

知識天地

求訪宇宙中黑洞的影像

井上 允 (Inoue, Makoto) 特聘研究員 (天文及天文物理研究所)

黑洞相關概念最早可回溯到 18 世紀末，由拉普拉斯 (P.S. Laplace) 提出：「一個質量極大且密度極高的天體，由於重力強大，即便是光也不能向外射出」的想法。直到 1960 年代，這個議題仍僅限於紙上談兵。到 1990 年代中期，特長基線干涉技術法 (VLBI) 興起，促成黑洞真實存在的重要發現：位於某星系的中心，有一個質量為太陽 3,600 萬倍的超大質量天體 (太陽質量： $M_{\odot}=2 \times 10^{30}$ 公斤)，似乎被侷限在一個半徑不到 0.4 光年 (4×10^{12} 公里) 的空間裡^[1]。觀測顯示它是遵循克卜勒定律的旋轉盤面，雖未觀測到盤面內的天體，但在質量和密度尺度皆如此大的情況下，除了「黑洞」以外，再無第二可能。此後旋即又在新觀測中獲得證實：在我們的銀河系中心便存在著類似於此的一個大質量天體，估計質量約 300 萬個太陽^[2]，雖然看不到這個天體，科學家再次假設這個大質量天體：「可能就是黑洞」。

當時，黑洞已榮登供應活躍星系核 (Active Galactic Nuclei: AGN) 能量來源的可能名單上。不過，前述二個天體質量雖大，還未達到「活躍星系核」一族的門檻。但是這些觀測上的發現，仍對天文研究帶來一些新想法：或許，所有星系的中心，都含有一顆 10^6 - $10^9 M_{\odot}$ 「超大質量黑洞」 (Super Massive Black Hole: SMBH, 質量是太陽 100 萬到 10 億倍)。形成超大質量黑洞的機制是什麼，成了近代天文學界熱門話題之一。

綜合上述，近代天文學已確實承認：「黑洞存在」。不過，惟獨欠缺了可以佐證的直接證據。究竟黑洞看來如何？答案在 1970 年代晚期已獲提出：它看起來應該像一個映襯於明亮吸積盤中央的黑色的「陰影」^[3]。受重力透鏡效應作用，以一個不旋轉的黑洞而言，估計其陰影大小，約為「史瓦西半徑」的 5 倍大。圖 1 顯示一個黑洞陰影圖像「看起來會像什麼」的例子^[4]。當超大質量黑洞旋轉或自旋時，則陰影尺寸逐漸變小且漸漸偏離圓形。這意味著一件事：如果廣義相對論在強重力場仍然正確的話，那麼，從一個黑洞陰影的圖像中，我們至少可以取得用來描述黑洞 3 參數的其中 2 個：「質量」和「旋轉」。更進一步，我們還可以確認廣義相對論的效度如何、驗證它是否適用於強重力場。觀測到黑洞陰影附近區域之後，未來物理學將眼界大開，特別是與廣義相對論相關的部份，譬如：超大質量黑洞和吸積盤如何形成、如何吸積？相對論性噴流又如何形成？黑洞的基本物理是什麼？... 等，各面向都有可觀的新知有待探索。

用來觀測超大質量黑洞陰影需要的各項工具，「萬事具備，只欠東風」- 只要觀測到那個黑洞陰影圖像，輕而易舉就可以證明：黑洞的確存在。事實上，取得超大質量黑洞陰影圖像所需的關鍵技術近在咫尺，且已確定，最可行之方法，唯獨「次毫米波段 VLBI 干涉法」一途。為什麼呢？簡言之，從伽瑪射線到無線電波，整個電磁頻譜中，只有次毫米波段在和 VLBI 干涉法相結合之下，能達成最高空間分辨率，遠勝於其他任何波段之任何望遠鏡。

