

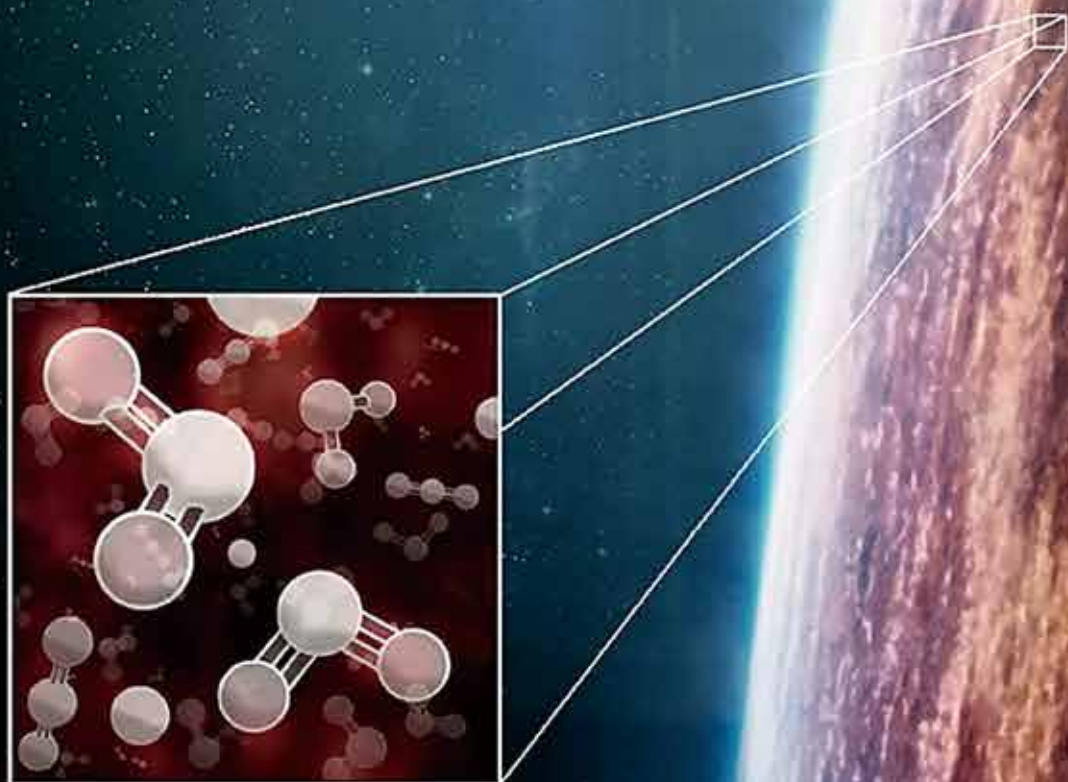


中華民國 115 年
夏季號



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

美麗新世界： 生命在那裡？



韋伯太空望遠鏡 (JWST) 偵測到一顆熱木星大氣成分的示意圖。
©Melissa Weiss/Center for Astrophysics | Harvard & Smithsonian

太陽系裡那些可能藏著生命的世界

作者 許仁愷 中央大學天文研究所博士後研究

你知道嗎？在太陽系裡，最有可能藏著生命的地方，不一定是那些看起來最像地球的世界。

在很長一段時間裡，人們討論「地球之外是否存在生命」時，幾乎所有的目光都放在火星上。那曾經是一個有河道、有液態水、甚至可能擁有氣候變化的行星，看起來就像地球的早期版本。因此，只要在火星上找到水的證據，就被認為離生命更近了一步。

但這幾年，科學家的想法慢慢改變了。研究的焦點開始從行星，轉向那些繞著行星運行的衛星。這些過去常被忽略的天體，如今反而成為天體生物學最重要的研究對象之一。原因很簡單，當我們重新思考生命需要什麼條件時，會發現關鍵並不只是「像不像地球」，而是那裡的環境是否能讓化學反應長時間持續演化。

從地球上的生命來看，至少需要幾個基本條件。首先是液態環境，例如水，讓分子可以移動並發生反應；其次是穩定的能量來源，無論來自陽光、地熱，或化學反應；最後則是足夠複雜的有機分子，讓它們有機會逐步組合成更複雜的結構。但更關鍵的一點是，這些條件不能只是短暫存在，而是要能維持很長時間，讓化學有機會一步步跨越到生命。

