

中華民國第四十八屆中小學科學展覽會
作品說明書

高中組 地球科學科

第三名

040505

以 B-V 色指數圖探討球狀星團中的紅群聚

學校名稱：臺北市立建國高級中學

作者：	指導老師：
高二 曾鈺雍	葉昭松
高二 王昶航	洪筱恬
高二 陳駿仁	
高二 許景順	

關鍵詞： 紅群聚、水平分支、球狀星團

摘要

在蒐集網路上的資料時，我們在球狀星團中觀察到了一種稱為紅群聚（red clump）的恆星，此類恆星在天文領域中為一個較新的研究題材，我們透過以下的幾個方法，進一步探討紅群聚：

- 一、製作 B-V 色指數圖並分析球狀星團中的紅群聚。
- 二、計算紅群聚在水平分支中的數量百分比，與星團年齡做比較。
- 三、觀察紅群聚與轉折點的亮度差，與星團年齡做比較。

經過研究分析之後發現：

- 一、星團年齡與紅群聚在水平分支中所佔百分比成反向關係。
- 二、球狀星團中，紅群聚和轉折點之間的亮度差與年齡呈現反向關係，與疏散星團相反。

壹、研究動機

球狀星團（全華版高中基礎地球科學第三章第四節、康熹版高中基礎地球科學第二章第一節）可製成與赫羅圖等價的 B-V 色指數圖（星等星色圖），而在這種圖上我們可以得到許多不同的資訊。我們好奇為什麼在圖上會有聚集在一起的一群恆星？它們的多寡與星團的年齡是否有關？希望能透過此研究得到解答並深入探討其關聯性。

貳、研究目的

利用 B 波段（300-520nm）與 V 波段（490-680nm）的數值做出與赫羅圖等價的 B-V 色指數圖，觀察不同年齡球狀星團的紅群聚及比較相關年齡後，分析紅群聚分布及多寡，進而探討其關連性。

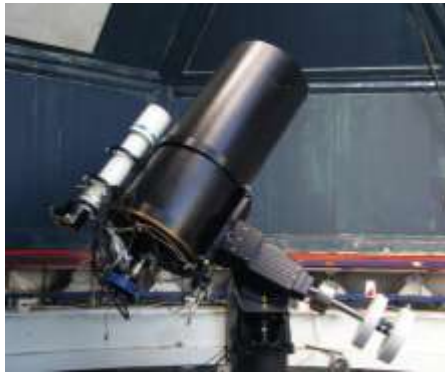
參、研究設備及器材

一、硬體：

（一）個人電腦

（二）中央大學鹿林山天文台

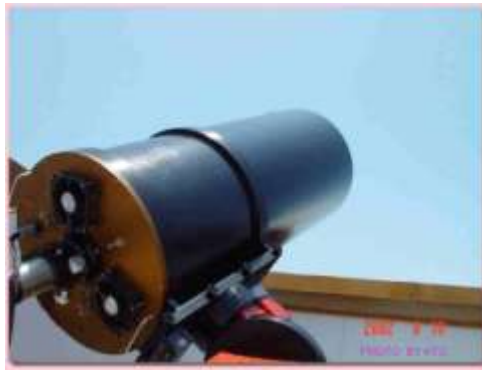
- 1.鹿林山天文台 SLT40cm 遠距遙控望遠鏡（如圖一）
- 2.Apogee Alta U42 CCD 相機
- 3.Paramount 1100ME 赤道儀
- 4.濾鏡系統 Johnson / Cousins (Bessell)



圖一、鹿林山天文台 SLT40cm 遠距遙控望遠鏡

(三) 台灣大學墾丁天文台

1. 墾丁天文台 RC40cm 遠距遙控望遠鏡 (如圖二)
2. ST10XME KAF3200E CCD 相機
3. Paramount ME Robotic 赤道儀
4. FLI UBVR 五色濾鏡組



圖二、墾丁天文台 RC40cm 遠距遙控望遠鏡

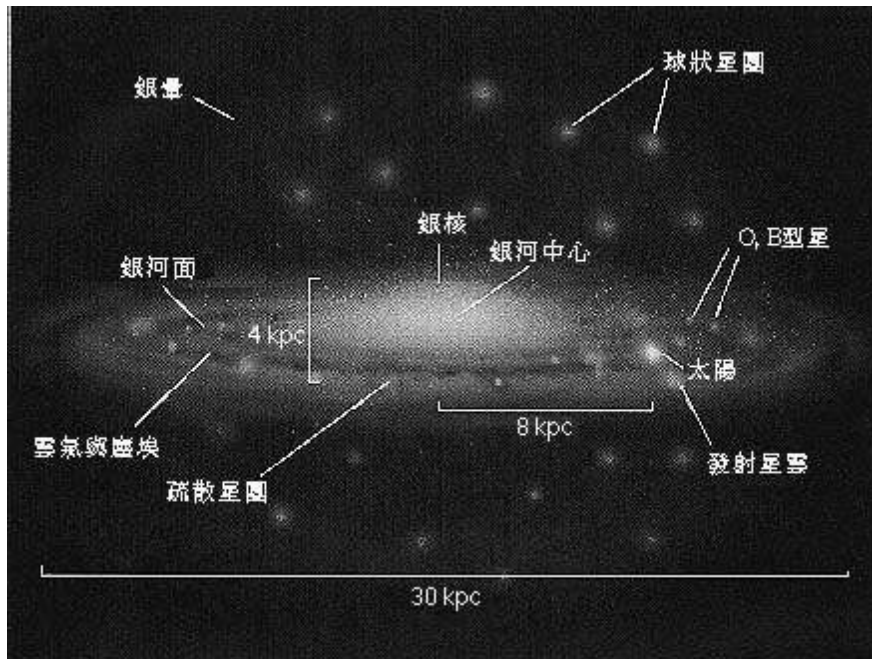
二、軟體：

- (一) CCDsoft5.0
- (二) TheSky Astronomy Software 6
- (三) Microsoft Word
- (四) Microsoft Excel
- (五) MaxImDL V4
- (六) Windows 內建遠端桌面遙控
- (七) Astrometrica
- (八) Aladin Java Applet
- (九) IDL (with Phot Vis)

肆、文獻探討

一、球狀星團

球狀星團是在軌道上繞著星系核心運行的恆星集團。球狀星團因為被重力緊緊束縛，使得外觀呈球形且恆星向中心高度集中。被發現的球狀星團多在星系的星暈（如銀暈）之中，如圖三。

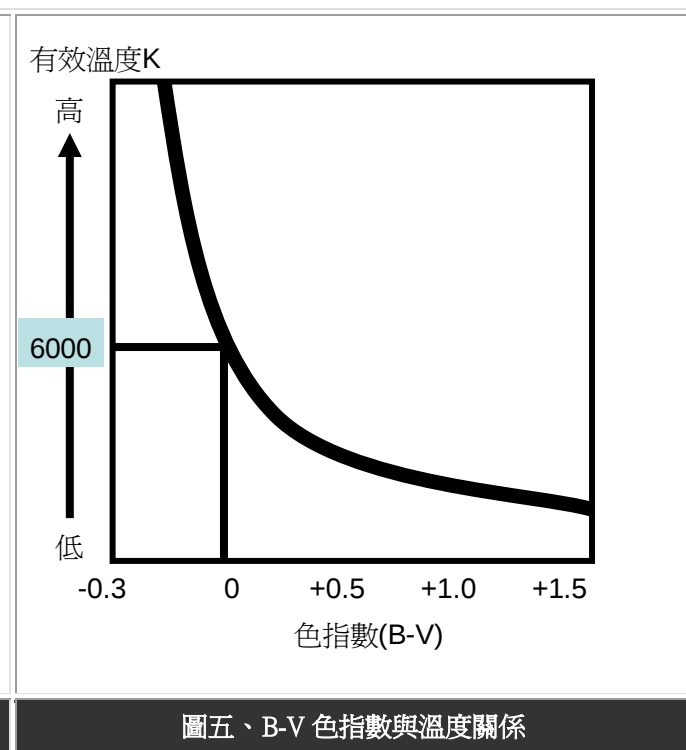
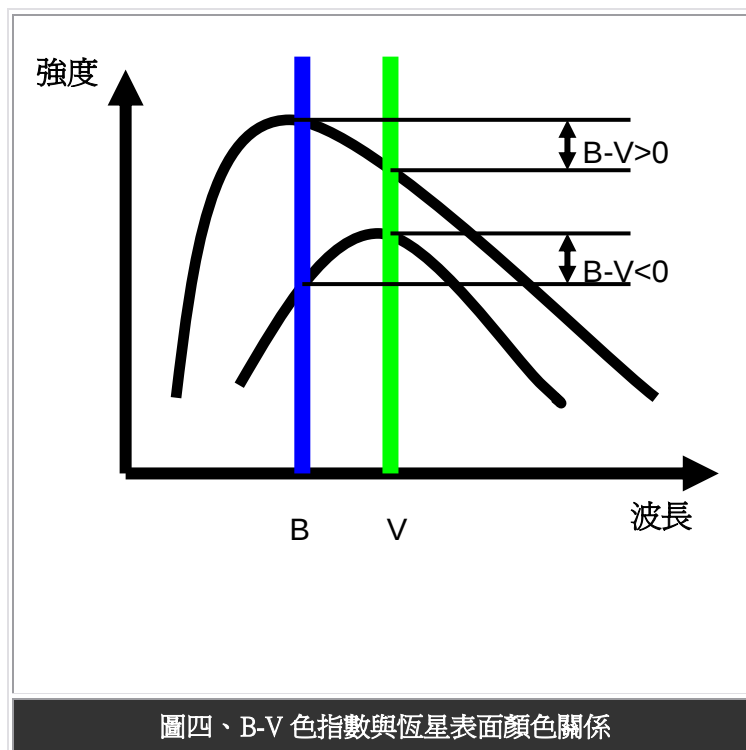


圖三、球狀星團多分布在銀暈之中

二、B-V 色指數

B、V 色是 UBV 測光系統裡兩個重要指數的其中之一。天文學家用不同的波段測量一顆星所發出光的多寡。溫度較高的星所發出的藍光比紅光多；反之亦然。利用濾鏡可以測量恆星所發出不同波段的光。先用 B 波段（300-520nm）、V（490-680nm）波段測量星等，再用 B 值減去 V 值，所得即為 B-V 色指數。

當恆星漸漸冷卻（即顏色偏紅），B-V 顏色指數會增加，因為比較小的星等代表較亮的光。高溫恆星的 B-V 指數較小，於是會出現在赫羅圖的左邊；反之則出現在右邊，如圖四、五。

