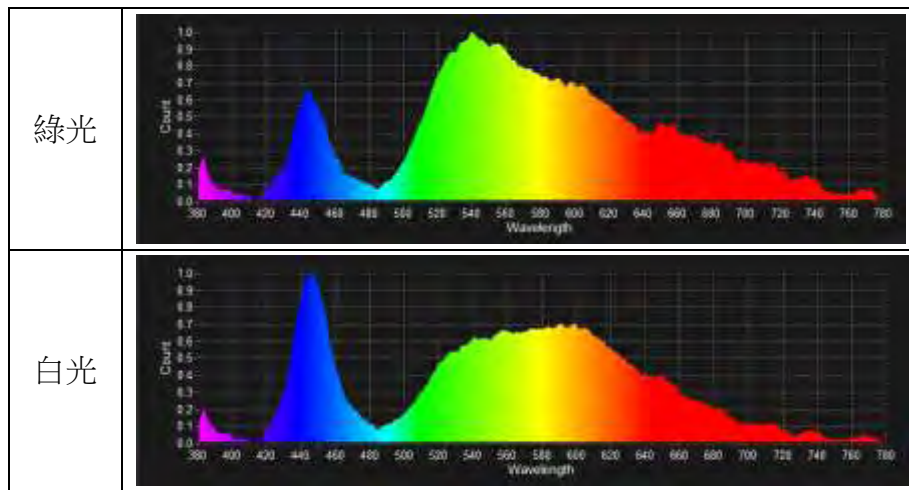
接著，放入燃燒中的線香直到我們需要的濃度後，拔出線香並使箱子靜置 10 秒，同樣的，使用光譜分析儀連續測量的功能測量 5 次，每次間隔 8 秒，從這 5 組數據中取平均值作為經散射光源之相關色溫數值。

以上步驟重複 3 次，再改變光源顏色進行實驗。

(一) 實驗數據分析

1. 使用光譜分析儀測量黃光、綠光、白光之光譜圖結果，如下表二：





表二

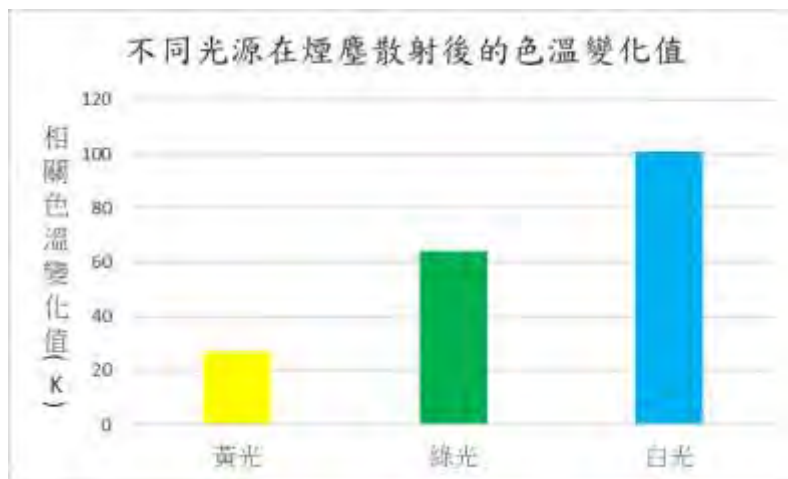
2. 實驗二，線香煙粒濃度為 $[PM\ 1.0 - 77\ \mu g/m^3; PM\ 2.5 - 1511\ \mu g/m^3]$ ，CCT 為相關色溫、 $\Delta\ CCT$ 為經散射 CCT 與初始 CCT 之差、AVG $\Delta\ CCT$ 為 $\Delta\ CCT$ 數據的平均值。

光色	初始 CCT (K)	經散射 CCT (K)	$\Delta\ CCT$	AVG $\Delta\ CCT$ (K)
黃光	3065	3093	28	27
	3075	3099	24	
	3067	3095	28	
綠光	4272	4343	71	64
	4278	4331	53	
	4264	4332	68	
白光	4121	4221	100	101
	4095	4203	108	
	4091	4185	94	

表三

(二) 討論

我們將實驗二的結果製成長條圖作比較，如圖七所示。



圖七 不同光源在煙塵散射後的色溫變化值長條圖

1. 實驗中發現白光的 Δ CCT 大於綠光及黃光。
2. 由表二不同色光光譜圖可以看見，白光的短波長(450 nm)光線強度大於綠光，綠光的短波長(450 nm)光線強度又大於黃光，我們認為短波長光線強度越強，使得經散射之後的光源的相關色溫數值越高。
3. Δ CCT 值越大，代表越多短波長的光被散射，所以散射較多。
4. 從實驗二的結果，我們決定在實驗三中採用白光做為光源，因為白光有較明顯的相關色溫變化量。

【實驗三】分析煙粒濃度對散射效應之關係

依據實驗二的結果，在實驗三中我們選擇白光作為光源，較有利於光源散射後的相關色溫數值變化的測量。

我們反覆測量多種不同的線香煙粒濃度，經散射光源之相關色溫數值與原始相關色溫數值之差。

相關色溫數值是使用光譜分析儀連續測量的功能測量 10 次，每次間隔 8 秒，從這 10 組數據中捨去最大和最小值後取平均值作為經散射光源之相關色溫數值。

線香煙粒濃度是由 arduino PMS7003-G7 煙霧偵測器在電腦上顯示的數值做判斷，取濃度較穩定時作為紀錄(圖八)。

經過 34 次使用隨機濃度的實驗下，總共測得 340 組個別數據，共 34 組有效數據，再加上五組濃度超過儀器上限的相關色溫數據，共 39 組。



圖八 arduino PMS7003-G7 煙霧偵測器在電腦上顯示的畫面

(一)實驗數據分析

實驗三量測資料如下表四：

編號	初 始 CCT (K)	經散射 CCT (K)	Δ CCT	PM 1.0 濃度	PM 2.5 濃度
1	4313	4398	85	117	2412
2	4260	4328	68	116	2194
3	4274	4349	75	120	2442
4	4248	4348	100	141	2562
5	4257	4344	87	137	2284
6	4267	4311	44	105	2449
7	4204	4227	23	339	600
8	4204	4225	21	324	569
9	4204	4217	13	314	542
10	4204	4213	9	317	541
11	4204	4215	11	313	537
12	4204	4220	16	310	517
13	4204	4215	11	306	501
14	4204	4221	17	300	489
15	4204	4229	25	298	495
16	4171	4189	18	277	1464
17	4171	4225	54	272	1529
18	4171	4199	28	273	1536
19	4171	4222	51	274	1478
20	4171	4191	20	283	1448
21	4171	4214	43	281	1445
22	4171	4210	39	290	1446
23	4171	4203	32	285	1420
24	4171	4189	18	291	1419
25	4171	4197	26	294	1404
26	4241	4254	13	375	1056
27	4241	4255	14	371	1023
28	4241	4254	13	378	1012
29	4241	4256	15	388	1006
30	4241	4257	16	390	989
31	4274	4338	64	98	1997
32	4283	4333	50	94	1923
33	4244	4322	78	112	2136
34	4267	4299	32	109	2307

35	4527	4647	120	3333	3333
36	5863	6030	167	3333	3333
37	5272	5473	201	3333	3333
38	4316	4559	243	3333	3333
39	4530	4848	318	3333	3333

表四

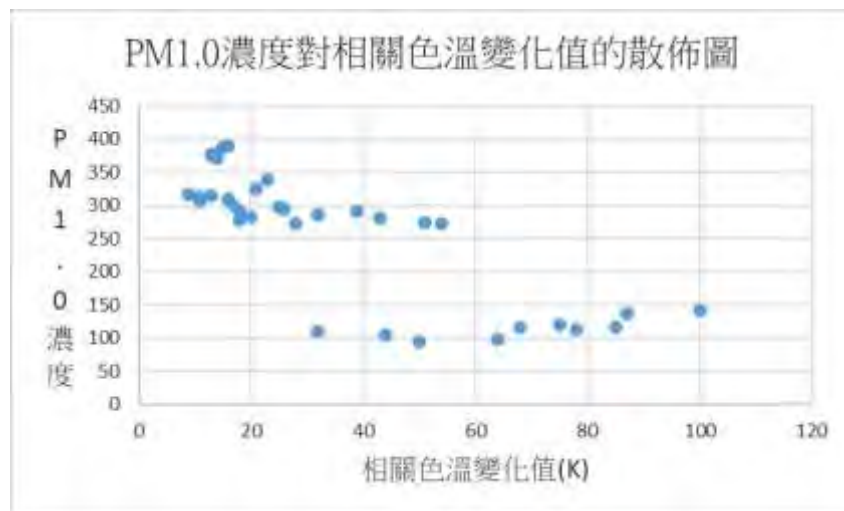
[註一] 數據第 1~34 組為第一部份，第 35~39 組為第二部分(灰底)。

[註二] 第二部分資料說明：在 arduino PMS7003-G7 的程式設定當中，若濃度超過儀器上限，則顯示出來的數值將會是 3333，在第二部分，我們刻意拉高箱子內的濃度來測出他們的相關色溫變化值，希望能從第一部份資料獲得的趨勢線代入第二部分的相關色溫變化值得到第二部分大致的濃度。

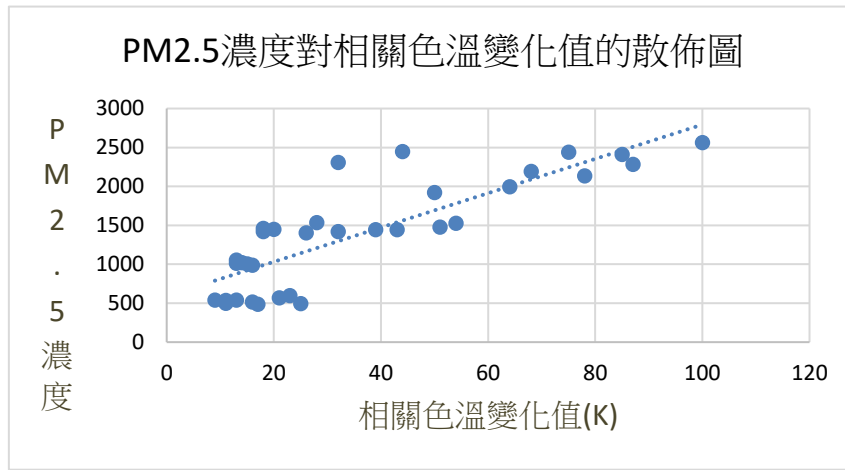
[註三] 由於我們測量第二部分的目的便是想要知道當濃度超出儀器範圍實相關色溫值的變化，因此當我們在測量第二部分時是使用線箱放入箱子內燃燒的時間作為操縱變因，分別為 1、2、3、4、5 分鐘。

(二)討論-(1)

