

# 天聞

中華民國 109 年 冬季號  
winter



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

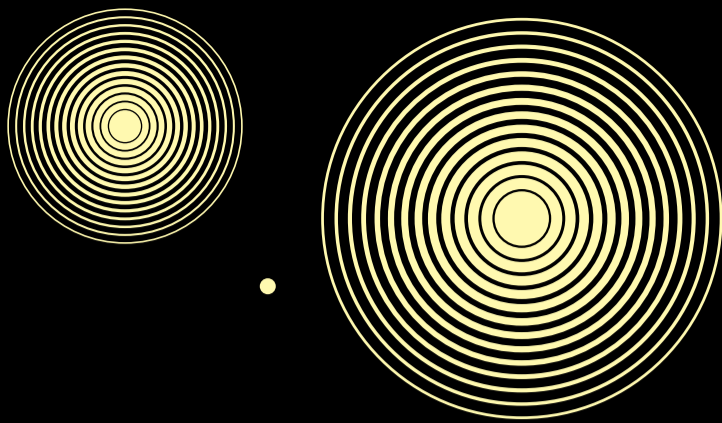
# 銀河系中心

A large-scale image of the Milky Way galaxy, showing the spiral arms and the central region. The text '銀河系中心' (Galactic Core) is overlaid in large, white, stylized Chinese characters across the center of the image.

2013 年銀河系中心黑洞噴發的X光閃焰。  
©NASA/CXC/Amherst College/D.Haggard et al

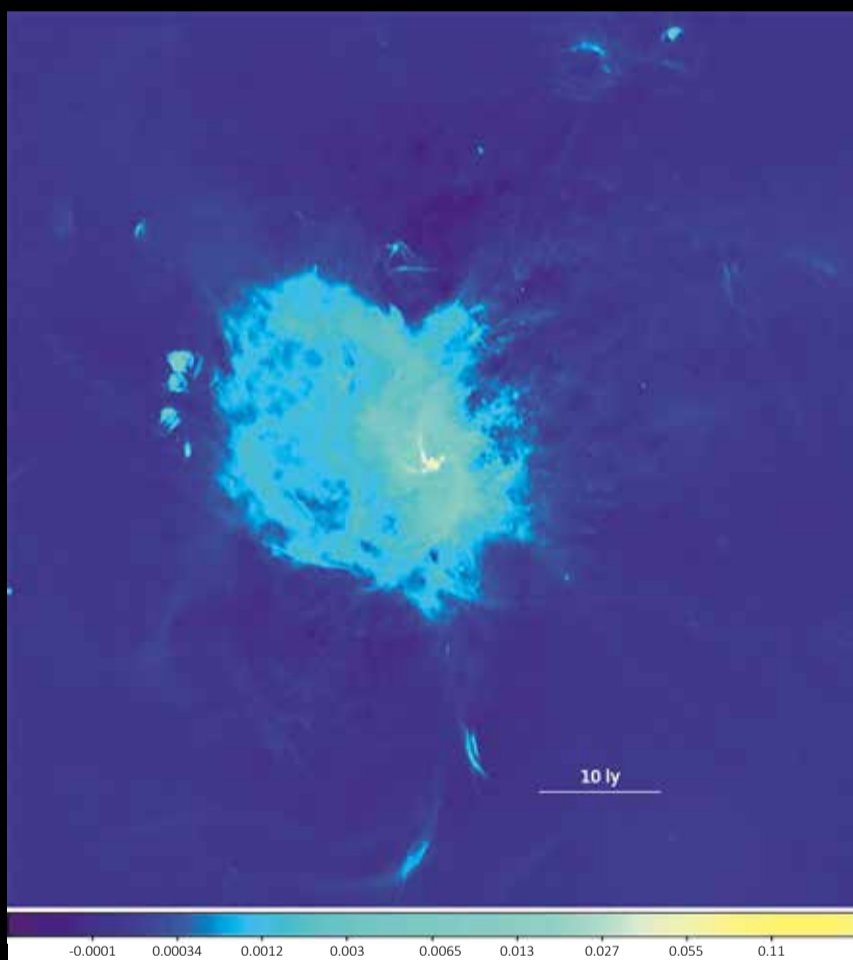
# 透視銀河中心

作者 / 呂浩宇



地球距離銀河系的中心（簡稱銀心）約 2 萬 6 千光年，之間隔著層層緻密的銀河系旋臂。銀心的位置可定義於質量約為太陽的 4 百萬倍的超大質量黑洞，位於人馬座的 Sagittarius A\*，簡稱 Sgr A\*（確認 Sgr A\* 為黑洞的工作於今年獲頒諾貝爾物理獎）。在 Sgr A\* 周遭數光年內還圍繞著質量為太陽百萬倍的核恆星團（Nuclear Star Cluster），其中包含著許多大質量恆星。這些大質量恆星死亡時會產生明亮的超新星爆炸，目前在銀心附近便還存有超新星的遺骸。此外，Sgr A\* 亦持續吸收四周的氣體。這些氣體在靠近 Sgr A\* 時受重力及向心力的作用而形成環狀、帶狀或旋臂狀的緻密結構，之中

