

FIRST BLACK HOLE IMAGE

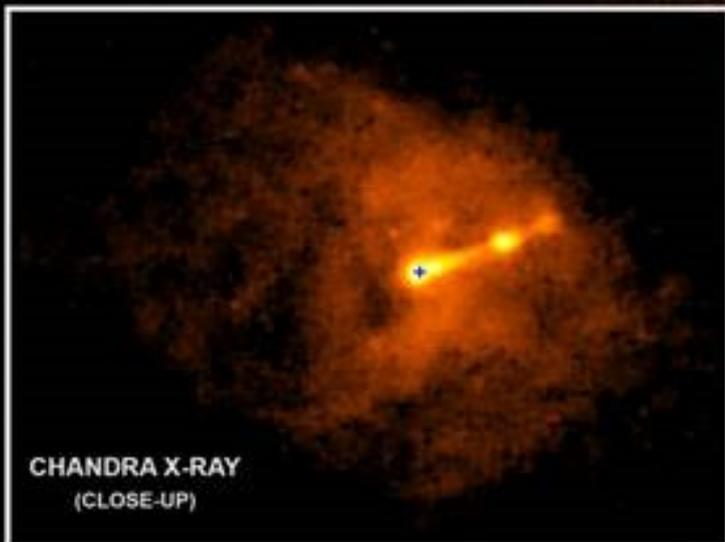
by Event Horizon Telescope (EHT)

- 首張黑洞照片
- 室女座A(M87)
- 黑洞身影專案
- 黑洞101
- 黑洞與相對論
- 黑洞輻射

- M87 超大質量黑洞：由 8 個分佈各地觀測站組成望遠鏡網絡：事件視界望遠鏡，Event Horizon Telescope (EHT) 匯集資料，4/10/2019 發表在 Astrophysical Journal Letters

首張黑洞照片

- 光環直徑 ~ 700AU (天文單位) ~ 4.5×10^{11} km ~ 太陽系的 17.5 倍
- 質量： $6.5 \times 10^9 M_{\odot}$
- 距離： 5×10^{20} km ~ 5.5×10^7 光年
- 所屬星系：室女座 A (梅西爾 87 - M87) 直徑 = 9.8×10^5 光年
~ 接近銀河系直徑的 10 倍
- 火焰狀光環圍繞著圓形黑洞：
光環是黑洞邊緣氣體被吸進黑洞的過程中加熱所發的光，其光度超過 M87 星系中其他數十億恆星所發的總光度。
- 所得的照片與從愛因斯坦的理論預測相近，看來愛因斯坦又對了！



CHANDRA X-RAY (WIDE-FIELD)

FIRST BLACK HOLE IMAGE

by Event Horizon Telescope (EHT)

- 首張黑洞照片
- 室女座A(M87)
- 黑洞身影專案
- 黑洞101
- 黑洞與相對論
- 黑洞輻射



室女座A (M87)

