

在人類歷史的大部分時間裡，我們對於天文觀測僅限於太陽系內的行星和其他肉眼可見的恆星。然而，隨著天文技術的進步，我們開始發現太陽系之外也有行星圍繞其他恆星運行，天文學家稱之為系外行星。這些行星，開啓了人類對宇宙中其他世界探索的新篇章。

研究系外行星的特性有不少方法，其中結合凌日法和測量徑向速度以獲得系外行星大小和質量是最主流的方式。早期克卜勒太空望遠鏡發現了數千個新的凌日候選者，不過大部分的目標恆星亮度太低，以至於要用光譜測量這些行星的徑向速度受到極大的限制。好在凌日系外行星巡天衛星（TESS，詳見《臺北星空84期》新聞追蹤）的出

現彌補了這一不足，這是一個幾乎涵蓋整個天空的巡天計畫，專門搜尋在離地球較近且明亮的恆星上運行的凌日行星。TESS首次的發現就是一顆在肉眼可見的恆星 π Men（山案座 π ）上運行的超級地球（圖1），這正是TESS設計用來探測的主要行星類型之一。

探索宇宙中的新世界

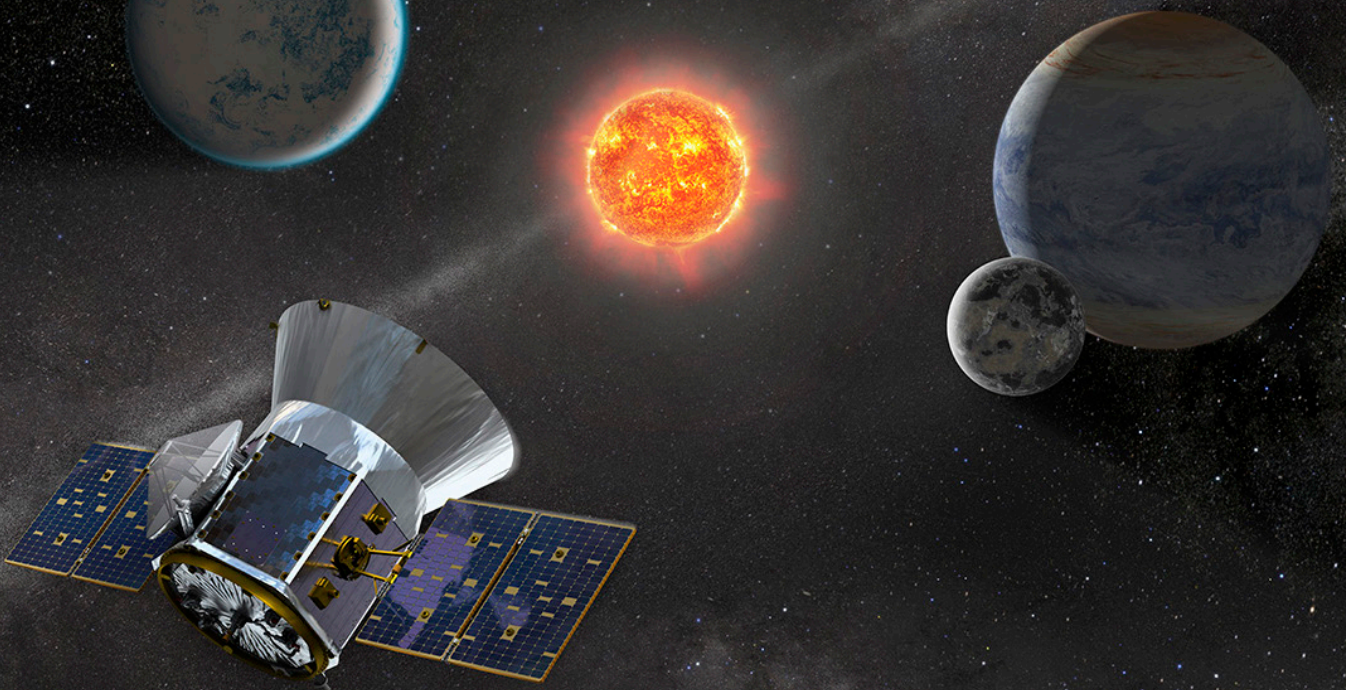


圖1. 藝術家描繪凌日系外行星巡天衛星觀測到的第一顆行星，該行星圍繞著一顆肉眼可見的恆星（ π Men）。

圖片來源：Goddard Space Flight Center / NASA

透過凌日法，天文學家已經發現並確認超過四千顆系外行星並估算其大小（表1）。然而，僅有大小資訊並不足以確認這些系外行星是否與地球具有相似的性質。因此，天文學家還需要獲得這些行星的質量資訊，以進一步了解其性質。在此背景下，多家天文機構合作啟動了TESS-Keck巡天計畫。該計畫由加州理工學院、加州大學（伯克利、爾灣、洛杉磯、河濱、聖克魯斯）、夏威夷大學、堪薩斯大學、美國太空總署、美國太空總署系外行星科學研究所和凱克天文臺共同參與。TESS-Keck巡天計畫基於克卜勒和克卜勒二期的成果，加上TESS計畫所發現的大量系外行星樣本，利用安裝在夏威夷茂納基山上的凱克天文臺（圖2）望遠鏡上的高解析度光譜儀（HIRES）進行追蹤觀測，主要想來解答系外行星天文學中的重大未解問題。

