

The relationship between asteroids Icarus and 2007MK6

Determination of rotation period of 2007 MK6

FINAL REPORT

Student : Chia-Lung Lin 林佳龍

Advisor : Daisuke Kinoshita 木下大輔

2016/08/31

OUTLINE

1. Introduction

- ◆ Significance of asteroids research
- ◆ Icarus and 2007MK6
- ◆ Review of our interest and purposes

2. Method

- ◆ Observation
- ◆ Basic CCD data reduction
- ◆ Aperture photometry
- ◆ Differential photometry
- ◆ Corrections
- ◆ Periodicity analysis

3. Results and discussions

4. Summary

1. Introduction

- Significance of asteroids research

- ▶ The history of our solar system

The studies of asteroids could help us to explore the origin and evolution of our solar system.

The planetesimals were fused together to form the planets about 4.5 billion years ago. Asteroids and the minor bodies of our solar system are seen as remnant planetesimals.

For above reason, the asteroids may be just like the time capsules contain the original information, such as compositions, structures, etc.

1. Introduction

- Icarus and 2007 MK6

Asteroid Icarus was discovered by Baade in 1949, and it is an Apollo asteroid.(Apollo is a type of Near Earth Objects, NEOs)

Asteroid 2007 MK6 was discovered in the Catalina sky survey in 2007.

Physical properties	Icarus	2007MK6
Absolute magnitude(H)	15.96	19.9
Albedo	0.33	Unknown
Rotation period(hr)	2.273	Unknown
Diameter(m)	1270	≈ 350
Tholen's taxonomy	Q-type	Unknown

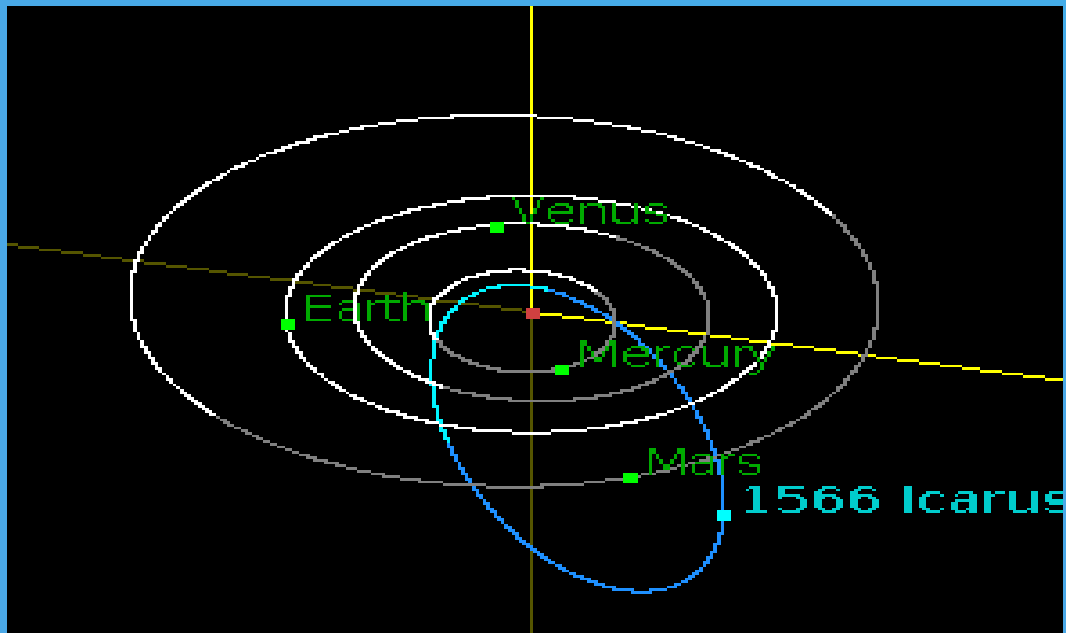
● Icarus and 2007 MK6

(OHTSUKA et al. 2007)

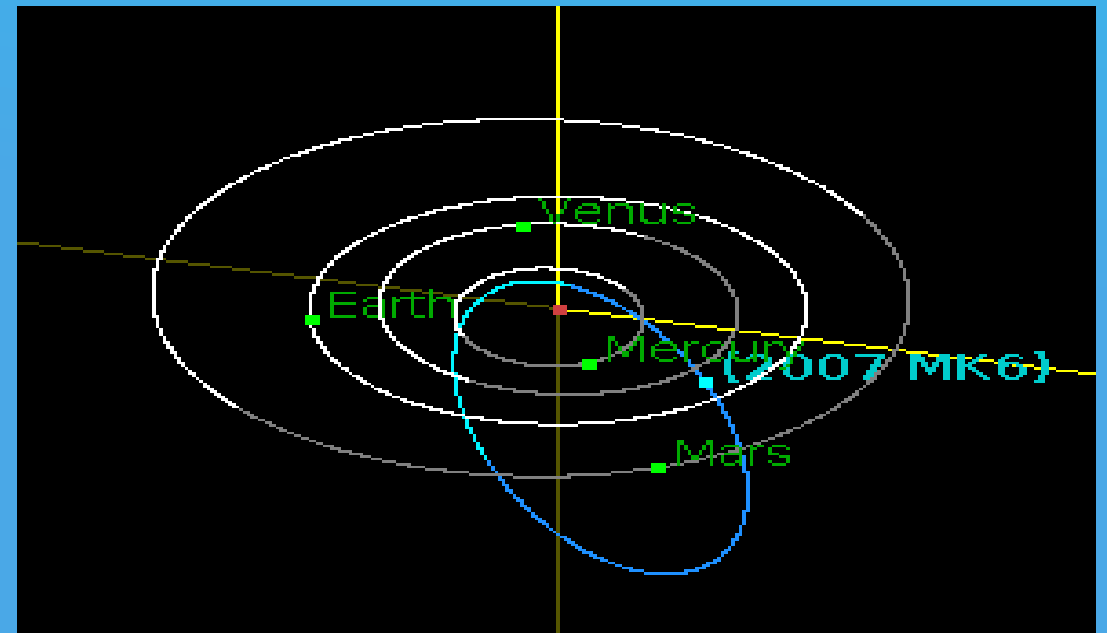
Orbit parameters	Icarus 2007 Apr 10.0 TT	2007MK6 2007 Apr 10.0 TT
Perihelion distance q (AU)	0.1866177	0.1959358
Semi-major axis a (AU)	1.0778849	1.0807494
Eccentricity e	0.8268668	0.8187038
Argument of perihelion ω (°)	31.29236	25.38152
Longitude of ascending node Ω (°)	88.08105	92.94672
Inclination i (°)	22.85385	25.15553

Orbit diagrams

Icarus 2007 Apr 10.0 TT



2007MK6 2007 Apr 10.0 TT

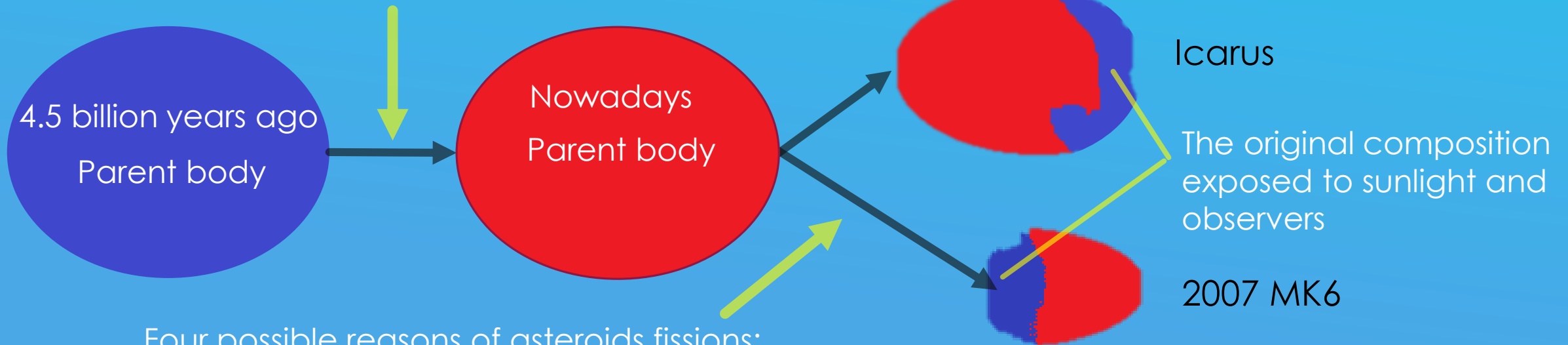


1. Introduction

- Review of our interest and purposes

We believe that asteroids **Icarus** and **2007 MK6** are belong to a same **parent body**, but somehow it broken up to two or more fragments.

The influence of space-weathering



Four possible reasons of asteroids fissions:

- a. Impact
- b. Tidal force
- c. Rotational fission
- d. Thermal fracture

One of two purposes is to determine the original composition, the other is to find out the true reason of fission of their parent body. My study is to determine the rotation periods of 2007MK6 in this summer .

2.Method

- Observation

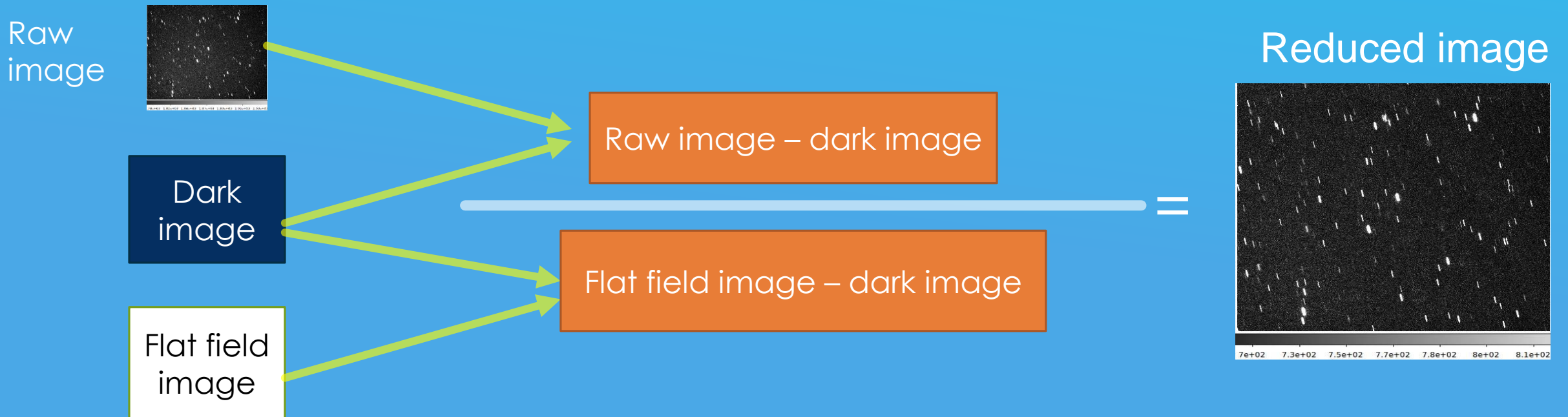
Observational information	Icarus	2007MK6
Telescope	RCOS 40 cm Field Flattener	LOT 1 m
Location	120°52'25''E 23°28'7''N	120°52'25''E 23°28'7''N
Height(m)	2862	2862
Time	2015/6/16~6/21	2016/6/30~7/4
Camera	Andor DZ936	Apogee U42
Focal length of telescope(mm)	3540	8000
CCD temperature	-80°	-35° C
Observers	Kinoshita Daisuke, Wu Wan-Ju	Kinoshita Daisuke, Chen Chen-Hung, Lin Chia-Lung

2.Method

- Basic CCD data reduction

This is a way to correct the raw image that consists of bias image, dark image and influence of flat field to the reduced image.

$$\text{Reduced image} = \frac{\text{Raw image} - \text{dark image}}{\text{flat field image} - \text{dark image}}$$

