

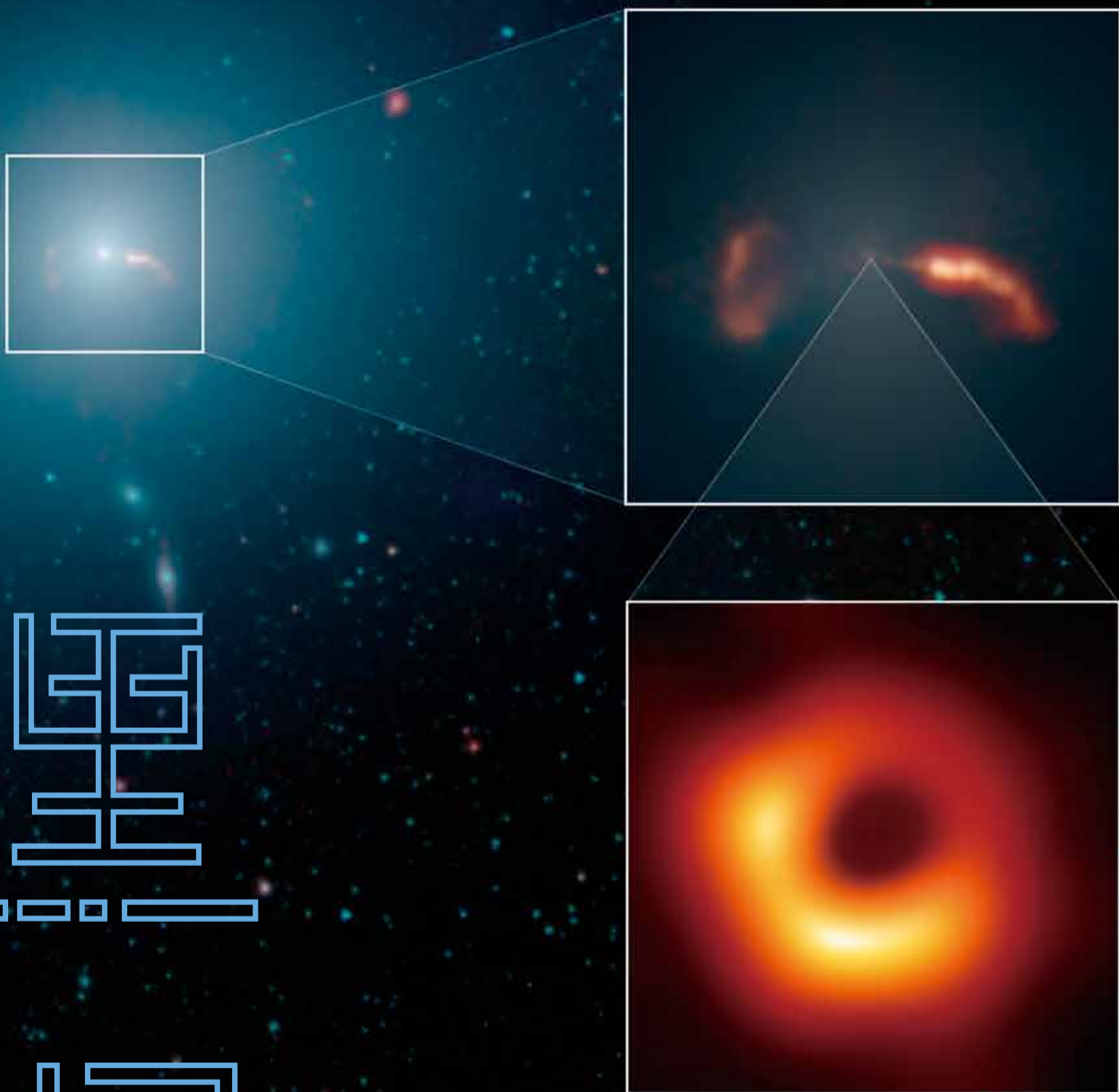


天聞

中華民國 108 年 秋季號



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

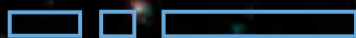


星



洞

圖說：橢圓星系M87（左方）及其噴流（右上方）和中心的黑洞影像（右下方）。©NASA/JPL-Caltech/IPAC/EHT Collaboration