室女座 A - Messier 87 - M87

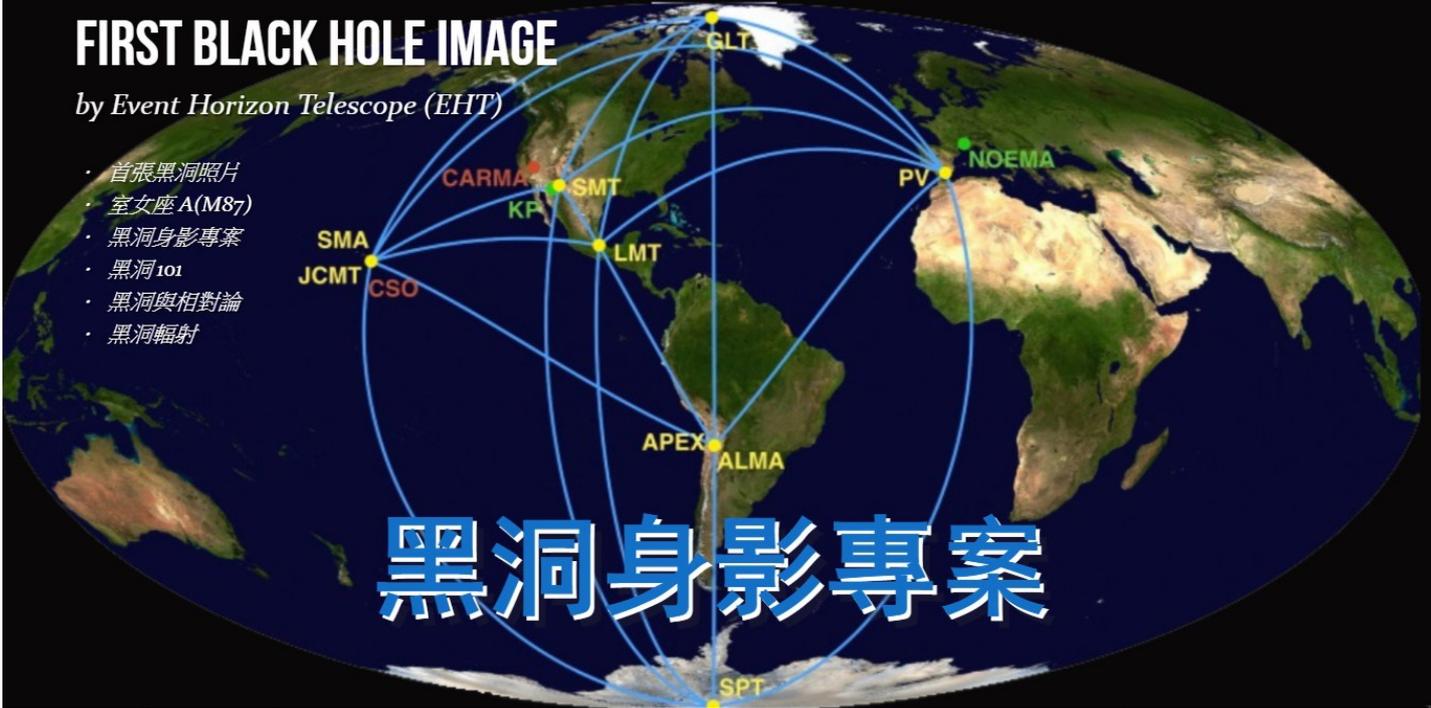
- 室女 A (梅西爾 87, M87) 星系：由法國天文學家查爾斯·梅西爾於 1781 年發現。呈橢圓形，是室女星系團北方次明亮的星系，直徑 = 9.8×10^5 光年 ~ 將近銀河系直徑 10 倍。
- M87 質量 = $2.4 \times 10^{12} M_{\odot}$ ~ 1.5-3 倍銀河系質量。
- 星系中心是超大質量黑洞，各波段(尤其是電波)都發強烈輻射。核心發出一道向外延伸約 1,500 秒差距 (4900 光年) 接近光速的高能電漿噴流。
- 黑洞照片的火焰狀光環圍繞著圓形黑洞，是黑洞邊緣氣體被吸進黑洞的過程中加熱所發的光，其光度超過 M87 星系中其他數十億恆星所發的總光度。



FIRST BLACK HOLE IMAGE

by Event Horizon Telescope (EHT)

- 首張黑洞照片
- 室女座A(M87)
- 黑洞身影專案
- 黑洞101
- 黑洞與相對論
- 黑洞輻射



ALMA - CHILE

SMA - HAWAII

SPT - SOUTH POLE

SMT - ARIZONA



PV - SPAIN

JCMT - HAWAII

LMT - MEXICO

APEX - CHILE

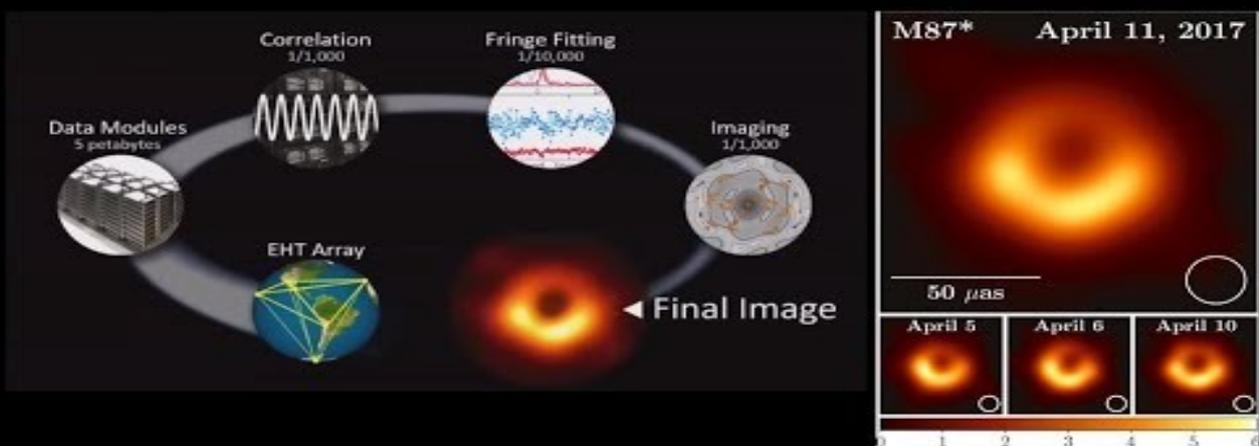
- 沒有一個單獨的望遠鏡有足夠的解析度觀察宇宙深處的黑洞並拍攝照片，但跨洲 8 組巨型天文望遠鏡連成的網絡，組成地球大小的望遠鏡：事件視界望遠鏡 - Event Horizon Telescope (EHT)，提供了足夠的觀測解析度。

