

文/周毅桓

在我們身處的太陽系中，八大行星圍繞著太陽運行。科學家發現在太陽系以外，許多恆星都有行星系統圍繞著母恆星運行，這些行星質量與體積多大？表面是不是有陸地？它們是否像我們的地球一樣有海洋與大氣？是否一樣孕育著生命？天文學家希望藉由觀測這些系外行星來找到線索。本期的天文學教室，將帶大家了解 TRAPPIST-1 行星系統的觀測故事及天文學家探索系外行星的方法。

TRAPPIST-1

系外行星系統的探索故事

圖片來源：NASA

什麼是 TRAPPIST-1 ？

TRAPPIST-1 是一顆紅矮星，離地球約 40 光年遠，最開始的時候在 1999 年由 2 微米巡天計畫 (2MASS) 觀測到，當時它的名字被記為 2MASS J23062928-0502285，一個不起眼的名字。在 2016 年 5 月歐洲太空總署 (ESA) 科學家利用位於智利的偵測凌日行星與微行星小型望遠鏡 (TRAnsiting Planets and Planetesimals Small Telescope, TRAPPIST)，發現這顆紅矮星可能有 3 顆行星圍繞著它運行。歐南天文臺 (European Southern Observatory, ESO) 緊接著觀測到這 3 顆系外行星公轉軌道週期，最靠近紅矮星的行星 TRAPPIST-1b 公

轉週期約 1.5 天、第 2 顆行星公轉週期約 2.4 天，第 3 顆公轉週期約 4 天。(圖 1)

發現 7 顆和地球相似的系外行星

哈伯太空望遠鏡接續對於 TRAPPIST-1 的觀測，在同年 5 月 4 日時利用「凌日法」(圖 2)，發現其中兩顆行星 TRAPPIST-1b、TRAPPIST-1c 似乎沒有以含氫原子為主組成的行星大氣。和一般類木行星這種大質量的氣態行星不同，因此強化了這兩顆行星有可能具有岩石表面的推論。此外，行星表面若能不被含氫化合物與氫組成的大氣層所包覆，將較有利

