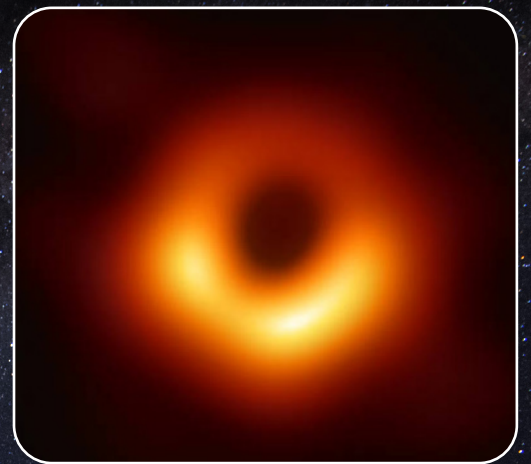


在彎曲時空裡仰望

從愛因斯坦到黑洞合併的百年探索

一百多年前，愛因斯坦提出廣義相對論，顛覆人類對重力的理解，預言時空會因質量彎曲，並推导出「黑洞」這個劃時代的概念。起初，黑洞被視為僅是數學解，幾乎無法證實是否存在。然而隨著觀測技術進步，天文學家陸續發現脈衝星、類星體與存在銀河系中心未知的超大質量天體，逐步累積黑洞存在的證據。2019年，人類首次直接拍攝到黑洞影像，終於驗證了百年前的理論。另一方面，廣義相對論也預測「重力波」的存在——當兩個黑洞合併，會釋放出重力的時空漣漪。2016年，LIGO雷射干涉重力波天文臺首度偵測到重力波訊號，正式開啓了「重力波天文學」的時代。未來，LISA雷射干涉太空天線的三個相距極遠的雷射干涉儀，將捕捉超大質量黑洞合併時發出的重力波，藉此深入了解宇宙的起源與結構。

文／湯濟家



EHT首度直接拍攝到M87星系中心超大質量黑洞的影像。

臺灣中研院天文所協助建造並運用阿塔卡馬大型毫米/次毫米波陣列望遠鏡（ALMA），於2019年在事件視界望遠鏡（EHT）計畫中，首度拍攝到M87星系中心超大質量黑洞的影像，為愛因斯坦廣義相對論提供關鍵證據。並促成這劃時代的天文突破。影像來源：NASA/ESO

廣義相對論的誕生

這個故事，要從一百多年前開始說起。當時的人類，對宇宙仍相當懵懂無知。

1914年，第一次世界大戰在歐洲爆發。當時三十多歲的愛因斯坦，已是國際知名的物理學家，剛開始在柏林的洪堡大學擔任教授。與當時許多德國知識分子不同，他並不支持帝國主義的戰事，而是選擇繼續埋首於自己的相對論研究。

1915年11月，他發表了著名的廣義相對論。這套理論中的重力場方程式，徹底改變了人們對牛頓力學裡萬有引力的概念。原本牛頓說物體加速度移動是因為力在作用的關係，而力的來源就是質量；但愛因斯坦說這只是物體在一個有曲率的時空中自然產生的運動而已，也就是所謂的重力場，而質量就是造成時空彎曲的因素。

正當歐洲陷入戰火與混亂時，愛因斯坦卻默默提出了一種全新的方式，來理解我們所處的宇宙。

在中學課堂上，學生們常常發現，將一個題目轉換為數學方程式是最困難的第一步，而解出這個方程式卻又是另一層挑戰。為了完成廣義相對論，愛因斯坦使用了當時相當複雜且冷門的數學工具——張量（tensor）概念，才成功寫出重力場方程式。他原以為這個方程式難以找到解析解¹，沒想到僅兩個月後，史瓦西（Karl Schwarzschild）就寫出了第一組解析解，如圖1。

史瓦西原是波茨坦天文臺的臺長，但他跟愛因斯坦不同，年過40歲的他在戰爭爆發後志願加入了德意志帝國陸軍成為一位砲兵少尉。在東線與帝俄的作戰中，他感染了天袍瘡（Pemphigus），即使在病中，他仍完成了三篇論文，其中之一便包含廣義相對論的解析解。他在四個月後因病辭世，未能親眼見證他的發現對後世產生的巨大影響。

圖 1



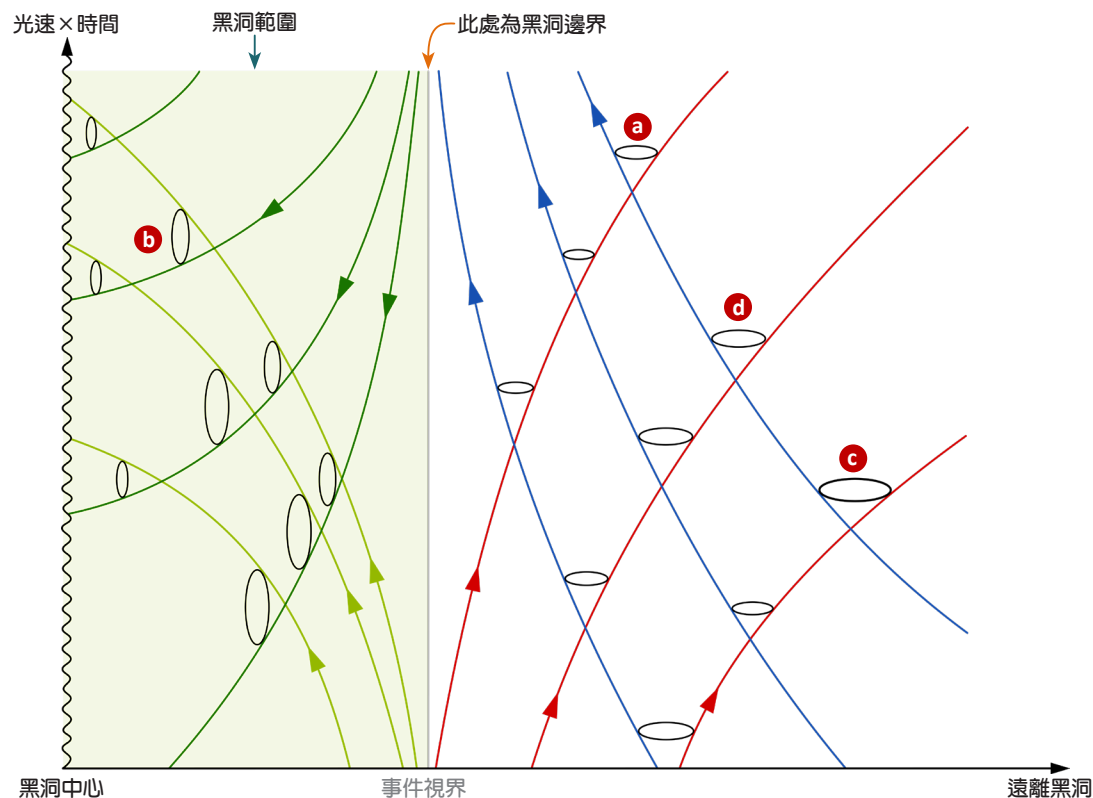
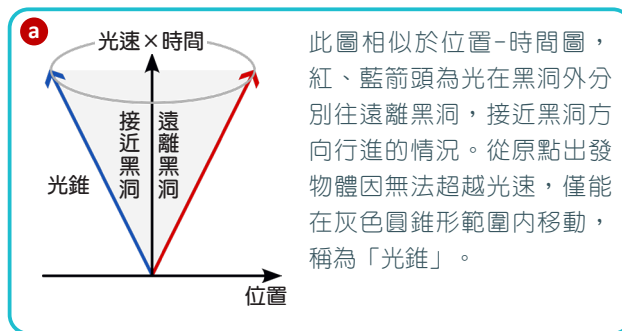
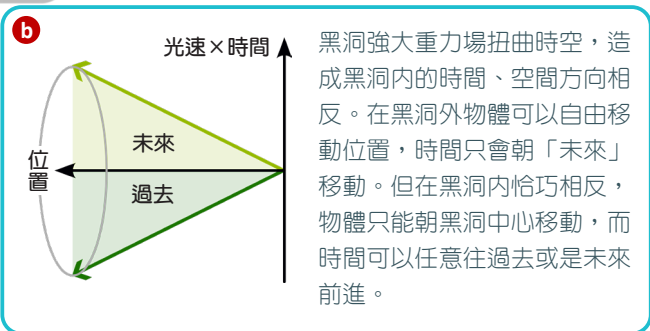
工作中的天文學家史瓦西，在愛因斯坦發表重力場方程式後僅兩個月，史瓦西就寫出了第一組解析解，從理論推演開啓了科學家對黑洞的百年探索過程。影像來源：Leibniz Institute for Astrophysics Potsdam (AIP)

史瓦西解首次揭示了黑洞的概念²：當足夠多的質量集中在極小的空間內，會造成周圍時空曲率極端彎曲，強烈到物質跟光都無法逃脫。這個不可逃脫的範圍邊界，後來被稱為「事件視界（Event Horizon）」，

如圖2。然而，當時許多科學家，包括愛因斯坦在內，都認為這只是一個數學解，不代表真實世界中會存在這樣的天體。畢竟，當時現代天文學才剛剛起步，人們甚至還不確定銀河系外是否存在其他天體³。

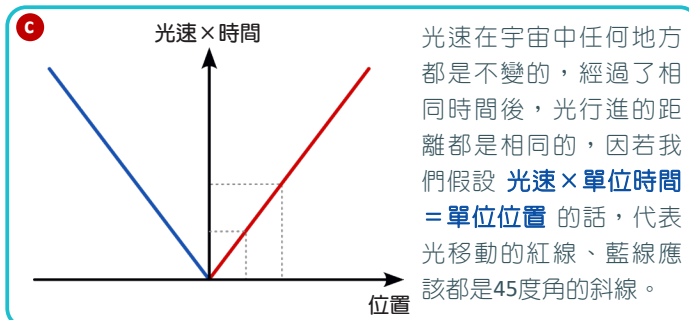
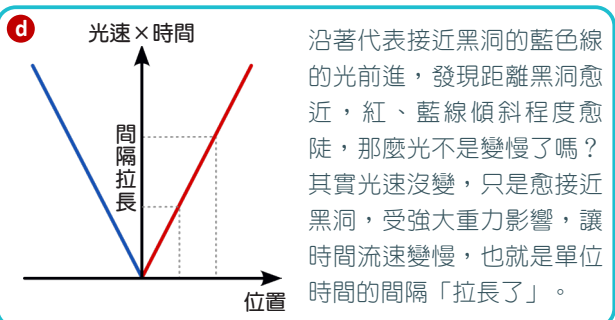
史瓦西的黑洞時空概念 簡易說明圖解

圖 2



由史瓦西解出的黑洞時空關係，簡易概念上可以當作是位置-時間關係圖來看，其中紅、藍、深綠、草綠曲線皆代表在關係圖上行進的光，若在黑洞外，距離黑洞邊界，也就是事件視界愈近，時間流逝速度愈慢，因此代表光前進的線就愈陡。

在黑洞內，因重力場強烈扭曲時空，造成光錐由直立轉為橫躺，所有物體只能朝黑洞中心移動，因此無法逃出黑洞範圍，但是在時間上則可以任意往過去或是未來移動。



圖片來源：編輯部繪製

黑洞到底是否真實存在？

廣義相對論的提出，開啓了一段長達一百多年的旅程。這段旅程中，無數科學家試圖驗證或挑戰這套理論。

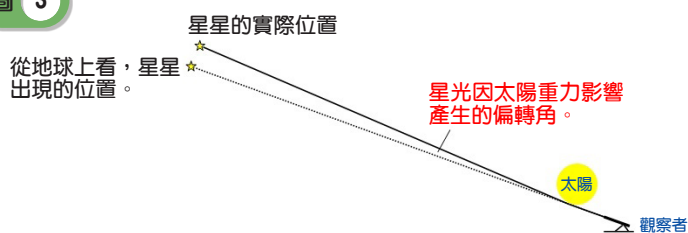
1919年，第一次世界大戰剛結束。英國劍橋天文臺臺長愛丁頓爵士（Arthur Eddington）率領團隊，前往西非外海，當時葡屬的普林西比（Príncipe）島與另一組前往巴西索布拉爾(Sobral)的格林威治天文臺團隊，同時觀測日全食。他們的目標，是測量星光在太

陽附近是否會偏折。根據廣義相對論的預測，光線會因為太陽質量造成的時空彎曲而偏折，如圖3。在克服各種已知的觀測的誤差後，愛丁頓團隊成功觀測到多顆恆星的位置產生位移，證明了重力會改變光的路徑，也就是所謂的「重力透鏡效應（gravitational lensing）」。

這次觀測結果，使得廣義相對論首次受到英語世界的重視，也讓愛因斯坦更加聲名大噪，如圖4。

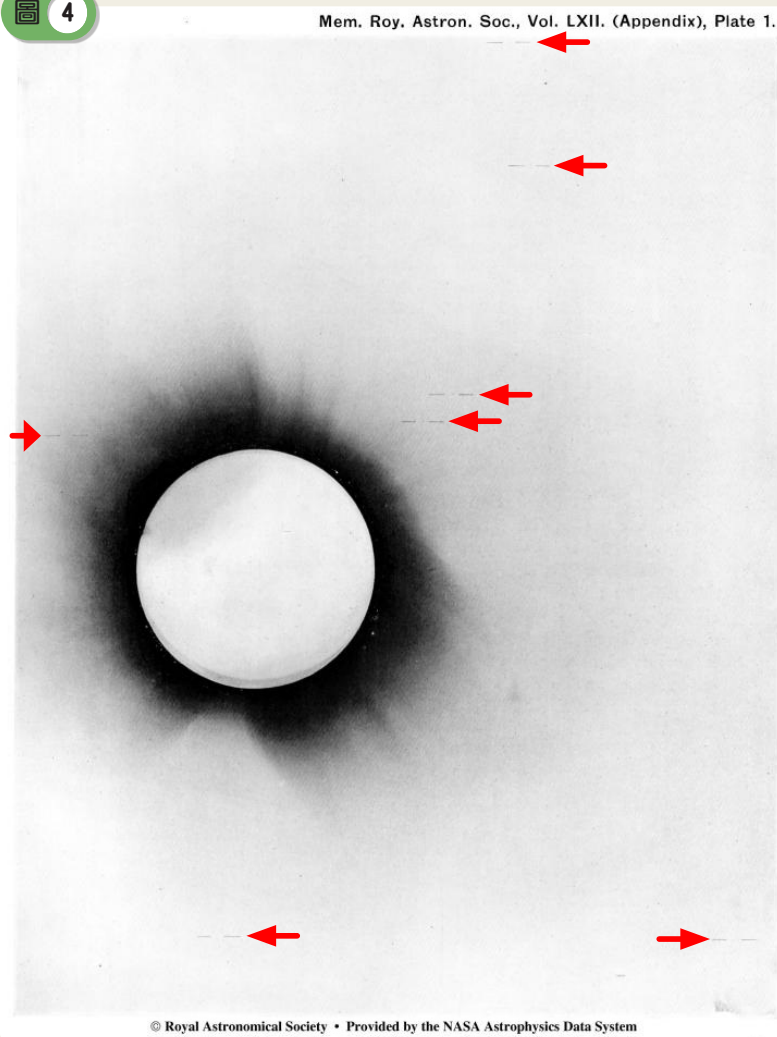
隨著廣義相對論逐漸被接受，黑洞這個理論上的產物，也引發了更多關注。如果黑洞真實存在，那它究竟是如何形成的？