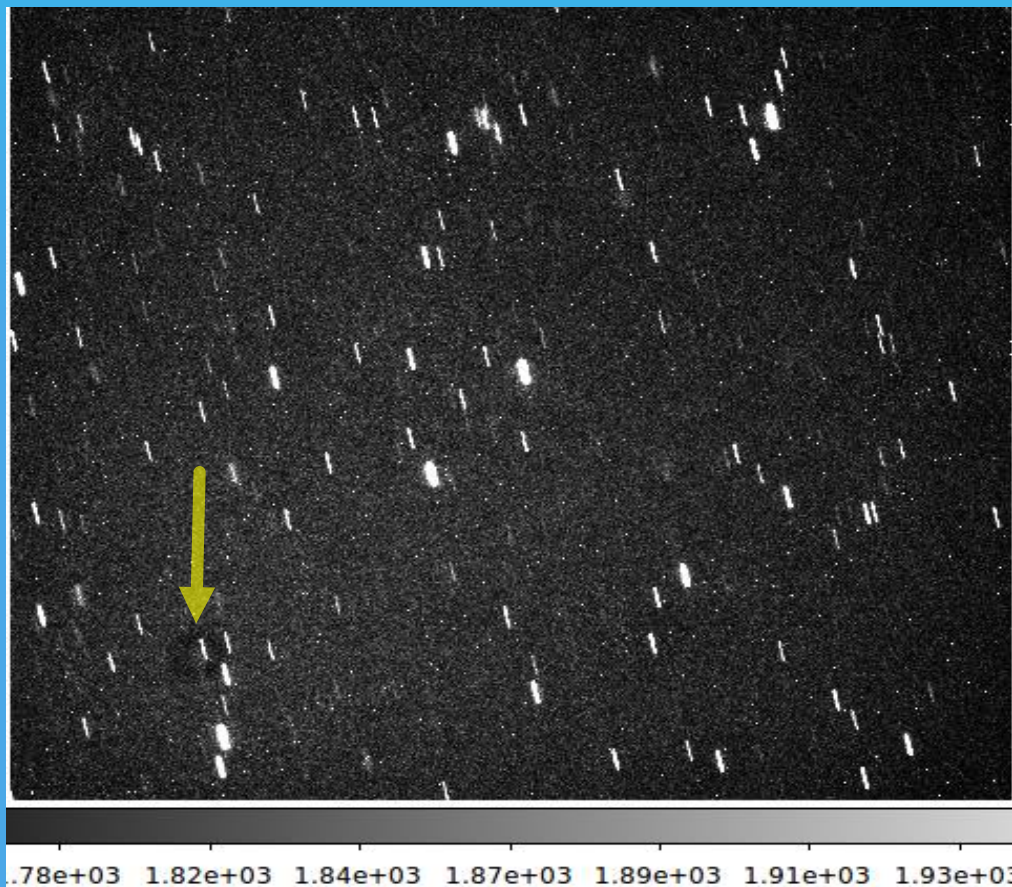


(P.S. : Dark images Including the bias level)

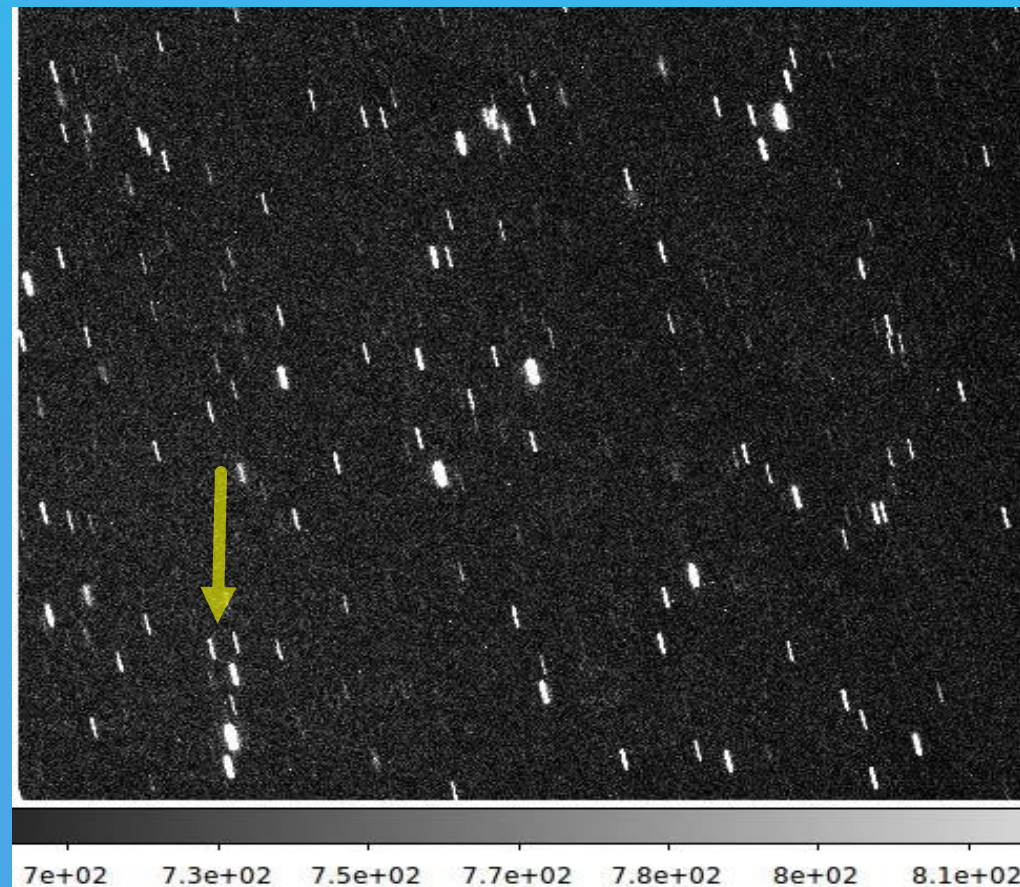
2.Method

- Basic CCD data reduction

Raw image



Reduced image



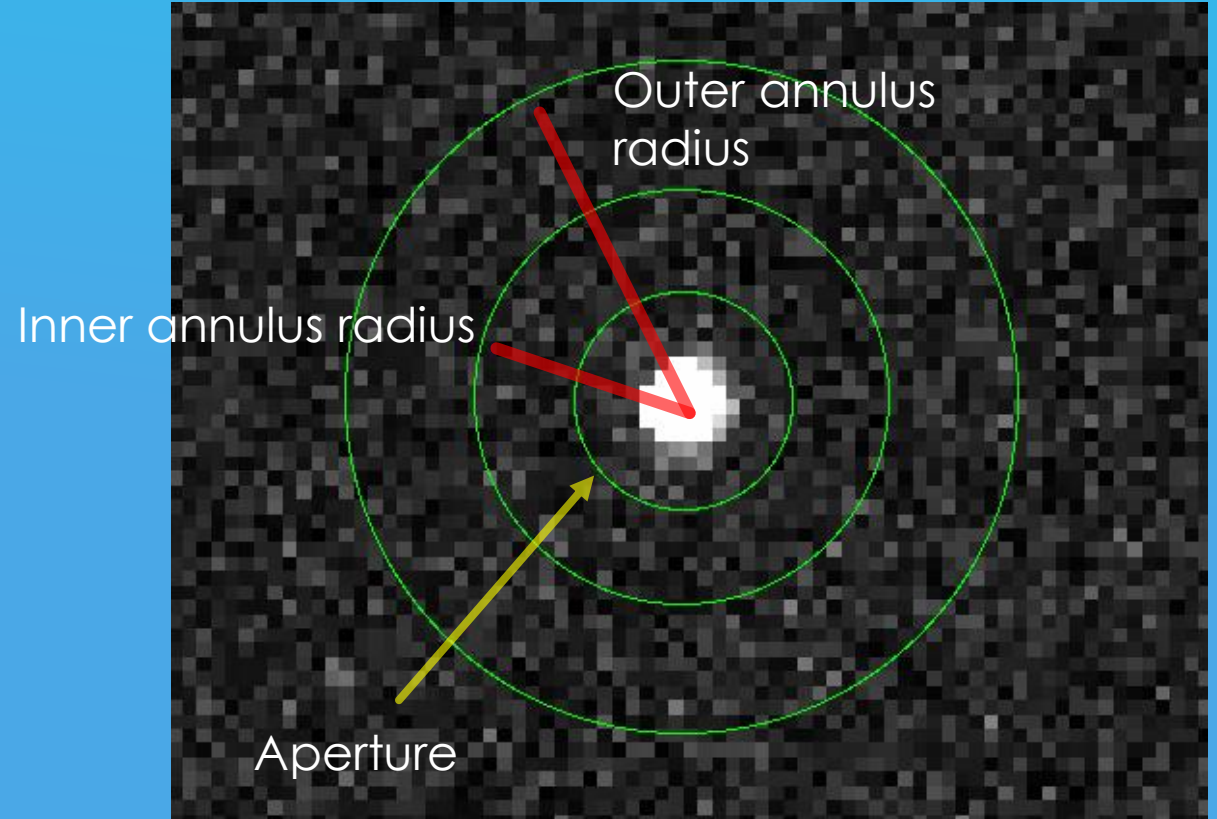
2.Method

- Aperture photometry

(Using IRAF & SAOImage Ds9)

This is a method to determine the source magnitude of the point sources of interest in the reduced CCD images.

The basic principle of aperture photometry is that one **enclose the star in a circular aperture of some radius r , and add up all the light in that circle.** Then, you **subtract off the amount of light contributed by the sky / background in that same area,** and you are **left with the brightness of the star.**



2.Method

- Aperture photometry

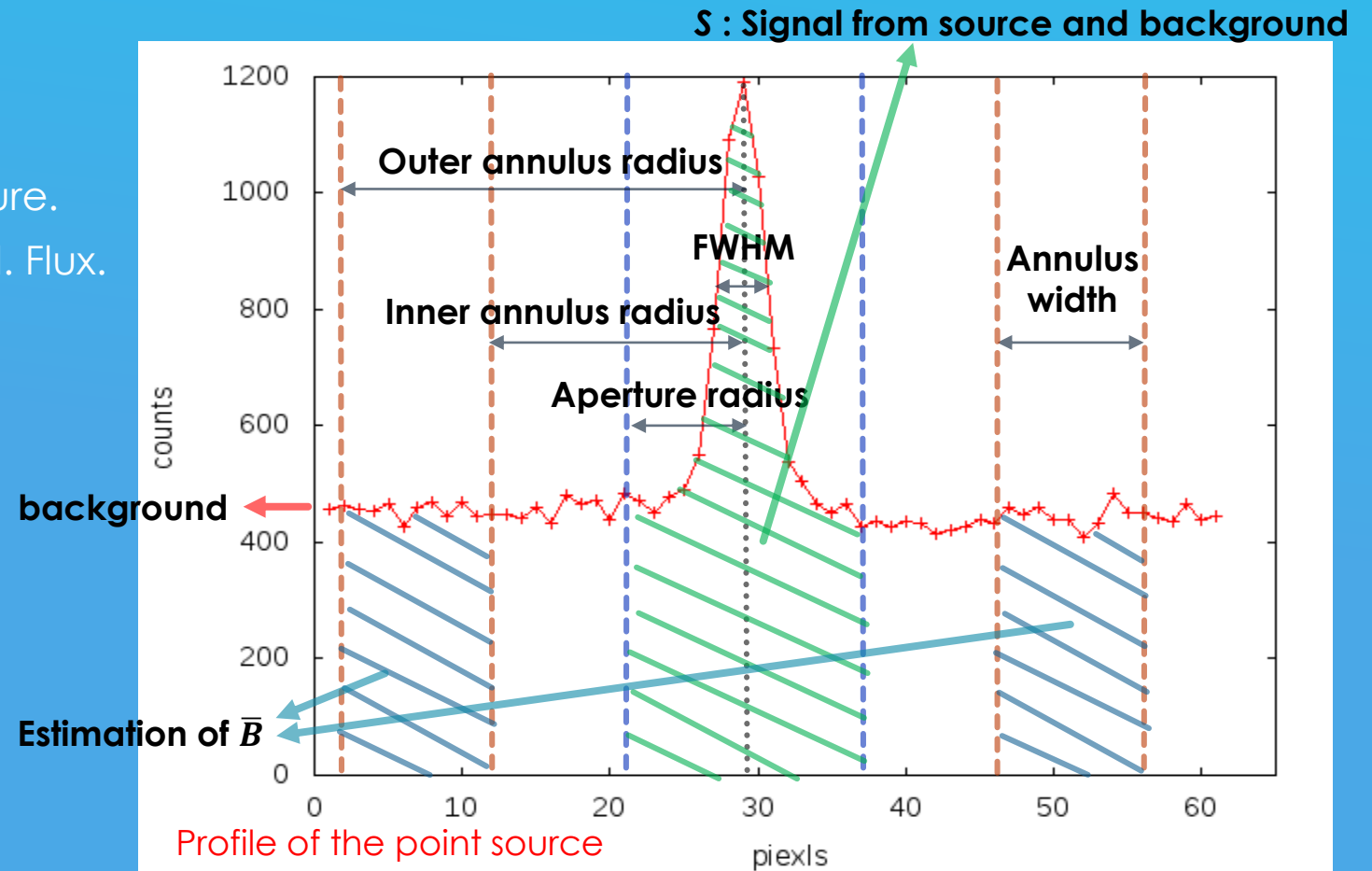
1. Summing up all the light in aperture of radius r , S .
2. Estimating the mean light signal of sky/background within in the annulus that placed near and around the aperture, \bar{B} .

