

# 在疏散星團中尋找系外行星與變星

胡瑞華、葉永烜

國立中央大學天文研究所

## 摘要

我們使用鹿林一米望遠鏡觀測疏散星團 NGC 2324、NGC 2374 及 NGC 2420，利用掩星的方式尋找系外行星。行星掩星造成的光度變化需要高精確度的測光，以及長時間的觀測。以此連續觀測方法及類似的資料處理分析，可以尋找短週期的變星。在我們觀測的十個晚上，六個晚上可分析的資料中，沒有找到掩星現象。在 NGC 2324 中找到兩個變星候選星，NGC 2374 中找到四個，NGC 2420 沒有找到變星候選星。

## Search for Exoplanets and Variable Stars in Open Clusters

Hu Juei-Hwa, Ip Wing-Huen

Institute of Astronomy, National Central University

### Abstract

We present results of the search for exoplanets and variable stars in open cluster fields, NGC 2324, NGC 2374, NGC 2420, with the Lulin One-meter Telescope (LOT). Our main scientific goal is to use time series CCD photometry survey to detect exoplanets via transit effects. Such detection technique demands high-precision photometry now being implemented and gradually improved at Lulin. The secondary scientific goal is to discover and study variable stars with the same data set and similar data analysis methods.

Two variable candidates have been found in the NGC 2324 star field and four variable candidates in the NGC 2374 star field but no transit events detected. In the NGC 2420, no variable has been found.

關鍵字 (Key words): 系外行星(exoplanets)、變星(variable star)、疏散星團(open cluster)

## 1 緒論

### 1.1 尋找太陽系外行星

太陽系外行星，為太陽系以外的行星系統。在 1995 年，Mayor 和 Queloz 利用恆星運行產生的都卜勒效應 (Doppler Effect)，第一次偵測到太陽系外行星，51Peg b (Mayor & Queloz,

1995)，圍繞在一個類似太陽恆星的行星。近年來，利用相同的方法，透過光譜分析，已經找到了一百多個系外行星\*。在這一百多個恆星與行星系統，有約百分之二十的行星非常靠近其主星，行星軌道半徑小於 0.1AU，這些靠近主星巨大行星（Close-in Extra-solar Giant Planets）的存在，顯示了其他的行星系統與太陽系的不同，若能找到更多的系外行星系統及確定基本參數，則可以使行星系統的形成與演化的理論更加的完備。目前，因為大部分的行星是由都卜勒視向速度所發現的，而光譜觀測無法得到行星的質量及半徑等基本參數。若能觀測到行星經過其主星，所造成的光度變化，也就是掩星或凌日現象（transit），則可以定出較精準的質量與半徑（Seager, 2003）。所以我們想利用掩星現象的光度變化，尋找系外行星。此方法的優點除了可推算半徑和質量等物理性質，也可以同時監測整個望遠鏡視場中的星體，提高找到行星的機率，且可以觀測到比光譜觀測更遠更暗的星。

但是，此方法對於望遠鏡系統及資料處理方法精確度要求非常高，因為掩星現象所造成的光度變化，以木星大小及與太陽類型恆星的距離而言，只有 0.01 個數量級的變化，且只能找出疑似系外行星，最後的確認還是需要透過光譜的分析。

在 2002 及 2003 年，OGLE (Optical Gravitational Lensing Experiment) 利用了掩星的方法，在銀河球暈的方向，找到一百多個掩星現象 (Udalski et al., 2002a; b; c; 2003)，OGLE-TR-56b (Konacki et al., 2003)、OGLE-TR-113b (Konacki et al., 2004)、OGLE-TR-132b (Bouchy et al., 2004)、OGLE-TR-10b (Konacki et al., 2004; Bouchy et al.,

2004) 及 OGLE-TR-111b (Bouchy et al., 2004) 均被證實為短週期圍繞其主星的行星。OGLE 使用 1.3 米的望遠鏡，證明了使用一米等級的望遠鏡尋找系外行星的掩星現象是可行的。發現其他的行星系統，可以讓我們對於太陽系的形成與演化更加的了解，而觀測到掩星現象對於此系統的探討是非常有利的。所以我們使用了在鹿林前山的一米望遠鏡，嘗試尋找系外行星，同時利用相同的觀測方法，可以觀測到在觀測星場中的變星。

我們的觀測目標為疏散星團，除了星多，還考慮了可同時了解所觀測疏散星團的性質。若存在系外行星，對於其存在的環境特性，如年齡、金屬豐度及與我們的距離等性質，均可透過疏散星團做進一步的討論。