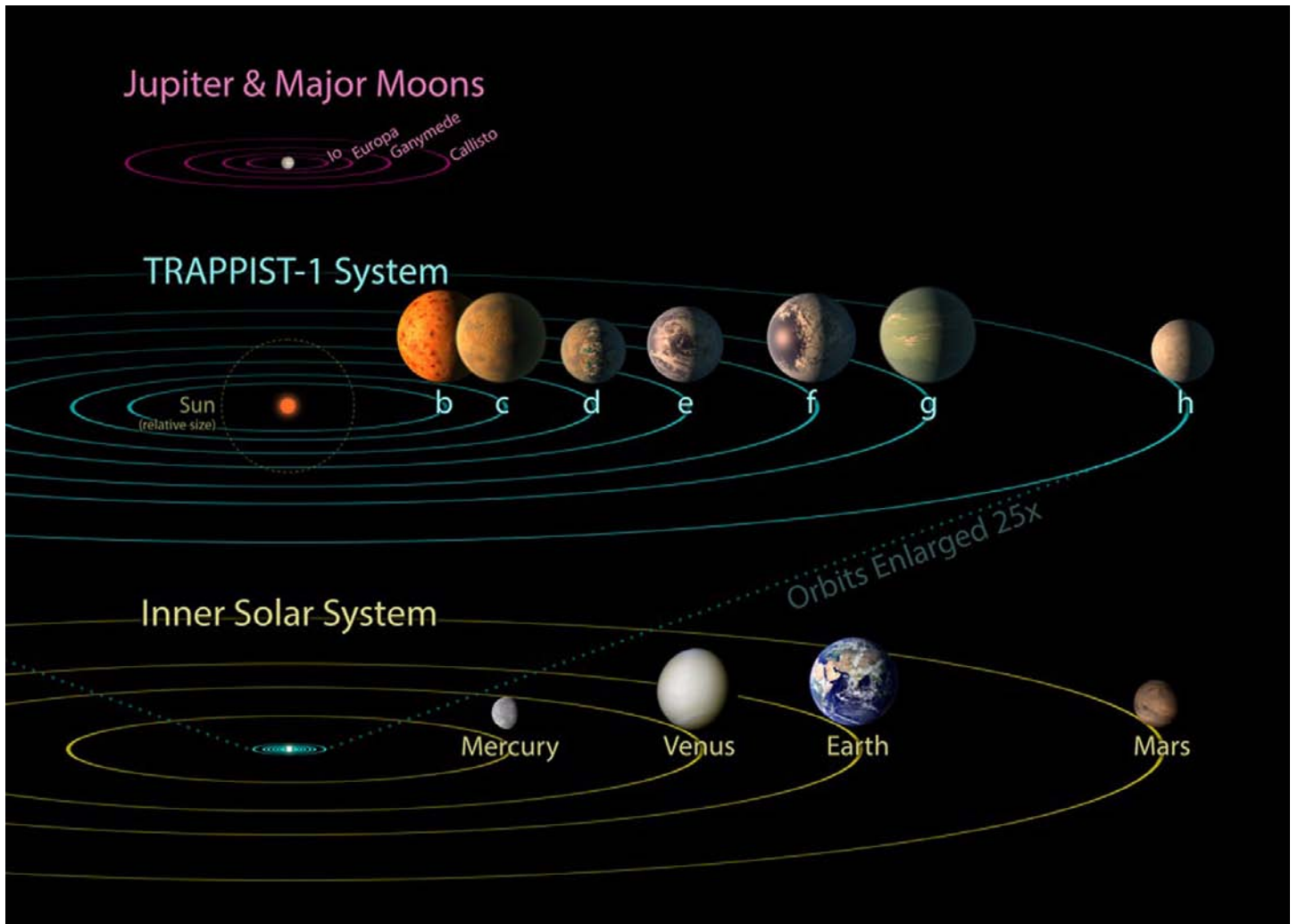


圖1. TRAPPIST-1行星系統的尺度大約可以和木星與它的衛星系統相提並論。相較於我們的太陽系，距離母恆星最遠的系外行星TRAPPIST-1h，它的軌道平均半徑比太陽到水星的距離還小。圖片來源：NASA/JPL-Caltech/R. Hurt, T. Pyle (IPAC)

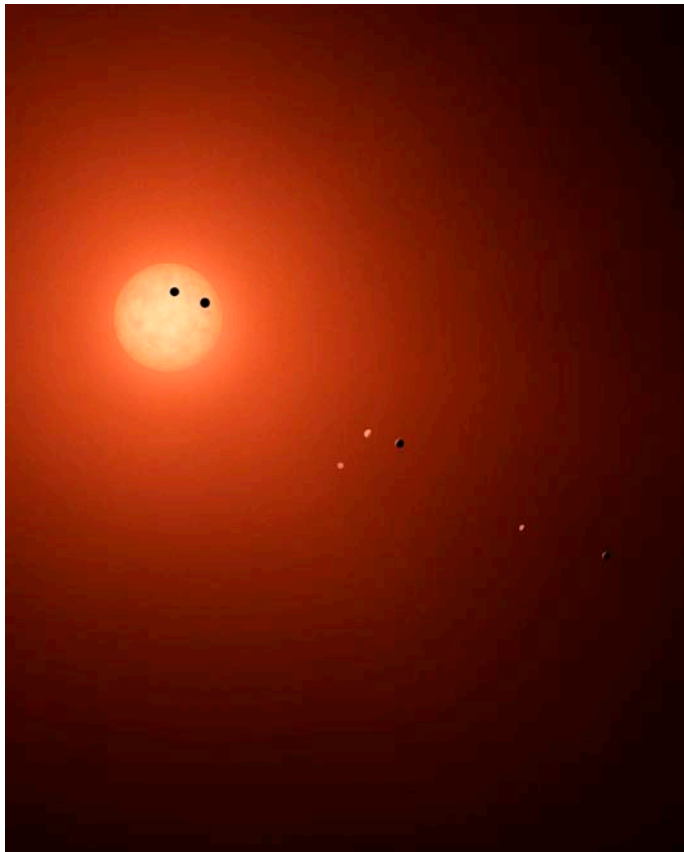


圖2. 凌日法，天文學家尋找與分析系外行星的觀測方法之一。當系外行星穿過母恆星與地球之間時，由地球上觀測到恆星的亮度將因被系外行星遮蔽而下降，此時稱為「凌日」。藉由觀測凌日的過程，可以得知系外行星的許多特質，如它的公轉軌道週期、軌道平均半徑、行星的大小、行星的大氣組成等。圖片來源：NASA