亦持續地形成年輕的恆星。銀心及其周遭物質受到銀河系盤面大量的塵埃遮擋，在可見光波段僅呈現一片昏暗，完全無法探測！然而，在可見光以外的波段，銀心更能呈現豐富的樣貌。例如，電波能穿透銀河系盤面的塵埃，是研究銀心的利器之一。



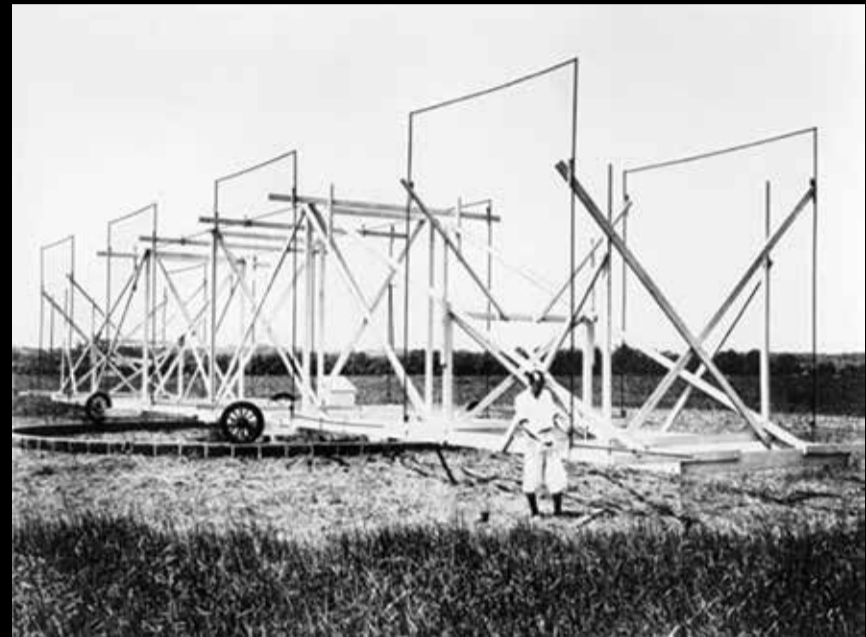
甚大天線陣（Karl G. Jansky Very Large Array）所拍攝的銀河系中心 5.5 公分波段影像。中央最亮點處即為銀河系中心黑洞 Sgr A\* 的位置。圖中的比例尺為 10 光年。圖片為筆者由哈佛史密松天文台 Jun-Hui Zhao 老師提供的原始數據重製。© 原始資料來源：<https://www.cfa.harvard.edu/~jzhao/GC/sgra/>

電波天文學的開端始於貝爾實驗室的電波工程師央斯基（Karl Guthe Jansky），他在研究電波通訊的雜訊來源時，偶然探測到源自銀心的電磁波（觀測波長約 15 公尺，相當於 20 兆赫頻率；發表於 1933 年）。據此，標準的國際物理單位系統以央斯基（Jansky）稱呼所定義的電波流量密度單位。當今最先進的電波干涉儀陣列天文台亦被命名為「卡爾·G·央斯基特大天線陣」（NRAO Karl G. Jansky Very Large Array）。

電波天文學為本所的強項之一，近年來還參與事件視界望遠鏡計畫（EHT；更多資訊見 108 年秋季號季報）。筆者亦利用本所參與的次毫米波陣列望遠鏡（Submillimeter Array）首次解析銀心周圍十數光年的高溫中性氣體旋臂，此旋臂受黑洞重力牽引圍繞著 Sgr A\*，進一步利用阿塔卡瑪毫米及次毫米波陣列（Atacama Large Millimeter Array）首次解析 Sgr A\* 在 0.6 毫米及 0.43 毫米波段的線性偏振。



由此可知，銀心為天空中最明亮的電波發射源之一。央斯基在發現它時因觀察到它每日早四分鐘升起而推測為太陽系外天體，但當時對於它的電磁輻射機制尚不了解。近代高解析力的電波干涉儀影像揭露除了由 Sgr A\* 位置所發出的同步輻射外，在 Sgr A\* 周圍 10 光年內有旋臂狀電離氣體結構。在更大的尺度上則有個圓圈狀的超新星遺骸。在這個超新星遺骸的中央以及靠近 Sgr A\* 處可測得高溫電子所發出的熱輻射 X 射線。此外，在電波影像中還可發現許多由新形成的大質量恆星所造成的電離泡泡，與許多或許與磁場相關的長絲狀電離氣體結構。這些複雜壯麗的游離及中性結構彰顯著許多複雜的未知物理機制，等待研究探索與了解！由於銀心相對於其它銀河系外的超大質量黑洞距離近得非常多，使得我們可以做非常精細的觀察。因此，對於銀心的研究，將持續地對銀河系外活躍星系核 (Active Galactic Nuclei) 的吸積、噴流、以及恆星形成爆發 (starburst) 等現象的物理機制，提供非常關鍵的線索。



