

人類史上第一張

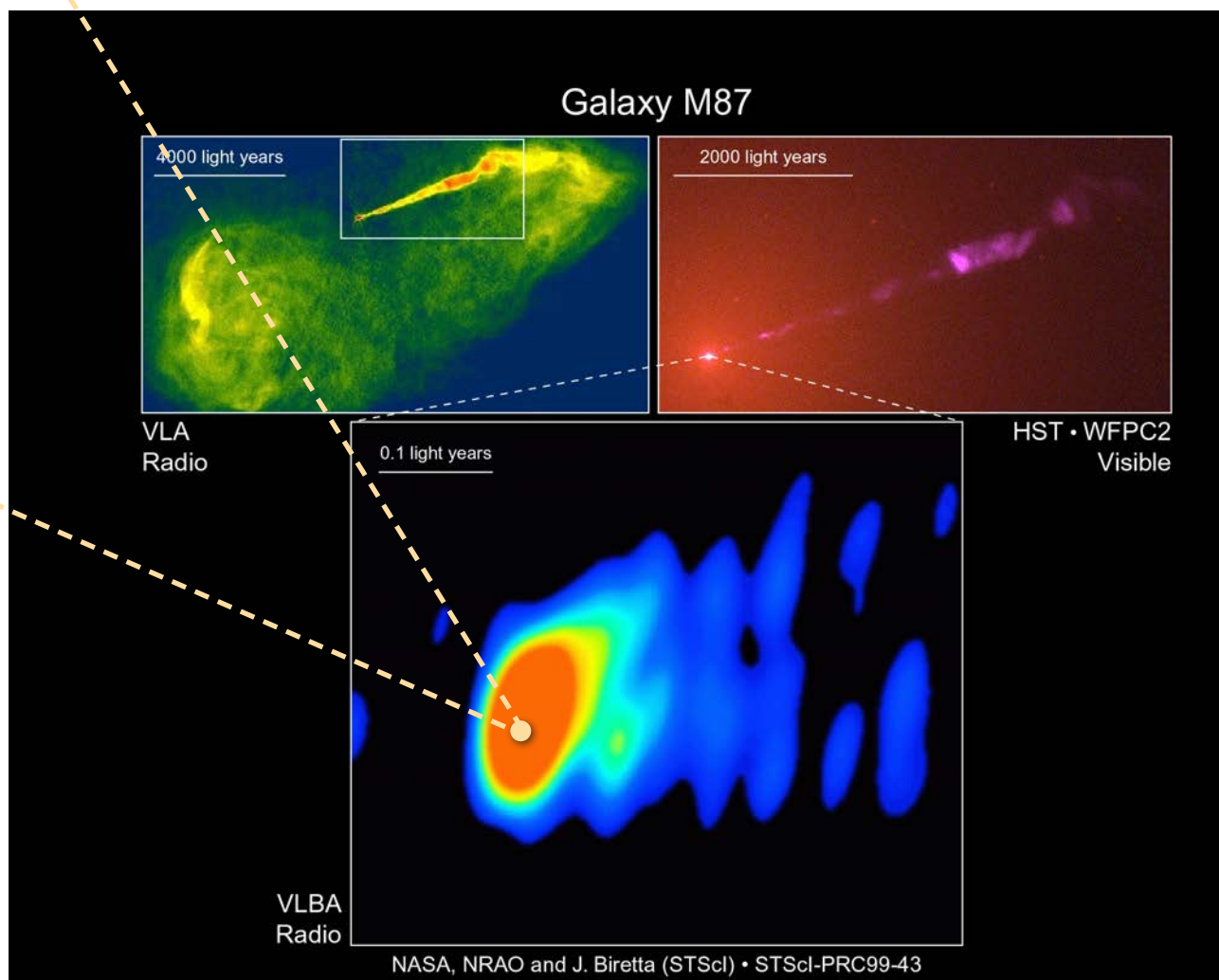
文/卜宏毅

# 黑洞「近照」

事件視界望遠鏡 (EHT; Event Horizon Telescope) 團隊在今年 2019 年四月 10 日公布了人類史上的第一張黑洞照片，EHT 團隊在全世界各地，包括台灣，都舉辦了盛大的記者會。這張人類世上的首張黑洞照片的主角，是距離我們約五千五百萬光年的 M87 星系，其星系中心的超大質量黑洞 (約有六十五億個太陽質量)。M87 星系有個明顯的噴流，這次黑洞的影像正是這個噴流的「源頭」。

M87 有個明顯的大尺度噴流，其近照顯示出下方較亮的環狀影像。此環狀影像的形狀與天文學家預計看到的黑洞影像相符合：黑洞周圍的光線因為部分被黑洞捕抓而烘托出黑洞的「剪影」。雖然天文學家認為黑洞存在於宇宙之中且有許多的相關理論研究，但是在今年四月十號這張「黑洞近照」的公佈之前，尚未看過黑洞近距離的影像。

