



## 遠離家園

### —尋找太陽系外行星

「我們是唯一的嗎？」一直是人類想盡辦法追尋，但是又難以短時間內解答的問題。天文學家認為，要回答這個問題，至少必須先瞭解本銀河系內有沒有類似太陽系的恆星與行星系統？如果有，有沒有可能發現類似地球大小，又與恆星距離適中，可能有液態水海洋的行星？想要回答這些問題，需要什麼方法呢？

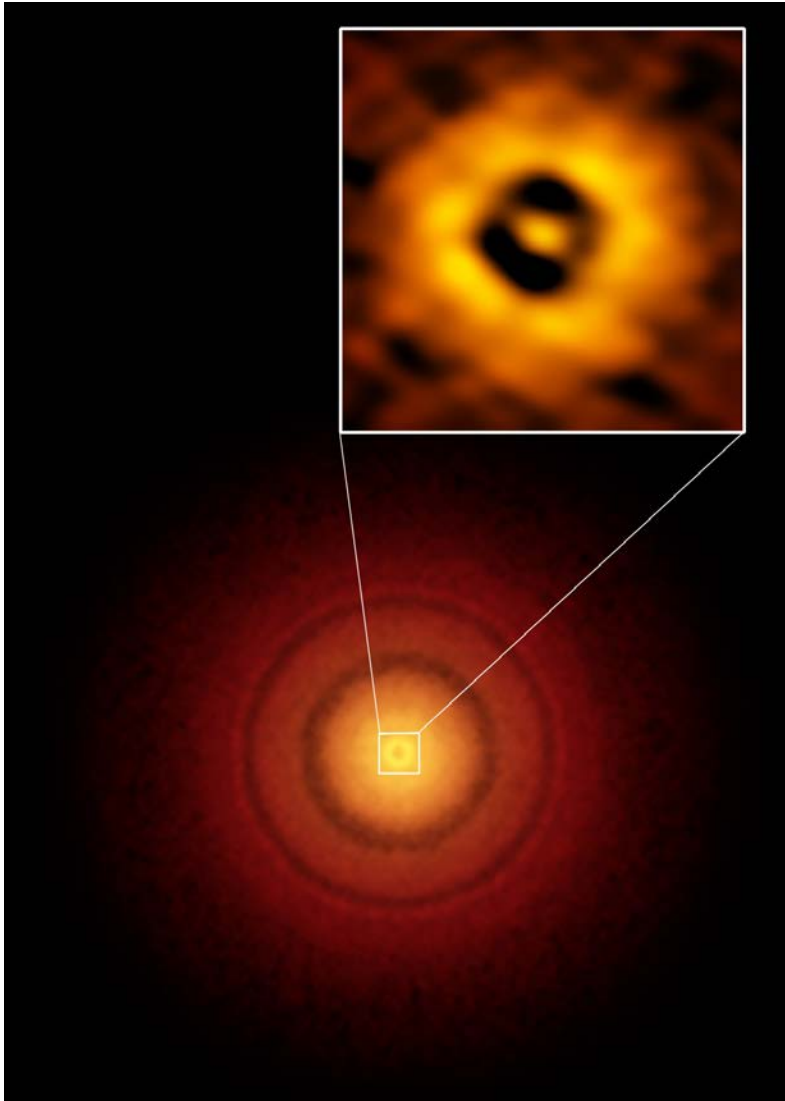
首先，我們想要直接找行星！天文學家嘗試直接照張恆星的照片，然後在恆星周圍找尋行星的蹤影。但是即使在照相時遮住恆星的光線，也只有比木星大上數倍，而且距離恆星夠遠的行星，才能被辨認出來，目前很難用這種方式找出類似地球的行星。後來天文學家反而利用行星比恆星暗很多的這項特性，當行星通過恆星前方，捕捉行星遮住恆星光芒造成恆星變暗的短短數分鐘，找到不少行星。效果如何？我們找到地球的近親嗎？我們讓本所專品高博士告訴大家。