對於相近金屬豐度和年齡的主序星，影響觀測到掩星的條件包括：行星的存在、行星的幾何位置以及觀測資料。假設  $P$  為觀測到的機率， $P_p$  為行星存在的機率， $P_g$  為行星與恆星相對位置可偵測到的機率， $P_g \sim R_s/D$ ， $R_s$  為恆星的半徑， $D$  為恆星與行星的距離， $P_{data}$  為所得到的觀測資料，

$$P = P_p P_g P_{data}$$

$P_p \sim 0.007$  (Butler, 2000)，相對應的  $P_g \sim 0.1$ 。Mallen-Ornelas et al. (2003) 估算，若雙星系統占所有的恆星的一半，而我們所尋找的行星若存在於孤立的恆星，則  $P$  的值會遠小於 0.00035，也就是觀測遠超過 3000 顆恆星，才有機會發現行星。因為此值是由靠近太陽附近的星及扣除掉雙星系統求出的，所以他們認為，真實的值會遠小於 0.00035，且再考慮觀測的因素， $P_{data}$ ，發現系外行星的機率會更加的降低。若想提昇發現系外行星的機率，我們可控制的因素為觀測的恆星數，及觀測資料影響的機率  $P_{data}$ 。觀測疏散星團便是為了增加被觀

\* <http://www.obspm.fr/encycl/catalog.html>

表 1.1：NGC 2324，NGC 2374，及 NGC 2420 的基本參數

Objects	RA(J2000)	Dec(J2000)	Age(Year)	[Fe/H]	References
NGC 2324	07:04:07	+01:02:42	0.42 G	-0.15	Dias et al. (2002)
NGC 2374	07:23:56	-13:15:48	0.29 G	---	Dias et al. (2002)
NGC 2420	07:38:23	+21:34:24	1.1 G	-0.38	Dias et al. (2002)

\*Some data are taken from SIMBAD. (<http://simbad.harvard.edu>)

測的恆星數。關於觀測資料的影響，若精準度可達到掩星時微小的光度變化 $(R_p/R_s)^2$ ，表示由觀測資料中，可區分出恆星被行星遮掩的光度及恆星未被遮掩，即恆星本身的光度。關於觀測的總時間，為了求得週期，必須要偵測兩次的掩星現象，所以觀測時間要大於兩個週期。

NGC 2324、NGC 2374 以及 NGC 2420 為我們的觀測目標，除了此三個疏散星團星場較一般的星場密集外，另一原因是星團的亮星分佈的位置及其數量，亮星均不是分佈在影像中間，小於 13 等星等 (R 波段) 的亮星很少，我們希望將亮星飽合時所造成附近星體的污染，達到最小。我們對於星團年齡及金屬豐度沒有特別的範圍選擇，若有行星的發現，不同的年齡可討論行星系統演化的時間。至於金屬豐度，一般而言，疏散星團的金屬豐度高於球狀星團，但是金屬豐度與行星形成的關係，並沒有確切的理論，所以我們挑選觀測目標主要還是依據觀測條件。

表 1.1 為 NGC 2324、NGC 2374 以及 NGC 2420 的基本參數。因為 NGC 2374 文獻較少，沒有金屬豐度的資料。在我們觀測的三個疏散星團中，對於 NGC 2324 和 NGC 2374 的討論不多，且所作的觀測討論年代久遠。Dias et al. (2002) 的疏散星團目錄中，NGC 2324 的年齡約為四億兩千萬年，金屬豐度為-0.15。由 Babu (1985) 的文章，知道對於 NGC 2374 年齡的估算 (Babu, 1985; Fenkart et al., 1972; Lyngå, 1980) 由七千多萬年到二十億年。而 NGC 2420, Lee et al. (1999) 在韓國的期刊發表估算其年齡為二十億年。我們所選的三個星團的基

本參數，均需要進一步的確認。對於星團中變星的討論，只有在 2001 年由 Kim et al. (2001) 討論 NGC 2420，在五天的連續觀測，總共 347 幅影像中，沒有找到變星。我們將在第二節說明觀測與資料分析，第三節為光度分析結果與討論，第四章為結論。

## 2 觀測與資料分析處理

### 2.1 觀測系統

我們的觀測資料是使用鹿林前山的一米望遠鏡 (Lulin One-meter Telescope) 所拍攝的，此望遠鏡為一焦比為  $f/8$  的蓋賽格林式望遠鏡 (Cassegrain Telescope)。鹿林前山位於東經 120 度 52 分 25 秒，北緯 23 度 28 分 07 秒，高度為海拔 2862 公尺。分別使用 FLI IMG 1024S CCD，CCD 大小均為 1024×1024，整個影像視野 (Field of View) 約為 10 角分平方，每個像元約為 0.62 角秒。

在 2003 年一月底及二月初，拍攝了三個疏散星團，NGC 2324、NGC 2374 和 NGC 2420，使用 R 與 V 兩種濾鏡與 FLI CCD，曝光時間分別為 30 秒及 180 秒，拍攝方式是每個星團，每個濾鏡，兩種曝光時間各拍兩張影像，三個星團輪流拍，每張的間隔約為五分鐘，拍攝期間的大氣寧靜度 (seeing) 大約在 3 個角秒，表 2.1 列出了觀測結果，每個星團在不同的觀測日期，所得到的影像數目，總共觀測了十天，但可分析的資料為六個晚上，每個星團兩種濾鏡共拍了約 200 幅影像。在觀測期間，我們也拍了藍道標準星場 (Landolt, 1992)，SA104，為星等修正之用。表 2.1 統計了每個星團，所拍