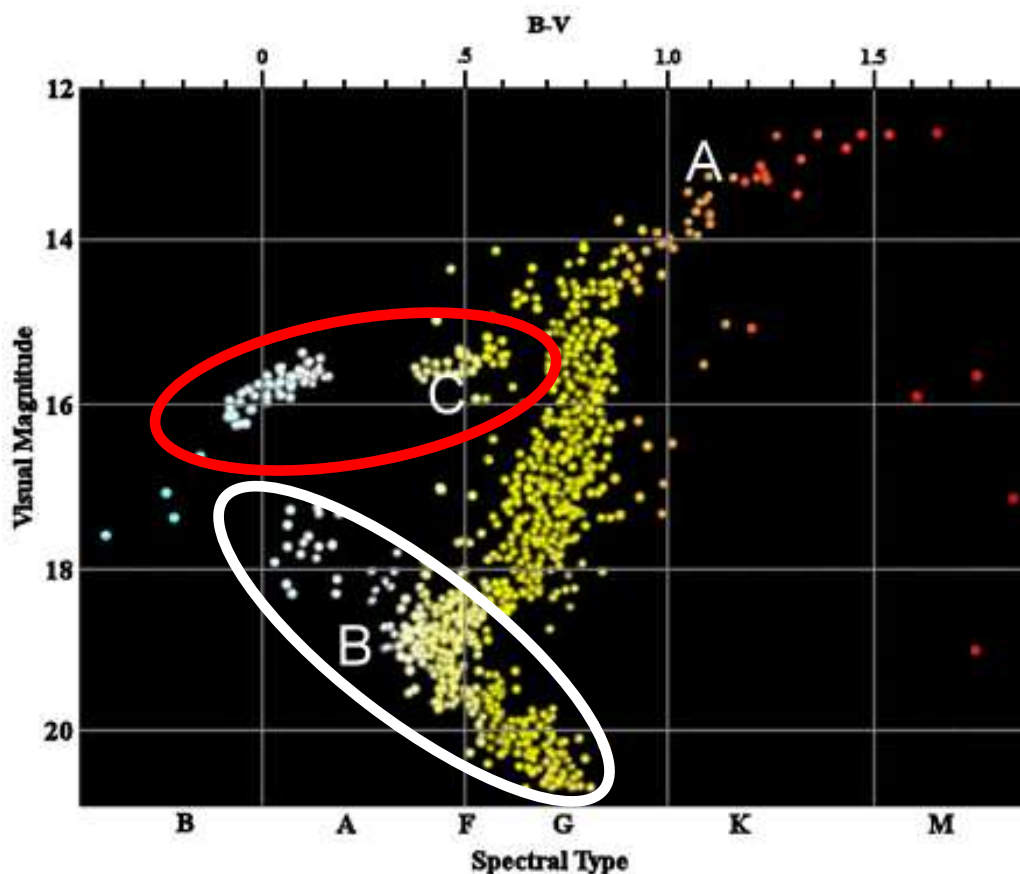


三、B-V 色指數圖（星等星色圖）

球狀星團中的每顆星與我們的距離大致相同，又顏色與光譜型有等價關係（如圖六）。B-V 色指數圖是以大量恆星的星等製作而成，橫軸為 B-V 值，縱軸為 V 值。B-V 值較大表示這顆恆星是表面溫度較低的紅色星，較小則是表面溫度較高的藍色星。

多數恆星的位置都在一條傾斜的曲線上，即熟知的主序帶（main sequence）（如圖六白圈處），但是也有一些演化至晚期的恆星會出現在圖中，它們的位置已經遠離了主序帶的曲線。

球狀星團的 B-V 色指數圖與鄰近太陽恆星的赫羅圖不同的是，星團中的恆星都有相同的起源和年齡，球狀星團的曲線形狀是同一個時間、相同的材料和成分，只有質量不同的恆星所形成的曲線。由於恆星在 B-V 色指數圖上的每一個位置都對應於不同質量恆星的演化程度，以曲線轉折點的位置（如圖六一B 點）就能比較各星團的年齡。



圖六、A：氦閃點；B：轉折點；C：紅群聚；紅圈：水平分支；白圈：主序帶

四、球狀星團的金屬含量

球狀星團通常擁有的是金屬含量較少的第二星族星（星族 II），而金屬含量較多的第一星族星（星族 I）則比較少（例如太陽）。（在天文學中所稱的金屬是指比氦重的元素，像鋰和碳等。）所謂的星族是根據美國天文學家 Baade，將銀河系裡的恆星依據其化學成分、相對於太陽的成分以及分布區域不同劃分成兩族。而星族 I 恆星大多分布在銀盤，星族 II 則分布在銀暈。貧金屬星體的年齡較富金屬星體老。

五、氦閃點（helium fusion）（如圖六一 A 點）

紅巨星時，殼光度的增加超過穩定輸出的輻射擴散，因此紅巨星的整個包層將變成一個對流區，同時核繼續收縮，在低質量恆星裡，自由電子緊緊地擠在一起，擠壓得使他們成為簡併電子氣體。……核實質上是一個低質量（大約 0.4 個太陽質量）的氦白矮星。這顆「白矮星」的巨大邊界重力促使殼上的氫猛烈地燃燒，很快的把這顆恆星送上了紅巨星分支。在紅巨星的頂端，核的溫度上升到大約 10^8K 。這個溫度足夠點燃氦……在低質量恆星核裡，氦點燃是發生在簡併條件下的。（物理學宇宙，初版，第 247 頁）

六、水平分支（HB, horizontal branch）（如圖六一紅圈處）

在質量接近太陽的恆星之演化過程中，緊接紅巨星階段氦閃後的即是水平分支。水平分支恆星的能量來自核的氦融合以及核外殼層的氫融合。水平分支的名稱來自其於 B-V 色指數圖的分布圖形，即一水平線帶。許多水平分支恆星會出現脈動的情形，這些

就是所謂的天琴座 RR 變星（RR Lyrae）。

分布於水平分支右側區域裡的恆星，我們稱之為紅群聚（red clump）（如圖六一C 點），此類恆星在星團中是屬於較年輕且金屬含量較多的一群，屬於星族 II 的恆星。

七、研究觀測目標資料

表一、研究觀測目標資料

星團名稱	赤經 (R.A.)	赤緯 (Dec.)	距離 (kly)	估測年齡 (log(yrs))	其他名稱
Arp2	19 ^h 28 ^m 44 ^s	-30° 21' 14"	93.3	9.76	
NGC104	00 ^h 24 ^m 05 ^s	-72° 04' 51"	13.4	9.48	47 Tuc
NGC1818	05 ^h 04 ^m 14.	-66° 26' 31"	164		
NGC1851	05 ^h 14 ^m 06 ^s	-40° 02' 50"	54.5	8.85	
NGC1904	05 ^h 24 ^m 10 ^s	24° 31' 27"	42.1	9.1	M79
NGC2419	07 ^h 38 ^m 08 ^s	-38° 54' 52"	274.6	10.55	
NGC3201	10 ^h 17 ^m 36 ^s	-46° 24' 40"	16.3	9.2	
NGC4147	12 ^h 10 ^m 06 ^s	+18° 32' 31"	62.9	8.67	
NGC4590	12 ^h 39 ^m 28 ^s	-26° 44' 34.9"	33.3	9.29	M68
NGC5053	13 ^h 16 ^m 27 ^s	+17° 41' 53"	53.5	10.02	
NGC5139	13 ^h 26 ^m 45 ^s	-47° 28' 36.7"	18.3	10	ω
NGC5272	13 ^h 42 ^m 11 ^s	28° 22' 31.6"	33.9	9.35	M3
NGC5694	14 ^h 39 ^m 36 ^s	-26° 32' 18"	113.2	9.15	
NGC5904	15 ^h 18 ^m 33 ^s	+02° 04' 57.7"	24.5	9.53	M5
NGC5927	15 ^h 28 ^m 00 ^s	-50° 40' 22"	24.8	8.98	
NGC6093	16 ^h 17 ^m 02 ^s	-22° 58' 30"	32.6	8.86	M80
NGC6121	16 ^h 23 ^m 35 ^s	-26° 31' 31.9"	7.2	8.82	M4
NGC6171	16 ^h 32 ^m 31 ^s	-13° 03' 13"	20.9	9.31	M107
NGC6205	16 ^h 41 ^m 41 ^s	+36° 27' 36.9"	25.1	9.3	M13
NGC6341	17 ^h 17 ^m 07 ^s	+43° 08' 11"	26.7	9.06	M92
NGC6397	17 ^h 40 ^m 41 ^s	-53° 40' 25"	7.2	8.46	
NGC6535	18 ^h 03 ^m 50 ^s	-00° 17' 49"	22.2	8.15	
NGC6584	18 ^h 18 ^m 37 ^s	-52° 12' 54"	43.7	9.09	
NGC6656	18 ^h 36 ^m 24	-23° 54' 12"	10.4	9.22	M22
NGC6809	19 ^h 39 ^m 59 ^s	-30°57' 44"	17.3	9.3	M55
NGC7089	21 ^h 33 ^m 52 ^s	-00° 47' 20"	37.5	9.32	M2
NGC7099	21 ^h 40 ^m 22 ^s	-23°10' 45"	26.1	8.95	M30

資料來源：SEDS (Students for the Exploration and Development of Space)

伍、研究過程及方法

爲得到本次研究結果，首先我們從網站上取得目標星體的成員星資料，並繪製成赫羅圖，並觀察比對不同年齡恆星演化至水平分支的狀況。然後把我們利用天文台拍攝的星體進行測光，以同樣方式繪製成赫羅圖，比對其差異性並做出探討。

研究一、自行拍攝取得星點資料：

(一) 取得影像：

由網路連結至鹿林山或墾丁天文台，以 The Sky 6 及 MaxIm DL 連接望遠鏡，進行遠距遙控觀測。

(二) 影像處理：

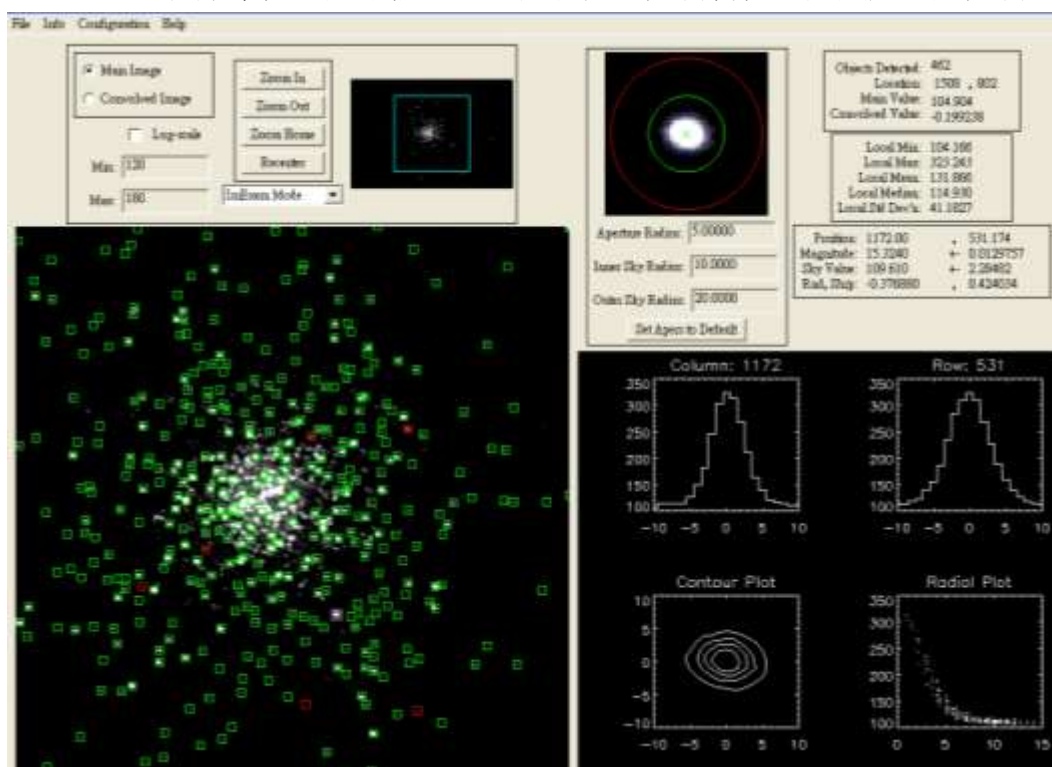
將觀測影像匯入 MaxIm DL 中進行暗電流 (Dark) 及平場 (Flat) 之處理，再將波段相同之影像合併以加強訊號。

