

# 臺灣二〇〇七年國際科學展覽會

科 別：地球與太空科學

作品名稱：太陽系外行星光度研究

學校 / 作者：臺北市立麗山高級中學

陳漢洲

## 作者簡介



大家好。我是麗山高級中學二年級學生陳漢洲。

從小就對科學很有興趣，時常讀一些關於科學的著作與雜誌。

在一次觀星時，突然有人跟我說，「你知道嗎？那些都是好幾年前發出來的光耶！」就是在那次偶然的機遇下，聽見了那句話，也從此愛上了天文！

我對天文很熱衷，也希望能走這條道路，期望能在未來更專精！

## 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恆星碟面時，會造成光度略微下降，稱之為凌日現象 (transit)。本研究便是利用鹿林天文台 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。

我們得到約 4000 張影像，再經過影像修正與資料分析後，我們作出凌日光變曲線圖、Bin 圖及相位圖，並從中探討其特性。

經分析判斷後，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 濾鏡所拍攝；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。

並由光變曲線，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 度以及軌道半徑為 0.03115 天文單位。

## *Abstract*

Since 1995, more than 200 extra-solar planets have been found. Until today, astronomers still make efforts in searching extra-solar planets because it's one of the most important projects in this century. During the crossing by the stellar disks (i.e., transits), the exoplanets will cause the brightness to decrease by a small amount.

In the project, we have focused on the observations of two known transit exoplanets, HD 189733 b and HD 209458 b. The photometric observations were performed with the 40-cm SLT telescope on the Lulin Observatory. The results from the image procuring, data reduction and analysis are presented. We accrue and plot the light curve, bin and phase.

We found out that HD 189733 has two transit ingresses with B, R band, and HD 209458 has two transit ingresses, two transit egresses with B, R, H $\alpha$  band on phase.

We figure out planetary parameters,  $R_p$  is  $1.242 R_J$ , inclination is  $88.94^\circ$  and orbital semi-major axis is  $0.03115 AU$  by transit light curve.

## 目次

摘要.....	p.3
<i>Abstract</i> .....	p.4
壹、緒論.....	p.6
貳、研究方法.....	p.12
參、研究結果與討論.....	p.27
肆、結論與未來展望.....	p.46
伍、參考文獻.....	p.47
陸、附錄.....	p.49

## 壹、緒論

### 一、研究動機

於一次偶然的機遇下，我在台北市立天文館的電子報上看到一則有關係外行星的報導，內容是關於到目前為止觀測條件最佳的系外行星 HD 189733 b 的報導。這類研究在天文學上是很新、而且是突破性的研究題材，因為不發光的行星相對於能自行發光的恆星而言，就像是個隱形天體。近年來許多天文學家不斷地搜尋、發現、觀測及研究系外行星，一步步描繪出太陽系以外的行星運作模式及行星性質，進而探討行星系統起源的理論。看到相關研究新知的陸續報導，引發我強烈的興趣，猶如親臨研究最前線一般，對於系外行星想要有更進一步的了解與探討。

### 二、研究目的

1. 拍攝系外行星凌日現象 (transit) 時的影像。
2. 繪製系外行星凌日光變曲線 (light curve)。
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。

### 三、文獻探討

系外行星 (extra-solar planet)，顧名思義為太陽系以外的行星。早在 1992 年，Wolszczan 第一次在編號 PSR1257+12 的波霎 (pulsar) 旁發現了三顆質量接近地球的系外行星 (Wolszczan, 1992)。直到 1995 年，Mayor 和 Queloz 才又利用恆星運行所產生的都卜勒效應 (Doppler effect)，偵測到另一顆環繞在類似太陽恆星 (sun-like star) 的系外行星，51Peg b (Mayor & Queloz, 1995)。至今，我們已發現超過 200 顆的系外行星 (系外行星大百科，<http://exoplanet.eu/>)。

系外行星研究最初的目的在於，當人們抬頭仰望星空時，想知道是否有別的行星存在於太陽系以外？而現在則是為了想知道是否有外星智慧生命？第一步，便是尋找系外行星。

至今，在已知的系外行星中，約有 40 顆的運行軌道小於 0.05 AU，證實這類靠近其主星的巨大行星 (close-in extra-solar giant planets) 與太陽系大不相同，若能找到更多類似的系外行星並確定其基本參數，則可以使行

星系統的形成與演化的理論更加完備。

自1995年來，絕大部分的系外行星都是利用都卜勒視向速度變化，經過光譜紅移與藍移的分析而發現的，目前由此方法已經找到了近200顆的系外行星。但此方法需要解析度很高的光譜儀，並受限於只能觀測亮星，對於較暗的星，要使用其他方法。

根據過去觀測雙星系統（最有名的是天狼星與其伴星），發現其軌道繞同一質心運轉；而系外行星也會造成此種現象，因此可用相同的方法進行搜尋，但缺點是需要長時間的確認，且無法找到質量過小的行星。

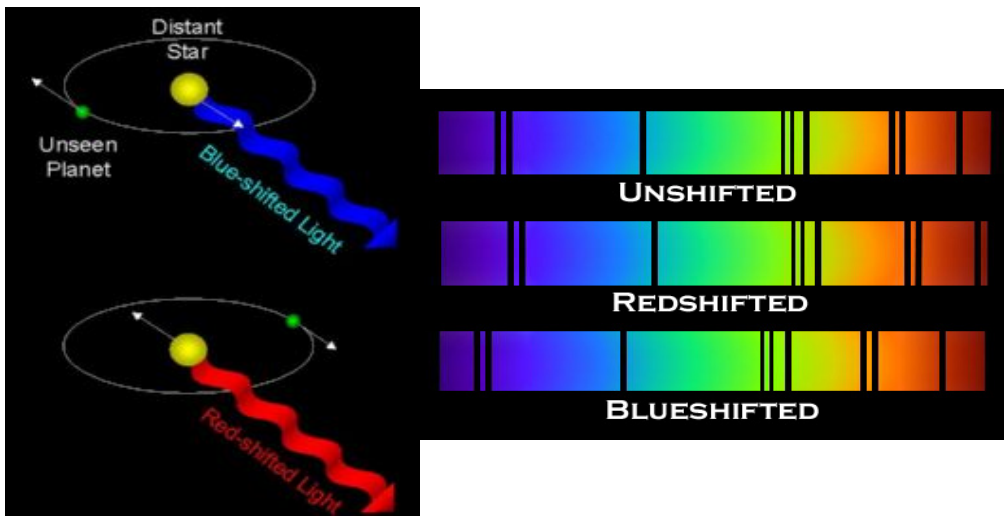
而近年來，進展相當迅速是利用觀測凌日現象（transit）所產生的光度變化搜尋系外行星。像OGLE（Optical Gravitational Lensing Experiment）團隊，在2001年(Udalski et al. 2002a;b)，往銀河中心觀測了3個密集星場，發現有59顆有凌日現象的候選星；在2002年(Udalski et al. 2002c)又對船底座方向觀測了3個密集星場，發現62顆有凌日現象的候選星。此方法的優點在於可同時監測整個目標星場，大幅提高找到行星的機率，且可定出較精準的質量與半徑（Seager, 2003），並由此推測出密度等參數，另外還能觀測比光譜更遠更暗的星。但是，此方法對於望遠鏡系統及資料處理方法精確度要求非常高，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的分析。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。

關於最前面提到在1992年觀測波霎而發現系外行星，但因為現今主要目的在於尋找外星智慧生命，而波霎為超新星爆炸後的殘骸，跟其他主序星不同，所以不被列入探討的範圍。

目前在觀測上，大致利用下面五種方法尋找系外行星：

1. 都卜勒效應所產生的視向速度變化（Radial velocity variation）
2. 系外行星因質量與彼此距離造成恆星位置的變化（Astrometric wobbles）
3. 凌日現象所產生的光度變化（Transit）
4. 微重力透鏡的光度變化（Gravitational microlensing of light）
5. 紅外線波段觀測（Infrared direct imaging）

## 1. 視向速度測量法 (Radial velocity measurement)



圖一、視向速度測量法示意圖

(來源：ESP, <http://www.psi.edu/esp/method.html>)

恆星在被系外行星繞行時，受到重力的影響，產生輕微晃動，如果從光譜上看，根據都卜勒效應，會產生微小的週期性紅移與藍移，藉此可得知系外行星的存在。此方法受限於行星公轉軌道平面須與我們視向夾角夠小，且須由裝載高解析度光譜儀的望遠鏡來觀測，才能看出細微的變化。

## 2. 系外行星因質量與彼此距離造成恆星位置的變化 (Astrometric wobbles)



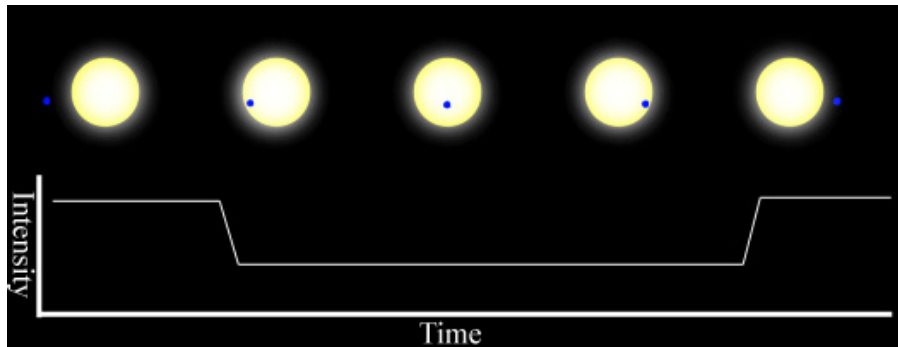
圖二、恆星與行星互繞示意圖

(來源：ESP、Stare project, <http://www.psi.edu/esp/method.html>、<http://www.hao.ucar.edu/public/research/stare/search.html#methods>)

恆星在被系外行星繞行時，受到重力的影響，因而繞彼此共同質心運轉，當行星公轉平面與我們視線方向夾角接近垂直時，可以觀測繞行時所產生的位置變化，因而推知系外行星的存在。



### 3. 凌日現象所產生的光度變化 (Transit)

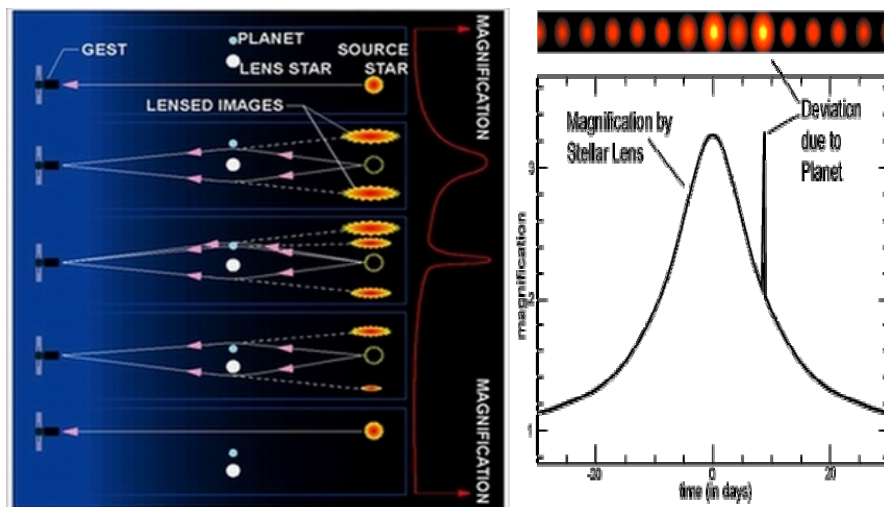


圖三、凌日現象時的光度變化示意圖

(來源：ESP, <http://www.psi.edu/esp/process.html>)

如果系外行星公轉軌道平面與我們視向幾近平行時，除了產生都卜勒效應外，當行星繞過我們視線時，會因為凌日現象而遮掩了恆星的光，產生細微的光度變化，如此可推知系外行星的存在。

### 4. 微重力透鏡的光度變化 (Gravitational microlensing of light)



圖四、微重力透鏡效應示意圖

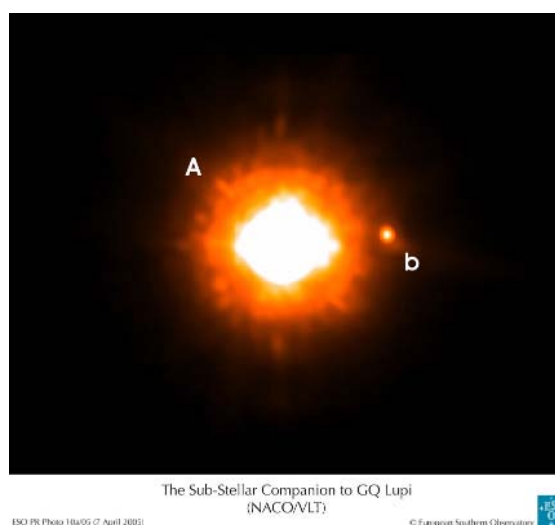
(來源：MPS, <http://www.nd.edu/~srhie/MPS/>)

根據愛因斯坦的廣義相對論，光線會因受到重力場影響而彎曲，造成類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）。系外行星也可以利用類似的方法進行搜尋，由上圖四來看，當有系外行星系統的恆星通過遠方的發光天體時，除了本身恆星所產生的重力透鏡效應外，系外行星也會因為微重力透鏡效應的發生，而有微擾的情況，使遠方的發

光天體有光度上的變化，便可猜測系外行星的存在；此方法可較準確地測得系外行星的質量。目前證實由這個方式觀測到的系統有OGLE 2003-BLG-235/MOA 2003-BLG-53、OGLE 2005-BLG-071、OCLE-05-169L、OCLE-05-390L四例。

微重力透鏡的光度變化（gravitational microlensing of light），因為發生機率小且不容易發現，有很多的發展空間。

### 5.紅外線波段觀測（Infrared direct imaging）



圖五、系外行星 GQ Lup 影像

（來源：ESO，<http://www.eso.org/>）

紅外線波段的觀測（infrared direct imaging）則是需要非常尖端的儀器，配合大尺寸的望遠鏡與高解析度的CCD在地面天文台或太空望遠鏡，才有可能進行這樣的觀測。但有可能觀測到是棕矮星（brown dwarf）。目前觀測到的系統有下列表一：

表一、直接觀測的系統

（來源：系外行星大百科，<http://exoplanet.eu/>）

星碼	質量[ $M_J$ ]	軌道距離[ AU ]
2M 1207	5 ( $\pm$ 13)	46 ( $\pm$ 5)
GQ Lup	21.5 ( $\pm$ 20.5)	103 ( $\pm$ 37)
AB Pic	13.5 ( $\pm$ 0.5)	275
SCR 1845	> 8.5	> 4.5

