

天問

中研院天文所季報
ASIAA Quarterly Press
<http://www.asiaa.sinica.edu.tw>



中華民國111年

秋季號

銀河系中心黑洞

ALMA望遠鏡照片與模擬的黑洞影像馬賽克合成圖。©Avery Broderick

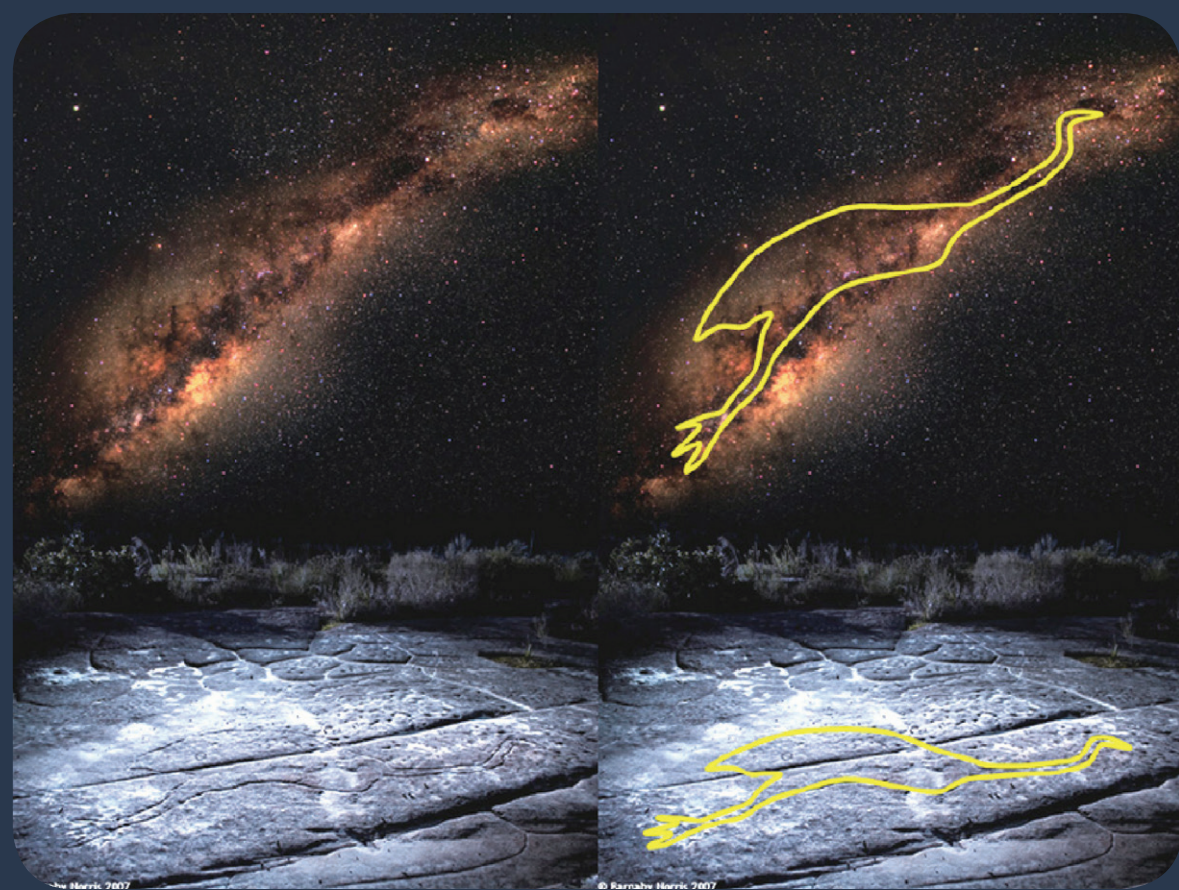
人馬座 A 星： 銀河系中心的巨獸

作者·郭駿毅 × 翻譯·周美吟

古文明中的銀河

如果你恰好遠離城市，在一個晴朗、漆黑的夜晚抬頭仰望，你會在天空中看到一條微弱的光帶。這個光帶實際上是我們銀河系的一部分，而銀河系是由數千億顆恆星組成。如果你仔細觀察，你還會看到星星之間的一些暗斑，實際上是塵埃雲阻擋了背後星光所造成。這些暗雲在人馬座方向看起來最厚，因為那指向我們銀河系中心。