- Atacama Large Millimeter Array
- Atacama Pathfinder Experiment
- Heinrich Hertz Submillimeter Telescope
- IRAM 30m telescope
- James Clerk Maxwell Telescope
- Large Millimeter Telescope
- South Pole Telescope
- Submillimeter Array

事件视界望远镜 Event Horizon Telescope (官网)

	Submillimeter Telescope (SMT), part of the Arizona Radio Observatory (ARO)		Large Millimeter Telescope "Alfonso Serrano" (LMT)
	IRAM 30-meter telescope		Atacama Large Millimeter/ Submillimeter Array (ALMA)
	James Clerk Maxwell Telescope (JCMT)		South Pole Telescope (SPT)
	Atacama Pathfinder Experiment (APEX)		Submillimeter Array (SMA)

The Event Horizon Image



黑洞身影專案

來自荷蘭的 Heino Falcke 教授在 1993 (還是博士生時) 開始這個黑洞攝影的構想, 當時沒有人覺得可行。當他知道黑洞四周有強大無線電波圍繞, 又回想 1973 有篇論文提到, 由於黑洞周圍強大的重力效應, 黑洞看起來會是實際大小的 2.5 倍, 連結這兩個因素, 使得黑洞攝影的構想似乎成為可能。花了 20 年的時間, 終於說服了歐洲研究委員會 (European Research Council), 加上美國國家科學基金會和東亞相關機構投入黑洞攝影的構想。

執行部分, 由 MIT 兼哈佛史密松天體物理中心 (Harvard-Smithsonian Centre for Astrophysics) 的杜樂曼 (Sheperd Doeleman) 教授主導, 網絡世界各地 8 個天文觀測站及其中的 200

多位科學家組成了虛擬 (地球大小) 的超級望遠鏡, 這就是事件視界望遠鏡 (Event Horizon Telescope - EHT)。超過 60 個電波望遠鏡對準 M87 中心進行 7 天同步掃描。收集的資料集中儲存在幾百個硬碟, 送往美國波士頓 (Boston) 和德國波恩 (Bonn), 再由 MIT 的 Katie Bouman (博士生及博士後時期) 的計算機程式解析並轉成影像。

宇宙間幾乎所有大型星系的中心都有超級黑洞。我們的銀河系中心也有個超級黑洞 - 人馬座 A* (Sagittarius A*), 雖然距離近 (1/1000), 由於事件視界 (黑洞質量) 小 (不到 M87 的 1/1000), 因此噴流和吸積盤輻射強度也相對低, 加上噴流方向等其他因素, 得到黑洞影像需要更高解析和敏銳度。

延伸閱讀：

- <https://eventhorizontelescope.org/>
- <http://news.mit.edu/2019/mit-haystack-first-image-black-hole-0410>
- <https://www.jpl.nasa.gov/edu/news/2019/4/19/how-scientists-captured-the-first-image-of-a-black-hole/>
- <https://interestingengineering.com/how-was-the-first-picture-of-a-black-hole-taken>
- <https://www.eso.org/public/usa/news/eso1907/>
- <https://www.nytimes.com/2019/04/10/science/black-hole-picture.html>
- <https://iopscience.iop.org/article/10.3847/2041-8213/ab1141/meta>
- 科學人-黑洞奇想：<https://www.facebook.com/ylib.sa/posts/2172843919432160/>
- 黑洞剪影：<http://sa.ylib.com/MagArticle.aspx?Unit=featurearticles&id=3267>
- 黑洞大考驗：<http://sa.ylib.com/MagArticle.aspx?Unit=featurearticles&id=4307>