我們分別將 PM1.0 和 PM2.5 濃度對相關色溫變化值製作散佈圖，如圖九與圖十。



圖九 PM1.0 濃度對相關色溫變化值的散佈圖



圖十 PM2.5 濃度對相關色溫變化值的散佈圖

$$R^2 = 0.697$$

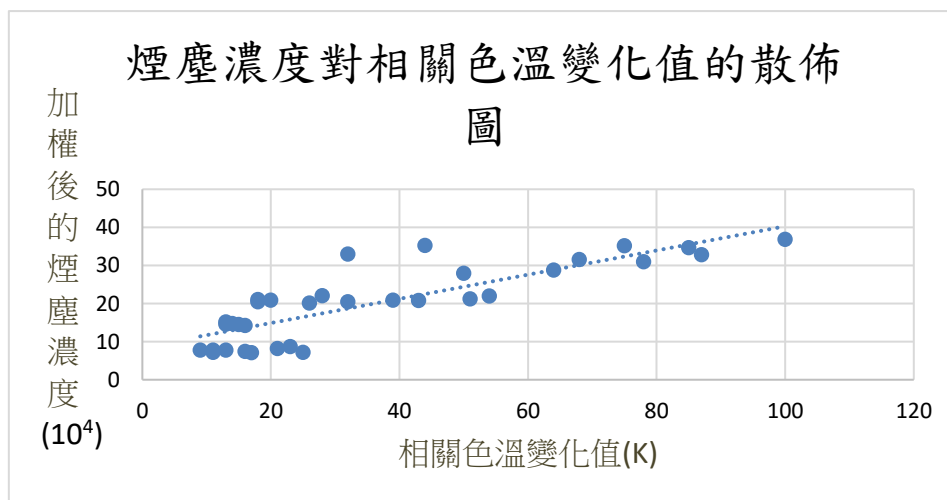
1. 圖九，PM1.0 對相關色溫變化值的影響不大，在圖右下和左上都分別有一團 PM1.0 濃度差不多，但對應的相關色溫變化值相差極大的點。
2. 圖十，PM2.5 對相關色溫變化值的影響明顯比圖九中 PM1.0 大，而 PM2.5 的濃度和相關色溫變化值根據圖表判斷是正相關的；其中相關係數平方值(R^2)為 0.697。
3. 接著，將加權後的煙塵濃度和相關色溫變化值製成散佈圖並進行討論。

討論-(2)

我們將各組數據的 PM1.0 和 PM2.5 濃度加權後對相關色溫變化值做成散佈圖，如圖十一

加權計算公式為： $(【PM2.5】 \times 144 + 【PM1.0】) / 10000$

加權公式來源：觀察瑞利散射的公式如式(1)，可以發現散射強度與粒子直徑的六次方成正比，因此計算得單位 PM2.5 所能夠造成的散射影響約為單位 PM1.0 的 144 倍，將兩者的濃度加權相加後和測得的各組相關色溫變化值製成散佈圖觀察相關色溫變化值與煙塵濃度之間的趨勢。



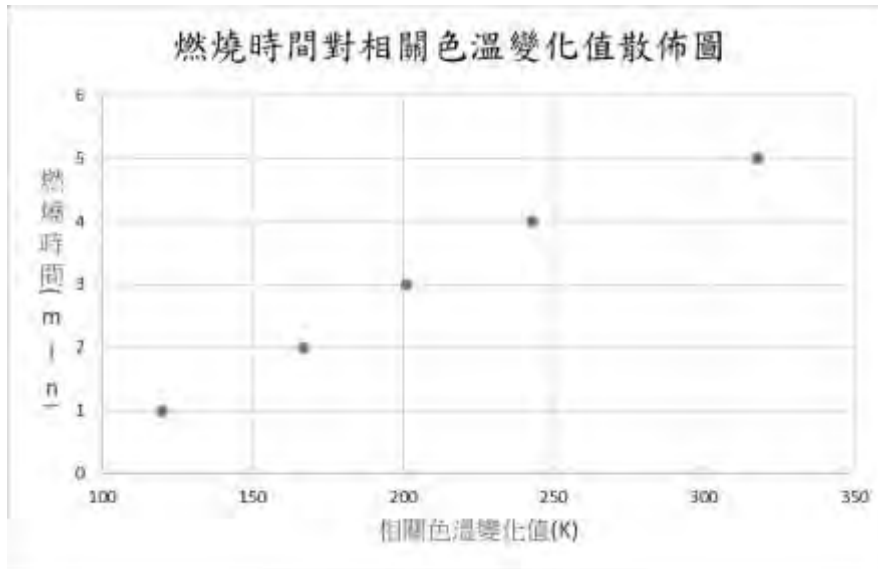
圖十一 煙塵濃度對相關色溫變化值的散佈圖

線性趨勢線公式: $y = 0.3175x + 8.5356$, $R^2 = 0.699$

1. 從圖十一中，我們可以得到各點之間的迴歸直線，也就是趨勢線，作為實驗的結果；其中，相關係數平方值(R^2)為 0.699，趨勢線公式為 $y = 0.3175x + 8.5356$ 。

討論-(3)

我們對第二部分數據的燃燒時間對相關色溫變化值製成散佈圖，如圖十二

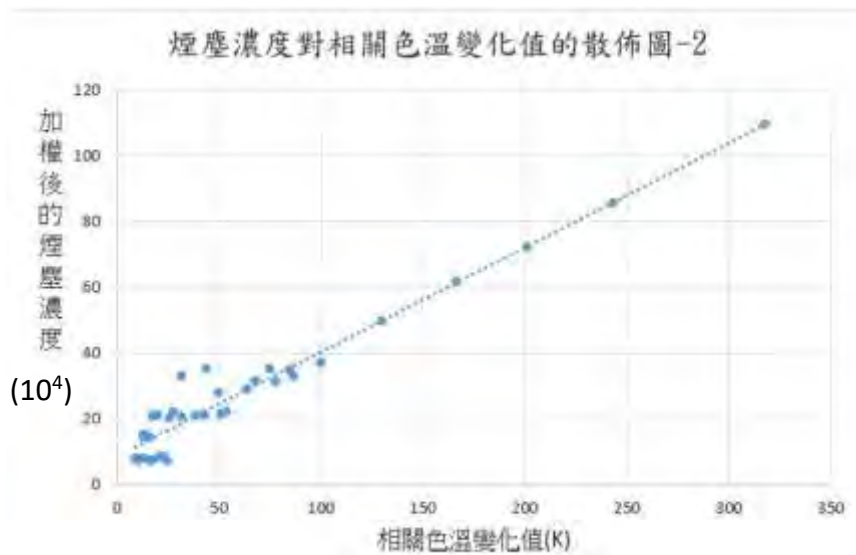


圖十二 燃燒時間對相關色溫變化值散佈圖

1. 從圖十二中可以看到，雖然上面這五筆數據我們無法測出確切的細懸浮微粒濃度，但我們可以確定這五組數據中的相關色溫變化值和燃燒時間是呈正相關的，而且在前四組數據連來的話幾乎就是一條完美的斜直線，只有在第五組數據時，相關色溫值的變化幅度不如前面四者。

討論-(4)

我們將第 35~39 組資料中的相關色溫變化值帶入圖十一的趨勢線公式中，求得五組數據的理論細懸浮微粒加權濃度值(10^4)分別為 50、62、72、86、110，與第 1~34 組資料共 39 組煙塵濃度與相關色溫變化值的數據做成散佈圖，如圖十三。



圖十三 煙塵濃度對相關色溫變化值的散佈圖-2

1. 觀察圖十三右上方那五個點，我們認為那便是第 35~39 組數據在測量時，箱子內的濃度，雖然受限於現在的設備，我們尚無法證實我們的假設，但我希望未來我們能繼續去探索右上方那塊未知的區域。

【實驗四】探討小水滴對不同色光之散射效應

我們在此實驗中，延續實驗二選擇白光，綠光，和黃光作為實驗光源，並且使用超音波水霧產生器做為水霧的來源(330ml/hr)，分別使其產生 5，10，15，20，25，30，35，和 40 秒的小水滴，用光譜儀偵測加入小水滴前後的相關色溫值，每種時間分別偵測三組有效數據，總共 72 組數據。

(一)實驗數據分析

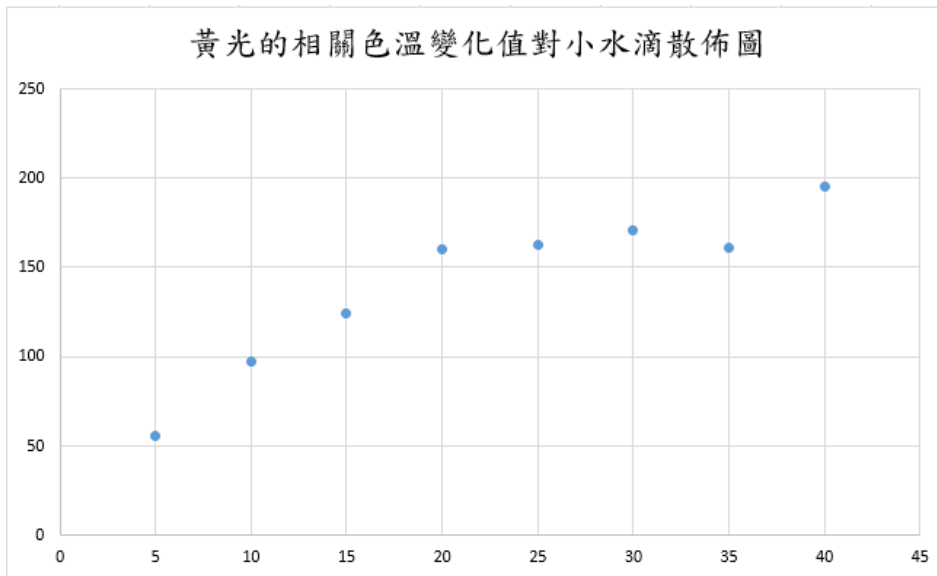
實驗四數據如表五

表五 實驗四數據

光源 顏色	白光			黃光			綠光		
	初始 CCT(K)	經散射 CCT(K)	Δ CCT	初始 CCT(K)	經散射 CCT(K)	Δ CCT	初始 CCT(K)	經散射 CCT(K)	Δ CCT
Δ CCT									
時間(Sec)									
5	5245.7	6310.7	1065	3564	3619.3	55.3	4631	4914	283
10	5132.7	6458	1325.3	3533.3	3631	97.6	4562.7	5017.7	455
15	5131.7	6641.3	1509.6	3524	3648	124	4594.7	5214.3	619.6
20	5122.3	6827.3	1705	3485	3645	160	4569.3	5265.6	696.3
25	5034.7	6910.7	1876	3503.6	3666.6	163	4581.7	5295.3	713.6
30	5076.3	7040	1963.7	3507	3678	171	4610.3	5306	695.7
35	5143	6957.7	1814.7	3500.6	3664.6	161	4566.3	5260	693.7
40	5175.3	7063.7	1888.4	3463.6	3659	195.3	4624.3	5261	636.7

(二)討論-(1)

