

中華民國第四十七屆中小學科學展覽會
作品說明書

高中組 地球科學科

040511

太陽系外行星 HD 189733 b 和 HD 209458 b 光度測量與分析

學校名稱：臺北市立麗山高級中學

作者： 高二 陳漢洲	指導老師： 萬義昶
---------------	--------------

關鍵詞：凌日現象 HD 189733 b HD 209458 b

壹、摘要

搜尋太陽系外行星 (extra-solar planet ; exoplanet) 是當今天文學家最重要的計畫之一；其中，當系外行星經過其主星碟面時，會造成光度略微下降，稱之為凌日現象 (transit)。本研究利用鹿林天文台 SLT (Sne Little Telescope) 望遠鏡來拍攝兩顆已知的系外行星 HD 189733 b 和 HD 209458 b 在凌日時的影像。

在經過影像修正與資料分析後，作出凌日光變曲線圖，分析判斷後，HD 189733 看到一個剛開始發生和一個完整的凌日現象，分別由 B 濾鏡和 R 濾鏡拍攝；而 HD 209458 則看到兩個剛開始發生，三個要結束的凌日現象，分別由 B 濾鏡、R 濾鏡和 $H\alpha$ 濾鏡拍攝。

本研究成功得到完整的 HD 189733 光變曲線圖，並推得其基本參數，包括：行星半徑為 1.242 個木星半徑、軌道傾角為 88.94 度及軌道半徑為 0.03115 天文單位。

貳、研究動機

於一次偶然的機遇下，在天文館的電子報上看到一則有關係外行星的報導，內容是到目前為止觀測條件最佳的系外行星 HD 189733 b。這類研究是很新、且是突破性的題材，因為不發光的行星對於能自行發光的恆星而言，就像是隱形的天體。近年來，許多天文學家不斷地研究系外行星，一步步描繪出太陽系以外的行星運作模式及性質，進而探討行星系統起源的理論。看到相關新知陸續報導，引發我強烈興趣，猶如親臨最前線，對系外行星想要有更進深的了解。

參、研究目的

- 1.拍攝系外行星凌日現象時的影像。
- 2.繪製系外行星凌日光變曲線。
- 3.分析因凌日現象而產生的光度變化並找出其特性。
- 4.利用所得到的凌日光變曲線推算行星的基本參數。

肆、文獻探討

系外行星，顧名思義為太陽系外的行星。1995年，Mayor和Queloz利用恆星運行所產生的都卜勒效應，偵測到一顆環繞在類太陽恆星的系外行星，51Peg b (Mayor & Queloz, 1995)。

自發現以來，大部分是利用都卜勒視向速度變化(圖一)，經過光譜紅移與藍移分析而發現的，目前此方法已找到200多顆。但此方法需要解析度很高的光譜儀，並受限於亮星，對於較暗的星，要使用其他方法。

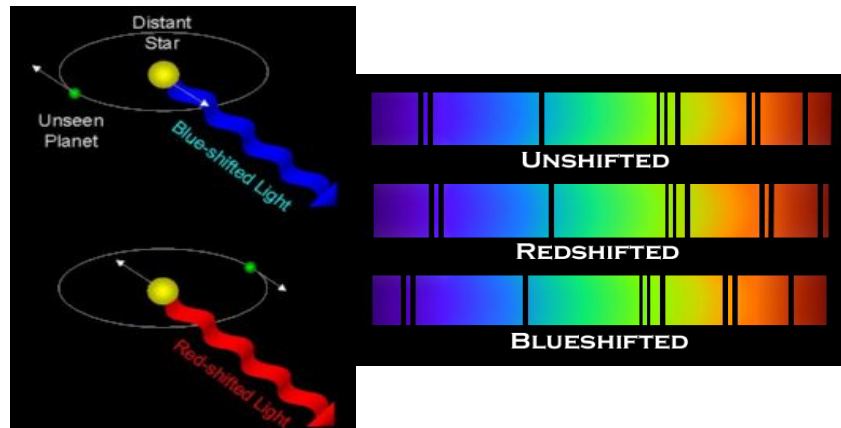
根據觀測雙星系統（最有名的是天狼星與其伴星），發現其軌道繞一質心運行。系外行星也會造成此現象，源自質量與彼此距離造成恆星位置的變化(圖二)。可用相同方法搜尋，但缺點是需要長時間的確認，且無法找到質量過小的行星。

近年來，進展迅速的是利用觀測凌日現象所產生光度變化搜尋系外行星(圖三)。優點在於可同時監測整個目標星場，大幅提高找到行星的機率，且可定出較精準的質量與半徑 (Seager, 2003)，並由此推測出密度等參數，另外還能觀測比光譜更遠更暗的星。但是，此方法對於望遠鏡系統及資料處理精確度要求很高，因為凌日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，且只能找出疑似的系外行星，最後確認還是需要透過光譜分析。對於太暗無法使用光譜儀觀測的星，則需要長時間觀測其光度變化，以便確認。

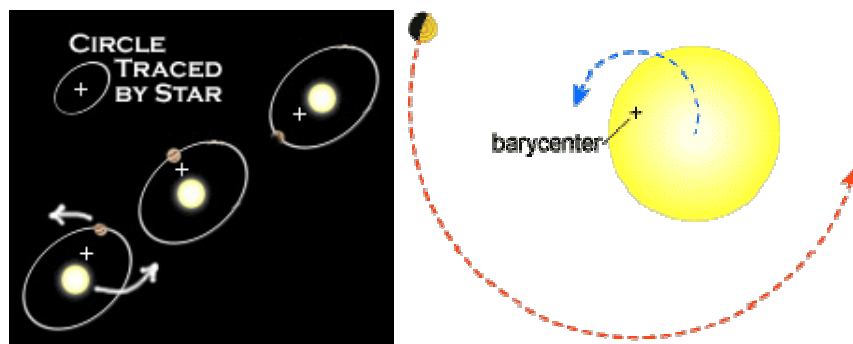
根據廣義相對論，光線因受到重力場影響而彎曲，造成似放大鏡的聚光效應，最著名的是愛因斯坦環與愛因斯坦十字。系外行星也可利用微重力透鏡光度變化的方法進行搜尋(圖四)。此方法可較準確地測得系外行星的質量。但發生機率小且不容易發現，有較多發展空

間。

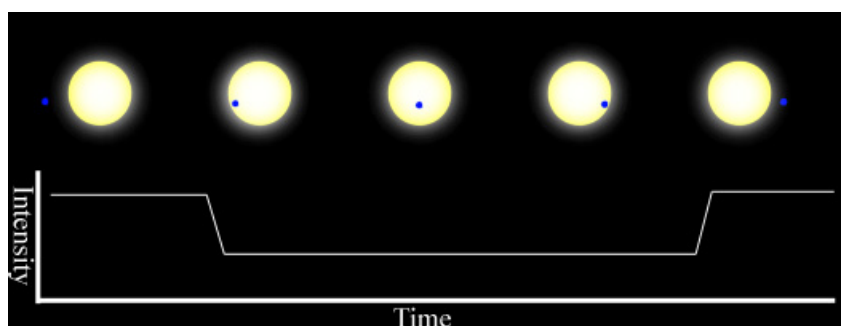
紅外線波段有時可以直接觀測到恆星與他的行星，但需要非常尖端的儀器，即大尺寸的望遠鏡配合高解析度的CCD在地面天文台或太空望遠鏡，才有可能進行(圖五)。



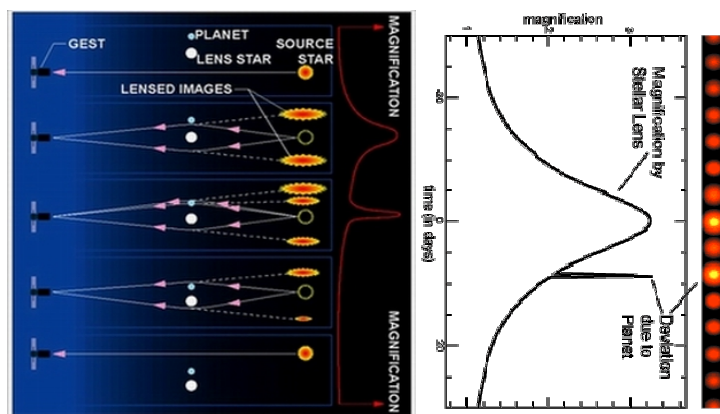
圖一、視向速度測量法示意圖 (ESP, <http://www.psi.edu/esp/method.html>)



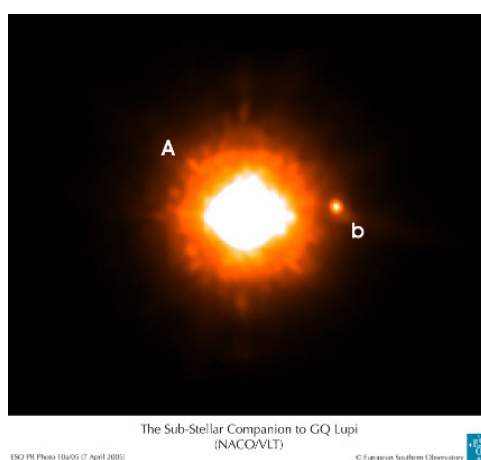
圖二、恆星與行星互繞示意圖 (ESP、Stare project, <http://www.psi.edu/esp/method.html>、<http://www.hao.ucar.edu/public/research/stare/search.html#methods>)



圖三、凌日現象時的光度變化示意圖 (ESP, <http://www.psi.edu/esp/process.html>)



圖四、微重力透鏡效應示意圖（MPS，<http://www.nd.edu/~srhie/MPS/>）



圖五、系外行星 GQ Lup 影像（ESO，<http://www.eso.org/>）

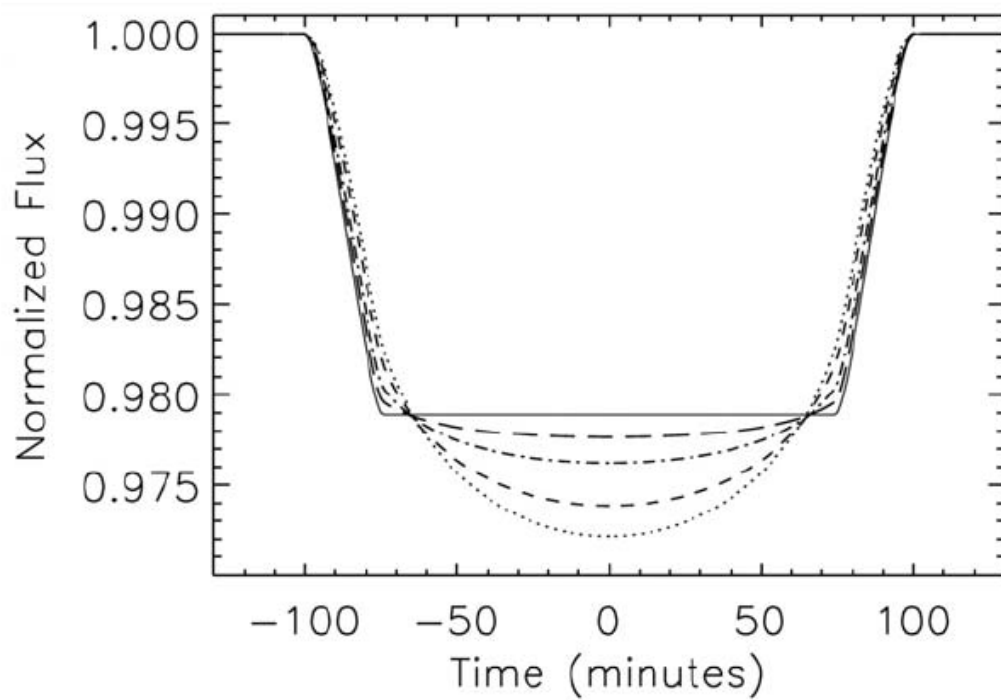
一般來說，我們在發現一顆系外行星後，希望得到它的一些基本參數，如下表一：

表一、基本參數表

基本參數	單位
恆星質量	$[M_{\odot}]$
恆星半徑	$[R_{\odot}]$
行星質量	$[M_J]$
行星半徑	$[R_J]$
行星密度	$[g\ cm^{-3}]$
公轉週期	$[days]$
軌道距離	$[AU]$
軌道傾角	$[^{\circ}]$

