

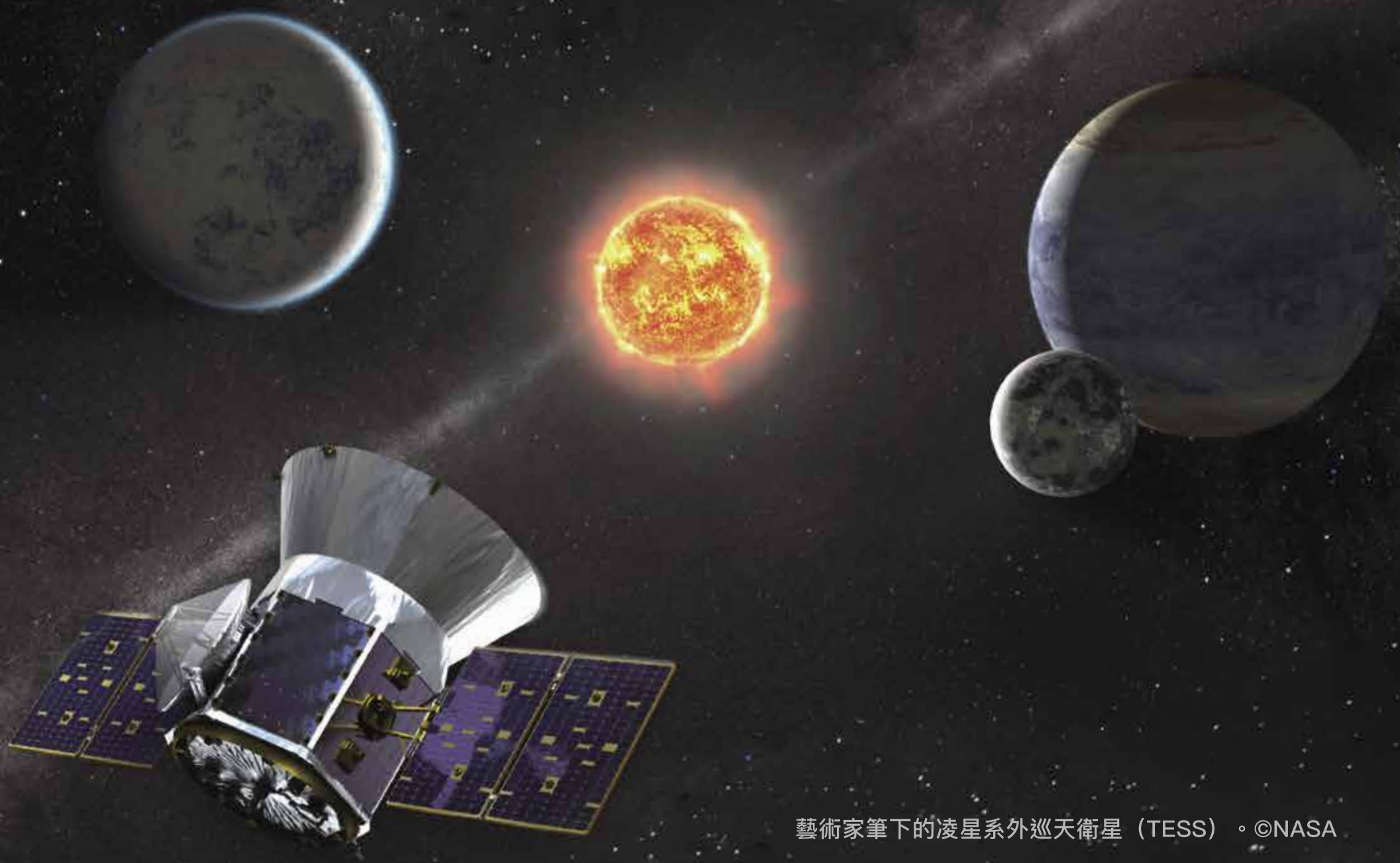
# 天聞

中華民國 112年 夏季號



中研院天文所季報  
ASIAA Quarterly Press  
<http://www.asiaa.sinica.edu.tw>

## 發現新世界—— 探索系外行星和系外衛星



藝術家筆下的凌星系外巡天衛星 (TESS) 。©NASA

# 漫談最近系外行星研究的發展

## TESS與紅矮星行星的適居性

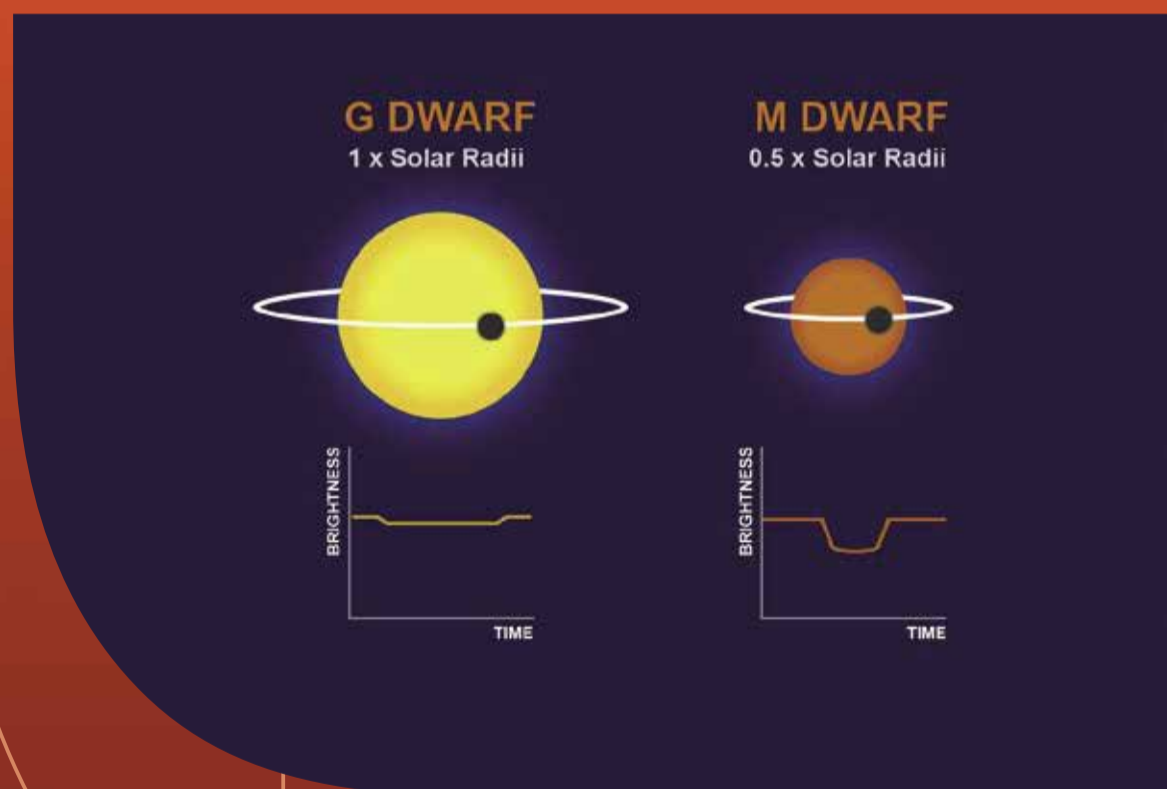
作者 辜品高

在研究系外類地行星的領域裏，紅矮星被天文學家認為是 CP 值最高的投資標地。比起類似太陽的恆星，紅矮星在銀河系中更為普遍。加上它們的體積小，如果有類似地球大小的行星順著軌道，恰巧經過觀測者的視線，所遮擋的母恆星光度也容易被偵測到，所以更有利於凌星搜尋以及其它相關大氣的觀測。此外，紅矮星表面溫度低，所以在適居帶的行星軌道也小，通常軌道週期僅約一個月。這使得天文學家能夠透過短期的觀測，就能掌控紅矮星行星的軌道動態。對比於地球繞日一圈需要一年，天文學家要花好幾年的時間才能確認行星軌道週期的行為，尋找紅矮星的適居行星實在是省時省力很多。