我們針對黃色光源的 8 個相關色溫變化值製成散佈圖如下圖

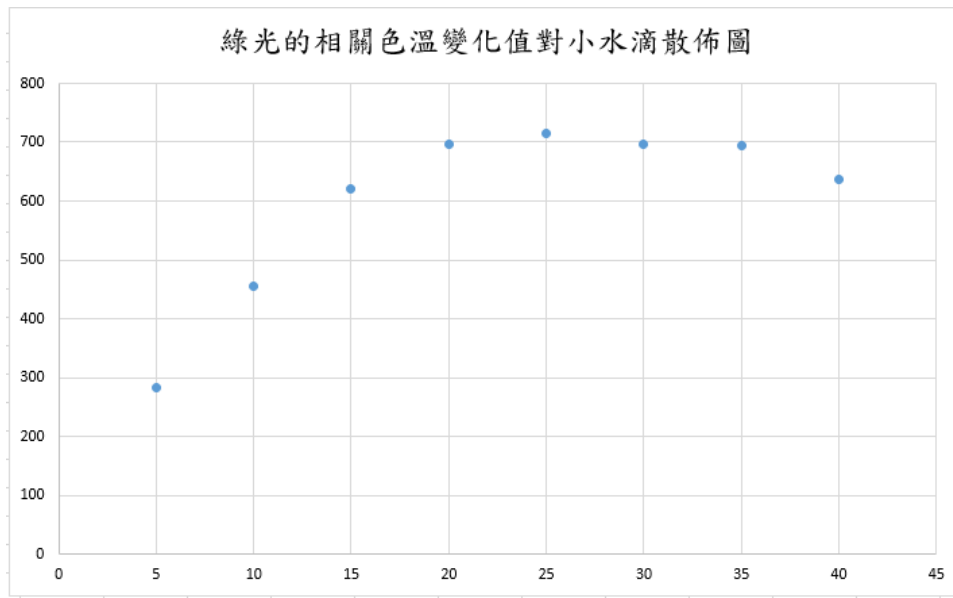


圖十四 黃光的相關色溫變化值對小水滴散佈圖，橫軸為時間(秒)；縱軸為相關色溫變化值(K)

從圖十四中可以看出相關色溫變化值和小水滴的濃度呈正相關，其中相關色溫變化值上升趨勢大約從 20 秒時開始減緩，但在 40 秒時又突然上升，整體相關色溫變化值從 50 到 200 不等。

討論-(2)

我們針對綠色光源的 8 個相關色溫變化值製成散佈圖如下圖

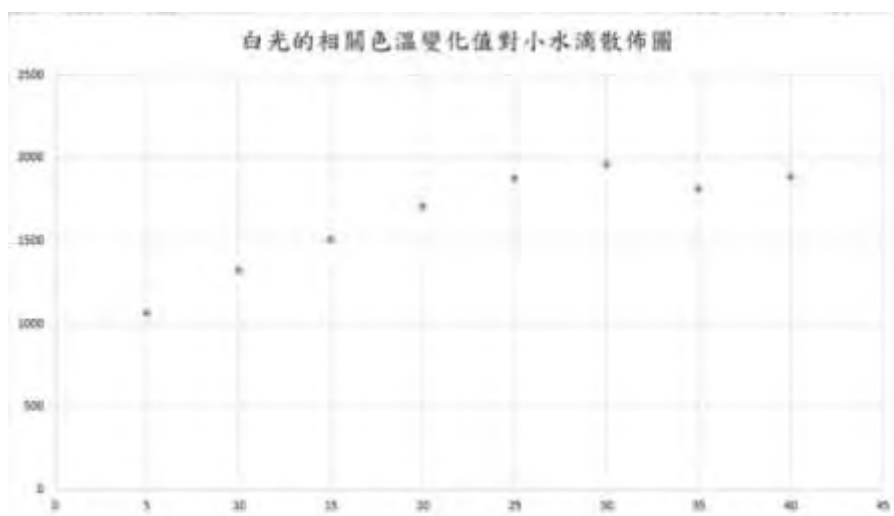


圖十五 綠光的相關色溫變化值對小水滴散佈圖，橫軸為時間(秒)；縱軸為相關色溫變化值(K)

從圖十五中可以觀察到以綠光作為光源所測得的相關色溫變化值對小水滴似乎有變化的飽和點存在，其中相關色溫變化值上升趨勢大約從 20 秒時開始減緩，整體相關色溫變化值從 280 到 710 不等。

討論-(3)

我們針對白色光源的 8 個相關色溫變化值製成散佈圖如下圖



圖十六 白光的相關色溫變化值對小水滴散佈圖，橫軸為時間(秒)；縱軸為相關色溫變化值(K)

從圖十六中可以觀察到以白光作為光源所測的相關色溫變化值對小水滴也隱約有飽和點的存在，其中相關色溫變化值上升趨勢大約從 30 秒開始減緩，整體相關色溫變化值從 1000 到 2000 不等。

伍、 討論

1. 在【實驗一】當中我們知道，晴天時的天空比夕陽時的晚霞有著更高的相關色溫值。
2. 在【實驗二】中得知，若控制在相同濃度，那麼相關色溫變化值是白光>綠光>黃光，進而分析三個光源的光譜圖，從三個光譜圖中可以看出藍光和橘紅光的比例為白光>綠光>黃光。
3. 由於【實驗二】的結果符合前述散射原理第一點瑞利散射的特性(波長越短散射強度越大)，因此我們可以確定在此次實驗中主要的散射類型為瑞利散射。
4. 根據【實驗三】第一部分，我們知道相關色溫變化值和煙塵濃度呈正相關。
5. 根據【實驗三】第二部分，在無法得知確切濃度的情況下，我們可以知道相關色溫變化值大致上和線香燃燒的時間成正比。
6. 將【實驗三】第二部分的五組無法直接測量線香煙粒濃度的相關色溫變化值代入【實驗三】第一部分所得到的趨勢線關係，我們據此推論第 35~39 組之 PM2.5 濃度為表五。

編號	初 始 CCT (K)	經散射 CCT (K)	Δ CCT	PM 2.5 濃度
35	4527	4647	120	3472
36	5863	6030	167	4305
37	5272	5473	201	5000
38	4316	4559	243	5972
39	4530	4848	318	7638

表五

7. 從【實驗四】中我們可以得到和【實驗二】類似的性質，也就是當我們在相同濃度下，測量出的相關色溫變化值為白光>綠光>黃光。
8. 根據【實驗四】的數據可以發現三種光源對應出來的散佈圖都有變化量趨緩的趨勢，我們推測這代表了飽和點的存在，但目前尚未確定是何原因造成如此現象，我們只能推測可能是箱子內部的水滴進入速率和凝結速率達成動態平衡，或著是光源的光線中，能被散射的短波光線已經全部散射完了，因此不論我們再加入多少小水滴，也沒有多餘的光線可以被我們散射。
9. 從【實驗四】的三個散佈圖分析，黃，綠，白光的飽和點大約是 20，20，30 秒。

10. 目前我們所使用的煙塵偵測器為一般日常生活中所使用，日常中很難有機會出現如表五中高濃度的 PM2.5，所以目前無法檢測，需要進一步採用工業上所使用高濃度懸浮微粒的偵測儀器才能確定。若能檢驗其有效性，我們相信能藉由光源散射之相關色溫數值差的測量，作為煙囪排廢量偵測是具有可行性的方案。

陸、 結論與未來展望

(一) 結論

1. 從【實驗一】知道，大氣散射作用會影響不同時間所測量之相關色溫數值。
2. 從【實驗二】知道，一個光源中，若是佔有的短波長光線比例越大，則在相同濃度的煙塵下相關色溫的變化量就越大，代表越多短波長的光線被散射。
3. 從【實驗三】第一部分可以得知，當一個空間中細懸浮微粒越多，藉由光源散測作用所測得之相關色溫的變化值就越大。
4. 【實驗三】中獲得的趨勢線公式： $y = 0.3175x + 8.5356$ ， y 為煙塵散射濃度， x 為相關色溫變化值。
5. 從【實驗三】第二部分的圖十二，我們可以推論在實驗裝置箱中，當線香燃燒時間不超過五分鐘時，線香的燃燒時間和相關色溫變化值呈正相關。
6. 從【實驗四】的數據我們判斷，小水滴對相關色溫的變化是正相關的，而且當一個環境的小水滴到達一定含量的時候，相關色溫變化值會有漸緩的趨勢。

(一) 未來展望

1. 應用實驗三的圖十三，我們若是能讓政府立法強制所有工廠在自家煙囪上裝設燈泡，那麼，未來當 CEMS 系統"故障"時，煙囪上的燈泡便會亮起，這時若有業者偷偷排放廢氣，那麼即使是在路旁的行人，只要能看到煙囪上的那顆燈，便能看到一條比雲朵還要藍的煙霧直上雲霄，而對於政府單位而言，測量那團煙霧中光線的相關色溫變化值，也能藉由實驗測到的趨勢線，得到那團煙霧大致上的濃度，進而分析是否超標；這個方法，或許沒有 CEMS 來的準確，但是，在避免資料被消失這方面，肯定比 CEMS 來的強。
2. 我們希望可以找到測量範圍更大的煙霧偵測器，如此一來便能獲得更完整的煙塵濃度對相關色溫變化值的關係。
3. 我們將著手研究細懸浮微粒對光線的消光能力，從科學的角度分析煙塵消光的影響，並試著找出煙塵濃度對光線消光能力的相關公式。

柒、 參考資料

1. 台大物理系朱士維教授於網路教學網站
<https://zh-tw.coursera.org/instructor/swchu>
2. 群智科技照明百科
3. 科學月刊 2018 年一月 PM2.5
4. <http://www.thephysicsmill.com/2014/03/30/a-quantum-of-scattering/>

【評語】 052603

1. 本研究利用光散射原理設計實驗系統，分析光通過燃燒線香過程產生細懸浮微粒的色溫變化以推估細懸浮微粒濃度，實驗過程利用燃燒線香過程產生不同煙塵濃度建立與色溫變化值的相關性，呈現正相關。發現當環境中細懸浮微粒越多，相關色溫的變化量就越大，未來將可應用此系統，測量空氣粒狀污染物的濃度。
2. 作品說明書圖 8 中的數據顯示煙霧偵測器在電腦上顯示的數據同時有 PM1.0、PM2.5、PM10 三種不同粒徑濃度數值輸出，且粒徑越大濃度數值越大，建議未來可加入 PM10 的研究數據分析。
3. 建議比較雷射型粉塵感測器測量細懸浮微粒濃度的原理和本實驗設計的原理有何相似與差異？同時應用在所設計實驗系統是否會產生干擾？而從該雷射型粉塵感測器單價並不高角度而言，應思考如何加強說明所開發系統在環境監測應用的潛力。
4. 建議思考使用線香會是一個好的穩定細懸浮微粒提供來源嗎？是否有其他實驗設計方式可以替代使用？

不同散射源對相關色溫變化值之探討

摘要

隨著工業開發，空氣品質也每況日下，大氣中充斥著各式各樣的有害物質，不勝枚舉，但他們都有個共同點，這些有害物質都很小，小到無法用肉眼觀察。

在本次實驗中，我們使用光譜儀所測得的相關色溫這項資料，比較光線被散射前後相關色溫的變化，在實驗一中藉由自然現象探討相關色溫的性質；在實驗二中藉由製造不同波長的光源探討瑞利散射的性質；最後，在實驗三中改變煙塵的濃度，與測得的相關色溫變化值比較，得到兩者呈現正相關，也就是說，當一個環境中細懸浮微粒濃度越高，相關色溫的變化量就越大。

一、研究動機

每次在高速公路上經過那一根根排著或黑或白的廢氣的煙囪時，總是會有些疑問，那些工廠到底排了多少濃度的煙？有沒有為了逃避空汙稅而在陰雨天時偷排煙？

我們曾在某文章中看到，雖然目前全台已有不少工廠的煙囪有裝設早已在1993年便引進的CEMS，也就是所謂的固定污染源空氣污染物連續自動監控設施(Continuous Emission Monitoring System)，但實際上，許多不肖業者往往為了避免超標，而使CEMS測到的數據“被消失”，使用的手段不乏假裝故障、外掛軟體或調整參數；讀完這篇文章之後，針對CEMS的效果不彰這個問題，我們認為最根本的原因便是CEMS這個系統本身沒有多少民眾知道，而且過於精密，使得此系統的程式極容易被篡改，而且即便被竄改了也不會有民眾發現，因此，我們決定要找出一個更簡單、更能被一般大眾了解的方法，來避免那些不肖業者再繼續肆無忌憚的破壞環境。