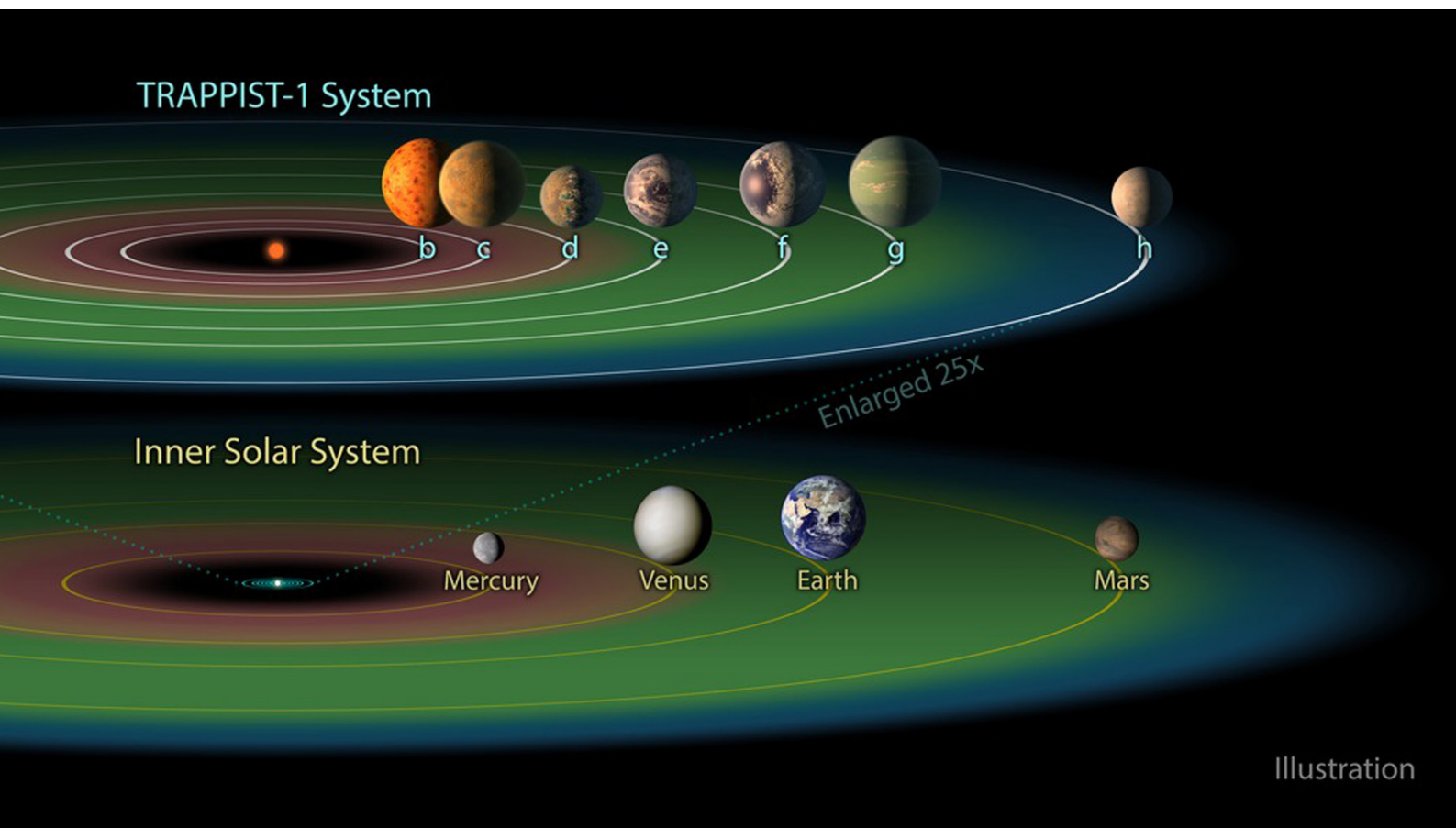
於生命的棲息，因為那些成份的大氣層可能會造成很強的溫室效應，使行星表面溫度過高，而不利於生命發展。

