

文／林建爭

在智利阿塔卡馬沙漠海拔約2,600公尺的帕拉納山頂（Cerro Paranal），歐南天文臺（ESO）的甚大望遠鏡干涉儀（Very Large Telescope Interferometer，簡稱VLTI）傲然矗立，如下圖，它們是世界上最先進的光學望遠鏡之一。自啓用至今，甚大望遠鏡干涉儀不僅是天文研究的先鋒，也持續透過技術革新拓展我們對宇宙的視野。然而，即使是如此強大的望遠鏡，觀測遙遠宇宙仍面臨一個巨大的挑戰：地球大氣層的擾動。現在，甚大望遠鏡干涉儀正迎來一次劃時代的升級：GRAVITY+計畫，將在人類探索宇宙的旅程中再跨出關鍵一步。



歐南天文臺甚大望遠鏡在帕拉納山美麗的暮色中的樣子。影像來源：ESO

就像湖面上的漣漪會扭曲水下物體的影像一樣，地球大氣層中的氣流和溫度變化，會使來自遙遠恆星的光線發生扭曲和模糊。這就是為什麼我們

看到的星星總是在「閃爍」。為了消除這種干擾，天文學家們開發了一種「黑科技」：自適應光學（Adaptive Optics，簡稱AO）系統。

什麼是自適應光學？

簡單來說，自適應光學系統就像是望遠鏡的「神經中樞」，它能即時檢測並修正大氣層造成的扭曲。它主要由三部分組成：

- ①**波前感測器 (Wavefront Sensor)**：用來測量進入望遠鏡的光線扭曲程度。
- ②**變形鏡 (Deformable Mirror)**：一個能迅速改變形狀的鏡子，用來修正光線的扭曲。
- ③**即時電腦 (Real-Time Computer)**：用來快速處理感測器的數據，並指揮變形鏡做出精確的調整。