後來，在偶然間得知了一些關於散射的知識後，認為這可能是對於偵測工廠有沒有在排放廢氣一個很好的切入點，因此決定展開研究。

二、研究目的

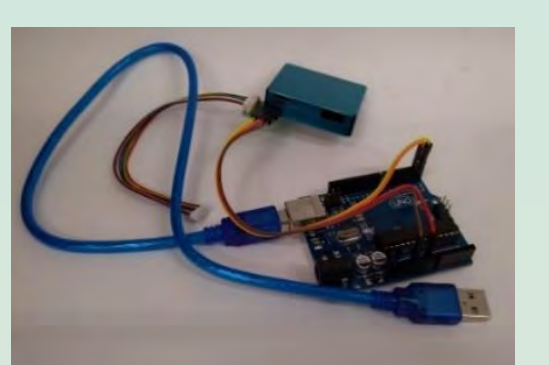
- 一、探討線香煙粒和小水滴對不同色光之散射效應。
- 二、探討煙粒濃度對散射效應之影響。
- 三、分析線香和小水滴對不同波長光線造成的散射強度關係並進一步分析兩者差異。
- 四、探討利用光源散射之相關色溫數值差作為煙囪排廢量偵測器之可能性。

三、研究設備與器材

- 1.電腦
- 2.光譜分析儀(群智科技光譜精靈ASENSE ALP-01)
- 3.箱子
- 4.線香
- 5.打火機
- 6.攀藤科技煙霧偵測器(arduino PMS7003-G7)
- 7.光源(Ronever PA-Q5-3)
- 8.計時器
- 9.使用軟體：SPECTRUM GENIUS、PMS ARDUINO 1.8.8、EXCEL、小畫家
- 10.超音波水霧產生器



(a)手電筒



(b)煙霧偵測器



(c)光譜儀



(d)超音波水霧產生器

四、研究過程與方法

【實驗一】 散射現象與相關色溫(CCT)之關係

(1)使用光譜儀測量並記錄「晴空」和「夕陽」時的相關色溫。

【實驗二】 分析線香煙粒對不同色光之散射效應

(1)在實驗裝置箱中，測量光源光色分別為黃、綠、白光之初始相關色溫數值。

(2)放入燃燒的線香一段時間再抽出，使實驗裝置箱中充滿某濃度煙粒後，分別測量黃光、綠光、白光光線經散射後之相關色溫數值，測量數次取平均值。

【實驗三】 分析煙粒濃度對散射效應之關係

(1)在實驗裝置箱中，以白光為光源，測量初始相關色溫數值。

(2)放入燃燒的線香某段時間再抽出，使實驗裝置箱中充滿某濃度煙粒後測量經散射光源之相關色溫數值。

(3)改變實驗裝置箱內線香煙粒濃度，反覆測量。

【實驗四】 分析小水滴對不同色光之散射效應

(1)在實驗裝置箱中，測量光源光色分別為黃、綠、白光之初始相關色溫數值。

(2)通入超音波水霧產生器一段時間再抽出，使實驗裝置箱中充滿某濃度小水滴後，分別測量黃光、綠光、白光光線經散射後之相關色溫數值，測量數次取平均值。

【實驗五】 分析煙粒及小水滴之散射強度隨波長變化之關係

(1)分別抽取實驗三及實驗二之數據各一組，將散射前之光譜圖和散射後之光譜圖兩者相除之後再正規化。

(2)將所得曲線圖和理論圖作疊圖比較，分析煙粒和小水滴分別應為何種散射模型之範疇。

五、研究結果

【實驗一】 散射現象與相關色溫(CCT)之關係

我們分別在上午及傍晚夕陽時，量測天空的色溫，使用ASENSE ALP-01光譜儀連續測量的功能連續測量10次，每次間隔約8秒，從這十組數據中，去掉最大以及最小值後將其餘8組取平均作為相關色溫數值。

(一)實驗數據分析：

	晴天	夕陽晚霞
相關色溫(K)	5845 K	4063K

表一 實驗一數據

(二)討論：

從瑞利散射的特性中我們得知到晴天時，大氣散射了較短波長的藍光，使天空看起來是藍色的。而夕陽晚霞呈現偏紅的顏色，是因為陽光穿過的大氣層較厚，過程中短波長的藍光被散射掉，最後進入人眼的太陽光以波長較長的紅光為主，所以我們看到火紅的夕陽。

觀察晴天與夕陽的相關色溫值發現，我們在晴天測得的相關色溫值大於夕陽晚霞，可知相關色溫較高時，代表短波長光線散射較多；相關色溫較低時，代表短波長光線散射較少。

【實驗二】 分析線香煙粒對不同色光之散射效應

我們首先在Ronever PA-Q5-3手電筒上套上單層綠色或黃色玻璃紙，以及沒有套上任何玻璃紙的手電筒，產生了白光，綠光和黃光三種光源，安裝在實驗裝置箱中，使用ASENSE ALP-01光譜分析儀連續測量的功能測量5次，每次間隔8秒，從這5組數據中取平均值作為原始相關色溫數值。

接著，放入燃燒中的線香直到我們需要的濃度後，拔出線香並使箱子靜置10秒，同樣的，使用光譜分析儀連續測量的功能測量5次，每次間隔8秒，從這5組數據中取平均值作為經散射光源之相關色溫數值。

以上步驟重複3次，再改變光源顏色進行實驗。

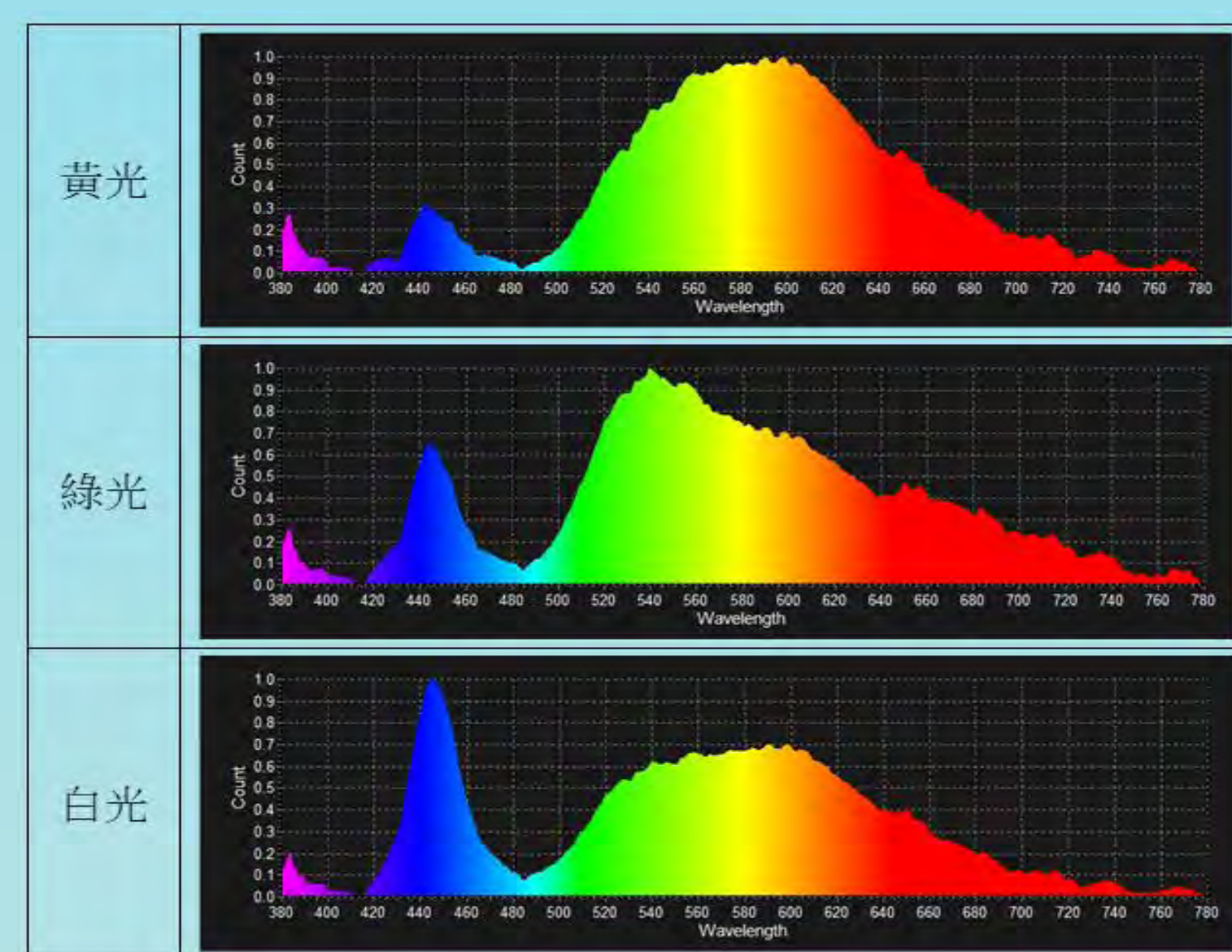
(一) 實驗數據分析

1. 使用光譜分析儀測量黃光、綠光、白光之光譜圖結果，如下表二：
2. 實驗二，線香煙粒濃度為 $[PM\ 1.0 - 77\ \mu g/m^3; PM\ 2.5 - 1511\ \mu g/m^3]$ ，CCT為相關色溫、 ΔCCT 為經散射CCT與初始CCT之差、 $AVG\Delta CCT$ 為 ΔCCT 數據的平均值。