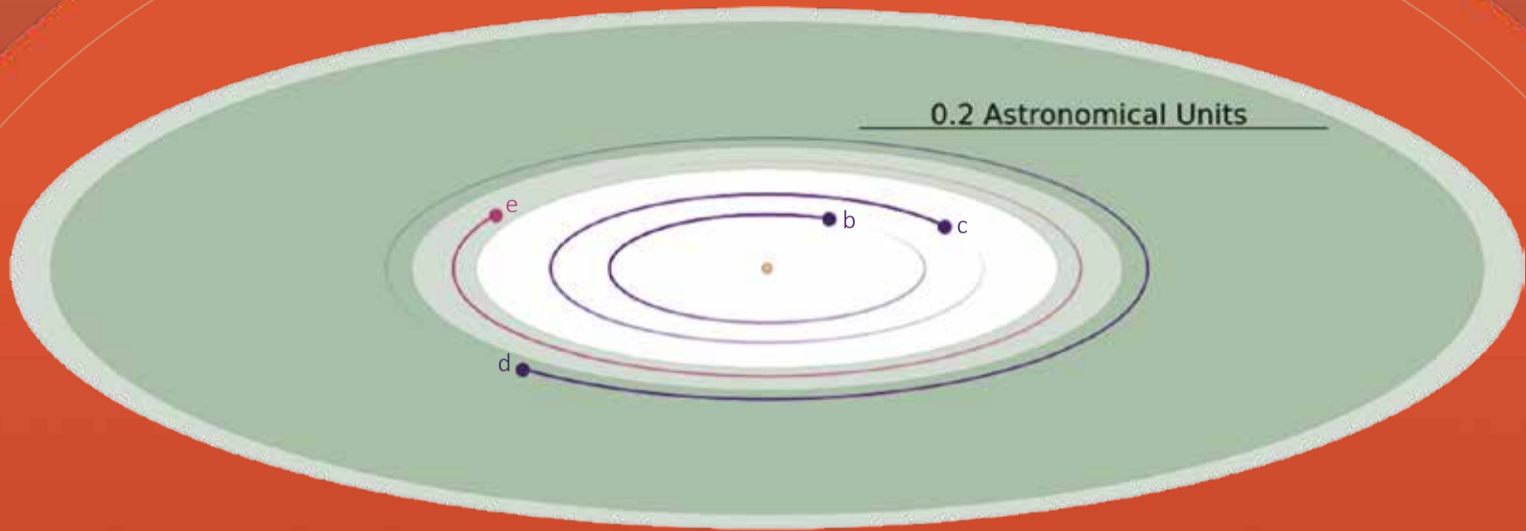
名聞遐邇的克卜勒太空望遠鏡，使用凌星法，花四年的時間，發現數千顆確認和疑似系外行星。這些行星大多數是環繞類似太陽的母恆星的迷你海王星和超級地球，它們的運行軌道半徑比水星還小。這些行星系統和太陽系大相逕庭，確實跌破專家的眼鏡。當我們讚嘆克卜勒太空望遠鏡的發現時，天文學家卻無法再進一步解讀這數千顆行星的特性。因為克卜勒望遠鏡的觀測策略，是盯著一個星場觀看四年，所以能看到非常遙遠而暗淡的母恆星，但無法用其它觀測方式知道這些環繞母恆星行星的質量，甚至是大氣性質。此外，克卜勒望遠鏡的凌星精準度無法大量尋找比迷你海王星和超級地球

更小的行星，也就是環繞像太陽恆星的類地行星，以至於無法對類地行星的多寡下一個統計定論。克卜勒望遠鏡的單一星場觀測也侷限了暗淡紅矮星的凌星偵測數量。

凌星系外巡天衛星 (Transiting Exoplanet Survey Satellite, 簡稱 TESS) 是克卜勒太空望遠鏡的後繼者，於 2018 年由馬斯克的 SpaceX 公司的火箭載入地球軌道。同樣是使用凌星法，TESS 採用不同於克卜勒望遠鏡的觀測策略。顧名思義，TESS 是對整個天空分區來觀測，每區僅持續觀測約一個月。每兩年全天巡視一次，並試圖涵蓋前一次巡天遺漏的星場區。這種巡天策略著重大量觀測太陽系附近的恆星、包括紅矮星的凌星，所發現的母恆星因近而亮度夠高，便於後續用其它觀測方法更加了解行星的特性，例如質量甚至是大氣的性質。有趣的是，TESS 早期受到 google 的基本資助，根據媒體報導，這與 google 除了在地球建地圖，也想在月球、火星、甚至星空建立地圖和大數據有關。筆者曾在一個飯局問過 TESS 的計劃主持人 George Ricker，他說事實只是 google 派人聽了他一場演講，隨後便決定提供 TESS 一筆種子經費，如此而已，並無利用 TESS 建立一個所謂的 google 星圖。