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，如下表二：

表二、基本參數表

基本參數 basic parameters	單位 unit
恆星質量 star mass	[ $M_{\odot}$ ]
恆星半徑 star radius	[ $R_{\odot}$ ]
光譜類型 spectral type	$O$ 、 $B$ 、 $A$ 、 $F$ 、 $G$ 、 $K$ 、 $M$
溫度 temperature	[ $K$ ]
行星質量 planet mass	[ $M_J$ ]
行星半徑 planet radius	[ $R_J$ ]
行星密度 planet density	[ $g\ cm^{-3}$ ]
公轉週期 period	[ $days$ ]
軌道距離 orbital semi-major axis	[ $AU$ ]
軌道與黃道面的傾角 inclination angle	[ $^{\circ}$ ]
視向速度 radial velocity	[ $ms^{-1}$ ]

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，其他參數要由其他的方法推得。

假設恆星半徑為  $R_{\odot}$ ，行星半徑為  $R_J$ ，恆星與行星投影在平面的中心距離為  $d$ ，則由於恆星因凌日而被遮掩的面積與光度變化( $\Delta F$ )成正相關，其光度變化可用下列公式描述：

$$\Delta F = \begin{cases} 0, & 1 + p < z, \\ \frac{1}{\pi} [p^2 \kappa_0 + \kappa_1 - \sqrt{\frac{4z^2 - (1 + Z^2 - p^2)^2}{4}}], & |1 - p| < z \leq 1 + p, \\ p^2, & z \leq 1 - p, \\ 1, & z \leq p - 1, \end{cases}$$

其中

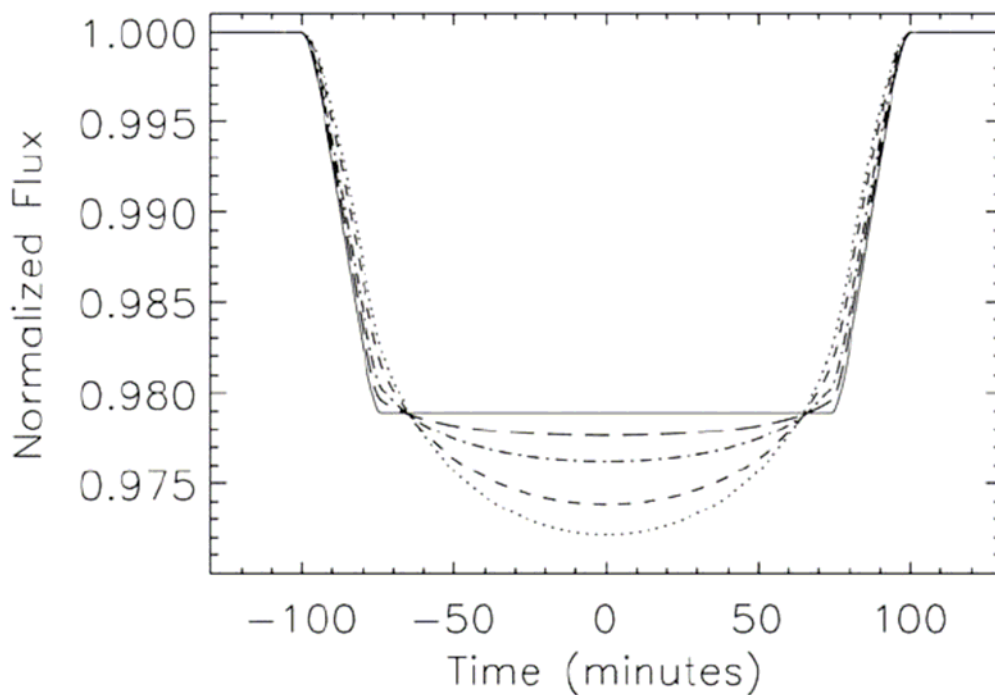
$$z = \frac{d}{R_s}; \quad p = \frac{R_p}{R_s};$$

$$\kappa_0 = \cos^{-1}[(1 - p^2 + z^2)/2z]; \quad \kappa_1 = \cos^{-1}[(p^2 + z^2 - 1)/2pz]$$

(來源：Kaisey & Eric, 2002)

系外行星凌日的機率跟行星的軌道傾角有極大的關係。若考慮軌道傾角，則須滿足  $R_p \leq a \cos i \leq R_s + R_p$  才會發生凌日現象。

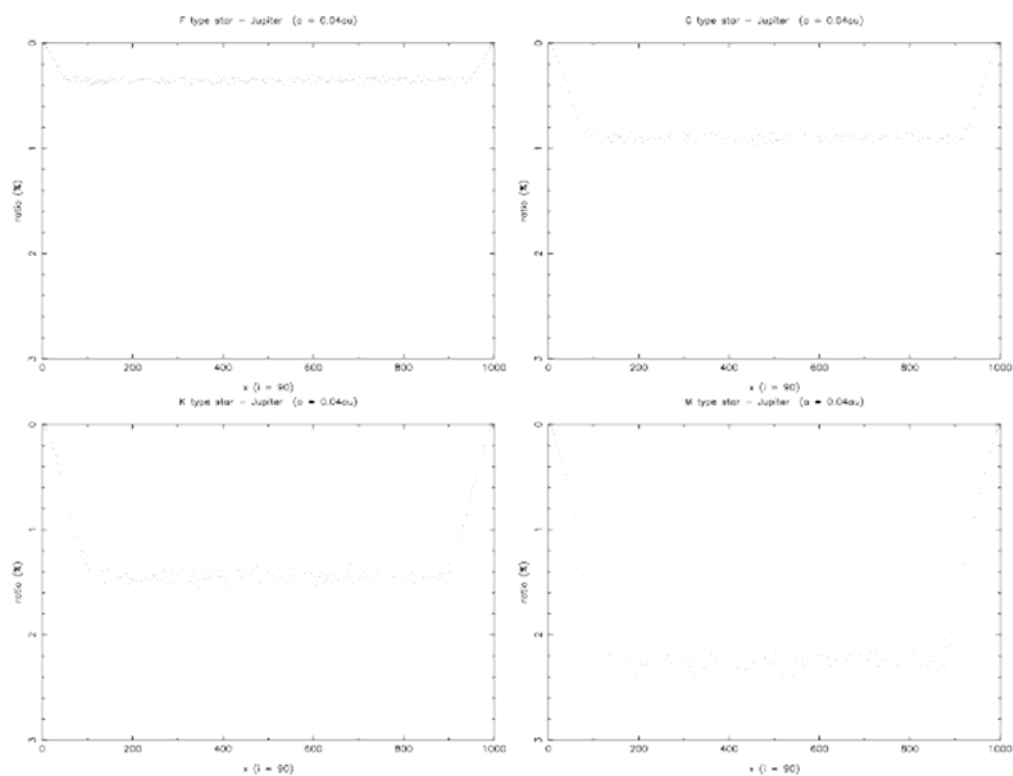
系外行星在發生凌日現象時，需要考慮臨邊昏暗效應(limb darkening)所造成的光度變化影響。圖六中實線表示沒有考慮臨邊昏暗，虛線則表示不同波段的臨邊昏暗，由上而下分別為 3、0.8、0.55、0.45  $\mu\text{m}$  (波長愈長，愈偏紅)。



圖六、臨邊昏暗效應示意圖

(來源：Mall'en-Ornelas G, 2003)

下圖七是質量為木星大小的系外行星凌日光變曲線，並環繞在光譜 F、G、K 及 M 類型的恆星中所產生的光度變化。給定相同的條件有：傾角都為 90 度、軌道距離皆為 0.05AU 並且沒有考慮臨邊昏暗效應的影響。



圖七、系外行星凌日光變曲線示意圖

(來源：在疏散星團中尋找系外行星與變星，胡瑞華，2004)

## 貳、研究方法

### 一、研究設備與器材

#### 1. 儀器與設備：

鹿林天文台 (Lulin Observatory) 地點：

經度 (longitude) : 120 d 52 ' 25 " E (+120.87361d)

緯度 (latitude) : 23 d 28 ' 07 " N (+23.46861d)

海拔 (elevation) : 2862 m

天文望遠鏡 (telescope) :

RC Optical Systems 0.41-m f/8.8

Ritchey-Chrétien

(Sne little telescope, SLT)

視場大小 (field-of-view) :

27' x 27' (單位: 角分)

影像尺寸 (image scale) :

0.78" / pixel (單位: 角秒/像素)

平均視相 (average seeing) :

1.2" ~ 1.5" (單位: 角秒)

天文專用 CCD :

Apogee Alas U42 CCD

(2048 x 2048 pixels)

濾鏡系統 (filter) :

Johnson / Cousins (Bessell)

2. 分析軟體 :

IRAF (Image Reduction and Analysis Facility) (Linux)

IDL 6.0 (Windows)

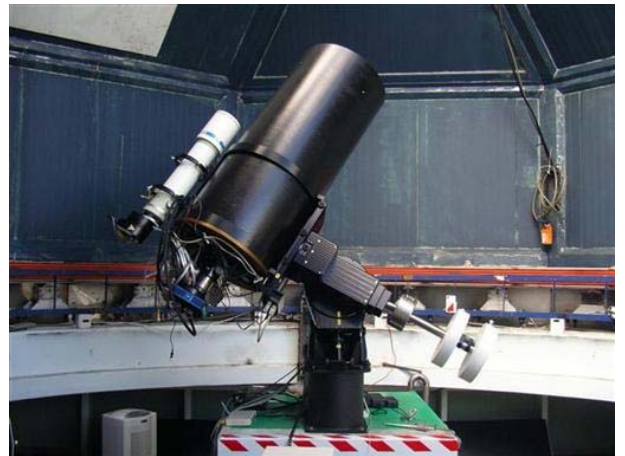
## 二、觀測目標

截至 2006 年 11 月 20 日, 在系外行星大百科 (The Extrasolar Planets Encyclopaedia) 裡公佈的 209 顆系外行星中, 有 197 顆是由視向速度測量發現, 4 顆由微重力透鏡效應發現, 4 顆由直接觀測發現, 另外 4 顆則是環繞於波霎旁。依據這些資料, 我們由視向速度測量所發現的 197 顆裡找尋目標, 才有機會觀測到凌日現象, 但目標還必須符合下列設定條件:



圖八、鹿林天文台

(來源: <http://www.lulin.ncu.edu.tw/>)



圖九、SLT 望遠鏡

(來源: <http://www.lulin.ncu.edu.tw/>)

1.公轉週期 (periods)：

因為希望能重複觀測到多個凌日現象，所以其軌道公轉週期最好短於 5 天。

2.凌日時間長度 (transit)：

由於觀測時間大約是晚間 8 點到翌日凌晨 4 點，因此凌日時間長度最好短於 5 小時，不然便需要再進一步處理。

3.光變幅度 (transit depth)：

關係到儀器的限制，太小的變化我們可能因誤差而無法判斷出來，所以幅度要大於 0.01 星等。

4.最小亮度 (magnitude ; mag)：

由於光變幅度非常微小，為了求得精確的星等，所以選擇大於 12 星等的目標星。

5.比對目標星的所在位置：

預計在夏、秋兩季進行觀測，所以要比對目標的赤經 (RA) 和赤緯 (Dec)。春分 (Spring Equinox) 3 月 21 日的中午 12:00 正上方的赤經是 0 小時；而在秋分 (Autumn Equinox) 9 月 21 日的半夜 12:00 正上方的赤經座標也是 0 小時；每個月份，星體會晚升起 2 小時，所以每月的 21 日，半夜 12 點，天頂上的星星之赤經座標，如下表三：

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
RA	8h	10h	12h	14h	16h	18h	20h	22h	0h	2h	4h	6h

表三、每月天頂赤經刻度表

由於主要觀測時間在 7、8、9 月份，所以目標的赤經最好位於 20h~0h 之間。而鹿林天文台的 SLT 望遠鏡可以看到的赤緯在 -20 以北，當然偏北一點比較好。

6.列出適合的目標：

我們依據系外行星大百科及 Transitsearch 網站裡所公佈的系外行星基本資料與凌日時間表，進行適當的篩選。將符合上述條件的目標，

列出下表四：

表四、符合條件的目標星表

目標星星碼	赤經 (RA)	赤緯 (Dec)	公轉週期 (天)	凌日時程 (分鐘)	光變幅度 (mag)	星等 (mag)
HD 189733	20 h 00 m 43 s	+ 22° 42 ' 39 "	2.218573	128.678696	~ 0.03	7.67
HD 209458	22 h 03 m 10 s	+ 18° 53 ' 04 "	3.524748	199.127776	~ 0.03	7.65
TrES-1	19 h 04 m 09 s	+ 36° 37 ' 57 "	3.030065	150.318928	~ 0.025	11.79
TrES-2	19 h 07 m 14 s	+ 49° 18 ' 59 "	2.47063	155.143337	~ 0.015	11.41

表中，符合的有 4 顆，但以赤經、光變幅度與星等三項要求來看，其中又以 HD 189733、HD 209458 最為適合。

#### 7. 由 Transitsearch 網站來擬定觀測凌日時程：(詳細請見附錄內容)

由附錄所列的表中，第一目標 HD 189733 從 5 月至 11 月間，總共有 37 天可觀測到的凌日現象，其中 13 天可做完整的觀測，其餘的皆只能觀測到某部份。而第二目標 HD 209458 在 8 月至 11 月間，則有 12 天可觀測到的凌日現象，其中 8 天可做完整的觀測，其餘的則只能觀測到某部份。

#### 8. 觀測時需注意的事項：

##### (1) 濾鏡 (filter) 的使用

因為考慮到臨邊昏暗效應的影響，所以我們盡量選擇較長的波段來觀測，R、I 濾鏡是較好的選擇。

##### (2) 曝光秒數 (exposure) 的選定

HD 189733 的視星等約為 7.67，而 HD 209458 的視星等約為 7.65，對於 SLT 望遠鏡而言是很亮的星體，因此要特別注意目標星絕對不能達到飽和 (overexpose; maximum 值接近 65535)，而且為了避開 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。

(3) 目標星的仰角 (angle of elevation)

由於光變幅度非常微小，容易受到大氣厚度及擾動的影響，因此目標星仰角最好不要低於40度。

9. 觀測資料：

絕大多數的觀測資料都來自鹿林天文台觀測助理的幫忙，其中2006/08/05則是我上山實際操作望遠鏡並進行觀測。

第一目標 HD 189733：

今年總共觀測了5天，得到2340張影像，加上去年拍攝的3天，780張影像，一共有3120張影像，統計如表十：

表十、HD 189733

<i>Date \ Filter</i>	<i>B</i>	<i>R</i>	<i>Empty</i>	<i>Total</i>
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
<i>Total</i>	780	2022	318	3120

