

觀測銀河系中心的利器 光學干涉望遠鏡

今年5月12日，事件視界望遠鏡計畫（Event Horizon Telescope，EHT）再度公布黑洞影像，與2019年M87*不同的是，這次的黑洞影像是在我們銀河系中心的超大質量黑洞人馬座A星（Sgr A*）。

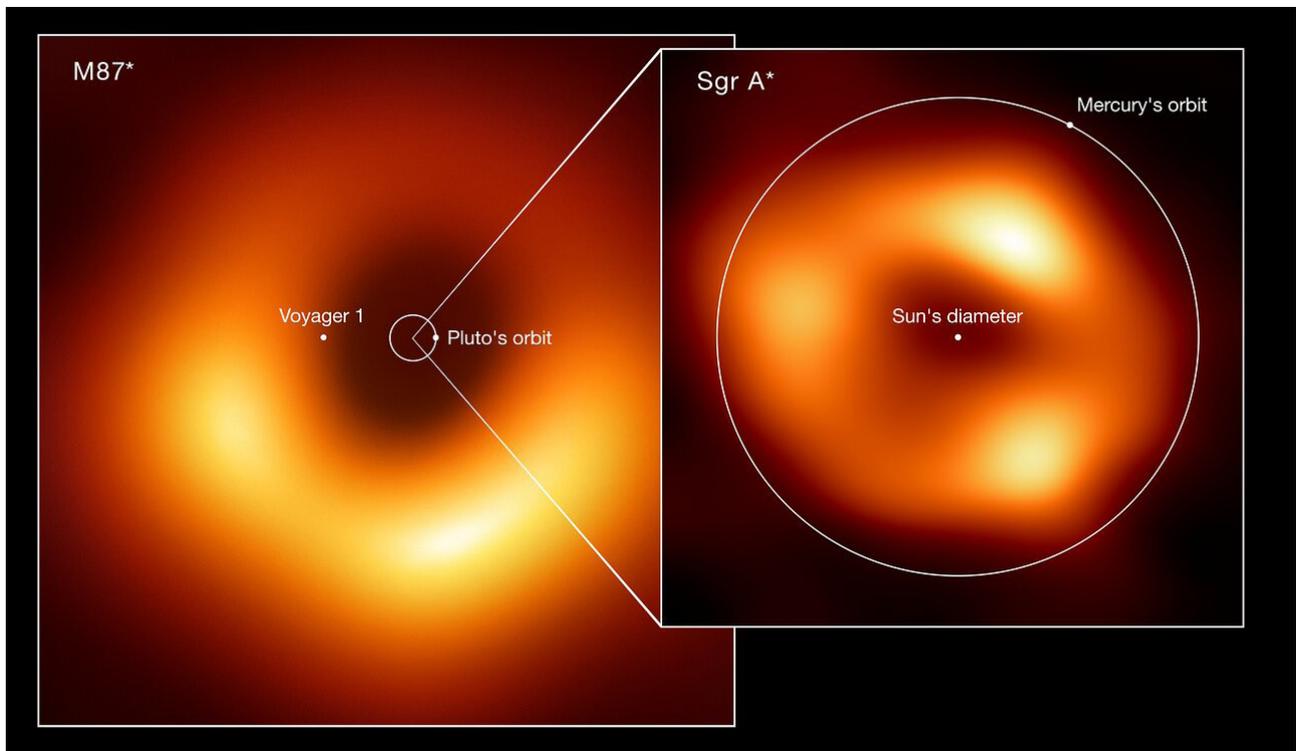


圖1. 事件視界望遠鏡拍攝的兩個黑洞的大小比較：左圖M87*，位於M87星系中心，以及右圖 Sgr A*，位於銀河系中心。白圈是太陽系中冥王星（左）和水星（右）的軌道與黑洞大小的比較，其中太陽的直徑（右）和距離地球最遠的航海者1號太空船（左）的當前位置。圖片來源：ESO

今年5月12日，事件視界望遠鏡計畫（Event Horizon Telescope，EHT）再度公布黑洞影像，與2019年M87*不同的是，這次的黑洞影像是在我們銀河系中心的超大質量黑洞人馬座A星（Sgr A*）。M87*距離我們約5,500萬光年，是已知最大的黑洞之一，質量大約是太陽的65

億倍重。Sgr A* 距離我們約2萬7,000光年，質量大約是太陽的430萬倍重。雖然M87*比Sgr A*重約1,500多倍，不過由於它們與地球的距離不同，因此兩個黑洞在天空的張角大小差不多約 0.1 毫角秒（圖1），這些黑洞影像是經由全球八座電波望遠鏡連線成一座與地球一樣大的虛