攝的影像數目。

表 2.1：觀測資料（每天每個星場，所得到的影像數目。）

Date	NGC 2324	NGC 2374	NGC 2420	Total
2003/01/28	36	28	36	100
2003/01/29	40	40	48	128
2003/01/30	52	48	62	162
2003/01/31	48	40	56	144
2003/02/01	23	19	16	58
2003/02/06	24	24	32	80
Total	223	199	250	672

## 2.2 資料處理分析流程

我們使用 CCDRED/IRAF (Image Reduction and Analysis Facility) 做 CCD 對觀測資料產生的影響的修正，以及 DAOPHOT/IRAF 取得光度資料，使用 Smithsonian Astrophysical Observatory Telescope Data Center 發展出的 WCSTools 軟體，將星場的赤經和赤緯參照 USNOA2.0 星表，進行座標轉換。座標轉換的原則是先給定一亮星在影像上的座標值，及參

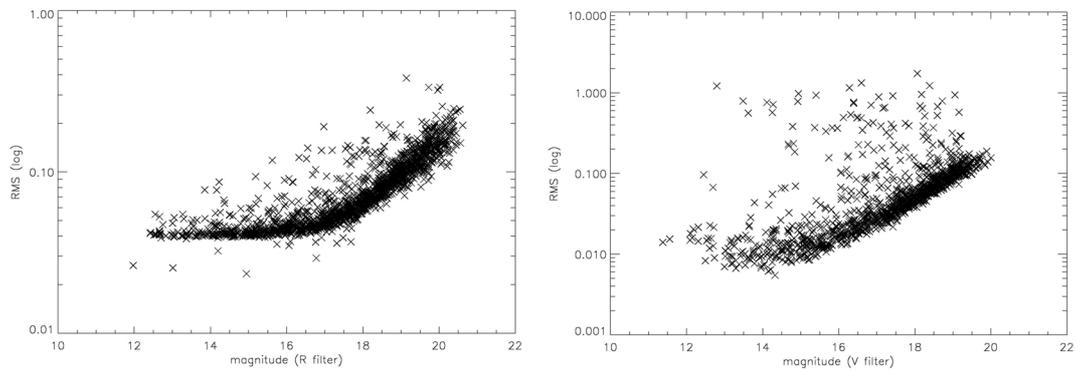


圖 2.1：NGC 2324 星場，R（左）與 V（右）波段的星等及其誤差圖。

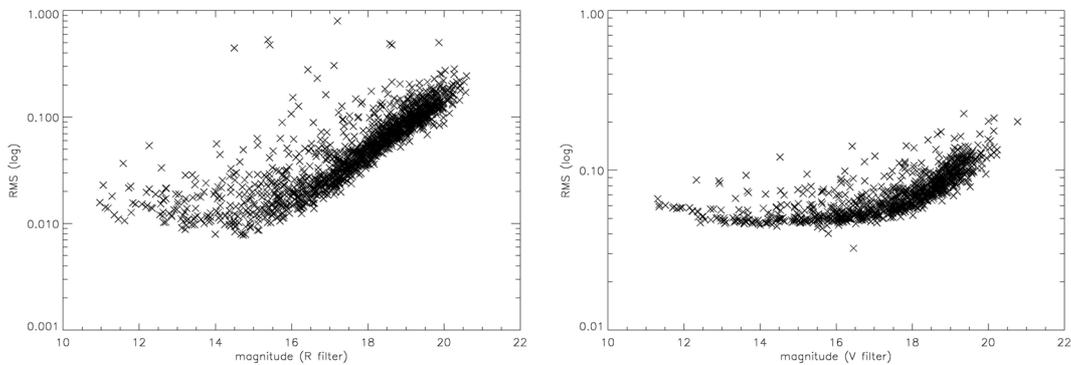


圖 2.2：NGC 2374 星場，R（左）與 V（右）波段的星等及其誤差圖。

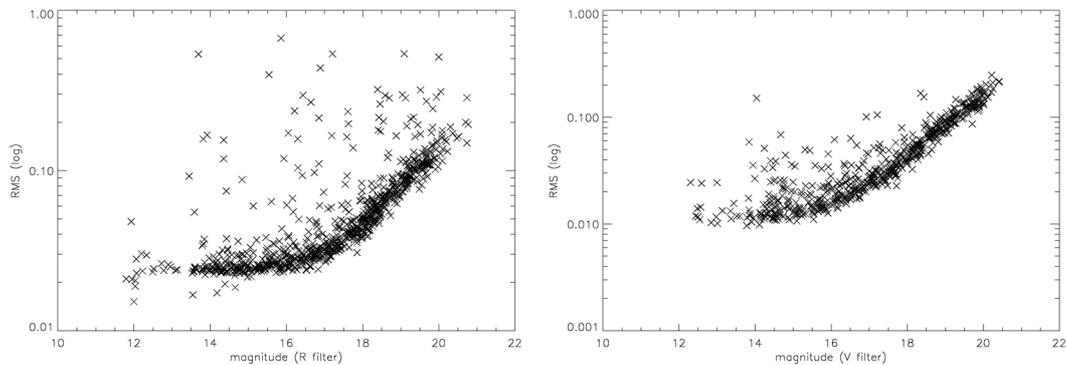


圖 2.3：NGC 2420 星場，R（左）與 V（右）波段的星等及其誤差圖。

照 USNO A2.0 星表的赤經和赤緯值，利用此資訊，可找到此星在星表中的天區，接著比對星表及影像中的星，可得到指定數目的星的座標值及其赤經赤緯。經由這些星的資訊，取得座標轉換的參數，進行座標轉換。

為了確認所作的光度討論均來自同一顆星，我們在假設任兩顆星在不同的影像中距離相同之下，做了幾個尋找與確認的步驟。我們先找一張大氣寧靜度較好的圖當作參考圖，參考圖中的任兩顆星的距離，若與其他圖中某兩顆星的距離相等，便可得知此兩顆星是參考圖中的那兩顆星，再經過交叉比較，便可確認不同影像中來自同一顆星的光度變化。

圖 2.1 到圖 2.3 是在三個觀測星場中，R 與 V 波段的星等值，以及所得的星等誤差，此誤差為所有的誤差，包括了修正標準星等、點擴散函數擬合等的誤差。我們希望由觀測所得星等值的精確度在 0.02 個星等以下，因為對於太陽類型的恆星，及木星大小的行星系統，掩星產生的星等變化在 0.02 個星等之內。對於誤差較大的星體，比較適合尋找變星，不適合系外行星的尋找，因為誤差太大，對於我們所要尋找掩星造成的光度變化，會在誤差裡面。

得到星體的光度之後，便要開始尋找系外行星，同時我們還可以找到副產物，變星。因為尋找系外行星與變星均是利用星等變化，所以使用較差測光，可依據其光度變化程度、週期和光度的曲線，分辨出系外行星造成掩星及變星的種類。