事件視界望遠鏡 (EHT)

廣義相對論預測了黑洞的存在，天文學家也已觀測到宇宙中存在質量極大的緻密天體，然而目前尚無法確定其即為黑洞。另外，雖然黑洞已是個被科學界與人們廣為接受的概念，其性質及引發諸多現象的機制也仍待釐清。事件視界望遠鏡即是在此一背景下開始的計畫。有別於其他研究黑洞的方法，如透過重力波觀測、分析其周圍繞行恆星的行為等，EHT的目標為直接取得事件視界尺度的影像進行分析。

主要目標

1. **檢驗廣義相對論**：EHT利用VLBI技術能觀測重力場極強的超大質量黑洞邊緣（事件視界尺度）的結構，直接測試廣義相對論在極強重力場下的預測。

2. **直接觀測事件視界**：存在與否，及輻射區域的結構。

3. **檢測黑洞吸積盤**：物質繞著黑洞打轉、最終落入其中，繞行時形成的盤狀結構稱為吸積盤。EHT專案檢驗吸積盤的理論預測。

4. **檢測黑洞噴流**：超大質量黑洞的超相對論性噴流，以近乎光速的速度跨越了數個星系距離。其成因推測和黑洞的磁場有關。

觀測對象

1. **人馬座 A***：離地球最近的大質量黑洞為距離地球約 26,000 光年、位於銀河系中央的超大質量黑洞人馬座 A*，其具有約四百萬太陽質量、30 倍太陽體積，已知黑洞中佔天空視面積最大。然而，即使其觀測大小已因自身重力產生的重力透鏡效應而放大了兩倍以上，它的事件視界看起來仍僅有 55 微角秒，相當於從地球看一顆放在月球上的高爾夫球。位於南半天球。

2. **M87**：室女 A 星系 (M87) 中心的黑洞為另一個理想的觀測目標。M87 的黑洞距離地球 5,500 萬光年，估計擁有 64 億倍太陽質量，因此在天空中看起來只比人馬座 A* 小一些。它擁有一道橫跨 5,000 光年的噴流，若能辨識出噴發的起點，可讓理論學家更了解相對論性噴發物的性質。觀測 M87 相對人馬座 A* 有許多優點，如：位在北半球的天空，有更多現成的天文台可進行觀測；質量為人馬座 A* 的 2,000 倍，因此動態變化時間較長，較易取得進行中事件的影像；並且，觀測 M87 的黑洞較不會受其星系盤面的物質影響。