(三) 尋找星點並取得其亮度資料：

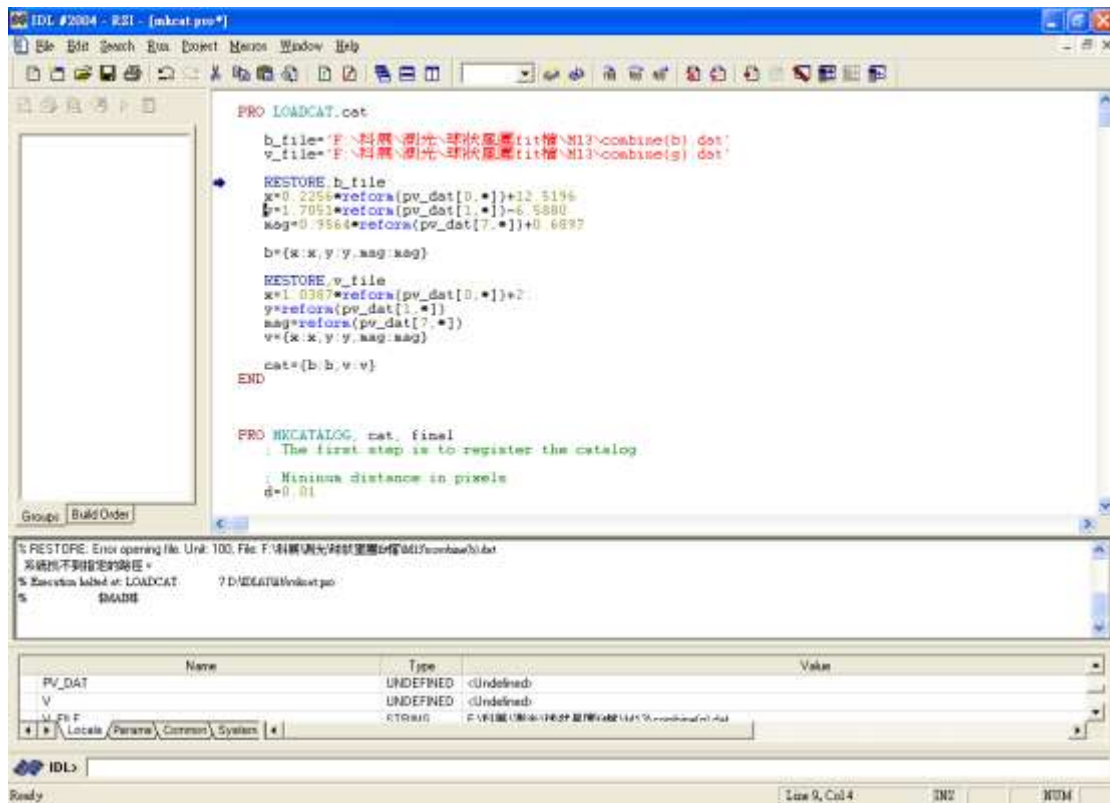
將處理過的影像匯入 IDL 之 Phot Vis 程序進行偵測後便可得到星體在影像中之位置及其儀器星等。

(四) 修正星點亮度及位置資料：

由 Phot Vis 所得到之位置與儀器星等必需經由網路上星表的修正才有實質用處。此時將手動比對拍攝影像中及 Aladin Java Applet 所提供之星點資料匯入 Excel 中，算出影像中(x,y)位置與天球座標(R.A., Dec.)之關係式、Phot Vis 所得之儀器星等與星表中實際之星等的關係式。將關係式寫入 IDL 的程序中修正其數值，並將兩波段之資料合併，匯出成測光資料。



圖七、將處理過的影像匯入 IDL 之 Phot Vis 程序進行偵測

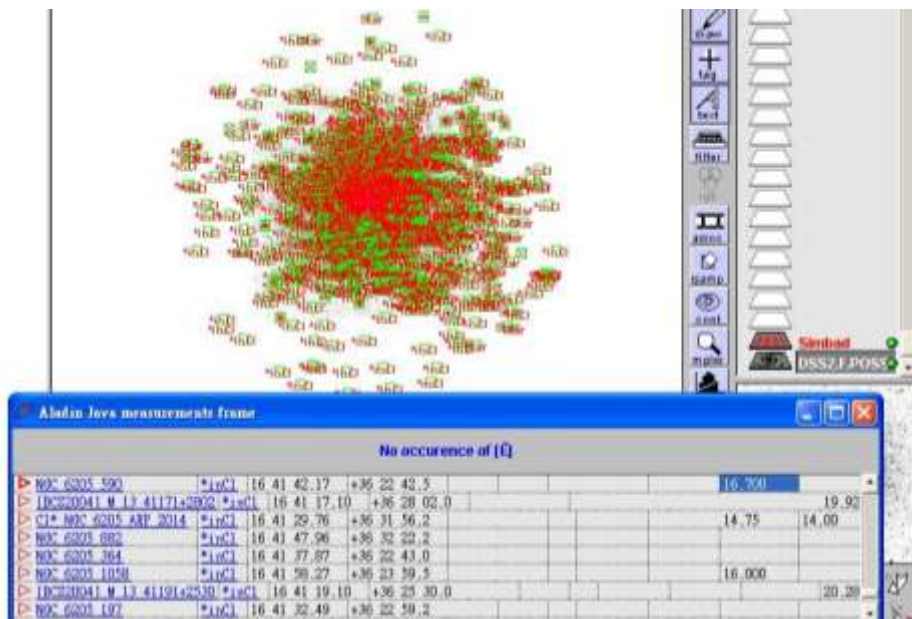


圖八、將關係式寫入 IDL 的程序中修正其數值

研究二、製作星團赫羅圖：

(一) 取得資料：

1. 由 SIMBAD Astronomical Database 網站進入，鍵入星團名稱後，取得 DSS 影像，使用 Aladin Java Applet 圈選球狀星團範圍後可直接得到 B 濾鏡、V 濾鏡的星等值，匯入至 Excel 後處理。(B 波段為 300-520nm; V 波段為 490-680nm。)



圖九、由 SIMBAD 取得 DSS 資料

2. 由 NASA Astrophysics Data System (ADS) 上的 Online Data 直接取得星團成員星的資料。
3. 自行測光資料。

(二) 整理資料並做出 B-V 色指數圖：

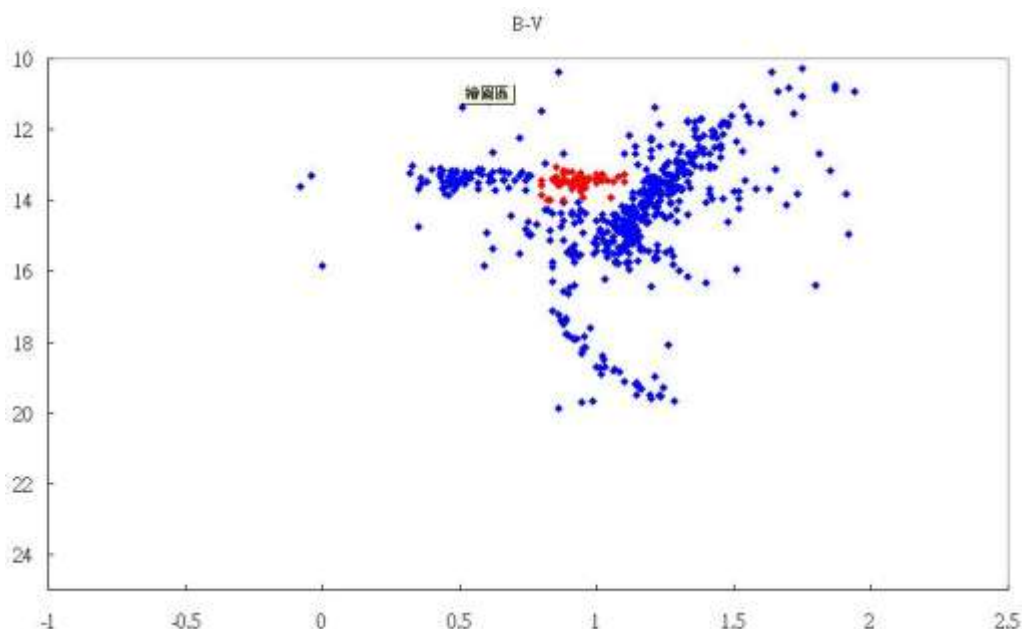
匯入 Excel 後，資料會有一些不完整與不連續性，所以將不完整的資料（只有 B 或 V 值或兩者皆沒有）的星體刪除，並建立 XY 散布圖。



圖十、匯入 Excel

(三) 判斷並標出紅群聚星體：

製作出 B-V 色指數圖之後，可以利用 B-V 圖定出紅群聚位於圖中之位置（即兩軸之數值範圍），再找出紅群聚之星體，並得到數量。



圖十一、從 Excel 中標出紅群聚之星體

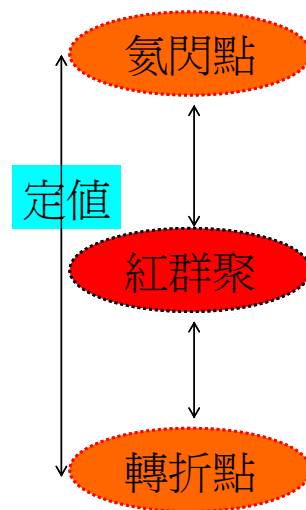
研究三、繪出年齡與紅群聚數量百分比線性圖：

算出各個星團的紅群聚在水平分支中的數量百分比，將其與星團的年齡做成散布圖，並觀察其關連性。

研究四、繪出年齡與亮度差（紅群聚、氦閃點）趨勢線：

Bragaglia and Tosi (2006) 的論文中指出，疏散星團裡的紅群聚、轉折點光度差與星團年齡成正向關係。我們試著將這種關係套用在球狀星團上，雖然我們所做的某些圖中無法觀察到轉折點，但我們發現論文中每個球狀星團赫羅圖的氦閃點與轉折點的亮度差十分接近，所以我們改採用氦閃點當作基準，與紅群聚的亮度比進行比較，再藉由星團的年齡資料，希望觀察出紅群聚、氦閃點的亮度差與年齡的關係。