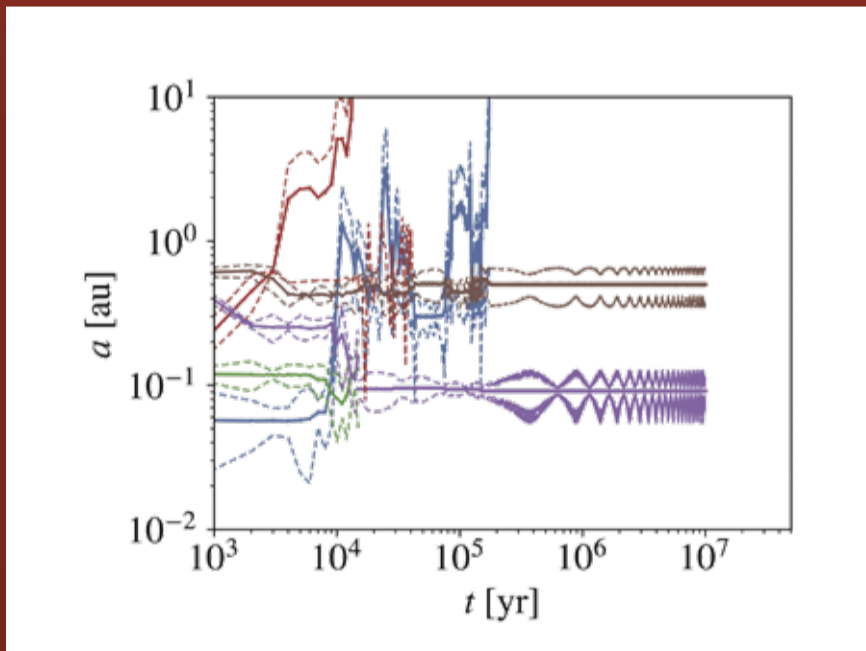
類似太陽的恆星 (G dwarf) 和紅矮星 (M dwarf) 的凌星光變比較圖。當同一大小的行星在凌星時，遮擋紅矮星所造成光度變暗的情況比較明顯。©Nora Eisner



TOI-700 行星系統，軌道由內而外分別是編號 b、c、e 和 d 的行星。綠色區域描繪了適居帶，從距離母恆星 0.12 到 0.32 天文單位。適居帶的內和外邊界分別由金星和火星過去地表有海洋時的太陽輻射量，加上大氣對紅矮星輻射的低反射率的修正所推導出來。  
©Gilbert et al., 2023, Astrophysical Journal Letter, 944, L35

既然要尋找環繞紅矮星適居帶的行星，第一個問題則是鄰近紅矮星是否樂於成為類地行星的宿主？哈佛史密松天文台的兩位天文學家 Kristo Ment 與 David Charbonneau 分析 TESS 前三年的觀測數據，發現在離我們僅 50 光年以內，質量介在 0.1-0.3 太陽質量的紅矮星，擁有 1-1.5 地球大小的行星機率高達 45%。簡單來說，每兩顆鄰近紅矮星，就有一顆類地行星

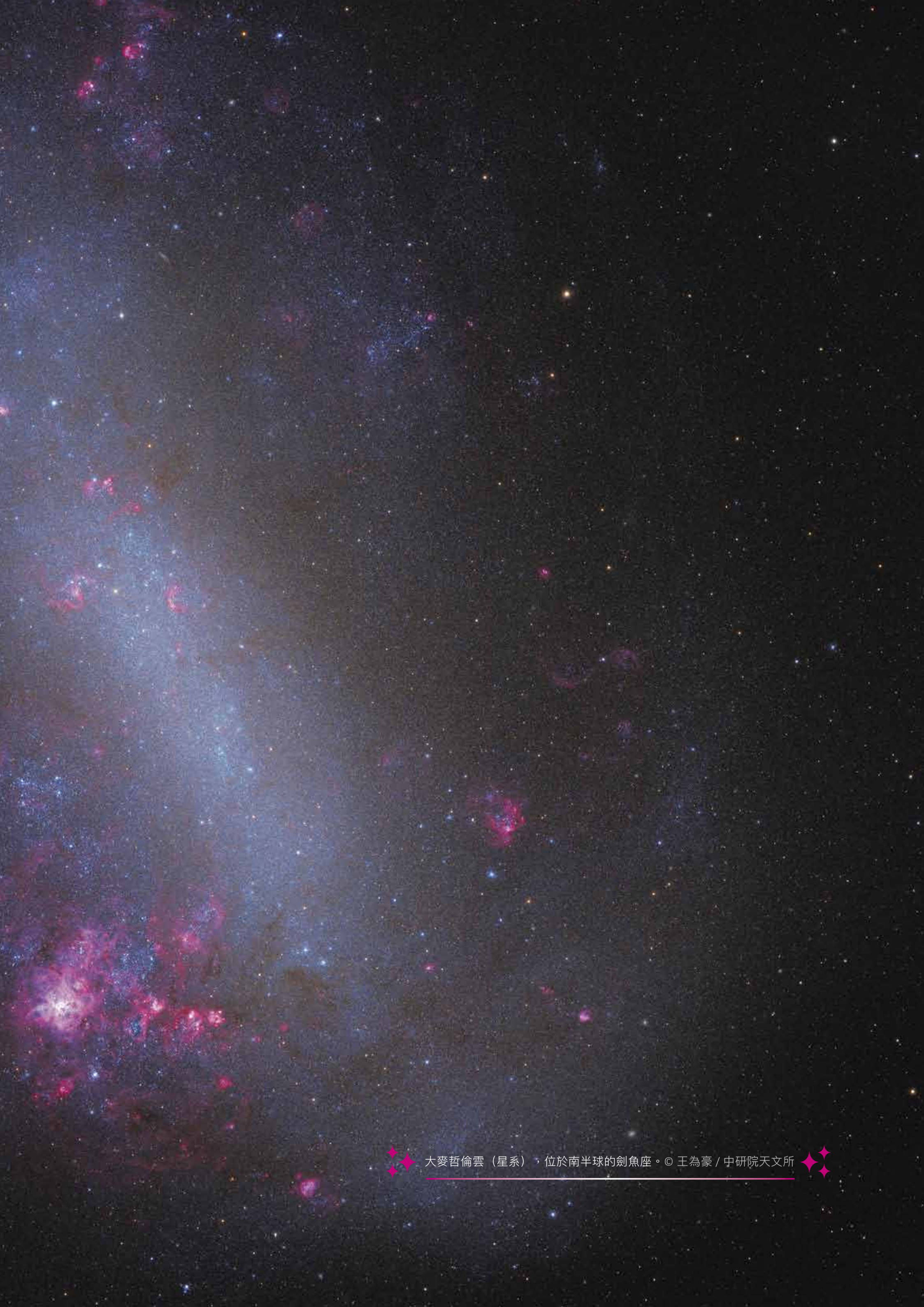
或是超級地球環繞著。這項激勵人心的統計結果符合筆者研究團隊數值模擬的期待：紅矮星的微弱重力場，仍可以束縛類地行星和超級地球的軌道，但壓制不了較大行星彼此間的重力擾動而淪落到大行星被逐出軌道的宿命。