上表一所列的 $[M_{\odot}]$ 、 $[R_{\odot}]$ 都為比值，設太陽質量、半徑=1； $[M_J]$ 、 $[R_J]$ 也為比值，設木星質量、半徑=1。由凌日光變曲線能得到恆星的質量與半徑、行星的質量、半徑、密度、軌道距離與傾角。

系外行星在發生凌日現象時，需要考慮臨邊昏暗效應所造成的影響。圖六中實線表示沒有考慮臨邊昏暗，虛線則表示不同波段的臨邊昏暗，由上而下分別為3、0.8、0.55、0.45 μm （波長愈長，愈偏紅）。



圖六、臨邊昏暗效應示意圖（Mall'en-Ornelas G，2003）

伍、研究設備及方法

一、儀器與設備：

鹿林天文台：

經度： 120 d 52 ' 25 " E

緯度： 23 d 28 ' 07 " N

海拔： 2862 m



圖七、鹿林天文台

(<http://www.lulin.ncu.edu.tw/>)

天文望遠鏡：

RC Optical Systems 0.41-m f/8.8 Ritchey-Chrétien

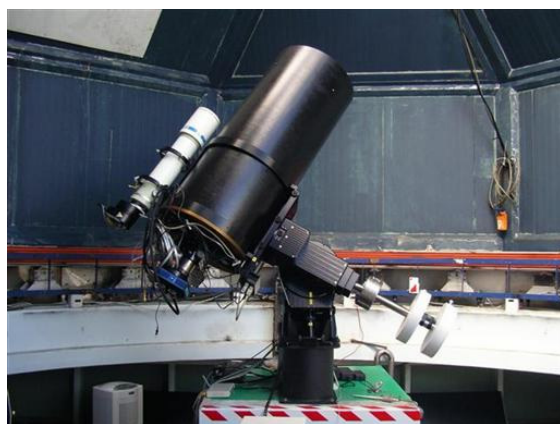
(Sne little telescope, SLT)

天文專用CCD：

Apogee Alas U42 CCD

濾鏡系統：

Johnson / Cousins (Bessell)



圖八、SLT 望遠鏡

(<http://www.lulin.ncu.edu.tw/>)

二、分析軟體：

IRAF (Image Reduction and Analysis Facility) (Linux)

IDL 6.0 (Windows)

三、觀測注意事項：

(一) 濾鏡的選擇

因臨邊昏暗效應的影響，盡量選擇較長的波段來觀測，R、I 濾鏡是較好的選擇。

(二) 曝光秒數

HD 189733的視星等為7.67，HD 209458的視星等為7.65，對於SLT望遠鏡是亮星，因此要注意目標絕對不能達到飽和，且為了避開CCD非線性範圍，星體的訊號值最好維持在10000~30000間。觀測數天下來，曝光秒數通常在1~3秒間，依星體仰角不同和天氣因素而有所變動。

四、觀測資料：

第一目標 HD 189733：

表二、HD 189733 資料彙整

日期 \ 濾鏡	B	R	Empty	總共
2005/11/08	241			241
2005/11/09	215			215
2005/12/02	324			324
2006/08/05			318	318
2006/08/14		580		580
2006/08/23		218		218
2006/10/02		310		310
2006/10/13		914		914
總共	780	2022	318	3120

第二目標 HD 209458：

表三、HD 209458 資料彙整

日期 \ 濾鏡	B	R	H α	總共
2005/11/08	265			265
2005/11/09	205			205
2006/08/24		566		566
2006/10/16			140	140
2006/12/08	125	124		249
總共	595	690	140	1425

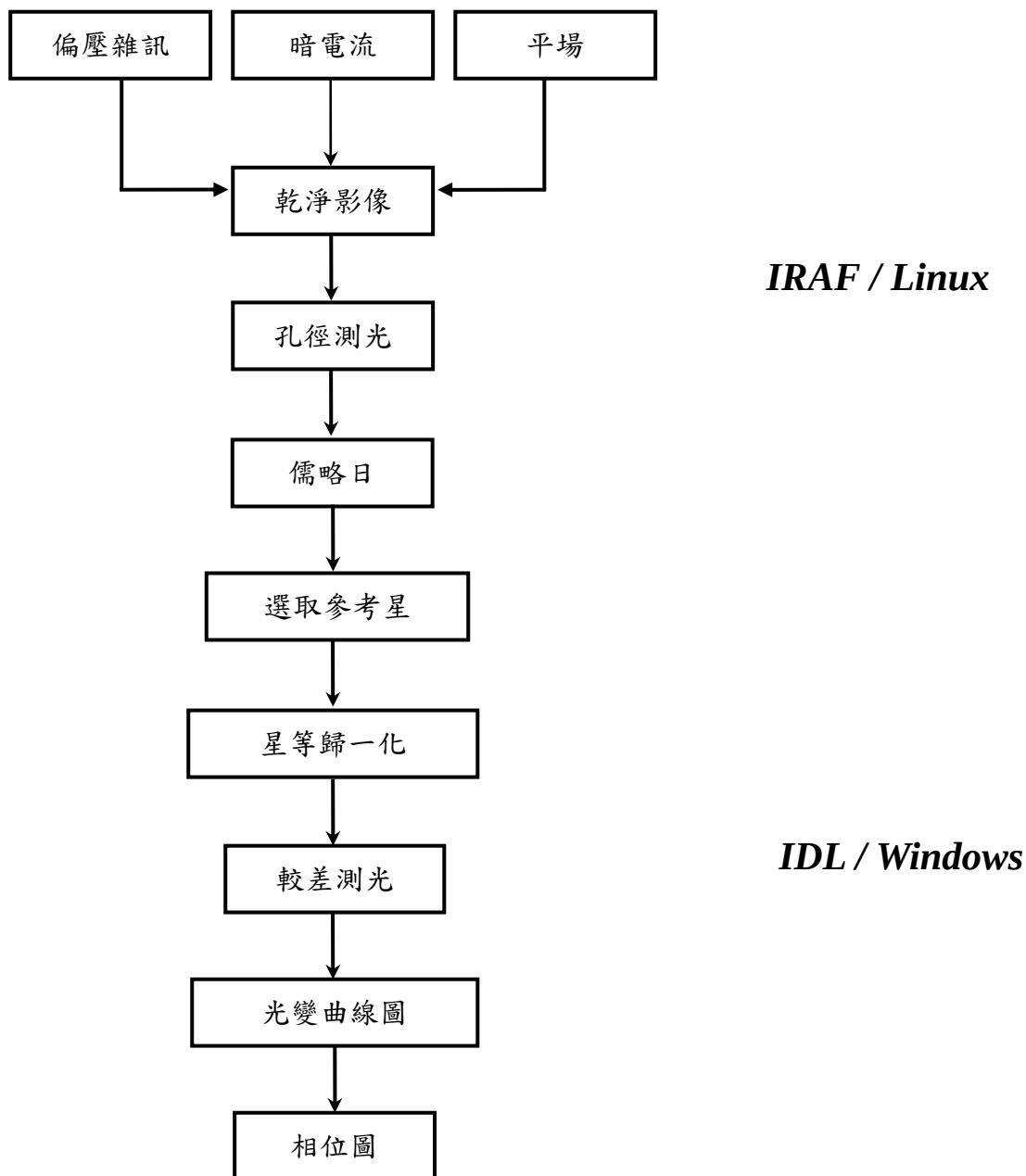
四、資料處理與分析

取得觀測資料後，必須處理分析，得到需要且有意義的資訊。首先修正 CCD 儀器與拍攝所產生的影響，包含本身 CCD 輸出影像時所導致的雜訊、因曝光時間愈久而產生熱所導致的電子流、因 CCD 本身感光不一而產生的感度差異。修正這些影響後，才不會因此而造成無法取得真實資訊；再來，需要進行星體的光度測量，利用光圈光度測光，

也稱為孔徑測光，得到星體的光度後，接著進行較差測光，所得到的差值即可視為光度的變化量，再配合時間作圖，便可得到凌日現象時產生的光度變化曲線圖，這是整個研究的重點。更進一步是利用光變曲線計算一些行星的基本參數。

基本上，假設 100 張內受大氣的影響並沒有變化太多，所以每 100 張中抽樣 3 張進行測量所需的參數。然後列清單分批處理，視當天影像數量來決定次數，原則上也是 100 張處理一次。

基本的流程圖，如下圖九：



圖九、基本處理流程圖

1.修正影像：

影像由 CCD 拍攝，其雜訊會對影像產生影響。修正後即可得到乾淨的影像。CCD 本身所造成的雜訊影響有下列三種：偏壓、暗電流以及平場。偏壓為 CCD 的初始值，是在沒有光的進入下且曝光時間趨近於零，所得到的值。暗電流是因為 CCD 在曝光時，因為熱而產生的電子流，它會影響真正星體所發出來的光的值，通常暗電流隨曝光時間成正相關，理想狀態下為線性關係。平場是指 CCD 上每個像元的反應狀況，理想狀態下是反應相同，但實際上，反應並不相同，所以需拍攝均勻光源來修正此影響。使用 CCDRED/IRAF 做修正影像的動作。

$$cleanframe = \frac{rawframe - (dark_r - bias) - bias}{flat - (dark_f - bias) - bias}$$

2.光度取得：

星體的光度，使用 APPHOT/IRAF 測得。基本上，每 100 張處理一次。

(1) 參數

用來取得影像的參數，有半高全幅寬（Full Width Half Maximum；FWHM）和天空背景光的標準差。每 100 張中抽樣 3 張。

(2) 找星

給定條件，尋找影像中的星體座標，並排除非星體的目標。

(3) 初始儀器星等

將上一步所找到的星體中心座標，進行光圈光度測光。給定光圈大小和背景光範圍，扣掉天空背景平均值，以高斯分佈擬合計算後積分，取得初始儀器星等及測光誤差。

3.儒略日取得：

利用儒略日（HJD）來作為時間軸。使用 ASTUTIL/IRAF 將儒略日求出。

4.數據處理：

(1) 參考星

在選定參考星時，需要注意的有：

- 在星場中是否偏外，如果太外便不能使用，會影響測光
- 光譜類型跟目標星不能相差太遠

- 最好比目標亮，如果沒有要選相近的

第一目標 HD 189733 的參考星，如下表四：

表四、HD 189733 與參考星的基本資訊

	目標星	參考星
星碼編號	HD 189733	HD 345459
光譜類型	G5	K0
視星等	7.67	8.08

第二目標 HD 209458 的參考星，如下表五：

表五、HD 209458 與參考星的基本資訊

	目標星	參考星
星碼編號	HD 209458	HD 209346
光譜類型	G0V	A2
視星等	7.65	8.33

(<http://exoplanet.eu/>)