$$I = S - n_{pix}\bar{B}$$

n_{pix} is the number of pixels within the aperture.

I is the collected source intensity per second. Flux.

- Aperture radius $\approx 3 \times$ FWHM
- Inner annulus radius **can not** be placed **too far from and close to aperture.**
- Outer annulus radius **can not** be placed **too far from and close to inner annulus.**



2.Method

- Aperture photometry

3. Estimating the magnitude of object of interest.

$$m_{instr} = -2.5 \log \left(\frac{I}{t} \right)$$

I is the flux of the object of interest

m_{instr} is instrumental magnitude

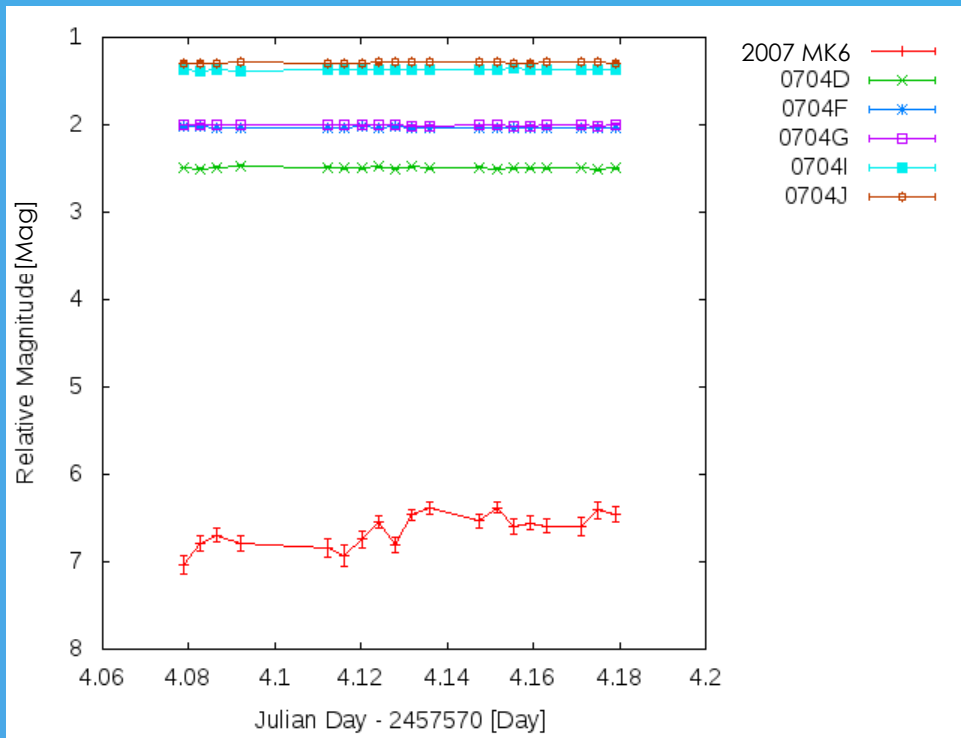
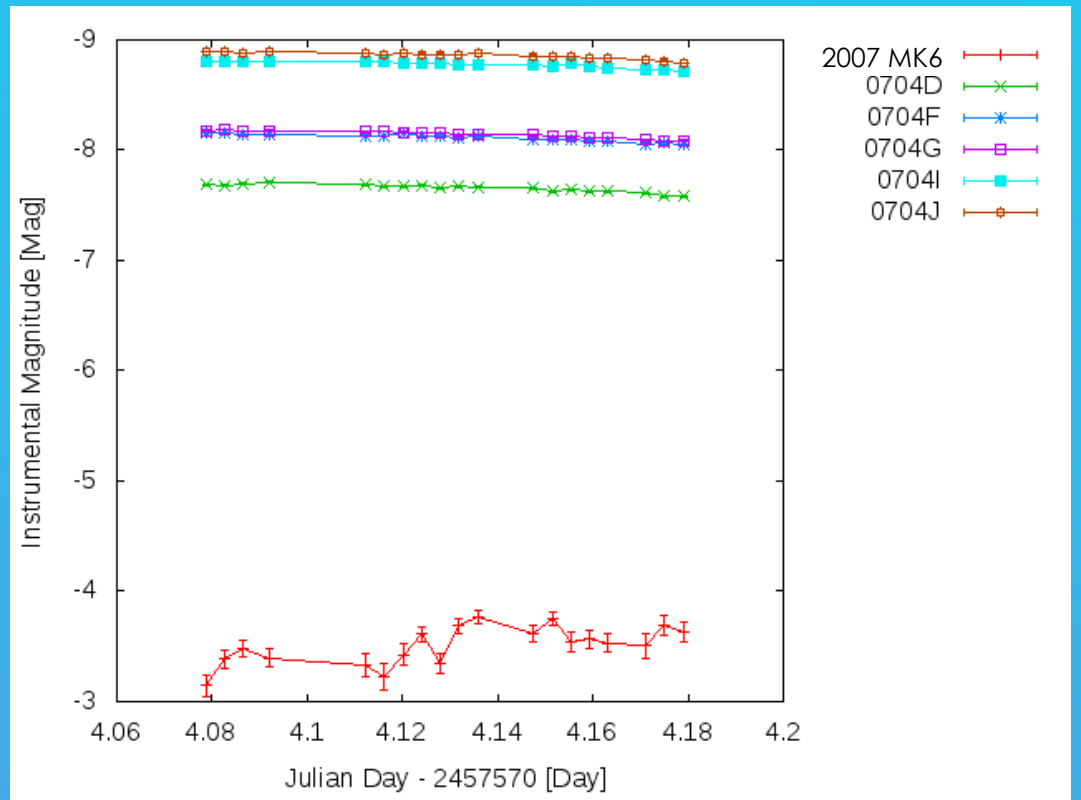
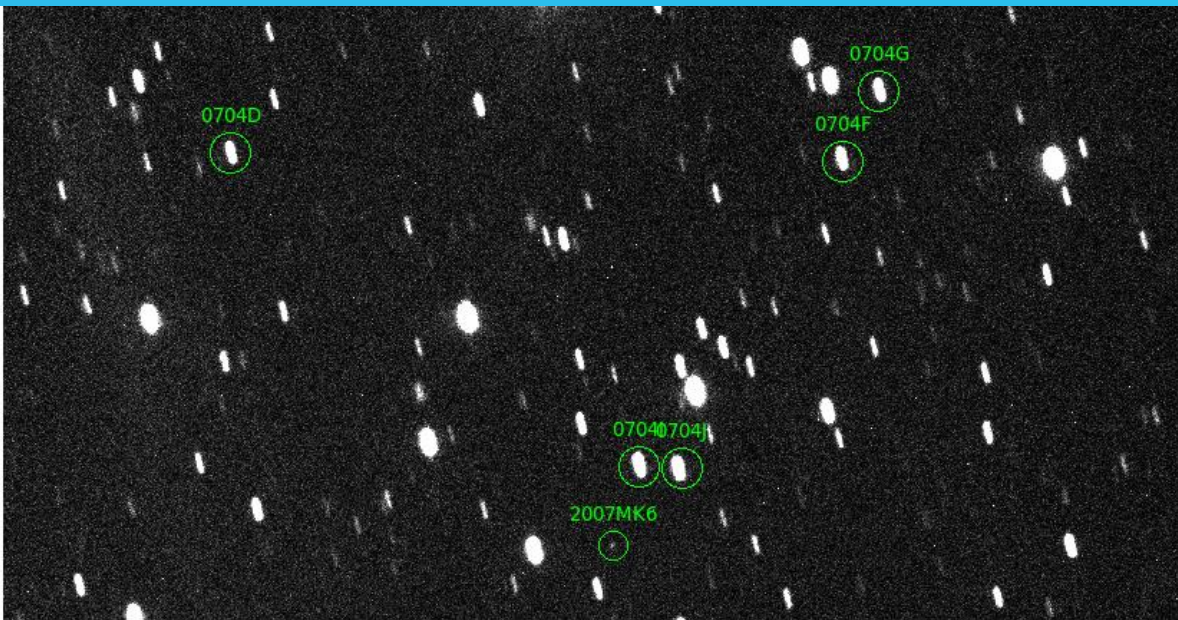
t is the exposures time of data images (= 300 s in these cases).

2.Method

- Differential photometry

A way to analyze the data of CCD images. The final result is only known with **respect to one or more other sources**.

If two unknown sources compare with each other in the same time, we can plot the graph of relative magnitude. **It is useful to remove the influence of Earth's atmosphere**, then you can observe which stars have **intrinsic variation** easily.



m_{sum} = instrumental magnitude of all suitable reference stars.
 m_{0704D} = instrumental magnitude of reference star 0704D, and so on.
 We take the m_{sum} as reference magnitude, then do the math.
 $m_{0704D} - m_{\text{sum}}$, $m_{0704F} - m_{\text{sum}}$, $m_{2007mk6} - m_{\text{sum}}$...
 We can see the brightness variation of reference stars was not intrinsic, but due to the variation of the Earth's atmosphere.
 Also, we can see the source 2007mk6's brightness variation was apparently intrinsic.

