

2016 年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

作品編號 160005
參展科別 物理與天文學
作品名稱 恆星風對行星環境的影響
得獎獎項 大會獎：三等獎

就讀學校 臺北市立第一女子高級中學
指導教師 楊善茜、葉永烜
作者姓名 莊雅雯

關鍵字 恆星風、Kepler-22、Kepler-452

作者簡介



我是莊雅雯，目前就讀北一女中三年級。我從小就很喜歡星星，特別喜歡看星空。有幸在上高中後接觸到天文學，我覺得很新鮮有趣，並在老師的帶領下，參加了科展。過了兩年，學到很多也遇到許多挫折，很開心能夠全心投入研究一件事情。謝謝一直幫助我的教授、老師和學姐。

摘要

本研究採用克卜勒任務的分批資料，藉由仿作前人手法，嘗試將已被認為有行星環繞的系外恆星 Kepler-22 和 Kepler-452 的不同觀測階段的光變曲線連接在一起，獲得較為長期的觀測資料，以確認它是否被行星環繞著。再從分析數據的過程中，為尋找外星生存環境建立基礎的探究能力。透過分析 Kepler-22 和 Kepler-452 光變曲線及假設它們與它們的行星的密度已知狀況下，可以得知系外行星 Kepler-22b 的公轉繞行週期為 290 天、Kepler-22b 半徑為地球的 $\sqrt{7}$ 倍、Kepler-22b 質量為地球的 16 倍、公轉軌道半長軸約為 1AU。系外行星 Kepler-452b 的公轉繞行週期為 385 天、Kepler-452b 半徑為地球的 $\sqrt{3}$ 倍、Kepler-452b 質量為地球的 5 倍、公轉軌道半長軸約為 1.04AU。系外恆星 Kepler-22 的自轉週期為 21 天、年齡為四十億年。這些參數有助了解這個系外恆星系統的結構，並在研究出結果後可以做為了解太陽系過去與未來演變的參考。

Abstract

This study uses a batch data from Kepler mission, and attempts to connect the light curves of Kepler-22 and Kepler-452, which have been considered surround by extrasolar planets, observed in different stages together by pastiche previous practices, to get more long-term observational data to confirm whether they are surrounded by a planet. And then establish basic ability for searching extraterrestrial living environment during the process of analyzing the data. Through analyze the light curves of Kepler-22 and Kepler-452 and assume that their and their planets' density are in a known situation, we can learn that the exoplanet Kepler-22b orbiting the orbital period of 290 days, the radius of Kepler-22b is $\sqrt{7}$ times the radius of Earth, the mass of Kepler-22b is 16 times the mass of Earth, and that the orbit semi-major axis is about 1AU. Exoplanet Kepler-452b orbiting the orbital period of 385 days, the radius of Kepler-452b is $\sqrt{3}$ times the radius of Earth, the mass of Kepler-452b is five times the mass of Earth, and the orbits semi-major axis is about 1.04AU. Extrasolar stellar Kepler-22 has the rotation period of 21 days, and the age of four billion years. These parameters help to understand the structure of stellar systems, and the result can be used as understanding the evolution of the solar system.

(一)、前言

在科幻電影中時常出現的外星人，挑起我想要探究的興趣。地球擁有充足的陽光、適當的溫度、液態水、大氣層，是一顆適合生物生活的星球。假若有一顆位於系外恆星系統中的行星，擁有跟地球一樣適合讓生物生存的條件，那麼是否有可能也會有外星生物的存在呢？站在現有太陽對地球影響的認知之上，對了解系外恆星對其行星的影響有哪面向可供借鏡呢？

Kepler 觀測計劃主要在尋找系外行星，也因此累積大量，系外恆星長時間的光度資料。透過分析恆星 Kepler-22 和 Kepler-452 的光變曲線紀錄，找出其行星 Kepler-22b 和 Kepler-452b 的存在，分析 Kepler-22 和 Kepler-452 相關基本物理參數，嘗試推斷出恆星的日冕拋射物質和恆星風能量對行星環境造成的影響。