(2) 星等歸一化

將影像中得到的目標跟其他星體，做星等歸一化的動作，選 5 顆當參考。

(3) 較差測光

- 將得到的初始儀器星等，利用兩星星等相減進行較差測光，此方法的好處在於可消掉大氣的影響。但需注意參考星的光度不能變化，且其恆星色指數必須和目標星相差不遠，否則會因大氣消光，而產生觀測上的誤差。

$$MAG_S = MAG_T - MAG_R$$

MAG_S 為相減所得到的星等差值， MAG_T 為目標星星等， MAG_R 為參考星星等。

- 將目標星與參考星本身的測光誤差，取平方相加再開根號，可得到較差測光的誤差。

$$MERR_S = \sqrt{MERR_R^2 + MERR_T^2}$$

$MERR_S$ 為星等差值的誤差， $MERR_T$ 為目標星的測光誤差， $MERR_R$ 為參考星的測光誤差

(4) 光變曲線圖

用較差測光所得到的星等差值 (MAG_S) 及測光誤差 ($MERR_S$) 為X軸，儒略日為Y軸，繪製光變曲線圖。

(5) Bin 圖

將得到的星等值每 10 點取一平均，再做較差測光，最後用光變曲線呈現。此方法的目的是在於降低誤差，根據統計計算，將可減少 $\sqrt{10}$ 的雜訊。

(6) 相位圖

將儒略日轉換成相位的關係，把一個週期的起點設 0，結束設 1，利用下式處理並作成相位圖。

$$Phase = MOD\{(HJD - J_C)/Period\}/Period$$

$Phase$ 為得到的相位， MOD 來取餘數， HJD 為影像當時的儒略日， J_C 為週期起始點時間， $Period$ 為公轉週期。

(7) 利用光變曲線求恆星與行星參數：

光變曲線可以求出恆星質量、半徑與行星質量、半徑、密度、軌道距離與傾角等參數。但還須符合下列條件：

- 需精確的測光，呈現其光變曲線。
- 光變曲線必須包含平底，這樣才能假設行星完全重疊在主恆星的碟面；需注意在觀測時的波段，選能減少臨邊昏暗效應影響的波段較好。
- 不能有第二個凌日現象產生在其中（也就是不能有第二顆行星的影響）。
- 先從光變曲線取得行星的軌道週期（需要連續觀測兩個以上的凌日現象）。
- 主星旁不能有太接近的伴星，且須為主序星。
- 行星質量遠小於恆星質量，行星半徑遠小於軌道距離，且假設為圓形軌道。

如符合上述條件，五個參數可由下列方程式求出。

光度變化 (ΔF) 由下式描述：

$$\Delta F = \left(\frac{R_p}{R_*}\right)^2$$

R_* 為恆星半徑， R_p 為行星半徑。

軌道傾角與光變曲線外型的關係由下式描述：

$$\left(\frac{t_{flat}}{t_T}\right)^2 = \frac{\left(1 - \frac{R_p}{R_*}\right)^2 - \left(\frac{D}{R_*} \cos i\right)^2}{\left(1 + \frac{R_p}{R_*}\right)^2 - \left(\frac{D}{R_*} \cos i\right)^2}$$

t_{flat} 為掠過恆星時間，也就是平底部份， t_T 為完整凌日時間， D 為軌道距離， i 為軌道傾角。

上面的 t_T 可用下式表示：

$$t_T = \frac{PR_*}{\pi D} \sqrt{\left(1 + \frac{R_p}{R_*}\right)^2 - \left(\frac{D}{R_*} \cos i\right)^2}$$

P 為行星軌道週期。

根據克卜勒行星第三運動定律，可以得到下式的關係：

$$P^2 = \frac{4\pi^2 D^3}{GM_*}$$

π 為圓周率， G 為萬有引力常數， M_* 為恆星質量。

下式描述類似太陽恆星，其行星質量與半徑的關係。

$$M_* = f(R_*) \approx R_* \frac{M_s}{R_s}$$

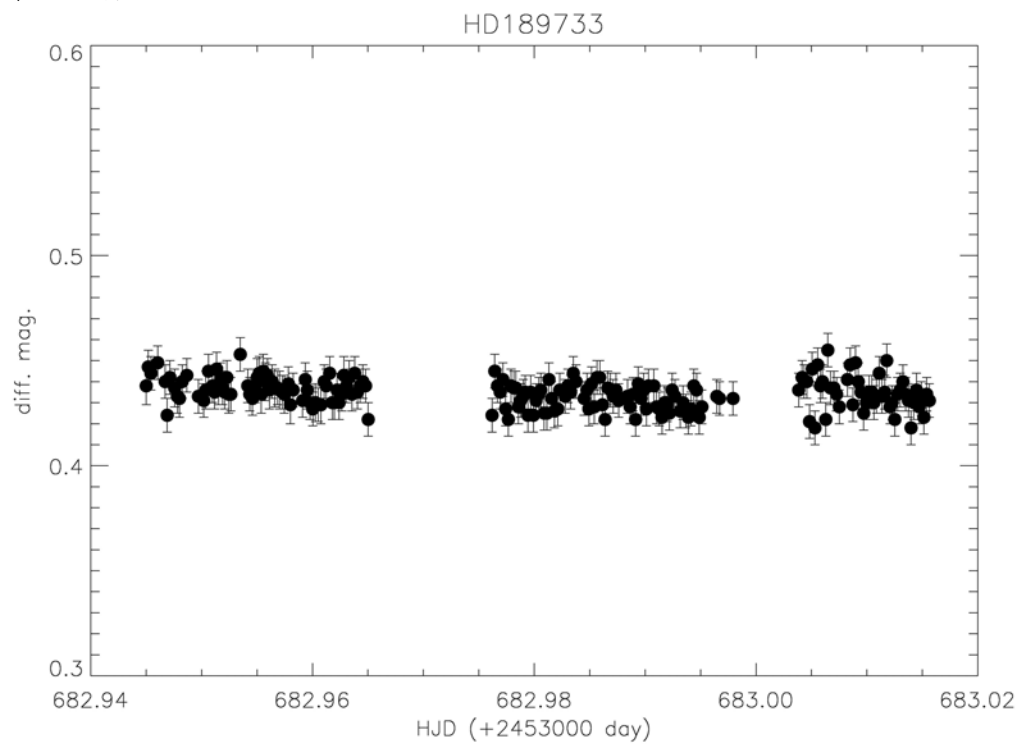
藉由上面的公式，可推得行星的基本參數。

(Seager & Mall´en-Ornelas, 2003)

