

天聞



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

中華民國 113年 冬季號

尋找地球

20

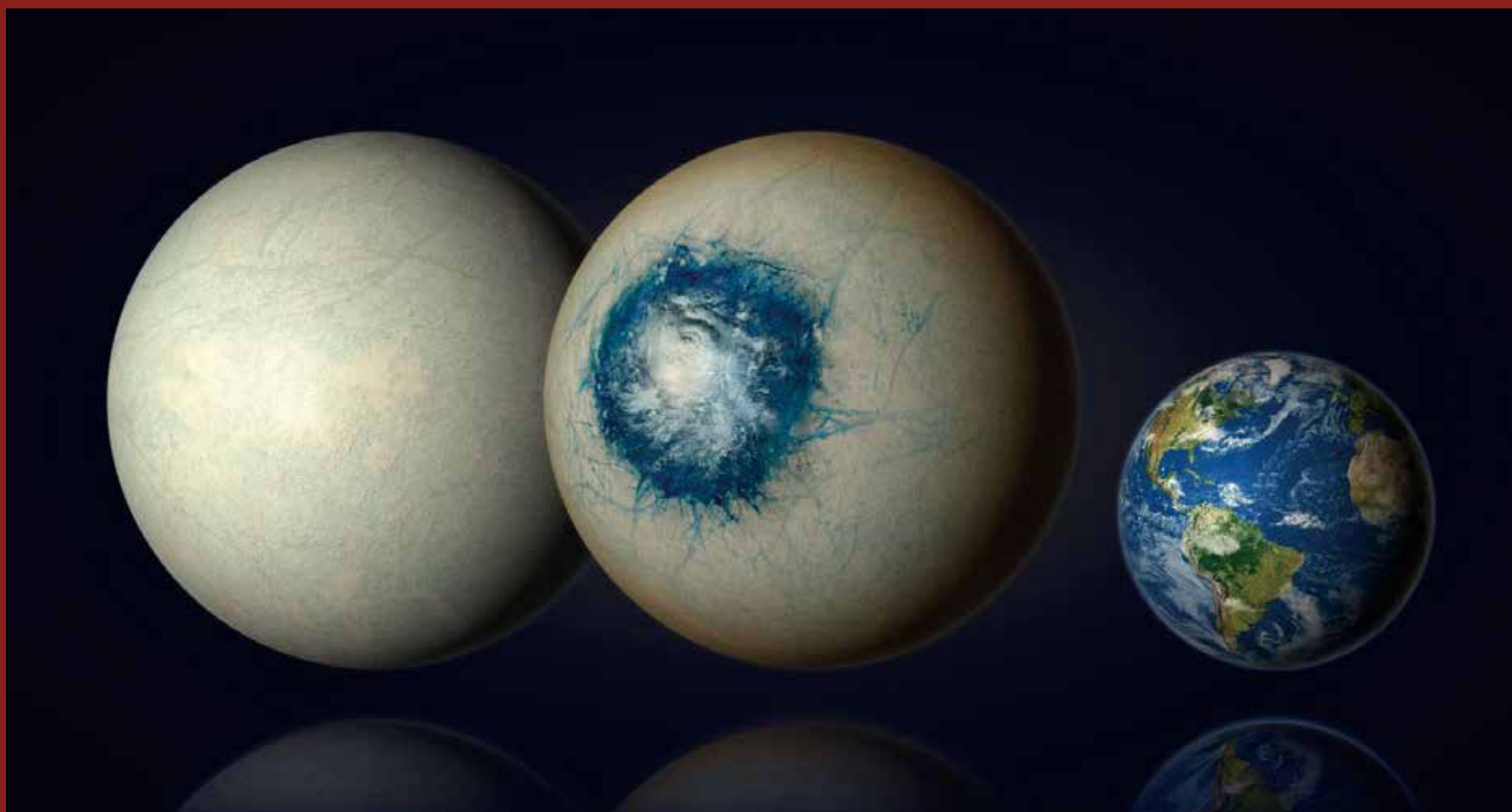
從科幻到現實 尋找「地球 2.0」的觀測計畫

作者 周美吟

地球以外的世界到底長什麼樣？隨著地球環境變遷及科學發展，人類不禁要問：宇宙中是否存在另一顆像地球一樣，能支持生命的星球？科幻小說裡經常描述人類移居到其他星球，那現實中真有可能找到「地球 2.0」嗎？時至今日，我們對外太空的探索已經不再只是想像。從 1992 年發現第一顆系外行星以來，已有超過五千顆以上的系外行星被確認。而所謂的「地球 2.0」，指的就是那些可能擁有與地球相似的條件，特別是位於適居帶的行星。適居帶是指行星環繞在恆星的特定距離區域，溫度適中，有可能存在液態水，被認為是生命存在的重要