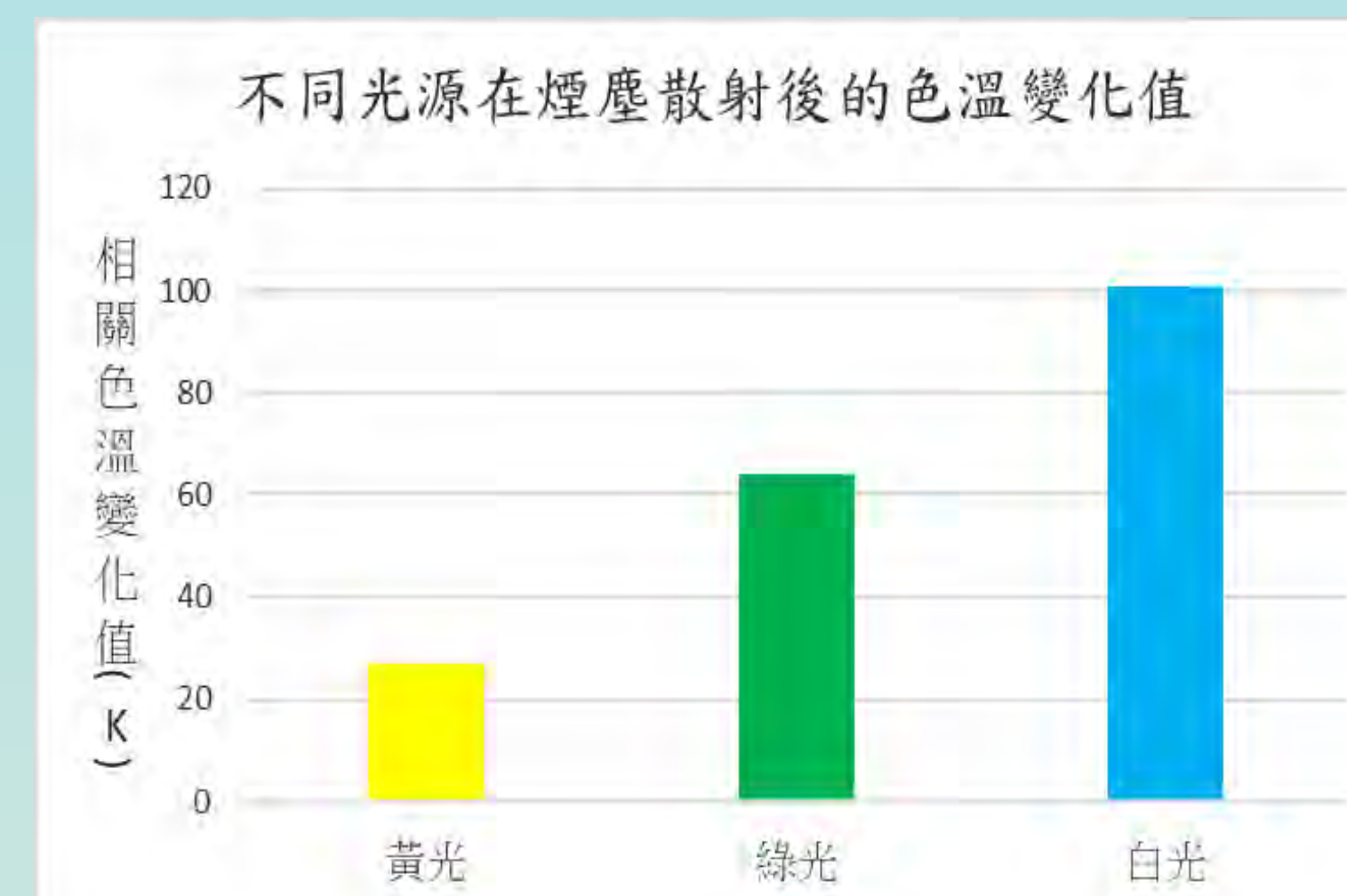
(二) 討論

我們將實驗二的結果製成長條圖作比較，如圖一所示。

1. 實驗中發現白光的 ΔCCT 大於綠光及黃光。
2. 由表二不同色光光譜圖可以看見，白光的短波長(450 nm)光線強度大於綠光，綠光的短波長(450 nm)光線強度又大於黃光，我們認為短波長光線強度越強，使得經散射之後的光源的相關色溫數值越高。
3. ΔCCT 值越大，代表越多短波長的光被散射，所以散射較多。
4. 從實驗二的結果，我們決定在實驗三中採用白光做為光源，因為白光有較明顯的相關色溫變化量。



表二 光譜圖



圖一 不同光源的色溫變化值

【實驗三】分析煙粒濃度對散射效應之關係

依據實驗二的結果，在實驗三中我們選擇白光作為光源，較有利於光源散射後的相關色溫數值變化的測量。我們反覆測量多種不同的線香煙粒濃度，經散射光源之相關色溫數值與原始相關色溫數值之差。

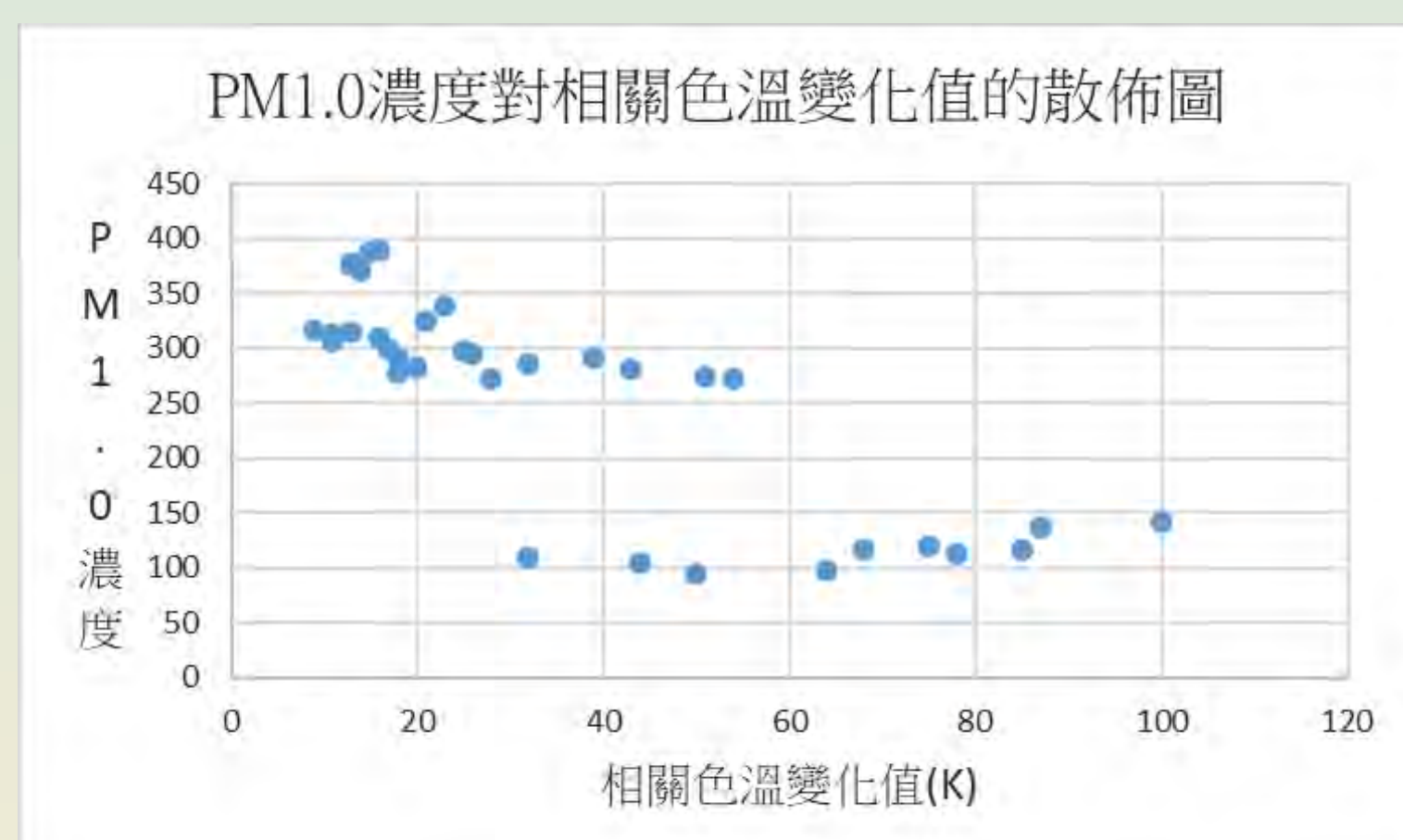
相關色溫數值是使用光譜分析儀連續測量的功能測量10次，每次間隔8秒，從這10組數據中捨去最大和最小值後取平均值作為經散射光源之相關色溫數值。

線香煙粒濃度是由arduino PMS7003-G7煙霧偵測器在電腦上顯示的數值做判斷，取濃度較穩定時作為紀錄。

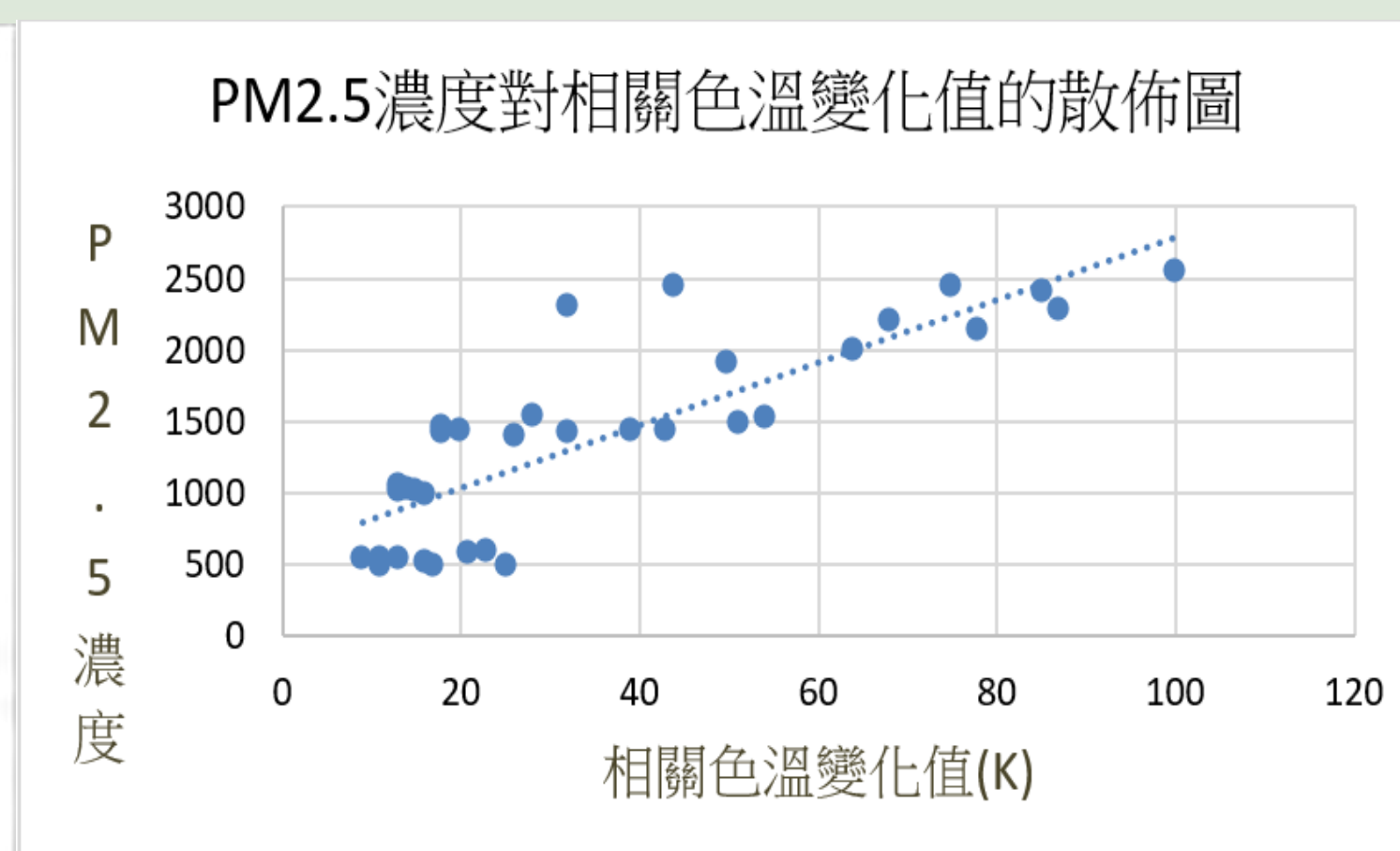
經過34次使用隨機濃度的實驗下，總共測得340組個別數據，共34組有效數據，再加上五組濃度超過儀器上限的相關色溫數據，共39組。

