

臺灣二〇〇七年國際科學展覽會

科 別：物理學

作 品 名 稱：數位攝譜儀及其數位分析方法

學校 / 作者：國立大里高級中學
國立大里高級中學

林育瑞
劉東霖

作者簡介



敝姓林，名育瑞。就讀國立大里高中，是自然組的第三類組。本身對自然科學有著相當大的興趣，曾參與許多科學營隊，也曾擔任許多幹部。在一次的機會中，我邀請了東霖同學一起做科展；選擇物理光學，是基於對光譜的好奇心；光譜線看到的到卻不一定能拍攝，能拍攝卻不一定能分析。課餘時間我們都投注了不少精神在實驗室裡，於是我們有了些心得…

作者簡介



我叫劉東霖，來自台中，一個由四人所組成的小康家庭，請讀國立大里高中第三類組。

我對自然科學本就抱持著相當的興趣，在進入國立大里高中後，詩翔老師及我的搭檔育瑞便邀我參加科展，因為三人都有很強的企圖心，所以都積極的參與，日後不論是遇到段考或是模考，只要是課餘時間，我和育瑞幾乎都在從事實驗的研究。

DIGITAL SPECTROPHOTOMETER AND SPECTROLOGICAL METHOD

Abstract

Color is not a physical quantity, but it is a characteristic of spectra. Traditionally spectra of light sources are characterized by the wavelengths and intensities of the spectral lines. We propose an alternative way of charactering spectra using colors. Using digital cameras, convex lens, and a 600 Lines/mm grating, we design a “Digital Spectrophotometer” (Pic.1), which uses no light sensors and electrical circuits that are necessary for conventional spectrometers. To analyze a spectrum using the “Digital Spectrophotometer”, we take digital images of the diffracted light through the grating emitted by the light source and then analyze the intensity distribution of the color components of the spectral lines. The structure of the “Digital Spectrophotometer” is simple and is easy to operate.

The Digital Spectrophotometer includes a computer software program we have developed called the “Digital Spectrological Method”. After enlarging the digital spectrographs to a mosaic scale and regards each mosaic as a basic color block, the Digital Spectrological Method will transform every color block into a four dimensional “color coordinates” (λ (wavelength), R (red), G (green), B (blue)), where the coordinate λ is translated from the spatial position of the spectral line and the R , G , and B coordinates specifies respectively the corresponding intensity of the red, green, and blue color components. Comparing the “color coordinates” of the unknown light sources to the known, we can easily identify the wavelengths of the lights emitted by the unknown illuminant precisely.

We have accomplished the following experiments by using the “Digital Spectrophotometer”:

1. Measure the spectra of various gaseous atoms, and establish the “database of digital spectra in color coordinates” (DDSCC).
2. Compare the characters of color presentation between digital camera images and positive film of the optical camera.
3. Identify the absorption spectrum of the Solar spectrum (Fraunhofer Lines) using the DDSCC.
4. Analyze the Orion α and β spectrum using the DDSCC.
5. Identify the 589.0 and 589.6 nm wavelength difference between the “Double Lines of sodium spectrum”.
6. Measure the range of wavelength of the colored LED and register the results into the (λ , R , G , B) coordinates.
7. Compare the range of wavelength of He-Ne Laser and commercial Laser pointer.
8. Measure the Zeeman splitting of the hydrogen atom spectrum at 0.5 Tesla.

一、摘要

顏色雖不是物理量，卻是光譜的特性，傳統上對光譜的分析只記錄波長及對應的強度，而非以顏色來區分。我們運用數位相機、凸透鏡及 600 條/mm 光柵，設計一個以顏色成分為標準來分析各類光譜的「數位攝譜儀」(Pic.1)。這個新的設計無須使用傳統光譜儀所需之光感應器及電路設計，只需拍攝光源透過光柵的繞射影像即可分析對應之光譜。

我們製作的「數位攝譜儀」包含了一個自行設計的電腦軟體程式「數位光譜分析法」；將拍攝到光譜數位影像放大成「馬賽克」，作為光譜的最小「色塊」，該程式可將每個色塊轉換為一組四維的「顏色座標」(λ (波長), R (紅), G (綠), B (藍))，其中的 λ 座標係由光譜線的位置轉換而來，而紅、綠、藍座標則記錄對應的紅、綠、藍色成分強度。與已知光源譜線的「顏色座標」比較，「數位攝譜儀」可精確測量各種未知光源放射出的光波波長且操作方便。

利用「數位攝譜儀」的數位分析方法，我們完成以下實驗：

1. 測量不同種類的原子光譜，建立「數位光譜資料庫」，包括氫、汞及鈉原子。
2. 比較數位相機影像與光學相機正片的色彩顯影。
3. 利用「數位光譜資料庫」，鑑定太陽光譜中的吸收光譜(Fraunhofer Lines)。
4. 利用「數位光譜資料庫」，分析獵戶座 α 、 β 的可見光光譜。
5. 鑑別波長 589.0、589.6 奈米的鈉雙線。
6. 用顏色座標(λ, R, G, B)測量發光二極體的波長範圍。
7. 比較 He-Ne 雷射與雷射光筆放光的波長範圍，發現市售雷射光筆所放之光並非單頻。

二、研究動機：

高中光學用三稜鏡或光柵分光，用肉眼判讀每條光譜對應特定波長，不但誤差很大，很難客觀描述光譜顏色。大學用單光儀 monochromatic 測量光譜線的波長，但單光儀近百萬元，無法攜帶。

天文攝影常使用紅、藍、綠 3 種濾鏡，利用電腦影像疊合得到彩色的星雲照片，提供我們將「光譜影像數位化」的靈感。把分光儀結合數位相機，改良設計為「數位攝譜儀」，可靈活拍攝各種光源的光譜，分析對應的波長、顏色。

LED 在不同角度，其相對發光強度相差很多，因此市售的 LED 很難品質保證。「數位攝譜儀」直接拍攝 LED 連續光譜，用影像軟體求出波長範圍，比產業界公佈的特性曲線精準，可作為品管分析。

Pic.01: 「數位攝譜儀」裝置圖



三、理論與實驗印證

[實驗 1]：He-Ne 雷射（波長 $\lambda = 632.8\text{nm}$ ），**垂直入射** 600 條/mm 光柵，測量繞射角 α 。

<原理> 假設狹縫寬為 d ，光柵與像屏距離 r ，中央亮點與第一亮點距離 x ：

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{由圖形: } \tan \alpha = \frac{x}{r} \cong 0.41 \quad \therefore \alpha \cong 22.3^\circ \\ \text{繞射公式: } d \cdot \sin \alpha = \lambda \quad \therefore \frac{10^{-3}}{600} \times \sin 22.3^\circ \cong 6.322 \times 10^{-7} \text{m} = 632.2\text{nm} \cong \lambda \end{array} \right.$$