條件之一。為了找到這些可能的地球 2.0，科學家們展開了一系列觀測計畫，如凌星系外巡天衛星（Transiting Exoplanet Survey Satellite，簡稱 TESS）和韋伯太空望遠鏡（James Webb Space Telescope，簡稱 JWST）。這些尖端的觀測儀器讓我們有機會深入了解系外行星的性質、環境，甚至大氣中的成分。

其中一顆有潛力的系外行星是 LHS 1140b，它是在 2017 年被發現的，距離地球大約 48 光年。乍聽之下，48 光年好像很遠，



插畫家畫的示意圖：系外行星 LHS 1140 b 可能是一個完全被冰覆蓋的世界（如左圖），或是擁有液態海洋和多雲大氣層的冰凍世界（如中圖），直徑比右圖的地球大約 1.5 倍。©Benoit Gougeon, Université de Montréal

但在宇宙尺度來看，這其實是我們的「鄰居」。LHS 1140b 圍繞著一顆紅矮星運行，而紅矮星是一種比我們的太陽小很多的恆星。由於這顆行星位於母恆星的適居帶，天文學家覺得它非常有可能擁有液態水。它的質量大約是地球的 6 倍，但半徑只比地球大約 1.5 倍，這讓科學家認為它可能是一顆岩石行星，像是放大版的地球。這類行星被稱為「超級地球」，比地球大，但可能還是有類似地球的環境。至於它到底有沒有大氣層？這部分還在研究中，因為它的母恆星 LHS 1140 是一顆活躍的紅矮星，可能會不時發射強烈輻射，對行星的大氣穩定性有一定影響。

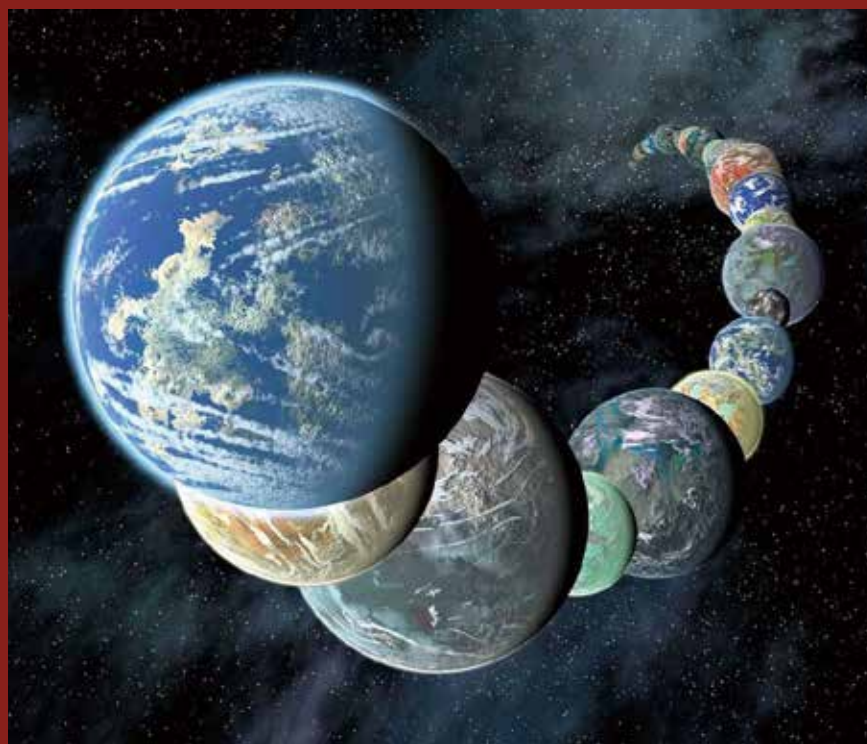
當前天文界的超級明星 JWST，在 2021 年升空後，為人們提供了前所未有的觀測能力，尤其是在分析行星的大氣層方面。最近，JWST 就對 LHS 1140b 進行深入觀測，試圖透過分析行星大氣層中的光譜來找出有沒有水蒸氣、甲烷、氧氣等可能跟生命有關的分子。

光譜分析聽起來很複雜，但你可以把它想像成利用光線來「聞」出大氣層裡有哪些氣體。這些氣體的種類能告訴我們很多事，比如行星是否有穩定的大氣層，或是它的環境適不適合生命存在。雖然 LHS 1140b 目前還沒發現確切的生命相關分子，但 JWST 已經發現它的大氣層存在氮，行星表面有可能有大範圍的冰及小部分的液態水，讓我們對這顆行星的環境有更深入的了解。

