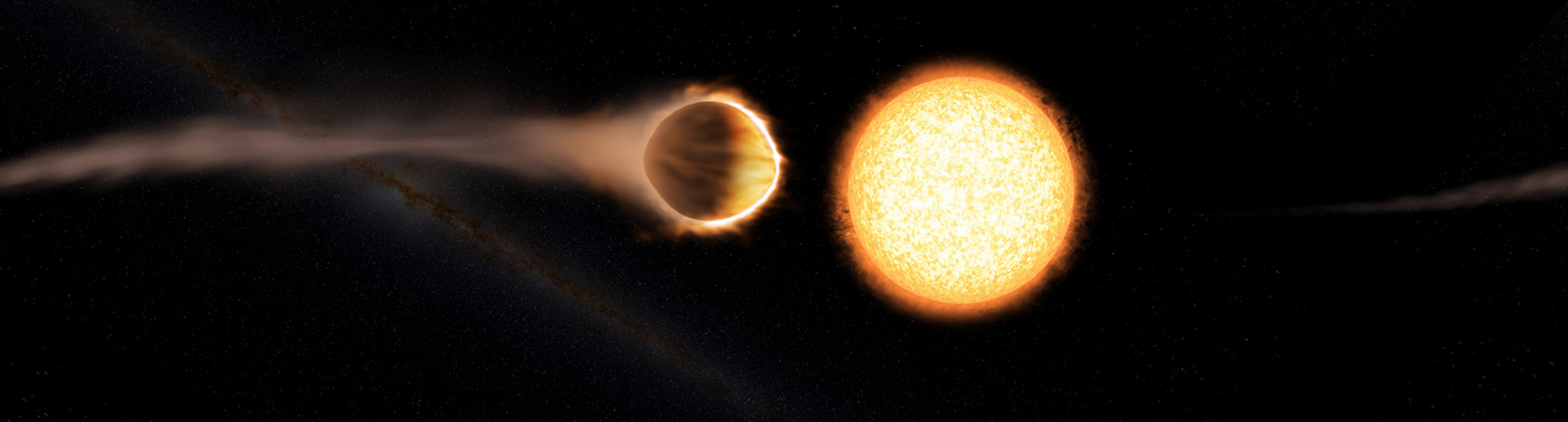


哈伯與史匹哲太空望遠鏡 攜手發現系外行星平流層！

文/ 李見修



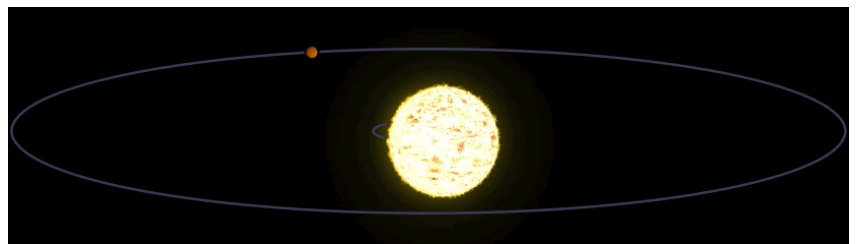
藝術家對熱木星WASP-121b的想像圖。

© Engine House VFX, At-Bristol Science Centre, University of Exeter

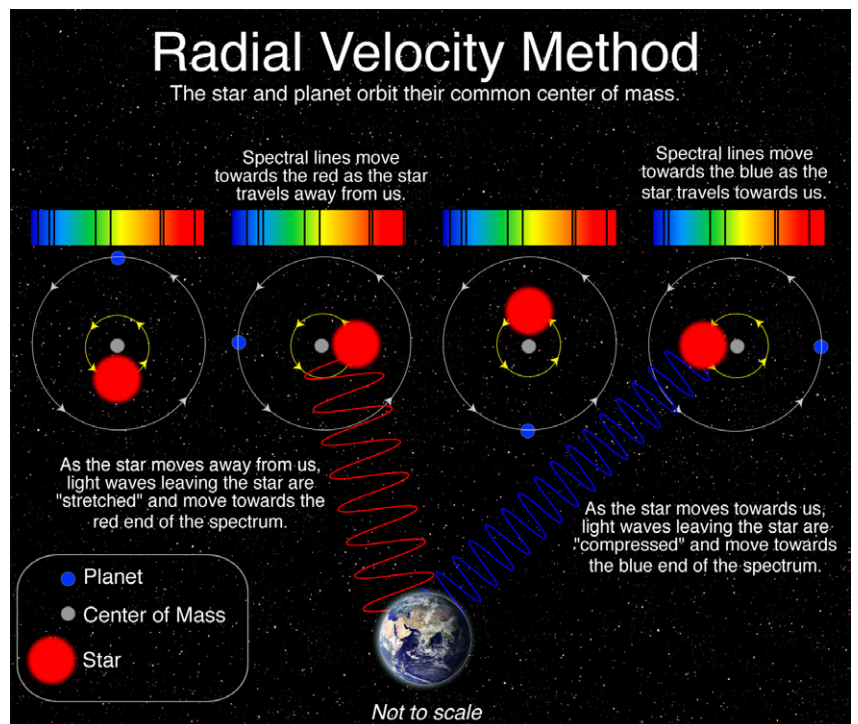
搜尋系外行星

搜尋環繞其他恆星的行星系統（太陽系外行星），以及這些行星是否適合生物居住、或生物存在的證據，一直是天文學家及行星科學家的夢想。隨著科技進步，第一顆已知的系外行星（飛馬座51b）在1995年被確定。早期搜尋系外行星主要依靠兩種方法：其一為透過高解析度光譜，量測遠方恆星的徑向速度。