關於天氣情況方面，我們紀錄下來，統計如下表十一：

表十一、HD 189733 觀測天氣概況

<i>Date</i>	<i>Weather</i>	月亮
2005/11/08	開始拍攝時接近天頂，seeing較穩定。	上弦月
2005/11/09	受到薄雲與水氣的因素的影響較大。	上弦月
2005/12/02	後半段影像較不佳，因仰角的關係。	上弦月
2006/08/05	一開始時有薄雲不斷飄過，影像時好時壞。	滿月
2006/08/14	天空背景受月光影響，seeing較差。	下弦月
2006/08/23	受到干擾較小，seeing大致穩定。	下弦月
2006/10/02	剛開始時有月光影響，seeing較差。	滿月
2006/10/13	後來受到月光的影響。	下弦月

備註：seeing為視相，可用來判斷天氣的優劣。

第二目標 HD 209458：

今年總共觀測了2天，得到706張影像，再加上去年拍攝的2天，470張影像，一共有1176張影像，統計如表十二：

表十二、HD 209458

<i>Date \ Filter</i>	<i>B</i>	<i>R</i>	<i>H<math>\alpha</math></i>	<i>Total</i>
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
<i>Total</i>	<i>595</i>	<i>690</i>	<i>140</i>	<i>1425</i>

而天氣統計則如下表十三：

表十三、HD 209458 觀測天氣概況

<i>Date</i>	<i>Weather</i>	月亮
2005/11/08	目標雖接近天頂，但前半段仍因雲而受影響。	上弦月
2005/11/09	大致上seeing都還算穩定。	上弦月
2006/08/24	中間部份偶爾受到薄雲干擾。	上弦月
2006/10/16	大致上seeing還算穩定。	下弦月
2006/12/08	前半部天氣還算穩定，後面仰角開始變低。	下弦月

除了有拍攝的日期外，其他則大多因為天氣的不穩定和不許可，而無法觀測。另外，若有其他計畫在進行，我們也會受到影響。

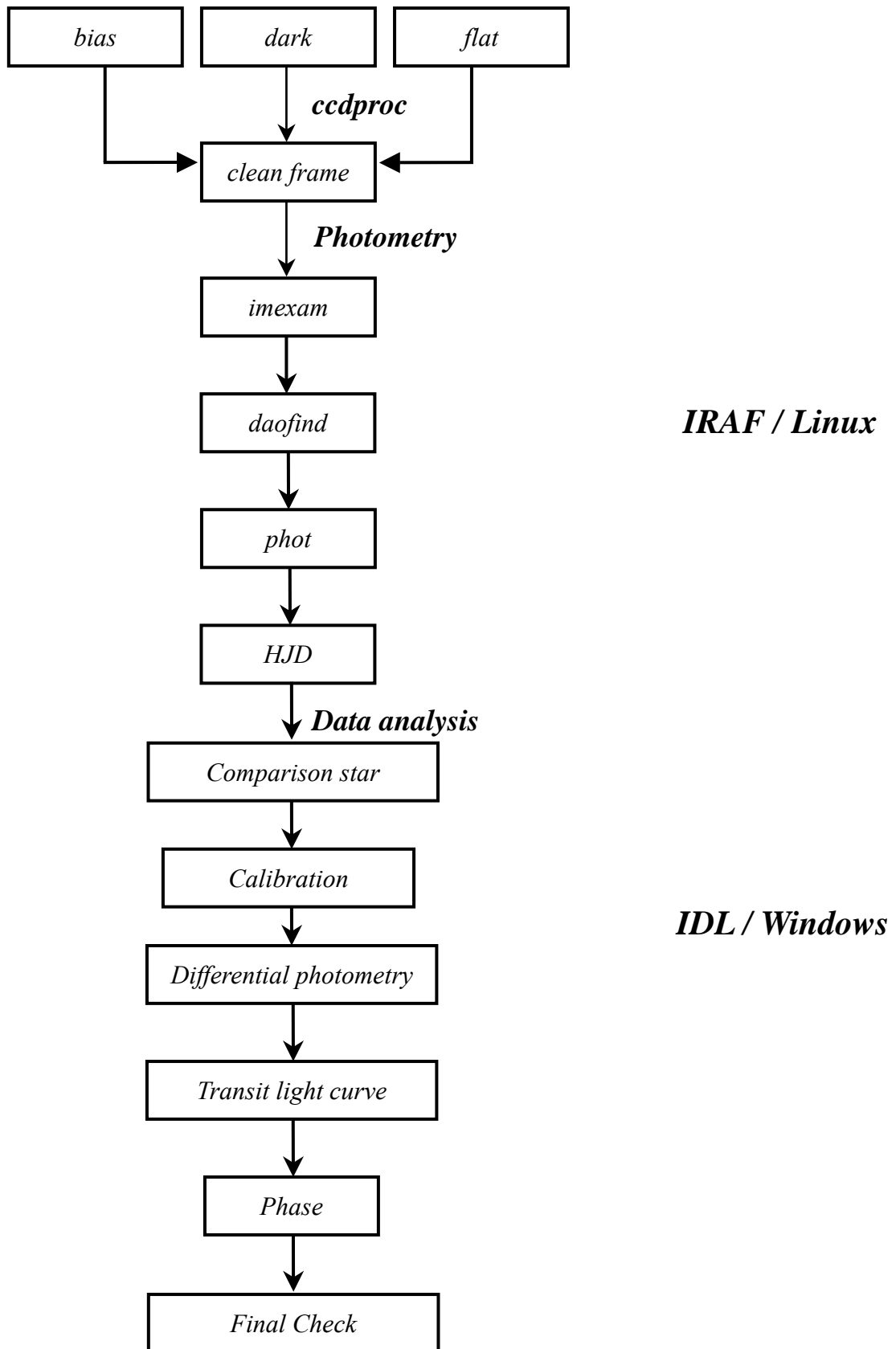
### 三、資料處理分析

取得觀測資料後，必須處理分析，得到我們需要且有意義的資訊。第一步，要先修正 CCD 儀器與拍攝時所產生的影響，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，我們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，我們假設 100 張內其受大氣的影響因素並沒有變化太多，所以每 100 張中抽樣 3 張進行測量我們所需的參數。然後列清單 (list) 分批進行處理，視當天影像數量來決定處理次數，原則上也是 100 張處理一次。

過程分為兩部份，第一部份在 IRAF/Linux 系統下執行，第二部份則在 IDL/Windows 系統下執行。

基本的流程圖，如下圖十：



圖十、基本處理流程圖

## 1.修正影像 (reduction)：

影像由 CCD 拍攝，其雜訊會對影像產生影響，必須進行修正的工作，以便得到乾淨的影像。CCD 本身所造成的雜訊影響有下列三種：偏壓 (bias)、暗電流 (dark current) 以及平場 (flat field)。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 (thermal noise) 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 (pixel) 的反應狀況，理想狀態下是每個像元反應均相同，感覺像是「平」的。但實際上，沒有 CCD 是「平」的，所以需要拍攝均勻光源來修正此影響 (pixel to pixel sensitivity variation)。我們使用 CCDRED/IRAF 做修正影像的動作：

### (1) 偏壓 (bias) 雜訊

取每個像元在不同影像的平均值並合併成一張偏壓影像，bias。

指令：*zerocombine*

### (2) 暗電流 (dark)

取每個像元在不同影像的平均值並合併成一張暗電流影像，dark。

指令：*darkcombine*

### (3) 平場 (flat)

因為光線通過不同濾鏡時，CCD 感度差異也會不同，所以要分別處理，不同濾鏡會得到不同的平場，flat。

指令：*flatcombine*

### (4) 取得乾淨的影像 (clean frame)

將原始影像 (raw frame) 修正上述雜訊並根據下式處理，便得到乾淨的影像 (clean frame)。

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

指令：*ccdproc*

## 2. 光度取得 (photometry):

為了測得星場中星體的光度資訊，我們使用 APPHOT/IRAF。基本上，我們每 100 張處理一次。

### (1) 影像參數 (imexam)

用來取得影像中所需的參數。每 100 張中抽樣 3 張。

fwhmpsf: 星體的半高全幅寬 (Full Width Half Maximum; FWHM)。

sigma: 天空背景光的標準差。

指令: *imexam*

### (2) 找星 (daofind)

給定條件，尋找影像中的星體座標，並排除非星體的目標。

threshold: 此參數與 sigma 的乘積決定了訊號與雜訊的界線值。一般取 3~4 之間，但因為在我們星場中，目標星為最亮星體，且要選取較亮的參考星，因而設為 100~200 之間，以排除過多不必要的訊號。

fwhmpsf: 在影像中星光經過大氣時，受擾動應大致相同，所以形狀也會與 FWHM 大致相符，故可用來判斷是否為訊號。

datamax: 用來設定有效數值 (Maximum) 的上限；為了得到較多的資料點，我們取 45000 為其界線。

指令: *daofind*

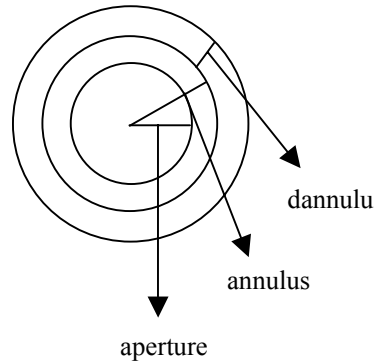
### (3) 初始儀器星等 (phot)

將上一步所找到的星體中心座標，進行光圈光度測光 (aperture photometry)。給定測光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。

annulus: 光圈測光時背景光量測內徑的起始值。根據統計計算，由中心向外延伸  $3\sigma$  內可包含 99.74% 星光， $4\sigma$  內則可包含 99.99% 星光，因此在  $5\sigma$  外幾乎為背景光，故將此值設為  $5\sigma$ 。(  $\sigma = \text{FWHM}$  )

dannulus：背景光測量的寬度，一般設為  $3 \sim 4\sigma$ 。

aperture：光圈光度測光所用的光圈半徑大小，有上述得知， $3 \sim 4\sigma$  便可包含 99.74% 以上的星光。因為我們要求很高的精確度，所以設為  $4\sigma$ 。



圖十一、phot 示意圖

指令：*phot*

### 3. 儒略日取得 (Heliocentric Julian Day ; HJD) :

因為光度隨時間變化，所以需要儒略日 (HJD) 來作為時間軸。使用 ASTUTIL/IRAF 將每一幅影像的儒略日求出。

指令：*setjd*

最後，將上述在 IRAF/Linux 下得到的資訊輸出到.txt 檔。

指令：*txdump*、*hselect*

#### 4.數據分析 (data analysis)：

在處理完上述步驟後，我們轉到 IDL/Windows 下繼續進行數據分析。分析前，需要再次檢查數據是否正確。

##### (1) 選定參考星 (comparison star)

在選定參考星時，需要注意的有：

- 在星場中是否偏外圍，如果太外圍便不能使用（會影響測光）。
- 光譜類型跟目標星不能相差太遠。
- 最好比目標星亮，如果沒有就要選較相近的。

第一目標 HD 189733 的參考星，如下表十二：

表十二、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：

表十三、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

(資料來源：系外行星大百科，<http://exoplanet.eu/>)



## (2) 星等歸一化 (calibration)

### (3) 較差測光 (differential photometry)

- 我們假設在同一視野中視相 (seeing) 是相同的，即受到相同的大氣擾動 (前提是視場必須夠小)，然後將先前所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視相的影響。但需注意到參考星的光度不能有變化，並且其恆星色指數 (color index) 必須和目標星相差不遠，否則會因大氣消光作用，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 (light curve)

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 (HJD) 為 Y 軸，繪製光變曲線圖。

### (5) Bin 圖

將我們得到的星等值每 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 (phase)

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， $MOD$  用來取餘數， $HJD$  為影像當時的儒略日， $J_C$  為週期始點時間， $Period$  為公轉週期。

(7) 利用光變曲線求恆星與行星參數：

根據光變曲線，我們可以求出有恆星質量、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：

- 需極精確的測光，以呈現其光變曲線。
- 光變曲線必須包含平底 (flat-bottomed) 部分，這樣才能假設行星完全重疊在主恆星的碟面；這裡需注意在觀測時的波段，要選擇能減少臨邊昏暗效應影響的波段。
- 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）。
- 要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）。
- 主恆星旁不能有太接近的伴星。
- 必須是位於主序帶上的恆星。
- 行星質量需遠小於恆星質量。
- 行星半徑遠小於軌道距離。
- 系統須假設為圓形軌道。

如果符合上述條件，五個參數可由下面所列方程式求出。

光度變化 ( $\Delta F$ ) 可由下式描述：

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

$R_*$ 為恆星半徑， $R_P$ 為行星半徑。

其軌道傾角與光變曲線外型的關係由下式描述：

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

$t_{flat}$  為掠過恆星的時間，也就是平底那部份， $t_T$  為完整凌日的時間， $D$  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（須先求出）。