圖 3



愛丁頓日全食觀測示意圖。圖片來源：<https://www.thenakedscientists.com/articles/science-features/eddingtons-eclipse-experiment-1919-and-2017>

圖 4



1919年日全食的影像，被觀測到位移的所有恆星用雙橫線（紅色箭頭標示處）標出。位移程度從0.2到1角秒不等。影像來源：<https://articles.adsabs.harvard.edu/full/1923MmRAS..62A...1D/A000042I001.html>

當時天文學家認為恆星在燃料耗盡、停止核融合後，會坍縮成跟地球差不多大小但非常高密度的白矮星，如圖5。而白矮星得以穩定存在不會被重力壓垮靠得是量子力學中，電子不能有完全一樣能階狀態的特性，也就是「包立不相容原理（Pauli exclusion principle）」。

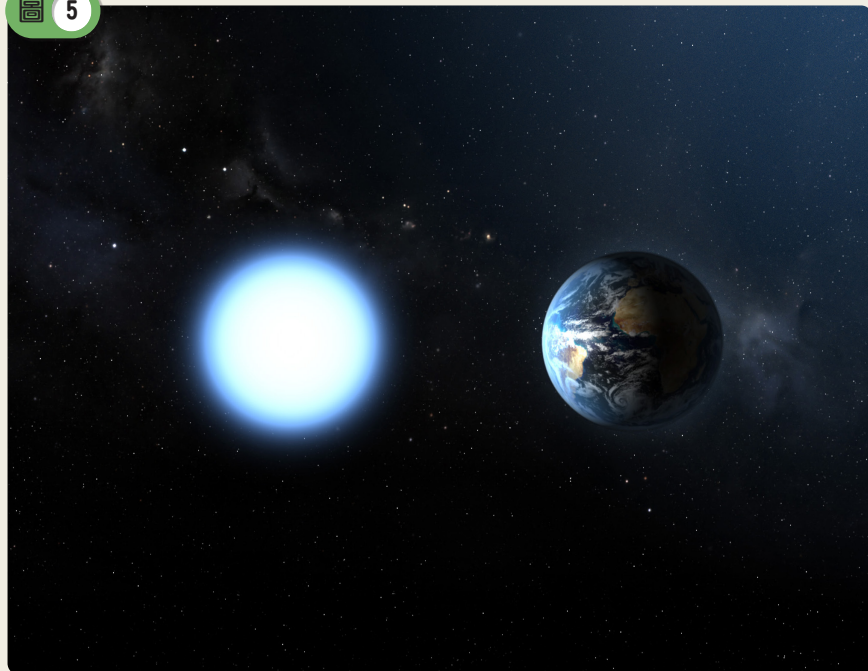
這個特性讓電子會彼此排斥形成所謂「電子簡併壓力（electron degeneracy pressure）」，並足以跟重力對抗，如圖6。

1930年，一位來自英屬印度、在劍橋求學的年輕學生錢卓西卡（Subrahmanyan Chandrasekhar）發現，在狹義相對論效應下，當白矮星質量超過約1.44倍太陽質量時，電子簡併壓力將不足以支撐其重力，星體會進一步坍縮。這個數值後來被稱為「錢卓西卡極限（Chandrasekhar limit）」。

但這項發現當時受到他的學術前輩愛丁頓的激烈反對。愛丁頓不接受這種結果，甚至對錢卓西卡進行了公開批評與嘲笑，認為這是數學上的結果，不符合直覺的物理現象。不過多年後，理論與觀測逐漸證實錢卓西卡的預測，他也在1983年獲得諾貝爾物理學獎肯定他在恆星演化的理論貢獻。

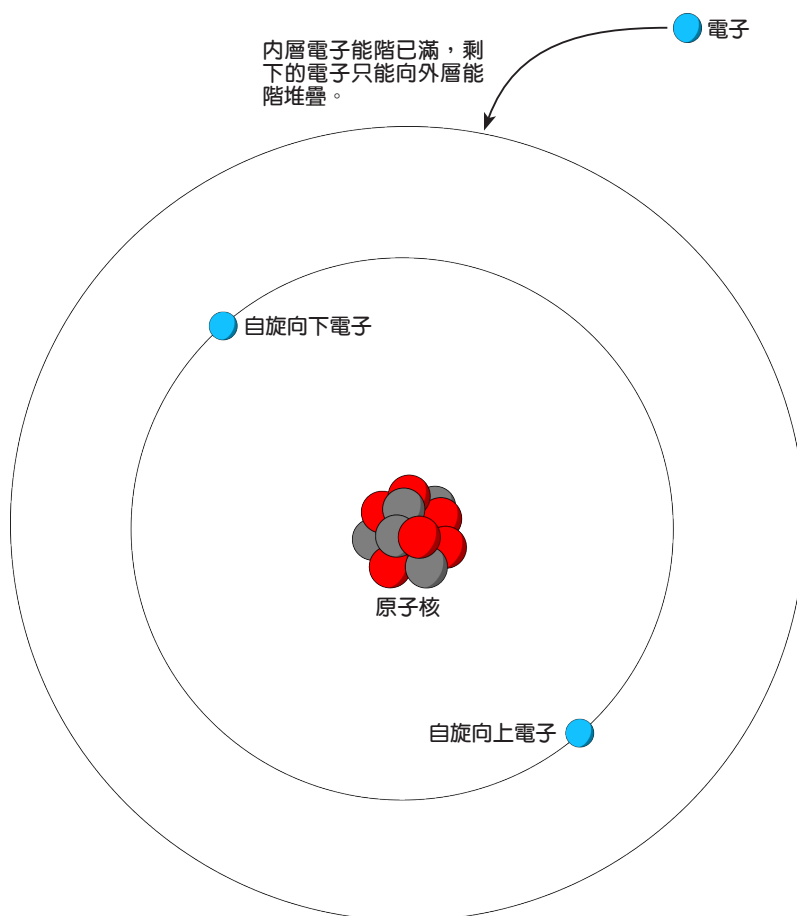
由於原子中的每個電子能階僅能容納1個向上自旋、1個向下自旋電子，若要再壓縮電子所占空間，例如將第3個電子擠入已滿的能階時，就會產生排斥壓力，這就是「電子簡併壓力」。圖片來源：編輯部繪製

圖 5



白矮星大小與地球差不多，但是密度極高。圖片來源：ESA/NASA

圖 6



1939年9月，納粹德國入侵波蘭，世界大戰再度爆發。同時美國物理學家歐本海默（Robert Oppenheimer），與他的學生們發表研究，指出超過錢卓西卡極限的恆星坍縮成而成的中子星，如圖7，若質量超過約0.7倍太陽質量⁴，中子的簡併壓力也無法支撐，就會塌縮成黑洞。這是首度有物理理論解釋黑洞如何形成，卻因戰爭而鮮少受到關注。歐本海默後來也被徵召參與曼哈頓計畫，轉向原子彈的研發。

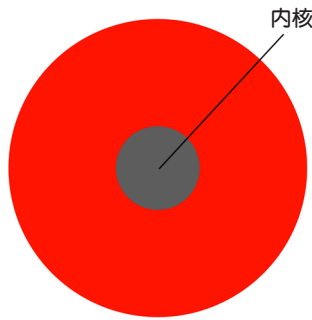
諷刺的是，同一時間已移居美國、年屆六十

的愛因斯坦，仍在嘗試從理論上證明黑洞在物理上不可能存在。

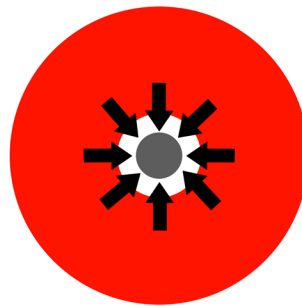
愛因斯坦於1955年過世後，廣義相對論與黑洞研究迎來了黃金時代。1963年，紐西蘭數學家卡爾（Roy Kerr）找到了描述旋轉黑洞的解析解，這也是現實中更常見的黑洞形式。兩年後，美國物理學家紐曼（Ezra Newman）發現，黑洞也可以帶有電荷。隨著更多理論的建立，最終發展出「無毛定理（no-hair theorem）」：黑洞可被質量、自旋與電荷三個參數完全描述。

中子星的誕生過程 說明圖解

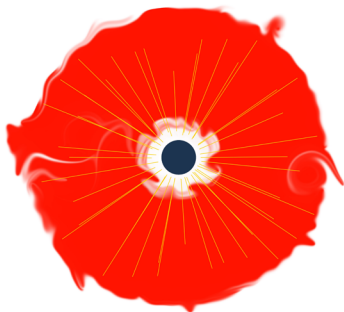
圖 7



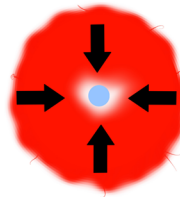
a 已達演化過程末期的大質量恆星



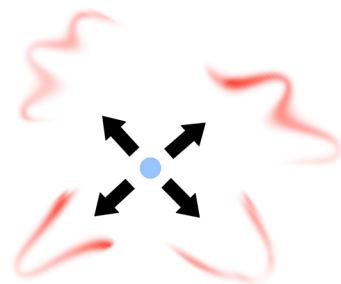
b 巨大恆星的電子簡併壓力撐不住重力，發生內爆。



c 重力會將電子跟質子壓縮成中子



d 外層會以極快的速度先向內坍縮



e 再向外爆炸產生超新星（supernova）

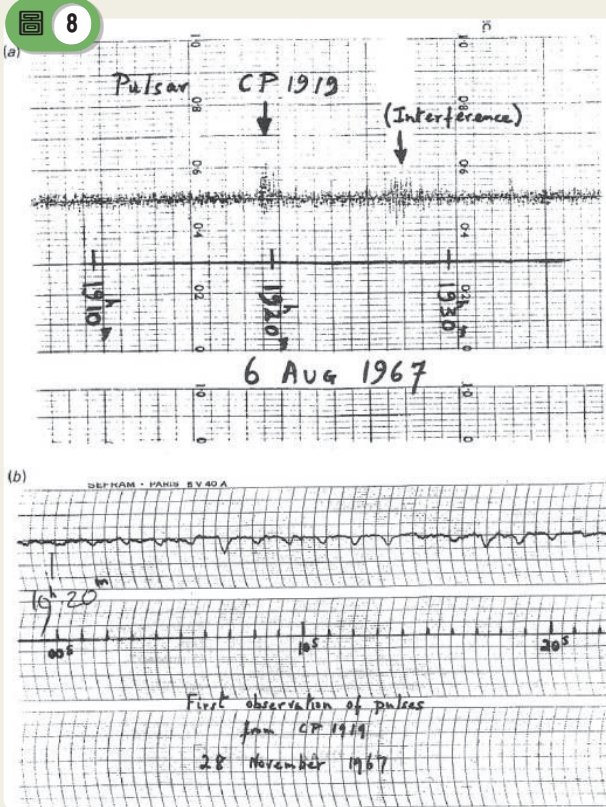


f 最後剩下中心核的部分就是中子星

由 a 至 f 依序為中子星的誕生過程說明。圖片來源：Wiki/Bedrock Person

觀測方面也有突破。1967年，劍橋大學研究生貝爾（Jocelyn Bell）發現了重複發出脈衝的無線電訊號，如圖8，這是人類第一次觀測到脈衝星（pulsar）。後來被證實為快速自轉的中子星，如圖

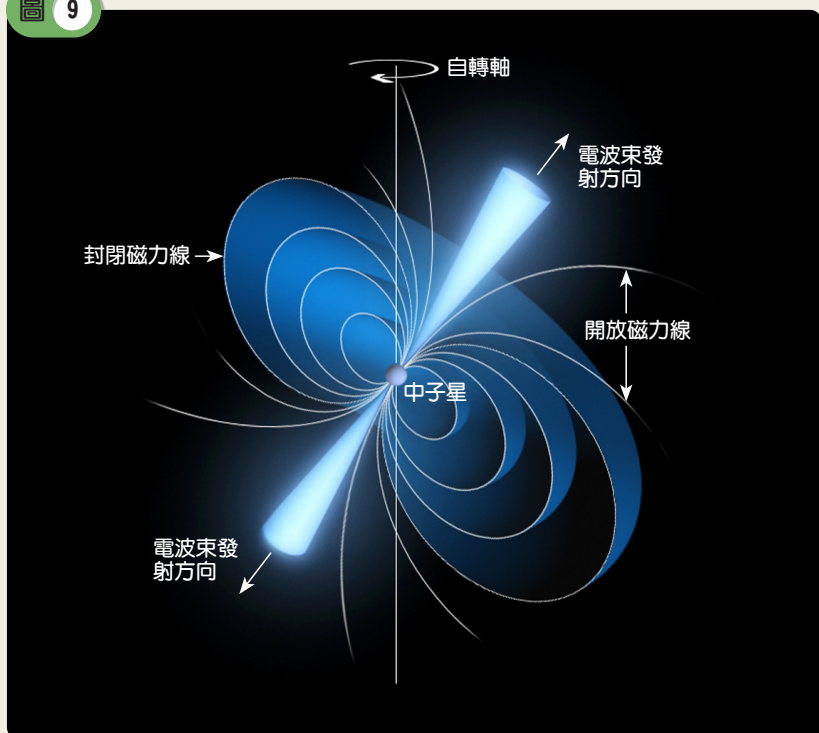
9，這項發現間接證實了中子星的存在，如圖10，也增強了黑洞存在的可能性。但這項發現的諾貝爾物理獎卻在1974年頒給了她的指導教授，未提及她本人，成為諾貝爾獎歷史上的一大污點。



