

中華民國第 61 屆中小學科學展覽會  
作品說明書

---

國小組 物理科

第一名

080102

銀燭星光冷畫屏-塔比星的光變曲線研究

學校名稱：新竹縣竹北市十興國民小學

作者： 小六 蘇子斐	指導老師： 賀芝庭
---------------	--------------

關鍵詞：塔比星、光變曲線、聯行星

# 得獎感言

## 全國科展，學以致用的天堂

「080102 (註：科展作品編號)，開鏡頭！」全國賽評選的指令一下，這是我從未想到的一瞬間.....一年之前，一如往常在網路上查詢天文資料的我，根本沒想到會參加科展，當然更不可能想到我能進入全國科展的評選。在報告完後，一股壓抑感湧上心頭，「我報告的好不好？」、「我的回答好不好？」，各式各樣的問題在腦中浮現，生怕我講錯了什麼，這股緊張感幾天後就消失了，但是這次參與科展的經驗和收穫卻永遠留存於我的心中。

在剛開始實驗時需要導出數據、再將數據進行編輯做成表格，然後調整實驗、再導出數據，一直重複的過程非常繁瑣，使得實驗相當費力又無聊。同時又要進行畢業的獨立研究報告，因此我覺得有些負荷不了，所以在過程中有一度想要放棄。有天突發奇想，想到利用即時監看程式來協助我整理所有的數據，整個過程就沒有那麼複雜。在此同時，我也把我的星體移動裝置做了改良，使其變得更容易操作，有了這樣的過程，之後遇到的各種問題，我便開始思考要如何去解決。

當第一次從即時監看程式看到了我模擬出的光變曲線時，那股激動的心情早已掩蓋了放棄科展的念頭。雖然剛開始我的實驗過程非常的繁瑣，但在對我的裝置和程式進行改良之後，我的實驗方法就變得相較起來比較簡單，所有的問題彷彿就迎刃而解了。

全國科展是全國中小學生科學研究的盛會，當然也帶給我了許多不凡的經驗和收穫。首先在撰寫報告時，條列式的分析研究數據，讓我的思考方向更加的有邏輯，接著在查詢關於塔比星的天文資料時，我了解到更多關於天文的知識。最後這次科展報告時的練習，讓我的報告方式更加的自然，除了這些以外，科展也讓我的研究精神進步了很多。但是這些都只是我學到的知識和經驗，實際上真正對我來說最大的收穫就是學會了不放棄的精神。

我希望在這之後參展的學弟妹，平時能多閱讀，不要只局限在課本裡的內容，要去涉獵多方面的知識。平常老師提供上台發表的機會都要好好把握並主動爭取，練習自己的發表能力。對於事情的分析，要善用心智圖，這樣子在整理研究數據的時候，可以把數據分析的有條有理，整體上來說會輕鬆許多。當然最後更少不了的就是對你的主題有興趣，只要有了興趣就會想要不懈的努力，也就一定會有收穫。

對於這次科展，我要謝謝指導我的賀芝庭老師，在過程中的指導以及科展報告的修訂；還有學校許多師長的幫助，最後我也要感謝我的爸媽在過程中的支持。



為了防止實驗的亮光刺眼，利用美勞課剩餘的材料做成的護目鏡。



代表新竹縣國小組物理科參加全國科展。



特殊的科展經驗：當天是疫情之下的全國科展複審。

## 摘要

塔比星是一顆位於天鵝座的恆星，他的光變曲線同時擁有不對稱性以及大光度變化，常常是天體物理學家的研究對象。在這份報告中，我探討塔比星的基本屬性，我也使用樂高作為硬體結構的主要構成部件，以 Scratch3.0 做為控制用的程式語言，在此基礎下，開始設計與建立恆星系模型。我會用此模型模擬各種光變曲線的可能性，包括校正整體的光變曲線、模擬兩顆行星同時掠過塔比星的光變曲線實驗以及聯行星掠過塔比星的光變曲線實驗。我也會將這些內容，與克卜勒(Kepler)太空望遠鏡所觀測到的數據做比較，在其中也有使用『宇宙沙盒』做出一個塔比星系的模擬。

## 壹、研究動機

我從小就非常喜歡天文知識，某天，我一如既往的在網路查詢天文資料時，看到塔比星這顆奇怪的恆星，他的光變曲線兼具不對稱性以及大光度變化等奇特行徑，不禁讓我感到相當有趣。也因為此特性有諸多科學家提出各種不同的假說，甚至有人提出戴森球解釋，認為有外星人的可能，令我感到相當的好奇。此外，其他的假說也描述了許多的特殊狀況，因此我想要分析他們假說的主要特性以及預期的光變曲線變化，且分段研究克卜勒望遠鏡所觀測到的一些數據，再一步步地建構自己的多行星環繞模型。

## 貳、研究目的

- 一、了解塔比星的基本資料
  - (一)恆星屬性
  - (二)光變曲線
- 二、設計與建立恆星系模型
  - (一)設計星體移動裝置
  - (二)設計星體移動裝置程式
- 三、用模型模擬各種光變曲線的可能性
  - (一)校正整體的光變曲線
  - (二)用模型模擬塔比星與多行星環繞的光度變化關係
  - (三)比較出最接近的塔比星光度變化模型

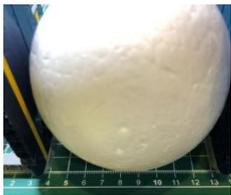
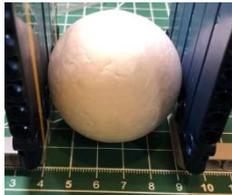
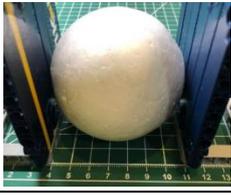
## 參、研究設備及器材

### 一、硬體設備：

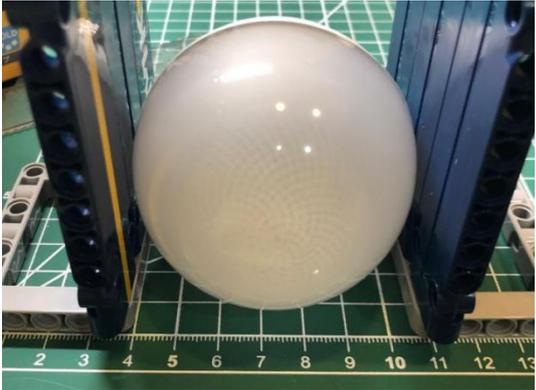
(一)Lego Mindstorms EV3 (積木、馬達、主機、光感測器、齒條與齒輪組)

(二)保麗龍球數顆，用積木以類似游標尺方式量測直徑；如下表一：

表一 器材一覽表

編號	直徑 (cm)	照片	編號	直徑 (cm)	照片
A	9		D	5	
B	8		E	3.5	
C	7				

(三)E27 燈泡一顆，直徑與規格如照片(圖二)。

	
<p>圖一 燈泡直徑 6.5cm</p>	<p>圖二 燈泡規格表</p>

(四)方格紙，每一小格邊長為 0.5cm

(五)電腦

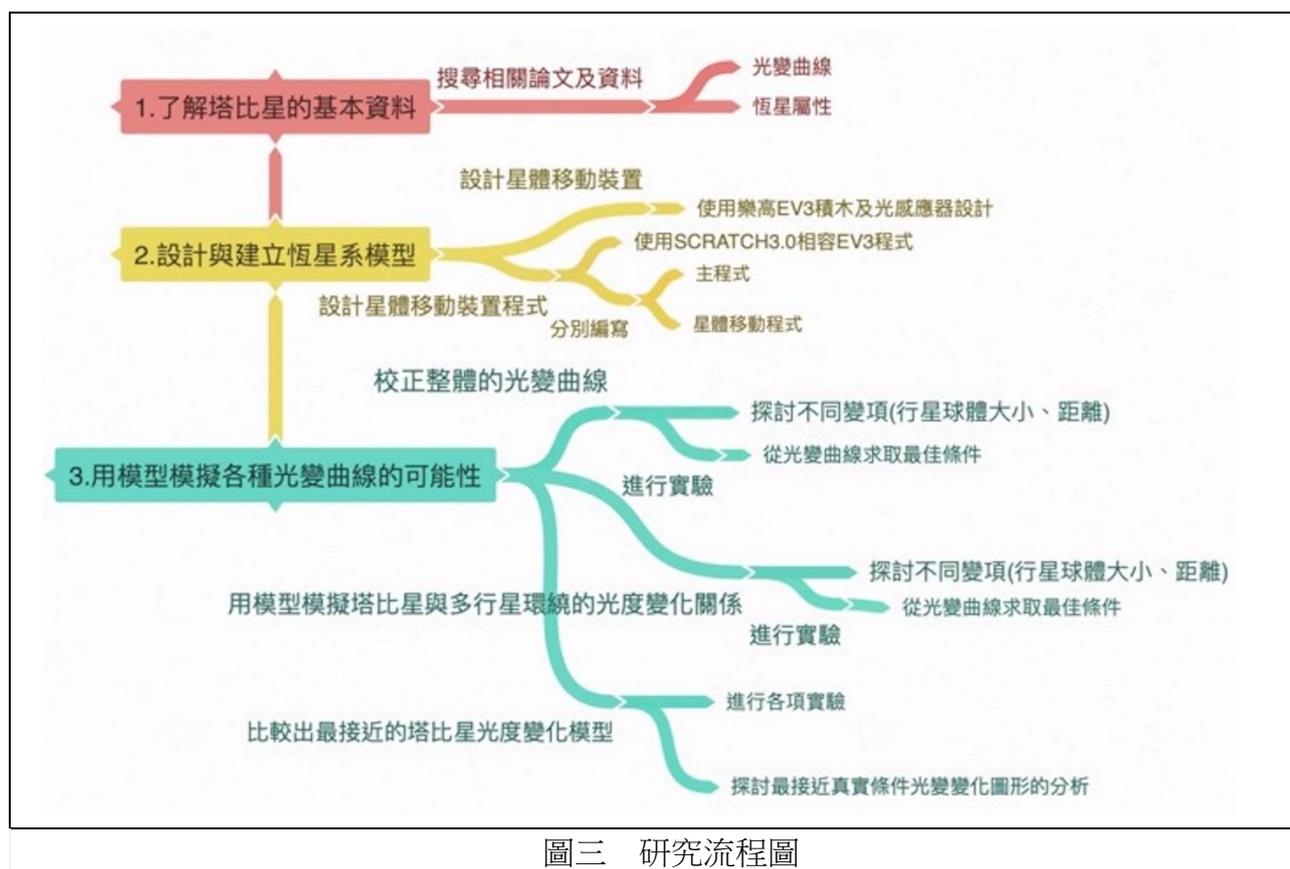
### 二、軟體設備：

(一)Scratch 3.0

(二)Scratch Link

(三)Universe Sandbox<sup>2</sup>（宇宙沙盒）：一款由 steam 遊戲平台販售約數百元台幣的物理教育類模擬軟體

## 肆、研究過程與方法

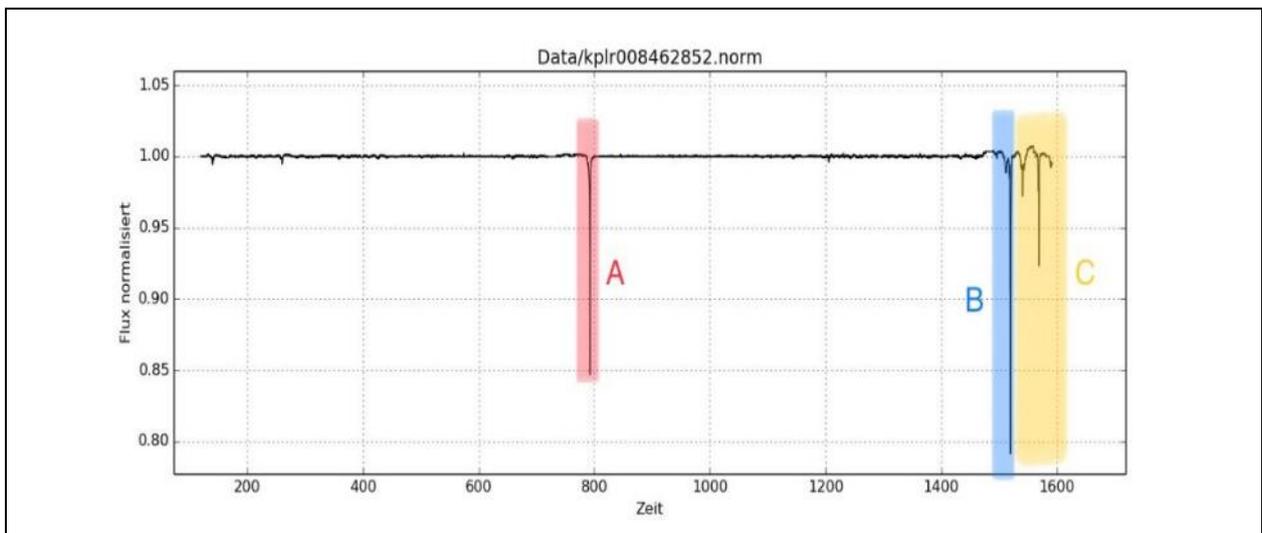


圖三 研究流程圖

### 一、塔比星的基本資料：

塔比星是天鵝座的一顆主序星，其質量約為 1.43 個太陽質量，其半徑約為 1.58 個太陽半徑，距離地球約 1480 光年，其絕對星等為 3.08，他以特殊的光變曲線而出名，接著下方，我們要來介紹他的光變曲線之特殊性。

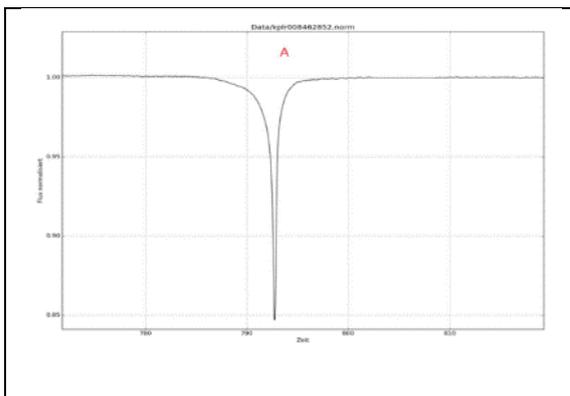
在介紹塔比星的光變曲線之前，我先介紹什麼是光變曲線，光變曲線是行星經過恆星前造成降低亮度，並藉由太空望遠鏡觀察到數據再繪製而成，但一般的單行星光變曲線是對稱，且是一個倒過來的反比曲線，但塔比星不一樣，他的曲線種類之多，令許多科學家百思不得其解。



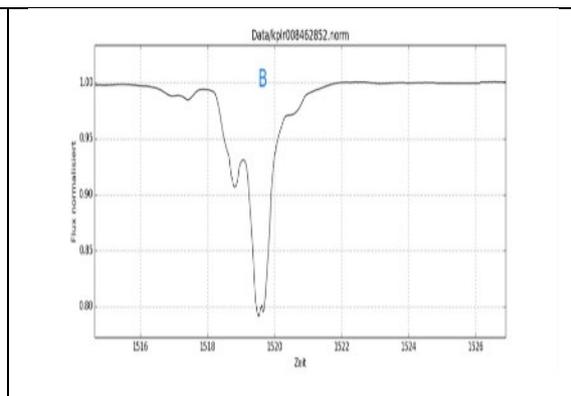
圖四 塔比星光變曲線圖

根據圖四，此圖為塔比星的主要光變曲線，來自於克卜勒望遠鏡所觀測到的數據，縱軸為『光通量歸一化』，意思就是將亮度歸為百分比的數據，橫軸為『時態』，意思為所觀測過的日數，我將這張圖分為A,B 與 C 三個部分分段解說。