又因為我們可以從文獻中了解到，紅群聚為水平分支的一部分，所以在沒有出現紅群聚的球狀星團中，我們改採水平分支的亮度。

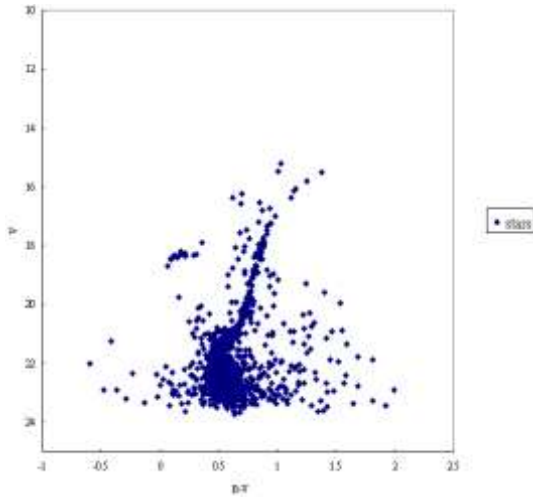


圖十二、轉折點、紅群聚、氦閃點的亮度關係

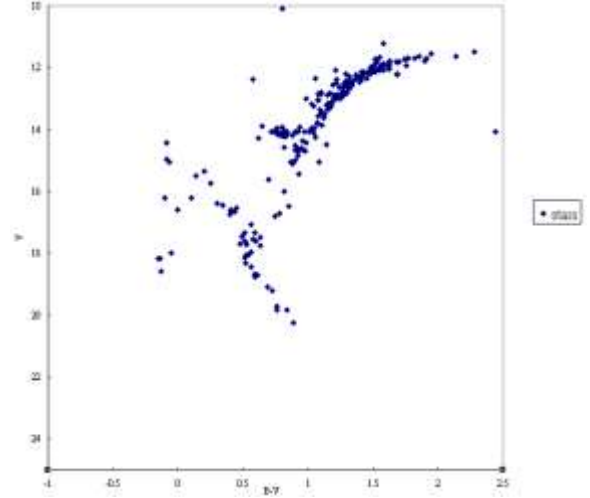
陸、研究結果

一、標出紅群聚星體（僅標出有紅群聚的星團）：

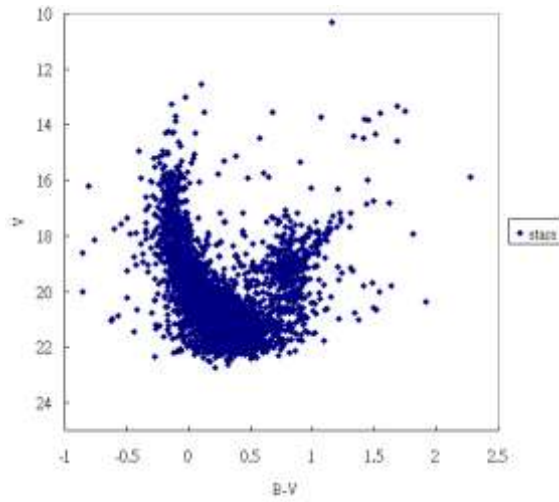
(一) A r p 2



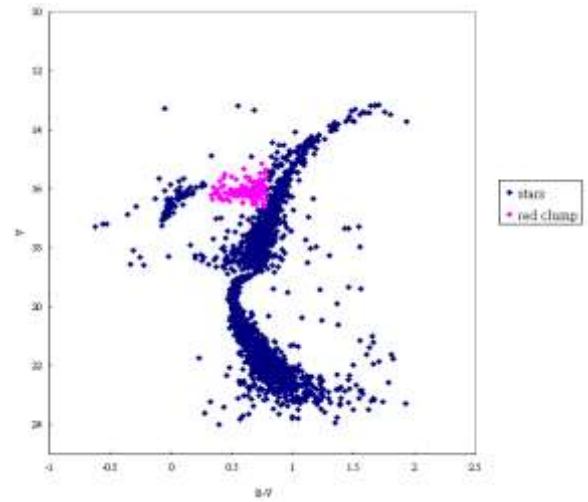
(二) NGC 104



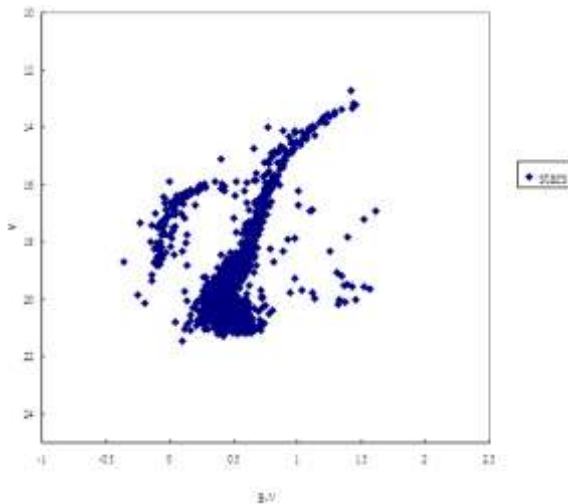
(三) NGC 1818



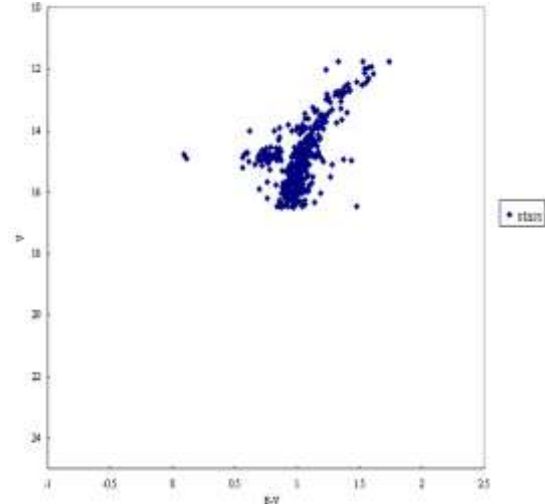
(四) NGC 1851



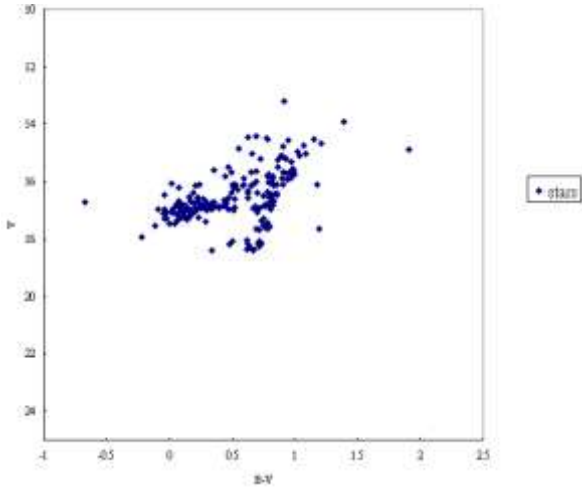
(五) NGC 1904



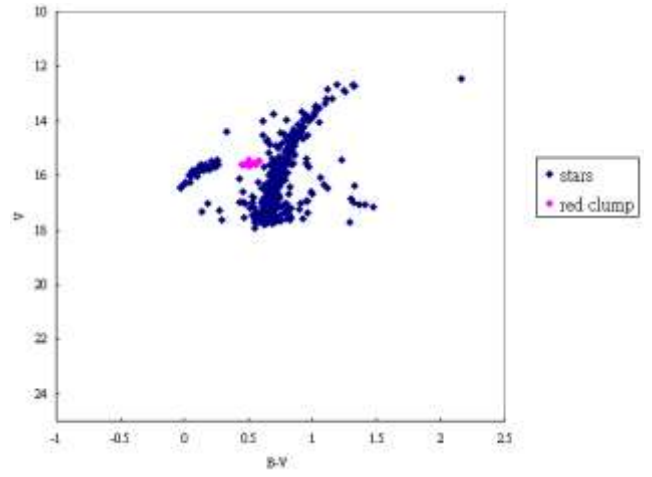
(六) NGC 3201



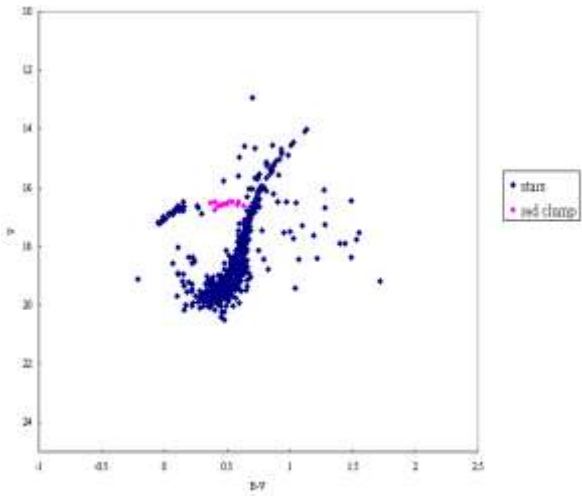
(七) NGC 4147



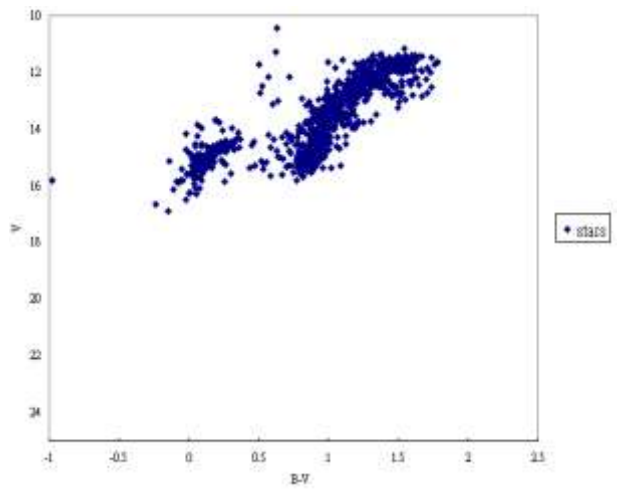
(八) NGC 4590



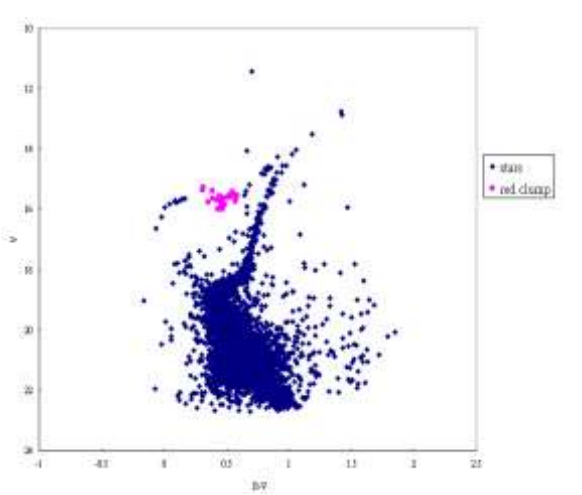
(九) NGC 5053



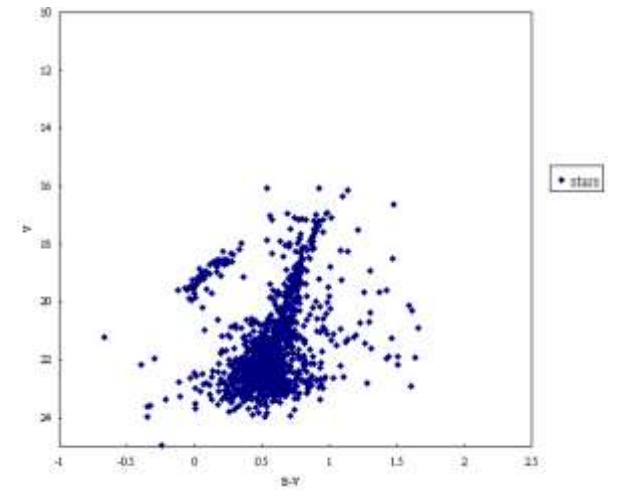
