

臺北星空

Taipei Skylight No. 126 2025.07

CCD、CMOS的天文觀測發展史與未來展望
從愛因斯坦到黑洞合併的百年探索
穿越銀河的閃電訊號—探索快速電波爆

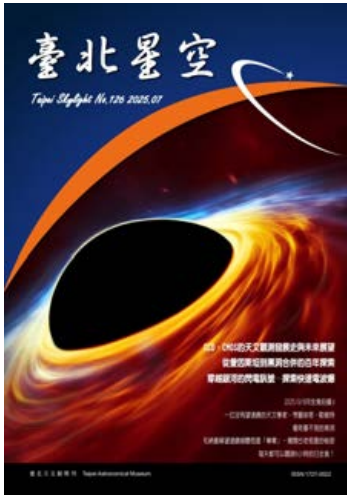
2025/9/8月全食拍攝 I

一位沒有望遠鏡的天文學家—亨麗埃塔·勒維特

看見看不見的黑洞

毛納基峰望遠鏡傾聽恆星「樂章」，揭開古老恆星的秘密

每天都可以觀測6小時的日全食！



影像名稱：超大質量黑洞與吸積盤
來源：ESA

刊名：臺北星空期刊
GPN：4811300001
中華民國87年10月1日創刊
中華民國114年7月1日出版
刊期頻率：雙月刊
本刊刊載於臺北天文館網站

發行人 陳岸立

發行委員 林修美、吳志剛
林琦峯、陳俊良
吳昆臻、謝翔宇
溫淑宜、李麗卿
卞欣婷、鄭伊宸

編審委員 陶蕃麟、黃麗君
張彩鳳、顧德生

總編輯 石中達

編輯 蔡承穎、吳昆臻
段皓元

美術編輯 蔡承穎

封面設計 蔡承穎

出版機關 臺北市立天文科學教育館

地址 臺北市士林區基河路363號
電話 (02) 2831-4551
傳真 (02) 2831-4405
網址 <https://tam.gov.taipei>

中華民國行政院新聞局出版事業登記證
局版北字第2466號

目次

- 總編輯的話** 編輯部 1
- 天文館活動布告欄** 編輯部 2
- 新知與天象** 王彥翔、王庭萱 3
- 天文新聞追蹤報導
毛納基峰望遠鏡傾聽恆星「樂章」，揭開古老恆星的秘密 林建爭 7
- 觀測裡的光電效應
CCD、CMOS的天文觀測發展史與未來展望 林宏欽 14
- 在彎曲時空裡仰望
從愛因斯坦到黑洞合併的百年探索 湯濟家 26
- 穿越銀河的閃電訊號—探索快速電波爆** 黃于綸 52
- 謎樣星宿
同名星官何其多 歐陽亮 60
- 天文展品導覽
愛因斯坦的重力波預言及實現之路 許晉翹 68
- 天文學教室
貝皮可倫坡號水星探測任務 周毅桓 74
- 女性天文學家
一位沒有望遠鏡的天文學家—亨麗埃塔·勒維特 劉淑雯、黃譯平 82
- 天文教育
看見看不見的黑洞 蔡安理 88
- 天文攝影實戰教學
2025/9/8月全食拍攝 I 吳昆臻 93
- 天體映象
每天都可以觀測6小時的日全食！ 謝翔宇 102
- 美星映象館** 彙整/吳昆臻 103

總編輯的話

本期《臺北星空》期刊，以紀念愛因斯坦「奇蹟年」一百週年為主軸，回顧重力波理論的誕生與實現，並延伸至現代天文的多項突破。廣義相對論自1915年提出至今，歷經百年驗證與觀測，已從數學方程轉化為人類探知宇宙結構的重要工具。從1919年日全食觀測中首次證實光線會因重力偏折，到雷射干涉重力波天文臺（LIGO）於2015年成功捕捉重力波訊號，這段跨世紀的科學旅程證明了科學理論的推測與實踐。

期刊中介紹了超大質量黑洞的形成原因與觀測歷程，包括銀河系中心人馬座A*黑洞的研究，以及2019年事件視界望遠鏡（EHT）捕捉到人類首張黑洞影像，臺灣研究團隊亦參與其中，展現臺灣科學界在全球天文舞台的貢獻。

除理論與實證並進的篇章外，本期也介紹女性天文學家亨麗埃塔·勒維特如何在無望遠鏡的條件下發現造父變星的「週期－光度關係」，成為測量宇宙距離的關鍵基石。另有關於毛納基峰凱克天文臺捕捉恆星「歌聲」、快速電波爆的觀測與理論解析、貝皮可倫坡號對水星的精密探測，以及2025年9月8日月全食的拍攝與觀測指引等豐富內容。

本期《臺北星空》以深入淺出的方式，串聯百年來天文觀測技術、科學理論與歷史人物的脈絡，是一場橫跨時空、從地球仰望宇宙的知識饗宴。歡迎讀者一同翻開這本期刊，在科學的光芒下重新認識星空的奧祕。

臺北星空 臺北天文館期刊

投稿需知

- 本刊歡迎各界人士投稿並提出指教，投稿內容請寄至：tsaijulien@gmail.com。
- 本刊對來稿有刪改權，如作者不願稿件被刪改，請註明。
- 文稿請自行影印留底，投稿文字、圖表、圖片與照片，均不退件。
- 文章一經採用，將刊登於臺北天文館網站。並請同意授權全本刊登於政府出版品相關宣傳網站，如「臺北市政府出版品主題網」、「國家圖書館－臺灣期刊論文索引系統」。
- 投稿「美星映像館」，請提供相關攝影資料，系列照片三張以下每張以單張計價，三張以上不論張數均以三張計價。
- 本刊文字及圖片，未經同意，不得轉載。

新專欄徵稿中，歡迎投稿！

專欄名稱	性質	說明	投稿字數	投稿圖片
天文教育	天文科普教育	1. 歡迎各級現職及退休教師投稿。 2. 天文教學分享、課程設計等天文教育相關主題。	1,500字以內	3張以內

天文館活動布告欄 七、八月活動訊息

表中所列項目之辦理情形可能依實際狀況調整，以
官網公布資訊為主。

天象直播	英仙座流星雨直播	8/12 (二)																			
夜間觀測室 開放	第二觀測室 〈觀賞星體〉	7/5 (六) 〈月球〉	7/12 (六) 〈關關雙星〉	7/19 (六) 〈華道龍〉	7/26 (六) 〈M6〉	8/2 (六) 〈月球〉	8/9 (六) 〈華道龍7〉	8/16 (六) 〈M7〉	8/30 (六) 〈月球〉												
	第一觀測室 〈特殊天象〉	〈待定〉																			
特展	「遇見歐若菈-追極光科學指南」	10/12 (日)																			
特展活動	特展闖關+VR看極光	7/12 (六)	7/19 (六)	7/26 (六)	8/9 (六)																
	特展親子活動	8/23 (六)	8/24 (日)	8/31 (日)																	
劇場	立體劇場 19:00/19:30 放映免費短片	7/5 (六)	7/12 (六)	7/19 (六)	7/26 (六)	8/2 (六)	8/9 (六)	8/16 (六)	8/30 (六)												
	宇宙劇場新片 「哆啦A夢-宇宙的模型」上映	7/1 (二)																			
	敦親睦鄰影片欣賞	7/21 (一)																			
	宇宙紀事	7/26 (六)																			
館內營隊	暑假國小一、二年級營隊	7/5 (六)	7/6 (日)	7/11 (五)	7/19 (六)	7/20 (日)	7/25 (五)	7/31 (四)	8/1 (五)	8/9 (六)	8/10 (日)										
	暑假國小三、四年級營隊	7/3 (四) 7/4 (五)	7/8 (二) 7/9 (三)	7/12 (六) 7/13 (日)	7/17 (四) 7/18 (五)	7/22 (二) 7/23 (三)	7/26 (六) 7/27 (日)	7/29 (二) 7/30 (三)	8/2 (六) 8/3 (日)	8/5 (二) 8/6 (三)	8/7 (四) 8/8 (五)										
	教師天文營	7/14 (一) 7/16 (三)	7/29 (二) 7/31 (四)																		
	高中天文營	7/17 (四) 7/19 (六)																			
館內活動	星姊姊說故事	7/12 (六)	7/26 (六)	8/9 (六)	8/23 (六)																
	父親節「星座桌遊」	8/8 (五)	8/9 (六)	8/10 (日)																	
	祖父母節活動	8/24 (日)																			
	七夕特別活動	8/29 (五)																			
	七夕音樂會	8/30 (六)																			
戶外營隊	暑假少年天文營	7/1 (二) 7/3 (四)	7/7 (一) 7/9 (三)	7/10 (四) 7/12 (六)	7/22 (二) 7/24 (四)	8/5 (二) 8/7 (四)	8/11 (一) 8/13 (三)	8/19 (二) 8/20 (三)	8/21 (四) 8/22 (五)												
	天地之旅	7/5 (六)	7/6 (日)	7/13 (日)	7/26 (六)	7/27 (日)	8/2 (六)	8/3 (日)	8/9 (六)	8/10 (日)											
	暑假少年墾丁營	7/17 (四) 7/20 (日)	8/14 (四) 8/17 (日)																		
課程與講座	專家演講 〈主題〉 〈演講者〉	7/6 (日) 〈從宇宙塵埃到星球〉 〈李景輝〉																			



薇拉·魯賓天文臺首批影像公開

PUNCH首度直擊太陽爆發影像

人類首次拍攝到太陽南極

「風吹砂」有望突破行星形成的難題

天文學家發現宇宙失落常態物質的龐大細絲狀結構氣體

自學習神經網路破解標誌性黑洞

韋伯望遠鏡發現下「沙雨」的系外行星與沙堡世界

韋伯望遠鏡找到早期再游離幕後推手

飛向土衛六：蜻蜓號將探索生命起源前的化學條件

韋伯拍攝迄今為止最清晰的超大質量星系團深空影像

日冕中的雨滴：自適應光學系統展現了太陽大氣的驚人細節

盛夏不只是欣賞銀河的最佳季節，七、八月也有一連串令人期待的精彩天象登場！這段期間，水星可說是最亮眼的主角，7月4日和8月19日分別發生東大距和西大距，是日落後和日出前觀賞水星的絕佳時機。而在7月3日日落後，還有機會看到水星和鬼宿星團近距離相伴的美麗畫面。

接下來還有重頭戲：8月12日將上演金星合木星，兩顆亮星分別達到-3.9等和-1.9等，隔天凌晨一同升起，在東方天空互相輝映，非常值得一看。

此外，夏季最受矚目的英仙座流星雨也將在8月12日迎來極大期，雖然當晚接近滿月，月光會稍微影響觀賞效果，但它有許多明亮的火流星，仍將是一場精彩的流星雨。而在7月31日，還有另一場寶瓶座 δ 南流星雨登場，這次不受月光干擾，下半夜觀賞條件絕佳，也非常值得期待！



推薦

7/3 水星近掠鬼宿星團

7/4 水星東大距 距角 25.9° ，0.4等

7/4 地球過遠日點 距離1.016644AU



推薦

7/12 金星、畢宿五、畢宿星團群聚

7/29 火星合月 北 1.29°

7/31 寶瓶座 δ 南流星雨極大期 ZHR~25



推薦

8/12 英仙座流星雨極大期 ZHR~100



推薦

8/12 金星合木星
金星-3.9等，木星-1.9等，相距 0.86°

8/19 水星西大距 距角 18.6° ，-0.1等



七、八月天象焦點

7/3 (四)

水星近掠鬼宿星團

7月3日14:02，水星會和鬼宿星團（M44）來到最近的位置，兩者之間的距離只有 1.02° 。當天日落後，在水星沉入地平線前的短暫時間內，只要在遠離光害、西方視野開闊的地點，就有機會用肉眼或雙筒望遠鏡看到這兩個天體緊密相伴的美麗景象。



7/4 (五)

水星東大距

今年會有三次水星東大距，其中第二次將在7月4日12:39發生。水星和太陽的角距達到 25.9° ，亮度約0.4等，是今年三次東大距中距角最大的一次。當天傍晚日落後，在西方低空就可看到這顆最靠近太陽、也最難觀察的行星。如果使用天文望遠鏡，還能看到水星像弦月一樣的盈虧形狀，相當有趣。



7/12 (六) 金星、畢宿五、畢宿星團群聚

7月12日凌晨2:30後，金星將和金牛座的亮星畢宿五，以及畢宿星團一起在東方天空「同框」現身，三者間的角距不到 3° 。這幾天只要天氣良好，用雙筒望遠鏡就能把它們一起收入視野，清楚欣賞畢宿星團的細節，以及這三顆天體相聚的美麗畫面。



8/12 (二) 金星合木星

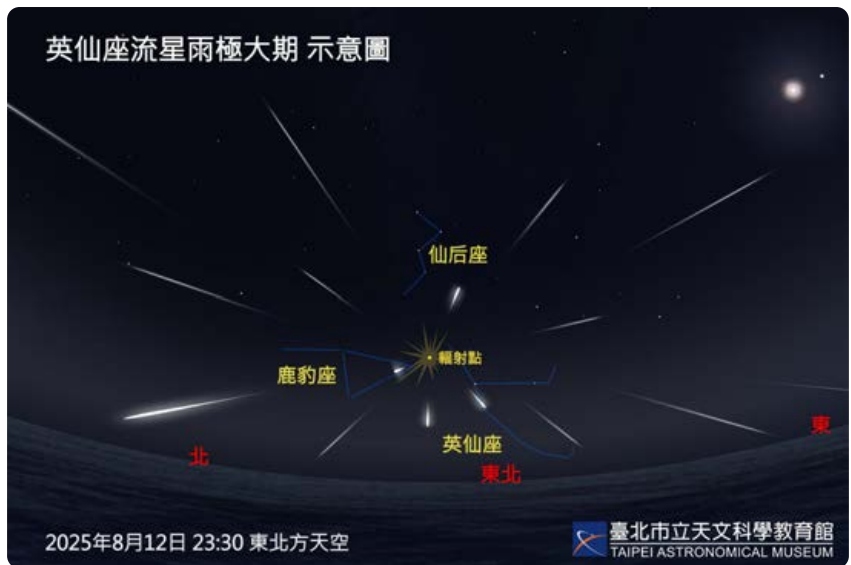
8月12日15:44，金星與木星將達「合」相，兩顆行星相距僅 0.86° ，看起來幾乎貼在一起。當時金星亮度高達-3.9等，木星也有-1.9等，兩者都位在雙子座，隔天凌晨3:00左右一同從東方升起，觀賞條件相當不錯。更棒的是，當天剛好也是英仙座流星雨極大期，有機會同時欣賞到行星相合和流星劃過夜空的壯麗畫面。





8/12 (二) 英仙座流星雨極大期

英仙座流星雨是每年最受矚目的三大流星雨之一，出現時間固定、流星數量穩定，因此廣受喜愛。今年的極大期預計落在8月12日前後，ZHR約為100。不過可惜的是，當晚剛好接近滿月，月光會影響觀察，讓流星數量看起來變少。好消息是，英仙座流星雨常伴隨明亮的火流星，即使在月光下，如果選擇光害少、東北方視野開闊的地方，背對月亮觀察，還是有機會看到許多流星劃過天際。



8/19 (二) 水星西大距

今年共有三次水星西大距，第二次將在8月19日17:48登場，屆時水星和太陽的角距為 18.6° ，亮度-0.1等。只要在日出前抬頭望向東方低空，就能看到明亮的水星。而且更精彩的是，水星、金星、木星和月亮會一同出現在東方天空，沿著地平線向上排成一列，構成一幅難得一見的天文美景。



毛納基峰望遠鏡傾聽恆星「樂章」，揭開古老恆星的秘密

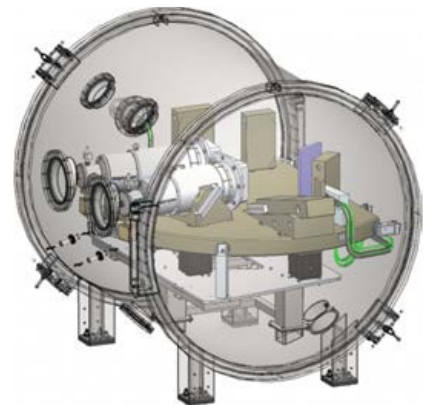
我們仰望星空，那些遙遠的星點似乎亙古不變，靜默無聲。但您可曾想過，恆星其實會「歌唱」嗎？最近，由夏威夷大學天文研究所博士後研究員李亞光主導的天文學家團隊，利用座落於夏威夷聖島毛納基峰，如下方示意圖中的凱克天文臺（Keck Observatory）上最新尖端儀器「凱克行星搜尋器（Keck Planet Finder）」，如右下方的附圖，成功捕捉到鄰近恆星的「歌聲」，並揭示了關於恆星內部結構與老化過程的重要線索。這不僅挑戰了我們對恆星的理解，也為探索外星生命鋪平了道路。

文／林建爭



在上方示意圖中，由凱克天文臺兩座口徑10公尺的望遠鏡收集星光後，分別進入右圖的凱克行星搜尋器。此儀器被封閉在直徑1.96公尺，長度2.6公尺的真空腔室中。上方影像來源：W. M. Keck Observatory、右方圖片來源：<https://exoplanets.caltech.edu/kpf/>

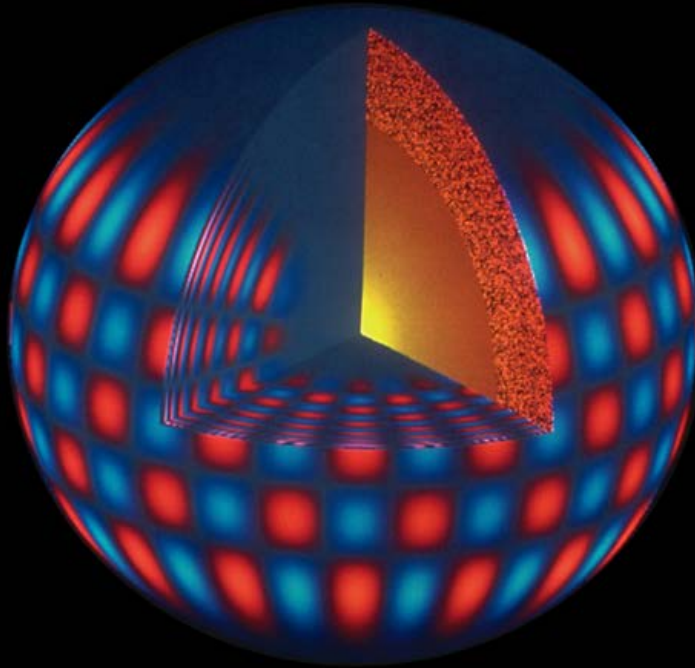
凱克行星搜尋器



天文學其中一門迷人的研究領域被稱為「星震學」(Asteroseismology)，顧名思義，就是研究恆星的「地震」。就像樂器會因振動而發出獨特的聲音一樣，恆星內部也充滿了波動，產生了猶如其獨特「歌聲」的頻率。天文學家透過精密儀器捕捉這些振動，就像醫生

透過聽診器聽心跳一樣，我們也能透過儀器「聽」出恆星的內部結構。這些震動頻率反映了恆星的大小、密度、組成與年齡。比方說，恆星的「心跳速度」會隨年齡增長而減慢。因此，星震學就像一把「宇宙年齡計」，幫助我們測定恆星的生命階段，如圖1、圖2。

圖 1



如同地球物理學家透過地震波探索地球內部結構，天文學家也透過在太陽與其他恆星中，不同區域、頻率聲波的傳播速度差異推算恆星內部的性質與結構分布。由於聲波傳播速度會因氣體溫度與密度變化而改變，因此造成恆星表面亮度的些微變化。天文學家藉由這些亮度變化數據進行電腦模擬，即可推算出恆星的質量、半徑與年齡等性質。

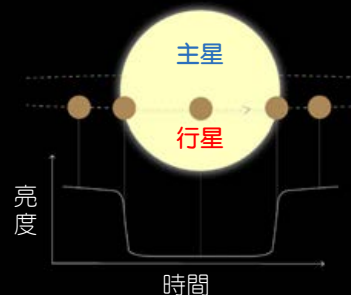
已知恆星內存在兩類聲波：壓力模式 (p-modes) 與重力模式 (g-modes)。前者源自氣體的向內與向外脈動，後者則與橫向位移有關，類似海洋表面的波浪。有些恆星兼具兩種模式，甚至可產生耦合波動。利用壓力模式聲波的變化，例如：上圖中顯示因太陽的壓力模式聲波所產生的都卜勒效應，向內部移動處為紅色，向外部移動處為藍色，藉此可計算出恆星尺寸與內部密度分布，進而推算其質量與年齡。重力模式則較為複雜，可用於研究恆星核心的自轉，並已成功應用於老年紅巨星與年輕藍巨星的年齡估算。圖片來源：NSF/NOIRLab

星震學對系外行星研究亦具關鍵價值。首先，它可精確測定行星系統中主星的半徑，進而準確計算通過法所觀測行星的大小。其次，星震學是唯一可提供恆星精確年齡的方法，有助於判斷行星系統的演化階段與可居住性。最後，精確估算主星質量，亦能提升推算行星質量時的準確度，進一步判斷是否為類地或氣態行星，如右圖。圖片來源：ESA

圖 2

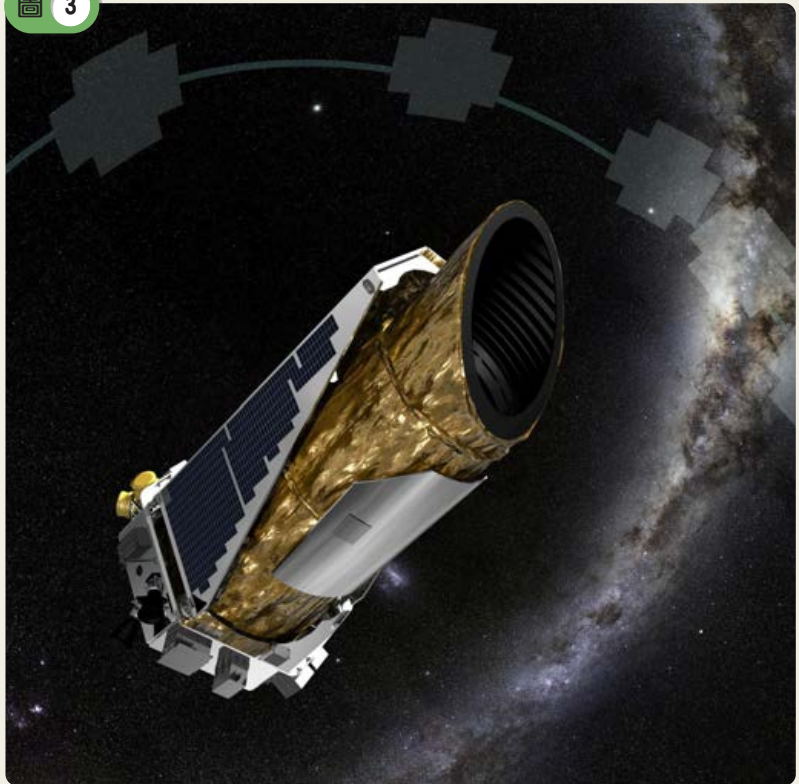
尋找系外行星的方法：凌日法

藉由測量行星凌日或恆星時的亮度變化搜尋系外行星，若能獲得精確的主星質量、半徑數據，就能準確推算出行星質量。



過去，星震學的研究大多集中在比太陽更熱、更活躍的恆星上，天文學家主要仰賴像克卜勒（Kepler），如圖3，和凌日系外行星巡天衛星（TESS），如圖4，等太空望遠鏡觀測恆星亮度的微小變化。但這種方法在面對表面溫度較冷偏橙色的恆星時效果有限。這些恆星震動幅度小、亮度變化微弱，常被視為「太安靜」而無法研究。

圖 3



克卜勒太空望遠鏡（Kepler Space Telescope）是美國太空總署設計來搜尋其他恆星系統中的類地行星的望遠鏡。在九年多的時間中，觀測並分析了10萬顆恆星的光度，並藉由恆星光度變化，檢測是否有行星凌恆星的現象。圖片來源：NASA

圖 4

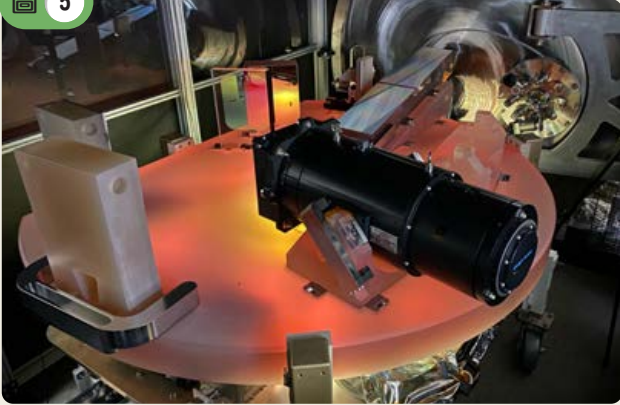


凌日系外行星巡天衛星的主要任務，是用於在比克卜勒太空望遠鏡觀測區域大400倍的天區內，搜尋地球附近300光年內的恆星是否存在行星。凌日系外行星巡天衛星主要是搜尋類地行星，包括其主星的適居帶範圍、行星的質量、大小、密度及軌道。凌日系外行星巡天衛星觀測過後，會將數據提供給韋伯太空望遠鏡，或是保存以備提供給其他未來的太空或地面望遠鏡，作為進一步挑選觀測目標的參考。圖片來源：NASA

這時，凱克行星搜尋器大顯神威，它是一台超高精度的光譜儀，能測量恆星表面朝向或遠離我們的速度變化，準確度甚至達到每秒幾十公分，相當於在觀測距離超過20光年的恆星上，偵測到像人類

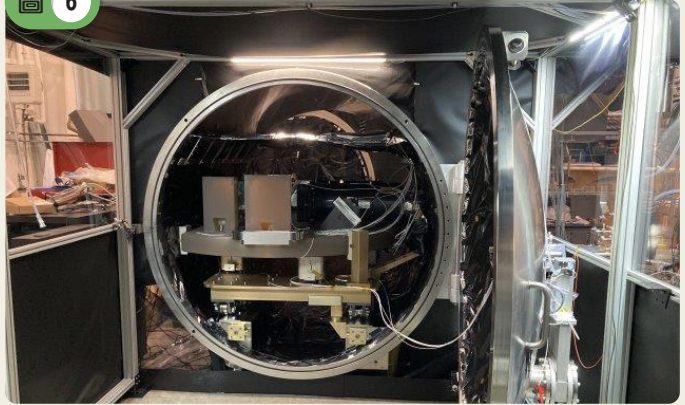
心跳一樣微弱的節奏。這台安裝在毛納基峰的凱克天文臺上的斬新儀器，於2021年設計完工，2022年底在凱克天文臺上測試並於隔年投入科學觀測使用如圖5～圖7。

圖 5



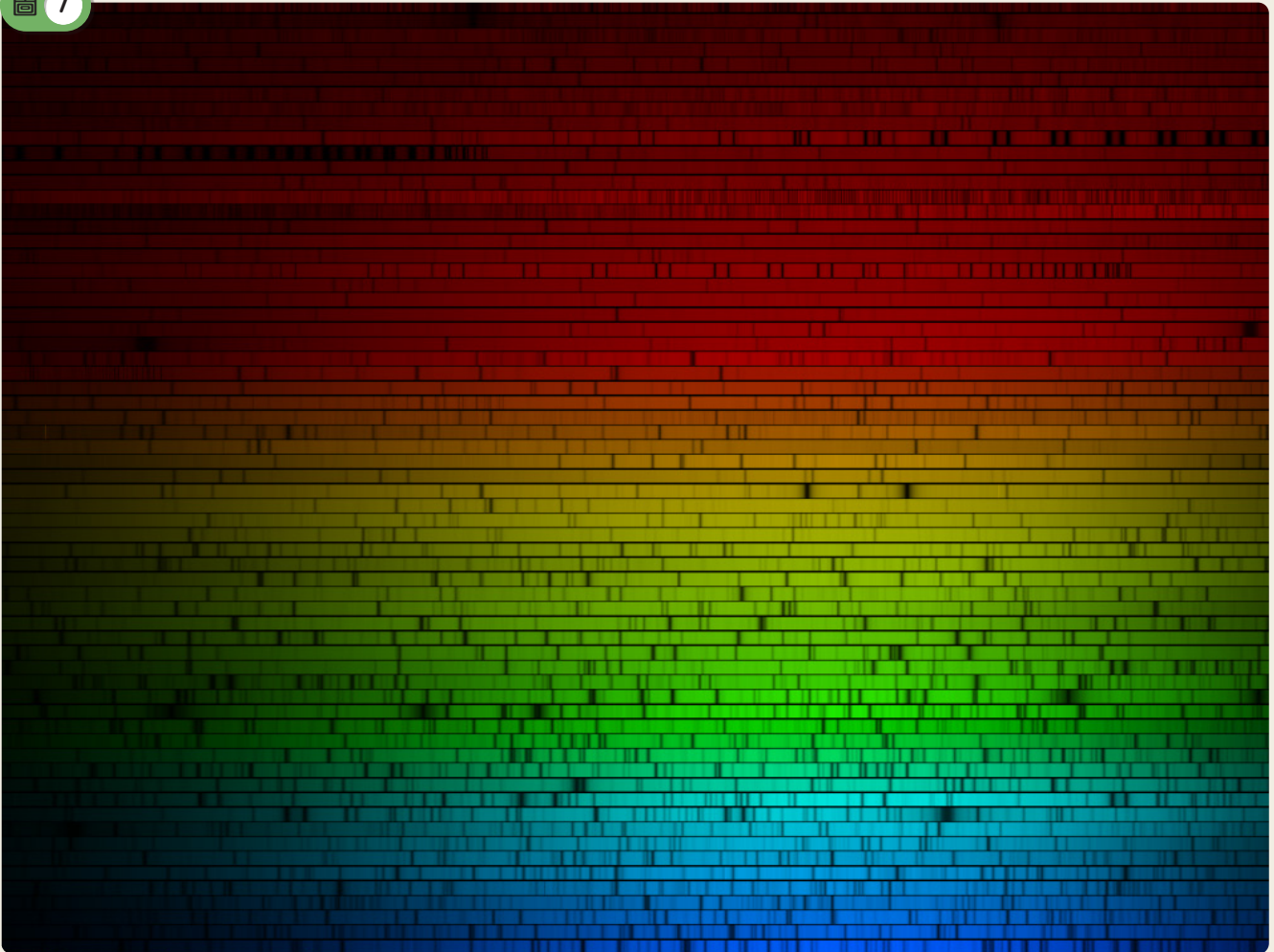
凱克行星搜尋器的內部構造。影像來源：<https://www2.keck.hawaii.edu/inst/kpf/>

圖 6



放置於真空腔室中的凱克行星搜尋器。影像來源：UC Berkeley Space Sciences Laboratory

圖 7



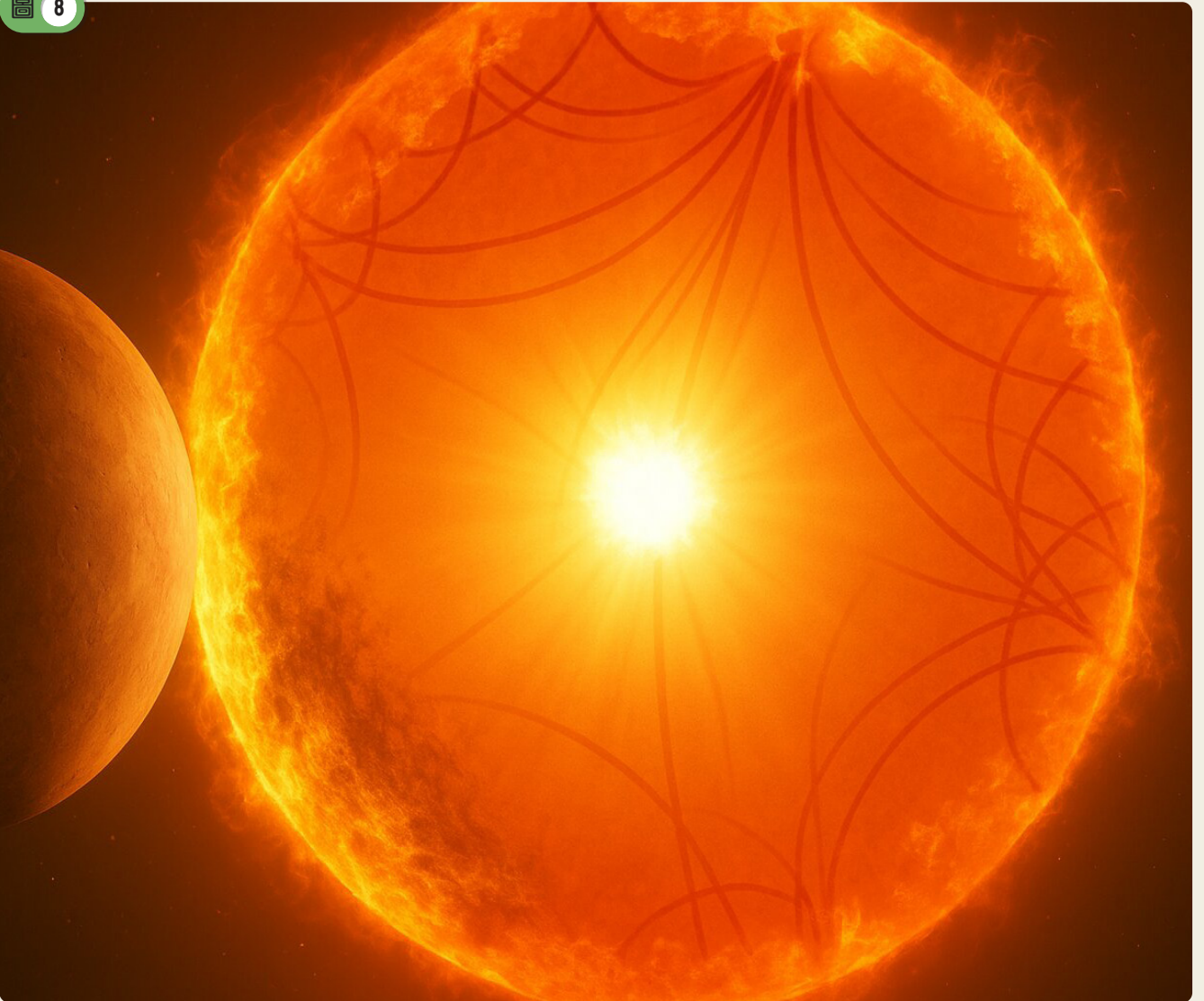
凱克行星搜尋器首次使用時所拍攝的木星光譜，此儀器能藉由都卜勒效應準確測量恆星表面朝向或遠離我們的速度變化，並藉此計算出精確的恆星半徑。影像來源：W. M. Keck Observatory

這次研究的主角恆星HD 219134，如圖8，是一顆距離地球僅21光年的橙矮星，位於仙后座，肉眼可見。它的溫度比太陽低，也更古老。雖然它不像大質量恆星那樣明亮活躍，但它卻擁有六顆行星，其中有四顆是類似地球的岩石行星。該研究團隊在連續四個夜晚，使用凱克行星搜尋器對HD 219134進行了超過2000次的超精確速度測量，最終成功「聽見」這顆恆星的振動頻率，也就是它的「星震」訊號。這是首次有儀器能如此精準地捕捉冷恆星的內部震動，為星震學開啓了全新篇章。

分析這些「星震」數據後，團隊有了驚人的發現：

古老的「宇宙時鐘」：HD 219134的年齡高達102億年，是我們太陽年齡（約46億年）的兩倍多！這使其成為利用星震學測定年齡的最古老主序星之一。此外，研究還發現該恆星的自轉週期約為42天，這項發現為恆星如何隨時間老化提供了關鍵線索，李博士形容這如同「為恆星時鐘找到了一個失傳已久的音叉，提供了一個重要的參考點來校正恆星數十億年來的自轉速度。」。

圖 8

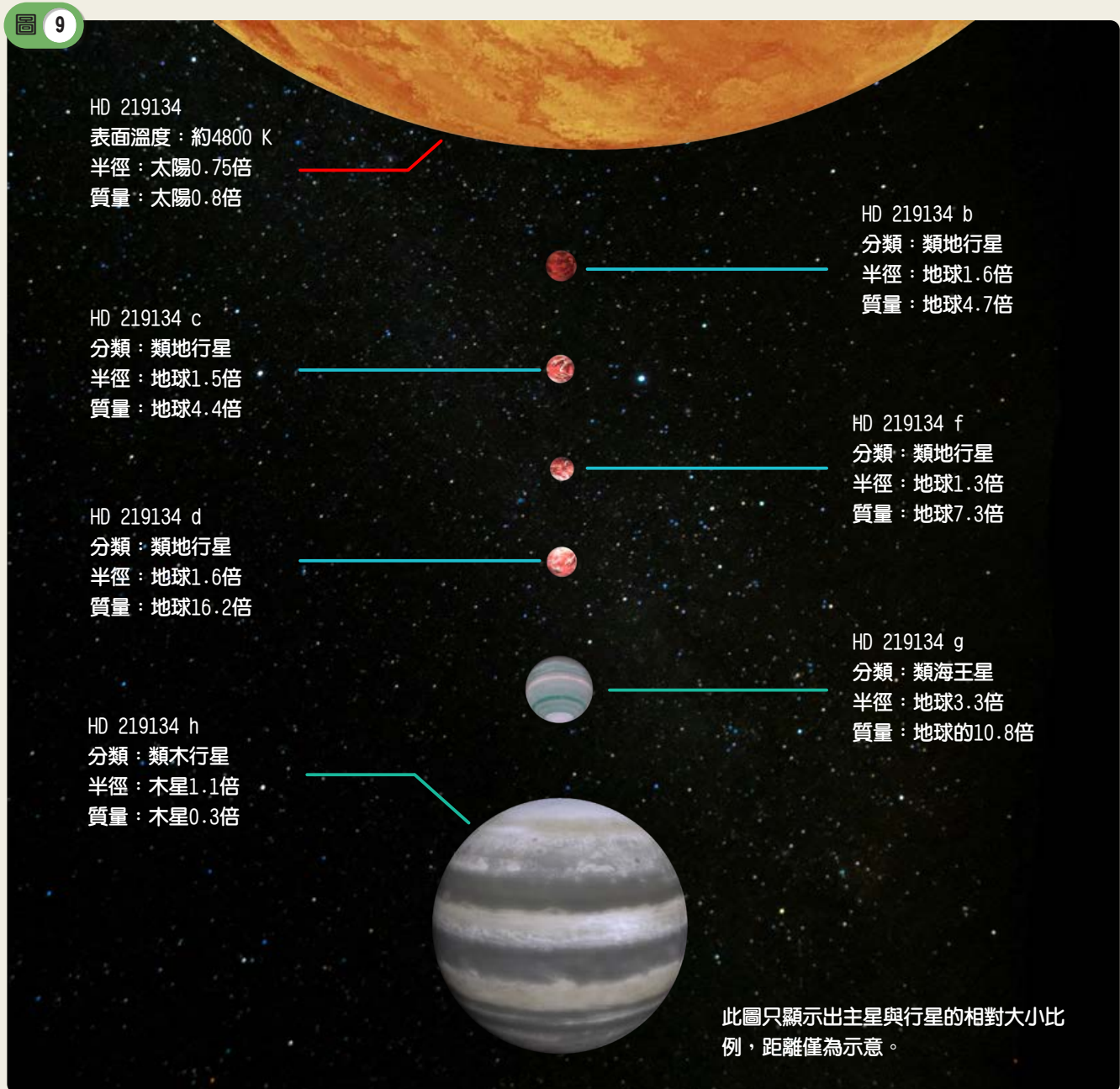


HD 219134的內部構造想像圖。恆星內部的聲波被用來測量它的年齡、大小以及圍繞該恆星運行的行星的特徵。圖片來源：Gabriel Perez Diaz/Instituto de Astrofísica de Canarias/W. M. Keck Observatory