首先是圖三的紅色 A 部分放大圖（圖五），根據我的猜測，這是個基本的單行星環繞光變曲線，因為他既對稱又像是個反過來的反比曲線，符合正常的單行星環繞光變曲線的條件。



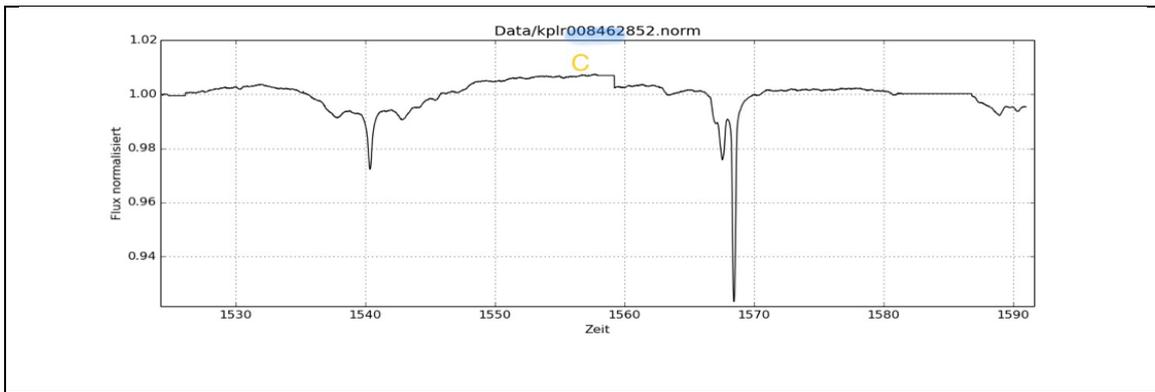
圖五 紅色 A 部分放大圖



圖六 藍色 B 部分放大圖

接著是圖四的藍色 B 部分放大圖（圖六），根據我的猜測，他是兩顆行星一大一小，小在前、大在後，掠過塔比星，並且平面上看距離相當近，幾乎同時經過塔比星所造成的光變曲線。

最後是圖四的黃色 C 部分放大圖（圖七），我將分為兩個曲線來解釋，第一個曲線是 1530 日至 1550 日類似於小的行星先經過，大的行星重新再經過，小的行星再重新經過，因此根據這些特徵，我預估他是一個聯星系統，第二個曲線是 1560 日至 1580 日則和圖三的 B 部分相當相近，因此我估計跟 B 部分是相同類型的系統掠過塔比星。



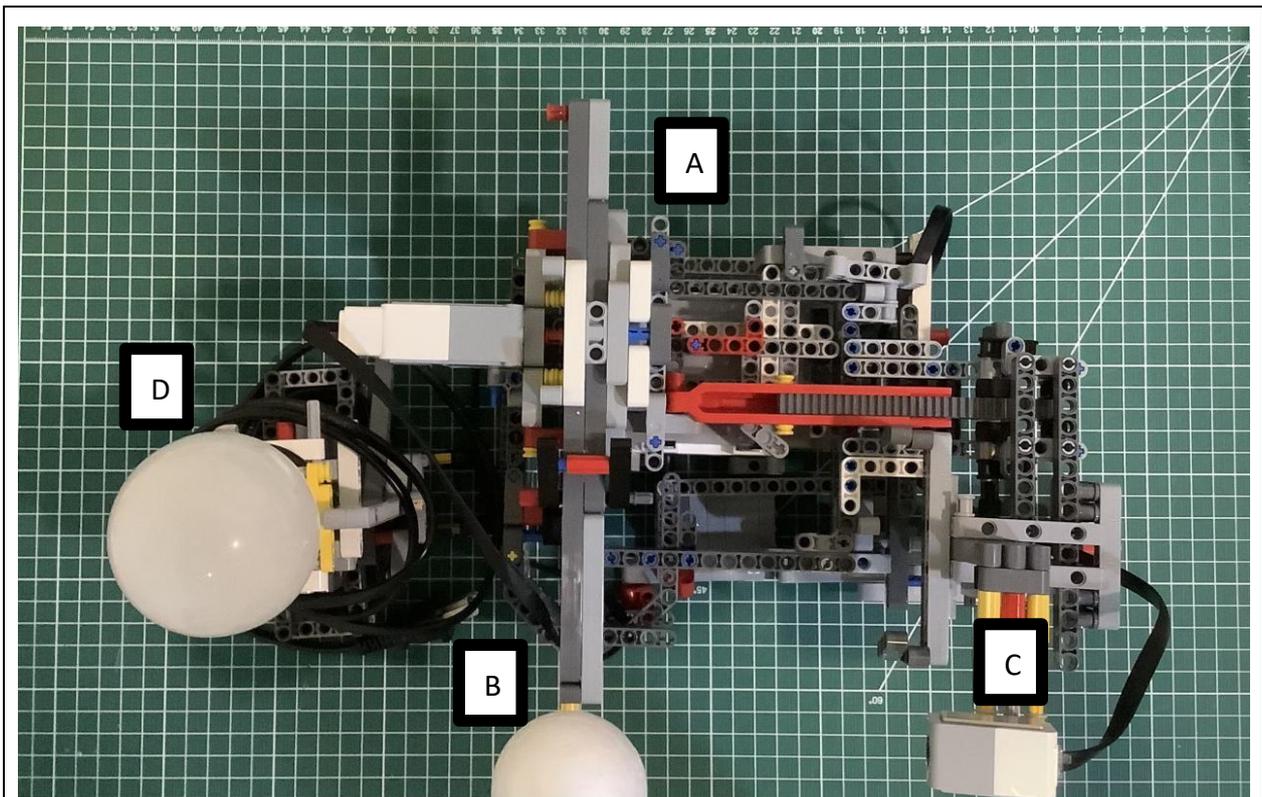
圖七 黃色 C 部分放大圖

因此依據我的假設，我將做出恆星系模型來確認是否能符合 A,B 與 C 三個部分。

## 二、建立恆星系模型：

### (一)星體移動裝置硬體部份：

圖七是建構完成的恆星系模型，這個模型的硬體有四大部分：基座部分（A）、行星移動部分（B）、光感應偵測部分（C）與恆星模擬部分（D）。



圖八 建構完成的恆星系模型全貌

### 1. 基座部分(A)：

我在做基座時，在六邊形當中內切了一個矩形，這是最穩固的撐起同為方形且龐大的主機。

## 2.行星移動部分(B)：

行星移動的部分，使用 L 形積木的一些組合，製造出穩固的方形基座，因為齒條在移動時力臂會不斷改變，因此就會造成搖晃的問題，於是我將它改為多支點設計，由此一來便可以穩定著齒條，使他搖晃不再過於激烈，同時結合利用齒條、馬達與齒輪來達成水平移動的目的，並且兩者結合製造出行星移動部件。

## 3.光感應偵測部份(C)：

我將齒條與棍棒形積木結合，因為齒條能幫助光感應器前後移動，並且棍棒型積木能穿過一般積木的孔，他們都可以幫助我穩定移動過後的光感應器，我再將一些長條型積木與棍棒形積木交叉組成一穩定支架，使得光感應器的位置在行星移動軌跡的中間，接著我將這些支架與基座結合樂高的顏色感測器，他有兩個主要功能，第一是觀測顏色，第二是偵測光度，我選擇使用後者來模擬克卜勒望遠鏡，並將 A,B 與 C 三者與主機合成，製作出星體移動裝置。

## 4.恆星模擬部分(D)：

恆星模擬部分最初的構想，是六邊形的長柱，後來因為主要目的是因為需要撐起燈座，於是以大量的框架形積木層層疊疊的固定下層，上層的主軸仍然是框架形積木，但是以棍棒形積木與長條形積木交錯互相排列加以固定，設計出穩定的結構，在最上方，我使用了一顆球形燈泡來模擬一顆主序星。

### (二)星體移動裝置軟體部分：

一開始，我原本使用 LabView 來編輯我的 LEGO EV3 程式，但是版本不支援我的電腦的版本，因此他的穩定性差，常常閃退，接著我使用 EV3 classroom 來編輯，但是他無法即時監控，而 Scratch 3.0 則兼具了以上優點，因此我最後選擇使用 Scratch 3.0 來編輯我的程式

當然，有了程式就會需要傳輸程式，說到傳輸程式，就不可少掉 Scratch Link 這一大功臣，他可以間接式的透過藍牙，來為 Scratch 3.0 和 EV3 之間進行連結，此外，Scratch 3.0 內建的 EV3 mindstorm 模組讓我能上 Scratch 編輯 EV3 程式。

### 1.馬達驅動系統：

馬達驅動的部分，一開始我使用的馬達計數方式，是使用度數形式的，但是使用度數形式會造成距離錯誤，因為度數的計算方式並不是看圈數去累加，而是判斷馬達超過 360 度後便會歸零當中的度數，因此後來我改變了度數計算的方式，改使用依時間而定的馬達參數。圖八為程式的一部分範例，馬達動力設為 50%是表示『馬達運行速度』為 100%的一半，我讓它來回各運行兩秒鐘來限制齒條運行的路徑長。

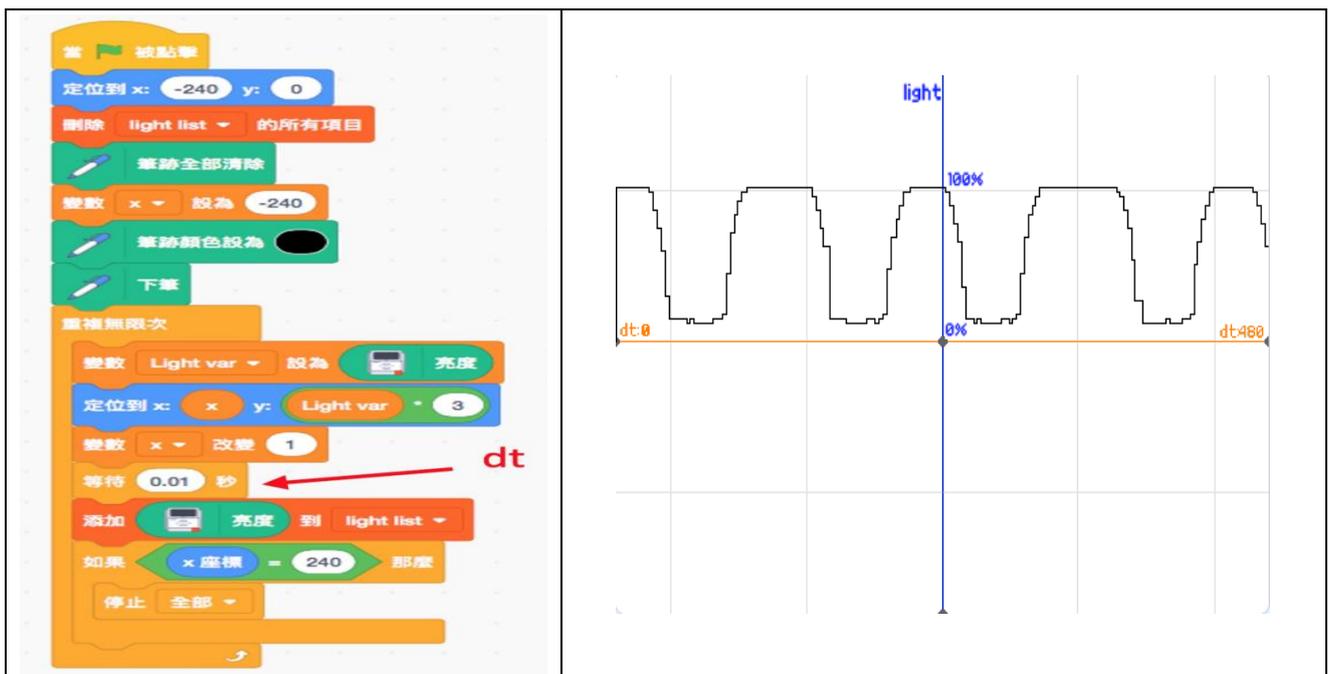


圖九 SCRATCH 程式

## 2.即時監看取樣系統：

我之所以要使用即時監看的原因是因為使用程式的光變曲線『數據』輸出，再另行以 excel 製作圖表再依照圖表做模型調整，整個重複調整的過程中所花費的時間以及複雜度會提升，而且這個輸出輸入的過程容易出錯。因此我選擇了在程式內設計一個『即時監看』的程式，可以邊運轉邊觀測光變曲線變化，這樣可以省去很多時間，也可以即時知道實驗的結果。

圖十為 scratch 裡的即時監看視窗程式，y 軸為光亮度的百分比，x 軸為時間，也就是圖十一取樣時間  $dt(\text{delta time})$  的倍數，單位為秒數。即時監控的原理為先等待一個  $dt$ ，接著移動一個像素，讀取光感應器亮度數值並乘上倍率參數，然後繪製一個數據點，並將點與點之間連線，最後重複此序列。例如 x 座標從 -240 開始取樣光亮度並畫上黑點，如果  $dt=0.01$  秒，則整個 x 軸的秒數為  $480 \times 0.01=4.8$  秒。不過在後續實驗中，我發現實際的秒數較估算的長，這是因為 scratch 自己計算迴圈就有一個等待時間。



圖十 即時監看程式

圖十一 光線與時間變化圖

(三)預估本影(umbra)大小與公式部分：

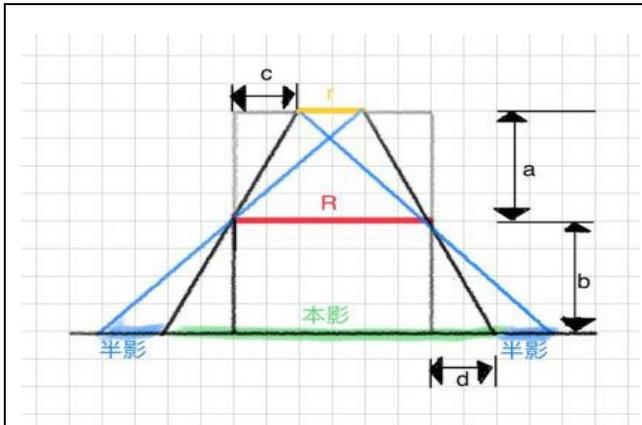
在過程中，我將硬體與軟體備妥之後，但仍然在為如何訂定燈與球的距離而煩惱，因為光感應器的孔直徑為 1cm（圖十二），產生的本影若太小會無法完全遮住光源，若本影太大會超過行星齒條的路徑長，會無法觀測到完整的光變曲線，於是我想出可以先用公式來推導出本影近似的大小，進而可以推估燈與球最合適的距離，得出了只需知道遮蔽物（球）大小，就可以知道最佳的燈與球距離。