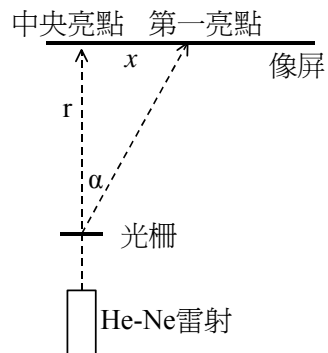


Fig.1 測量光柵的繞射角 α

[實驗 2]：汞、鈉、氫燈斜向入射光柵，同時拍攝汞、鈉、氫原子光譜 (Fig.2)。

將汞、鈉、氫燈垂直排列，光源從狹縫射出，測量照度分別為 2.6、2.6、1.8 勒克司。相機距離光源 $D=380\text{ cm}$ ，鏡頭貼上 600 條/mm 光柵，相機旋轉角度 $\theta \cong 15^\circ$ ，拍攝從紅光~紫光光譜。

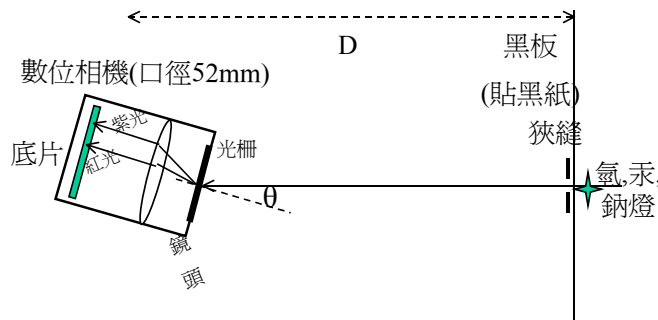


Fig.2:光源以 θ 斜向入射光柵,用相機拍攝光譜

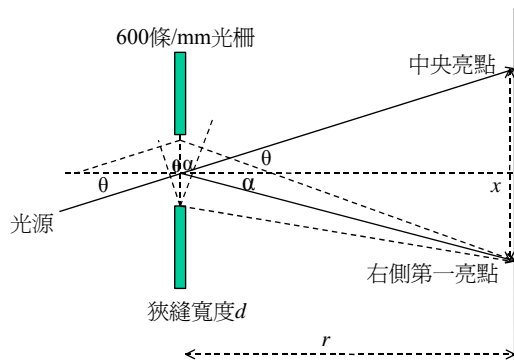


Fig.3:測量中央亮點與右側第一亮點的距離 x_i

<原理> (Fig.3)

1. 同時拍攝不同光源的光譜，有相同的偏向角 θ ，光柵與底片的等效距離 r 相同。
2. 已知光譜波長 λ_i 代入下式，計算對應的繞射角 α_i ，由拍攝光譜照片測量光譜線與中央亮點距離 x_i 。

$$\begin{cases} \frac{d}{\cos \theta} (\sin \alpha_i + \sin \theta) = \lambda_i & \dots (1) \\ x_i = \tan \alpha_i + \tan \theta & \dots (2) \end{cases} \quad \text{其中 } i = 1, 2, 3, \dots$$

3. 相機視野從紅光~紫光， $410.2 \leq \lambda \leq 656.3\text{ nm}$ ，代入(1)式，則繞射角

$$-7.6^\circ \leq \alpha \leq 6.6^\circ \quad \therefore 0.98 \leq \cos^3 \alpha \leq 1$$

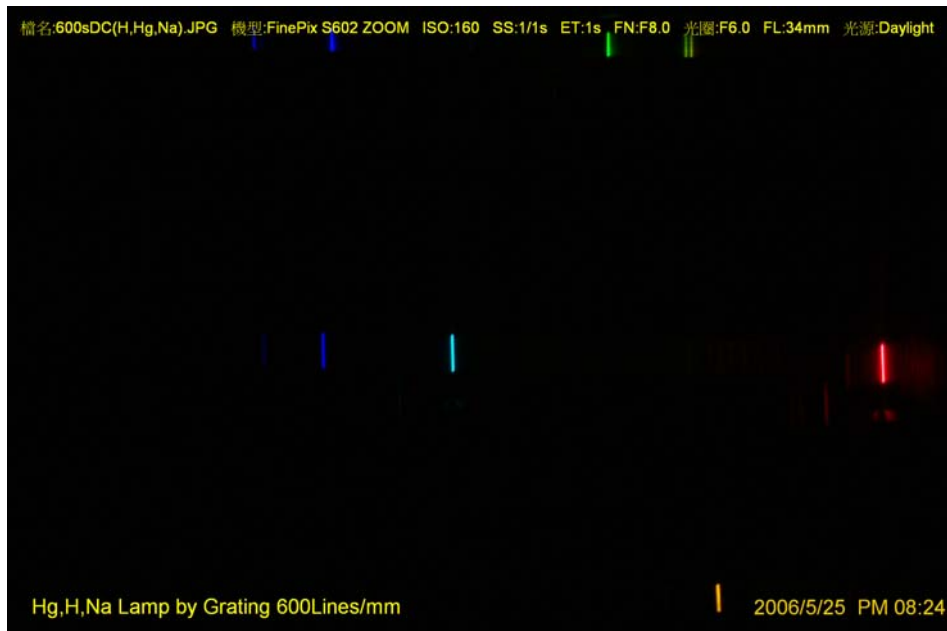
4. 微分(1)： $\frac{\Delta \lambda}{\Delta \alpha} = \frac{d \cdot \cos \alpha}{\cos \theta}$ ，微分(2)： $\Delta x = r \cdot \sec^2 \alpha \cdot \Delta \alpha$ 則

$$\frac{\Delta \lambda}{\Delta x} \cong \frac{\Delta \lambda}{r \cdot \sec^2 \alpha \cdot \Delta \alpha} = \frac{d \cdot \cos^3 \alpha}{r \cdot \cos \theta} = \text{定值} \cdot \cos^3 \alpha \cong \text{定值} \quad (\text{測量誤差 } 2\% \text{ 以內})$$

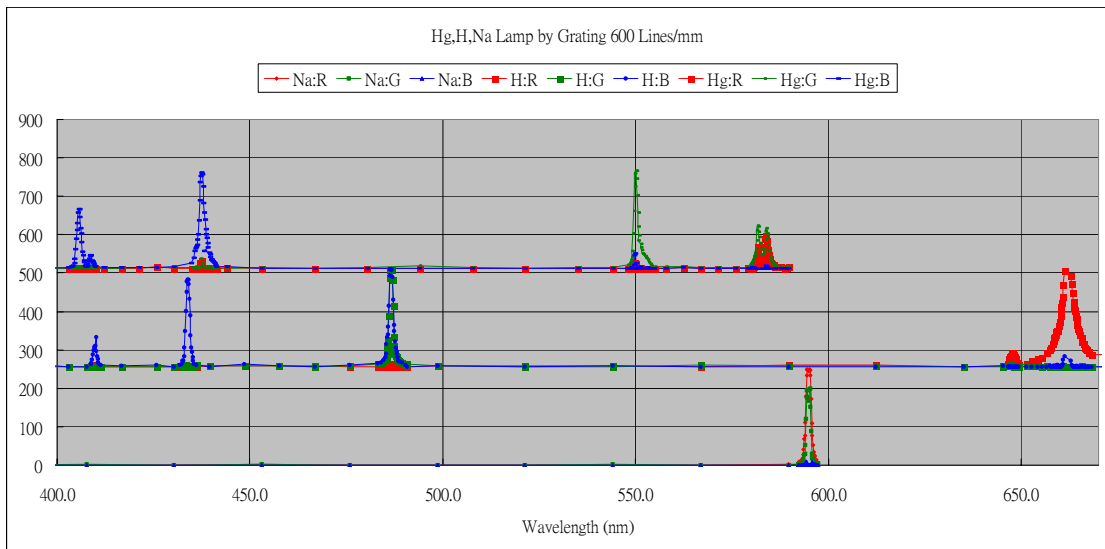
其中：相鄰兩條光譜線波長差 $\Delta \lambda$ ，繞射角的夾角 $\Delta \alpha$ ，成像在照片的位置 Δx 。

