

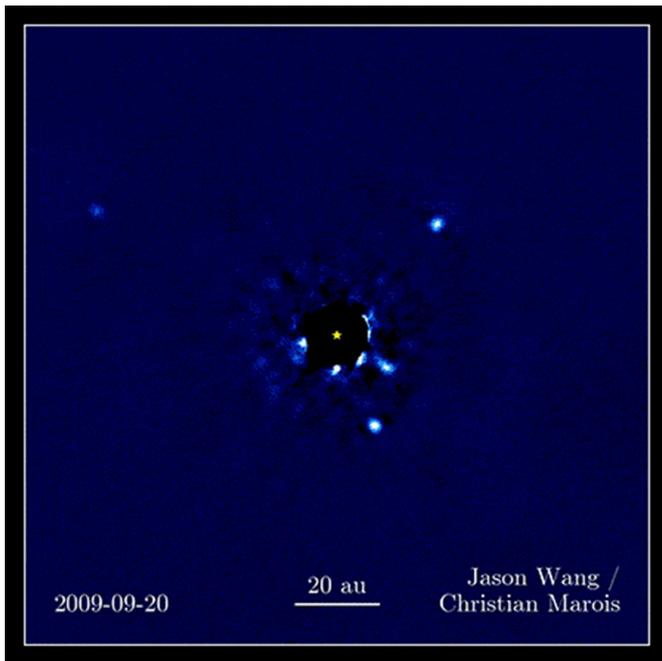
文/ 李見修

# 太陽重力透鏡計畫 為系外行星拍攝高畫質的影像

尋找太陽系以外的行星系統，特別是找到適宜生命形成的系外行星，以及探索上面是否有生命的存在，一直是天文學家追求的目標。自1995年起，天文學家透過不同的觀測方法，像是透過光譜觀察恆星週期性的徑向速度變化，或是當系外行星凌日時所造成的恆星光度變化等等，不斷發現新的系外行星。但這些都只是間接的方式。

一直到十多年後，由加拿大天文學家克里斯汀·馬華（Christian Marois）所帶領的團隊，結合了夏威夷毛納基峰上的凱克以及雙子星望遠鏡，對HR 8799這顆恆星進行長時間且高解析度的觀測，人們才首次直接目睹了（四顆）系外行星。直接觀測也提供其他間接方法所沒有的優勢，像是我們能夠直接取得系外行星的光譜。而直接觀測到的這些系外行星們也帶給天文學家許多驚喜。像是早期技術未臻成熟，我們只能直接觀測到離主星較遠的系外行星。這些系外行星離主星有數百至數千個天文單位。在這麼遠的距離，原行星盤無法提供足夠的物質形成行星，因此對行星形成理論帶來很大的挑戰。