(二)、研究方法或過程

1. 系外行星(Kepler-22b 和 Kepler-452b)公轉週期、質量與軌道半長軸的估算

(1) 行星週期的計算

克卜勒太空望遠鏡探尋行星的方法為凌日法。此方法需要重複觀察到行星經過恆星前方的凌日現象，而行星經過恆星前時會造成光子數在一段時間內的下降，讓光變曲線呈現凹盆狀。至少觀察到三次凌日現象方可斷定其為行星。

(2) 行星的質量的計算

地球經過太陽時，會造成光子數下降萬分之一，因此透過計算凌日時下降的光子數除以平均光子數，可推得此行星與地球半徑倍率。

$$(\text{平均光子數} - \text{下降光子數}) / \text{平均光子數} = \text{行星與恆星的面積比}$$

我大膽假設 Kepler-22 和 Kepler-452 恆星與太陽的半徑差不多，等於 109 倍地球半徑。而面積比開根號後等於半徑比，如此可求得行星的半徑(r)約為幾倍的地球半徑。

同樣假設此行星的母恆星，即 Kepler-22 和 Kepler-452 的密度與太陽相等，等於 $1408(\text{kg}/\text{m}^3)$ ，此行星的密度也假設與地球相等，都等於 $5515(\text{kg}/\text{m}^3)$ ，那麼可以求出恆星及行星的質量：

$$\begin{aligned} m(\text{Kepler-22b 行星質量}) &= 4/3 \pi (r)^3 * 5515 \text{ (kg)} \\ M(\text{Kepler-22 恆星質量}) &\doteq 1M_{\odot} \\ &= (4/3 \pi (109*6378100)^3 * 1408 \doteq 1.98*10^{30}(\text{kg})) \end{aligned}$$

(3) 行星軌道半長軸的計算

分析觀測光變曲線週期性光度下降的情況可得的週期 t ，假設系外行星公轉軌道離心率不大，可經過下列圓周運動向心力假定來估算得出行星半長軸。 R 可視為行星繞行軌道半長軸， M 為母恆星質量， m 為行星質量。

$$t = 2\pi R/v \dots\dots(1)$$

$$mv^2/R = F = GmM/R^2 \dots\dots(2)$$

由(1)(2)聯立方程式可求得 R

$$v = 2\pi R/t$$

$$(2\pi R/t)^2 = GM/R$$

$$R = (GMt^2/4\pi^2)^{1/3}$$

2. 系外恆星(Kepler-22)自轉週期與恆星年齡的估算

(1) 自轉週期的計算

透過數學分析的方法將光變曲線變化的主要週期求出。我使用 Lomb-Scargle Periodogram(註三)計算，此方法類似傅立葉轉換。在下列式子中， ω 為頻率(以 1 到 500 代入)， t_j 是時間， τ 是由式子(3)定義出來的。

$$\tan 2\omega\tau = (\sum_j \sin 2\omega t_j) / (\sum_j \cos 2\omega t_j) \dots\dots(3)$$

P 為強度， P 值越高表示此頻率(ω)的擬合下，光變曲線越能重合，是真實訊號的機會也越大，該頻率屬於雜訊的機會就越低。

$$P(\omega) = (1/2) * \{ [\sum_j (X_j - X_{av}) * \cos\omega(t_j - \tau)]^2 / [\sum_j \cos^2\omega(t_j - \tau)] + [\sum_j (X_j - X_{av}) * \sin\omega(t_j - \tau)]^2 / [\sum_j \sin^2\omega(t_j - \tau)] \}$$

(2) 年齡的計算

運用公式如下：

$$P(B-V, t) = f(B-V) * g(t)$$

$$f(B-V) = (0.7725 \pm 0.011) * (B-V_0 - 0.4)^{0.601 \pm 0.024}$$

$$g(t) = t^{0.5189 \pm 0.0070} \quad (\text{註一})$$

Barnes 等人(註一)中的論文提到上述公式，顯示自轉週期(P)為年齡(t)與色指數($B-V$)的函數。色指數之 $B-V$ 的值可以由網站 Mikulski Archive For Space Telescope(MAST, 一個保存許多太空望遠鏡資料的網站(註四))查到，Kepler-22 的 $B-V$ 色指數為 0.616。使用不同濾鏡測得的光度差分別稱為 $U-B$ 或 $B-V$ 的色指數，數值越小，恆星的顏色越藍色；反之，色指數越大，顏色越紅(或溫度越低)。而由 $P(B-V, t) = f(B-V) * g(t)$ 方程式