\therefore 只要已知 3 條光譜線的波長 λ 與位置 x ，可由相對位置計算未知光譜波長。

Pic.02 : Fuji S602 數位相機與 600 條/mm光柵拍攝汞燈、氫燈、鈉燈光譜(由上而下)



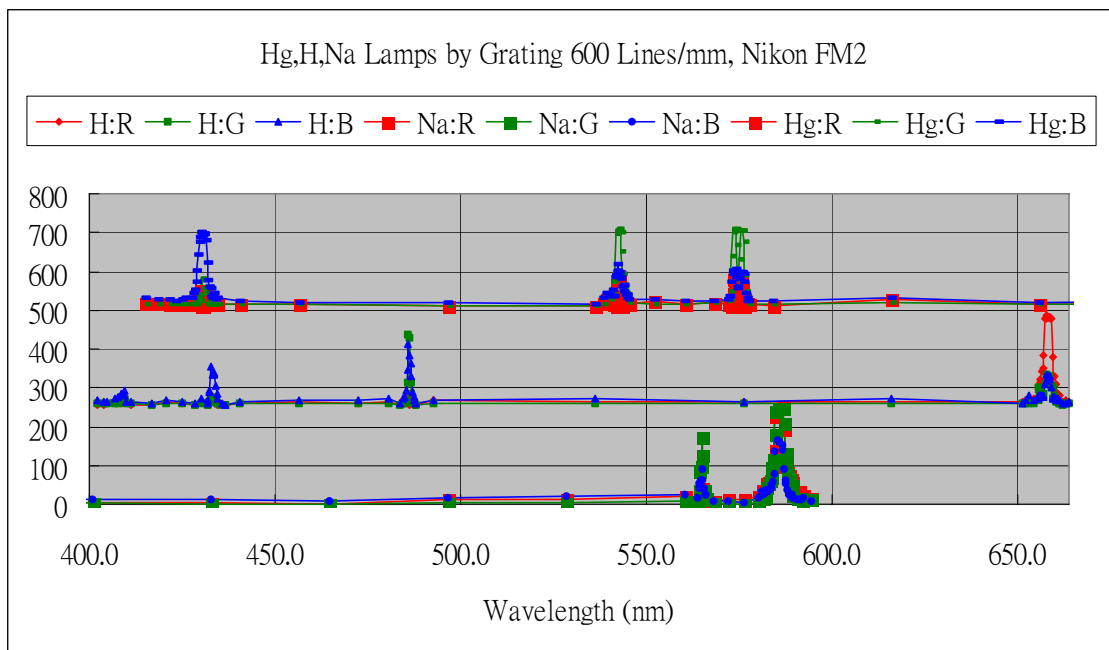
Pic.03 : Fuji S602 數位相機拍攝汞、氫、鈉原子數位光譜座標



Pic.04 : Nikon FM2 相機 (100 度正片) 與 600 條/mm 光柵拍攝汞燈、氫燈、鈉燈光譜



Pic.05 : Nikon FM2 相機 (100 度正片) 拍攝汞燈、氫燈、鈉燈數位光譜座標



Tab.01 : Fuji S602 數位相機與 600 條/mm光柵拍攝鈉、氫、汞原子的「數位光譜資料庫」。

【Fuji S602 數位相機：光圈：6，快門：1s，感光度：160，焦距：34 mm，入射角：15°】

光源	顏色	紅	紅	黃	黃	綠	綠	藍	紫
H 已知	位置 x (格)	72.77(?)				37.3		23.55	20.55
	(R, G, B)	(36,2,0)				(8,255,255)		(0,2,107)	(3,1,78)
	λ (nm 理論)	656.3				486.1		434.3	410.2
	$\Delta\lambda / \Delta x$					4.58		4.51	
Hg 未知	位置 x (格)	未顯影		58.72	58.23	51.31		26.59	19.61
	(R, G, B)			(84,104,7)	(58,112,0)	(0,255,15)		(2,8,250)	(1,2,154)
	λ (nm 實驗)			583.7	581.5	550.0		437.6	405.8
	λ (nm 理論)	690.8	656.3	579.1	577.0	546.1		435.8	407.8
	誤差%			0.8	0.8	0.7		0.4	0.5
Na 未知	位置 x (格)	未顯影		61.08		未顯影	未顯影		
	(R, G, B)			(250,196,0)					
	λ (nm 實驗)			594.5					
	λ (nm 理論)	617.5		589.3 (平均)		568.8	497.8		
	誤差%			0.9					

Tab.02 : Nikon FM2 相機(100 度正片)與 600 條/mm光柵拍攝鈉、氫、汞原子「數位光譜資料庫」。

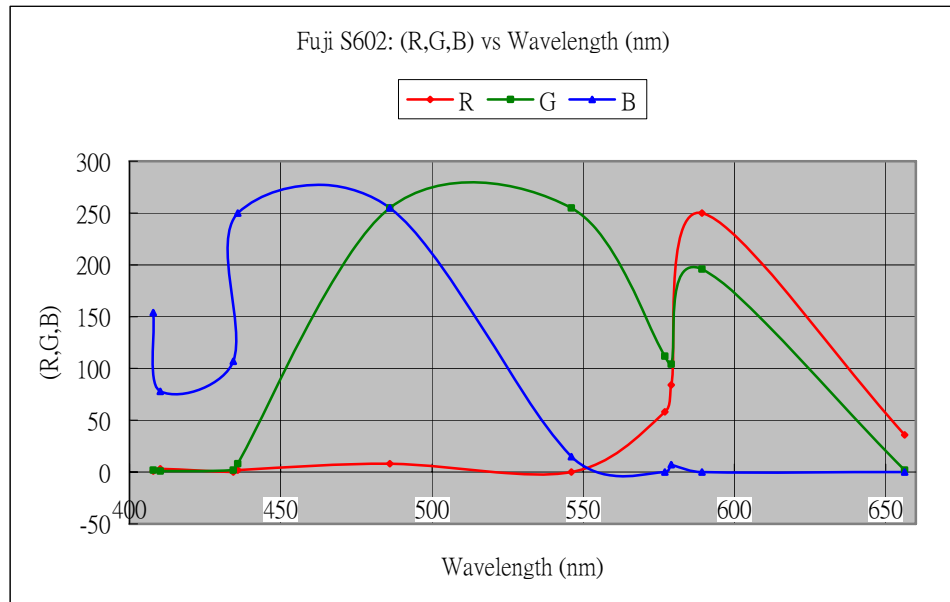
【Nikon FM2 相機：光圈：8，快門：4s，感光度：100，焦距：85 mm，入射角：15°】