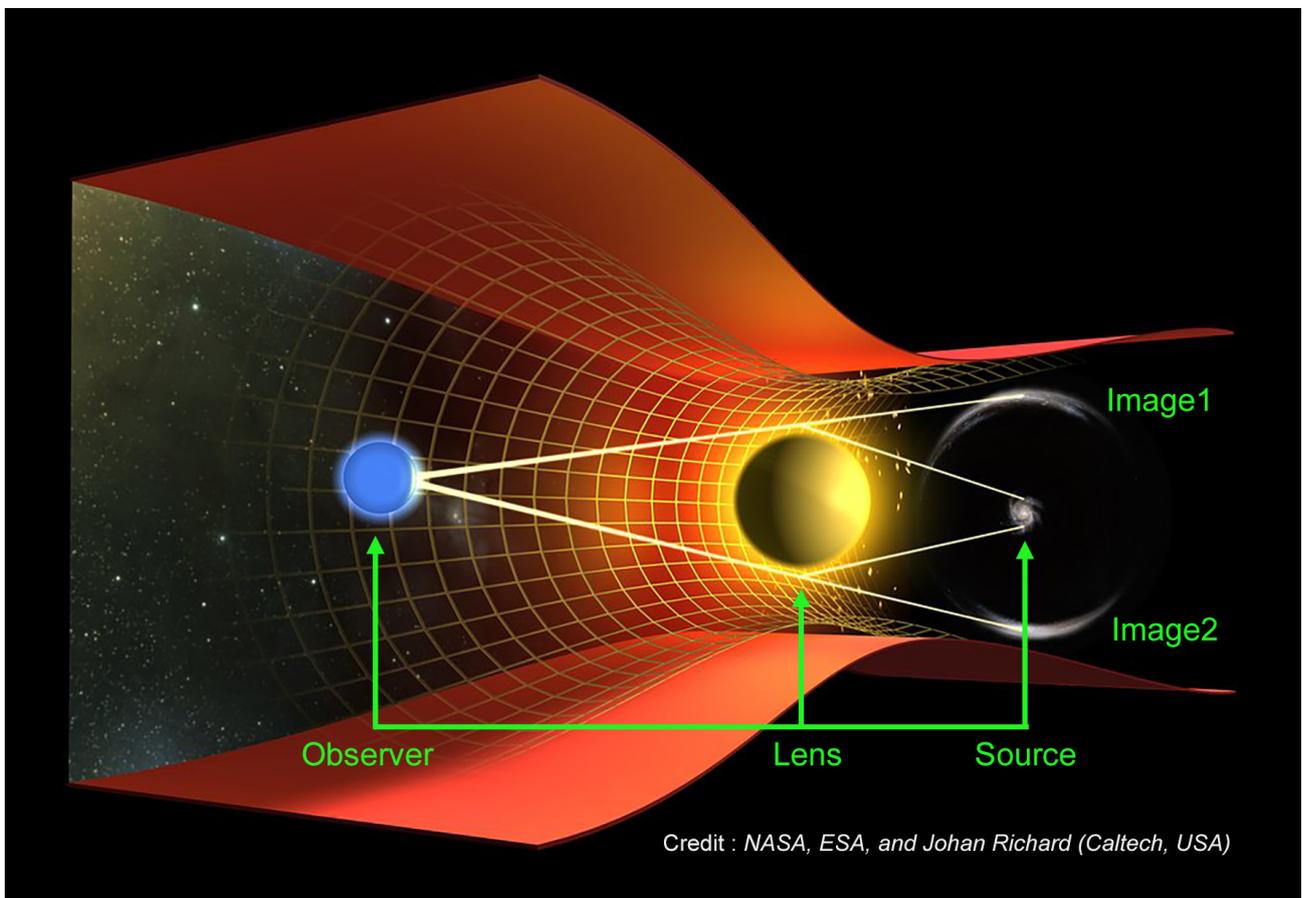
即便我們能直接觀測到這些系外行星，現在最尖端的天文相機所能記錄的也僅僅是一個小小的亮點。無法看清楚系外行星上的山川地貌，更遑論系外生命所留下的足跡了。那麼，有沒有辦法能讓系外行星的影像再放大些，讓我們看得更清楚呢？



圖一、HR 8799行星系統的影像。正中央為主星所在的位置。系外行星相較主星黯淡許多（數萬倍），因此在觀測時，我們會使用日冕儀將遮蓋來自主星的光，以方便觀測系外行星。©. Jason Wang / Christian Marois。

## 用太陽當透鏡

為此，科學家想到一個不太一樣的透鏡：太陽。這個透鏡不是由玻璃做成的，而是由重力做成的！根據愛因斯坦的廣義相對論，物體所產生的重力場會造成時空彎曲，當遠方天體的光行經這個彎曲的重力場，便會被聚焦，即所謂的重力透鏡效應。物體質量越大，重力場及其所造成的時空彎曲也越大。舉例來說，如果是星系等級的物體作為重力透鏡，我們將會看到它將遠方的天體變成多重影像。而如果觀測者（在地球上的我們）、重力透鏡、以及遠方的天體完美的排列在一條直線上，那麼遠方的天體將會被重力透鏡形成一個圓



圖二、重力透鏡示意圖。©. NASA / ESA / Johan Richard。

環的形狀。為了紀念發明相對論的愛因斯坦，科學家們將這個圓環稱為愛因斯坦環。

那麼，太陽作為透鏡，焦點又在哪裡呢？根據推算，太陽重力透鏡的焦點約為550天文單位。如果以太陽系內的行星作為比例尺的話，這個距離大約是古柏帶（30-50天文單位）及冥王星軌道（40天文單位）的十倍有餘。不過相較於太陽系的邊緣—歐特雲（10萬天文單位）來說則小得多。