JWST 最大的優勢就是它能觀測紅外光，能穿透厚厚的大氣層，探測到其他望遠鏡看不到的細節。LHS 1140b 只是 JWST 觀測的其中一顆行星，未來還有更多行星等待它去揭開神秘面紗，或許其中就藏著真正的「地球 2.0」呢！

除了 JWST，另一個探測系外行星的利器是 TESS。TESS 是 2018 年發射的一顆專門尋找系外行星的衛星，主要目標是找到像地球這樣的「小型」行星，特別是位於適居帶內的行星。TESS 利用「凌星法」來偵測行星。當一顆行星經過它的母恆星前方時，恆星的亮度會短暫變暗，我們可以透過這種規律的亮度變化來發現行星，甚至估算行星的大小以及它圍繞恆星的軌道，進一步篩選出有可能適合生命的候選行星。

目前 TESS 已經發現了數千顆系外行星候選者，其中不少都距



可能位於適居帶的系外行星示意圖。©NASA/JPL-Caltech/R. Hurt (SSC-Caltech)

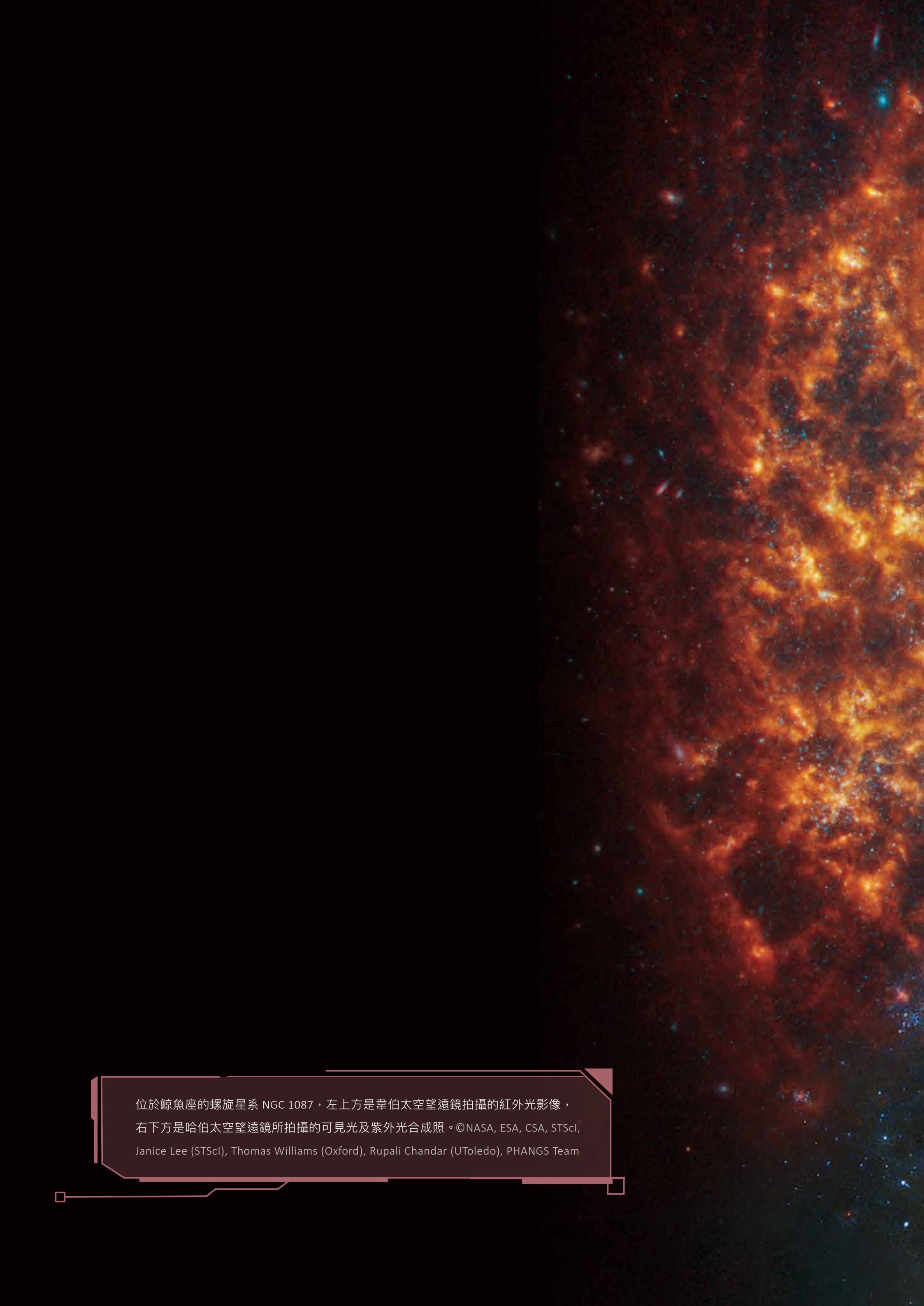
離地球很近，這讓我們有機會使用 JWST 等更高精度的望遠鏡對它們進行深入觀測。想像一下，一顆位於適居帶的行星，大小跟地球差不多，表面可能還有水，這就是 TESS 幫我們尋找的地球 2.0 ！