擬望遠鏡所拍攝（圖2）。由於地球至銀河系中心之間有許多塵埃，因此天文學家只能選擇比塵埃（0.1微米）大的波段來觀測銀河系中心，不過除了電波的毫米、次毫米波段之外，光學的紅外光（2 微米）也是天文學家們拿來觀測銀河系中心的波段之一。



圖2. 事件視界望遠鏡陣列於2017年由八座望遠鏡組成。自2017年運行以來，觀測了兩個黑洞並產出第一張位於 M87 星系中心的黑洞影像，以及第一張位於銀河系中心的黑洞人馬座 A 星的影像。圖片來源：The University of Arizona

光學干涉與電波干涉的原理相同，基本上就是使用兩座或多座望遠鏡組成一座虛擬望遠鏡，望遠鏡相距越遠，表示虛擬望遠鏡的口徑越大，因此解析力也就越高。當這些望遠鏡同時觀測同一目標，將觀測的影像兩兩重合，影像會彼此干涉而形成條紋，天文學家們藉由研究這些干涉條紋的形狀與特徵，便能重建出此目標，比單個望遠鏡觀測要來的更精細的結構。

位於智利北部帕拉納山（Cerro Paranal，高2,635公尺）上的天文臺，有四座直徑8.2公尺的光學望遠鏡於2000年落成，他們的名字

為馬普切語（Mapuche）中的「太陽」（Antu）、「月亮」（Kueyen）、「南十字」（Melipal）及「金星」（Yepun），總稱為甚大望遠鏡（Very Large Telescope，VLT）。之後2006年歐洲南方天文臺在甚大望遠鏡旁另外新建四座直徑1.8公尺的輔助望遠鏡，它們與四座8.2公尺望遠鏡共同組成甚大望遠鏡干涉儀（Very Large Telescope Interferometer，VLTI）最大可以組成相當於口徑200公尺的虛擬望遠鏡（圖3），從此開啓了南天的光學干涉望遠鏡時代。

光學干涉除了必需的望遠鏡

之外，最重要的是後端能將光束疊合的各項儀器。VLTI最初的干涉光接收儀MIDI同時只能收集兩組成對望遠鏡的光束，接著安裝新型的干涉光接收儀AMBER能夠同時收集三組兩兩成對的望遠鏡光束，使干涉影像得以完整重建（圖4），而這樣的虛擬望遠鏡能比哈伯太空望遠鏡在相同波長下所看到的影像還要精細約50倍，也相當於能從地面上解析出太空站裡的一根螺絲釘大小。不過直到干涉光接收儀PIONIER的建置後，VLTI才是真正的完成體。如果我們拿音樂來類比：觀測目標代表完整的曲子，每兩座望遠鏡連成的基線代表組成樂曲的一個音符。我