在2016年的秋天，由天文學家Michaël Gillon率領的團隊利用史匹哲太空望遠鏡（Spitzer Space Telescope）觀測這顆紅矮星，發現可能有7顆半徑與質量皆與地球差不多大小的系外行星圍繞著它，其中3顆位於適居帶內（圖3）。Michaël Gillon的團隊並利用史匹哲太空望遠鏡的觀測數據，分析出其中6顆系外行星的密度。從分析出的密度推測，這些系外行星很可能是具有岩質表面的類地行星。這意味著這3顆跟地球差不多大小、位於適居帶內的岩質行星的表面將可能含有液態水。而含液態水的岩質行星，和我們的地球較為相似，因此可能適合生命的發展與棲息。另外由於這些系外行星離紅矮星很近，它們的公轉軌道很可能受到紅矮星的潮汐力

鎖定，使行星的一個半面永遠面向紅矮星，形成永晝，而背對紅矮星的另一半面則為永夜。

系外行星間的簡諧運動

除此之外，Michaël Gillon的團隊也發現內圈6顆行星繞母恆星公轉的軌道週期分別為1.51、2.42、4.04、6.06、9.21、12.35天。而最外圍第7顆行星的軌道週期，由天文學家Rodrigo Luger組成的團隊，在2017年初利用克卜勒太空望遠鏡測得為18.77天。這一組公轉軌道週期序列，暗示著TRAPPIST-1的行星系統，具有軌道共振的性質。軌道共振通常發生在行星圍繞母恆星公轉時，行星間以一個持續的、有規律的萬有引力彼此拖曳，使彼此的軌道公轉頻率滿足特定的倍數關係。以木星四大衛星圍繞木星公轉為例，木衛一Io的公轉週期約1.77天，木衛二



Illustration

圖3. 適居帶是在恆星周圍液態水可能存在的區域。行星圍繞母恆星公轉的平均軌道半徑介於一個適當的範圍內，使行星接收母恆星發出的能量強度不會太強，也不會太弱，讓行星具有溫和的表面溫度，而使其表面的水可能以液態存在。TRAPPIST-1行星系統的7顆系外行星，其中3顆（e、f、g）位於適居帶（綠色區域）中；另3顆（b、c、d）位於水可能以氣態的形式存在的區域（紅色區域）；1顆（h）位於水可能以冰的形式存在的區域（藍色區域）。相較於太陽系，金星、地球、火星這3顆行星位於太陽系的適居帶內。圖片來源：Courtesy NASA/JPL-Caltech



圖4. 藝術家想像描繪，假設我們站在系外行星TRAPPIST-1的表面，景色看起來的樣子。圖片來源：NASA/JPL-Caltech/T. Pyle (IPAC)

Europa的公轉週期約3.55天，木衛三Ganymede的公轉週期約7.15天，3個衛星繞木星公轉週期接近1:2:4的比例。而這樣1:2:4的比例，被天文學家認為是穩定的軌道共振關係，即使3個衛星其中之一被輕輕推開，它們也會自我修正回到原本穩定的公轉軌道。

這是天文學家第一次發現類地行星間，彼此具有軌道共振關係的行星系統。這暗示著共振結構在TRAPPIST-1行星系統形成過程的前期，就已經成形。Rodrigo Luger解釋道：這組共振結構或許並非巧合，它有可能是行星公轉時向內遷移，直到公轉軌道進入共振關係。

觀測任務前，天文學家做足準備

隨著天文學家對紅矮星TRAPPIST-1越來越深入的研究，更多有關TRAPPIST-1紅矮星和其行星系統的特質被揭露：TRAPPIST-1紅矮星的表面溫度約為2,566K，恆星光譜分類為M8，它的質量大約0.08個太陽質量，年齡約介在54至98億年間，它經常發出X光及紫外光波段的恆星閃焰以及日冕巨量

噴發（coronal mass ejections），高能的恆星風粒子衝擊行星大氣，可能使行星的大氣分子脫離，而不利於生命的形成。最靠近它的系外行星TRAPPIST-1b由哈伯太空望遠鏡、史匹哲太空望遠鏡利用凌日時觀測透射光譜分析，沒有發現任何吸收譜線。TRAPPIST-1b的直徑約地球的1.1倍，並具有1.4個地球質量——它的平均密度比地球還高，由其平均密度推測，應為岩質行星。