儘管我們對尋找地球 2.0 充滿希望，但還是有很多問題需要解決。例如，行星大氣的成分、表面環境以及是否有穩定的液態水，都是關鍵問題。我們也需要更先進的觀測技術來區分哪些是自然現象、哪些可能是生命活動的跡象。

除了 JWST 和 TESS，未來還有更多望遠鏡計畫正在籌備中，如羅曼太空望遠鏡（Nancy Grace Roman Space Telescope）和柏拉圖號（PLANetary Transits and Oscillations of stars，簡稱 PLATO），這些計畫將能更深入探索那些距離更遠、更小的行星，甚至找到更多可能適合生命的世界。

探索地球 2.0 不再只是幻想情節，而是現今天文學的研究方向。透過 JWST 和 TESS 這些強大工具，我們已經開始揭開許多神秘的系外行星面紗。未來，甚至可能真的找到一顆像地球一樣的行星，徹底改變我們對宇宙的認識。這趟旅程，才剛啟航！

（本文部分內容由 ChatGPT 生成，經筆者修改與完善。）



位於鯨魚座的螺旋星系 NGC 1087，左上方是韋伯太空望遠鏡拍攝的紅外光影像，
右下方是哈伯太空望遠鏡所拍攝的可見光及紫外光合成照。©NASA, ESA, CSA, STScI,
Janice Lee (STScI), Thomas Williams (Oxford), Rupali Chandar (UToledo), PHANGS Team