©. NASA, NRAO, & J. Biretta (下圖), EHT Collaboration (左上圖)



這張黑洞照片，是在2017年四月5號到11號之間四個晚上，由七個遍佈全球（包括夏威夷，美洲，歐洲）的電波望遠鏡共同觀測所分析得到。藉由這些遍佈地球的望遠鏡聯合觀測，能幫助我們達到由地球大小般的望遠鏡所能達到的角解析度，足以分辨天空中位於M87中心遙遠黑洞附近的影像。這樣的角解析度甚至能分辨放在月球上的一個硬幣的正反面。

經過近兩年的資料處理，資料分析，理論分析等漫長過程，目前成員約兩百多人的EHT團隊在四月十日除了公布影像外也同時發表了六篇論文，分別對望遠鏡陣列，數據與影像處理，理論與影像特徵作了深入討論。

## 黑黑洞照片背後 更多的科學故事

經過近兩年的資料處理，資料分析，理論分析等漫長過程，目前成員約兩百多人的EHT團隊在四月十日除了公布影像外也發表了六篇論文，分別討論了：

Paper I : Overview 簡介

Paper II : Array 望遠鏡陣列

Paper III : Data數據

Paper IV : Image影像處理

Paper V : Theory理論

Paper VI : Feature extraction  
影像特徵分析

有些讀者可能對這首張黑洞照片的影像感到興趣：

## 黑洞近照

### 為什麼像是甜甜圈？

黑洞本身不發光，天文學家所觀測到來自黑洞的輻射是來自於黑洞周圍包圍住黑洞的物質，這些物質在不同的頻率因為不同的機制發出輻射。根據廣義相對論，光線在黑洞附近會被彎曲，部分光線會被黑洞「吃掉」（如圖1），因而形成狀似是甜甜圈內部的陰影區，稱為黑洞剪影（black hole shadow）。（如圖2）

這個甜甜圈的內部陰影正是黑洞一時空中的一個洞一的具體表現！愛因斯坦的廣義相對論預測了黑洞剪影的形狀與特性，而黑

洞附近的發光物質的空間分佈，能量分佈，與運動特性則提供各種不同的發光背景，烘托出這些黑洞的剪影，旋轉的黑洞也會對剪影造成影響，這些都是在理論分析黑洞「近照」時需要考慮的課題。

### 為什麼選M87？

天體在天空中的張角由大小與距離決定。根據所有已知黑洞的大小與距離，M87星系中心的超大質量黑洞在天空中的張角是第二大的，大約有40個微角秒（ $40 \mu\text{as}$ ；1角秒=1as=1/3600角度）的黑洞（約是一個硬幣放在月球上時的張角）。排行第一的是位在我們銀河系中心的黑洞，