因為行星掩星時所造成的光度變化很小，我們需要很精確的星等，希望誤差能在 0.02 個星等內。所以我們將星場中星等值誤差小於 0.02 個星等的星挑出，在我們的觀測資料中，星等誤差小於 0.02 的星不多，且星點不密集，所以直接畫出星等誤差小於 0.02 的星，再用眼

睛檢查每一幅光度變化圖。

尋找變星的方法為，選出星等變化大於三個標準差的星，再找出其週期，我們利用了 Phase Dispersion Minimization (Stellingwerf, 1978) 及 Lomb Normalized Periodogram (Lomb, 1976) 兩種方法求週期。

### 3 光度分析結果與討論

做時間連續的觀測，尋找系外行星時，從觀測資料中可以得到副產物，找出星場中的光度隨著時間變化的變星候選星。在此三個星場中，總共找到了 6 個變星候選星。NGC 2324 星場中，找到了 2 個變星候選星；NGC 2374 星場，找到了 4 個變星候選星；在 NGC 2420 星場中，沒有找到任何變星候選星。

圖 3.1 是由鹿林山一米望遠鏡所拍攝到的 NGC 2324 星場，圖上的圓圈分別標出了變星候選星 V1 及 V2 的位置。圖 3.4 則為 NGC 2374 星場，同樣標出了變星候選星的位置。

圖 3.2、圖 3.3 及圖 3.5 到圖 3.8 分別表示了 NGC 2324 與 NGC 2374 星場中，變星候選星的兩個波段的光度曲線圖 (light curve) 和相位圖 (phase diagram)。光度曲線圖中，橫軸時間單位為天，縱軸為相對光度變化，圓點表示 R 波段，三角形表示 V 波段的相對光度變化。光度曲線圖中的虛線的間隔為我們所求得的可能週期，將光度變化明顯 (光度變化的最大值或最小值) 的時間點定為相位的零點，虛線所表示的時間，就是由相位的零點相對的時間，衍生出來光度會有明顯變化的時間點。我們將相位圖中兩個波段的零點，均對應同一個時間，由此我們可以看出，在相鄰的兩個波段光度變化的一致性與否。一個相位即為一個週期，在相位圖中顯示兩個相位，比較容易看出

表 3.1：變星候選星的基本參數

變星候選星 編號	RA(J2000)	DEC(J2000)	週期(day)	變幅	種類	
NGC 2324 星場	V1	07:04:07.915	+01:02:47.59	0.8370	~ 0.2	TBD
	V2	07:04:08.297	+01:03:37.05	1.2877	~ 0.2	Pulsating
NGC 2374 星場	V1	07:23:55.962	-13:18:03.91	0.6516	~ 0.15	TBD
	V2	07:24:10.909	-13:15:13.57	0.7711	~ 0.15	TBD
	V3	07:24:02.802	-13:14:11.35	0.4908	~ 0.08	TBD
	V4	07:23:47.404	-13:14:55.59	0.7360	~ 0.15	Eclipsing