可知，色指數愈大，恆星年齡愈大。

3. 行星大氣留存的計算

下列是計算行星大氣在磁場保護下經高能粒子衝擊後的大氣留存所涉及的假設：

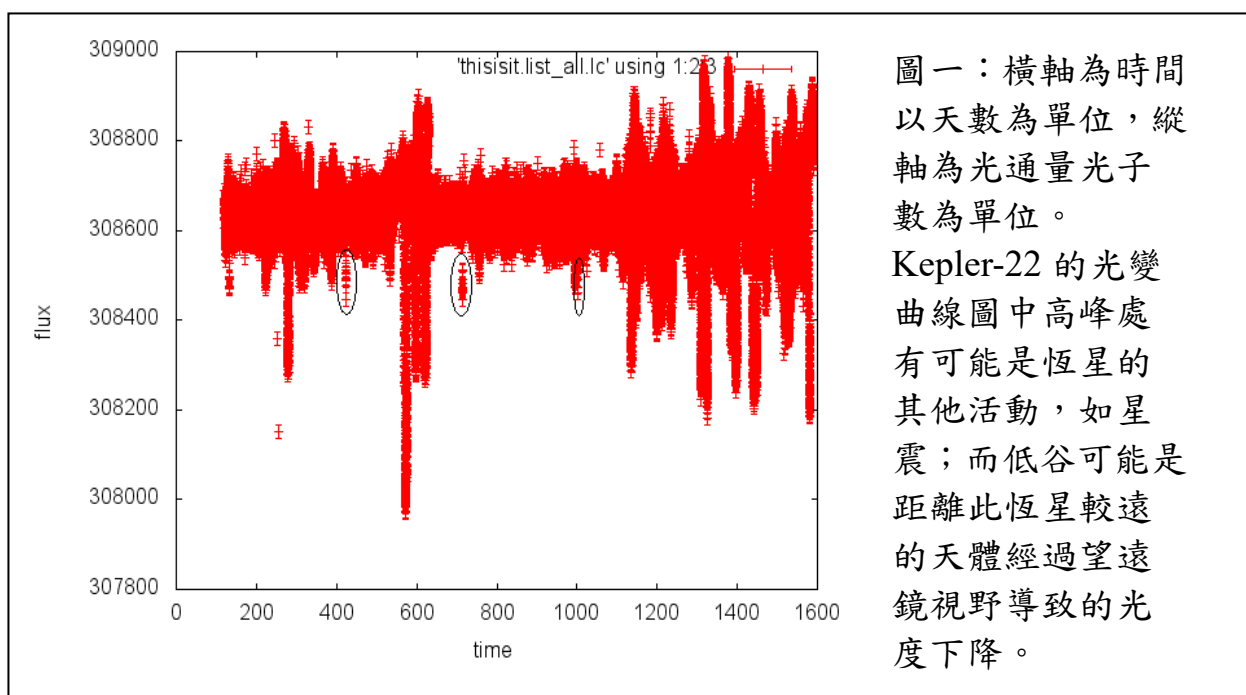
- (1) 假設恆星風動能與太陽風動能相當，即單位空間中帶電粒子密度與速度平方的乘積。
- (2) 假設行星磁層半徑等於地球的磁層半徑，皆為 10 倍地球半徑。
- (3) 假設恆星原始大氣組成只有 CO₂ 的情況下。