意想不到的「身材之謎」：令人驚訝的是，星震學的測量結果顯示，HD 219134的質量約為太陽的0.8倍，半徑約為太陽的0.75倍，比預期要小一些、更為緊湊。這與使用其他望遠鏡和方法測得的結果（半徑約大4%左右）有所出入，對現行的恆星模型，尤其是關於像HD 219134這樣較冷恆星的模型，提出了新的挑戰。

解開HD 219134的秘密尤為重要，因為它並非孤單存在。已知這顆古老的恆星至少擁有六顆

行星，其中包括四顆可能是岩石構成的「超級地球」，如圖9。精確了解主恆星的年齡、大小和特性，對於研究其行星系統的演化、以及評估這些系外行星是否可能孕育生命至關重要。正如研究共同作者、夏威夷大學天文研究所的天文學家Daniel Huber所說：「當我們在其他行星上發現生命時，我們會想知道那個生命有多古老。」換句話說，了解恆星，才能認識行星，也才能回答宇宙中是否有生命的終極問題。



恆星HD 219134與其行星系統示意圖，包含1顆光譜分類為K型的恆星，以及4顆岩石質的類地行星、1顆氣態的類海王星、1顆氣態的類木恆星。恆星與各行星的圖片來源：NASA、資訊圖表來源：編輯部製作

這項研究再次凸顯了毛納基峰在全球天文界的重要地位，毛納基峰是夏威夷最高峰，海拔超過4,200公尺，擁有乾燥、穩定且無光害的大氣條件，是理想的天文觀測地點，如圖10。然而，這座山峰也是夏威夷原住民心中的神聖之地。因此，科學家與社群間持續對話，努力在追求知識與尊重文化之間取得平衡。夏威夷大學也持續與當地社區合作，推動具有在地文化意識的科學教育與研究。

凱克行星搜尋器的強大能力，為研究那些曾經被認為過於「安靜」而難以探測的恆星內部打開了一扇新的窗戶。這項研究不僅加深了我們對恆星物理學的理解，也為未來尋找太陽系外的宜居世界鋪平了道路。每一次從毛納基峰上傳來的宇宙「新樂章」，都讓我們對浩瀚宇宙的奧秘有了更深一層的認識。

林建爭：美國夏威夷大學天文研所泛星計畫博士後研究員
王品方校稿：美國夏威夷專案文物修復師

參考資料：

<https://www.hawaii.edu/news/2025/05/06/maunakea-telescope-tunes-into-music-of-nearby-star/>

<https://www2.keck.hawaii.edu/inst/kpf/>

YouTube 相關影片：

UH astronomers tune into music of nearby star

<https://www.youtube.com/watch?v=KpEaDt7Ohlw>

Asteroseismology: How to Explore Stars with Sound

<https://www.youtube.com/watch?v=2XDwnZKPrmM>

How do you measure the age of a star? | Science News

https://www.youtube.com/watch?v=w80z_moI8BU

圖 10



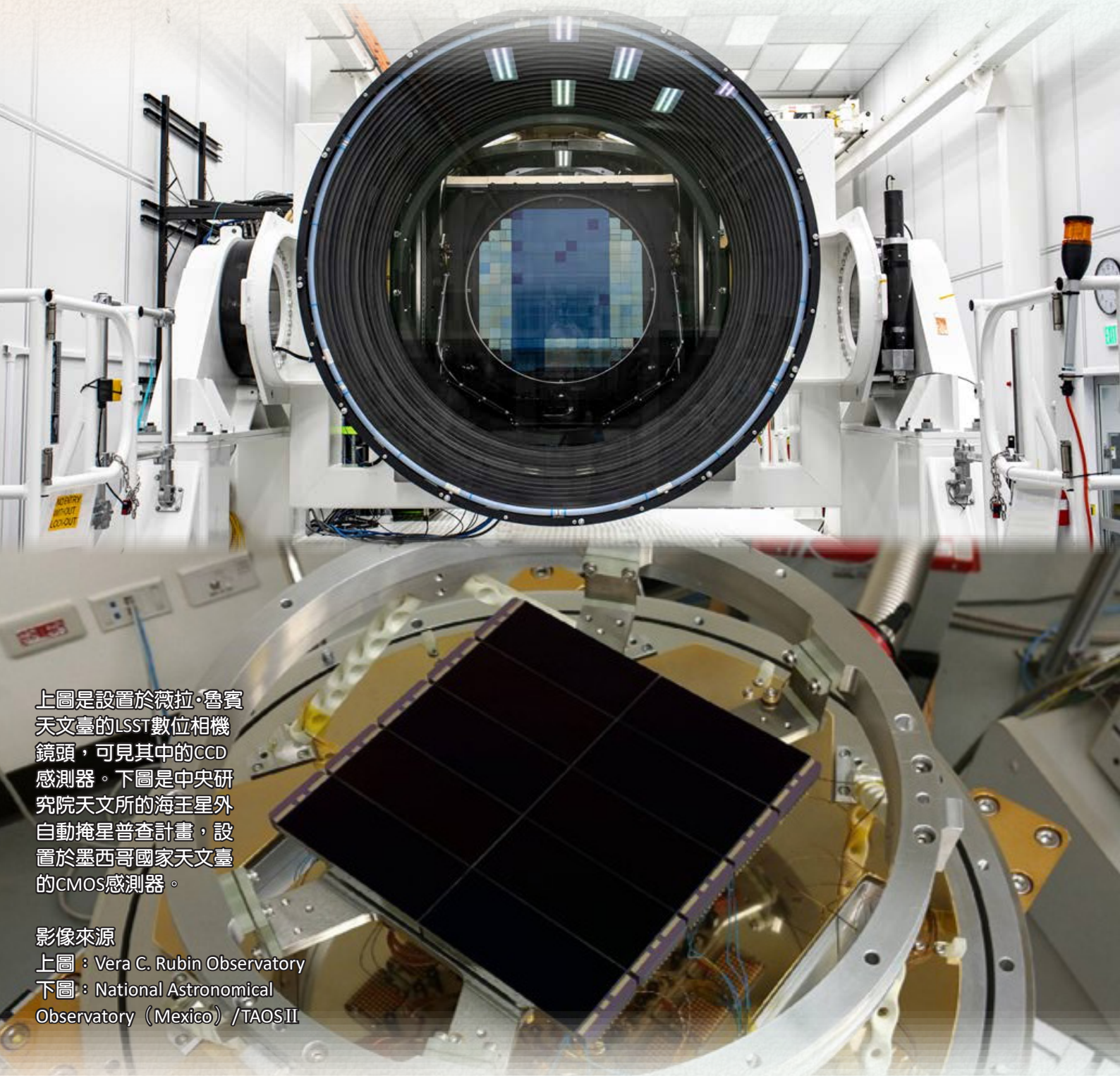
毛納基峰上的天文臺。影像來源：Maunakea Observatories

觀測裡的光電效應

CCD、CMOS的天文觀測發展史與未來展望

自古以來人類便對夜空充滿好奇，天文觀測技術的不斷發展一直在改變我們對宇宙的理解。從肉眼觀星到望遠鏡的發明，從照相底片到電子影像感測器的運用，其中電荷耦合元件（CCD）與互補性金屬氧化物半導體（CMOS）感測器更是在20世紀末徹底改變了天文觀測方式，將光（光子）轉換為電訊號（電子）再儲存成數位資訊，迎來了數位天文的新時代。

文／林宏欽



上圖是設置於薇拉·魯賓天文臺的LSST數位相機鏡頭，可見其中的CCD感測器。下圖是中央研究院天文所的海王星外自動掩星普查計畫，設置於墨西哥國家天文臺的CMOS感測器。

影像來源

上圖：Vera C. Rubin Observatory

下圖：National Astronomical Observatory (Mexico) /TAOS II

CCD與CMOS原理都是基於光電效應（photoelectric effect），即光照射到某些金屬表面激發出電子，愛因斯坦便是以光電效應獲得1921年諾貝爾物理學獎，而非著名的相對論！

早期天文觀測

早期人類以裸眼觀測，使用繪圖、文字及簡單的觀測工具（如日晷、星盤）來記錄星象與曆法。1609年伽利略使用自製望遠鏡觀測月球、木星的衛星、金星的相位，開創現代天文學的先河。

19世紀中期，照相術出現，開展出天文攝影，照相底片能夠精確記錄天象，且長時間曝光使記錄暗弱天體成為可能。但仍有靈敏度低、反應慢、需化學顯影過程、無法即時分析等缺點。此外，底片的量化能力有限，影像動態範圍小，資料重複性差，使得科學分析受到限制，如圖1。

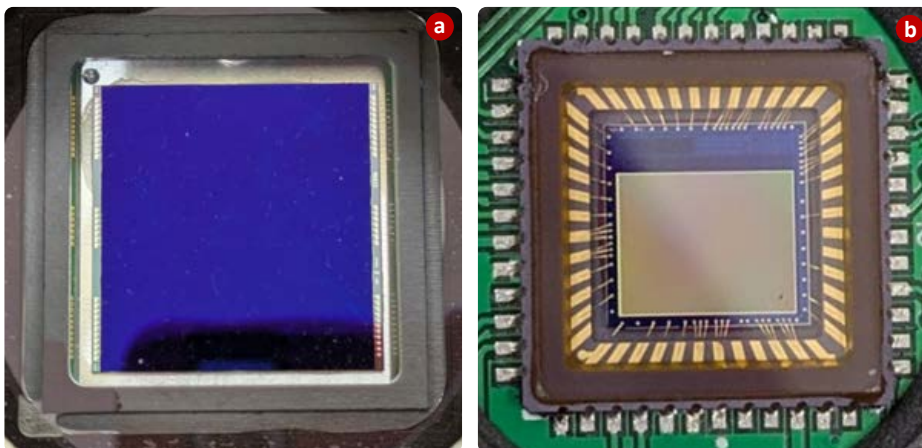
到了20世紀中期，隨著電子技術的進步，更為靈敏、可即時處理的CCD和CMOS感測器技術發展，取代了傳統底片，對攝影技術帶來革命，如圖2。數位形式的影像處理及傳播非常迅速便利，透過網絡可瞬間傳送全球，同時也帶動新的科學研究模式。

圖 1



照相術出現後，早期使用感光玻璃作為底片，亦為當時天文研究拍攝記錄所用。此張拍攝蜘蛛星雲的玻璃底片，由中央研究院天文研究所朱有花教授所提供。影像來源：朱有花 攝影

圖 2



a CCD和 **b** CMOS感測器外觀看起來十分類似，但技術架構完全不同。影像來源：林宏欽 攝影

CCD的誕生與崛起

CCD由Willard S. Boyle和George E. Smith於1969年發明，原本設計用途為記憶體，但很快便被發現具有優異的影像感測能力。兩位發明者也因此與光纖之父高錕共同獲得2009年諾貝爾物理獎。CCD利用光電效應，將進入感光元件的光子轉換為電子，並將每個像素的電子依序一一傳送到讀出端，進而轉為數位訊號，如圖3、圖4。其主要優點包括：

- ①**高靈敏度**：能捕捉極微弱的光源。
- ②**低雜訊**：適合長時間曝光與高精度測量。
- ③**良好的量子效率**：對不同波長的光都有很高的響應。
- ④**高動態範圍**：可記錄明暗差異大的天體。

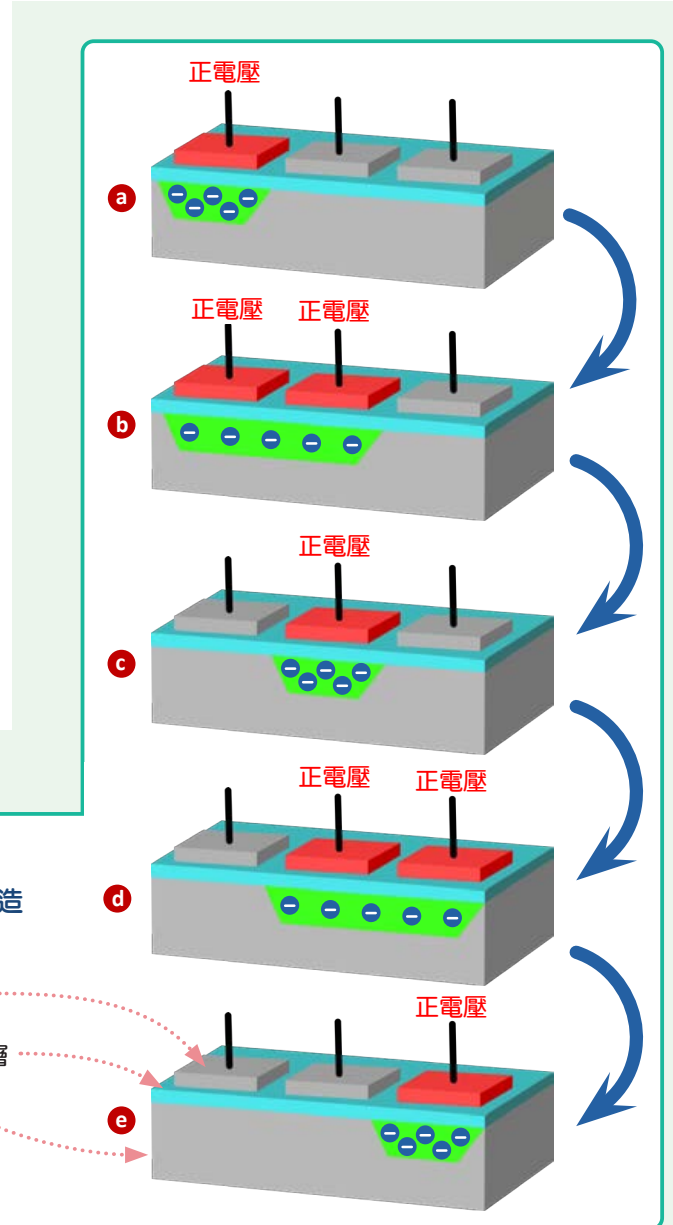


圖 3

CCD感測器的構造

CCD如何傳遞電子訊號的圖解

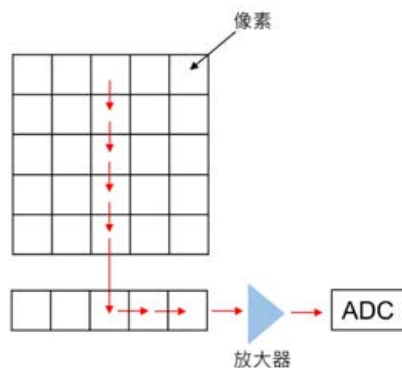
藉由圖3中 a 至 e 的運作方式，按照步驟在CCD元件上施予正電壓，讓下方綠色標示處所產生電位并移動，就能將每個元件所產生的電子訊號依序傳遞出去。圖片來源：編輯部繪製

圖 4

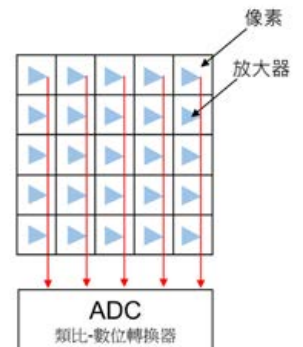
CCD與CMOS傳遞電子訊號方式的差異圖解

這兩種感光元件的主要區別在於其技術架構。在CCD感光元件中，電荷會在像素內逐行或逐列移動最後讀出；而CMOS感光元件則是直接讀出每一像素。圖片來源：作者提供

CCD



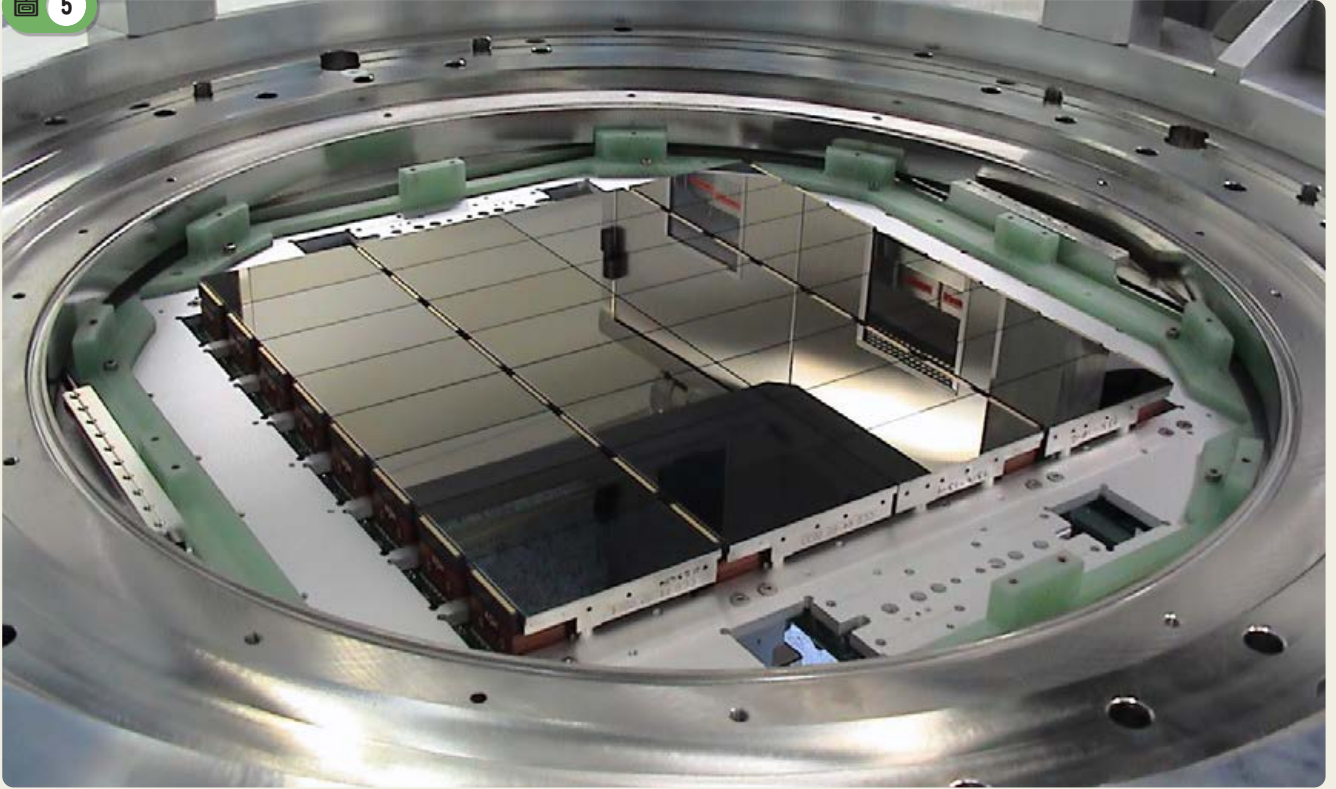
CMOS



自1970年代起，CCD迅速被應用於專業天文觀測，冷卻技術有效降低熱雜訊，使CCD在低光環境中能精確成像，顯示出遠高於底片的靈敏度與解析度。此後，全球各大天文臺陸續將CCD作為主力感測器。

隨著製程進步，CCD的像素數量與尺寸持續提升，背照式 (back-illuminated) CCD的發展提升了量子效率，除了在近紫外與可見光波段表現卓越，並進一步拓展到近紅外波段 (0.7至1.0 μm)，如圖5~圖6。

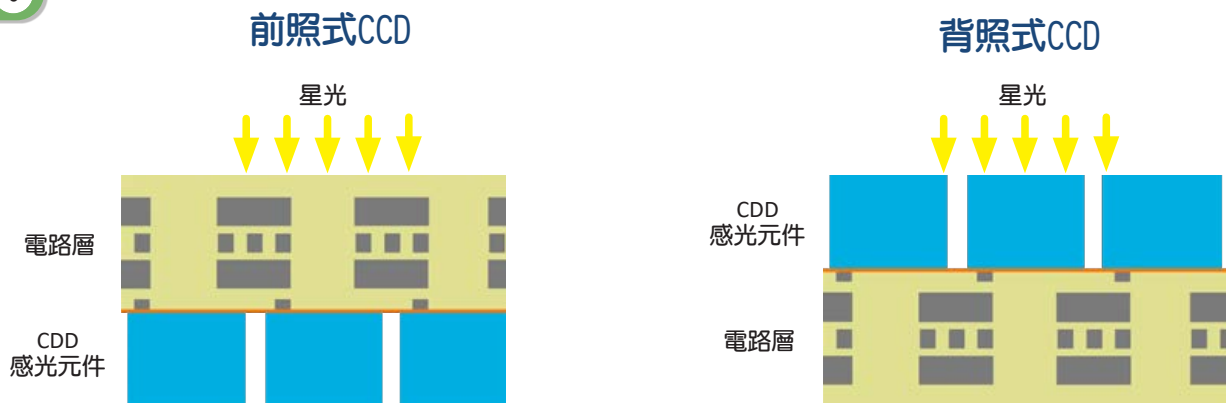
圖 5



帕瑞納天文臺 (Paranal Observatory) 的甚大巡天望遠鏡 (The VLT Survey Telescope)，配置了包含32個背照式CCD感測模組的數位感測器，能夠單次拍攝包含2.68億個像素的影像。OmegaCAM相機是由荷蘭、德國與義大利的聯合團隊設計與建造，歐洲南方天文臺 (ESO) 也作出了重要貢獻。影像來源：ESO/Paranal Observatory

前照式與背照式CCD的構造比較圖解

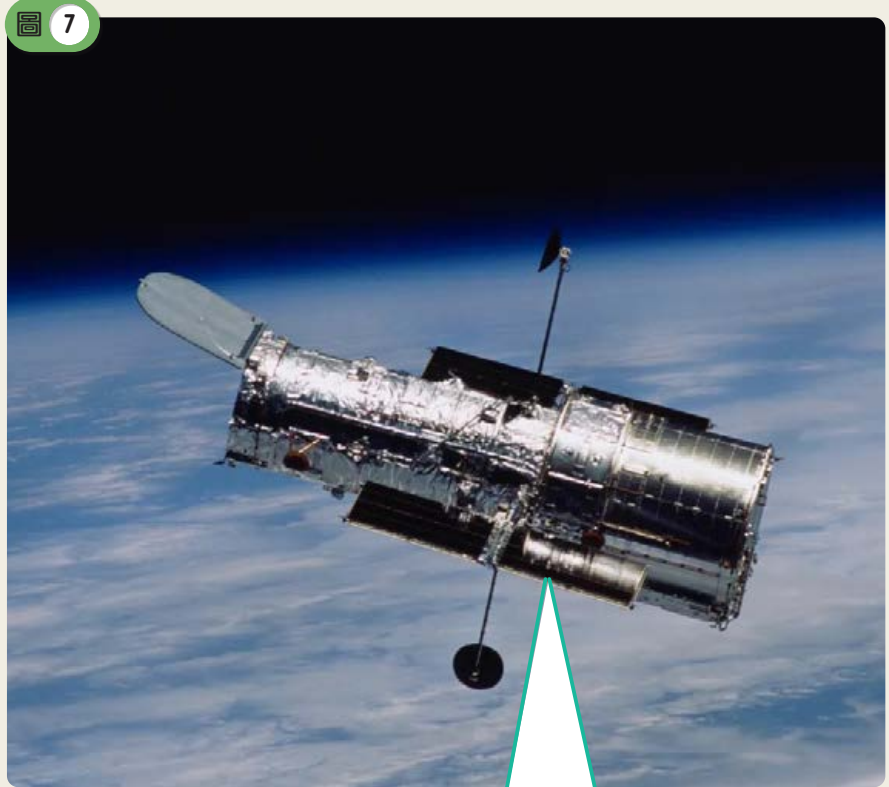
圖 6



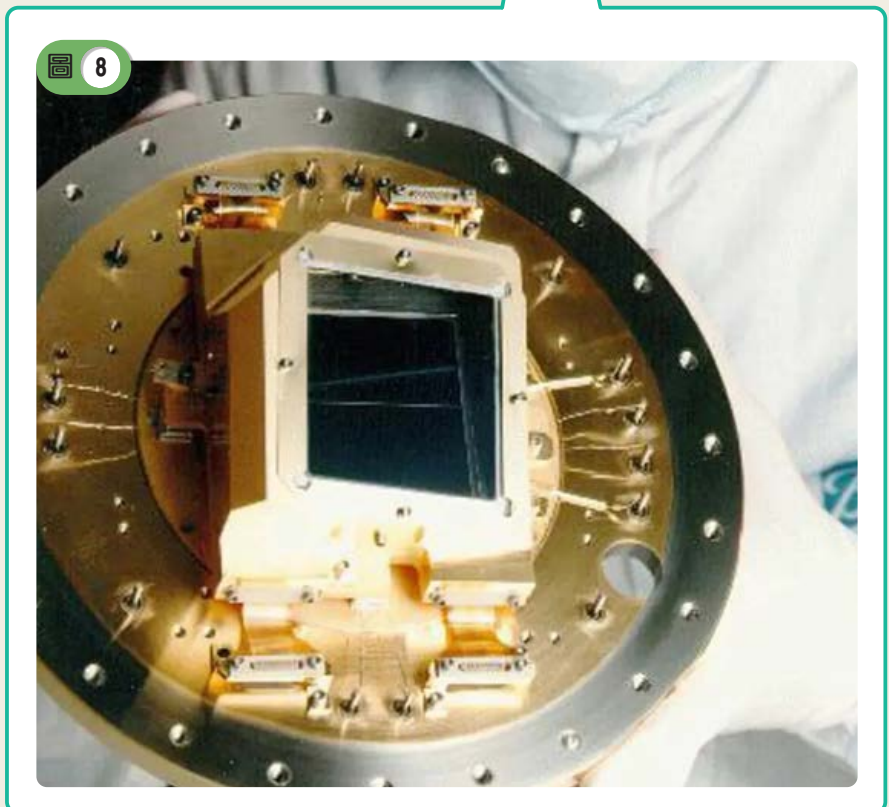
此示意圖說明，前照式CCD和背照式CCD構造上的差異。前照式因電路層中的電路遮擋星光，所以感光效率較低。背照式因電路在感光元件後面所以感光效率較高。圖片來源：編輯部繪製

對要求極端低雜訊、極高光度準確性，CCD仍在主相機與長時間深空觀測中保持主流地位。例如：

①哈伯太空望遠鏡 (Hubble Space Telescope)：如圖7，自1990年起搭載多代高解析CCD相機，如圖8，(如WFPC2、ACS、WFC3)，太空望遠鏡可避免地球大氣干擾，拍攝出無數前所未有震撼人心的宇宙圖像。



哈伯望遠鏡是人類首次將望遠鏡設置在太空的望遠鏡，也是首座採用CCD作為感光裝置的太空望遠鏡。影像來源：NASA

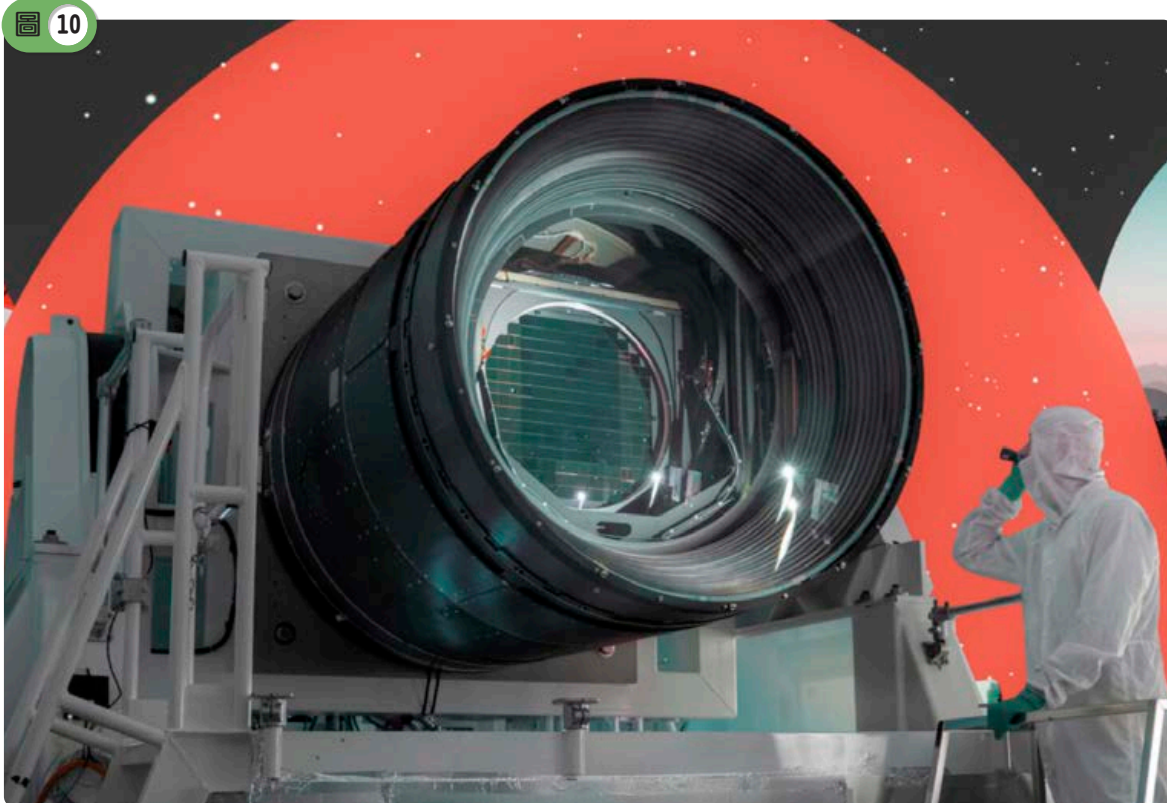


②薇拉·魯賓天文臺（Vera C. Rubin Observatory）：8.4米超廣角望遠鏡搭載世界最大的32億像素CCD相機，每幾晚就可掃描整個南半球天區。LSST計畫旨在研究暗能量和暗物質，以及太陽系天體、時域天文和銀河系等重要課題，如圖9、圖10。

③各類小行星與彗星發現：CCD的高靈敏度使得天文學家能夠發現更多暗弱天體，例如，鹿林天文臺在2003-2009年間發現800多顆小行星。



薇拉·魯賓天文臺配置了8.4米超廣角望遠鏡，搭配LSST相機，從鏡頭前方就可以直接看到CCD，共有32億像素，是目前全球最大，像素最多的天文專用數位相機。影像來源：圖9-陳文屏攝影、圖10-Vera C. Rubin Observatory



CMOS的崛起

1963年快捷半導體的Frank Wanlass和C. T. Sah發明了互補式金屬氧化物半導體電路（CMOS）。由於CMOS每個像素皆具有自己的放大與讀出電路，因此可以進行高速讀取與即時影像顯示。早期CMOS存在雜訊大、靈敏度低的問題，現代CMOS技術已經大幅進化，提供成本優勢、低功耗和更快的信號處理能力，使其廣泛應用於數位攝影與影像設備，現在人手一機的手機和數位相機都是使用CMOS感測器。其主要優點包括：

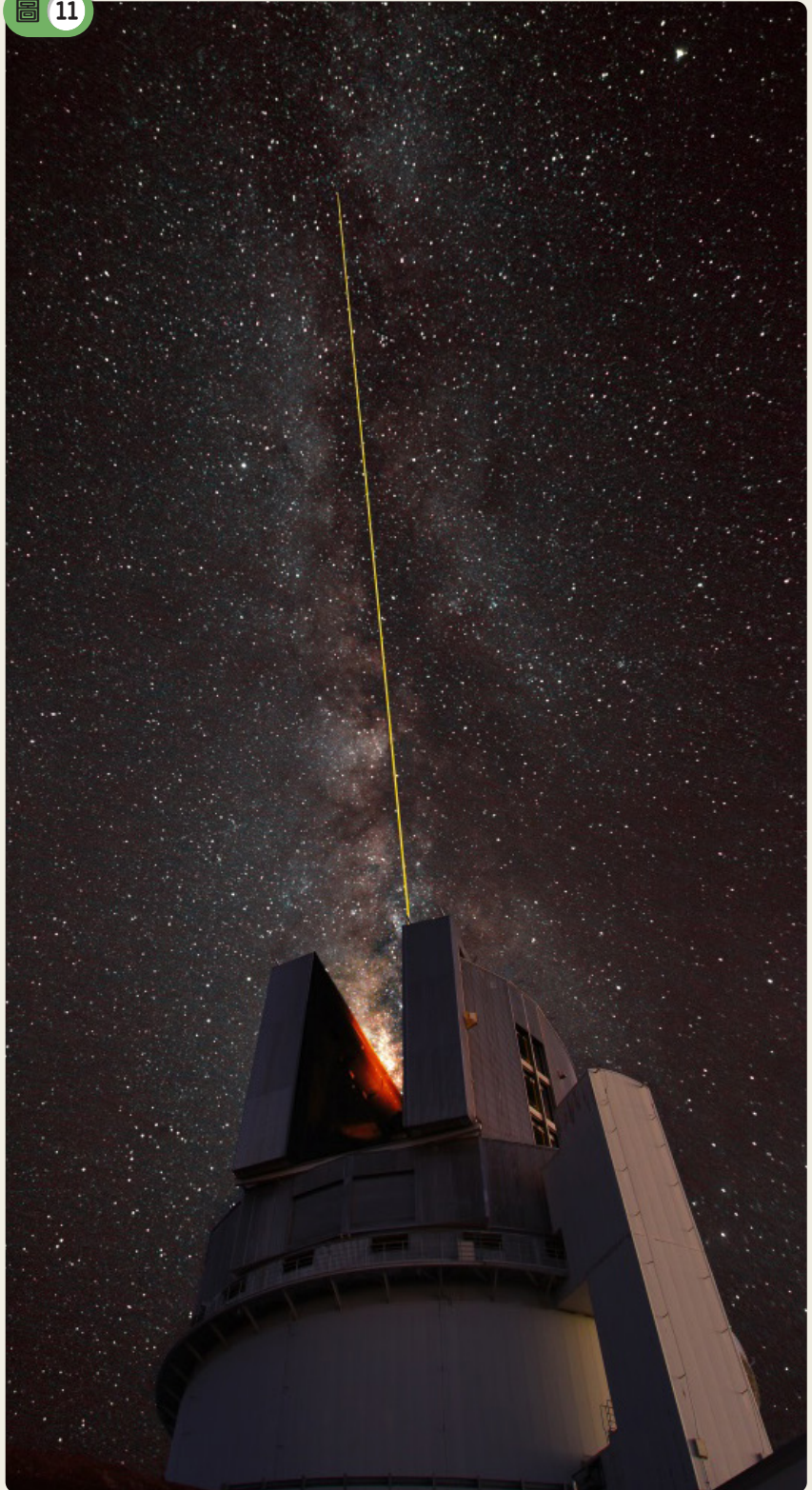
- ①**低功耗**：適合太空任務、手機等移動設備。
- ②**高速讀出**：可支援高幀率拍攝，有助於行星影像與快速事件捕捉。
- ③**低成本、大量製造**：有利於普及與應用推廣。
- ④**電子快門與HDR功能**：無須機械快門，可更好地捕捉高反差天體。

近十年來，CMOS感測器在設計與製造上有重大突破，在天文界逐步獲得重視，從業餘天文攝影開始，隨著CMOS成本下降與影像處理技術普及，業餘天文愛好者與教育機構將更容易取得高品質影像設備。這將促進更多公眾參與天文觀測與公民科學（Citizen Science）的發展，也可協助專業天文學家進行大規模資料收集與分析。

專業天文領域方面，隨著科技進步，科學級CMOS（sCMOS）的性能逐漸逼近，甚至在某些方面超

越CCD。儘管傳統大望遠鏡長期以使用CCD為主，越來越多新一代望遠鏡系統開始整合CMOS技術，尤其是在快速導星系統與自適應光學系統的波前感測器（Wavefront Sensors）等即時、機動觀測應用，如圖11。

圖 11

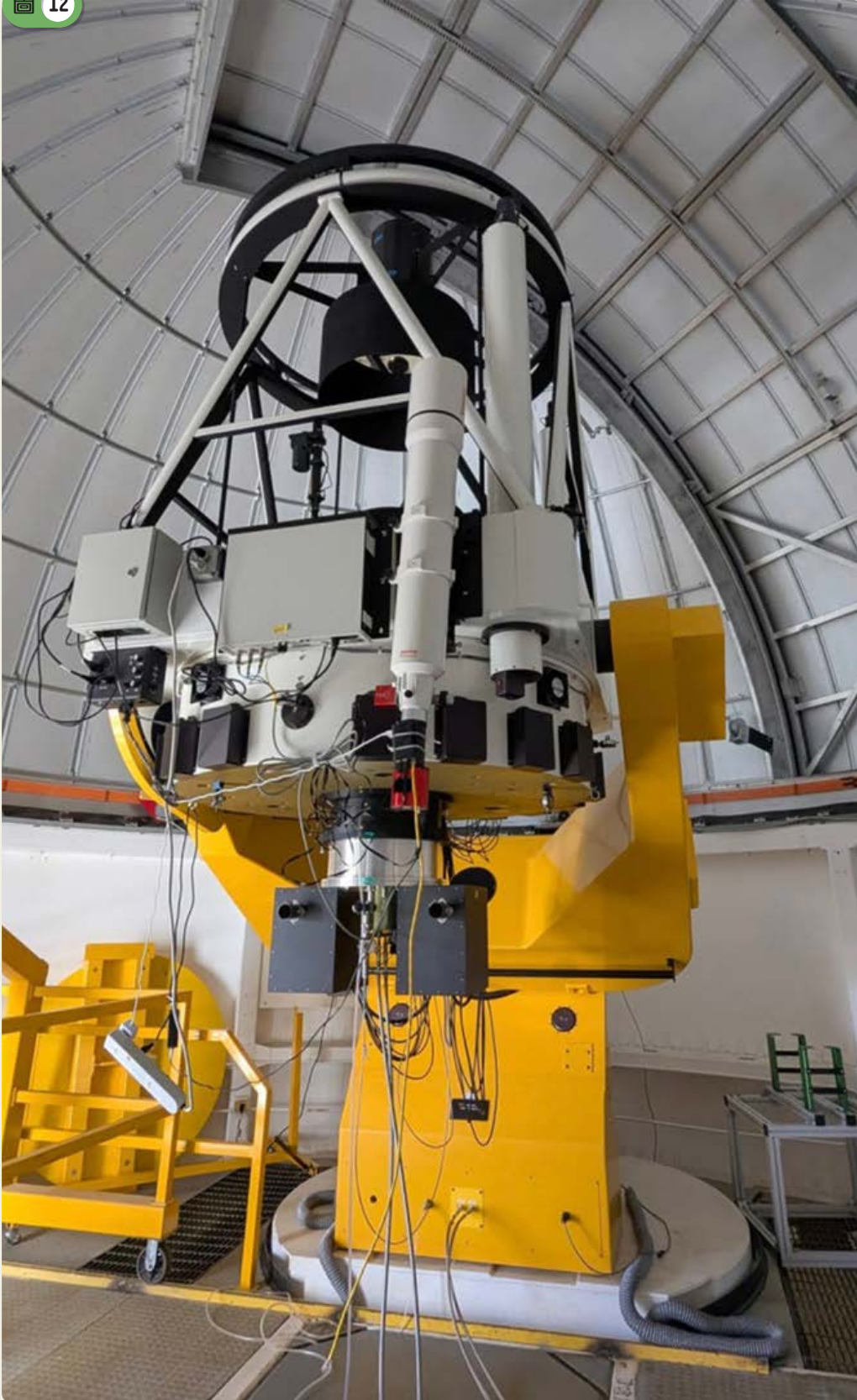


開啟自適應光學系統的昴星團望遠鏡，其中接受大氣反射雷射光的波前感測器，就是使用反應速度快的sCMOS作為感光元件。影像來源：日本國立天文臺（NAOJ）

值得一提的是中研院天文所的TAOS II海王星外自動掩星普查計劃（Transneptunian Automated Occultation Survey）使用三架口徑1.3公尺的全自動望遠鏡，主相

