

# 以稜鏡色散對白光 LED 與鹵素燈之光譜分析及其教學應用

梁立國

輔英科技大學 共同教育中心  
sc013@fy.edu.tw

(投稿日期：民國 103 年 10 月 23 日，接受日期：104 年 01 月 08 日)

**摘要：**光源置於凸透鏡焦點附近，鏡後方是 5mm 圓孔，利用兩個三稜鏡讓光作接近九十度的偏折，移動屏幕，白光 LED 的明線光譜與鹵素燈的連續光譜被分析：一、屏幕遠離時，LED 紅、藍、綠的圓逐漸析出，紅綠交匯處呈現黃色，藍圈以更快速度離開綠圈與紅圈是一有趣的景象，測量圈圈位置，可驗證各色光位置與波長的線性關係；二、觀察鹵素燈，屏幕遠離時，眾多圈圈交匯的白光變淡，各色層亦逐漸析出，此時，在藍紫的一方，光強度突然暗淡許多，古典理論的解釋在此遇到烏雲，這是近代物理的重要歷程「紫外災難」，鹵素燈為一近似黑體輻射源；依據 Stefan-Boltzmann Law 關於熱輻射功率的關係式，操作電源，可模擬與認識熱輻射體頻譜峰值與色溫的關係。

**關鍵詞：**稜鏡色散、熱輻射體、紫外災難、Stefan-Boltzmann Law

## 壹、前言

牛頓在二十六歲時回到家鄉<sup>1,2</sup>，他在房裡的窗子挖了一個小圓孔，陽光穿過圓孔為一平行且圓形的光，三稜鏡讓圓形光折射，圓光在屏幕上析出不同顏色的光，牛頓發現：白光是由不同顏色的光組成，不同顏色的光遇到三稜鏡，偏折的角度不一樣；在此之前，光被認為是純白的，是物體讓她添了顏色。這個活動的發想來自上述的故事，如圖 1，將白光 LED 置於凸透鏡焦點，穿過透鏡後形

成平行光再經過三稜鏡的色散，三原色光圈便在屏幕上出現，由圖可知，光圈即使在明亮的教室內仍有足夠的亮度可為視覺接受且清晰可見。



圖 1：在明亮室內 光學活動可進行

當注意力轉向連續光譜時，我們選擇照度大、耐高溫、規格為 12V20W 明亮黃光的鹵素燈供應電流，以稜鏡色散其光譜，再以數位相機拍攝，我們不經意地發現：在藍紫色的一方光線暗淡許多，此為黑體輻射研究裡的「紫外災難」，鹵素燈在高溫時為一近似之黑體輻射源，於是，開始一連串關於對黑體輻射光譜的動手做活動。

十九世紀末，黑體輻射被視為理想的發光物體，其輻射的能量被大量的研究，實驗相關的數據與理論得到三點結論（Richard Wolfson, 1995）：一、熱輻射功率與絕對溫度的四次方成正比，二、輻射強度峰值的波長與溫度成反比；三、輻射強度與波長的分布僅與溫度相關，與發光物的材料無關。依循這三個結論，調整供應的電壓電流，提供適當比例且可行的電功率，在不同的距離下拍攝光譜圖片，觀察光譜峰值與亮度的變化，對教科書的內容進行更深一步的理解，讓黑體輻射不同色溫下之光譜曲線能具體的以圖像呈現，並對教學有所幫助。

這個模仿牛頓以稜鏡色散「圓的平行光」有別於僅能在暗室內呈現的狹縫色散，或以圖片與公式抽象的在教室內說明頻譜關係，包括光譜、熱輻射與黑體輻射等物理教學，明圈光譜在屏幕上有較大的亮度，容易在課室內呈現，可作為教師教授光波長的計算、熱輻射體相關的物理學與紫外災難現象發生的演示活動，亦可輕易的由學生操作 LED 與

白熾燈，顯露白光裡所蘊含的各個成分；其次，使用與生活相關之光源讓學生的物理學習確實進入生活中體驗，隨時理解課文與課堂的教學；最後，實驗過程裡，我們可具體認識許多關於發光物相關的技術與知識，包括：LED 的組成與相關原理、白熾燈色溫的控制、色差現象的形成…等。