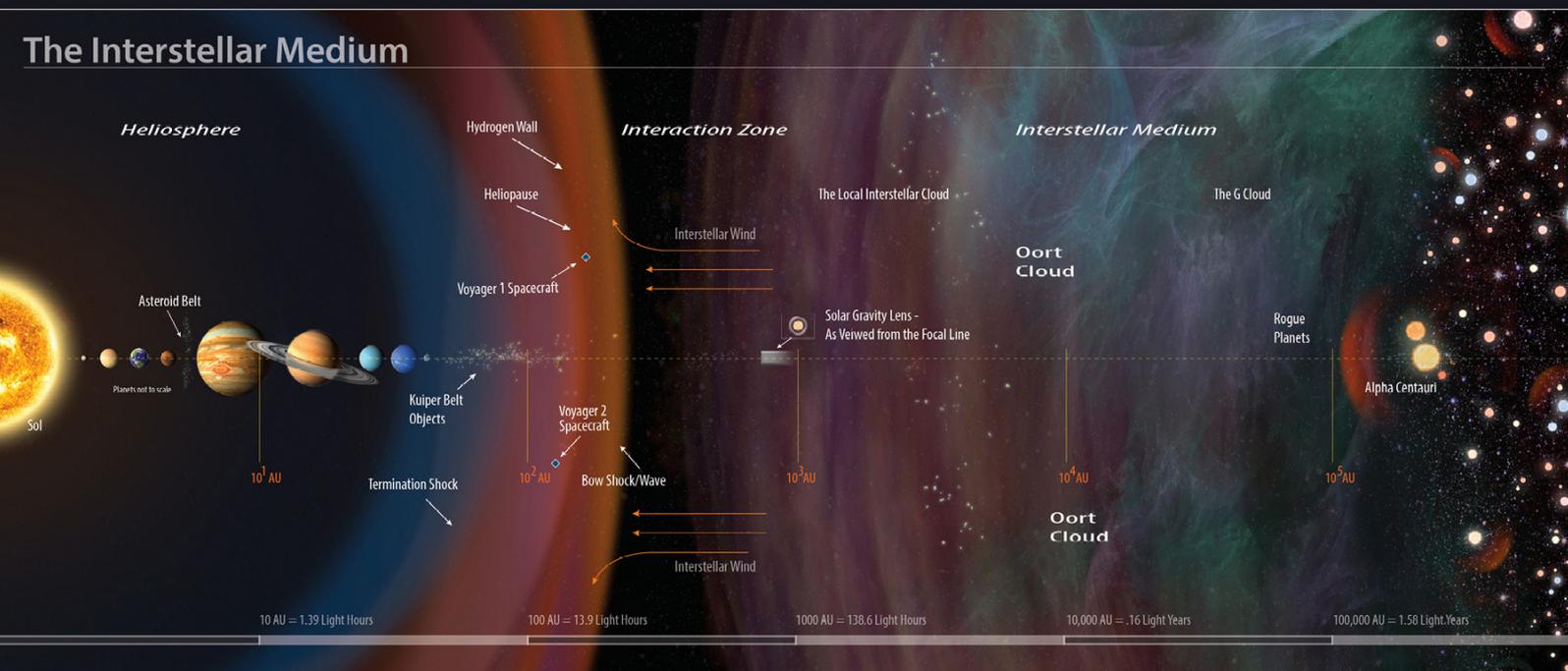
當我們以太陽作為透鏡時，將可把距離太陽100光年外、地球大小的系外行星聚焦為直徑1公里、長1公里的愛因

斯坦環。假設我們把一座口徑1公尺的太空望遠鏡放到太陽透鏡的焦點（550天文單位），那麼我們便能將這個系外行星的愛因斯坦環解析成1000x1000畫素的影像，遠勝目前直接觀測法影像裡的一個小小亮點。但是要取得這1000x1000個畫素，這座1公尺口徑的太空望遠鏡需要掃描完全部1公里x1公里的愛因斯坦環，整個過程將耗時兩個月！而在掃描完之後，科學家們更需要透過精確的計算，將這1百萬畫素從環狀結構還原成系外行星本來的樣子！

但這些都不是最困難的。真正的挑戰是，如何將一座1公尺的太空望遠鏡放到離太陽550天

文單位的地方、同時維持良好的通訊？做為參考，目前距離我們最遠的航海家一號，在歷經四十年的飛行後，正抵達離太陽140天文單位的距離，且仍舊與地球上的科學家保持通訊。這讓科學家有信心，即使到了數百天文單位的距離，仍能有效地控制太空望遠鏡。而為了能在最短時間內達到550天文單位，除了靠太空望遠鏡本身的推進燃料之外，科學家們更想出一個辦法，借助木星及太陽的重力拋射而出，達到每年15-20天文單位的航行速度，得以在40年內將太空望遠鏡送達太陽重力透鏡的焦點。

## The Interstellar Medium



圖三、星際空間示意圖，距離以對數尺度標示（非線性尺度）。太陽在最左邊，往右依序是太陽系內的行星們、古柏帶、歐特雲。圖片最右邊是離我們最近的恆星南門二。太陽重力透鏡的焦點（550AU）在此圖的正中央。