我們知道，史瓦西半徑和黑洞質量成正比，質量 = $1 M_{\odot}$ 的黑洞，大小約 3 公里。以距離我們最近的超大質量黑洞 - 銀河系裡的人馬座 A* 而言，估算其「黑洞陰影」可視大小，約 50 微角秒，而這是因為它距離我們很近，而不是因為它質量特別大。在鄰近區域，可視尺寸同樣可觀的另一超大質量黑洞陰影候選對象，位在 M87 星系中心，約 40 微角秒。M87 位於室女星團，也是該星團的主要星系，因大質量，且距離我們還不算太遠，因此可視尺寸達 40 微角秒。它是個活躍星系核，質量等於 60 億 M_{\odot} ，名符其實是一個超大質量黑洞。其他剩下的所有超大質量黑洞，可視尺寸都遠比 40 微角秒一半還小。再加上，由於次毫米波段 VLBI 干涉法的望遠鏡所能獲得的最佳空間分辨率，正好是 40 微角秒^[5] 左右，因此，人馬座 A* 和 M87 雙雙入選，成為「取得黑洞陰影圖像」的主要鎖定目標。

先前我們運用 VLBI 位於夏威夷、加州和亞利桑那州等三個地點的三個觀測單元觀測了人馬座 A* 和 M87。VLBI 干涉法構成影像的方式是，由兩兩成對的干涉儀，經由傅立葉變換，換算出干涉圖。干涉儀必需要兩兩成對才能干涉，數量越多，影像品質越好。通常我們需要有好幾個觀測單元，才夠取得一張品質可接受的影像。兩兩一組的干涉儀彼此間有個距離，這個距離的長度，我們以「基線」來稱呼它。「基線」的最大長度和 VLBI 系統能取得多清晰的空間分辨率有關，空間分辨率則又受限於繞射極限。以先前觀測人馬座 A* 為例，基線數量只有 3 條，當中有兩條又非常相似，它們所換算得出的干涉圖幾乎是一模一樣，於是便不可能構成一個黑洞陰影的影像了。

之前的 VLBI 觀測頻率為 230GHz（波長 1.3 毫米），這也是 VLBI 觀測史上，成功完成觀測的最高頻率。但觀測中不乏一些嚴峻挑戰，其中尤以「大氣層水氣含量」影響最大。相當遺憾，觀測迄今，仍未有獲得黑洞陰影的跡象。為了改善觀測條件，我們確實需要額外另增一處觀測站臺，並且相對位置必須距離現有的望遠鏡相當遙遠，才能提高整個系統的空間分辨率。

以「觀測黑洞陰影」為目標，本院天文所 VLBI 團隊一直在為新的「次毫米波 VLBI 站臺」尋訪適合位址。該站臺必須：（1）乾燥，在次毫米波波段有良好的大氣透明度（2）必須能與現有望遠鏡站臺之間形成良好、甚至更長的基線。與第一項條件「大氣透明度」相關，其穩定度也同等重要，必須位於較少大氣湍流之處。未來，我們計劃在接近 0.86 和 0.46 mm，（350 和 650 GHz）的波段進行觀測，波長更短，頻率更高，因此，乾燥、穩定的大氣層是最基本的要求。在波長更短的頻段進行觀測，好處是可取得更高的空間分辨率，但相對的，無論技術上或大氣層條件方面的情形，都會使觀測更困難。至於第二項「良好 / 更長基線」的條件要求，我們則可透過現有的兩座望遠鏡與這個需求呼應：第一座是在智利的阿塔卡瑪大型毫米及次毫米波陣列（以下簡稱 ALMA），第二座是位在夏威夷的次毫米波陣列（以下簡稱 SMA）。未來的 ALMA 不僅在次毫米波段有很高的靈敏度，基線靈敏度也非常高。本院天文所本來便是建造和運營 ALMA 之主要成員，將 VLBI 干涉技術加以延伸應用，繼而由本院天文所來主導下一個「次毫米波 VLBI」重大專案，可謂順利成章之最佳人選。如眾所周知，SMA 也是靈敏度極高之望遠鏡。在與 SMA 建立深厚關係後，本院天文所繼續與當今全球最強大兩座望遠鏡保持友好同盟，將成為國

際間具獨特地位的機構。

目前在接近北極區的格陵蘭島我們已經發現了一個觀測條件相當優秀的站址。該站臺位於海拔 3000 米高，年平均溫：零下 30°C。2011 年夏天我們將攜帶天空監測系統前往該站臺位址測量大氣透明度和穩定性。由於人馬座 A* 位於南天，是南半球較適合觀測的天體，在北半球的格陵蘭站臺，無法以人馬座 A* 為觀測目標，但若以 M87 為觀測目標，則格陵蘭站臺不僅和 ALMA 形成一道最長的基線，相對的與 SMA 和歐洲的一些望遠鏡之間，也構成了極優良的基線。觀測目標 M87 星系明顯的有一「相對論性噴流」，所以，幾乎呈南北走向（格陵蘭 - 智利）的基線，對於深入研究該噴流各種細節幫助極大。