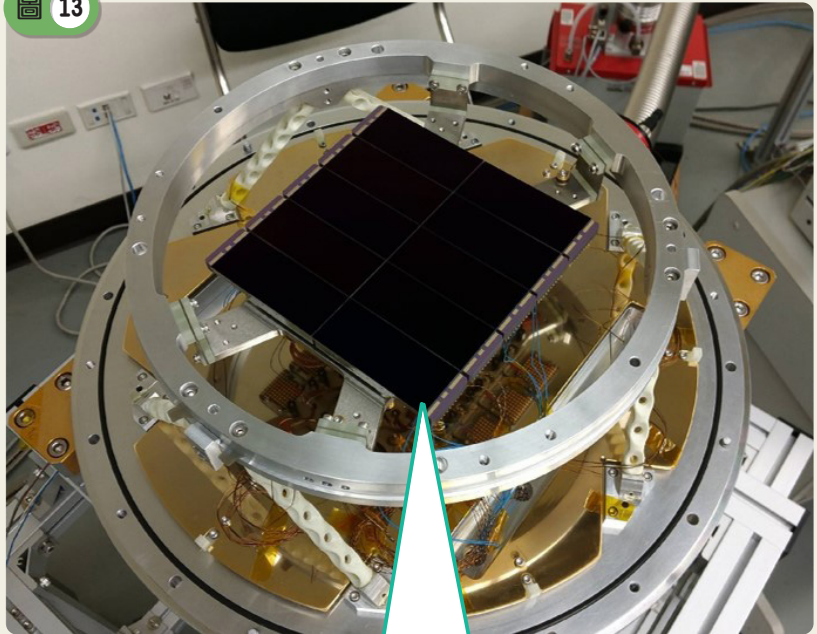
機配置高速連拍的CMOS，可偵測亮度微小、快速變化的掩星事件，來量測海王星外天體（Trans-Neptunian Objects）的大小分布，如圖12~14。

圖 12



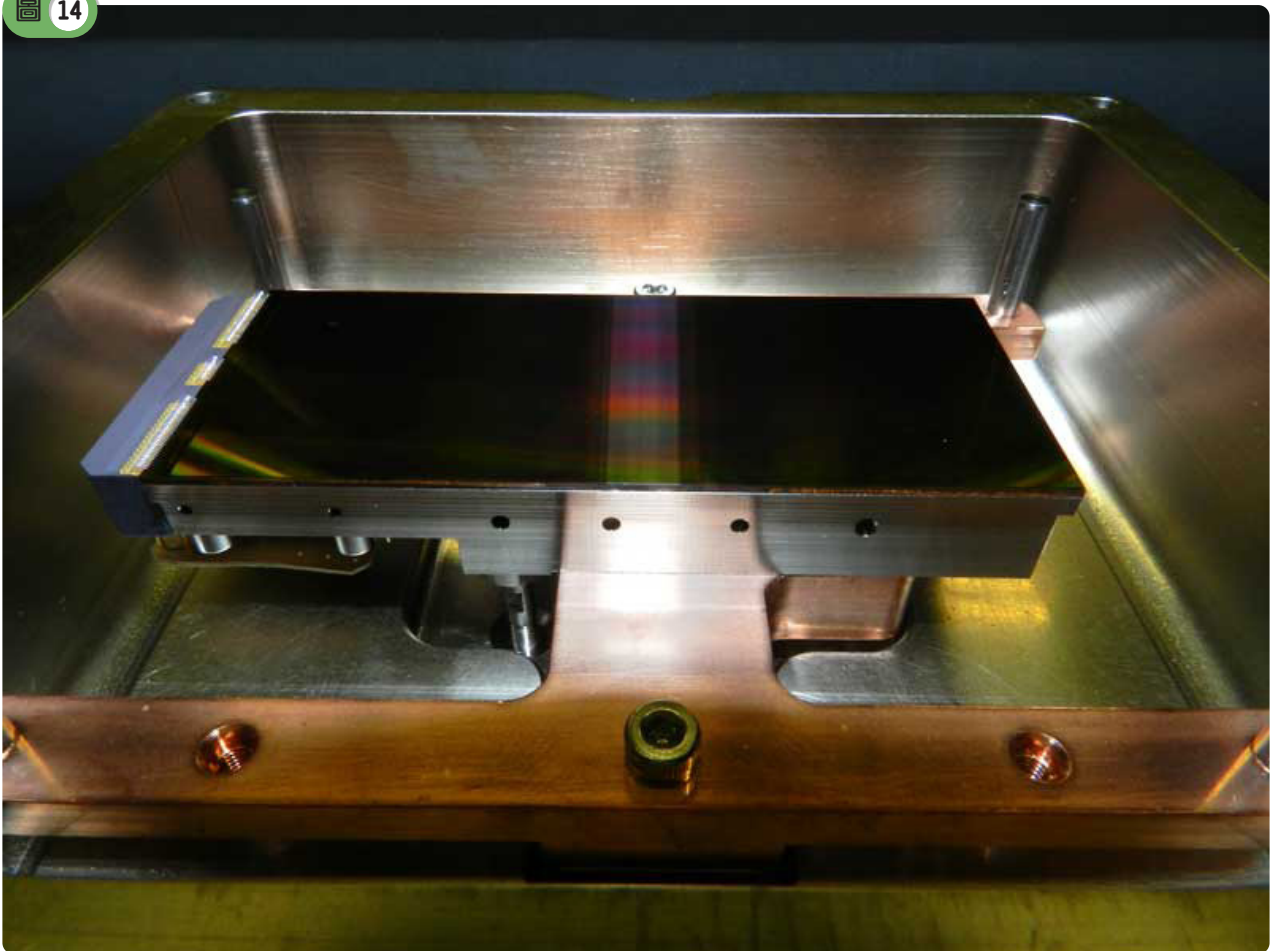
TAOS II的口徑1.3公尺望遠鏡，配置了能高速連拍的CMOS相機，在一秒內可取得20幅數位影像，每幅影像中包含了超過一萬個以上的星體。影像來源：陳文屏 攝影

圖 13



已安裝在攝影機中，由10個英國e2v公司CMOS感光模組所組成的感測器。影像來源：中央研究院天文研究所/TAOS II海王星外自動掩星普查計劃

圖 14



英國e2v公司的CMOS感光模組，長74公釐、寬31公釐，由8,847,360個像素所組成的陣列。影像來源：中央研究院天文研究所/TAOS II海王星外自動掩星普查計劃

CCD與CMOS的比較

早期CCD在高質量、低雜訊影像方面表現較優，而CMOS則擁有更高幀率、低功耗等優點。現代CMOS感測器技術的改進使其在影像質量上與CCD相媲美，在多數應用上已能與CCD匹敵甚至超越，特別是在高幀率與即時成像需求上，使其成為在成本/能源效率以及高速影像應用方面更好的選擇，如表1。

CMOS在技術日趨成熟下大幅普及，因具有強大性價比優勢，取代了大部分CCD，全球最大的影像晶片生產商SONY於2017年停止生產CCD後，CCD技術發展告一段落，現今多數CCD已停產。因CCD仍在極高靈敏度與高精度光度研究中保持主流地位，所以尚有少數特定用途的CCD（天文、生醫等）有量產。在同時要求「單光子靈敏度+絕對光度精度+超高動態範圍」等三個條件的場合，CCD目前仍不可取代。例如實驗/觀測設計要求系統性誤差到0.1%以下，或必須在-120°C長時間曝光，CCD依舊是唯一成熟且經過長年實戰驗證的方案，如圖15。

表 1 CCD與CMOS的性能比較表

項目	CCD	CMOS
靈敏度	較高	接近，部分甚至超越
雜訊	較低	高雜訊，已逐步改善
讀出速度	較慢	非常快
功耗	較高	較低
成本	昂貴	相對便宜
成像均勻性	高	接近，部分機型略差
可擴展性	限制	容易整合其他元件（如A/D轉換）

圖 15



此影像為克卜勒太空望遠鏡上配置的CCD陣列，CCD仍是目前經過長期實戰經驗，能在嚴苛的外在環境條件下，穩定保持極低誤差範圍且持續工作的最佳感測器。影像來源：NASA

未來展望

隨著AI與大數據分析的進入，未來的天文觀測將朝向自動化與智慧化邁進。大型望遠鏡巡天一天可產生數TB的影像資料，需靠自動化影像處理進行去除雜訊、分類，以AI演算法即時分析天象變化，快速偵測瞬變事件（如超新星、伽瑪射線暴等）。此外，望遠鏡與影像感測器的模組化將促使更多地面與太空觀測平臺部署高解析感測器，進行全天候與全波段監測。

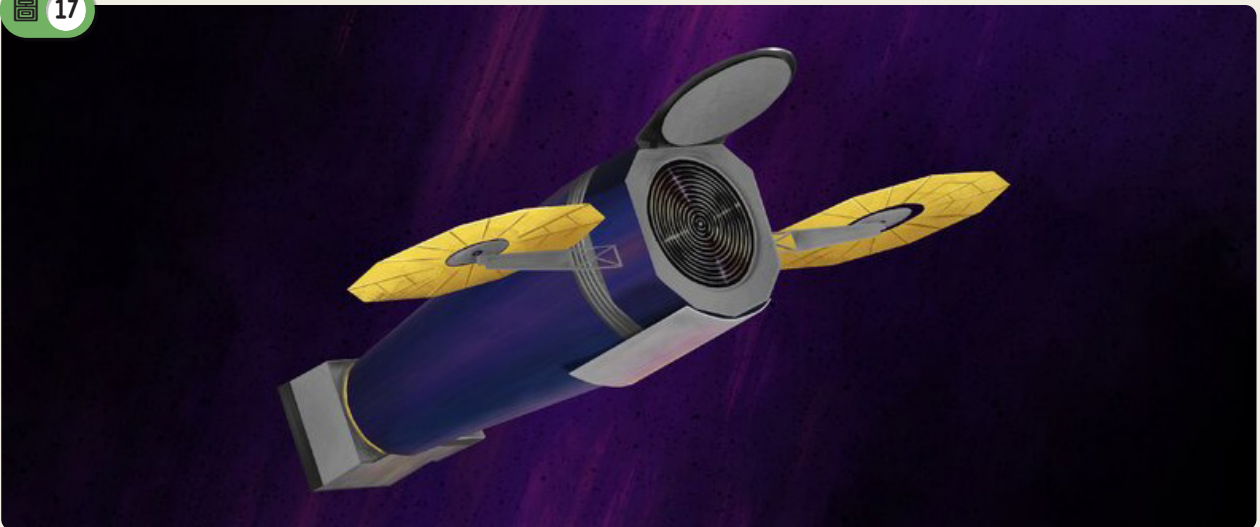
未來可能導入的更先進CMOS影像感測技術，如更高量子效率的背照式sCMOS（QE提高到95%以上），如圖16、更低讀出雜訊的CMOS或混合感測器（Hybrid CMOS-CCD），如圖17、突破冷卻限制的Cryo-CMOS技術、高能天文（X-ray、太陽物理）領域用途的抗輻射強化（Radiation-hardened）CMOS、AI-on-sensor實現「邊拍邊算」，特別適合全天候巡天任務。這些技術將使我們更深入觀察宇宙早期結構、暗能量、系外行星等。

圖 16



設置在美國夏威夷的井上建太陽望遠鏡（Daniel Ken Inouye Solar Telescope，簡稱DKIST），採用背照式sCMOS相機，主要用於太陽表面的磁場測繪，以及太陽閃焰的動態監測。影像來源：NASA

圖 17



尚在規劃階段的次世代太空望遠鏡：Lynx X-ray Observatory，未來或將搭載Hybrid CMOS-CCD相機。圖片來源：
<https://www.lynxobservatory.com/>

以量子效應為基礎的新型感測技術，例如量子點感測器、超導感測器（如MKID, Microwave Kinetic Inductance Detectors），這些裝置將突破傳統感測器的靈敏度與解析度極限。新材料（如石墨烯）也可能為未來感測器帶來革命性變化，例如提升紅外線波段感應能力、實現全光譜即時成像等。

從早期的底片時代到現今的數位感測時代，CCD與CMOS的發展大幅推進了天文學的觀測能力與研究深度。CCD以其高靈敏度奠定了數位天文觀測的基礎，而CMOS則以高速、低功耗與整合性展現強大接棒潛力。隨著科技的演進與跨領域融合，相信未來的天文觀測將更加即時、精確且深入。CCD與CMOS無疑將繼續扮演解開宇宙謎團的重要角色。

林宏欽：國立中央大學天文研究所 鹿林天文臺 臺長

參考資料：

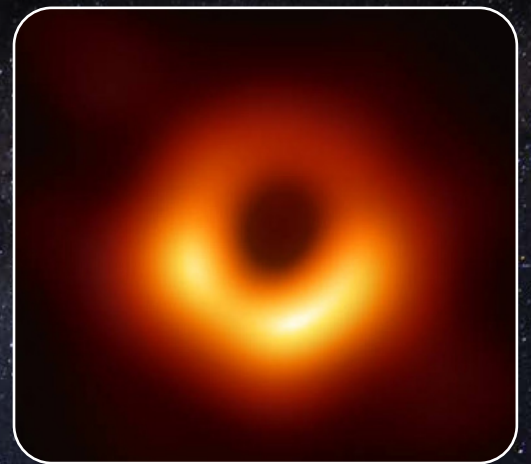
1. Janesick, J. R. (2001). Scientific Charge-Coupled Devices. SPIE Press.
2. McLean, I. S. (2008). Electronic Imaging in Astronomy: Detectors and Instrumentation. Springer.
3. 薇拉·魯賓天文臺 (維基百科)
4. CCD vs CMOS：感測器技術評論 <https://www.csensor.com/ccd-vs-cmos?lang=zh>
5. TAOS II - The Transneptunian Automated Occultation Survey <https://taos2.asiaa.sinica.edu.tw/>

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，並推導出「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



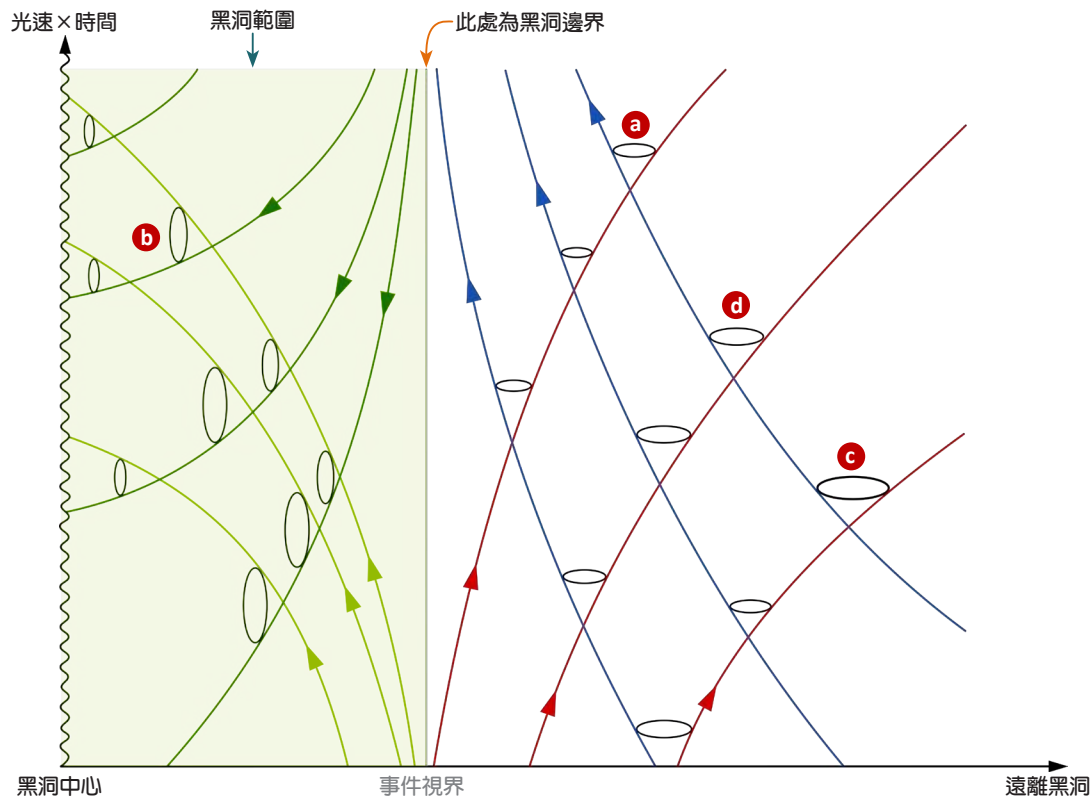
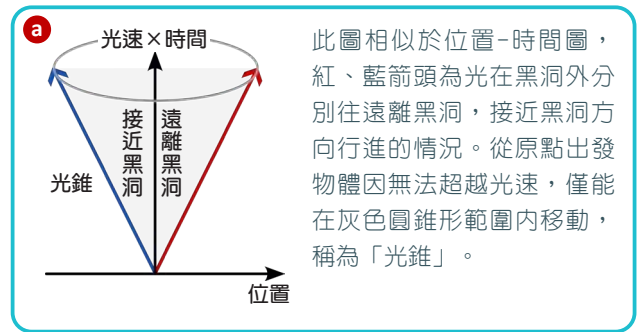
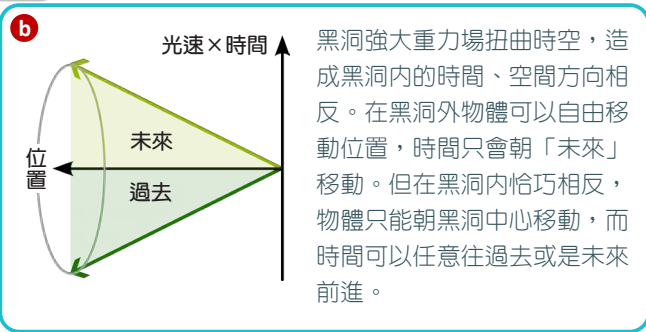
工作中的天文學家史瓦西，在愛因斯坦發表重力場方程式後僅兩個月，史瓦西就寫出了第一組解析解，從理論推演開啓了科學家對黑洞的百年探索過程。影像來源：Leibniz Institute for Astrophysics Potsdam (AIP)

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。

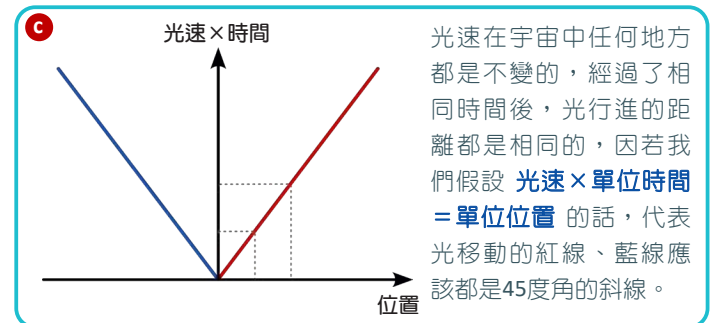
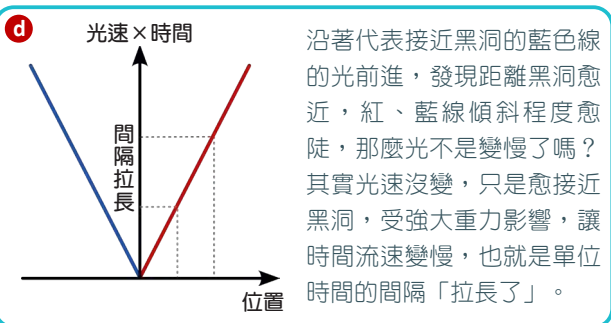
史瓦西的黑洞時空概念 簡易說明圖解

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。

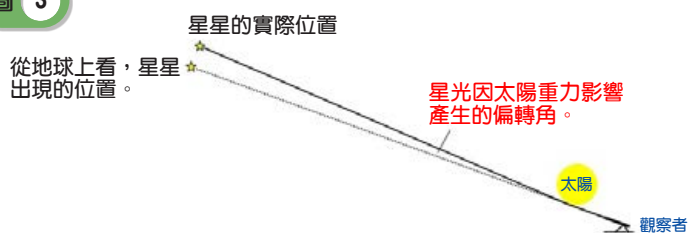
1919年，第一次世界大戰剛結束。英國劍橋天文臺臺長愛丁頓爵士（Arthur Eddington）率領團隊，前往西非外海，當時葡屬的普林西比（Príncipe）島與另一組前往巴西索布拉爾(Sobral)的格林威治天文臺團隊，同時觀測日全食。他們的目標，是測量星光在太

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？

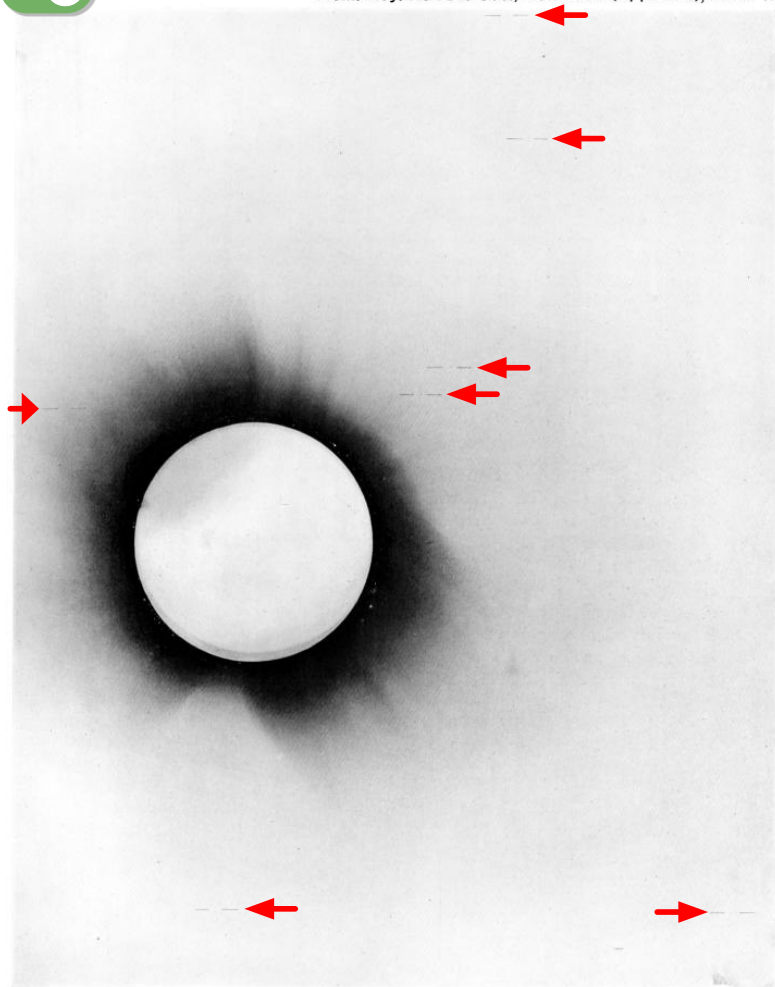
圖 3



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

Mem. Roy. Astron. Soc., Vol. LXII. (Appendix), Plate 1.



© Royal Astronomical Society • Provided by the NASA Astrophysics Data System

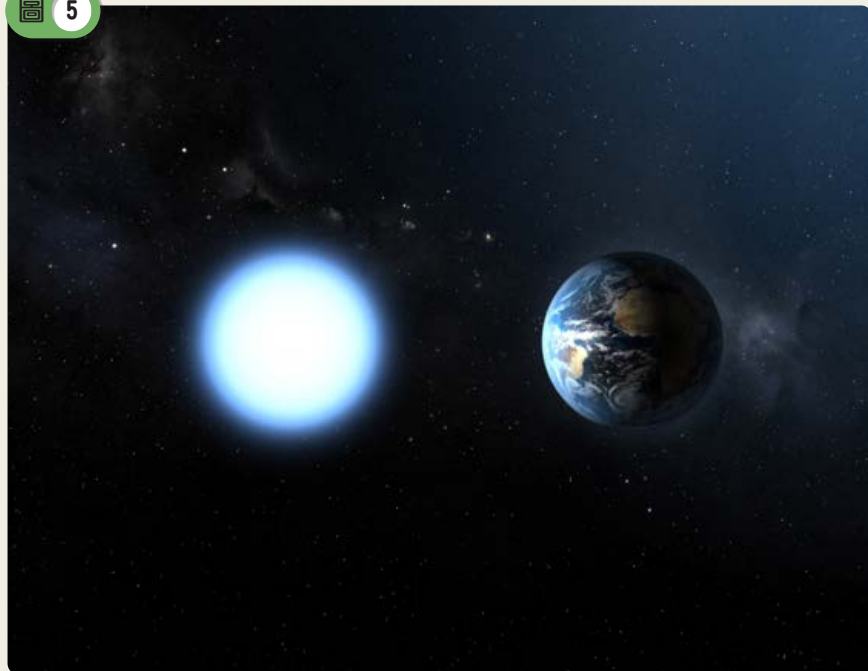
1919年日全食的影像，被觀測到位移的所有恆星用雙橫線（紅色箭頭標示處）標出。位移程度從0.2到1角秒不等。影像來源：<https://articles.adsabs.harvard.edu/full/1923MmRAS..62A...1D/A000042I001.html>

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。

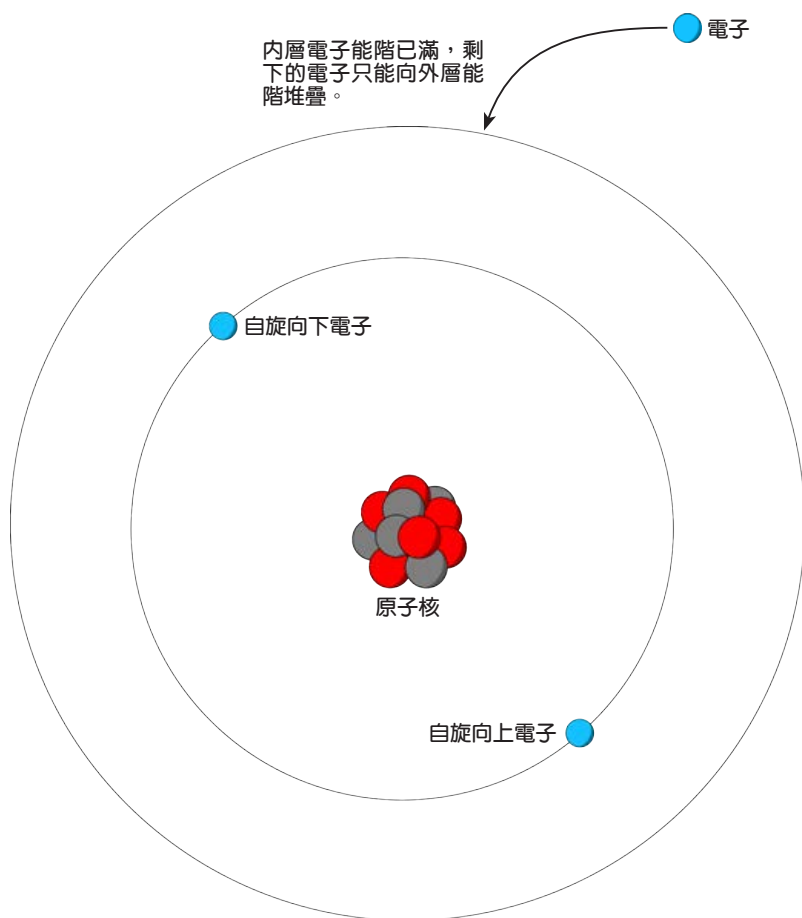
由於原子中的每個電子能階僅能容納1個向上自旋、1個向下自旋電子，若要再壓縮電子所占空間，例如將第3個電子擠入已滿的能階時，就會產生排斥壓力，這就是「電子簡併壓力」。圖片來源：編輯部繪製

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。

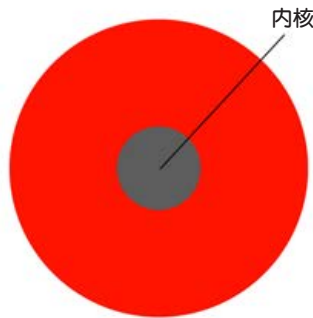
諷刺的是，同一時間已移居美國、年屆六十

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。

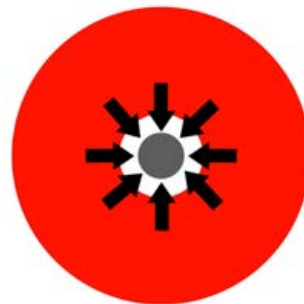
愛因斯坦於1955年過世後，廣義相對論與黑洞研究迎來了黃金時代。1963年，紐西蘭數學家卡爾（Roy Kerr）找到了描述旋轉黑洞的解析解，這也是現實中更常見的黑洞形式。兩年後，美國物理學家紐曼（Ezra Newman）發現，黑洞也可以帶有電荷。隨著更多理論的建立，最終發展出「無毛定理（no-hair theorem）」：黑洞可被質量、自旋與電荷三個參數完全描述。

中子星的誕生過程 說明圖解

圖 7



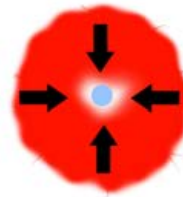
a 已達演化過程末期的大質量恆星



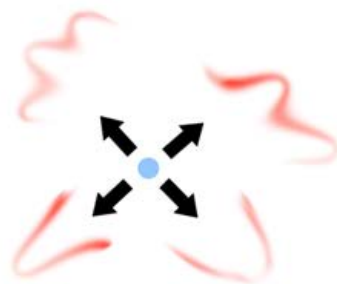
b 巨大恆星的電子簡併壓力撐不住重力，發生內爆。



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）

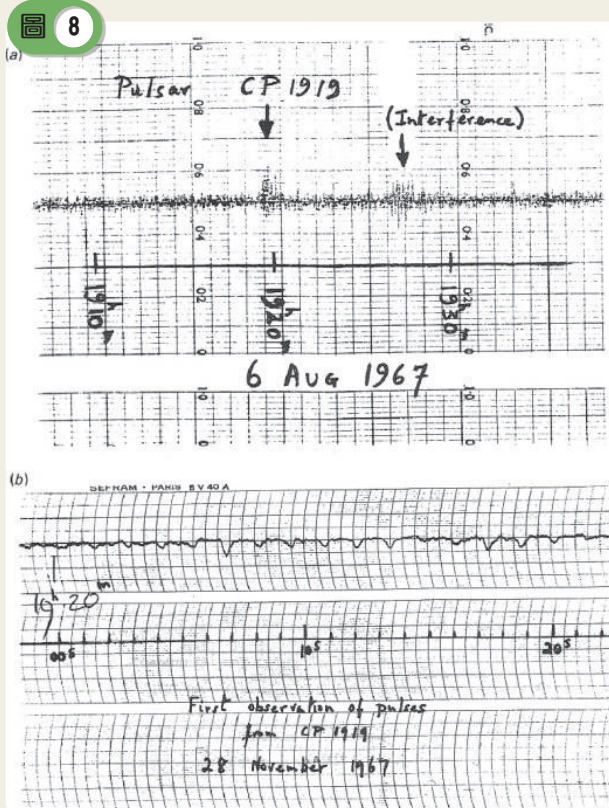


f 最後剩下中心核的部分就是中子星

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

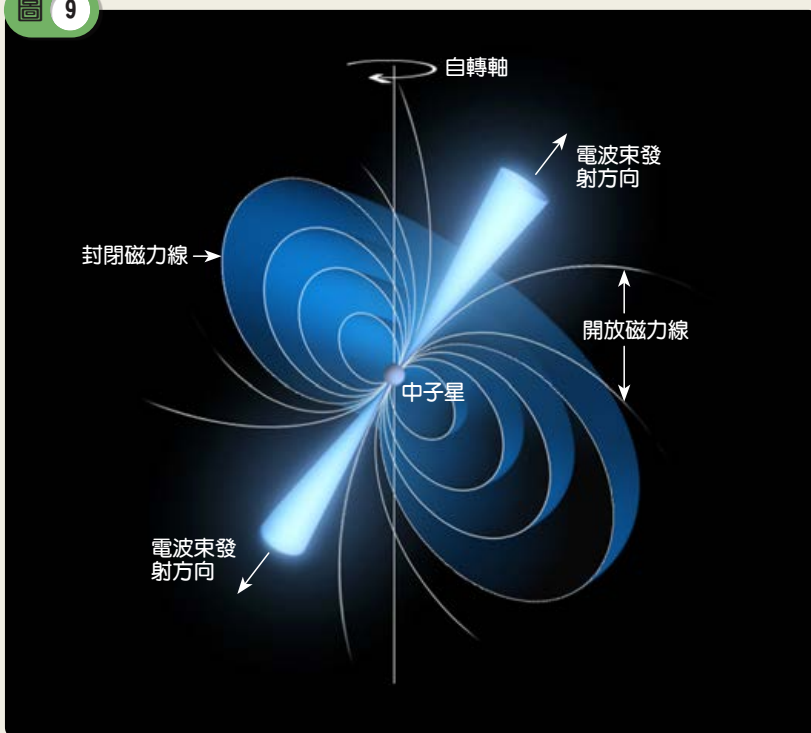
9，這項發現間接證實了中子星的存在，如圖10，也增強了黑洞存在的可能性。但這項發現的諾貝爾物理獎卻在1974年頒給了她的指導教授，未提及她本人，成為諾貝爾獎歷史上的一大污點。



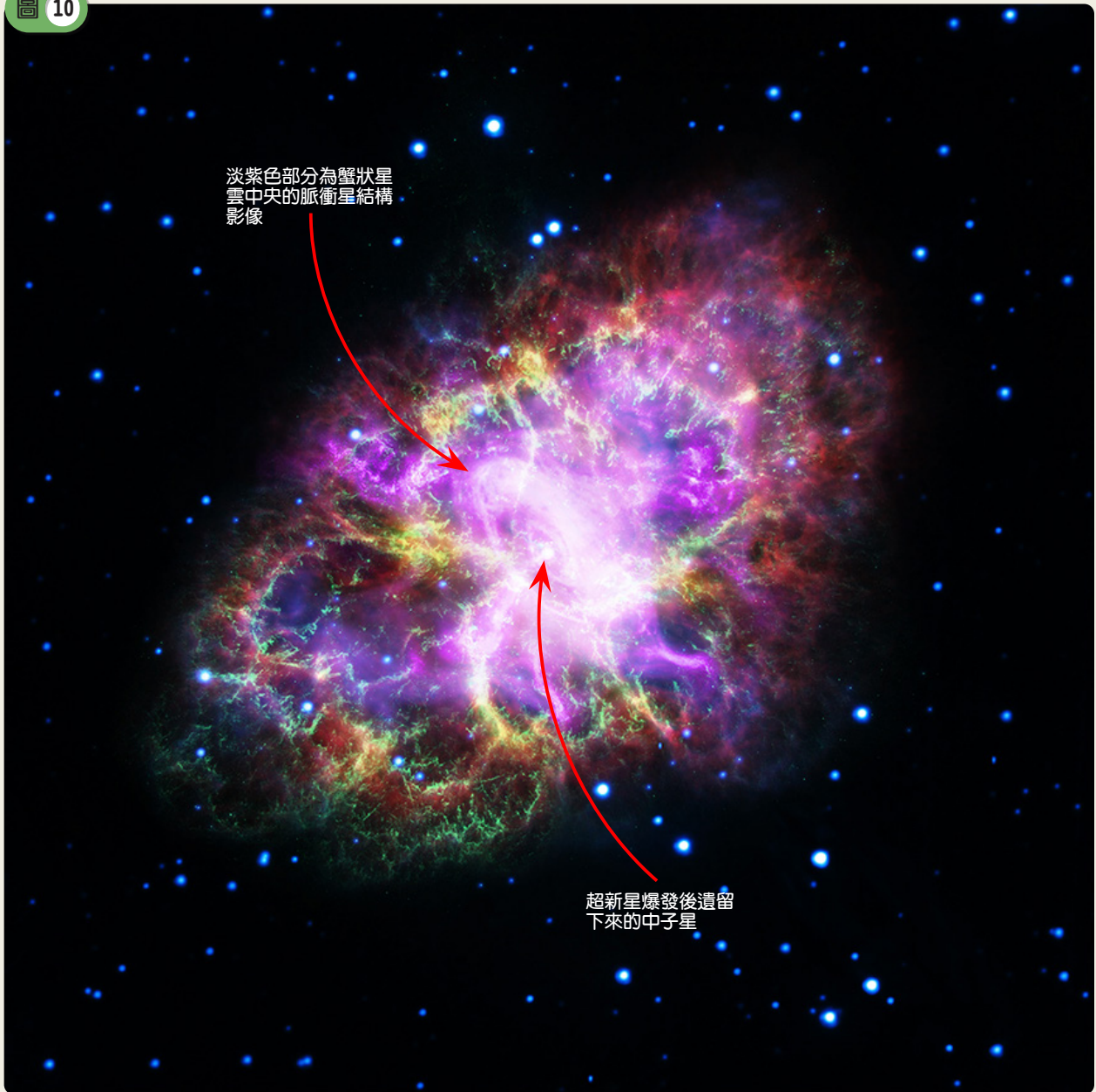
貝爾發現脈衝星的觀測紀錄。影像來源：Cavendish Laboratory Department of Physics