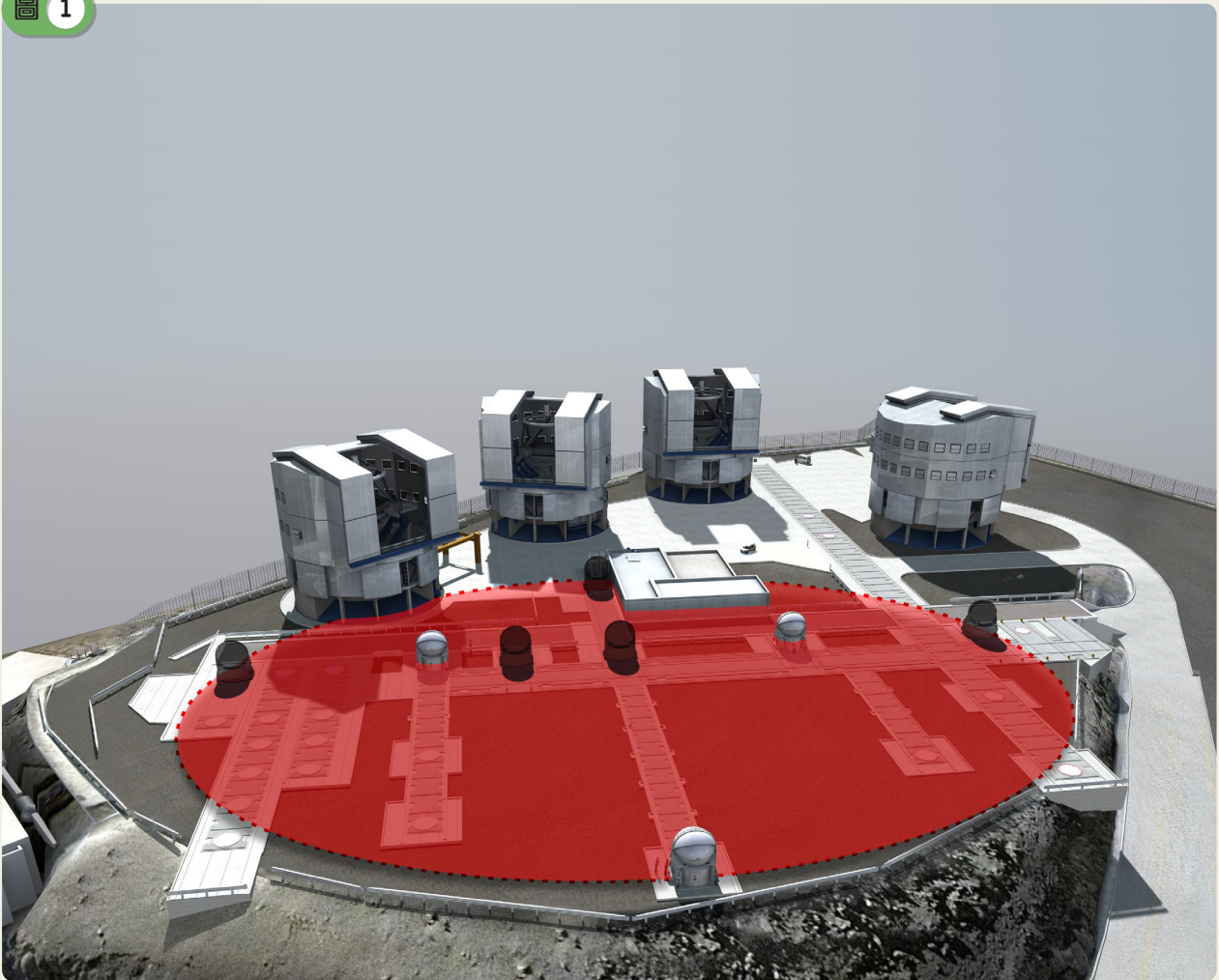
透過這個系統，望遠鏡能夠在每秒數千次的頻

率下，不斷地修正光線，讓最終的影像變得無比清晰。這項技術在甚大望遠鏡干涉儀上尤為重要，因為它能夠將多個望遠鏡的光線精準地結合，以達到超乎想像的解析度。

干涉儀的奧秘：多眼合一

一般望遠鏡的解析力受到鏡面大小限制，但甚大望遠鏡 (VLT) 採取了不同的策略：甚大望遠鏡干涉儀是一種把多臺望遠鏡的光線結合在一起的技術，利用光學干涉測量法，能模擬出直徑超過百公尺的「巨型虛擬望遠鏡」，如圖1。然而，要讓不同望遠鏡的光線精準重疊，需要克服大氣擾動與光程延遲的挑戰，難度極高。

圖 1



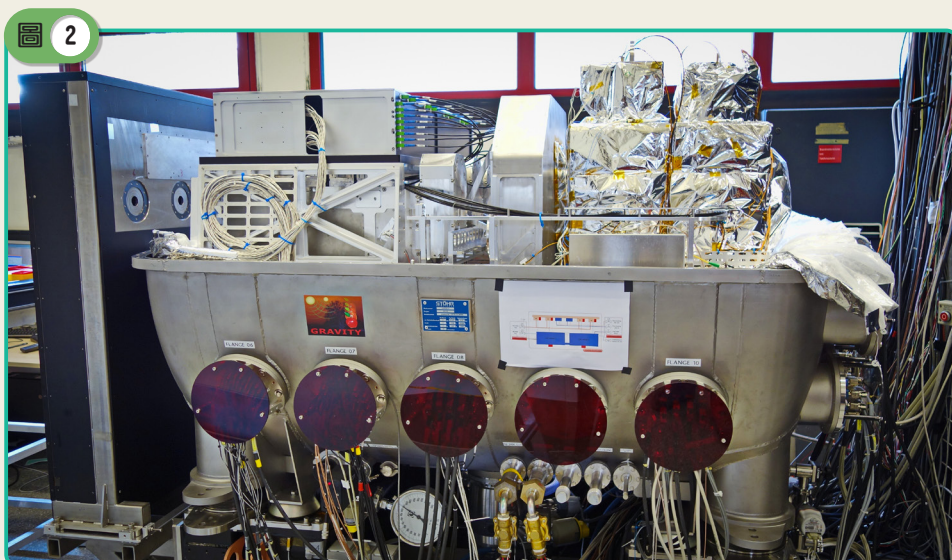
後方四座8.2公尺望遠鏡由左至右分別是「太陽」(Antu)、「月亮」(Kueyen)、「南十字」(Melipal)及「金星」(Yepun)，前方四座1.8公尺輔助望遠鏡可以在此平臺上移動到30個不同的位置，最大可以組成一座直徑相當於200公尺的虛擬望遠鏡。圖片來源：ESO

