

利用二微米巡天計畫 研究主序星在近紅外波段的色指數

彭定弘、高仲明

國立中央大學天文研究所

摘要

二微米巡天計畫 (2MASS) 是一個近紅外波段的全天觀測。如果可以判斷星的光譜型，讓我們有機會去利用其點源目錄 (Point Source Catalogue) 找出全天主序星的質量函數。Bessell & Brett (1988) 列出約四十種不同光譜型主序星和巨星的近紅外本質色指數 (intrinsic color)。然而，Finlator et al. (2000) 提到不同光譜型的星有相似的紅外色指數，導致只靠2MASS的色指數很難判斷光譜型。我們利用密西根目錄 (Michigan Catalogue, 1975, 1978, 1982, 1988, 1999) 上面的主序星，嘗試建立一個準則，從二微米巡天計畫的點源目錄裡找主序星的光譜型。

The NIR colors of main sequence stars in 2MASS

Ting-Hung Peng, Chung-Ming Ko

Institute of Astronomy, National Central University

Abstract

2MASS (Two Micron All Sky Survey) is an all sky NIR survey. Its PSC (point source catalogue) gives us an opportunity to find the mass function of main sequence stars across the sky, provided that we can identify the spectral type of the stars. Bessell & Brett (1988) have listed the intrinsic colors of main sequences and giants which are divided by about 40 spectral types. However, as pointed out by Finlator et al. (2000), the stars of different spectral types have similar infrared colors so that the classification of spectral types based on 2MASS (and NIR data in general) is difficult. Using the Michigan Catalogues (1975, 1978, 1982, 1988, 1999) on spectral types of main sequence stars, we attempt to find an empirical scheme to identify the spectral type of main sequence stars from PSC of 2MASS.

關鍵字 (Keywords): 二微米巡天計畫 (2MASS)、雙色指數圖 (color-color diagram)

Received : 2009.10.13; accepted: 2010.12.10

1、緒論

色指數(color index, 或 color)是兩個波段星等(magnitude)的差，通常是短波長波段的星等減去長波長波段的星等，理論上是個跟距離無關的參數，所以可以用來判斷星的光譜型(spectral type)。但實際上受到星際消光(interstellar extinction)及紅化(reddening)的影響，使得用色指數判斷光譜型變得困難許多。近紅外波段(near infrared bands)因為消光效應小(約為可見光的十分之一)，所以理論上我們用近紅外波段的色指數來判斷恆星的光譜型是個不錯的選擇。Bessell & Brett (1988)整合了在近紅外 *JHKLM* 波段的研究，並且用一套標準系統 — Glass-Johnson System — 描述各種不同光譜型的主序(main sequence)和巨星(giant)在近紅外波段的本質色指數(intrinsic color)，總共列了約四十種光譜型的本質色指數(主序從 B8 型到 M6 型，分成 25 個型態，見表 1 第 6, 7, 8 欄；巨星則從 G0 型到 M7 型，分為 18 個型態)。近幾年來在近紅外波段有全天的觀測資料，如二微米巡天計畫(Two Micron All Sky Survey, 2MASS)，因 2MASS 系統有別於其他的近紅外觀測系統，Carpenter (2001)導出 2MASS 跟這些近紅外系統的轉換公式，其中也列出了跟 Bessell & Brett (1988)的轉換。Straizys & Lazauskaite (2009)更進一步地利用已經知道光譜型的恆星訂出在 2MASS 的本質色指數。

恆星在近紅外波段的雙色指數圖的分布雖然有沿著主序和巨星線的趨勢(見圖 1)，但 Finlator et al. (2000)利用史隆數位巡天計畫(Sloan Digital Sky Survey, SDSS)和 2MASS 的資料，從 SDSS 的色指數判斷星的光譜型，說明了 2MASS 雙色指數圖其不同光譜型的星有相似的紅外色指數導致只靠 2MASS 的色指數很難判斷光譜型，大致上只能分成早期型恆星

(early-type star)和晚期型恆星(late-type star) (分界在 K0 型)，其成功率約 95%。之後陸陸續續地有關於 2MASS 色指數方面的研究，例如 Racca et al. (2009)和 Shenoy et al. (2008)用 2MASS 色指數找出紅化和消光；有些研究是為了分辨主序星和他們感興趣的源，例如 Kouzuma S. & Yamaoka H. (2010)研究活躍星系核(AGNs)在近紅外波段的色指數，Quanz S. P. et al. (2010)針對棕矮星(brown dwarf)的研究等。針對 2MASS 資料的色指數研究越來越多，本論文主要是重新探討主序星光譜型跟 2MASS 的色指數的對應關係，特別是針對早期型恆星。