如果遠方恆星有系外行星繞行，恆星會受到週期性的擾動，而我們觀測光譜時會看到恆星的速度呈現週期性的變化。藉由速度變化的強度與週期，我們可以推測系外行星的質量與繞行時的軌道大小。

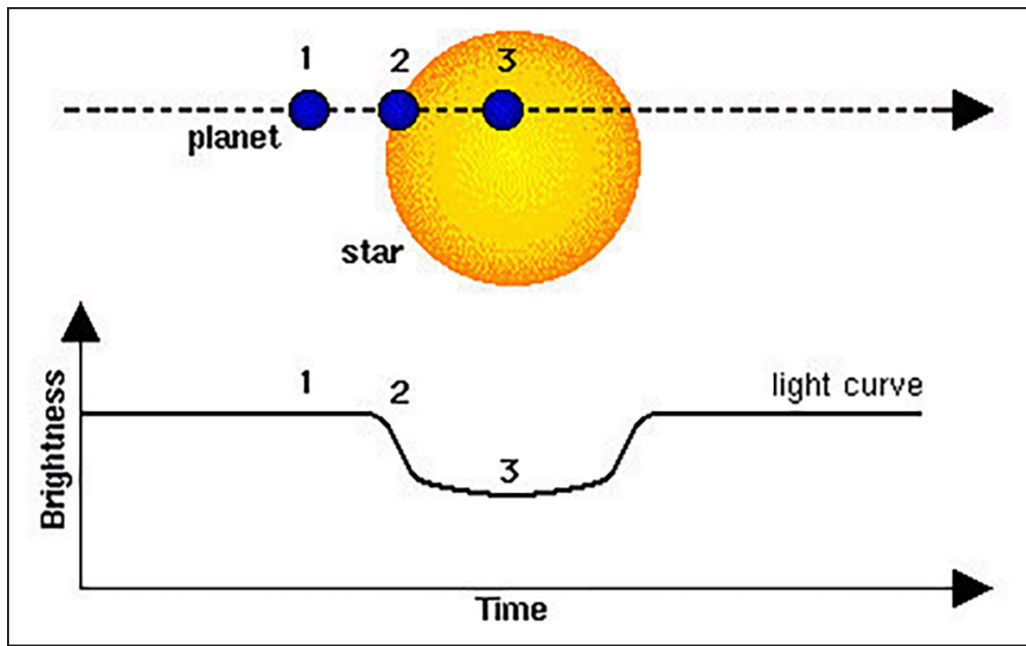
另一種方法則是透過系外行星凌日。如同金星凌日一般，當遠方行星繞行恆星的軌道剛好通過地球上觀測者的視線方向時，地球上的觀測者會



©. NASA



徑向速度法 ©. Las Cumbres Observatory



凌日法 ©. Astronomy Online

看到遠方恆星的光度變暗。恆星光度變化的週期告訴我們系外行星的軌道週期，而光度變化的強度則告訴我們系外行星的大小。因為系外行星與恆星的大小差距懸殊，恆星光度的變化約在百分之一（類木行星），甚或小至千分之一（類地行星）。