光源	顏色	紅	紅	黃	黃	綠	綠	藍	紫
H 已知	位置 x (格)	39.99				18.68		12.01	9.06
	(R, G, B)	(229,78,77)				(11,183,156)		(20,22,100)	(21,16,35)
	λ (nm 理論)	656.3				486.1		434.3	410.2
	$\Delta\lambda / \Delta x$					7.99		7.77	
Hg 未知	位置 x (格)	未顯影		29.94	29.65	25.77		11.8	未顯影
	(R, G, B)			(61,195,87)	(70,197,92)	(77,198,105)		(25,43,185)	
	λ (nm 實驗)			574.9	572.6	542.0		432.0	
	λ (nm 理論)	690.8	656.3	579.1	577.0	546.1		435.8	
	誤差%			0.7	0.8	0.8		0.9	
Na 未知	位置 x (格)	未顯影		31.3		28.59			
	(R, G, B)			(251,248,152)		(43,174,89)			
	λ (nm 實驗)			585.6		564.3			
	λ (nm 理論)	617.5		589.3 (平均)		568.8			
	誤差%			0.6		0.8			

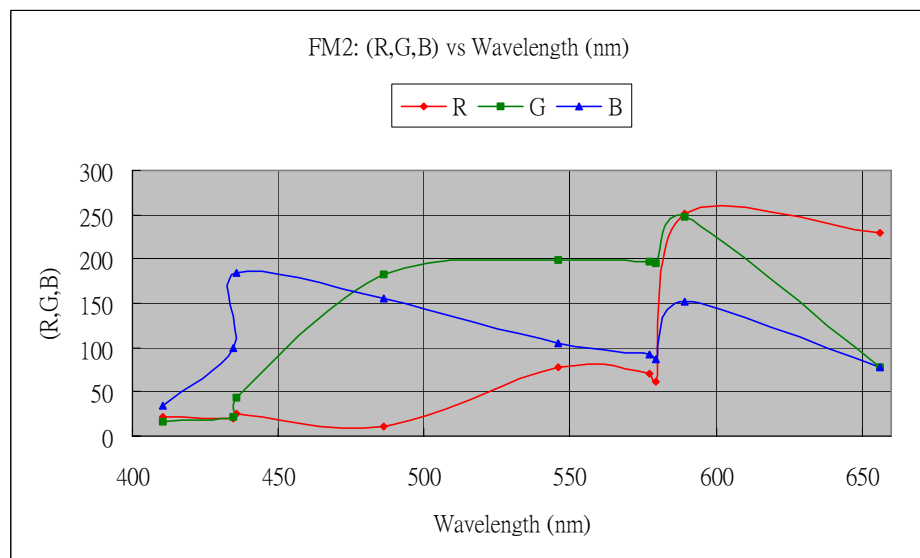
<應用 1>Fuji S602 (感光 CCD)與 Nikon 相機(100 度正片)感光原理不同，若拍攝相同光譜，可畫出波長 λ 對應顏色座標(R,G, B) 感光特性曲線。

- 【1】R 線與 B 線互相消長，肉眼感覺黃綠色較明亮，G 線在 500~555nm 較大。
- 【2】數位相機約在紅光 600nm 減弱，光學相機的紅光幾乎不變。
- 【3】光學相機約在藍光 430nm 持續減弱，數位相機約在紫光 400nm 突然增強。

Pic.06：數位相機 Fuji S602：波長 vs (R,G,B)平均值 作圖

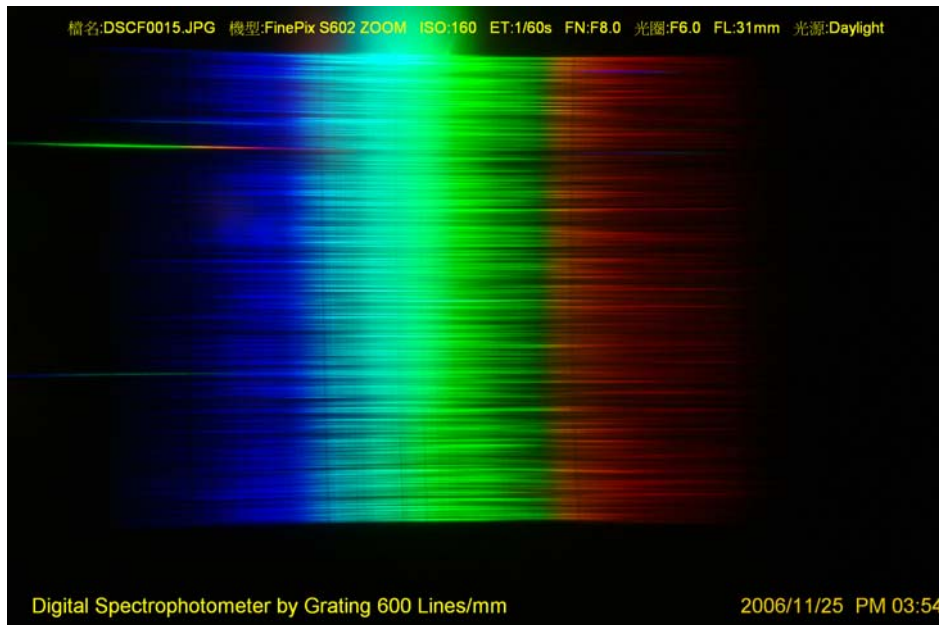


Pic.07：Nikon FM2 相機（100 度正片）：波長 vs (R,G,B)平均值 作圖

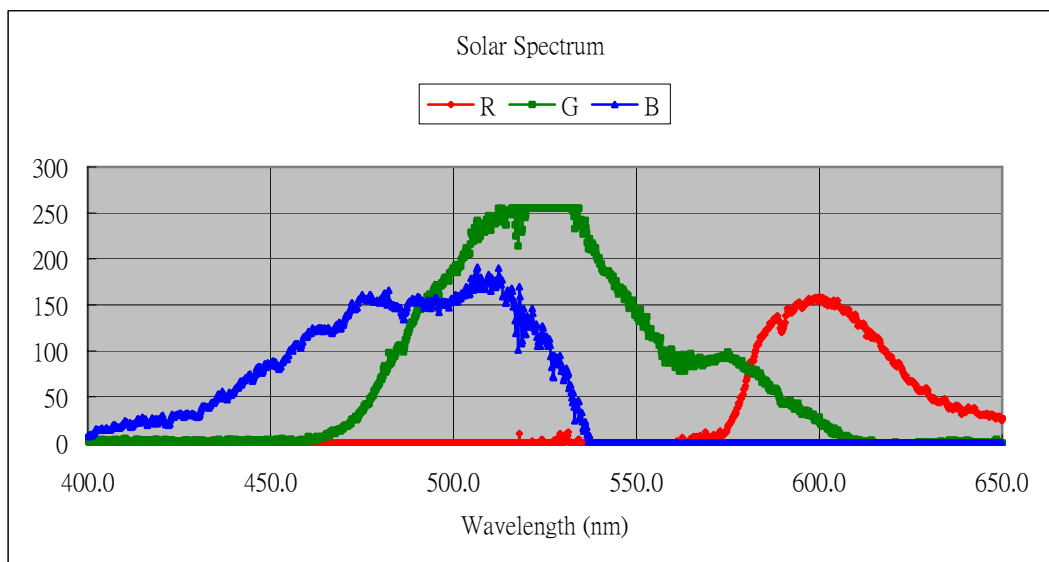


<應用 2> 數位攝譜儀蓋上黑布，使陽光垂直入射光柵，於繞射角 $\alpha \cong 23^\circ$ 放置相機，拍攝太陽暗線光譜。利用「數位光譜資料庫」，測量太陽的暗線光譜波長。