揭開行星形成與演化的秘密

作者 林明楷

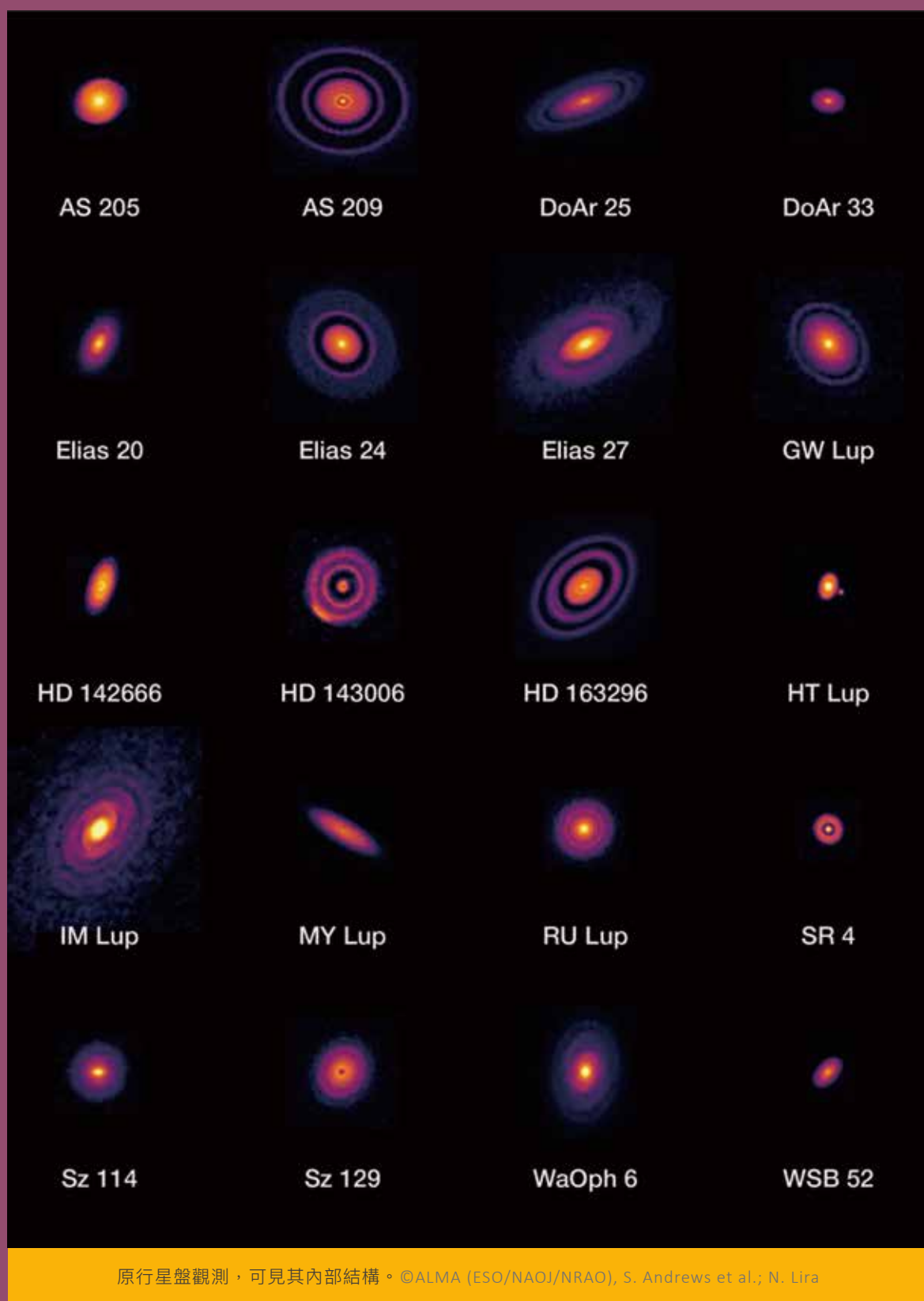
◎ 引言

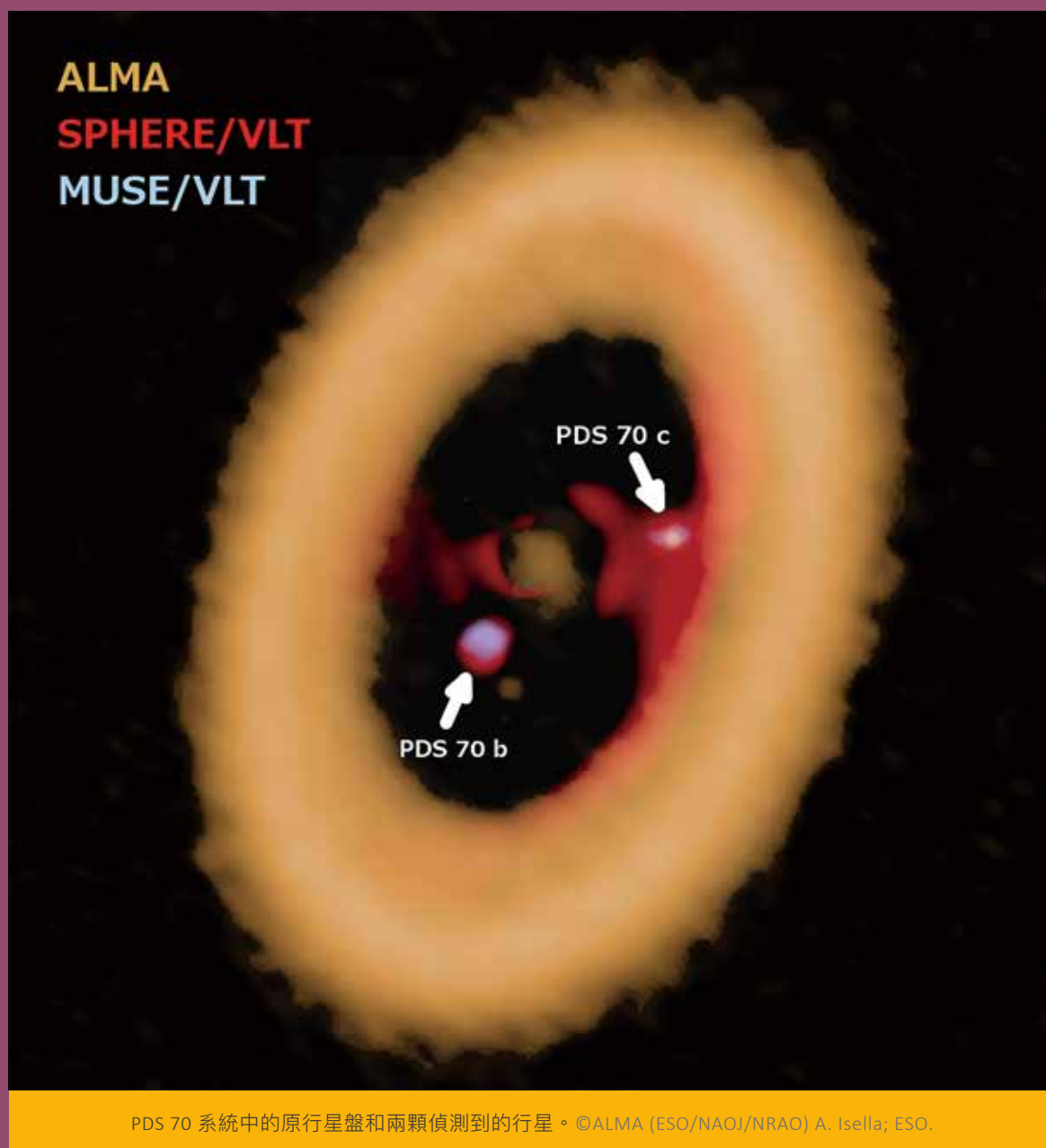
系外行星，即太陽系以外的行星，是天文研究中發展最快的領域之一。科學家們致力於找尋人類在宇宙的定位：我們是孤獨的嗎？地球之外還存在著什麼樣的世界？生命是否可能在其他地方出現？自古以來，這些問題就穿梭於各個文化，而我們如今終於可以開始回答。