天文學家為何要用高解析度光譜儀檢測恆星？當一顆恆星上有一個或多個系外行星時，其本身會因為系外行星的引力影響而有規律地擺動，如果擺動的方向是遠離或接近觀測者，基於都卜勒效應，觀測者觀測到其光源也會產生波長的變化（圖3），當恆星系統向望遠鏡移動時，其星光會略變藍；當它遠離我們時，星光會略微變紅。聲波也有一樣的現象：救護車鳴笛靠近你時，音調會變高，而遠離時音調會變低。不過一般來說，系外行星對宿主恆星的軌道運動影響很微弱，波長變化相當微小，也因此需要高解析度光譜儀來檢測恆星波長變化，藉此得到徑向速度變化，再根據克卜勒運動定律可以估計出系外行星的質量。

TESS-Keck巡天計畫團隊最初挑選了86個恆星系統中的108個凌日行星候選者，這些恆星大多數是亮度較高（V星等小於13）的類太陽主序星，它們表面溫度範圍在4,500K到6,000K之間，金屬豐度從-0.5到0.5之間，赤緯低於-30°的恆星也排除在外，因為它們在凱克望遠鏡的觀測範圍外。

表1. 目前利用各種發現方法已確認的系外行星數量

發現方法	行星數量
天文測量法 (Astrometry)	3
成像法 (Imaging)	78
徑向速度法 (Radial Velocity)	1,090
凌日法 (Transit)	4,178
凌日時間變分法 (Transit timing variations)	29
食時序變分法 (Eclipse timing variations)	17
微重力透鏡法 (Microlensing)	217
脈衝星計時法 (Pulsar timing variations)	8
脈動計時變異法 (Pulsation timing variations)	2
軌道亮度調變法 (Orbital brightness modulations)	9
恆星盤運動學法 (Disk Kinematics)	1
已確認的系外行星總數	5,632

資料來源：https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/docs/counts_detail.html



圖2. 凱克1及凱克2在夏威夷的夕陽西下時打開圓頂，準備觀測宇宙。圖片來源：Ethan Tweedie / Keck Observatory

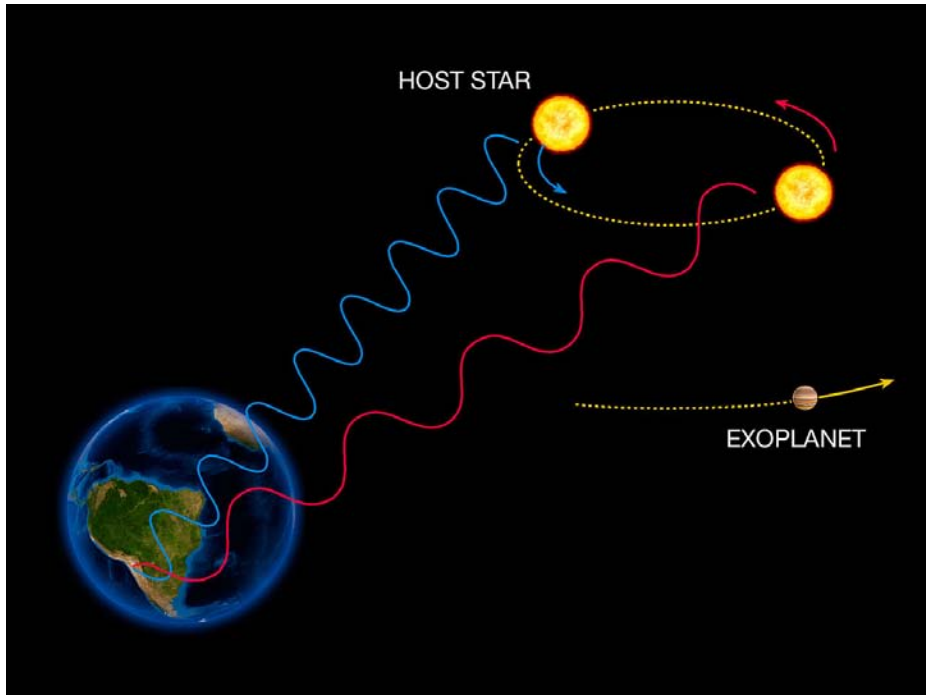


圖3. 觀測恆星光譜中譜線的都卜勒效應以尋找是否有系外行星環繞，當一顆恆星靠近地球時，它的光譜會發生藍移，而當它遠離我們時，它的光譜會發生紅移，透過分析這些光譜變化，天文學家可以推斷系外行星對宿主恆星的引力影響，進而估算其質量。圖片來源：Wiki