## 貳、文獻與理論的探討

我們由三個面向對文獻與理論進行探討：科學史、物理教科書，以及白光 LED 與鹵素燈原理。

幾本關於科學史與科普書籍都提到牛頓返回家鄉期間關於光學所做的實驗<sup>1,2,3</sup>，穿過小圓孔的白光經過三稜鏡後，各色光的折射率並不同，各個光圈偏折後在屏幕上呈現重疊且多層次橢圓，牛頓再以另一三稜鏡及凸透鏡將各色光匯集，得到原來的白光；於是牛頓得到白光是由各色光組合的結論，這是科學上的第一個光譜，更廣義的說法：科學上的第一個電磁波譜。依據上述的結果，我將三稜鏡置於一平台，白光 LED 的小光點放在凸透鏡焦點附近，白光穿過凸透鏡得到近似平行的光，穿過 5mm 的小圓孔，再經三稜鏡折射，可輕易察覺屏幕上紅藍綠三原色的色圈，如圖 2，此為教科書裡提到的明線光譜；若改以白熾燈則得到連續光譜，以數位相機拍攝並仔細觀察時，我們驚訝的發現：在光譜中偏藍紫的部分衰弱許多，此為近代物理裡著名的「紫外災難」現象。我們在教室的教學中透過簡易的操作，演示光譜與光譜相關的物理現象，包括熱輻射物理與近代物理的濫觴。

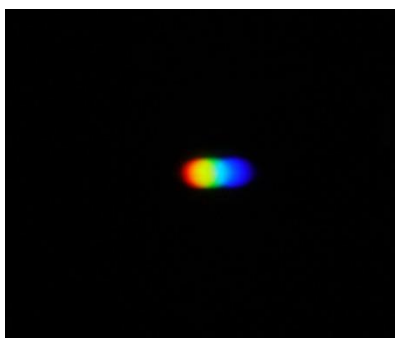


圖 2：置於稜鏡後方 60 公分 LED 色散。

教學活動設計的理论有兩個方面。首先是稜鏡色散現象<sup>4,5</sup>中，描述平行的太陽光經稜鏡色散後的光譜分布；平行的陽光經過細縫與稜鏡色散呈現出的光譜，橫座標為波長，上方是光譜顏色，而座標的等差比例，讓我們得以對各色光所對應的中心波長，寫下式(1)

$$\lambda R - \lambda B / \lambda G - \lambda B = XR - XB / XG - XB \quad (1)$$

其中  $\lambda R$ 、 $\lambda G$ 、 $\lambda B$  分別為紅光、綠光及藍光波長， $XR$ 、 $XG$ 、 $XB$  則為色散後光圈位置，式(1)有助於我們對白光 LED 色散後各光圈波長的分析。

其次，當我們以白熾燈觀察連續光譜時，熱輻射體相關的操作讓這個活動更顯意義；十九世紀中關於熱輻射發光物，包括恆星、高溫爐、等物體之發光顏色、溫度與其相關光譜，提出理想黑體的定義，而在燈泡的發明後，科學家們透過發熱燈絲裡熱能與其發光的光譜，分析溫度、熱功率、光波強度與光譜間的關係，得到了三個結論<sup>6</sup>(Richard Wolfson, 1995)：一、熱輻射功率與絕對溫度四次方成正比，可寫成式(2)

$$P = \sigma \varepsilon AT^4 \quad (2)$$

其中  $\sigma$  為常數，值為  $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ ， $A$  為輻射面積， $\varepsilon$  為物體輻射率(黑色為 1)，式(2)稱 Stefan-Boltzmann Law；二、輻射強度最大的波波長  $\lambda_{\text{peak}}$  與絕對溫度  $T$  的關係為式(3)，

$$\lambda_{\text{peak}} T = 0.2898 \times 10^{-2} \text{ m K} \quad (3)$$

此為 Wien's displacement law，峰值會隨著輻射體溫度增加並往波長短的地方移動；三、光譜強度的分布僅與熱輻射物體的絕對溫度有關，與材料無關。但是，當深入探究能量的來源時，古典的駐波理論與熱均能理論在波長較長的部分得到驗證，在短波波長部分面臨潰敗，科學史上稱為紫外災難。德國物理學家普朗克(Max Planck)經過五年的計算，提出光量子假說，即光以能量子  $E = nh\nu$  方式存在，並得到符合波長與輻射強度實驗分布的式(4)

$$R(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda kT} - 1)} \quad (4)$$