天文學家於 1992 年首次確認發現了系外行星，當時發現了兩顆與地球大小相當的行星，他們圍繞著脈衝星 PSR 1257+12 運行，這是一顆快速旋轉的中子星。然而，直到 1995 年，天文學家麥爾（Michel Mayor）和奎洛茲（Didier Queloz）才偵測到第一顆環繞於系外類太陽恆星運行的行星。這顆系外行星 51 Pegasi b 是一顆氣體巨行星，大小與木星相當，但它的軌道距離比木星更靠近恆星，其公轉週期僅為 4 天（相比之下，地球為一年）。這一發現打破了對行星系統結構的傳統認知，並促使了系外行星研究的迅速發展，這兩位科學家也因此發現獲得了 2019 年諾貝爾物理學獎。

由於望遠鏡和觀測技術的進步，過去三十年來所偵測的系外行星數量大幅增加。觀測方法包括凌星法、都卜勒效應、重力微透鏡效應，以及直接成像。截至今日，已確認的系外行星超過 5,700 顆，其中超過 2,700 顆是由 2009 年發射的克卜勒（Kepler）太空望遠鏡發現的。其後繼者——2018 年發射的凌星系外巡天衛星（Transiting Exoplanet Survey Satellite）——已經發現了超過 500 顆新系外行星。這兩個望遠鏡都是通過測量行星經過恆星前方時造成的星光下降來探測系外行星，即類似凌星的效應。

這些調查揭示了系外行星種類的驚人多樣性，從超級地球（比地球更大的岩質





行星）到熱木星（公轉週期極短的氣體巨行星）、在大軌道上運行的巨型行星、圍繞多顆恆星的行星，甚至還有沒有恆星的『自由漂浮』行星。儘管這些發現本身相當有趣，系外行星研究的首要目標仍是尋找第二個地球。目前已經有一些候選行星位於其恆星的『適居帶』，即他們可能擁有液態水（像海洋），甚至有可能孕育生命。目前和未來的觀測將以前所未有的精度分析系外行星的大氣層，其中最重要的目標是識別生物特徵——如氧氣或甲烷等可能表明生命存在的化學標記。

◉ 原行星盤

行星是在環繞於年輕恆星的氣體和塵埃中形成。研究這些『原行星盤』（protoplanetary disk）對於了解行星（包括地球）的形成與演化是關鍵問題。當代天文學家能夠利用像是阿塔卡瑪大型毫米及次毫米波陣列（Atacama Large Millimeter/submillimeter Array，簡稱 ALMA）的先進望遠鏡直接觀測這些星盤的內部結構，因而帶來革命性的新知。ALMA 的高解析度揭發原行星盤中有高度複雜的內部結構——包括塵埃環、間隙、旋臂和渦旋等等。其中最著名的例子可能是圍繞 HL Tau 的原行星盤，其 2015 年的 ALMA 影像在學界造成了一股轟動。但後續調查顯示，這些內部結構，特別是塵埃環和空隙在明亮的原行星盤中無所不在。它們通常被解釋為年輕行星在盤中開闢縫隙的跡象，而塵埃顆粒則會在縫隙邊緣聚集。