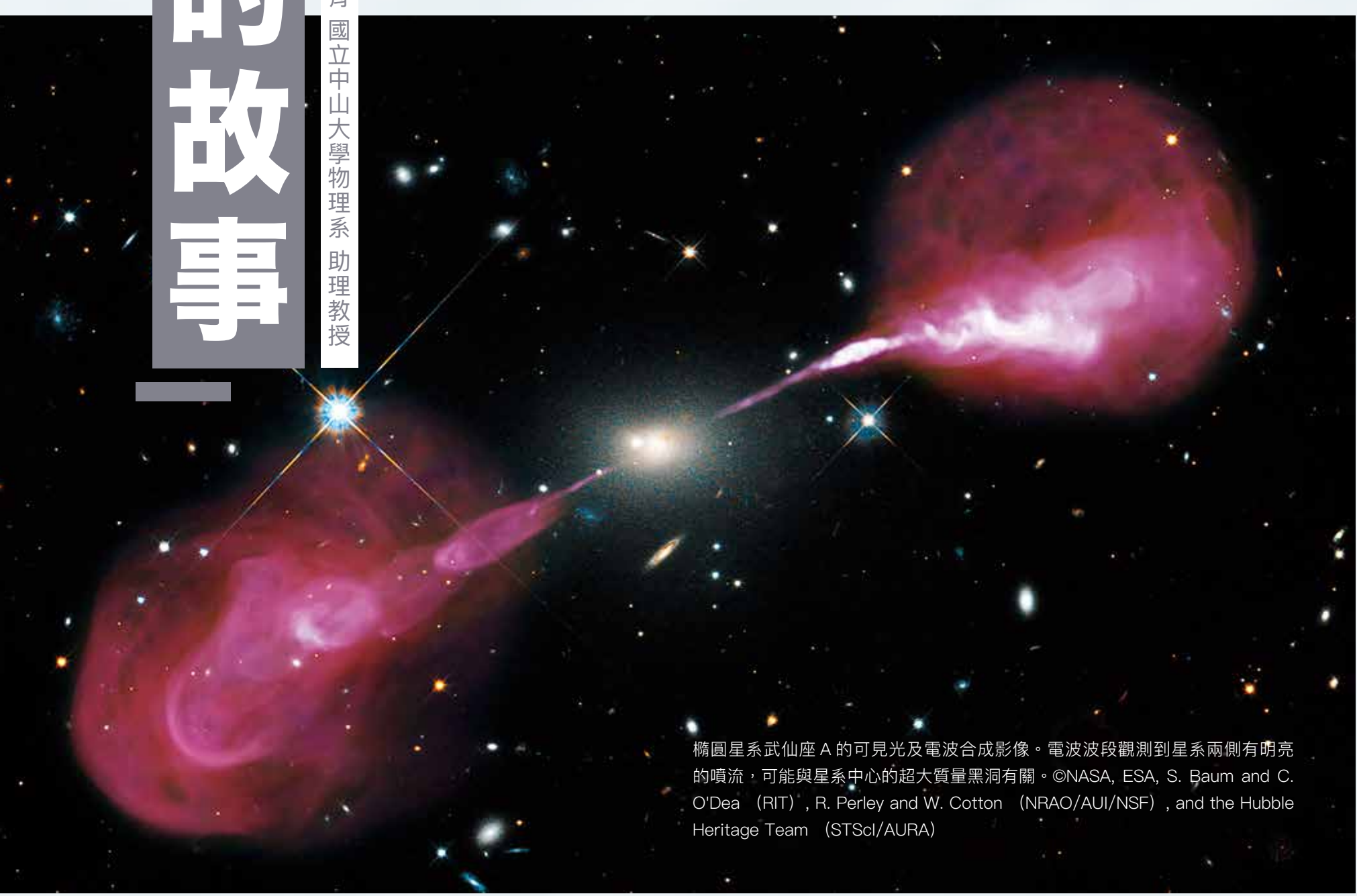
黑洞的故事

作者 郭政育 國立中山大學物理系 助理教授

「黑洞」這個概念源自於愛因斯坦的「廣義相對論」，但愛因斯坦本人卻不是首先提出「黑洞」這個想法的物理學家。在第一次世界大戰的戰場上，曾有一位德國的物理學家叫史瓦西（Karl Schwarzschild），當他跟隨著德軍在俄國前線作戰時，抽空閱讀著愛因斯坦在 1915 年剛發表的廣義相對論。隨著他