2. Method

● Differential photometry

選擇參考星

注意事項:

1. 不能選訊號至超過CCD像素飽和值的亮星，因為無法計算其真正的星等。
2. 不能選訊號過低的暗星，越暗的星其測光結果的誤差越大。
3. 不能選擇與附近天體距離太近的星星，若測光孔徑涵蓋到其他星星，那麼這顆星的測光結果將不可信。

觀測影像以小行星為中心，隨著小行星的快速移動，觀測影像上的出現的其他星體每一張都會有些不同，某張影像有拍攝到的星體可能就不在下一張或之後幾張的影像中了。一組觀測資料內的**參考星必須一致**且為了能在一組資料內**選擇較多的參考星**，故我將所有能用的觀測影像分成五組，**之後的五組個別處理**。

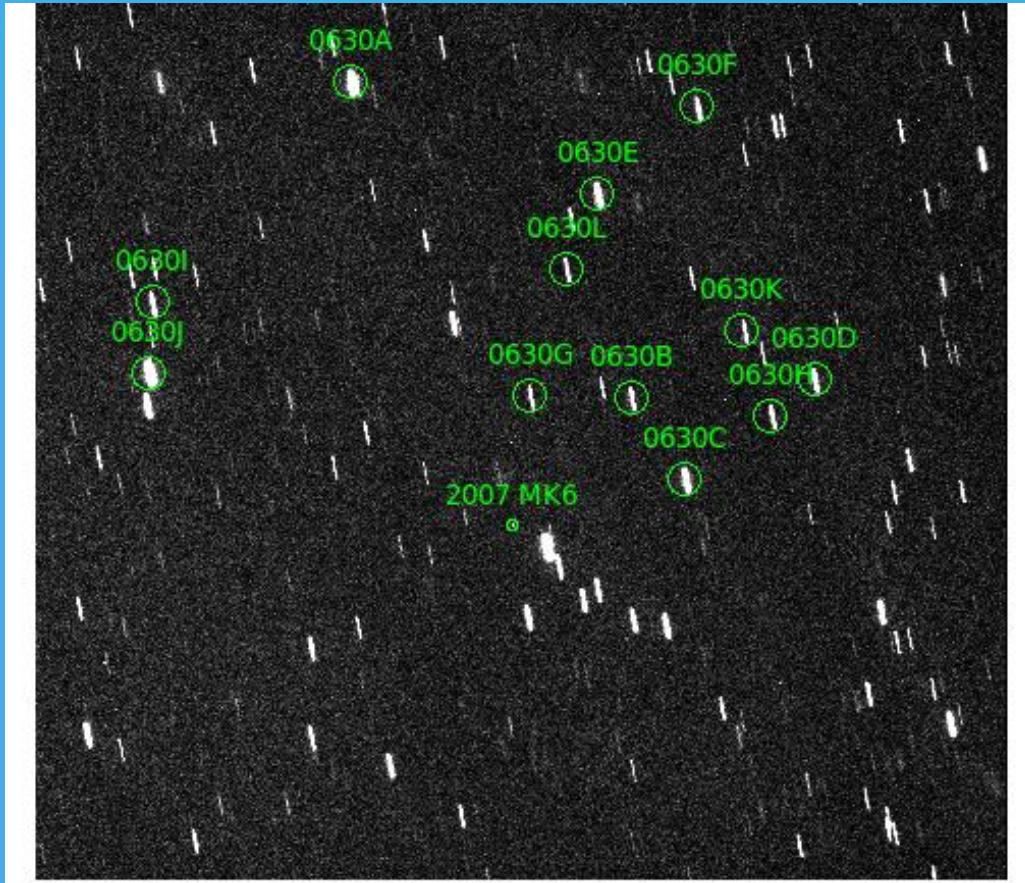
1. 2016/06/30 之32張觀測影像，分成第1~第18張一組
2. 2016/06/30 第15~第32張一組。
3. 2016/07/01 之15張觀測影像為一組。
4. 2016/07/02 之16張觀測影像為一組。
5. 2016/07/04 之26張觀測影像為一組。

2. Method

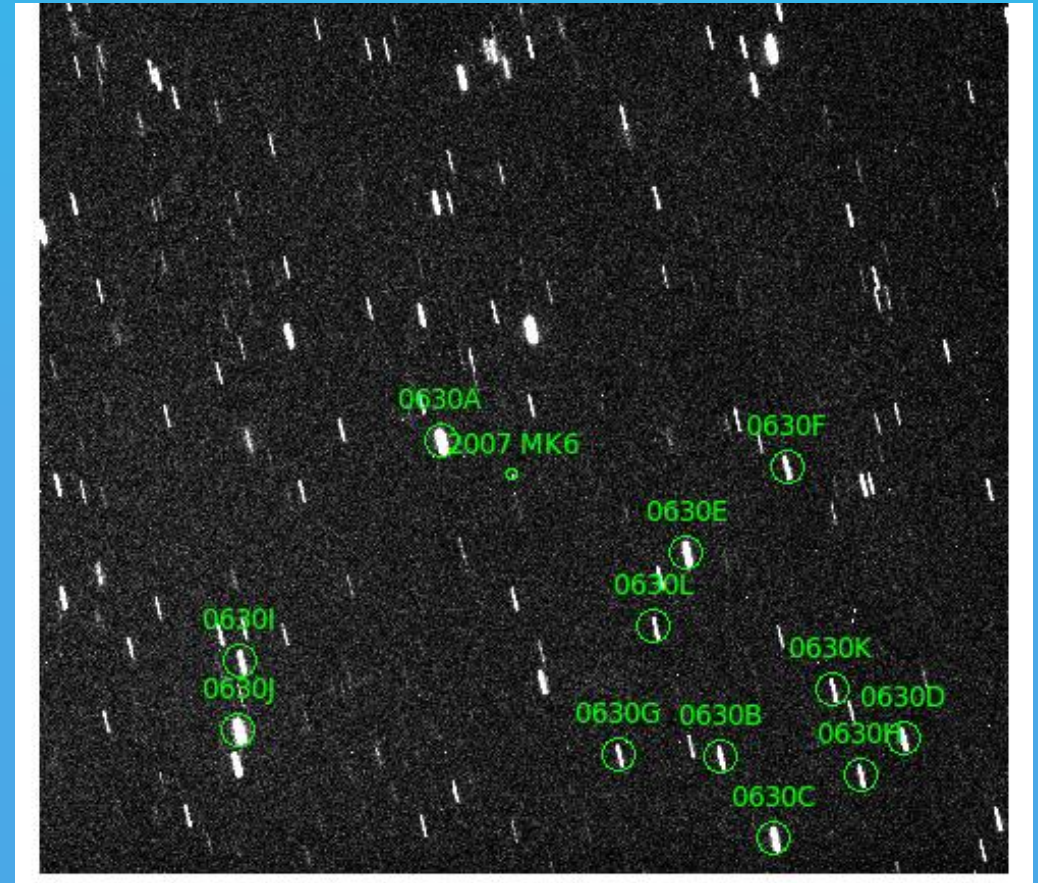
- Differential photometry - 選擇參考星的例子

2016/06/30第一組 1~18 參考星選擇。同時開啟第1張(左)與第18張(右)影像作比對，選擇有重複出現且適合的星星，標記身分後對參考星們進行孔徑測光，孔徑大小如下圖綠圈所示。