2018 年，天文學家首次觀測到在具有內部結構的原行星盤中運行的行星。天文學家使用 VLT 望遠鏡（Very Large Telescope），捕捉到 PDS 70 系統的兩顆年輕行星——PDS 70b 和 PDS 70c，它們仍嵌在星盤中，透過吸積物質成長，並同時在盤中開闢出縫隙。2022 年，天文學家又發現另一個例子：在位於御夫座 AB 星的高度結構化星盤中有一顆『超級木星』。這些觀測結果直接證明了上述情景，即行星形成於原行星盤，而在其過程中通過與周圍氣體和塵埃的引力相互作用，塑造出我們在盤中觀察到的縫隙和環狀結構。當然，這些觀測還是沒有解釋這些行星最初是如何形成的呢？

◉ 行星形成的大小事

目前，行星形成的主流理論是『核心吸積』論，特別適用於類地行星和氣體巨行星的核心。這是一種積少成多的方式，從微米大小的塵埃顆粒開始，這些顆粒在盤形成時從星際介質中繼承而來。像家裡的灰塵一樣，這些微小的顆粒碰撞時會通過表面力黏在一起，這種黏著增長的模式可以讓顆粒長大到毫米或公分大小的『小圓石』。不過，到這裡就會出現了幾個成長障礙。大於小圓石的顆粒相互碰撞時可能導致反彈或碎裂。此外，小圓石在盤中的氣體摩擦力作用下，會逐漸向恆星移動，在可能進一步增長之前就掉入恆星，行星形成的材料也就此流失。

因此，許多理論研究專注於如何克服這些障礙。具體而言，雖然單個小圓石會面臨上述挑戰，但當一群具有足夠密度的小圓石集結在一起時，集體的相互引力可以讓它們直接塌縮形成『微行星』——這些

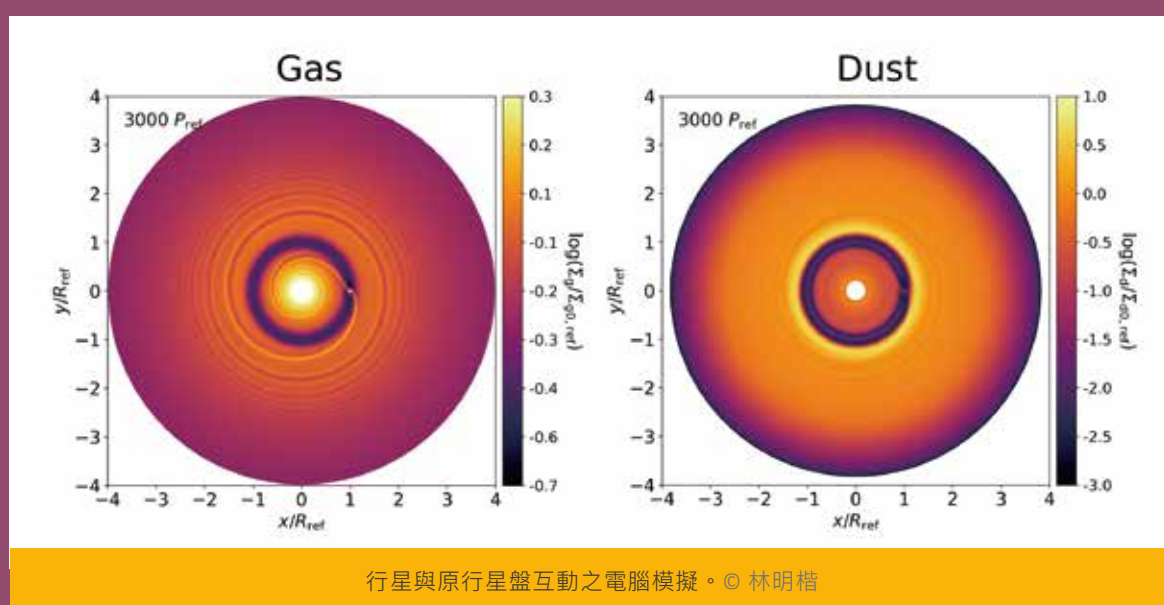
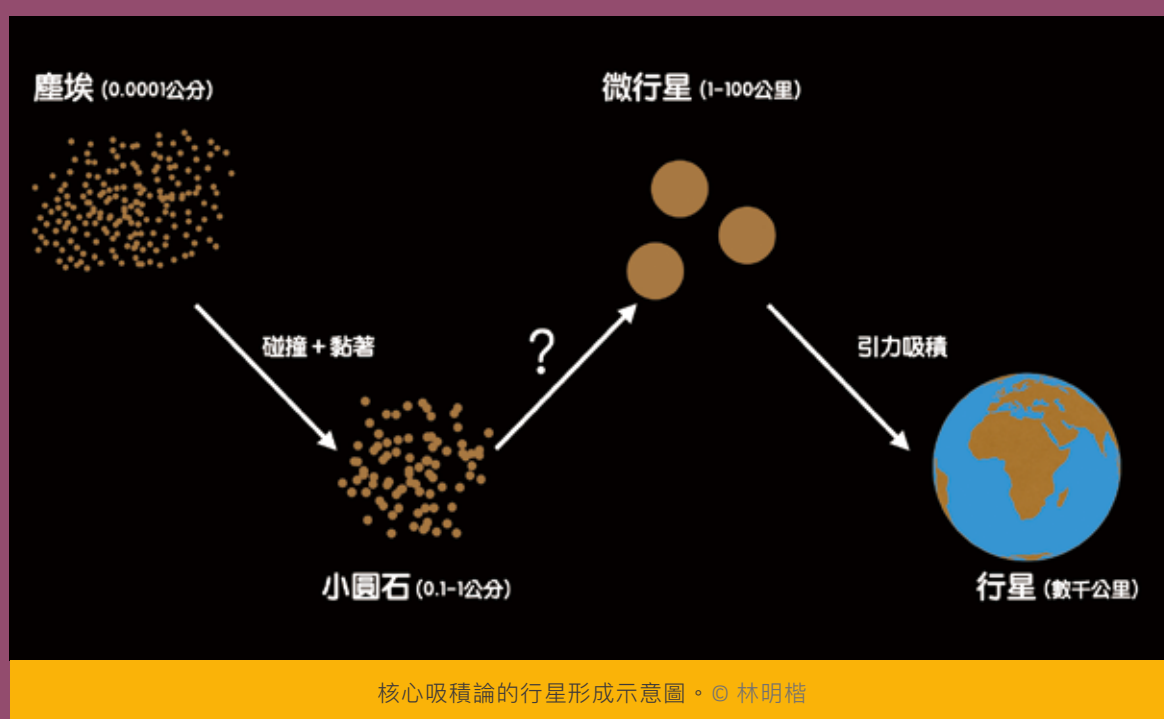
公里級或更大的天體能夠繼續行星形成的下一步。然而，這種重力塌縮所需的臨界塵埃密度可能是周圍氣體密度的 100 倍，遠高於星盤中的初始值（只有氣體密度的 1%）。所以問題在於如何實現小圓石的臨界密度，以達到重力塌縮的條件？