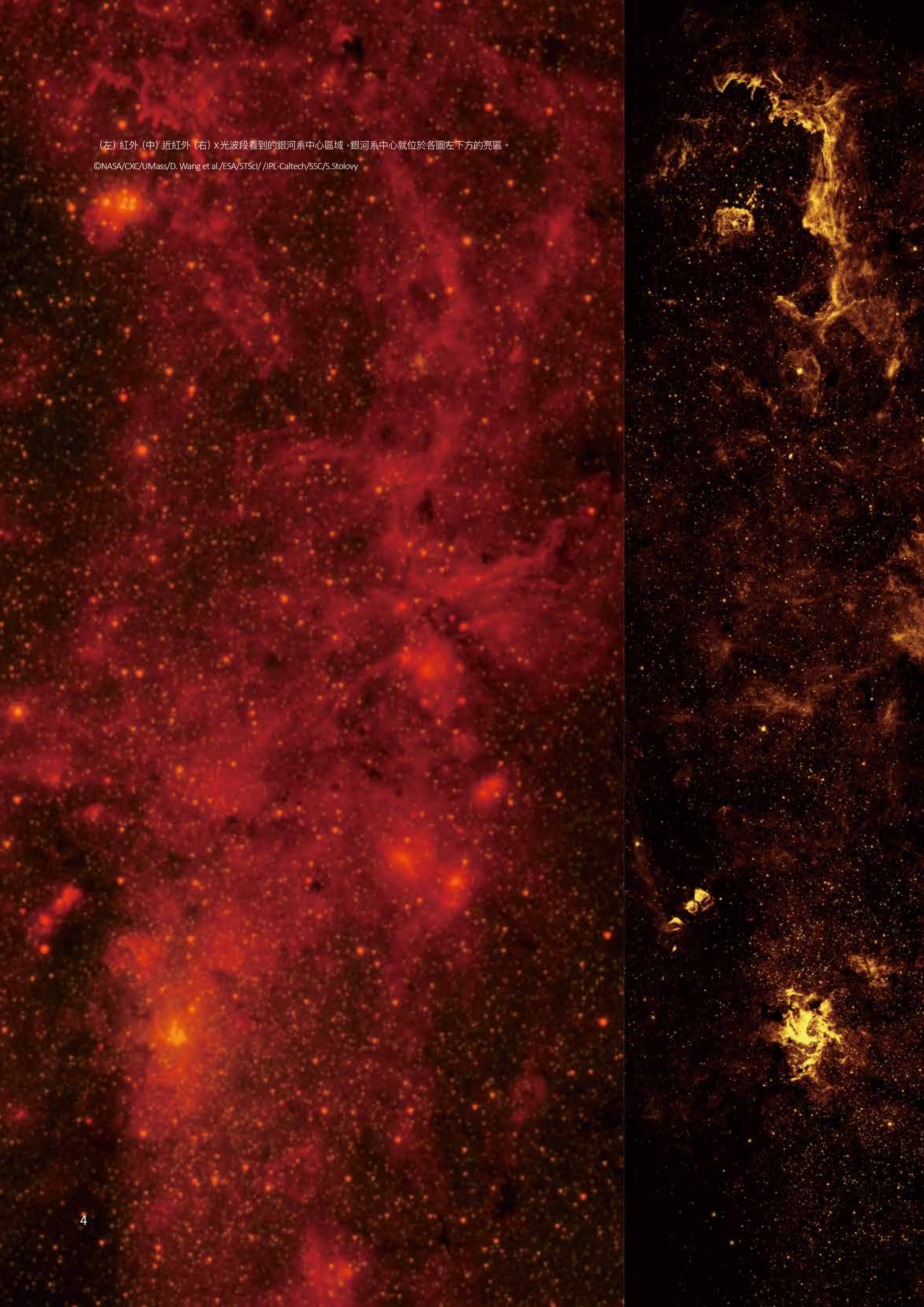
電波天文學之父央斯基 (Karl G. Jansky)。身後為其所建造天線「央斯基的旋轉木馬」。©Bell Telephone Laboratories