在這樣的觀點下，一些過去較少被關注的世界開始變得非常重要。例如土星的衛星——土衛六（Titan）。它擁有濃厚的大氣層，氣壓甚至比地球還高，還存在湖泊與河流。只不過，流動的不是水，而是液

態甲烷與乙烷。這裡同樣存在一套完整的循環，包括蒸發、成雲、降雨與地表流動，只不過發生在極低溫的環境中。更特別的是，土衛六的大氣在太陽紫外線與高能粒子的作用下，會不斷產生複雜的有機分子，並進一步形成微小的氣膠顆粒，慢慢沉降到地表。這使整個土衛六像是一座長時間運作的化學實驗室，也讓人開始思考，生命是否真的一定要以水為基礎存在。

如果說土衛六代表的是「充滿有機化學的世界」，那麼另一顆衛星——土衛二（Enceladus）則提供了更直接的線索。在它的南極，有裂縫



土衛六北極的甲烷湖，湖岸可見明顯的隆起地形。©NASA/JPL-Caltech



卡西尼號飛掠過土衛二，南極噴出的水氣羽流在黑暗中顯得格外明亮。©NASA/JPL-Caltech



歐羅巴快船掠過木衛二。©NASA/JPL-Caltech

持續向外噴出水氣與冰粒，這些物質來自冰層下的液態海洋。過去卡西尼號探測器多次穿越這些噴流，發現其中含有水、鹽類、有機分子，甚至氫氣與磷元素。這些成分與地球深海的熱液環境很相似，也就是海底熱水和岩石持續反應的地方，而在地球上，這正是微生物可以生存的環境。也因此，土衛二被認為是太陽系中最有機會直接回答「是否存在生命」的地方之一。

與土衛二類似，但規模更大的，是木衛二（Europa）。它的表面覆蓋著厚厚的冰層，但下方可能存在一個全球性的海洋，其水量甚至超過地球所有海洋的總和。這個海洋之所以能保持液態，並不是因為太陽的熱，而是來自木星引力所造成的潮汐加熱。這樣的機制顯示，生命