Pic.08:太陽光的暗線光譜 (Fraunhofer Lines): 600 條/mm光柵, 減光鏡 ND4、ND8



Pic.09: 分析太陽光的暗線光譜 (Fraunhofer Lines)



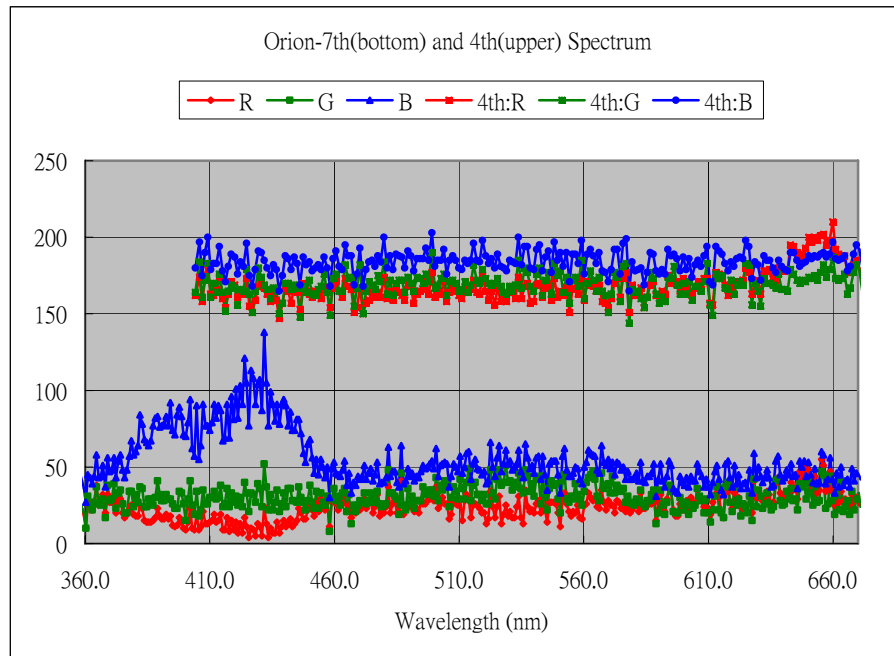
Tab : 03	黃	綠	綠	綠	藍	藍
暗線光譜	589.3nm	527.4nm	518.8nm	517.6nm	486.5nm	438.5nm
對應光譜	鈉雙線	鐵 527nm	鎂 518.4nm	鎂 517.3nm	氫 486.1nm	氫 434.3nm

<應用 3>利用「光譜數位資料庫」，分析獵戶座參宿四、參宿七的可見光光譜。

Pic.10：FM2 相機（100 度正片）使用 600 條/mm光柵拍攝獵戶座光譜



Pic.11：FM2 相機（100 度正片）使用 600 條/mm光柵拍攝獵戶座的數位光譜座標

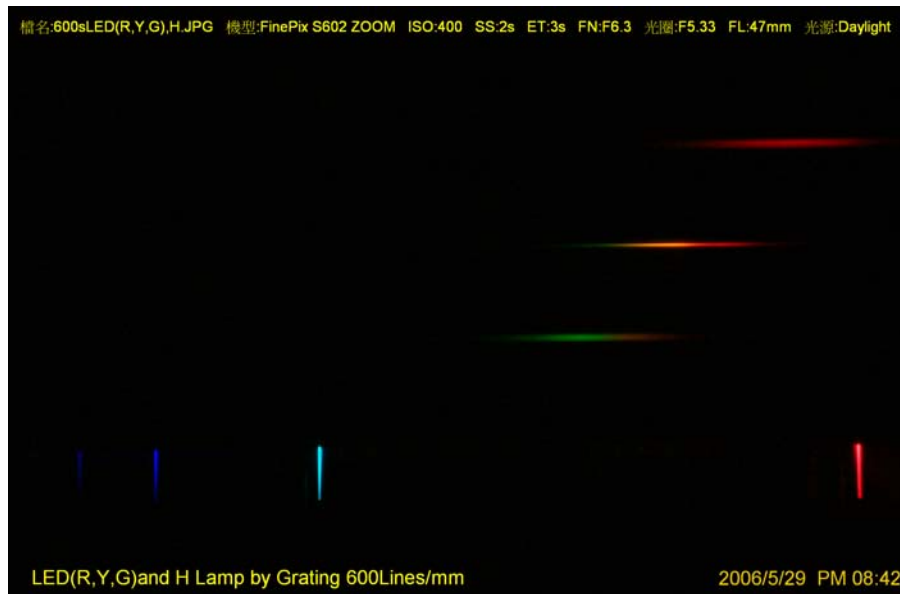


<結論>Tab.04：獵戶座參宿四、參宿七的明線（吸收）光譜

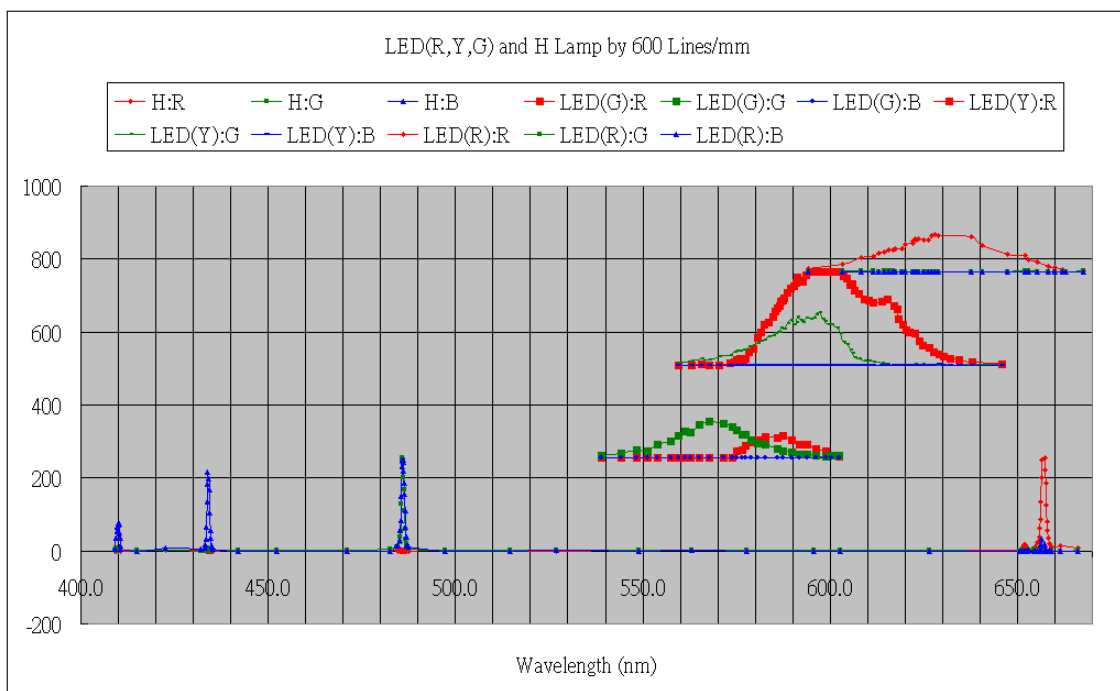
獵戶座	星等	種類	明線光譜(λ ,R,G,B)	明線光譜(λ ,R,G,B)	吸收光譜(λ ,R,G,B)
參宿四	0.4	紅巨星	氫(434.3nm,27,30,48)	氫(656.3nm,70,47,57)	汞(577nm,37,43,59)
參宿七	0.1	白矮星	氫(434.3nm,24,52,138)	氫(656.3nm,55,47,60)	鈉(589nm,32,35,52)