(一) 實驗數據分析

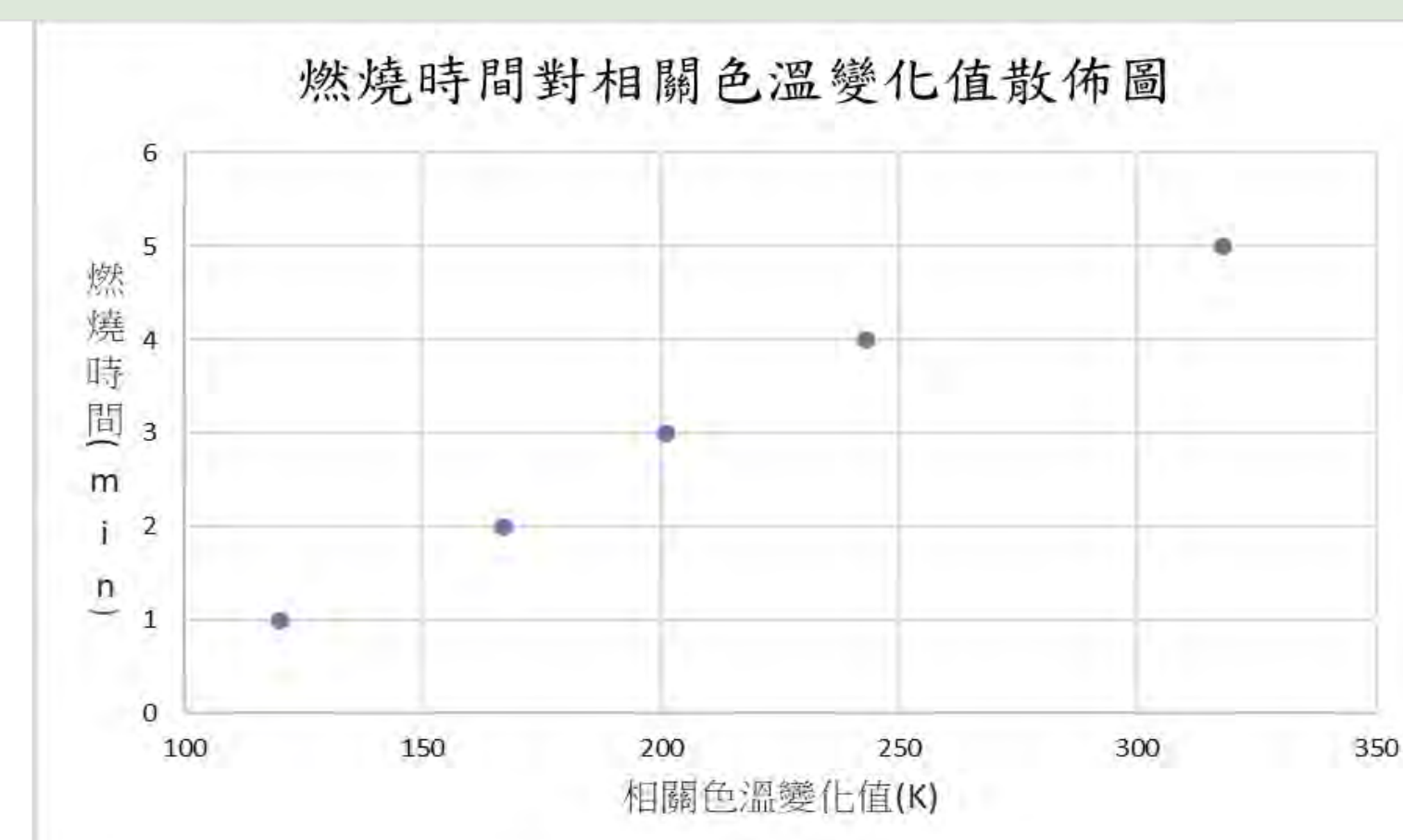
實驗三量測資料如下圖二、三、四：



圖二



圖三



圖四

(二) 討論-(1)

圖二，PM1.0對相關色溫變化值的影響不大，甚至出現同樣濃度對應出差異極大的兩個相關色溫變化值。

圖三，PM2.5的濃度和相關色溫變化值根據圖表判斷是正相關的；其中相關係數平方值(R^2)為0.697。

討論-(2)

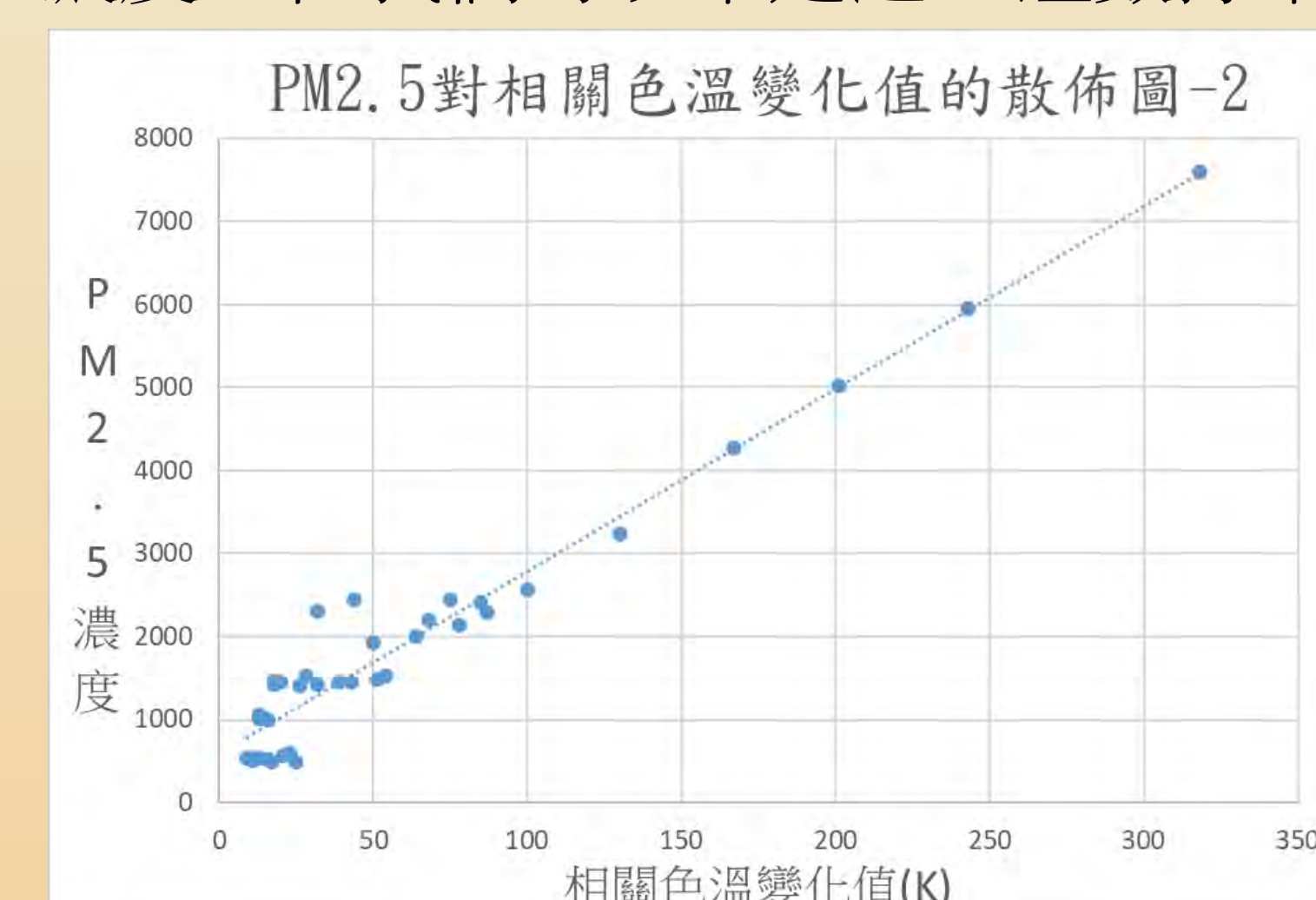
我們對第二部分數據的燃燒時間對相關色溫變化值製成散佈圖，如圖五。

從圖五可以看到，雖然我們無法測出上面這五筆數據確切的細懸浮微粒濃度，但我們可以確定這五組數據中的相關色溫變化值和燃燒時間呈正相關。

討論-(3)

我們將第35~39組資料中的相關色溫變化值帶入圖四的趨勢線公式中，求得五組數據的理論PM2.5濃度值分別為3235、4270、5019、5944、7596，與第1~34組資料共39組煙塵濃度與相關色溫變化值的數據做成散佈圖，如圖五。

觀察圖六右上方那五個點，我們認為那便是第35~39組數據在測量時箱子內細懸浮微粒的濃度，雖然受限於現在的設備，我們尚無法證實我們的假設，但我希望未來能夠繼續去探索右上方那塊未知的區域。



圖五

【實驗四】分析小水滴對不同色光之散射效應

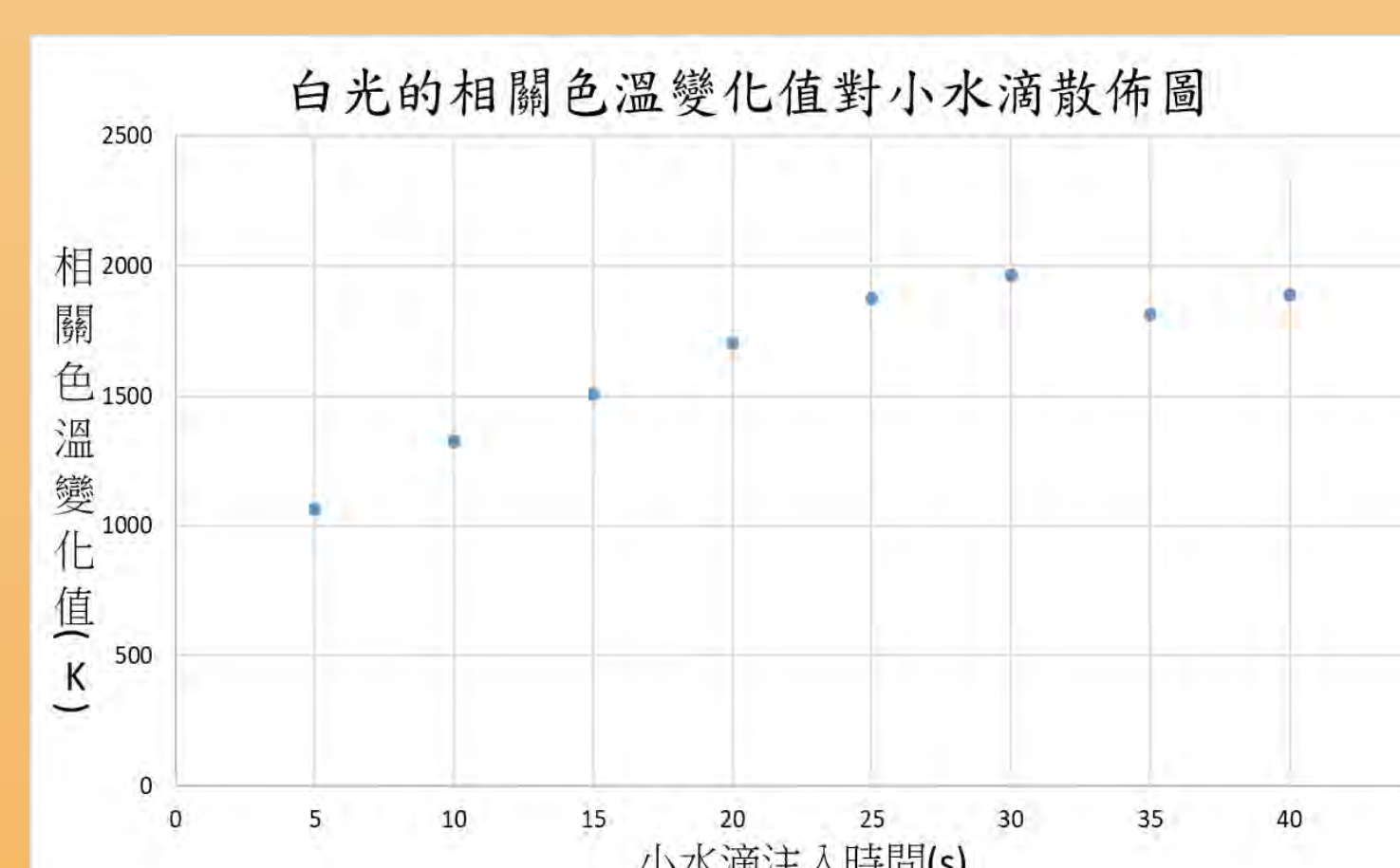
我們首先在Ronever PA-Q5-3手電筒上套上單層綠色或黃色玻璃紙，以及沒有套上任何玻璃紙的手電筒，產生了白光，綠光和黃光三種光源，安裝在實驗裝置箱中，使用ASENSE ALP-01光譜分析儀連續測量的功能測量5次，每次間隔8秒，從這5組數據中取平均值作為原始相關色溫數值。