所需的能量來源不一定來自陽光，也可能來自行星與衛星之間的引力作用。這個發現也讓科學家開始重新思考「適居帶」的定義，不再只侷限於靠近恆星的區域。

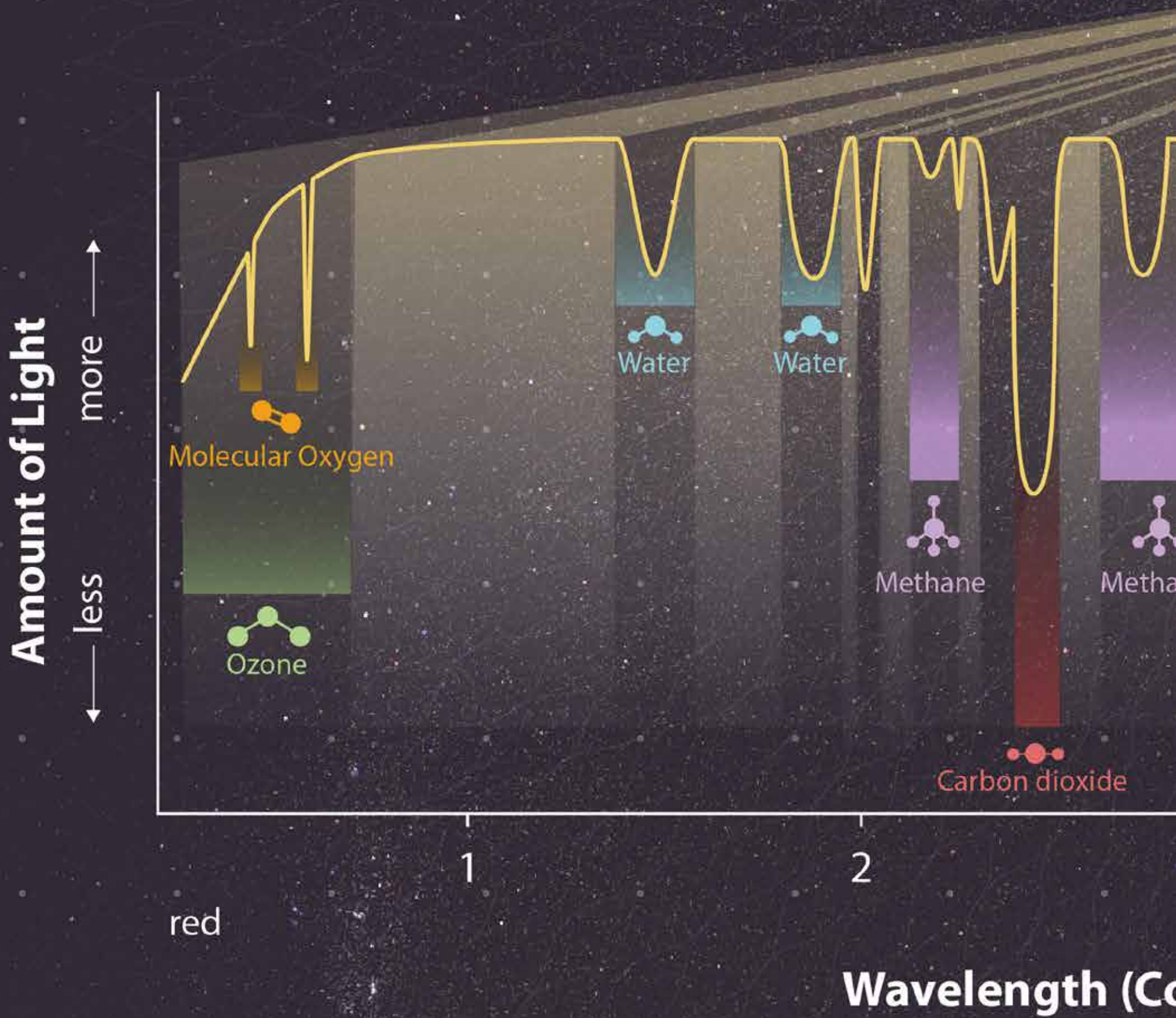
當我們開始更仔細觀察這些天體時，觀測技術的進步也讓我們對它們有了更深入的了解。

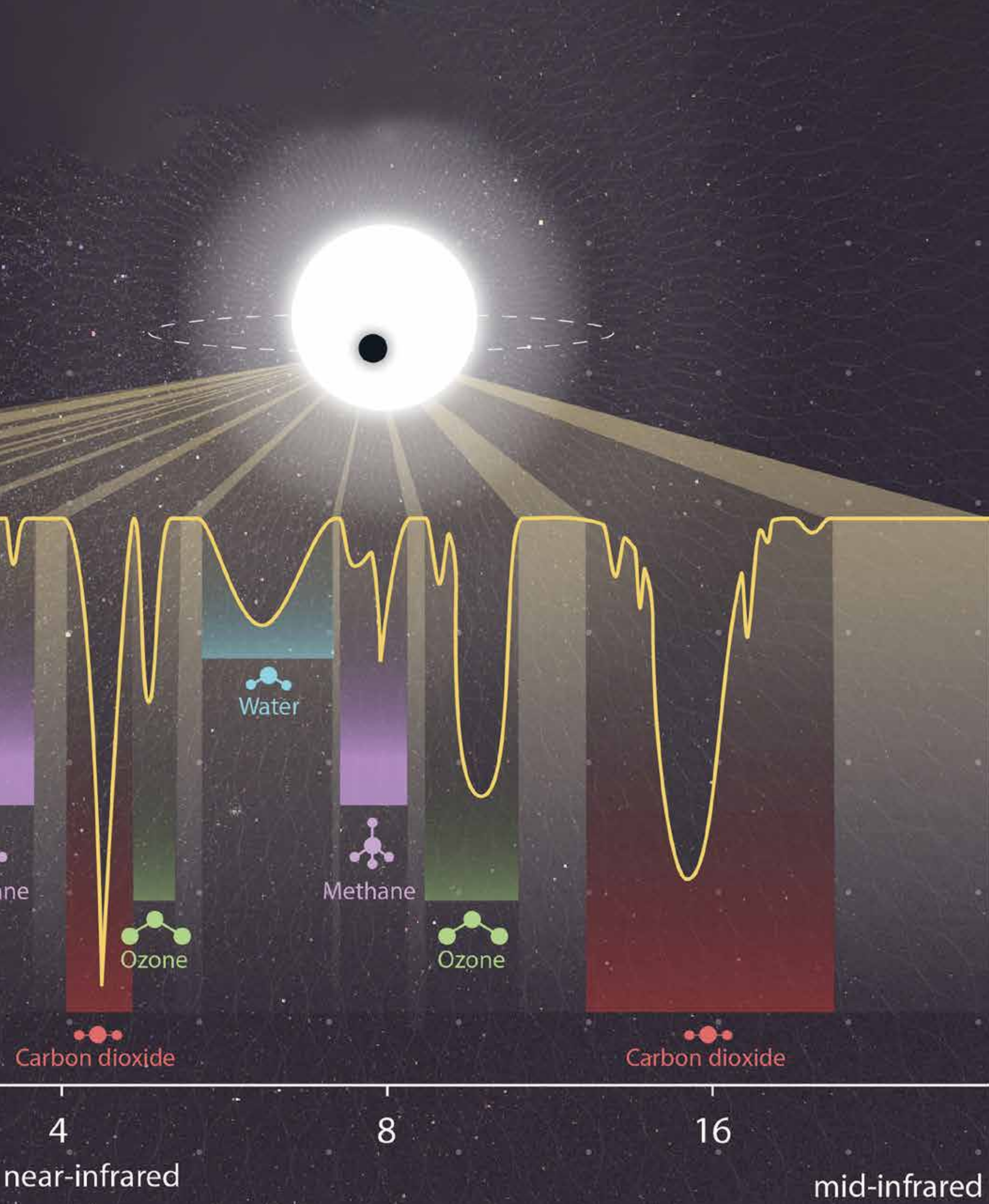
透過像韋伯太空望遠鏡（James Webb Space Telescope，簡稱為 JWST）這樣的儀器，科學家可以分析這些天體的大氣與表面成分，甚至追蹤分子的變化。未來的探測任務，例如歐羅巴快船（Europa Clipper，詳見天聞季報 2025 夏季號）、木星冰衛星探測船（JUICE），以及前往土衛六的蜻蜓號（Dragonfly），也將進一步直接測量這些環境的性質。

當這些線索逐漸拼湊起來時，我們也開始用不同的方式想像生命可能出現的地方。過去，我們習慣尋找另一個「像地球一樣」的世界；但現在我們開始意識到，生命可能出現在完全不同的環境中，例如冰層之下的黑暗海洋，或充滿有機分子的低溫世界。

換句話說，與其尋找另一個地球，也許更重要的是學會辨認那些看起來不像地球，卻仍然具備關鍵條件的地方。而在這樣的視角下，那些曾經被忽略的衛星，不再只是行星旁邊的配角，而是可能改變我們對生命理解的重要地方。

Earth-like Exoplanet's Transmisson Spectrum





Color) of Light in Microns

類地系外行星的大氣光譜示意圖。系外行星運行到恆星前方時，部分星光會穿過系外行星大氣層，大氣層中的特定元素或分子會吸收特定波長的光，造成觀測到的吸收光譜，可由此得知這個行星的大氣組成。

© NASA, ESA, CSA, STScI, Joseph Olmsted (STScI)