(十) NGC 5139



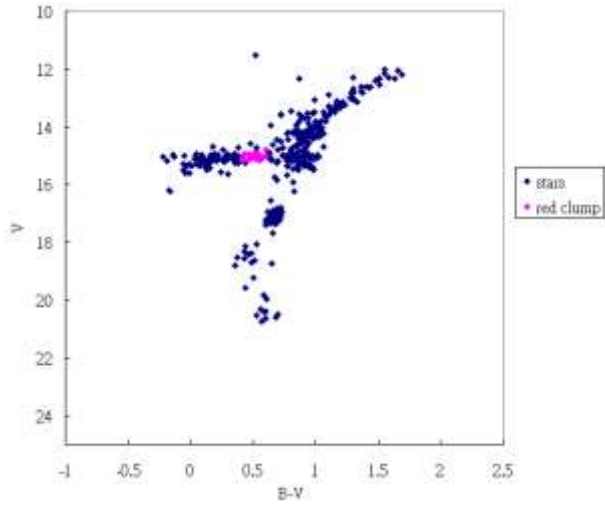
(十一) NGC 5272



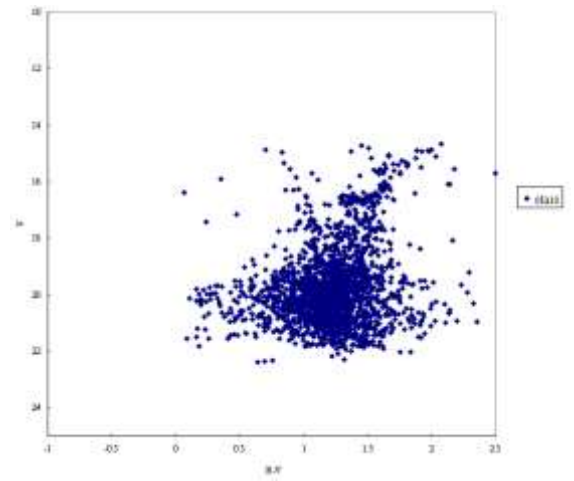
(十二) NGC 5694



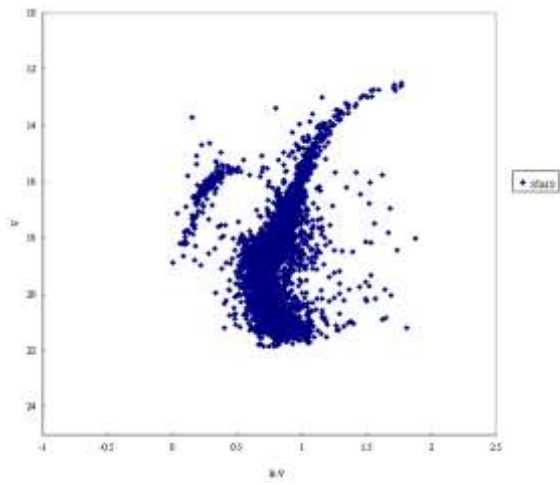
(十三) NGC 5904



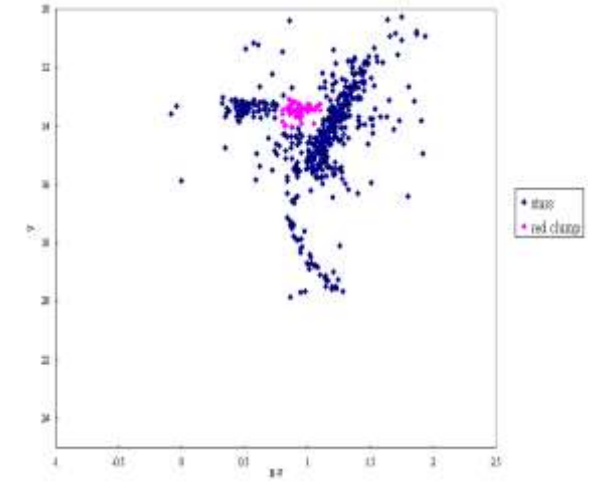
(十四) NGC 5927



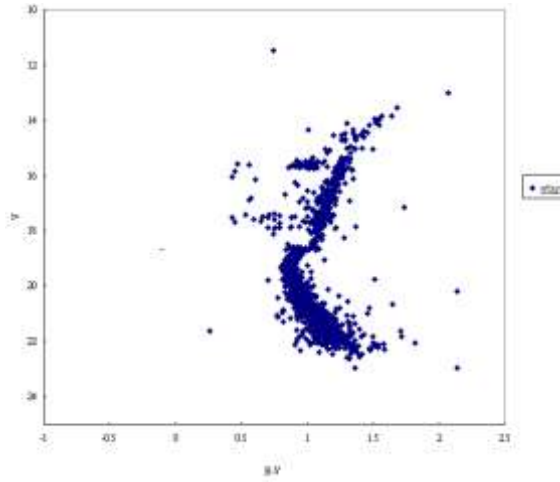
(十五) NGC 6093



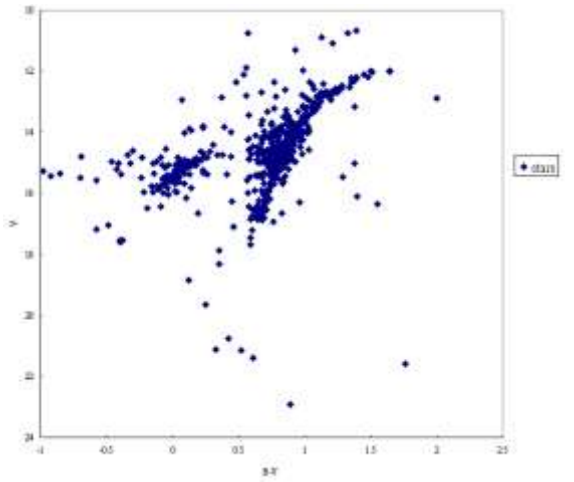
(十六) NGC 6121



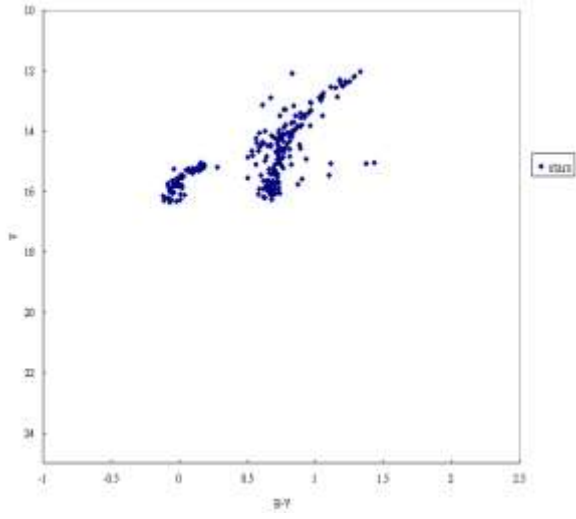
(十七) NGC 6171



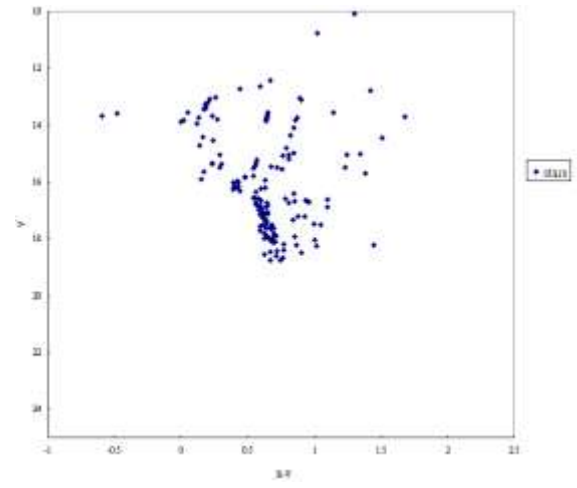
(十八) NGC 6205



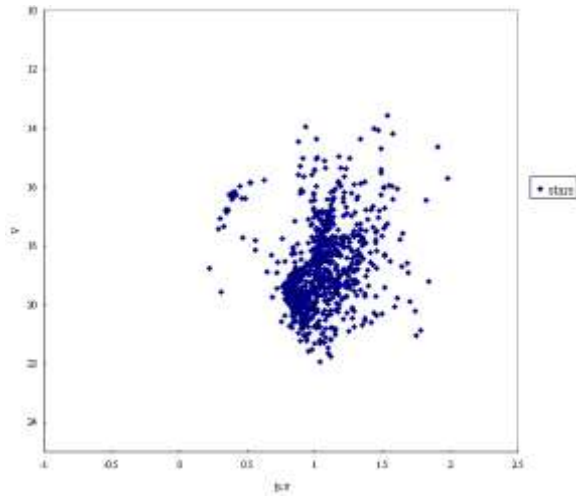
(十九) NGC 6341



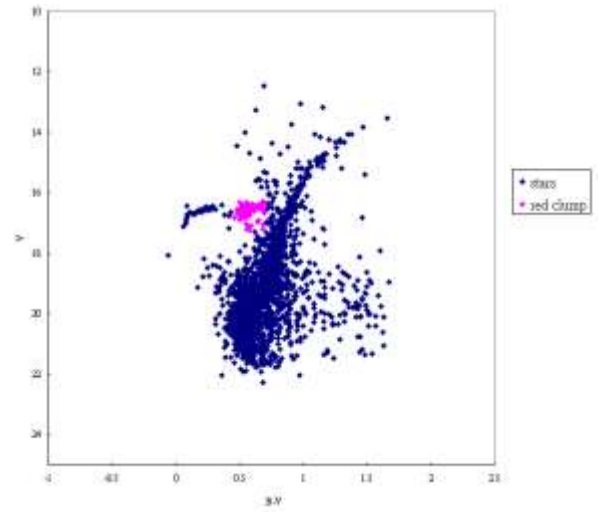
(二十) NGC 6397



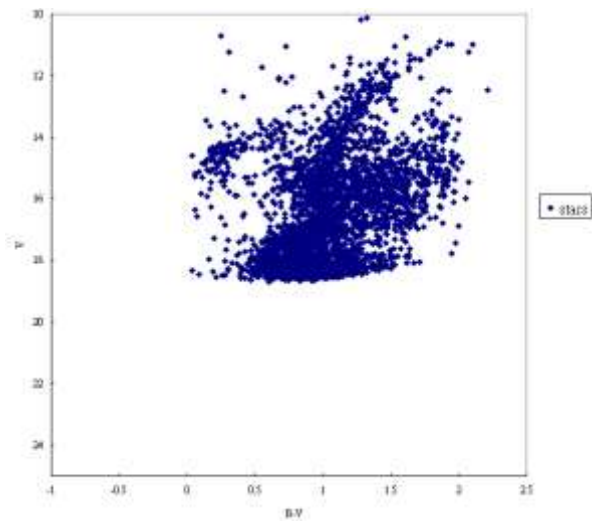
(二十一) NGC 6535



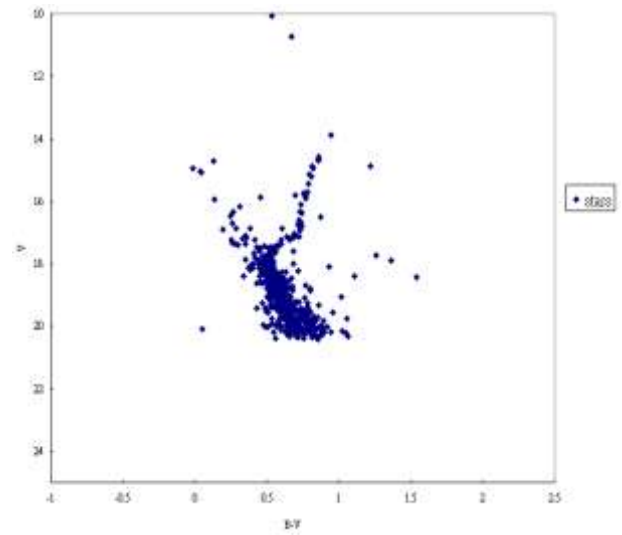
(二十二) NGC 6584