接著，通入超音波水霧產生器直到我們固定時間後，拔出管子並立即測量(小水滴會在十分短的時間內沉至箱底因此須馬上測量)，取得光源經散射後之相關色溫數值。

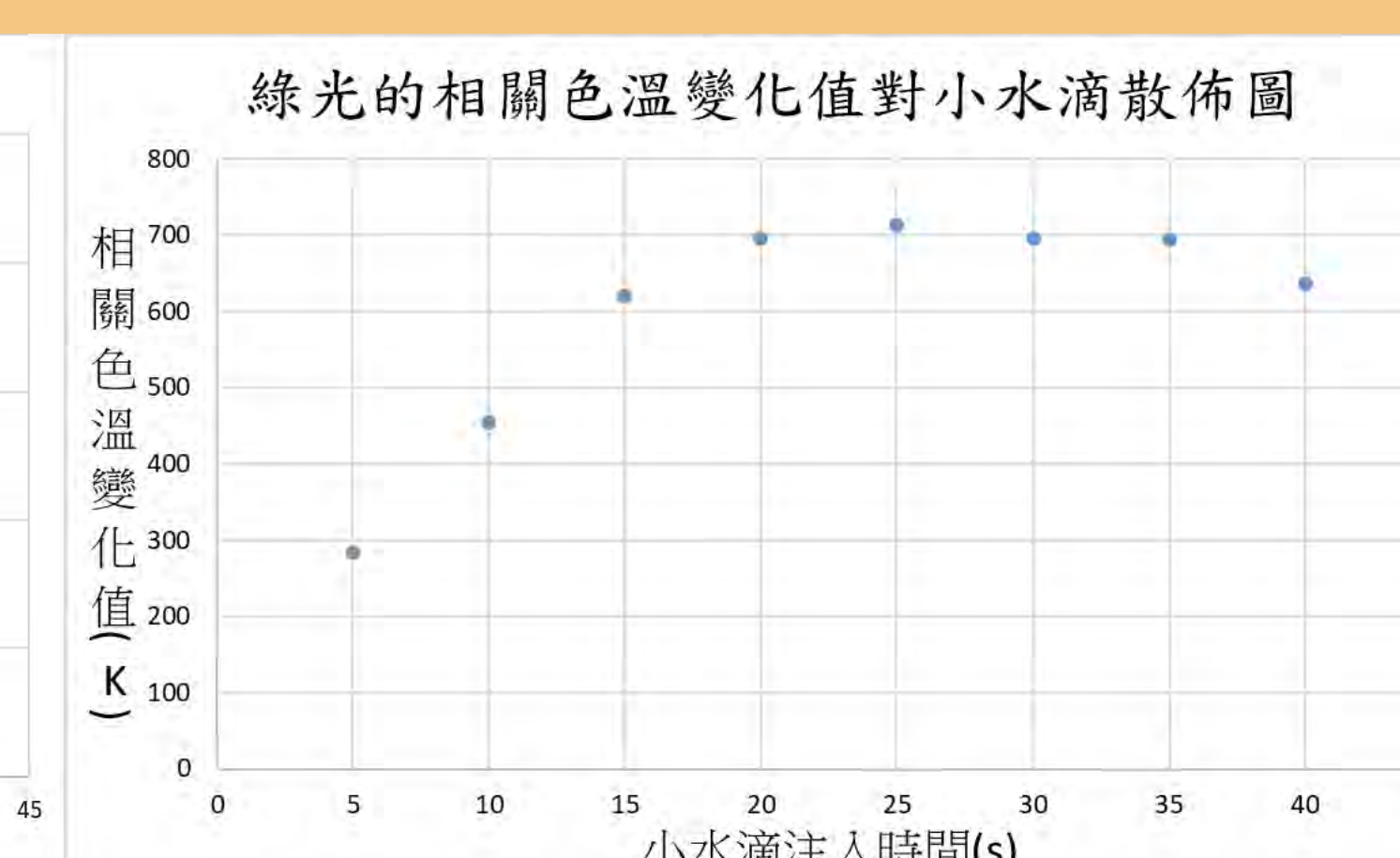
以上步驟每種時間重複3次取平均值，再改變通入時間進行實驗。

(一) 實驗數據分析

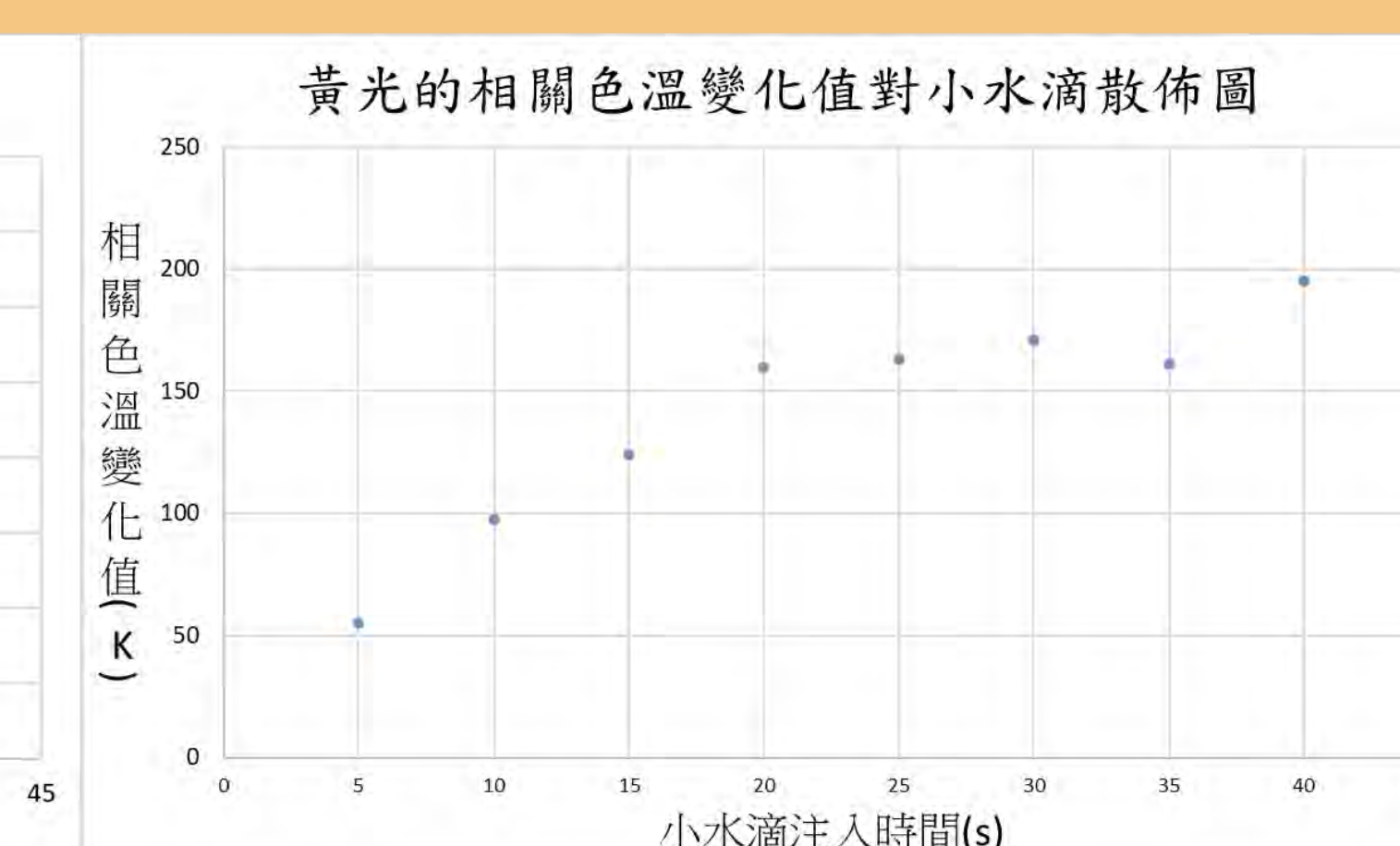
實驗四量測資料如下圖六、七、八：



圖六



圖七



圖八

(二)討論-(1)

圖六，白光光源之相關色溫變化值從1000K左右開始攀升，至2000K左右變化幅度趨緩趨緩。

圖七，綠光光源之相關色溫變化值從300K左右開始攀升，至700K左右變化幅度趨緩。

圖八，黃光光源之相關色溫變化值從50K左右開始攀繩，至160K左右變化幅度趨緩，但在40秒的數據又有上升趨勢，目前未知造成此趨勢和其他兩種光源不同的原因為何。

討論-(2)

綜合圖六至八，我們可以發現相關色溫變化值的大小在注入相同時間之小水滴的情況下，白光>綠光>黃光，且不論何種光源，其相關色溫變化值皆會先隨著注入時間增加而穩定上升後在某時間趨緩，達到類似飽和點的地方，雖然此次實驗尚不足以證明是否真的存在飽和點，但我們相信這會是一個很好的研究問題等著我們在未來的時間去解開。

【實驗五】分析煙粒及小水滴之散射強度隨波長變化之關係

首先我們先選取一組數據，共有散射前測得光譜圖和散射後測得光譜圖，接著我們將這兩個光譜圖個個波長的兩個光譜強度相除，再將其正規化(使所有數據中最大值為一，其他數據等倍縮小)後，獲得散射強度對波長關係。