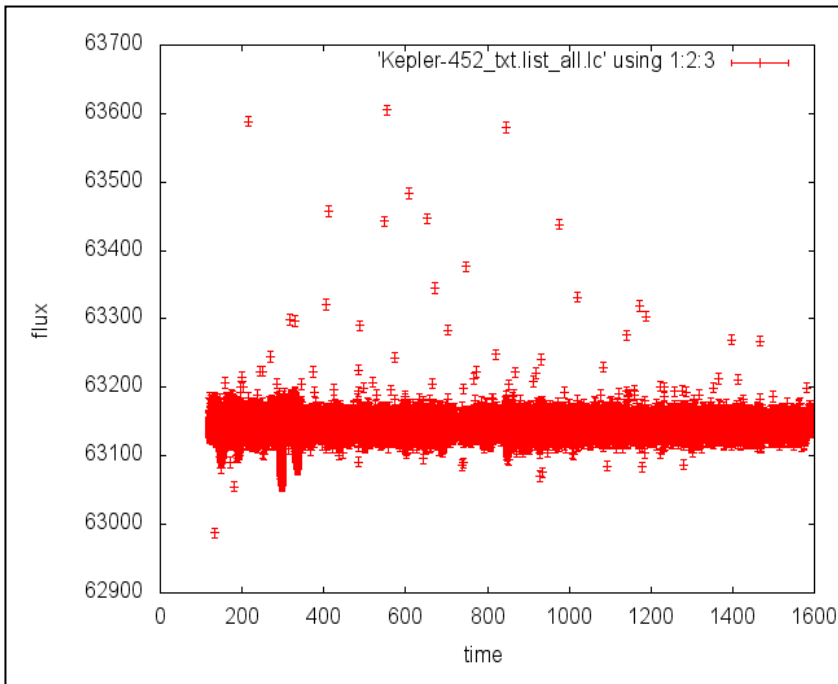
(三)、研究結果與討論

1. 系外行星(Kepler-22b 和 Kepler-452b)公轉週期、質量與軌道半長軸的估算

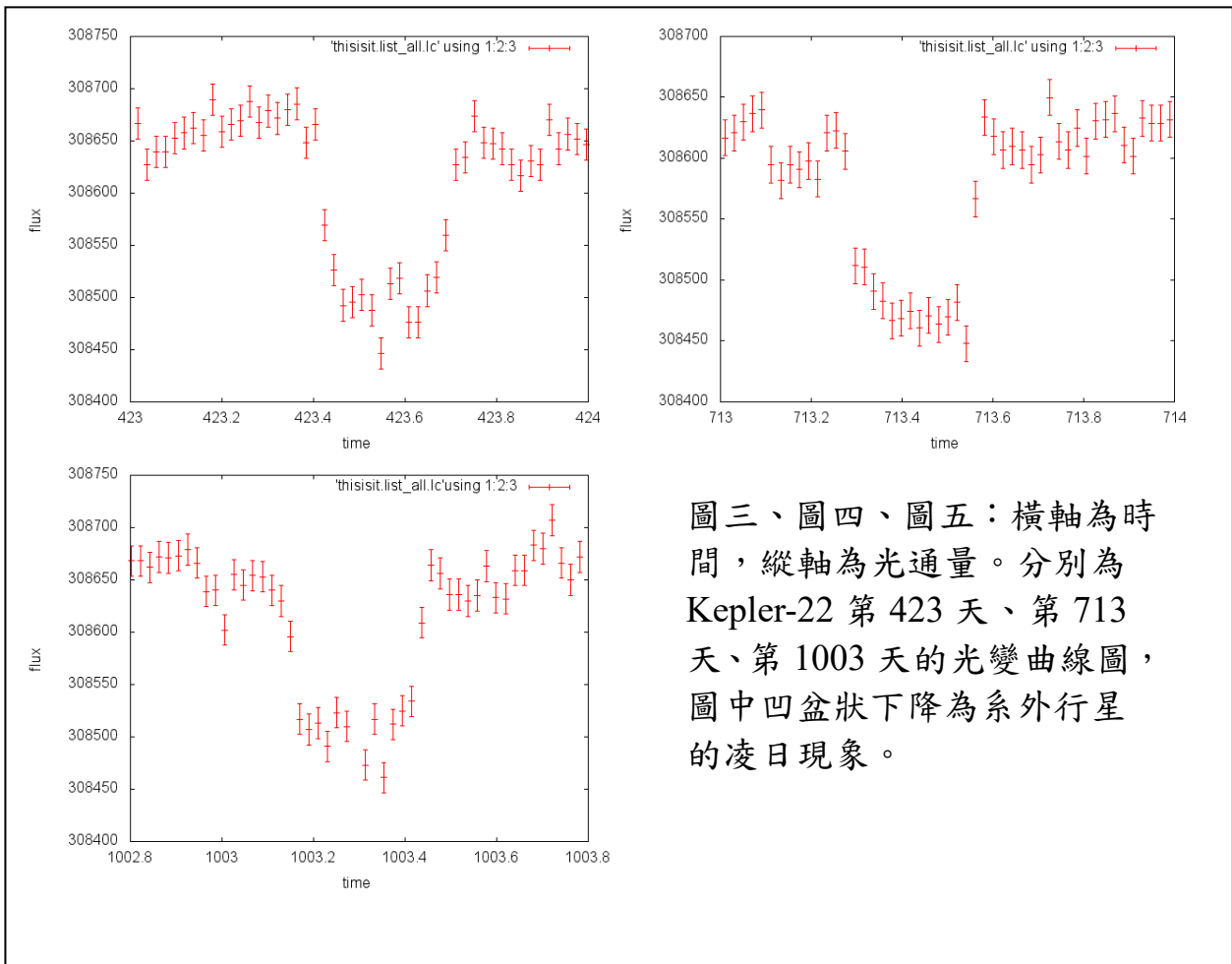
(1) 行星週期的計算結果

從圖一中可見圖一中其餘的光度下降時刻經校驗已排除，並非為行星凌日的現象。大約是第 423 天、第 713 天、第 1003 天出現了掩星現象。由此可推出 Kepler-22b 公轉週期為 290 天。