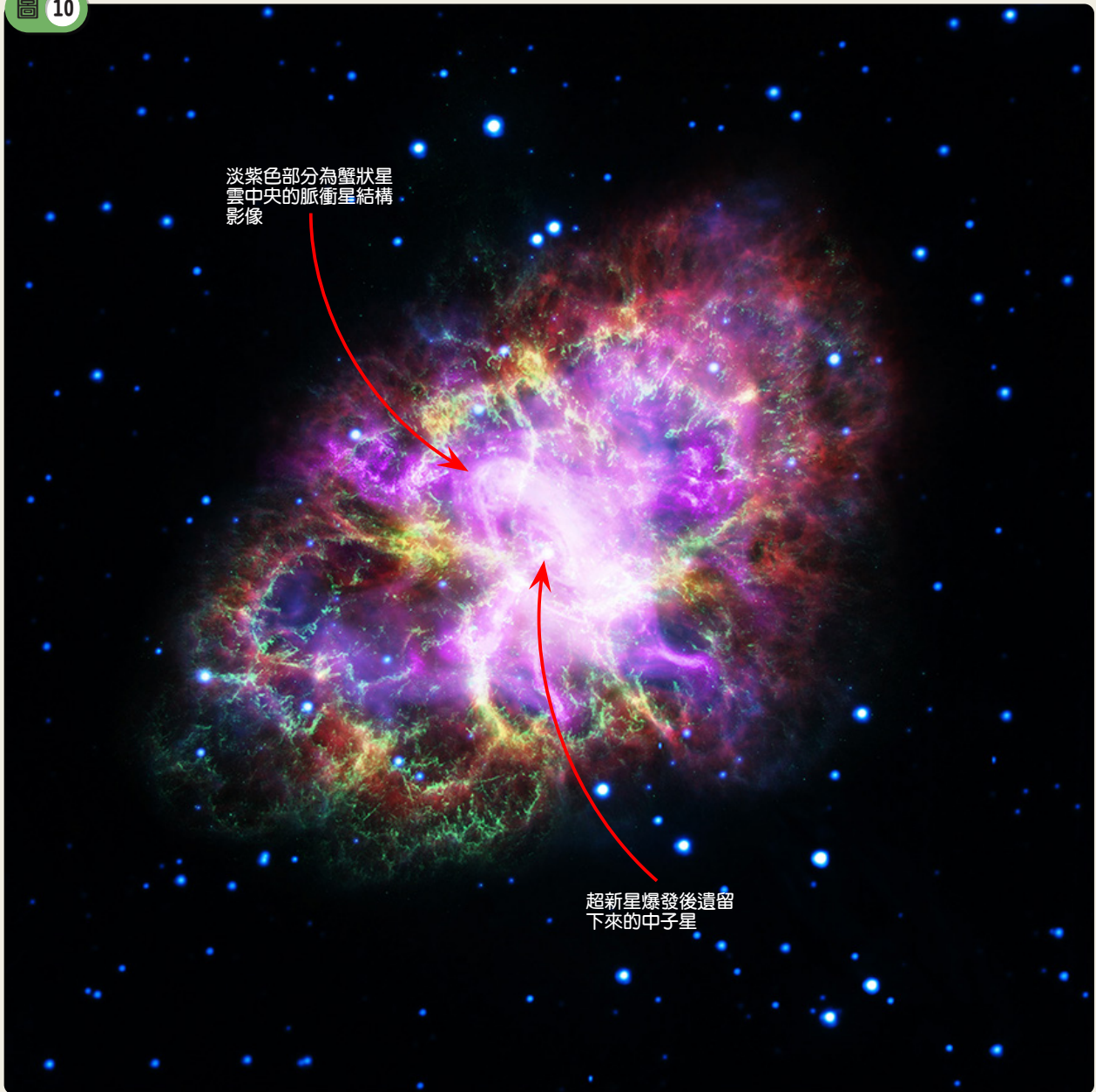
貝爾發現脈衝星的觀測紀錄。影像來源：Cavendish Laboratory Department of Physics

圖 9

脈衝星的結構示意圖，位於中央的是快速自轉的中子星，由於雙極電波束跟自轉軸不在同一方向上，所以電波束會繞著自轉軸旋轉。若地球剛好在會被電波束指到的方向上，那我們就會看到來自這顆脈衝星週期性的訊號。由於自轉速度非常快，因此測到的電波脈衝頻率很高。圖片來源：ESA



10



淡紫色部分為蟹狀星雲中央的脈衝星結構影像

超新星爆發後遺留下來的中子星

天文學家結合涵蓋幾乎整個電磁波頻譜的觀測資料，疊合成此張蟹狀星雲的高解析度影像。從甚大望遠鏡的無線電望遠鏡陣列（Very Large Array）接收的無線電波（紅色標示）、哈伯太空望遠鏡（Hubble Space Telescope）的可見光影像（綠色標示）、史匹哲太空望遠鏡（Spitzer Space Telescope）的紅外線觀測（黃色標示），到錢卓拉X射線天文臺（Chandra X-ray Observatory）所捕捉的高能X射線（紫色標示），均納入疊合。產生星雲的超新星爆發，在西元1054年由中國所觀測。蟹狀星雲距離地球約6,500光年，核心是一顆每33毫秒就自轉一圈的高速旋轉中子星，發射出從無線電波段至伽瑪射線波段的脈衝訊號，是一顆典型的脈衝星。星雲的結構是由脈衝星發出的高能帶電粒子，以及超新星爆發時從母星拋出的物質交互作用所塑造，此脈衝星的能量輸出率約為太陽的1,000倍。影像來源：Chandra X-Ray observatory

類星體的發現

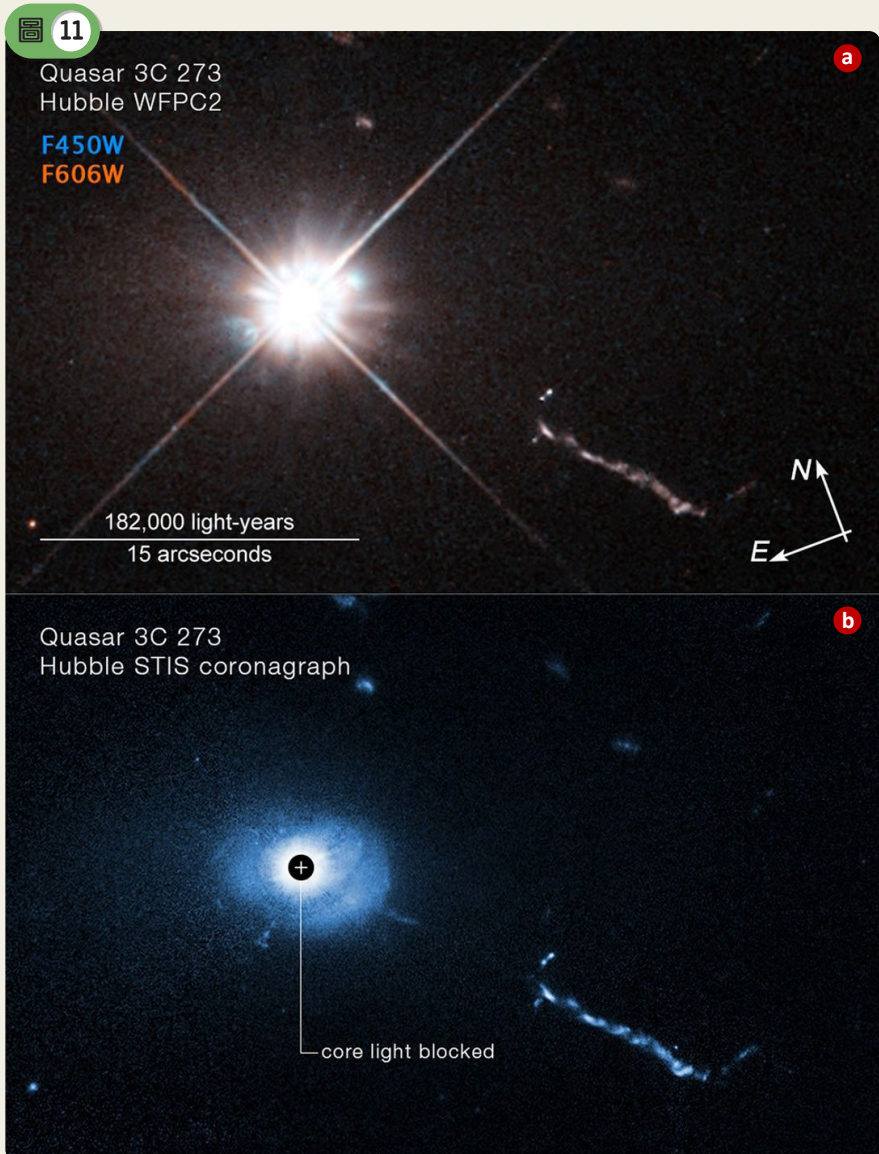
戰爭雖然帶來無數災難，也促成了許多技術的進展。其中之一便是無線電與雷達技術的快速發展。在英國，雷達技術幫助皇家空軍預警德軍空襲，守住了不列顛島。劍橋大學的許多科學家在這當中扮演了重要角色，他們在戰後將戰爭中發展出來的技術應用到的電波天文學上，在1950年代前後發表了幾份巡天觀測後得到的星表。

電波是一種電磁波，波長從幾公分到十幾公尺不等，跟可見光的幾百奈米波長完全不同。當天文學家找到這些電波源後，就想知道它們在可見光波段能不能被看到，但單一電波天線的解析度完全比不上可見光，所以一個電波源可以對應到非常多的

可見光源上，無法確認到底哪一顆才是產生電波源的天體。

天文學家於是想出了一個解法：當月亮經過天區時，會依次遮擋背景天體。只要觀測哪一顆被遮掉時電波訊號會消失，就能確認是哪一顆天體是電波源。1963年，荷蘭天文學家施密特（Maarten Schmidt）成功找到了與第三份劍橋星表中的第273號電波源（3C 273）相對應的可見光源，如圖11。

令人驚訝的是，當他們取得3C 273的光譜時，發現它跟一般恆星光譜不同，且它的光譜中有強烈的紅移（redshift）⁵，表示它來自極遠的距離——大約24億光年之外。也就是說，這個看似恆星的天體，其實是一個遙遠的強力能量來源。



此2張類星體3C 273核心的影像由哈伯太空望遠鏡所拍攝，**a**看起來像一般恆星一樣，**b**則是將**a**畫面中心的活躍星系核遮住後，可以清楚看到原先黯淡的宿主星系。3C 273距離地球約24億光年，是天文學家於1963年發現的第一顆類星體，亦為人類認識活躍星系核（類星體）的重要里程碑。影像來源：NASA/Hubble

這種天體後來被大量發現，甚至有更多的天體有著類似的光譜，但卻沒有任何的電波訊號。後來這類天體被命名為類星體，而到底類星體是什麼呢？

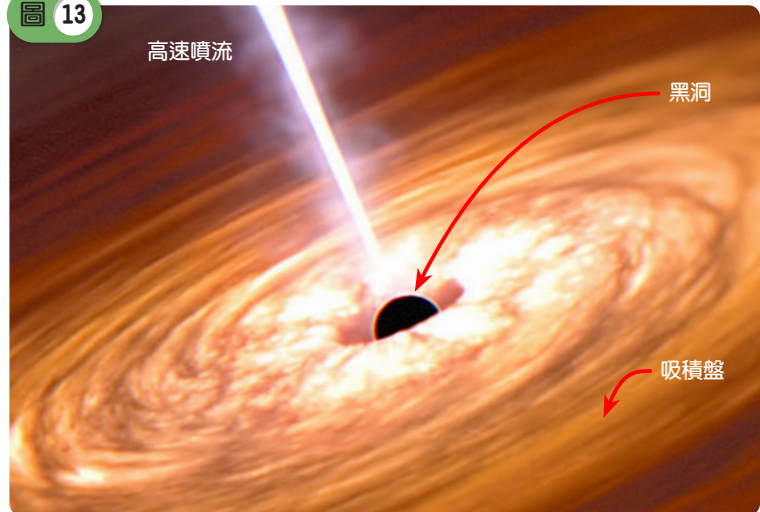
在接下來十幾年中，天文學家盤點各種理論跟證據後，認為類星體是來自於星系中心的「超大質量黑洞 (supermassive black hole)」，如圖 12、圖 13。當其大量吸積物質時會釋放能量，其亮度足以超越整個星系內恆星亮度的總和，所以看起來會像是個明亮的點光源，而看不到原本盤狀或橢圓狀的星系。