閱讀時所產生的強大靈感，他在幾週之內就從愛因斯坦的方程式中得到了一個連愛因斯坦都感到奇特的數學解，這個數學解不但描述了任何球狀星體附近的時空幾何結構，它還隱含著一種特殊天體的存在：如果有一個天體的半徑小於所謂的「史瓦西半徑」時，外界會觀察到這個星體表面的時間流逝將完

全停滯。此外，任何處在這個半徑之內的物質甚至是光線，都將因為受到強大重力的拉扯而無法逃脫。正因為連運動速度最高的光都無法逃脫這種星體的掌控，因此在 1967 年時，美國著名的物理學家惠勒（John Wheeler）在一場位於美國航太總署的演講中，正式將這種奇特星體定名為「黑洞」。



橢圓星系武仙座 A 的可見光及電波合成影像。電波波段觀測到星系兩側有明亮的噴流，可能與星系中心的超大質量黑洞有關。©NASA, ESA, S. Baum and C. O'Dea (RIT), R. Perley and W. Cotton (NRAO/AUI/NSF), and the Hubble Heritage Team (STScI/AURA)

我們可以將「黑洞」想像成宇宙中一種最令人畏懼的引力怪獸，因為它是存在星際間的所有星體中，將時空扭曲到最極致的一種狀態。時空的嚴重

扭曲讓黑洞產生了極強大的重力。凡是進到黑洞這種怪獸的地盤——事件視界（又稱事象地平面，event horizon）——之內的所有事物，都會被它強大的

重力吞噬、撕碎，最後將殘骸堆積在黑洞中心那死寂的奇異點中。

為什麼稱黑洞的地盤為「事象

地平面」（或事件視界）呢？想像我們在日落時分，遠望一無邊無際的大海，在大海的遠端可以清楚地看到「地平線」（horizon）。在太陽落到地平



高雄西子灣的夕陽。© 黃彥誠

線之前，所有來自太陽的光芒都可以被地面上的人們所看見。然而，一旦當太陽落到地平線之下，所有來自太陽的訊息，或是任何發生在太陽上的事件（event），都將消逝在地平線（horizon）下，沈沒於黑暗之中，人們再也無從看見來自太陽的光芒。同樣地，當一個物體掉到黑洞的地盤之前，這個物體的所有訊息仍然有可能透過許多方式傳遞給地球上的人們。但是，一旦當這個物體進入到黑洞的史瓦西半徑範圍之內，由於此時完全無法逃脫黑洞重力的掌控，因此所有的訊息都將消逝在黑洞的「horizon」之後。由於這個覆蓋黑洞的屏幕是一個球面，我們稱之為事象地平面或事件視界。

黑洞這種引力怪獸在宇宙中真的存在嗎？在 1950 年代以前，如果你拿這個問題去問愛因斯坦，他會用嚴謹的數學與物理證明給你看，黑洞這種東西在宇宙中是不可能存在的。然