從圖二中可見圖二中其餘的光度下降時刻經校驗已排除，並非為行星凌日的現象。大約是第 485 天、第 870 天出現了掩星現象。由此可推出 Kepler-452b 公轉週期為 290 天。行星造成的光度下降如圖三、圖四、圖五、圖六、圖七凹盆狀明顯可見，確認為行星凌日現象。

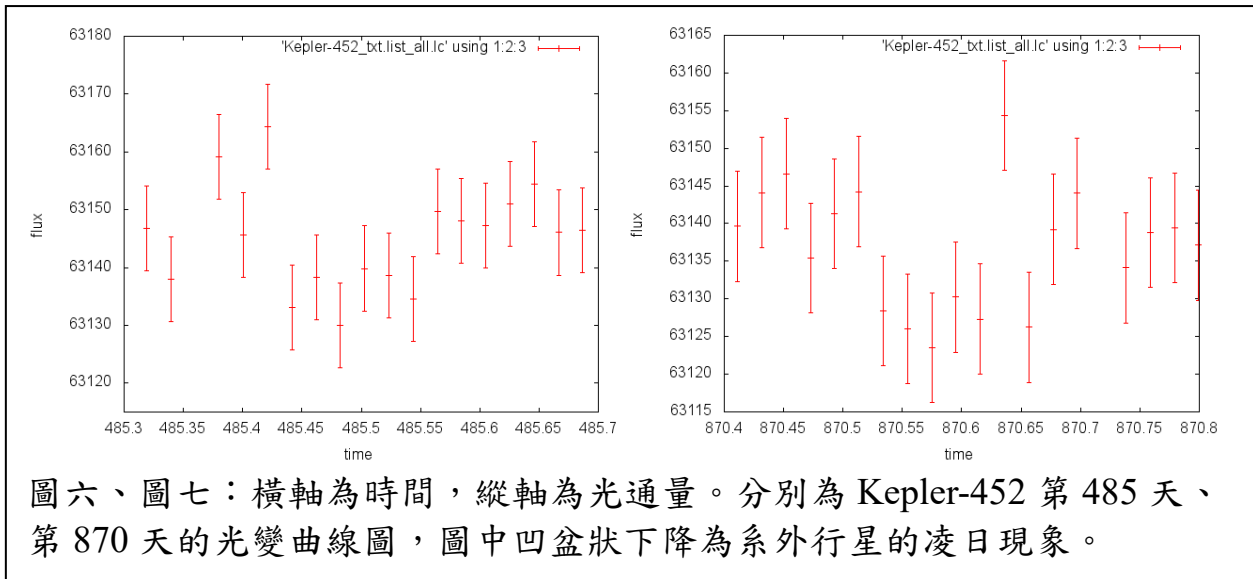




圖二：橫軸為時間以天數為單位，縱軸為光通量光子數為單位。Kepler-452 的光變曲線圖中高峰處有可能是恆星的其他活動，如星震；而低谷可能是距離此恆星較遠的天體經過望遠鏡視野導致的光度下降。