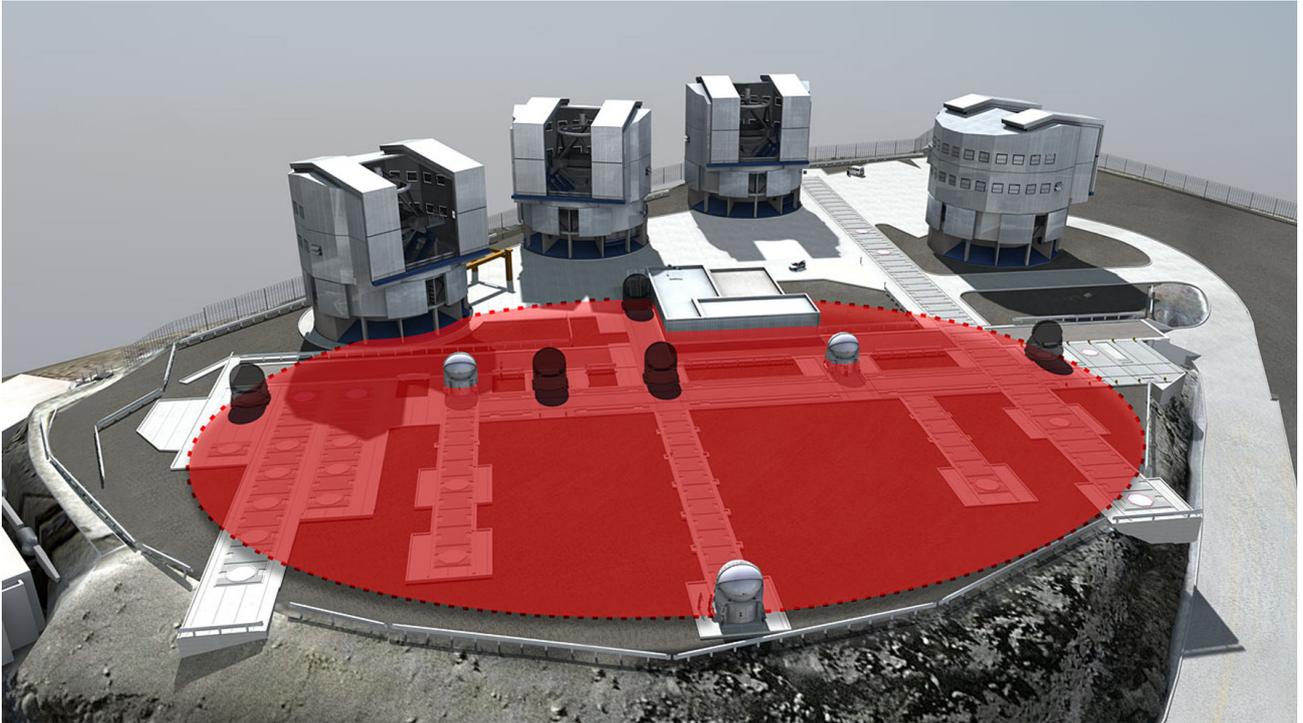


圖3. 後方四座8.2公尺望遠鏡由左至右分別是「太陽」(Antu)、「月亮」(Kueyen)、「南十字」(Melipal)及「金星」(Yepun)，前方四座1.8公尺輔助望遠鏡可以在此平臺上移動到30個不同的位置，最大可以組成一座直徑相當於200公尺的虛擬望遠鏡。圖片來源：ESO

們擁有的基線越多，表示我們擁有的音符就越多，我們越能夠辨識究竟是莫札特還是貝多芬的曲子。由於PIONIER能夠同時結合了來自8.2公尺的四座甚大望遠鏡或1.8公尺的四座輔助望遠鏡

的四道光束，四座望遠鏡能兩兩配對成六組不同基線來觀測目標的能見度 (Visibility) 藉此判斷是點源、展源或是多星系統，加上任三座望遠鏡連成的四組閉合相位 (Closure Phase) 藉此重建

觀測目標比用單一望遠鏡更精細的影像。

接著2016年VLT又安裝了新的干涉光接收儀GRAVITY，該儀器能夠藉由追蹤干涉條紋

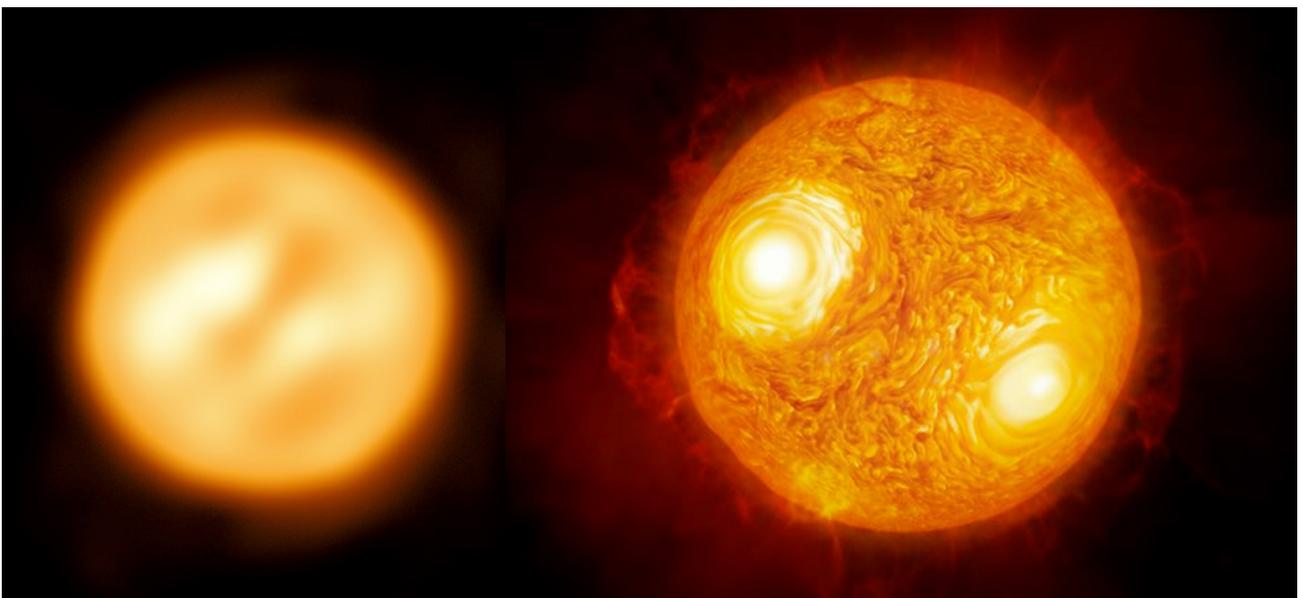


圖4. 天文學家利用VLT/AMBER的觀測結果得以重建天蠍座的紅超巨星心宿二 (Antares) 的影像 (左)，這也是天文學家觀測到除了太陽之外的恆星大氣結構。圖右是藝術家的想像圖。圖片來源：ESO