第一組第1張，拍攝時間：
2016/06/30 13:49:16 UT



第一組第18張，拍攝時間：
2016/06/30 15:22:47 UT



2. Method

- Differential photometry - 參考星等計算

分別將各組參考星的測光結果的flux加總，並計算之儀器星等 m_{RSsum} 作為參考星等。

$$m_{RSsum} = -2.5 \log \left(\frac{I_{sum}}{t} \right)$$

I_{sum} 是參考星flux的總和，

$$I_{sum} = I_1 + I_2 + I_3 + \cdots + I_n = \sum_{i=1}^n I_i$$

I_i 是第*i*個參考星的flux

t 是影像的曝光時間，這一次所有觀測影像的曝光時間為300秒。

再分別將各組的參考星的儀器星等減去相對應的 m_{RSsum} 求出每顆參考星的相對星等。

$$m_{RSrelat} = m_{RSintr} - m_{RSsum}$$

$m_{RSrelat}$ 為參考星的相對星等

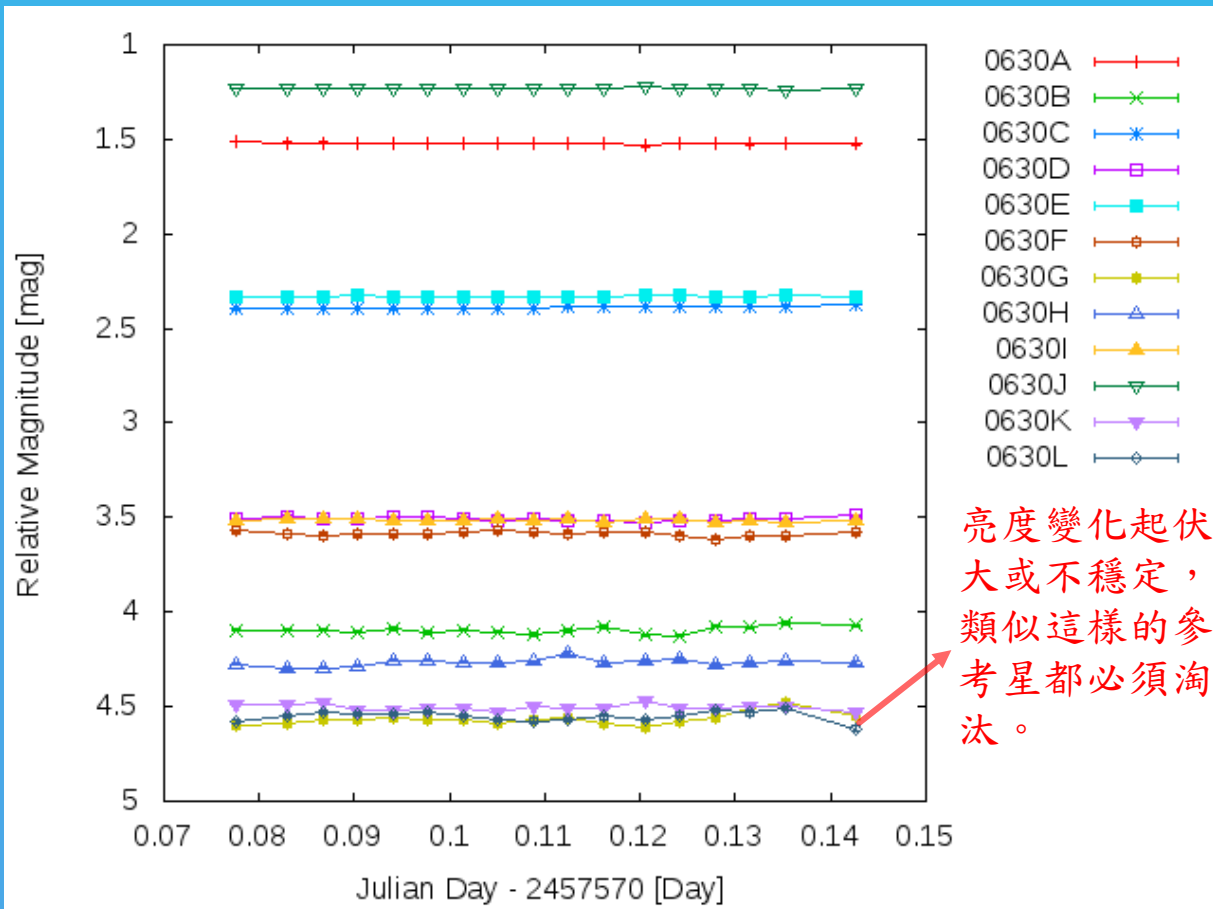
m_{RSintr} 為參考星儀器星等

2. Method

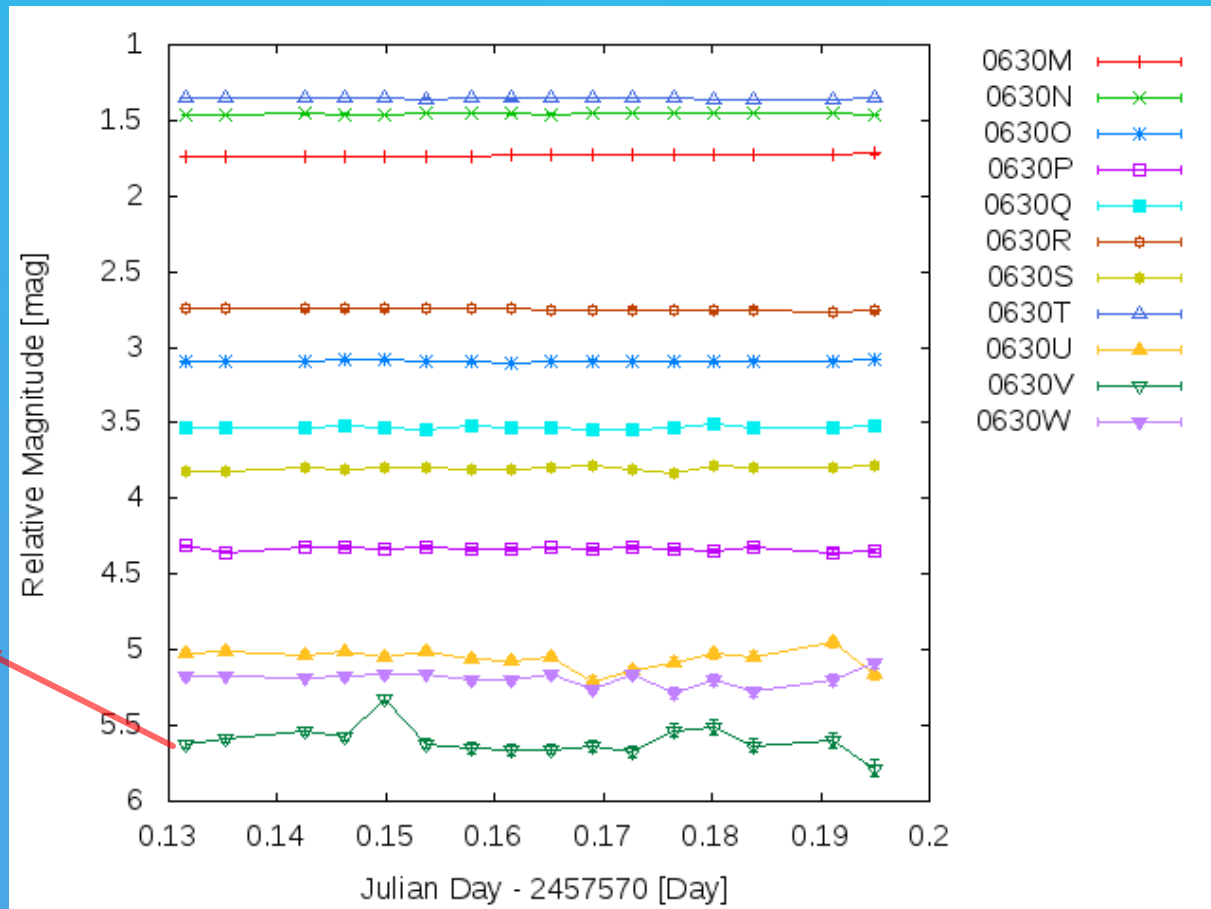
● Differential photometry - 參考星篩選

分別畫出每部分之每一顆參考星的相對星等隨時間變化圖，並以此淘汰掉不適合的參考星。

2016/06/30前半 1~18 部分



2016/06/30後半 15~32 部分

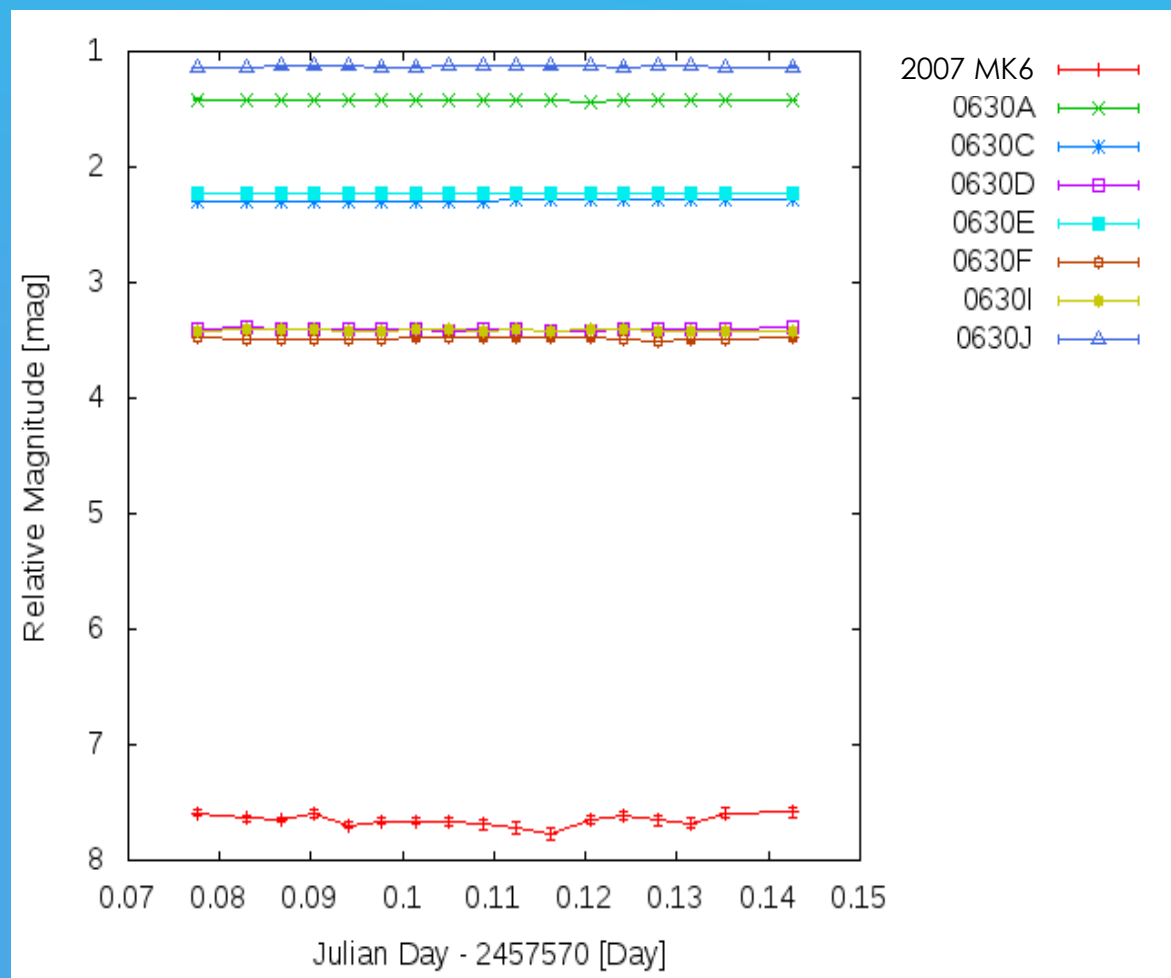


2. Method

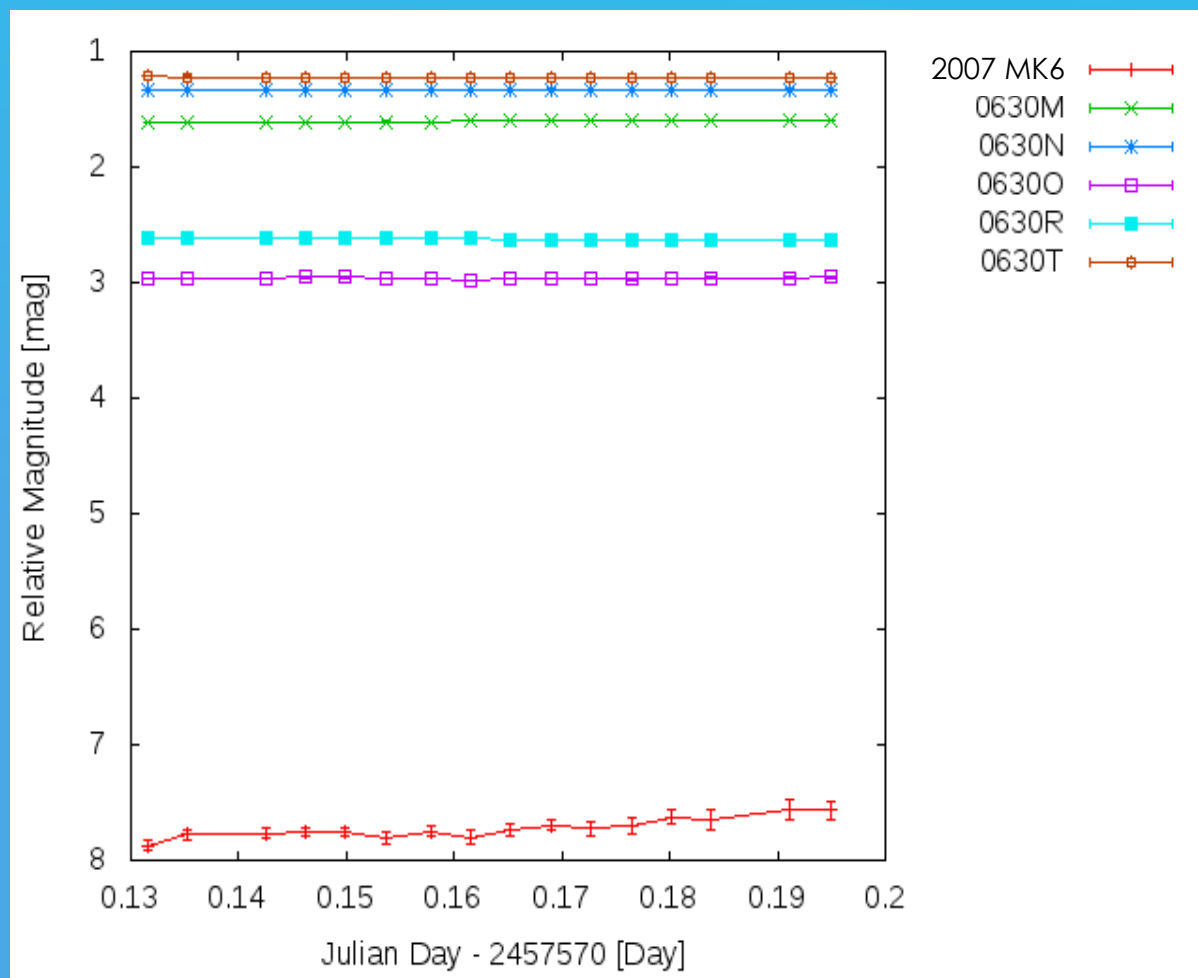
● Differential photometry – 2007 MK6相對星等

總和最後篩選的參考星之flux並計算其 m_{RSum} ，其他重複如上方式。2007 MK6之儀器星等減去新的 m_{RSum} ，並繪製、觀察2007 MK6之相對星等變化曲線。

2016/06/30前半 1~18 部分



2016/06/30後半 15~32 部分



2. Method

• Corrections

Time correction

時間單位皆為 day.