環繞紅矮星行星的軌道半徑  $a$  隨時間  $t$  的演化。在這個數值模擬中，行星質量大於超級地球，軌道變化變得混亂，甚至有兩顆行星（紅色和藍色）離開紅矮星的重力束縛，成為沒有母恆星的流浪行星。©Matsumoto, Gu et al. 2020, Astronomy & Astrophysics, 642, 23

在 TESS 發現的紅矮星行星系統中，以 TOI-700 最為有名。該系統包含四顆行星，其中編號 d 和 e 的兩顆行星與地球半徑相似，位在適居帶的內緣。紅矮星最讓人擔心的，是它們比起太陽有較劇烈的閃焰活動，產生強大的紫外線和 X 射線。這些高能量輻射會加熱蒸發高層大氣，可能讓適居帶的行星失去大量的大氣和海洋。TESS 和哈伯望遠鏡目前並未測到 TOI-700 有明顯的閃焰活動。TOI-700 是屬於質量比較大的紅矮星，自轉速度緩慢，這些條件可能減少閃焰的活動，而成為較沉靜的恆星。在此不免提及著名的紅矮星行星系統 Trappist-1，坐擁七顆類地行星，其中數顆可能落在適居帶內。比起 TOI-700，Trappist-1 質量偏低，所以半徑僅約太陽半徑的十分之一，以至於類地行星造成的凌星效果更顯著，但所伴隨的高能量輻射也更強大了。韋伯太空望遠鏡將觀測 Trappist-1 行星大氣的光譜，希望能了解環繞活躍紅矮星行星的適居性。另一方面，觀測 TOI-700 行星大氣，將提升了解環繞沉靜紅矮星的行星適居性。TESS 將持續觀測 TOI-700 的凌星現象，也預期找到更多鄰近紅矮星的類地行星，屆時太空和地面大型望遠鏡，將更能深入探索紅矮星行星的適居性。