在使用韋伯太空望遠鏡對TRAPPIST-1b觀測前，天文學家推測，這顆系外行星因公轉軌道靠近母恆星，將收到較高的輻射強度（相較於地球接收太陽光照射的輻射強度，約為4倍左右），因此表面溫度較高。而受到母恆星潮汐力影響。潮汐力使這顆系外行星被拉成橢球形，變形所做的功可能有部分被轉換為行星的內熱，使這顆行星獲得額外的熱能，表面溫度更加升高，較高的表面溫度將使行星表面的大氣分子獲得較高的脫離動能，而使行星大氣向外逸散。因此，TRAPPIST-1b若具有大氣，大氣可能由較重的分子所組成。另橢球長軸的一端被母恆星的重力鎖定，如同前面提到的，TRAPPIST-

圖5. 溫度計下方是天文學家在觀測前以模型推測，假設系外行星 TRAPPIST-1b 表面大氣均勻分布熱能，行星表面平均溫度約為 400K。假設 TRAPPIST-1b 表面無大氣分布熱能，使面向母恆星的那一側持續受熱，則那一側表面溫度約 500K。溫度計上方為韋伯太空望遠鏡本次觀測結果——503K。圖片來源：NASA, ESA, CSA, Joseph Olmsted (STScI); Thomas P. Greene (NASA Ames), Taylor Bell (BAERI), Elsa Ducrot (CEA), Pierre-Olivier Lagage (CEA)

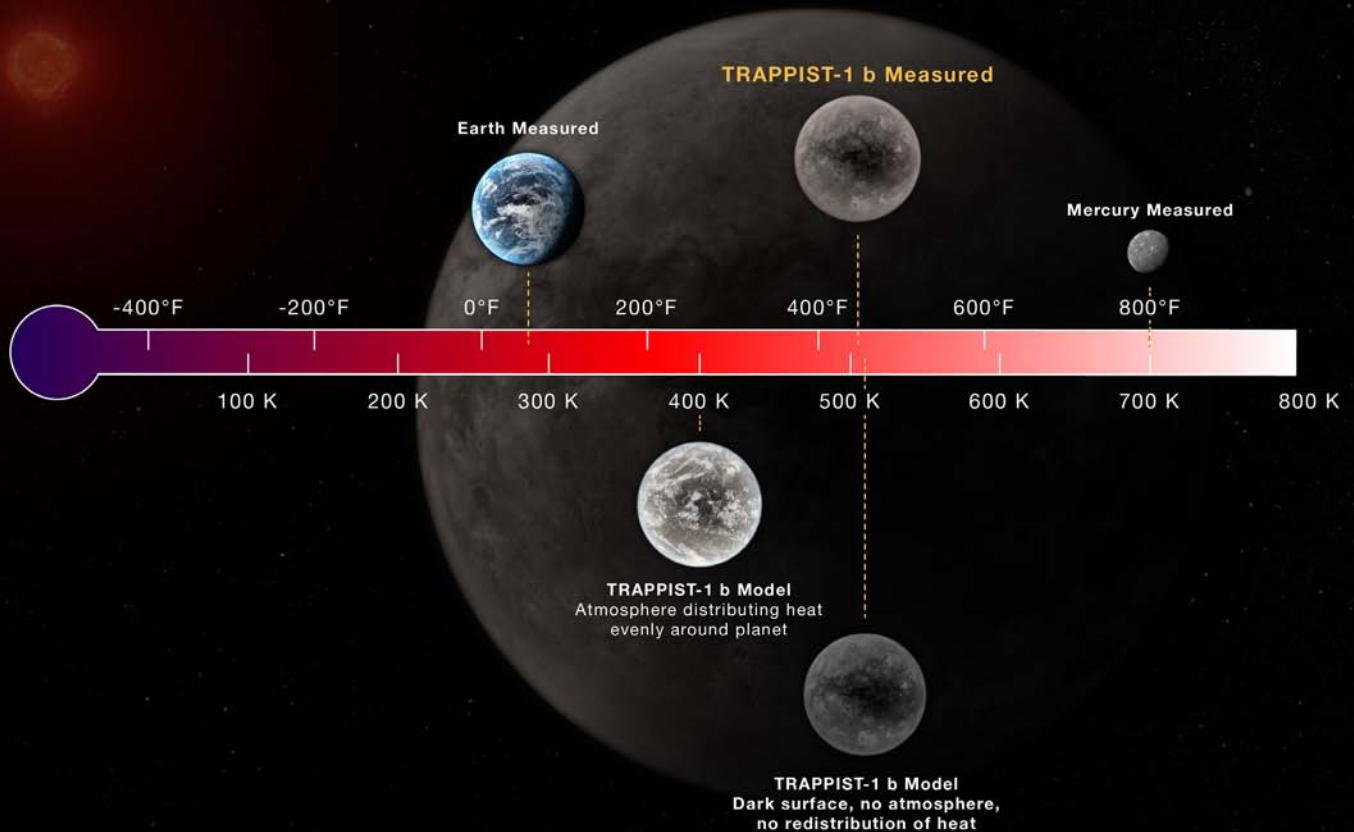
1b 的一個半面會一直朝向母恆星受熱，另一半面則接收不到母恆星照射。因此天文學家以模型推測，在假設有均勻分布行星表面的狀況下，TRAPPIST-1b 的表面平均溫度約 400K。如果 TRAPPIST-1b 完全沒有大氣，這個半面的表面溫度預估將在 500K 左右（圖5）。這樣的表面溫度雖然不足以讓 TRAPPIST-1b 發出可見光波段的熱輻射，但它在紅外線波段發射出的輻射量卻已足以讓韋伯太空望遠鏡靈敏的中紅外成像光譜儀（MIRI）分辨出來。