觀測選擇效應， 熱木星佔大宗

徑向速度量測法主要依靠行星對主星造成的擾動。因此越靠近恆星，以及質量越大的行星，對恆星造成的影響也越大。而凌日法也與此類似，越大的行星所造成的光度變化也越強烈。早期的凌日法搜尋行星受限於地面觀測望遠鏡的時間有限，僅能對遠方恆星進行數月的觀測，因此所偵測到的行星繞行週期也較短（較靠近主星）。

因為觀測方法的選擇效應，早期發現的系外行星多為離主星相當近（約十分之一至百分之一天文單位），比太陽系內離太陽最近的水星（0.4天文單位）還近得多，表面溫度也高達攝氏上千度。因為觀測方法選擇效應的關係，這些系外行星的質量也相當大，約為木星質量的數倍。因為距離恆星近，溫度高，質量也大，因此天文學家統稱這一類系外行星為熱木星。因為系外行星系統與太陽系行星性質相當不同，這些熱木星的發現，以及其形成方式，一開始讓天文學家傷透腦筋。

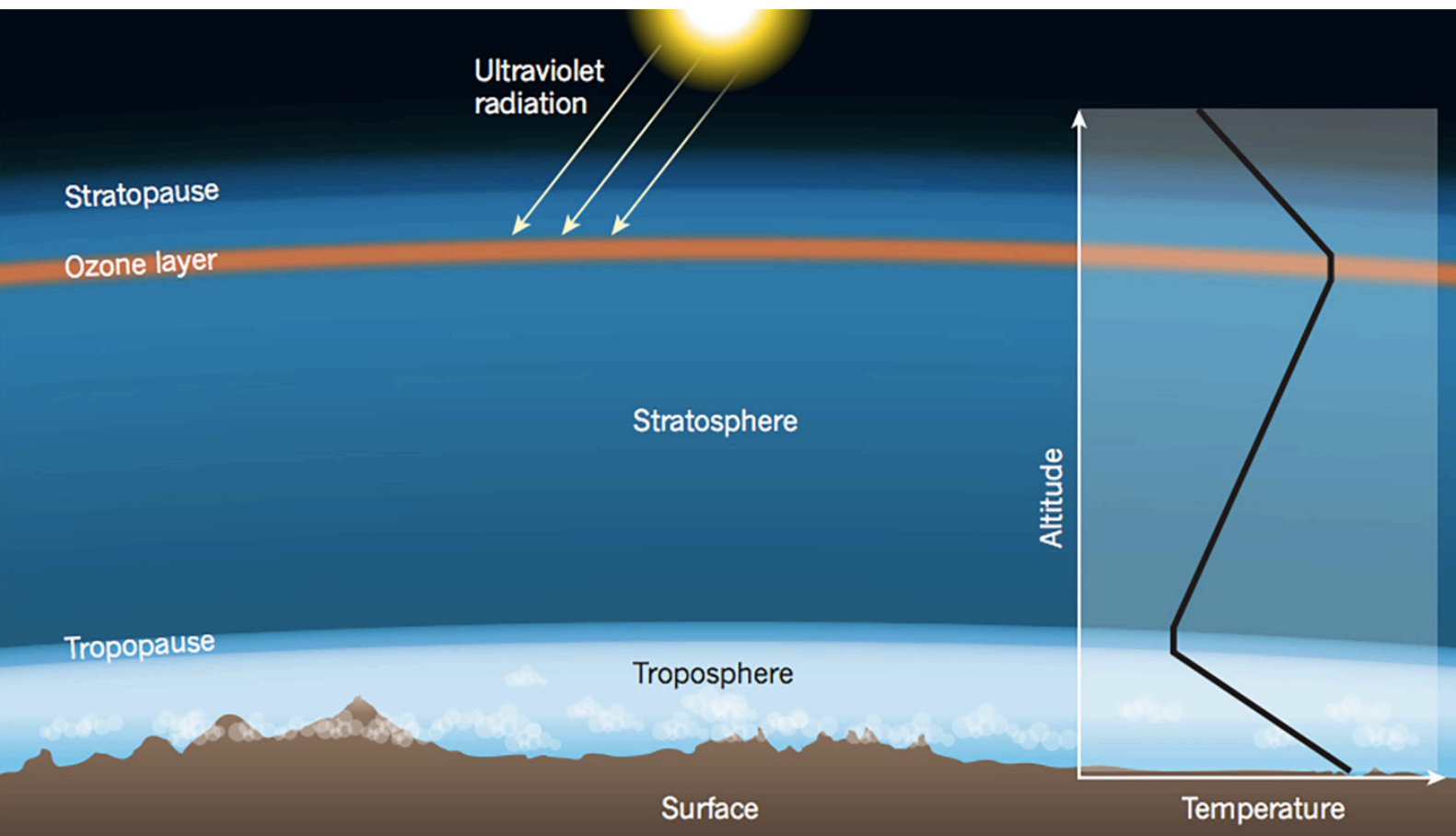
現有的理論則認為這些熱木星生成時離主星較遠，但是因為與原行星盤交互作用而損失角動量，因此軌道慢慢向內遷徙，而離主星越來越近。另外一個理論是遠方恆星本來有數顆行星，但這些行星的軌道並不穩定，透過