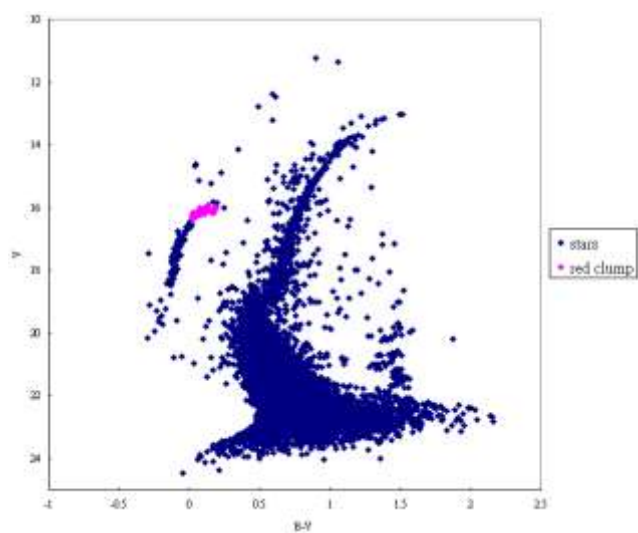
(二十三) NGC 6656



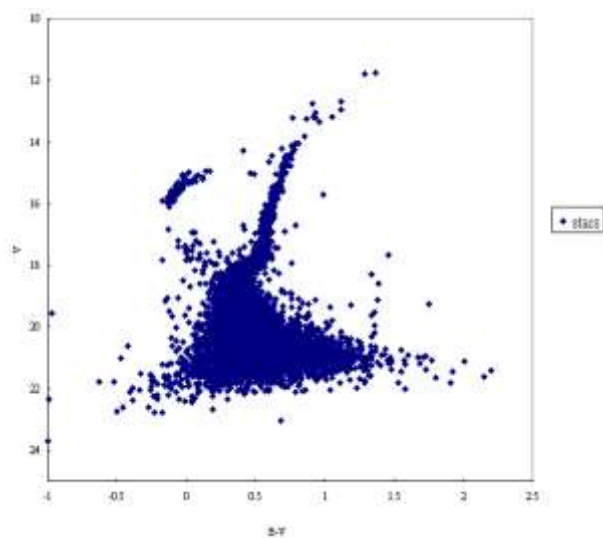
(二十四) NGC 6809



(二十五) NGC 7089



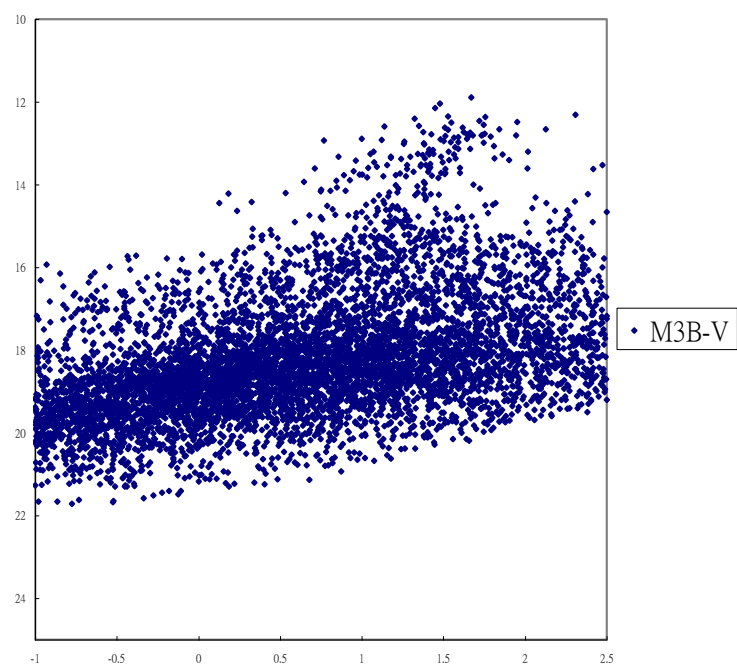
(二十六) NGC 7099



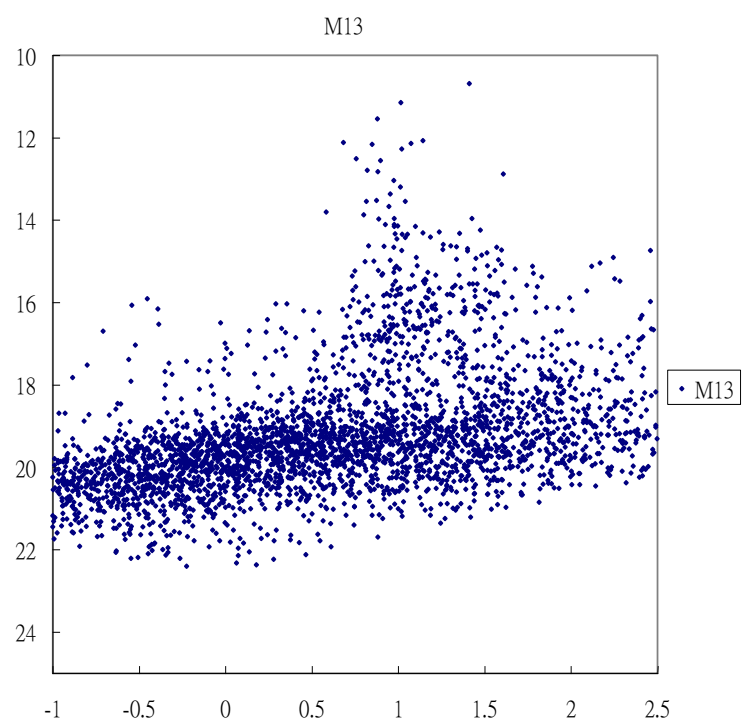
二、墾丁與鹿林山天文台的測光資料：

(一) 墾丁天文台M3：

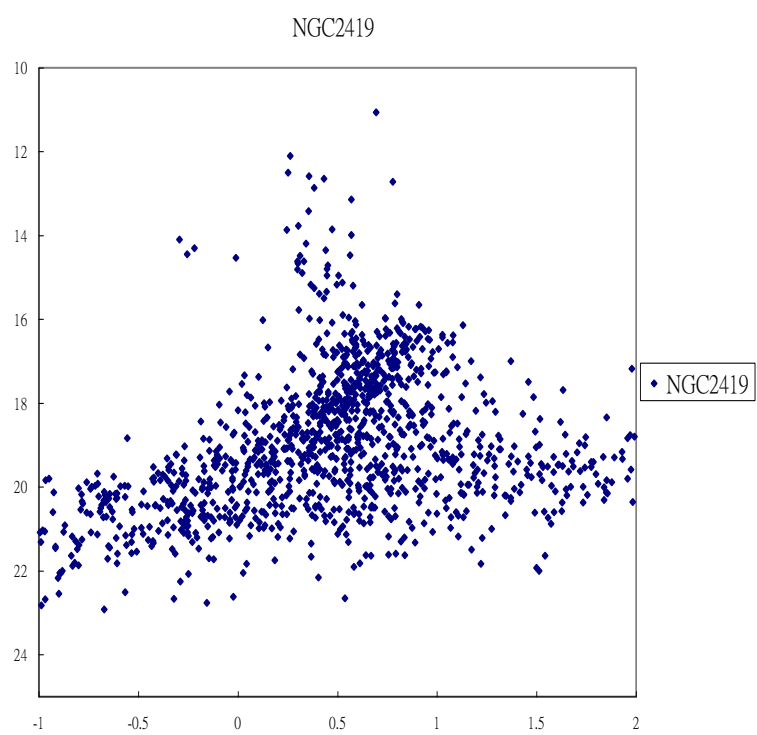
M3B-V



(二) 墾丁天文台M13：

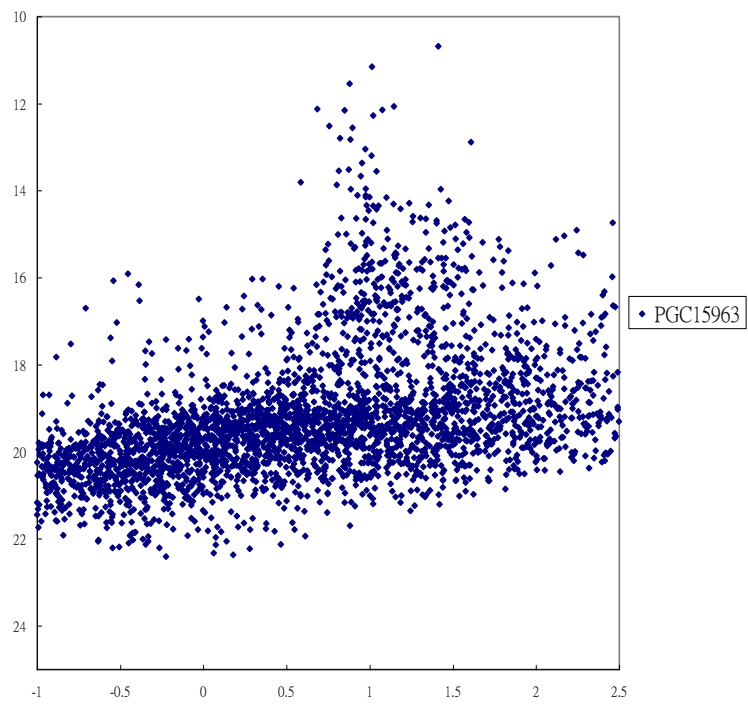


(三) 鹿林天文台NGC 2419：

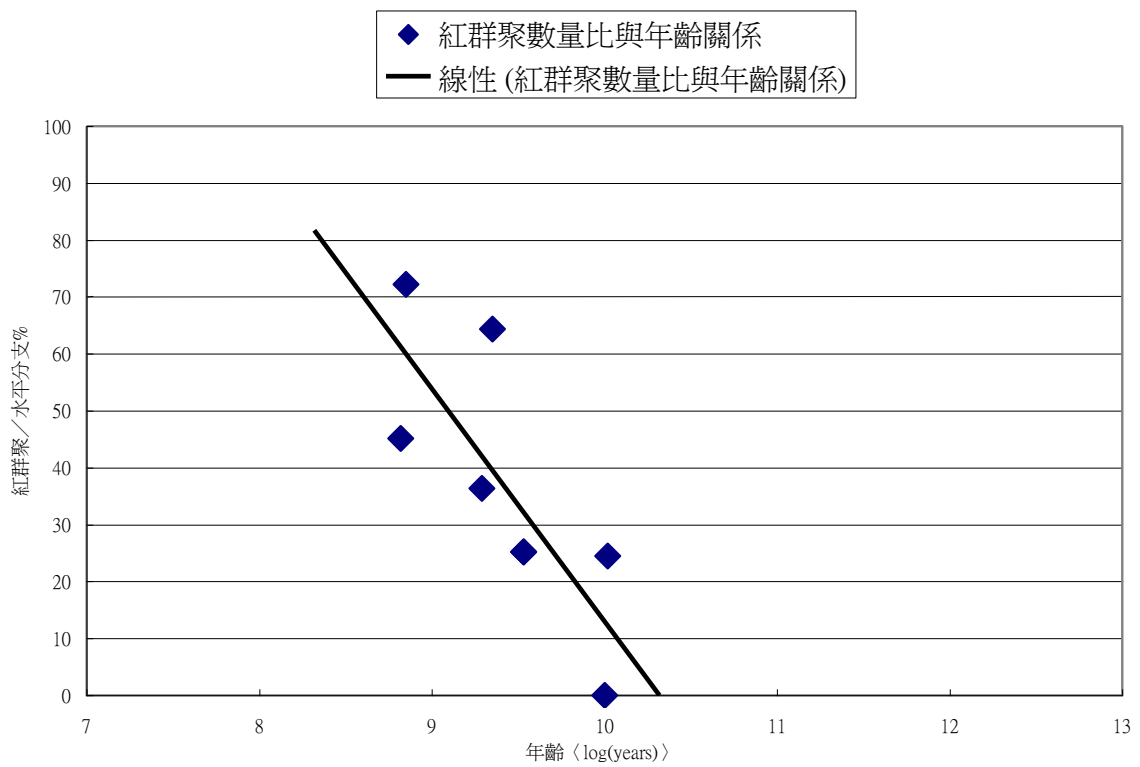


(四) 鹿林天文台 P G C 1 5 9 6 3 :

PGC15963

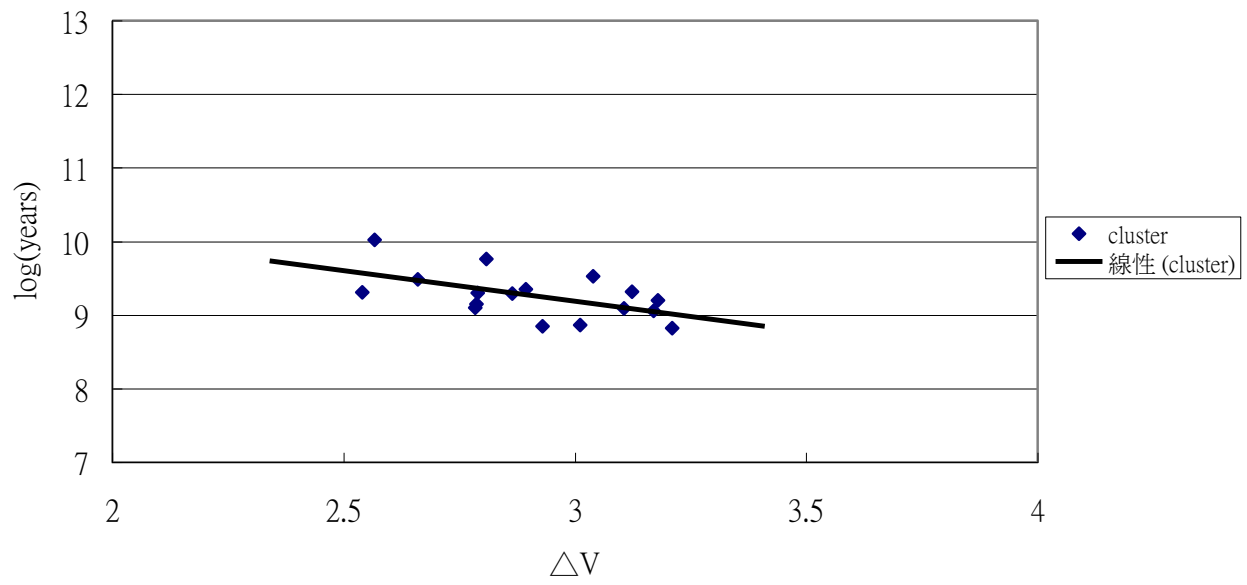


三、年齡與數量百分比圖：



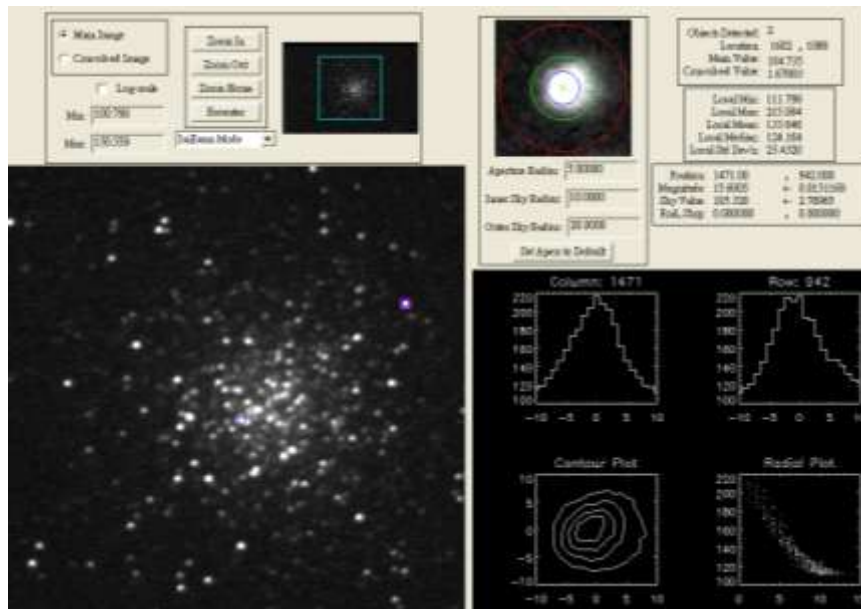
四、亮度差（氦閃亮度與紅群聚亮度差）與年齡關係：

亮度差與年齡關係



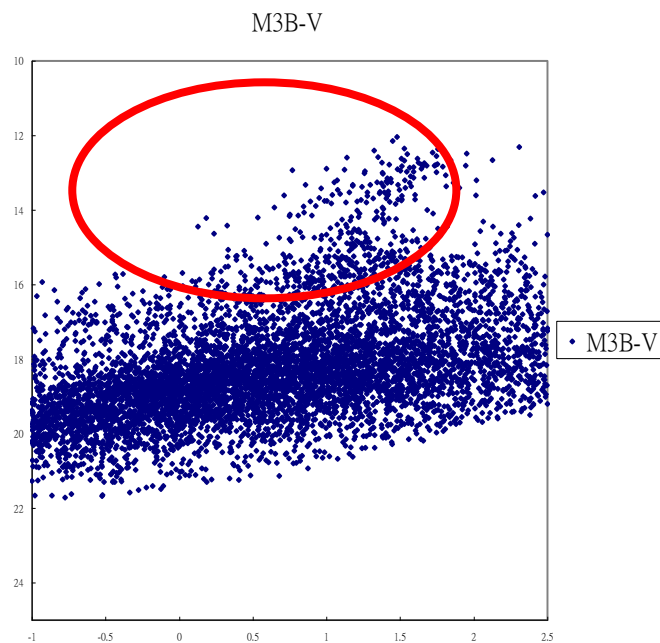
柒、討論

- 一、在製作 B-V 圖時，我們發現光是用 SIMBAD 的資料是不足的，會造成某些星團星點數不足，導致無法製作出完整的 B-V 色指數圖。爲了解決此問題，我們在 ADS 與 SEDS 尋求更多相關的資料，以進行研究。