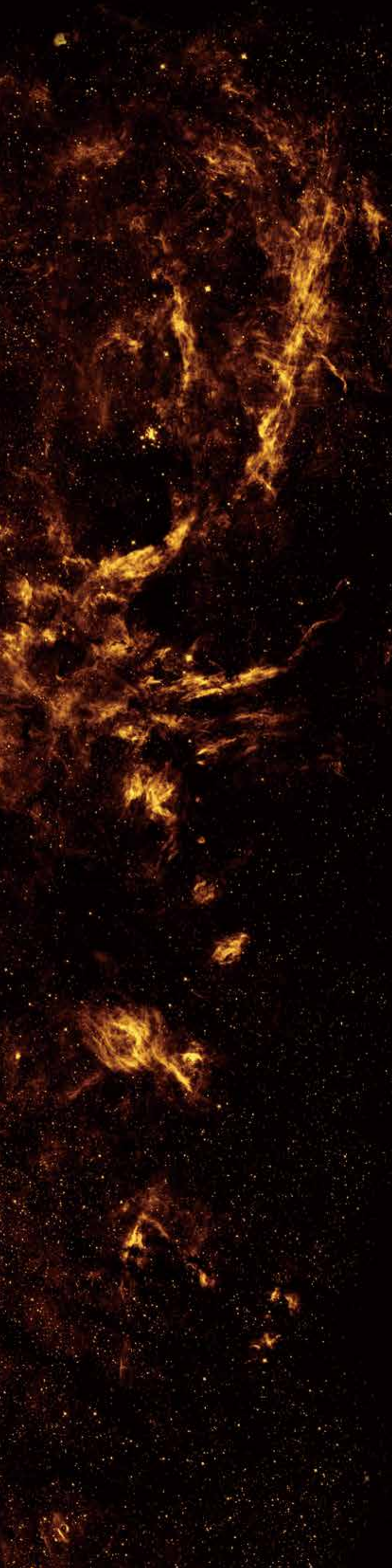


銀河系中心的合成影像。紅、金、及紫色分別顯示於電波、紅外光、及 X 射線波段所拍攝的影像。  
©A. Angelich (NRAO/AUI/NSF); NASA/JPL-Caltech/ESA/CXC/STScI

(左) 紅外 (中) 近紅外 (右) X光波段看到的銀河系中心區域，銀河系中心就位於各圖左下方的亮區。

©NASA/CXC/UMass/D. Wang et al./ESA/STScI/ JPL-Caltech/SSC/S.Stolovy





# 銀河系中心的黑暗秘密

## 超大質量黑洞 Sgr A\*

作者／卜宏毅 國立臺灣師範大學物理系助理教授

我們的銀河系中心區域是個活躍的場所，除了濃密的分子雲與星團聚集之外，還居住了一個約有 4 百萬個太陽質量的黑洞。這個大質量黑洞經由重力對周圍的影響範圍 (sphere of influence) 約是黑洞本身大小的百萬倍，黑洞能在這區域中用重力束縛物體的運動，並能影響經過這區域的物體。在天文物理學家推論出銀河系中心有個大質量黑洞之前，就是根據僅有黑洞才能造成的特殊效應，才得以推論黑洞的存在。

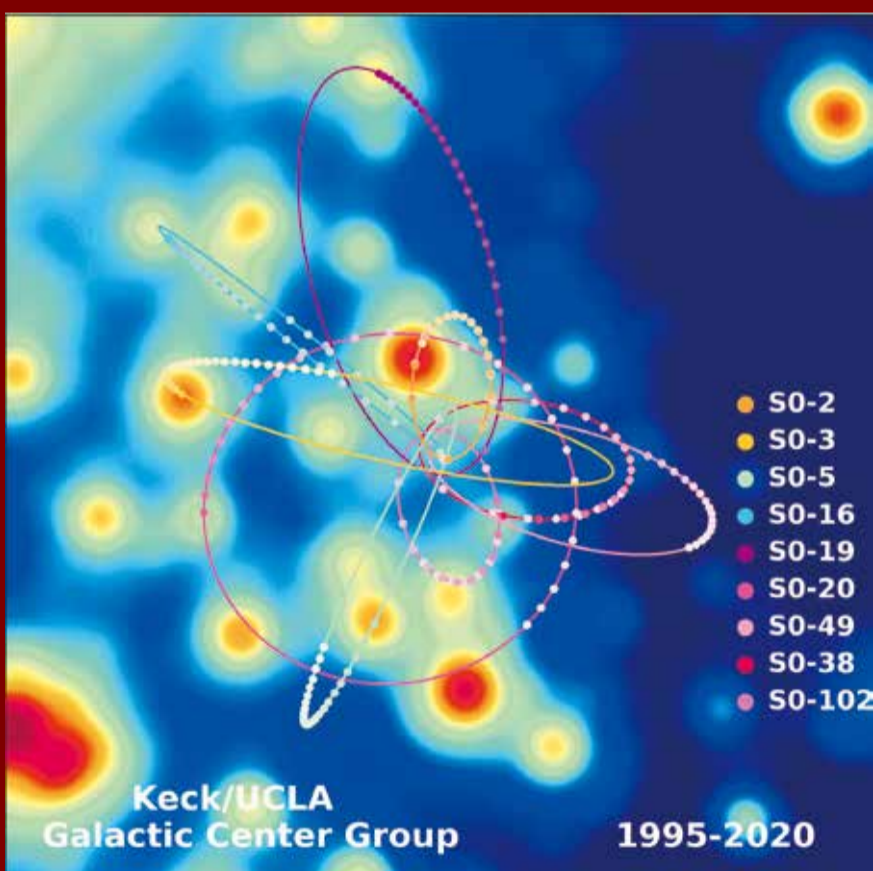
放眼望去，離地球約 2 萬 6 千光年的銀河系黑洞所造成的影響範圍在天空中約是一個角秒 (1 角秒 = 1/3600 角度)。天文學家經由長年觀測在此範圍內的天體運動，發現這些恆星們的軌道都有共同的焦點。這意味著有個相當大質量的物體用重力約束這些恆星的運動。這些恆星中尤其重要的是一個稱為 S0-2 (亦稱 S2) 的恆星，其軌道半徑最接近於銀河系中心，因此可以推斷說此天體至少必須