其中  $n$  為正整數， $h$  為普朗克常數，值為  $6.63 \times 10^{-34} \text{ J.S}$ ， $\nu$  為波頻率， $\lambda$  為波長， $k$  為 Boltzmann 常數， $R$  為每單位面積每單位波長之發光強度。依式(4)可得到符合實驗所得關於熱輻射物體不同溫度下，光譜強度與波長的關係圖<sup>6</sup>，如圖 3；我們可以注意到：頻譜的峰值在 3000K 時為近紅外線，4000K 時為紅光，偏藍紫光部分皆突然衰弱。式(4)也同時解釋了 Wien's displacement law 與 Stefan-Boltzmann Law<sup>6</sup>。本實驗的活動設計依循 Stefan-Boltzmann Law，讓學生或教師操作電源供應器之功率，利用前述稜鏡色散的方法，觀察鹵素燈的色光與色散光譜的變化，具體呈現圖 3 中關於頻譜峰值波長與不同色溫關係的光譜圖像。

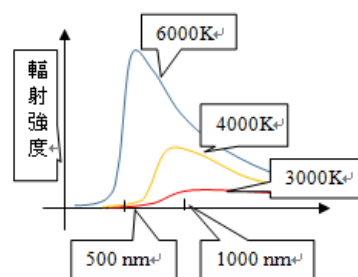


圖 3：黑體在不同溫度下輻射強度之頻譜圖<sup>6</sup>。

實驗活動光源為白光 LED 及鹵素燈；白光 LED 的種類有數種<sup>7</sup>，如表 1，(1)為三個 LED 發光合成，(2) 為一個藍光 LED 發光並激發黃色螢光劑而成，(4)為紫外光 LED 激發紅藍綠三種螢光劑而成白光，(3) 是我們使用的白光 LED，為原子筆上的贈品，目視下為黃色，實際上為綠光螢光劑與紅光螢光劑調製而成，由藍光 LED 激發兩種螢光劑組合而成白光，各色光波長約為藍光 460nm、綠光 530nm、紅光 590nm。在教室裡，我們讓光圈色散開來，以數位相機拍攝後，讓學生以線性插入法對光波長做演算。鹵素燈<sup>8</sup> 為白熾燈的一種，耐高溫、有較高的照度是它的特性，實驗裡使用的鹵素燈規格為 12VAC，20W；依據熱輻射體兩個經驗公式(2)與公式(3)，操作直流電源，將電壓與功率由 5V，6W 提升至 18V，44W，進行不同絕對溫度光譜之分析，理解熱輻射原理與普郎克假設契合的黑體輻射光譜，並對教科書<sup>4,6</sup>的圖形與例題，提供具體可行的操作例子。

表 1、白光 LED 的種類 (參考資料<sup>7</sup>)

序號	單晶	螢光劑	備註
(1)	紅、藍、綠	無	日亞化技術壟斷
(2)	藍光	黃色	日亞化技術壟斷
(3)	藍光	藍、綠	
(4)	紫外光	紅、藍、綠	

註：活動使用(3)種類的白光 LED。

## 參、教具的製作與簡單操作

- 一、表 2 列出製作牛頓色散活動裡需要使用的器材。
- 二、將白光 LED、10Ω 電阻、開關與鋰電池串聯，10Ω 電阻作為限制電流，以保護 LED 不被燒壞，並得到較大亮度。
- 三、將黑色盒子鑽一 5 mm 小孔，將鹵素燈置入盒內以 AB 膠固定，拉出電線並串聯開關，再接上電源供應器備用。