如果找尋行星像是大海撈針，難以捉摸，有沒有可能用間接的方式，推測行星的存在？在我們的太陽系裡，有布滿小型天體的小行星帶與古柏帶。天文學家認為，這些小型天體很可能在太陽系形成過程中受到木星等大型氣體行星的重力擾動，互相碰撞碎裂，而無法形成類似地球的行星。雖然它們溫度不高，但是範圍廣大，紅外線太空望遠鏡甚至可以觀測到太陽系外其他恆星系統的類似結構。如何靠它們推斷行星的存在，請見本所訪問學者蘇玉玲博士的訪談記錄。

當然天文學家不為此滿足，甚至想要在行星還沒完全成形前就預測它們的存在。然而，此時的原始行星還被包裹在圍繞著恆星，布滿氣體與塵埃的盤狀結構內，無法直接被觀測到。所幸，我們可以根據行星的重力影響盤中物質的分布，讓這些氣體與塵埃發出的輻射，指引我們行星的方向。例如 2014 年阿塔卡瑪大型毫米與次毫米陣列 (ALMA) 觀測到金牛座 HL 星的塵埃盤有清晰的環狀間隙，以及本所顏士韋博士的最新研究，發現其氣體盤也具有與塵埃分布一致的間隙結構，更確認行星造成間隙結構的可能性。今年最新的 ALMA 影像，觀測距離約 175 光年遠的長蛇座 TW 星 (如下圖)。由於距離地球更近，我們得以看到離恆星只有約一天文單位的間隙，很有可能是由一個數倍地球質量的行星造成。

「我們找到第二個地球了嗎？」或許答案尚未明朗，但是我們藉由新近觀測與理論的指引，正朝著這條路上邁進！

(作者/劉君帆)



圖說：ALMA觀測到的長蛇座TW星的次毫米波影像，顯示塵埃的分布情況，為目前為止最清晰的恆星周圍塵埃盤圖像。環形間隙之處可能是年輕行星的形成場域。放大區域為中心間隙區域，與恆星的距離僅有約一天文單位，約為地球至太陽的距離。©S. Andrews (Harvard-Smithsonian CfA), ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)

## 發現第二個地球？

2015 年，當天文界歡慶發現第一顆環繞類似太陽恆星的系外行星的二十周年紀念時（此行星稱為飛馬座 51b，是一顆熱木星。有關於系外行星的科普故事，可參考本所的宇宙探險日誌部落格 <http://beholdtgsjinthuniverse.tumblr.com>），克卜勒 (Kepler) 太空望遠鏡的研究團隊興高采烈地對外宣布，他們首次發現一顆系外行星，不但環繞類似太陽的恆星，且地面溫度可能容許有海洋存在。這顆行星名為克卜勒 452b，半徑約為地球半徑的 1.6 倍，公轉週期約 384.8 天，母恆星質量和太陽相當，因此被稱作「第二個地球」。

### 行星凌現象

「第二個地球」是如何被發現的呢？當系外行星軌道平面和我們觀測的視線恰巧或幾乎平行的時候，只要行星運轉到我們和母恆星之間時，母恆星光度就會因行星遮掩而些微減弱，此天文現象稱為行星凌 (planet transit)。天文學家從減弱的光度估算行星的大小，並從行星凌的週期得知行星軌道的週期。克卜勒太空望遠鏡就是利用這種方法尋找系外行星，目前已發現超過一千多個行星，及四千多個疑似行星。

大多數情況下，從行星凌只能得知行星的大小，無法直接測量克卜勒 452b 的質量，因此不易確認它是否確實為行星。例如，當小恆星環繞大恆星的食變雙星，或是食變雙星和一顆恆星在視線上靠得很近的情況，或是一個白矮星凌一顆普通的恆星等等，都可能近似行星凌的現象。事實上，克卜勒 452b 早在 2014 年已被發現而成為疑似行星的一員。天文學家審慎地利用消去法一一排除上述非行星的可能性後，在今年接受它為一顆行星。