根據克卜勒行星第三運動定律，我們可以得到下式的關係：

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

$\pi$  為圓周率， $G$  為萬有引力常數， $M_*$  為恆星質量。

下式則描述類似太陽恆星，其行星質量與半徑的關係。

$$M_* = f(R_*) \approx R_* \frac{M_S}{R_S}$$

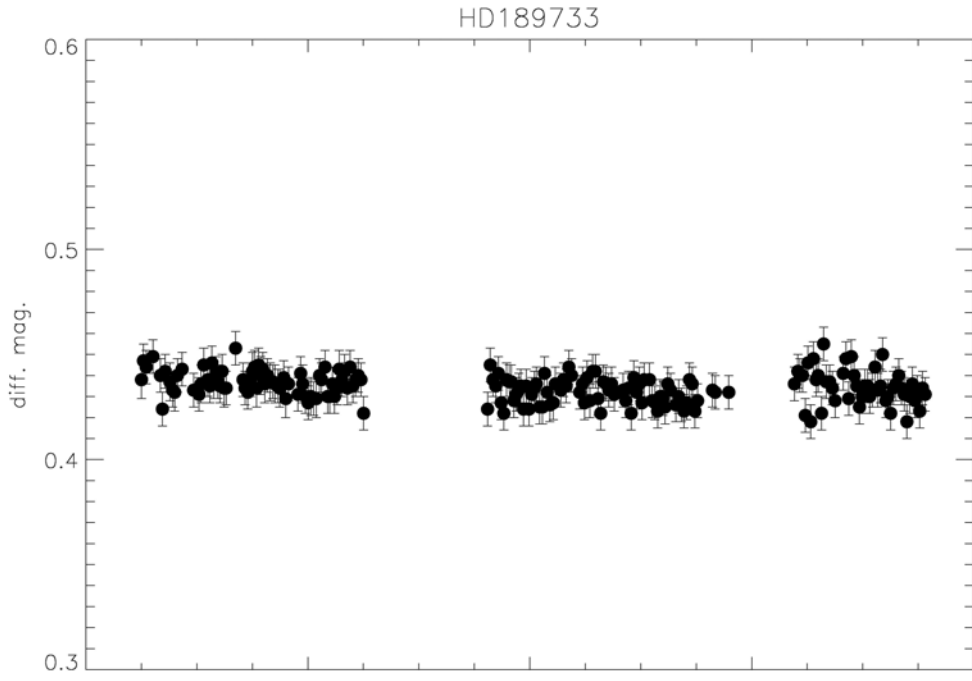
（資料來源：Seager & Mall' en-Ornelas，2003）

藉由上面的公式，我們便可推得行星的基本參數。

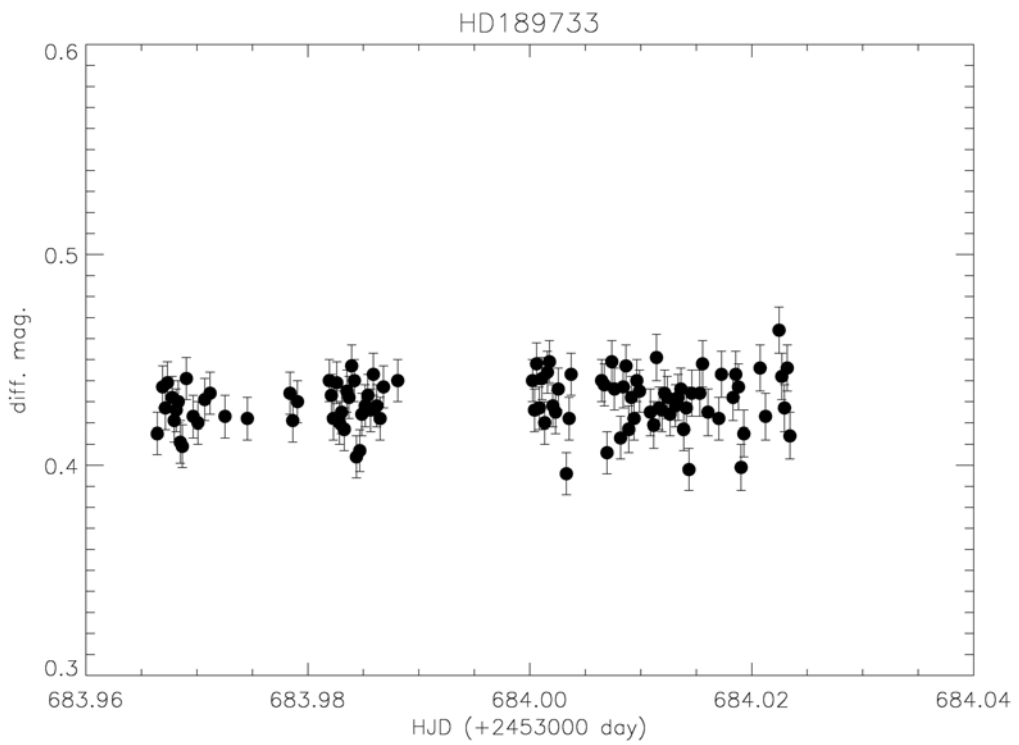
## 參、研究結果與討論

### 一、光變曲線圖

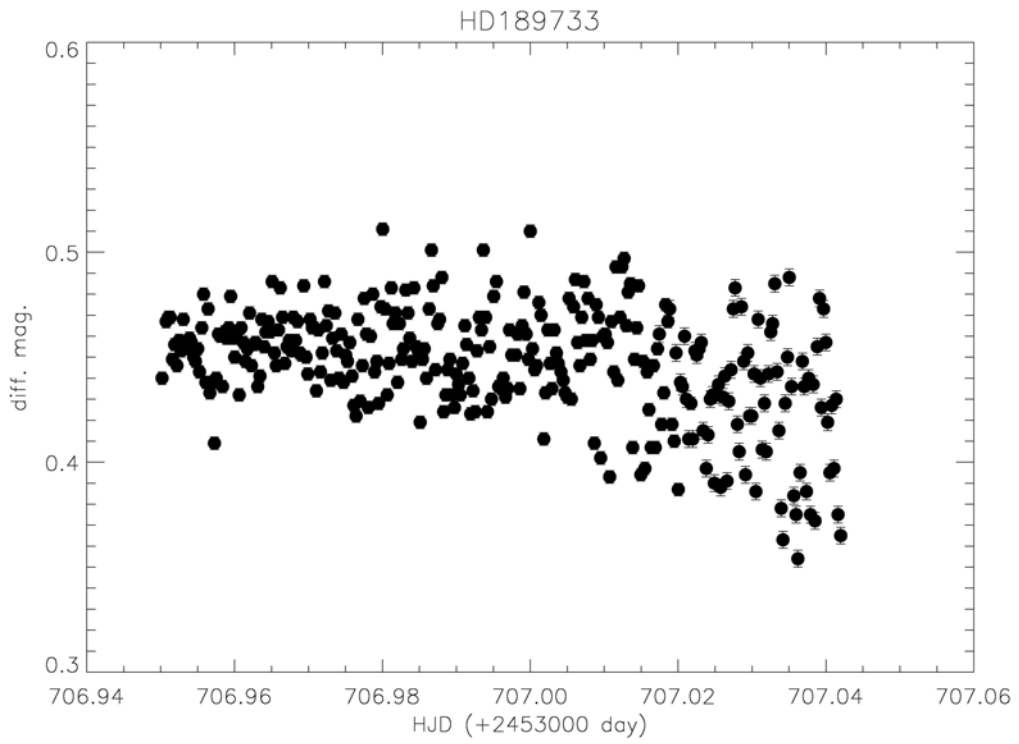
1. 第一目標 HD 189733 :



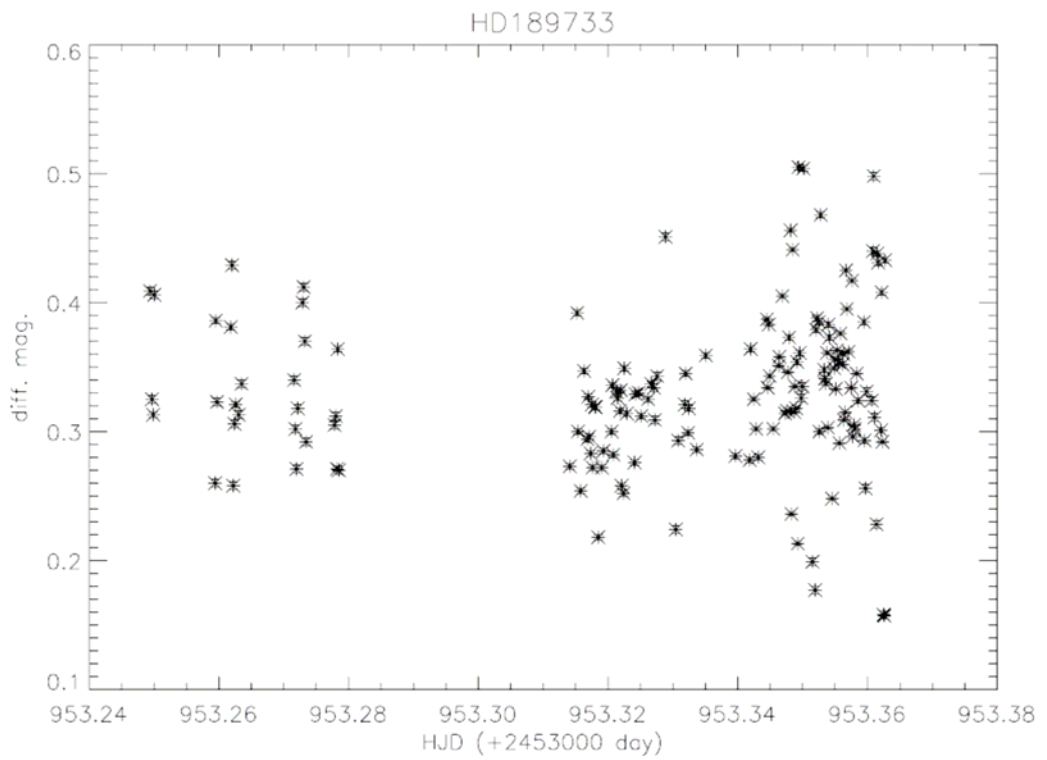
圖十二、2005/11/08 光變曲線圖 (B 濾鏡)



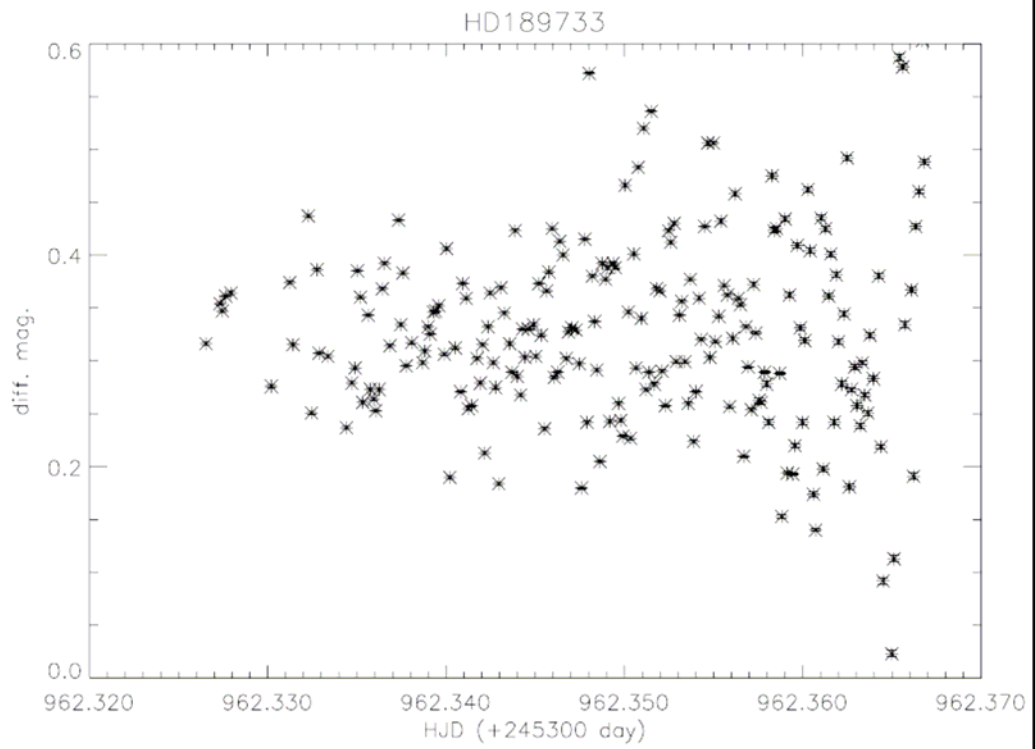
圖十三、2005/11/09 光變曲線圖 (B 濾鏡)



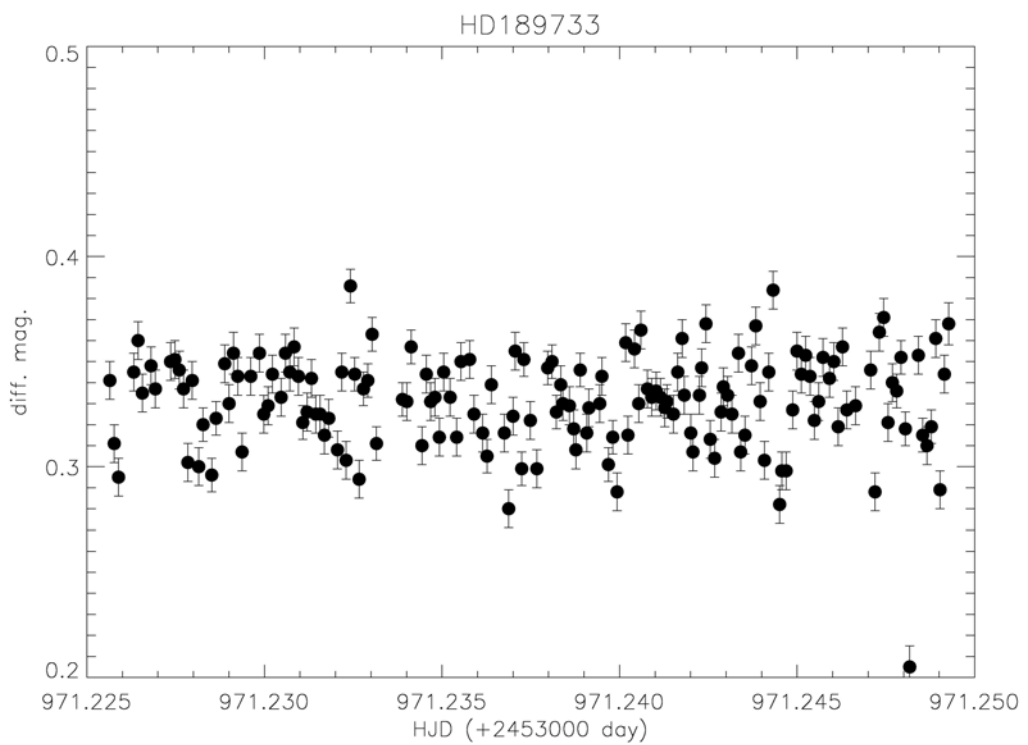
圖十四、2005/12/02 光變曲線圖 (B 濾鏡)



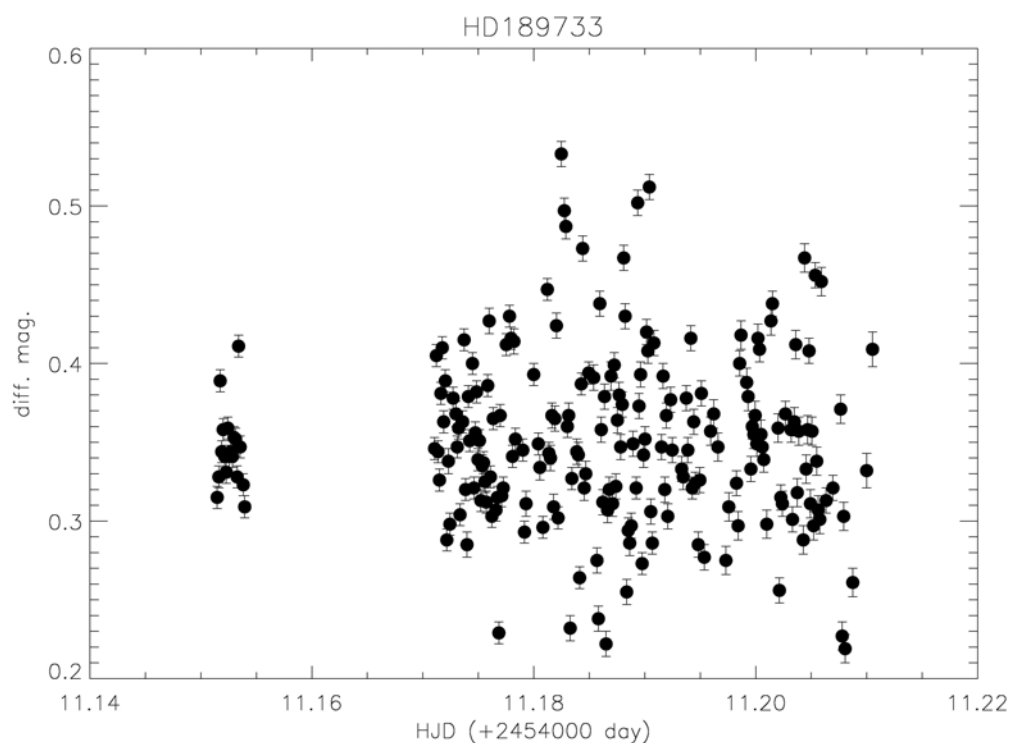
圖十五、2006/08/05 光變曲線圖 (R 濾鏡)