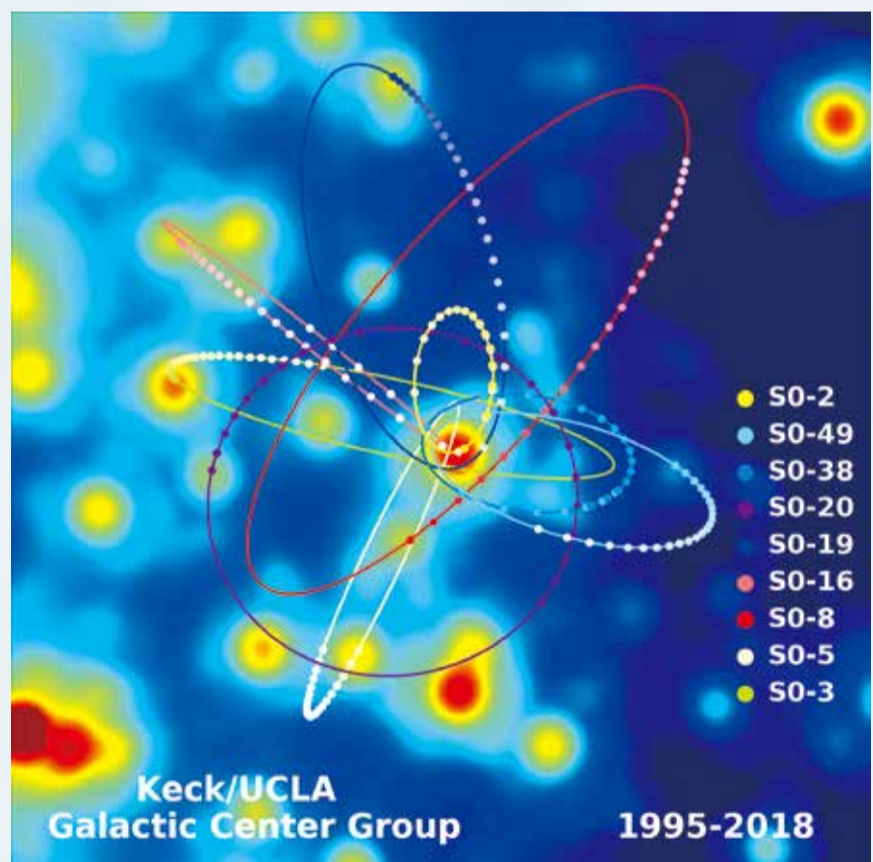
而，從 1970 年代起，天文學家陸陸續續發現了可以在短時間內釋放出巨大能量的遙遠星系（如類星體、電波星系等）。到了 1980 年代，天文學家根據理論計算的結果，推論出這些能夠在瞬間產生巨大能量的星系，它們的能量來源應該是來自於質量大於太陽一百萬倍以上的黑洞（超大質量黑洞）。接著，在 1990 到 2016 年之間，美國加州大學洛杉磯分校的天文團隊成功地拍攝到我們銀河系中心 0.03 光年範圍內的星球運行，這些星球正圍繞著一個不會發光的質點旋轉。根據牛頓力學的計算，這個不會發光的質點質量大得嚇人，有著四百萬顆太陽的質量。天文學家想到，要在那麼小的範圍內塞進那麼多不會發光的東西，只能用黑洞來解釋。這是之前黑洞存在最強烈的證據，但這樣的證據仍然是間接的。

大約在 2007 年左右，當時在美國麻省理工學院的天文學家 Sheperd Doeleman 有了一個新

的想法。他想要利用次毫米波的特長基線干涉陣列去直接測量黑洞事件視界周圍的訊號，並用以探測黑洞的性質。有一天，他到哈佛大學的史密松天文台去演講，並告訴哈佛大學的天文學家他的最新想法。當時，本所的前所長賀曾樸院士也在場聆聽。演講後，賀院士告訴 Sheperd Doeleman 說，單單要用干涉儀去測量黑洞周圍的訊號是不夠的，他應該要試著拍攝黑洞的直接影像！賀院士的一句話啟發了 Doeleman 博士用次毫米波的特長基線干涉陣列望遠鏡去拍攝黑洞影像的想法，而這也是事件視界望遠鏡（Event Horizon Telescope）計畫的開始。

事件視界望遠鏡是用分佈在世界各地的數座次毫米波望遠鏡所組成的陣列。透過電波干

涉的技術，這種陣列可以虛擬出一個如同地球一樣大的望遠鏡，而這種望遠鏡將達到天文學史上最高的解析度（20 微角秒）。為什麼需要那麼大的望遠鏡呢？這是因為距離地球最近的幾個大黑洞（如室女座 M87 的黑洞）在天空上的張角大約跟放在月球表面上的棒球差不多大。然而，要能看到月球上的一顆棒球對於傳統的望遠鏡來說完全是不可能的任務。幸好特長基線干涉的技術已經發展多年，現在只要能夠在地球上找到足夠多、彼此間距夠遠的電波望遠鏡，並透過干涉技術將它們連結起來，就能在次毫米波段進行黑洞的拍攝。目前公布的首張黑洞照片，還有很多細節看不清楚。未來更多望遠鏡加入這個計畫後，解析度可望再提高，預期將能得到更清晰的黑洞影像。