比 S0-2 的軌道半徑要小。一個大質量黑洞是最能符合此兩項要求的最“合理”解釋。自九零年代起，利用先進方法長期觀測銀河系中心恆星運動的兩位天文物理學家，蓋茲 (Andrea Ghez) 與根舍 (Reinhard Genzel)，也榮獲今年諾貝爾物理獎的殊榮。

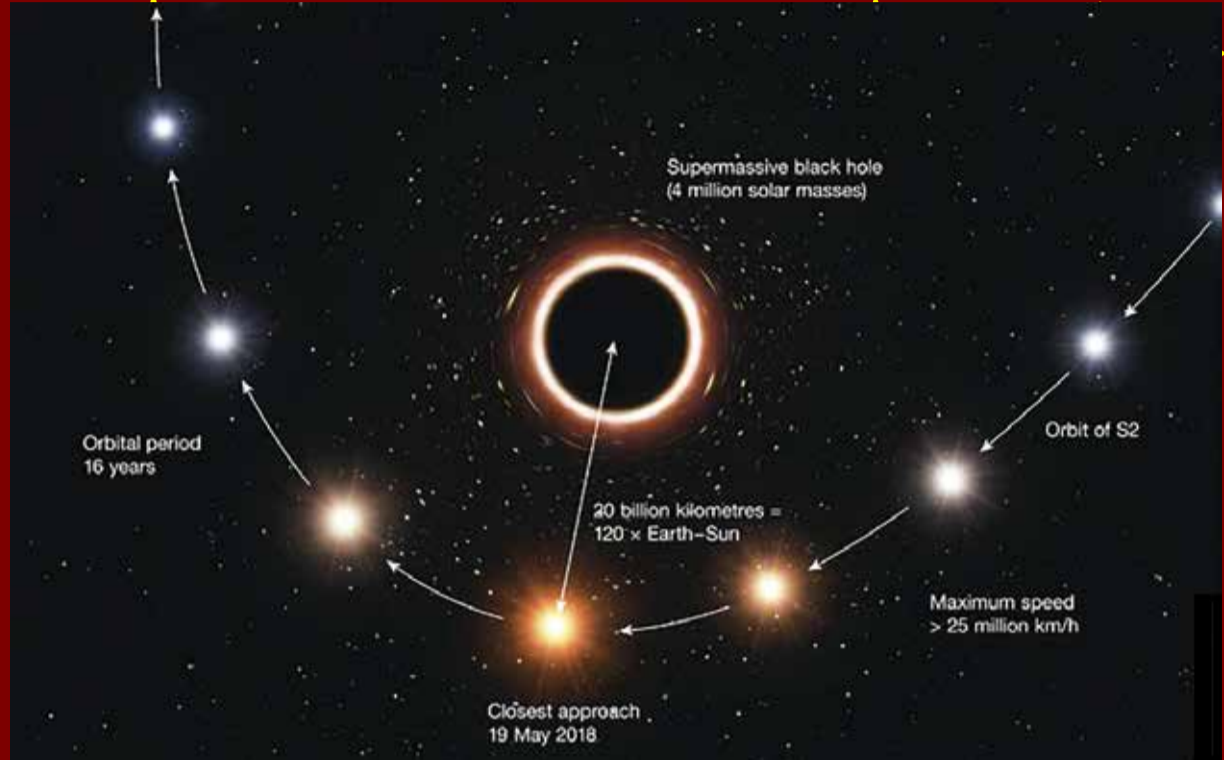
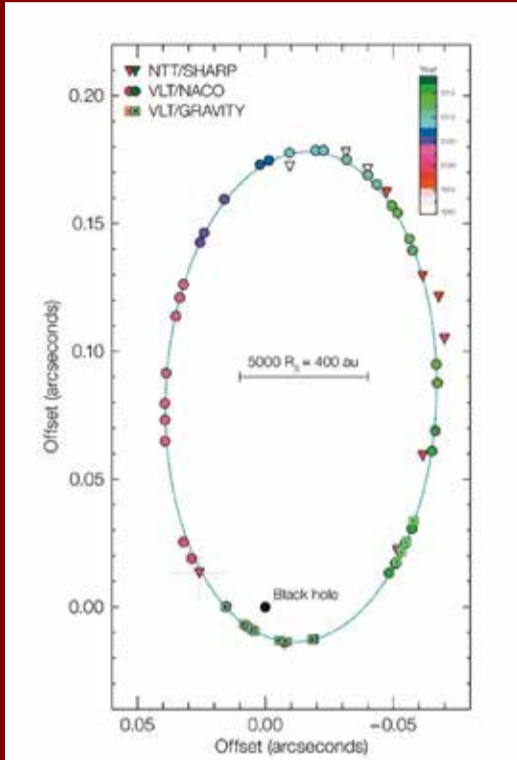
黑洞是個非常緻密的天體，根據廣義相對論，其所有的質量都聚集在一個體積幾乎為零的小空間內。這個奇怪的時空結構稱為黑洞的奇異點 (singularity)。數學物理學家潘若斯 (Roger Penrose) 在六零年代證明，足夠重的天體在歷經重力塌縮時，奇異點的產生是不能避免的，也因此榮獲今年諾貝爾物理獎的殊榮。奇異點的外部被一個稱為事件視界 (event horizon) 的時空結構所包圍，在事件視界內，即使是試著向外逃逸的光也只能因為黑洞造成的時空彎曲而朝向奇異點前進，因此我們對黑洞的所有觀測資訊都止步於事件視界外部。