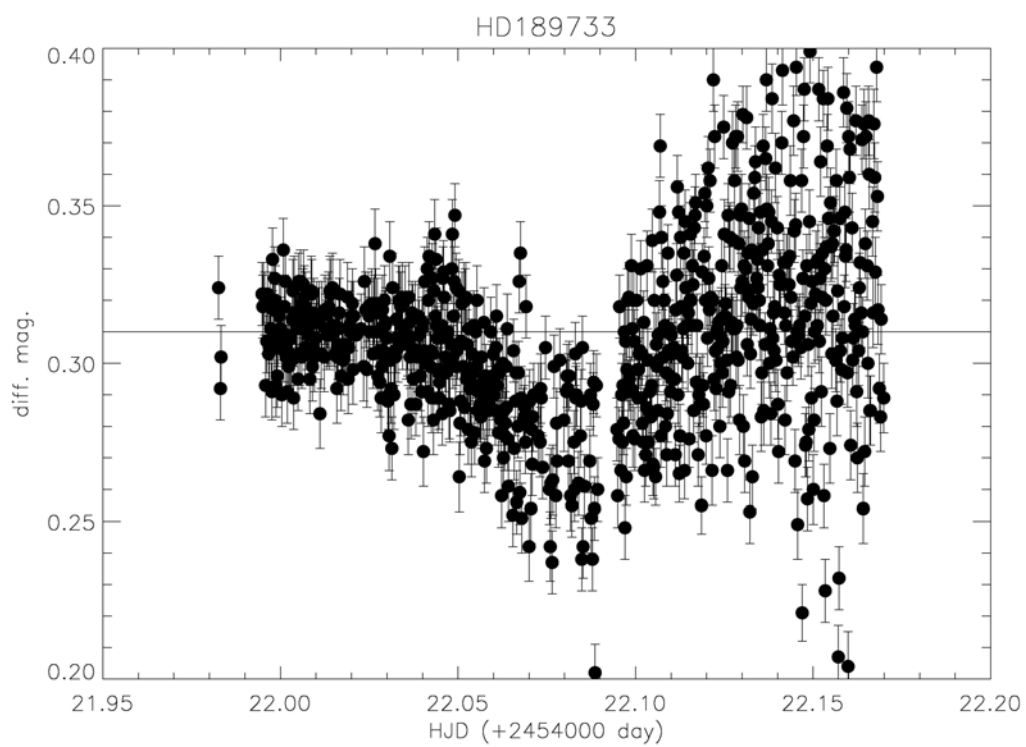
圖十六、2006/08/14 光變曲線圖 (R 濾鏡)



圖十七、2006/08/23 光變曲線圖 (R 濾鏡)



圖十八、2006/10/02 光變曲線圖 (R 濾鏡)



圖十九、2006/10/13 光變曲線圖 (R 濾鏡)

圖十二，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。

圖十三，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。

圖十四，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 (HJD +2453000 days)，應在 706.99 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。

圖十五，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。

圖十六，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。

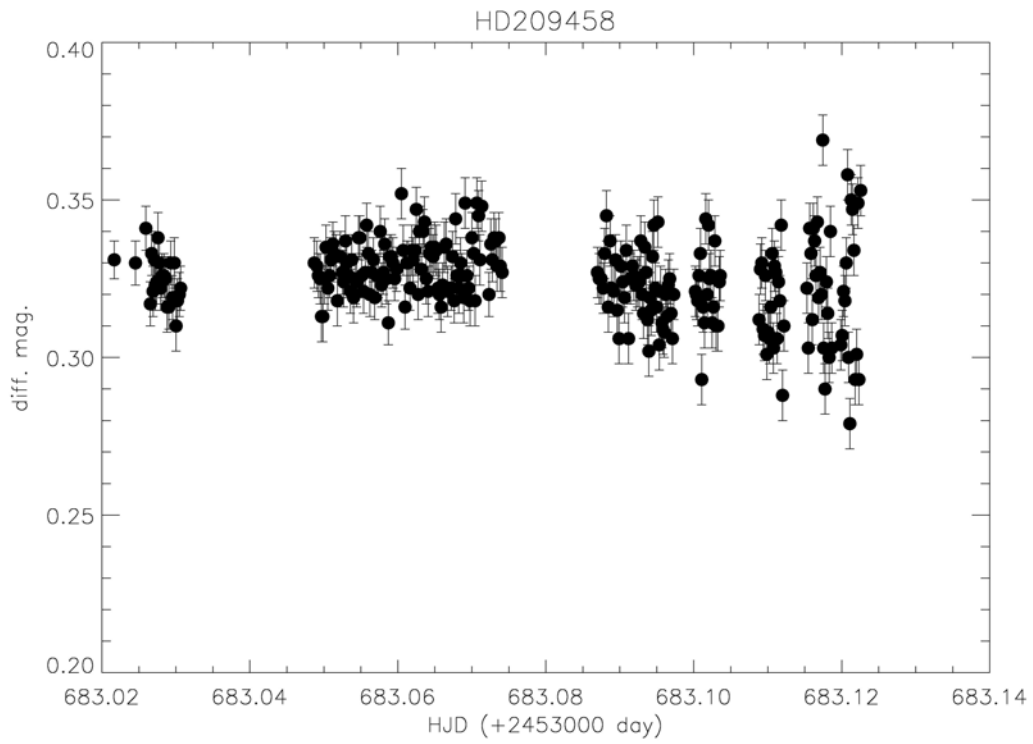
圖十七，為 2006 年 8 月 23 日使用 R 濾鏡曝光拍攝，分析出來的誤差範圍約在 6% 左右。根據理論計算出來的時間，應在 971.24 時結束凌日現象；但也因為觀測時的仰角介於 30 到 40 度間，故無法精確測光。

圖十八，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。

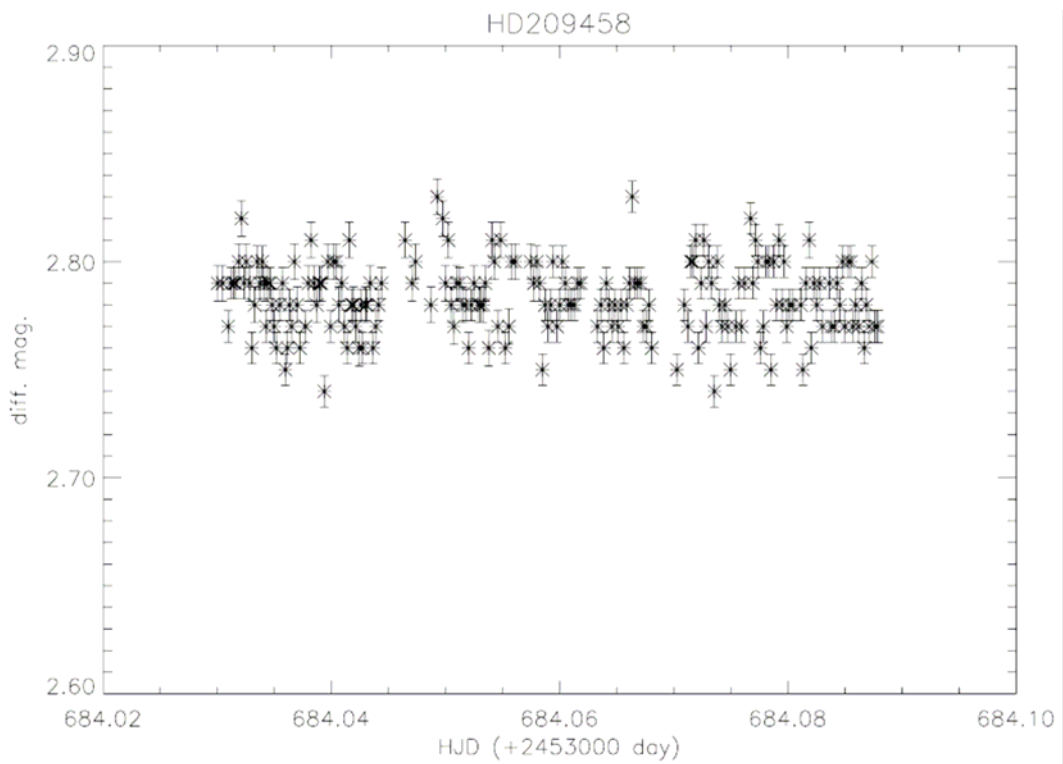
圖十九，為 2006 年 10 月 13 日使用 R 濾鏡曝光拍攝，分析出來的誤差範圍約在 4% 左右。根據理論計算出來的時間，應在 22.02 時發生凌日現象；我們發現約在 22.04 附近時，略有下降的趨勢，之後在 22.12 時，有回升的趨勢，初步研判是行星凌日造成的。



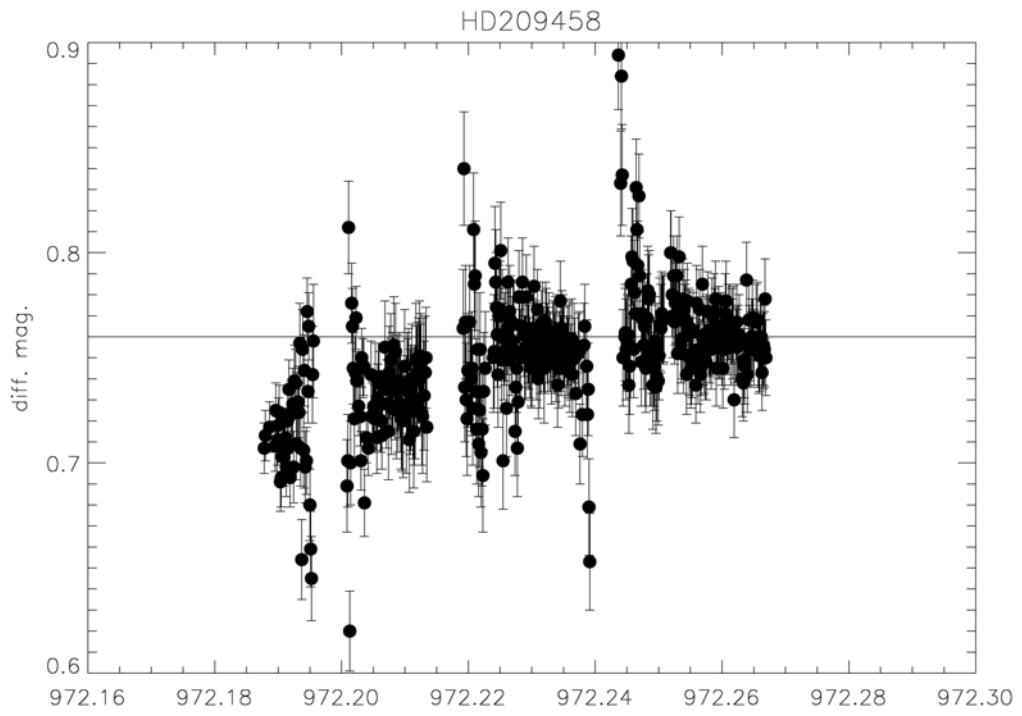
2. 第二目標 HD 209458 :



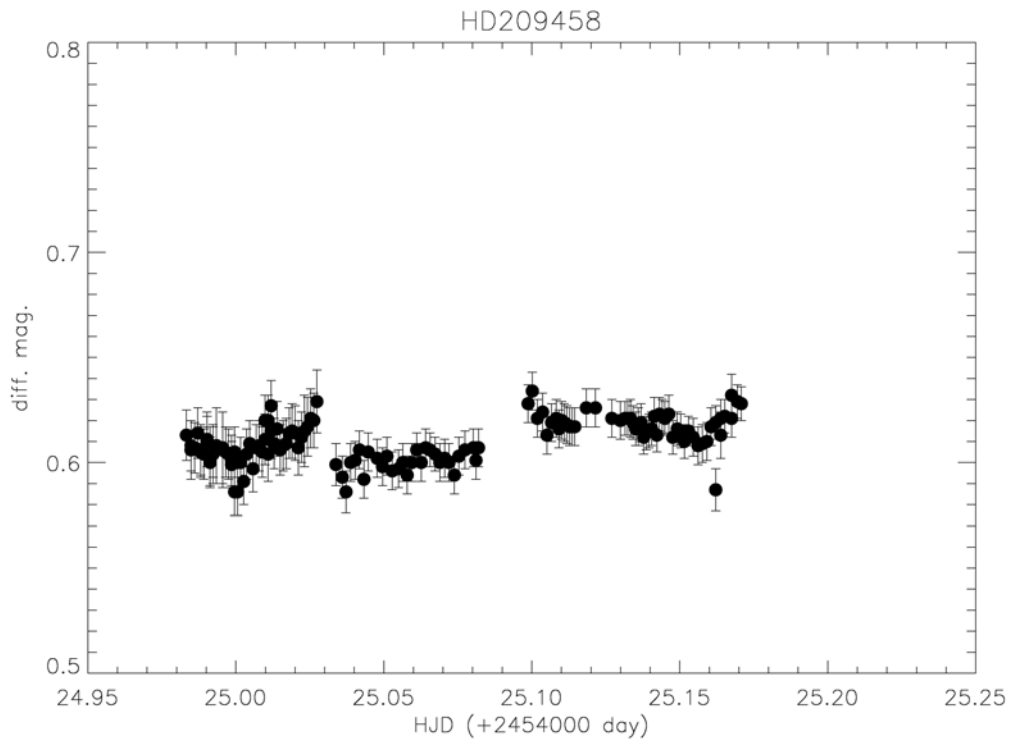
圖二十、2005/11/08 光變曲線圖 (B 濾鏡)



圖二十一、2005/11/09 光變曲線圖 (B 濾鏡)



圖二十二、2006/08/24 光變曲線圖 (R 濾鏡)



圖二十三、2006/10/16 光變曲線圖 (H $\alpha$  濾鏡)