[實驗 3]：以氫原子光譜為準，測量 LED、He-Ne 雷射、雷射光筆的波長範圍。
 <應用 1>相機距離光源 $D=3.20$ 公尺，鏡頭貼上光柵，相機旋轉角度 $\theta \cong 17^\circ$ ，
 紅、黃、綠 LED 照度分別為 0.03、0.02、0.02、0.11 勒克司，斜向入射光柵。

Pic.12：Fuji S602 數位相機與 600 條/mm 光柵拍攝紅、黃、綠 LED 與氫燈光譜

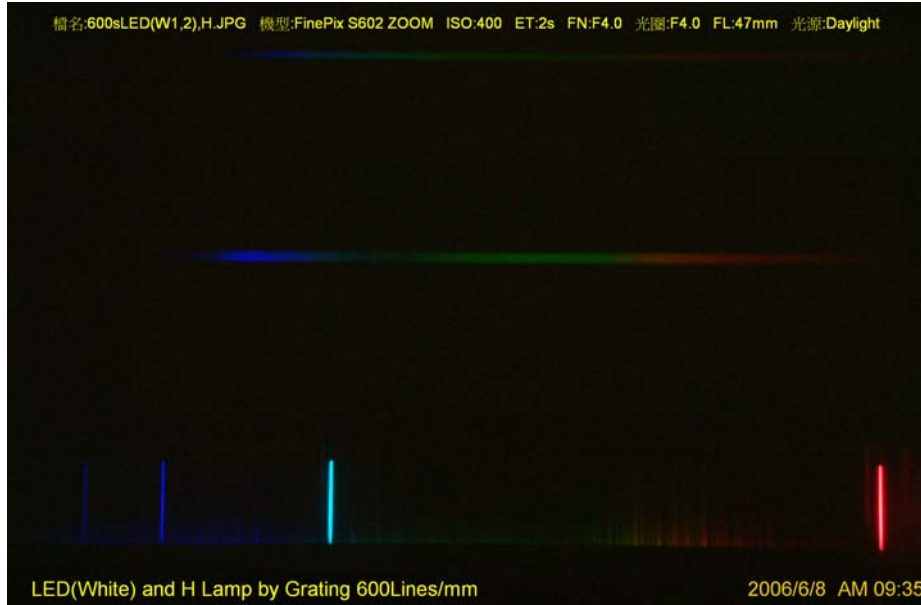


Pic.13：Fuji S602 數位相機與 600 條/mm 光柵拍攝紅、黃、綠 LED 與氫燈數位光譜座標

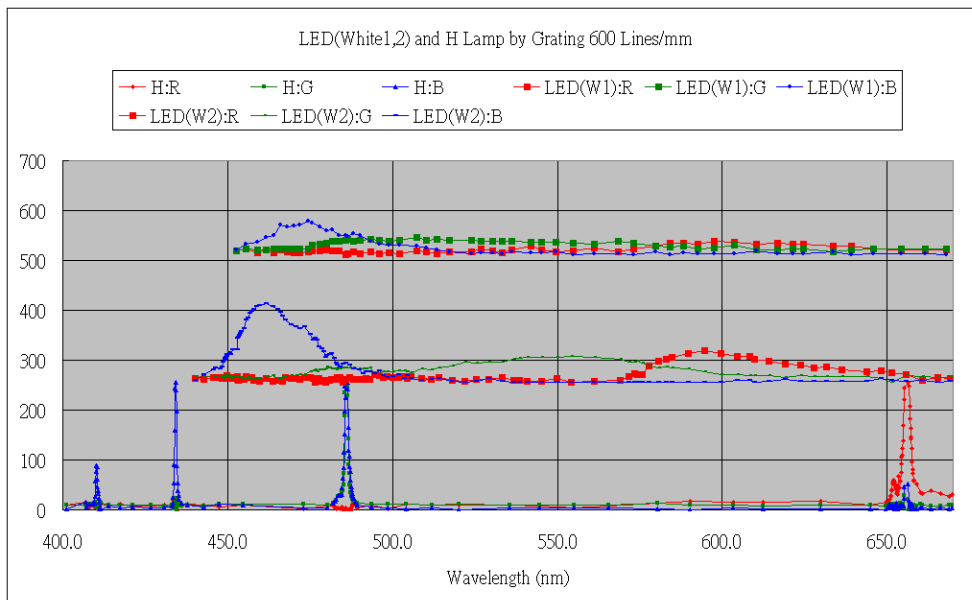


<應用 2>相機距離光源 D=3.20 公尺，鏡頭貼上光柵，相機旋轉角度 $\theta \cong 17^\circ$ ，白光 LED，測量照度分別為 0.03、0.02 勒克司，斜向入射光柵。

Pic.14：Fuji S602 數位相機與 600 條/mm光柵拍攝白光 LED（2 個）與氫燈光譜



Pic.15：Fuji S602 數位相機與 600 條/mm光柵拍攝白光 LED（2 個）與氫燈數位光譜座標

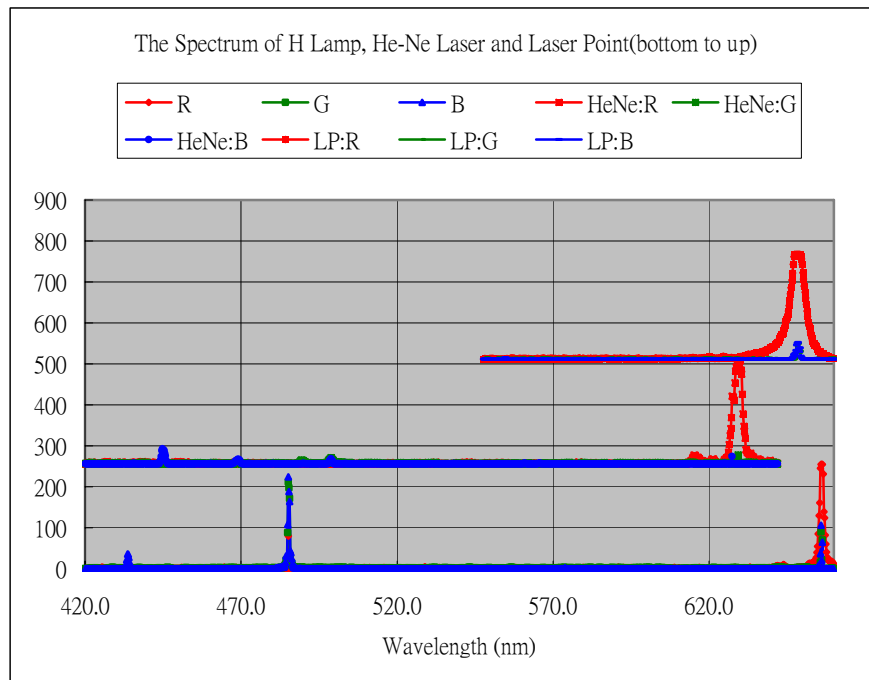


<應用 3>相機距離光源 $D=3.20$ 公尺，鏡頭貼上光柵，相機旋轉角度 $\theta \cong 17^\circ$ ，拍攝 He-Ne 雷射（分子光譜）、雷射光筆（半導體）的光譜。