### 克卜勒 452b 的可能環境

克卜勒 452b 的半徑介於地球和海王星的半徑之間（海王星約地球 4 倍大），在系外行星的分類上屬於所謂的超級地球，但在太陽系並無類似行星可供比較。所以當

天文學家想要大膽宣稱這行星是「第二個地球」時，遭遇到了一個棘手問題：「它的內部結構和大氣成分到底是比較像地球，還是像海王星？」如果較像海王星，大氣就會充滿較濃厚的氫與氦，並包覆在冰和岩石所組成的中心核之上，與地球環境大不相同。根據加拿大籍美國天文學家羅傑斯（Leslie Rogers）統計估算，小於 1.6 地球半徑的系外行星大概都是岩石行星。這個結果使大小恰好為 1.6 地球半徑的克卜勒 452b 陷於尷尬的情況。嚴格來說，克卜勒 452b 約有 50~60% 的機率是岩石行星。

假設樂觀一點，將克卜勒 452b 視為具有海洋的「第二個地球」。但另一個問題出現了，克卜勒 452b 的母恆星質量雖和太陽差不多，但年齡比太陽（45 億年）大約多 15 億年。因為主星序的恆星會隨年齡增長而熱輻射增強，所以估計克卜勒 452b 目前所受到來自母恆星的輻射，比地球所受到的太陽輻射強約 10%。或許它的過去環境比較適合長期生命的演化，但現在它的海洋遭受較強的恆星輻射加熱而開始大量蒸發。蒸發的水汽是一種溫室氣體，所以它可能受到比目前地球更嚴重的暖化困擾。天文學家將液態水能在類地行星表面存在的軌道區帶稱為適居帶（habitable zone），其位置會隨母恆星的演化而變動。克卜勒 452b 目前可說位在適居帶的內側，在未來 20~30 億年內，它會隨著母恆星的輻射增強，表面溫度越來越高，海洋完全被蒸發，逐漸離開適居帶。

### 困難重重的驗證方法

以上所有對克卜勒 452b 的描述，完全根據它的半徑、所受的母恆星輻射、模型推論等，樂觀地認為它是「第二個地球」。但如何驗證它真的具有類似地球的環境？天文學家通常仰賴從天體發出的輻射，分析光譜來了解其成分和物理環境。但目前要直接觀測到來自系外行星的微弱輻射是非常困難的，因為行星輻射全被母恆星的光給吞噬掉了。因此，天文學家想出一種間接辦法以獲知行星的光譜。在行星凌發生時，母恆星的光會穿越行星大氣，部分的光被吸收後造成更多或更深的光譜線，從中可得知大氣成分，譬如氧氣、水汽、二氧化碳等。藉由這些成分，便能揣測該行星是否真的在適居帶，或進一步推斷是否有疑似生命的證據。天文學家已利用此觀測方法解析某些發生行星凌的類木系外行星大氣的成分。