多體作用，有的行星被拋向較遠的軌道、有的行星則移入較近的軌道。而熱木星表面溫度如此之高，也引發天文學家討論這些熱木星是否有跟地球一樣的大氣結構？

行星大氣結構

地球的大氣結構由地表往太空可依序分為對流層、平流層、中氣層、增溫層，以及外氣層。一般來說隨著高度增加，大氣的溫度會越低。但平流層恰恰相反，高度越高溫度越高，所以有時又稱為逆溫層。這是因為平流層含有臭氧，會吸收從太陽而來的紫外線並升溫，所以在平流層裡大氣溫度隨著高度而增加。那麼系外行星的大氣是否也有同樣的結構，如果有的話，又該如何證明呢？

如果大氣隨著高度增加溫度遞減的話，在觀測系外行星大氣



圖一、地表、對流層（Troposphere）、以及平流層（Stratosphere）示意圖。在對流層頂（Tropopause）溫度恆定，不隨高度而降溫。在平流層中有臭氧層可以吸收紫外線，讓地表上的生物不至於暴露在高能量的太陽輻射底下。
參考資料：http://www.nature.com/nature/journal/v548/n7665/fig_tab/548038b_F1.html

散發出的紅外光時，大氣中的分子因為溫度降低會在系外行星的紅外光譜裡造成吸收譜線。但如果系外行星的大氣溫度隨著高度增溫，那麼大氣中的分子會在紅外光譜裡呈現發射譜線。雖然道理聽起來很簡單，但是系外行星散發的光度非常的黯淡，就算是用現在地表上口徑最大的十米等級望遠鏡，或是太空中的望遠鏡，都還是無法觀測到。還好聰明的天文學家想到了一個巧妙的方法，就算不能直接偵測到系外行星的光度，也能探索它們的大氣層。

利用凌日 拍攝系外行星光譜

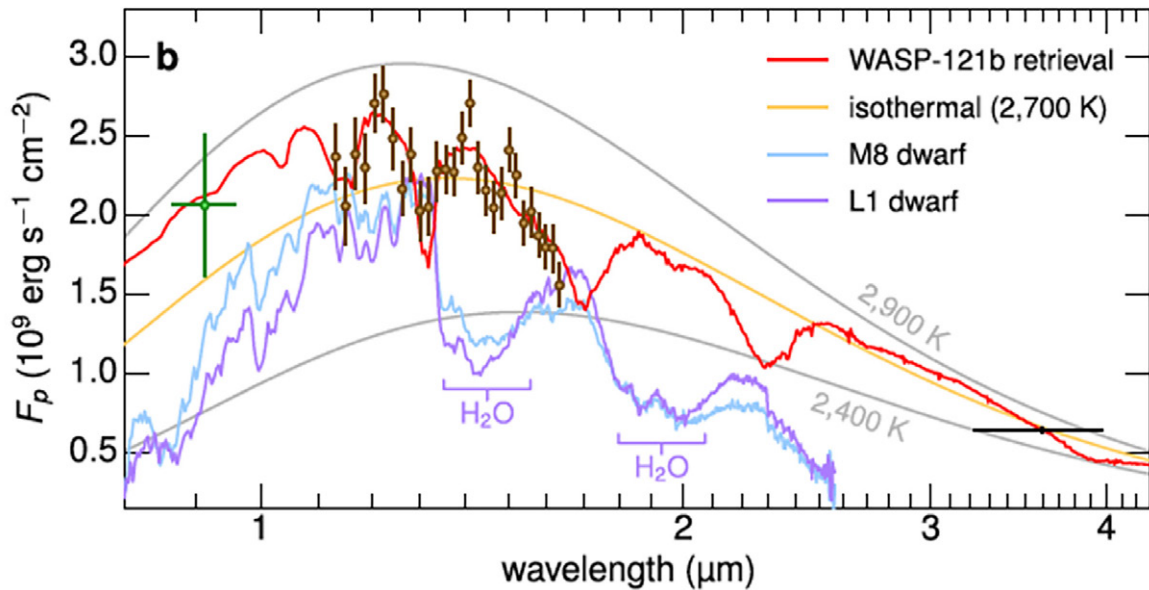
這個方法就是趁系外行星凌日時拍攝光譜。當系外行星凌日時，主星的光會穿過系外行星的大氣層。因此我們只要比較主星在系外行星凌日時的光譜，以及非凌日時的光譜，這兩者間的差異，就是系外行星的光譜囉！