Pic.16: 拍攝氫原子光譜、He-Ne 雷射、雷射光筆的光譜（600 條/mm）。



Pic.17: 氫原子光譜、He-Ne 雷射、雷射光筆光譜的數位光譜座標



<結論>

Tab.05：氫原子光譜為「校準光譜」，測量 LED(紅,黃,綠)、白光 LED (2 個) 光譜範圍

LED 顏色(型號)	波長範圍(nm)	R 線極大、波長 座標(101,0,0)	G 線極大、波長 座標(39,4,0)	B 線極大、波長
紅光 (RB-234HRS)	594.3 < λ < 667.5	$\lambda = 628.0\text{nm}$ 座標(101,0,0)	$\lambda = 608.4\text{nm}$ 座標(39,4,0)	幾乎為零
黃光 (RT3-434ACS)	559.5 < λ < 638.1	$\lambda = 599.6\text{nm}$ 座標(255,110,0)	$\lambda = 597.2\text{nm}$ 座標(255,142,0)	幾乎為零
綠光 (RB-534YGCS)	538.8 < λ < 602.4	$\lambda = 587.6\text{nm}$ 座標(60,18,0)	$\lambda = 567.6\text{nm}$ 座標(0,99,0)	幾乎為零
白光 (上)	452.7 < λ < 667.9	$\lambda = 597.6\text{nm}$ 座標(27,13,2)	$\lambda = 507.3\text{nm}$ 座標(7,34,17)	$\lambda = 474.4\text{nm}$ 座標(5,12,67)
白光 (下)	440.1 < λ < 669.0	$\lambda = 594.7\text{nm}$ 座標(63,21,0)	$\lambda = 554.3\text{nm}$ 座標(0,51,0)	$\lambda = 461.6\text{nm}$ 座標(8,10,157)

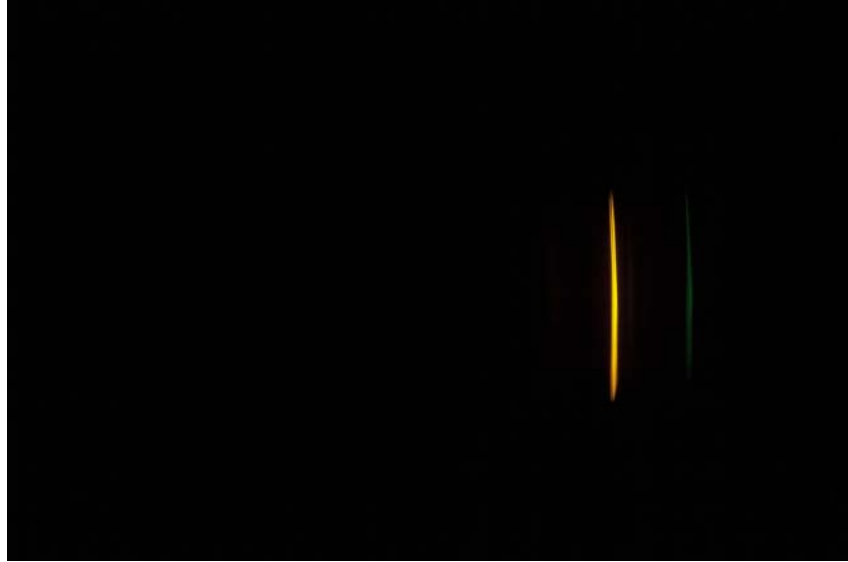
Tab.06：比較氫燈，He-Ne 雷射、雷射光筆的明線(連續)光譜

光源	波長範圍(nm)	明線光譜	明線光譜	明線光譜	明線光譜	說明
氫燈		656nm	486nm	434nm		原子光譜
He-Ne 雷射	626 < λ < 633	450nm	469nm	490nm	499nm	分子光譜
雷射光筆	642 < λ < 654					半導體光譜

[實驗 4]：由「數位攝譜儀」拍攝鈉雙線，鑑別波長差 $\Delta \lambda = 0.6$ 奈米。

鏡筒內置凸透鏡、0.5 mm狹縫，鈉燈垂直入射 1200 條/mm光柵，於繞射角 $\alpha \cong 44^\circ$ 放置相機，拍攝光譜。

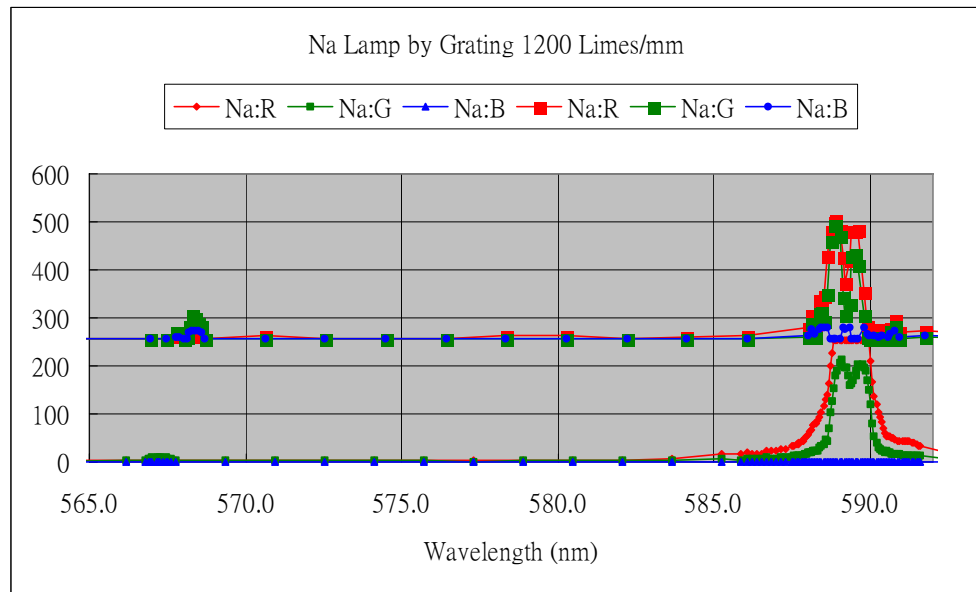
Pic.18：NikonFM2 相機，1200 條/mm光柵鑑別鈉雙線



Pic.19：Fuji S602 數位相機，1200 條/mm光柵鑑別鈉雙線



Pic.20：NikonFM2 相機(上)，Fuji S602 數位相機(下)，1200 條/mm光柵鑑別鈉雙線



<結論>

Tab.07:由顏色座標(R, G, B)的最小波長單位 $\Delta \lambda \approx 0.3\text{nm}$ ，恰可鑑別鈉雙線 $\Delta \lambda \approx 0.6\text{nm}$ 。