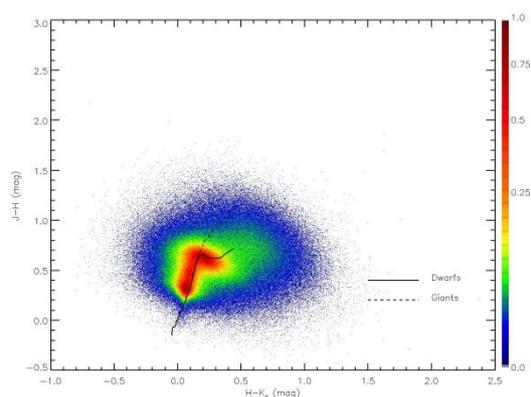


圖 1：2MASS 在高銀緯 $b > 75^\circ$ 的 $J-H$ 和 $H-K_S$ 雙色指數分布^a。

2、二微米巡天計畫和密西根恆星光譜目錄

二微米巡天計畫是一個近紅外的巡天計畫，觀測波段分別是 $J(1.25\mu m)$ 、 $H(1.65\mu m)$ 、 $K_S(2.17\mu m)$ 。其點源目錄(Point Source Catalogue)包含了三億多的點源遍佈於全天且大部分都是本銀河系(the Milky Way)的星。對點源來說，訊噪比 SNR(signal-to-noise ratio) = 10 時三個波段的極限星等(limit magnitude)分別是 15.8(J)、

^a

<http://www.ipac.caltech.edu/2mass/releases/allsky/index.html>

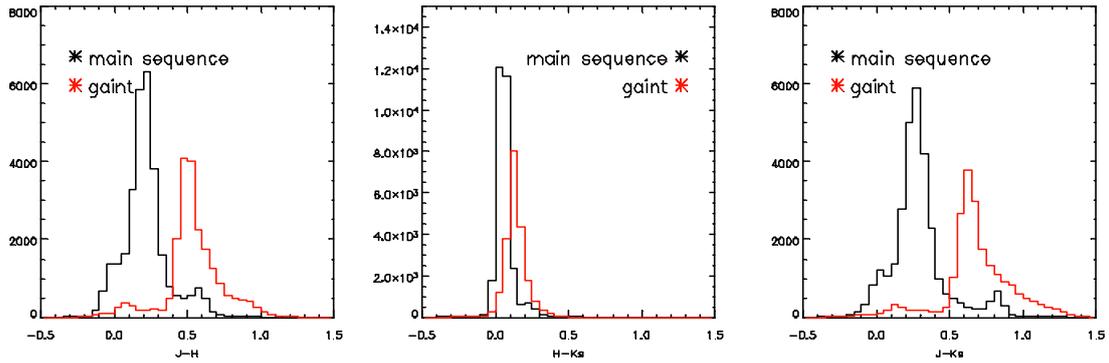


圖 2：密西根目錄裡主序跟巨星的色指數分布，黑色線為主序，紅色線為巨星，圖(左)到圖(右)依序為 $J-H$ 、 $H-K_s$ 、 $J-K_s$ 的分布，可以發現從圖(左)在 $J-H$ 小於 0.4 和圖(右)在 $J-K_s$ 小於 0.5 的星大部分都是屬於主序，且差不多約為主序的 K 型星。

15.1 (H)、14.3 (K_s)。

為了研究主序星的色指數和光譜型之間的關係，我們需要一個有光譜型資料的目錄。密西根目錄(Michigan Catalogue) 把 Henry Draper Catalogue 的星重新在光譜的 MK 系統上做分類 (MK 系統是 Morgan, Keenan & Kellerman 發展的一套系統(Morgan & Keenan, 1973))。至目前為止總共有五冊，每冊大約有 30000 個星，星的分布範圍是從 $\text{dec} = -90^\circ$ 到 $+5^\circ$ 。我們挑選了在密西根目錄中的主序星 (光度分類 (luminosity class) 為 V 的星) 並找出它們在 2MASS 近紅外波段的星等為我們的樣本。為了避免紅化效應，我們選擇了中高銀緯 ($|b| > 20^\circ$) 的星。除此之外，在 K_s 波段亮於 4.5 等的星因為達到飽和，而且誤差達到 0.2-0.4 等，所以我們不考慮這些星 (暗於 4.5 等到極限星等附近的星，其星等誤差範圍是 0.01-0.03)。我們總共挑選了 23029 顆星，其光譜型是從 O9 型到 M1 型。