太陽系外的新世界

迷你海王星是尋找外星生命的捷徑嗎？

作者 蔡尚旻

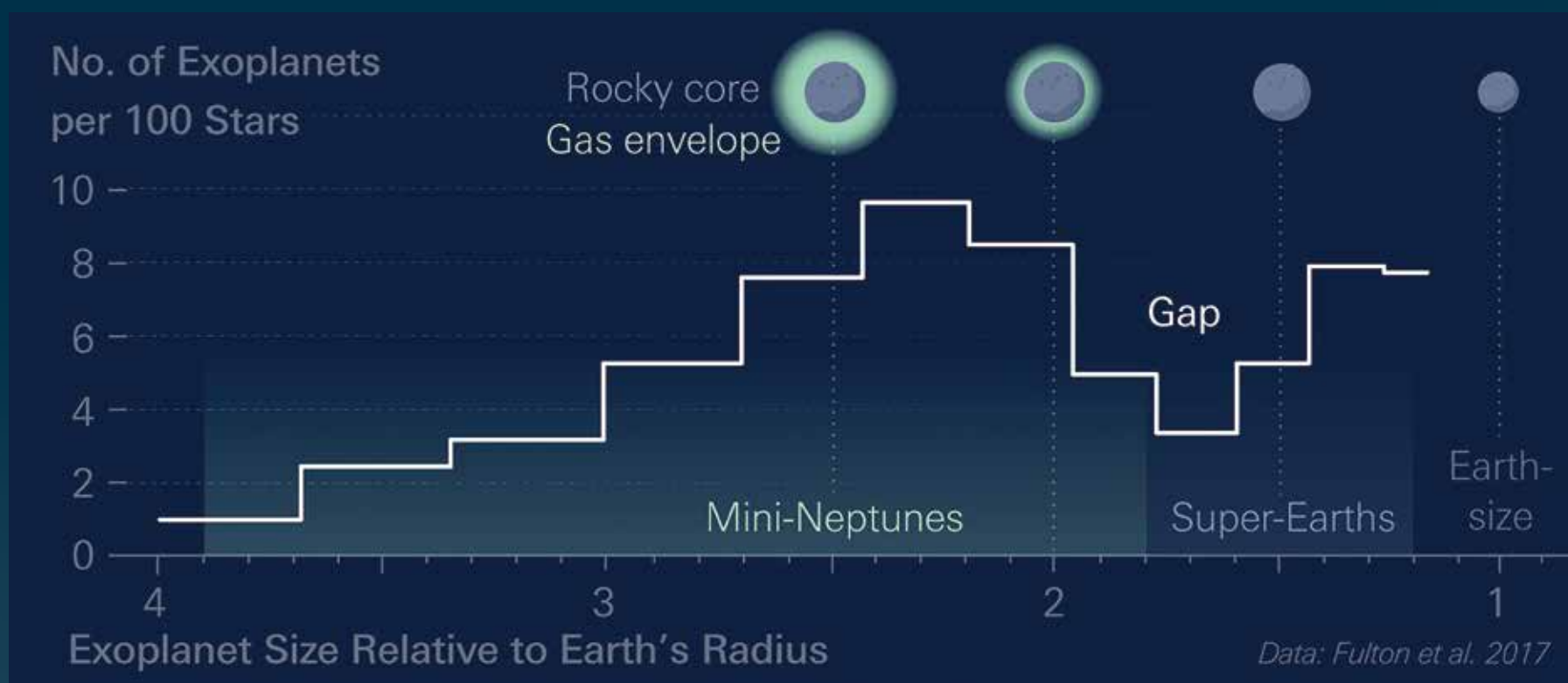
最常見卻最不了解的行星

NASA 的克卜勒太空望遠鏡徹底改變了天文學。在為期九年的任務中，它持續觀測一片包含超過 15 萬顆恆星的天空區域——就在夏夜抬頭可見的夏季大三角天區。通過凌星法（可參考本所 YouTube 頻道介紹的「凌星觀測法」），克卜勒太空望遠鏡發現了數千顆行星——首次揭示了太陽系外行星其實是多麼普遍。最令人驚訝的並不是克卜勒發現了行星，而是它揭露的：比地球大、但比海王星小的世界，稱為次海王星（sub-