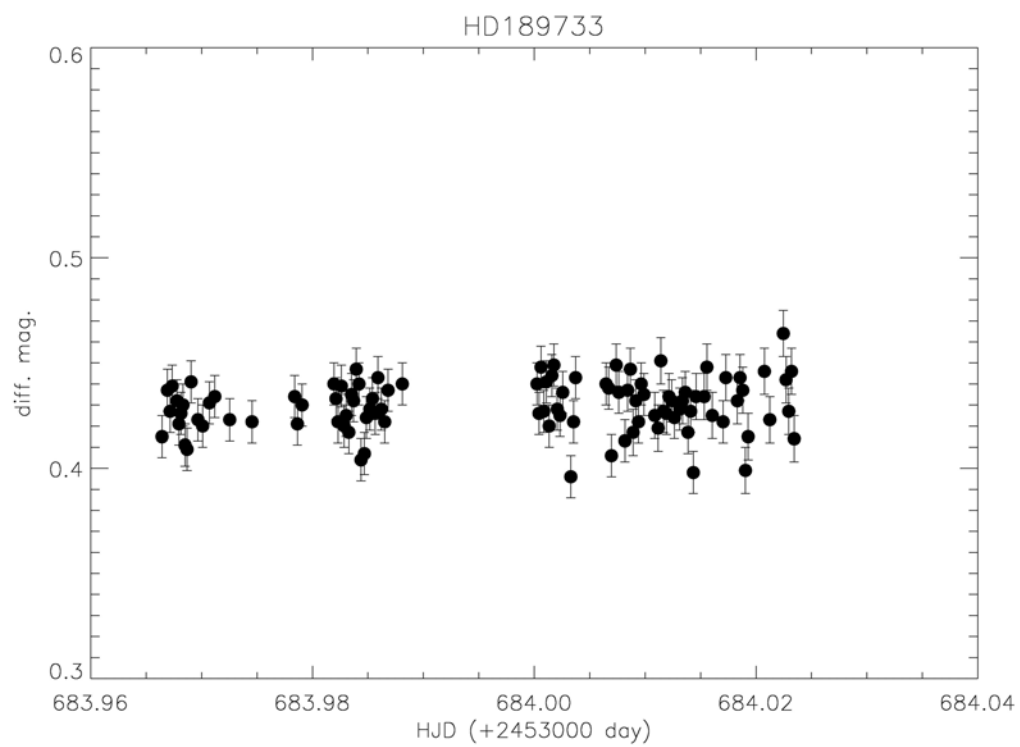
陸、研究結果

一、光變曲線圖

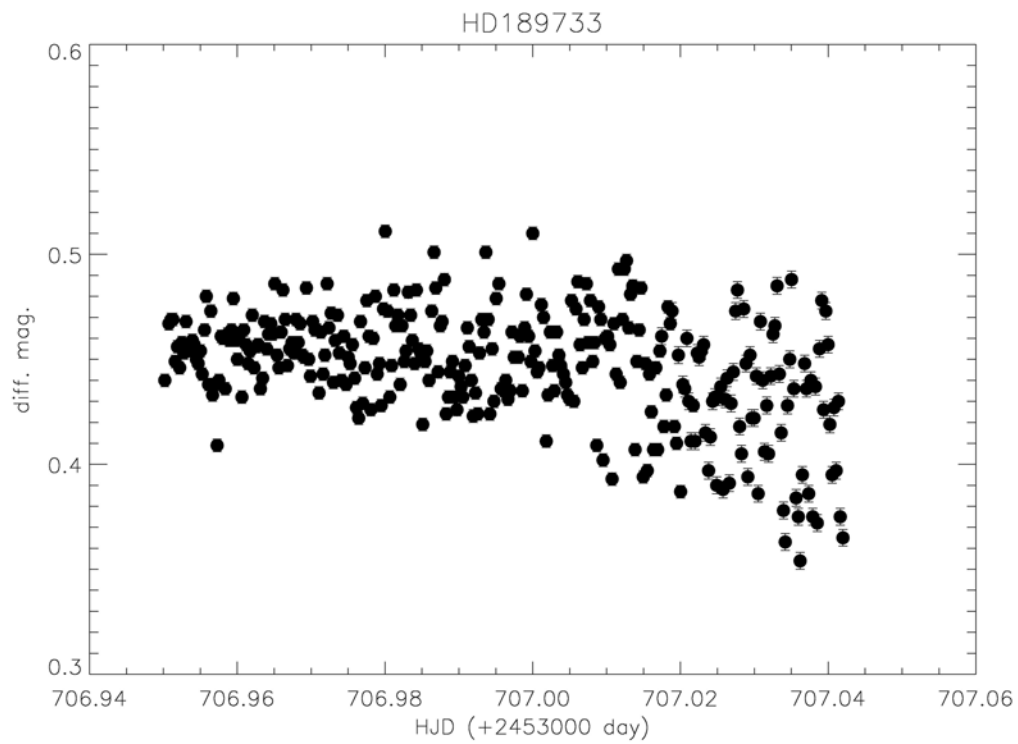
1.第一目標 HD 189733：



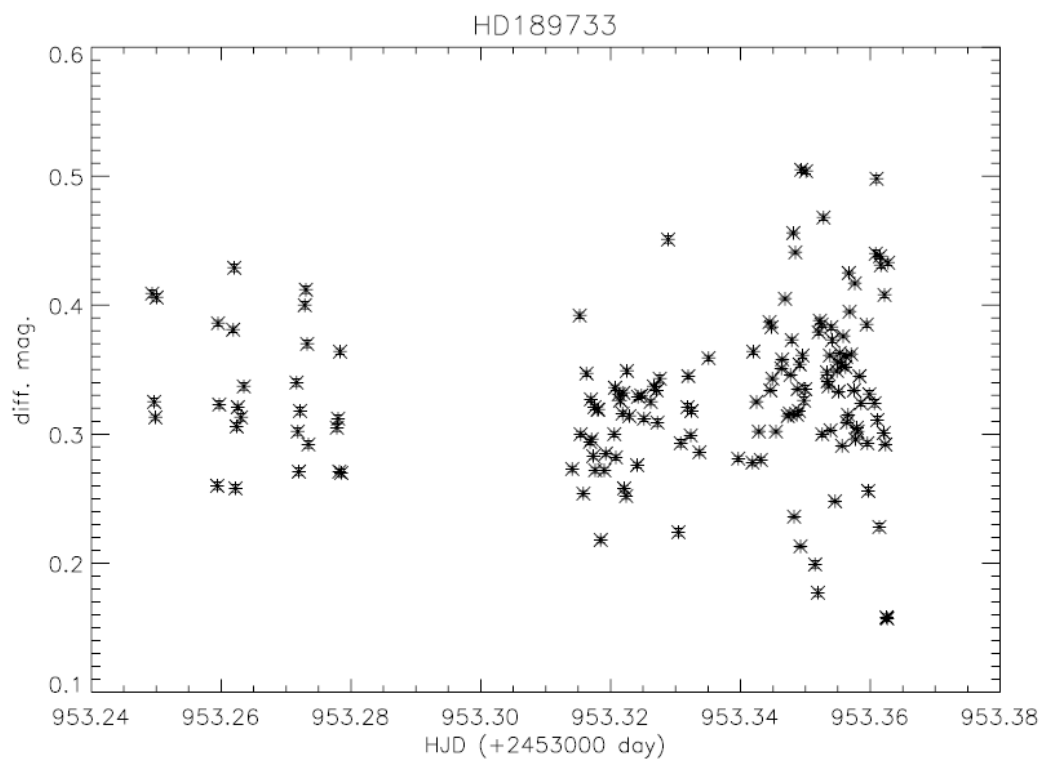
圖十、2005/11/08 光變曲線圖 (B 濾鏡)



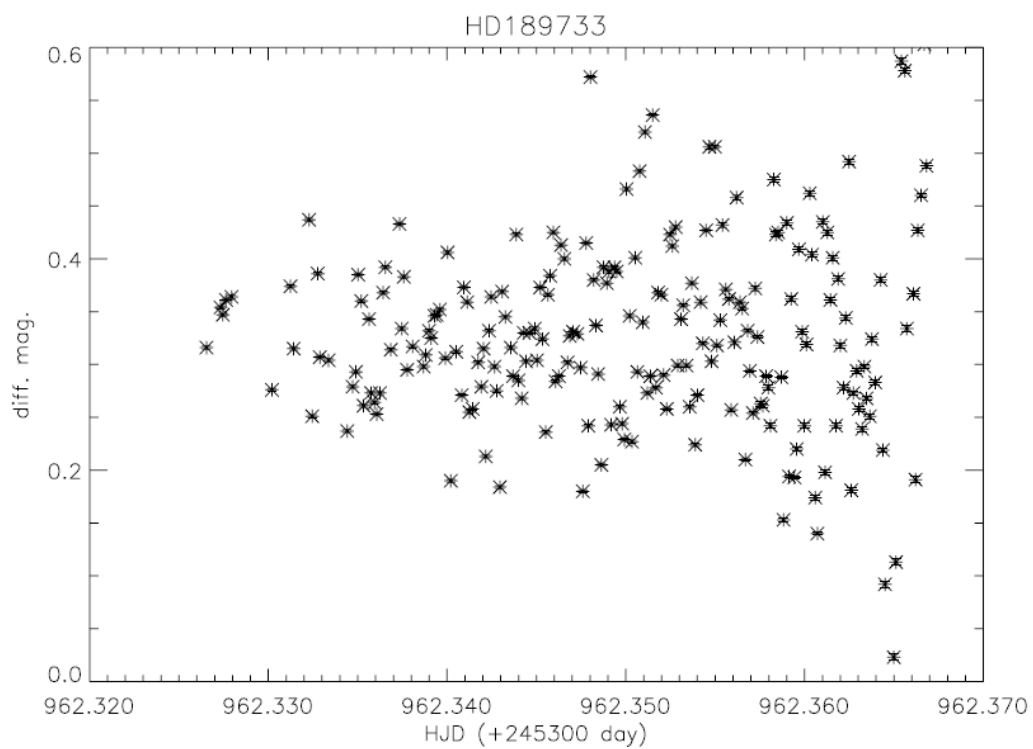
圖十一、2005/11/09 光變曲線圖 (B 濾鏡)



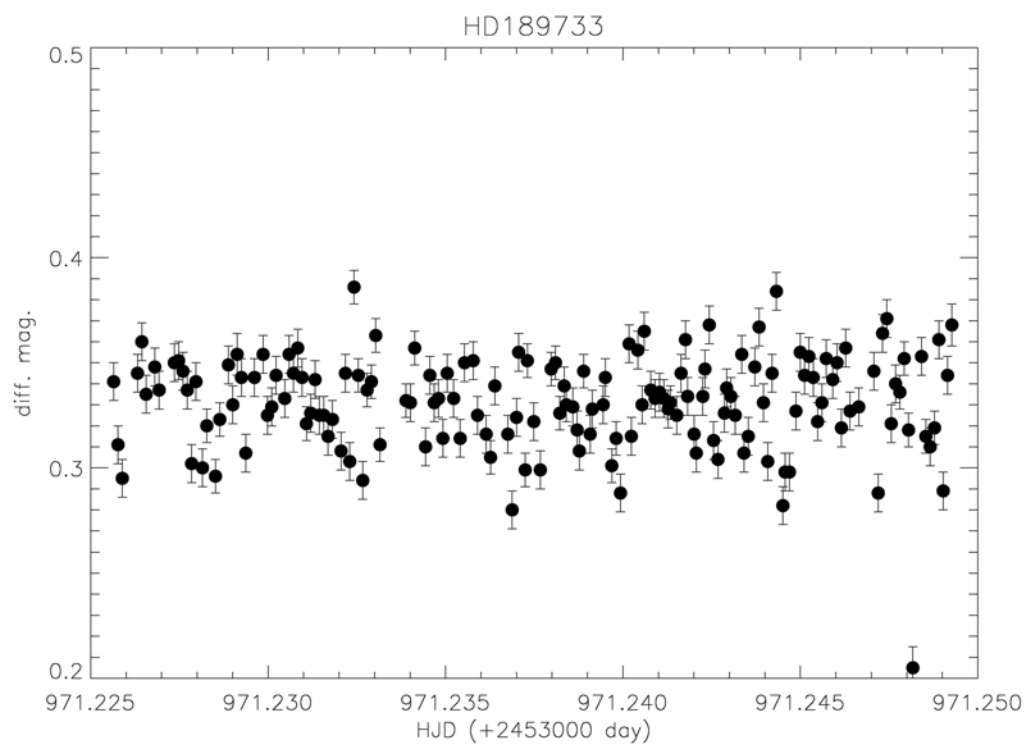
圖十二、2005/12/02 光變曲線圖 (B 濾鏡)



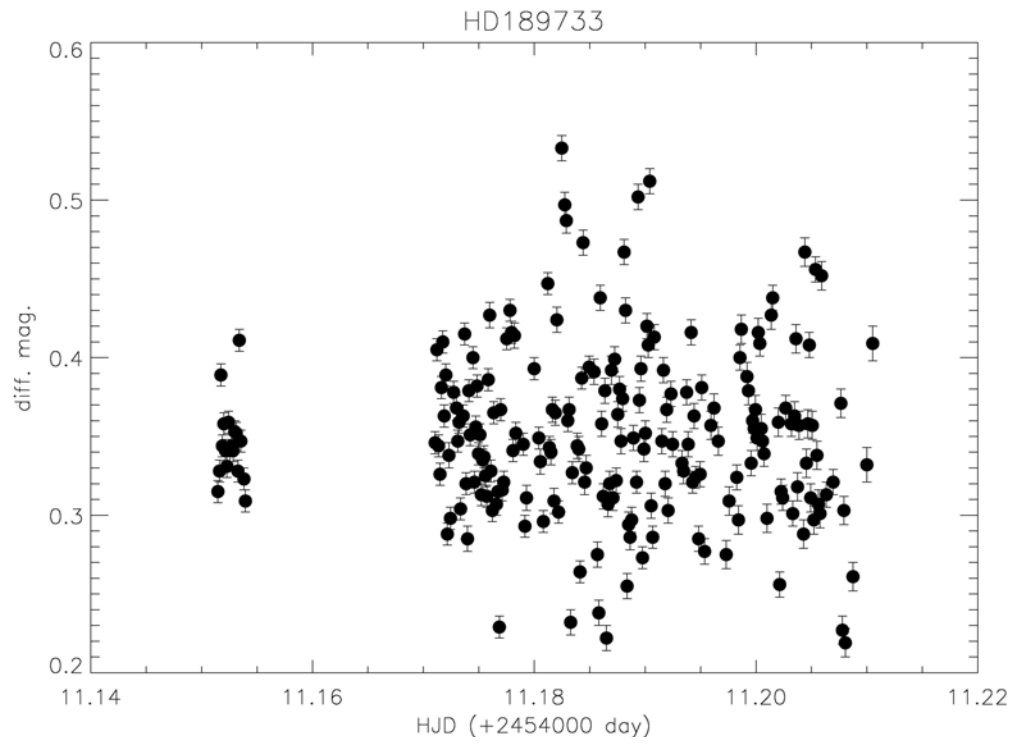
圖十三、2006/08/05 光變曲線圖 (R 濾鏡)



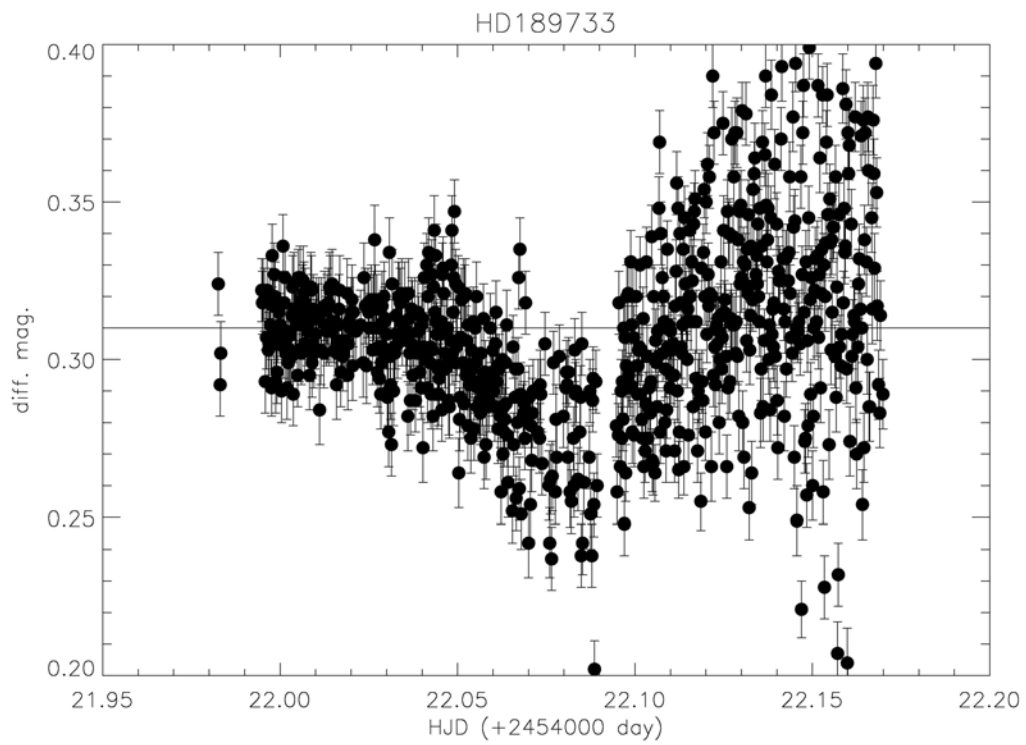
圖十四、2006/08/14 光變曲線圖 (R 濾鏡)