儘管如此，在事件視界外部，我們可以藉由圍繞著黑洞的高溫高速旋轉氣體所發出的電磁輻射，得知許多黑洞周圍環境的資訊。天文學家認為位於人馬座的 Sgr A\*，就是我們銀河系中心的黑洞。這些環繞黑洞旋轉的氣體，最終藉由逐漸損失角動量而能掉入黑洞，稱為黑洞的吸積 (accretion) 過程。過程中被吸積氣體能釋放出可觀的輻射能量，質量越大的黑洞越有能力製造越多的輻射。觀測發現 Sgr A\* 所發出的輻射能量遠小於其有能力製造的能量，說明了銀河系中心黑洞的吸積流處於低吸積率的狀態。自七零年代開始發展的各類型黑洞吸積流理論已經可以幫助天文學家對黑洞吸積系統的輻射特性有很好地理解，可以解釋 Sgr A\* 的觀測光譜。此外，噴流結構也能偶爾在其他黑洞吸積系統觀測到，這些在掉入黑洞事件視界前成功向外逃出的噴流物質，甚至能產生比星系尺度還要大的結構。儘管目前觀測上 Sgr A\* 沒有明顯的大尺度噴流，但尚未清楚是否 Sgr A\* 其實有極弱的噴流結構或是過去曾經有過噴流的產生。黑洞吸積流與噴流皆是帶有磁場的磁流體，其局部活動與輻射釋放也能造成在不同波段的複雜的亮度變化或是閃焰。