圖十二 光感應器直徑

1.假設球比燈大的情況：

圖十三與圖十四為公式推導的說明圖。



圖十三 球比燈大本影與半影解析圖



圖十四 球比燈大實驗裝置示意圖

假設光源的直徑為  $r$ ，遮蔽物（球）的直徑為  $R$ ，光源與遮蔽物的距離為  $a$ ，遮蔽物與光感應器的距離為  $b$ ，遮蔽物之二維投影扣掉光源之二維投影之環形的寬度為  $c$ ，本影扣掉遮蔽物之二維投影之環形的寬度為  $d$ ，umbra 為本影直徑，則依據相似三角形的特性

$$a : b = c : d,$$

$$\text{且 } c = \frac{(R - r)}{2}$$

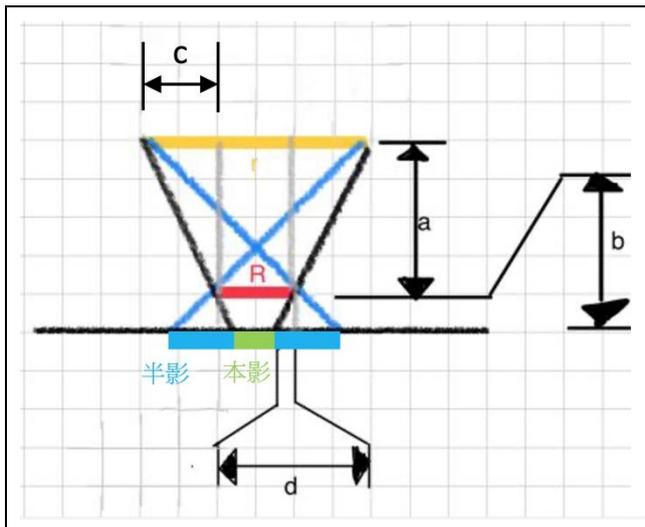
$$\therefore \frac{(R - r)}{2} \times \frac{b}{a} = d,$$

$$umbra = R + \frac{b}{a}(R - r) \quad (\text{公式一})$$

由公式一可知遮蔽物與光感應器的距離  $b$  愈大，則本影愈大，光源與遮蔽物的距離  $a$  愈大，則本影愈小。如圖十三所示，光源的直徑  $r$  為 6.5cm，球的直徑  $R$  為 7cm， $a=24\text{cm}$ ， $b=12\text{cm}$ ， $a:b=2:1$ ，則預估的本影直徑  $umbra$  為 7.25cm。

## 2. 假設球比燈小的情況：

圖十五與圖十六為公式推導的說明圖。圖十六為實際的球投影在方格紙上的照片，方格紙上的藍色圓點為 EV3 光感測器的孔徑位置。



圖十五 球比燈小本影與半影解析圖



圖十六 球比燈小實驗裝置示意圖

假設光源的直徑為  $r$ ，遮蔽物（球）的直徑為  $R$ ，光源與遮蔽物的距離為  $a$ ，遮蔽物與光感應器的距離為  $b$ ，光源之二維投影扣掉遮蔽物之二維投影之環形的寬度為  $c$ ，設遮蔽物之二維投影扣掉本影之環形的寬度為  $d$ ， $umbra$  為本影直徑，則依據相似三角形的特性

$$a:b = c:d,$$

$$\text{且 } c = \frac{(r - R)}{2}$$

$$\therefore \frac{(r - R)}{2} \times \frac{b}{a} = d,$$

$$umbra = R - \frac{b}{a}(r - R) (\text{公式二})$$

由公式二可知遮蔽物與光感應器的距離  $a$  愈大，則本影愈大，光源與遮蔽物的距離  $b$  愈大，則本影愈小。如圖十五所示，光源的直徑  $r$  為 6.5cm，球的直徑  $R$  為 5cm， $a=7.2\text{cm}$ ， $b=14.4\text{cm}$ ， $a:b=1:2$ ，則預估的本影直徑  $umbra$  為 2cm。

### 3.預估值與實驗值討論：

我依照表二的 a:b 與球大小的條件估算本影的直徑，同時也量測每個條件在方格紙上的本影大小來觀察公式的結果。

a:b	球的直徑	計算出的本影直徑	實際的本影直徑
1:1 (12cm:12cm)	C (7cm)	7.5cm	約 8.5cm
	D (5cm)	3.5cm	約 4cm
1:2 (7.2cm:14.4cm)	C (7cm)	8cm	約 8cm
	D (5cm)	2cm	約 3cm
2:1 (12cm:24cm)	C(7cm)	7.25cm	約 7.25cm
	D(5cm)	4.25cm	約 4.5cm

### 三、利用『單行星凌日』進行校正：

在正式實驗之前進行校正，是為了確保往後的實驗數據的正確性，而使用一般單行星凌日的光變曲線校正恆星系模擬設備，是因為單行星凌日的光變曲線的圖形構造簡單，擁有較高的辨識度，至於要何為校正的標準，有兩點要件，第一為每個深溝之間的問題不能太寬或太細，第二為深溝本身不能太寬或太細。

運行星體移動裝置，以星體移動裝置的 EV3 光感測器與電腦來觀察並紀錄光亮度變化，並使用即時監看來繪製出光變曲線的變化圖，在下面的實驗中，我將改變取樣時間(dt)，改變『馬達運行速度』(MP)與時間(T)，以及改變光源與球的距離(a)與改變球與感測器的距離(b)之間的比例，以進行校正。

#### (一)改變不同的馬達運行的速度 MP (小球)：

由相同的取樣時間(dt)，觀察不同的馬達運行的速度(MP)及所相對應的光變曲線圖，以了解馬達運行的速度與光變曲線圖之間的關係。由於齒條的路徑長固定，因此依據距離等於速度乘上時間，馬達運行的速度(MP)會與時間(T)互成反比。此實驗的取樣時間(dt)為 0.1s，a 與 b 的比例為 2:1，a 與 b 分別為 24cm 與 12cm，球的直徑則為 5cm。

表三 改變不同馬達運行速度 MP(小球)光變曲線			
dt(s)	MP (%)	T(s)	光變曲線
0.1	25	4	
0.1	50	2	
0.1	100	1	
a=24cm, b=12cm, a:b=2:1, ball size=D			

MP 為 25%的曲線是正常的單行星光變曲線，MP 為 50%的曲線也是標準的單行星光變曲線，MP 為 100%的曲線雖然是標準的單行星曲線，但曲線過度密集不利於觀察。由這一些圖表可以得知，增加馬達運行的速度可以使得不同的深溝之間間距減小，深溝的寬度也會減小，深溝的個數也會變多。MP 為 25%到 50%是校正的可接受範圍。

(二)改變不同的取樣時間 dt：

由相同的馬達運行的速度(MP)，觀察不同的取樣時間(dt)及所相對應的光變曲線圖，以了解取樣時間與光變曲線圖之間的關係。此實驗的馬達運行速度 MP 為 25%，a 與 b 的比例為 2:1，a 與 b 分別為 24cm 與 12cm，球的直徑則為 5cm。

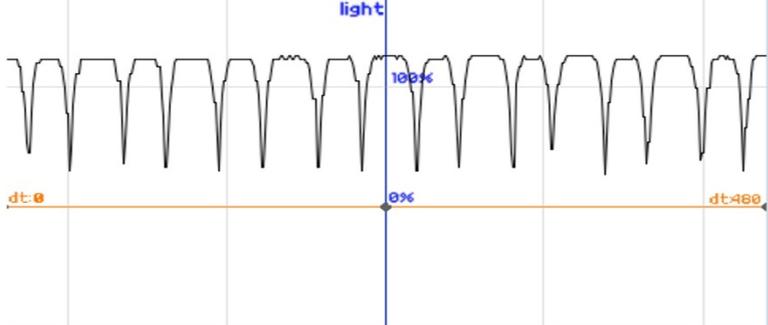
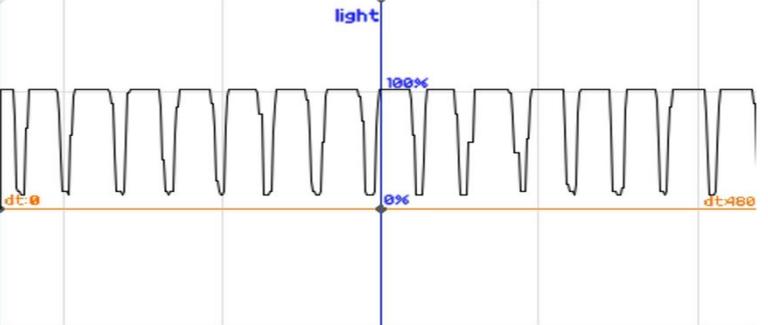
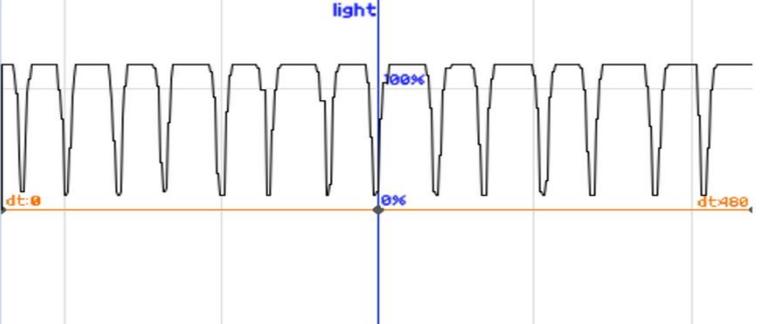
表四 改變不同取樣時間 dt 光變曲線			
dt(s)	MP (%)	T(s)	光變曲線
0.1	25	4	
0.01	25	4	
0.001	25	4	
a=24cm, b=12cm, a:b=2:1, ball size=D			

由表四觀察發現  $dt=0.1s$  時有 18 個深溝， $dt=0.01s$  與  $dt=0.001s$  時都只有 15 個深溝。這是因為 scratch 內部在執行迴圈時有一個內建的等待時間。這個內建的等待時間在我的程式設定  $dt=0.01s$  與  $dt=0.001s$  時決定了整個的總時間，使得我的  $dt$  可以被忽略，因此  $dt$  的最小可變量我將它設定在  $0.1s$ 。

### (三)改變不同的恆星與行星之間的距離：

由相同的馬達運行的速度(MP)，以及相同取樣時間(dt)，觀察不同的距離比例及所相對應的光變曲線圖，以了解距離的比例與光變曲線圖之間的關係。此實驗的馬達運行速度 MP 為 25%，取樣時間(dt)為  $0.1s$ 。

表五 改變不同恆星與行星之間距離光變曲線

a:b	光變曲線
a=7.2cm b=14.4cm 1:2	
a=24cm b=12cm 2:1	
a=12cm b=12cm 1:1	
dt=0.1s, MP=25%, T=4s, ball size=D	

很明顯的，我們可以發現使用燈與球與光感應器的距離比例 1:1 或者是 1:2 的光亮度會超出 2:1 所定的 100% 基準值，這是因為在這兩種情況下，光源離感測器較近。此外，我也發現，1:1 或者是 1:2 的深溝尖端較尖，這是因為這兩種情況下本影直徑較小，遮蔽的時間也較短。

(四)改變不同的馬達運行的速度(大球)：

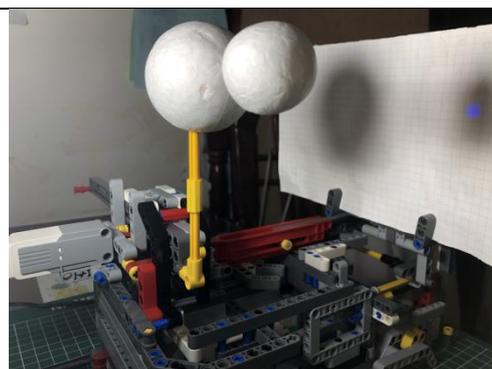
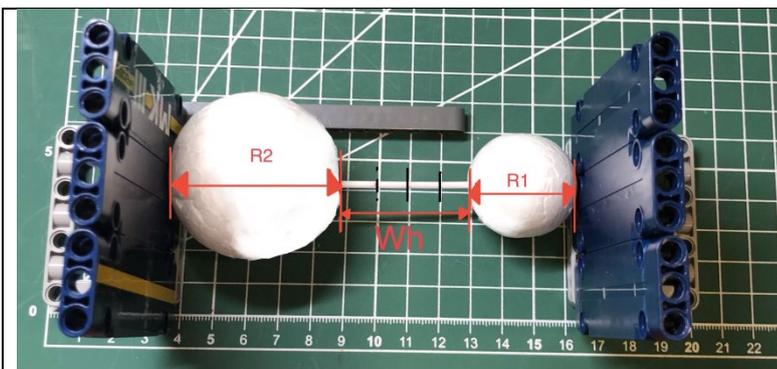
由相同的取樣時間(dt)，觀察大球的不同的馬達運行的速度(MP)及所相對應的光變曲線圖，以了解馬達運行的速度與光變曲線圖之間的關係。由於齒條的路徑長固定，因此依據距離等於速度乘上時間，馬達運行的速度(MP)會與時間(T)互成反比。此實驗的取樣時間(dt)為 0.1s，a 與 b 的比例為 2:1，a 與 b 分別為 24cm 與 12cm，球的直徑則為 7cm。

表六 改變不同馬達運行速度(大球)光變曲線			
dt(s)	MP (%)	T(s)	光變曲線
0.1	25	4	
0.1	50	2	
a=24cm, b=12cm, a:b=2:1, ball size= C			

基本上大球的參數與小球非常相像，但是有一點值得注意的是，大球的深溝底部為平底，因為大球的本影較大，所以遮光的時間也就較長。由這一些圖表可以得知，增加馬達運行的速度可以使得不同的深溝之間の間距減小，深溝的平底寬度也會減小，深溝的個數也會變多。

#### 四、模擬兩顆行星光變曲線實驗：

之所以我要模擬關於兩顆行星光變曲線的實驗，原因其實是因為開普勒望遠鏡的曲線當中有三個觀測期間的曲線相當類似於兩顆行星的曲線，分別對應兩顆行星在不同的軌道或者聯星這兩種星體組合。在這個實驗當中會運行星體移動裝置，以星體移動裝置的 EV3 光感測器與電腦來觀察並紀錄光亮度變化，並使用即時監看來繪製出光變曲線的變化圖，在下面的實驗中，我將改變遮蔽物之間的距離(Wh)，如圖十七示意，改變兩顆球的直徑 (R1 與 R2) 的比例(ball ratio, Br)也就是 R1:R2 的比例，以及改變光源與球的距離(a)與改變球與感測器的距離(b)之間的比例。實驗配置如圖十八所示。



圖十七 大球的直徑為  $R2$ ，小球的直徑為  $R1$ ， $Br$  即為  $R1:R2$ 。中間為  $Wh$  的白色連接棒，連接著兩顆球。 $Wh$  的實驗範圍為 1cm 至 4cm。