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

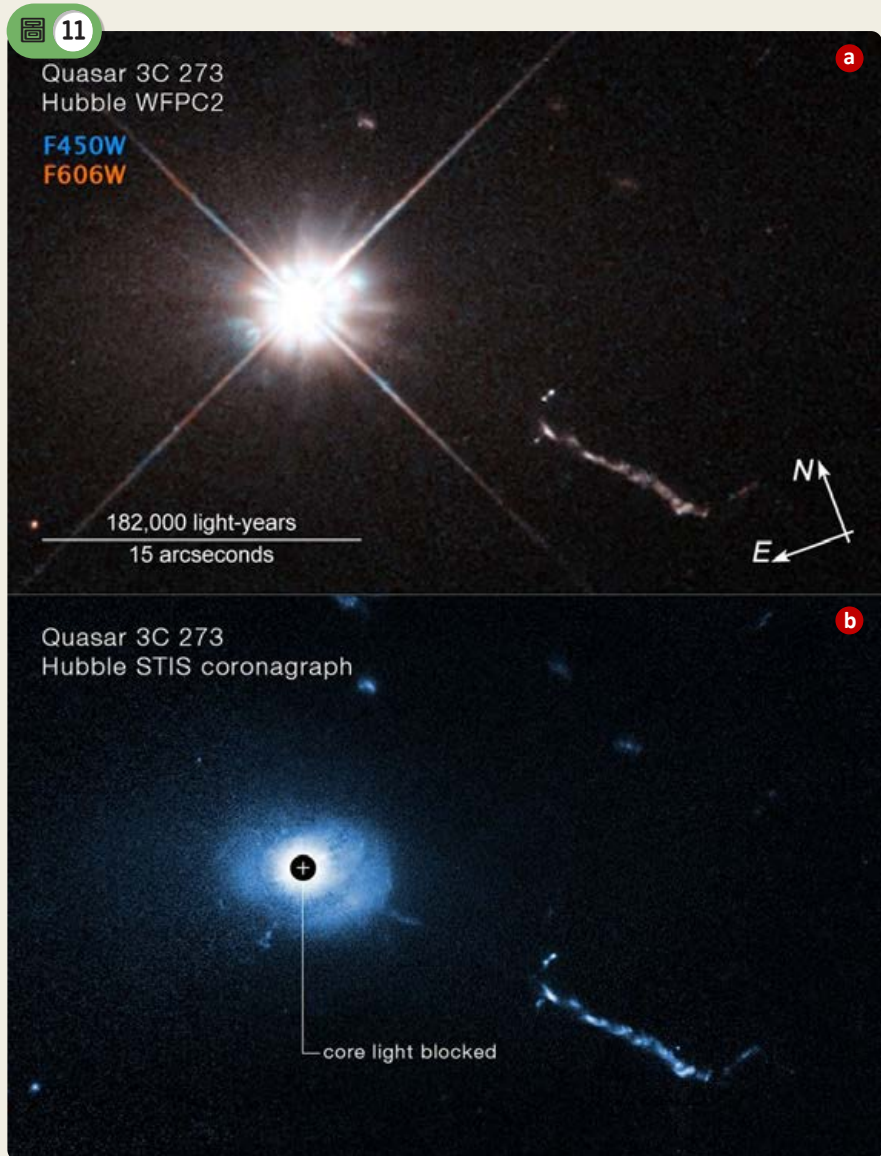
戰爭雖然帶來無數災難，也促成了許多技術的進展。其中之一便是無線電與雷達技術的快速發展。在英國，雷達技術幫助皇家空軍預警德軍空襲，守住了不列顛島。劍橋大學的許多科學家在這當中扮演了重要角色，他們在戰後將戰爭中發展出來的技術應用到的電波天文學上，在1950年代前後發表了幾份巡天觀測後得到的星表。

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？

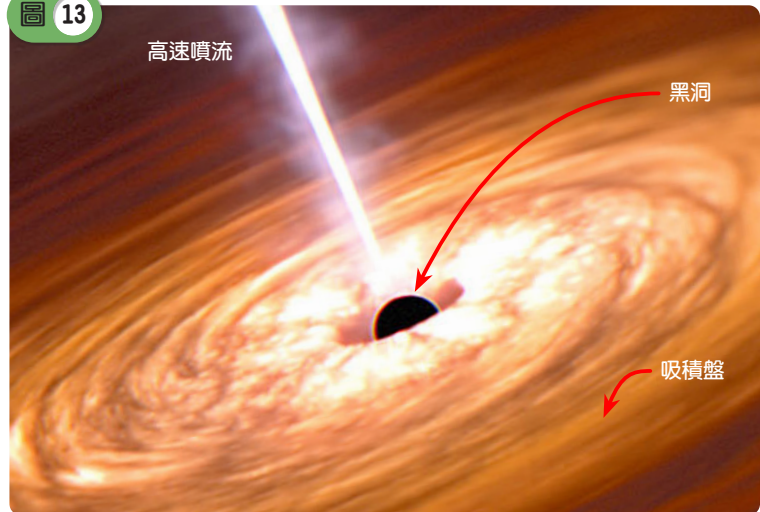
在接下來十幾年中，天文學家盤點各種理論跟證據後，認為類星體是來自於星系中心的「超大質量黑洞 (supermassive black hole)」，如圖 12、圖 13。當其大量吸積物質時會釋放能量，其亮度足以超越整個星系內恆星亮度的總和，所以看起來會像是個明亮的點光源，而看不到原本盤狀或橢圓狀的星系。

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。

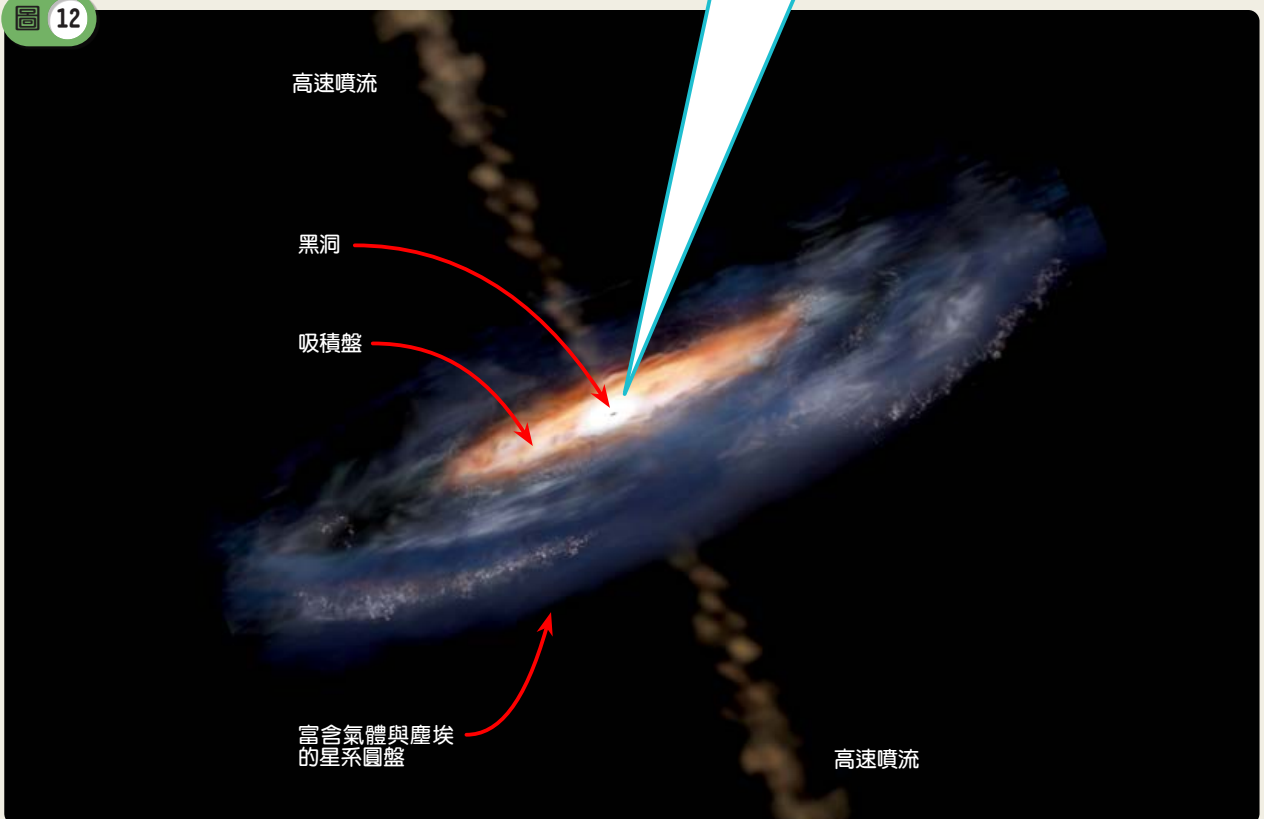
這樣的發現帶來了一個新的難題：這些龐大的黑洞，是怎麼形成的呢？我們會在後續回到這個問題。

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。

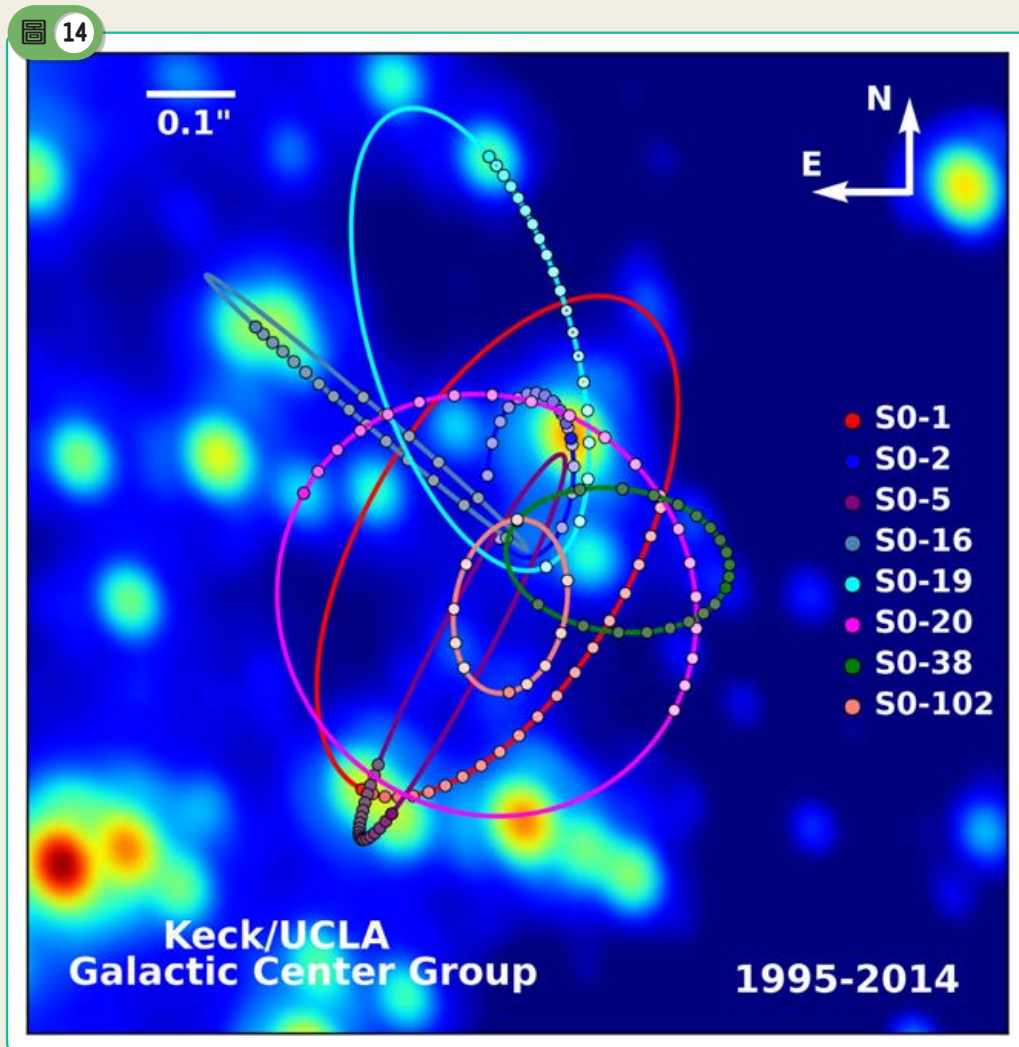
那麼，我們所在的銀河系中心是否也藏著一顆這樣的黑洞呢？答案是肯定的。這顆位於人馬座方向的黑洞，稱為人馬座A*（Sagittarius A*），是一個典型的沉寂黑洞。雖然看不見它發出的光，但天文學家發現，附近有數顆恆星繞著一個看不見的中心

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



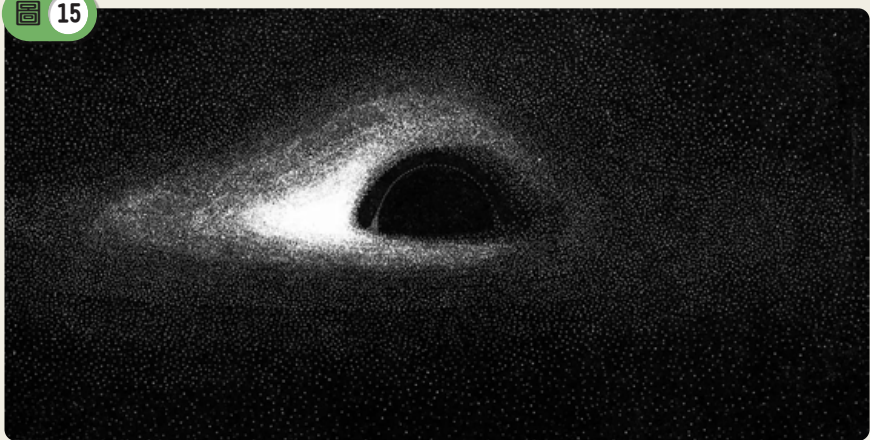
蓋茲團隊對人馬座A*的多年觀測結果，顯示周遭恆星繞行看不到的超大質量黑洞。影像來源：Keck/UCLA Galactic Center Group

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。

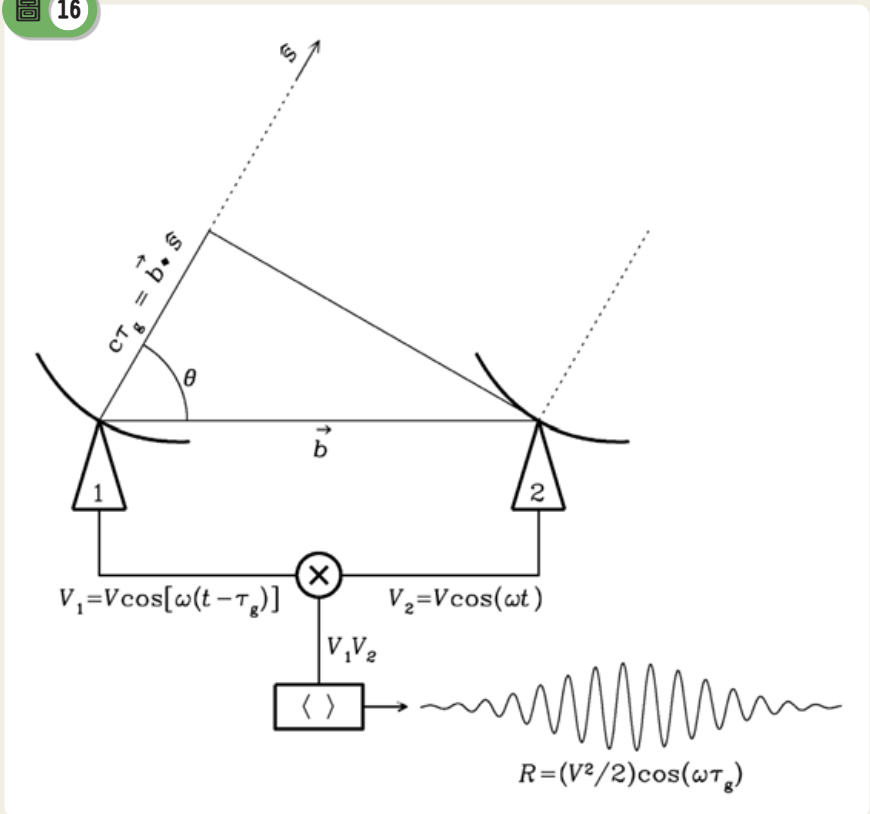
雖然單一天線的電波望遠鏡解析度有限，但天文學家可透過將多個天線組成電波陣列來大幅提高解析度，原理是利用中學學過的干涉技術：當不同位置的兩個碟盤天線觀測不在天頂的同一天體時，會因為光抵達兩個碟盤有時間差而得到不同相位的光，那將這兩道光互相疊加就能得到干涉，如圖16。在電波陣列中每兩個碟盤可以組成的一個基線 (baseline)，只要基線夠多，就能夠利用干涉原理合成出原本的影像 (synthesis imaging)。而這兩個碟盤只要擺得夠遠，就可等效出比碟盤本身大很多的電波望遠鏡。

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



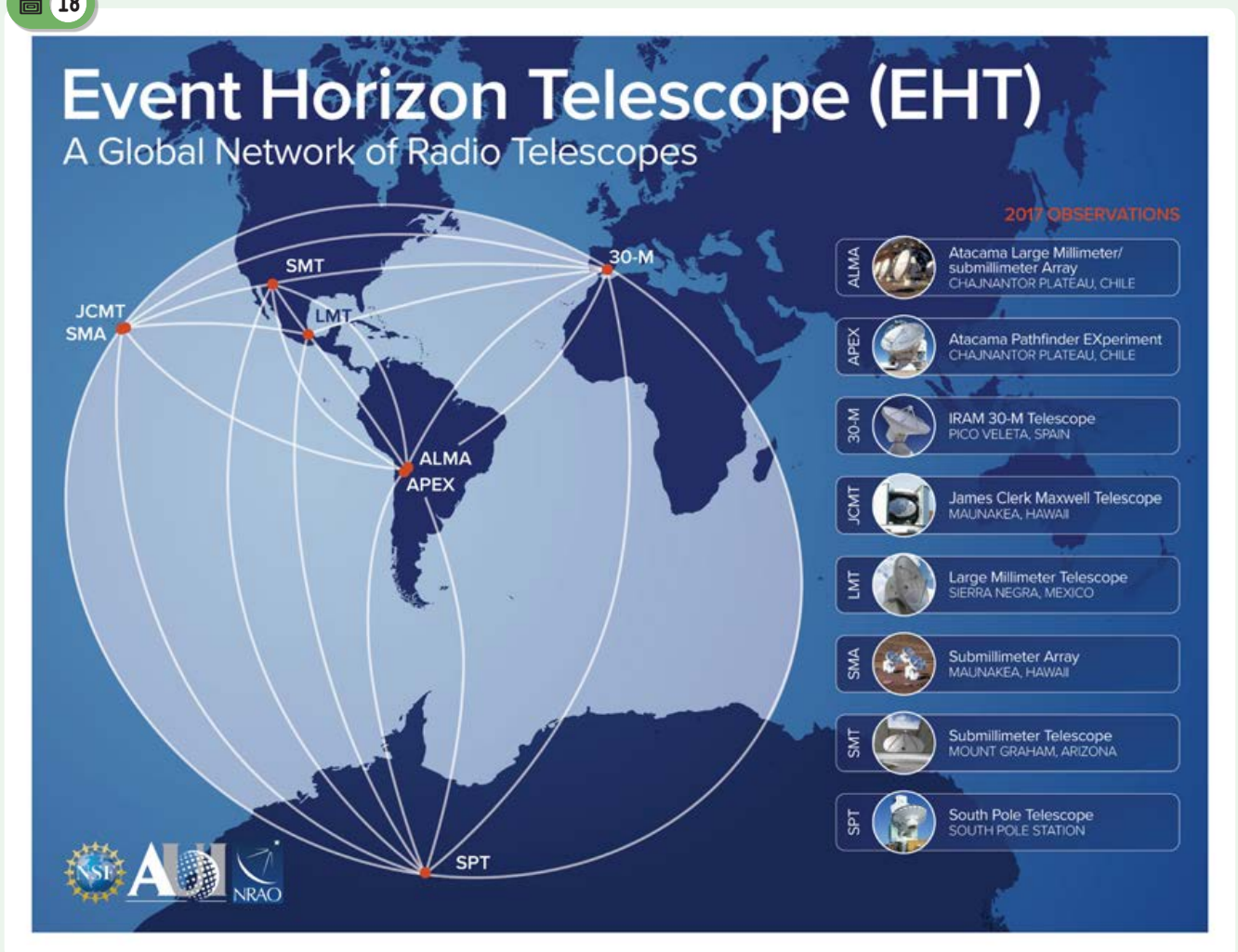
阿塔卡馬大型毫米及次毫米波陣列（Atacama Large Millimeter/submillimeter Array，簡稱ALMA）為事件視界望遠鏡陣列最重要的望遠鏡之一，位於陣列的中央。此望遠鏡位於智利北部阿塔卡馬沙漠，為電波望遠鏡群組成的干涉儀陣列。共有66座天線一起協同工作，可用不同的配置法排列，天線間的距離變化多樣，最短可以是150公尺，最長可以到16公里。臺灣中央研究院天文研究所於計畫中協助建造並參與實際營運。影像來源：ESO

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。

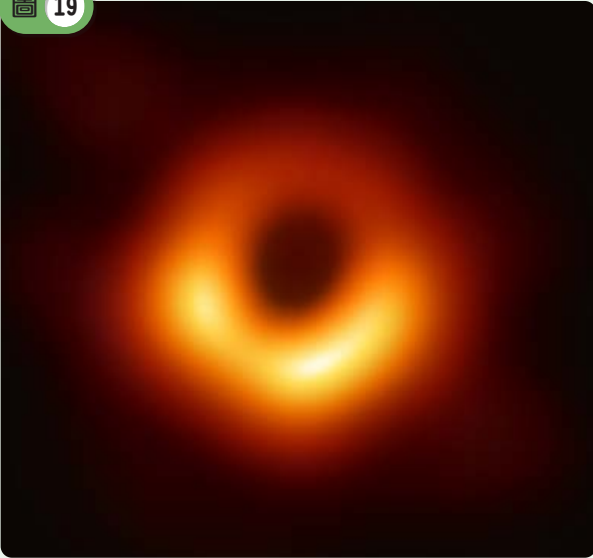
事件視界望遠鏡的核心科學目標包括：驗證廣義相對論在黑洞極端重力環境下的適用性、研究黑洞周圍的吸積盤與相對論性噴流、確認事件視界是否實際存在，以及建立黑洞物理的基礎理論架構。主要觀測對象為2個超大質量黑洞：一為位於銀河系中心、南天的人馬座A*，另一則是北天室女座的M87橢圓星系核心的黑洞。

18



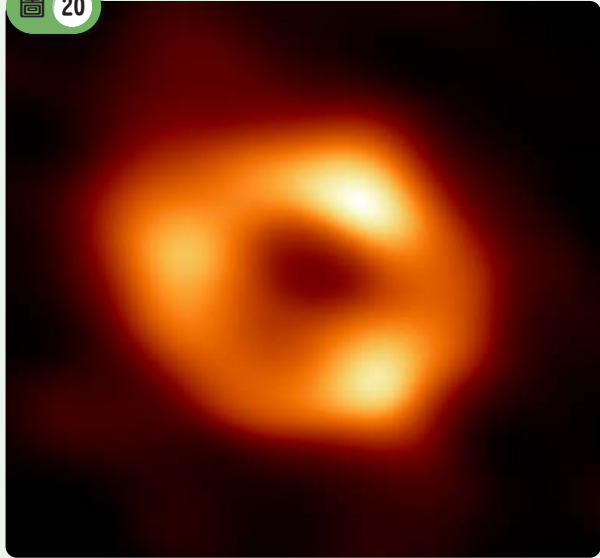
事件視界望遠鏡聯合了遍佈夏威夷、智利、南極、歐洲與北美的無線電波陣列，用網路同步串連，將望遠鏡盤面擴大至整個地球大小，可以提高解析度至十萬分之一角秒等級。圖片來源：ESO

圖 19



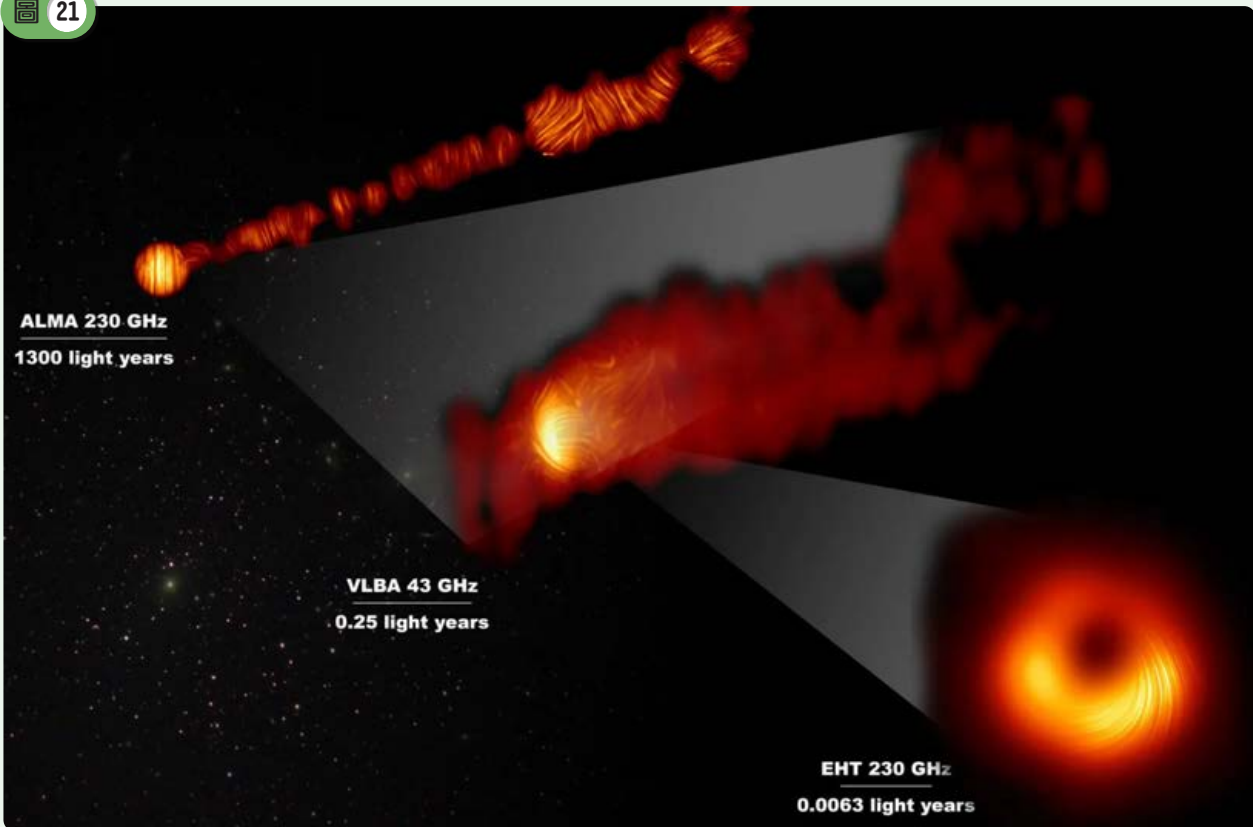
2019年，事件視界望遠鏡首度拍攝到室女A星系M87中央的黑洞影像。影像來源：ESO

圖 20



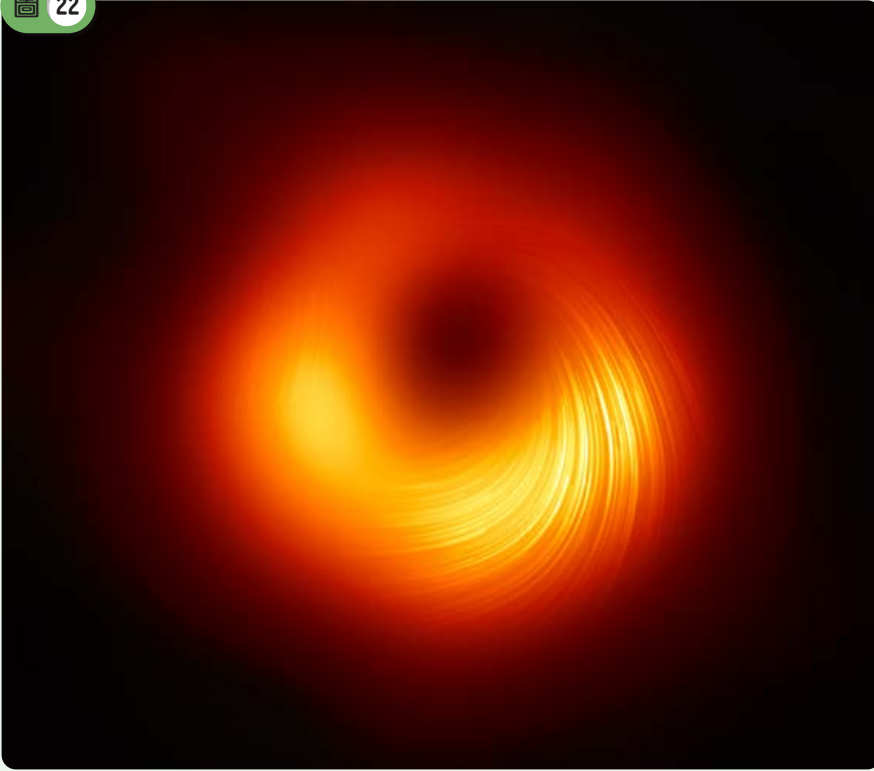
2022年，事件視界望遠鏡拍攝到銀河系中央的人馬座A*超大質量黑洞影像。影像來源：ESO

圖 21



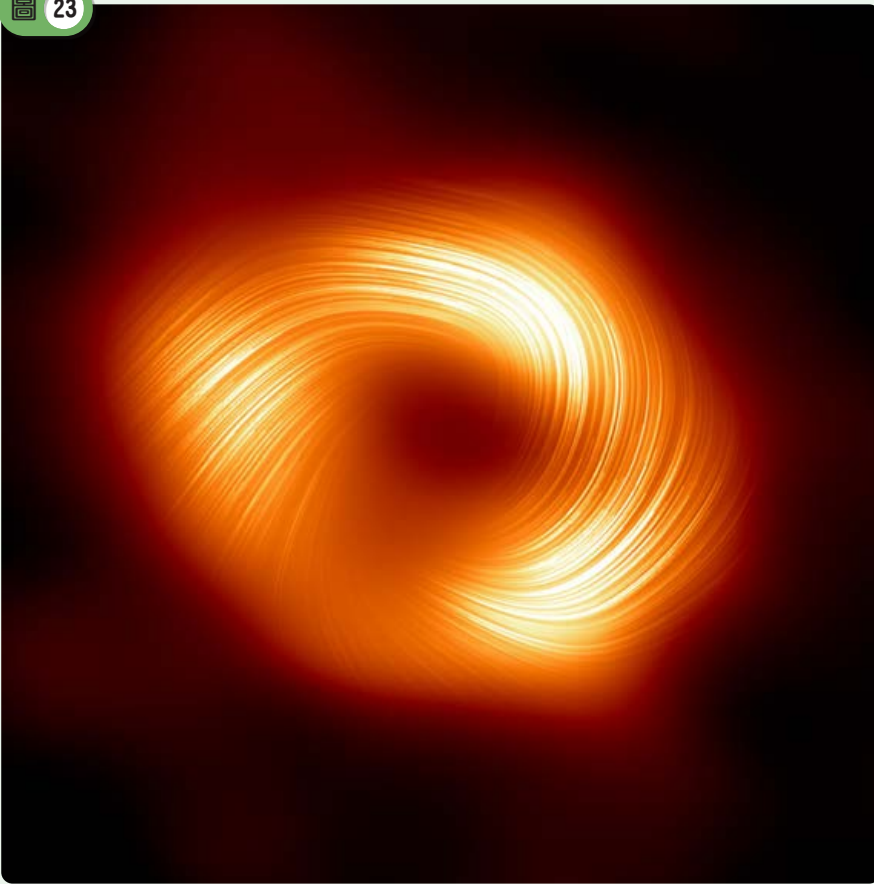
這張合成影像以偏振光呈現M87星系核心區域的三種觀測視角。該星系中心擁有一顆超大質量黑洞，並以延伸遠超星系範圍的噴流聞名。最上方是由歐洲南方天文臺（European Southern Observatory）合作參與、設於智利的ALMA所拍攝之偏振影像，呈現出距離星系核心約6,000光年範圍內的噴流結構。中間部分是由美國國家電波天文臺的甚長基線陣列（Very Large Baseline Array）取得的偏振圖像，解析範圍約1光年，更進一步靠近黑洞。下方的最內層視野則由EHT聯結全球8座電波望遠鏡形成地球尺度虛擬望遠鏡所拍攝，使天文學家得以探測噴流發射區域。圖中線條顯示偏振方向，反映出區域內的磁場結構。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

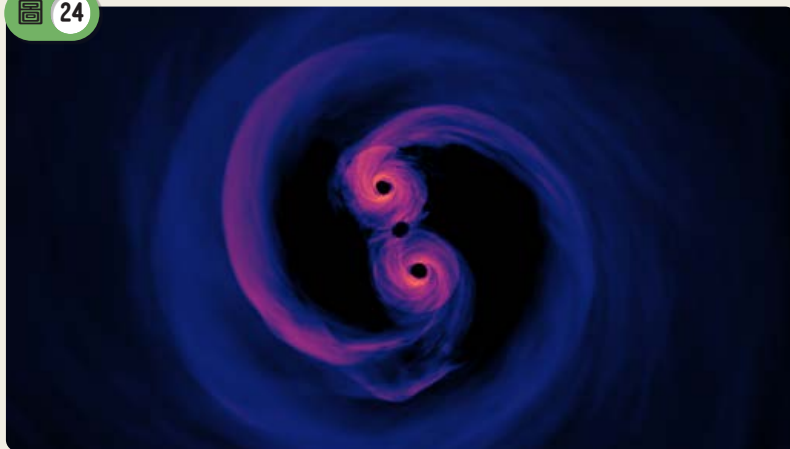
超大質量黑洞形成 與星系合併

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。

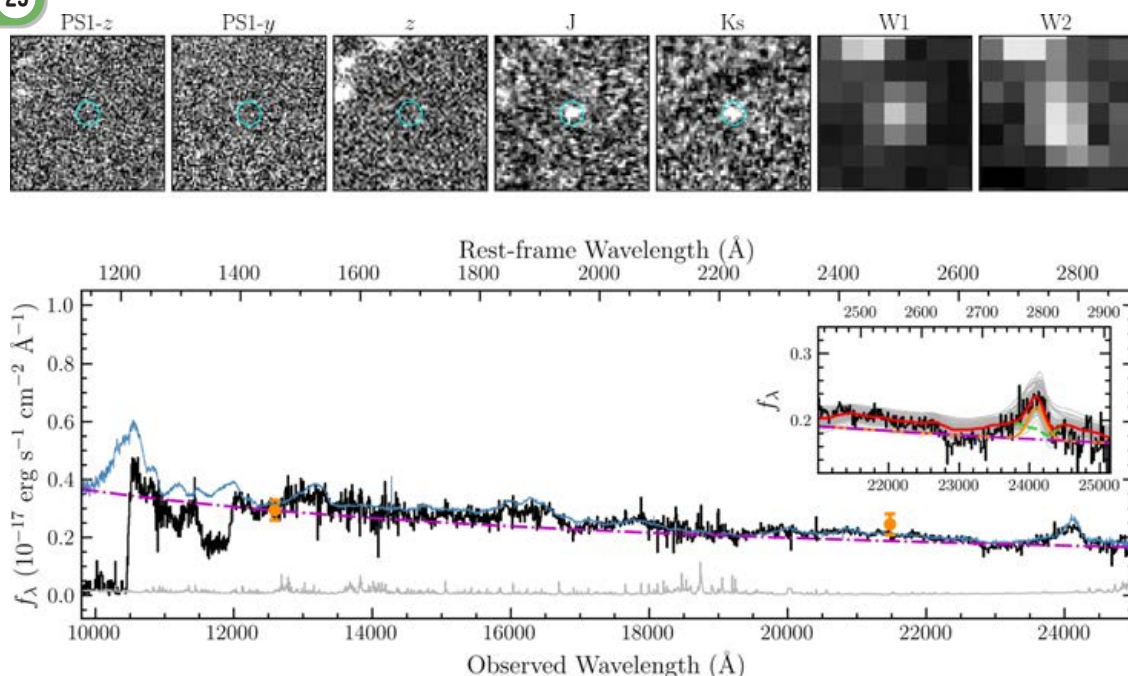
然而，這個過程理論上需要漫長的時間，但是天文學家卻陸續發現，在宇宙年齡只有幾億年時就已經出現了類星體，如圖25，而且他們的超大質量黑洞估計可達十億倍的太陽質量。要如何最有效率地長出這麼重的黑洞就是非常多天文學家努力在研究的問題。

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

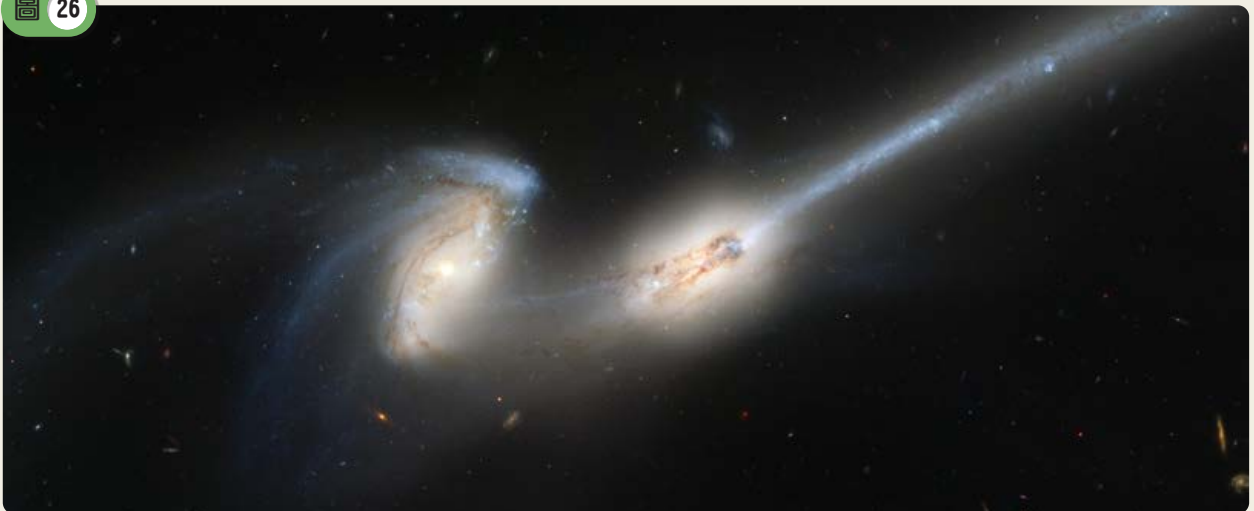
超大質量黑洞的形成還跟星系的成長有關。1999年，美國天文物理學家梅里特（David Merritt）透過統計眾多星系後發現，超大質量黑洞的質量，與其宿主星系中核球（bulge）的總恆星質量成正比。這個就是著名的M- σ 關係⁷，代表著即使超大質量黑洞的尺寸只有星系大小的百萬分之一以下，但彼此是會共同成長的。那麼，有什麼機制能讓它們「一起變大」呢？