本院天文所 VLBI 團隊今年已獲得美國國家科學基金會（NSF）授予一個功能非常強大的望遠鏡^[6]（參見圖 2），令「次毫米波 VLBI 計畫」立刻如虎添翼。稍早，美國國家科學基金會曾以公開方式徵求「免費使用 ALMA 原型天線」的申請計畫，由本院天文所主導的 VLBI 國際團隊，成功的以「次毫米波段之 VLBI 計畫」贏得該次甄選競賽。該座望遠鏡（天線）仍須略加改造，使性能得以更適應格陵蘭的極地寒冷氣候，可望於三年內完成運送至格陵蘭站臺。接下來，非常希望能透過這座望遠鏡觀測 M87 星系而得到第一個超大質量黑洞的陰影影像。

目前的格陵蘭島站臺上已有一些基礎設施。本院天文所團隊更已發現到，該站臺在次毫米波段的觀測條件競爭力雄厚，拜低溫之賜，先天條件甚至更在智利之 ALMA 之上。這意味著利用格陵蘭站臺從事「黑洞陰影」觀測，前景非常看好，而我國團隊之國際重要性將益發突顯。此外，該望遠鏡若以單一望遠鏡模式在波長較短頻段進行觀測，生產力也將非常之高，這是由於它口徑大，達 12 米，又有極良好大氣條件之故。事實上，不少次毫米波研究單位已就該天線的單機模式應用，向我方表達高度合作意願，因此，本院天文所的次毫米波 VLBI 計畫將繼續向前，邁入該計畫之單碟觀測研究領域。

參考文獻

- [1] Miyoshi, M. et al. "Evidence for a Black Hole from High Rotation Velocities in a Sub-parsec Region of NGC4258," 1995, Nature, 373, p.127.
- [2] Genzel, R. et al. "The Dark Mass Concentration in the Central Parsec of the Milky Way," 1996, Astrophys. J., 472, p.153.
- [3] Luminet, J.-P. "Image of a Spherical Black Hole with Thin Accretion Disk," 1979, Astron. Astrophys., 75, p.228.
- [4] Fukue, J. & Yokoyama, T. "Color Photographs of an Accretion Disk," 1988, Publ. Astron. Soc. Japan, 40, p.15.
- [5] Doeleman, S. et al. "Event-Horizon-Scale Structure in the Supermassive Black Hole Candidate at the Galactic Centre," 2008, Nature, 455, p.78.
- [6] 中華民國 100 年 04 月 14 日，中央研究院新聞稿「本院天文所研究團隊自美接收一座 12 米電波天線」

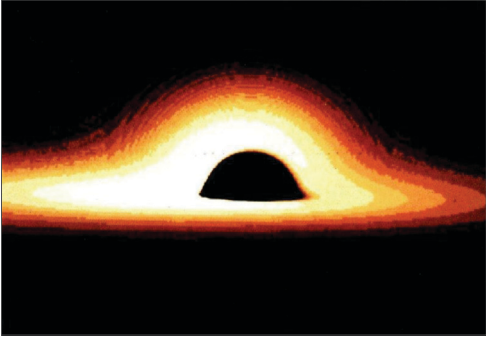


圖 1. 黑洞陰影的模擬影像 [4]。吸積盤傾角約 5° ，自上方觀測時吸積盤呈逆時針方向旋轉。由於吸積盤盤面高速旋轉，都卜勒效應造成左側（「漸近側」）顯得比右側更為明亮。



圖 2. 本院天文所 VLBI 團隊與 ALMA 「北美版」原型天線之合影。照片攝於 2011 年 4 月，在美國新墨西哥州索科羅。當時此天線已 3 年無人照管，研討會即就如何改造、重新啟用此座天線，使之可為「次毫米波 VLBI 計畫」所用加以討論。按索科羅會議結論，現在，2011 年 7 月，本院天文所已開始著手重新測試和檢查這支口徑寬達 12 米的天線碟之現況。