澳洲有些原住民部落將人馬座周圍這些大的黑色塵埃雲稱為「天空中的鸛鵒」。在雪梨附近的 Kuring-Gai Chase 國家公園



銀河中的黑色塵埃雲看起來像是鸛鵒的形狀，澳洲原住民將其稱為「天空中的鸛鵒」。在這張照片中，可以看到它恰好位於澳洲雪梨附近的 Kuring-Gai Chase 國家公園的鸛鵒岩雕上方。在鸛鵒的腿根附近，黑色塵埃雲的後面，就是我們銀河系中心的超大質量黑洞人馬座 A 星。© Barnaby Norris and Ray Norris/ Fuller et al. (2014), Journal of Astronomical History and Heritage, 17, 171

裡，有一個古老的石刻似乎代表這隻天空中的鸛鵒。研究人員認為，當塵埃雲的位置及方位與石刻一致時，代表著鸛鵒產卵的季節到了，古代原住民認為那是能找到鸛鵒蛋當食物的最佳時機。就像許多古文化一樣，天文學知識對人們的生存很重要。

現代人已知的銀河

現代則有許多科學家持續致力於研究我們的銀河系中心，透過凝視天空鸛鵒的塵埃雲，背後似乎藏著一個巨大的怪物。由於塵埃阻擋了我們眼睛能看到的可見光，因此只能使用紅外線或電波來探索銀河系中

心。本所前籌備處主任魯國鏞院士，就是用電波研究銀河系中心的先驅。銀河系中心有一個被稱為人馬座 A 星（簡稱 Sgr A*）的明亮緻密電波源，透過觀察它附近的恆星軌道，蓋茲（Andrea Ghez）與根舍（Reinhard Genzel）這兩個獨立的團隊，分別證實了人馬座 A 星確實是一個超大質量天體，其質量是我們太陽的 400 萬倍，但範圍侷限在一個非常小的區域內。這個怪物天體最可能的解釋是一個黑洞。因此，他們的發現為黑洞的存在提供了最有力的證據，並因此獲得 2020 年的諾貝爾物理獎。

最近，我們的事件視界望遠鏡（簡稱 EHT）合作團隊，由包括臺灣在內的世界各地研究人員組成，終於揭示了 Sgr A* 黑洞的影像。透過連結世界各地的電波望遠鏡，結合起來形成一個地球大小的虛擬望遠鏡。有了這個地球大小的望遠鏡，我們終於拍到夠清晰的影像，可以清楚看到 Sgr A* 黑洞，知道銀河系中心的怪物長什麼樣子了！

黑洞照片中周圍明亮的環來自環繞黑洞旋轉的氣體所發出的光。由於黑洞附近的強大重力，這道光被彎曲而朝著我們的方向。在這個光環內是一個黑暗區域，黑洞就隱藏在那陰影之下。愛因斯坦一百多年前提出的廣義相對論告訴我們，這個光環的大小主要取決於黑洞的質量。根據測量到的 400 萬個太陽質量和已知的 27,000 光年距離，這個光環的直徑預估約為 50 微角秒，或天空中的 0.00000001°。從地球上，這大約是一個放在月球上的甜甜圈大小。EHT 觀測到的環的大小確實非常符合預估值。即使在 100 多年之後、在接



深入銀河系中心看到黑洞。©Sara Issaoun and the Event Horizon Telescope

近黑洞附近的極端條件下，也沒有人能夠證明愛因斯坦的廣義相對論是錯的。

我們銀河系中心的黑洞可能是我們眼中的怪物，其直徑相當於 17 個太陽（或 1875 個地球）的直徑。但從宇宙的角度來看，它其實很小，比水星軌道還小一些。有些黑洞的質量要大得多，例如位於 M87 星系中心的黑洞，EHT 也在 2019 年 4 月公布了它的照片，質量為 65 億個太陽質量。Sgr A* 黑洞目前的胃口也非常小——如果它是人類，它每百萬年只吃一粒米！然而，與罕見的 M87 黑洞等巨型黑洞相比，較小的超大質量黑洞（如 Sgr A*）在宇宙中更為常見。因此，研究 Sgr A* 有助於我們更了解典型黑洞的行為模式。