3、主序星在近紅外波段的色指數分布

雖然挑選出來的主序星其光譜型分布範圍很廣泛 (從 O9 到 M1)，但 O9 型到 B4 型和 K5 型到 M1 型的星特別少 (126 顆)，所以我們就選擇了 B5 型到 K4 型去做進一步的研究。在

此之前我們要先確定巨星是否會造成影響，所以我們拿密西根目錄裡面的巨星 (光度分類為 I、II、III 的星) 做分析，因個數在我們討論主序的範圍裡佔的比例很少 (見圖 2)，主序跟巨星比例約 12:1，所以考慮巨星與否對我們的結果影響不大。

首先來看看色指數在各別光譜型主序星的數值，如表 1，第 1 欄是光譜型，第 2, 3, 4 欄是我們利用 2MASS 資料經過 Carpenter (2001) 的轉換變成 Bessell & Brett (1988) 訂出的標準系統 J-H、H-K、J-K 的數值，轉換公式如下：

$$\begin{aligned} (J-H)_{2MASS} &= (0.980 \pm 0.009)(J-H)_{BB} + (-0.045 \pm 0.006) \\ (H-K_s)_{2MASS} &= (0.996 \pm 0.019)(H-K_s)_{BB} + (0.028 \pm 0.005) \\ (J-K_s)_{2MASS} &= (0.972 \pm 0.006)(J-K_s)_{BB} + (-0.011 \pm 0.005) \end{aligned}$$

轉換公式裡色指數的下標代表的意義是觀測系統，BB 是指 Bessell & Brett (1988) 的標準系統。為了使得統計有效，我們挑了樣本裡大於十顆星的光譜型出來算出平均的色指數，總共有 45 個次型態(subtype)，樣本在各個光譜型的星數在第 5 欄。表 1 的第 6, 7, 8 欄分別是 Bessell & Brett (1988) 標準系統的 $J-H$ 、 $H-K$ 、 $J-K$ 本質色指數。由表 1 可見，每個次型態的數值都非常接近，且如果把誤差範圍考慮進去的話，色指數在其附近次型態的星都包含進去了。所以我

們無法分辨在鄰近的次型態。以 A0 型為例，其 $J-H$ 色指數的範圍為 0.045 ± 0.066 ，其所鄰近次型態的涵蓋範圍從 B4 型到 A4 型，所以無法分辨各別的次型態。

不過，我們發現可以把樣本分成 8 組，每組的間隔是五個次型態，分別是：(1)：B5-B9、(2)：A0-A4、(3)：A5-A9、(4)：F0-F4、(5)：F5-F9、(6)：G0-G4、(7)：G5-G9、(8)：K0-K4，每組裡面約有 500 到 3000 顆星。圖 3、圖 4、圖 5 是這 8 組的單一色指數的個數分布。