這麼強的能量需要多重的黑洞呢？天文學家估算，至少需要幾億倍太陽質量以上的黑洞才能驅動這樣的現象，遠遠超過一般恆星死亡後形成

的黑洞，是宇宙中最重的單一物體。

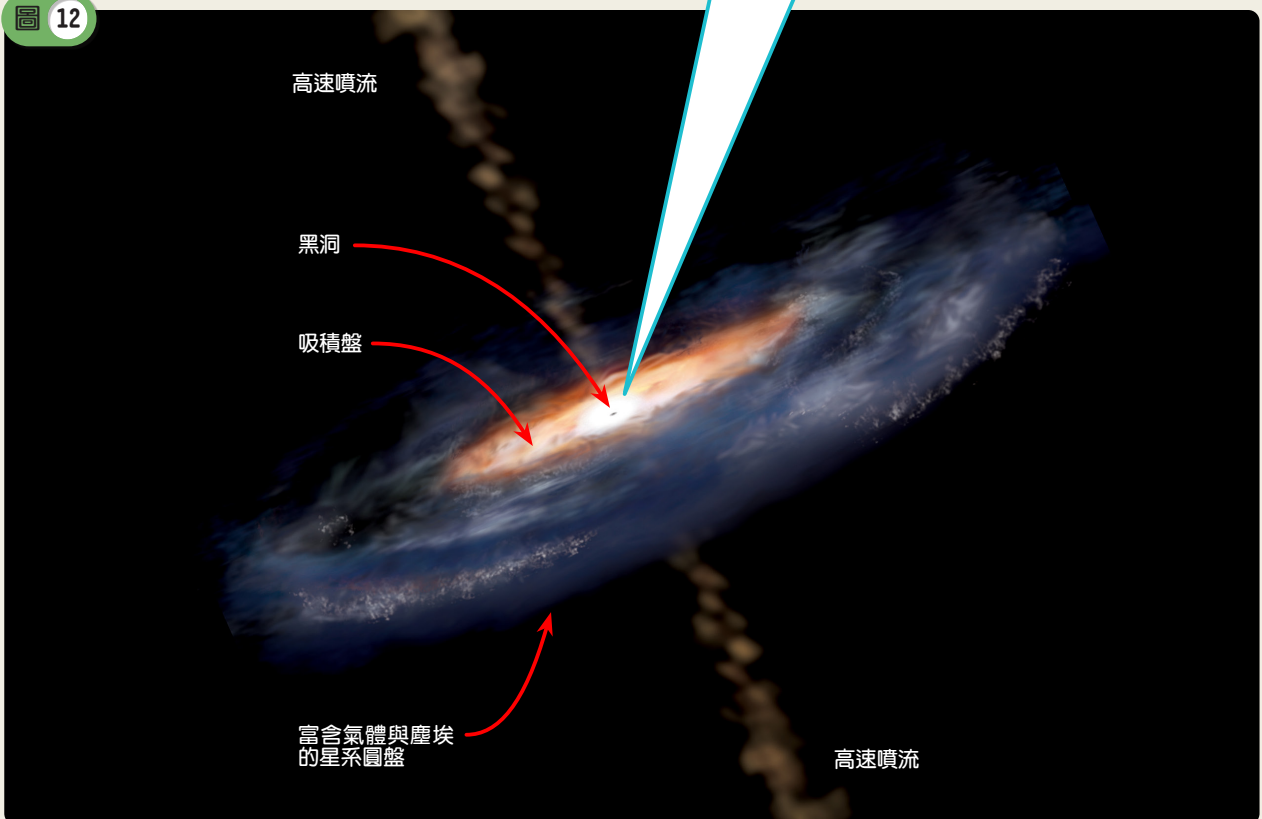
這樣的發現帶來了一個新的難題：這些龐大的黑洞，是怎麼形成的呢？我們會在後續回到這個問題。

圖 13



活躍星系的核心放大示意圖，在星系正中央是超大質量黑洞，周圍的吸積盤物質以接近光速的超高速度繞黑洞運轉，並發出強烈光芒。圖片來源：STScI

圖 12



一種可能的活躍星系核構造示意圖，確切構造是還在爭論中的熱門議題。活躍星系核之所以會如此明亮，是因超大質量黑洞吸積周圍物質形成吸積盤，而鄰近黑洞的吸積盤物質高速繞轉黑洞而釋放出強烈的輻射能量。一部分的活躍星系核擁有沿著旋轉軸方向延伸的高速噴流結構，而另一些則缺乏明顯噴流。圖片來源：NASA/Aurore Simonnet, Sonoma State University

在理解類星體的成因後，兩位英國天文學家林登貝爾（Donald Lynden-Bell）與里斯（Martin Rees）提出大膽的推論：所有星系的中心都存在一顆像類星體裡有的超大質量黑洞。不同的是，類星體之所以發光，是因為其黑洞正在大量吸積物質；而一般星系的中心黑洞則沒太多物質可以吸積，所以不會發光。天文學家於是將類星體這類天體稱為「活躍星系核（active galactic nuclei）」，有別於一般的星系。

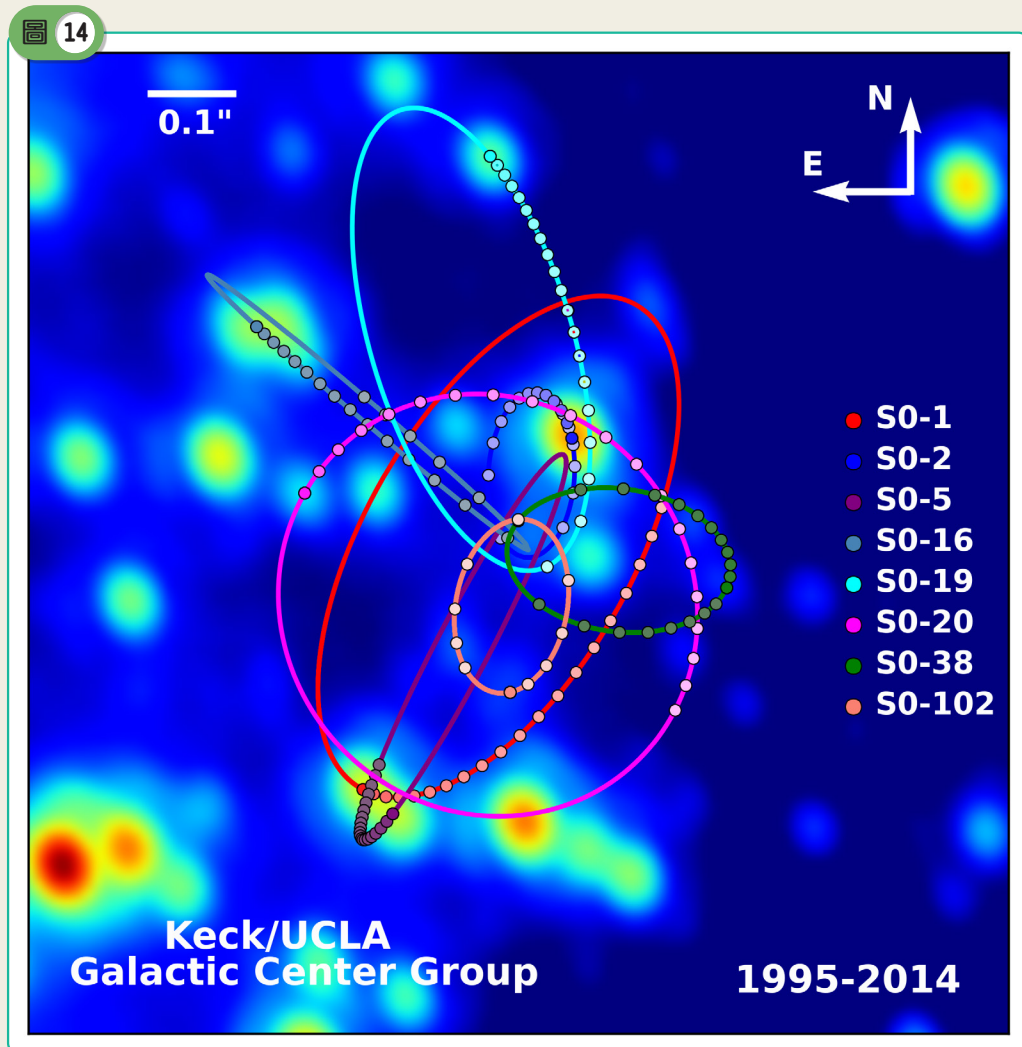
那麼，我們所在的銀河系中心是否也藏著一顆這樣的黑洞呢？答案是肯定的。這顆位於人馬座方向的黑洞，稱為人馬座A*（Sagittarius A*），是一個典型的沉寂黑洞。雖然看不見它發出的光，但天文學家發現，附近有數顆恆星繞著一個看不見的中心

運行。

1990年代起，美國天文學家蓋茲（Andrea Ghez）和德國天文學家根策爾（Reinhard Genzel）各自帶領團隊，長期觀測人馬座A*附近恆星的運動，如圖14。他們利用紅外線觀察塵埃後方的星體，並根據這些恆星的軌道，利用克卜勒行星定律與廣義相對論的修正，反推出中心超大質量黑洞的質量：大約是四百萬倍太陽質量。兩位科學家因此在2020年獲得諾貝爾物理學獎。

這樣的觀測提供了間接但強而有力的證據。接著，天文學家們提出了下一個挑戰：是否有機會直接「看到」黑洞？

1978年，法國天文學家盧米內（Jean-Pierre



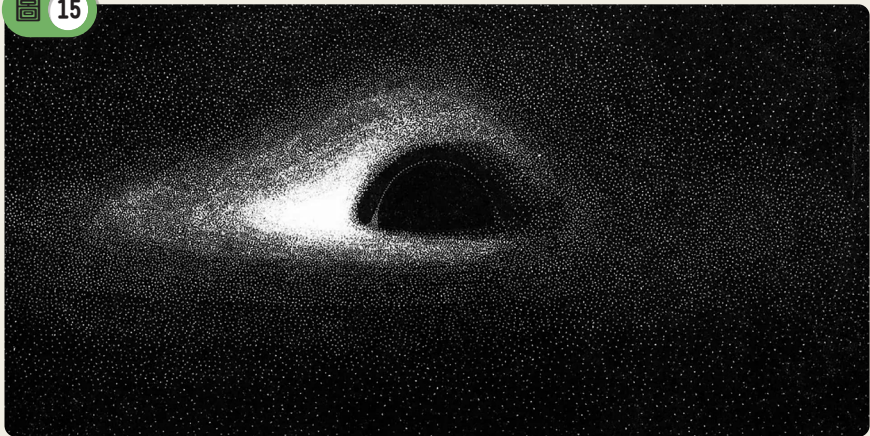
蓋茲團隊對人馬座A*的多年觀測結果，顯示周遭恆星繞行看不到的超大質量黑洞。影像來源：Keck/UCLA Galactic Center Group

Luemint) 使用早期電腦模擬，根據廣義相對論來預測黑洞與其周圍吸積盤在觀測上的樣貌。結果顯示，在強重力彎曲下，吸積盤的光線會繞過黑洞、被扭曲成一個亮環，中央則是一塊光線無法逃出的黑影，也就是所謂的「黑洞影子」，如圖15。

然而，實際上要看到這樣的影像極為困難。即使是超大質量黑洞，其整體尺度最多也只有太陽系大小，這在宇宙中是非常小的，需要非常高的解析度才行。

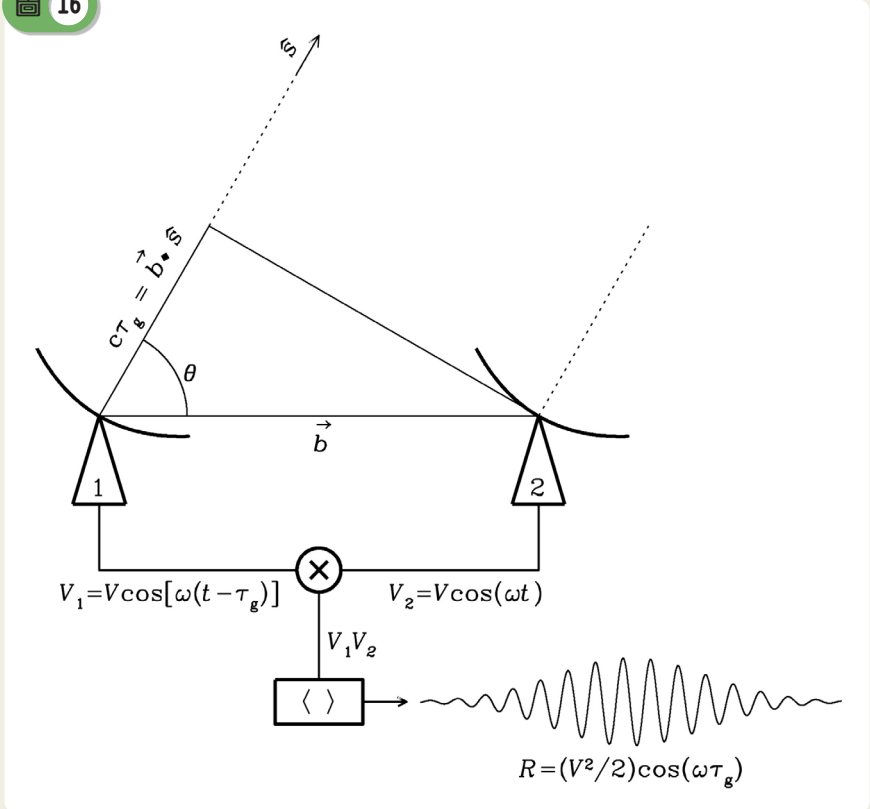
雖然單一天線的電波望遠鏡解析度有限，但天文學家可透過將多個天線組成電波陣列來大幅提高解析度，原理是利用中學學過的干涉技術：當不同位置的兩個碟盤天線觀測不在天頂的同一天體時，會因為光抵達兩個碟盤有時間差而得到不同相位的光，那將這兩道光互相疊加就能得到干涉，如圖16。在電波陣列中每兩個碟盤可以組成的一個基線 (baseline)，只要基線夠多，就能夠利用干涉原理合成出原本的影像 (synthesis imaging)。而這兩個碟盤只要擺得夠遠，就可等效出比碟盤本身大很多的電波望遠鏡。

圖 15



法國天文學家盧米內 (Jean-Pierre Luemint) 於1978年使用早期電腦模擬所預測的黑洞樣貌。圖片來源：Jean-Pierre Luemint/CNRS Phototheque

圖 16



電波干涉運作原理示意圖。將1跟2兩台碟盤天線接收到的訊號處理後，即可得到干涉波。圖片來源：Essential Radio Astronomy, by Condon and Ransom, Princeton University Press, 2016

目前最新且有臺灣參與的大型電波陣列是阿塔卡馬大型毫米及次毫米波陣列（Atacama Large Millimeter/submillimeter Array, ALMA），如圖17，ALMA有66個碟盤天線，形成2,145條基線，最遠可以擺到16公里的距離，能達到百分之一角秒⁶等級的解析度，但是這樣仍不足以看到超大質量黑洞。

既然能靠很長的基線來等效出大型望遠鏡，那麼在地球上能做出最大的電波陣列，就是具有地球直徑長度基線的陣列了。天文學家將這個大膽的想法付諸實現，事件視界望遠鏡（Event Horizon Telescope, EHT）因此誕生，如圖18。