雖然我們已經設法揭開了隱藏在銀河系中心的怪物面紗，但仍有許多謎團。黑洞最初如何長到這麼大的？事實上，像 Sgr A* 和 M87 黑洞這樣的超大質量黑洞如何形成，仍然是天文學最大的未解之謎之一。此外，M87 黑洞會產生強大的噴流，噴射出接近光速的粒子，傳播至數萬光年遠並加熱整個 M87 星系中的氣體。為什麼 Sgr A* 沒有產生類似的噴流？2017 年的觀測

用了 8 台望遠鏡，之後又增加了 3 台新望遠鏡（包括本所主導興建的格陵蘭望遠鏡），我們希望升級後的 EHT 和韋伯太空望遠鏡（JWST）等其他新望遠鏡能幫忙解答這些問題。透過拍攝 Sgr A* 的影片，我們希望能更了解黑洞周圍極端重力條件下的廣義相對論，以及它如何吃掉周圍氣體。EHT 在 2018、2021 和 2022 年進行了更多的觀測，我們已經開始處理和分析資料。

研究黑洞的重要性

但是為什麼我們要花這麼多錢和時間來觀察黑洞呢？研究 Sgr A* 對我們的日常生活有何影響？當臺灣和世界還有更大的問題需要解決時，為什麼要用納稅人的稅金來資助這樣的計畫？老實說，現在還不知道答案。黑洞研究是一門基礎科學，因此對人類的影響通常只能從長期來看，也許是幾十年或幾個世紀後才知道。我們很難預測對 Sgr A* 的研究在 100 年後會對人類產生什麼樣的影響。

但我們知道，廣義相對論對衛星的運行至關重要，它使我們能夠更準確地計算衛星上的時鐘時間與地球上的時鐘時間之間的

差異（因為衛星的移動速度與地球上的我們相比快了许多，時間流逝較慢）。此外，遙遠的類星體也在 GPS 系統的運行中扮演關鍵角色，而類星體中就有一個超大質量黑洞。數以千計的類星體被當成空間坐標系的一部分，使 GPS 衛星能夠準確判定它們的位置，從而幫助地球上諸如手機的 GPS 設備能精確定位。或許也有許多人不知道 Wi-Fi 技術的一個關鍵組成是由澳洲的一位電波天文學家研發的，他最初研發該技術是為了使用電波望遠鏡來搜索（理論預測）蒸發或爆炸的黑洞！在愛因斯坦的時代，沒有人會預測到科技進步竟然來自廣義相對論和黑洞研究。

所以下次當我們打開電腦，用 Wi-Fi 在外送平台上訂便當，外送員在手機上用 Google 地圖找到送貨的路徑時，願我們記得這一切都和黑洞與廣義相對論的研究有關！就像「天上的鸛鵒」幫助澳洲原住民知道何時該收集鸛鵒蛋當食物的正確時間一樣，誰能想到即使在現代，天文學在幫助我們獲取食物方面仍然發揮著重要作用！誰知道用 EHT 研究 Sgr A* 周圍的極端重力會在未來 100 年導致什麼結果，但願我們的子孫後代能夠從我們今天的投資中獲得收益。



目前加入 EHT 的 11 座望遠鏡與銀河的合成圖。

©ALMA, APEX: ESO/M. Kornmesser; LMT: INAOE Archives; GLT: N. Patel; JCMT: EAO-W. Montgomerie; SMT: D. Harvey; IRAM 30-M: N. Billot; Kitt Peak 12-M, SPT: Wikipedia; SMA: S. R. Schimpf; NOEMA: IRAM; Milky Way: N. Risinger (skysurvey.org)