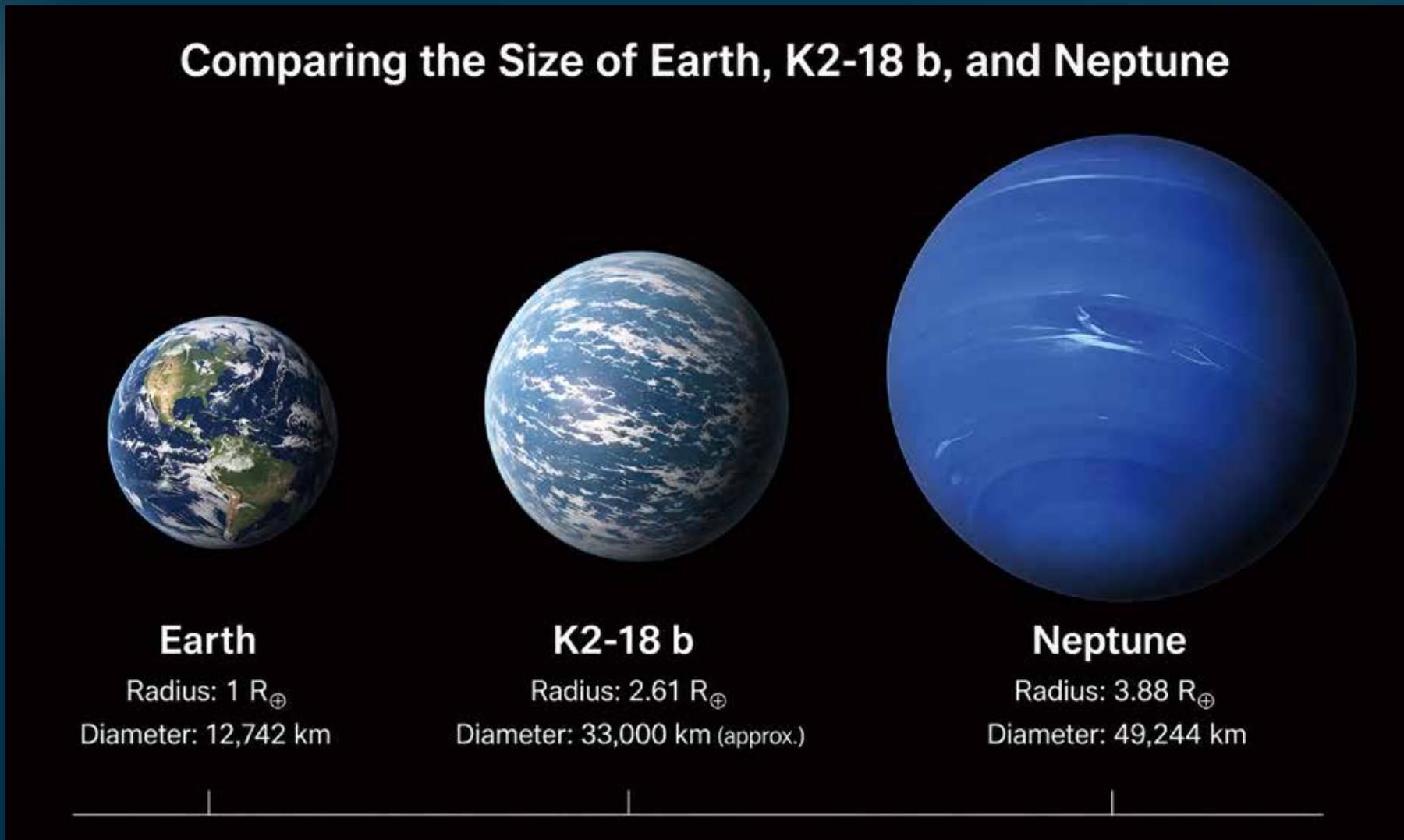
Neptune）或迷你海王星（mini-Neptune），而這類行星在我們的太陽系中完全不存在。因為缺少太陽系的類比，多年來，這些中等大小的世界一直充滿謎團。通過凌星，我們可以測量它們的大小，通過都卜勒效應，我們也能估計其質量，但幾乎無法窺探其內部結構。它們是像放大版的岩石行星？還是縮小版的海王星？還是有著新的構造？

“M型化”的大小分佈

最近幾年，透過凱克（Keck）望遠鏡仔細地校正行星的母恆星，天文學家得以更準確地推估這些克卜勒行星的大小分佈。在這些圍繞類似太陽的恆星運行的小型行星中，可以發現一個明顯的特徵：在大小約為地球半徑的 1.5 到 2 倍之間，行星數量顯著偏少。天文學家將這個區域稱為「半徑缺口」（radius gap）或「半徑山谷」（radius valley），它將行星分成兩個族群——體積較小的「超級地球」，以及體積較大的「次海王星」。



不同半徑的行星在類似太陽的系統中出現的頻率。觀測顯示，很少有行星的大小是地球半徑的 1.5 到 2 倍間。對於這一「半徑山谷」的形成機制，目前已有多種理論，解釋行星如何演化成半徑山谷兩側不同的族群。©Simons Foundation