最後將上述步驟獲得之曲線圖和理論曲線圖進行疊圖，便可知道實驗中測得曲線位於哪個範圍之內。

(一)實驗數據分析

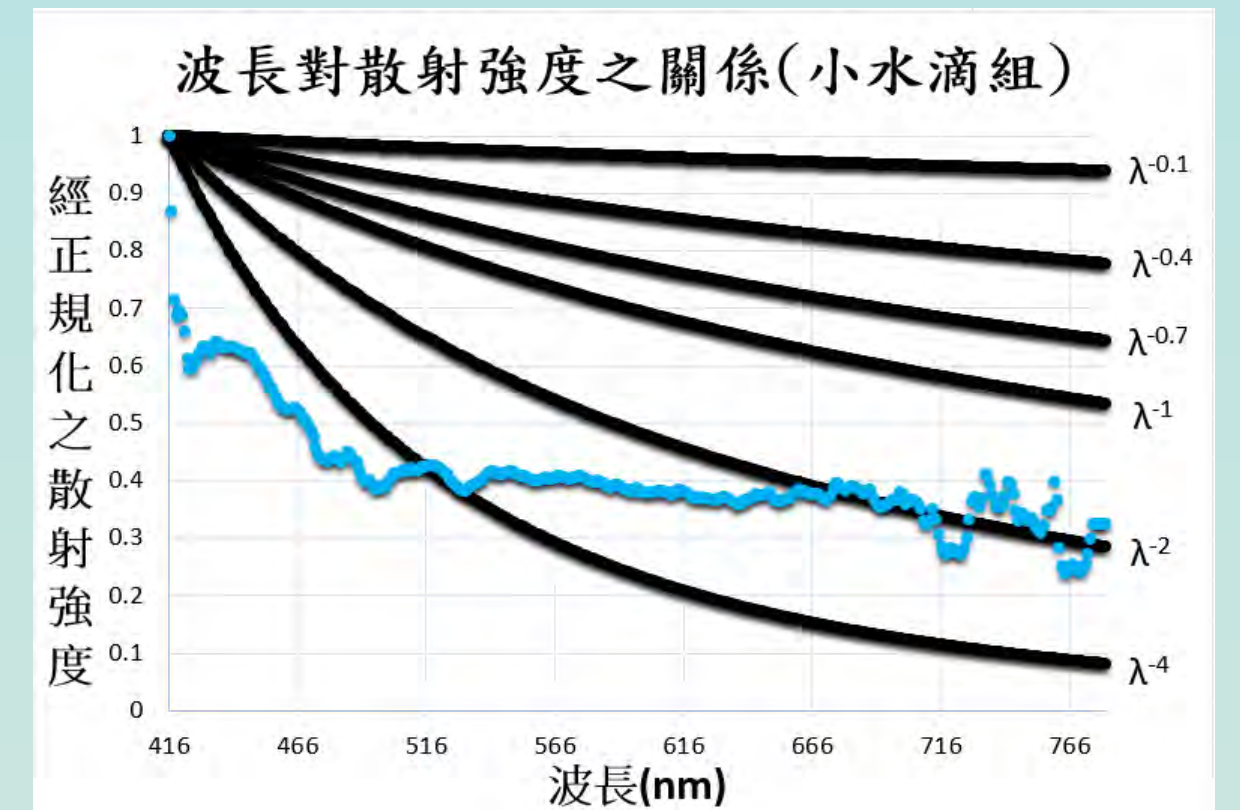
實驗五分別抽取之數據進行上述步驟之後得曲線疊圖如圖九、十。

(二)討論

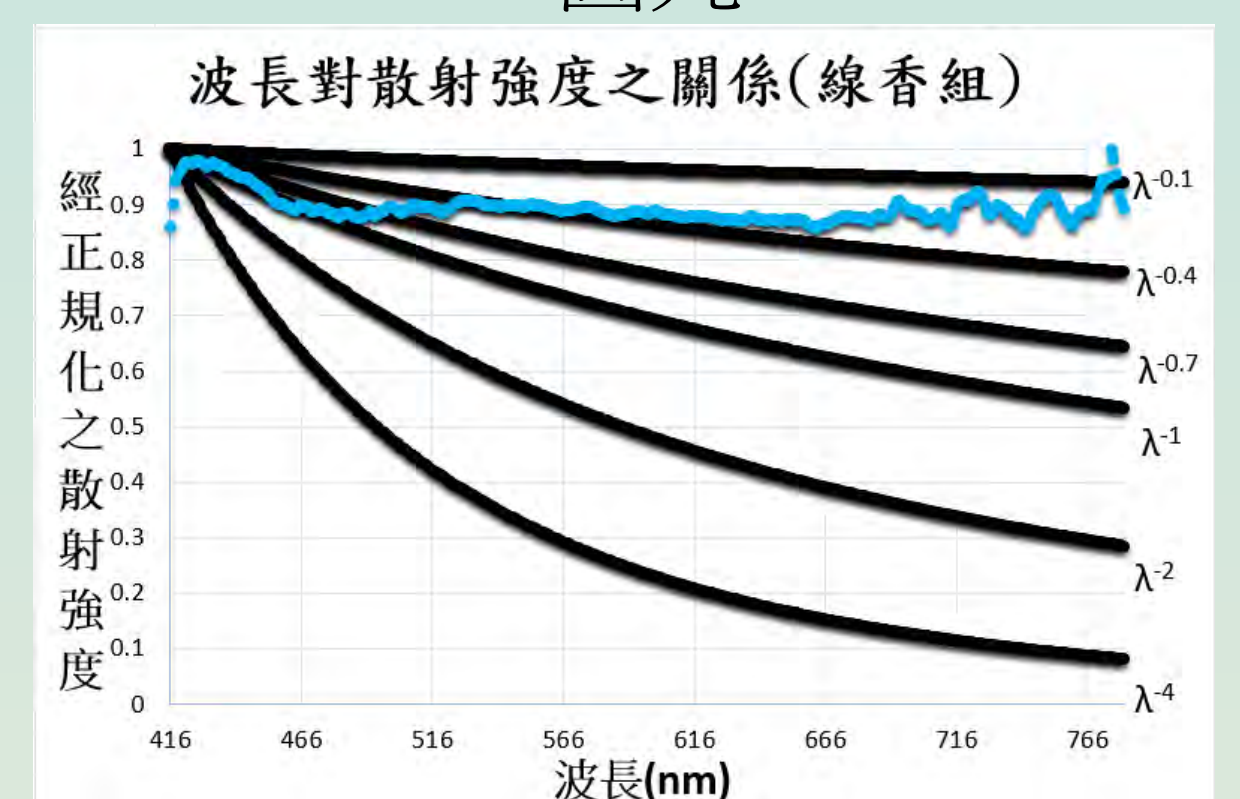
從圖九可以看出當波長介於416nm和516nm之間時，散射強度與波長之間大約為四次方反比(瑞利散射)的關係，當波長大於516nm時，散射強度與波長大約界於四次方至平方反比之間(米氏散射)，根據銳利及米氏散射之性質表示小水滴粒徑大約界於波長1/10倍至1倍之間，我們認為由於小水滴個別粒子大小差異頗大進而造成部分波長對某種特定散射的影響較其他種散射更為顯著造成的。

從圖十中可以看出散射強度基本上維持一條水平線，且散射強度與波長大約界於0.1至0.4次方反比之間(米氏散射至非選擇性散射之間)，根據米氏及非選擇性散射之性質表示煙粒粒徑遠大於波長。

因此我們便可藉由此方法經光譜圖分析散射源之粒徑大小。



圖九



圖十

六、討論

1. 在【實驗一】中得知，晴天之天空較夕陽之天空有更高的相關色溫值。
2. 在【實驗二】中得知，若控制在相同濃度，那麼相關色溫變化值是白光>綠光>黃光，進而分析三個光源的光譜圖，從三個光譜圖中可以看出藍光和橘紅光的比例為白光>綠光>黃光。
3. 根據【實驗三】第一部分，我們知道相關色溫變化值和煙塵濃度呈正相關。
4. 根據【實驗三】第二部分，在無法得知確切濃度的情況下，我們可以知道相關色溫變化值大致上和線香燃燒的時間成正比。
5. 將【實驗三】第二部分的五組無法直接測量線香煙粒濃度的相關色溫變化值代入【實驗三】第一部分所得到的趨勢線關係，我們據此推論第35~39組之PM2.5濃度為表五。
6. 從【實驗四】中我們可以得到和【實驗二】類似的性質，也就是在相同濃度下，測量出的相關色溫變化值為白光>綠光>黃光。
7. 從【實驗四】中發現三種光源都有相關色溫變化量漸緩的趨勢，推測這代表了飽和點的存在，在尚未確定是何原因的情況下，我們推測可能是箱內水滴進入速率和凝結速率達成動態平衡，或著是光源的光線中，短波光線已經全部散射完了，因此沒有多餘的光線可以被小水滴散射。
8. 從【實驗四】的散佈圖分析，黃、綠、白光飽和點大約是20、20、30秒。
9. 根據【實驗五】得知小水滴粒徑大約界於可見光波長1/10倍至1倍之間，而煙粒粒徑遠大於可見光波長，並且此法也可應用在測定不同散射源之粒徑大小以方便套用不同散射模型。

編號	初始 CCT (K)	經散射 CCT (K)	ΔCCT	PM 2.5 濃度
35	4527	4647	120	3472
36	5863	6030	167	4305
37	5272	5473	201	5000
38	4316	4559	243	5972
39	4530	4848	318	7638

表三 第35~39組數據

七、結論與未來展望

(一) 結論

1. 從【實驗一】知道，大氣散射作用會影響不同時間所測量之相關色溫數值。
2. 從【實驗二】知道，一個光源中，若是佔有的短波長光線比例越大，則在相同濃度的煙塵下相關色溫的變化量就越大，代表越多短波長的光線被散射。
3. 從【實驗三】第一部分可以得知，當一個空間中細懸浮微粒越多，藉由光源散測作用所測得之相關色溫的變化值就越大。
4. 【實驗三】中獲得的趨勢線公式: $y = 0.3175x + 8.5356$ ， y 為煙塵散射濃度， x 為相關色溫變化值。
5. 從【實驗四】的數據我們判斷，小水滴對相關色溫的變化是正相關的，而且當一個環境的小水滴到達一定含量的時候，相關色溫變化值會有漸緩的趨勢。
6. 根據【實驗五】之方法，我們將可以區分不同種的散射粒子。

(二) 未來展望

1. 應用圖六，我們若是能讓政府立法強制所有工廠在自家煙囪上裝設燈泡，那麼，未來當CEMS系統"故障"時，煙囪上的燈泡便會亮起，這時若是有業者偷偷排放廢氣，那麼即使是在路旁的行人，只要能看到煙囪上的那顆燈，便能看到一條比雲朵還要藍的煙霧直上雲霄，而對於政府單位而言，測量那團煙霧中光線的相關色溫變化值，也能藉由實驗測到的趨勢線，得到那團煙霧大致上的濃度，進而分析是否超標；這個方法，或許沒有CEMS來的準確，但是，在避免資料被消失這方面，肯定比CEMS來的強。
2. 我們希望可以找到測量範圍更大的煙霧偵測器，如此一來便能獲得更完整的煙塵濃度對相關色溫變化值的關係。
3. 我們將著手研究細懸浮微粒對光線的消光能力，從科學的角度分析煙塵消光的影響，並試著找出煙塵濃度對光線消光能力的相關公式。

八、參考資料

1. 台大物理系朱士維教授於網路教學網站:<https://zh-tw.coursera.org/instructor/swchu>
2. 群智科技照明百科
3. 科學月刊 2018年一月 PM2.5
4. <http://www.thephysicsmill.com/2014/03/30/a-quantum-of-scattering/>