來一個銀河系自產的黑洞甜甜圈！

作者・卜宏毅

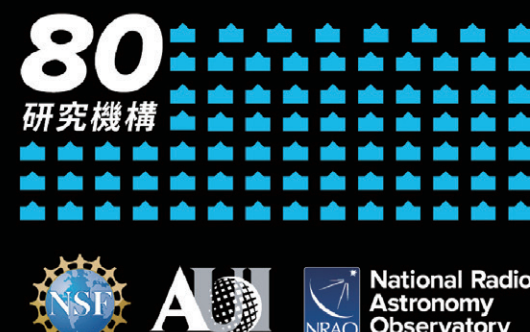
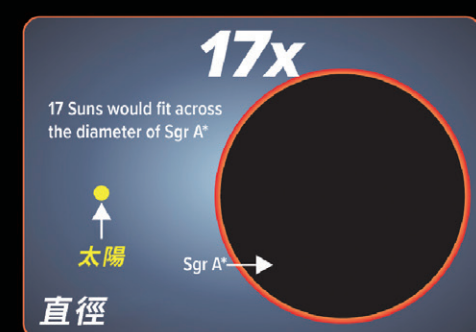
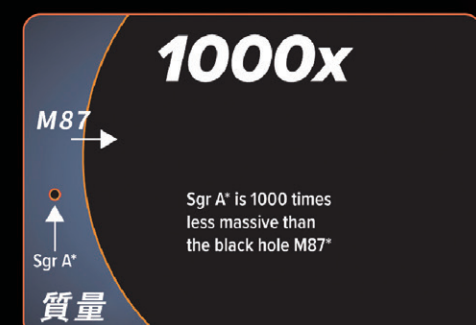
Sagittarius A*

Sgr A* /sadge-ay-star/

This is the first image of our neighborhood black hole in the center of the Milky Way galaxy. The ring around the black hole is captured light bent by the powerful gravity of the black hole.



This result is made possible by a global human effort of more than 300 researchers from 80 institutions.



我們銀河系中心的黑洞是什麼樣子呢？終於，事件視界望遠鏡（Event Horizon Telescope）團隊為我們帶來至今最「清楚」的答案！

遍布宇宙的神祕天體逐漸現身

自六零年代以來，天文學的發現逐漸讓人們相信黑洞這樣的天體的確存在於宇宙之中。時至今日，我們已經了解黑洞系統在宇宙中比比皆是，若以質量來區分，包括了大質量恆星演化最終形成的恆星級質量黑洞（質量為數十至上百個太陽質量），以及位於大部分星系中心的超大質量黑洞（質量為數百萬至數十億個太陽質量）。事件視界望遠鏡團隊在 2019 年公布了第一張黑洞影像，是位於 M87 星系中心的超大質量黑洞的「身影」。M87 黑洞的影像看起來像是個甜甜圈，與廣義相對論描述黑洞的時空結構所做出的預測相符合，進一步證實了黑洞的存在。就如同於皮影戲般，甜甜圈中央陰暗處正是不發光的黑洞被周圍發光的物質所烘托出來的「剪影」！

在太陽所處的銀河系，其中心也有個超大質量黑洞。科學家相信來自於人馬座（或稱為射手座）的強烈電波源正是黑洞附近繞行氣體所發出的輻射，並將此天體稱為人馬座 A 星（Sagittarius A*，簡寫為 Sgr A*）。天文學家對這個離我們最近的超大質量黑洞進行了長期的觀測，終於在今年（2022 年）五月，事件視界望遠鏡團隊公布了我們銀河系中心的超大質量黑洞的身影。類似 M87 黑洞的影像，今年公布的人馬座 A 星影像也具有類似甜甜圈的樣貌（影像中不同區域的亮度反映了該區域的電波訊號強度）！這張來自人馬座 A 星的第二張甜甜圈照片，再次驗證了廣義相對論的預測。

史上第二張黑洞影像：你不知道的事

人馬座 A 星與 M87 黑洞是目前唯二可以看見黑洞剪影的黑洞系統，它們都是用角分辨率高達 20 微角秒（1 角秒 = 1/3600 角度）的事件視界望遠鏡觀測得到。此兩個黑洞所造成的剪影影像實際大小雖然不同，但在天空中的張角卻相近：前者約為 50 微角秒，後者約為 40 微角秒。恰巧的是，人馬座 A 星與 M87 黑洞在許多方面剛好互補，例如前者位於南半天球的銀河上，質量較小，距離較近，且目前沒有觀測到明顯的黑洞噴流結構；而後者位於北半球，質量較大，距離較遠，且具有明顯且活躍的黑洞噴流。當觀測人馬座 A 星時，銀河盤面上的自由電子會造成散射效應，目前公布的人馬座 A 星影像已經去除了此效應。



參與 2017 年銀河系中心人馬座 A 星觀測的電波望遠鏡，遍布於全球各地。這些望遠鏡成員利用特長基線干涉儀技術共同合作觀測，達到足以解析銀河系中心黑洞的角解析度。© Event Horizon Telescope Collaboration