美國加州大學洛杉磯分校 Andrea Ghez 教授的天文團隊，從 1995 到 2018 年使用凱克望遠鏡持續觀測銀河系中心的星球運行，並推測出這些星球的運轉軌道。©UCLA Galactic Center Group – W.M. Keck Observatory Laser Team

吸積盤 *Accretion Disk*

奇異點

在黑洞最中心，物質塌縮在一個密度等於無限大的區域裡，即奇異點。所有掉入黑洞裡的物質和能量最後都往那裡去。廣義相對論預測那裡的密度無限大，暗指該處已不適用廣義相對論，而量子效應的描述也從那裡開始。

事件視界

這是黑洞「黑色」的部分。是個以奇異點為中心的球形範圍，一旦進入此區域的話，無論物質或能量，就受黑洞重力所掌握、不再能逃脫，又稱「不歸路」。

光子層

黑洞本身雖然黑暗，但是不遠處的熱電漿噴流或吸積盤卻有光子輻射出來。當無重力時，光子呈直線運動。但是在黑洞事件視界外，強大重力足以彎曲光子的運動軌跡，所以我們會看到，在幾乎圓形的黑暗球狀陰影外，會有一圈明亮的光環。「事件視界望遠鏡」就是希望看得到這個陰影和光環。

相對論性噴流

黑洞有時藉吸食恆星、氣體或塵埃等，大吃一頓，伴隨產生了粒子噴流，從黑洞的上下兩極以極強勁的輻射向外噴發，噴發速度接近光速。這種噴流在太空中可綿延幾千光年遠。

最內穩定軌道

吸積盤內圈，是物質還能平平安安進行軌道運動的最後邊境，在這裡，還不會掉落到「不歸路」上。

吸積盤

由於極高熱氣體塵埃盤環繞著黑洞在高速旋轉，所產生的電磁輻射（包括了X射線、可見光、紅外線、電波），透露著黑洞所在位置。這些物質的一部分，命中注定會越過事件視界邊境最終踏上「不歸路」，其他部分則有可能受力後向外噴，形成噴流。

相對論性噴流
Relativistic jets

事件視界
Event Horizon

奇異點
Singularity

光子層
Photon sphere

最內穩定軌道
Innermost stable orbit

看見

黑洞

作者 | 羅文斌

中研院天文所 / 臺灣大學物理研究所 博士生

為什麼人們在意黑洞呢？

在所有的天文奇景中，為什麼人們這麼在意黑洞呢？或許是因為黑洞的神秘、複雜，可能對某些人而言，還有恐懼吧。人們對於宇宙中未知的事物充滿了敬畏之心，而黑洞剛好滿足了這些需求。大量的大眾媒體、小說、電影為黑洞佈滿了想像空間。大家有看過「星際效應」這部電影嗎？充滿戲劇性卻又無比真實的黑洞影像從此在大家心中產生新的化學作用。當男主角 Cooper 和他的船員們被困在巨人黑洞附近的行星時，時間變得如此緩慢，在行星上的一小時，等於地球上的七年。他們才待上幾個小時，女兒居然跟自己一樣大了！

物理與天文學家們為什麼在意黑洞呢？因為黑洞是基本物理理論中相當重要的拼圖之一。目前已知的兩大物理理論，廣義相對論與量子場論，

在黑洞這個強大重力場的環境下會出現彼此矛盾的情形，因此物理學家與天文學家對這個天空中極端的實驗室充滿了濃厚的興趣。基礎物理理論是關於世界如何運行的地基，地基穩了，我們才能在這上面蓋出更燦爛的文明。所以調和了這個矛盾，我們就準備好了一把鑰匙，一把能讓人類文明踏向下一個階段的鑰匙。

人們要如何看見黑洞？

EHT 是事件視界望遠鏡的縮寫，而事件視界是黑洞的邊界。從計畫的名稱就能知道，我們的目標是要探索與解析黑洞的邊界。EHT 的觀測技術，稱為特長基線干涉儀 (VLBI, very long baseline interferometry)。其特點是可以產生出高解析度的影像。這個技術自 1960 年代開始發跡，可以將洲際的望遠鏡陣列觀測到的信號做合成，等效成一個地球大小的望遠鏡，天文