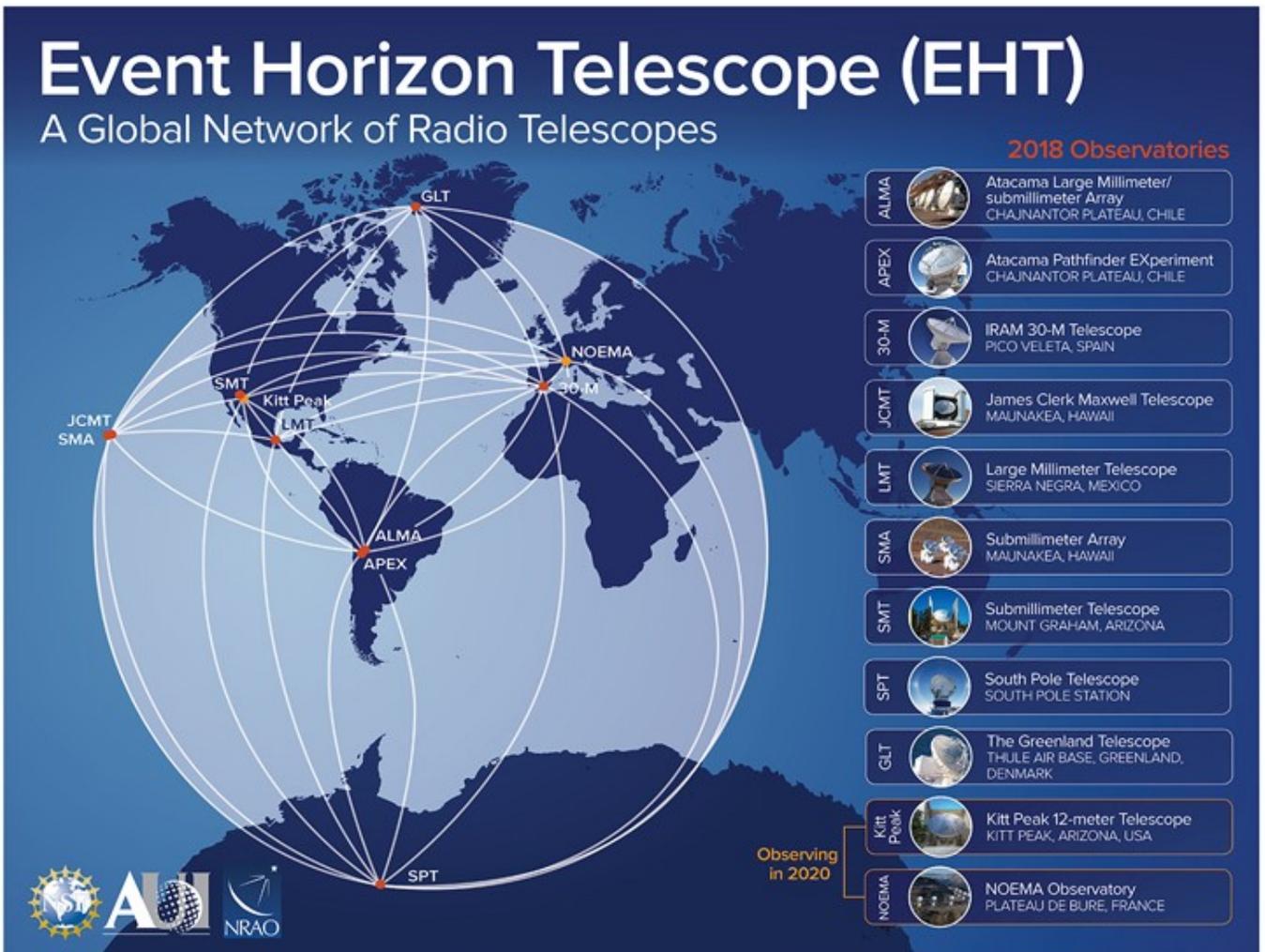
3. **活躍星系核**：活躍星系核 (AGN) 為具有高紅移、在部分至全部波段輻射出強烈電磁波的遙遠天體。EHT 的高角解析度適合研究 AGN 細部結構，且觀測波長可以看得更深入噴流內部、研究其準直性，高頻寬則適合測量噴射源的高旋轉量。這方面的觀測能力目前只有俄羅斯的太空望遠鏡 Spektr-R 可能超過 EHT，前者以最高頻率 (22 吉赫)、單一方向觀測的情況下才會發生。

台灣團隊

中研院團隊和科技部支援夏威夷、東亞和 ALMA (智利) 的陣列天文台，做成像處理和黑洞模型電腦模擬 (ALMA 的加入使 EHT 的分辨能力提高 10 倍)。又花七年時間建立格林蘭望遠鏡，2018 年四月起與夏威夷、智利連線，收集 M87 黑洞資料。

1. 人類史上首度看到黑洞
2. 史上首張黑洞照片
3. 事件視界望遠鏡全球記者會
4. EHT/GLT：中研院設計維護格林蘭望遠鏡
5. EHT/GLT 官網
6. 首拍黑洞照片 再證愛因斯坦廣義相對論
7. 聚焦格陵蘭

中研院與格林蘭望遠鏡 — 2020 展望



Press **F11** to exit full screen

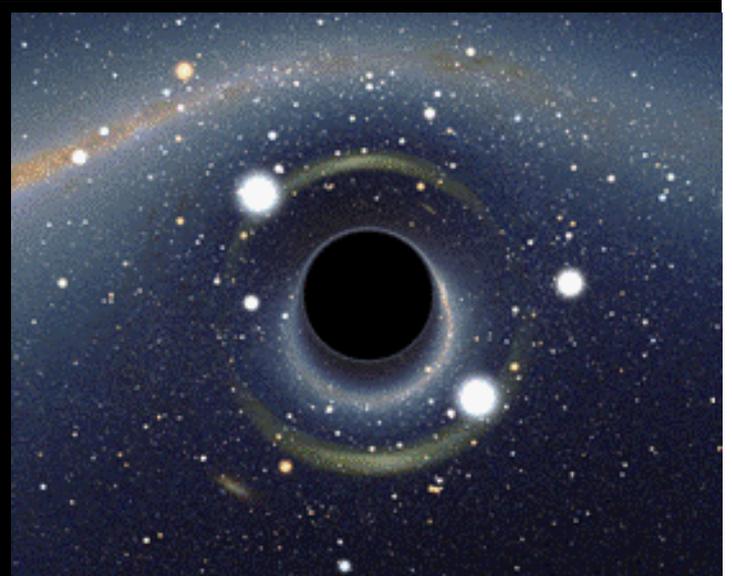
FIRST BLACK HOLE IMAGE

by Event Horizon Telescope (EHT)