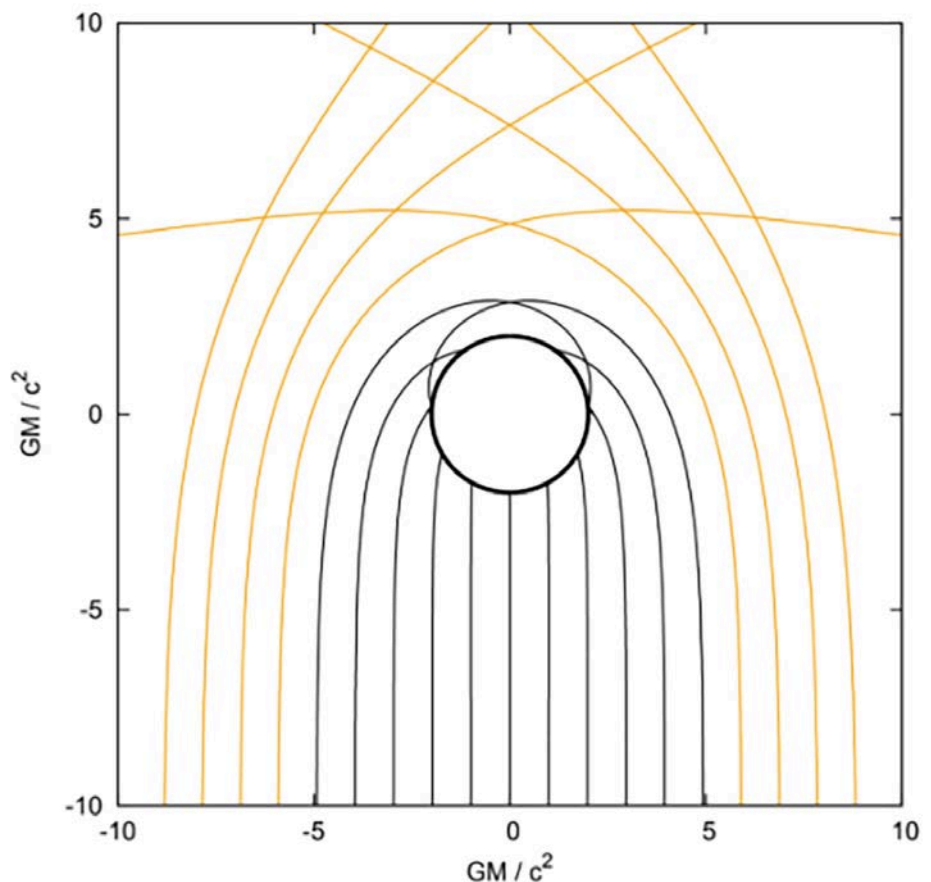


圖1. 非旋轉黑洞附近的光線軌跡。圖片中央的黑洞能「吃掉」（捕捉）周圍的光線，形成剪影。被捕捉的光線用黑色表示。有興趣的讀者可以使用免費教育軟體Odyssey\_Edu模擬光線在黑洞附近軌跡。（©卜宏毅）

黑洞周圍的光線被黑洞捕捉所造成的黑洞“剪影”

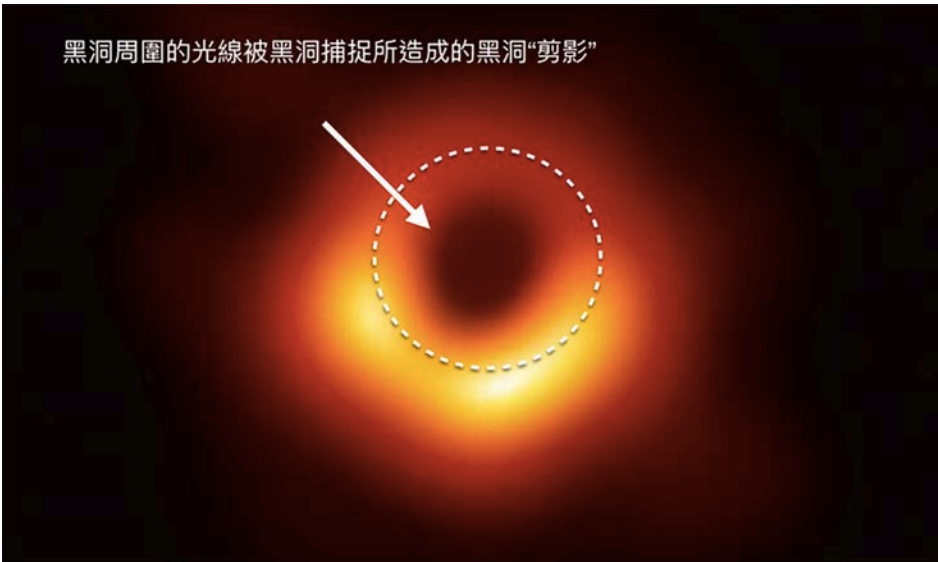


圖2. 黑洞影像中剪影區域的示意圖。EHT團隊根據廣義相對論，磁流體力學，以及之前對M87星系的了解模擬了超過六萬張的黑洞影像資料庫並加以分析。這些影像分別對應了不同的黑洞旋轉速度，不同的觀測角度，不同的氣體溫度，不同的氣體環繞方式，以及氣體環繞黑洞的不同時刻。儘管對一些細節物理的不確定，觀測到的剪影與我們對M87黑洞以及其周圍的環境大致符合。由剪影的大小，也獨立推論出M87星系中心的黑洞約有六十五億個太陽質量。(©. EHT Collaboration)

約有50個微角秒。在地球上觀測銀河系中心時，會受到銀河系盤面星系介質造成的散射影響。EHT團隊目前還在分析對銀河系中心黑洞的觀測資料。

EHT利用電波望遠鏡和甚大陣列干涉儀 (VLBI; Very Long Baseline Interferometry) 技術用約230GHz的頻率觀測黑洞，並「分

析得出」影像。影像的顏色不具意義 (人眼無法看見電波)，僅影像的相對亮暗對應了電磁波輻射能量的大小。因此黑洞的照片

### 為何用電波觀測黑洞剪影？

選定要觀測的黑洞目標後，根據天體的輻射特性，我們要挑選適當的觀測頻率才能不被黑洞周圍的發光物質擋住而看見黑洞的剪影 (如圖3解)。EHT的主要觀測頻率是在電波 (radio) 波段，頻率230GHz (波長1.3mm)。在此觀測頻率黑洞附近的結構相對是透明可穿透的。望遠鏡的解析度大致可用觀測的波長 $\lambda$ ，除以望遠鏡的大小 $d$ ，來估計。當觀測頻率與波長決定之後，我們可以利用上述： $\lambda/d \sim 40$ 微角秒的要求，估計出大約需要六千公里以上的望遠鏡大小，才能達到足夠的角解析度 (angular resolution) 來看到在M87星系中央的黑洞剪影。