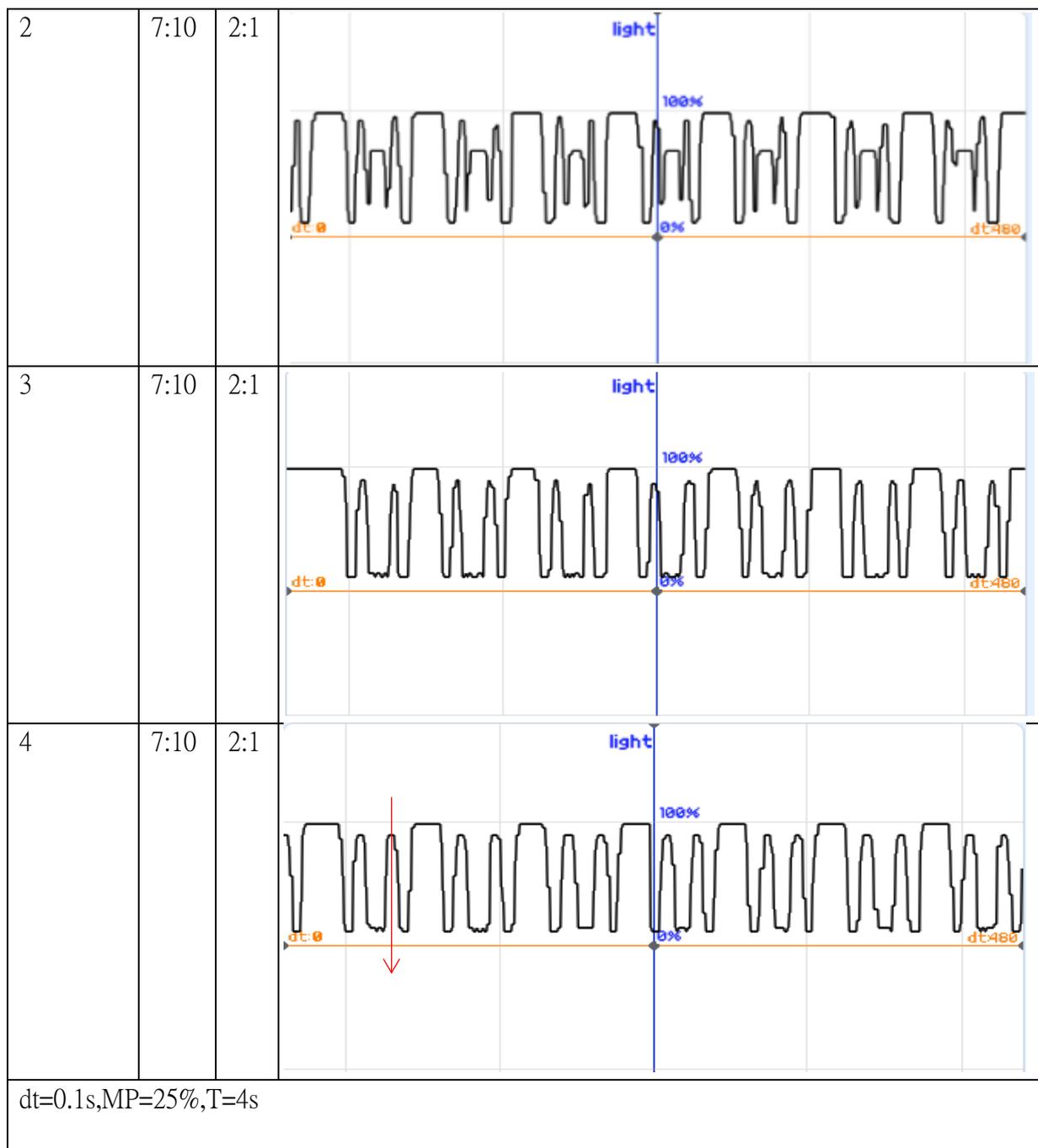
圖十八 模擬兩顆行星光變曲線實驗

(一) 改變不同的遮蔽物之間的距離 ( $Wh$ )

由相同的球的直徑之間的比例、光源與球的距離和球與感測器的距離，改變不同的遮蔽物之間的距離及所相對應的光變曲線圖，以了解遮蔽物之間的距離 ( $Wh$ ) 與光變曲線圖之間的關係。此實驗的取樣時間 ( $dt$ ) 為 0.1s，馬達運行速度 (MP) 為 25%， $a$  與  $b$  的比例為 2:1， $a$  與  $b$  分別為 24cm 與 12cm，球的直徑之間的比例 ( $Br$ ) 為 7:10，分別為 3.5cm 與 5cm。

表七 改變不同的遮蔽物之間的距離

Wh(cm)	Br	a:b	光變曲線
1	7:10	2:1	



當  $W_h=1\text{cm}$  與  $W_h=2\text{cm}$  時，因為間距  $W_h$  短所以小球本影在到達齒條終點時有部分遮住光感測器，因此在紅色箭頭處造成些許光亮度降低。而  $W_h=3\text{cm}$  與  $W_h=4\text{cm}$  因為間距  $W_h$  過長，因此在紅色箭頭處的小球本影會將光感測器完全遮住，因此形成三個深溝一循環。這一些圖當中遮蔽物之間間距為一公分的光變曲線圖的一循環紅色箭頭部分，距離 100 % 線較為接近，因此後續實驗遮蔽物之間的最佳距離  $W_h$  為一公分。

## (二)改變不同的球的直徑之間的比例 (Br)

由相同的遮蔽物之間的距離、光源與球的距離和球與感測器的距離，改變不同的球的直徑之間的比例及所相對應的光變曲線圖，以了解球的直徑之間的比例與光變曲線圖之間的關

係。此實驗的取樣時間(dt)為 0.1s，馬達運行速度 MP 為 25%，a 與 b 的比例為 2:1，a 與 b 分別為 24cm 與 12cm，遮蔽物之間的距離為 1cm。

表八 改變兩顆球的直徑之間的比例

Wh(cm)	Br	a:b	光變曲線
1	7:10 (3.5cm:5cm)	2:1	
1	7:14 (3.5cm:7cm)	2:1	
1	10:10 (5cm:5cm)	2:1	
1	10:14 (5cm:7cm)	2:1	
dt=0.1s, MP=25%, T=4s			

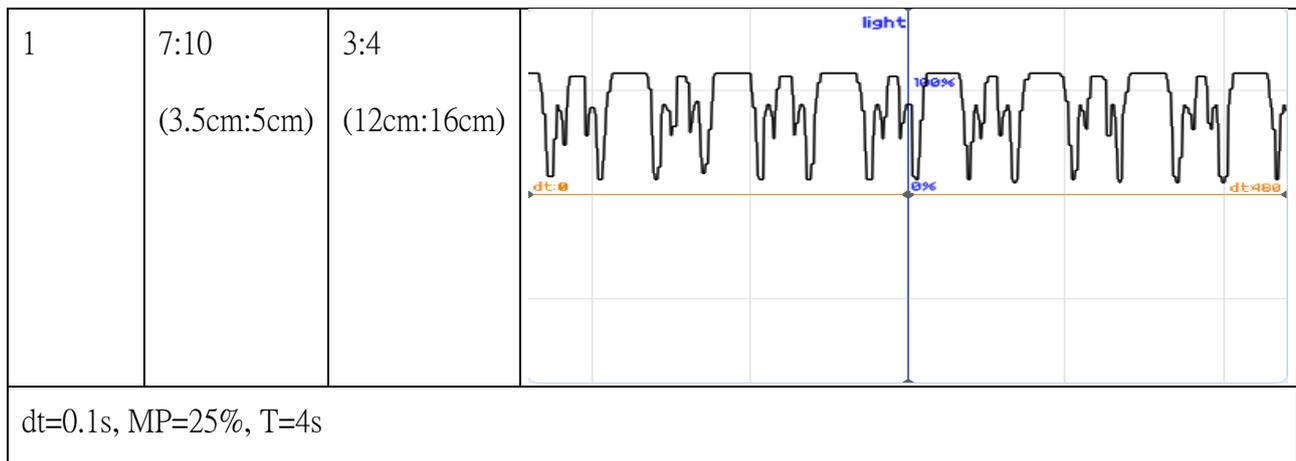
球的直徑之間的比例 Br 為 7:10 與球的直徑之間的比例 Br 為 7:14 的這兩張光變曲線圖進行比較，可以看出紅色箭頭部分光亮度微幅下降，其原因為後者的總長大於前者。而球的 Br 為 7:14 與球的 Br 為 10:10 的這兩張光變曲線圖進行比較，也可以看出紅色箭頭部分光亮度下降，其原因則為後者小球的直徑大於前者而本影遮住面積較大。最後，將球的直徑之間的比例 Br 為 10:10 與球的直徑之間的比例 Br 為 10:14 的這兩張光變曲線圖進行比較，紅色箭頭部分光亮度也出現下降，其原因也為後者的總長大於前者，因此可以推知，整體的趨勢為一個循環當中的紅色箭頭部分光亮度除了球的 Br 為 7:14 與球的直徑之間的為 10:10 的這兩張光變曲線圖之外，其他部分也隨著兩球的總長增大而不斷下降，這一些圖當中球的直徑之間的比例(Br)為 7:10 的光變曲線圖的一循環紅色箭頭部分，距離 100 %線較為接近，因此球的直徑之間的比例為 7:10 作為後續實驗球的直徑之間的比例為最佳選擇。

### (三)改變不同的光源與球的距離和球與感測器的距離 (a:b)

從前面單行星凌日的實驗當中的結論進行歸納，就可得知本影大小可由 a:b 的比例控制，由於前面的光變曲線圖與開普勒望遠鏡觀測到的數據有一定差別的原因是因為球的本影太大，因此也許改變 a:b 的比例，就可獲得與開普勒望遠鏡的數據圖相像的曲線。

由相同的遮蔽物之間的距離、球的直徑之間的比例，改變不同的光源與球的距離和球與感測器的距離及所相對應的光變曲線圖，以了解光源與球的距離和球與感測器的距離與光變曲線圖之間的關係。此實驗的取樣時間(dt)為 0.1s，馬達運行速度 MP 為 25%，球的直徑之間的比例(Br)為 7:10，分別為 3.5cm 與 5cm，遮蔽物之間的寬度為 1cm。

表九 改變不同的遮蔽物之間的距離			
Wh(cm)	Br	a:b	光變曲線
1	7:10 (3.5cm:5cm)	2:1 (24cm:12cm)	



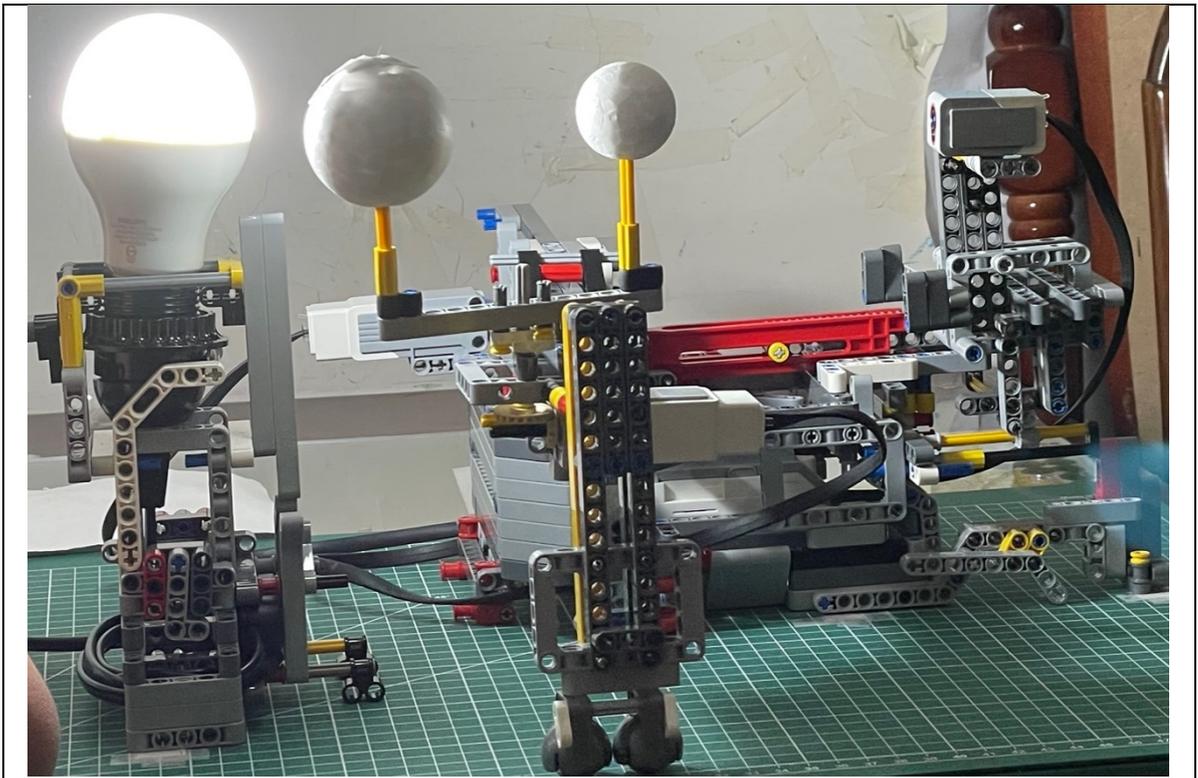
在所有的實驗當中，光源與球的距離和球與感測器的距離比例為 3:4 的圖與克卜勒望遠鏡所觀測到的圖最為相似，因此最後我選擇使用光源與球的距離和球與感測器的距離為 3:4 的光變曲線圖作為最終的模擬兩顆行星的光變曲線圖，再與開普勒望遠鏡觀測到的數據進行比較。

#### 五、『聯行星』光變曲線實驗：

為何要執行聯行星實驗的原因其實是因為克卜勒太空望遠鏡觀測的光變曲線當中的一個結構，很有可能是由於聯行星所造成，但當然也有可能是其他因素。我會如此想的原因是因為我推測現實中聯行星的光變曲線會非常混亂。

我的聯行星模擬裝置（如圖十九）是原本的星體移動裝置再外加聯行星組件，聯行星組件包含可以互相轉動的兩顆保麗龍球，便可以藉此來模擬轉動中的聯行星。在實驗當中由於聯行星組件過重，因此需要一個架子來支撐聯行星組件，但是這個架子又需要可以不斷移動，因此我最後使用兩顆萬向輪與架子合用來解決這個問題，因為萬向輪摩擦力小，且可以在大負重的情況下順暢移動。

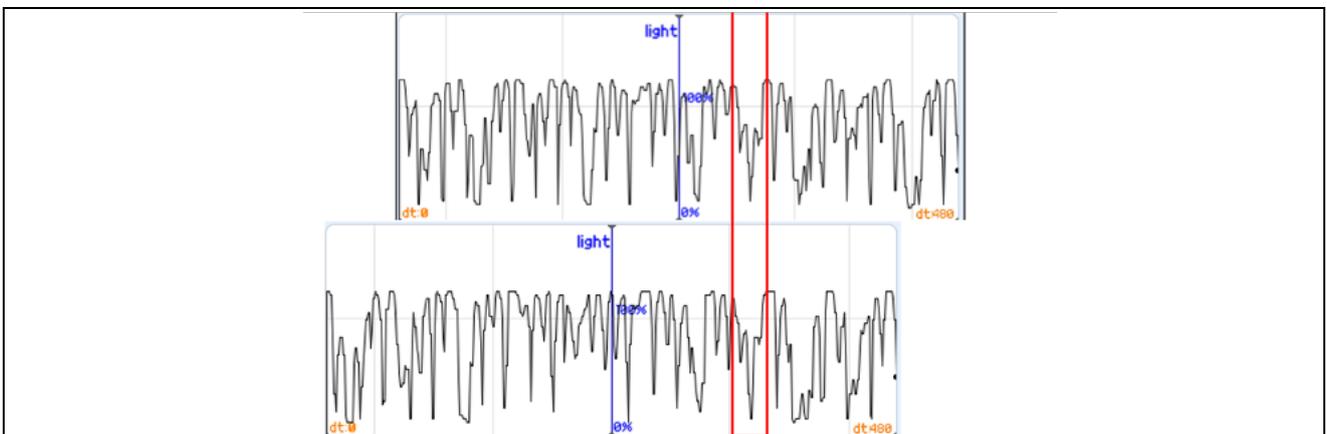
雖然真實中與模擬中聯行星的光變曲線會非常混亂，但是如果多次模擬實驗各項變因都相同之下，光變曲線將出現相同的變化，因此我執行實驗後，會再重複一次實驗，並互相比較，驗證是否會出現相同的曲線。同時，我也將錄影的影片片段暫停並截圖，再讓影片片段中當時的光變曲線與模擬裝置的狀態做比較。



圖十九 聯行星模擬裝置

(一)二次實驗重複性比較：

在聯行星的光變曲線重複性比較實驗其中，我執行了兩次程式，嘗試去模擬出與克卜勒太空望遠鏡所觀測到的相似曲線。在圖二十中，兩次的模擬出現了相似的曲線，當然，我也找出了兩次的『聯行星光變曲線』，即為紅色部分。這與克卜勒太空望遠鏡觀測到光變曲線相似。