圖二十，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。

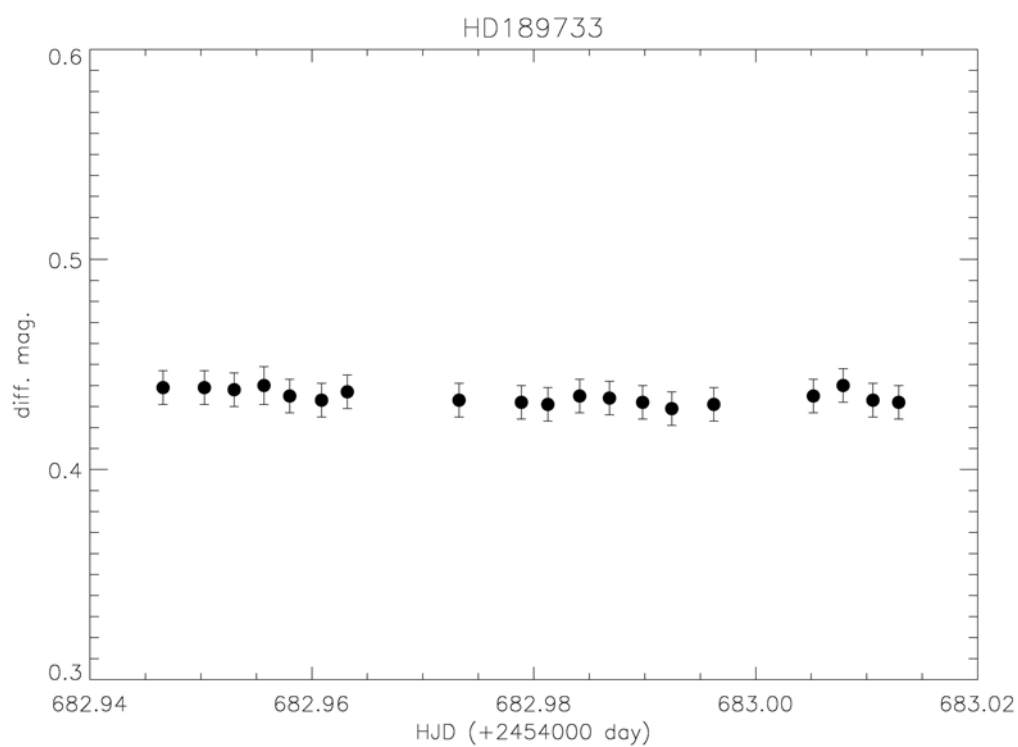
圖二十一，為 2005 年 11 月 9 日用 B 濾鏡曝光拍攝，分析出來的誤差範圍約在 8% 左右。根據理論計算出來的時間，此時並沒有凌日現象的發生。而誤差範圍變大的原因是，這天選取的參考星與其他天不同，原本的參考星因不在星場中而無法使用。

圖二十二，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。

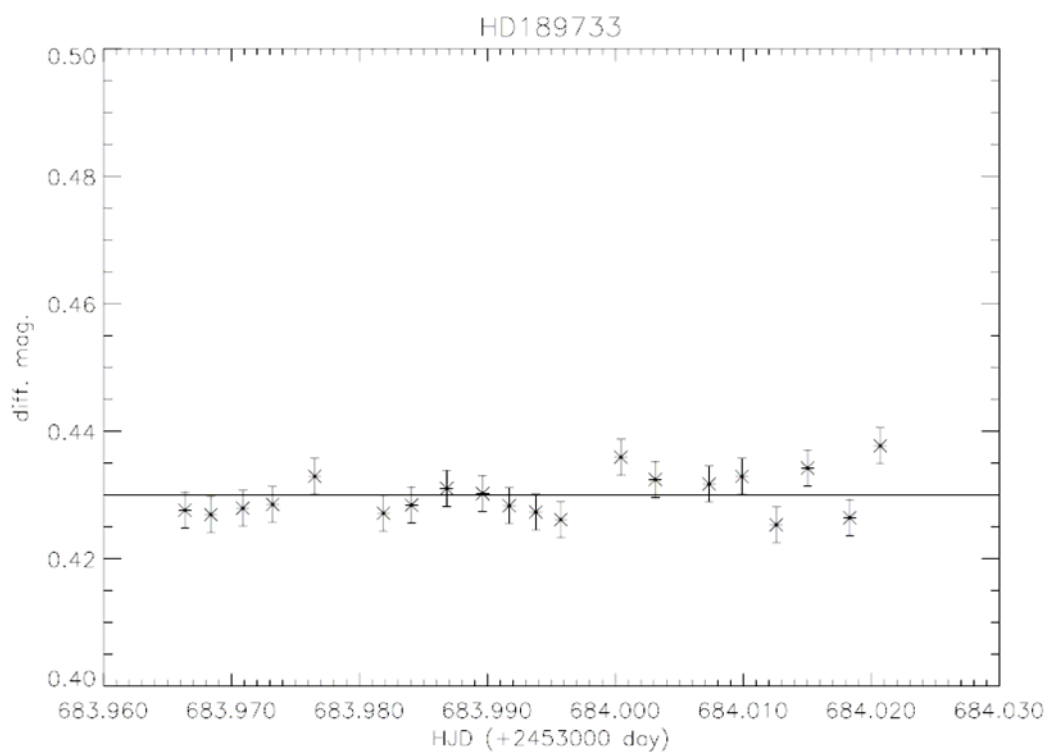
圖二十三，為 2006 年 10 月 16 日使用 H $\alpha$  濾鏡曝光拍攝，分析出來的誤差範圍約 2% 左右。根據理論計算出來的時間 (HJD +2454000 days)，應在 24.97 時發生凌日現象，並於 25.12 時結束凌日現象；可惜的是我們並沒有拍到 24.97 這個關鍵時段，也沒有拍到 25.09 附近的關鍵時段，但在 24.97 後面 (24.99 附近) 發現有略為下降的趨勢，而在 25.12 前面，也有略為上升的趨勢，初步研判是行星較完整的凌日現象。

## 二、Bin 圖

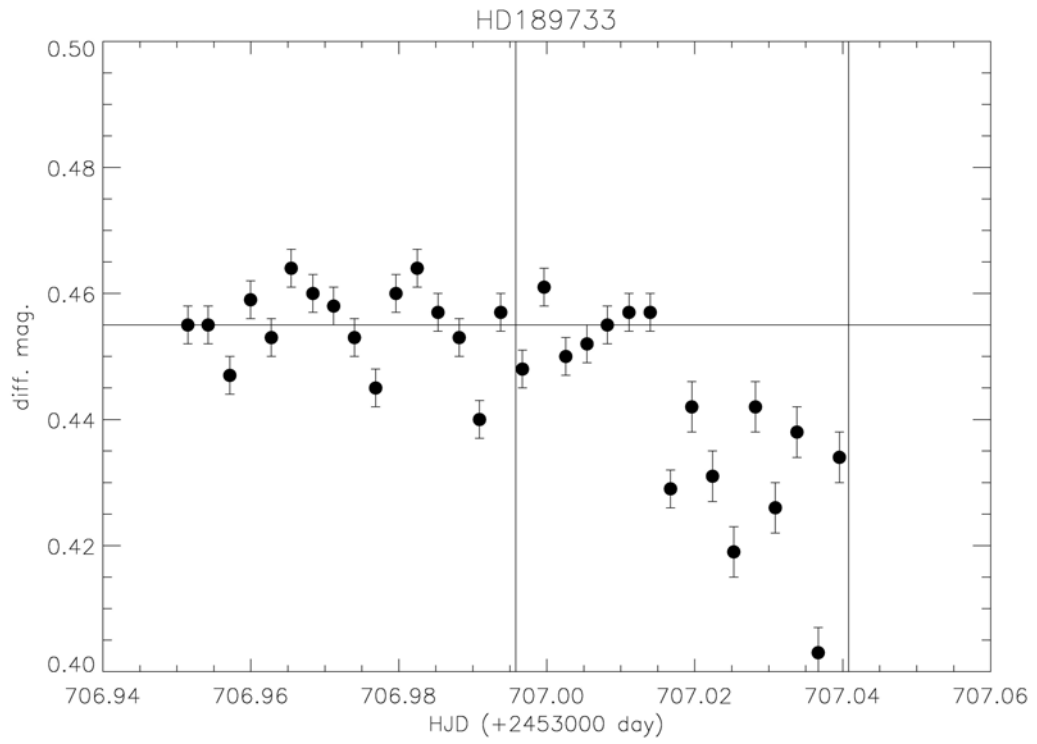
### 1. 第一目標 HD 189733 :



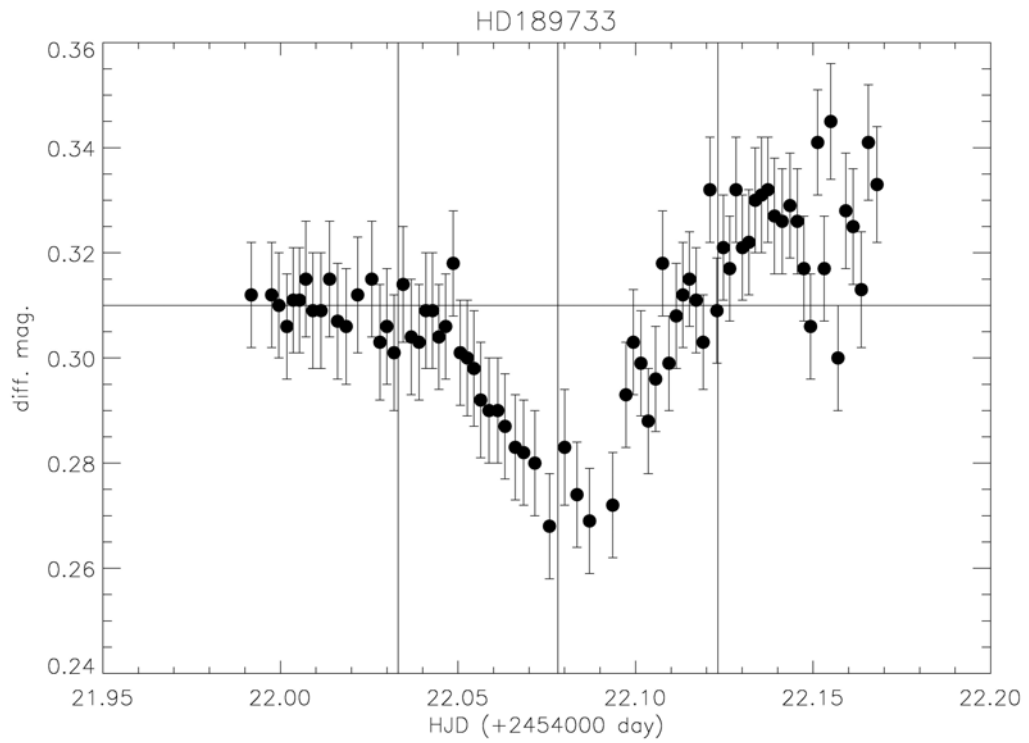
圖二十四、2005/11/08 Bin 圖 (B 濾鏡)



圖二十五、2005/11/09 Bin 圖 (B 濾鏡)



圖二十六、2005/12/02 Bin 圖 (B 濾鏡)



圖二十七、2006/10/13 Bin 圖 (R 濾鏡)

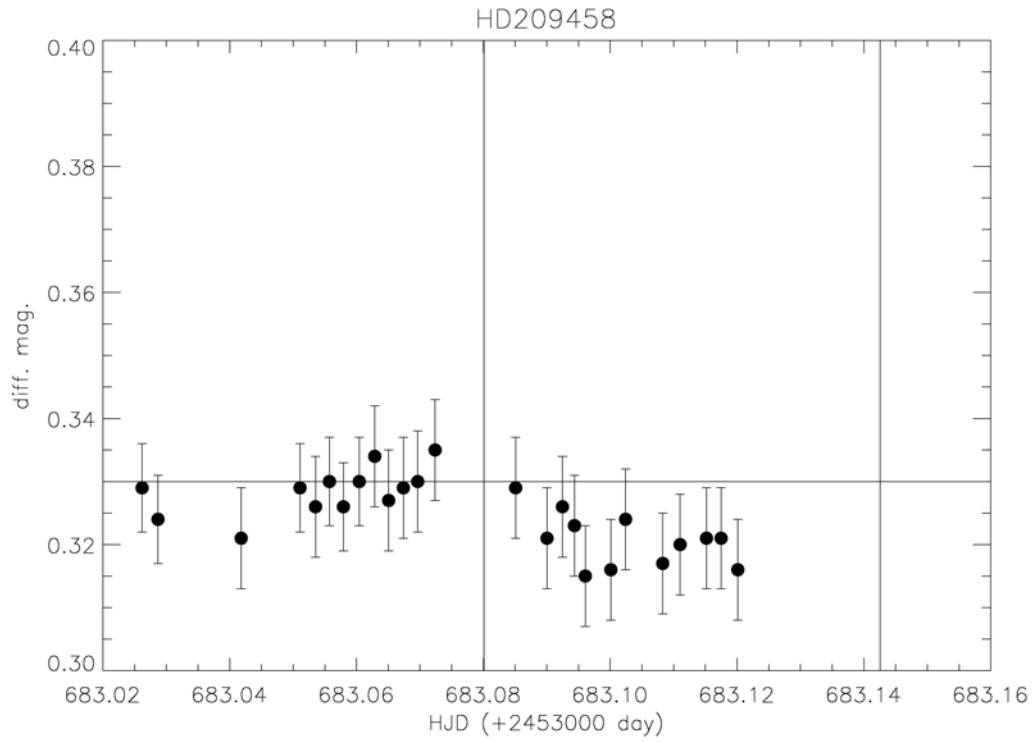
圖二十四，用圖十二的資料點做完 Bin 後，原本約為 3% 的誤差範圍，縮小為 2%。但這天並沒有凌日現象，所以不多做討論。