地球、K2-18 b（次海王星）、海王星的大小比較示意圖。© 筆者使用 OpenAI ChatGPT 生成

超級地球的密度與岩石相近；而次海王星的密度較低，必須含有一定比例的氣體，或含足夠的低密度物質，才能解釋其觀測的大小和質量。目前最廣為接受而且最單純的解釋是，這兩個族群其實源自相同的初始族群；只是較小的行星在形成早期，受到母恆星強烈的紫外線與 X 射線輻射影響，逐漸失去原始氫氣大氣，最終演化成我們所觀測到的大部分超級地球。而原本比較大、氣體較多的行星則得以保留其大氣，演化成我們今天所觀測到的次海王星。這一解釋的物理基礎在於，當一顆岩質行星包覆約 1% 質量的氣體大氣時，其半徑可膨脹至約原本的兩倍，此時大氣是相對最穩定的狀態。這個約 1% 的氣體含量，正好與目前觀測到的次海王星性質相符。

氣態矮星 V.S. 水世界

然而，在天文學家能夠精確測量的質量與半徑範圍內，我們仍然無法唯一確定其內部結構。這是有點像數學裡一個式子有多解的問題。一顆質量約為地球 8 倍、半徑約為地球 2.5 倍的行星，整體密度約是地球的一半。其低密度有可能來自一個被厚重氫氣大氣包覆的類地核的組成，也可能是內部含有大量的水，因為形成的環境較冷而充滿冰。所以近期不少研究都是投入在如何透過觀測，區分這些不同的行星內部組成。

JWST 開啟新的觀測窗口

韋伯太空望遠鏡（JWST）從 2022 年開始運作後，我們探測系外行星大氣的能

力出現了革命性的提升。在凌日時，也就是行星從其母恆星前方通過時，不同分子會在特定波長吸收光線，在光譜中留下如指紋般的吸收特徵。JWST 的靈敏度足以讓我們開始研究這些過去難以探測的次海王星。

其中一個引人注目的目標是 K2-18 b，一顆位於其恆星適居帶內的次海王星，JWST 在其大氣中觀測到明確的甲烷（ CH_4 ）與二氧化碳（ CO_2 ）訊號——這是首次在適居帶外行星中偵測到含碳分子。雖然甲烷與二氧化碳在地球大氣中常被視為與生命活動相關的氣體；然而，在以氫氣為主的大氣中，甲烷不會被氧化也不需要生物的補充。