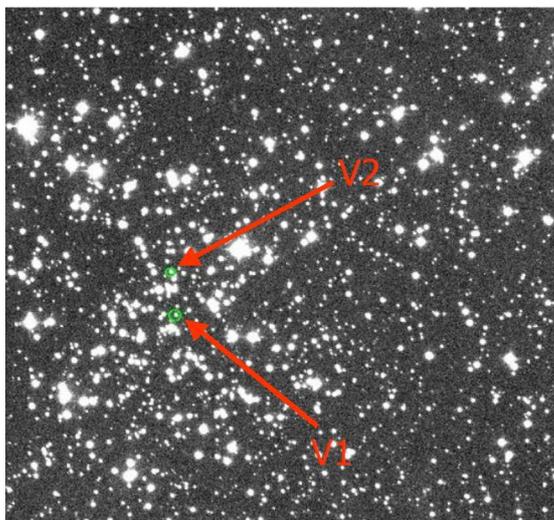


圖 3.1：NGC 2324 星場中，變星候選星位置圖。

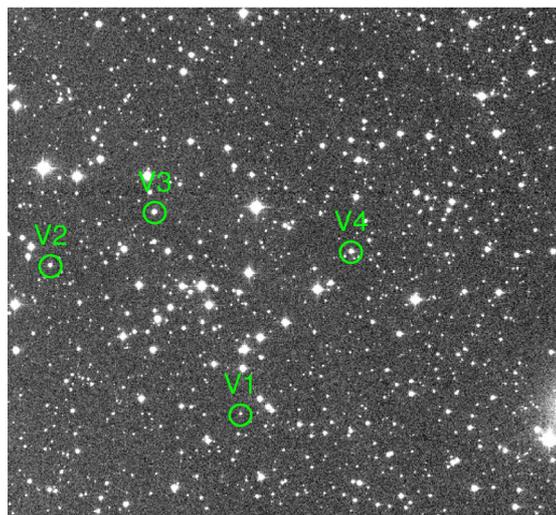


圖 3.4：NGC 2374 星場中，變星候選星位置圖。

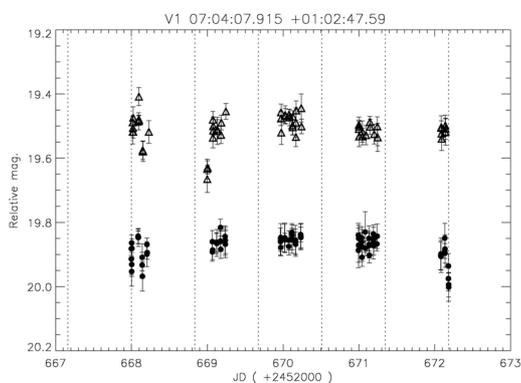
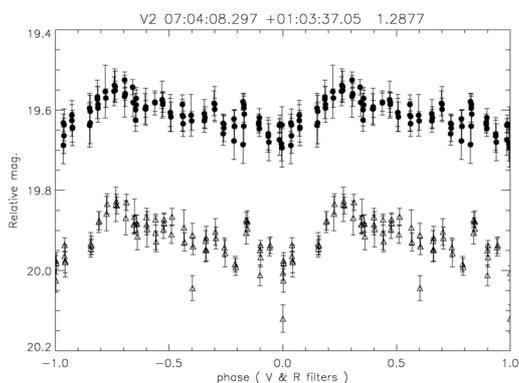


圖 3.2：NGC 2324 星場中 V1 變星候選星光度變化圖(左) 與相位圖(右)。

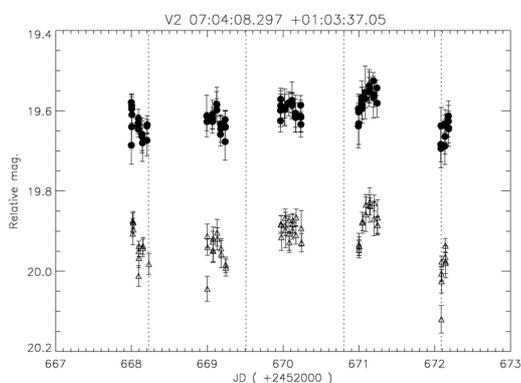
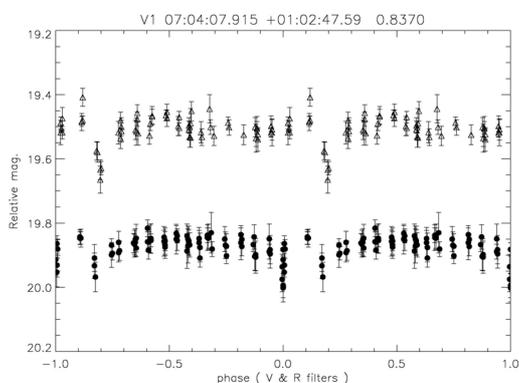