- 四、將黑色圓孔片以 AB 膠固定於凸透鏡上，再將此凸透鏡以 AB 膠立在黑色木板一側角落，右手將白光 LED 置於凸透鏡焦距上，再以左手調整三稜鏡在木板的位置，並於屏幕上得到清楚的光圈後以 AB 膠固定三稜鏡，圖 4 為裝置示意圖。
- 五、圖 5 顯示實驗在一般桌上即可操作，右下角以桌上虎鉗固定之鹵素燈，上方為白色屏幕，凸透鏡、圓孔與三稜鏡固定在黑色座上。
- 六、理論與理想的情形是：當光源置於凸透鏡焦點時，光線會在經透鏡後平行射出；然而，在非點光源且無法確實置於焦點的情況下，光在穿過透鏡後會呈現放大的效果，故仍應依屏幕實際效果作稜鏡與光源位置的調整。

表 2、牛頓色散所需材料

序號	品名	數量	備註
1	三稜鏡	2 個	100 cm x1.2cm
2	凸透鏡	1 個	焦距 10 cm
3	圓孔片	1 片	黑色 孔徑 5 mm
4	白光 led	1 個	
5	電阻	1 個	10Ω
6	黑色木板	1 片	30cm x30cm
7	鹵素燈	1 個	12V，20W (含座)
8	黑色盒子	1 個	塑膠製 耐高溫
9	塑膠板	1 片	白色
10	鋰電池	1 個	手機回收

註：1.工具包括：電源供應器、雙面膠、AB 膠、數位相機、電線若干、焊槍、開關。

2.數位相機使用有 PANASONIC 300 萬畫素、SONY1000 萬畫素。

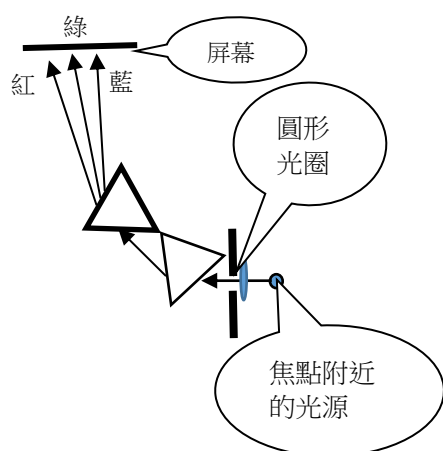


圖 4：稜鏡色散示意圖。



圖 5：實驗設備擺置圖，右下方為被虎鉗固定至於黑盒內的白熾燈。

## 肆、實驗與課室的呈現

### 一、動態影像的取得

- (一) 三原色光的色散：將屏幕置於三稜鏡後，點亮 LED，啟動攝影機，白色圓圈的邊緣一側是紅色，另一側是藍色的色差現象，隨著屏幕遠離三稜鏡，三原色逐漸析出，紅色圈與綠色圈交接處呈現黃色，綠色圈與藍色圈交接處呈現靛色，屏幕更加遠離時藍色圈離開的速度也快。
- (二) 鹵素燈的熱輻射光譜：將屏幕置於三稜鏡後 60 公分處，鹵素燈接上電

源供應器，供應電位調至 18 伏特，功率 44 瓦(燈泡額定功率為 20 瓦，但仍有承受極限)，鹵素燈甚為明亮，逐漸降低電壓，燈光漸黃，屏幕上的光譜，最亮處由藍綠光處往綠黃光方向移動，當燈逐漸暗黃，紅光處依舊很亮，藍光逐漸消逝，接下來綠光消逝，紅光則維持其應有的份量，直到燈光全滅，過程完全與圖 3 吻合，是教科書裡圖表的具體表現。