圖二十 紅色部分為兩次模擬而重疊的聯行星曲線與克卜勒太空望遠鏡光變曲線相似的部分

(二)光變曲線與模擬裝置的狀態比對：

在聯行星的光變曲線與模擬裝置的狀態比對實驗當中，使用手機將模擬裝置的行徑路徑錄影下來，在影片播放時，中途暫停並截圖，最後，在透過影像的順序、兩顆保麗龍球轉向以及當時的齒條移動方向全部串連起來，並且再去推理它的狀態，最後繪製出模擬裝置的俯視圖。在以下一連串的俯視圖中（圖二十一至圖二十六），黃球為恆星（燈泡），藍球為行星（保麗龍球），眼睛符號部分則為克卜勒太空望遠鏡（光感應器）。



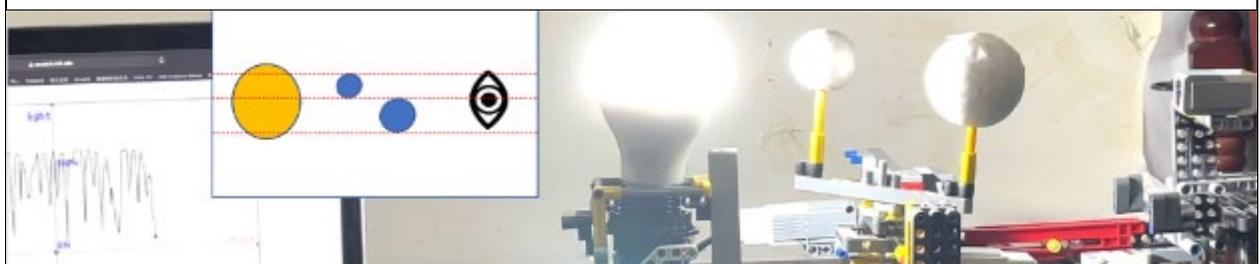
圖二十一



圖二十二



圖二十三



圖二十四



圖二十五



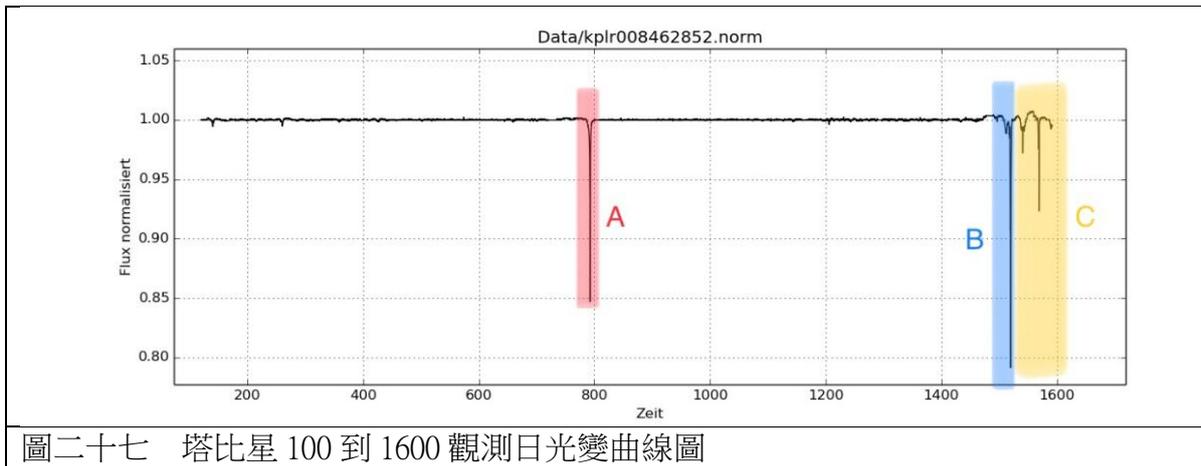
圖二十六

以上是紅框區曲線的形成過程。

## 伍、研究結果

從塔比星自 100 個觀測日到 1600 個觀測日左右的光變曲線圖（圖二十七）觀察出幾個主要特點，在 800 個觀測日附近有一次光度下降且呈現對稱，有可能為一般的單行星凌日。而 1520 日開始，出現了一連串的曲線，其中有三個主要的曲線，其中兩個可能為『兩顆行星』在不同的軌道掠過塔比星所造成，另外一個曲線則有多種可能性。

在 1540 日左右的下降有可能是兩顆行星在不同的軌道且重力不會互相影響掠過塔比星所導致的光變曲線下降。從 1560 日左右開始的下降可以分成兩個部分，第一部分則有兩種可能，第一種可能為兩顆行星受到彼此的重力牽制形成像聯星而互相環繞(雙行星)而掠過，第二種可能則是一顆帶有長橢圓形環的大行星掠過了塔比星，第二部分則與 1540 日左右下降十分雷同但幅度較小，同為兩顆行星在不同的軌道且重力不會互相影響而掠過塔比星。根據先前我提出的三個猜測，經過實驗的結果，發現可以得到接近的光變曲線。

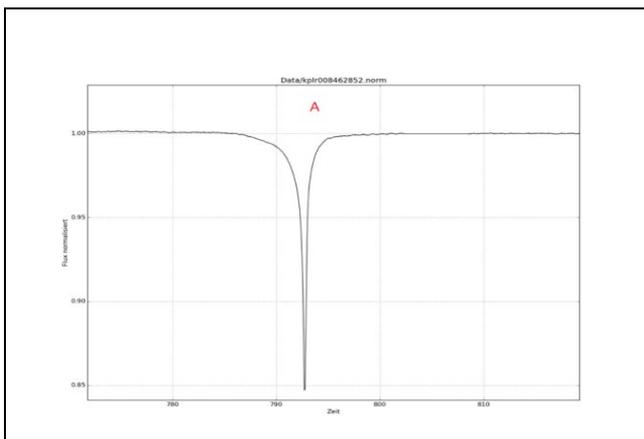


圖二十七 塔比星 100 到 1600 觀測日光變曲線圖

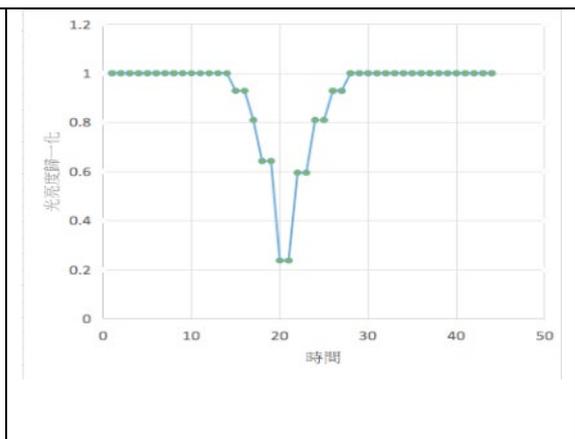
根據先前我提出的三個預估，經過實驗的結果，發現可以得到接近的光變曲線。

### 一、單行星凌日

一顆行星掠過了塔比星，開普勒望遠鏡光變曲線貌似出現了一個深溝，如圖十七，若是這顆行星公轉速度變快了則這深溝就會變細，若是行星距離塔比星的距離變遠了，克卜勒望遠鏡偵測到的光度下降就會變大，這是因為本影變大，因此塔比星的光度隨即變小，綜合以上結果，這張光變曲線圖來源就是因為一顆行星掠過了塔比星，也就是常見的單行星凌日所造成的結果。以下的圖十九為開普勒望遠鏡於 780 觀測日至 820 觀測日的塔比星觀測數據，圖二十則為從表五的 a:b 比例為 2:1 的圖中擷取一部份再另製成圖，經過比較後，我的模擬與觀測到的數據非常相像，但是大小還是無法完美呈現。



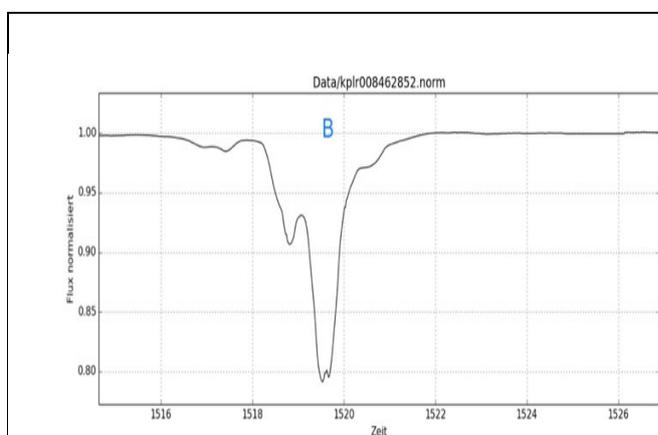
圖二十八 開普勒望遠鏡於 780 觀測日至 820 觀測日的塔比星觀測數據



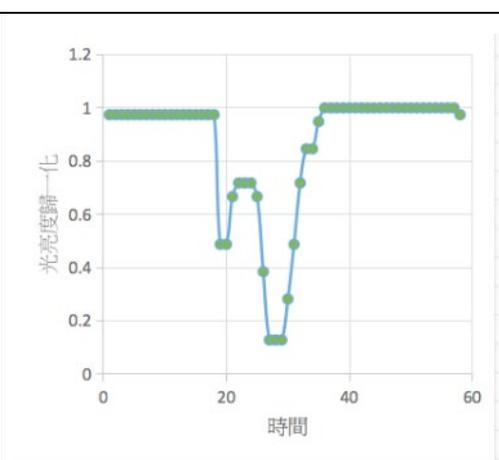
圖二十九 從表五的 a:b 比例為 2:1 的圖中擷取一部份再另製成圖

## 二、兩顆行星凌日

一開始，是一顆小的行星掠過了塔比星，接著在小的行星尚未完全通過時，一顆大行星便緊追其後，如圖三十---但只有在平面上看是這樣的，在立體上來說，其實實際上他們所在的是不同的軌道，重力影響極小，因此『緊追其後』其實只是剛好大行星同時掠過而已，也有可能，大行星的軌道週期與小的行星的軌道週期十分相近或有因數倍數關係，甚至也有可能，大行星與小的行星的差別只是因為視覺錯覺的遠近不同所造成的結果，綜合以上結果，會造成開普勒望遠鏡所觀測到的一大一小並且十分相近如此的特殊光變曲線的便是在不同軌道的兩顆行星幾乎同時經過塔比星。以下的圖三十為克卜勒望遠鏡於 1514 觀測日至 1525 觀測日的塔比星觀測數據，圖三十一則為從表九的 a:b 比例為 3:4 的圖中擷取一部份再另製成圖，經過比較後，我的模擬與觀測到的數據非常相像，但是大小還是無法完美呈現。



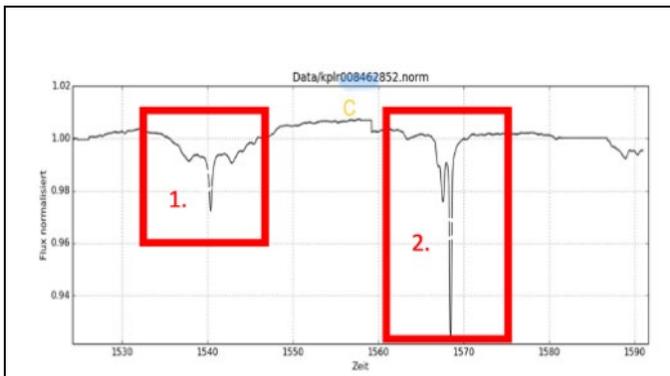
圖三十 開普勒望遠鏡於 1514 觀測日至 1525 觀測日的塔比星觀測數據



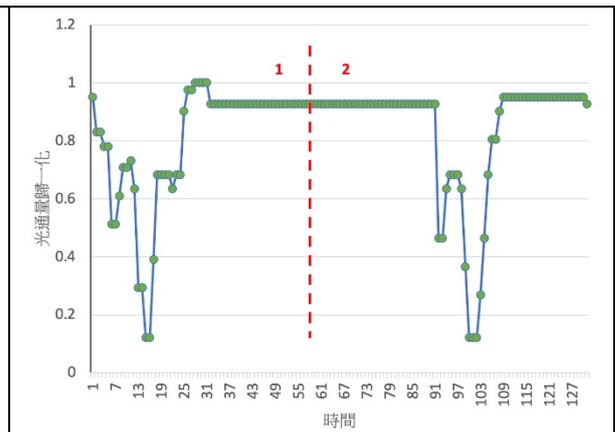
圖三十一 從表九的 a:b 比例為 3:4 的圖中擷取一部份再另製成圖

## 三、聯行星凌日

一對聯行星掠過了塔比星，其有著混亂的行徑，前後前後的通過塔比星，克卜勒太空望遠鏡便觀測到了它，如圖三十二的第一個曲線（第 1520 觀測日至 1550 觀測日）——這是我腦海裡的想像。在圖三十二第一個曲線當中，體積小的行星先通過塔比星面前，體積大的行星再跟著通過，小的行星繞一圈再通過，這個組合是聯行星千千萬萬種可能性中的一種。我也得到了一個相似的結果，它便是圖三十三的第一個曲線部分，而圖三十二的第二個光變曲線與先前圖三十一相似。



圖三十二 克卜勒太空望遠鏡於 1525 觀測日至 1590 觀測日的塔比星觀測數據



圖三十三 從表九的 a:b 比例為 3:4 的圖與圖二十中擷取一部份再拼接製成

## 陸、討論

### 一、關於塔比星的資料：

#### (一)名字的由來與最初的可能性

「塔比星」之所以是作為 KIC8462852 這顆恆星的名字的原因是來源於科學家 Tabettha S. Boyajian，之所以以她的名字作為此星的名字則是因為她是研究此計畫的首席研究員，同時也為此星提出了許多假說，一開始的塵埃雲假說，但也因為此星為成熟的星體而否定了這個假說，接著也提出了彗星團假說，但也因為數量的問題而否定了這個假說，她也提出了很多其他的假說並進行測試，可說是對 KIC8462852 貢獻良多。

#### (二)重元素的分析

在一些研究當中，科學家分析了塔比星的重元素含量，其中有六種重元素，分別為鐵、鎳、鈣、矽、釷和鈦，這些為塔比星當中可能會有的重元素，科學家先是分析了它們的豐度，偵測到的含量多寡排序則為：鐵大於鎳大於鈣大於矽大於釷大於鈦，也深入地分析這些數據分別與波長的關係，以及用一些數學模型帶入再去分析。簡易的分析完後則製成一點狀分佈圖，接著用特殊的數學方法將點狀分佈圖上的數據合併成一曲線，在去做深入分析，最後則排除掉了是恆星本身發生變瓦的可能性。

#### (三)克卜勒太空望遠鏡與樂高 EV3 光感應器

克卜勒太空望遠鏡的結構類似於眼球，會先經過特殊的曲面鏡可以將光線修正，接

著通過第一次焦平面快門，並且將光匯聚於進入最後面的鏡子，接著鏡子反射進入中間的焦平面快門，也就是第二次通過焦平面快門，這時候再將數據記錄下來。

而光感應器就不一樣了，只有一個光電元件單純使用它來感測附近的環境光亮度，可見，光感應器的結構較克卜勒望遠鏡簡單許多。

二、本研究的不足之處：

### (一)單行星凌日部分

雖然克卜勒太空望遠鏡的曲線與我的單行星凌日曲線相似，但是基於『公分』大小與『光年』大小的差異，也就是重力之間的差異，要是我的單行星凌日模擬當中球的大小與燈的大小等比例的去複製在光年大小當中，行星與塔比星的距離過近就會受到重力影響，行星就會墜入塔比星當中或者撕碎。而且雖然都是光亮度發生下降的變化，但我的實驗主要來自本影的大小遮擋光感應器的過程。