除此之外，越小的黑洞，其周圍的氣體繞黑洞一圈所需的時間越短。利用地球自轉，事件視界望遠鏡讓遍布地球上六個不同地理位置的八座電波望遠鏡分別陸續觀測到人馬座 A 星，再將觀測資料合併分析，模擬出一個口徑有如地球大小的虛擬電波望遠鏡。這樣的技術稱為「特長基線干涉儀」（Very Long Baseline Interferometry，簡稱 VLBI）。然而，對銀河系中心黑洞來說，在 VLBI 觀測所需的時間內，黑洞周圍的氣體已經足以環繞黑洞非常多圈了。換句話說，對人馬座 A 星的 VLBI 觀測數據其實包含了黑洞周圍環境的動態資訊，而目前公布的人馬座 A 星影像是將這些動態資訊一併分析的結

果。相較之下，質量較重的 M87 黑洞因為氣體環繞黑洞所需的時間較長，在 VLBI 觀測所需的時間內，黑洞周圍的氣體看起來近乎不動，使得資料處理較為容易。因為這樣的原因，資料處理難度較高的人馬座 A 星影像成為了公布的第二張而非第一張黑洞影像。目前事件視界望遠鏡團隊正在發展考慮動態影像的分析技術，也許不久的將來我們能觀測到人馬座 A 星的一系列影像。如果目前公布的人馬座 A 星影像就像是為一隻快速飛舞的蝴蝶照了一張長時間（相對於蝴蝶移動位置所需的時間）曝光的照片，未來動態影像分析技術所呈現的將是如同記錄蝴蝶如何快速拍翅的一部電影。

事件視界望遠鏡團隊於 2022 年五月所公布人馬座 A 星（銀河系中心黑洞）的電波影像，以及對人馬座 A 星和研究團隊的介紹。© NRAO/AUI/NSF, EHT Collaboration