在這裡，『對流不穩定性』（streaming instability）被認為是形成高密度小圓石雲團並引發重力塌縮的機制。其實原行星

盤是一種不穩定的氣體和塵埃旋轉混合系統，換言之，微小的擾動會快速增加，並在適當的條件下，導致局部區域出現高塵埃密度。儘管這種不穩定性仍需要接近 1:1 的塵埃 – 氣體比例才能有效運作，但這一條件可以通過塵埃向盤的中平面自然沉降而實現，使得微行星的形成變得可行。

一旦公里級或更大的微行星形成，它們可以通過彼此間的引力吸引進一步聚集增

長，這在傳統理論中被稱為『微行星吸積』（planetesimal accretion）。而最近的新理論進展則是『小圓石吸積』（pebble accretion），即較大微行星通過吸積剩餘的小圓石來增長。由於周遭氣體阻力的影響，此過程能遠比微行星吸積更有效率。無論透過微行星或小圓石吸積，如果最終形成的原行星質量能達到大約十個地球質量，它就可以從周圍的星盤中吸積氣態物質而形成巨行星。



◎ 本所團隊研究

雖然天文學家對行星形成與演化的主要階段有廣泛共識，但在細節上仍然存在許多不確定性。例如：1) 氣體與塵埃在星盤中的相互作用，以及 2) 行星與星盤的交互作用。筆者團隊利用最先進的模擬和理論計算，研究星盤氣體的不穩定性到底會促進還是阻礙行星的形成。過去的研究大多是在理想化的星盤中進行。若考慮到實際星盤中預期的額外物理因素，它是否有一樣有效？

運用超級電腦模擬星盤與行星之間的相互作用，筆者團隊發現行星會產生複雜的三維氣流運動，這是過去的二維模型無法呈現的，但這些三維效果對於解釋觀測結果卻有直接影響。此外，我們也發現，行星所開闢間隙往往不穩定，且會產生大規模的非對稱性。反觀觀測結果顯示，最常見的內部結構卻是對稱的環帶和間隙。如何解釋這一大落差是本團隊正在研究的中心問題。

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 | 曾耀寬、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