另外有許多謎團無法解開，像是克卜勒太空望遠鏡偵測到的的曲線當中為何塔比星被遮蔽的光量如此之多，因為如果被遮蔽的光量多，行星體積就會大，甚至變成一顆小太陽，以及克卜勒太空望遠鏡偵測到的的曲線當中為何曲線的深溝持續了如此之久的時間，照理來說凌日只是一瞬間，因為行星的公轉速度必須要很快，不然會墜入恆星，但是克卜勒太空望遠鏡偵測到的曲線當中卻是數十日之久，這兩個問題都是在現在公分大小下無法去模擬並解決的。

### (二)兩顆行星凌日部分

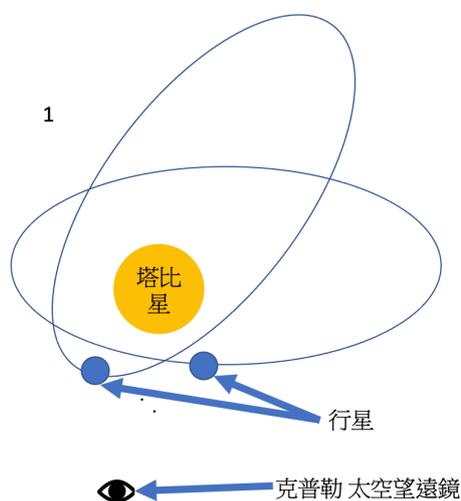
雖然克卜勒太空望遠鏡的曲線也與我的兩顆行星凌日模擬的曲線相似，但是仍然無法解釋為何克卜勒太空望遠鏡的曲線上呈現的如此剛好，讓兩顆行星幾乎同時的掠過了塔比星，況且不只一次出現這種曲線，同一星系這樣的巧合出現多次也不太可能，因此在塔比星面前掠過的也有可能是一種新型的特殊星體，有可能是一種稱為 synestia 的甜甜圈形天體。

同樣，兩顆行星凌日部分也有與單行星凌日相同的問題，基於公分大小與光年大小的差異，也就是重力之間的差異。

在兩顆行星的模擬中，設定變數為遮蔽物之間的距離( $Wh$ )，但事實上，依據克卜勒行星

第三定律，週期的平方會跟長半軸的立方成正比。不同的軌道半徑，速度會不一樣，會有不同的週期。因此，行星(遮蔽物)之間的距離應會隨時間變化。我覺得其實有兩種可能性讓行星之間在凌日當中彼此的視距離隨著時間變化的幅度較小，而且滿足克卜勒行星第三定律。

第一種可能性：可能這兩顆行星的軌道週期是相同的，但是彼此交錯，如下圖三十四。



圖三十四 雙行星凌日假想圖

第二種可能性：可能兩顆行星的軌道周期有特殊的因倍數關係，例如：行星 A 周期是二，行星 B 周期是一，行星 A 每轉一圈，行星 B 能轉兩圈，相較於第一種可能性來說這個可能性機率比較小，因為需要太剛好了。

雖然我的實驗中沒有做出速度差，但如果真的要實現速度差的話，可以透過兩個齒條來實現。

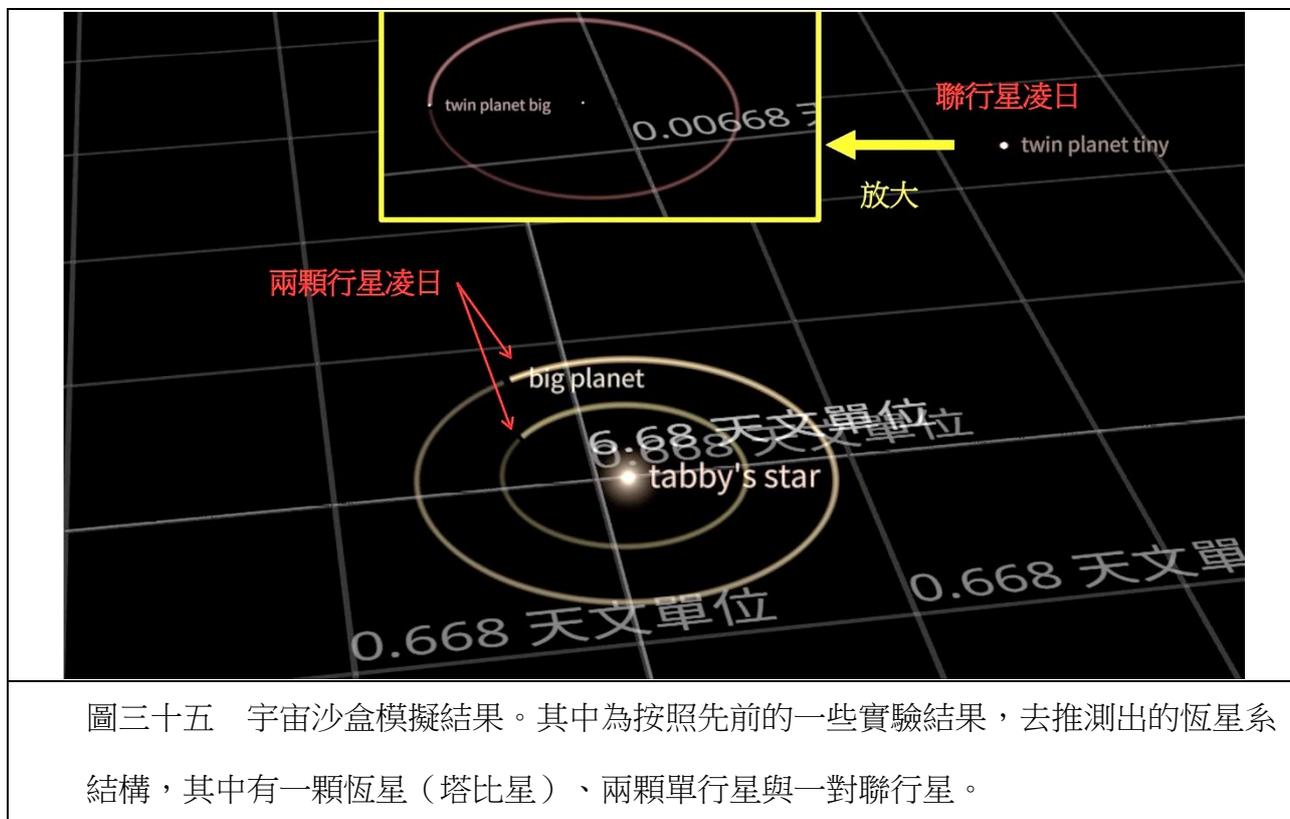
### (三)聯行星凌日部分

就我所知，目前在現實中並沒有聯行星的觀測紀錄，但這應該是符合物理定律的，並非是我的憑空想像，只是由於現實中沒有資料，因此難以確認聯行星的光變曲線是否如此。此外，我的聯行星部件雖然使用萬向輪與架子組合，但是仍然不穩定，常常在實驗運行途中，不斷地晃動，這會導致實驗的誤差。

## 三、宇宙沙盒的模擬

最後，我使用宇宙沙盒這款軟體，它可以圖像化的使用數學與物理模型，去模擬天體之間的碰撞及環繞，我使用它，去簡易的模擬塔比星恆星系的形成。可以歸納出我猜測的這多行星環繞模型在宇宙沙盒的模擬中並不會受到恆星的重力撕裂，因為兩顆行星同時凌日系統

雖不多見，一旦這系統可以形成，則代表重力環境相當穩定。而且大行星也能去除外來的小行星干擾而穩定整個塔比星系統。因此我在宇宙沙盒中建立了一顆塔比星、兩顆單行星與一對聯行星，並讓這星系可以運行，如圖三十五。



圖三十五 宇宙沙盒模擬結果。其中為按照先前的一些實驗結果，去推測出的恆星系結構，其中有一顆恆星（塔比星）、兩顆單行星與一對聯行星。

## 柒、結論

綜合以上實驗我得到以下五點結論：

- 一、本研究為模擬塔比星光變曲線做出星體移動裝置並可以幫助了解行星凌日的現象。
- 二、在實驗當中，我設定了多個參數，如：dt, MP, a, b ...等等，要好好的控制這麼多個參數不是一件容易的事情，而我在這次實驗中有系統的控制參數進行實驗，可作為日後他人的參考。
- 三、以單行星凌日模型模擬與克卜勒太空望遠鏡於 780 觀測日至 820 觀測日的塔比星觀測數據相似曲線。
- 四、以兩顆行星同時凌日模型模擬與克卜勒太空望遠鏡於 1514 觀測日至 1525 觀測日的塔比

星觀測數據相似曲線。

五、以聯行星凌日模型模擬與克卜勒太空望遠鏡於 1525 觀測日至 1550 觀測日的塔比星觀測數據相似曲線。

## 捌、參考資料

### 一、參考書籍

- (一)圖解數學(2017)數學能力開發研究會著，漢湘文化出版，98-105 頁。
- (二)宇宙必修課：給大忙人的天文物理學入門攻略，天下文化，泰森著，66-78 頁。
- (三)國小 6 下自然與生活科技(八)課本，南一書局，黃鴻博著，單元 1 巧妙的施力工具。
- (四)國中自然與生活科技自修 3 (2019) 何錫霖著，翰林出版，148-149 頁。

### 二、網路資源

#### (一)中文網站

##### 1.維基百科-洛希極限

<https://zh.m.wikipedia.org/zh-tw/洛希極限>

##### 2. KKNEWS-EV3 關於光電顏色傳感器使用中的問題

<https://kknews.cc/zh-tw/news/52jblm8.html>

##### 3. 探奇 EV3 樂高機器人 LOGO SPIKE BOOST TOUCH CLASSROOM-LEGO EV3 Color Sensor 顏色感應器的 RGB 讀取功能

<https://touchclassroom.blogspot.com/2018/09/lego-ev3-color-sensor-rgb.html>

##### 4.維基百科-KIC8462852

[https://zh.m.wikipedia.org/wiki/KIC\\_8462852#/media/File%3AKIC\\_8462852](https://zh.m.wikipedia.org/wiki/KIC_8462852#/media/File%3AKIC_8462852)

#### (二)英文網站

##### 1.WIKIPEDIA-TABBY' S STAR

[https://en.m.wikipedia.org/wiki/Tabby%27s\\_Star](https://en.m.wikipedia.org/wiki/Tabby%27s_Star)

##### 2. T. S. Boyajian, D. M. Lacourse, S. A. Rappaport, D. Fabrycky, D. A. Fischer, D. Gandolfi et al.

(2016) Planet Hunters. X KIC8462852-Where's the flux? Research Notes of the American Astronomical Society, Jan, 26 .

<https://arxiv.org/pdf/1509.03622.pdf>

3. Mysterious eclipses in the light curve of KIC8462852: a possible explanation

[https://www.aanda.org/articles/aa/full\\_html/2017/04/aa29344-16/aa29344-16.html](https://www.aanda.org/articles/aa/full_html/2017/04/aa29344-16/aa29344-16.html) 4.

4. KIC8462852-Where's the flux?

<https://www.wherestheflux.com>

4. Bruce Gary and Rafik Bourne(2017). KIC8462852 Brightness Pattern Repeating Every 1600 Years. *Research Notes of the American Astronomical Society*, Nov07.

<https://arxiv.org/pdf/1711.04205.pdf>

5. WIKIVEDIA-Synestia

<https://en.wikipedia.org/wiki/Synestia>

## 【評語】 080102

1. 作者能自行研究新主題，清楚且聚焦。除了建構相關機構，並利用樂高與 Scratch3.0 建立恆星系模型，以科學方法檢驗與模擬光變曲線。
2. 作品中有系統地擷取數據及分析，邏輯清楚且探究合理，並且在摘要中能述明研究主要成果。
3. 能依據實際塔比星光變曲線，猜測可能成因，模擬結果能符合實際狀況。