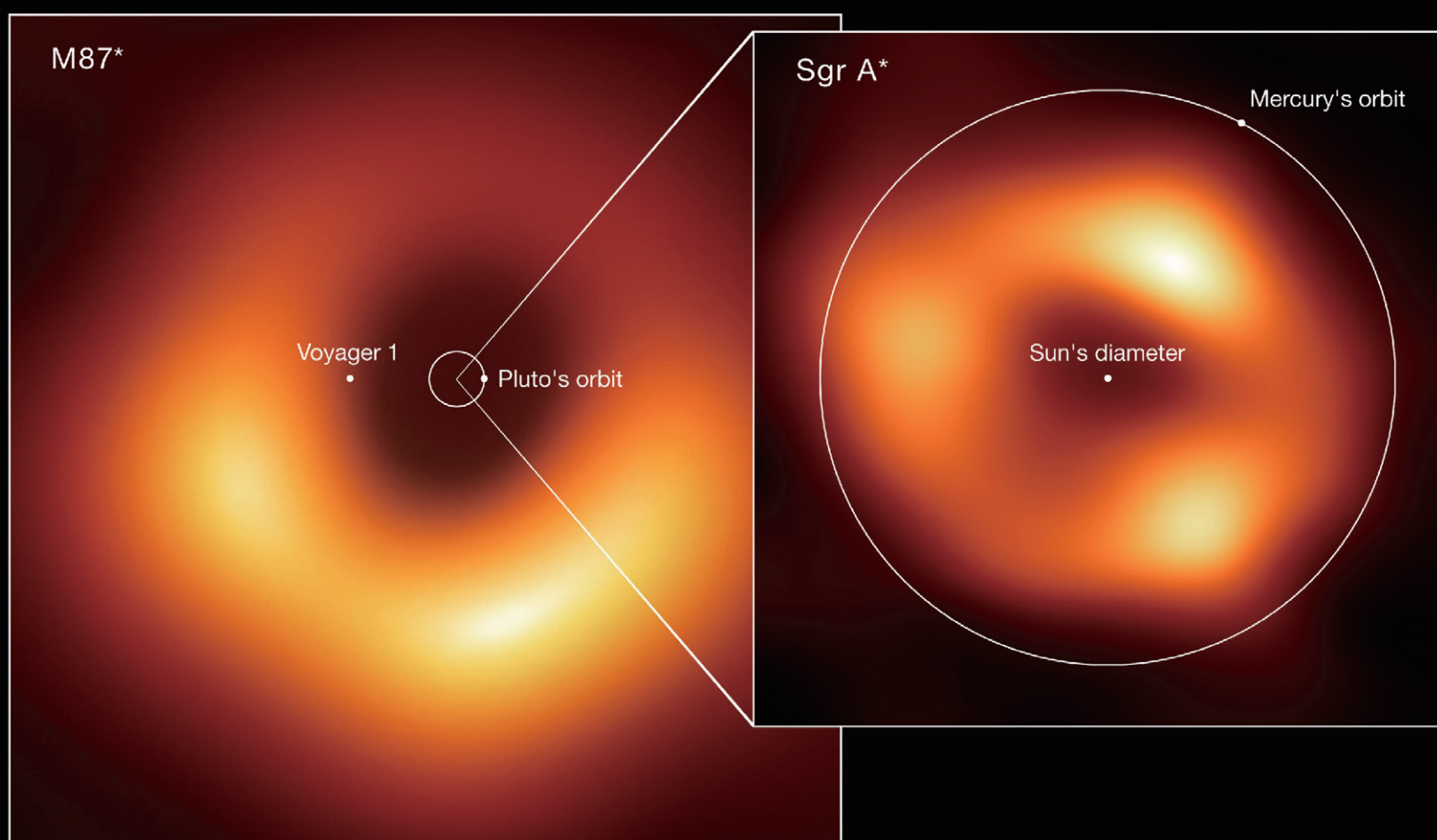
● 黑洞甜甜圈比一比

經由以上介紹，我們可以理解因為銀河系中心黑洞的特性，和第一張（M87 黑洞）甜甜圈照片相比，第二張甜甜圈照片背後有許多不一樣的「製作流程」。如果我們進一步比較這兩張甜甜圈照片，可以看到 M87 黑洞甜甜圈的下方較為明亮，而人馬座 A 星的甜甜圈影像其較為明亮的區域則分布在影像的左方、右上和右下處。這些較為明亮的區域可能是因為氣體運動所造成的都卜勒加速（Doppler boosting，亦即迎向地球視線方向運動的氣體所發出的

輻射訊號會較為明亮，反之則較為暗淡），或是局部較多明亮物質所致。M87 黑洞影像在數年前問世時，事件視界望遠鏡團隊正是利用 M87 黑洞甜甜圈下方較為明亮的特徵推測出氣體與黑洞周圍旋轉時空的旋轉方向，進而了解 M87 黑洞的旋轉軸與地球視線方向的相對夾角。而今年五月事件視界望遠鏡團隊所公布的人馬座 A 星影像，其影像分析難處讓我們尚無法判斷甜甜圈影像中較為明亮區域的確切位置與大小。然而，可以確定的是，銀河系中心

黑洞的旋轉軸與地球視線方向的相對夾角必定不能太大，才能讓我們看到一個完整（但亮度不均勻）的甜甜圈影像！

現在的觀測技術已經讓我們朝向黑洞天文物理邁出驚人的一步，讓人們能驗證遠在天邊的黑洞系統周圍的環境細節！隨著更多的事件視界望遠鏡對人馬座 A 星的觀測，以及分析技術與理論模擬的發展，人類對銀河系中心的黑洞以及時空本質的諸多好奇，將能獲得更清楚的答案！



人馬座 A 星影像（右圖）與 M87 黑洞影像（左圖）的實際尺寸比較。兩張黑洞影像的中央陰暗處正是不發光的黑洞被周圍發光的物質所烘托出來的「身影」，看起來像是個甜甜圈。具有約六十五億個太陽質量的 M87 黑洞（距離地球約 5500 萬光年），其剪影大小比整個太陽系還大。相較之下，具有約四百萬個太陽質量的人馬座 A 星（距離地球約兩萬七千光年），其剪影大小比水星軌道還小。這兩張影像是 2017 年對這兩個天體的電波觀測（觀測波長約為 1.3mm）後分析得到，分別於 2022 年與 2019 年由事件視界望遠鏡團隊公布。© EHT collaboration (acknowledgment: Lia Medeiros, xkcd)

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，有機會在天聞季報上刊登喔！

發行人 | 彭威禮。執行主編 | 周美吟。美術編輯 | 王韻青、楊翔伊。執行編輯 | 曾耀寰、劉君帆。

發行單位 | 中央研究院天文及天文物理研究所。天聞季報版權所有 | 中研院天文所。ISSN 2311-7281。GPN 2009905151。

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)2366-5415。電子信箱 | epo@asiaa.sinica.edu.tw。