大麥哲倫雲（星系），位於南半球的劍魚座。© 王為豪 / 中研院天文所



# 發現新世界——在台北也行！

作者 Alex Teachey · 翻譯 周美吟

當我遇到新朋友並告訴他們我是一名天文學家時，最常聽到的問題是，  
「在台北真的可以研究天文嗎？」

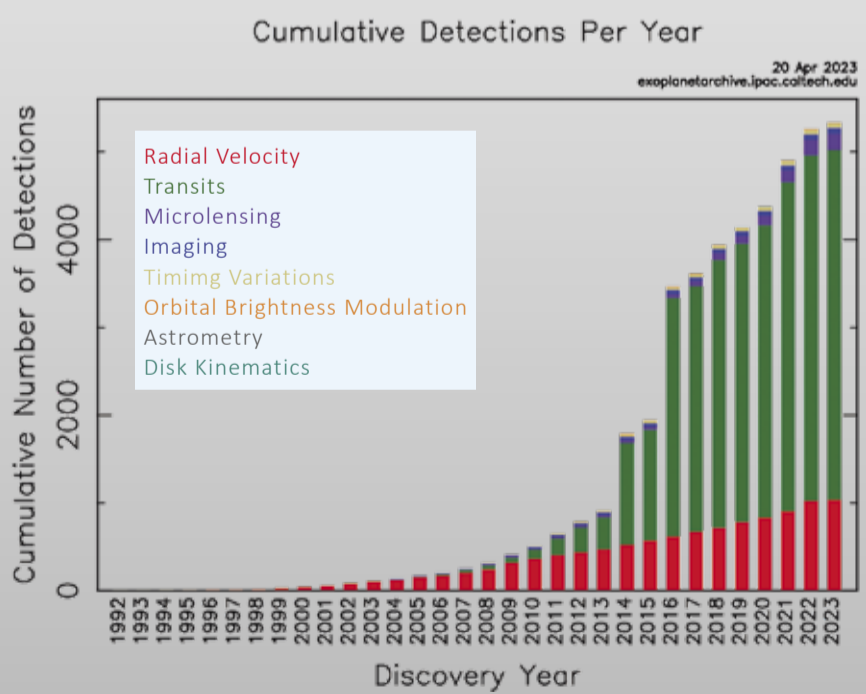
這個問題讓我覺得，大家常認為城市並不是個觀星的好地方。即使是最晴朗、天空最黑暗的夜晚，當北台灣雲層消散，月亮也在地平線下時，城市的燈光和污染仍然讓我們看不到太多亮星或行星。都市人對於看不到星星的夜空已經感到習慣，但我們都知道，如果遠離都市——例如進入山區或去東海岸——令人眼花撩亂的星空將等著你。天空佈滿了星星、星座顯現出來，你會感受到地球之外的浩瀚。亮星周圍充滿無數暗星，凝視的時間越長，出現的星星就越多。當你望向深空，可能會感覺天空不是平的，而是三維立體的，甚至可以看到銀河系平面上的微弱光帶，而我們正在其中。

在最暗的夜晚，可能會看到上萬顆星星，但這實際上只是構成我們銀河系的一小部分；銀河系估計就有幾千億顆恆星，這些龐大星群的光組成我們看到的銀河微弱光帶。我們的銀河系只是可觀測宇宙中數千億個星系其中之一，每個星系都包含數十億甚至數萬億顆恆星。宇宙中的恆星數量多到令人難以理解。

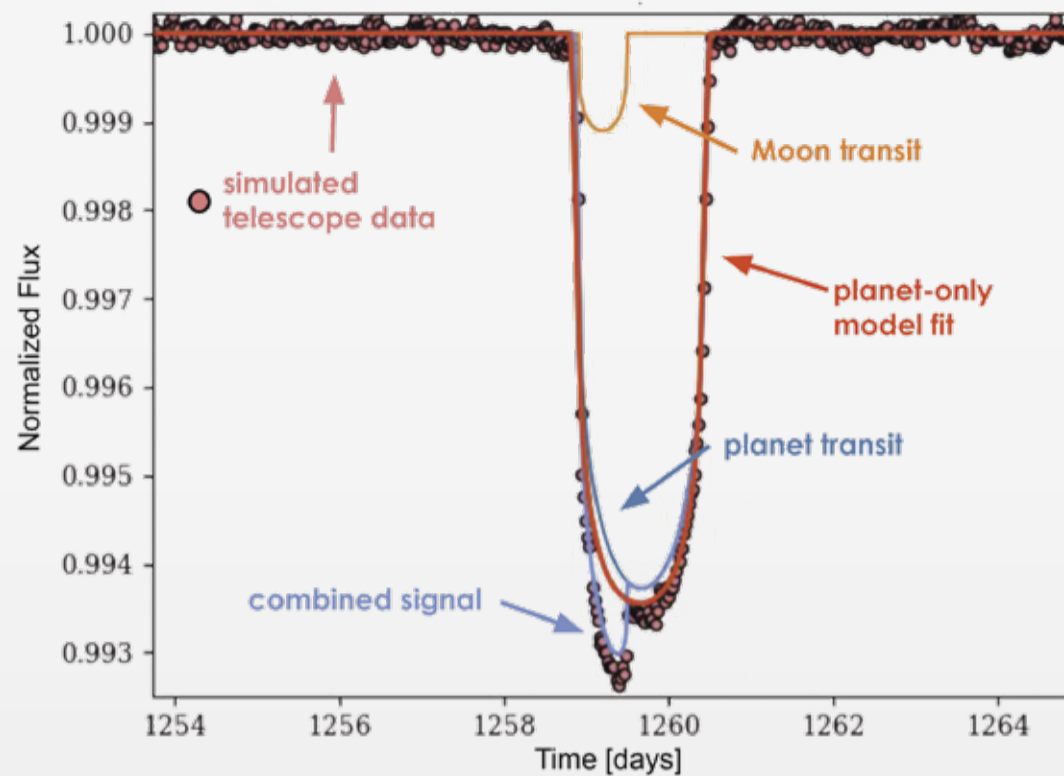
我們最熟悉的恆星——就是太陽。它是天空中巨大的發電廠，將氫融合成氦，這過程已持續約 45 億年，使地球感受到溫暖和活力。在台灣只要在陽光明媚的日子走出戶外，即使距離太陽約 1.5 億公里，也能感受到它不可思議的力量。和其他熱源一樣，有一個恰到好處的距離——不太熱，也不太冷——地球就位於這個最佳位置。如果地球離太陽再近一點，我們的海洋會沸騰，大氣層會蒸發。如果距離再遠一點，地球將變成一個大雪球，永遠結冰。我們的太陽系有八大行星和大約二十顆的大衛星，但只有一個具備我們所知生命存在的必需條件和要素，與舒適的生存環境，那就是我們寶貴的家園行星：地球。