吸積流中高速電子繞著磁場運動產生的同步輻射是電波波段主要的輻射來源。當天文學家在電波波段試著觀測銀河系中心黑洞的吸

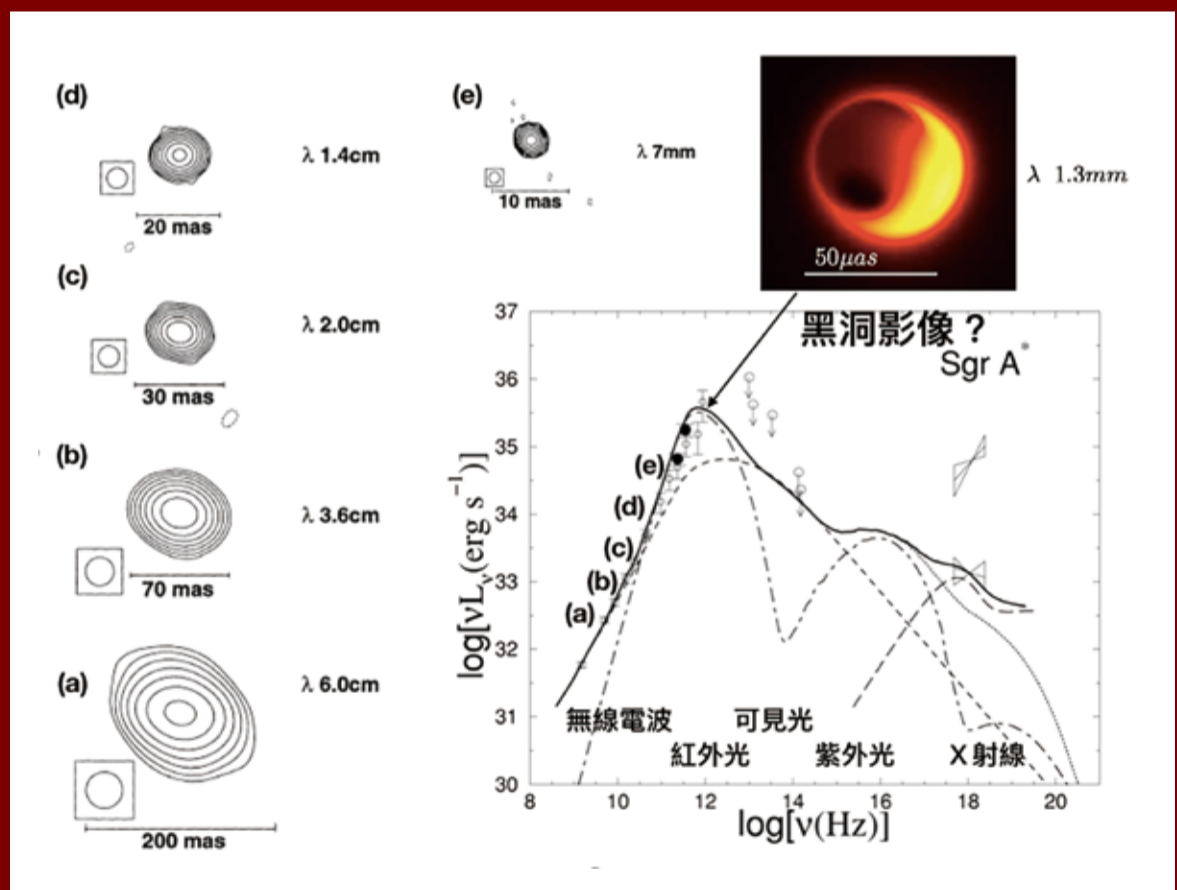


恆星們繞行銀河系中心的軌跡顯示出銀河系中心有個大質量黑洞。其中 S0-2 在最接近銀河系中心時僅僅只有 17 光時 (光走一小時的距離)。此圖大小為 1 平方角秒，為今年諾貝爾物理獎得主蓋茲率領的研究團隊在紅外線波段的長期觀測成果。  
©UCLA Galactic Center Group- W.M. Keck Observatory Laser Team



(左) 今年諾貝爾物理獎得主根舍率領的團隊，觀測 S2 恆星在 25 年間繞行銀河系中心黑洞的軌跡。(右) 插畫家示意圖，顯示 S2 恆星在 2018 年時最靠近黑洞，當時恆星顏色因廣義相對論效應而轉紅。©ESO/MPE/GRAVITY Collaboration/M. Kornmesser

積流結構時，隨著觀測頻率的不同，吸積流也有不同的不透明度 (opacity)。隨著觀測頻率增加，這些吸積流越顯透明，因而能觀測到更接近銀河系中心黑洞的區域，且 Sgr A\* 的尺寸顯得更小 (見圖 (a)-(e))。位於我們銀河系中心的大質量黑洞除了觀測頻率的效應之外，還需要考慮從地球觀測銀河系中心黑洞時，由於銀河系盤面的電子不均勻分佈所造成的散射效應。當觀測頻率夠高，解析度夠好，天體也足夠明亮時，我們將有機會目睹銀河系中心黑洞—我們銀河系家園裡的迷人巨獸—的神秘身影 (見圖中的黑洞影像模擬)。中央研究院、國家中山科學研究院、國立臺灣大學、國立中山大學及國立臺灣師範大學也有參與的 EHT 團隊在去年公布人類史上第一張黑洞影像之後，目前正在努力分析 Sgr A\* 的觀測數據。更多關於銀河系中心黑洞的疑問，例如 Sgr A\* 是否有噴流結構、造成 Sgr A\* 亮度變化的詳細物理機制等，都將等待地球上的我們來一步步揭曉！(轉載自科技大觀園)



銀河系中心超大質量黑洞 (Sgr A\*) 的觀測數據。黑洞的吸積流理論 (右圖實線部分) 能大致符合 Sgr A\* 的光譜特性。當電波波長觀測頻率逐漸提高時 (如光譜上標示的 (a)-(e) 所示)，因為吸積流的輻射機制而能觀測到越來越靠近銀河系中心大質量黑洞的區域 (如左方及上方電波觀測分析後的影像所示)。預計觀測波長約在 1mm 時，將有機會觀測到來自黑洞事件視界周圍的輻射，可以進一步分析推論出更清晰的黑洞影像，如右上方的黑洞影像模擬圖所示。左方及上方圖中的比例尺單位為 mas= $10^{-3}$  角秒，以及  $\mu\text{as}=10^{-6}$  角秒。© Lo et al. (1999), The Central Parsec of the Galaxy ASP Series, Vol. 186 / Yuan et al. (2003), The Astrophysical Journal, 598:301 / Broderick et al. (2016), The Astrophysical Journal, 820: 137



# 搖晃的 M87 黑洞之影：首窺黑洞動力學

事件視界望遠鏡 (EHT) 2019 年發表史上首張黑洞影像，揭示位在 M87 星系中心的超大質量黑洞。2019 年獲取的成果經驗，現在被用來分析從 2009 年到 2013 年的檔案資料，分析結果得以看見黑洞在數年間的行為變化。除了「形狀像新月」的黑洞暗影特徵持續存在，還發現新月結構的方向持續在變，像是有搖晃擺動。