圖十五、2006/08/23 光變曲線圖 (R 濾鏡)



圖十六、2006/10/02 光變曲線圖 (R 濾鏡)



圖十七、2006/10/13 光變曲線圖 (R 濾鏡)

圖十，為 2006 年 11 月 8 日使用 B 濾鏡曝光拍攝，分析出來的誤差範圍約在 3% 左右。根據理論計算出來的時間，這天並沒有凌日現象的發生。

圖十一，為 2006 年 11 月 9 日使用 B 濾鏡曝光拍攝，分析出來的誤差範圍約在 4% 左右。根據理論計算出來的時間，這天並沒有凌日現象的發生。

圖十二，為 2006 年 12 月 2 日使用 B 濾鏡曝光拍攝，分析出來的誤差範圍約在 5% 左右。根據理論計算出來的時間，應在 706.99 (HJD +2453000 days) 時發生凌日現象；我們發現約在 707.05 附近的時候，有略為下降的趨勢，初步研判是行星凌日造成的。

圖十三，為 2006 年 8 月 5 日沒有使用濾鏡曝光拍攝，分析出來的誤差範圍約在 17% 左右。根據理論計算出來的時間，應在 953.24 時發生凌日現象；但因為這天天氣與仰角因素，使得誤差太大，以致無法確認。

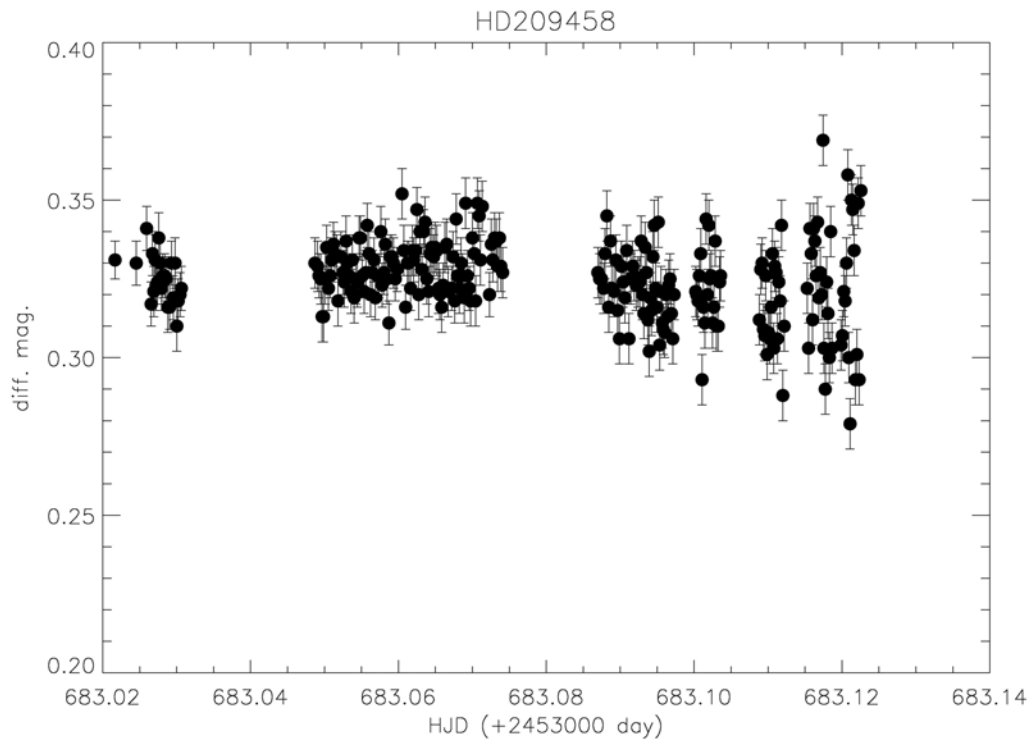
圖十四，為 2006 年 8 月 14 日使用 R 濾鏡曝光拍攝，分析出來的誤差範圍約在 30% 左右。根據理論計算出來的時間，應在 962.36 時結束凌日現象；卻因為觀測時的仰角低於 40 度，使得誤差太大，而無法確認。

圖十五，為 2006 年 8 月 23 日使用 R 濾鏡曝光拍攝，分析出來的誤差範圍約在 6% 左右。根據理論計算出來的時間，應在 971.24 時結束凌日現象；但也因為觀測時的仰角介於 30 到 40 度間，故無法精確測光。

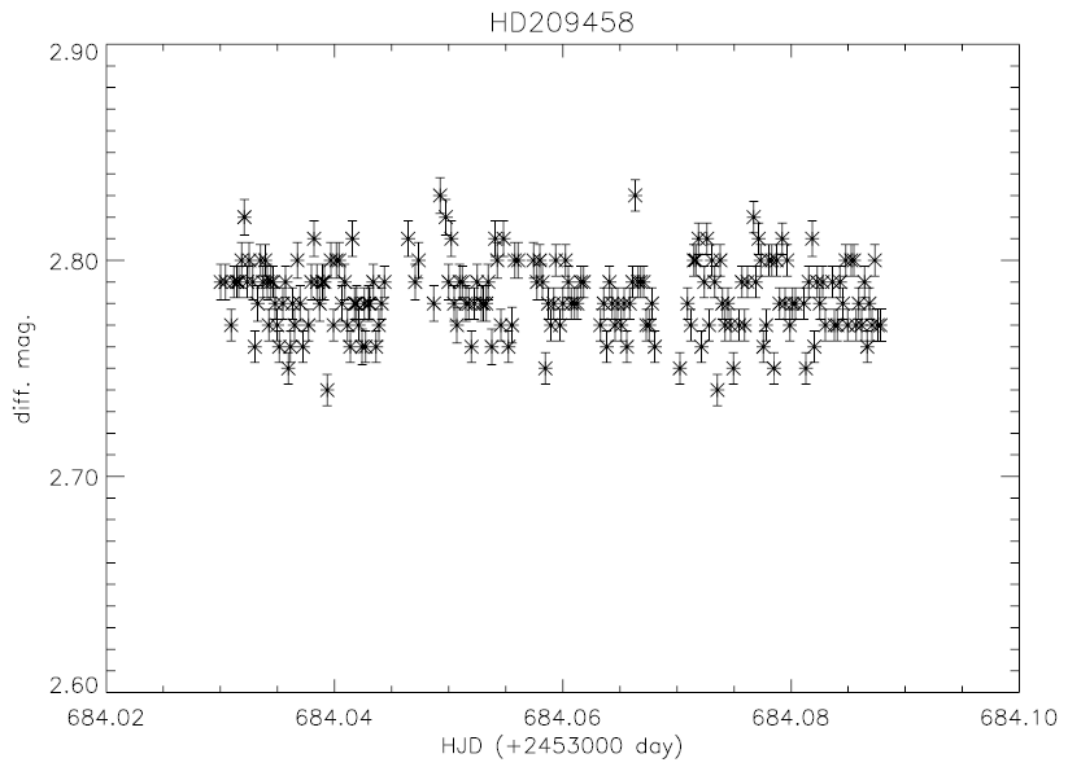
圖十六，為 2006 年 10 月 2 日使用 R 濾鏡曝光拍攝，分析出來的誤差範圍約在 30% 左右。根據理論計算出來的時間 (HJD +2454000 days)，應在 11.19 時結束凌日現象；但這天同樣因為仰角過低，無法判斷。

圖十七，為 2006 年 10 月 13 日使用 R 濾鏡曝光拍攝，分析出來的誤差範圍約在 4% 左右。根據理論計算出來的時間，應在 22.02 時發生凌日現象；我們發現約在 22.04 附近時，略有下降的趨勢，之後在 22.12 時，有回升的趨勢，初步研判是行星凌日造成的。