1. 小行星影像真正的觀測時間。

一張CCD影像有開始曝光時間、結束曝光時間，影像真正的觀測時間為這兩者的中間值。

真正的觀測時間 = 開始曝光時間 + $t / (2 \times 86400)$ ， t 為影像曝光時間，單位為秒。

2. 小行星反射光出發時的時間。

我們觀測到的小行星是 $\Delta AU / c$ 秒以前的小行星，我們必須要知道它真正的時間

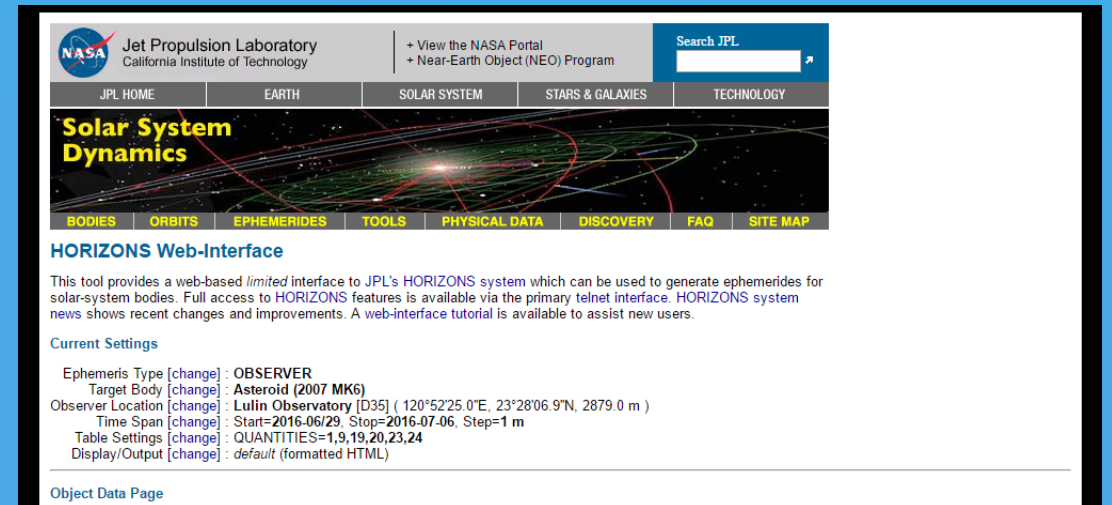
小行星反射光出發時間 = 真正的觀測時間 - $\Delta AU / 86400c$

$c = 3.0 \times 10^8$ m 光速

Δ 是小行星距離觀測者的距離. (AU)

AU = 1.4960×10^{11} m 天文單位

Δ 可以在 JPL Horizon 上找到我們需要的數值。



Jet Propulsion Laboratory
California Institute of Technology

View the NASA Portal
Near-Earth Object (NEO) Program

Search JPL

JPL HOME EARTH SOLAR SYSTEM STARS & GALAXIES TECHNOLOGY

Solar System Dynamics

BODIES ORBITS EPHEMERIDES TOOLS PHYSICAL DATA DISCOVERY FAQ SITE MAP

HORIZONS Web-Interface

This tool provides a web-based *limited* interface to JPL's HORIZONS system which can be used to generate ephemerides for solar-system bodies. Full access to HORIZONS features is available via the primary telnet interface. HORIZONS system news shows recent changes and improvements. A web-interface tutorial is available to assist new users.

Current Settings

Ephemeris Type [change]: OBSERVER
Target Body [change]: Asteroid (2007 MK6)
Observer Location [change]: Lulin Observatory [D35] (120°52'25.0"E, 23°28'06.9"N, 2879.0 m)
Time Span [change]: Start=2016-06/29, Stop=2016-07-06, Step=1 m
Table Settings [change]: QUANTITIES=1,9,19,20,23,24
Display/Output [change]: default (formatted HTML)

Object Data Page

<http://ssd.jpl.nasa.gov/horizons.cgi#results>

2. Method

● Corrections

Brightness correction

為了得到可以分析的光變曲線，必須盡可能將每一天2007 MK6的相對星等變化區間統一。

1. 小行星與地球的距離以及與太陽距離的星等修正

同一顆小型天體，在與地球的距離以及與太陽距離不同時所觀測到的星等也會不同，這樣的影響必須修正。

小行星-太陽距離星等校準:

$$dm_R = -5 \log_{10} R$$

小行星-觀測者距離星等校準:

$$dm_{\Delta} = -5 \log_{10} \Delta$$

R 是小行星與太陽的距離，單位為AU，一樣可以到JPL Horizon 上尋找對應的值。

2. 不同參考星所造成的差別校準。

由於每組所選的參考星不盡相同，故每組2007 MK6的相對星等也會有所差異。以2016/06/30 1~18這組的已經過篩選的參考星為基準，計算其他組適合參考星與其的差別，再用這個差別修正每一組的2007 MK6的相對星等。可以到 IRSA PTF 網站上找到每顆參考星的視星等來計算。 IRSA PTF <http://irsa.ipac.caltech.edu/applications/ptf/>

2. Method

● Corrections – 星等修正計算

同天不同組之間與不同天不同組之間的星等修正計算方式有所不同。

1 -同天不同組觀測資料修正方式:

較為單純。2016/06/30 15~32 這組的第15 16 18 (第17張小行星與其他天體重疊, 不能用)與1~18 之 15 16 18 的做平均相對星等差計算的計算, 再讓15~32整組小行星的相對星等扣掉這個數值, 就能將這同一天的兩組光變曲線相接。

2 -不同天不同組觀測資料修正方式(以2016/06/30第一組的已篩選參考星為基準):

$$m_{cr} = m_{intr} - 2.5 \log \left(\frac{I_{sum}}{t} \right) + dm_R + dm_{\Delta} - m_{0630-1} + m_b$$

m_{cr} 為已修正相對星等

m_{intr} 是2007 MK6儀器星等

I_{sum} 是參考星flux的總和

$dm_R = -5 \log_{10} R$ 小行星-太陽距離星等修正

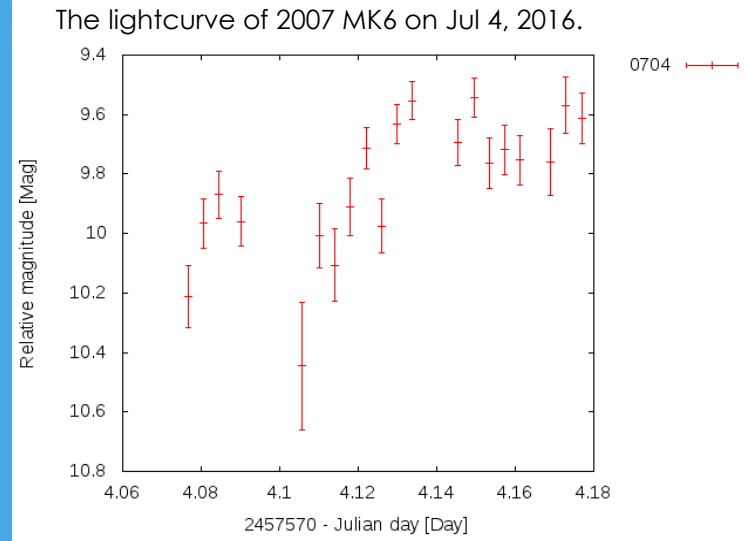
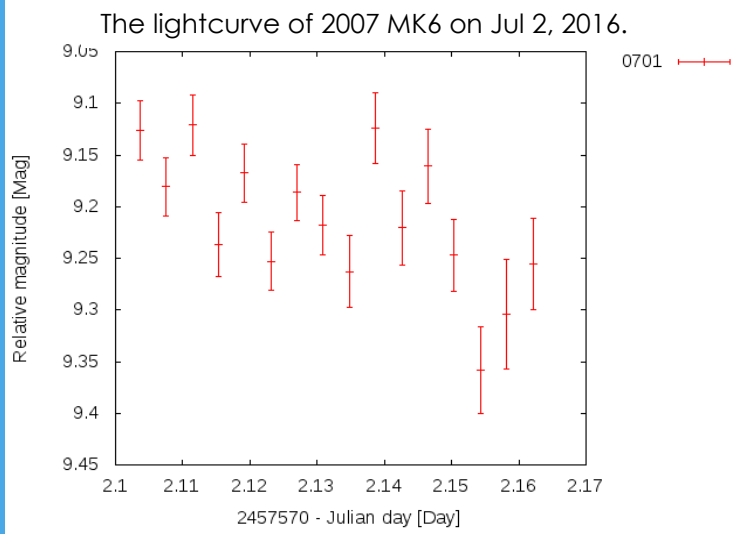
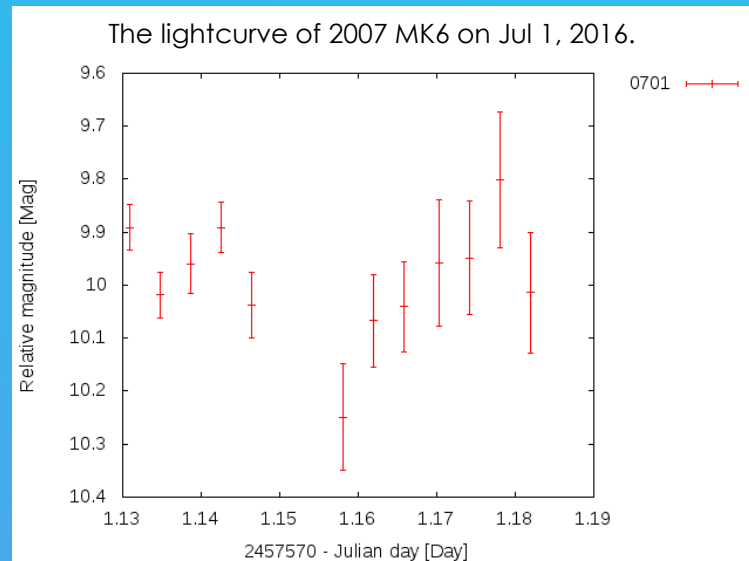
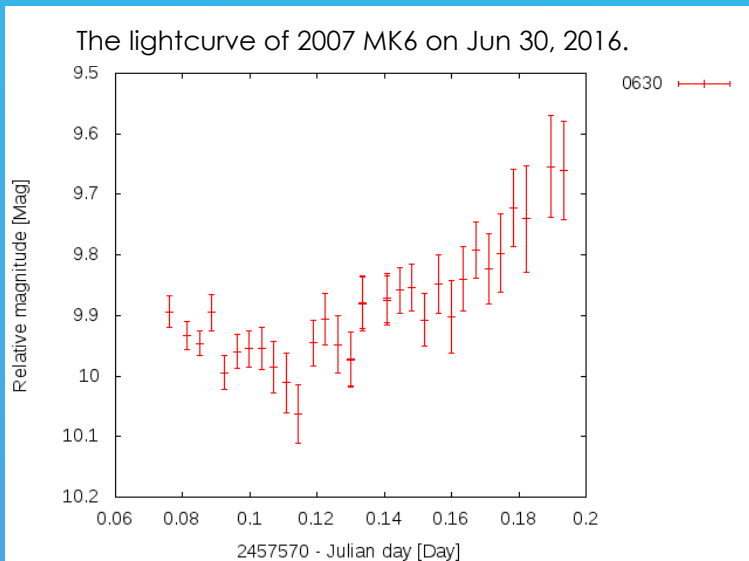
$dm_{\Delta} = -5 \log_{10} \Delta$ 小行星-觀測者距離星等修正

m_{0630} 是從PTF資料計算之2016/06/30 第一組的已篩選參考星flux總和的視星等

m_b 是從PTF資料計算之欲修正觀測天之參考星flux總和的視星等, b=0701, 0702, 0704

2. Method

- Corrections – the available light curves to periodicity analysis
各組經過時間、星等的修正後所畫個觀測天之相對星等光變曲線圖。可以發現每天Y軸的區間都很相近，除了2016/07/02的觀測資料。經過反覆驗算、檢查後依然未能解決問題，故決定放棄對2016/07/02觀測資料做週期分析。



2.Method

- Periodicity analysis

Lomb – Scargle periodogram (L – S periodogram)

Lomb於1976年提出 Lomb periodogram 用來分析非均勻間隙數據，Scargle 在 1982年加入統計性質來考慮週期訊號的可靠性。這個方法可以用來分析一組資料內是否有週期性，以及其週期的大小。

假如有N個資料點， h_i 為對應的星等， t_i 為對應時間。

$$h_i = h(t_i), i = 1, \dots, N, \quad \bar{h} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N h_i \quad \sigma^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (h_i - \bar{h})^2 \quad \tan 2\omega\tau = \frac{\sum_j \sin 2\omega t_j}{\sum_j \cos 2\omega t_j}$$

$$P_N(\omega) \equiv \frac{1}{2\sigma^2} \left\{ \frac{[\sum_j (h_j - \bar{h}) \cos \omega(t_j - \tau)]^2}{\sum_j \cos^2 \omega(t_j - \tau)} + \frac{[\sum_j (h_j - \bar{h}) \sin \omega(t_j - \tau)]^2}{\sum_j \sin^2 \omega(t_j - \tau)} \right\}$$