圖 3.3：NGC 2324 星場中 V2 變星候選星光度變化圖(左) 與相位圖(右)。

在疏散星團中尋找系外行星與變星  
Search for exoplanets and variable stars in open clusters

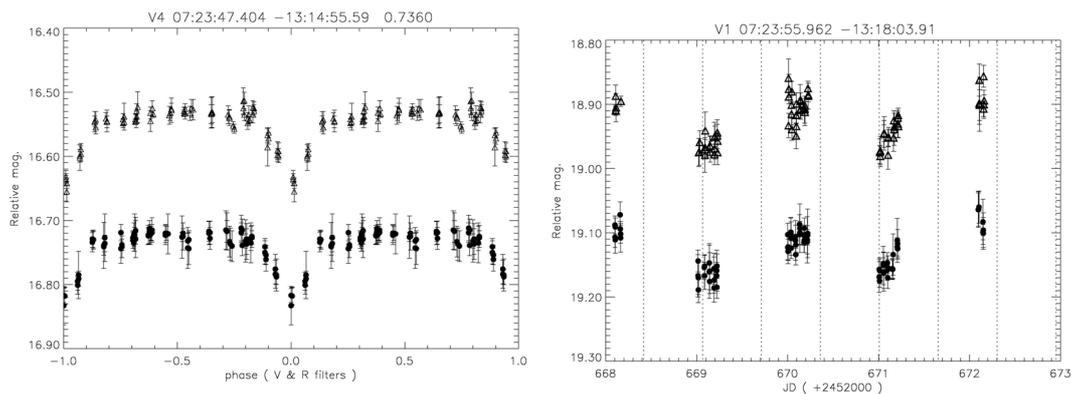


圖 3.5 : NGC 2374 星場中 V1 變星候選星光度變化圖(左) 與相位圖(右)。

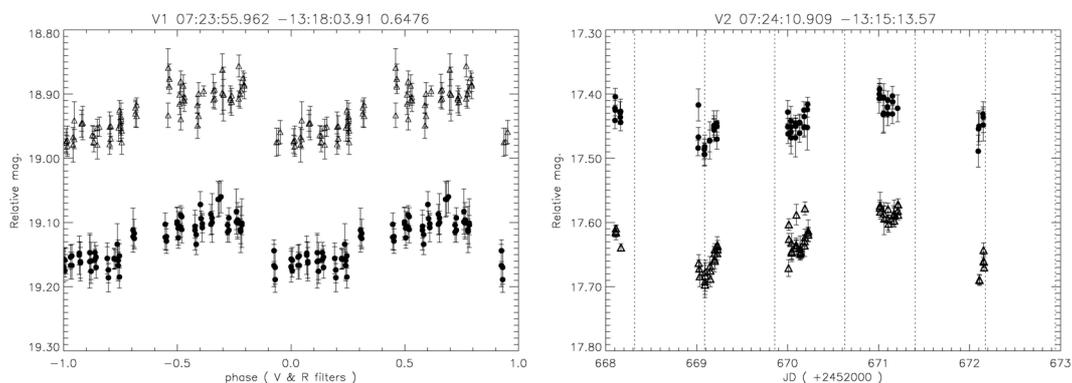


圖 3.6 : NGC 2374 星場中 V2 變星候選星光度變化圖(左) 與相位圖(右)。

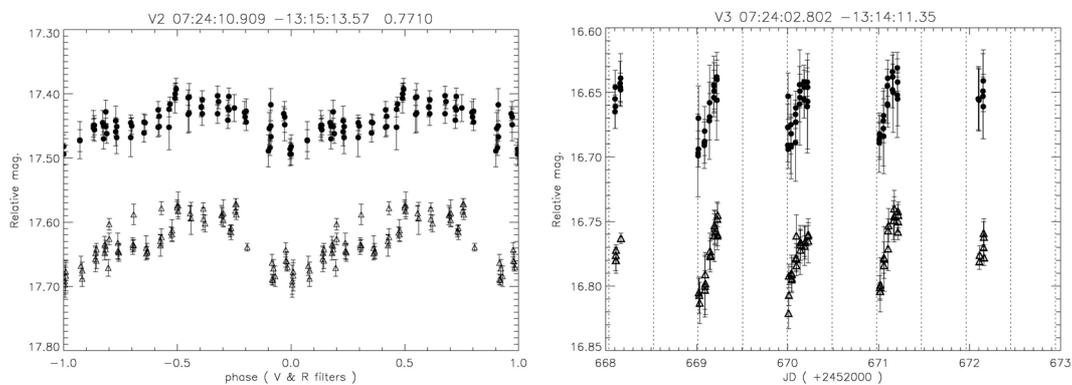


圖 3.7 : NGC 2374 星場中 V3 變星候選星光度變化圖(左) 與相位圖(右)。

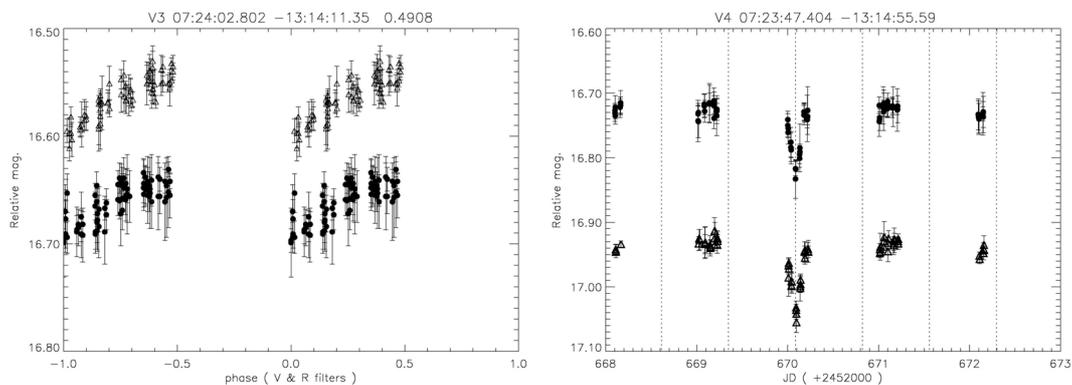


圖 3.8 : NGC 2374 星場中 V4 變星候選星光度變化圖(左) 與相位圖(右)。

光度變化的規律性。我們以 LNP 求得的週期為主，再使用 PDM 方法測試。由 LNP 所得到的可能週期，在 PDM 的檢測中，大都能得到相對最小值。表 3.1 列出了四個星場中變星候選星的基本參數。

NGC 2324 星場中發現的 V1 變星候選星，由圖 3.2 中的光度變化圖及相位圖都可以看出，在 R 與 V 波段中有同步的變化，我們以 V 波段相位零點相對應的時間為基準，因為在 V 波段光度變化的最小值比較明顯，此時間為 2452672.1829，將此時間也設為 R 波段的相位零點，即可發現兩個波段變化的一致性，由相位圖可推測此為一個食雙星系統，在相位 0.6 附近，光度似乎有些微的掉落，週期估算為 0.8370 天。