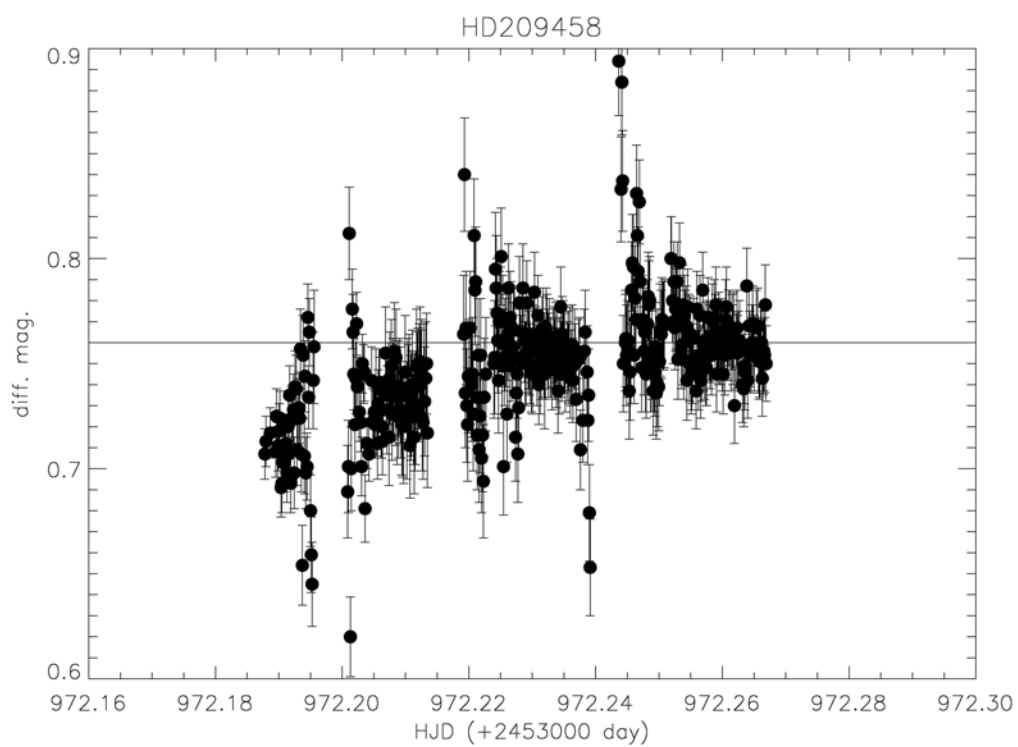
2.第二目標 HD 209458：



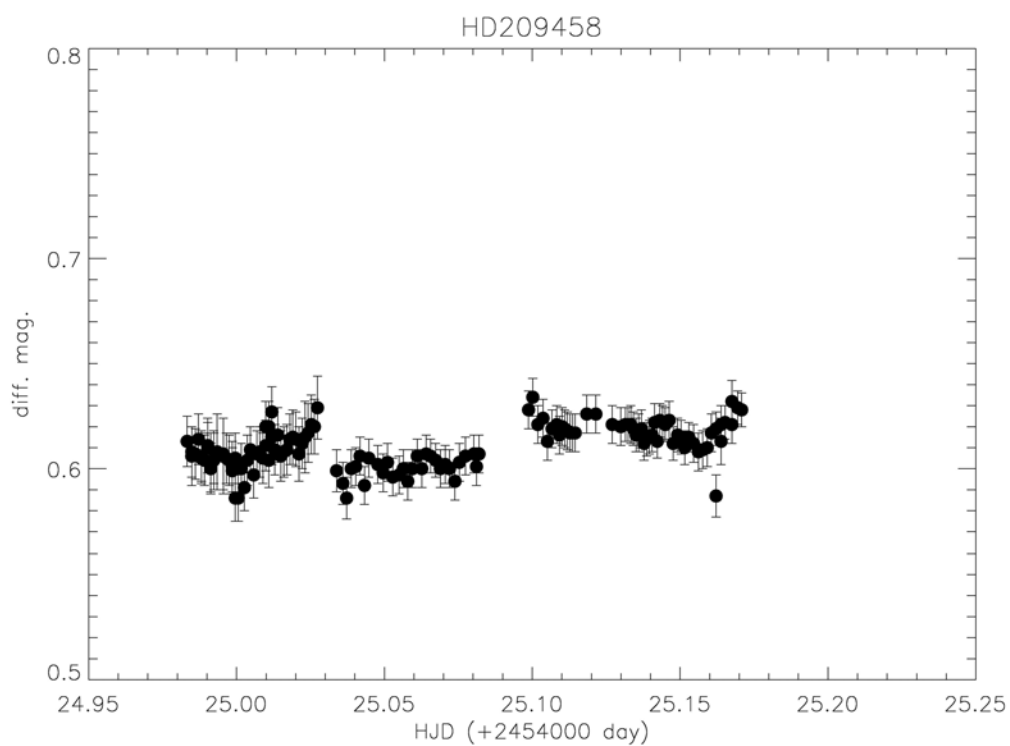
圖十八、2005/11/08 光變曲線圖 (B 濾鏡)



圖十九、2005/11/09 光變曲線圖 (B 濾鏡)



圖二十、2006/08/24 光變曲線圖 (R 濾鏡)



圖二十一、2006/10/16 光變曲線圖 (H α 濾鏡)

圖十八，為 2005 年 11 月 8 日使用 B 濾鏡曝光拍攝，分析出來的誤差範圍約在 3% 左右。根據理論計算出來的時間 ($HJD + 2453000$ days)，應在 683.07 時發生凌日現象；很可惜的是我們並沒有拍到 683.07 時的影像。不過前後比對一下，發現的確約在 683.07 附近時，有略為下降的趨勢，初步研判是行星凌日造成的。

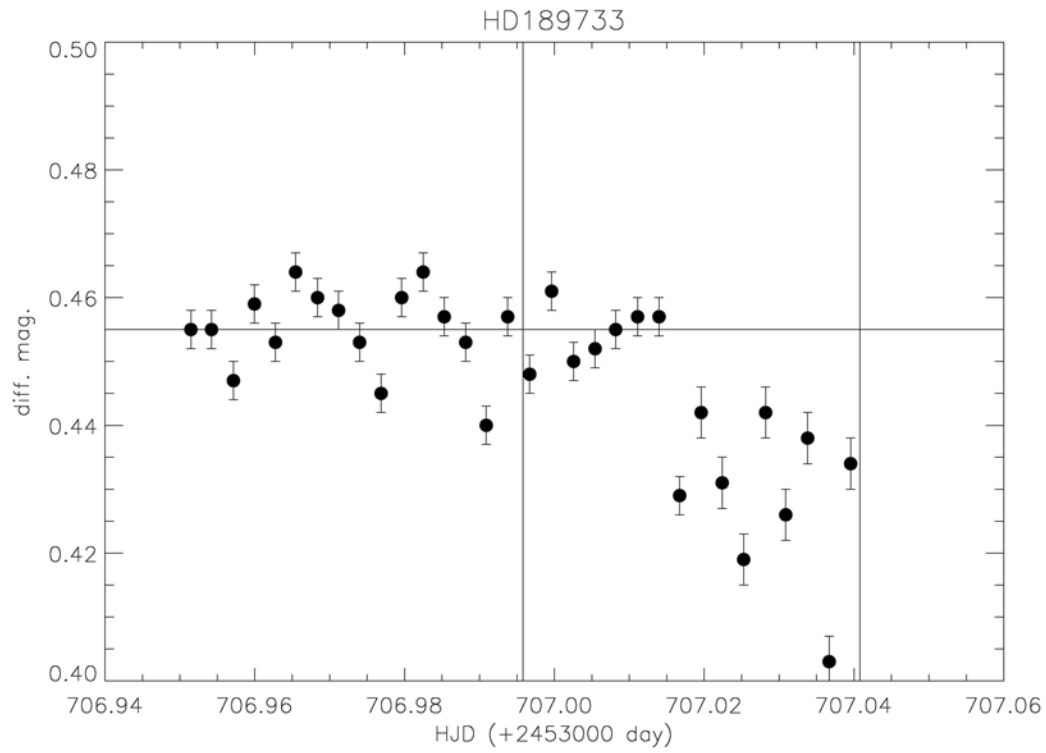
圖十九，為 2005 年 11 月 9 日用 B 濾鏡曝光拍攝，分析出來的誤差範圍約在 8% 左右。根據理論計算出來的時間，此時並沒有凌日現象的發生。而誤差範圍變大的原因是，這天選取的參考星與其他天不同，原本的參考星因不在星場中而無法使用。

圖二十，為 2006 年 8 月 24 日使用 R 濾鏡曝光拍攝，分析出來的誤差範圍約在 3% 左右。根據理論計算出來的時間，應在 972.25 時結束凌日現象；我們發現約在 972.25 附近時，有略為上升的趨勢，初步研判是凌日現象結束。

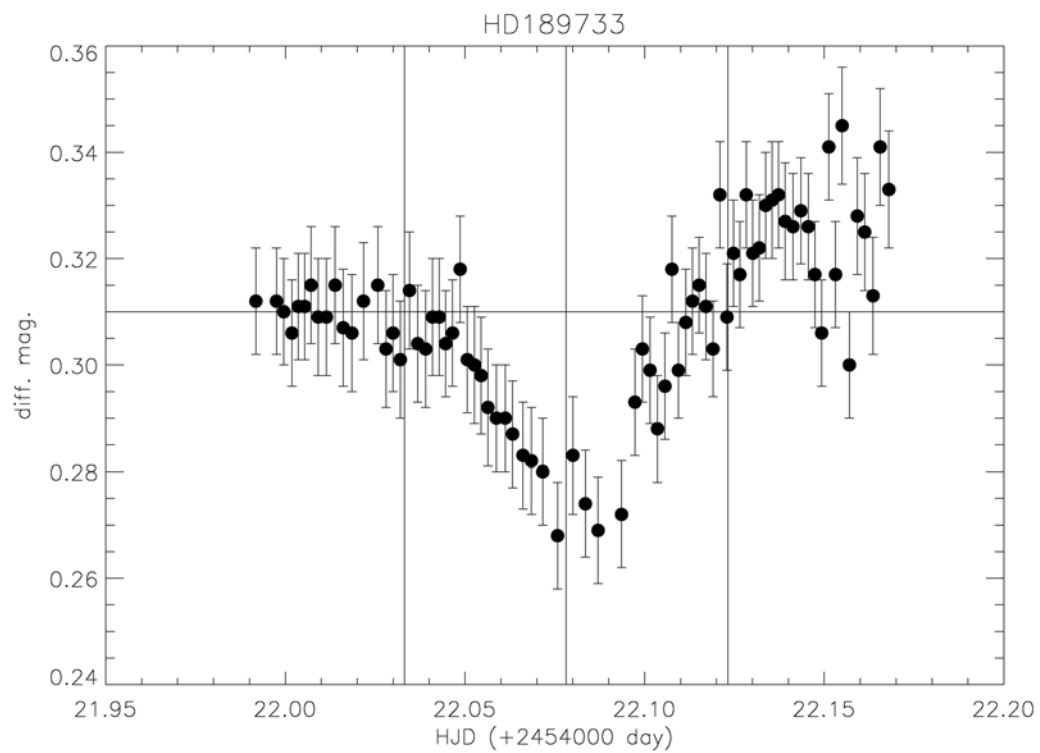
圖二十一，為 2006 年 10 月 16 日使用 $H\alpha$ 濾鏡曝光拍攝，分析出來的誤差範圍約 2% 左右。根據理論計算出來的時間 ($HJD + 2454000$ days)，應在 24.97 時發生凌日現象，並於 25.12 時結束凌日現象；可惜的是我們並沒有拍到 24.97 這個關鍵時段，也沒有拍到 25.09 附近的關鍵時段，但在 24.97 後面 (24.99 附近) 發現有略為下降的趨勢，而在 25.12 前面，也有略為上升的趨勢，初步研判是行星較完整的凌日現象。

二、Bin 圖

1. 第一目標 HD 189733：



圖二十二、2005/12/02 Bin 圖 (B 濾鏡)

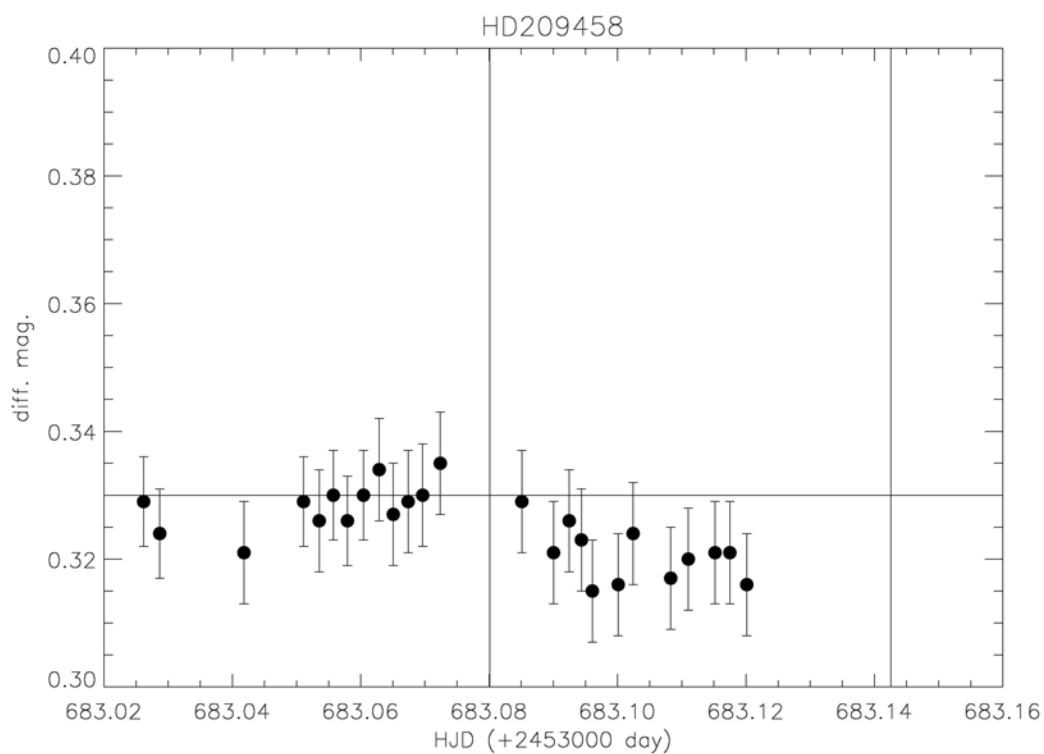


圖二十三、2006/10/13 Bin 圖 (R 濾鏡)