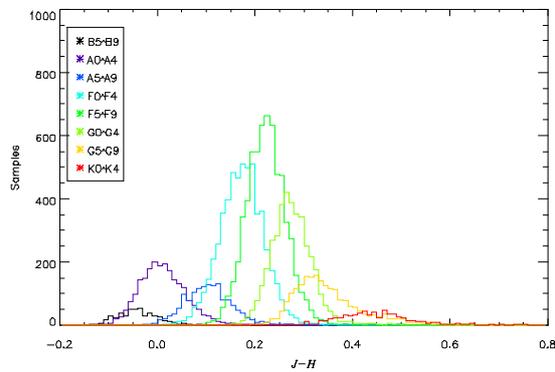


圖 3：8 個主序星組的 $J-H$ 色指數分布。

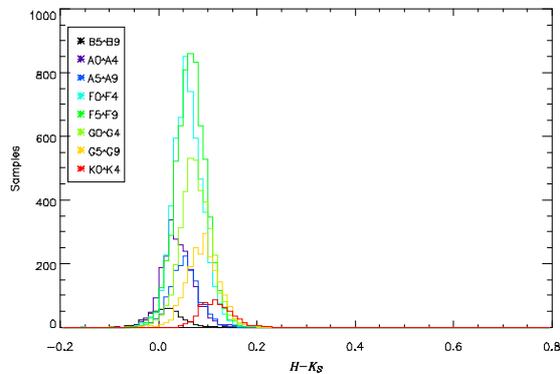


圖 4：8 個主序星組的 $H-K_s$ 色指數分布。

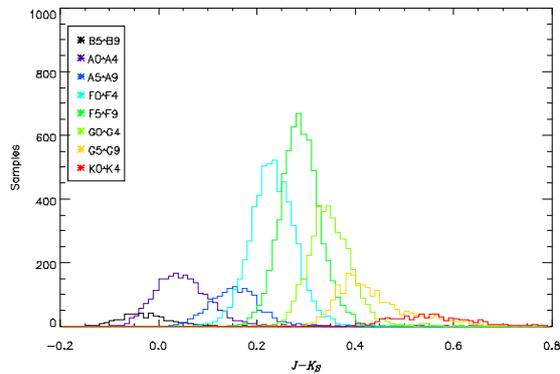


圖 5：8 個主序星組的 $J-K_s$ 色指數分布。

由圖 4 可知 $H-K_s$ 根本無法判斷星的光譜型。Bessell & Brett (1988) 也提到 $H-K$ 的差異在 A 型到 K 型星很小導致重疊得很嚴重。 $J-H$ 和 $J-K_s$ 星組與星組間雖有重疊的部分，不過並非像 $H-K_s$ 那麼嚴重。所以我們試著用 $J-H$ 和 $J-K_s$ 進行下一步的分析。我們研究在 $J-H$ 和 $J-K_s$ 二維的平面上八個星組的分布並畫出其分布的半高等高線(contour of half maximum)，如圖 6。顯然地，利用此方法可以判斷星組的光譜型。表 2 是我們訂出分開八個星組的準則。在準則(a)左下方的星我們認為它是(1)組星，(a)和(b)之間我們認為它是(2)組星，依此類推。在這種情況之下我們必須先了解我們訂出的準則有多好。我們找出在兩準則之間的星，去統計出每個星組在這兩準則之內的比例，如圖 7。以(3)星組區間為例，其包含了(1)、(2)、(3)、(4)四種星組，其中屬於(3)星組的星佔了 60%。再看看(6)星組

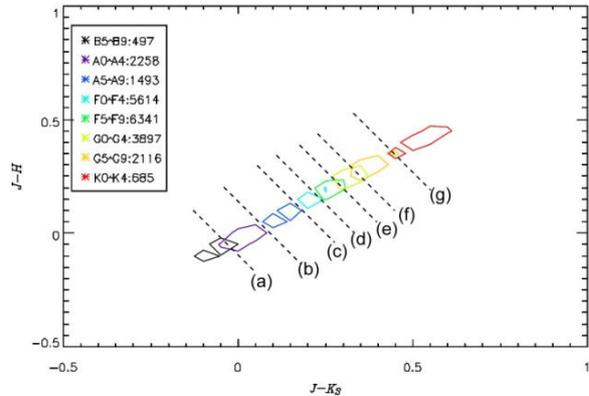


圖 6：八個星組在 $J-H$ 和 $J-K_s$ 二維平面上半高等高線。虛線是我們訂出分辨每個星組的準則，見表 2。

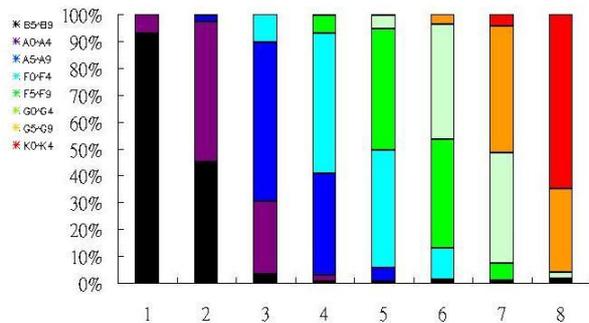


圖 7：利用表 2 訂出的準則去找出在兩準則之間的星，其相對應各組星的比率。

區間，其包含了(1)、(4)、(5)、(6)、(7)五種星組，其中屬於(6)星組的星佔了 40%。可見用我們的準則判斷星組的光譜型精確判斷率差不多約 40~60%。