EHT聯合了遍佈夏威夷、智利、南極、歐洲與北美的電波陣列，可以達到十萬分之一角秒等級的解析度。在超過三百位包括臺灣天文學家的努力之下，成功在2019年公開了室女A星系（Messier 87, M87）裡首張黑洞影像，如圖19。這是人類首次「直接」觀測到黑洞的證據，與半世紀前應用廣義相對論的預測一致。2022年，EHT再次公佈了比M87小但離我們更近的人馬座A*的黑洞影像，如圖20。

這些努力，從愛因斯坦提出理論，到橫跨世代的觀測行動，歷時超過一世紀，終於讓人類第一次真正「看見了」黑洞，如圖21~23。

圖 17



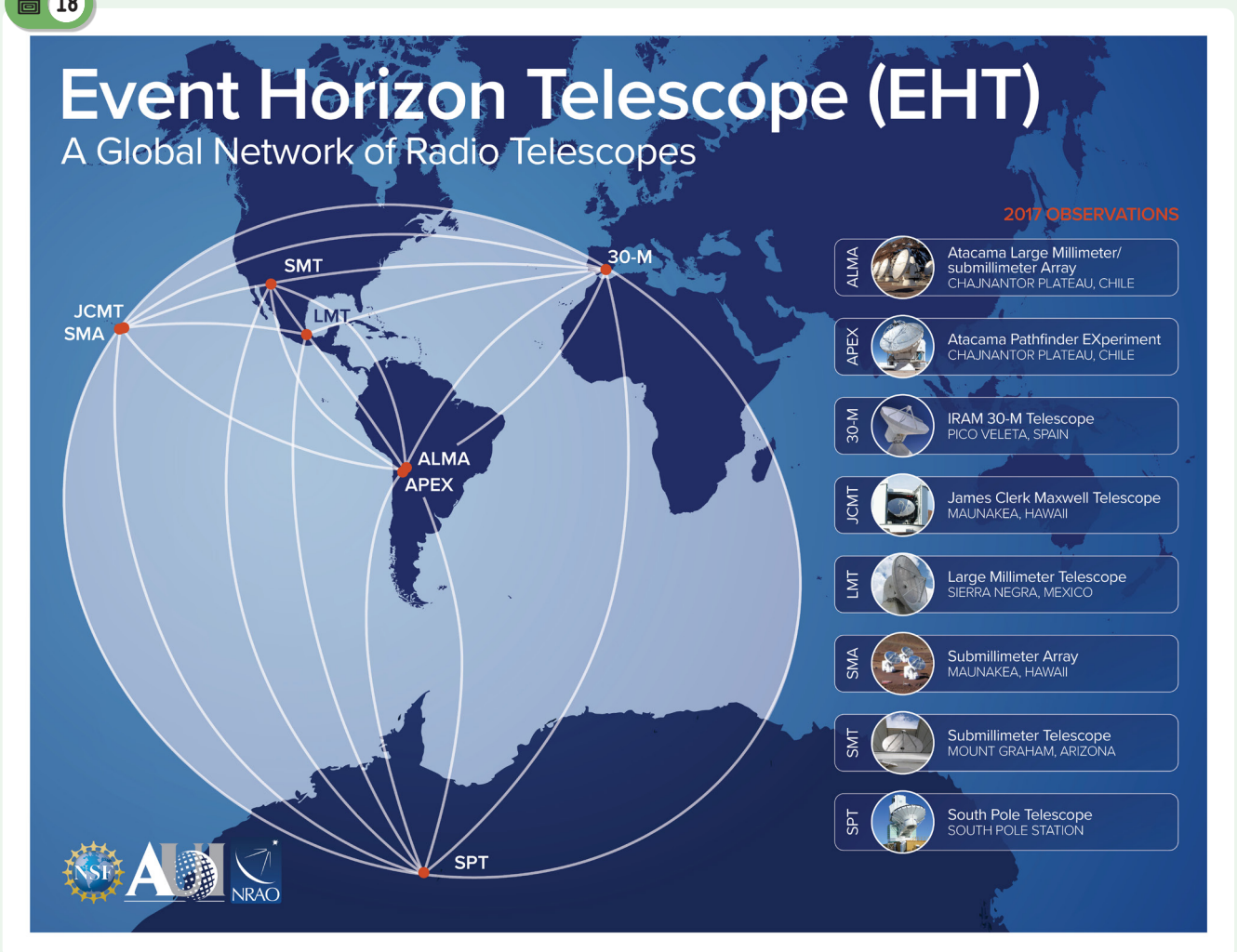
阿塔卡馬大型毫米及次毫米波陣列（Atacama Large Millimeter/submillimeter Array，簡稱ALMA）為事件視界望遠鏡陣列最重要的望遠鏡之一，位於陣列的中央。此望遠鏡位於智利北部阿塔卡馬沙漠，為電波望遠鏡群組成的干涉儀陣列。共有66座天線一起協同工作，可用不同的配置法排列，天線間的距離變化多樣，最短可以是150公尺，最長可以到16公里。臺灣中央研究院天文研究所於計畫中協助建造並參與實際營運。影像來源：ESO

黑洞研究觀測的先驅者-事件視界望遠鏡 說明圖解

事件視界望遠鏡（Event Horizon Telescope，簡稱EHT）是一項觀測星系中心超大質量黑洞的國際合作計畫。該計畫運用甚長基線干涉（Very Large Baseline Interferometry）技術，將分布於全球各地的電波望遠鏡同步連結，讓彼此相距數千公里的接收天線能共同鎖定同一觀測目標，並記錄觀測資料。透過此技術，事件視界望遠鏡等效建構出一具口徑相當於地球直徑的虛擬望遠鏡，解析力足以捕捉事件視界尺度上的精細結構。

事件視界望遠鏡的核心科學目標包括：驗證廣義相對論在黑洞極端重力環境下的適用性、研究黑洞周圍的吸積盤與相對論性噴流、確認事件視界是否實際存在，以及建立黑洞物理的基礎理論架構。主要觀測對象為2個超大質量黑洞：一為位於銀河系中心、南天的人馬座A*，另一則是北天室女座的M87橢圓星系核心的黑洞。

圖 18



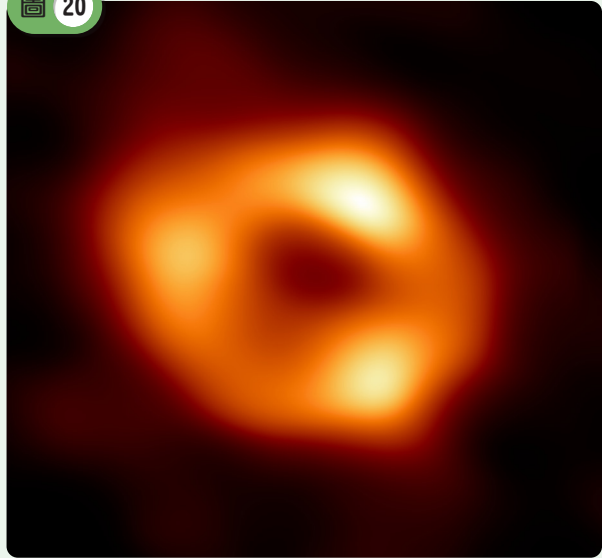
事件視界望遠鏡聯合了遍佈夏威夷、智利、南極、歐洲與北美的無線電波陣列，用網路同步串連，將望遠鏡盤面擴大至整個地球大小，可以提高解析度至十萬分之一角秒等級。圖片來源：ESO

圖 19



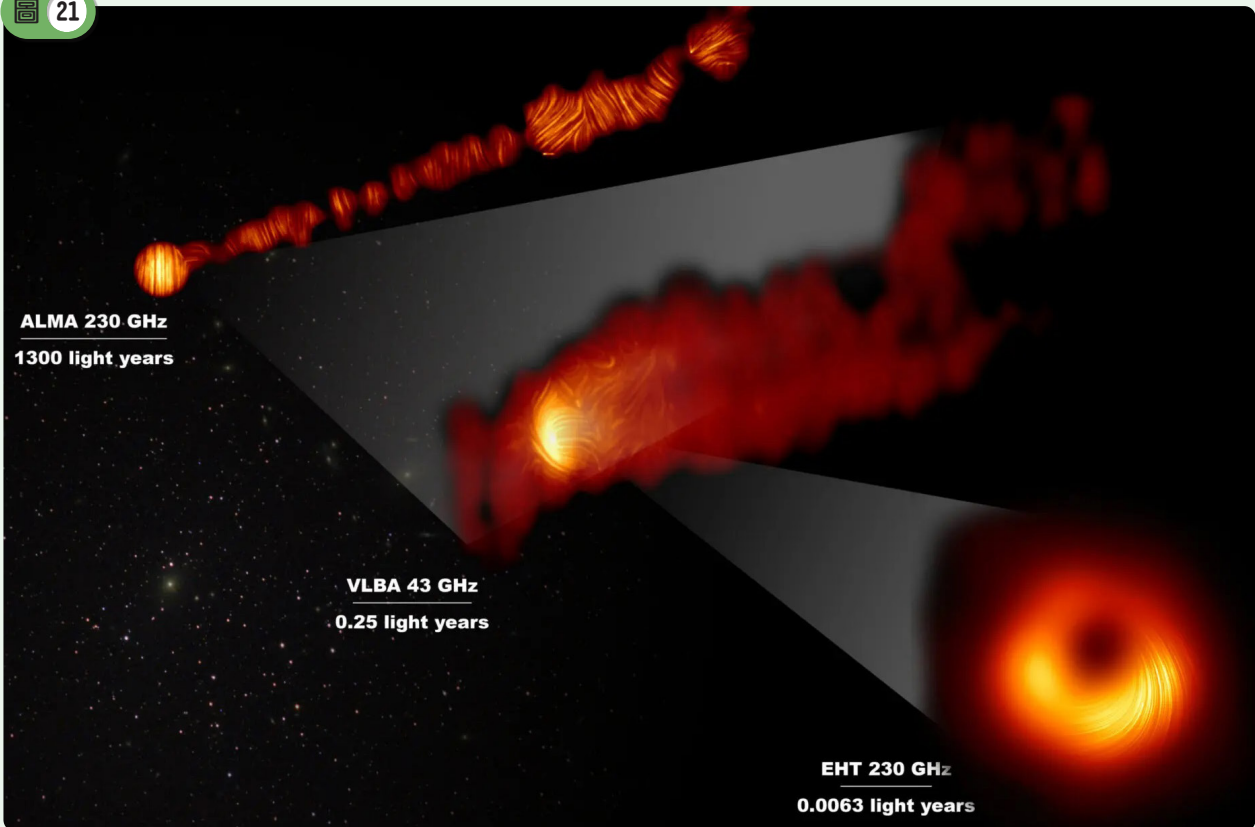
2019年，事件視界望遠鏡首度拍攝到室女A星系M87中央的黑洞影像。影像來源：ESO

圖 20



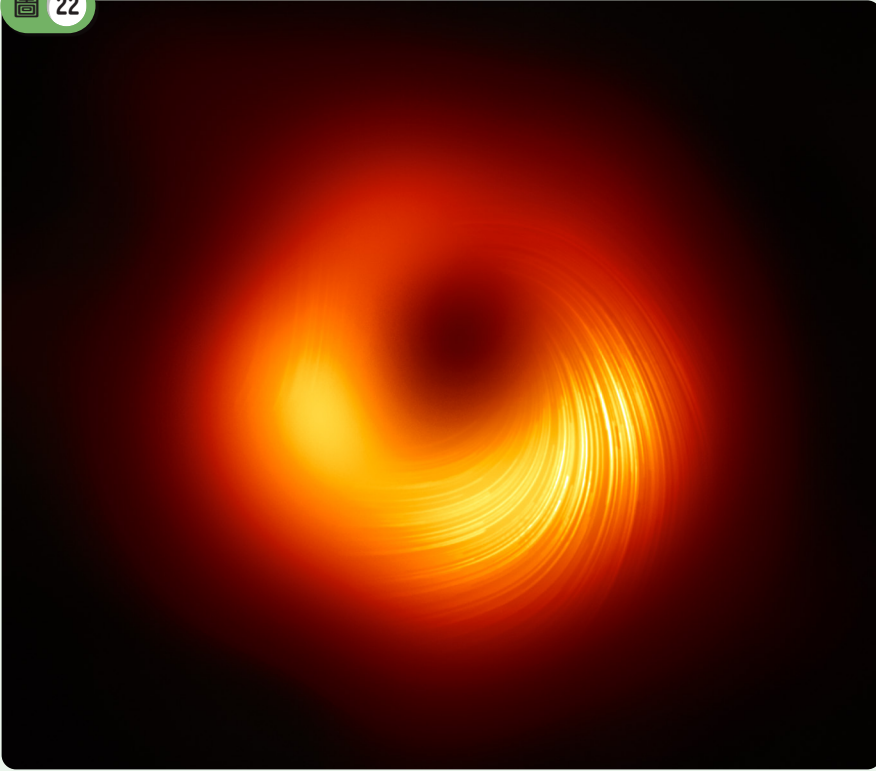
2022年，事件視界望遠鏡拍攝到銀河系中央的人馬座A*超大質量黑洞影像。影像來源：ESO