(Fringe tracking) 技術來消除地球大氣對星光干涉條紋的影響，概念有點類似自適應光學 (Adaptive optics) 技術，藉由快速改變修正鏡來消除地球大氣對星光的影響，藉由追蹤干涉條紋技術使得VLT的觀測能力又更上一層樓，不僅是能重建較暗的星體且更精細影像，還能更精準的測量星體位置達10微角秒的誤差精度，如果月球上有棒球賽，用GRAVITY就可以輕鬆看出棒球軌跡的變化。

2020年諾貝爾物理學獎頒給了Reinhard Genzel和Andreas Ghez，表揚他們發現銀河系中心的超大質量緻密天體。其中Genzel的團隊能夠成功追蹤在銀河系中心的S2星的完整軌跡，其中利用到的一項儀器就是GRAVITY，該儀器高精度測量星體位置的能力，把距離地球2萬7,000光年的S2星軌跡幾乎精確到可以看出它每天的變化（圖5）。2018年GRAVITY對於S2星的觀測資料也是確認銀河中心是黑洞的最後一片拼圖，當年S2星運行到銀河系中心距離黑洞不到200億公里，並以每小時超過2,500萬公里的速度移動，幾乎是光速的3%。該團隊分別比較

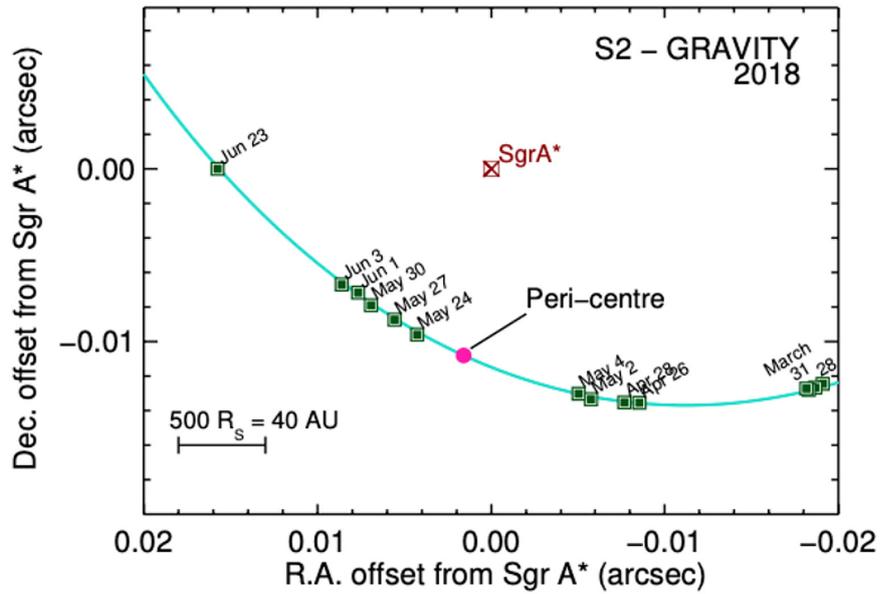


圖5. 2018年恆星S2星的軌道最接近銀河系中心黑洞（Sgr A*）的觀測結果。圖上的綠點是VLT的GRAVITY儀器觀測S2星在銀河系中心附近運行的分析結果，青色線是S2星軌道的最佳擬合結果。圖片來源：2020 諾貝爾獎官網

了GRAVITY以及之前使用其他儀器對S2星的觀測，他們的結果與牛頓力學的預測不同，相反的與廣義相對論的預測幾乎吻合，也因此再次驗證了愛因斯坦的廣義相對論。

經過了二、三十年的發展，光學干涉望遠鏡陣列逐漸成熟，不僅在黑洞測量上取得卓越的貢獻，在恆星和行星形成領域也有不少進展，未來我們期待座落在智利的甚大望遠鏡干涉儀能解開更多人們心中對宇宙中的疑問。

參考資料：

<https://www.hawaii.edu/news/2022/05/12/maunakea-critical-1st-black-hole-image-milky-way/>

<https://www.eso.org/public/teles-instr/paranal-observatory/vlt/vlti/>

<https://www.eso.org/sci/facilities/paranal/instruments/gravity.html>

<https://www.eso.org/public/news/eso1825/#2>

林建爭：美國夏威夷大學天文研究所
泛星計畫博士後研究員

王品方校稿：美國夏威夷專案文物修復師

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>