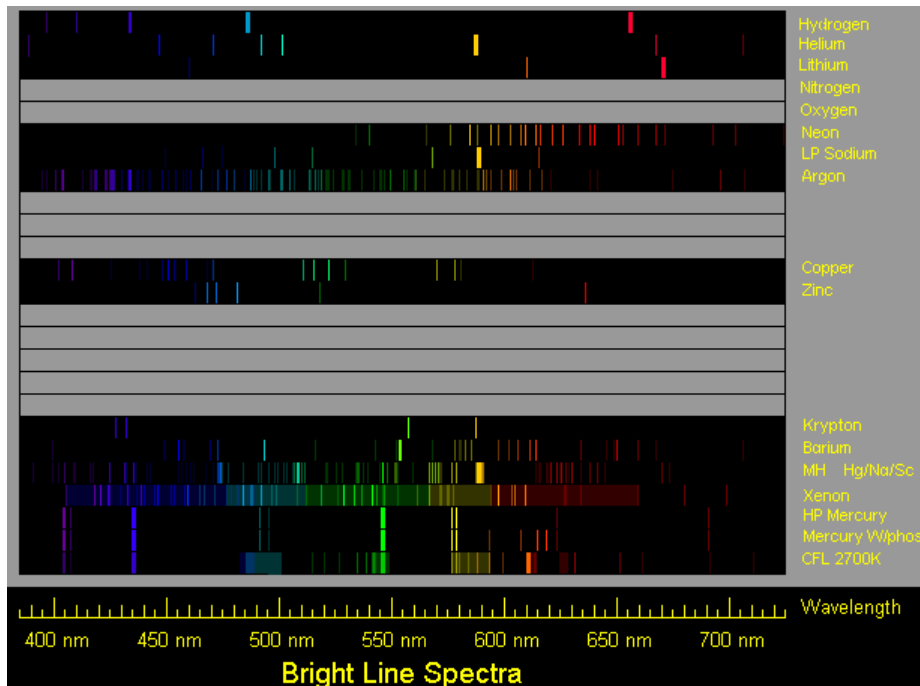
相機種類	準確值(波長)	黃(589.6nm)	黃(589.0nm)	綠(568.8 nm)
Fuji S602 數位相機	測量值(波長)	589.6nm	589.1nm	567.3nm
	(R, G, B)	(255,202,0)	(255,215,0)	(4,10,0)
Nikon FM2 (100 度正片)	測量值(波長)	589.5nm	588.9nm	568.3nm
	(R, G, B)	(254,179,0)	(247,239,0)	(10,52,18)

四、討論

1. 儀器部分：

- 【1】400 萬畫數數位相機、600 條/mm(教學用)光柵，可鑑別 $\Delta \lambda = 0.6\text{nm}$ 的鈉雙線。
- 【2】最新的千萬畫素的單眼數位相機，其三原色顯影已接近正片，很適合拍攝光譜。
- 【3】為增加景深，用光圈 11，曝光時間約 30 秒，能拍攝很細的光譜。
- 【4】專業儀器所拍攝的原子光譜如下圖(Pic.21)，因為數位相機的 CCD 色彩顯影非線性，以至於較暗的光譜未顯影。

Pic.21：文獻上，許多原子光譜（包含氫、汞、鈉原子光譜）



2. 測量 LED 波長範圍

【1】將 LED 固定在黑色底片盒中，並貼上 0.1mm 狹縫，彼此不干擾，則 LED 的發光強度與形狀面積無關。

【2】台灣球旦生產黃光 LED (編號 RT3-434ACS) 的規格：波長 540~640nm，在 580nm 的相對發光強度最大，與 Tab.03 結果接近。

3. 測量白光 LED 波長範圍

【1】可用 R,G,B 線分析白光 LED 用藍光晶片、黃光、紅光螢光粉混合比例。

【2】以白光 LED 為例：若螢光粉比例不同，導致顏色偏黃(藍)，其顏色座標(λ , R,G,B) 曲線會偏移。

【3】相同攝影條件下，高亮度的 LED，其(R,G,B)值較大，肉眼感覺顏色較亮(飽和)。

4. 比較 He-Ne 雷射、雷射光筆的光譜。

【1】He-Ne 雷射有 4 條很暗的明線光譜，不是單色光，應視為「分子光譜」。

【2】雷射光筆的波長範圍比 LED 窄，功率較大，不是單色光，應視為「半導體光譜」。

5. 顏色座標(x, R, G, B)方面：

【1】不同電腦判讀照片中同一個馬賽克，其顏色座標(R,G,B)都相同，可客觀分析。

【2】雖然數位相機的「白平衡」可調整影像顏色，其數位影像的顏色座標(R,G,B)也會改變，總比肉眼判讀顏色準確。

【3】有些明線光譜的強度很大，則光譜顏色趨向白色，雖可判斷位置，顏色卻不真實。

【4】相同顏色的線光譜，其 R:G:B 數值的比值約相等，可利用「數位光譜資料庫」判斷未知光譜的位置。

六、實驗結論

1. 數位攝譜儀配合數位分析方法，不但可精確分析各種光源的光譜，也具有原創性。
2. 天文學家可利用「數位光譜資料庫」，將拍攝光譜轉成數位座標(x, R, G, B)，搜尋可能對應的波長 λ ，可鑑別元素（化合物）、測量該光譜線的位移，深具應用價值。
3. 產業界用波長範圍規範 LED 的顏色，但顏色並不精準，很難品質保證，「數位光譜分析法」可精準分析 (λ, R, G, B)組成。
4. He-Ne 雷射、雷射光筆，雖號稱「雷射」，都不是單色光。
5. 「數位攝譜儀」的特點：
 - 【1】符合高中物理、化學「氫原子光譜」的教材實驗，真正「動手拍攝光譜」。
 - 【2】無須使用光感應器、無電路設計，搭配數位相機，即可拍攝光譜，誤差 1% 以內。
 - 【3】由程式畫出 LED 的顏色座標(λ, R, G, B)特性曲線，比產業界規格更準確。
 - 【4】由拍攝「光譜數位影像」，便可分析未知光譜的波長、顏色，可能對應的原子。
 - 【5】可鑑別相差 0.6nm 的鈉雙線，相當於從 5 cm寬的照片，肉眼鑑別相距 0.1 mm的細線，繞射角 0.058° ，是高難度的挑戰。
 - 【6】可搭配腳架，拍攝太陽的暗線光譜 (Fraunhofer Lines)、星光光譜，並分析可能對應的原子光譜。

七、參考資料

編號	內容	頁數
1.	Weast 'C.R.C. Handbook of Chemistry and Physics' 60 th edition	E260·277·314
2.	Frank. L.Pedrotti, S.J.Leno., S. Pedrotti. , 'Introduction to Optics'“ 2 nd edition (Prentice Hall,US 2001)	350
3.	R. A. Serway and J. W. Jewett, 'Principles of Physics' 3 rd edition (Harcourt, Singapore 2002)	1007 1024
4.	大學物理學, 2e , Book4 “波動與光學” 清華大學出版社, 張三慧 著.	188

評語

有想法作出簡便的攝譜儀，動機甚佳。實驗做了不少，攝譜儀也十分精密。

如能進一步改善，將體積縮小，會更有賣點。