韋伯太空望遠鏡最新觀測成果

在 2022 年的 11 月到 12 月初，天文學家 Thomas Greene 所組成的團隊以韋伯太空望遠鏡的中紅外線儀器，在 F1500W 濾鏡下，直接測量 TRAPPIST-1 和 TRAPPIST-1b 在次食（secondary eclipse）（圖6）過程中紅外線下降的亮度，計算出 TRAPPIST-1b

ROCKY EXOPLANET TRAPPIST-1 b DAYSIDE TEMPERATURE COMPARISON

MIRI | F1500W



WEBB
SPACE TELESCOPE

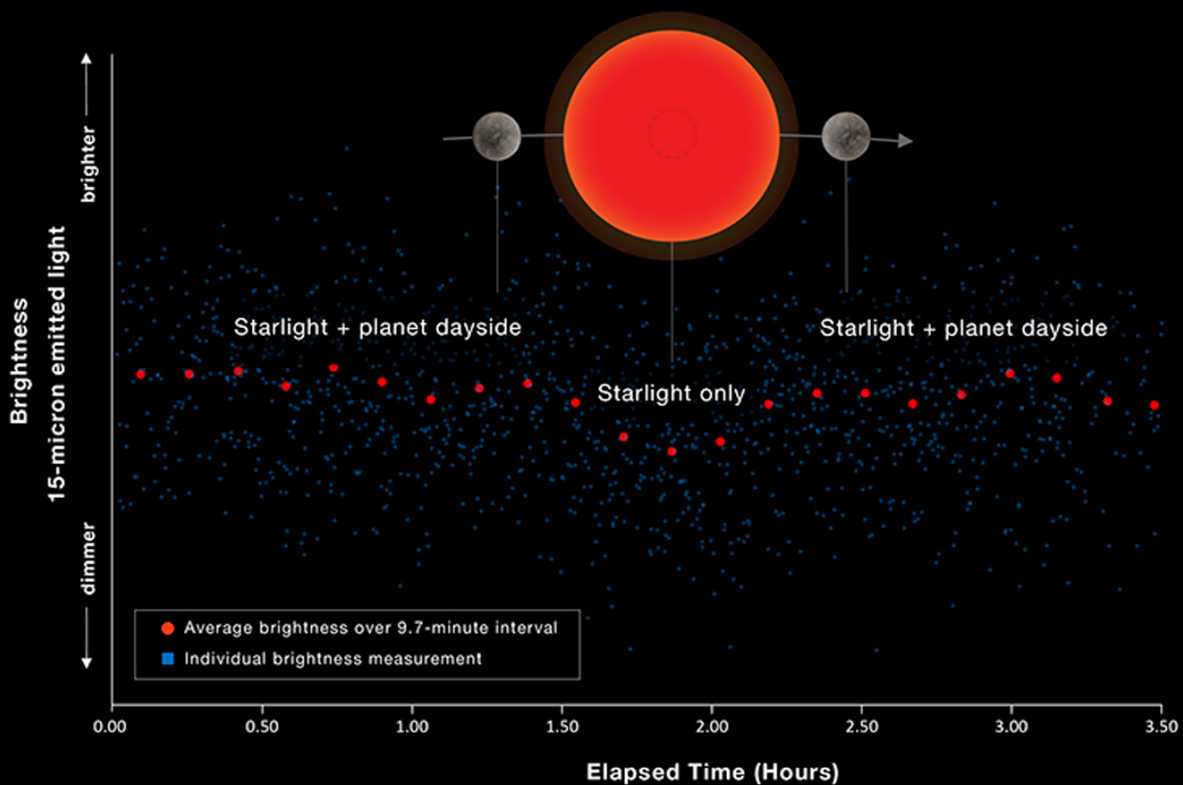
的表面溫度約為503K左右——非常接近行星無表面大氣模型所預測的溫度。觀測結果暗示著TRAPPIST-1b可能沒有大氣。這是人類首次直接透過紅外線波段的熱輻射測量太陽系以外的行星溫度。