了解太陽對生命的重要性後，人們將目光轉向銀河系中的其他恆星，想知道：太陽系外是否也有能維持生命存在的行星？這種想法引發許多科幻故事。太陽系以外的行星和衛星一直與外星生物和未來人類探索有關、是充滿想像力的故事舞台。這些故事是激勵我成為一名天文學家的原因之一——也許有天我真能發現另一個適合生命存在的世界！

20 世紀 90 年代初至今，尋找並了解太陽系以外的行星（簡稱為系外行星）已成為天文學研究的主要焦點。全世界有數百位天文學家在尋找這些行星，研究它們的運動、大氣層、所在的系統結構、年齡、歷史及最終命運。我們已經發現了與我們的行星系統截然不同的天體——「熱木星」，這種大質量行星的軌道比太陽系中的任何行星



每年偵測到的系外行星累積曲線，顏色代表不同的偵測方法。至今凌星法（深綠色）偵測到最多的系外行星，要歸功於像克卜勒和凌星系外行星巡天衛星（TESS）這樣的太空望遠鏡計畫。© NASA Exoplanet Archive



模擬觀測一顆行星和一顆大衛星通過它們主星的亮度變化（以圓點表示），以及分別只有行星凌星（藍線）、只有衛星凌星（橘線），和兩者都有的結合訊號（淺藍線）。圖中還顯示一個純行星凌星的最佳模型（紅線），但此模型與模擬觀測結果不符。© Alex Teachey

都更靠近它的母恆星，在幾天內就繞完一圈，有些甚至只需幾小時！這些行星由於太靠近其母恆星而被烤焦，表面溫度高達幾千度。與此同時，我們還發現了被稱為「超級地球」或「迷你海王星」的行星，這種行星雖不同於太陽系中的任何行星，但事實證明它們卻是宇宙中最常見的。奇異的系統結構、極高的溫度、奇特的組成成分、甚至雲層會下著熱金屬雨的行星……我們發現的行星越多，就越了解我們自己在銀河系中的地位——哪些方面是相同的，哪些方面是很不同的？這些都是一個大哉問的線索：那裡有生命嗎？如果有，生命有多普遍？有一天，我們能否加入銀河文明共同體？或者我們其實是孤獨的，要為整個銀河系傳遞生命的火炬？這個問題的任何解答都有其深遠意義。

天文學家設計了許多創造性的方法來尋找

和研究系外行星。一種特別有效的方法是尋找凌星現象（簡稱為凌星法）——從我們的角度來看，一顆行星從其主星前方經過，在此期間，這顆行星只遮擋了一點星光。如果我們隨著時間的推移監測恆星的亮度，我們可以發現星光亮度降低了一點點，並且隨著行星一次又一次地公轉，可以看到這種亮度降低的現象定期發生。迄今為止，這項技術已經發現了數千顆系外行星，主要歸功於克卜勒太空望遠鏡的觀測，該望遠鏡花了 4.5 年時間監測天鵝座方向約 200,000 顆恆星，尋找這些凌星現象。