學家稱之為孔徑合成，是目前在天文中達到微角秒等級解析度的唯一方法。

2009 年，EHT 這個國際計畫開展。在 2017 年，EHT 總共有八座望遠鏡投入觀測，最長的基線達到 12000 公里，等效的最高解析度是 25 微角秒。這個解析度有多高呢？相當於是在紐約閱讀一份，放在巴黎咖啡廳裡的報紙；或是從站在地球上判斷，月球表面上的一枚硬幣，是正面還是反面。

這些望遠鏡的位置相當極端，例如在智利 5000 公尺高的阿塔卡瑪沙漠高原、在夏威夷 4400 公尺高的毛納基峰、在萬年結冰的南極洲、在北極圈內的格陵蘭島。這些望遠鏡都遠離人類文明的繁華，因為乾燥環境是電波望遠鏡選址的第一要件。

要做出一張黑洞的影像需要多少努力呢？EHT 的研究團隊有超過 200 名科學家，來

自 30 個不同的研究機構與國家，望遠鏡遍佈 4 個洲。EHT 的觀測窗口通常是每年的 4 月初，從 10 天中選出 5 天。每天觀測前天文學家們會開視訊會議，根據每個望遠鏡的狀態與天氣，決定當天是否要觀測。

黑洞觀測需要做些什麼事？

一旦確定當天要觀測後，我們便會開始進行各式各樣的檢查，從望遠鏡的訊號端，如對焦狀態、指向性模型、設定接收機的觀測頻率，到資料紀錄的後端，如氫邁射原子鐘精度的穩定程度、硬碟是否能夠正確紀錄資料。還有最重要的事情，要將望遠鏡的遮罩 (shutter) 打開，就像是拍照要移開鏡頭蓋。開始觀測後，望遠鏡的電腦系統會自動追蹤天體，以及監測望遠鏡的所有狀態。

當望遠鏡追著天體時，會以每秒鐘 2GB 的速度將資料記錄



小山博士領導的影像處理團隊。照片正中間是小山翔子博士，右邊第二位是本文作者，最右邊是本文作者的指導教授淺田圭一博士，右上方是當時在格陵蘭觀測的郭駿毅博士。由於當時還不能公開宣布已經看到黑洞成像，因此團隊成員用這個祕密手勢宣告看見黑洞！© 中研院天文所

到硬碟陣列裡。2GB 相當於是一部電影的資料量。整個觀測記錄完後，會產生數 PB 左右的資料量。在每個望遠鏡負責做觀測的天文學家們會將硬碟陣列打包，透過海運或空運寄出。這些硬碟會集中到美國麻省理工學院的 Haystack 天文台，以進行下一步的資料合成與分析。在做完初步的資料關聯性比對後，資料量會降到 TB 的等級。在更精細的資料校正完之後，資料量會降到 GB 的等級。而將資料做成圖像後，資料會降到 MB 的等級。從 PB 到 MB，資料數量級的差異是 10 的 9 次方！所以觀測天文學家們將這個過程稱為資料壓縮。就像是在大海裡

撈針一般，是現代的淘金術。

黑洞影像是如何處理的？

從 2018 年的 5 月開始，EHT 內部釋出了關於 2017 年觀測的第五次工程資料集 (EDR 5, engineering data release)。我們首次在 M87 的資料上發現了黑洞剪影的蹤跡，那時影像分析工作小組 (IWG, image working group) 分成四個子團隊，彼此獨立作業，不交流任何相關資訊或想法。每個團隊要採用的技術是自由選擇，但是團隊之間不能溝通，持續一個月的時間，直到後期才能交流結果。筆者隸屬

於第四團隊，使用的是干涉儀成像發展最久的 CLEAN 演算法，團隊帶領人是本所的小山翔子博士，她是本團隊唯一的女性。其他的成員來自本所 (ASIAA)、日本國立天文台 (NAOJ) 和韓國的天文太空機構 (KASI)。在 2018 年 8 月底，各團隊確認了彼此的結果後，我們共同確認了黑洞剪影的特徵！為了更進一步確定影像的可靠程度，IWG 達成了共識，我們對各個分析影像的演算法進行了大規模的參數探索，產生出大約 10 萬張的黑洞影像。持續數個月的密集工作後，EHT 團隊才得以在 2019 年的 4 月告訴世人，我們真的看見了黑洞！