關於TRAPPIST-1行星系統的觀測並沒有到此結束，接下來韋伯太空望遠鏡預定了一系列的TRAPPIST-1觀測任務要對行星系統做詳細的檢視。接下來的6顆系外行星TRAPPIST-1c、d、e、f、g、h，其中e、f、g位於適居帶中，行星表面可能含有液態水。h位於適居帶外，若為岩質行星，其表面可能含有冰，這些都是讓天文學家們非常關注的觀測目標。觀測結果如何，是否能藉以驗證我們的太陽系行星系統形成的各項假說及模型，值得拭目以待。有興趣的讀者可以到NASA官方網站，就能得到第一手的資訊。

圖6. 次食。從地球角度觀看，當系外行星圍繞至母恆星背面時，稱為次食。此時系外行星發出的紅外光將被母恆星所遮蔽，藉由觀測該紅外光波段亮度的下降量，可以推算系外行星的表面溫度。圖片來源：NASA, ESA, CSA, Joseph Olmsted (STScI) ; Thomas P. Greene (NASA Ames), Taylor Bell (BAERI), Elsa Ducrot (CEA), Pierre-Olivier Lagage (CEA)

ROCKY EXOPLANET TRAPPIST-1 b SECONDARY ECLIPSE LIGHT CURVE

MIRI | Time-Series Photometry (F1500W)



WEBB
SPACE TELESCOPE



圖7. 系外行星TRAPPIST-1b的表面，由藝術家根據韋伯太空望遠鏡觀測結果所想像描繪。圖片來源：NASA, ESA, CSA, J. Olmsted (STScI)

參考資料：

1. Thermal Emission from the Earth-sized Exoplanet TRAPPIST-1 b using JWST, Thomas P. Greene, 2023
2. The Near-infrared Transmission Spectra of TRAPPIST-1 Planets b, c, d, e, f and Stellar Contamination in Multi-epoch Transit Spectra, Zhanbo Zang, 2018
3. A seven-planet resonant chain in TRAPPIST-1, Rodrigo Luger, 2017
4. Seven temperate terrestrial planets around the nearby ultracool dwarf star TRAPPIST-1, Michaël Gillon, 2017
5. Why should we care about TRAPPIST-1, Luca Malagoli, Nature Astronomy, 2017
6. 10 Things: All About TRAPPIST-1, Elizabeth Landau, NASA, February 21, 2018
7. Promising worlds found around nearby ultra-cool dwarf star, ESO, NASA, May 1, 2016
8. NASA's Hubble Telescope makes first atmospheric study of Earth-sized exoplanets, NASA, July 19, 2016
9. NASA telescope reveals largest batch of Earth-size, habitable-zone planets around single star, NASA, February 21, 2017
10. Astronomers confirm orbital details of TRAPPIST-1h, Michele Johnson, NASA's Ames Research Center, May 22, 2017
11. NASA's Kepler Provides Insights on Enigmatic Planets, Jan 2014, JPL

周毅桓：臺北市立天文科學教育館

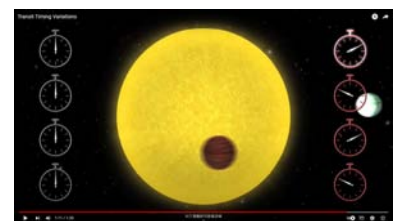
YouTube相關影片：



用韋伯太空望遠鏡探索外星世界：TRAPPIST-1
<https://youtu.be/t-DE5vmAytA>



NASA 360度VR全景模擬：在TRAPPIST-1d的行星表面上
<https://youtu.be/o2MgG6KhO1E>



「凌日時間變分法」輔助說明動畫
<https://youtu.be/rqQ1xKsNIQE>