這就是「你真的可以在台北研究天文嗎？」的答案。是的！我使用的資料幾乎都來自像克卜勒這樣的太空望遠鏡，這意味著我可以在地球上的任何角落工作，只要可以上網，並且有願意資助這

項工作的研究所！幸運的是，台灣是世界上正在探索天文學重大問題的國家之一，而本所提供了從事這項激勵人心的研究的必要資源。現在，大部分天文學家都不需要熬夜使用山頂上的望遠鏡觀測。我和我的同事們能夠從台北的辦公室，使用太空和世界各地最先進的望遠鏡設備。

憑藉近 30 年的經驗，尋找新的系外行星幾乎已成為天文學界的常規工作，但我們仍持續前行，從現有數據中挖掘，並建構新的工具來拓展我們的知識前沿。目前有許多天文學家專注於研究系外行星的大氣層，尤其是使用新的韋伯太空望遠鏡，經由觀察同一個行星的凌星現象並測量穿過行星大氣層時吸收了多少光。使用這種方法可以了解很多關於大氣成分的訊息，因為系外行星大氣



中的原子和分子會吸收某些已知波長的光。測量這些吸收譜線，可以確定這些大氣氣體的存在和豐度。最終，天文學家希望能透過這些大氣研究找到生命存在的證據。

與此同時，我與少數天文學家更致力於發現系外行星的衛星——也就是系外衛星。正如太陽系大多數行星都有衛星一樣，我們預測系外行星也會有——但它們會是什麼樣子呢？我們會在這裡找到它們？它們有多普遍？它們可能會告訴我們怎樣的行星系統歷史？太陽系的衛星為太陽系的

歷史、形成和演化提供了各種重要線索，我們預期系外衛星也是。因此我們再度搜尋凌星現象：一顆擁有衛星的行星在兩者通過恆星前方時，其星光強度會出現兩次下降。這些衛星還會導致行星在其軌道上稍微擺動，可以透過行星凌星的時間變化看到。但是我們想尋找的衛星訊號預計會比迄今所看到的行星凌星要小得多，而且不那麼規律。如果我們不特別小心處理資料，很容易錯過這些訊號。這過程很辛苦，但非常值得！

系外衛星甚至可能是尋找生命的好地方。

我們太陽系中的幾顆著名衛星——如木衛二和土衛二——被許多天文生物學家認為是近距離尋找生命的絕佳場所，因為它們冰冷的外殼下存在液態水，而且由於來自其母行星的強大潮汐力，導致內部有地熱活動。這些衛星遠不如地球的氣候適宜，但我們也知道，地球上還是有些生物可以在惡劣條件下生存和繁衍，因此這些衛星也有生命存在的希望。按理說，系外衛星也同樣可能支持生命存在，而且搞不好還可能比太陽系中的任何衛星都更像地球。

現在是從事系外行星和系外衛星研究最振奮人心的時刻。過去幾十年，我們研究太陽系以外的世界有長足發展，並且有充分理由認為，未來幾年也將持續快速進步。繁榮社會的特徵是不僅關注日常事務，還會努力追求對藝術和自然科學的了解。看到台灣能成為追求這種偉大目標的國家之一，自己還能成就其中的一小部分，是多麼令人高興的事！



筆者在 Astronomy on Tap Taipei 的聚會中，介紹系外衛星。Astronomy on Tap Taipei 是一群天文學家，每月在台北的餐廳跟民眾聊天文的活動，詳情請參閱活動臉書（掃描圖中左下方的 QR code）。© Alex Teachey

天聞季報編輯群感謝各位閱讀本期內容。本季報由中央研究院天文所發行，旨在報導本所相關研究成果、天文動態及發表於國際的天文新知等，提供中學以上師生及一般民眾作為天文教學參考資源。歡迎各界來信提供您的迴響、讀後心得、天文問題或是建議指教。來信請寄至：「臺北市羅斯福路四段1號 中央研究院 / 臺灣大學天文數學館 11樓 中央研究院天文所天聞季報編輯小組收」。歡迎各級學校師生提供天文相關活動訊息，有機會在天聞季報上刊登喔！



發行人 | 彭威禮 執行主編 | 周美吟 美術編輯 | 王韻青、楊翔伊 執行編輯 | 曾耀震、劉君帆  
 發行單位 | 中央研究院天文及天文物理研究所 天聞季報版權所有 | 中研院天文所 ISSN | 2311-7281 GPN | 2009905151  
 地址 | 中央研究院 / 臺灣大學天文數學館 11樓 (臺北市羅斯福路四段1號) 電話 | (02) 2366-5415 電子信箱 | epo@asiaa.sinica.edu.tw