- 首張黑洞照片
- 室女座A(M87)
- 黑洞身影專案
- 黑洞101
- 黑洞與相對論
- 黑洞輻射

- M87 超大質量黑洞：由 8 個分佈各地觀測站組成望遠鏡網絡：事件視界望遠鏡，Event Horizon Telescope(EHT)匯集資料，4/10/2019 發表在 Astrophysical Journal Letters

黑洞101



黑洞分類

分類	質量	大小 (半徑)
超大質量黑洞	$10^5 - 10^{10} M_{\text{sun}}$	0.001 – 400 AU
中量級黑洞	$10^3 M_{\text{sun}}$	$10^3 \text{ km } M_{\text{earth}}$
恆星黑洞	$10 M_{\text{sun}}$	30 km
微型黑洞	up to M_{moon}	up to $\approx 0.1 \text{ mm}$

FIRST BLACK HOLE IMAGE

by Event Horizon Telescope (EHT)

- 首張黑洞照片
- 室女座 A(M87)
- 黑洞身影專案
- 黑洞101
- 黑洞與相對論
- 黑洞輻射

黑洞與相對論

廣義相對論 (General relativity)

- 愛因斯坦重力場方程式 (重力場幾何化)

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R - \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}\Theta_{\mu\nu}, \quad R_{\mu}{}^{\prime} - \frac{1}{2}e_{\mu}{}^{\prime}R - \Lambda e_{\mu}{}^{\prime} = \frac{8\pi G}{c^4}\Theta_{\mu}{}^{\prime}$$

- 史瓦西度規 (空間) (Schwarzschild metric)

$$ds^2 = \left(1 - \frac{2GM}{c^2 r}\right) c^2 dt^2 - \left(1 - \frac{2GM}{c^2 r}\right)^{-1} dr^2 - r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\varphi^2)$$

- 克爾度規 (空間) (Kerr metric)

$$ds^2 = \left(\frac{\Delta - a^2 \sin^2 \theta}{\rho^2}\right) c^2 dt^2 + \left(\frac{4GMa}{c\rho^2}\right) r \sin^2 \theta d\varphi dt - \frac{\rho^2}{\Delta} dr^2 - r^2 d\theta^2 - \left(\frac{A \sin^2 \theta}{\rho^2}\right) d\varphi^2,$$

$$\Delta = r^2 - \frac{2GM}{c^2} r + a^2, \quad \rho^2 = r^2 + a^2 \cos^2 \theta, \quad A = (r^2 + a^2)^2 - a^2 \Delta \sin^2 \theta,$$

$$a = \frac{J}{Mc}, \quad J: \text{角動量}, \quad a = J = 0 \Rightarrow \text{克爾度規} = \text{史瓦西度規}$$

FIRST BLACK HOLE IMAGE

by Event Horizon Telescope (EHT)

- 首張黑洞照片
- 室女座A(M87)
- 黑洞身影專案
- 黑洞101
- 黑洞與相對論
- 黑洞輻射



黑洞輻射

黑洞（霍金）輻射 (Black hole radiation)

- 當廣義相對論遇見量子論：

霍金輻射 (Hawking radiation) 與霍金溫度 (Hawking temperature)

$$E_H = \frac{\hbar c^3}{8\pi GM}, \quad T_H \equiv \frac{E_H}{k_B}$$

- 質量越小蒸發越快，越蒸發溫度越高
- 黑洞輻射溫度與其質量成反比，質量越小，輻射溫度越高
- 輻射溫度須高過宇宙背景輻射溫度 ($\sim 2.73\text{K} \sim 2.3 \times 10^{-4} \text{ eV}$)
- 對應之黑洞質量 \sim 月球質量
- 黑洞蒸發條件： $M_{\text{黑洞}} < M_{\text{月}} \sim 7.54 \times 10^{-3} M_{\text{地}} (\sim 6 \times 10^{24} \text{ kg})$
- $2.3 \times 10^5 \text{ kg}$ 黑洞，生命期約 1 秒
- 期間所釋放能量 $> 10^7$ 百萬噸級 TNT
- 蒸發溫度呈指數上升：低頻光，X 射線， γ 射線，正負粒子對，...