圖二十五，用圖十三的資料點做完 Bin 後，原本約為 4% 的誤差範圍，縮小為 2%。但這天同樣沒有凌日現象，這裡也不多做討論。

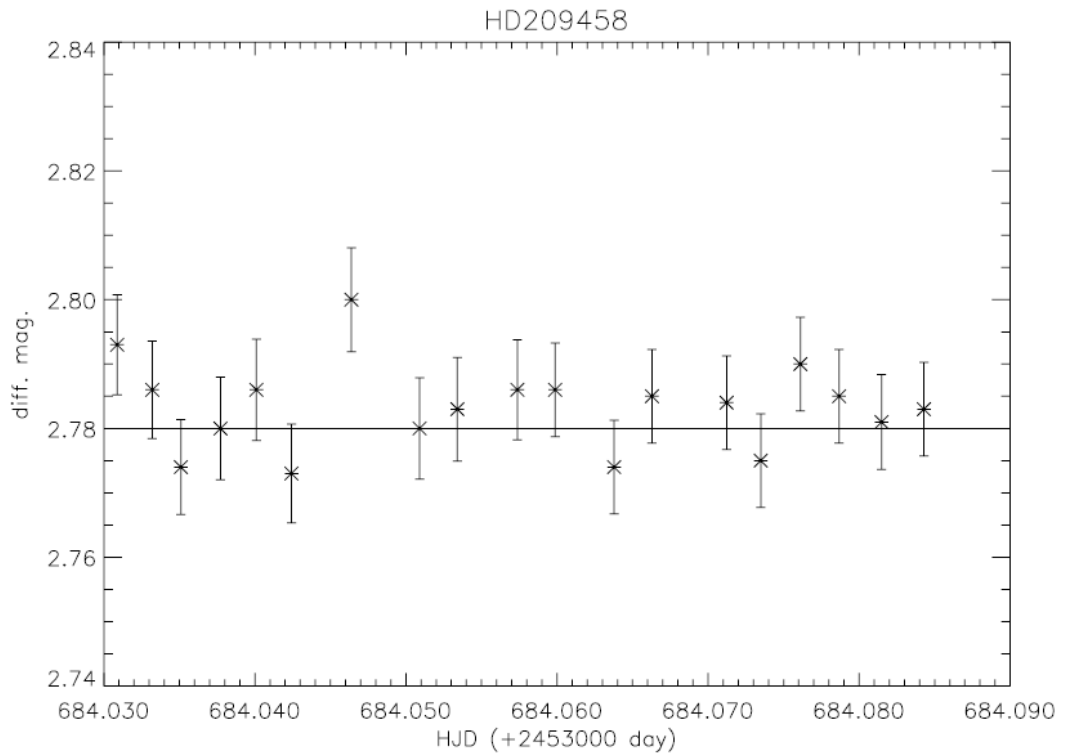
圖二十六，用圖十四的資料點做完 Bin 後，原本約為 4% 的誤差範圍，縮小為 3%。然後畫出標準線後，可以明顯看出來下降的趨勢，其幅度約為 0.025 星等 (mag)。

圖二十七，用圖十九的資料點做完 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。

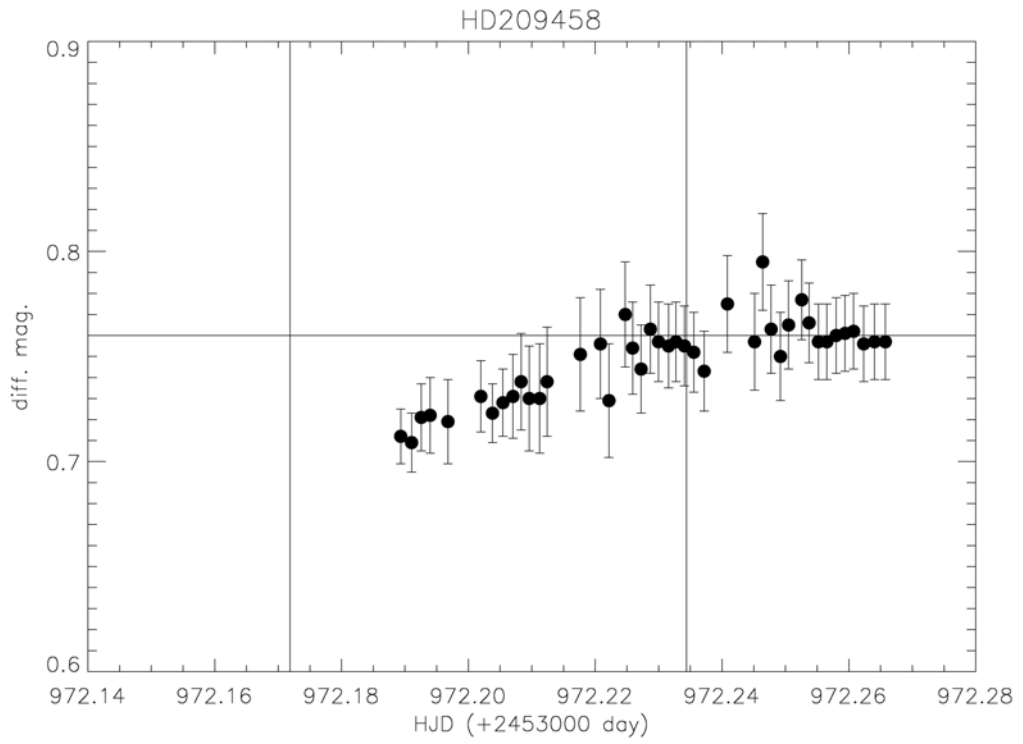
2. 第二目標 HD 209458 :



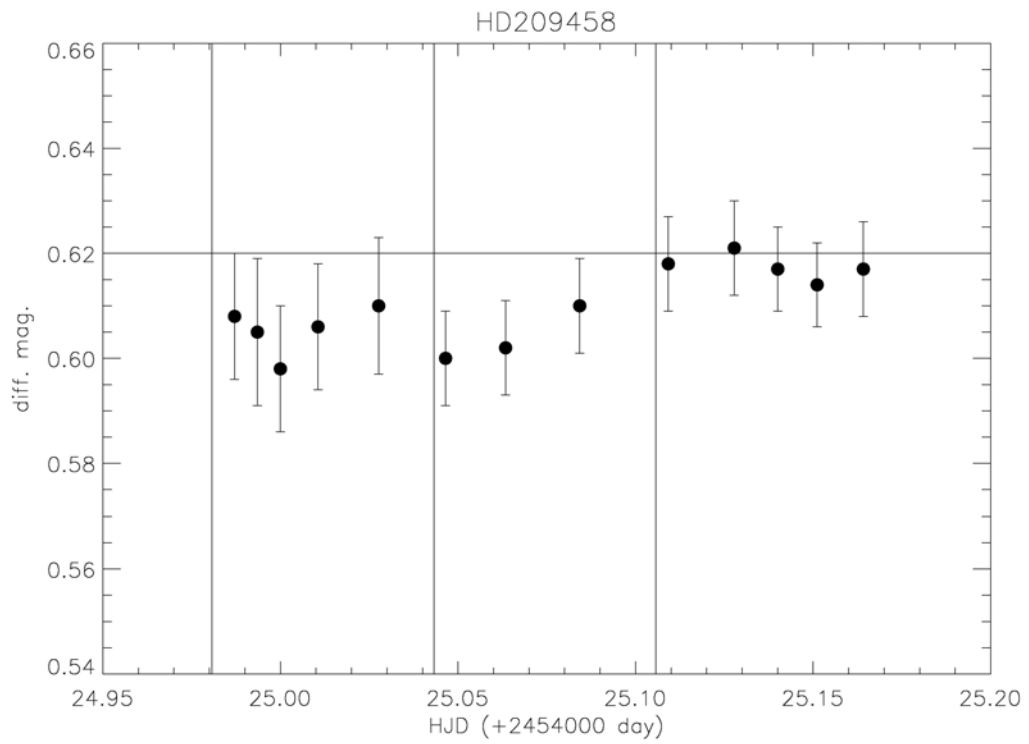
圖二十八、2005/11/08 Bin 圖 (B 濾鏡)



圖二十九、2005/11/09 Bin 圖 (B 濾鏡)



圖三十、2006/08/24 Bin 圖 (R 濾鏡)



圖三十一、2006/10/16 Bin 圖 (H $\alpha$  濾鏡)



圖二十八，用圖二十的資料點做完 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。

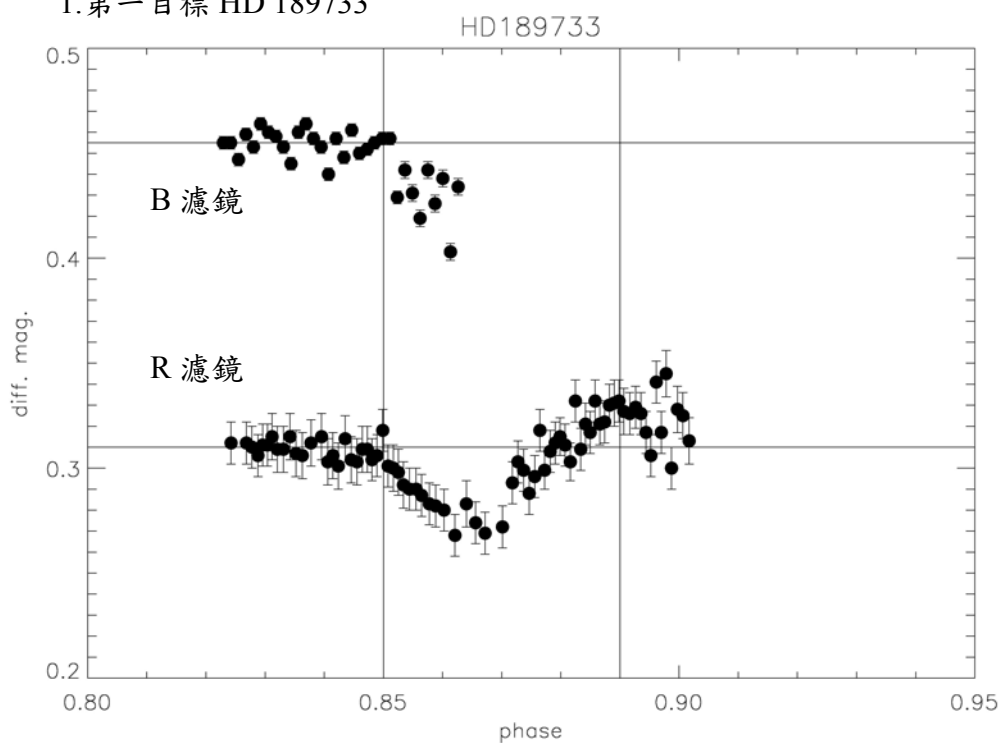
圖二十九，用圖二十一の資料點做完 Bin 後，原本約為 8% 的誤差範圍，縮小為 4%。但這天並沒有凌日現象，所以不多做討論。

圖三十，用圖二十二の資料點做完 Bin 後，原本約為 3% 的誤差範圍，雖然還是 3%，但我們畫出標準線後，可以明顯看出來上升的趨勢，其幅度約為 0.03 星等。

圖三十一，用圖二十三の資料點做完 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。

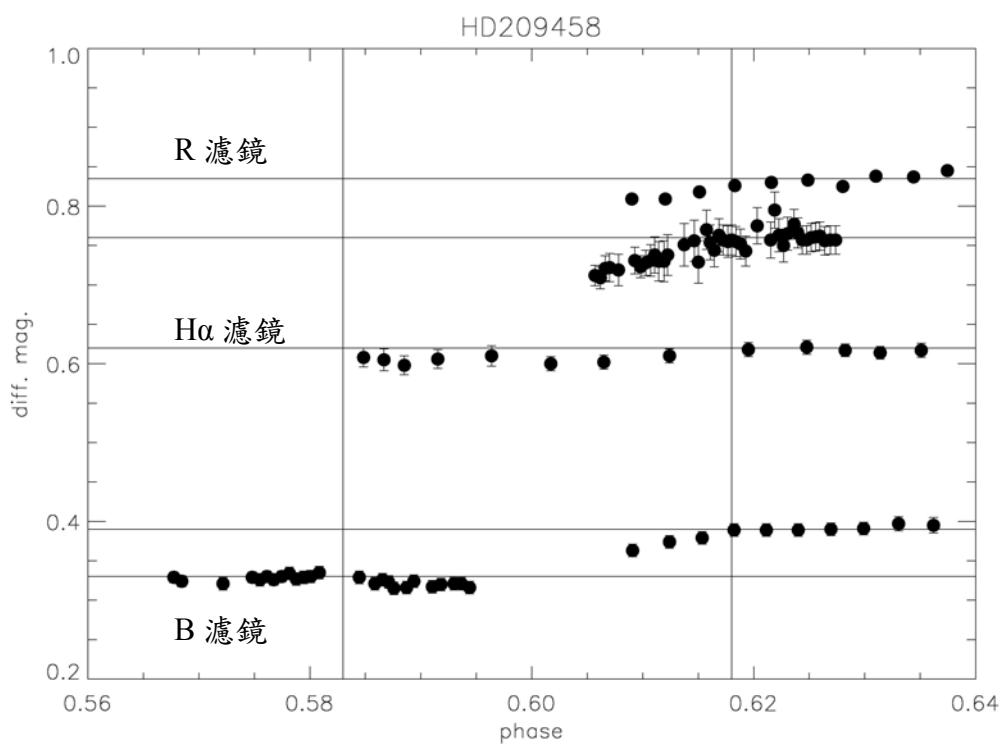
### 三、相位圖

#### 1. 第一目標 HD 189733



圖三十二、HD 189733 相位圖

#### 2. 第二目標 HD 209458



圖三十三、HD 209458 相位圖

圖三十二，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。

圖三十三，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：

我們觀測到一個完整的凌日現象，之後使用光變曲線去計算行星的參數，索取的數值如下：

Parameter	Value
$\Delta F$	0.028
$t_{flat}$	0.02193
$t_T$	0.07784
<i>Period</i>	2.218573

得到的數值如下：

Parameter	Value
$R_p (R_J)$	1.242
$i_p (^\circ)$	88.94
$M_*$	0.82 <sup>a</sup>
$R_*$	0.758 <sup>b</sup>
Orbital semi-major axis (AU)	0.03115

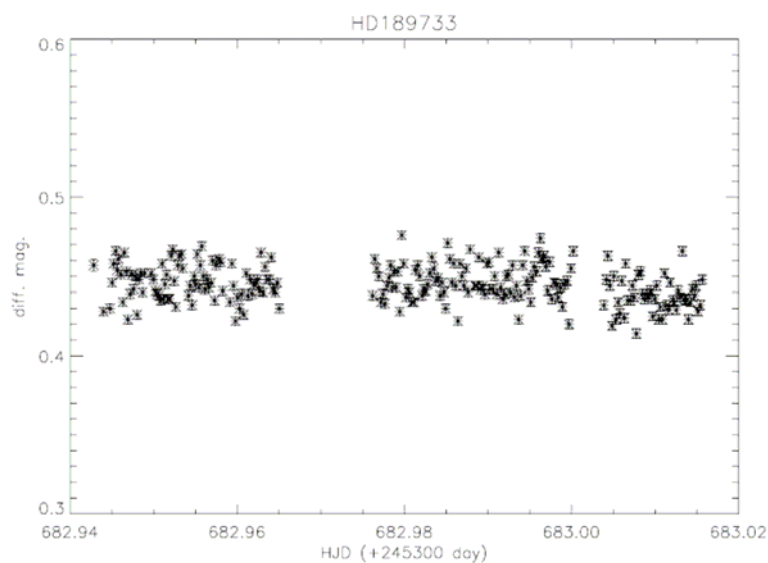
## 2.第二目標 HD 209458：

得到的光變曲線，並未包含了上升與下降的趨勢，所以這顆是沒有資料的。

## 五、討論

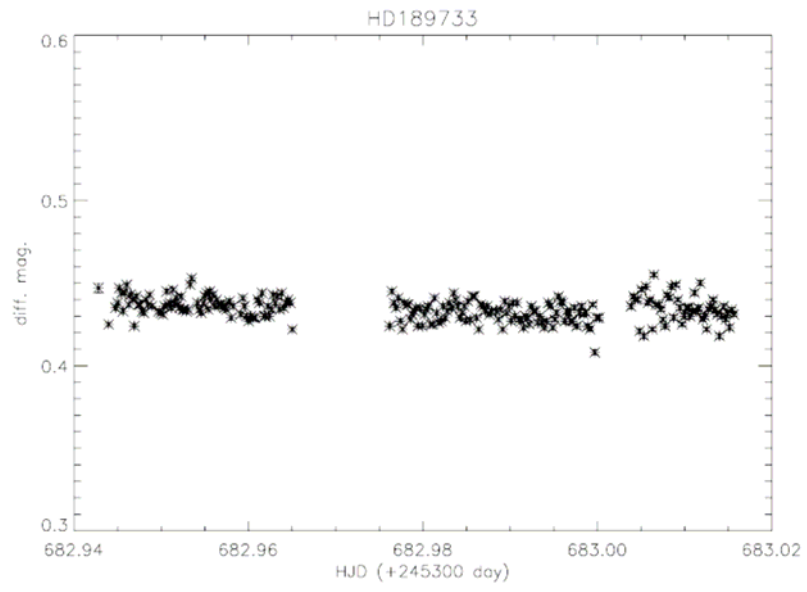
### 1.光度測光問題：

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理論誤差範圍不相符合。因為本身測光誤差僅只有 0.2%，但誤差範圍卻有近 5%，如下圖三十四：