NGC 2324 星場中，V2 變星候選星的光度變化，如圖 3.3 (左) 所示。由相位圖，圖 3.3 (右)，可看出光度變亮的時間比光度變暗的時間長。此星應為一脈動星，相位零點是以 V 波段光度變化最小值為基準，所對應的時間為 2452672.0865，同樣的 R 波段相位零點對應的時間和 V 波段相同，圖 3.3 (右)，相位為 0.82 處，在兩個波段均有個小突起，依據光度變化及週期為 1.2877 天。

圖 3.5 所表示在 NGC 2374 星場中，V1 的週期可能為 0.6476 天或 1.8364 天，由於資料點不足，這兩個週期無法畫出完整對應的相位圖，圖 3.5 中，光度曲線圖的虛線為估計相對最小值出現的點，但是在 670.35 處，V 波段 (三角形) 光度變化沒有下降的趨勢，所以推測週期 0.6476 天，可能是資料點不夠密集所產生的假週期，圖 3.5 相位圖的相位零點是以 R 波段的一個相對最小值為基準，相對應時間為 2452671.0071。

由圖 3.6 中的光度曲線圖，可知 NGC 2374

星場中 V2 變星候選星的變幅大約 0.1 個星等，圖中的虛線為可能的週期 0.7711 天，圖 3.6 中相位圖的相位零點是以 R 波段的一個相對最小值為基準，相對應時間為 2452669.0874，因為此星所計算出的週期較長，所折出的相位空隙很多，觀測的資料點不夠，不容易辨認種類，不過還是可以看出兩個波段變化的一致性。

NGC 2374 星場中的變星候選星 V3，從光度變化圖 3.7 (左)，可以看到光度隨時間的上升部份，光度下降部份沒有觀測到，估算可能週期為 0.4908 天，約為 12 小時，相當於觀測時間的間隔。所以此星的週期，有可能和觀測時間的間隔類似。相位零點均以 R 波段為參考，對應的時間為 2452669.0155。

NGC 2374 星場中 V4 變星候選星相位圖，圖 3.8(右)，此圖形形狀，應為一食雙星系統，但是從圖 3.8 (左) 的光度曲線圖中，只能看到一次食的現象，即在時間 670.1 處，光度變化有明顯的下降，很可惜在其他預測光度下降的時間點沒有觀測資料，相位零點對應的時間點為 2452670.0859，以 R 波對為基準，同樣的，光度變化在兩個波段有一致性。