不幸的是，此方法難以用於克卜勒 452b 的行星凌觀測上。主要原因是此行星系統離我們有 1400 光年之遙，母恆星光度相當黯淡，再加上它的行星凌減弱的光度不

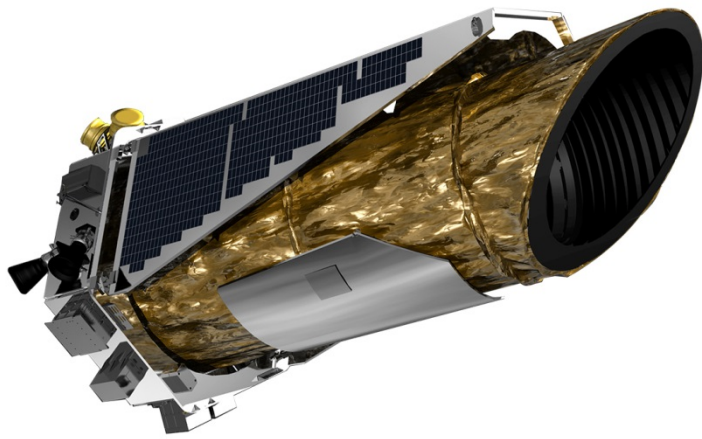
大，要從微弱的行星凌光譜中找尋被一層薄薄大氣吸收的光，無非難上加難。通常天文學家會利用多次的行星凌觀測以累積觀測數據，即累加星光的強度來增強信號。但對克卜勒 452b 而言，大約每 385 天才會行星凌一次，真的是太久了。即使在無雲無塵的理想環境下，使用哈柏或下一代的詹姆斯韋伯（JWST）太空望遠鏡（口徑較大集光力較強）觀測，也難以偵測其大氣成分。最著名的例子是，哈柏太空望遠鏡破紀錄地花 60 個飛行軌道的時間，觀測另一個超級地球 GJ 1214b 的行星凌光譜。GJ 1214b 約為 2.7 倍地球大小，距離我們僅約 42 光年，行星凌光譜變深程度也較大。即便如此，還是只得到一個沒有吸收譜線的平滑光譜！

### 開拓新探險方向

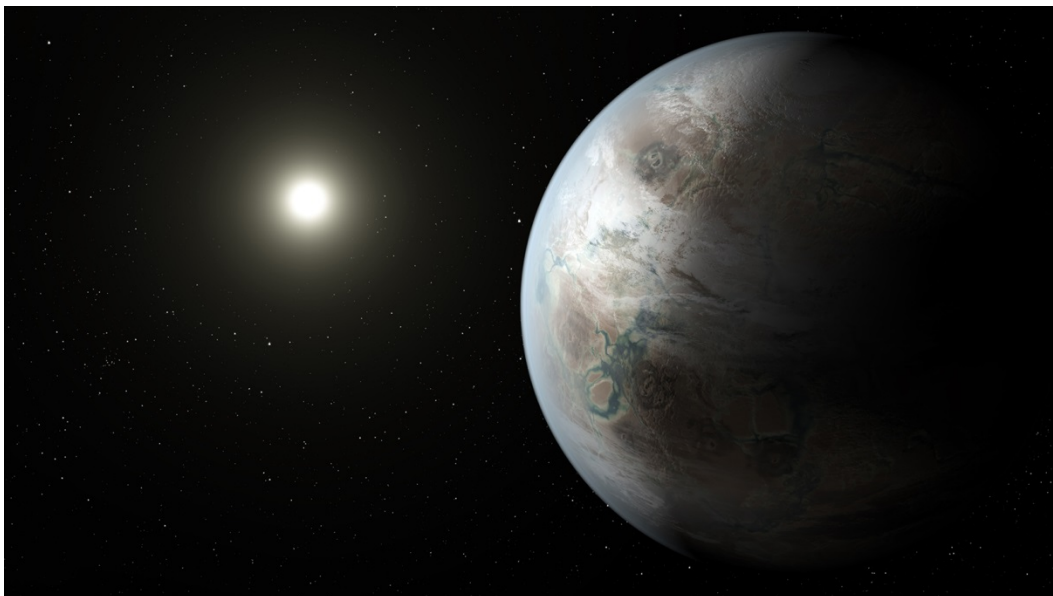
因為要證實「第二個地球」是如此困難，天文學家將以觀測太陽系附近的紅矮星（相當於較小而冷的太陽）的行星凌為主要方向。因紅矮星的數量極多，離太陽系較近的也較亮；半徑較小，所以行星凌的光度變化信號也較深；再加上適居帶軌道較小，行星凌的週期大約 20~40 天，可在短時間內累加數次行星凌光譜的信號，使得天文學家有更高的機率找到更多的類地行星。事實上，目前已發現了許多環繞紅矮星適居帶的超級地球。台灣也加入名為 SPIROU 的國際計劃 (<http://spirou.irap.omp.eu/Project>)，將從 2017 年起大量搜尋太陽系附近，環繞紅矮星的類地行星。如果天文學家夠成功地完成這一步，下一階段就是利用直接觀測行星的方法，類似過去已停止發展的類地行星尋找者（Terrestrial Planet Finder）和達爾文等太空望遠鏡計畫，或利用下一代 30 米以上的地面大型望遠鏡，利用日冕儀等裝置遮住強大母恆星的光，以觀測離太陽系較近，但類似克卜勒 452b 行星的微弱大氣光譜。