4、討論與結論

我們用密西根目錄的主序星〈B2-K7 型〉並找出它們在 2MASS 的資料，希望找出主序星的光譜型和近紅外的色指數的對應關係。當我們把早期型恆星五個次型態〈B5-B9 型、A0-A4 型...、K0-K4 型，因 B2-B4 型和 K5-K7 型的星數少所以不討論〉為一組時，則可訂出準則清楚地分出八個星組〈見圖 6〉。我們的結果顯示在色指數 $H-K_s$ 無法判斷，如同 Bessell & Brett (1988)。Straizys & Lazauskaite (2009)也提到除了觀測誤差可以到達 ± 0.07 ，也有可能是恆星在本質上面的差異使得誤差很大，如年齡和色球層活耀的差異、環繞在恆星周圍溫暖氣體和灰塵的盤或是外殼、未知的伴星或者次伴星、化學組成的差異等等。Finlator et al. (2000)利用 SDSS 和 2MASS 的資料說明光靠 2MASS 的資料是很難訂出恆星的光譜型，以 K0 型為分界分出早期型和晚期型的星約 95%的成功率。我們用 2MASS 的資料可以把早期型恆星分出七個「星組」〈以五個次型態為一個星組〉，但請注意其準確判斷率約 40~60%。

理論上從色指數知道光譜型的話，2MASS 的資料是可以直接用來研究質量函數。從我們的研究知道在 2MASS 的資料裡面可以把 0.8 太陽質量(K0 型)以上可粗略分成七組。沒有辦法研究質量較小的恆星的原因是主序星和巨星的色指數無法分開〈K 型到 M 型之間的恆星〉。要導出質量函數我們還得要把資料完整性 (completeness)的問題解決，這個工作我們還在研究當中。

參考文獻

- Bessell, M. S. & Brett, J. M., 1988, *PASP*, 100, 1134
- Binney & Merrifield, 1998, *Galactic Astronomy*, Princeton University
- Carpenter, J. M., 2001, *AJ*, 121, 2851
- Finlator, K. et al., 2000, *AJ*, 120, 2615
- Houk, N., 1978, Michigan Catalogue of Two-Dimensional Spectral Types for the HD Stars, Vol. 2 (Ann Arbor: Univ. Michigan)
- Houk, N., 1982, Michigan Catalogue of Two-Dimensional Spectral Types for the HD Stars, Vol. 3 (Ann Arbor: Univ. Michigan)
- Houk, N. & Cowley, A. P., 1975, Michigan Catalogue of Two-Dimensional Spectral Types for the HD Stars, Vol. 1 (Ann Arbor: Univ. Michigan)
- Houk, N. & Smith-Moore, M., 1988, Michigan Catalogue of Two-Dimensional Spectral Types for the HD Stars, Vol. 4 (Ann Arbor: Univ. Michigan)
- Houk, N. & Swift, C., 1999, Michigan Catalogue of Two-Dimensional Spectral Types for the HD Stars, Vol. 5 (Ann Arbor: Univ. Michigan)
- Kouzuma, S., & Yamaoka, H., 2010, *A&A*, 509, 64
- Morgan, W. W. & Keenan, P. C., 1973, *ARA&A*, 11, 29
- Quanz, S. P. et al., 2010, *ApJ*, 708, 770
- Racca, G. A., Vilas-Boas Jose, W. S., & Reza, R. De La, 2009, *ApJ*, 703, 1444
- Shenoy, S. S., Whittet, D. C. B., Ives, J. A., & Watson, D. M., 2008, *ApJS*, 176, 457
- Straizys, V. & Lazauskaite, R., 2009, *Baltic Astronomy*, 18, 19

表 1：主序星光譜型在近紅外的本質色指數，第 1 欄是光譜型，第 2, 3, 4 欄分別是我們導出的 J-H、H-K、J-K 的色指數和誤差，第 5 欄是樣本中各個光譜型的星數。第 6, 7, 8 欄列出 Bessell & Brett(1988)的本質色指數做比較。