### 二、LED 的色光波長計算

- (一) 將屏幕置於三稜鏡後方 80 公分處，點亮 LED，得到如圖 6 之影像。
- (二) 將圖 6 圖形複製到 WORD 文件中，用繪製圖形的功能，將三個相同的圈套入三個色圈，如圖 7，以游標尺測量圈圈中心間的相對位置  $X$ ，見表 3。
- (三) 課堂上可以讓藍光、紅光波長已知，請學生用線性插入法(式(1))求綠光之波長，表 3 的例子裡，得出綠光之波長為 531nm，與文獻之參考數據<sup>7</sup>相近。
- (四) 我們亦可以攝影機對圖 6 進行攝影，並以紅、綠、藍之玻璃紙過濾光源，分別取得各色圈之位置，並在教室內播放，量取各色光之相對位置，作為實際例題的計算。

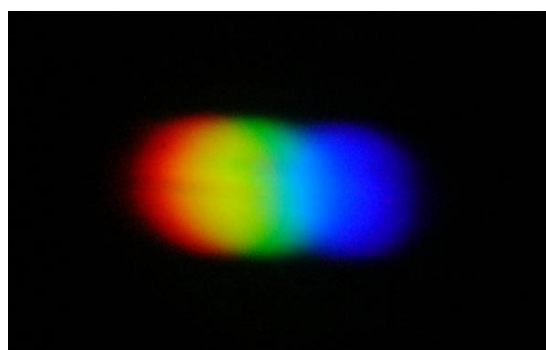


圖 6：屏幕於三稜鏡後 80 公分處之 LED 色散。



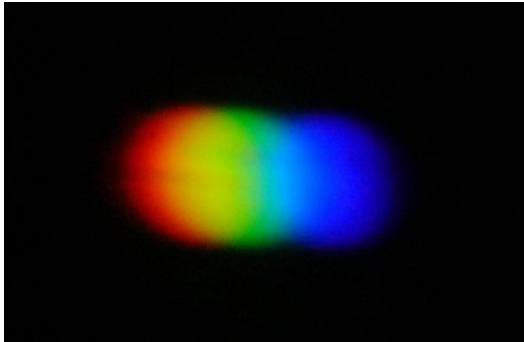


圖 7：以三個相同的圈圈填滿三個色圈。

表 3 LED 色散時，三原色光的相對位置 X

	藍光	綠光	紅光
參考波長	460 nm	530 nm	590 nm
位置 (X)	0 cm	1.76 cm	3.21 cm
實驗波長	460 nm	$\lambda=531$ nm	590 nm

註：此相對位置的取得是在 13.3 吋筆電 PPT 功能時量取。

### 三、熱輻射體在不同溫度時光譜之模擬

- (一) 將屏幕置於 80 公分處，調整並點亮鹵素燈，讓屏幕上呈現清楚明亮的橢圓。供應電壓自 5 伏特逐次上調至 18 伏特，每間格 1 伏特拍攝光譜成像圖一次，並記錄各電位之電流強度，觀察不同溫度下熱輻射體之光譜。
- (二) 參考下列因素：1. 前述光譜圖形峰值變化，2. 圖 3 中輻射強度與波長的關係圖，3. 鹵素燈之額定電壓，4. Stefan-Boltzmann Law 輻射功率與溫度四次方成正比。選定 5 伏特、10 伏特之光譜圖形，作為 3000K 與 4000K 之對照，其中 5 伏特因成像太弱而移至 0.5 公尺處。
- (三) 表 4 為鹵素燈在各輻射功率比值下估算之供電功率與溫度，及其在視覺中之色光。
- (四) 圖 8 為 3000K 之光譜圖形，右側藍紫光部分強度突然轉弱，而左側紅光部分仍舊較亮，可推論紅外線部分仍有未能為光感測元件測得之強度，與

圖 3 中 3000K 之圖形吻合。

- (五) 圖 9 為 4000K 之光譜圖形，右側藍紫光部分雖弱，但已不似 3000K 之光譜，而最強處落在紅黃交接部分，與圖 3 中 4000K 之圖形吻合。

- (六) 圖 10 為電壓 18 伏特 44W 時，依其與 3000K 電功率之比值，為 5000K 之光譜圖形，最強處落在黃藍交接部分。

表 4 輻射體溫度與輻射功率之關係

輻射溫度	3000K	4000K	5000K
功率比 <sup>1</sup>	1	3.2	7.8
供應電壓	5 V	10 V	18 V
電功率 <sup>2</sup>	6 W	18 W	44 W
色光	暗黃	亮黃	亮白