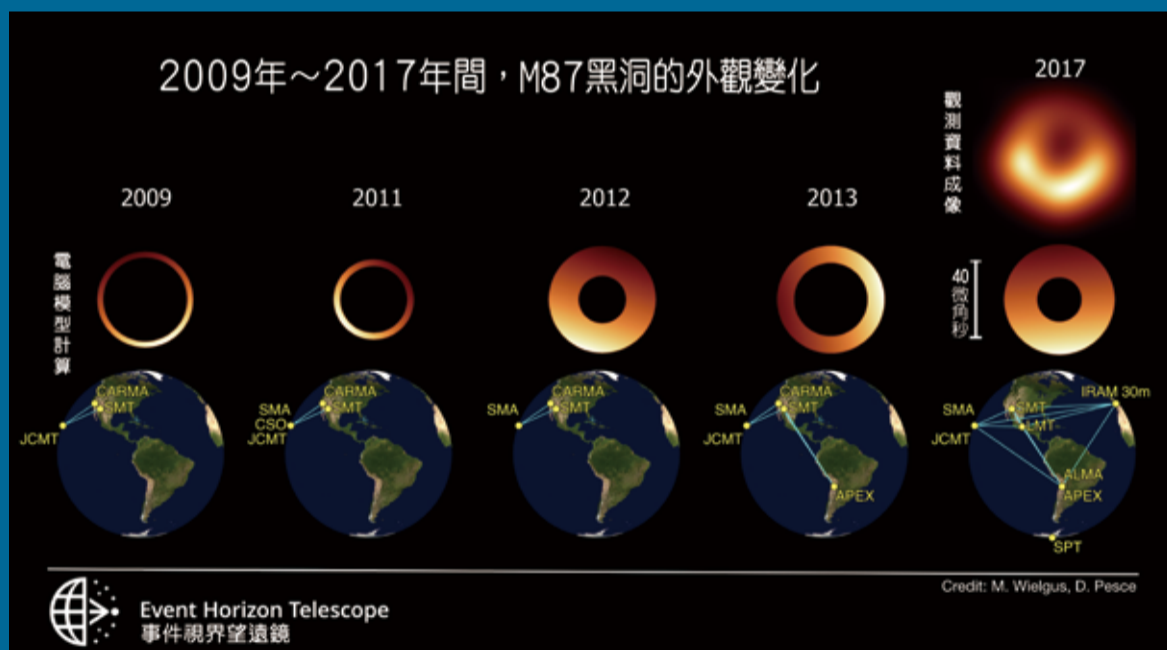
早在 2009 年到 2013 年，先期的 EHT 原型陣列就已在觀測 M87 黑洞。2009 到 2012 年期間，有三個站點一起觀測；2013 年則有四個站點；2017 年，EHT 陣列達成成熟階段，藉由分布於全球各地五站點部署的望遠鏡同時觀測。本次研究論文的第一作者、美國哈佛史密松天文物理中心的 Maciek Wielgus 說明，2019 年看到的「黑洞之影」，由 3 個部分組成：環繞在 M87 黑洞外的熱電漿氣體、比較亮的新月形狀、和黑暗的中心。

「我們預期該『黑暗的中心』區域，即為黑洞的『事件視界』。但 2019 年發表的結果所根據的只是 2017 年 4 月時，為期一週的觀察，時間太短以致於看不到太多變化。基於 2019 年所發表的結果，我們進一步想問：『那麼，2019 年看到的新月形外觀，是否與之前觀測的檔案資料一致？檔案資料上的新月狀結構，在大小和方向上，與 2019 年所發表的影像是否相似？』」

由於 2009 到 2013 年的觀測資料比 2017 年的少很多，用那些資料產生不了圖像。既然如此，EHT 團隊便使用統計模型建構的方式試圖觀察 M87 黑洞有可能隨時間而發生哪些變化。研究員將資料與一組亮度不一的環加以比對，然後使用統計框架判定資料是否與某些模型一致，藉此找到最匹配的一套參數。團隊展示出 M87 黑洞與理論預期值是相符的，黑洞暗影的直徑，與依愛因斯坦廣義相對論推估而得的 65 億太陽質量的黑洞一致。在新月狀的直徑大小一直維持不變這個重點以外，他們還發現這些前期資料中所暗藏的驚喜：光環是規律地在晃動。持續研究這個區域，對掌握並

理解相對論性噴流如何噴發之類的現象，是重要關鍵，科學家將有機會開始制定廣義相對論的新測試。

EHT 計畫科學家、本所資深天文學家包傑夫 (Geoff Bower) 說明：「格局更大的 EHT 陣列將繼續監測 M87 黑洞，提供新的影像和更豐富的資料，還能用來研究湍流動力學。本所主導的『格陵蘭望遠鏡』2018 年開始加入 EHT 陣列，我們已經開始分析那次的觀測資料。2021 年，EHT 陣列預計將再增建兩個觀測站點，以提供更高超的成像品質～最近幾年都將是研究黑洞最令人興奮的時刻！」（摘自本所新聞稿）



2009-2017 年藉成像 / 幾何模型產生的電腦模擬圖，顯示每個時期 EHT 望遠鏡陣列獲得的 M87 黑洞快照。所有的環直徑都近似，唯獨其亮面位置不同。©M. Wielgus/D. Pesce/EHT 團隊

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 | 王祥宇 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、蔣龍毅  
 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