圖三、圖四、圖五：橫軸為時間，縱軸為光通量。分別為 Kepler-22 第 423 天、第 713 天、第 1003 天的光變曲線圖，圖中凹盆狀下降為系外行星的凌日現象。



圖六、圖七：橫軸為時間，縱軸為光通量。分別為 Kepler-452 第 485 天、第 870 天的光變曲線圖，圖中凹盆狀下降為系外行星的凌日現象。

(2) 行星質量計算的結果

由圖三、圖四、圖五中三次的凌日現象可看出行星經過恆星前時的光度變化。凌日時大約下降了 200 個光子數。平均光子數為 308650，代入

$$\frac{(\text{平均光子數} - \text{下降光子數})}{\text{平均光子數}} = \text{行星與恆星的面積比}$$

$$\frac{(308650 - 308450)}{308650} \doteq 0.0006$$

可得 Kepler-22b 與 Kepler-22 的面積比為萬分之六。

由圖六、圖七中兩次的凌日現象可看出行星經過恆星前時的光度變化。凌日時大約下降了 20 個光子數。平均光子數為 63143，代入

$$\frac{(\text{平均光子數} - \text{下降光子數})}{\text{平均光子數}} = \text{行星與恆星的面積比}$$

$$\frac{(63143 - 63123)}{63143} \doteq 0.0003$$

可得 Kepler-452b 與 Kepler-452 的面積比為萬分之三。

在假設 Kepler-22 和 Kepler-452 恆星在半徑和密度方面和太陽相等，以及 Kepler-22b 和 Kepler-452b 在密度和地球相當之下，可得 Kepler-22b 半徑=17029168.676(m)，Kepler-22b 行星質量 $\doteq 16M_{\oplus}$ ($4/3\pi(17029168)^3 * 5515 \doteq 1.14*10^{26}(\text{kg})$)，Kepler-22 恆星質量 $\doteq 1M_{\odot}$ ($4/3\pi(109*6378100)^3 * 1408 \doteq 1.98*10^{30}(\text{kg})$)；Kepler-452b 半徑=11047193.256(m)，Kepler-452b 行星質量 $\doteq 5M_{\oplus}$ ($4/3\pi(11047193)^3$

*5515 \doteq 3.11*10²⁵(kg) , Kepler-452 恆星質量 \doteq 1M_☉
(4/3 π (109*6378100)³ *1408 \doteq 1.98*10³⁰(kg))

(3) 行星軌道半長軸的計算結果

分析觀測光變曲線週期性光度下降的情況所得的週期 t，假設系外行星公轉軌道離心率不大，將軌道以圓形估計，可經過下列圓周運動向心力假定來估算得出行星半長軸。R 可視為行星繞行軌道半長軸，M 為母恆星質量，m 為行星質量。

$$t = 2\pi R/v \dots\dots(1)$$

$$mv^2/R = F = GmM/R^2 \dots\dots(2)$$

由(1)(2)聯立方程式可求得 R

$$v = 2\pi R/t$$

$$(2\pi R/t)^2 = GM/R$$

$$R^3 = GMt^2/4\pi^2 = 6.67*10^{-11}*1.98*10^{30}*(290*86400)^2/4\pi^2 = 2.1*10^{33}$$