GRAVITY+ 的「神之眼」 極致自適應光學

在甚大望遠鏡干涉儀的核心，有一個名為 GRAVITY 的儀器，如圖2，用來收集不同望遠鏡的光線並重疊一起，它已經為我們帶來了諸多驚人發現，例如確認銀河系中心黑洞的存在，如圖3，相關新聞請參見《臺北星空108期》天文新聞追蹤報導，以及精確測量系外行星的軌道。而現在，一個名為 GRAVITY+ 的重大升級計畫正在進行中，其中最核心的部分就是 GRAVITY+ 自適應光學（GRAVITY Plus Adaptive Optics，簡稱 GPAO）系統。

GPAO 的目標是將甚大望遠鏡干涉儀的性能推向極致，顯著提升其敏感度、天空覆蓋率和高對比度觀測能力。過去的自適應光學系統，需要明亮導引星來測量大氣擾動。但宇宙中並非所有區域都有明亮的恆星。GPAO 解決了這個問題，它引入了雷射導星系統（Laser Guide Star System，簡稱 LGS），如圖4、圖5。

這個系統會在望遠鏡進行干涉觀測時，同時將強力的雷射光束打向高層大氣，激發鈉原子發光，從而創造出一個「人造導引星」。這使得即使在沒有明亮恆星的宇宙區域，也能進行高精確度的觀測。



GRAVITY 是甚大望遠鏡干涉儀第二代的干涉集光儀器，2015年7月在帕拉納天文臺安裝測試。影像來源：ESO



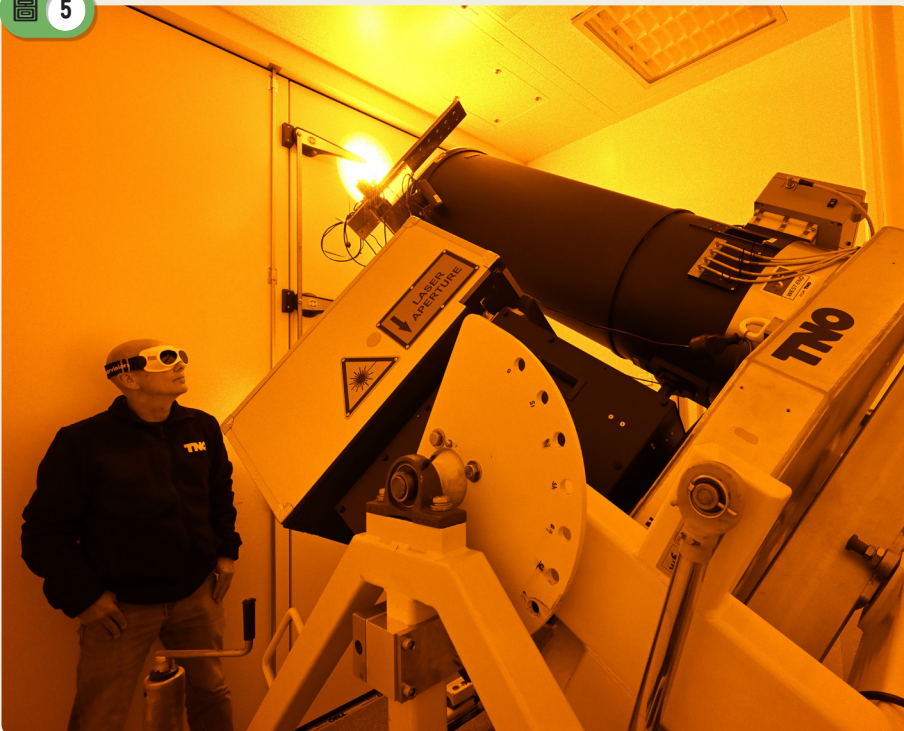
甚大望遠鏡干涉儀的 GRAVITY 儀器捕捉到恆星近距離環繞銀河系中心黑洞 Sgr A* 的軌跡，並首次發現新恆星 S300。圖片來源：ESO