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 28

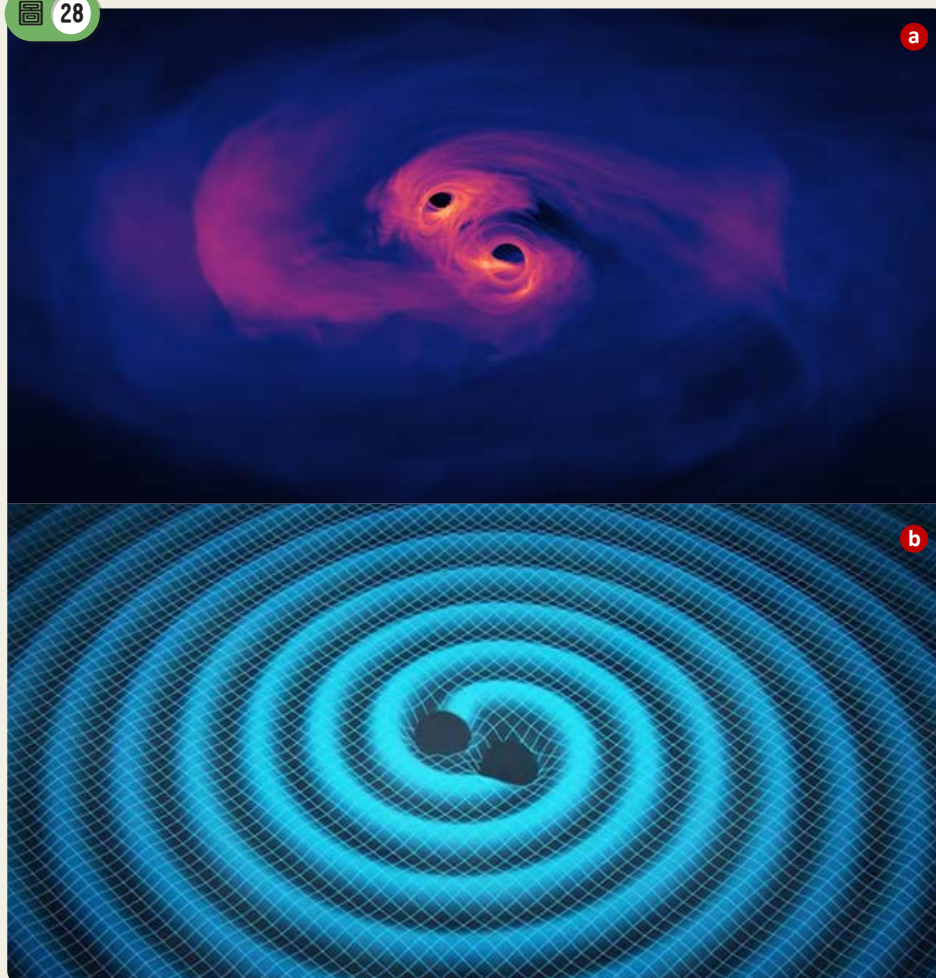


圖 a 為電腦模擬2顆黑洞近距離高速相互繞轉直到接近並合併，根據廣義相對論推算，在此階段的黑洞會放射出強大的重力波，如圖 b。圖片來源：NASA

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。

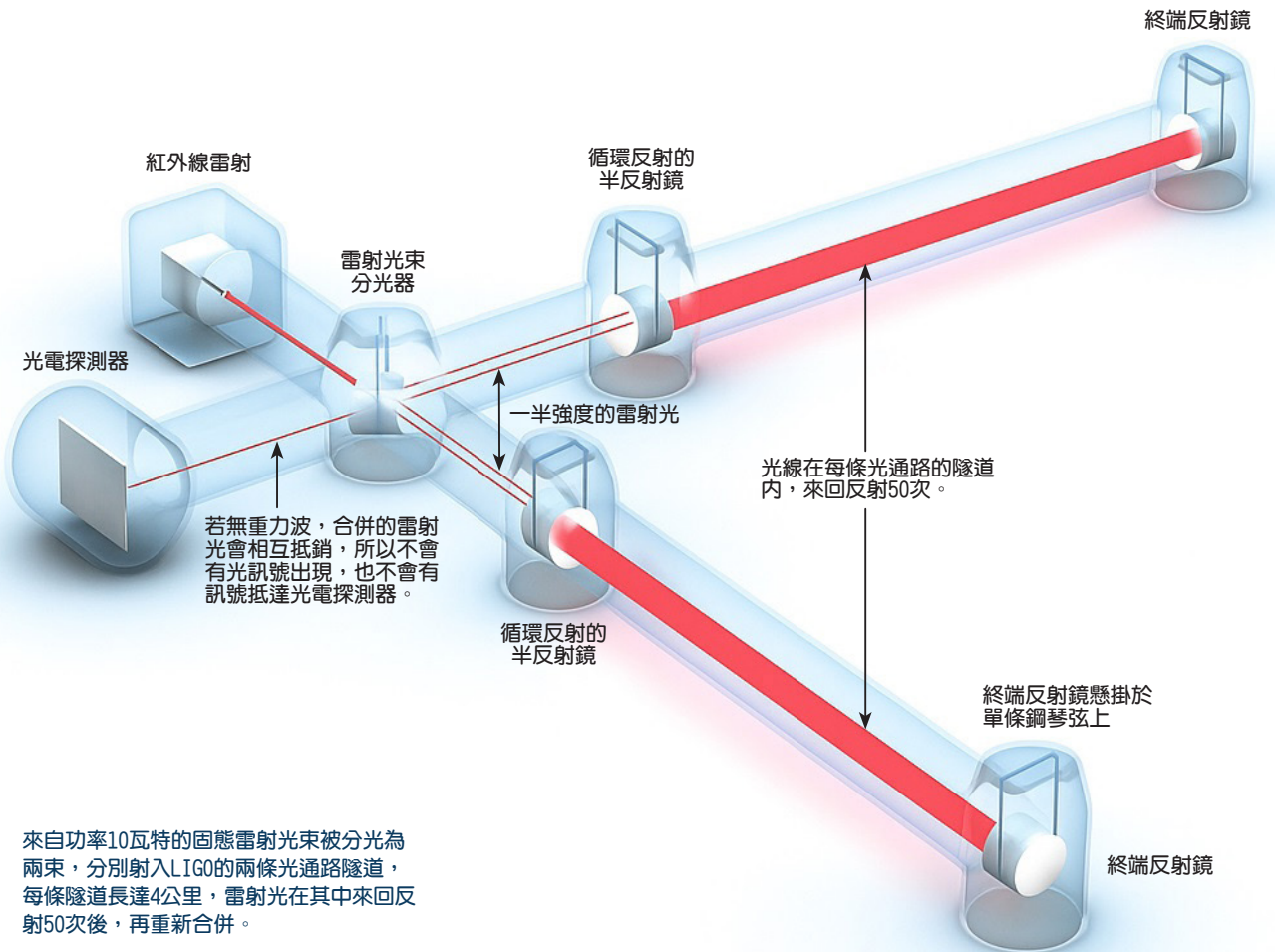
圖 29



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

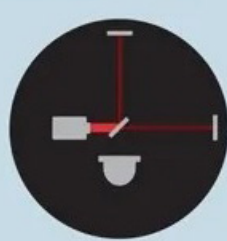
圖 30



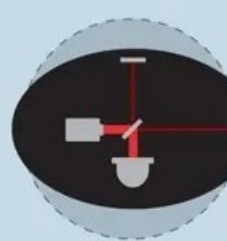
在重力波尚未抵達前，兩條長為4公里的光通路隧道完全等長，所以光電探測器接收不到任何訊號。



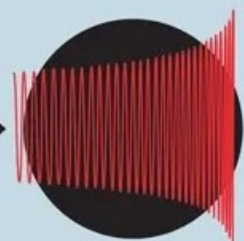
重力波通過時，其中一條光通路隧道被拉長，另一條光通路隧道被壓縮，導致干涉條件改變，讓光訊號出現並抵達探測器。



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。

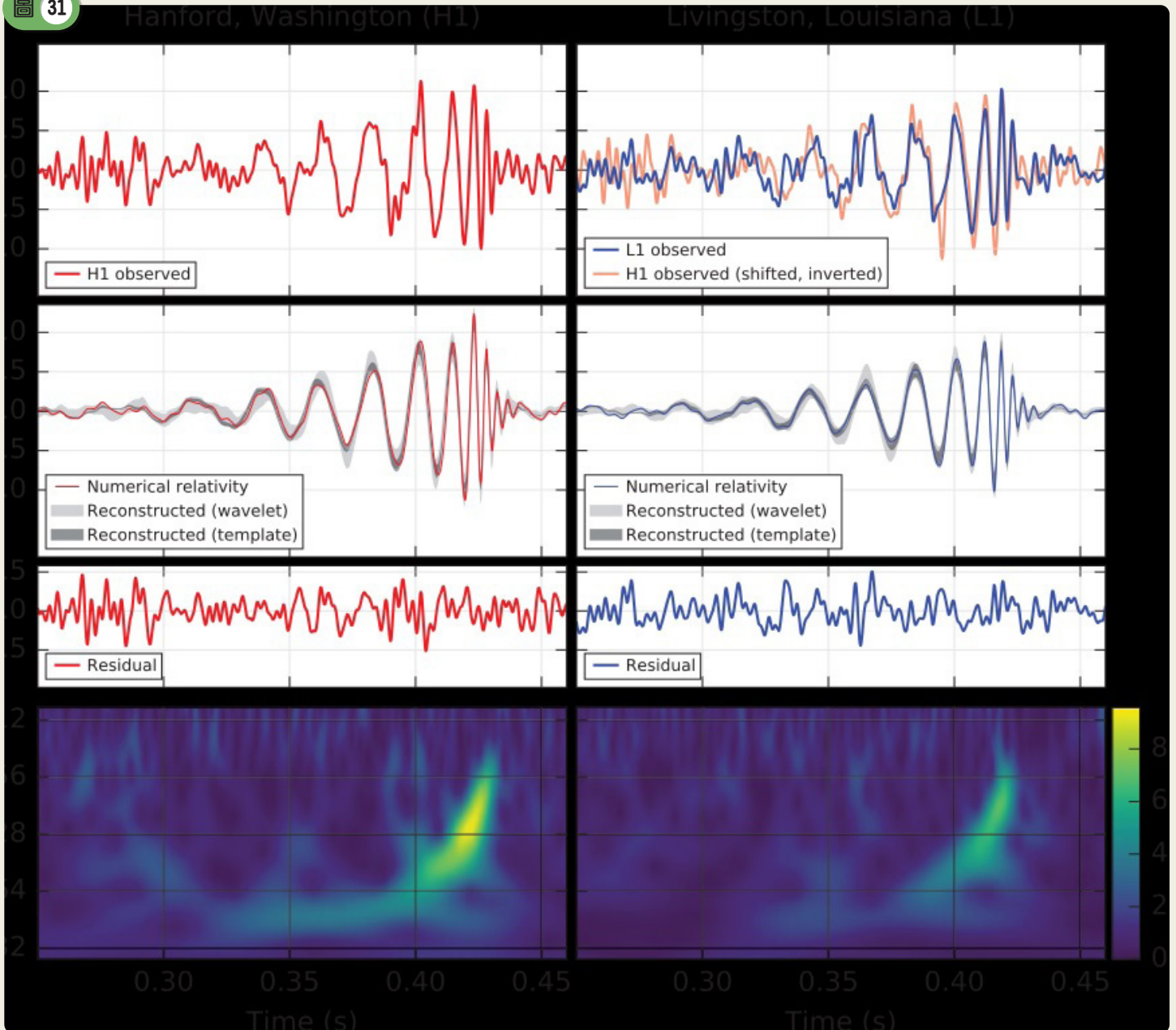


光電探測器所接收到的訊號呈現振盪狀，頻率與波形由重力波源的性質所決定。

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。

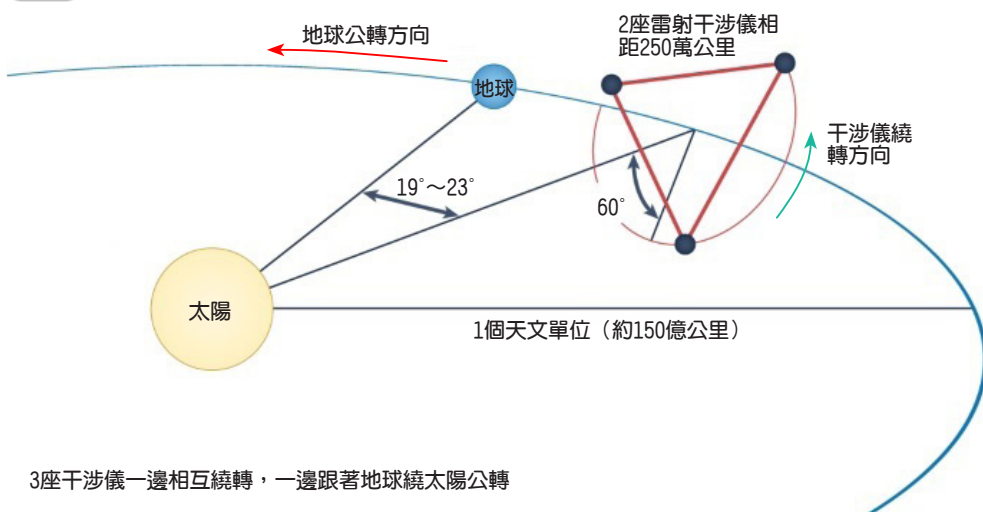
由歐洲太空總署主導，LISA 預計於2030年代發射三艘彼此相距250萬公里的太空探測器，組成一個巨大的正三角形，在地球軌道上繞行並尾隨地球，如圖36、圖37。每艘太空船將彼此發射與接收雷射光，透過干涉效應精密測量太空中的長度變化，靈敏度足以偵測來自超大質量黑洞合併的低頻重力波。

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



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。

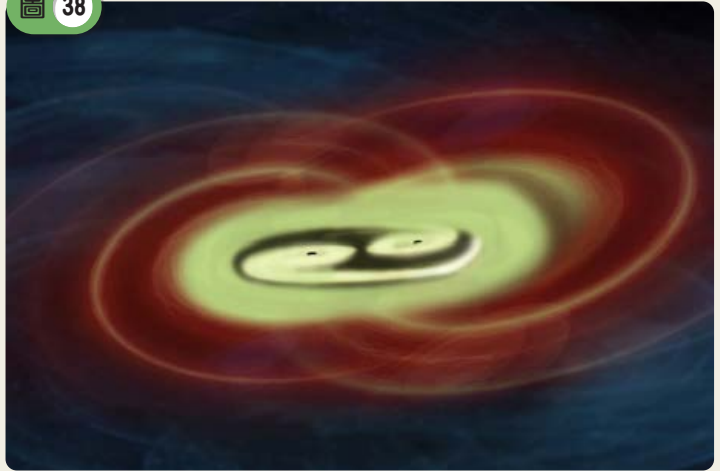
這段歷程展現了科學最珍貴的精神：代代相傳的探索勇氣，與對真理鏗而不捨的追求。我們也很慶幸這個時代，各國政府只要有能力，都會願意撥預算投資給科研經費，因為在解決科學難題時發展出來的技術知識，也許會碰巧在其他領域有所應用。未來或許仍有許多未知等待我們發現，但正是這份「不因困難而退縮」的精神，推動人類文明繼續前進。

湯濟家：日本愛媛大學博士後研究員

附註：

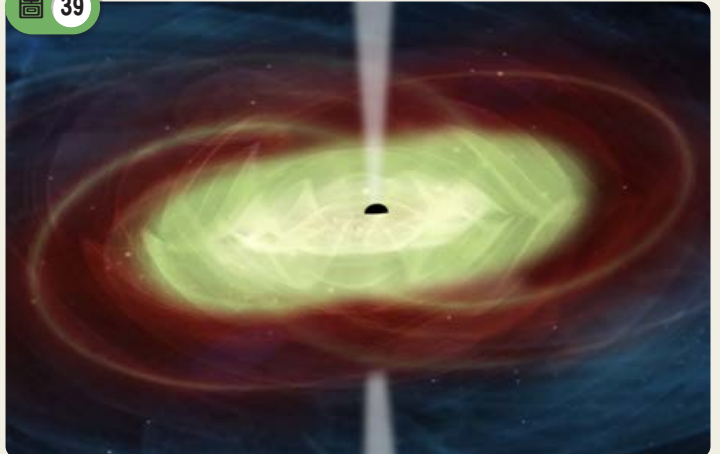
- 1.所謂解析解，就是能夠精確描述答案的一組數學算式。相對於解析解還有所謂的數值解，而數值解只能非常近似於正確答案。可以說，解析解就是可以拿紙筆簡單寫下來的，而數值解通常非得靠電腦計算才能得到。
- 2.黑洞這個詞是後來1967年惠勒（John Wheeler）採用才開始被廣見於各處，20世紀初人們稱呼黑洞為『重力坍塌的物體』。
- 3.這是1920年兩位美國天文學家Harlow Shapley與Heber Doust Curtis間的天文大辯論內容，現在我們知道銀河系外還有很多其他天體的存在。
- 4.後續的研究將這個數值修正到兩倍多的太陽質量。
- 5.因為宇宙正在膨脹，所有天體都在遠離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

穿越銀河的閃電訊號——探索快速電波爆

煙火之所以美麗，是因為它遙遠且稍縱即逝，你唯一能做的，只有欣賞，以及回味。而宇宙也有屬於它自己的煙火，同樣遙遠，同樣稍縱即逝，就是快速電波爆 (Fast Radio Burst, 簡稱 FRB)，雖然我們無法以肉眼觀察他，但他所蘊含的能量與訊息，卻足以讓我們大致了解屬於自己宇宙的故事。

文／黃于綸

快速電波爆FRB 181112從遙遠的母星系出發，穿越宇宙並抵達地球的路徑。影像來源：M. Kornmesser, ESO

什麼是FRB？

Fast Radio Burst中文直接翻譯是快速電波爆，是在2007年才被觀測到的天文現象，它在宇宙深處引爆時擁有極高的能量 ($L = 10^{38} \sim 10^{42} \text{erg} \cdot \text{s}^{-1}$)，卻只有接近一毫秒的觀測時間。最有趣的是，由於近年才被澳洲的帕克斯電波望遠鏡 (Parkes Radio telescope)，如圖1，觀測到第一筆訊號，然而我們卻能在尚不完全知道其生成機制的情況下，利用它來觀測宇宙奧秘。就像逢年過節時看到的煙火一樣，不知道是誰、在哪、為什麼放，但仍能在遠處欣賞美麗的景色。

而FRB中，有些是會重複觀測到的重複源 (repeater)，就是同個源發出不只一次訊號，有些則是非重複源 (non-repeater)。當然，由於天文

學家不確定每個爆發源的週期，因此可能有些非重複源其實是因為周期太長，或是爆發時沒有被觀測到，而被誤判成非重複源。

目前FRB的起源與機制眾說紛紜，尚未有定論。科學家提出了多種模型來解釋FRB的來源，其中較主流的兩種理論分別是激變雙星模型 (Cataclysmic Binary Model) 與磁星模型 (Magnetar Model)。

其中激變雙星模型認為FRB可能來自劇烈的雙星合併事件，像是超大質量黑洞與中子星合併，或是由兩顆中子星合併。當兩個高質量星體合併時 (如黑洞與中子星的系統)，由於黑洞的引力太過強大，導致中子星因為潮汐力被撕裂，並在黑洞周圍形成吸積盤，而多餘的物質會被往外噴發，形成類似物質雲的結構。當吸積盤的物質被吸到黑洞裡

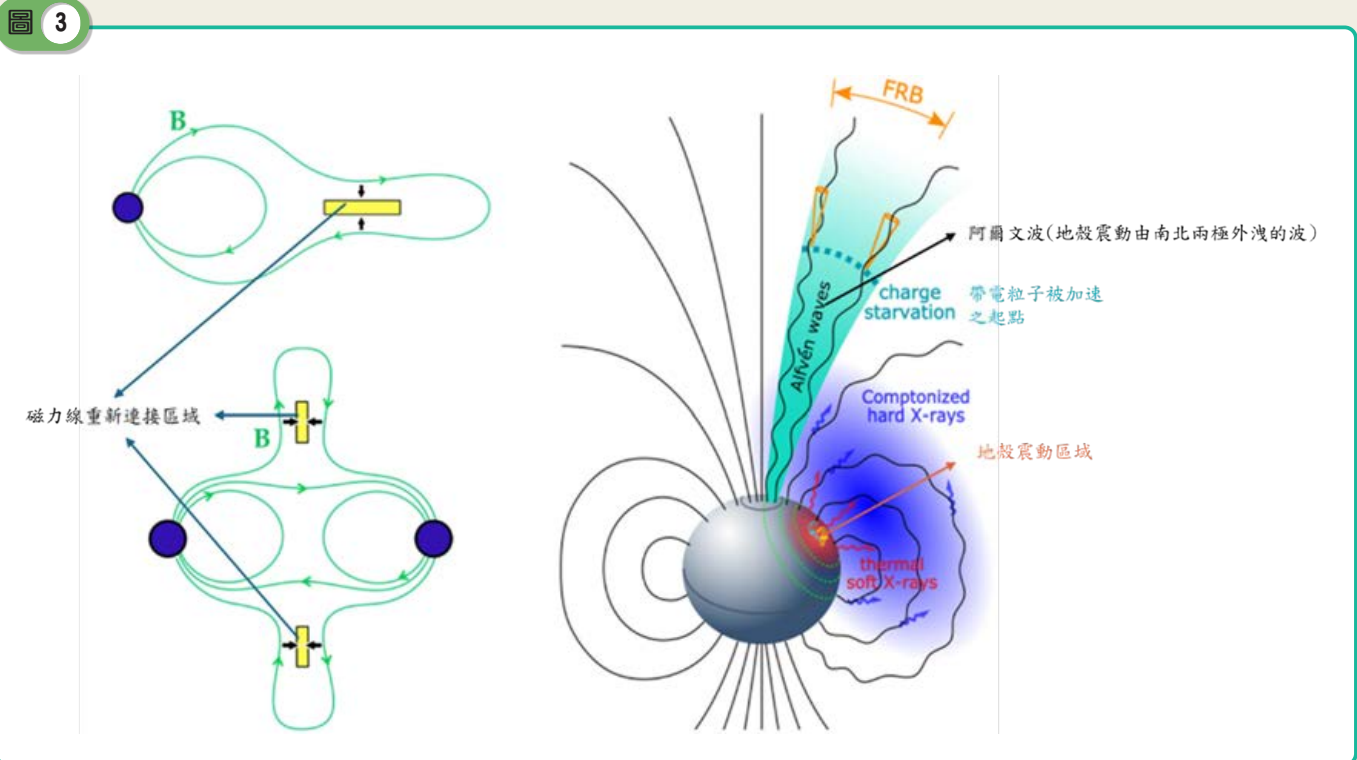
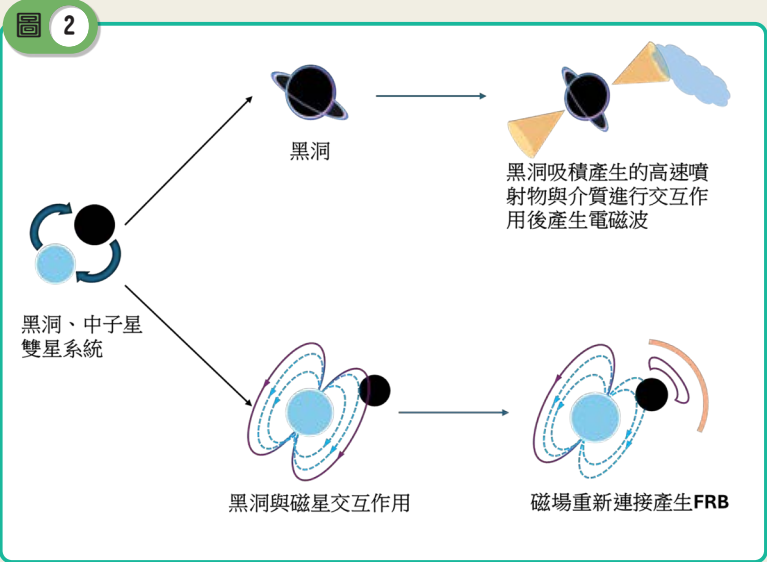
圖 1



第一個發現FRB訊號的澳洲帕克斯電波望遠鏡，口徑為64公尺，觀測範圍為700MHz~4GHz，主要用途為觀測FRB、脈衝星，以及研究宇宙背景輻射。影像來源：David McClenaghan CSIRO

時，由於要保持角動量守恆，黑洞的南北極會噴射出高速粒子流。這些噴流與外圍物質雲進行交互作用時，會形成震波（shock wave），形成FRB。而這機制也被猜測為是FRB非重複源最主流的機制，如圖2。

除了激變雙星模型（cataclysmic binary model）之外，另一個很可能的機制是磁星模型（magnetar model）。在擁有小行星或行星繞行的中子星（磁星）系統中，當行星繞著中子星公轉時，由於中子星的磁場過於強大，會導致中子星的磁場重新連接（magnetic reconnected），就如同圖3左下方部分所示。當磁場重新連接時，原本在外圍的磁力線會被甩飛出去，其中所產生的電磁波，就有可能是FRB。而磁星是磁場強度 $10^{14} \sim 10^{15} \text{G}$ 的中子星，這個模型認為由於磁星表面震動造成裂



隙，震動的能量會從南北兩極外洩，最後產生FRB，如圖3右圖所示；由於磁星的环境足夠極端，因此天文學家猜測磁星模型是目前最有可能產生極端天文現象FRB。

天文學家正在努力的尋找FRB的輻射機制，試著解開它們的身世之謎。以上兩種模型都無法在實際觀測與模型上能夠做到完全整合，主要是因為目前的觀測資料尚未完全。更甚至有科學家大膽猜測，說不定FRB這奇異的天文現象其實是某些高等文明外星人在刻意展現他們的科技以及其所在位置呢！不過，這種猜測目前並沒有實質證據支持，仍屬於科學範疇裡的『天馬行空』假說。若要真正完全搞懂FRB的起源，可能要請未來人搭時光機回來解答了，我們現在能做的就只有利用現有的FRB訊號，透過他們的特性與觀測設備的進步，將宇宙的謎團抽絲剝繭，慢慢拼湊出宇宙的真相。就如同在森林公園散步時，將手機拿來一棵樹、一株草的上網搜尋，雖然一開始只有零碎

的資訊，但為來可以逐漸將一整座森林的植物樣貌逐漸拼湊出來。因此現階段除了推論FRB的形成機制的理論模型外，累積足夠的觀測數據也很重要，這部分就有賴望遠鏡的觀測了。

如何觀測FRB

目前主要觀測FRB的望遠鏡除了前面提到第一個發現FRB的澳洲的帕克斯望遠鏡（Parkes Observatory，簡稱Parkes）外，另外還有加拿大氫強度測繪實驗（Canadian Hydrogen Intensity Mapping Experiment，簡稱CHIME），如圖4、澳洲平方公里陣列望遠鏡（Australian Square Kilometre Array Pathfinder，簡稱ASKAP），以及中國的500公尺口徑球面望遠鏡（Five-hundred-meter Aperture Spherical Telescope，簡稱FAST）。這些望遠鏡與天線陣列具有較大的觀測視窗，因此在單位時間內可以接收到更多微弱又短暫的FRB訊號。

圖 4



此為目前主要研究FRBs的加拿大CHIME陣列電波望遠鏡，觀測波段範圍為400MHz~800MHz，最初設計為觀測、研究宇宙微波背景輻射，由四個長達100公尺的拋物線圓柱體所組成。影像來源：CHIME

天空如此之大，要如何知道FRB訊號來自哪裡呢？

在觀測FRB時會遇到許多挑戰。例如，若使用單一望遠鏡（如上述提到的FAST和Parkes），其大口徑設計能夠覆蓋廣闊的天空區域，並接收到不論是強烈、微弱，亦或是多波段的FRB訊號。然而，由於僅依賴單一口徑，它只能粗略推測FRB的來向，類似於知道「臺北101在信義區」，但無法精確定位其具體位置。這種限制使得在FRB上的研究變得困難。

而在觀測的設備方面，以前面提到的CHIME為例，他們將望遠鏡排成陣列，如圖5，在天空中形成類似長方形的觀測視窗。當地球自轉時，視窗觀測到的天窗隨之跟著移動，這樣一天就可以掃視整個天球所收到的訊號，不過由於矩形的寬度不足，因此無法在瞬間觀測到所有的FRB訊號，導致可能因為漏失重複源，而將該源錯判為不重複源。

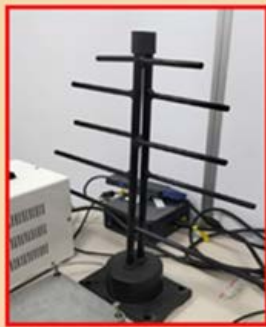
相較之下，干涉陣列望遠鏡（如ASKAP、

CHIME和甚大無線電望遠鏡陣列VLA）則可透過干涉測量技術，在觀測當下即時組合各天線數據，從而精確定位FRB來源，就像直接提供「臺北101的門牌號碼」一樣。目前，干涉陣列技術也是FRB定位最精確的方法之一。

這時你可能會想，為什麼不直接建造一個既能覆蓋大面積天空、又能精確定位訊號來源的陣列望遠鏡呢？這樣不僅能接收到更多FRB訊號，還能提升定位的準確度。

沒錯！這正是中央研究院目前正在推動的Bustling Universe Radio Survey Telescope in Taiwan（BURSTT）計畫。簡單來說，BURSTT的目標是在臺灣建設屬於我們自己的FRB陣列望遠鏡，透過擴大天空覆蓋範圍（天區覆蓋差異請見圖5），同時結合輔助天線陣列來提升定位能力，期望能超越現有的CHIME陣列。不僅能大規模接收FRB訊號，將不論是新的、舊的、強的、弱的FRB訊號盡可能收集起來，並且能達到更高的定位精度，在FRB研究領域中扮演「最強的外野手」，確保不漏接任何來自宇宙的神秘訊號，將訊號誤判的可能性降低。

圖 5



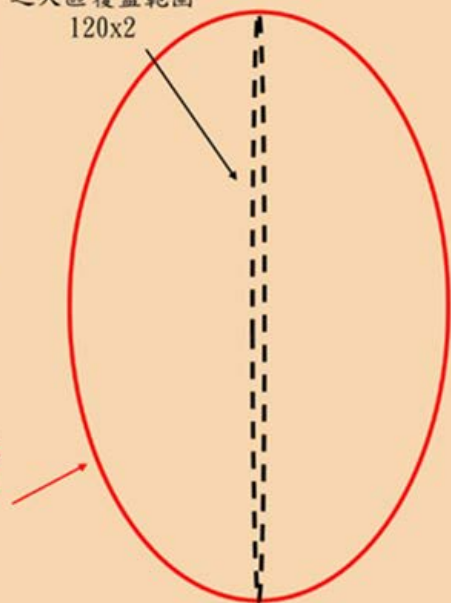
中研院使用之天線
天線增益:6dBi
偵測波段:400-800MHz



CHIME使用之天線
天線增益:2-10dBi
偵測波段:400-800MHz

CHIME使用天線
之天區覆蓋範圍
120x2

天區覆蓋範圍示意圖



中研院使用天線
之天區覆蓋範圍
120x60

dB：分貝，表示增益的強度（相對於某個基準）
i：一種理論上的完美天線，能夠均勻向所有方向發射能量

CHIME陣列望遠鏡與中央研究院使用之天線的天區覆蓋示意圖。可以看到CHIME的覆蓋範圍僅僅只有中間虛線的範圍，而目前在主站福山植物園與綠島輔助天線站皆以紅色方框所展示的天線為主。

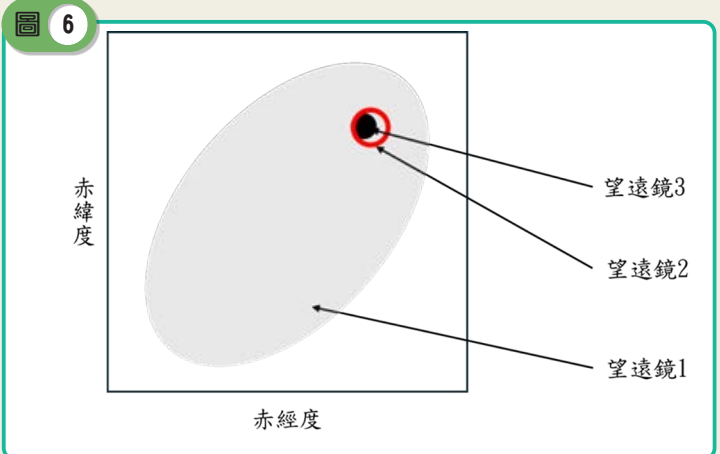
關於綠島觀測站

目前BURSTT計畫的FRB主要觀測站位於臺北的福山，除了主站外，後來還逐漸增設其他的輔助天線陣列。輔助天線陣列在研究FRB的工作中是非常重要的環節，如圖6。簡單來說，輔助天線陣列的接收訊號靈敏度會比主要陣列還要低，原因是輔助陣列的設計目的只是為了增加探測的範圍，而非深入探測、分析訊號。換句話說，若連靈敏度較弱的輔助天線都有偵測到FRB的訊號，也可以反過來印證這個訊號的真實性。

而其中一站的輔助天線觀測站就在綠島上的海洋研究站內，如圖7。

綠島海洋研究站的前身為綠島技能訓練所，設立於1992年，目的是訓練當時的累犯好讓他們擁有一項技能。這個訓練所在2002

年已經關閉，並在2007年開始計畫改建為海洋研究站，主要研究黑潮經過的綠島周圍海域時，溫暖海水中所帶來的豐富且多樣的海洋生物。由於綠島地處偏遠，光害極少，具備良好的天文觀測條件，並且來自無線電波的干擾也比較少，因此在2022年開始計畫在研究站內架設了輔助天線陣列，作為BURSTT計畫的一部分。



此圖定位FRB源的示意圖，利用多個望遠鏡來定位FRB來自於星系的準確位置。其中灰色橢圓區域是望遠鏡1的偵測區域；紅色圓圈為望遠鏡2的偵測區域；黑點為望遠鏡3的偵測區域。首先利用望遠鏡1來確定源的相對位置，再利用望遠鏡2與望遠鏡3的偵測區域相疊後精準捕捉源的絕對位置。

圖 7



這是綠島輔助天線站的現場天線照片，白色盒子為天線的配線盒。現場配置為南北向四排，東西向一排，共計16支天線，總數為64支天線，構成干涉陣列。

筆者就讀的臺東大學地理位置正好接近綠島，因此和BURSTT計畫的主要執行機構中央研究院天文及天文物理研究所（ASIAA）合作，我們主要協助天線維護、更換零件、檢修內部線路等工作。雖然這些任務看似繁瑣，但它們對於保持設備正常運作至關重要，確保FRB訊號的觀測能順利進行。

說了這麼多，FRB能夠幫助我們解開哪些宇宙奧秘呢？

FRB的色散測量（DM）

提到快速電波爆（FRB），通常會提到一種測量，稱為色散測量（Dispersion measure，簡稱DM）。當電磁波經過星際介質時，會遇到自由電子，並與自由電子進行交互作用，導致高頻率訊號比低頻率訊號先到達觀測站，如圖8，而延遲的程度取決於星際介質中電子的密度，以及電磁波的頻率，科學家利用這個延遲程度定義出一個值，稱為色散測量值（DM value，或稱為DM值）。DM值可以推測源頭到地球的距離和星際介質的密度，從而了解宇宙物質在空間中的分布，以及其組成。

如果將天文學家比喻成考古學家，上述提到的各種望遠鏡與陣列望遠鏡則如同考古學家手上的槌子與十字鎬，是我們挖掘未知的工具。至於色散測量（DM）就像是放射性碳定年法可以讓考古學家回推化石年齡，DM則可以幫助我們測定宇宙中物質的距離與分佈。而要真正了解宇宙的歷史與結構，就需要全面

的分析這些『宇宙化石』也就是FRB的起源以及機制。透過這些神秘的訊號，科學家或許能解開宇宙演化的關鍵線索。

若想掌握更多FRB的起源與機制，就必須如同考古學者分析化石年代一樣，需要將這若干平方公畝地的化石所生成的年代完全分析完成，接下來的工作就是將已知的拼圖拼上，以及將未知的部分套用理論模型進行擬合推論拼圖中缺失的部分。天文學家推測，如果我們了解了FRB更多的資訊，就可以將FRB做為一個宇宙的探針，解決目前在天文界多個懸而未解的難題。而這些難題中，其中一個就是「重子失蹤問題」。

FRB與「重子失蹤問題」

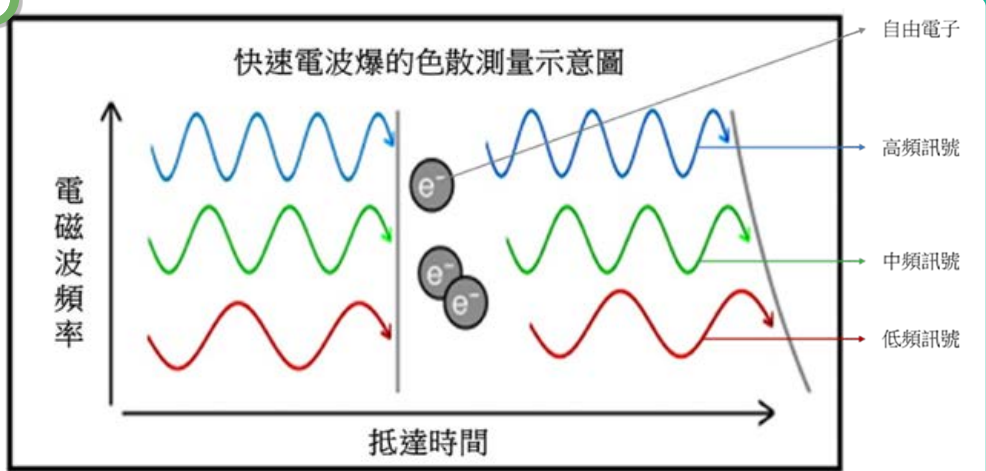
「重子（baryon）」是組成物質的一種粒子分類，由三個夸克組成。舉例來說，如果這顆重子是由一個上夸克與兩個下夸克所組成，則這顆重子是大家所熟悉的中子；若是由兩個上夸克與一個下夸克所組成，則是質子。而重子在宇宙中扮演著重要的角色，因為它們組成了所有你看到的、看不到的天體，例如恆星、行星等等，並且也是星際間塵埃（Intergalactic medium，簡稱IGM）的主要組成物質。

說了這重重子，你可能會問：「重子很重要沒錯，但關FRB什麼事？」

簡單來說，理論上根據宇宙大爆炸的模型推算，宇宙中的重子數量應該比我們實際觀測到的多。這就是在天文物理中著明的重子失蹤問題（missing baryon problem）。而當FRB經過大多數由重子構成的IGM時

圖 8

此圖為色散（Dispersion）示意圖，橫軸為時間，縱軸為頻率。可以看到訊號經過星際介質後與自由電子作用後發生色散的現象，也就是高頻訊號先到達觀測站，低頻訊延遲到達觀測站。（不同頻率的光速傳遞的速度不一樣的現象叫做『色散』）。