甫退休的克卜勒太空望遠鏡計畫主持人布洛克（William Borucki）於 2015 年榮獲邵逸夫天文獎。早在 1980 年代起，他就多次向 NASA 提出可觀測行星凌現象的太空望遠鏡提案以尋找第二個地球，但先前一直被認為不可行而遭拒。2015 年恰巧發現了克卜勒 452b，對他來講應是無比的欣慰。布洛克對他信念的堅持，就像 400 多年前克卜勒對行星運轉方式的堅持。這得來不易的科學結果將持續推動系外行星的研究，終究讓我們能夠回答人類對宇宙最基本且深層的問題：在宇宙中有第二個地球存在嗎？

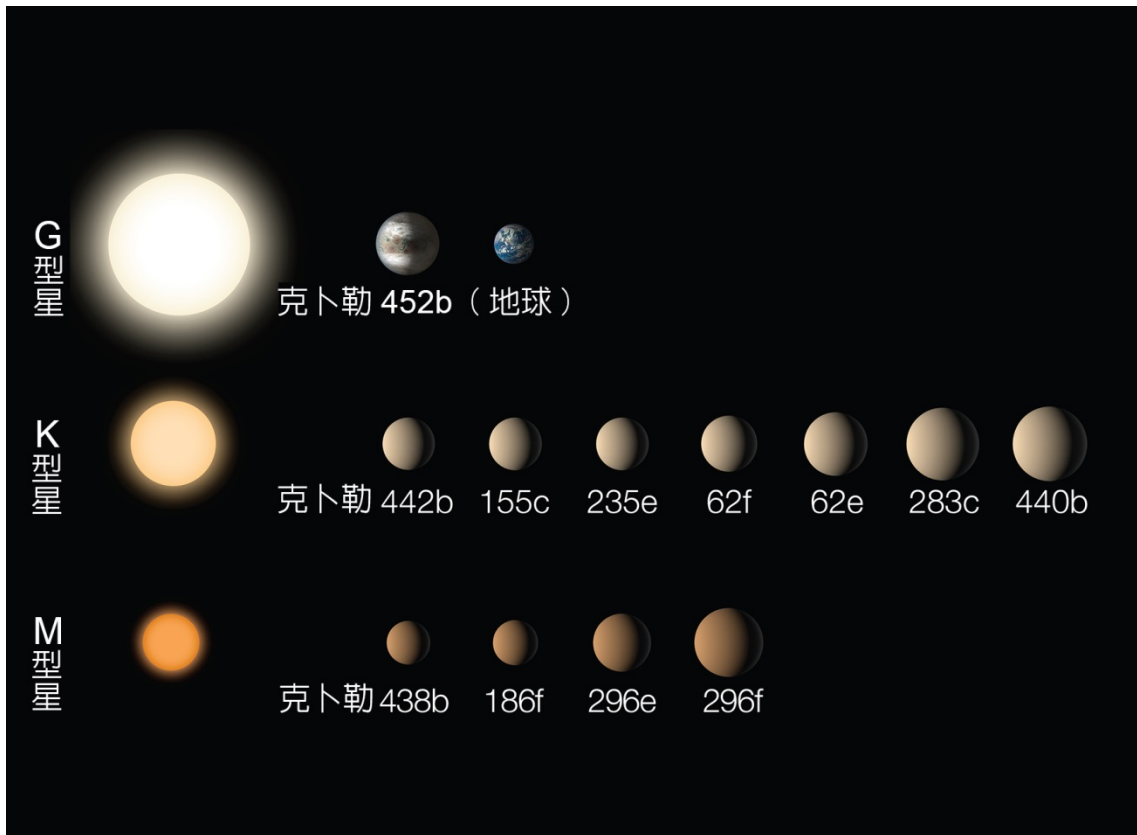
（作者/辜品高）



圖說：克卜勒太空望遠鏡 ©NASA Ames/JPL-Caltech/T Pyle



圖說：藝術家筆下的克卜勒452b。©ESO



圖說：截至2015年，克卜勒太空望遠鏡發現位於適居帶的行星，與地球做比較。  
 ©NASA Ames/JPL-CalTech/R. Hurt



圖說：藝術家想像圖，一些位於適居帶的系外行星。©PHL@UPR Arecibo (phl.upr.edu)



## 碎屑盤 — 擁有解開太陽系形成與演化秘密的天體

恆星形成過程中，由於角動量守恆，物質會形成一個盤面，在中間的原始恆星會藉由吸進盤面上的物質而變大，此時盤面上的物質有部分也會結合在一起而形成微行星（planetimals，大小約 1~10 公里左右），也就是原始類木行星與類地行星形成的基本素材。此時盤的主要成份為氣體，灰塵僅有大約 1%，稱為行星盤。等到恆星形成開始自行發亮之後就會有熱輻射把周遭的物質清掉，原始的行星盤就會消散。原本在行星盤內的微行星如果沒有繼續成為行星，此時會經過碰撞之後又從大變小。在這過程中類木行星的引力會在其中扮演一個催化碰撞的機制，提高它們碰撞的機率，當這些碎屑很多，形成一個盤面，就是碎屑盤（debris disks）。