$P_N(\omega)$ 為標準化後的強度。

由小至大將頻率(週期倒數)代入上式並繪製頻率與強度的關係圖，稱強度頻譜圖。觀察強度頻譜圖，對應強度越高的頻率越有可能是我們所要的結果。

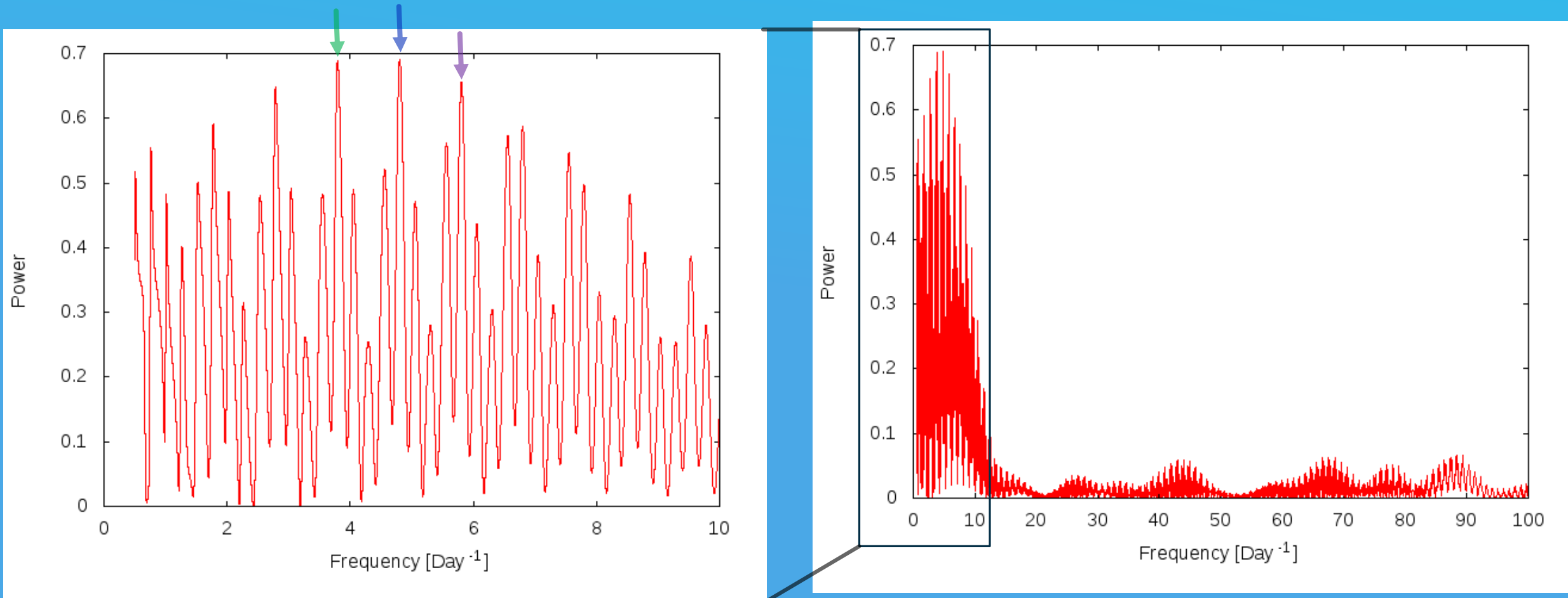
3. Results and discussions

2007 MK6之強度頻譜圖

可以明顯地發現到強度峰值出現的區間，由於最高的幾個峰值十分接近，故在此區間內選擇峰值前三高（**最有可能的前三個**）對應的頻率做2007 MK6的週期分析。

分別為：

最高點(藍色)：0.208180 day，次高點(綠色)：0.263525 day，第三高點(紫色)：0.172240 day



3. Results and discussions

相位分析

我利用所得到的三種可能的週期對2007 MK6光變曲線做相位分析圖，再使用正弦週期函數進行擬合，做出擬合曲線，並以擬合結果判斷哪一個才是真正的光變週期。擬合函式： $f(x) = a\sin(x + b) + c$

Power最高點之週期：

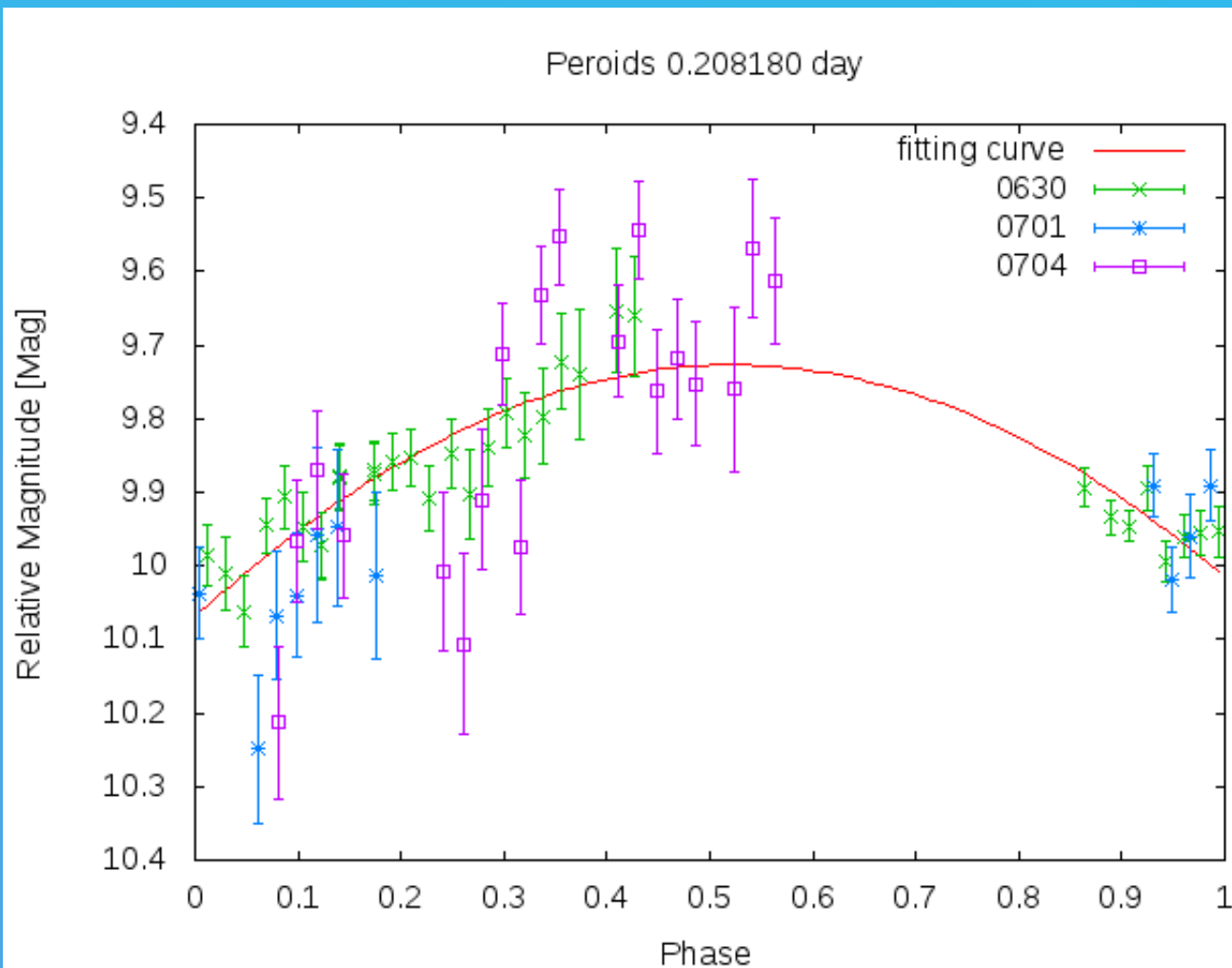
0.208180 day = 4.99632 hr

擬合結果：

$$a = 2.57166$$

$$b = -171.739$$

$$c = 12.2986$$



3. Results and discussions

Power次高點之週期：

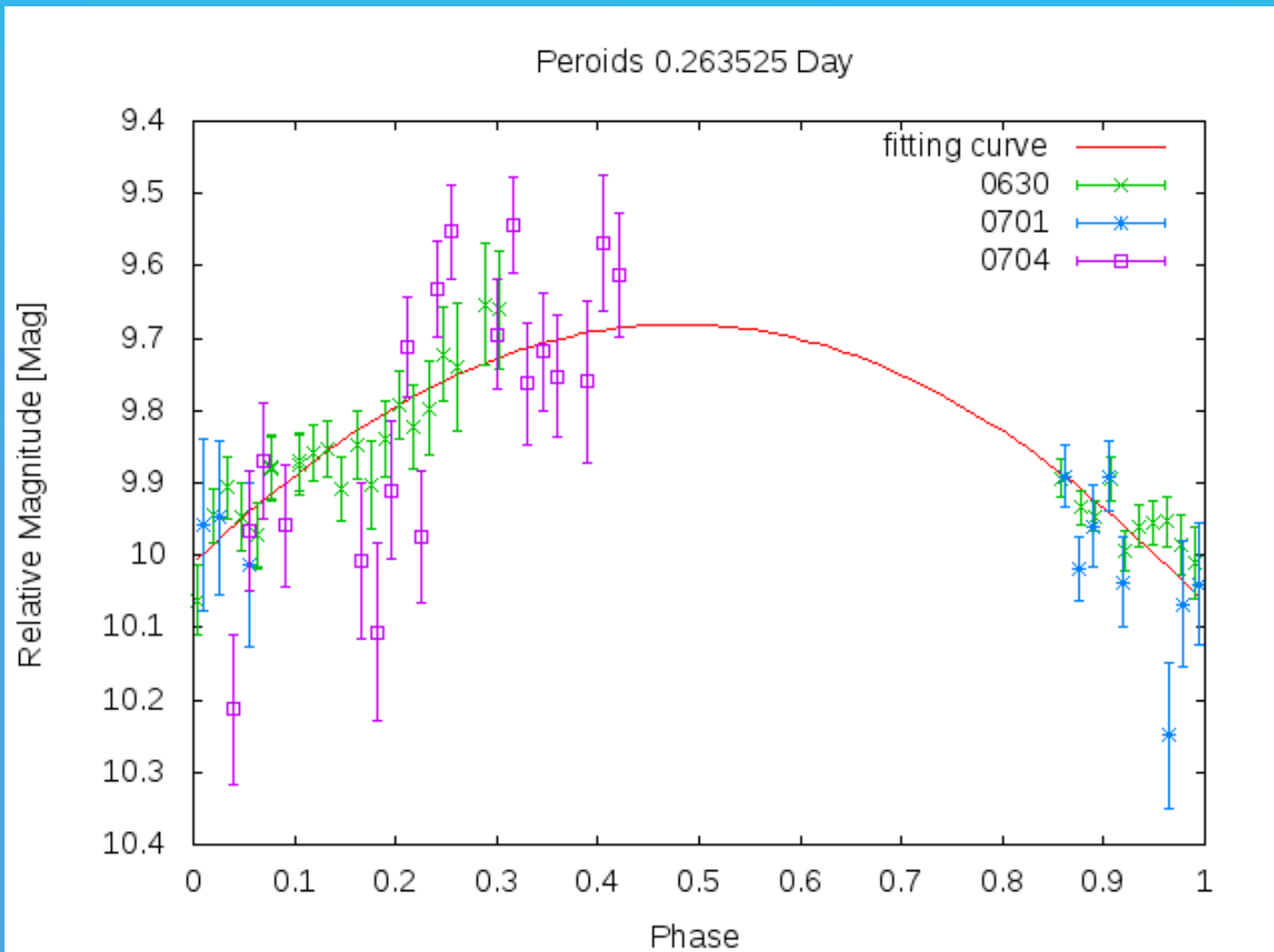
0.263525 day = 6.3246 hr

擬合結果：

$a = 2.92731$

$b = -171.697$

$c = 12.6078$



3. Results and discussions

Power 第三高點之週期 :