Event Horizon Telescope (EHT)

A Global Network of Radio Telescopes

2018 Observatories



- ALMA**  Atacama Large Millimeter/submillimeter Array
CHAJNANTOR PLATEAU, CHILE
- APEX**  Atacama Pathfinder EXperiment
CHAJNANTOR PLATEAU, CHILE
- 30-M**  IRAM 30-M Telescope
PICO VELETA, SPAIN
- JCMT**  James Clerk Maxwell Telescope
MAUNAKEA, HAWAII
- LMT**  Large Millimeter Telescope
SIERRA NEGRA, MEXICO
- SMA**  Submillimeter Array
MAUNAKEA, HAWAII
- SMT**  Submillimeter Telescope
MOUNT GRAHAM, ARIZONA
- SPT**  South Pole Telescope
SOUTH POLE STATION
- GLT**  The Greenland Telescope
THULE AIR BASE, GREENLAND, DENMARK
- Kitt Peak**  Kitt Peak 12-meter Telescope
KITT PEAK, ARIZONA, USA
- NOEMA**  NOEMA Observatory
PLATEAU DE BURE, FRANCE

Observing
in 2020



格陵蘭望遠鏡 (GLT) - 格陵蘭計劃 (專訪)



黑洞身影第一瞥：中研院天文及天文物理所的角色

- **次毫米波陣列望遠鏡(SMA)**：2003年11月在夏威夷的毛納基峰上正式啟用並運轉至今。本陣列由中研院天文及天文物理所與美國史密松天文台合作興建，是全世界第一座次毫米波干涉陣列，提供了在此波段最高的角解析力。
- **阿塔卡瑪大型毫米及次毫米波陣列計畫(ALMA)**：阿塔卡瑪大型毫米波及次毫米波陣列(ALMA)是目前最大的地面望遠鏡，由66座望遠鏡組成一個毫米波及次毫米波段的干涉儀，為次毫米波陣列的擴大版，這座位處智利阿塔卡瑪沙漠的望遠鏡，於2013年3月正式啟用。三個主要合作夥伴為北美、歐洲及東亞。臺灣分別受到ALMA日本計畫(ALMA-J)與ALMA北美計畫(ALMA-NA)的邀請參與計畫。
- **格陵蘭望遠鏡(GLT)**：天文所擁有SMA與ALMA使用權，若聯合成為一個長基線干涉儀系統(submm-VLBI)，可達數微角秒的角解析力，足以解析超大質量黑洞，SgrA*和M87的核心。天文所提議於格陵蘭再增一座望遠鏡，與SMA及ALMA組成北天的VLBI金三角。再結合南極的SPT望遠鏡，將能作到對黑洞的成像。這是僅使用由SMA及ALMA組成之單一基線所不能作到的。



相關閱讀

- **白洞**：可看成黑洞的時空倒轉，物質與光線無法進入這個時空區域，但是可以從這個區域向外發出，與黑洞相反。
- **裸奇點**：重力奇點的外圍沒有事件視界（黑洞=裸奇點+事件視界）
- **類星體**：是活躍星系核中最明亮的，類星體活躍的高峰時期在紅移大約 2，也就是大約 100 億年前。已知最遙遠的類星體是 ULAS J1342+0928，紅移 $z=7.54$ ；當時的宇宙年齡只有 6.9 億歲。這個類星體中的超大質量黑洞是迄今發現的最遙遠黑洞。質量估計是太陽的 8 億倍。透過哈伯太空望遠鏡，發現類星體是在星系的中心。
- **活躍星系核**：星系中心的一個緊密區域，電磁波譜遠比普通光度高，光度不是由恆星產生。如此高的非恆星輻射在無線電、微波、紅外線、可見光、紫外、X 光、 γ 射線波段觀測到。其中能量最強大的活躍星系核被歸類為類星體。
- **宇宙審查假說**：此假說陳述星體塌縮成奇異點的過程，必伴隨事件視界；由於事件視界的存在，奇異點無法被直接觀測。由於奇點的物理是未知的，如果奇點可由時空其他部分觀察到，因果關係就會破壞，物理學就可能失去預測能力。另外，根據彭羅斯-霍金奇點理論，奇點是不可避免的，因此使得上述假說（裸奇點存在導致因果關係破壞）也不可避免。
- **超大類星體群**：是一群超大質量黑洞，被認為是已知宇宙的最大結構。
- **人馬座 A***：位於銀河系銀心非常亮及緻密的無線電波源，大約每 11 分鐘自轉一圈，屬於人馬座 A 的一部份。人馬座 A*很有可能是離我們最近的超大質量黑洞所在，因此是研究黑洞物理的最佳目標。
- **室女 A 星系（梅西爾 87、M87 或 NGC 4486）**：M87 位在室女座，是巨大的橢圓星系，也是銀河系附近質量最大星系其中之一。星系中心是超大質量黑洞，是活躍星系核的主成分。
- **重力波**：是時空的漣漪，帶質量物體呈加速度運動時，會在時空產生漣漪，從帶質量物體位置向外傳播，這漣漪就是重力波。主要的重力波源有白矮星、中子星與黑洞所組成的聯星。另外，超新星與大爆炸等劇烈天文事件也是重要的重力波波源。
- **GW150914（重力波 2015 年 9 月 14 日）**：由雷射干涉重力波天文台（LIGO）和處女座干涉儀（VIRGO）團隊於 2015 年 9 月 14 日首度直接探測到的重力波現象。這束重力波訊號與廣義相對論對雙黑洞旋近、併合及併合後的衰盪（ringdown）的預測相符。從此開啟了重力波天文學的新紀元。