- 二、在研究初期，我們無法定義紅群聚的位置。在觀察與比對自己與論文中的資料後，我們決定以「位於水平分支縫隙的右半邊」和「其他論文中的位置」來定義紅群聚。
- 三、在研究紅群聚數量與星團年齡的關係時，一開始使用的是紅群聚的絕對數量。但我們發現，因爲每個星團的總資料數不同，若以絕對數量進行比較會產生較大的誤差，因此我們改成取每個星團中紅群聚在水平分支中的百分比。
- 四、根據參考資料以及我們圖表中紅群聚的分布，球狀星團中，紅群聚的重金屬含量相較其他成員星多，屬於星族 I；然而球狀星團裡的恆星屬於星族 II 且重金屬含量較少，造成此種矛盾現象：可能是球狀星團形成時，少數重金屬元素受內部引力而聚集於星團核心，造成核心附近的星體演化形成金屬含量較高的紅群聚。
- 五、在研究四，我們發現有些 B-V 色指數圖無法觀察到轉折點，導致無法算出紅群聚和水平分支的亮度差。但在網路上的 B-V 色指數圖中，我們發覺轉折點與氦閃點的亮度差爲定值（如圖十二），因此，我們便可以用這種關係來解決無法觀察到轉折點的狀況。
- 六、根據年齡數量百分比圖所呈現出的趨勢，我們做出推測：因爲年老球狀星團形成之初，雲氣中較不含重金屬元素，於是不會形成金屬含量較高的紅群聚；但較年輕的球狀星團爲之後形成，它的雲氣汲取先前第一代恆星爆發後殘留下來的重金屬，因此其金屬含量較高，較容易形成紅群聚。
- 七、比對測光資料與網路資料的 B-V 色指數圖：
 - （一）測光資料的 B-V 圖並沒有出現明顯水平分支與紅群聚星體，可能原因是此類星體亮度較高，而較亮的恆星其星點體積較大，造成 IDL Phot Vis 孔徑測光的範圍小於星點實際大小，因而低估了星體的亮度。