註：1. 輻射功率與溫度四次方成正比。

2. 電功率由為電壓與電流的乘積。

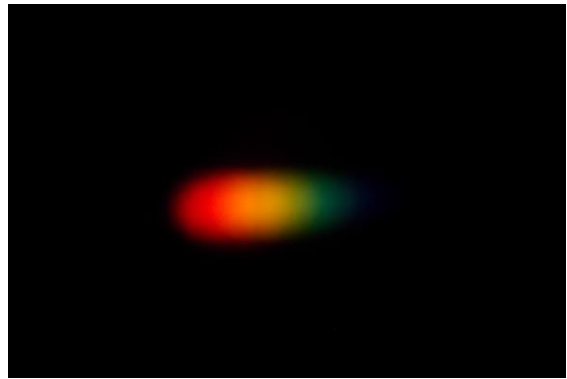


圖 8：6 瓦之光譜，屏幕距離 0.5 公尺，紅光乃至於紅外線仍可能有較強的輻射。

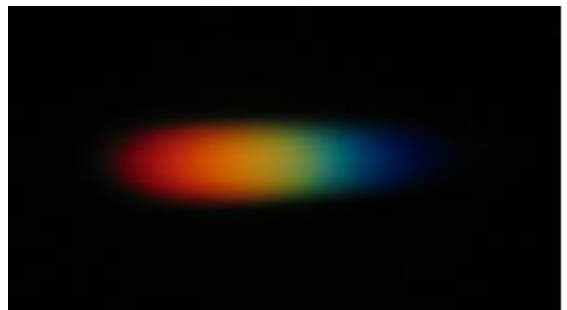


圖 9：18 瓦時之光譜，屏幕距離 0.8 公尺，輻射最強由左稍偏右。



圖 10：44 瓦時之光譜，屏幕距離 0.8 公尺，輻射最強處在中間黃藍交接處。

#### 四、有趣的小教具

在此動手做活動應用於課室的操作經驗裡，我們發現：只要在稜鏡的一側留下一小圓孔，如圖 11，即可在陽光下選擇適當的角度，將平行陽光色散到陰暗的白色牆面，得到與牛頓當年的實驗過程，若以眼睛透過稜鏡與小圓孔觀察發光物（勿直視強發光物，例如：陽光），發光物的色差現象馬上揭露，這實在是一個簡單、有趣、又具歷史意義的小教具。若圓孔改為狹縫，繞射與色散將同時出現。

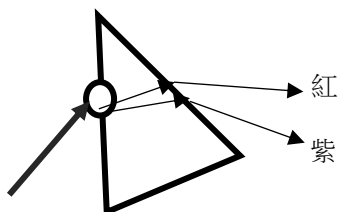


圖 11：三稜鏡留一小孔 從右側可觀察到發光物之色差現象。

### 伍、結論與建議

- 一、活動模仿牛頓在三百五十年前做的實驗，除了理解經典科學的美感，以白光 LED 與鹵素燈為光源，能貼近生活，吸引學生參與。
- 二、以動態演示方式呈現光譜的色散，與紫外災難現象的出現，讓學生以數位影像