由英國天文學家湯瑪斯·伊萬（Thomas Evans）所帶領的國際團隊，便是透過這一個方法，加上哈伯（Hubble）與史匹哲（Spitzer）望遠鏡優越的紅外線光譜、光度儀器，取得熱木

星WASP-121b精確的紅外光譜（圖二），並且首次成功的觀測到了WASP-121b大氣具有平流層的逆溫效應！

展望

針對WASP-121b這顆系外行星，湯瑪斯·伊萬等人尚有新的哈伯望遠鏡觀測計畫正在進行中。除了能提供更精確的光譜外，如果在每次凌日時所拍攝的光譜出現變化，將可告訴我們系外行星的大氣變化，以及系外行星是否跟地球一樣有不同的天氣現象。



圖二、系外行星WASP121b的紅外光譜。橫軸為光譜輻射的波長（毫米），縱軸為行星大氣的光度。褐色數據點為哈伯太空望遠鏡的量測值，黑色數據點為史匹哲太空望遠鏡的量測值，綠色數據點為地面天文望遠鏡的量測值。伊萬·湯瑪斯等人將數據與不同的大氣模型做比對。紅色線為與WASP-121b量測值最吻合的行星大氣模型、黃色線代表溫度為凱氏溫標2700K的黑體輻射、淺藍色線為M8型棕矮星的大氣模型、紫色線為L1型棕矮星的大氣模型。水汽特徵主要出現在1.45-1.7以及1.8-2.2毫米。在棕矮星呈現吸收譜線，但是在WASP-121b的大氣則出現水汽發射譜線，表示在WASP-121b的大氣中有平流層，且是以水汽為主。參考資料：（<http://www.nature.com/nature/journal/v548/n7665/full/nature23266.html>）

另一方面，隨著克卜勒衛星的發射及其在太空中累積數年的高精度光度觀測，天文學家們用凌日法發現越來越多類地行星。在不遠的將來，將有機會透過凌日法偵測類地系外行星的大氣。

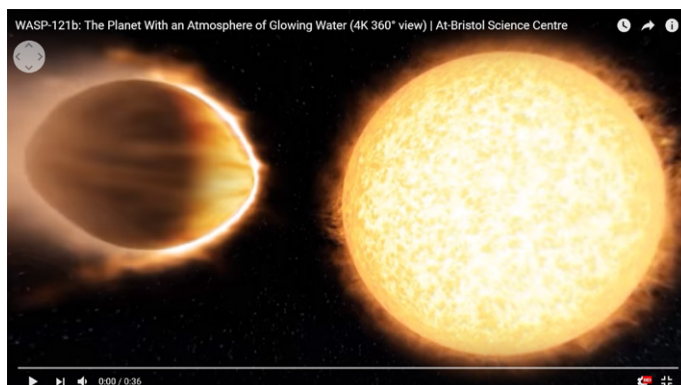
參考資料：

1. Thomas M. Evans et al. "An ultrahot gas-giant exoplanet with a stratosphere", 2017 Nature 548, 58-61

2. Kevin Heng, "Astronomy: Ozone-like layer in an exoplanet atmosphere", 2017 Nature 548, 38-40
3. <https://www.youtube.com/watch?v=fyMd-CJJqoo>

李見修：Subaru望遠鏡支援天文學家

YouTube相關影片：



WASP-121b: The Planet With an Atmosphere of Glowing Water (4K 360° view) | At-Bristol Science Centre

https://www.youtube.com/watch?time_continue=7&v=fyMd-CJJqoo