$$R \doteq 1\text{AU}(128061403.167(\text{km}))$$

Kepler-22b 的公轉軌道半長軸約為 1AU。

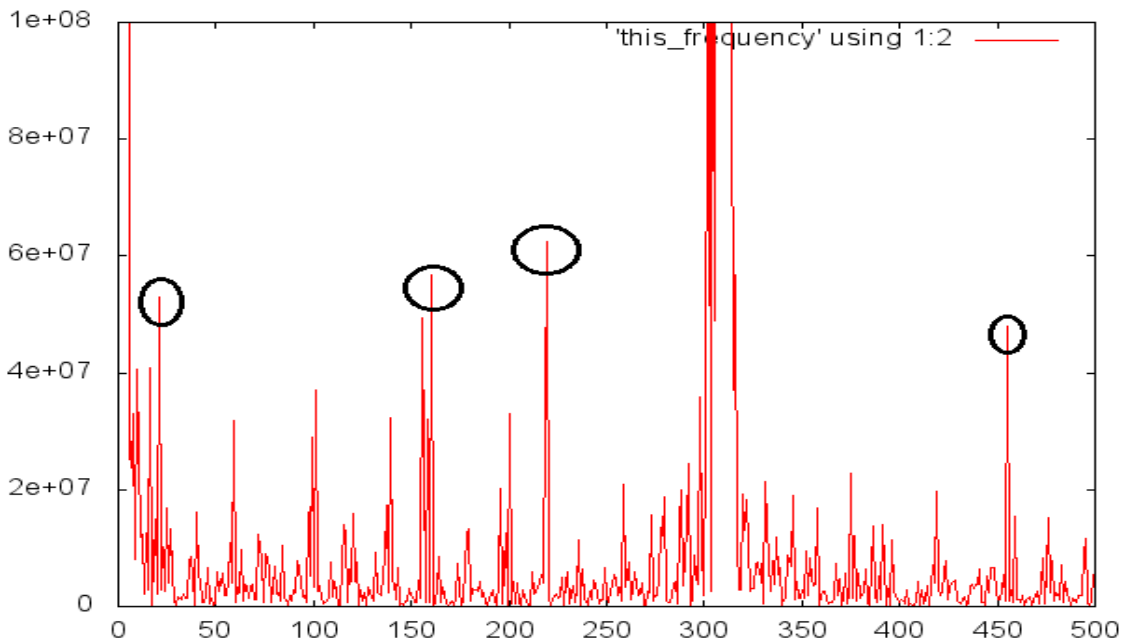
$$R^3 = GMt^2/4\pi^2 = 6.67*10^{-11}*1.98*10^{30}*(385*86400)^2/4\pi^2 = 3.7*10^{33}$$

$$R \doteq 1.04\text{AU}(154689229.815(\text{km}))$$

Kepler-452b 的公轉軌道半長軸約為 1.04AU。

2. 系外恆星(Kepler-22)自轉週期與恆星年齡的計算結果

(1) 自轉週期部分



圖八：橫軸為頻率(ω)(單位：天)，縱軸為強度(P)。 $\omega=0$ 處有明顯高峰是因為此資料為每半小時記錄一筆，因此它算出每半小時的頻率。在 300 天左右有另一高峰是因為大約每三百天此恆星之行星便會通過鏡頭視野，造成光變曲線的變化。圖中圈出處為有可能是周期性活動的天數，下一步便是與完整的光變曲線圖(圖一)互相比對，結果發現 21 天左右會有相似的曲線重複出現，以此來確定恆星自轉周期為 21 天。

(2) 年齡的計算結果

採用 MAST 資料庫數據將 Kepler-22 的 B-V 值用 $P=21$ 代入：

$$P(B-V, t) = f(B-V) * g(t)$$

$$f(B-V) = (0.7725 \pm 0.011) * (B-V_0 - 0.4)^{0.601 \pm 0.024}$$

$$g(t) = t^{0.5189 \pm 0.0070} \quad (\text{註一})$$

得到的結果 Kepler-22 的恆星年齡約四十億年。

由於 B-V 是數值一對一的形式，太陽的 B-V 色指數為 0.656 ± 0.005 ，而 Kepler-22 的色指數為 0.616；太陽的自轉周期約為 27 天，而 Kepler-22 的自轉週期為 21 天，可以看出此恆星相當近似於太陽的狀況。

3. 系外行星(Kepler-22)的大氣留存估算結果

(1) 假設恆星風動能與太陽風動能相當，即單位空間中帶電粒子密度與速度平方的乘積。

- (2) 假設行星磁層半徑等於地球的磁層半徑，皆為 10 倍地球半徑。
- (3) 假設恆星原始大氣組成只有 CO₂ 的情況下。

滿足上述三條假設情況下計算行星大氣在磁場保護下經高能粒子衝擊後的大氣留存得到大氣層總質量為 2×10^{22} (g)(運用公式： $H=(kT/mg) \times (\text{地球大氣層空氣較集中部分厚度 km})$ 、 $g=GM/r^2$ 、 $M=A \times n \times H$ ，T 為溫度(K)，m 為分子量，n 為分子密度)，同時每秒恆星風使大氣逸散之質量為 2×10^6 (g)，而經過 3 億年後大氣將全部逸散。如若只以大氣的有無為生物生存的依據，此行星目前可能沒有生物生存。