4



GRAVITY+儀器整合4臺甚大望遠鏡同時用雷射導星的概念圖。圖片來源：ESO

5



GRAVITY+用於導星的雷射發射器。圖片來源：ESO

突破極限 實現新科學

GPAO系統的強大性能在實際觀測中得到了驗證。在測試階段，它成功觀測了多個代表性的天體，包括宇宙最亮類星體（J0529-4351，紅移值4）：它為我們提供了一種全新的、直接測量遙遠超大質量黑洞質量的方法。系外行星（HR 8799）：GPAO系統的高對比度能力，讓天文學家能夠更精確地觀測到系外行星，如圖6。另外還有解析出年輕恆星金牛座T型星（HL Tau）這樣年輕恆星周圍的盤狀結構。這些初步的觀測結果證明了GPAO系統帶來的巨大潛力，它不僅提升了現有儀器的能力，更開啓了全新的研究領域。

望遠鏡的未來

GPAO系統的成功，代表著天文學進入了一個新紀元。它不僅是望遠鏡技術的又一次飛躍，更為我們打開了一扇通往宇宙深處的窗戶。未來，科學家們將繼續探索這項技術的潛力，例如將其應用於更短波長的觀測，並結合其他先進技術，以達到前所未有的解析度。這項技術，讓甚大望遠鏡開啓了「新視界」，引領我們更深入地探索宇宙的奧秘。

參考資料：

<https://arxiv.org/abs/2509.21431>

<https://www.eso.org/public/blog/gravity-leap-vlti/>

<https://phys.org/news/2025-09-exomoons-host-planet.html>

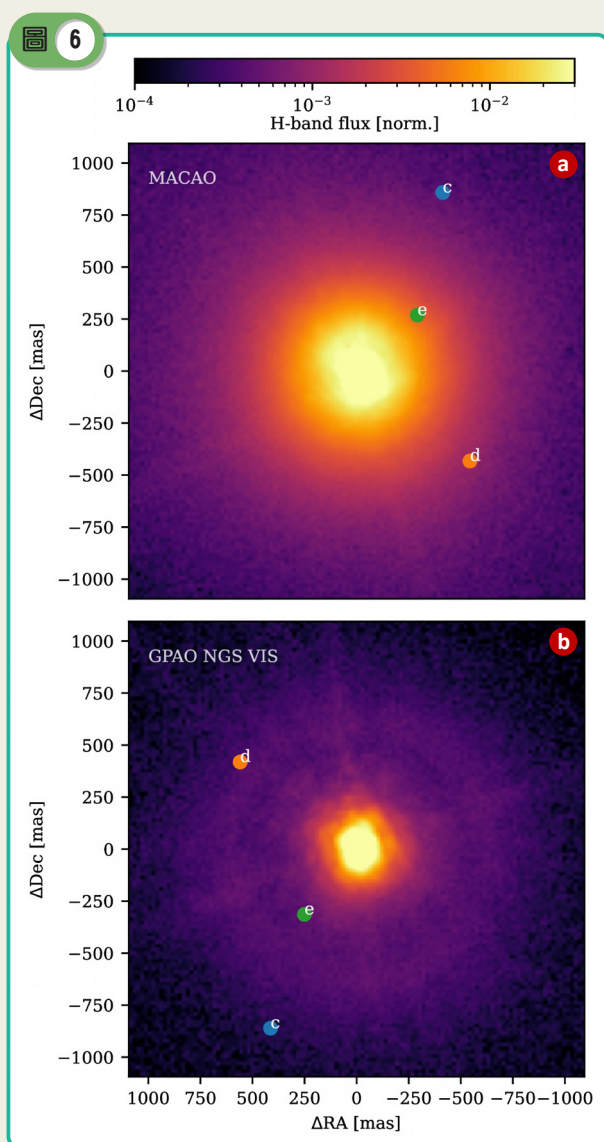
YouTube 相關影片：

Zooming into Sagittarius A*

<https://www.youtube.com/watch?v=DRCD-zx5QFA>

Animation of the path that an incoming light ray traces through the GRAVITY instrument

<https://www.youtube.com/watch?v=Zc2oMnTB08E>



a 使用舊版自適應光學系統觀測時，恆星HR 8799周圍達到飽和，形成一個強烈的光暈。**b** 使用GPAO觀測時，恆星的光暈得到顯著抑制，呈現出更清晰、更集中的影像。影像來源：<https://arxiv.org/abs/2509.21431> 的圖10

林建爭：美國夏威夷大學天文研所泛星計畫博士後研究員

王品方：美國夏威夷專案文物修復師 校稿