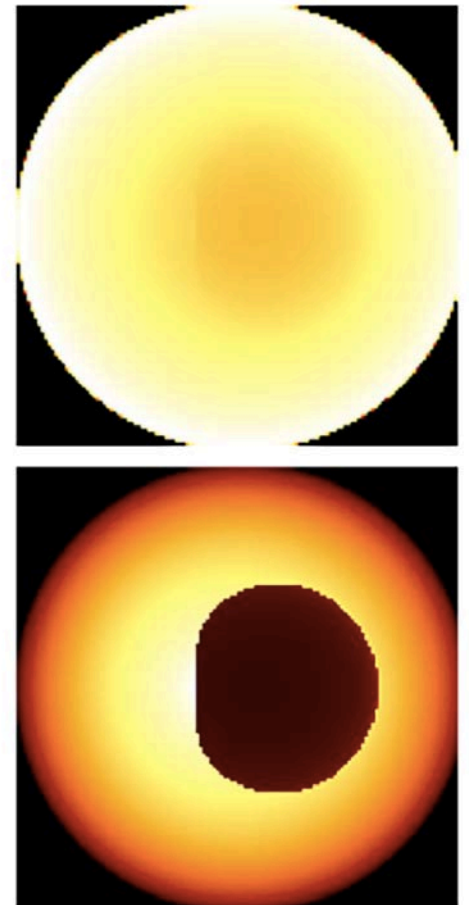
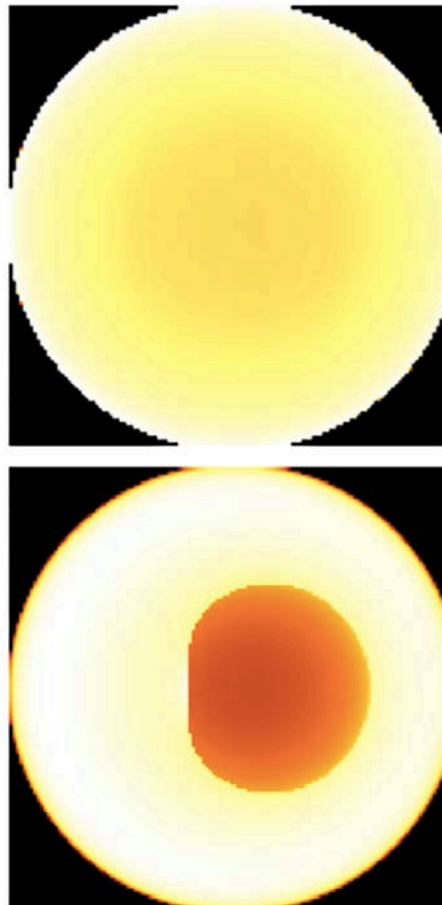


圖3. 模擬被發光物質包圍的黑洞用不同的觀測頻率時所觀測到的影像。在適當的觀測頻率下 (下方圖) 可以看到黑洞剪影。此範例是一個極端的情況：快速旋轉的黑洞且其旋轉軸垂直於觀察者，造成剪影明顯的不對稱。(©. 卜宏毅)

為什麼  
照片看起來是模糊的？

並非像是如同手機拍照般「拍到的」。

要怎麼打造一個六千公里以上的超大望遠鏡呢？答案是利用很多的望遠鏡一起合作觀測。圖4是2017年參與觀測M87的電波望遠鏡（因為M87位於北半天球，南極望遠鏡South Pole Telescope 無法觀測M87）。這些望遠鏡的連線稱為基線（baseline）。2017四月的觀測很幸運的幾乎每個望遠鏡在觀測的時候都遇到了好天氣。這些望遠鏡能同時觀測到M87的月份也決定觀測時間的選擇。

當地球自轉時，這些基線的兩端畫出的軌跡，電波天文學家習慣畫在圖5稱為uv-plane的平面上（將基線的距離以觀測波長表示）。我們不妨把圖5中望遠鏡的軌跡（稱作uv-coverage）「大致」想像成是一個虛擬的超大望遠鏡的局部組成。因此，基線越長，則這個虛擬望遠鏡的就越大，越能看見細微的結構；而uv-coverage填的越滿，則這個虛擬望遠鏡就越完整（這些觀測的細節數學上與傅立葉轉換有密切的關係；電波望遠鏡利用干涉儀原理觀測，得到的訊號稱為visibility，其與影像之間的關係符合傅立葉轉換）。例如，在圖5中如果uv-coverage能把 $25 \mu\text{as}$ 的圈圈填滿，則這個虛擬望遠鏡就足以解析天空中約25個微角秒的結構，也就可以「模糊看見」大小約40微角秒的M87黑洞的剪影了！