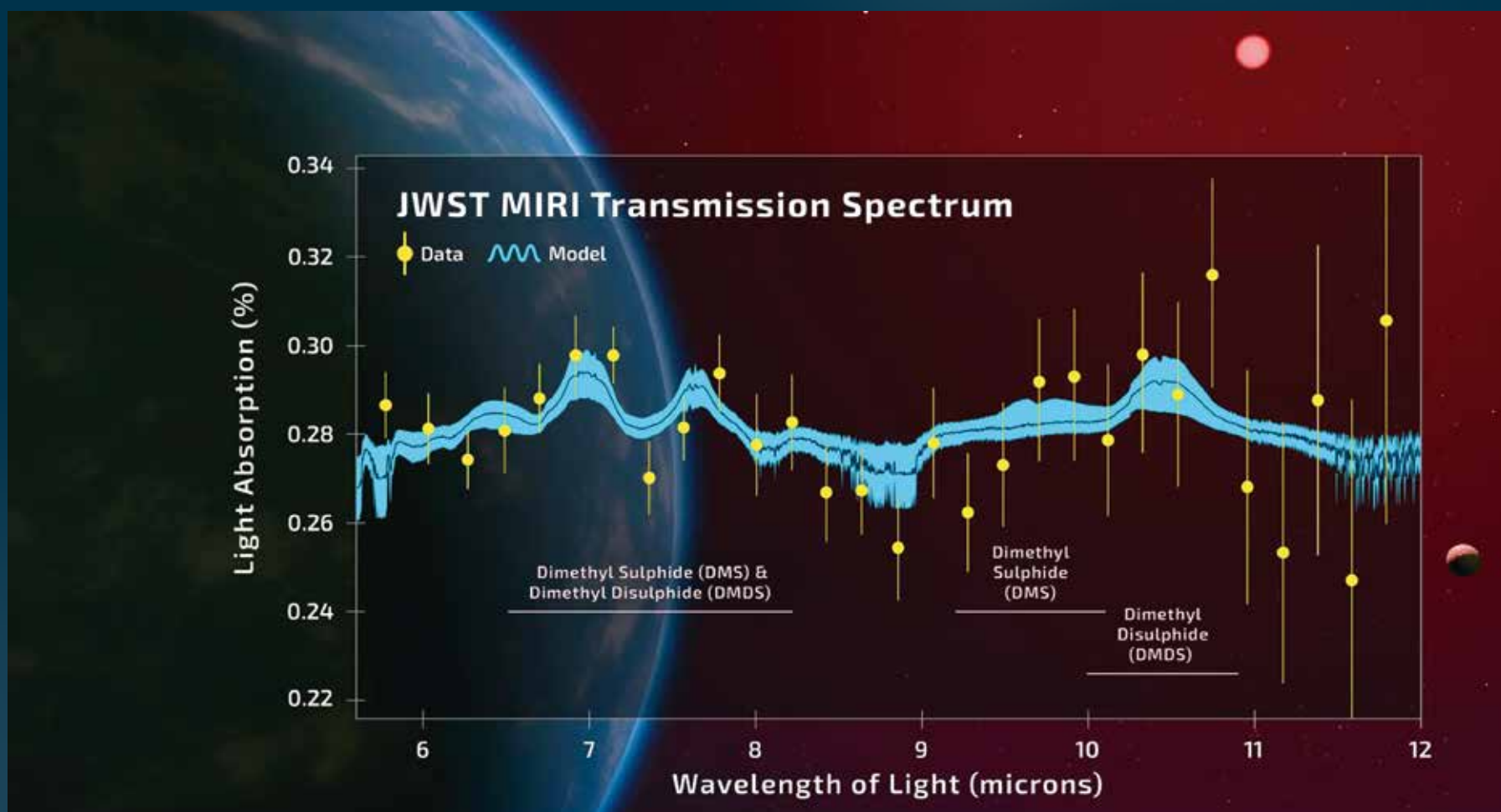
無生命的氣態矮星 V.S. 微生物的海洋星球

在2025年4月,由劍橋 Nikku Madhusudhan 領導的研究團隊,在 K2-18 b 的大氣中發現了二甲基硫 (DMS) 及其相關分子二甲基二硫 (DMDS),而這類分子在地球上幾乎只由海洋微生物產生。然而就像 Carl Sagan 的名言,非凡的主張需要非凡的證據。多個獨立團隊重新分析相同的 JWST 資料後認為,DMS 訊號在統計上並不顯著。針對單次中紅外儀器 (MIRI) 的資料

分析,目前學界仍存在分歧,例如認為訊號有可能來自其他碳氫化合物而非二甲基硫。這需要後續更多觀測和理論以釐清爭議。

未來發展

目前的觀測仍無法直接搜尋氧氣相關的生物跡象,但 JWST 已經開啟了在厭氧環境下尋找生物跡象的討論。即將啟用的 ELT,將從地面以高解析度解析次海王星大氣中的有機分子譜線,有望區分 JWST 尚無法分辨的碳氫化合物訊號。在理論方面,研究人員也迫切需要更完善的分子光譜資料,以便與觀測結果進行比較。宇宙中充滿了次海王星,其中是否有些具備適居條件,是我們首先需要回答的問題。例如,我們是否能透過大氣觀測來辨識海洋的存在?至於是否有生命跡象,或許在我們有生之年就能得到答案——但這將是一個需要謹慎判讀且充滿辯論的過程。



2025 年, JWST 的中紅外儀器 (MIRI) 以凌星方式觀測 K2-18 b。Nikku Madhusudhan 團隊在其大氣光譜中發現了二甲基硫 (DMS) 的可能訊號,並提出該行星可能是一顆被氫氣包覆的海洋型世界。©A. Smith/N. Madhusudhan/University of Cambridge

天聞季報編輯群感謝各位閱讀本期內容,特別感謝台北藝術院院長、國家文官學院講座教授張禮權博士惠賜刊頭題字。

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 | 曾耀寰、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。