小行星帶即是我們太陽系的一個碎屑盤，在地球上看到的黃道光（zodiacal light），就是小行星帶的灰塵反射太陽光。如果換用紅外線部分觀測的話，除了反射光之外因為灰塵也會吸收太陽光產生熱，因此自己會發出紅外線部分的光，這反而會很亮。太陽系的另一個碎屑盤是古柏帶天體，由於那邊的溫度較低，距離較遠，所以不容易觀測，但理論上也是一個碎屑盤。

碎屑盤是不斷演化的，剛開始會有很多微行星，碰撞的機會較大，產生很多灰塵碎屑，在紅外線比較亮。但之後許多小的灰塵被太陽或恆星的光壓吹到外圍去，灰塵會減少，因此就不會那麼亮，地球上還能看到黃道光是因為那距離我們近；至於古柏帶的溫度低，比較亮的部分屬於遠紅外線，再加上距離遠，我們並不容易觀測到那裡的訊息，只是早先航海家太空船出去的時候經過那邊所蒐集的訊息，知道那兒有灰塵，不過當時的資訊很有限。況且太陽系的碎屑盤已經經過 45 億年的演化，很多早期重要演化的證據都已經不存在，所以要研究太陽系碎屑盤詳細演化的過程就只能看別的不同年紀的恆星。

碎屑盤因為表面積大，同時比較強的波段在紅外線部分，而恆星比較強的波段是在可見光部分，因此只要選對波段，其實是容易觀測的，甚至會比一小點的行星還容易觀測。可以從觀測到的灰塵分佈去猜想，什麼樣的行星組合，會造成這樣的灰塵分佈。

比如說我們的太陽系構造是太陽在中心，然後是類地行星、小行星帶、類木行星、古柏帶天體，這邊有兩個碎屑盤，中間隔著類木行星。小行星帶（~3 天文單位）和古柏帶天體（~30 天文單位）有很大的空缺。如果我們看到其他恆星系統的碎屑盤也有兩個，那我們可以猜它們中心的空缺可能也跟太陽系一樣有幾顆類木行星。