## 作品簡報



# 銀燭星光冷畫屏- 塔比星的光變曲線研究

作品編號:080102

# 研究目的

## 一、了解塔比星的基本資料

(一) 恆星屬性

(二) 光變曲線

## 二、設計與建立恆星系模型

(一) 設計星體移動裝置

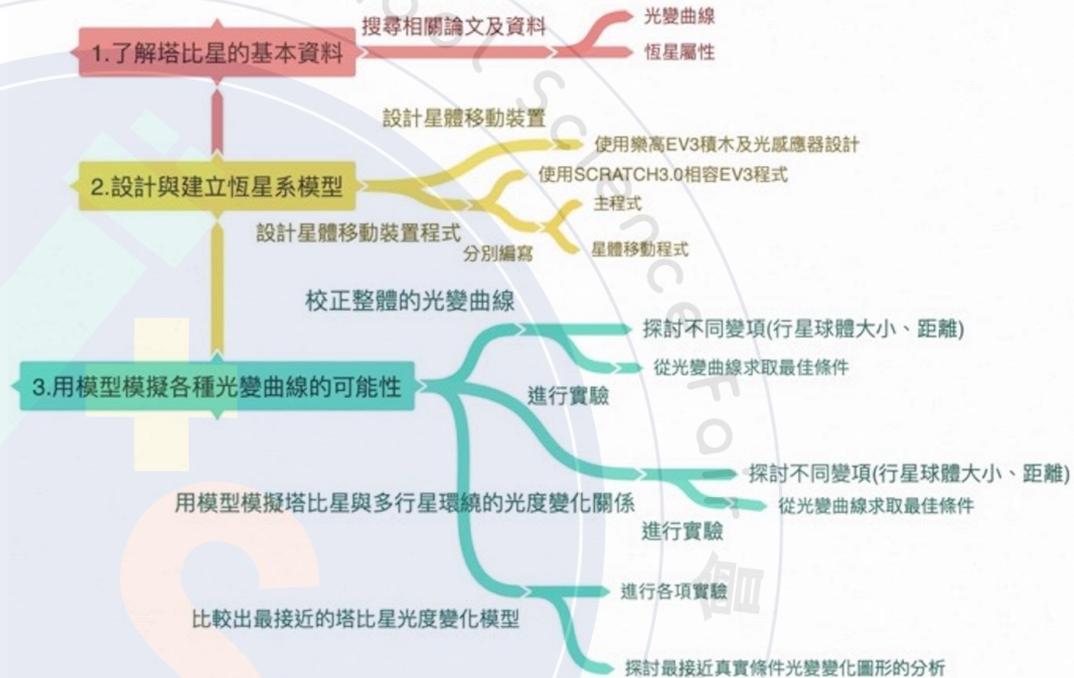
(二) 設計星體移動裝置程式

## 三、用模型模擬各種光變曲線的可能性

(一) 校正整體的光變曲線

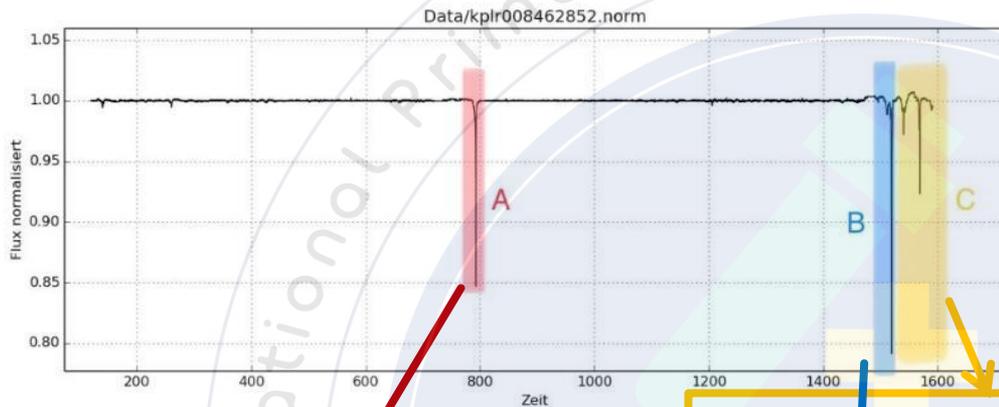
(二) 用模型模擬塔比星與多行星環繞的光度變化關係

(三) 比較出最接近的塔比星光度變化模型

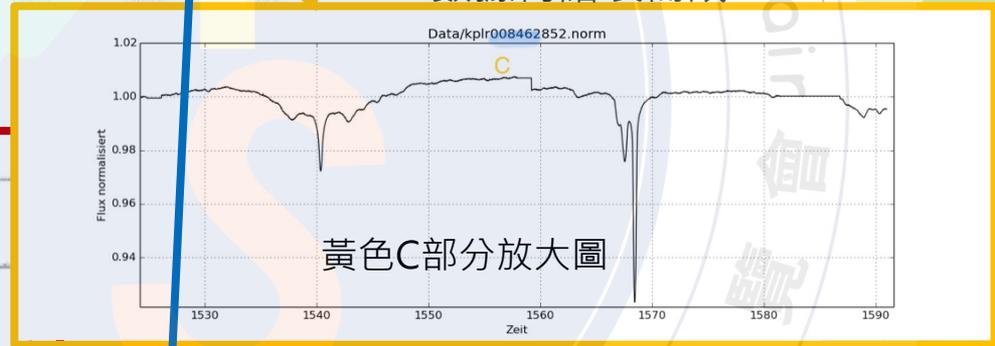
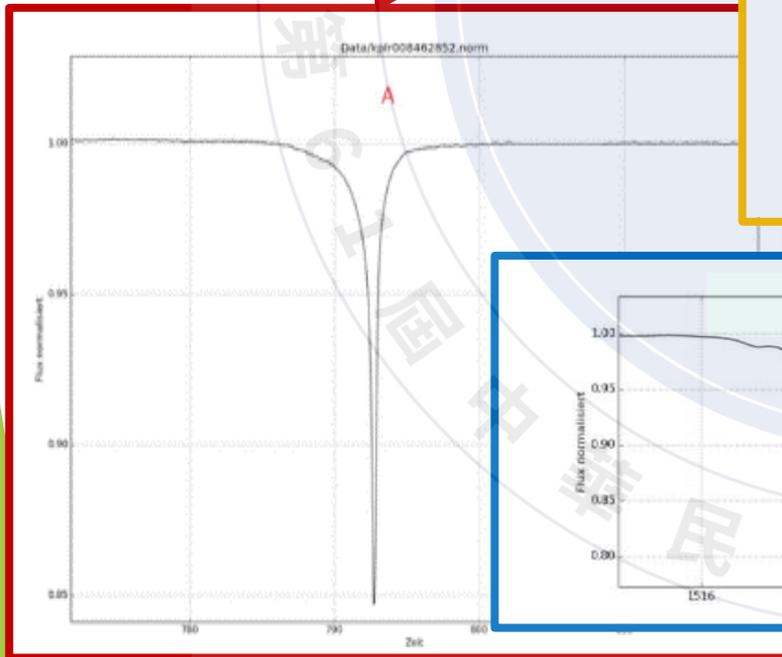


# 研究過程與方法 --- 塔比星的基本資料

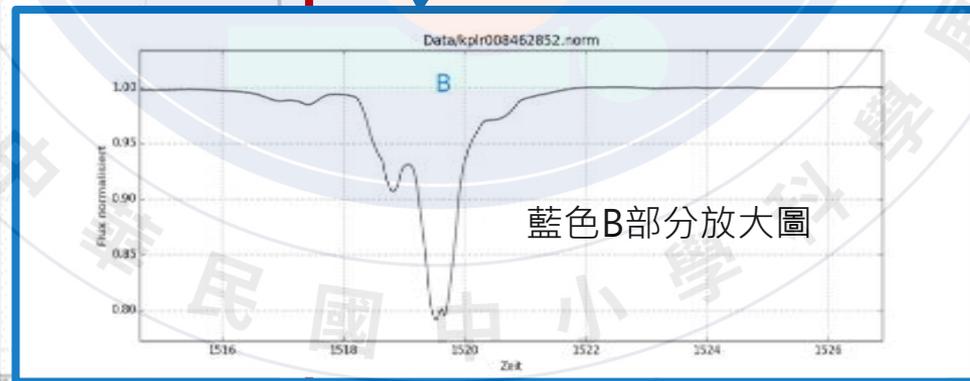
- ◆ 塔比星是天鵝座的一顆主序星
- ◆ 質量約為1.43個太陽質量，半徑約為1.58個太陽半徑，距離地球約1480光年，其絕對星等為3.08
- ◆ 塔比星以特殊的光變曲線而出名
- ◆ 光變曲線是行星經過恆星前造成降低亮度，並藉由太空望遠鏡觀察到數據再繪製而成



紅色A部分放大圖



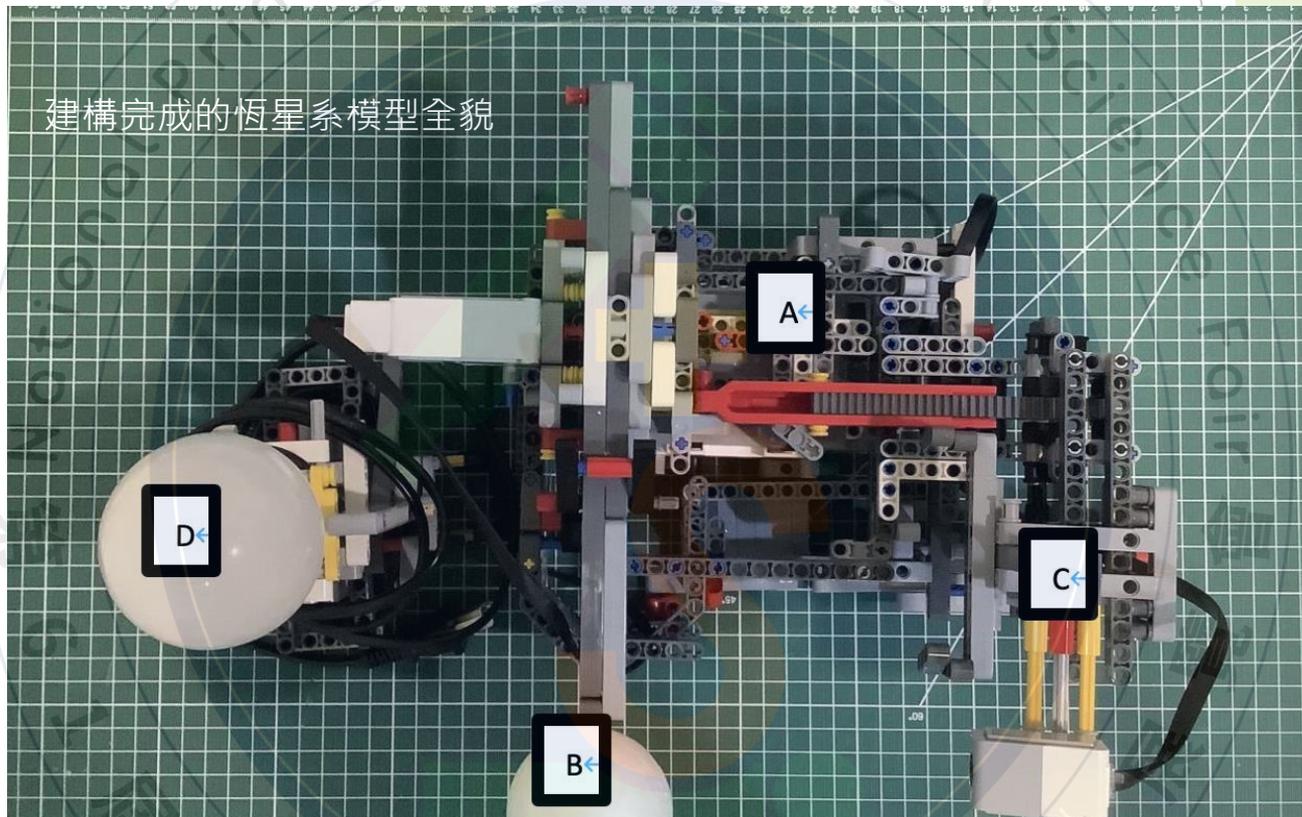
黃色C部分放大圖



藍色B部分放大圖

# 研究過程與方法 --- 建立恆星系模型

## 一、星體移動裝置硬體部份：



- ◆ 基座部分(A)
- ◆ 行星移動部分(B)
- ◆ 光感應偵測部份(C)
- ◆ 恆星模擬部分(D)

# 研究過程與方法 --- 建立恆星系模型

## 二、星體移動裝置軟體部分：

### 1. 馬達驅動系統程式

馬達動力設為50%是表示馬達運行速度為100%的一半，我讓它來回各運行兩秒鐘來限制齒條運行的路徑長。



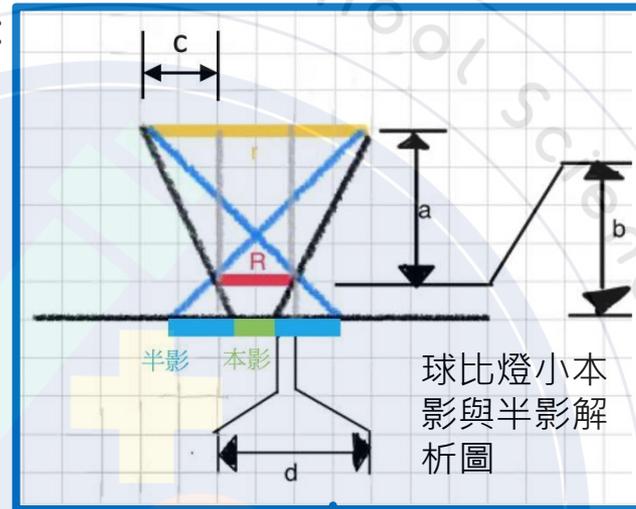
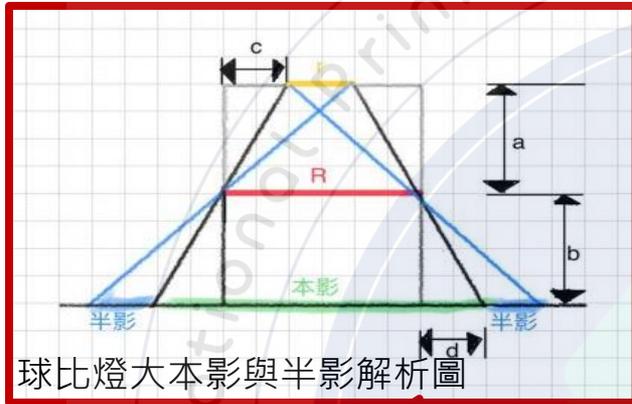
### 2. 即時監看取樣系統程式

使用即時監看的原因是因為使用程式的數據輸出，再另行以excel製作圖表，整個過程會變麻煩，而且這個輸出輸入的過程容易出錯。



# 研究過程與方法 --- 建立恆星系模型

## 三、預估本影(umbra)大小與公式部分：



$$a : b = c : d,$$

$$\text{且 } c = \frac{(R - r)}{2}$$

$$\therefore \frac{(R - r)}{2} \times \frac{b}{a} = d,$$

$$\text{umbra} = R + \frac{b}{a}(R - r)$$

$$a : b = c : d,$$

$$\text{且 } c = \frac{(r - R)}{2}$$

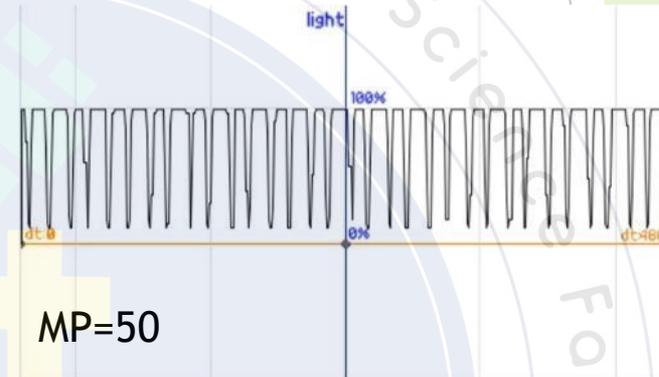
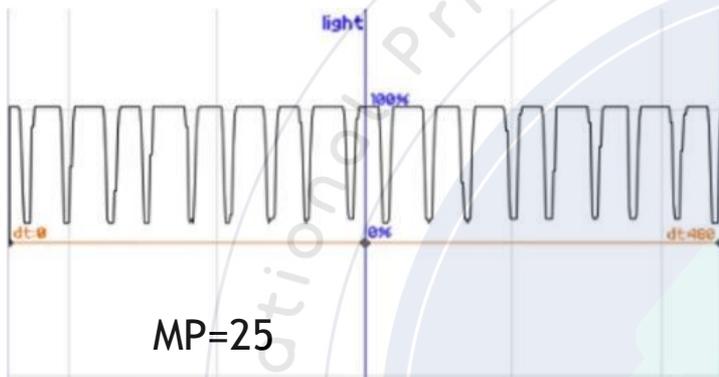
$$\therefore \frac{(r - R)}{2} \times \frac{b}{a} = d,$$

$$\text{umbra} = R - \frac{b}{a}(r - R)$$

表二 本影直徑計算及實際測量結果一覽表

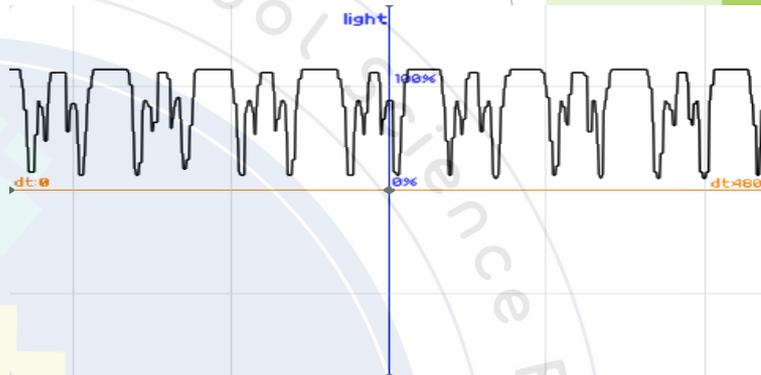
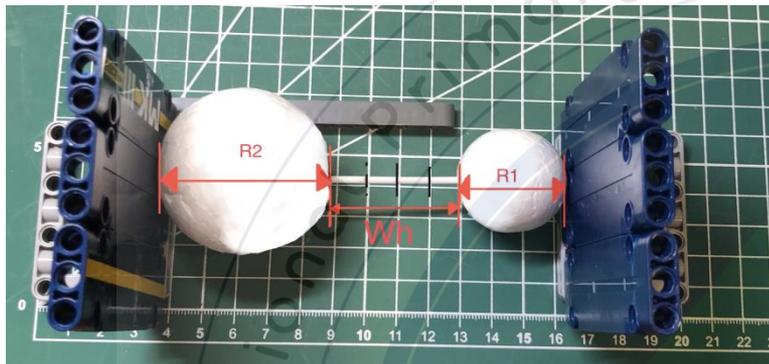
a:b	球的直徑	計算出的本影直徑	實際的本影直徑
1:1 (12cm:12cm)	C (7cm)	7.5cm	約8.5cm
	D (5cm)	3.5cm	約4cm
1:2 (7.2cm:14.4cm)	C (7cm)	8cm	約8cm
	D (5cm)	2cm	約3cm
2:1 (12cm:24cm)	C(7cm)	7.25cm	約7.25cm
	D(5cm)	4.25cm	約4.5cm