圖 21



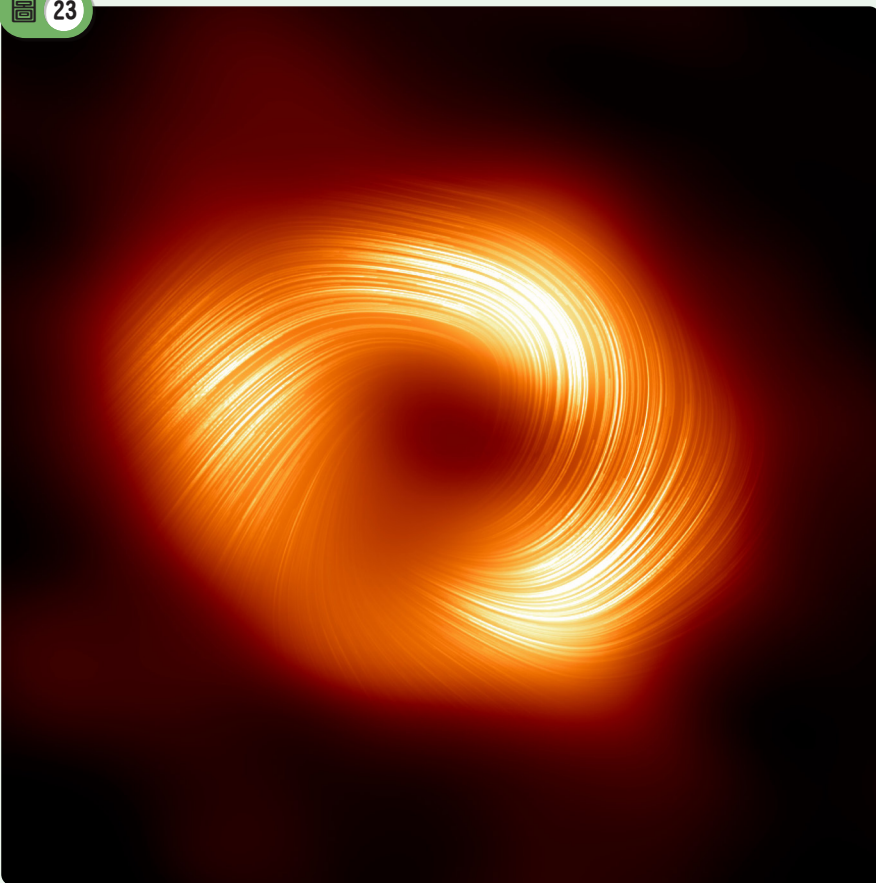
這張合成影像以偏振光呈現M87星系核心區域的三種觀測視角。該星系中心擁有一顆超大質量黑洞，並以延伸遠超星系範圍的噴流聞名。最上方是由歐洲南方天文臺（European Southern Observatory）合作參與、設於智利的ALMA所拍攝之偏振影像，呈現出距離星系核心約6,000光年範圍內的噴流結構。中間部分是由美國國家電波天文臺的甚長基線陣列（Very Large Baseline Array）取得的偏振圖像，解析範圍約1光年，更進一步靠近黑洞。下方的最內層視野則由EHT聯結全球8座電波望遠鏡形成地球尺度虛擬望遠鏡所拍攝，使天文學家得以探測噴流發射區域。圖中線條顯示偏振方向，反映出區域內的磁場結構。ALMA資料描繪了沿噴流的磁場分布，而EHT與ALMA的結合觀測，讓研究人員得以追溯磁場從事件視界附近至星系尺度上噴流的角色，跨越至幾千光年之尺度。圖中GHz數值代表各波段觀測頻率，橫線則標示影像的實際尺度（以光年計）。影像來源：ESO

22



2021年，EHT團隊公開位於M87星系中心黑洞的偏振光觀測結果。此為天文學家首次於黑洞邊緣測量偏振訊號，揭示其鄰近磁場結構。偏振光是電磁波的一種特性，其方向性變化與磁場的排列密切相關，因此成為研究黑洞環境中磁場分布的關鍵工具。影像中所示線條代表偏振方向，反映出黑洞陰影周圍磁場的排列情形，為探究黑洞吸積與噴流機制提供線索。影像來源：ESO

23



這是2024年，EHT公開的人馬座A*中心黑洞的偏振光影像。儘管人馬座A*的黑洞無論在質量或大小都只有M87的千分之一，但他們的偏振光影像卻是如此的相似，這暗示著磁場活動可能在各種尺度的黑洞上都存在。由於人馬座A*沒有M87顯而易見的噴流，同樣的磁場活動代表或許人馬座A*也存在某種隱藏的噴流。影像來源：ESO

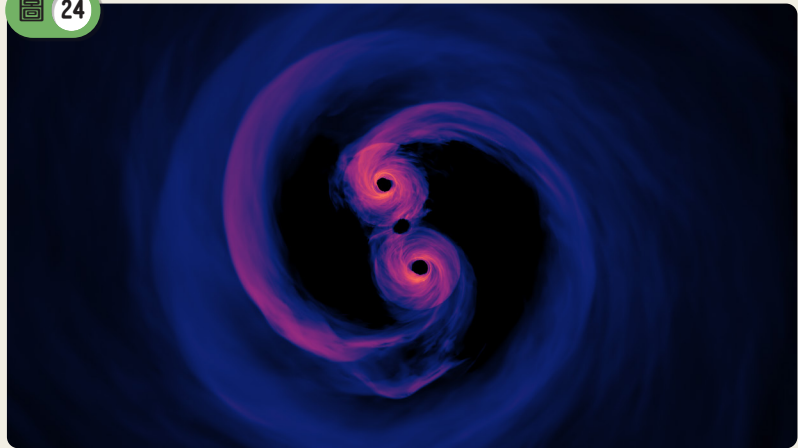
超大質量黑洞形成 與星系合併

不過，故事還沒結束。我們已經知道，恆星死亡後可能形成質量數倍到上百倍於太陽的黑洞；我們也能觀測到星系中心那龐大的超大質量黑洞。但問題來了——這些黑洞質量之間有著幾百萬倍以上的巨大差距，它們是怎麼從恆星級「長大」成這個程度的？

目前有各種理論試圖解釋超大質量黑洞的形成，其中一種簡單的方式就是透過兩顆輕一點的黑洞合併成更重的黑洞，如圖24，不斷重複這個過程就可以合併出超大質量黑洞。

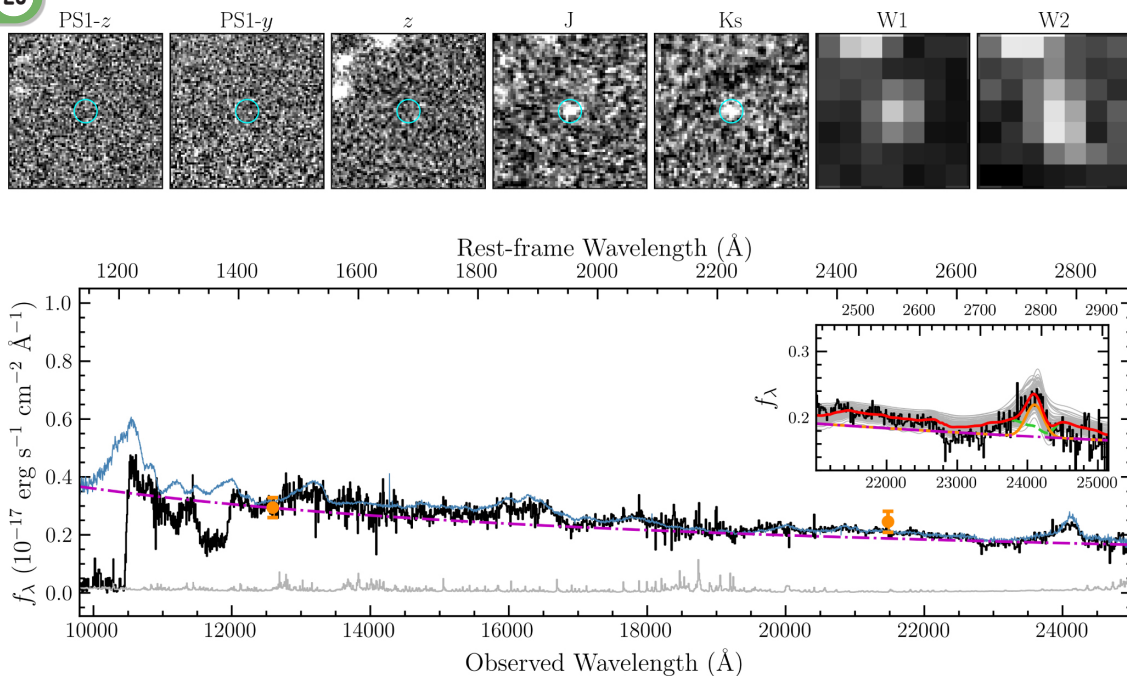
然而，這個過程理論上需要漫長的時間，但是天文學家卻陸續發現，在宇宙年齡只有幾億年時就已經出現了類星體，如圖25，而且他們的超大質量黑洞估計可達十億倍的太陽質量。要如何最有效率地長出這麼重的黑洞就是非常多天文學家努力在研究的問題。

圖 24



電腦模擬2顆相互繞轉的超大質量黑洞，再繞40圈，這兩顆黑洞就會合併，可見周圍氣體發射出強烈的輻射。此類模擬可望協助天文學家在觀測數據中辨識黑洞雙星系統，進一步探索黑洞的合併過程與產生重力波的機制。圖片來源：NASA

圖 25



目前公開紀錄中最高紅移的類星體為2021年發表的QSO J0313-1806，紅位移值為7.642，相當存在於宇宙大霹靂後約6億多年，中心的黑洞質量預估有16億倍太陽質量。上方七個並排小圖為該類星體不同波段的影像。左邊三張圖顯示在短波長是看不到這顆類星體的，因為被路徑上的中性氫原子吸收了。下方則是光譜。黑色線是觀測得到的光譜，藍色線是沒有被氣體吸收的話，應該要得到的光譜。在靜止坐標系（rest-frame wavelength）中波長1216Å左右的是氫的萊曼alpha（Ly- α ）譜線，短於該譜線波長的部分被中性氫原子完全吸收。在波長2800Å左右的是鎂離子（Mg II）譜線，這些都說明它是一顆高紅移類星體的證據。圖片來源：Feige Wang, et al. 2021 ApJL 907 L1

超大質量黑洞的形成還跟星系的成長有關。1999年，美國天文物理學家梅里特（David Merritt）透過統計眾多星系後發現，超大質量黑洞的質量，與其宿主星系中核球（bulge）的總恆星質量成正比。這個就是著名的M- σ 關係⁷，代表著即使超大質量黑洞的尺寸只有星系大小的百萬分之一以下，但彼此是會共同成長的。那麼，有什麼機制能讓它們「一起變大」呢？

星系合併（galaxy merger）是其中一種重要的

方式。在宇宙中，星系並不是靜止不動的孤島，它們會彼此靠近，最終融合成更大的星系，天文學家也確實在望遠鏡下觀察到無數正在合併中的星系，如圖26、圖27。

那麼這些星系合併的過程中，中心的超大質量黑洞是不是也有可能跟著合併變成更重的黑洞呢？天文學家確實是這麼相信，但還需要更多證據來證明。

圖 26



稱為「老鼠星系」的NGC 4676，是一對相互碰撞合併中的螺旋星系，因拖曳出像老鼠般的長尾巴而得名。星系間的潮汐作用促使星系大量產生年輕的藍色恆星，兩星系間可見交互流動的星際物質，以及凝聚中的星團。根據估算，部分的星團質量均已達矮星系等級，它們最終將合併為巨大的單一星系。影像來源：NASA

圖 27



美國與歐洲太空總署聯合公布6幅壯麗的星系合併影像。這些系統皆為HiPEEC巡天研究的一部分，旨在探討合併過程中新恆星的形成速率。星系的合併為星系生命中最劇烈的現象之一。影像來源：NASA

黑洞合併的重力波

講到黑洞合併，就不得不提到「重力波 (gravitational wave)」了。重力波最早是由英國物理學家黑佛賽 (Oliver Heaviside) 跟法國物理學家龐加勒 (Henri Poincaré) 分別提出概念，但直到愛因斯坦的廣義相對論出現後，重力波才有更完整的物理理論基礎。

在牛頓力學的概念中，重力是即時且無遠弗屆的：一個質量的存在就能即時影響另一個有質量的物體。但這種「瞬時作用」與廣義相對論精神相違，因為愛因斯坦指出：宇宙中任何訊息的傳遞都不能超越光速，就算是重力場也一樣。因此，在廣義相對論中，質量會造成時空的彎曲，而當這種彎曲隨著物體移動而變化時，這個變化會以光速傳遞出去，也就是所謂的重力波，如圖28。

愛因斯坦在1916年寫下了重力波的理论基礎，

但他後來對重力波是否真實存在產生了懷疑。1936年，他在美國跟助理寫論文試圖證明重力波不可能存在，並投稿到《物理評論 (Physical Review)》，結果居然被匿名審查的審查人指出推理有誤。當時匿名審查還不普遍，而物理評論也還是新興的期刊，還沒有現今的盛名。愛因斯坦沒有經歷過匿名審查，所以認為期刊編輯在他不知情下將論文原稿交給他人審閱非常無禮，更何況還膽敢指出他的錯誤！他在憤怒中撤稿，並再也沒有投稿到該期刊。後來，他與另一名助理合作中發現了自己的錯誤，在修正後的論文中認為重力波可能存在，並投稿到其他期刊。這是愛因斯坦學術生涯中唯一一次投稿失利，多年人們後基於解密紀錄才知道，這位匿名審查委員是他的普林斯頓大學同事羅伯遜 (Howard P. Robertson)。

但理論是一回事，重力波訊號非常微弱，要怎麼觀測證實呢？

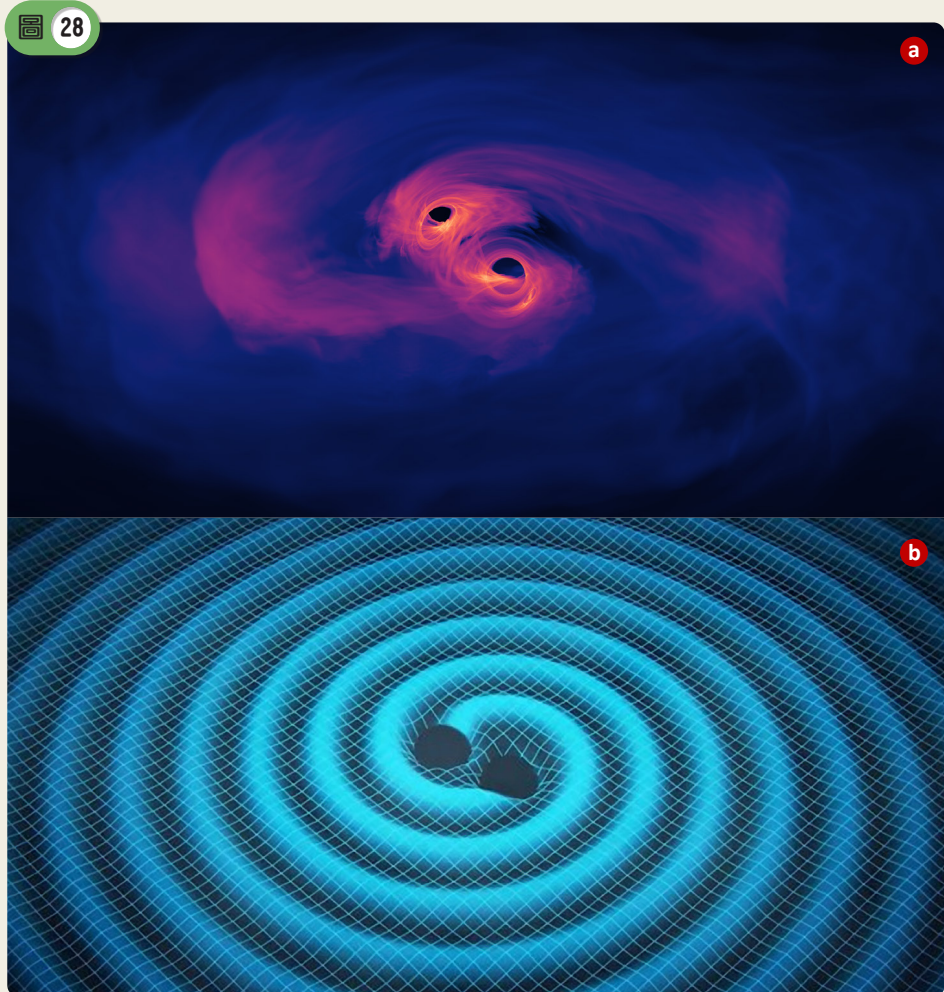


圖 a 為電腦模擬2顆黑洞近距離高速相互繞轉直到接近並合併，根據廣義相對論推算，在此階段的黑洞會放射出強大的重力波，如圖 b。圖片來源：NASA

1974年，美國天文物理學家赫爾斯（Russell Hulse）和泰勒（Joseph Taylor）發現的一對脈衝星組成的雙星系統（PSR 1913+16）。多年追蹤觀測後，他們發現該系統的軌道週期正逐漸縮短，其能量損失正好符合廣義相對論中重力波的預測。這項發現為重力波提供了有力的間接證據，並讓他們在1993年獲得諾貝爾物理學獎。