一個甚大陣列干涉儀（VLBI）的觀測好壞，大致就是在uv-plane上的這些軌跡的分佈與密度（uv-coverage）決定。

圖6的範例中，給出了一個

模擬的黑洞剪影影像（左上方小圖），用兩組不同的uv-coverage所觀測的結果。若望遠鏡的基線能因為地球自選而填滿藍色（或紅色），則能得到右上方（或右下方）的分析影像。在這個範例中，填滿藍色的情況不足以解析出黑洞剪影。圖5 M87觀測的uv-coverage，雖比藍色圈圈大但無法完全填滿紅色圈圈，觀測的品質剛好介於這兩種情況中間：這意味著在有限的望遠鏡數量，望遠鏡分佈，以及觀測時間下，我們僅能組成一個「不完整」的虛擬望遠鏡，並在對觀測數據分析成影像時，對欠缺的資訊進行人為的假設。EHT的影像分析團隊也由不同的四個獨立小組構成，交

叉驗證是否大家所得到的影像結果大致一至。最後公布的照片是所有小組的影像綜合而成。

## EHT團隊如何建立 黑洞剪影的理論模型？

黑洞的影像與許多物理參數有關，例如黑洞的自旋，黑洞質量，吸積流掉入黑洞的效率（吸積率），被吸積流帶入黑洞附近的磁場多寡等等。EHT團隊根據兩個步驟建立包含了超過四十個數值模擬的資料庫與包含了超過六萬張黑洞模擬影像的資料庫。

### 1. 利用廣義相對論磁流體力學 模擬黑洞附近吸積流與噴流

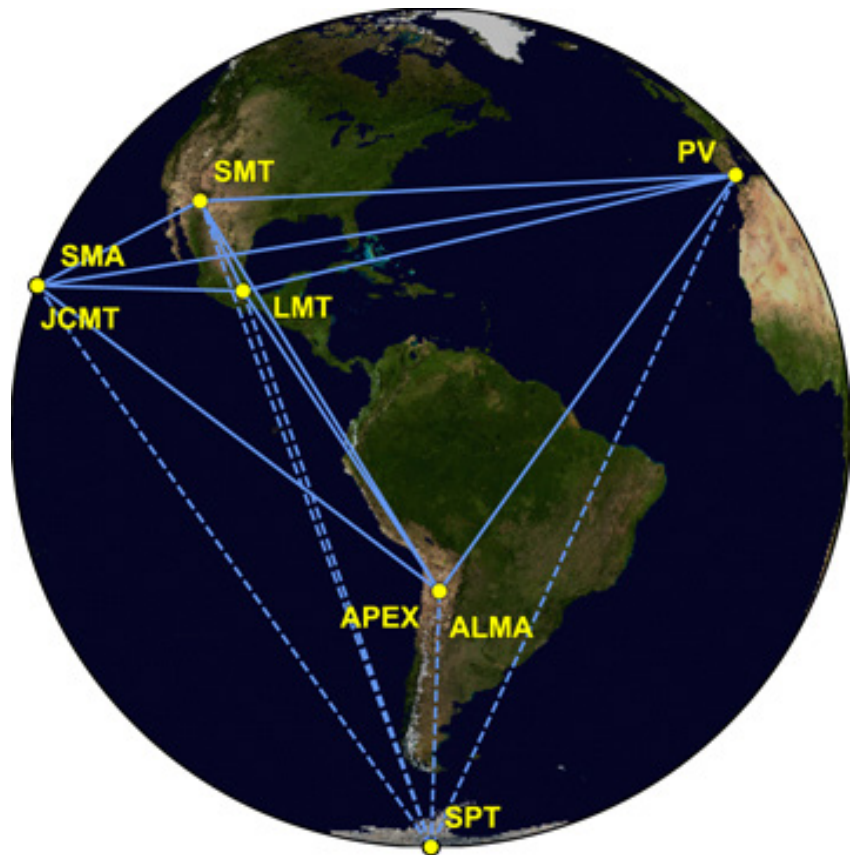


圖4. 2017年EHT觀測的望遠鏡成員。其中為在南極的SPT因為地理位置的關係未能參與M87的觀測。甚大陣列干涉儀所指的「甚大」指的是望遠鏡與望遠鏡的距離相當遠，未能有硬體設備直接連接。（credit: EHT Collaboration; figure 1 of paper 1）