#### 4 結論

我們觀測的三個疏散星團，NGC 2324、NGC 2374 及 NGC 2420，在可偵測的 10 平方角分的範圍裡，每個星團的星場大約可偵測到一千至兩千顆星，總共觀測了約五千顆星，但是由圖 2.1 到圖 2.3 可知道，誤差在百分之一的星並不是很多，在樣本空間的討論上，是不足夠的。誤差大的原因，可能是所使用的 DAOPHOT 得到的點瀰散函數，選取的不好，擬合時造成的較大誤差，且此次觀測為 LOT 剛架設完成，對於觀測操作不熟悉及儀器的不穩定均有可能影響到測光精度。就觀測點而言，

因為輪流觀測三個星團，且使用兩種濾鏡，拍攝一張需要約五分鐘，拍完一輪三個星團，則需要約半個小時，觀測點沒有很密集。在使用 LOT 做觀測的十天裡，由於天氣與儀器的關係，可用的資料只有六個晚上，且不是每個晚上都整晚觀測，所得到的資料點不足，也影響了最後的結果。

根據 EXPLORE/OC (Braun et al., 2004) 估算，在天氣好的狀況下，連續觀測同一個星場，多於 20 個晚上（每晚 10.8 小時，拍攝間隔小於 15 分鐘），才有機會偵測到兩次完整掩星的光度曲線。我們計畫長時間觀測一個星團，使用一個濾鏡，縮小每幅影像的拍攝間隔，拉長觀測時間，以增加發現掩星的機率。

## Reference

- Babu, G.S.D. 1985, *JAA*, 6, 61
- Bouchy, F., Pont, F., Santos, N., Melo, C., Mayor, M., Queloz, D., & Udry, S. 2004, *A&A*, 421, L13
- Butler, R.P., Marcy, G.W., Fischer, D.A., Vogt, S., Yinney, G.G., Jones, H. Rr. A., Penny, A.J. & Apps, k. 2000, in IAU Symp. 202, *Planetary Systems in the Universe: Observation, Formation, and Evolution*, (San Francisco:ASP), in press
- Dias, W.S., Alessi, B.S., Moitinho, A., Lépine, J.R.D. 2002, *A&A*, 389, 871
- Fenkart, R.P., Buser, R., Ritter, H., Schmitt, H., Steppe, H., Wagner, R., Weidemann, D. 1972, *A&A. Suppl. Ser.*, 7, 487
- Kim, S.-L., Chun, M.-Y., Park, G.-G., Kim, S.C., Lee, S.H., Lee, M.G., Ann, H.B., Sung, H., Jeon, Y.-B., & Yuk, I.-S. 2001, *Acta Astron.*, 51, 49
- Konacki, M., Torres, G., Jha, S., & Sasselov, D.D. 2003, *Nature*, 421, 507
- Konacki, M., Torres, G., Sasselov, D.D., Pietrzynski, G., Udalski, A., Jha, S., Ruiz, M.-T., Gieren, W., & Minniti, D., 2004, *ApJL*, 609, L37
- Kyeong J.M., Byun, Y.I., Sung E.C., 2001, *JKAS*, 34,143
- Landolt, A.U. 1992, *AJ*, 104, 340
- Lee, S.H., Kang, Y.W., & Ann, H.B., 1999, *PKAS*, 14, 61
- Lomb, N.R. 1976, *Ap. Sp. Sci.*, 39, 447
- Lyngå, G., 1980, *A Computer Readable Catalogue of Open Cluster Data*, Stellar Data Centre, Observatoire de Strasbourg, France.
- Mallén-Ornelas G., Seager, S., Yee, H.K.C., Minniti, D., Gladders, M.D., Mallén-Fullerton G.M., & Brown, T.M. 2003, *ApJ*, 582, 1123
- Mayor, M., & Queloz, D. 1995, *Nature*, 378, 355
- Seager, S., & Mallén-Ornelas G. 2003, *ApJ*, 585, 1038
- Stellingwerf, R.F. 1978, *ApJ*, 224, 953
- Udalski, A., Pietrzyński, G., Szymański, M., Kubiak, M., Żebruń, K., Soszyń, I., Szewczyk, O., & Wyrzykowski, L. 2003, *Acta Astron.*, 53, 133
- Udalski, A., Sszewczyk, O., Żebruń, K., Pietrzyński, G., Szymański, M., Kubiak, M., Soszyń, I., & Wyrzykowski, L. 2002c, *Acta Astron.*, 52, 317
- Udalski, A., Żebruń, K., Szymański, M., Kubiak, M., Soszyń, I., Szewczyk, O., Wyrzykowski, L., & Pietrzyński, G. 2002a, *Acta Astron.*, 52, 115
- Udalski, A., et al. 2002b, *Acta Astron.*, 52, 1
- von Braun, K., Lee, B.L., Seager, S., Yee, H.K.C., Mallén-Ornelas, G., & Gadders, M.D. 2005, *PASP*, 117, 141