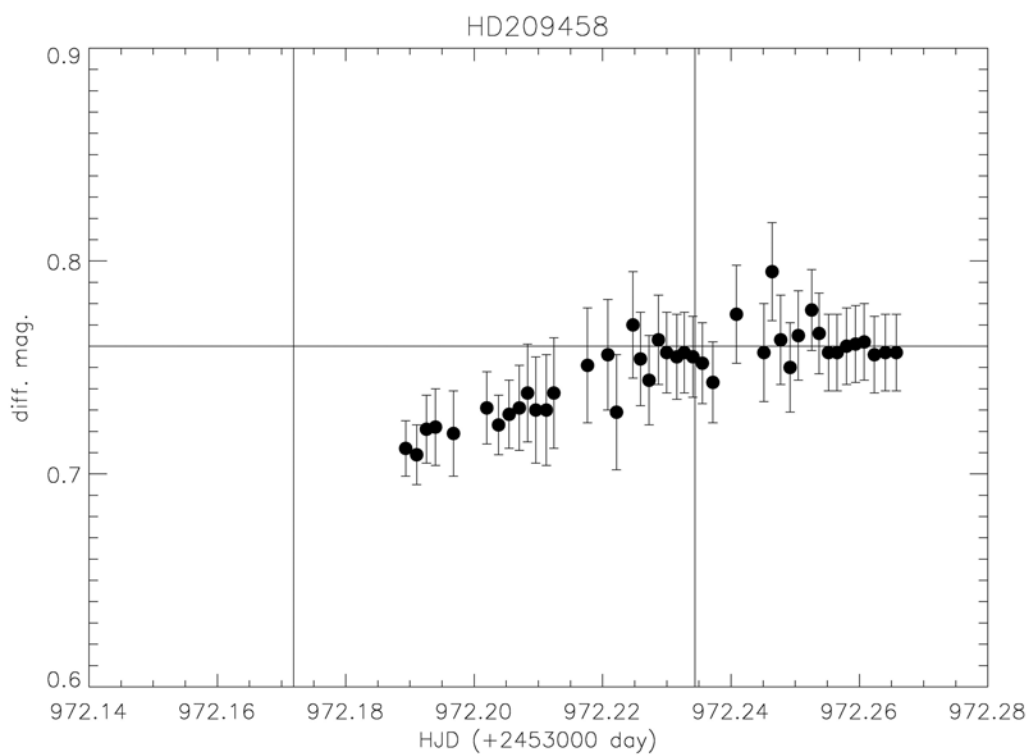
圖二十二，用圖十四的資料點做完 Bin 後，原本約為 4% 的誤差範圍，縮小為 3%。然後畫出標準線後，可以明顯看出來下降的趨勢，其幅度約為 0.025 星等 (mag)。

圖二十三，用圖十七的資料點做完 Bin 後，原本約為 4% 的誤差範圍，縮小為 2%。畫出標準線後，也可以明顯看出來下降與上升的趨勢，其幅度約為 0.03 星等；我們認為我們看到一次完整的凌日現象。

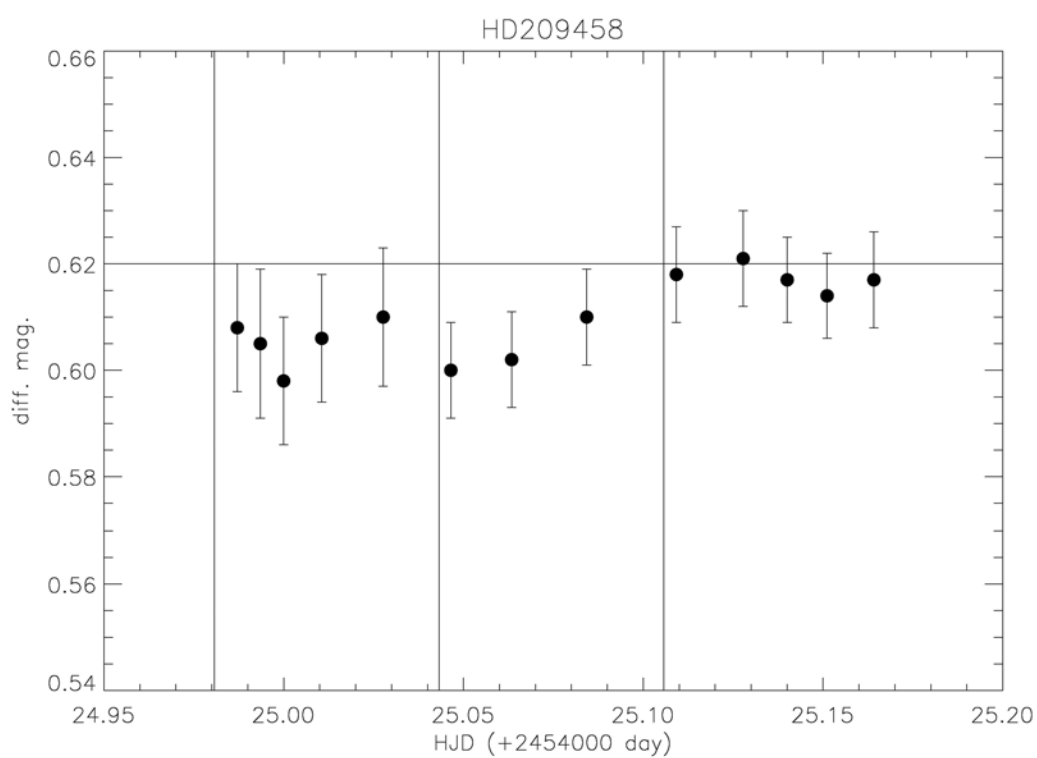
2. 第二目標 HD 209458：



圖二十四、2005/11/08 Bin 圖 (B 濾鏡)



圖二十五、2006/08/24 Bin 圖 (R 濾鏡)



圖二十六、2006/10/16 Bin 圖 (H α 濾鏡)

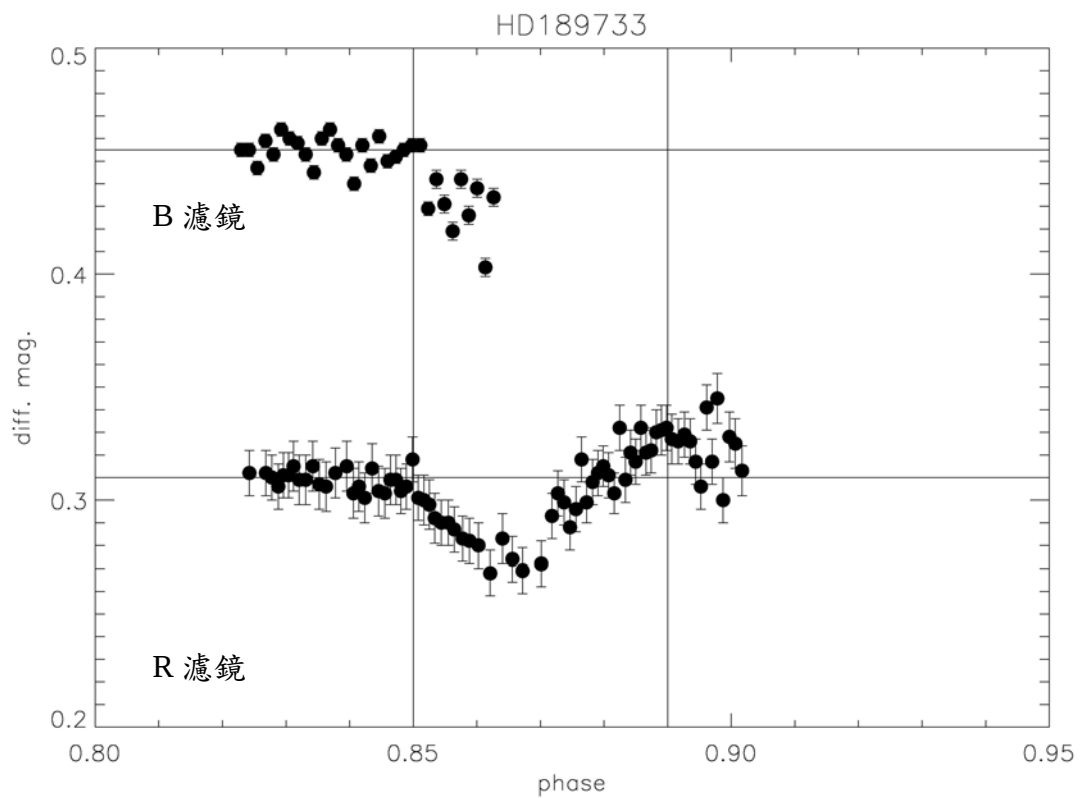
圖二十四，用圖十八的資料點做完 Bin 後，原本約為 3% 的誤差範圍，縮小為 2%。然後畫出標準線後，可以明顯看出來下降的趨勢，其幅度約為 0.01 星等。

圖二十五，用圖二十的資料點做完 Bin 後，原本約為 3% 的誤差範圍，雖然還是 3%，但畫出標準線後，可以明顯看出來上升的趨勢，其幅度約為 0.03 星等。

圖二十六，用圖二十一の資料點做完 Bin 後，原本約為 2% 的誤差範圍，縮小為 1%。畫出標準線後，可以明顯看出來上升與下降的趨勢，其幅度約為 0.02 星等。