會產生色散效應，這就是天文學家所感興趣的。可以利用已知的FRB源來計算、推測在FRB到地球這距離之中的自由電子的數量，進而尋找『消失的重子』。找出重子之後，又可以進一步研究他們的性質，以及為什麼重子會難以觀測到。就好比在你的吸塵器前端加上雷射光，原本看不見的灰塵就也無所遁形。

回顧快速電波爆（FRB）是什麼？

說了這麼多，相信面前的你對於FRB有更多的認識，那麼就讓我們小小回顧一下什麼是快速電波爆（FRB）吧！

FRB擁有極高的能量，但持續時間極短（毫秒級）。目前的觀測顯示，部分FRB會重複爆發，而有些則是單次爆發，其來源仍是天文學研究的重大謎團之一。根據色散測量的值，可以用來推斷這個從爆發源到接收端的這段途中IGM內的電子密度，進而推算出星際介質中，所包含的宇宙中『失蹤重子』組成物質的重要粒子的數量，再進一步研究觀測與理論不相符的重子數量，找出重子失蹤問題中的問題到底在哪裡。

由於FRB在天文學上具有可應用與研究的價值，因此各國的天文界陸續提出了觀測FRB的計畫，逐漸增加陣列望遠鏡的數量，所以在FRB的訊號接收上數量上有著大幅的增加。由原本的每年不到100筆訊號，到目前的每日超過1,000筆的訊號接收，可以知道FRB在天文學的前景與重要性。

FRB讓我學到了什麼

科學研究的突破往往源於對細節的專注。回顧歷史，牛頓的經典力學理論就源自於對蘋果落地現象的思考。看似微不足道的事情，往往蘊含著改變世界的關鍵。

在研究團隊中，每個人都是不可或缺的一部分，就像機械運轉時的每顆螺絲釘，雖然微小，卻支撐著整個系統的穩定運作。沒有這些基礎，科學突破便無從談起。

過去，我曾想過要從事最酷、最前沿的科學研究，但在綠島電波觀測站與臺灣最頂尖的科學家

的工作經驗讓我深刻體會到：真正的研究並非一蹴可及，而是需要一步一腳印，穩扎穩打地構築基礎。這讓我想起2017年上映的電影『關鍵少數』

（Hidden Figures），該片背景設定於1960年代美國太空競賽期間，NASA為了發射美國第一位進行軌道飛行的太空人約翰·葛倫（John Glenn），借重一群被稱為「人類計算機」（Human Computer）的數學家進行計算。其中，凱瑟琳·強森（Katherine Johnson）、桃樂絲·沃恩（Dorothy Vaughan）和瑪麗·傑克遜（Mary Jackson）三位傑出的非裔女性，在面臨種族與性別歧視的阻礙下，仍以卓越的數學才能突破層層困難，為NASA太空計畫帶來關鍵性貢獻，最終改變歷史。

正如這些科學家們所展現的精神，在科學研究領域中，每一個微小的發現、每一個看似不起眼的步驟，都是邁向重大突破的基石。就像燦爛的煙火，每一顆細小的火花，都是點亮夜空的關鍵。

黃于綸：國立臺東大學 應用科學系 大學部學生

參考資料：

- Zhang, B. (2023). The Physics of Fast Radio Bursts. *Reviews of Modern Physics*, 95(3), 035005. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.95.035005>
- Beloborodov, A. M. (2021). Emission of magnetar bursts and precursors of neutron star mergers. *The Astrophysical Journal*, 922(2), 236. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac17e7>
- Bailes, M. (2022). The discovery and scientific potential of fast radio bursts. *Science*, 375(6578), eabj3043. <https://doi.org/10.1126/science.abj3043>
- Clarke, T. A., et al. (2024). Quantifying the coincidence between gravitational waves and fast radio bursts from neutron star – black hole mergers. arXiv:2408.02534. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2408.02534>
- Kumar, P., & Bosnjak, Z. (2020). FRB coherent emission from decay of Alfvén waves. arXiv:2004.00644. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2004.00644>
- Lu, W., Kumar, P., & Zhang, B. (2020). A unified picture of Galactic and cosmological fast radio bursts. arXiv:2005.06736. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2005.06736>

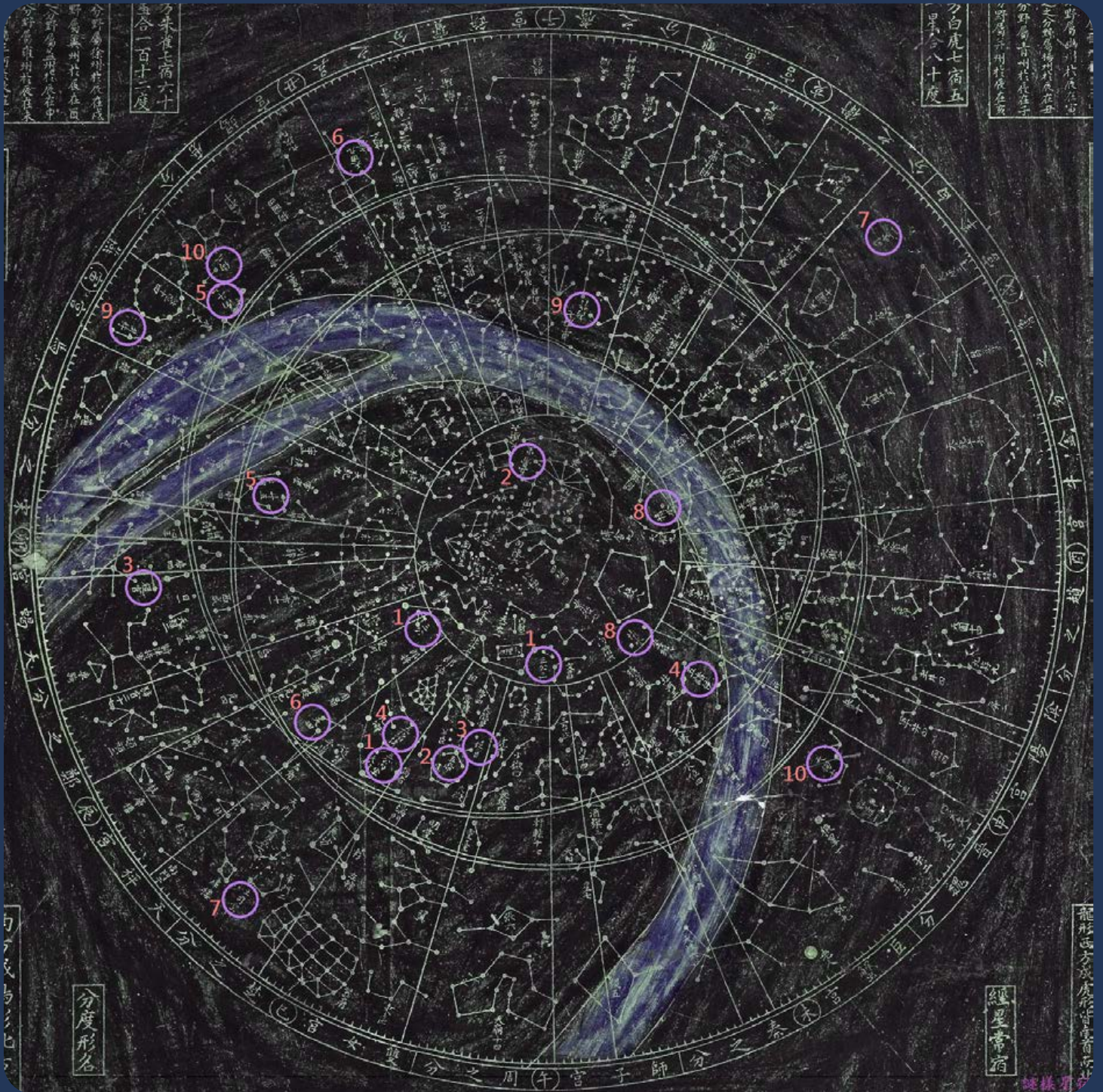


謎樣星宿

同名星官何其多

臺灣有種「菜市場名」的趣味說法，意思是相當通俗或流行的人名，因此在菜市場隨便喊就會有人回頭。但天空中的星座也同名的話，辨認時造成的困擾應該不下於市場人群中有一兩個人一起應聲回頭吧？然而天文官好像不太在乎，同名者竟然超乎想像地多，如下圖所圈出的10組星官。難道他們會像回頭後尷尬的人們一樣，僅僅一笑置之嗎？

文／歐陽亮



首圖：同樣名稱的星官超乎想像地多，從流傳至韓國的古星圖《天象列次分野之圖》即可發現10組同名的星官。

其實，古今中外的研究者並未輕易放過這個問題，謎樣星宿已發現的資料就有：

- ①南宋魏了翁《經外雜抄》之論星垣諸座異同，抄自鄒准《星象考》
- ②清代吳肅公《天官考異》

- ③伊世同《中西對照恆星圖表》¹
- ④日本學者大崎正次《中國星座的歷史》²
- ⑤《中國古代天象記錄的研究與應用》³

他們彼此間各有少許遺缺，其差異見於下方表1右方①至⑤欄。

表 1 古星圖之星名重複狀況對照表

對應首圖編號	星名	三家星與位置	①	②	③	④	⑤
	天樞	●Uma北斗 ●Cam北極			✓		✓
	上衛	●Cam紫微右 ●Dra紫微左			✓		✓
	少衛	●Cam紫微右 ●Cep紫微左			✓		✓
	太子	●UMi北極 ●Leo太微 ○Sco心	✓	✓	✓		✓
	庶子	●UMi北極 ○Sco心					✓
1	三公	●CVn紫微 ●Vir太微 ●Uma紫微	✓	✓	✓	✓	✓
2	五帝(內)座	●Leo太微 ●Cep紫微		✓			
3	從官	●Leo太微 ●Lup房	✓	✓	✓	✓	✓
4	(內)五諸侯	●Gem井 ●Com太微		✓	✓		
5	斗	●Her天市 ○Sgr斗			✓		
	韓、楚、周、秦、鄭、晉、魏、趙、齊、燕、(吳)越	●Her、Ser、Oph、Aq1天市 ●Cap、Mic女	✓		✓		
6	天田	●Vir角 ●Cap牛	✓	✓	✓	✓	✓
7	土司空	●Cet奎 ●Hya翼或軫	✓	✓		✓	✓
8	積水	●Per胃 ●Aur井	✓	✓	✓	✓	✓
	御女	●Leo星 ●Dra紫微	✓	✓	✓		
9	杵	●Ara箕 ●Peg危	✓	✓	✓	✓	✓
	柱	●Aur畢 ●Cen角			✓		
	積尸(氣)	●Per胃 ○Cnc鬼			✓	✓	✓
	天紀	●Her天市 ●Vel鬼或柳		✓		✓	✓
	天倉、天淵、天津、天門、明堂、大辰、天雞						✓
10	(天)狗	●Pyx鬼 ●Sgr斗		✓			

以上星名中，天樞到庶子以及天市垣的韓、楚等國名為星官內附屬單星的星名，如圖1、圖2；括弧中的字省略後亦可視為同名；至於天倉到天雞則為星官之別名造成同名的現象，較少為人知悉。第

三欄的三家星表示古代占星派別，●、●、●分別代表石氏、甘氏、巫咸氏體系，圓點後為西洋星座位置（以清代星官為準）以及其所屬的三垣二十八星宿分區；若是○則屬二十八宿之本體。

不過有些同名星並未列入，包括：

- ① 《天官考異》認為「太尊」一在斗前一在張北，疑為步天歌「紫微宮：太尊只向三公明……張宿：太尊一星直上黃」有兩處出現太尊所導致，實為同一顆。
- ② 太尊原名天尊，而在日本《三家簿讚》曾與「天樽」同名⁴。
- ③ 《中國星座的歷史》提到《史記·天官書》曾有一個「天潢」在王良旁，不過漢代後已消失，有可能是現在的天津⁵，與目前在五車內的天潢不同。
- ④ 鈇鑽在《三家簿讚》和敦煌寫本Pelliot chinois 2512曾出現過同名，巫咸氏的鈇鑽又可稱鈇鉞，現在則為斧鉞。

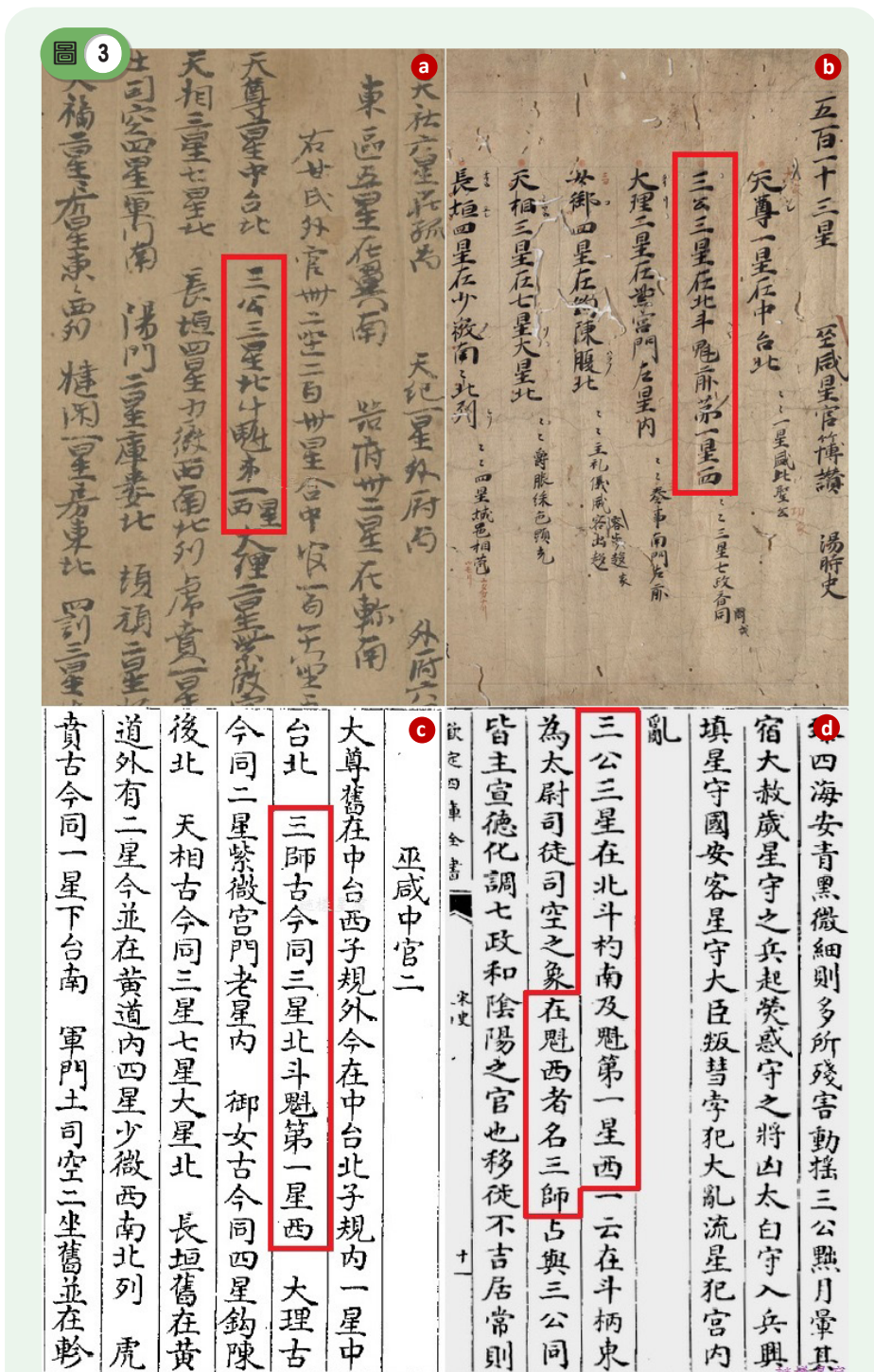
另外在翼軫之間的土司空四星，其實已在清代消失；在柳宿南邊的天紀一星，則被改為天記。至於「天樞內極星不見」的天樞是渾儀之構造名稱，也用在妖星名稱，需檢視上下文判定。現代研究者引用古天象記錄時，若誤認成另一個同名星官，將導致嚴重的位置計算失誤，因此不可不慎。

為何同名？

為什麼星官有這麼多雙胞胎甚至多胞胎？謎樣星宿認為原因十分多樣化，包括：

- ① 因為需求相同而命名，例如三垣內都有帝的座位；積水都在「天船」和「井宿」的裡面或附近；積尸都在「大陵」與「鬼宿」中央。
- ② 不同占星家訂出相同的星名，經三家星官合併與定紀後卻仍保留。
- ③ 因為古代朝代更迭形成知識斷層，以及抄寫增加許多異體字，讓星名產生變化。

同名的因素需各別判斷，例如兩個「三公」都屬於甘氏星官，顯然不是②造成，而是③：太微垣內的三公原名「三公內座」，如首圖之編號1，到宋代後才改為三公。但三公還曾有另外一個，導致同名竟高達三個，此即大熊座內的「三師」：在敦煌寫本Pelliot chinois 2512、《三家簿讚》與《天象列次分野之圖》都寫為三公，而《開元占經》因版本或篇章不同以致於兩種稱呼都有，《宋史》中則兩名稱並存，如圖3。



三公的同名星官高達三個，其中三師在敦煌寫本Pelliot chinois 2512 a、《三家星官簿讚》b與《天象列次分野之圖》(首圖)都寫為三公，而《開元占經》文淵閣版本之卷一百十稱三師c，在《宋史》中則兩名稱並存d。《三家星官簿讚》資料來源：京都府立京都學・歷彩館 京の記憶アーカイブ

有些星圖則會加字區分，例如《天象列次分野之圖》將「杵」寫為**內杵**與**外杵**，如首圖之編號9。若觀察每一組同名者（不含附屬單星與別名），大多相距超過一宿，只有兩個三公在北斗前後相距25度、斗宿與天市垣的斗距離約30多度、以及兩顆積水亦30幾度，比較容易混淆。至於古人記錄時如何區別它們？可在前面加上星官名，如「星出『**北斗**』**天樞南**」、「星出『**北極**』**天樞北**」。

比較同名星所屬的三家星官，剛好都在同一家者（附屬星名與別名不計），有三公、天田與天狗，且都是甘氏。這是否表示甘氏也有合併不同派別的痕跡？這種可能性目前難以確認。至於星名相近的「**大角**」與「**角宿**」、「**織女**」與「**女宿**」、

「**牽牛**」與「**牛宿**」⁶則可能與**星座變遷**過程有關，詳情請參考連結資料。

同名星官之百年懸案

雖然有些同名星官已消失其中一個，但也有些竟然兩個都找不到！近百年前的天文著作《**星象統箋**》發現有個神秘星官「**梁宮**」分別在**胃宿**與**昴宿**，其他古書皆未曾提過，如圖4。⁷但查看各種古星圖，完全沒有任何蹤影，神隱程度比**器府**還高出許多！更可疑的是，怎麼會在相鄰的兩宿裡命名兩個一樣的星官？這樣難道不會困擾歷代天文官和自己嗎？

圖 4

胃 宿 箋

天·困五星屬婁，餘星屬昴，大陵西三星屬婁，東五星屬胃，是則割星座以分屬二宿，與步天歌亦不合，於理似亦未當。文獻通考，**胃宿之內有梁宮**，歷考各書均未載及之。舒里梗考中國古時星座最詳，亦未列入。茲將通考所載梁宮方位附入。梁宮距西北星，去極五十二度三十三分，入胃宿十一度四十九分。備實測時參考之用。

昴 宿 箋

志有之，正義曰，蓋脫簡也。武密以芻蕘屬胃，以卷舌屬胃又屬昴，芻蕘與天苑比連，天苑屬昴，芻蕘亦應屬昴。卷舌西星雖未入昴，而全座盡在昴上，其屬昴宜矣。乾象新書以芻蕘屬婁，卷舌西三星屬胃，東三星屬昴，天苑西八星屬胃，東八星屬昴。以一星座而分跨兩宿，自以屬于一宿為宜。文獻通考於胃宿之內，載梁宮星座，**今於昴宿之內，又見梁宮之名**，其方位與胃宿所載者不同，仍將方位附記於此，容俟考究有得，再為訂正。梁宮北星，去極六十七度五十三分，入昴宿四度二十五分。

謎樣

民初高魯《**星象統箋**》記載了神秘星官「**梁宮**」，在**胃宿**與**昴宿**都有，但其他古書卻未提過。

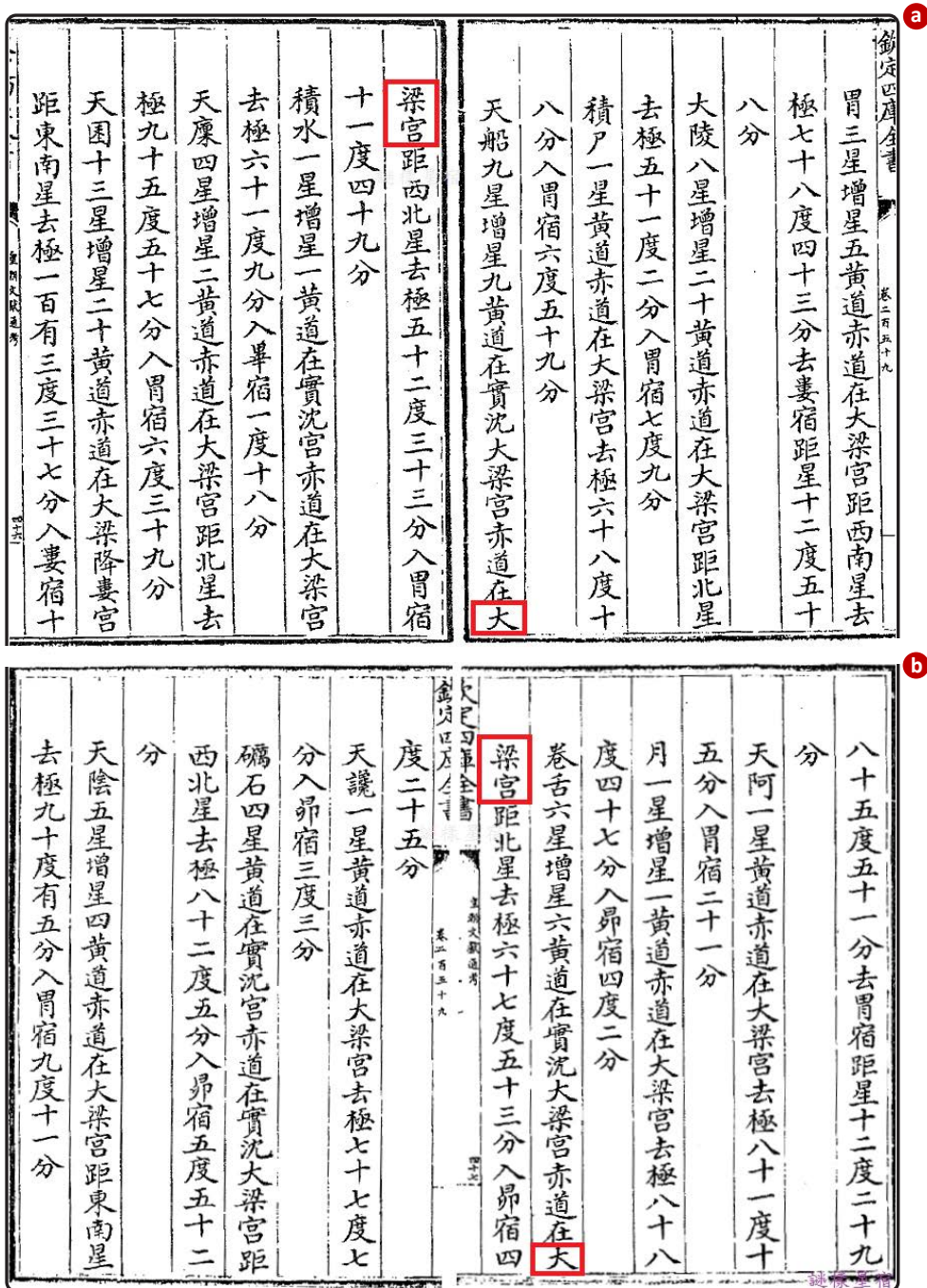
會不會只是同一個但歸屬不同星宿所造成的差異？但是從兩者的位置數據來看，很明顯不是同一個。過了五十年後，天文學家陳遵媯在《中國天文學史》依舊未解開這個謎團⁸，僅說明此星座只見於《文獻通考》，但謎樣星宿詳查《文獻通考》後並無此星名。

這時，星官位置的「精度」成了破案線索：《星象統箋》顯示梁宮的去極與入宿度都精確到角分，可是《文獻通考》為元代所寫，其記載之《宋兩朝天文志》位置精度只到半度，很明顯地不是出自這部書。

那麼是哪一本書呢？清代有一部近乎同名的《皇朝文獻通考》

嫌疑最大，精度可到角分。循線追蹤後，謎底揭曉：該書描述胃宿的天船九星時，剛好在「大梁宮」的梁字換頁，如圖5 a，看起來頗像有個星官叫做梁宮。同樣，在昴宿的卷舌六星段落裡也在梁字換行，如圖5 b，造成相同的錯覺。其實大梁宮只是該星官所在的十二次名稱而已。就這樣，謎樣星宿不小心解開一個民初至今困擾天文學者的小謎團了。

圖 5



清代《皇朝文獻通考》的天船九星段落剛好在「大梁宮」的梁字換頁，如 a，另外卷舌六星段落也在梁字換行，如 b。兩者的位置數據皆同於《星象統箋》。資料來源：中國哲學書電子化計劃

同名需避諱

漢字文化圈的古籍，常為了尊重君主或師長名字而刻意改字迴避，這種習慣稱為「避諱」，不同時代有不同的規定。有趣的是，天子雖受命於天，但有時候天空的星官卻因為剛好和當時皇帝名字一樣而硬被改掉。果然對人來說，上級還是比天重要一些。

例如清代雍正年間為了避康熙皇帝名字「玄燁」中的玄，規定玄武、玄戈改寫為元武、元戈，即使收錄的是宋代的書也會將其中星名改了，如圖6；「青丘」則為了避孔子的

名字「丘」而加上邑部變成青邱⁹，雍正之前的《方星圖》則未改，如圖1右下紅圈。

不過避諱理由也有相反的「惡諱」，是因為嫌惡相關字詞而故意不寫的。在清末的太平天國因為忌諱「鬼」字，其發佈的天曆就將鬼宿改魁宿。¹⁰

還有人利用同名避諱來斷定年代，不過已有的異體或俗體字不能做為年代判斷，需謹慎選擇。例如英法學者從《敦煌星圖》所使用的避諱文字將其繪製年代確定為公元649年至公元684年之間¹¹，因為在《敦煌星圖》之雲氣圖中，「民」字缺末筆，如下一頁的圖7，以避開唐太宗李世明的名字。由於缺筆字的可信度較高¹²，較能成為有力的間接證明。

圖 6

右渾象中外官星圖二凡二百四十六名一千二百八十一
星分布于四方周遍天體惟南極入地常隱不見紫微宮常
見不隱餘星近日而伏遠日而出四時互見二十八宿為十
二次三百六十五度有畸日月五星之所舍也史志曰東宮
蒼龍謂角亢氏房心尾箕七宿其形如龍在東方故曰蒼龍
也南宮朱鳥謂東井輿鬼柳七宿張翼軫七宿其形如鶉鳥
在南方故曰朱鳥也西宮咸池白虎謂奎婁胃昂畢觜鶻參
為白虎在西方故曰白虎也北方元武謂南斗牽牛女虛危
營室東壁有龜蛇體在北方故曰元武也凡星皆隨天左旋
日月五星常違天右轉昏曉于是乎正寒暑于是乎生歲時
是乎成所以著于渾象者將以俯察而知七政行度之所



清代道光年間《守山閣叢書》即使收錄的是宋代《新儀象法要》也會為了避諱而將其中星名改掉，如圖中玄武、玄戈變為元武、元戈。資料來源：中國哲學書電子化計劃

另外上一期謎樣星宿專欄介紹的《天文正義》這本書，也刻意避開了康熙與乾隆名諱，包括弦、弘字各缺末筆的一點，或將弘的△改寫為口。不過謎樣星宿也意外發現故宮版有兩個弘字未改，珍本版有四個弦字都寫了最末一點。這種大不敬若被發現會有什麼處分？其實很難說，因為就算在文字獄最慘烈的乾隆四十年前後仍有漏避與誤書，也大多不被懲處，成案者常是被仇人控告的。¹³

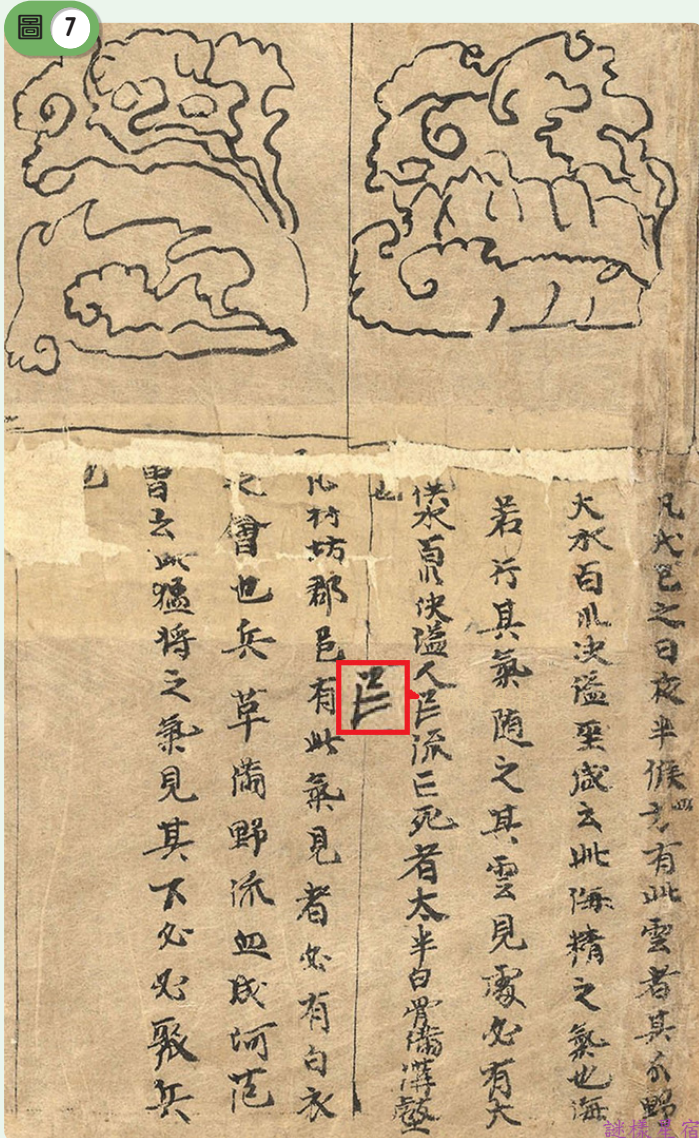
同名異名雜處

既然有這麼多同名的星星，是否也有同一顆星卻擁有許多名字的相反案例？其實這種情形更多，因為星座在人類歷史上從來沒有停止過變遷的腳步。幾千年來星星的排列其實相差無幾，但人們連線的方式卻不斷變化，由歲差所導致的可見範圍也不一樣，於是天空裡的星星被不同時代的人取了各種不同的名字。「一星多名」與「多星同名」混合在天上，就像菜市場一樣，好不熱鬧呀。

歐陽亮：天文愛好者，曾獲2001年尊親天文獎第二等一行獎，於2009全球天文年特展擔任解說員。

部落格：「謎樣星宿」—

<https://liangouystar.blogspot.com/>



同名避諱可用來判斷星圖年代，《敦煌星圖》之雲氣圖中，有「民」字缺了末筆，以避唐太宗李世民的名字。資料來源：International Dunhuang Programme

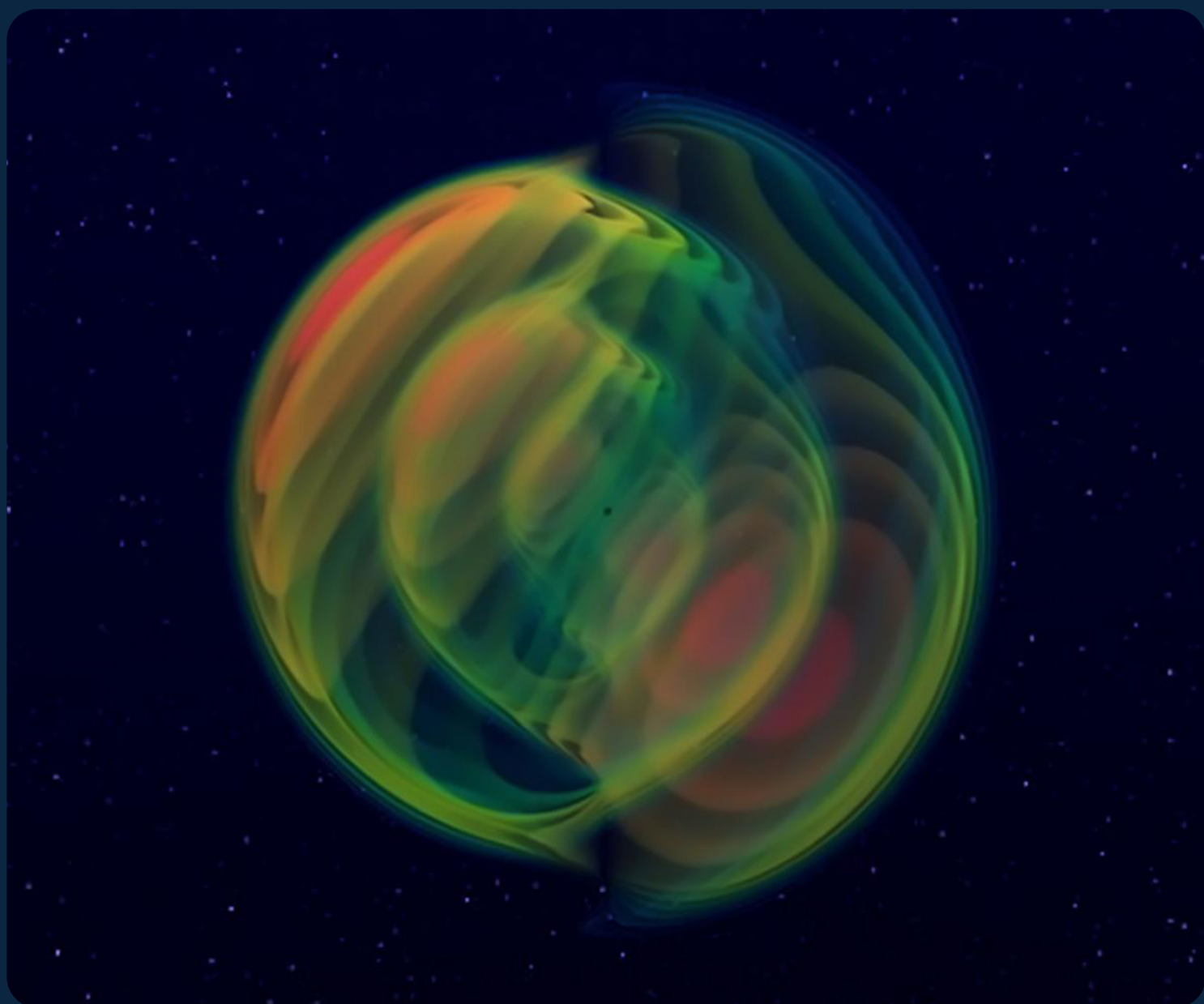
附註：

1. 伊世同《中西對照恆星圖表1950.0》星表分冊，科學出版社，1981，頁184。
2. 大崎正次《中國の星座の歴史》，雄山閣，1987，普及版2023，頁194~197。
3. 莊威鳳主編《中國古代天象記錄的研究與應用》，中國科學技術出版社，2013，頁194~196。
4. 潘鼐《中國恆星觀測史》，上海學林出版社，2009，頁169。
5. 潘鼐《中國恆星觀測史》，頁106。
6. 陳遵媯《中國天文學史》第二冊，明文書局，1985，頁65~67；新城新藏《東洋天文學史研究》，中華學藝社，1933，頁267~268。
7. 中央研究院天文研究所專刊：高魯《星象統箋》，1933，頁113、119。
8. 陳遵媯《中國天文學史》，頁118、120。
9. 黃一農《清代避諱研究：e考據的學術實踐》，國立清華大學出版社，2024，頁110、399。
10. 羅爾綱《太平天國史》卷三十二天曆。
11. Jean-Marc Bonnet-Bidaud, Françoise Praderie, Susan Whitfield "The Dunhuang Chinese sky: A comprehensive study of the oldest known star atlas", Journal of Astronomical History and Heritage, 12(1), 39-59 (2009), p50.
12. 黃一農《清代避諱研究：e考據的學術實踐》，頁198、469。
13. 黃一農《清代避諱研究：e考據的學術實踐》，頁127。

愛因斯坦的重力波預言及實現之路

1905年愛因斯坦發表了四篇奇蹟年論文，其中包含了狹義相對論，1907年，愛因斯坦開始發展重力相關的廣義相對論，並最終於1915年完成發表，重新定義了我們對「重力」的理解。又過了一年，他在《重力場方程的近似解》一文中推導出一個大膽的結論：如果宇宙中有巨大的質量快速移動或碰撞，將會在時空中激起微弱的波動，這些「波動」如同宇宙的漣漪，穿越整個時空。

文／許晉翹



此示意圖中所展現，為兩個相互繞轉的黑洞合併之前瞬間，放射出來的三維重力波模擬圖。圖片來源：LIGO

時間恍惚了一百年，那個當初只存在於數學中的預言，終於在2016年被科學家證實存在，在臺北天文館展示場的一隅，我們將透過影片展示，一同走進這場從理論到實驗的長征，傾聽宇宙深處的低語。