# 研究過程與方法 --- 利用『單行星凌日』進行校正



- ◆ 改變取樣時間(dt)
- ◆ 改變『馬達運行速度』(MP)與時間(T)
- ◆ 改變光源與球的距離(a)與改變球與感測器的距離(b)之間的比例
- ◆ MP為25%到50%是校正的可接受範圍
- ◆ dt 的最小可變量我將它設定在 0.1s。

# 研究過程與方法 --- 模擬兩顆行星光變曲線實驗

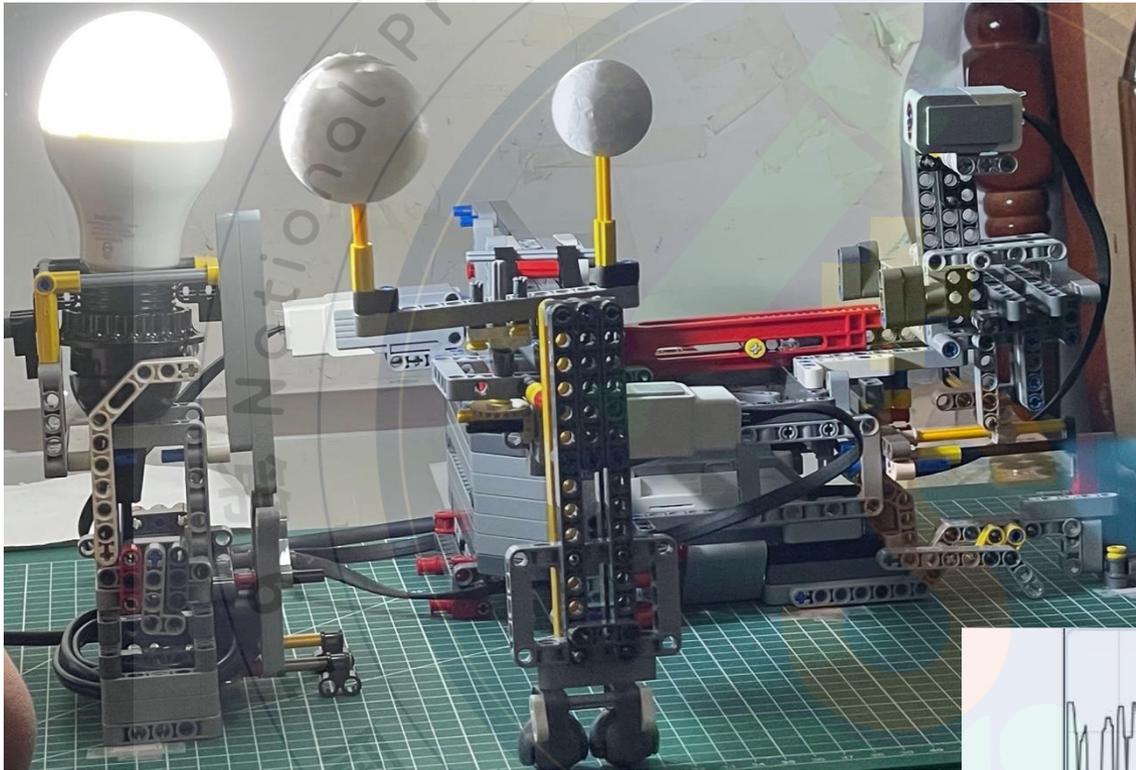


- ◆ 克卜勒太空望遠鏡的曲線當中有三個觀測期間的曲線相當類似於兩顆行星的曲線，
- ◆ 將改變遮蔽物之間的距離( $W_h$ )
- ◆ 改變兩顆球的直徑 ( $R_1$ 與 $R_2$ ) 的比例 (ball ratio,  $Br$ ) 也就是 $R_1:R_2$ 的比例
- ◆ 改變光源與球的距離( $a$ )與改變球與感測器的距離( $b$ )之間的比例。
- ◆ 實驗遮蔽物之間的最佳距離 $W_h$ 為一分
- ◆ 球的直徑之間的比例為7:10為最佳選擇
- ◆ 光源與球的距離和球與感測器的距離比例為3:4的圖與開普勒望遠鏡所觀測到的圖最為相似

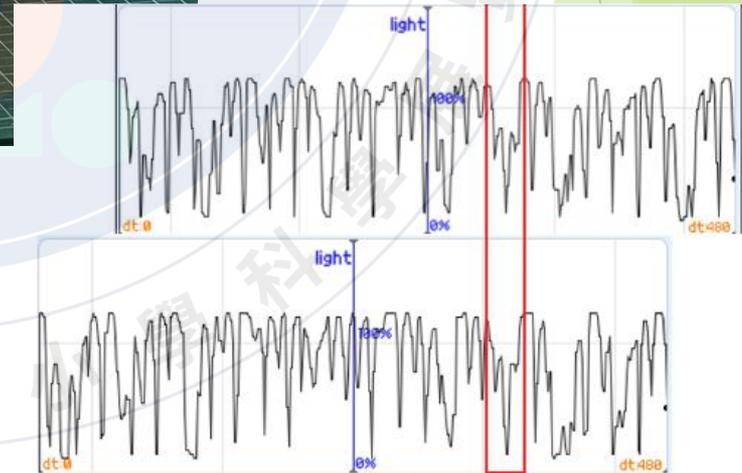


# 研究過程與方法 --- 『聯行星』光變曲線實驗

## 一、二次實驗重複性比較：

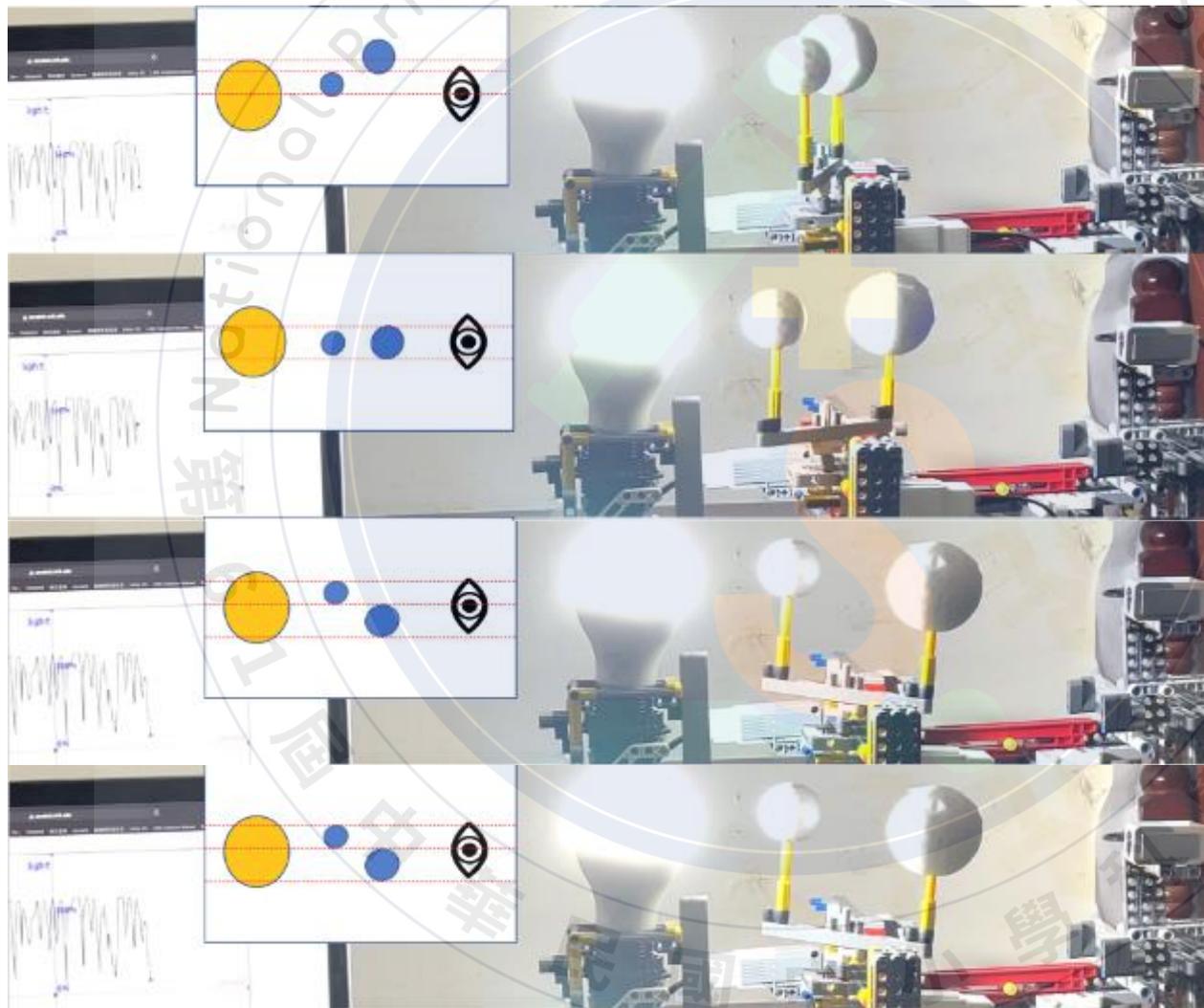


- ◆ 克卜勒太空望遠鏡觀測的光變曲線當中的一個結構，很有可能是由於聯行星所造成，但當然也有可能是其他因素。
- ◆ 我會如此想的原因是因為我推測現實中聯行星的光變曲線會非常混亂。



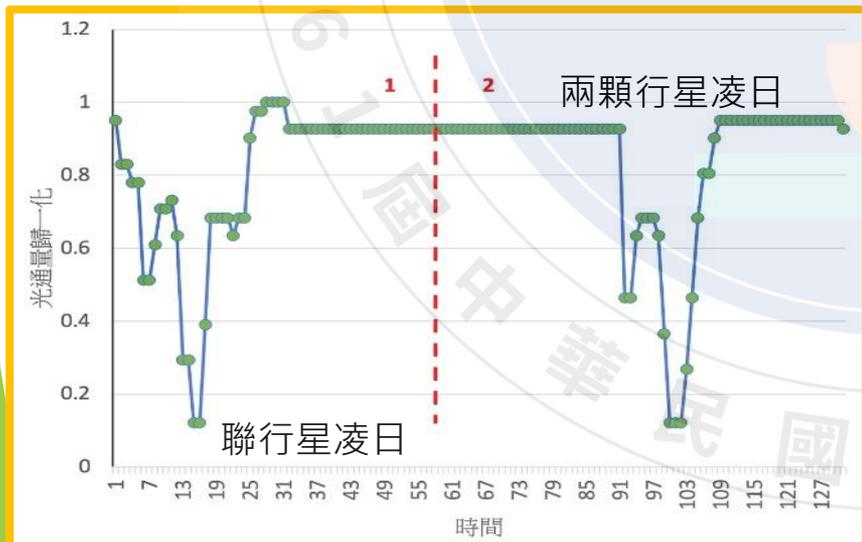
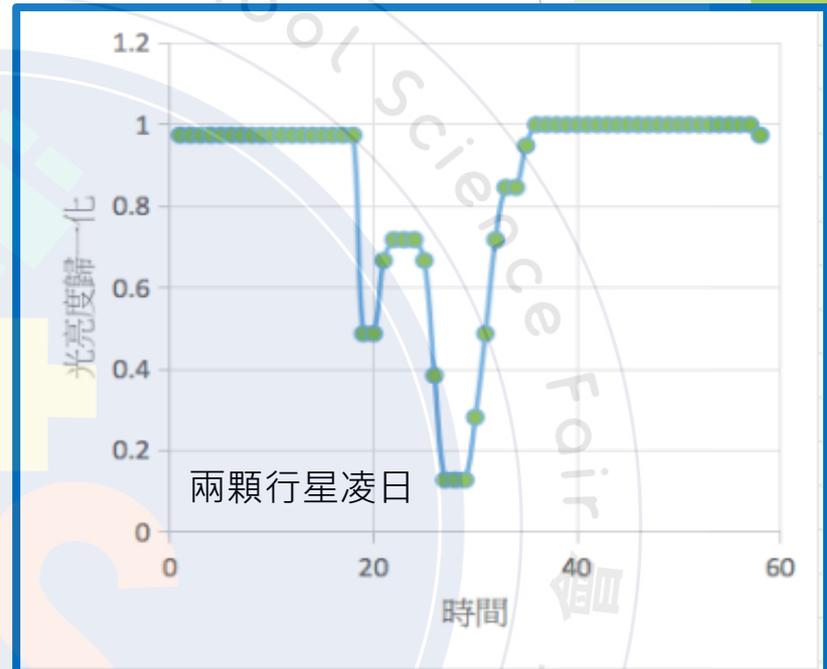
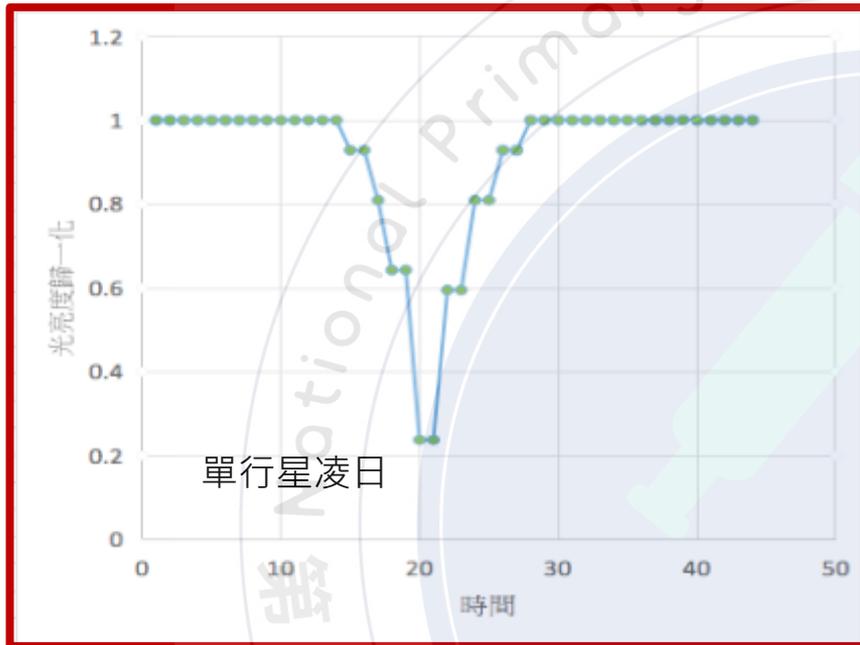
# 研究過程與方法 --- 『聯行星』光變曲線實驗

## 二、光變曲線與模擬裝置的狀態比對：



在聯行星的光變曲線與模擬裝置的狀態比對實驗當中，使用手機將模擬裝置的行徑路徑錄影下來，在影片播放時，中途暫停並截圖。然後，在透過影像的順序、兩顆保麗龍球轉向以及當時的齒條移動方向全部串連起來，並且再去推理它的狀態，最後繪製出模擬裝置的俯視圖。

# 研究結果



在800個觀測日附近有一次光度下降且呈現對稱，有可能為一般的單行星凌日。而1520日開始，出現了一連串的曲線，其中有三個主要的曲線，其中兩個可能為『兩顆行星』在不同的軌道掠過塔比星所造成，另外一個曲線則有多種可能性。

# 討論

- 一、關於塔比星的資料：
  - (一)名字的由來與最初的可能性
  - (二)重元素的分析
- 二、本研究的不足之處：
  - (一)單行星凌日部分
  - (二)兩顆行星凌日部分
  - (三)聯行星凌日部分
  - (四)克卜勒太空望遠鏡與光感應器
- 三、宇宙沙盒的模擬