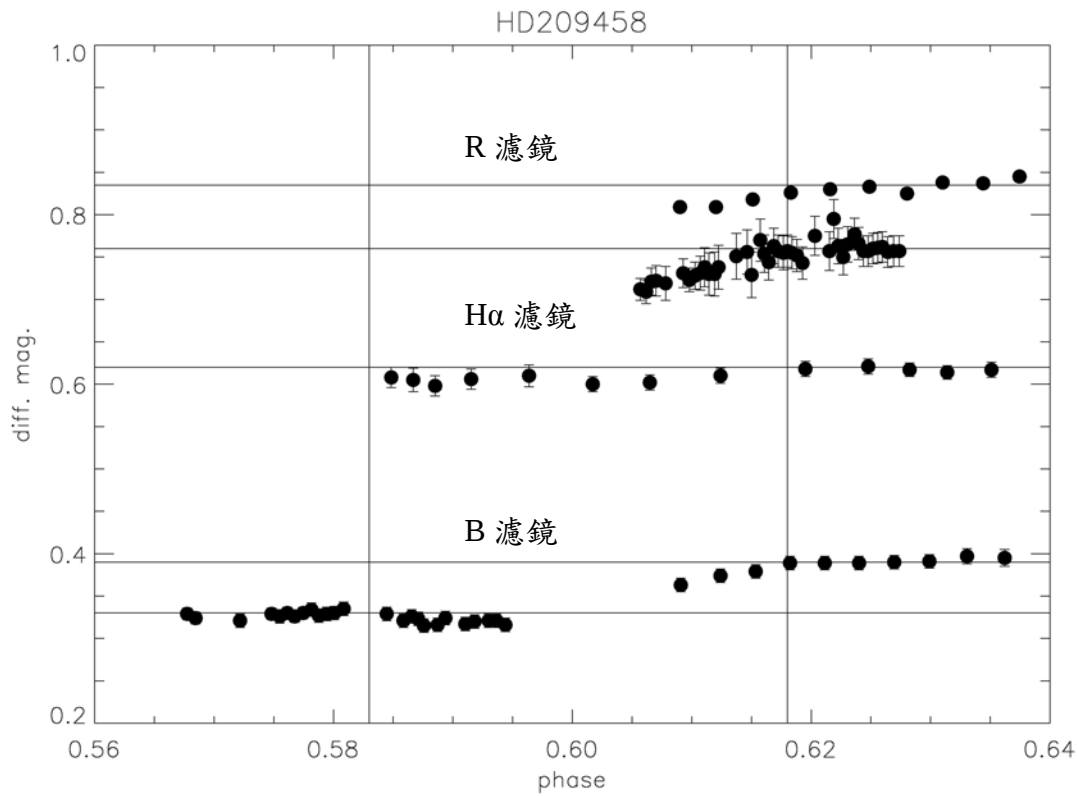
三、相位圖

1. 第一目標 HD 189733



圖二十七、HD 189733 相位圖

2.第二目標 HD 209458



圖二十八、HD 209458 相位圖

圖二十七，把所有 HD 189733 做過處理的 Bin 資料，由儒略日轉成相位的關係，然後我們把它放大來看，也就是只取觀測到凌日現象的時間，可以發現幾乎都在同一時間（約在 0.85 左右）有下降的趨勢，這樣意味著我們看到的是 HD 189733 真實且具有週期性的凌日現象。

圖二十八，把所有 HD 209458 做過處理的 Bin 資料，由儒略日轉成相位的關係，放大來看，可以發現幾乎在同一時間（約在 0.58 左右）有下降的趨勢，且在同一時間（約在 0.61 左右）有上升的趨勢，這樣也意味著我們看到的是 HD 209458 真實且具有週期性的凌日現象。

四、系外行星參數

1. 第一目標 HD 189733：

觀測到完整的凌日現象後，利用光變曲線去計算行星的參數，取得的數值如下表六：

表六、公式所需參數表

參數	數值
ΔF	0.028
t_{flat}	0.02193
t_T	0.07784
週期	2.218573 ^a

(a : Bakos, 2006)

得到的數值如下表七：

表七、HD 189733 b 參數表

參數 (單位)	數值
行星半徑 (木星半徑)	1.242
軌道傾角 (度)	88.94
恆星質量 (太陽質量)	0.82 ^a
恆星半徑 (太陽半徑)	0.758 ^b
軌道半徑 (天文單位)	0.03115

(a : Pont, 2005, b : Masana, 2006)

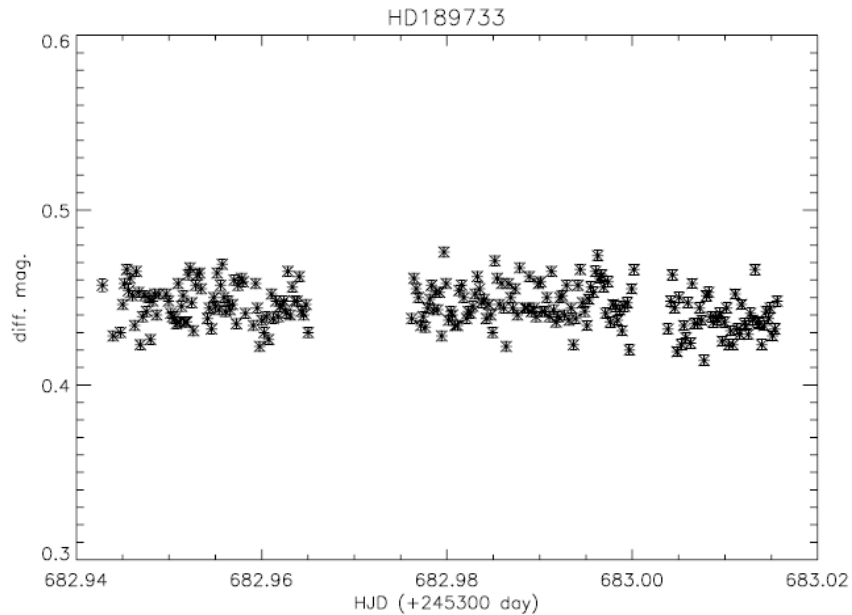
2. 第二目標 HD 209458：

得到的光變曲線，並未包含了完整的凌日現象，所以並沒有結果。

柒、討論

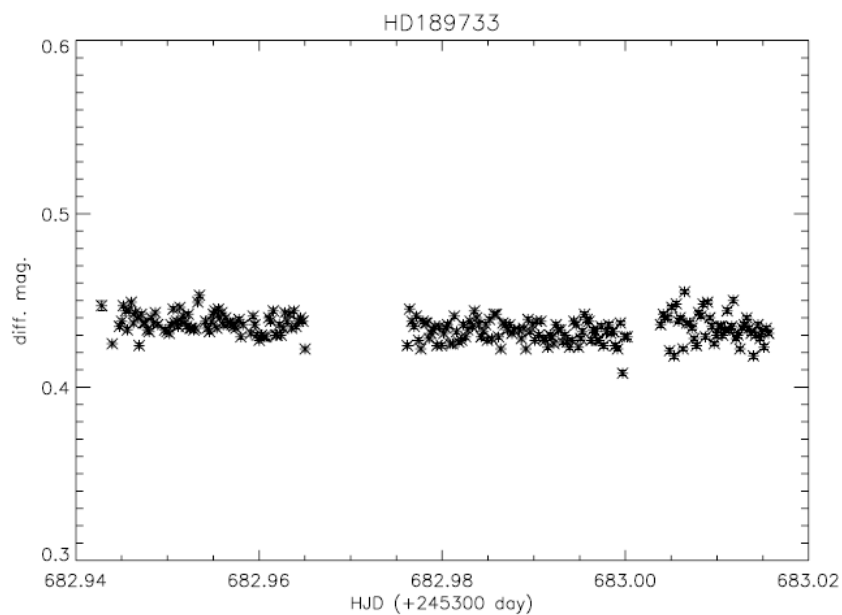
1. 光度測光問題：

初次分析處理完 2006/11/08 之後，發現在光變曲線圖中的資料點與誤差範圍不大符合。因為本身測光誤差僅只有 0.2%，但誤差範圍卻有近 5%，如下圖二十九：



圖二十九、初次分析光變曲線圖

討論後，在測光技術上不同的參數設定會影響到結果的精準度，其光圈半徑最好為星體的 4 倍 FWHM；根據統計，如果取 1 倍，只包含 66% 的星光，會造成測光不準確；4 倍則可包含 99.99% 的星光。這都是研究過程中得到的寶貴經驗，修正後的光變曲線圖，誤差約在 3%，如下圖三十：



圖三十、再次分析光變曲線圖

捌、結論

本研究成功地得到 HD 189733 完整凌日現象的光變曲線，這是首次在台灣地區觀測到系外行星凌日的現象，表示鹿林天文台的地理位置合適且證明小望遠鏡可以進行這樣精確測光的研究。

同時藉由完整凌日現象的光變曲線推得 HD 189733 的基本參數，包括行星半徑為 1.242 個木星半徑、軌道傾角為 88.94 度及軌道半徑為 0.03115 天文單位。

由本研究結果，日後可計劃使用 SLT 望遠鏡透過巡天模式，進行星場光度的監測，以行星凌日造成恆星微小光度變化為依據，做初步篩選系外行星候選之用。

玖、參考資料與其他

一、書籍期刊論文：

1. 胡瑞華，2004，在疏散星團中尋找系外行星與變星，碩士論文，中央大學天文研究所
2. 胡瑞華、葉永烜，2005，在疏散星團中尋找系外行星與變星，台北天文館學報第三期
3. F. Bouchy, S. Udry, M. Mayor, C. Moutou, F. Pont, N. Iribarne, R. Da Silva, S. Illovaisky, D. Queloz, N.C. Santos, D. Segransan, and S. Zucker, 2004, ELODIE metallicity-biased search for transiting Hot Jupiters II. A very hot Jupiter transiting the bright K star HD189733
4. G. 'A. Bakos, H. Knutson¹, F. Pont, C. Moutou, D. Charbonneau, A. Shporer, F. Bouchy, M. Everett, C. Hergenrother, D. W. Latham, M. Mayor, T. Mazeh, R. W. Noyes, D. Queloz, A. P' a and S. Udry, 2006, REFINED PARAMETERS OF THE PLANET ORBITING HD 189733
5. Kaisey, M., & Eric, A. 2002, ApJ, 580, L171
6. Lomb, N.R., 1976, Ap. Sp. Sci., 39, 447
7. Mall'en-Ornelas G., Seager, S., Yee, H.K.C., Minniti, D., Gladders, M.D., Mall'en-Fullerton G.M., & Brown, T.M., 2003, ApJ, 582, 1123
8. Mayor, M., & Queloz, D., 1995, Nature, 378, 355
9. P. R. McCullough, J. E. Stys, J. A. Valenti, S. W. Fleming, K. A. Janes, and J. N. Heasley, 2005, The XO Project: Searching for Transiting Extrasolar Planet Candidates, Asp, 117, 783
10. Seager, S., & Mall'en-Ornelas G, 2003, ApJ, 585, 1038
11. Stellingwerf, R.F, 1978, ApJ, 224, 953
12. Udalski, A., Z' ebrun', K., Szyman'ski, M., Kubiak, M., Soszyn', I., Szewczyk,

- O., Wyrzykowski, _L., & Pietrzyński, G. 2002a, Acta Astron., 52, 115
13. Udalski, A., et al. 2002b, Acta Astron., 52, 1
14. Udalski, A., Szweczyk, O., Zebur, K., Pietrzyński, G., Szymanski, M., Kubiak, M., Soszyński, I., & Wyrzykowski, _L. 2002c, Acta Astron., 52, 317
15. Wolszczan, A planetary system around the millisecond pulsar PSR1257 + 12, 1992, Nature, 355, p145

二、網路：

1. ASP—The Arizona Search for Planets
美國亞利桑那州系外行星搜尋計畫：
<http://www.psi.edu/%7Eesquerdo/asp/asp.html>
2. The Extrasolar Planets Encyclopaedia 系外行星大百科：
<http://exoplanet.eu/>
3. ESO—European Southern Observatory 歐洲南方天文台：
<http://www.eso.org/>
4. ESP
<http://www.psi.edu/esp/method.html>
5. MPS
<http://www.nd.edu/~srhie/MPS/>
6. The Geneva Extrasolar Planet Search Programme
日內瓦系外行星搜尋計畫：
<http://obswww.unige.ch/~udry/planet/planet.html>
7. Stare Project：
<http://www.hao.ucar.edu/public/research/stare/stare.html>
8. Transitsearch 系外行星凌日時間網站：
<http://www.ucolick.org/~laugh/>
9. 觀測通知：到目前為止觀測條件最佳的凌日行星：
<http://www.tam.gov.tw/news/2005/200510/05101601.htm>

【評 語】 040511 太陽系外行星 HD 189733 b 和 HD 209458 b
光度測量與分析

本作品使用鹿林山恆星監測數據推導系外行星的各項參數，所觀測的對象已被證實具有行星環繞，同時行星諸元已見諸各期刊論文，本作品僅為驗證及複製的工作，且數據質與量均嫌不足，較為可惜。