圖三十四、初次分析光變曲線圖

經過討論後，發現在光圈光度測光時，其光圈的半徑沒有取好，一開始我們只取  $\sigma$ ，根據統計計算這樣只包含 66% 的星光，因而造成測光上的不準確。後來，我們取  $4\sigma$ ，這樣便可包含 99.99% 的星光。修正後的光變曲線圖，誤差約在 3%，如下圖三十五：



圖三十五、再次分析光變曲線

## 肆、結論與未來展望

### 一、結論

由凌日光變曲線圖來看，HD 189733 有一個疑似剛開始的凌日現象，一個完整的凌日現象，分別為 B 濾鏡和 R 濾鏡拍攝；而在 HD 209458 中，則有兩個疑似剛開始，三個疑似要結束的凌日現象，分別為 B 濾鏡、R 濾鏡和 H $\alpha$  濾鏡拍攝。另外我們也注意到，當目標星仰角過低或月亮升起時造成的光害，對於需要精確測光的系外行星光度變化影響很大。

由 Bin 圖加上標準線來看，我們確定看到 HD 189733 一個剛開始和一個完整的凌日現象；而在 HD 209458 則看到兩個剛開始，三個要結束的凌日現象。

由相位圖來看，把時間轉換成相位的關係後，可發現不同時間的凌日現象幾乎是在同一相位開始發生的或結束的。由週期性的凌日現象所造成的光度上升或下降，更可以確定其行星存在的真實性。

藉由完整光變曲線所推算出來的參數有，行星半徑為  $1.242 R_J$ ，軌道傾角為  $88.94^\circ$ ，以及軌道半徑為  $0.03115 AU$ 。

### 二、未來展望

首先，要累積更多的觀測資料，把另一顆 HD 209458 b 的行星參數完整求出來，然後進行數據比對，這樣可增進我們對系外行星的了解。

再來，我們發現關於小望遠鏡 (2 x 10cm) 利用凌日方式找系外行星的論文 (The XO Project: Searching for Transiting Extrasolar Planet Candidates)，這個計劃團隊利用小望遠鏡已經發現了一顆新的系外行星。我們做過一些比較，無論是在儀器上、觀測條件上，都不會差太多，甚至有勝過他們的。而且這次研究結果也顯示出，只要天氣良好，儀器沒有問題，我們是可以畫出凌日光變曲線的。所以希望在未來也能進行類似的搜尋工作，為這個領域奉獻我們一點微薄之力。

## 伍、參考文獻

### 一、書籍期刊論文：

1. 毛松霖，2003，高三下地球科學課本，康熙圖書出版
2. 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
3. 葉永烜、胡瑞華，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
4. 薩根，2004，宇宙、宇宙，遠流出版社出版，丘宏義、呂克華譯
5. F. Bouchy, S. Udry, M. Mayor, C. Moutou, F. Pont, N. Iribarne, R. Da Silva, S. Ilovaisky, 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
6. G. 'A. Bakos, H. Knutson<sup>1</sup>, 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
7. Kaisey, M., & Eric, A. 2002, ApJ, 580, L171
8. Lomb, N.R. , 1976 , Ap. Sp. Sci., 39, 447
9. 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
10. Mayor, M., & Queloz, D. , 1995 , Nature , 378 , 355
11. 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
12. Seager, S., & Mall'en-Ornelas G , 2003 , ApJ, 585, 1038
13. Stellingwerf, R.F , 1978 , ApJ, 224, 953
14. Udalski, A., Z' ebrun', K., Szyman'ski, M., Kubiak, M., Soszyn', I., Szweczyk, O., Wyrzykowski, \_L., & Pietrzy'nski, G. 2002a, Acta Astron., 52, 115
15. Udalski, A., et al. 2002b, Acta Astron., 52, 1
16. Udalski, A., Szweczyk, O., Z' ebrun', K., Pietrzy'nski, G., Szyman'ski,

M., Kubiak, M., Soszy'n, I., & Wyrzykowski, L. 2002c, Acta Astron., 52, 317

17. 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. 宇宙學與粒子天文物理(CosPA)研究計畫：  
<http://www.astro.ncu.edu.tw/contents/cospa/exoplanets%20.htm>
9. Transitsearch 系外行星凌日時間網站：  
<http://www.ucolick.org/~laugh/>
10. ECLIPSING BINARY STARS 蝕雙星：  
<http://members.cox.net/astro7/binstar.html>
11. 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>



## 陸、附錄

附錄一、HD 189733 凌日現象觀測表 (5、6 月份)

	凌日現象開始時間				凌日現象結束時間				凌日現象
	儒略日 (HJD)	年份	月、日	時、分	儒略日 (HJD)	年份	月、日	時、分	
第一次	2453860.07	2006	5 / 4 (四)	21:37	2453860.26	2006	5 / 05	02:17	完整
第二次	2453868.94	2006	5 / 13 (六)	18:36 (太早)	2453869.14	2006	5 / 13	23:21	不完整
第三次	2453871.16	2006	5 / 15 (一)	23:51	2453871.36	2006	5 / 16	04:37	完整
第四次	2453880.03	2006	5 / 24 (三)	20:49	2453880.24	2006	5 / 25	01:42	完整
第五次	2453882.25	2006	5 / 27 (六)	02:04	2453882.46	2006	5 / 27	06:58 (太晚)	不完整
第一次	2453888.91	2006	6 / 2 (五)	17:48 (太早)	2453889.12	2006	6 / 2	22:46	不完整
第二次	2453891.13	2006	6 / 4 (日)	23:02	2453891.34	2006	6 / 5	04:02	完整
第三次	2453900.00	2006	6 / 13 (二)	20:01	2453900.21	2006	6 / 14	2:06	完整
第四次	2453902.22	2006	6 / 16 (五)	02:15	2453902.43	2006	6 / 16	06:22 (太晚)	不完整
第五次	2453911.09	2006	6 / 24 (六)	22:14	2453911.31	2006	6 / 25	03:27	完整

備註：太早，太陽尚未下山，無法進行觀測。

太晚，太陽已經升起或目標星已落入地平線，而無法進行觀測。

附錄二、HD 189733 凌日現象觀測表 (7、8 月份)

	凌日現象開始時間				凌日現象結束時間				凌日現象
	儒略日 (HJD)	年份	月、日	時、分	儒略日 (HJD)	年份	月、日	時、分	
第一次	2453919.97	2006	7/3 (一)	19:13 (太早)	2453920.19	2006	7/4	0:31	不完整
第二次	2453922.19	2006	7/6 (四)	0:27	2453922.41	2006	7/6	5:47 (太晚)	不完整
第三次	<b>2453931.06</b>	<b>2006</b>	<b>7/14 (五)</b>	<b>21:26</b>	<b>2453931.29</b>	<b>2006</b>	<b>7/15</b>	<b>2:51</b>	<b>完整</b>
第四次	2453939.93	2006	7/23 (日)	18:24 (太早)	2453940.16	2006	7/23	23:56	不完整
第五次	2453942.15	2006	7/25 (二)	23:39	2453942.38	2006	7/26	5:12 (太晚)	不完整
第一次	<b>2453951.03</b>	<b>2006</b>	<b>8/3 (四)</b>	<b>20:38</b>	<b>2453951.26</b>	<b>2006</b>	<b>8/4</b>	<b>2:16</b>	<b>完整</b>
第二次	2453953.24	2006	8/6 (日)	01:52	2453953.48	2006	8/6	07:32 (太晚)	不完整
第三次	<b>2453962.12</b>	<b>2006</b>	<b>8/14 (一)</b>	<b>22:51</b>	<b>2453962.36</b>	<b>2006</b>	<b>8/15</b>	<b>4:37</b>	<b>完整</b>
第四次	<b>2453970.99</b>	<b>2006</b>	<b>8/23 (三)</b>	<b>19:49</b>	<b>2453971.24</b>	<b>2006</b>	<b>8/24</b>	<b>1:41</b>	<b>完整</b>
第五次	2453973.21	2006	8/26 (六)	01:04	2453973.46	2006	8/26	06:57 (太晚)	不完整

附錄三、HD 189733 凌日現象觀測表 (9、10 月份)

	凌日現象開始時間				凌日現象結束時間				凌日現象
	儒略日 (HJD)	年份	月、日	時、分	儒略日 (HJD)	年份	月、日	時、分	
第一次	2453979.87	2006	9 / 1 (五)	16:48 (太早)	2453980.12	2006	9 / 1	22:45	不完整
第二次	<b>2453982.09</b>	<b>2006</b>	<b>9 / 3 (日)</b>	<b>22:03</b>	<b>2453982.33</b>	<b>2006</b>	<b>9 / 4</b>	<b>4:01</b>	<b>完整</b>
第三次	2453990.9	2006	9 / 12 (二)	19:01 (太早)	2453991.21	2006	9 / 13	1:06	不完整
第四次	2453993.18	2006	9 / 14 (四)	0:16	2453993.43	2006	9 / 15	6:22 (太晚)	不完整
第五次	2453999.83	2006	9 / 21 (四)	16:00 (太早)	2454000.09	2006	9 / 21	22:10	不完整
第六次	<b>2454002.05</b>	<b>2006</b>	<b>9 / 23 (六)</b>	<b>21:14</b>	<b>2454002.31</b>	<b>2006</b>	<b>9 / 24</b>	<b>3:26</b>	<b>完整</b>
第一次	<b>2454010.93</b>	<b>2006</b>	<b>10 / 2 (一)</b>	<b>18:13</b>	<b>2454011.19</b>	<b>2006</b>	<b>10 / 3</b>	<b>0:30</b>	<b>完整</b>
第二次	2454013.14	2006	10 / 4 (三)	23:51	2454013.41	2006	10 / 5	5:46 (太晚)	不完整
第三次	2454019.80	2006	10 / 11 (三)	15:11 (太早)	2454020.07	2006	10 / 11	21:35	不完整
第四次	2454022.02	2006	10 / 13 (五)	20:26	2454022.29	2006	10 / 14	2:51 (太晚)	不完整
第五次	2454030.89	2006	10 / 22 (日)	17:25 (太早)	2454031.16	2006	10 / 22	23:55	不完整
第六次	2454033.11	2006	10 / 24 (二)	22:39	2454033.38	2006	10 / 25	4:11 (太晚)	不完整

附錄四、HD 189733 凌日現象觀測表 (11 月份)

	凌日現象開始時間				凌日現象結束時間				凌日現象
	儒略日 (HJD)	年份	月、日	時、分	儒略日 (HJD)	年份	月、日	時、分	
第一次	2454041.98	2006	11 / 2 (四)	19:38	2454042.26	2006	11 / 3	2:15 (太晚)	不完整
第二次	2454050.86	2006	11 / 11 (六)	16:36 (太早)	2454051.14	2006	11 / 11	23:20	不完整
第三次	2454053.08	2006	11 / 13 (一)	21:51	2454053.36	2006	11 / 14	4:36 (太晚)	不完整
第四次	2454059.73	2006	11 / 20 (一)	13:35 (太早)	2454060.02	2006	11 / 20	20:24	不完整
第五次	2454061.95	2006	11 / 22 (三)	18:50	2454062.24	2006	11 / 23	1:40 (太晚)	不完整

附錄五、HD 209458 凌日現象觀測表 (8、9、10、11 月份)

	凌日現象開始時間				凌日現象結束時間				凌日現象
	儒略日 (HJD)	年份	月、日	時、分	儒略日 (HJD)	年份	月、日	時、分	
第一次	2453950.95	2006	8 / 3 (四)	18:54 (太早)	2453951.10	2006	8 / 3	22:19	不完整
第二次	<b>2453958.00</b>	<b>2006</b>	<b>8 / 10</b> (四)	<b>20:05</b>	<b>2453958.15</b>	<b>2006</b>	<b>8 / 10</b>	<b>23:31</b>	<b>完整</b>
第三次	2453965.05	2006	8 / 17 (四)	21:16	2453965.20	2006	8 / 18	0:42	完整
第四次	2453972.10	2006	8 / 24 (四)	22:28	2453972.25	2006	8 / 24	1:53	完整
第五次	2453979.15	2006	8 / 31 (四)	23:39	2453979.30	2006	9 / 1	3:05	完整
第一次	2453986.20	2006	9 / 8 (五)	0:50	2453986.34	2006	9 / 8	4:16	完整
第二次	2453993.25	2006	9 / 15 (五)	2:01	2453993.39	2006	9 / 15	5:27 (太晚)	不完整
第一次	2454017.92	2006	10 / 9 (一)	18:11 (太早)	2454018.07	2006	10 / 9	21:37	不完整
第二次	<b>2454024.97</b>	<b>2006</b>	<b>10 / 16</b> (一)	<b>19:22</b>	<b>2454025.12</b>	<b>2006</b>	<b>10 / 16</b>	<b>22:48</b>	<b>完整</b>
第三次	2454032.02	2006	10 / 23 (一)	20:34	2454032.17	2006	10 / 23	23:59	完整
第四次	2454039.07	2006	10 / 30 (一)	21:45	2454039.22	2006	10 / 31	0:11	完整
第一次	2454046.12	2006	11 / 6 (一)	22:56	2454046.27	2006	11 / 7	2:22 (太晚)	不完整

## 評語

本作品使用中大鹿村山 SLT 望遠鏡的資料，觀察已知有行星系統的恆星光度變化，希望能重複觀察到「行星凌日」的現象，就科學主題而言，並無新意，同時數據品質不良，凌日現象並不明顯，在數據取得和後續分析上仍有進步空間。