但要直接觀測重力波，難度更高。從1970年代開始，科學家們著手研發能夠直接偵測重力波的儀器。經歷多年籌備與資金申請，美國國家科學基金會終於在1990年代批准建設「雷射干涉重力波天文臺（Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory, LIGO）」，如圖29，展開劃時代的嘗試。

LIGO的運作原理基於相對論中光速不變的原

則。它將一道雷射光透過分光鏡分成兩道，分別沿著垂直方向延伸的四公里長隧道來回反射五十次，再重合成干涉圖樣。若有重力波通過地球，會極微小地拉伸或壓縮空間，導致兩條光路長度略有不同，使干涉圖樣出現變化，如圖30。這個變化極其微小，最終在超過一千名科學家幾十年的努力下，LIGO的靈敏度達到比質子直徑還小一萬倍的精度，相當於在測量距離4.2光年遠的恆星位置時，精確度達到一根頭髮的寬度。

為了確認觀測結果的可靠性，LIGO在美國兩處各建一座完全獨立的干涉儀——分別位於華盛頓州的漢福德（Hanford）與路易斯安那州的利文斯頓（Livingston）。只有當兩站同時探測到一致訊號時，才能確認這是來自宇宙的真正重力波，而非本地噪音。

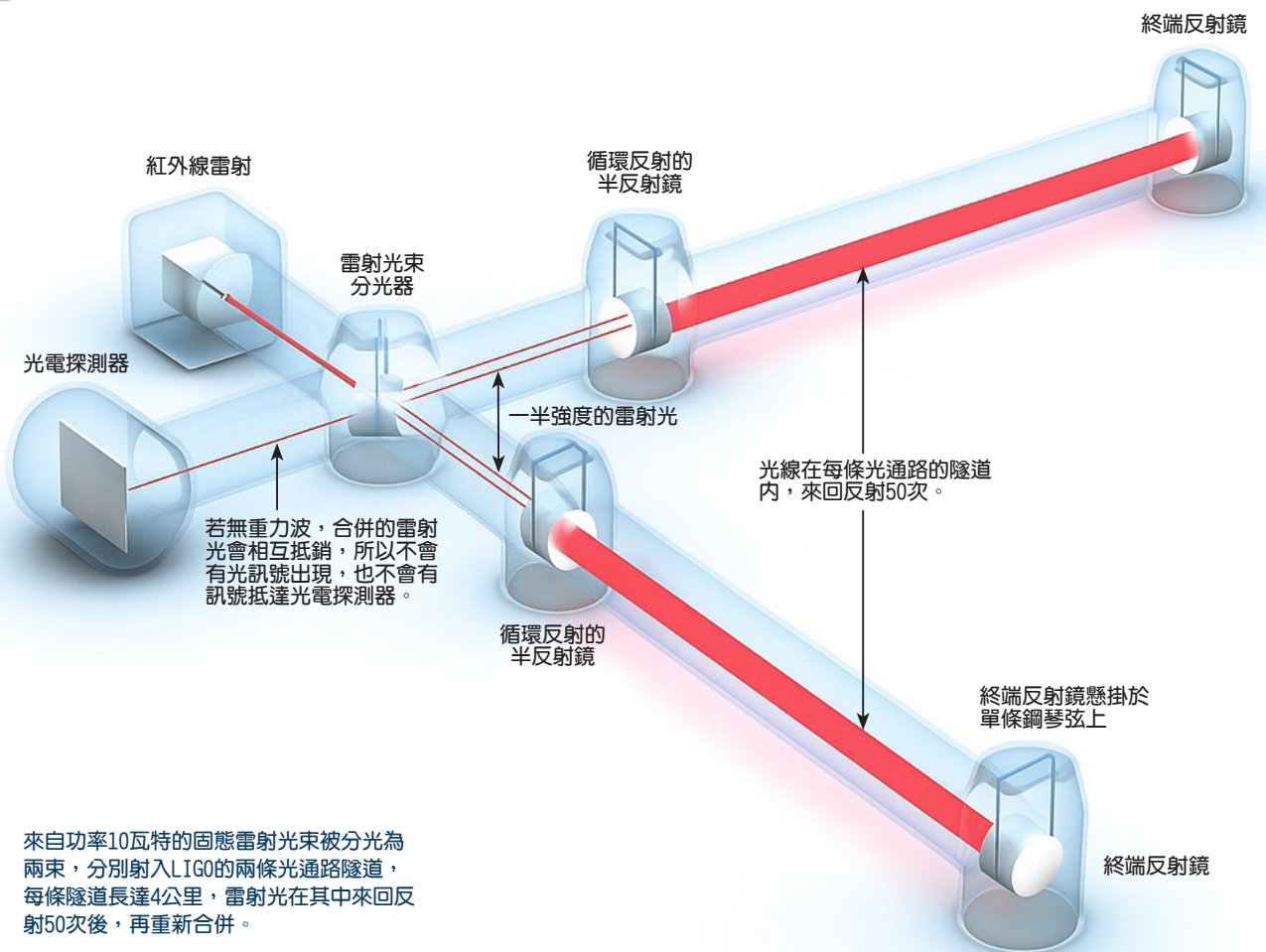
圖 29



雷射干涉重力波天文臺（Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory，簡稱LIGO）是探測重力波的一個大規模物理實驗和天文觀測平臺，在美國華盛頓州的漢福德與路易斯安那州的利文斯頓，分別建置雷射干涉儀。利用兩個幾乎完全相同的干涉儀共同運作，可以大幅度減少誤判微小雜訊微重力波訊號的可能性。干涉儀的靈敏度極高，即使長度為400公里的雷射光路徑發生任何微小變化，小至質子直徑的萬分之一，都能夠被精確測量。影像來源：LIGO

雷射干涉重力波天文臺 干涉儀運作方式圖解

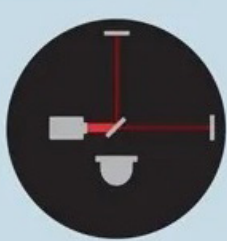
圖 30



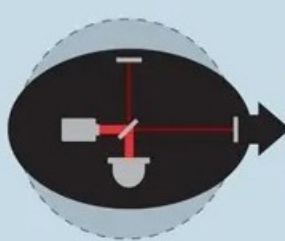
在重力波尚未抵達前，兩條長為4公里的光通路隧道完全等長，所以光電探測器接收不到任何訊號。



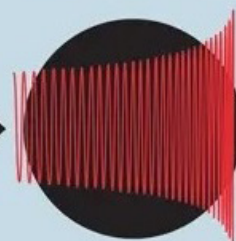
重力波通過時，其中一條光通路隧道被拉長，另一條光通路隧道被壓縮，導致干涉條件改變，讓光訊號出現並抵達探測器。



隨著重力波進一步通過，兩條光通路隧道再次恢復為等長，導致光訊號再次互相抵銷，探測器再度接收不到光訊號。



重力波持續通過，原本被拉長的光通路隧道開始壓縮，而原本壓縮的光通路隧道被拉長，導致探測器再次接收到光訊號。

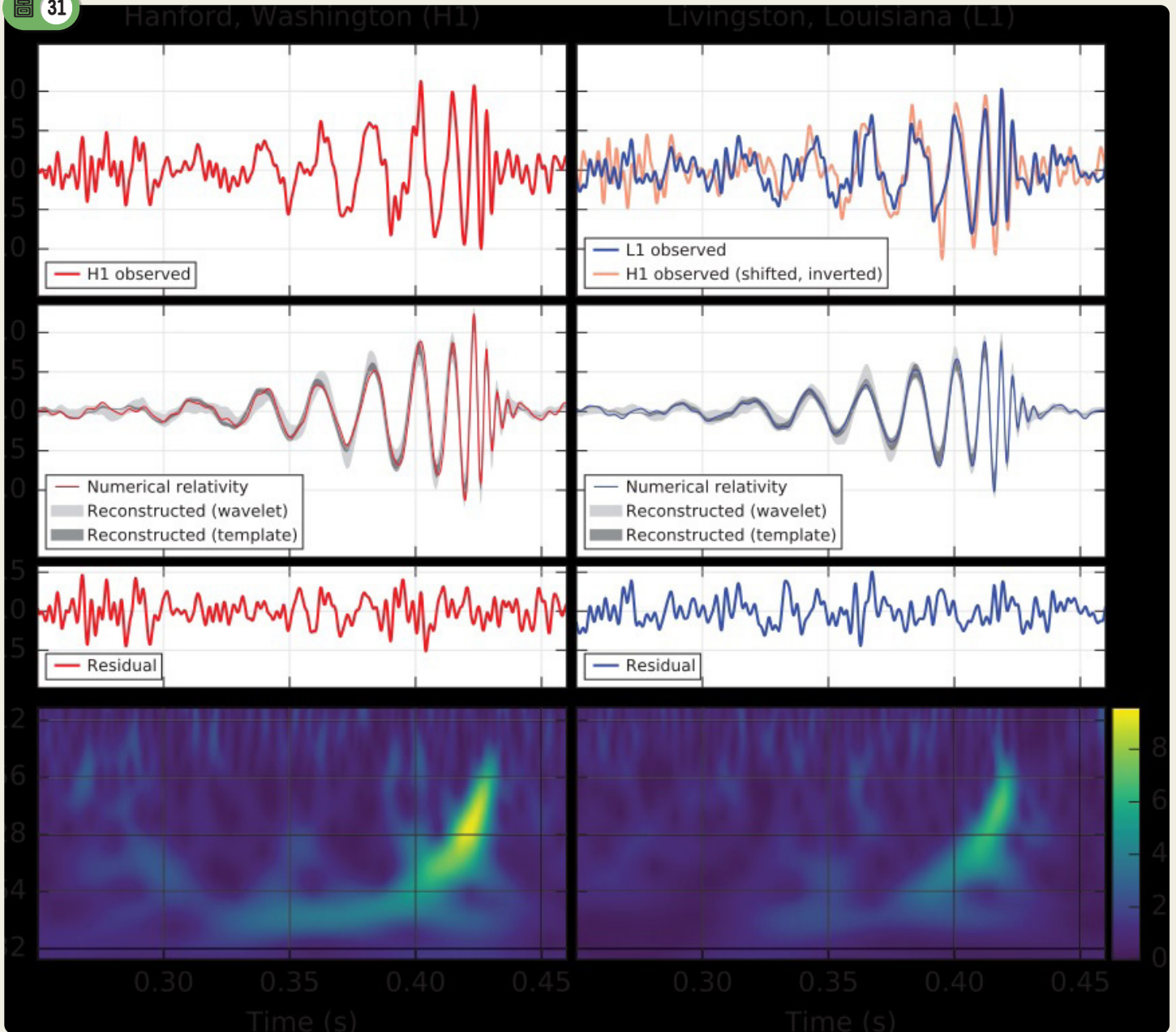


光電探測器所接收到的訊號呈現振盪狀，頻率與波形由重力波源的性質所決定。

2016年，LIGO 團隊宣布成功偵測到人類歷史上第一個重力波事件。經過與理論模型比對，證實這個只有約0.2秒的「啁啾訊號 (chirp)⁸」，如圖 31，來自14億光年外——兩顆各約30倍太陽質量的黑洞合併時釋放的重力波。這項成果不僅直接證實了重力波的存在，也證明了黑洞合併的物理過程確

實會釋放可測量的能量。這也象徵著人類首次用電磁波以外的方式來研究宇宙，而這距離首次用望遠鏡來研究天體的伽利略 (Galileo Galilei) 已經過了四百多年。參與LIGO建設與理論貢獻的美國物理學家魏斯 (Rainer Weiss)、巴利許 (Barry Barish) 與索恩 (Kip Thorne) 很快在隔年共同獲得諾貝爾物理學獎。

圖 31



LIGO首次測到的重力波訊號，可見黑洞到合併那一刻有越來越強的訊號。圖片、影像來源：LIGO

宇宙中有很多產生重力波的機會，像是兩顆天體互相繞行、表面不平滑的脈衝星或是超新星爆炸等，但目前觀測到的兩百多起重力波事件，大多來自高密度天體的合併，例如白矮星、中子星或黑洞。這些重力波事件除了兩顆黑洞合併外，都有機會被其他光學望遠鏡看到，但這就需要世界各地的

雷射干涉儀同時運作，來提高對重力波來源方位的估計。除了LIGO以外，歐洲有在比薩的室女座干涉儀（Virgo），如圖32~34，日本有在岐阜的神岡重力波探測器（KAGRA），如圖35，未來還有印度在馬哈拉什特拉邦的LIGO-India將會建成。由此可見，重力波相關的研究領域充滿了前景。