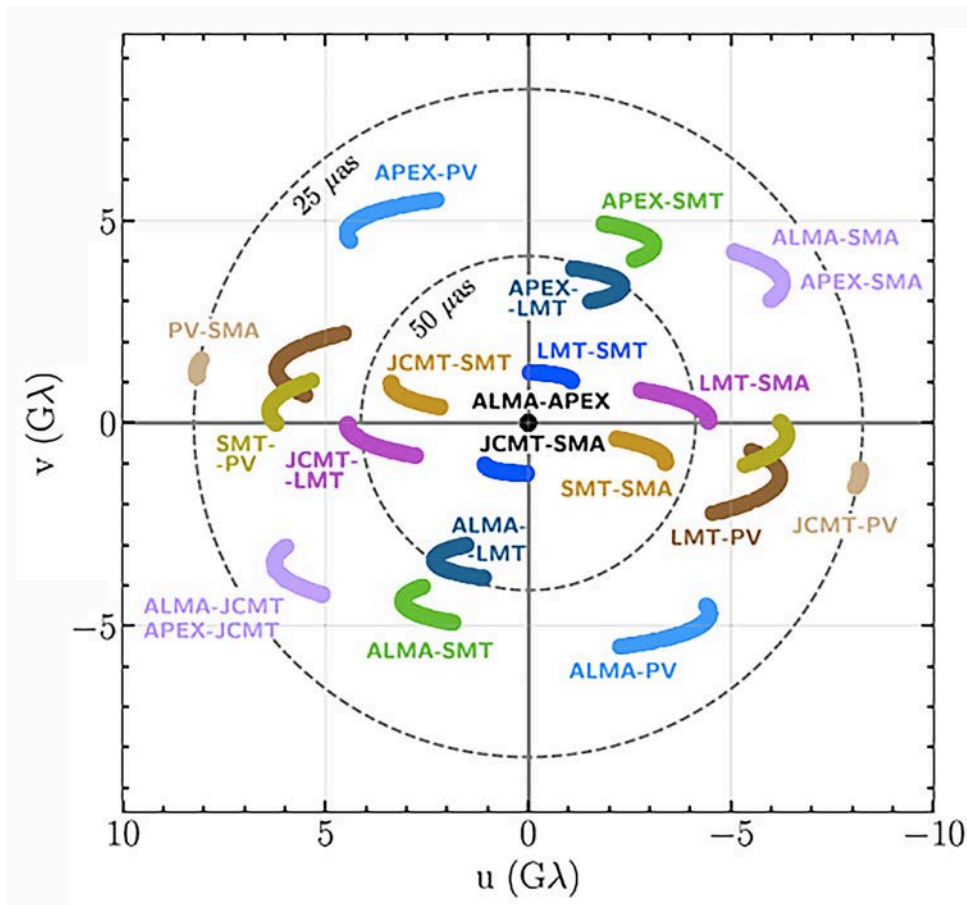
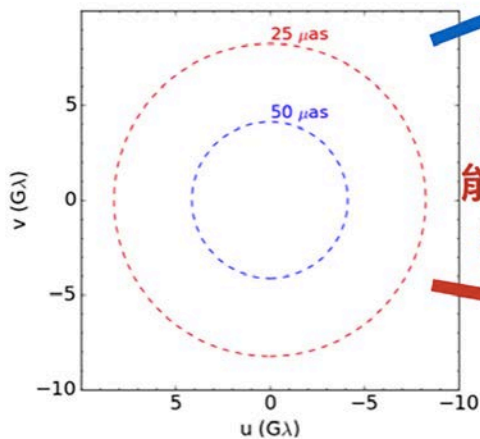
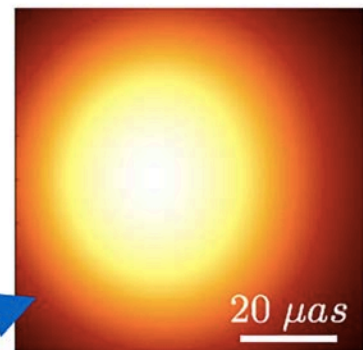


圖5. 望遠鏡與望遠鏡間形成的基線，因為地球的自轉改變與觀測目標的相對位置，形成一個如地球大的虛擬的望遠鏡。不同時刻的基線分佈貢獻了這個虛擬望遠鏡的不同部分。圖為畫在uv-plane上的基線軌跡，稱為uv-coverage。(©. EHT Collaboration; figure 2 of paper 1)



若望遠鏡成員能因為地球旋轉填滿藍色區域



若望遠鏡成員能因為地球旋轉填滿紅色區域

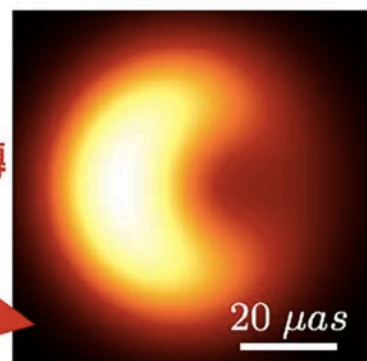


圖6. 甚大陣列干涉儀 (VLBI) 觀測結果取決於uv-coverage。如果左上方是M87黑洞剪影的影像，uv-coverage填滿藍色區域還不足以解析出黑洞影像。若uv-coverage可填滿紅色區域，則能大致解析出黑洞的影像。真實觀測的uv-coverage介於兩者之間 (見前圖)。(©. 卜宏毅)

## 的狀態

根據數值模擬，EHT團隊建立了一個至今最完整的資料庫，涵蓋了不同的黑洞轉速，以及在黑洞附近不同的磁場大小：在黑洞事件視界附近累積的磁場多到某個極限時，能破壞吸積流的結構並讓吸積流掉入黑洞的最終過程越加困難。