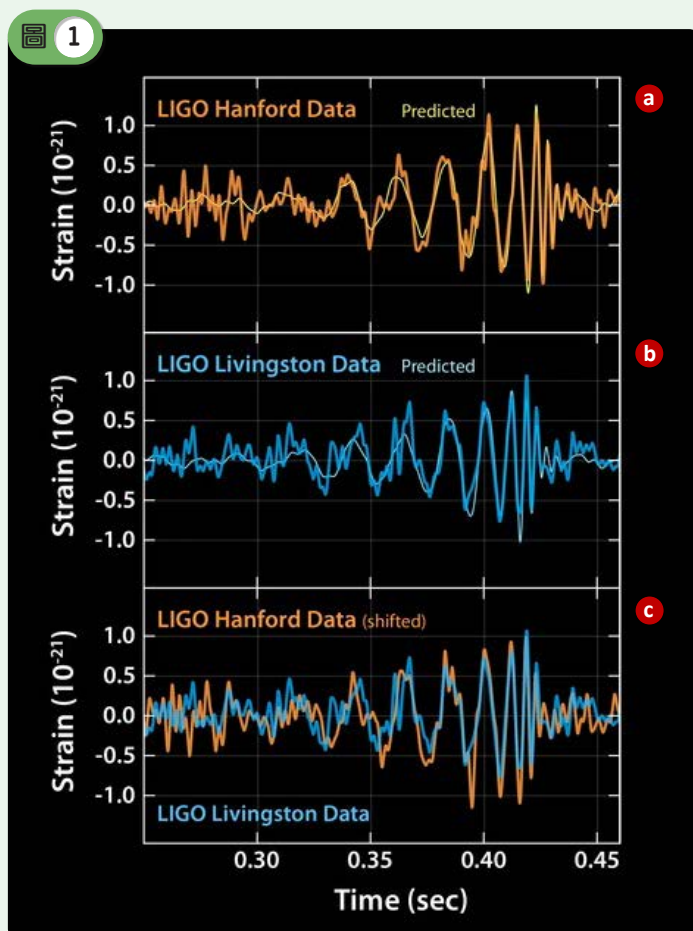
一百年的沉默 從愛因斯坦到LIGO

愛因斯坦在1916年首次提出重力波的概念，但他本人其實懷疑人類是否有能力檢測這樣微弱的現象，重力波就像是在一整個銀河系範圍內掀起一絲

絲不可思議的時空波動，當它們通過地球時，經過更嚴謹的計算，它的長度量級僅相當於原子核的百萬分之一倍。

然而，到了21世紀初，科學家終於打造出一台能偵測這些時空微震的儀器：雷射干涉重力波天文臺（Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory，簡稱LIGO）。2015年9月14日，LIGO首次偵測到來自13億光年外的雙黑洞合併事件所產生的重力波訊號，這不只是一次天文觀測，更是物理學史上的重大突破，如圖1，也讓愛因斯坦的預言跨越世紀成真，或許也是為了紀念愛因斯坦的廣義相對論100年，才選在那一年發表。

LIGO偵測到的重力波事件，與愛因斯坦所預言的重力波形態相符



左圖的數據，顯示設置在美國路易斯安那州利文斯頓和華盛頓州漢福德的LIGO干涉儀所接收到的重力波訊號。這些訊號來自13億光年外兩個質量約為太陽30倍的黑洞合併事件。

a 和 **b** 分別顯示來自利文斯頓測站與漢福德測站的觀測數據，並加上愛因斯坦廣義相對論推導的理論波形（黃線標示）作為對照。呈現兩個相互繞轉黑洞合併過程所產生的重力波形，以及儀器固有的背景雜訊。圖中橫軸為時間，縱軸為應變（strain），即空間因重力波通過而被微小拉伸或壓縮的比例。

從圖中可見，實際的觀測資料與理論推演結果非常近似，驗證了愛因斯坦廣義相對論的預測。

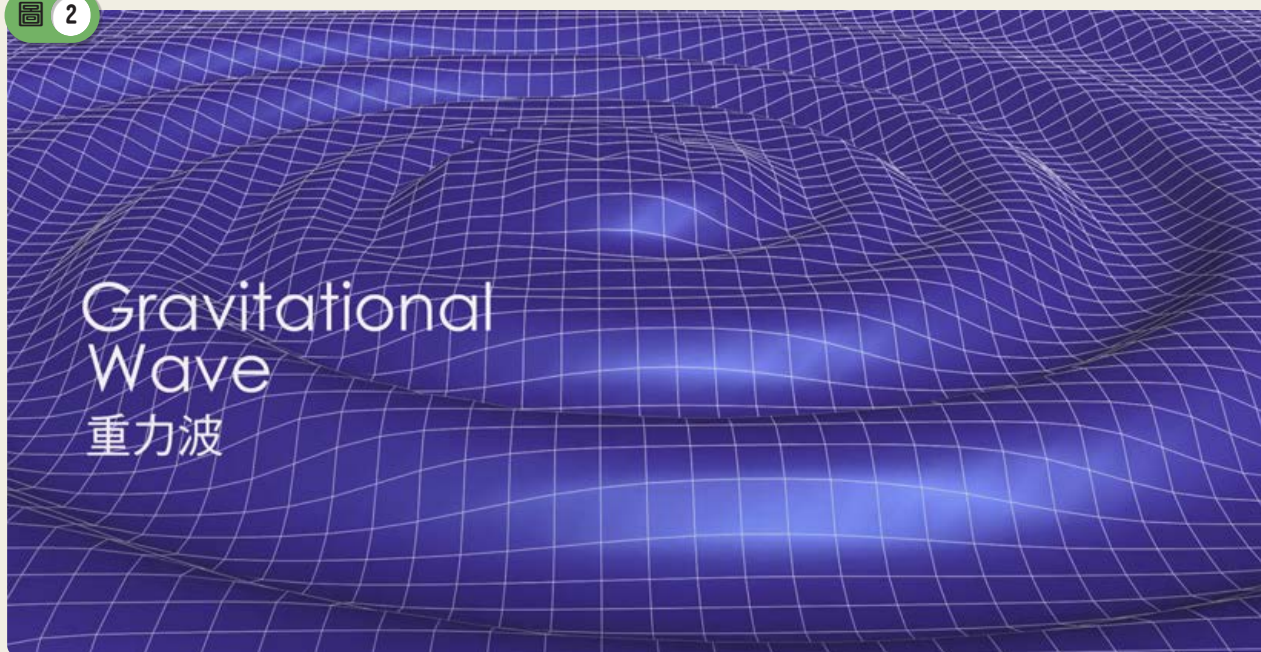
c 則綜合了兩座探測站數據相互對照。由於這兩組干涉儀在地面上的方向排列不同，為了方便比較，將漢福德測站的訊號進行了反轉，並根據重力波從利文斯頓傳至漢福德所需的時間差（約0.007秒）進行了時間校正。結果顯示兩測站觀測到是相同的事件，進一步確認此次重力波的成功探測。

看見時空的震動 重力波展示影片

如果你進入展示場三樓的一個劇院般的小角落，會看到一段令人屏息的動畫影片，描繪兩個黑洞旋轉、碰撞、融合，並釋出一道波浪般的時空漣漪，那正是重力波的視覺化重現。影片中，科學家

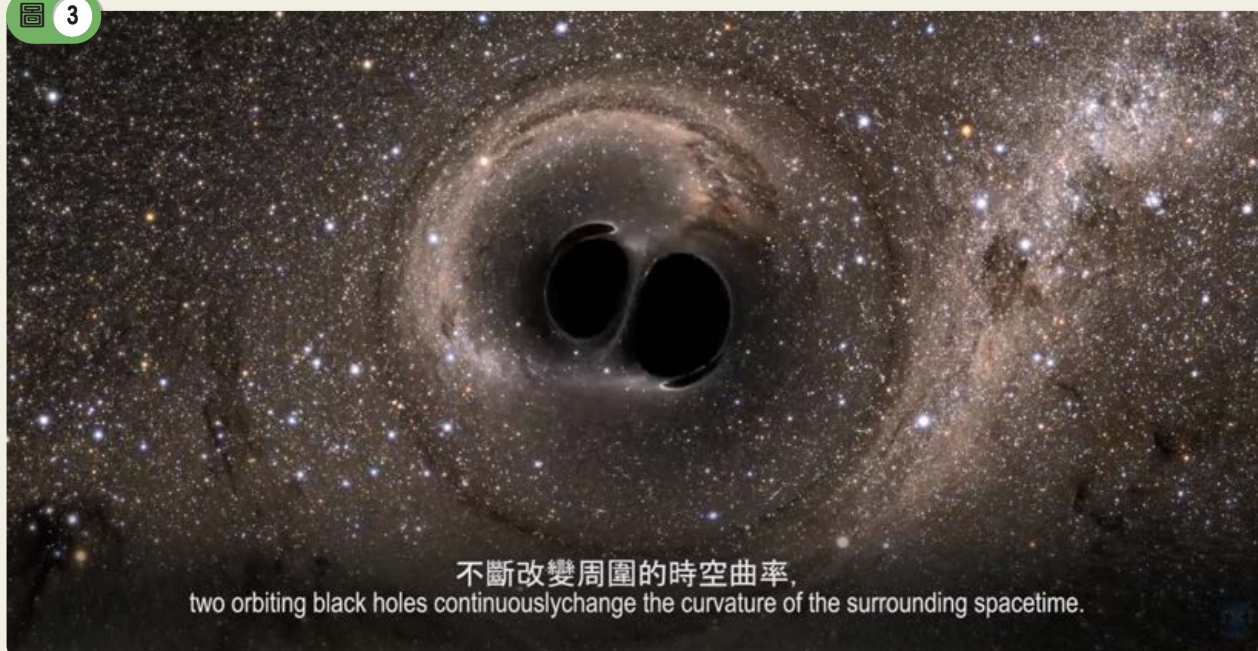
透過電腦模擬將這些原本無形的現象轉換成可感知的影像，並且將重力波「轉譯」成人耳可聽的頻率，讓我們真正「聽見」宇宙的聲音。這段展示不僅是視覺享受，更蘊含著深刻的物理意涵，你可以看到波動如何擠壓與拉伸時空，如何穿越億萬年後仍留有訊號到達地球，如圖2~圖5。這一切的背後，關鍵在於一項精密的實驗裝置：LIGO。它的工

圖 2



重力波是一種在時空中傳遞的波動

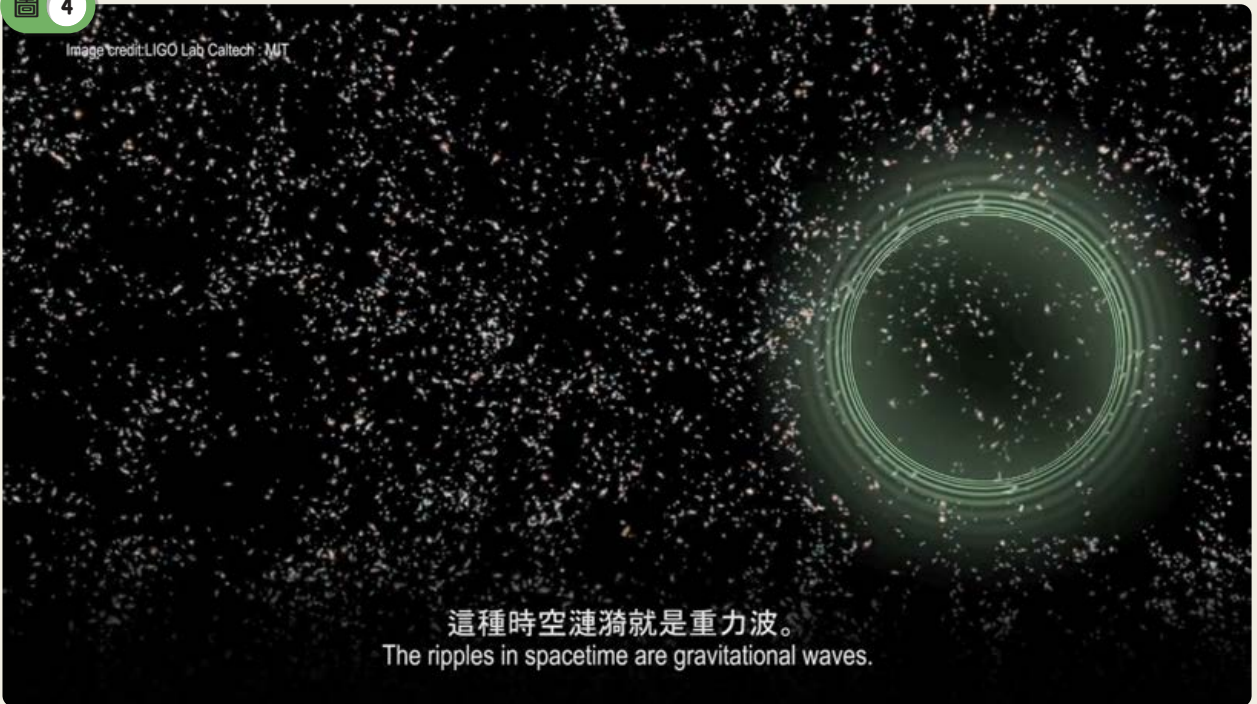
圖 3



相互繞轉且即將合併的兩個黑洞，其重力場和發出的重力波彎曲從黑洞後方射來的光線，形成此奇特的景象。

4

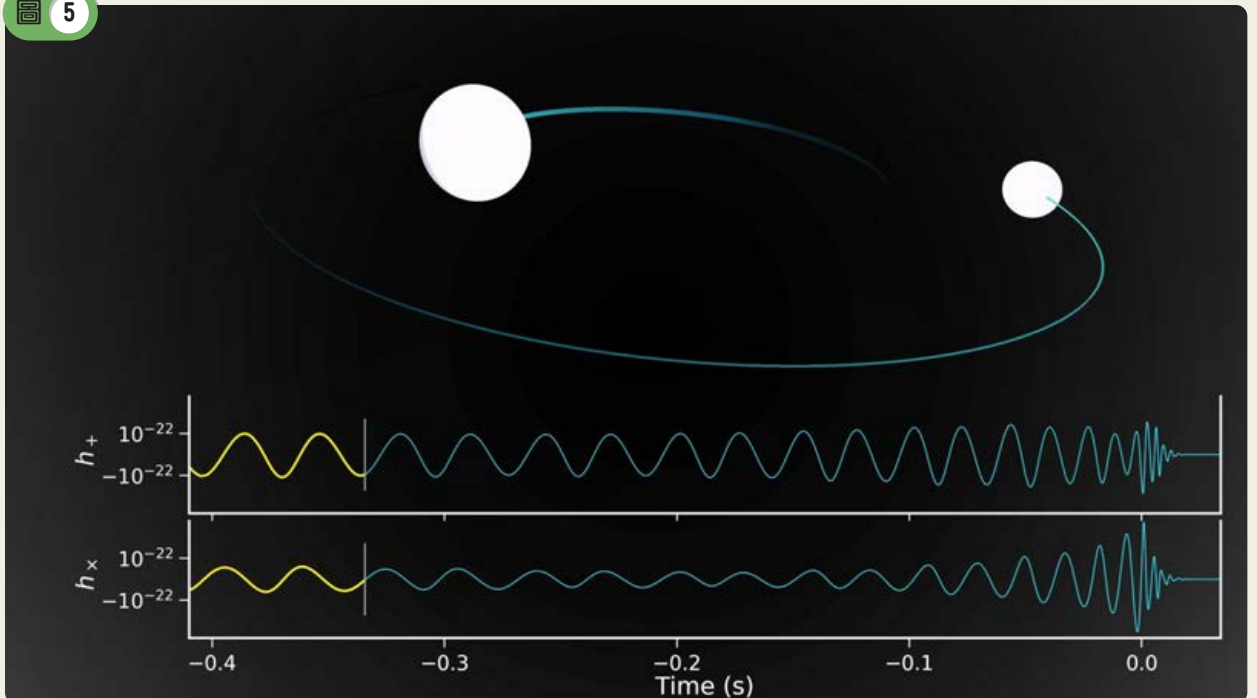
Image credit: LIGO Lab, Caltech, MIT



這種時空漣漪就是重力波。
The ripples in spacetime are gravitational waves.

黑洞相互合併瞬間，將會發出合併過程中最強的重力波，如同漣漪般向四面八方傳遞出去。

5



黑洞相互合併事件發出的重力波，頻率和人耳可聽見的聲波頻率十分接近，因此若將重力波轉換為波形、頻率相同的聲波，我們就可以聽見它的聲音。

作原理是：讓雷射光分成兩道光束，沿著相互垂直、各長達4公里的真空管道前進，再反射回來。這兩道光會在交會點重新干涉，若時空因重力波而微微被壓縮或拉伸，即使只有比原子核還小的變化，也會造成光程長度不一，從而改變干涉圖案，如圖6。

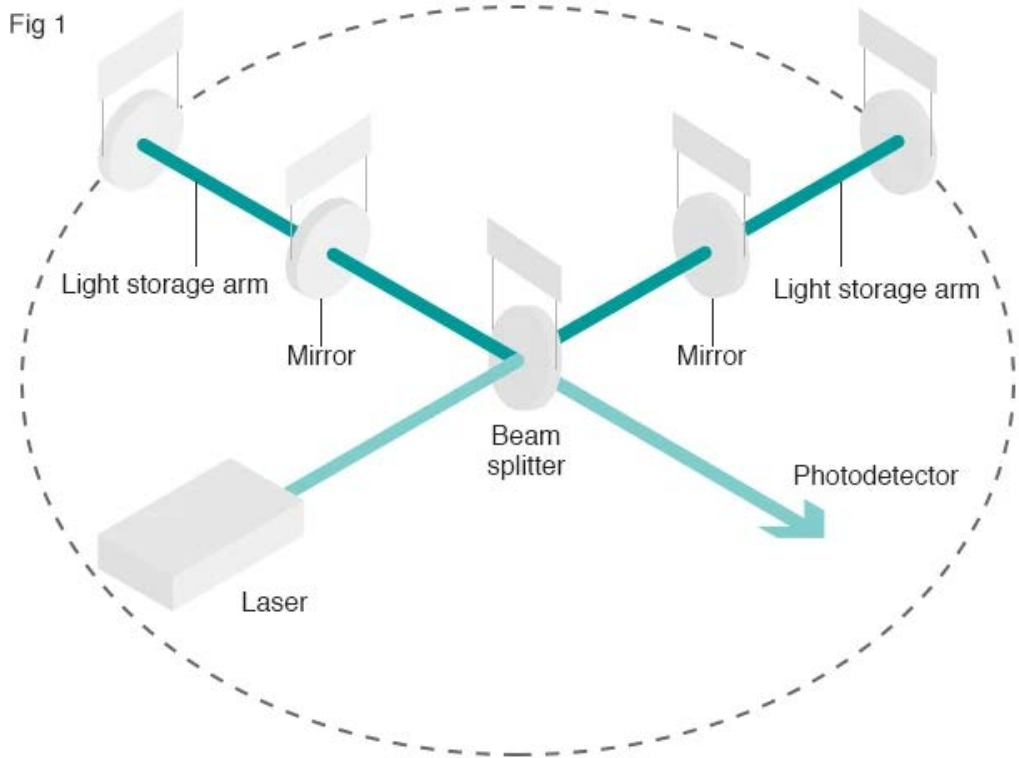
這種測量方式的靈感，可追溯到十九世紀的「邁克生干涉儀」(Michelson Interferometer)，這是一項原本用來測試以太假說的經典實驗裝置，只不過把實驗裝置的尺度從40公分放大到4公里的程度，LIGO

就像被哆啦A夢的放大燈照到的邁克生干涉儀一樣。如今，這個原理被延伸應用到極致，成為人類首次「聽見」宇宙重力波的關鍵技術。

重力波到底有多微弱？打個比方，要從整個太陽系的直徑裡找到一個不到原子核寬度的變化，除了實驗裝置本身要夠靈敏之外，還要排除所有地面的震動、熱擾動、甚至雷射本身也會產生雜訊，這些都是一場與物理極限拔河的科技挑戰，也讓LIGO成為現代物理史上最具代表性的實驗之一。

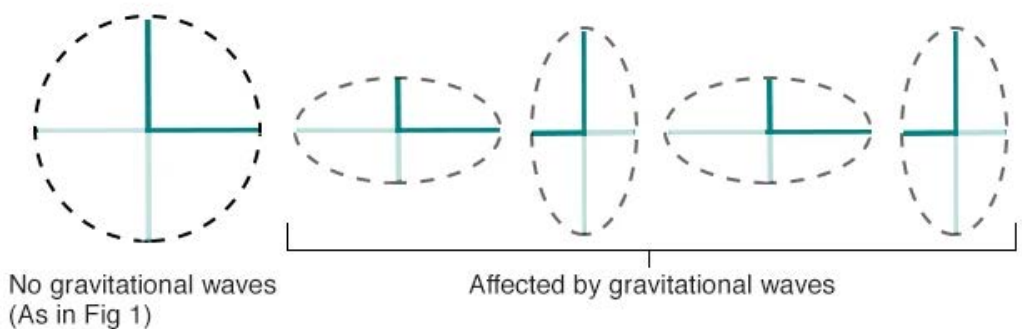
圖 6

An interferometer: How a gravitational wave hunter works



LIGO的雷射干涉儀原理示意圖。
圖片來源：BBC News

Gravitational waves alternately stretch and squeeze the space they pass through



Source: LIGO/NSF



宇宙的全新觀測視窗 為什麼重力波重要？

過去，人類認識宇宙主要仰賴「光」：可見光、紅外線、X光、伽瑪射線……但這些都需要穿過宇宙的塵埃與氣體，而有些事件，如黑洞合併，本身幾乎不會發出任何光。

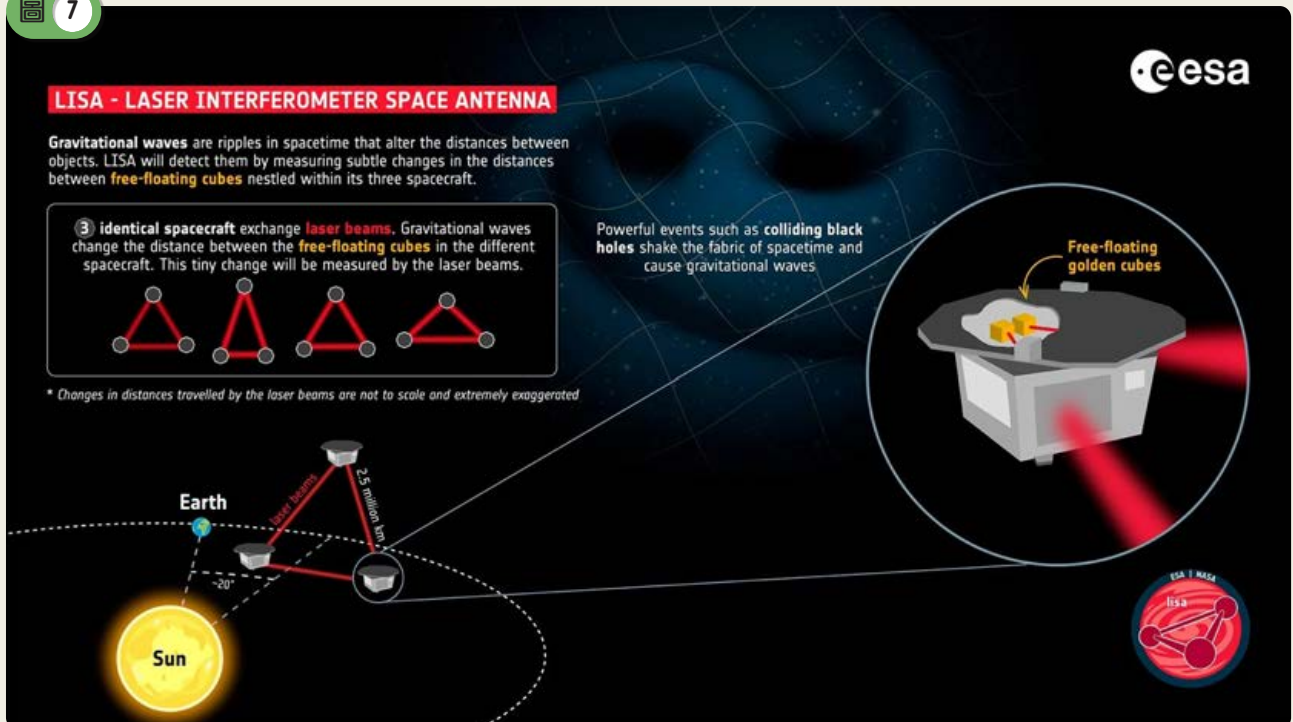
重力波觀測提供了另一種全新的方式，不需要依賴光線，而是直接感應到空間本身的震動。這讓我們能夠「聽見」以往無法觀察到的宇宙事件，也開啓了「重力波天文學」的嶄新時代，如圖7。從雙中子星合併、黑洞旋轉、甚至未來宇宙誕生初期的原始重力波訊號，這些都可能成為新的觀測對象。

回到展示場 你與宇宙漣漪的距離

臺北天文館展示場的重力波展示影片與看板，正是為了讓觀眾能夠在短短幾分鐘內理解這段從理論到實證的壯麗旅程。從愛因斯坦的紙筆，到干涉儀的細緻光程，從無聲的黑洞舞蹈，到人類耳中「啾」的一聲重力波訊號——這是一段橫跨世紀、跨越維度的故事，但卻以50秒的影片呈現給您。下次不妨停下腳步，想像你也正被那一道從數十億年前出發的時空波動輕輕掃過，在那一瞬間，你與宇宙的距離，其實比你認為的還要近得多。

許晉翊：臺北市立天文科學教育館

圖 7

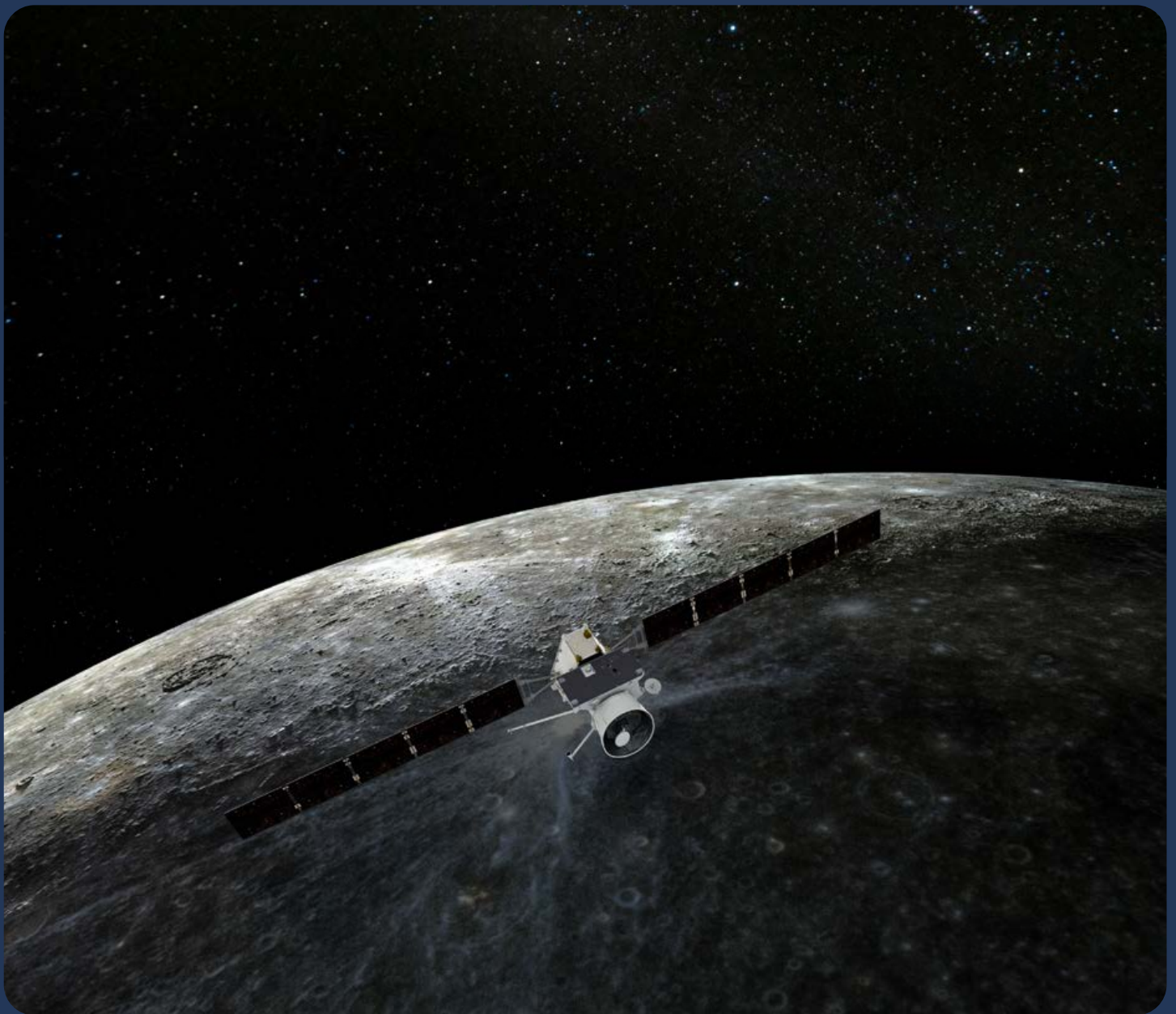


未來即將部署在太空，最先進的重力波探測器（Laser Interferometer Space Antenna，簡稱LISA）的運作原理示意圖。圖片來源：ESA

貝皮可倫坡號水星探測任務

貝皮可倫坡號太空探測器在2025年1月8日第6次飛掠水星。這不是第一次人類派遣探測器前往水星，歷史上曾有3次太空任務，包含1973年的水手10號及2011年的信使號。這次是人類歷史上第三次有太空探測器造訪水星，它將試圖解開信使號在圍繞水星公轉4年後，所新發現的謎團。本期的天文教室，將帶大家了解貝皮可倫坡號太空任務的規劃，並帶大家一同跟著貝皮可倫坡號發現水星的新面貌。

文／周毅桓



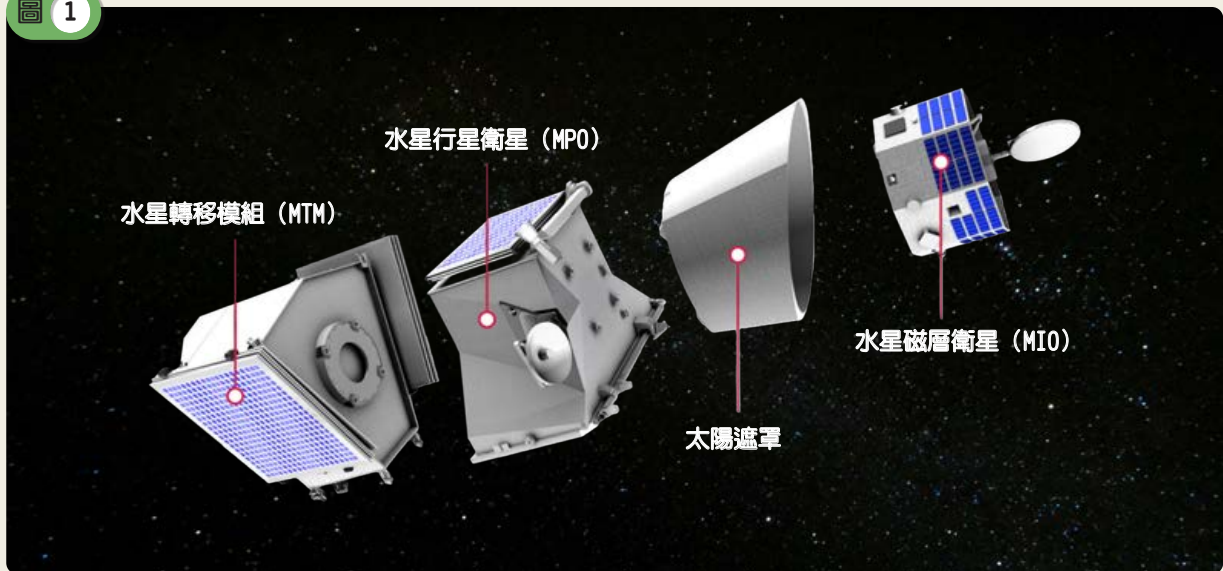
貝皮可倫坡號飛越水星示意圖。圖片來源：ESA/ATG medialab

兩架探測器組合的太空任務

貝皮可倫坡號是歐洲太空總署（ESA）與日本宇宙航空開發機構（JAXA）首次共同合作的太空任務，由兩架探測器組合而成。其中水星轉移模組（MTM）負責運送兩架探測器抵達水星，在進入水

星公轉軌道後，兩架探測器將會分離。由JAXA開發的水星磁層衛星（MIO）將繞著水星的極區公轉，並進行水星磁層與磁場的觀測。由ESA開發的水星行星衛星（MPO）則將下降至適當的高度，詳細的觀測水星的地表，如圖1、圖2。

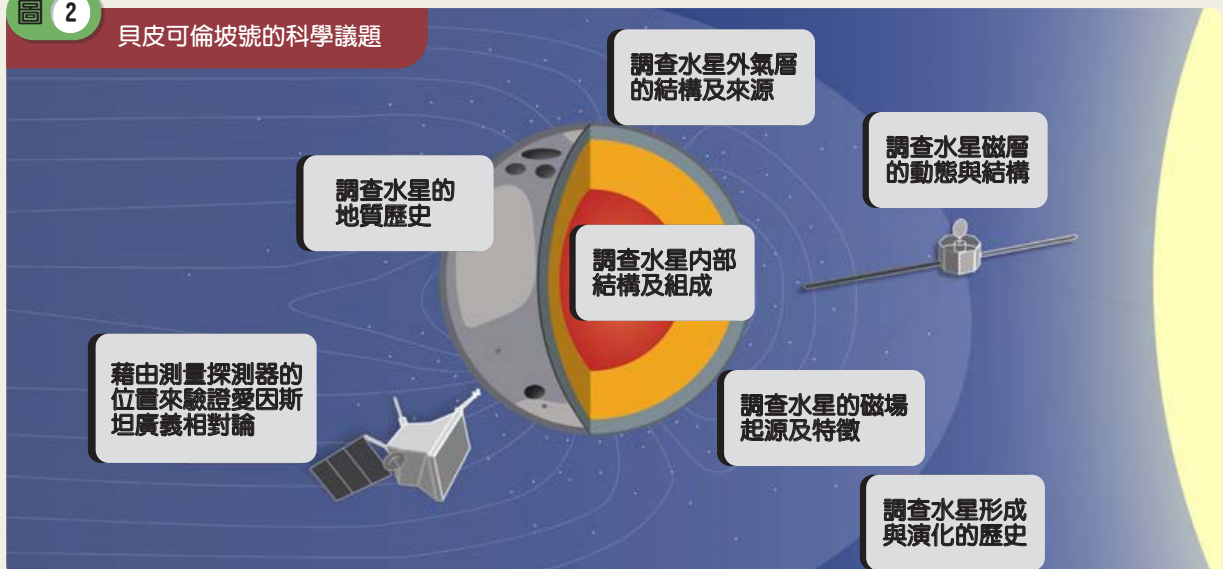
圖 1



貝皮可倫坡號的構造示意圖。圖片來源：ESA

圖 2

貝皮可倫坡號的科學議題



貝皮可倫坡號的任務內容示意圖。圖片來源：ESA

解讀信使號捎來的加密訊息

信使號在2011年抵達水星，進行4年的觀測，不

僅揭露了水星的許多特質，更發現水星隱藏著許多謎團等待貝皮可倫坡號去解開，如圖3~圖10。（詳見臺北星空第115期《信使號水星探測任務》）

是顆活躍的行星？還是死寂的星球？

信使號拍攝到水星表面有一定範圍的火山地質景觀，證實水星在早先的一段時期中曾有大規模的火山活動。

在這張照片中，左上方有一道光滑的條狀結構，是信使號發現的火山熔岩流遺跡。這道熔岩流流入右側隕石坑中，幾乎將這個隕石坑完全填滿。

貝皮可倫坡號將能更進一步了解在不同時期水星的火山活動的形式有怎樣的變化。

圖 3

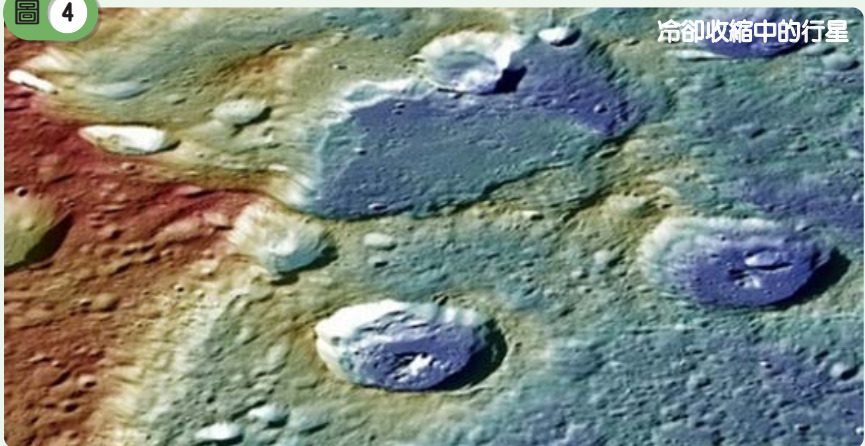


大規模的火山地形遺跡

信使號發現在水星的表面上，有著一道道跨過隕石坑的斷崖，是水星整顆行星正在冷卻收縮的證據。根據科學家的研究，水星半徑可能已經收縮了7公里左右。

貝皮可倫坡號將觀測水星表面，特別是南半球的表面，來研究水星隨著時間的經過是如何冷卻收縮，藉此了解一顆沒有板塊構造的行星冷卻的過程。

圖 4



冷卻收縮中的行星

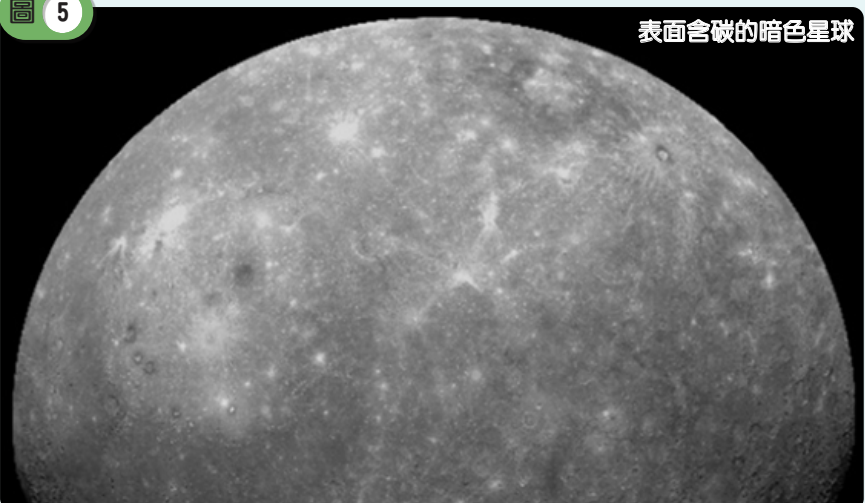
為什麼水星顏色這麼暗？

水星表面的反照率只有0.14左右，使水星表面看起來比較暗。

信使號發現水星表面含有的碳可能是造成水星顏色比較暗的主要原因之一。但這些碳元素的來源究竟是來自地底的岩漿還是來自太空中，科學家們還不是很確定。

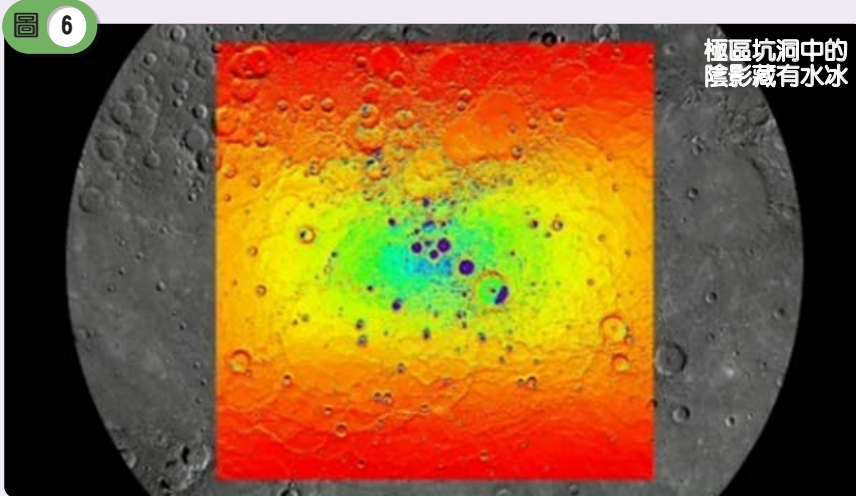
貝皮可倫坡將會仔細調查這些碳的本質與豐度，來釐清碳的來源。

圖 5



表面含碳的暗色星球

水星上真的有水嗎？



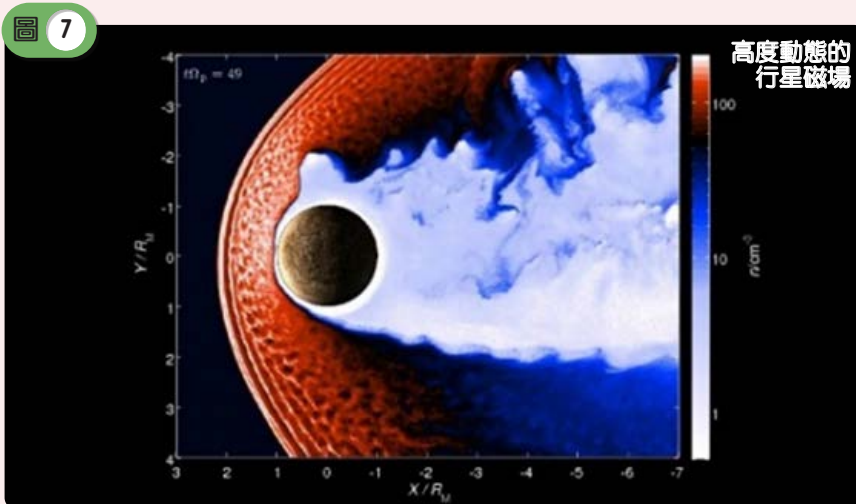
信使號最先發現在水星北極區域的坑洞中，在陽光照射不到的陰影處，有一些可能是水冰所組成的沉積物。