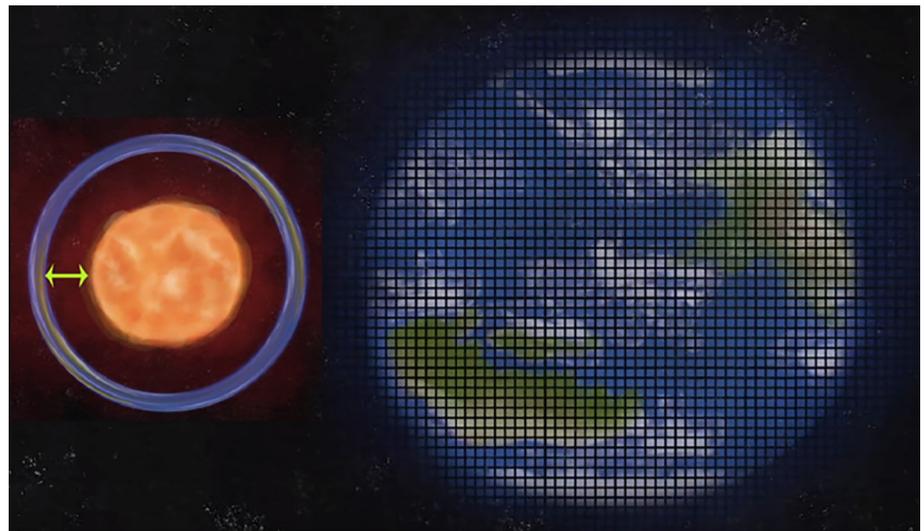
©. Charles Carter / Keck Institute for Space Studies

太陽重力透鏡計畫目前由加州理工學院/噴射推進實驗室的斯拉伐圖里雪夫主導，近期剛完成第一階段的任務可行性報告，並交由美國航太總署評估。希望在不久的將來，可以看到任務成行，讓我們為系外行星拍攝一張高畫質的照片！

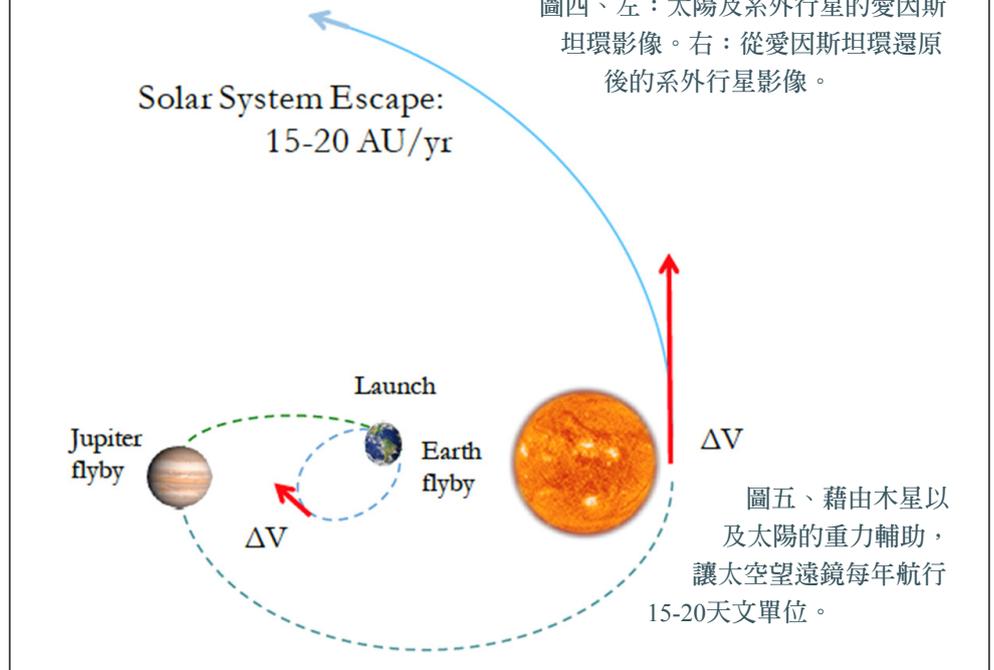
參考資料：

Slava G. Turyshev, Michael Shao, Leon Alkalai et al. (2018), "Direct Multipixel Imaging and Spectroscopy of an Exoplanet with a Solar Gravity Lens Mission", arXiv:1802.08421

李見修：Subaru望遠鏡支援天文學家



圖四、左：太陽及系外行星的愛因斯坦環影像。右：從愛因斯坦環還原後的系外行星影像。



圖五、藉由木星以及太陽的重力輔助，讓太空望遠鏡每年航行15-20天文單位。

相關YouTube影片：



Imaging Exoplanets with the Solar Gravitational Lens

<https://youtu.be/Hjaj-Ig9jBs>



Direct imaging of four planets orbiting the star HR 8799

<https://www.youtube.com/watch?v=GVOSSVHwWMU>