## 2. 根據數值模擬的結果，參數化建立可能看見的黑洞影像

因為輻射主要是由電子產生，我們需要進一步假設電子的能量分佈以及其他觀測參數（例如觀察者相對於黑洞旋轉軸的角度），計算出可能的黑洞影像。當模擬黑洞剪影像時，黑洞質量和吸積率的大小（假設M87的距離是正確已知的），都會和影像相關。也因此，藉由比較模擬黑洞的剪影影像與觀測結果，可以

得到這些參數的限制。

## 首張黑洞影像的意料之內與意料之外？

黑洞的近照有兩個重點：一個是黑洞剪影的輪廓（由廣義相對論所預測，可驗證廣義相對論在強重力場的正確性），一個是周圍為發光物質的所透露出黑洞周圍吸積流與噴流的特性（與許多相對不太確定的物理細節有關，例如噴流與吸積流在EHT觀測頻率230GHz的相對亮度）。例如在下圖是一些天文學家在首次看見M87黑洞影像前，所預測的可能影像。

這次看見的M87黑洞影像近乎圓形，確定了主要貢獻黑洞近照的光線是由很靠近黑洞的電子所產生（這是在看見黑洞影像前所不可預測的），而我們這次所

看見的黑洞影像主要就是時空的表現！而黑洞剪影的近圓形輪廓也符合廣義相對論黑洞時空的描述（請見圖2）。換句話說，若有其他理論或是理論中的參數預測出明顯非圓形的黑洞剪影，那這次的觀測結果顯示這些理論或是參數是不太可能的。

相關的另一個有趣的發現是，當我們分析特定環境（特定黑洞轉速，黑洞附近磁場大小，與電子能量分佈）能造成觀測到的可能性時，發現首張黑洞近照的觀測資訊未能幫助我們區分哪種特定環境是最有可能的，於是我們也採用了其他對M87天體的觀測資訊所提供的限制條件，並和模型比對。

在未來，藉由對M87黑洞近照的偏極化（polarization），動態影像等等資訊，將能提供對M87黑洞附近環境的更多細節。當然，

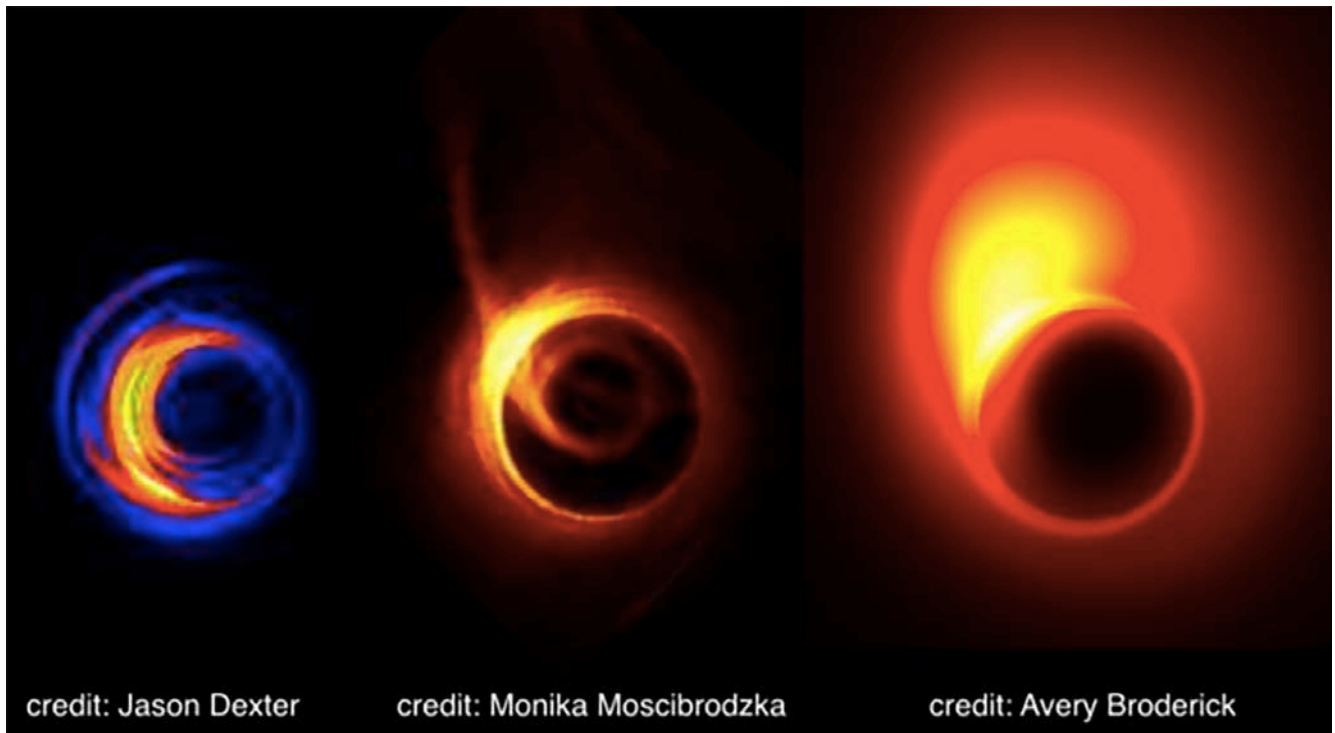


圖7. 天文學家對M87黑洞的近照有不同預測。這些預測與電子能量的分佈方式，電子空間的分佈等等相關，也關係到噴流部分是否能被明顯的被看見。在這些範例圖中，越右方的黑洞影像其噴流的結構越明顯。（©. Jason Dexter, Monika Moscibrodzka, Avery Broderick）