Spectral type	J-H	H-K	J-K	N	J-H _{BB}	H-K _{BB}	J-K _{BB}
B2	-0.036±0.049	-0.036±0.073	-0.079±0.113	17			
B3	-0.039±0.041	-0.039±0.042	-0.085±0.072	34			
B4	-0.021±0.062	-0.006±0.077	-0.033±0.11	10			
B5	-0.024±0.04	-0.024±0.045	-0.055±0.054	36			
B6	-0.014±0.039	-0.023±0.036	-0.044±0.049	21			
B7	0.007±0.068	-0.029±0.03	-0.028±0.081	21			
B8	0.011±0.069	-0.015±0.038	-0.01±0.094	135	-0.05	-0.004	-0.09
B9	0.017±0.056	-0.008±0.035	0.003±0.071	284			
A0	0.045±0.066	0.005±0.034	0.044±0.082	859	0	0	0
A1	0.059±0.06	0.011±0.033	0.065±0.072	538			
A2	0.068±0.054	0.016±0.032	0.078±0.064	360	0.02	0.005	0.02
A3	0.081±0.048	0.019±0.031	0.095±0.055	341			
A4	0.111±0.072	0.021±0.036	0.127±0.084	160			
A5	0.115±0.057	0.022±0.03	0.133±0.061	176	0.06	0.015	0.08
A6	0.133±0.066	0.024±0.034	0.152±0.087	121			
A7	0.131±0.056	0.024±0.031	0.15±0.064	195	0.09	0.025	0.11
A8	0.151±0.061	0.028±0.055	0.174±0.103	187			
A9	0.173±0.045	0.026±0.032	0.195±0.049	814			
F0	0.194±0.05	0.029±0.031	0.219±0.053	1368	0.13	0.03	0.16
F1	0.212±0.046	0.036±0.03	0.244±0.049	172			
F2	0.218±0.042	0.03±0.032	0.245±0.045	1289	0.165	0.035	0.19
F3	0.236±0.041	0.033±0.032	0.265±0.042	1994			
F4	0.249±0.045	0.035±0.034	0.28±0.044	791			
F5	0.258±0.041	0.035±0.034	0.29±0.045	2434	0.23	0.04	0.27
F6	0.271±0.038	0.038±0.03	0.306±0.039	1470			
F7	0.286±0.041	0.039±0.035	0.322±0.045	1320	0.285	0.045	0.34
F8	0.295±0.041	0.041±0.032	0.332±0.042	716			
F9	0.301±0.039	0.04±0.032	0.339±0.042	401			
G0	0.309±0.043	0.043±0.039	0.349±0.051	1147	0.305	0.05	0.36
G1	0.319±0.043	0.048±0.068	0.365±0.076	681			
G2	0.328±0.04	0.047±0.033	0.372±0.045	669	0.32	0.052	0.37
G3	0.345±0.05	0.052±0.032	0.395±0.055	1086			
G4	0.354±0.052	0.052±0.034	0.405±0.06	314	0.33	0.055	0.385
G5	0.369±0.055	0.054±0.066	0.421±0.08	859			
G6	0.393±0.06	0.059±0.06	0.45±0.082	471	0.37	0.06	0.43

利用二微米巡天計畫研究主序星在近紅外波段的色指數
The NIR colors of main sequence stars in 2MASS

Spectral type	J-H	H-K	J-K	N	J-H _{BB}	H-K _{BB}	J-K _{BB}
G7	0.429±0.081	0.061±0.035	0.49±0.098	104			
G8	0.443±0.074	0.071±0.33	0.514±0.084	499			
G9	0.457±0.075	0.075±0.035	0.531±0.092	183			
K0	0.471±0.077	0.08±0.031	0.55±0.091	271	0.45	0.075	0.53
K1	0.481±0.062	0.085±0.033	0.566±0.07	128			
K2	0.532±0.09	0.095±0.035	0.627±0.112	139	0.5	0.09	0.59
K3	0.546±0.077	0.102±0.035	0.649±0.095	108			
K4	0.612±0.06	0.12±0.034	0.733±0.073	39	0.58	0.105	0.68
K5	0.623±0.058	0.128±0.035	0.752±0.069	39	0.61	0.11	0.72
K6							
K7	0.646±0.07	0.127±0.041	0.775±0.104	14	0.66	0.13	0.79
K8							
K9							
M0					0.695	0.165	0.86
M1					0.68	0.2	0.87
M2					0.665	0.21	0.87
M3					0.62	0.25	0.87
M4					0.6	0.275	0.88
M5					0.62	0.32	0.94
M6					0.66	0.37	1.03

表 2：分辨八個星組光譜型的準則

$(J-H) = a(J-K_s) + b$							
準則	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)
a	-1.31	-1.25	-1.37	-1.41	-1.33	-1.42	-1.39
b	-0.105	0.125	0.36	0.495	0.595	0.76	0.97