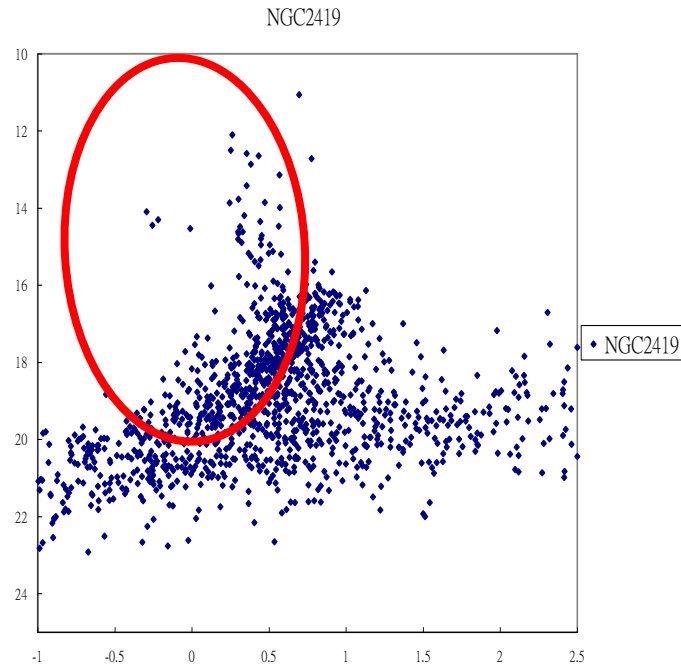
圖十三、IDL Phot Vis 孔徑測光的範圍小於星點實際大小

- (二) 測光資料的 B-V 圖下方有大量星體成帶狀分布，此團星體極有可能為未處理乾淨的雜訊，如 Dark、Bias、Flat 等，且其測光數值均小，因而成帶狀分布於 B-V 圖下方，亦有可能為非星團之背景星。
- (三) M3 可隱約看出有星體呈現似氮閃到水平分支的分布。



圖十四、疑似氮閃到水平分支的分布

- (四) PGC15963、NGC2419、M13 中皆可見到有恆星以近似脫離主序帶之演化路線分布。



圖十五、恆星脫離主序帶之演化路線

（五）若要取得更明顯水平分支與紅群聚星體分布的測光 **B-V** 圖，則需要盡可能減少背景星與雜訊，並尋求解決孔徑測光誤差的方法。

捌、結論

- 一、紅群聚在水平分支中所佔的百分比與年齡成反向關係，換言之，紅群聚越多則代表星團年齡越年輕。
- 二、紅群聚與轉折點的亮度差與年齡成反向關係，亮度差越大，年齡越年輕；與疏散星團相反。

玖、未來展望

這次研究中，我們遇到最主要的問題就是測光技術層面的誤差，在未來的時間中，我們可以學習如何改進測光技術，做比較有主動性的研究，以做出更準確的結論。

另外，我們觀察到球狀星團與疏散星團中，紅群聚與轉折點的亮度差與年齡趨勢圖恰巧相反，此主題也可以深入研究，探究這種現象背後的原因。

拾、參考資料及其他

壹、中文部份

許瑞榮、蘇漢宗（民 91）。高級中學地球科學課本下冊。台中市：康熙。

Frank Shu（民 90）。物理學宇宙上。天文學導論。國立編譯館。

林宏欽（民 96）。RC160ObsGuideR2 鹿林天文台 Slt 望遠鏡使用手冊 R2。未出版。

周體健（民 84）。簡明天文學。凡異文化事業有限公司。

台北市立天文科學教育館（民 96）。天文年鑑 2007。台北市：作者。

陳錦威（民 91）。利用 2 微米巡天觀測(2MASS)資料庫分析疏散星團之空間結構。國立中央大學天文研究所，未出版，桃園縣。

李鳳滋（民 94）。以 2MASS 近紅外資料研究太陽附近的疏散星團。國立中央大學天文研究所，未出版，桃園縣。

貳、英文部份

Sandage, A. (1970). Main sequence photometry, color magnitude diagrams, and ages for the globular clusters M3, M13, M15, and M92. *The Astrophysical Journal*, 162, 841-870.

Arp, H. C. (1955). Color-magnitude diagrams for seven globular clusters. *The Astronomical Journal*, 60, 317-337. Retrieved February 18, 2008, from http://articles.adsabs.harvard.edu/cgi-bin/nph-iarticle_query?1955AJ.....60..317A&data_type=PDF_HIGH&whole_paper=YES&type=PRINTER&filetype=.pdf

Seidel, E.; Demarque, P.; and Weinberg, D. (1986). The evolution of red clump stars: theoretical sequences. *The Astrophysical Journal*, 63, 917-945. Retrieved February 20, 2008, from http://articles.adsabs.harvard.edu/cgi-bin/nph-iarticle_query?1987ApJS...63..917S&data_type=PDF_HIGH&whole_paper=YES&type=PRINTER&filetype=.pdf

Will, J.; Bomans, D.; de Boer, K. (1995). The initial mass function of the young cluster NGC 1818 in the Large Magellanic Cloud. *Astronomy and Astrophysics*, 295, 54-62. Retrieved March 24, 2008 from <http://articles.adsabs.harvard.edu/full/1995A%26A...295...54W/0000054.000.html?high=47e735e16512978>

- Casagrande, L.; Portinari, L.; and Flynn, C. (2006). Accurate fundamental parameters for lower main-sequence stars [Abstract]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 373 (1): 13-44.
- Johnson, R. A.; Beaulieu, S. F.; Gilmore, G. F.; Hurley, J.; Santiago, B. X.; Tanvir, N. R.; and Elson, R. A. W. (2001). Young star clusters in the Large Magellanic Cloud: NGC 1805 and 1818. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 324, 367-380. Retrieved March 21, 2008, from http://articles.adsabs.harvard.edu/cgi-bin/nph-iarticle_query?2001MNRAS.324..367J&data_type=PDF_HIGH&whole_paper=YES&type=PRINTER&filetype=.pdf
- Porter, R. (2003). *The Cambridge History of Science*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Sekiguchi, M.; Fukugita, M. (2000). A Study of the B-V Color-Temperature Relation. *The Astronomical Journal* 120, 1072-1084.
- Smith, R. (1995). *Observational Astrophysics*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Bragaglia, A.; Tosi, M. (2006). The Bologna Open Cluster Chemical Evolution Project: Midterm Results From the Photometric Sample. *The Astronomical Journal*, 131, 1544-1558. Retrieved April 29, 2008 from <http://www.iop.org/EJ/article/1538-3881/131/3/1544/204999.web.pdf?request-id=52b728c6-11fc-4989-a7d8-bb7bc7ca38cf>
- Buonanno, R.; Corsi, C. E.; Pecci, F. Fusi; Richer, H. B.; Fahlman, G. G. (1995). Young globular clusters in the Milky Way: ARP 2. *The Astronomical Journal*, 109, 650-662.
- Lee, Jae-Woo; Carney, Bruce W. (1999). BV Photometry of RR Lyrae Variables in the Globular Cluster M2 (NGC 7089). *The Astronomical Journal*, 117, 2868-2881.
- Samus, N.; Kravtsov, V.; Pavlov, M.; Alcaïno, G.; Liller, W. (1995). A new photographic color-magnitude study of M 22 = NGC 6656. *Astronomy and Astrophysics Supplement*, 109, 487-499.
- Hodder, Philip J. C.; Nemec, James M.; Richer, Harvey B.; Fahlman, Gregory G. (1992). Deep CCD photometry and variable stars in the metal-rich globular cluster M71. *The Astronomical Journal*, 103, 460-479.
- Alcaïno, G.; Liller, W.; Alvarado, F.; Kravtsov, V.; Ipatov, A.; Samus, N.; Smirnov, O. (1998).

Multicolor CCD Photometry of the Poorly Studied Globular Cluster M80. *The Astronomical Journal*, 116, 2415-2422.

Ferraro, F. R.; Clementini, G.; Fusi Pecci, F.; Buonanno, R. (1991). CCD-photometry of galactic globular clusters. III - NGC 6171. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 252, 357-377.

Kravtsov, V.; Ipatov, A.; Samus, N.; Smirnov, O.; Alcaïno, G.; Liller, W.; Alvarado, F. (1997). NTT CCD photometry of the globular cluster M 79 = NGC 1904 in UBV. *Astronomy and Astrophysics Supplement*, 125, 1-9.

Ortolani, S.; Gratton, R. (1990). Deep photometry of globular clusters. XII - The metal-poor clusters NGC 5694 and Terzan 8. *Astronomy and Astrophysics Supplement*, 82, 71-112.

Richtler, T. (1995). CCD photometry of the globular clusters NGC 6496, NGC 6624, and NGC 6637. *Astronomy and Astrophysics Supplement*, 109, 1-7.

Sarajedini, Ata. (1994). CCD Photometry of the Galactic globular cluster NGC 6535 in the B and V Passbands. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 106, 404-412.

Sarajedini, Ata; Forrester, Wendy L. (1995). CCD photometry for the galactic globular cluster NGC 6584. *The Astronomical Journal*, 109, 1112-1118.

Guhathakurta, Puragra; Webster, Zodiac T.; Yanny, Brian; Schneider, Donald P.; Bahcall, John N. (1998). Globular Cluster Photometry with the Hubble Space Telescope. VII. Color Gradients and Blue Stragglers in the Central Region of M30 from Wide Field Planetary Camera 2 Observations. *The Astronomical Journal*, 116, 1757-1774.

Geffert, M.; Maintz, G. (2000). First results of a photometric and astrometric study of the globular cluster M 71 (NGC 6838). *Astronomy and Astrophysics Supplement*, 144, 227-233.

Walker, Alistair R. (1992). A BV color-magnitude diagram for the Galactic globular cluster NGC 1851. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 104, 1063-1085.

Wang, J. J.; Chen, L.; Wu, Z. Y.; Gupta, A. C.; Geffert, M. (2000). Kinematics and CMD of the globular cluster NGC 4147. *Astronomy and Astrophysics Supplement*, 142, 373-387.

Sarajedini, Ata; Milone, Alejandra A. E. (1995). BVI CCD photometry of NGC 5053: The most metal-poor galactic globular cluster. *The Astronomical Journal*, 109, 269-279.

Sarajedini, Ata; Norris, John E. (1994). CCD photometry for six metal-rich galactic globular clusters. *The Astrophysical Journal Supplement*, 93, 161-185.

Harris, W.E. (1996). Catalog of Parameters for Milky Way Globular Clusters: the Database. *The Astronomical Journal*, 112, 1487.

【評語】 040505

本研究在探討球狀星團中恆星晚期演化的中介過程，這是一個尚未有定論的尖端天文物理課題，在理論探討和數據搜集上都有相當難度，因此學生以此為研究課題很值得鼓勵，往後的發展及進步空間仍很大。