TESS-Keck 巡天計畫團隊近期分析了九千多筆的光譜觀測結果，其中有五千多筆來自凱克望遠鏡的高解析度光譜儀，另外四千多筆是來自利克天文臺（Lick Observatory）的自動行星探測器（Automated Planet Finder）高解析光譜儀，加上歷史觀測資料，每顆恆星系統平均觀測間隔接近4年以上。這是迄今為止針對TESS發現的系外行星，利用高解析度光譜儀分析徑向速度所建立的最大目錄，該目錄包含了最新的恆星參數，也有120顆已確認的系外行星和6顆候選系外行星的質量參數，這些資料現在已經公開發表在網路上。

這份新的目錄也揭露了我們太陽系外各種迷人的系外行星類型，包含了罕見的極端環境到可能有生



圖4. 藝術家描繪 TESS-Keck 巡天計畫中各種不同類型的系外行星概念圖，這是迄今為止對 TESS 發現的行星進行最大規模的均勻分析。圖片來源：W. M. Keck Observatory/Adam Makarenko

命存活的系外行星（圖4）。這份目錄的主要作者堪薩斯大學物理和天文學研究生Alex Polanski認為「這份新目錄有助於天文學家將其他個別系外行星的研究結果與這份系外行星目錄進行比較，這也是TESS-Keck巡天計畫的諸多結果中最大貢獻，因為可以讓我們了解TESS所發現的各類系外行星的不同物理特性。」

在TESS-Keck巡天計畫中，天文學家研究了許多系外行星，其中TOI-1824 b和TOI-1798 c因其獨特的特徵引起天文學家的好奇。以下是針對這兩個例子進一步說明：

TOI-1824 b是TESS-Keck巡天計畫中密度最高的類冰巨行星之一。根據加州大學聖克魯斯分校學生Sarah Lange發表的研究，該行星質量接近地球的19倍，但其大小僅為地球的2.6倍。該校的另一位合作者Joseph Murphy認為該行星密度異常的高，因為類似大小的行星質量通常介於地球質量的6至12倍。這樣高的密度可能性之一是它擁有一個類似地球的核心，周圍包覆著一個異常稀薄的大氣層；而另一種可能是這顆行星在大氣層下有一個充滿水的核心。紅矮星或M型矮星是銀河系中最常見的恆星類型，由於它們溫度較低，液態水可以存在於較近的軌道上，使這些系統成為尋找適居帶世界的理想目標。

TOI-1798 c是TESS-Keck巡天計畫中最罕見且環境極端的超級地球。TOI-1798是一顆K型恆星，它擁有兩顆行星：TOI-1798 b和TOI-1798 c。TOI-1798 b是一顆軌道週期約為八天的類冰巨行星，而TOI-1798 c是一顆距離其主恆星非常近，公轉週期

不到12小時，其一年還不到地球上的半天，是目前已知的系外行星系統中相當罕見的。由於該行星距離宿主恆星很近，它所接收到的輻射是地球從太陽接收的輻射的3,000倍以上，存在於這種極端環境中意味著這顆行星很可能已經失去了最初形成的大氣層。

TESS-Keck巡天計畫為天文學家提供了一個新的系外行星資料庫，幫助他們更詳細地研究各種系外行星環境是由岩石、冰還是氣體組成的，特別是那些可能適合生命存活的環境。這些訊息對於理解系外行星的形成過程至關重要，因為不同組成的系外行星可能是在不同的條件下形成的。此外，這些系外行星的質量測量也有助於確定它們的大氣層性質，了解系外行星的大氣層對於探索它們是否可能支持生命至關重要。某些大氣層成分（如氧氣和水蒸氣）可能表明系外行星具有適合生命存在的條件。未來，天文學家將利用TESS-Keck巡天計畫的資料，進行更深入的研究，例如用詹姆斯·韋伯太空望遠鏡（JWST）對這些行星的大氣層進行詳細觀測，從而獲得更多有關它們組成的訊息。

參考資料：

<https://www.ifa.hawaii.edu/2024/05/uh-astronomers-uncover-array-of-strange-exoplanet-worlds/>

<https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-3881/ac6266>

<https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-4365/ad4484>

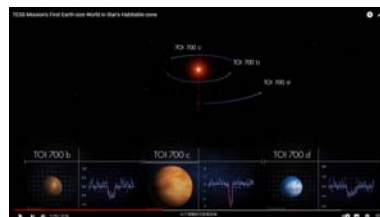
https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/docs/counts_detail.html

林建爭：美國夏威夷大學天文研所泛星計畫博士後研究員，王品方校稿：美國夏威夷專案文物修復師

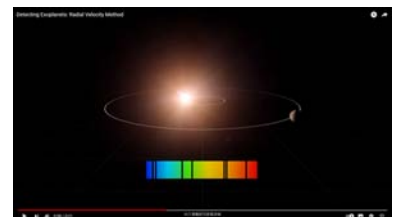
YouTube相關影片：



What Is an Exoplanet?
https://www.youtube.com/watch?v=0ZOjJe_7GrE



TESS Mission's First Earth-size World in Star's Habitable-zone
<https://www.youtube.com/watch?v=QU0qsIGS6MQ>



Detecting Exoplanets: Radial Velocity Method
<https://www.youtube.com/watch?v=9NaFu-wou8I>