- **重力波天文學**：傳統天文學主要是使用電磁波來觀測各種天體系統，而重力波天文學則是通過重力波來觀測發出重力輻射的天體系統。重力波與物質的交互作用非常弱，在傳播途徑中基本不會像電磁波那樣容易被吸收、散射或色散，因此可以揭示一些宇宙角落深處的資訊。
- **蟲洞**：又稱愛因斯坦-羅森橋，或稱為時空洞，是宇宙中可能存在的連接兩個不同時空的狹窄隧道。理論上，蟲洞是連結白洞和黑洞的多維空間隧道，無處不在，但轉瞬即逝。
- **量子纏結**：在量子力學裏，當幾個粒子在彼此交互作用後，由於各個粒子所擁有的特性已綜合成為整體性質，無法單獨描述各個粒子的性質，只能描述整體系統的性質，則稱這現象為量子纏結或量子糾纏 (quantum entanglement)。薛丁格表明，量子糾纏是量子力學的特徵性質；量子糾纏在量子力學與古典思路之間做了一個完全切割。物理學者猜測蟲洞的連結與量子糾纏的連結是同一種現象
- **EPR 吊詭**：是阿爾伯特·愛因斯坦、鮑裡斯·波多爾斯基和納森·羅森在 1935 年發表的一篇論文中，以吊詭的形式針對量子力學的哥本哈根詮釋而提出的重要批評，質疑量子力學的不完備性。
- **次毫米波陣列望遠鏡(SMA)**：2003 年 11 月在夏威夷的毛納基峰上正式啟用並運轉至今。本陣列由中研院天文及天文物理所與美國史密松天文台合作興建，是全世界第一座次毫米波干涉陣列，提供了在此波段最高的角解析力。
- **阿塔卡瑪大型毫米及次毫米波陣列計畫(ALMA)**：阿塔卡瑪大型毫米波及次毫米波陣列 (ALMA) 是目前最大的地面望遠鏡，由 66 座望遠鏡組成一個毫米波及次毫米波段的干涉儀，為次毫米波陣列的擴大版，這座位處智利阿塔卡瑪沙漠的望遠鏡，於 2013 年 3 月正式啟用。三個主要合作夥伴為北美、歐洲及東亞。臺灣分別受到 ALMA 日本計畫 (ALMA-J) 與 ALMA 北美計畫 (ALMA-NA) 的邀請參與計畫。
- **格陵蘭望遠鏡 (GLT)**：天文所擁有 SMA 與 ALMA 使用權，這兩個陣列若聯合成為一個超長基線干涉儀系統 (submm-VLBI)，可望達到數微角秒的角解析力。目前已知有兩個超大質量黑洞，即位於銀河系中心的 SgrA* 和 M87 的核心，其尺寸大得足以使用次毫米波段 VLBI 進行解析。天文所提議於格陵蘭再增加一座望遠鏡，與 SMA 及 ALMA 組成北天的 VLBI 金三角。再結合南極的 SPT 望遠鏡，將能作到對黑洞的成像。這是僅使用由 SMA 及 ALMA 組成之單一基線所不能作到的。