圖 32



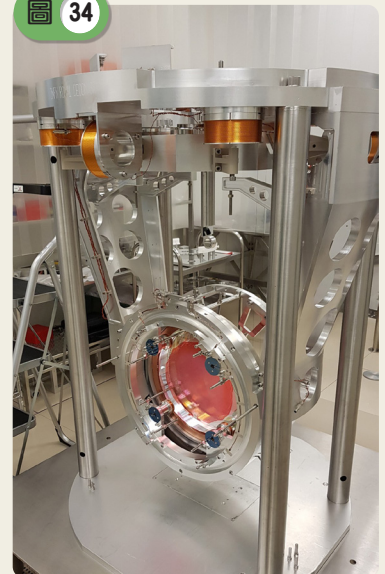
設置於義大利比薩的室女座干涉儀（Virgo），為全球第3座竣工的重力波天文臺。影像來源：LIGO

圖 33



Virgo的光通路隧道，是觀測重力波的關鍵設施。影像來源：European Gravitational Observatory

圖 34



Virgo的終端反射鏡。影像來源：European Gravitational Observatory

圖 35



日本的神岡重力波探測器，所有設施都設置於地下。圖片來源：NAOJ

天文物理學家的野望 尋找超大質量黑洞合併案例

人類已經能夠觀測到恆星級黑洞的合併與其釋放的重力波，那下一步，當然是挑戰更龐大的目標：超大質量黑洞的合併。

當兩個星系合併時，各自中心的超大質量黑洞會逐漸靠近，天文學家已經提出好幾種方法來尋找這些在不同距離尺度上合併中的超大質量黑洞系統。

在距離尺度為幾千至幾百光年的情況下，可以透過活躍星系核光譜中離子氣體的「窄發射譜線（narrow emission line）」來檢視。當氣體受到兩個不同黑洞的影響時，可能會呈現出雙峰的譜線結

構。另外，由於X射線具有較高穿透力，也可以用來觀察這些被塵埃遮擋、正在吸積的雙黑洞系統。而無線電波陣列的高解析度也能派上用場，但缺點是只有十分之一左右的活躍星系核會產生電波訊號。

在黑洞距離進一步縮短到幾光年以下時，高解析度的電波陣列還是有機會看到，但要在活躍星系核光譜中找到，就得看離子的「寬發射線（broad emission line）」而不是窄發射線，因為產生寬發射線的離子氣體速度更快、離黑洞更近。但由於這些離子氣體的運動更複雜，因此判讀比較困難。

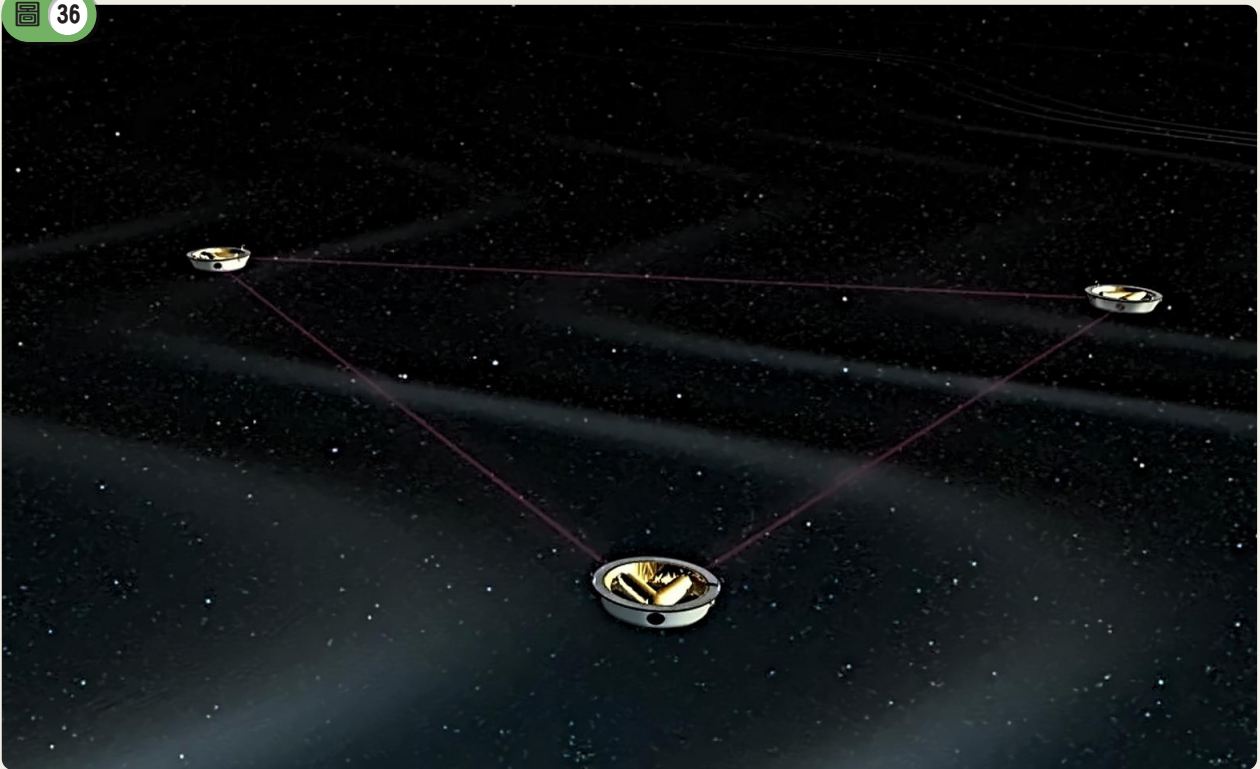
另一種方法，是對類星體進行長期光變監測。正常情況下，類星體的亮度變化是隨機且不具規律的；但若中心有兩顆黑洞互繞，理論上會造成重複的週期性變化。

若是想用重力波偵測超大質量黑洞合併的低頻訊號，地面上雷射干涉儀的靈敏度是不夠的，該怎麼辦呢？那就上太空吧！

這就是「雷射干涉太空天線（Laser Interferometer Space Antenna, LISA）」計畫的由來。

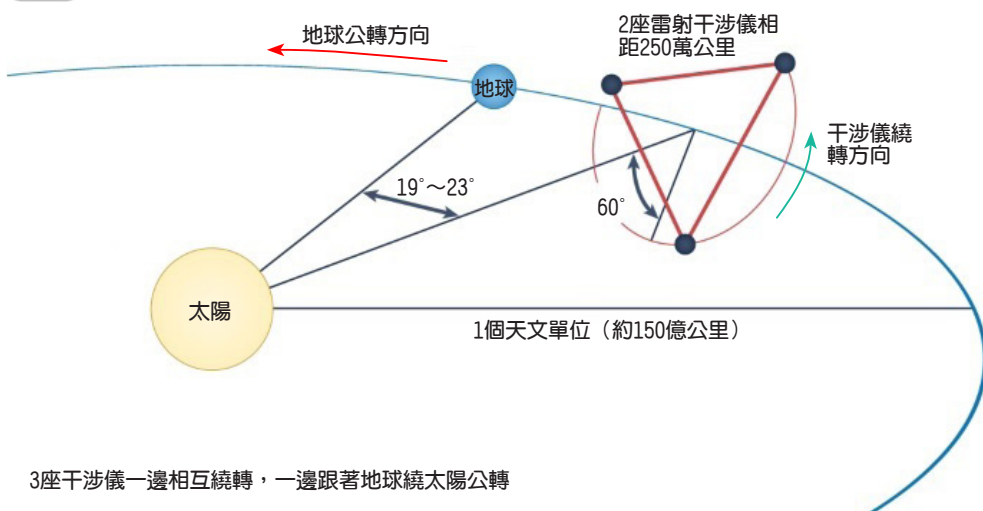
由歐洲太空總署主導，LISA 預計於2030年代發射三艘彼此相距250萬公里的太空探測器，組成一個巨大的正三角形，在地球軌道上繞行並尾隨地球，如圖36、圖37。每艘太空船將彼此發射與接收雷射光，透過干涉效應精密測量太空中的長度變化，靈敏度足以偵測來自超大質量黑洞合併的低頻重力波。

圖 36



LISA由三座相距數百萬英里的太空雷射干涉儀組成，位於地球的繞日軌道上，距離地球數千萬英里之處，約為地月距離的100倍。三座干涉儀互相傳遞雷射光並進行干涉合成，以偵測時空扭曲所產生的重力波訊號。為了觀測超過太陽百萬倍質量黑洞的相互繞轉現象，需建構尺度如此龐大的探測器。該任務由歐洲太空總署主導，美國太空總署協助，預定於2030年代中期發射，相關準備工作現正積極進行中。圖片來源：European Gravitational Observatory

圖 37



3座干涉儀一邊相互繞轉，一邊跟著地球繞太陽公轉

LISA的配置與運作方式示意圖。圖片來源：Astro2020: Decadal Survey on Astronomy and Astrophysics, APC white papers, by Thorpe, J. I., et al. 2019

LISA 預期能觀測到黑洞合併前的「螺旋靠近」過程，如圖38、圖39，並能提供準確的重力波來源方位，讓天文學家能配合進行光學觀測。這種「重力波與電磁波聯手」的觀測策略，有望揭示超大質量黑洞合併中尚未明瞭的細節，也許還會發現意想不到的現象。

回顧這場橫跨一世紀的科學追尋，從愛因斯坦提出廣義相對論開始，人類一步步將抽象的數學解方，化為觀測與實驗可及的現實。我們看到了脈衝星、證明了中子星的存在，偵測到黑洞合併的重力波，拍下了黑洞的影像，並將望遠鏡延伸至整個地球，甚至走向太空。

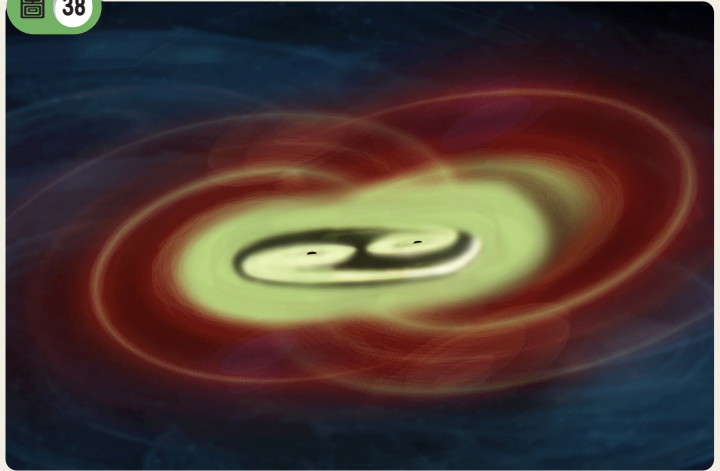
這段歷程展現了科學最珍貴的精神：代代相傳的探索勇氣，與對真理鏗而不捨的追求。我們也很慶幸這個時代，各國政府只要有能力，都會願意撥預算投資給科研經費，因為在解決科學難題時發展出來的技術知識，也許會碰巧在其他領域有所應用。未來或許仍有許多未知等待我們發現，但正是這份「不因困難而退縮」的精神，推動人類文明繼續前進。

湯濟家：日本愛媛大學博士後研究員

附註：

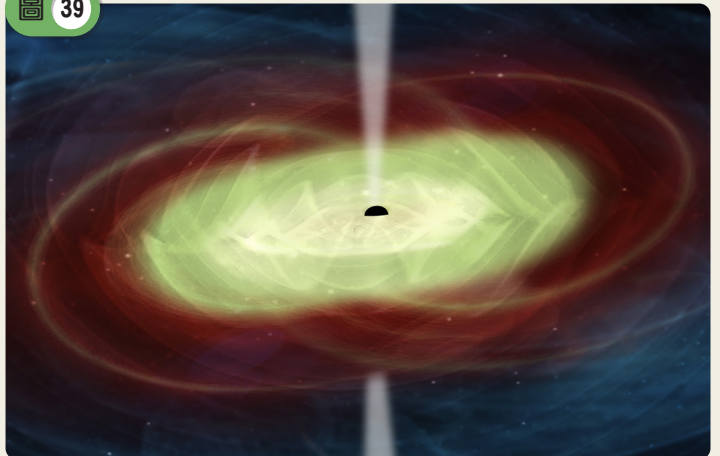
- 1.所謂解析解，就是能夠精確描述答案的一組數學算式。相對於解析解還有所謂的數值解，而數值解只能非常近似於正確答案。可以說，解析解就是可以拿紙筆簡單寫下來的，而數值解通常非得靠電腦計算才能得到。
- 2.黑洞這個詞是後來1967年惠勒（John Wheeler）採用才開始被廣見於各處，20世紀初人們稱呼黑洞為『重力坍塌的物體』。
- 3.這是1920年兩位美國天文學家Harlow Shapley與Heber Doust Curtis間的天文大辯論內容，現在我們知道銀河系外還有很多其他天體的存在。
- 4.後續的研究將這個數值修正到兩倍多的太陽質量。
- 5.因為宇宙正在膨脹，所有天體都在遠離彼此，所以當我們從地球上觀測這些遙遠逃逸中的天體時，就會看到因為都普勒效應

圖 38



當2顆黑洞相互靠近至一定距離，且繞轉速度愈來愈快，即為進入「螺旋靠近」的過程，此時放射出的重力波將逐漸增強。圖片來源：ESA

圖 39



在2顆黑洞合而為一的瞬間，將放射出合併過程中最強重力波。圖片來源：ESA

（Doppler effect）造成的波長變長現象。這在天文上就是所謂的紅移，儘管不一定是看起來變紅。

6.全天有360度，1度等於60角分，1角分等於60角秒。

7.這裡的M代表超大質量黑洞的質量，sigma代表星系中心核球裡所有恆星的離散速度（velocity dispersion），而這個速度可以用來推算這些恆星的總質量。

8.因為該訊號發生的頻率剛好處在人耳能聽到的頻率區段，所以要是將這個重力波訊號轉換成聲音訊號的話，聽起來很像某種鳥叫。

9.當這些氣體在繞行中心黑洞時就會有視線上的速度，因為都普勒效應，這些速度會造成譜線變寬。通常速度超過1000 km/s的會叫做寬發射線，以下的叫做窄發射線。