結語

過去一百年來，人類文明深度探索了物質世界的基本，我們擁有了描述底層物理的量子力學，我們擁有了描述時空的廣義相對論。與牛頓時代以來的物理完全不同，愛因斯坦的廣義相對論預測了全新的物理，那就是黑洞。2017 年，也是廣義相對論發表的一百年後，人類用行星大小般的望遠鏡，對著遙遠星系的中心觀測，我們收到了來自 5500 萬年前，從 M87 超大質量黑洞周圍發出的電磁波訊號。2019 年，我們首度真正證明了黑洞的存在，開啟了直接觀測黑洞物理的時代！



參與 2017 年 EHT 觀測的八座望遠鏡列表。© NRAO/AUI/NSF

黑洞的種類

作者 | 郭政育
國立中山大學物理系 助理教授

已故的著名天文物理學家霍金 (Stephen Hawking) 在 28 歲時 (1970 年)，有一次在睡前突然對黑洞的研究「大徹大悟」。之後，在手腳與身體完全不能自主的情況下，霍金在幾年的時間內寫下了黑洞的理論研究史上最重要的幾篇論文，其中最著名的就是會讓黑洞蒸發消失的「霍金輻射」以及「黑洞無毛定理」(no hair theorem) 的數學證明。這個定理告訴人們，無論構成黑洞的物質是什麼，黑洞的物理特性可以完全由包括質量在內的三個基本物理量來描述，其中質量是使得黑洞有著不同物理特性的重要關鍵。

黑洞可以依質量分成三種類

型：太初黑洞 (primordial black hole)、恆星質量黑洞 (stellar mass black hole)、以及超大質量黑洞 (supermassive black hole)。太初黑洞指的是在宇宙大爆炸的最初一瞬間，由於能量的劇烈擾動所產生的黑洞。這種黑洞的存在是霍金在 1970 年代時所提出。根據霍金的推測，這種黑洞的質量可以小到只有 0.00001 公克，大則能有十萬個太陽質量。此外，太初黑洞最特別的地方是它可能一點都不黑，反而非常明亮！依據霍金的黑洞蒸發理論，黑洞的質量越小、蒸發速率越高，而在蒸發時，小質量的黑洞可以發出強烈的電磁波。由於這些電磁波的波長涵蓋電波到伽瑪射線等所有範圍，因此從二十年前

開始，就有天文學家想要透過多波段的電磁波來搜尋存在於宇宙早期的太初黑洞，但到目前為止，還未能發現這類微型黑洞的蹤跡。

雖然太初黑洞的存在與否還有待證實，但恆星質量黑洞存在的證據卻是越來越顯著。一般來說，恆星質量黑洞指的是一顆大質量恆星爆炸以後所產生的黑洞。根據星球演化的理論，當一顆質量遠大於太陽質量的恆星走到它生命的盡頭時，內部的燃料會完全燒盡。此時，這顆星球的外部會產生劇烈的爆炸，而星球核心則會塌縮成黑洞。因此，我們可以說，恆星質量黑洞就是大質量恆星在生命盡頭時殘留在星際間的殘骸。這種黑洞在過去幾年中，已經由物理學家透過重

力波的觀測而被偵測到。

最後一種類型的黑洞稱為超大質量黑洞，質量約在太陽質量的一百萬倍到一百億倍之間。自從 1990 年代開始，天文學家就陸陸續續發現，這種超大質量黑洞通常是處在一個星系的中心，而且宇宙中大部份的星系中都有這種超大質量黑洞的存在。我們的臨近星系 M87 中心的大黑洞，最近更直接被事件視界望遠鏡 (Event Horizon Telescope) 所拍攝到。雖然這些巨型黑洞的存在逐漸變得無庸置疑，但目前為止還沒有天文學家能夠完全了解質量那麼大的黑洞是怎麼形成的。因此，它們的存在仍然是天文學上的一個謎！（本文作者曾任職本所博士後研究）



2019 年 4 月 10 日首張黑洞照片記者會結束後，本院廖院長（照片正中間）與科技部、中科院貴賓和研究人員一起比出黑洞圖案的手勢。© 中央研究院

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 | 朱有花。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。