直接紀錄，是這個活動的簡單發明。

- 三、相較於以狹縫形成較暗的光譜線，明圈光譜呈現較大亮度的色散現象，三百萬畫素具攝影功能的數位產品即可讓光學教學簡易的在教室內執行，可有效縮短教學時間，在授課時數不多的系科顯得實用。
- 四、實驗活動裡的影像皆可由教師拍攝完成，並自行製成投影片，在課程中講授，或伴隨實作與例題講解，特別是幾個熱輻射光譜圖，說明普郎克假說與黑體輻射經驗曲線的契合，具體提供近代物理教學的實例與演示。
- 五、由 LED 光譜的分析，此白光 LED 為單晶（藍光 LED）激發綠光螢光劑及紅光螢光劑形成，以線性插入法求取各色光之波長時，與參考文獻 7 比較，至為準確，可作為光譜教學的實際例題。
- 六、活動以鹵素燈的連續光譜作為白光 LED 光譜的對比，「紫外災難」典故的體認是意外的收穫，而鹵素燈耐高溫的特性，讓熱輻射體的物理相關議題呈現，是作者在活動裡難得的旅程。
- 七、不同溫度下，熱輻射體呈現的光譜是參考 Stefan-Boltzmann 定律、電功率公式及燈泡規格，定量分析與拍攝而得，由此可知：不斷的實驗觀察與數學分析是相當重要的；而不同溫度時，光呈現的色澤，有助於生活中各式照明設備色溫的理解。
- 八、光波長的計算取得，光柵扮演重要的角色，但稜鏡的色散對光譜的理解仍是簡單而容易的；在此活動中，除了對色差現象的理解外，熱輻射現象與其相關應用，例如：熱輻射體（高溫爐、人體體溫、恆星…）之溫度、光譜分布與發射功率，照明設備光能與熱能的分配比率

<sup>6</sup>，稜鏡色散都是認識她們的重要步驟之一。

九、活動仍有幾個可進步的部分，包括：光路徑控制、如何得到更好的平行光、凸透鏡成像及其孔徑的大小，光譜取得的適當距離等。

### 參考文獻

1. 蔡承志譯 (Creas, R. P.原著) (2010). 史上最美的十項科學實驗 第四章 85-103 頁。台北市：貓頭鷹出版。
2. 潘永祥等編著 (1986). 自然科學概論 第四章 87 頁。台北市：五南圖書出版公司。
3. 吳國盛著 (1998). 科學的歷程（上） 第 15 章 390-400 頁。理藝出版社。
4. Halliday, D. & Resnick, R. (2007). Fundamentals of Physics extend Eighth edition §11-4 p278 & § 11-5 p281. John Wiley & Sons Inc..
5. Wolfson, R. (1995). Physics with modern physics ,Ch.35.5.2 pp907-910. USA : HarperCollins College Publishers.
6. Wolfson, R. (1995). Physics with modern physics ,Ch.39.2 pp1031-1034. USA : HarperCollins College Publishers.
7. 新電子網站  
[http://www.mem.com.tw/article\\_content.asp?sn=0808250010](http://www.mem.com.tw/article_content.asp?sn=0808250010)
8. Bloomfield, L. A. (1997). How things work: The Physics of everyday life. Ch.6.3 pp275-282. USA : John Wiley & Sons Inc..
9. Serway, R. A. (2006). Serway's College Physics, Ch.22.4 pp736-738. USA : Thomson Brooks/Cole press.
10. 梁立國 (2014). 從牛頓色散到紫外災難 ---由白光 LED 及鹵素燈之光譜分析說起。2014 年中華民國物理教育聯合會 口頭論文。台東縣:台東大學應用科學系。



## **The Analysis of the Spectrums of White-light LED and Halogen Lamp by Prism Dispersion and Their Teaching Applications**

**Li-Kuo Liang**

Center of General Education, Foo-yin University  
sc013@fy.edu.tw

### **Abstract**

In this study, a light source is placed near the focus of a convex lens. Behind the lens, there are 5-mm holes and two prisms. The spectra of a white-light LED and a halogen lamp are analyzed. For the LED, different colors disperse when the screen shifts away. The intersection of red and green is yellow. We can calculate the wavelength of the different colors using the linear method from the measurements of the position of the circles. Different colored circles gradually appear when we observe the spectrum of the halogen lamp in the same way. We can easily find that the light strength becomes suddenly dim in the blue-violet area. This is the "ultraviolet catastrophe" phenomenon that cannot be explained by the classical theory in the history of modern physics. A halogen lamp is a radiation source of blackbody. We can operate the power of the lamp according to the Stefan-Boltzmann Law to present different colored lights and different spectrum distributions at different temperatures.

**Key words:** Newton dispersion, black-body radiation, the ultraviolet catastrophe, Stefan-Boltzmann Law