EHT對銀河系中心黑洞的觀測，以及其高解析度對其他天體的觀測也將帶來更多新發現。

更多有關首張黑洞照片背後科學資訊，讀者可以參考我在個人網誌寫的**懶人包I**和**懶人包II**。關於黑洞剪影的科學，也可以參考**臺北星空69期**「窺視黑洞的身影」一文。

## 未來展望

### EHT團隊與台灣

隨著第一張黑洞照片的問世，加上首次重力波的偵測，黑洞附近強重力場的物理逐漸變成可以驗證的「實驗物理」。這些發現都是重要的第一步，

在未來EHT會帶來更多M87黑洞周圍的動態結構，磁場分佈，我們銀河系中心黑洞的影像，以及對其他天體更細微結構的觀測。再加上近來首度發現微中子的來源，我們對天體的認識有越來越多的方式，預計也將有越來越多的驚喜發現。

EHT團隊中隸屬台灣研究單位或是來自台灣的成員約有數十位，當中有數位成員並在團隊中扮演統籌協助EHT運作的重要職務。台灣的中研院天文所負責支援2017年觀測八座望遠鏡中的其中三座（中研院主導的格陵蘭望遠鏡也在2018加入EHT觀測行列；對格陵蘭望遠鏡有興趣的讀者也可以參考**臺北星空69期**「格陵蘭望遠鏡計畫」一文）。除了望遠鏡硬體方面外，這些成員們目前主要貢獻在影像分析與黑洞影像的理論方面。相對於台灣對這些計劃的硬體投資，同樣重要的是更多研究者與對相關科學有興趣學生的加入與成長！

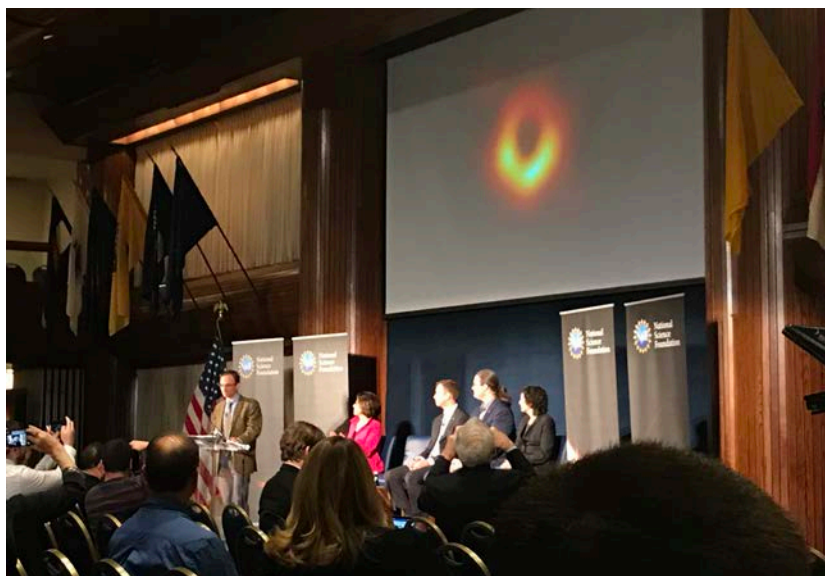


圖8. 四月十日在在華盛頓由美國國家科學基金(National Science Foundation)主辦的記者會會場。(©. 卜宏毅)



圖9. 四月十一日在機場的報紙 (©. 卜宏毅)

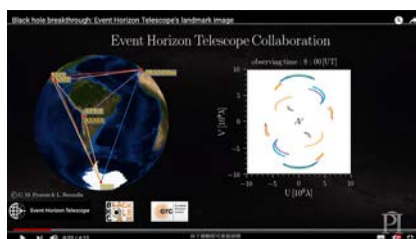
卜宏毅：加拿大圓周理論物理研究所

### YouTube相關影片：



Event Horizon Telescope Animated Movie

[https://www.youtube.com/watch?v=hMsNd1W\\_lmE](https://www.youtube.com/watch?v=hMsNd1W_lmE)



Black hole breakthrough: Event Horizon Telescope's landmark image

[https://www.youtube.com/watch?time\\_continue=246&v=129wCKkQpMg](https://www.youtube.com/watch?time_continue=246&v=129wCKkQpMg)