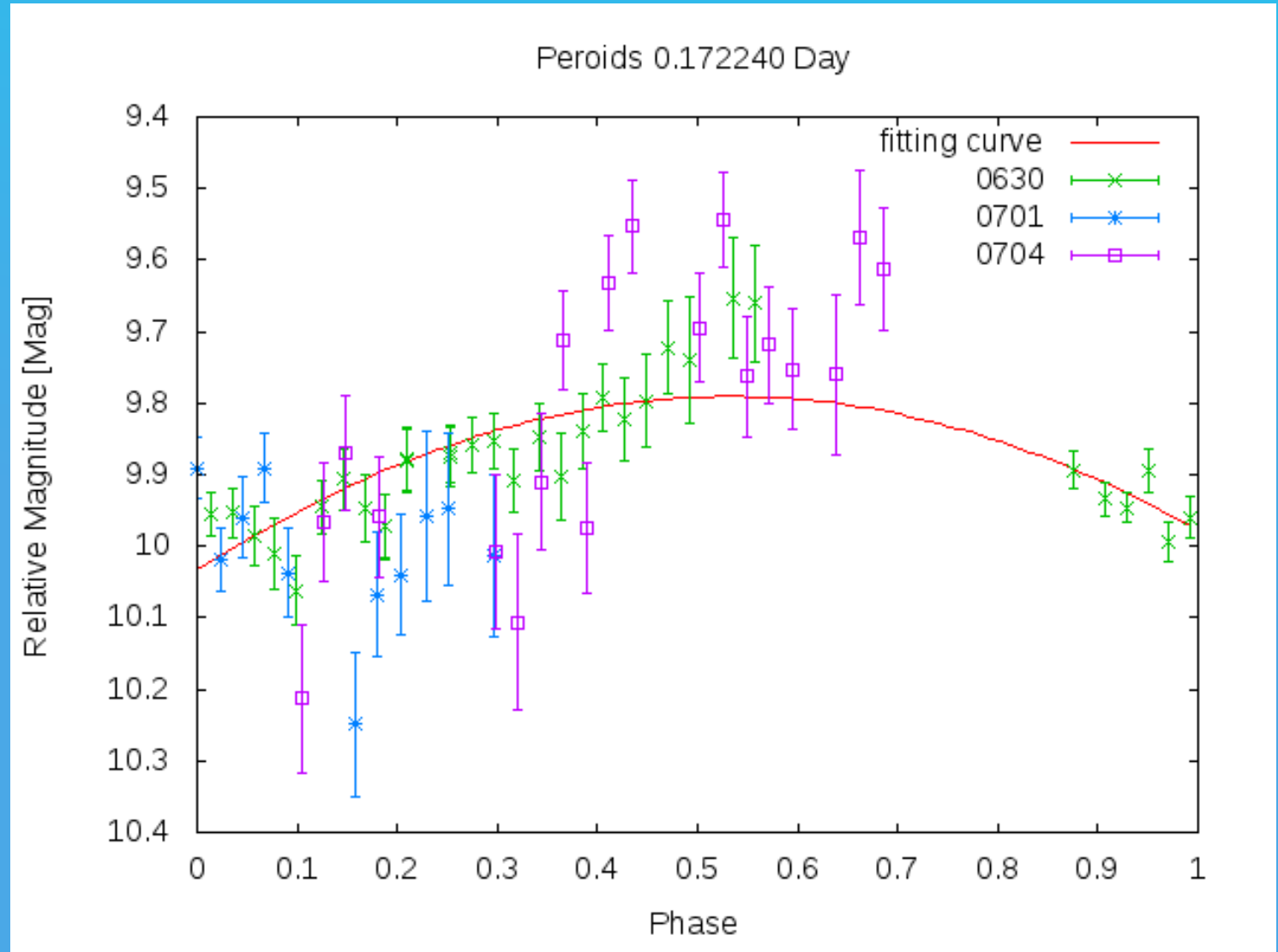
0.172240 day = 4.13376 hr

擬合結果:

$a = 1.75055$

$b = -171.75$

$c = 11.5412$



3. Results and discussions

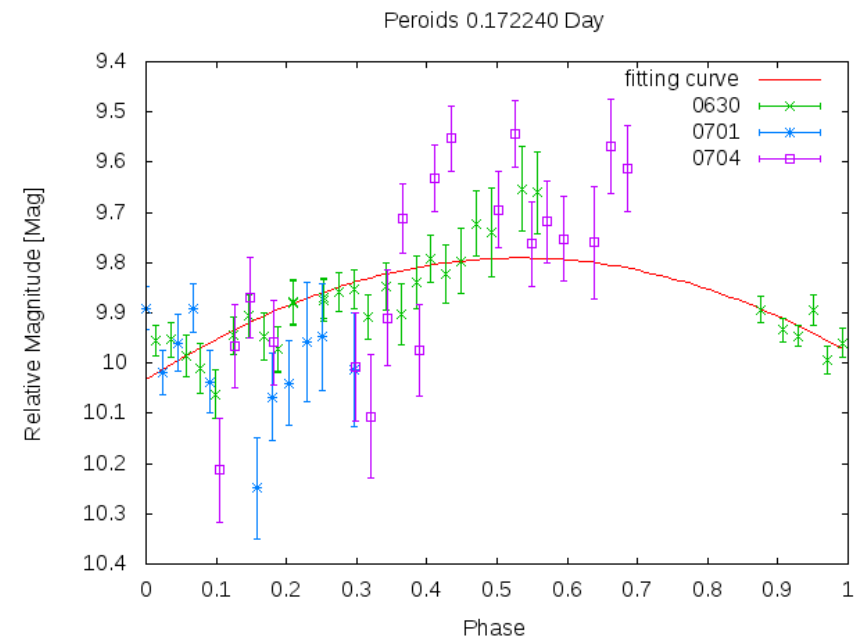
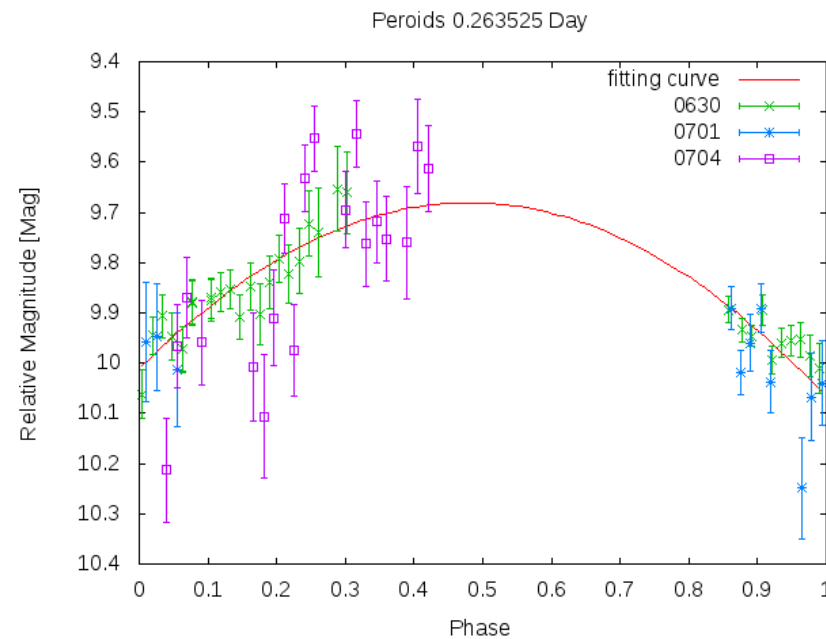
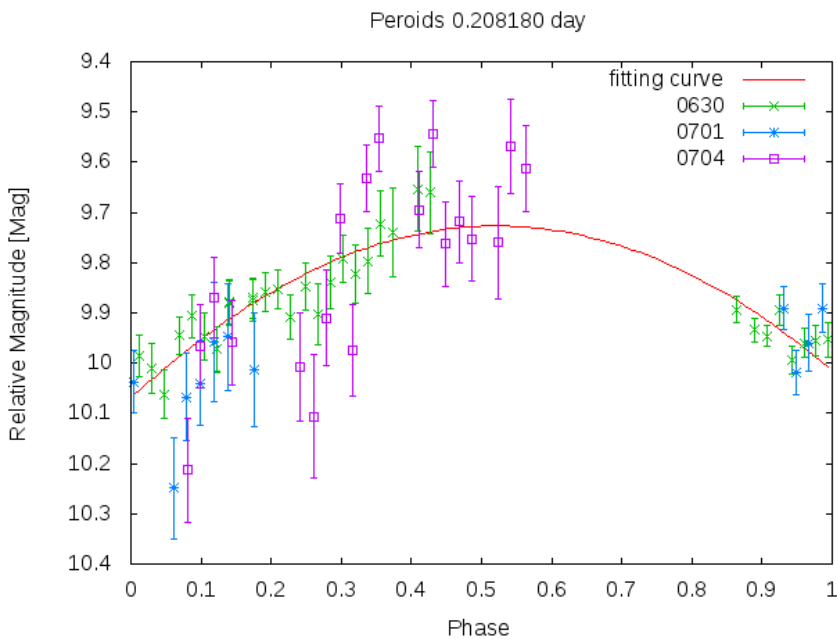
發現三種週期都能夠以正弦函數做擬合，且三種擬合結果之初相角非常相似。

三張圖放在一起比較，乍看之下週期0.263525 day 的擬合結果似乎最好，但光是憑這些擬合結果也無從判定哪一個才是2007 MK6真正的光變週期。現在的結果只能夠確認有這三個最有可能的候選者。

Power最高點之週期
(機率最高)

Power次高點之週期
(機率次高)

Power第三高點之週期
機率第三高



4. Summary

- a. 為了瞭解Icarus 與 2007 MK6過去是如何從一顆母星體分裂開來這樣的一個長遠目標，且今年六月至七月是2007 MK6接近地球的時間，故2007 MK6的旋轉週期的研究為我這暑假主要的研究題目。
- b. 今年2016/06/30至07/04我在中央鹿林天文台進行觀測，取得這個暑假我主要分析的資料。利用 aperture photometry來測量2007 MK6儀器星等。為了創造能夠進行週期分析的2007 MK6之光變曲線，利用differential photometry來找出各個觀測資料小行星的相對星等，並做時間與亮度上的修正，最後得到能夠進行週期分析的為:2016/06/30、2016/07/01、2016/07/04 三天的觀測資料。
- c. 利用L-S periodogram 進行週期分析並繪製強度頻譜圖。由於最高的幾個峰值非常接近，故找出三個最有可能的週期：最高點(機率最高) 4.99632 hr, 次高點(機率次高) 6.3246 hr, 第三高點(機率第三高) 4.13376 hr。
- d. 正弦曲線能夠擬合各週期對2007 MK6光變曲線的相位分析結果，且各週期之相位分析的擬合好壞差別不大，無從判斷哪一個才是真正的週期。
- e. 這一次得到的結果還不能夠確定2007 MK6真正的光變週期，但提供了三種最有可能的候選者。會造成這樣的結果可能是因為觀測資料的不足或者質量不高，若之後有機會與其他擁有相關資料的團體合作研究，這一次研究得到的結果可以是個很好的切入點。

THANK YOU FOR YOUR ATTENTION

References:

Handbook of CCD Astronomy – Steve B. Howell 2006

Gnuplot in Action – Philipp K. Janert 2010

Planetary Sciences second edition – Imke de Pater and Jack J. Lissauer 2010

A Beginner's Guide to Using IRAF

A User's Guide to CCD Reductions with IRAF

<http://irsa.ipac.caltech.edu/frontpage/>

<http://ssd.jpl.nasa.gov/horizons.cgi#top>

http://lidodo.astro.ncu.edu.tw/PIRE2016SCamp/file/SummerCamp2016_Ngeow_CCD.pdf