(四)、結論與應用

本研究目前估算所得的天體基本物理性質包括有恆星 Kepler-22 的質量(約等於 1 太陽質量)、自轉周期(21 天)、年齡(40 億年)。行星 Kepler-22b 的半徑($\sqrt{7}$ 倍地球半徑)、質量(16 倍地球質量)、公轉周期(290 天)、公轉軌道半長軸(1AU)。確定此系外恆星系是與太陽系相當相似，本研究提及的假設情況，所衍生的誤差經校驗在可接受範圍內。如果希望能找到與地球上的生物相似的外星生命，超級地球 Kepler-452b 比 Kepler-22b 更有可能，行星 Kepler-452b 的半徑($\sqrt{3}$ 倍地球半徑)、Kepler-452b 質量(5 倍地球質量)、公轉繞行週期(385 天)、公轉軌道半長軸(1.04AU)。雖然在表面溫度方面，兩顆系外行星的半長軸差不多，因此溫度上來說液態水是存在的，然而就氣壓方面而言，質量更接近地球的 Kepler-452 較有可能保有大氣層的同時有液態水。

除了恆星風會影響行星的大氣層外，另有恆星本身所釋放的電磁波，而生物與行星環境彼此也會互相影響，還有行星本身可能也會有地質活動補充大氣。

另外也不能排除有些生物可能是住在地底的，未來仍有許多值得研究的相關課題等待我們去探究。因此不能單從大氣層的方面斷定此行星上可能有生物生存。

一般人對克卜勒計畫的第一印象是發現系外行星，但其實在處理完系外恆星是否具有行星系統之後，大量高品質的恆星觀測資料，是就恆星研究的寶庫，應該可以從中發現許多新鮮事。因此本研究提供的一個有別於以往的研究方向，希望能夠吸引更多有興趣的人可以一起加入分析數據的行列。

由於系外恆星離太空望遠鏡很遠，許多資料都是在假設的情形下推算出

來的。地球能夠有生命存活是因為其本身的磁場阻擋大量高能宇宙射線，及能夠透過地質活動，例如地震、火山等，再釋放出氣體以維持大氣層的厚度，傷害不了地球生命。所以如果外星生命能夠存在，它的行星很有可能是環繞一顆中年恆星，且本身有能夠維持大氣層存在的地質活動，以及磁場的作用，因為日冕拋射物質放出的帶電粒子到了行星附近會被磁場所侷限，大幅降低帶電粒子碰撞到行星大氣的濃度與能量，才能抵擋恆星釋放出的能量。

本研究的目標是透過與太陽類似的恆星相比較，當我們知道這個系外恆星的活動，我們也可以藉此預測太陽的活動方式。譬如多大等級的閃焰多久會發生一次？單純只研究太陽的演變我們可能要等很久很久，但是我們可以同時研究一大批跟太陽類似的恆星，從統計的方式來推算我們想要的答案。從最短期、最實際的角度來看，我們有許多人造衛星，它們對太空天氣非常敏感，知道太陽的活動我們可以幫助它們避開不必要的損害。再往遠一點看，我們也想解答太陽會不會產生可以危害地球生命的閃焰，會的話，多久發生一次？會把人類的文明破壞到什麼程度？發生前如何預報？或許現在這些活動像地震一樣還無法準確預測，但我們總要踏出第一步去認識它。

(五)、參考文獻

- (1) Barnes. (2007) Ages for illustrative field stars using gyrochronology: viability, limitations and errors. *Astrophysical Journal*. 669: 1167-1189.
- (2) Schnepf, Lovelance, Romanova, and Airapetian.(2015) Stellar wind erosion of protoplanetary discs. *MNRAS*. 448:1628-1633.
- (3) Wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Least-squares_spectral_analysis
- (4) Mikulski Archive for Space Telescopes. <http://archive.stsci.edu/>

【評語】 160005

作者結合自行撰寫的軟體及現成軟體分析克卜勒太空望遠鏡的掩星資料，進而推算各系外行星之母恆星太陽風的影響，研究精神可佳，若能再分析更多的目標，其統計結果將有不錯的研究價值。