基於紅外線的巡天計畫調查發現，靠近我們的恆星大約有 20% 有碎屑盤。這些多數都是類似古柏帶型的盤面，距離恆星較遠、較冷而且有較大的表面積。

科學家相信受限於現行探測器的靈敏度，這個數字應該只是一個下限，說不定實際情況比例會更高。至於類似小行星帶的盤面，由於比較靠近恆星主體及較小表面積，其存在性多半由間接證據推論，但先前史匹哲（Spitzer）太空望遠鏡的解析度還無法直接區分出來太陽系外的小行星帶與古柏帶。

然而藉由另一個較新的赫歇耳（Herschel）太空望遠鏡，觀察織女星與北落師門（Fomalhaut）是否有上面理論所推測的內外兩個碎屑盤，結果恰如預期。兩個系統的內盤都是 10 天文單位左右，外盤則是約 100 天文單位，比例為 1:10。因為這兩顆均為較早期的恆星，會更有效率地加熱碎屑盤當中的灰塵，所以與類似太陽型態恆星相同溫度的灰塵距離恆星較遠。

另一個有趣的研究，是 2009 年加拿大天文學家馬若士（Christian Marois）發現 HR8799 這顆恆星有 3 顆類木行星在旁邊環繞（稍後又確認還要再加一顆）。根據過去紅外天文衛星（InfraRed Astronomical Satellite, IRAS）的觀測，那顆恆星週圍有個盤面，但當時的解析力不夠，看不出是兩個。亞利桑納大學史都華天文臺（Steward Observatory at the University of Arizona）的蘇玉玲研究員利用史匹哲太空望遠鏡觀測，果然分析出預期的兩個盤面。更棒的是，那幾顆行星的軌道就在這兩個盤面的間隔當中，讓碎屑盤的理論獲得更好的支持。因此，太陽系外的碎屑盤與原生行星盤、太陽系的研究有很密切的關係。

（改編自 2014 年秋季號〈台北星空〉蘇玉玲博士專訪，採訪撰文范賢娟）



圖說：赫歇耳太空望遠鏡 ©ESA/AOES Medialab/NASA



圖說：從織女星的小行星帶看織女星的想像圖。©NASA/JPL-Caltech

## [研究發表]

### 宇宙中的麥田圈 — 揭秘原行星盤氣體環狀間隙

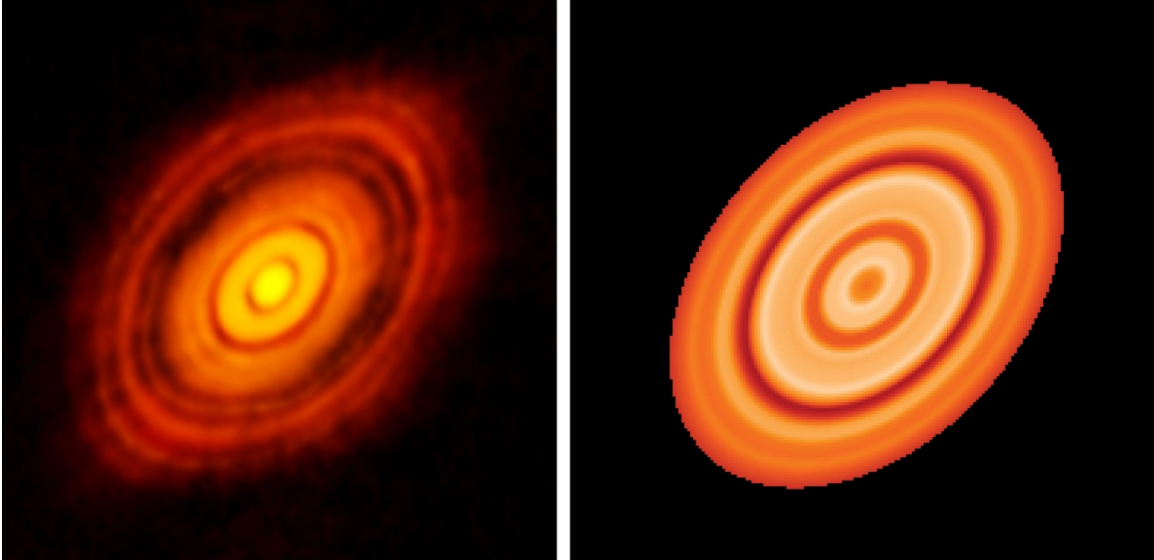
本所研究團隊使用阿塔卡瑪大型毫米及次毫米波陣列 (ALMA) 取得原行星盤分子譜線最佳影像，首度揭露金牛座 HL 星原行星盤上的氣體環和環狀間隙，能更直接的推測行星質量，獲知該正在形成行星質量可能與木星一樣大。本研究結果提供了行星形成時間及行星形成標準模型重要參考。

ALMA 曾於 2014 年年底對金牛座 HL 星進行長基線觀測，並於 2015 年三月向全球發表了解析力為 0.03 至 0.07 角秒的連續譜影像。毫米及次毫米波的連續譜追蹤的是原行星盤上塵埃的分佈，ALMA 高解析力的影像顯示了金牛座 HL 星的原行星盤有著一圈圈的塵埃環和間隙，認為是行星正在形成的證據。然而，顏士韋博士表示：「原行星盤的主要成分是氣體，塵埃只貢獻了原行星盤中百分之一左右的質量。」要完整敘述原行星盤上發生什麼事，如果只看塵埃而不知氣體狀況如何，就如同見樹不見林，因此本次研究成果，能幫助正確解讀金牛座 HL 星原行星盤。

無論是要確切了解行星是否正在金牛座 HL 星周圍形成，或要推測行星的質量，都需要極高解析力的分子譜線影像，用來追蹤氣體的分佈。ALMA 長基線觀測資料公開後，本所研究團隊進一步處理及分析觀測數據，成功重建高解析力的 HCO<sup>+</sup> 影像。重建出的影像解析力高達到 0.07 角秒，是目前原行星盤的分子譜線影像中最好的。研究團隊發現金牛座 HL 星原行星盤的氣體分佈有兩圈間隙，且氣體和塵埃間隙的位置相吻合。如果之前發現的塵埃間隙是由行星形成所造成，理論預期在一樣的位置應該也會有氣體間隙，因此，本所研究團隊的發現更加支持了行星正在金牛座 HL 星周圍形成。

此外，透過量測氣體間隙的寬度和深度，可以計算推測行星的質量。研究結果顯示，正在形成的行星其質量約和木星一樣大。如果觀測到的氣體間隙確實是由行星所造成，行星形成的時間就比預期的早很多，需要對標準模型進行修正或是建立新的行星形成理論。

(作者/顏士韋)



圖說：2014 年 ALMA 取回行星誕生現場的第一手照片，顯示金牛座 HL 星原行星盤高解析度圖像（左圖），實現建造 ALMA 的一大願景。圖中的暗隙究竟是不是真的有行星正在形成？如果是，那是個怎樣的行星？我們能知道它的質量和特性嗎？本所顏士韋博士主導的研究，經由氣體環間隙圖的重建（右圖），為這些問題取得了更精確可靠的詮釋。©ALMA(ESO/NAOJ/NRAO)、顏士韋/中研院天文所



圖說：座落於智利高原的阿塔卡瑪大型毫米及次毫米波陣列（ALMA）。©ALMA (ESO/NAOJ/NRAO), C. Padilla

## 編輯資訊

發行人 | 朱有花

執行主編 | 周美吟

美術編輯 | 蔡殷智

執行編輯 | 曾耀寰、劉君帆、蔣龍毅

底圖版權聲明 | 藝術家眼中的年輕恆星與原行星盤，經影像處理而成。

原圖版權©ESO/L. Calçada

發行單位 | 中央研究院天文及天文物理研究所

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)2366-5389

電子信箱 | epo@asiaa.sinica.edu.tw

天聞季報版權所有 | 中研院天文所

ISSN 2311-7281 GPN 2009905151

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，有機會在天文季報上刊登喔！