這張照片是信使號在紅外線波段觀測到水星北極表面的溫度分佈圖，紅色的部分溫度高達 270°C ，紫色的區域位於隕石坑的深處，溫度低到零下 215°C ，這樣的低溫已足夠使水冰存在於水星表面。

信使號也利用中子光譜儀進行觀測，發現水星極區的中子通量似乎比較低，提供了另一個間接證據。

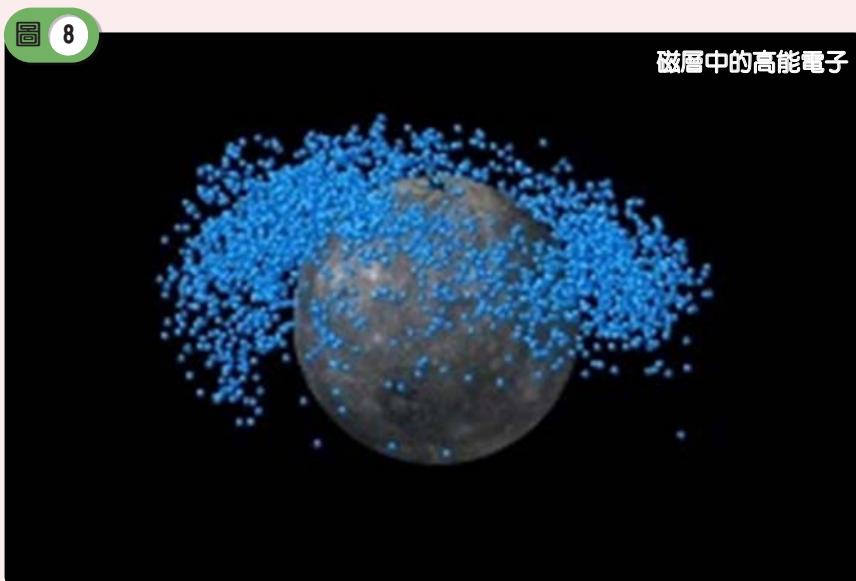
貝皮可倫坡號將利用不同的儀器對這些區域進行更深入的觀測。

水星磁場是怎麼產生的呢？



信使號發現水星具有一個高度動態的行星磁場。水星的磁場強度雖然比較弱，約只有地球磁場的1%。但水星磁場的尺度比較小，而且離太陽比較近，行星磁場與太陽光的交互作用，使水星具有一個快速變動的行星磁場。

貝皮可倫坡號的兩架探測器，將藉由它們不同的軌道，提供有關水星磁層、太陽光與水星地表之間互動的特殊視角。



信使號也測量到水星被一層高能量的電子包圍，這些高能量電子是水星磁場中長期存在的一部分，但關於這些電子的來源和從磁場中損失的過程，科學家們並不是很清楚。

貝皮可倫坡號將會觀測水星南半球的磁場分佈狀況，以跟信使號先前的北半球數據相結合，來取得水星完整的磁場結構。

水星最初是怎麼誕生的呢？

信使號的伽馬射線光譜儀在北半球高緯度地區觀察到鉀的濃度特別高，這代表水星是顆富含揮發性元素的星球。這些元素在中溫下會蒸發，由於元素鉀比鈾更容易揮發，因此比較這兩種元素在水星上的含量，就可以知道這顆星球在形成時的環境溫度。

科學家們原先認為水星距離太陽比較近，因此誕生時的高溫可能使揮發性物質揮發殆盡。結果信使號的發現，完全推翻了科學家們的猜測。

科學家們猜想水星最初有可能是在離太陽比較遠的地方誕生，然後才來到它現在的位置。

究竟水星最初是如何誕生的？仍需等待貝皮可倫坡號抵達水星後去嘗試解開。

圖 9

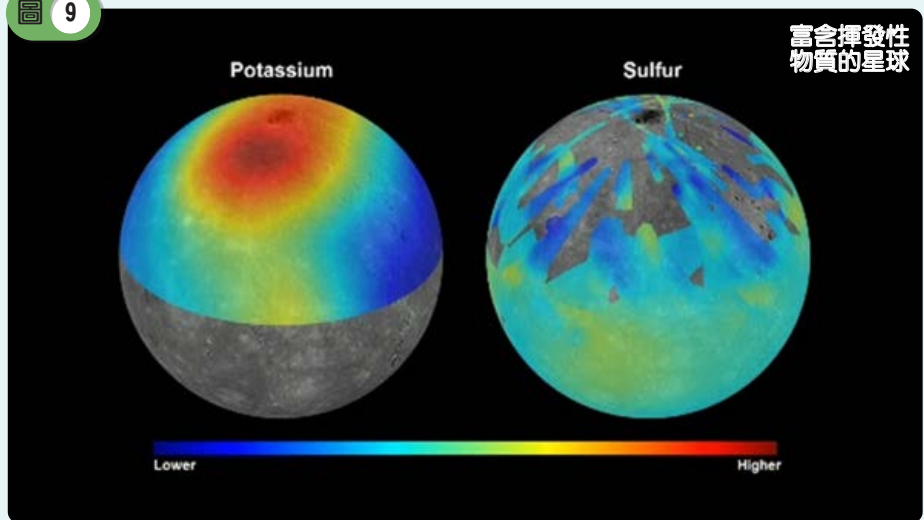


圖 10

信使號發現水星的表面有一些年輕的空洞構造。科學家們認為這是因為太陽光的照射或隕石撞擊的熱能使水星表面的揮發性物質昇華，而留下了這一些底部光滑平整的空洞構造。

貝皮可倫坡號將藉由高解析度的觀測儀器，將從紫外光波段到紅外光波段仔細的調查水星的化學組成，來深入了解這些物質的形成方式。

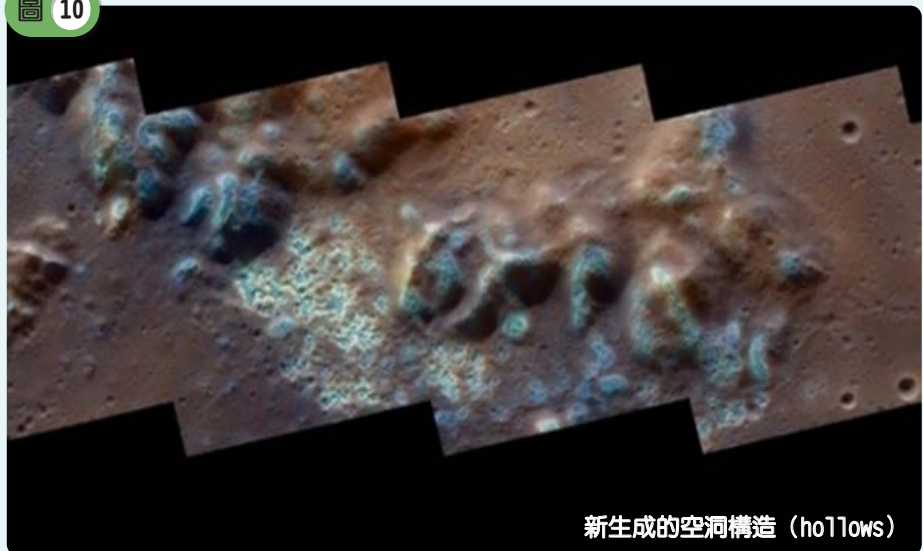


圖3~圖10。圖片來源：NASA/Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory/Carnegie Institution of Washington

離地球很近，卻比冥王星更難到達的水星

貝皮可倫坡號於2018年升空後，歷經1次地球飛越、2次金星飛越及5次水星飛越後，終於在今年（2025）1月25日完成第6次飛越。原先計畫於今年底抵達水星，進入水星軌道公轉，研究團隊卻發現探測器離子推進器的引擎推力似乎出了一點狀況，為了保險起見，研究團隊決定將原本預定的時程推遲1年，探測器預計將於2026年底抵達水星，如圖11。

雖然水星距離地球的直線距離不到1個天文單

位，但前往水星的路途卻相當困難。這是因為貝皮可倫坡號在升空後，就會不斷消耗燃料，由於太陽強大的重力，使貝皮可倫坡號在靠近水星的過程會不斷的加速，這將會使探測器在抵達水星時因速度過快而無法被水星的重力所捕捉。使得探測器在升空後，必須無時無刻的使用反向推力，來抵抗太陽的重力。但即使如此，探測器仍然需要透過多次行星重力的協助來減速，如圖12，這也是為什麼貝皮可倫坡號必須經過3顆行星、9次的飛越，歷時7年以上才能抵達水星的原因。相較於2006年升空的新視野號，僅花了9年的時間就抵達遠在45個天文單位外的冥王星，就能知道這趟任務的困難之處。



貝皮可倫坡號的任務年表。圖片來源：ESA



運用主引擎噴射產生的反作用力進行減速過程的貝皮可倫坡號。圖片來源：ESA

同名紀念款太空任務

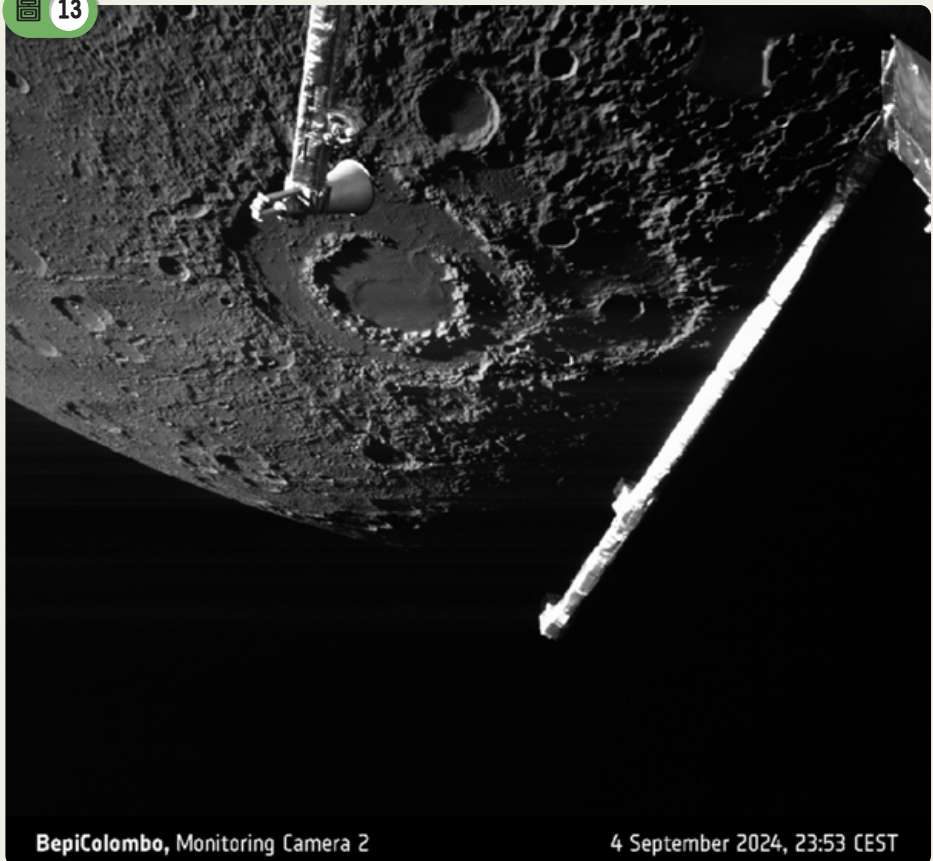
貝皮可倫坡號升空後由於太陽重力的干擾，需要經過9次行星重力減速跋山涉水才能抵達水星。這個問題先前水手10號與信使號都曾遇到過。在當時，是由義大利數學家貝皮可倫坡教授，首次提出利用金星重力減速的構想，計算出探測器前往水星的路徑與方法，並在水手10號初次升空時實驗成功。這次的太空任務，正是為了紀念這位義大利數學家，而取了相同名稱。

貝皮可倫坡號的自拍照

這是貝皮可倫坡號第4次飛越水星時，監視相機拍攝到的照片，監視相機拍攝這張照片的原因，是為了檢查探測器自身的狀況，不過在探測器背景的水星顯然更搶鏡。

畫面中央是水星的韋瓦第隕石坑，以著名的義大利作曲家韋瓦第的名字命名，它的直徑約為 210 公里。科學家們認為隕石坑中的峰環可能是小行星或彗星撞上水星時所形成，但形成的過程科學家們還不是很清楚。峰環之間有一個明顯的空隙，熔岩流從這裡進入並淹沒了這個區域，如圖13。

圖 13



貝皮可倫坡號第4次飛越水星時，監視相機拍攝到探測器一部分的構造。影像來源：JAXA/ESA

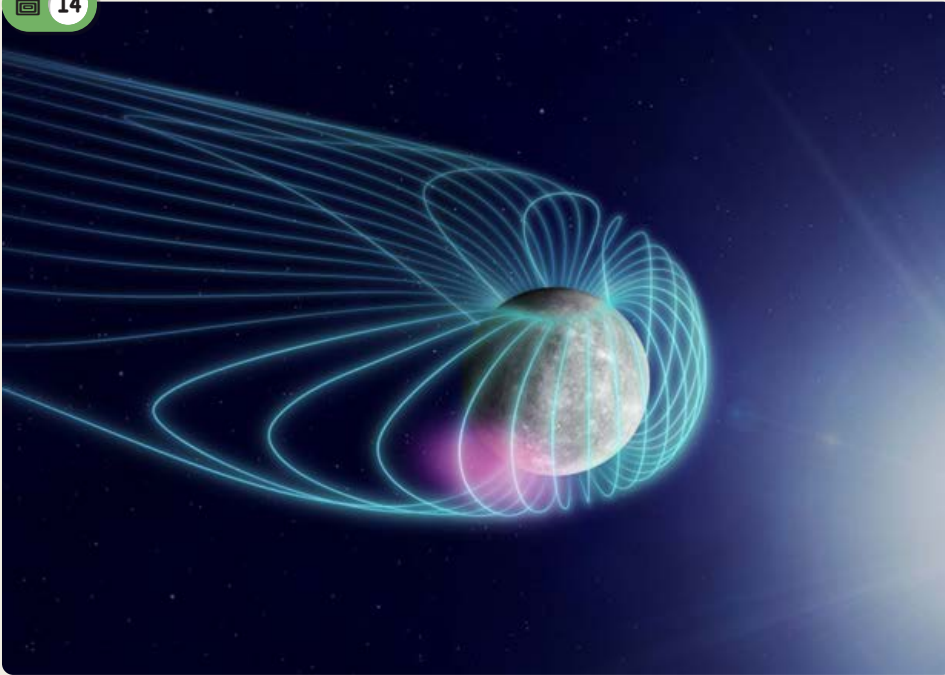
發現水星極光

貝皮可倫坡號發現，水星上和我們的地球一樣也有極光。發生的原因是由於在水星的早晨，低空中會產生一種名為合唱波（chorus waves）的電磁波，這種

電磁波能散射並加速在水星磁層中的電子，當這些電子撞上水星表面時，就會發出X射線波段的極光。由於極光發出的波段是在可見光的區域之外，因此肉眼看不見，如圖14。

周毅桓：臺北市立天文科學教育館

圖 14



水星上極光的波長，主要落在X射線波段，因此肉眼無法看見。圖片來源：ESA

參考資料：

1. ESA, From Messenger to BepiColombo. Retrieved from https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/BepiColombo/From_Messenger_to_BepiColombo
2. NASA, Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory, Carnegie Institution of Washington, Top 10 Science Results and Technology Innovations. Retrieved from <https://messenger.jhuapl.edu/index.html#top10>
3. ESA, TGiuseppe 'Bepi' Colombo: Grandfather of the fly-by Retrieved from https://www.esa.int/About_Us/50_years_of_ESA/Giuseppe_Bepi_Colombo_Grandfather_of_the_fly-by
4. JAXA, Discovery of local chorus waves that unlock the source of Mercury's electron acceleration and aurora! Retrieved from <https://www.isas.jaxa.jp/en/topics/003540.html> (Sep 15, 2023)
5. ESA, BepiColombo's best images yet highlight fourth Mercury flyby. Retrieved from https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/BepiColombo/BepiColombo_s_best_images_yet_highlight_fourth_Mercury_flyby (May 09, 2024)
6. ESA, Top Five Mercury mysteries that BepiColombo will solve. Retrieved from https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/BepiColombo/Top_Five_Mercury_mysteries_that_BepiColombo_will_solve (April 09, 2020)
7. 周毅桓 (民112)。信使號水星探測任務。臺北星空。第115期。Retrieved from https://tam.gov.taipei/News_Content.aspx?n=FDE741762D625CD4&sms=E756759C10260173&s=7B93B1223B75BD8B
8. Roger Freedman, Robert Geller, William J. Kaufmann. (2019). Universe 11 Edition. New York, United States of America: Macmillan Learning.

YouTube 相關影片：

- 貝皮可倫坡號水星探測任務
https://youtu.be/xHHfUnmkXi4?si=SC5_F8dlh5gxAOQT
- 貝皮可倫坡號第6次飛越水星縮時攝影
https://youtu.be/Drh5agiQYzE?si=9zPV8C_0WUUnnDywu
- 貝皮可倫坡號-飛行路徑與任務時間軸
<https://youtu.be/BK3F4fmqtbA?si=NgJFvAj98nuPHA5D&t=38>



女性天文學家

一位沒有望遠鏡的天文學家—亨麗埃塔·勒維特

她，觀察星星，卻從未親眼看見它們！這不是寓言，而是真實的歷史。

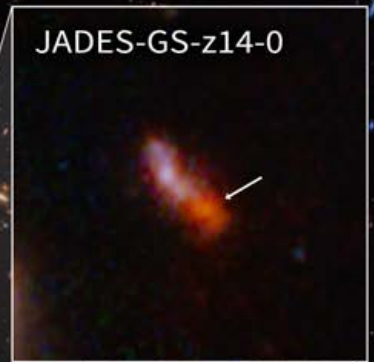
文／劉淑雯、黃譯平

當你透過電腦、或是手機正低頭閱讀這篇文章時，不妨先停下來想一想：「多久沒有抬頭望過夜空了？」，和亨麗埃塔思考一樣的大哉問：「星星有多遠」？「天空有多高」？

1912年，她是第一位發現變星的亮度與其週期之間存在穩定線性關係的人，後來被稱為「勒維特法則」（Leavitt Law，又稱周光關係）。藉由這項「週期與光度」關係的發現，就像找到了一把「測量星星遠近的尺」，只要我們知道恆星亮度變化的週期，就可以推算出它有多亮，再用這個亮度來知道它離地球有多遠。



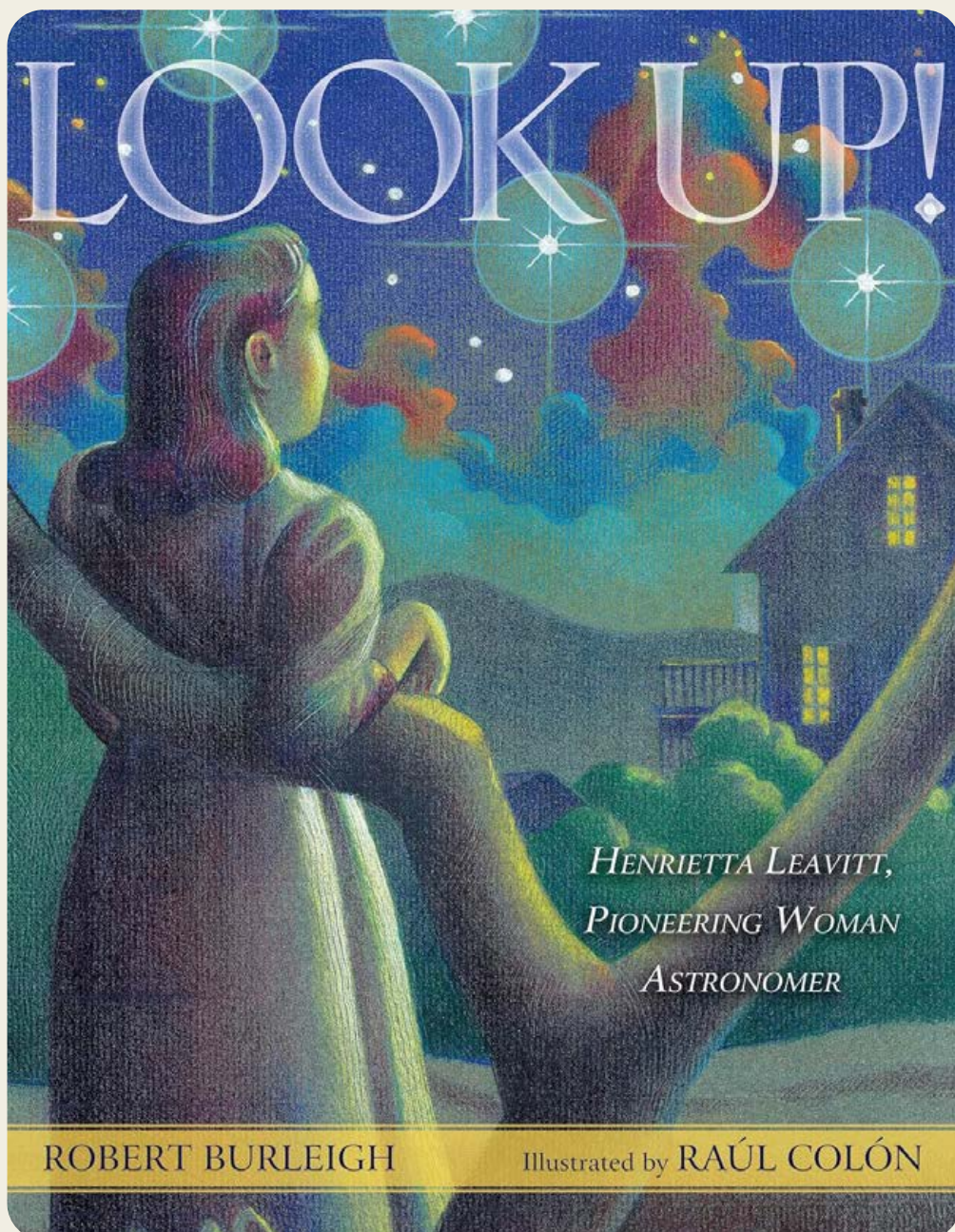
亨麗埃塔·勒維特



韋伯太空望遠鏡拍攝到距離地球遠達134億光年的JADES-GS-z14-0，是迄今為止所發現最遙遠的星系。現代天文學之所以能研究存在於大霹靂後不到3億年時期的星系和宇宙，關鍵是仰賴由女性天文學家亨麗埃塔·勒維特所發現的「勒維特法則」，藉由該法則與相關延伸出的其他方法，讓現代天文將人類觀察宇宙的範圍，從約100光年的距離推展至極其遙遠的宇宙誕生初期。影像來源：肖像為維基百科、底圖為ESA

現在，讓我們一起走向戶外，抬起頭來看看這片星空，然後一同閱讀她的故事繪本《Look Up! : Henrietta Leavitt, Pioneering Woman Astronomer》，認識這位在星光中計算的女性、天文界無人不知的科學家——亨麗埃塔·勒維特（Henrietta Swan Leavitt，1868-1921）。

這本繪本講述女性天文學先驅亨麗埃塔·勒維特的故事。1868年，她出生於美國麻薩諸塞州，進入拉德克利夫學院（Radcliffe College）學習數學與天文學，在當時多為男性研究團隊的天文學界中，是相當罕見的。



畢業後，亨麗埃塔進入哈佛大學天文臺所屬的「哈佛計算室」工作。當時的哈佛天文臺臺長愛德華·皮克林（Edward Pickering）成立了一個由女性組成的計算團隊，負責整理與觀測底片中記錄的大量星星資料，從數千張照相底片

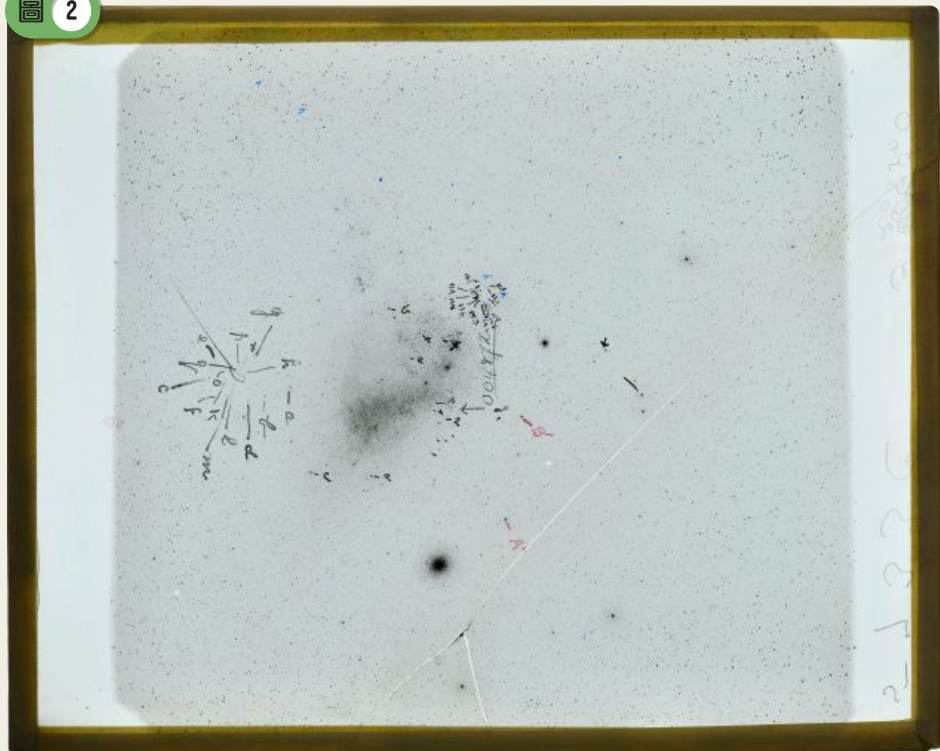
中提取數據並加以分析。她們被稱為「哈佛計算員（Harvard Computers）」或「人類計算機（Human Computer）」，即便這些女性不被允許操作天文望遠鏡，但是她們在恆星分類與資料處理方面辛勤工作，默默推動了天文學中許多關鍵性的進展，如圖1~圖3。

圖 1



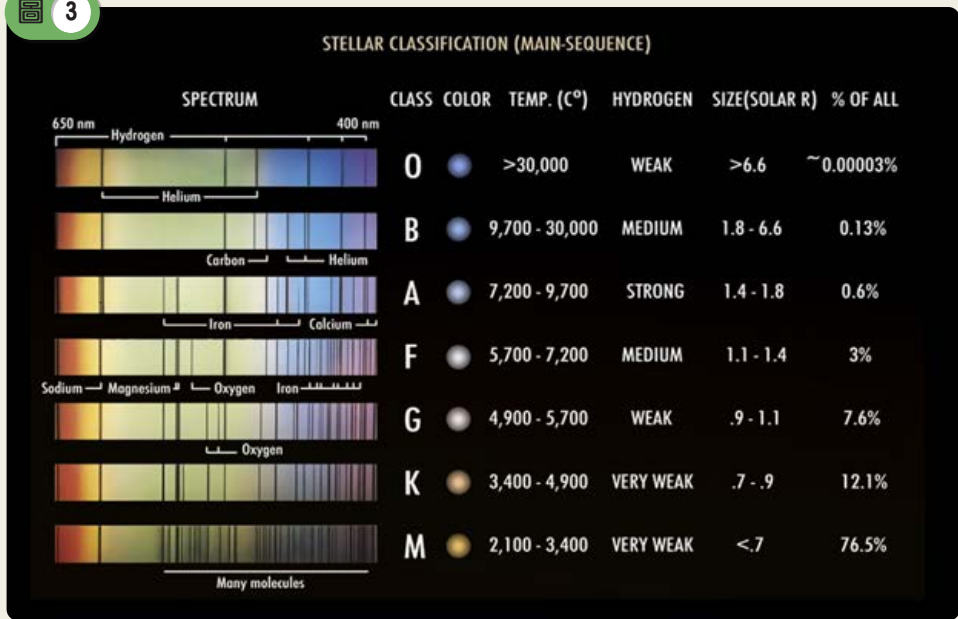
哈佛大學天文臺的女性計算員。影像來源：Harvard Library

圖 2



女性計算員的日常工作之一，對玻璃底片上記錄的恆星影像進行判讀、分類與統計。影像來源：Harvard Library

圖 3



女性計算團隊對於天文學的另一項重要貢獻，為制定出恆星的光譜分類法，此分類法後來亦成為研究恆星演化，以及赫羅圖的重要基礎。影像來源：ESA

亨麗埃塔就是此計算團隊中一位成員，在一個沒有望遠鏡的工作空間中，比對資料進而發現造父變星的「週期與光度」關係，並首次準確測量遙遠星系的距離，將人類觀測宇宙的能力，從原本約100光年的範圍擴展到數百萬光年。

亨麗埃塔這項重要的科學研究，不僅開啓了宇宙測距的新時代，更為日後天文學家哈伯提出宇宙膨脹理論奠定了關鍵的基礎，為人類描繪出更廣大遼闊的宇宙地圖，讓人們對宇宙的認知從銀河系提升到無邊無際的宇宙，如圖4、圖5。

從造父變星到宇宙膨脹 亨麗埃塔·勒維特對天文學的重要貢獻與影響

① 造父變星的週期—光度關係

天文學中的週期—光度關係 (period-luminosity relation)，是指脈動變星的光度與其脈動週期之間有一種簡單的數學關係。其中最著名的是適用於經典造父變星的正比定律，或稱為勒維特定律 (Leavitt Law)，此定律是由亨麗埃塔·勒維特於1908年時發現，它確立了造父變星可作為測量銀河系和宇宙中其他星系距離時，最準確的標準燭光 (standard candles) 之一。

② 標準燭光

天文學中對於已確認光度的天體，用來計算距離的幾種重要方法，都是以標準燭光 (standard candles) 做為基礎。將天體的已知光度 (或是它的對應函數的數值，絕對星等) 和他的觀測亮度 (視星等) 做比較，就可以藉由右邊的公式算出該天體距離我們多遠，其中D為距離，kpc為千秒差距 (10³秒差距，約為3,260光年)，m為視星等，M為絕對星等。

圖 4

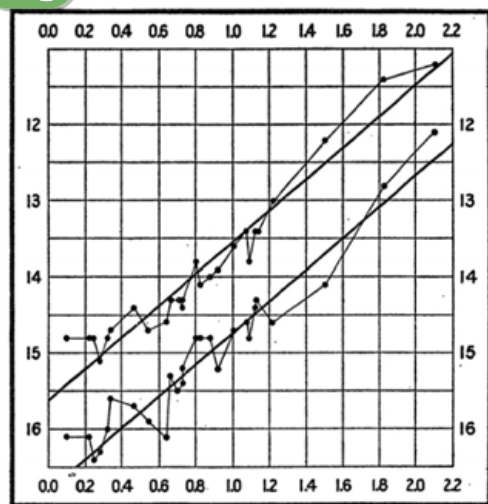


FIG. 2.

亨麗埃塔記錄的周光關係。圖片來源：維基百科

$$5 \log_{10} \frac{D}{kpc} = m - M - 10$$

運用標準燭光計算天體距離的公式

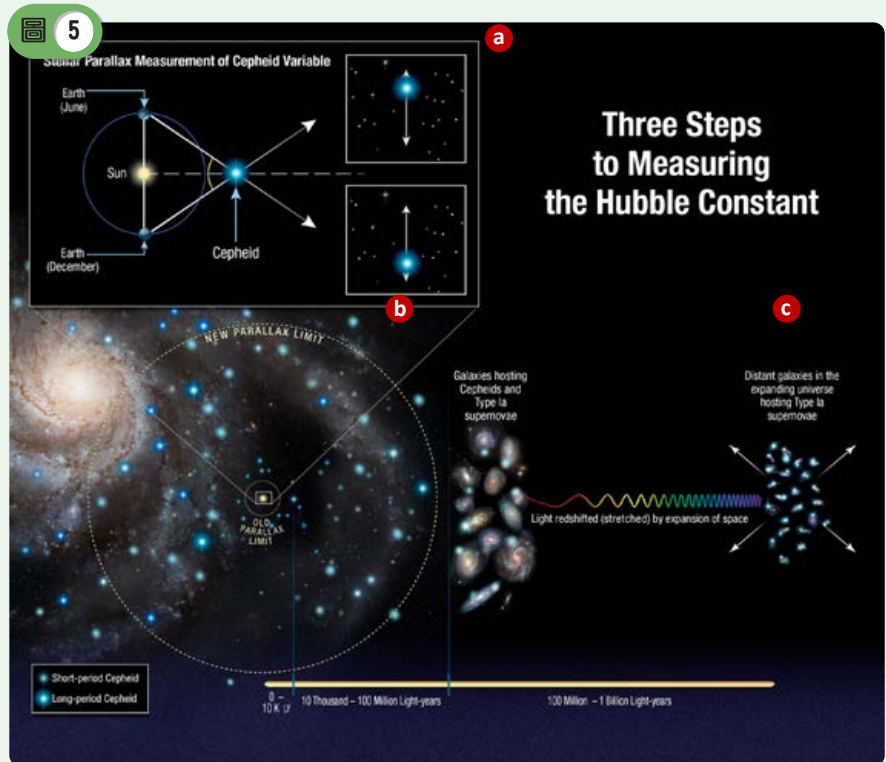
③哈伯定律與哈伯常數

1912年，亨麗埃塔發現了造父變星的週期-光度關係，之後天文學家廣泛運用上述關係於測量星系距離。逐漸發現宇宙中的星系都正遠離我們而去，而遠離的速度和距離成正比，經由天文學家哈伯精確測量，確認此一事實，也就是宇宙正在膨脹，膨脹速度與相互間的距離成正比，稱為哈伯定律，其中 v 是由紅位移值測得的星系遠離速率， H_0 是哈伯常數， D 是星系與觀察者之間的距離。而距離與膨脹速度之間的比值稱為哈伯常數，常以千公尺/秒/百萬秒差距（km/s/Mpc）做為單位。此劃時代的概念成為現今宇宙學和宇宙演化模型的基礎。

$$v = H_0 D$$

哈伯定律公式

目前天文學採用如下3種方法標定天體的距離，測量哈伯常數。由近至遠分別為：**a** 利用三角測量的視差法。**b** 觀測造父變星，利用勒維特定律計算。**c** 觀測Ia型超新星計算。圖片來源：ESA/Hubble



困境與歧視

儘管亨麗埃塔貢獻卓著，但身為女性卻需面對當時社會環境所造成的重重限制。相較於大眾熟知的哈伯，亨麗埃塔·勒維特的名字鮮少人知，這段歷史深刻反映了科學界長期對待女性的不平等，也顯示在追求真理的路上，許多女性在黑暗中努力發光，卻無法被看見。

她無法親自操作使用望遠鏡，沒有正式學術頭銜，甚至一開始以無薪志工的身分工作，後來才僅有微薄的薪資。而她的研究卻成為男性主管名下的發表成果，歷史幾乎將她的名字遺忘。直到1923年，她卓越的貢獻才開始受到重視，被瑞典科學院提名為諾貝爾物理獎候選人，可惜她在三年前便已去世，而依規定無法追授和獲得此一榮耀。

共讀故事的提問與思考

透過這本書，不僅認識一位女性天文學家，也提醒我們在這個AI技術躍進和氾濫的時代，線上工具取代了許多思考和計算的工作，讓我們省思最重要的天文學習是什麼？

「觀察」比擁有器材更重要

勒維特並未操作過望遠鏡，也沒有親眼見過那些遙遠的星星，她所依賴的，是對資料的細緻觀察與持續思索。這深度啟發我們，學習的起點不在於擁有多少工具，而在於是否願意專注地看見與思考。對學生來說，無論資源是否豐富，只要有心觀察世界，就有機會發現不同的可能。

「堅持與熱愛」 比獲得一時的掌聲更加深遠

勒維特的工作在當時幾乎未受到公開表揚，甚至連署名發表的機會都少之又少。但她仍然堅持不斷研究，在一次次資料的比對中找出規律。這份默默的堅持，最終改寫了天文學的歷史。學習的路上，我們也許不會立刻獲得掌聲，但當一個人持續投入、相信並熱愛自己的選擇，那份力量會比任何獎項更深遠長久。

勒維特憑藉敏銳的分析與對知識的熱情，為人類打開了測量宇宙的全新視野。這樣的精神，對今日的學習者而言，是一種跨越時代的啟示與鼓舞。以下分享三個延伸思考問題，提供在閱讀後進行討論與反思：

- ①為什麼亨麗埃塔多年努力得到的成果，卻無法獲得公開肯定？
- ②你覺得是什麼支持著她，繼續在天文領域工作？

- ③你會如何向其他人介紹亨麗埃塔這位科學家？

結語：讓看不見的光 ，照亮更多未來

當我們仰望夜空，不妨也思索：有多少默默付出的名字，正像星星一樣閃耀，但卻從未被好好訴說？

勒維特的發現不只是天文學的里程碑，更是一則關於信念、堅持與性別平等的故事。她讓我們知道——照亮世界的，不只是最先進的太空望遠鏡和AI人工智慧科技，其中也有些人默默奉獻著觀察的心、學習的熱情。在教學現場，讓我們以這樣的故事為起點，引領學生從理解宇宙，到看見彼此；從探究星辰，到理解人心，如圖6。

劉淑雯：臺北市立大學 退休教授

黃譯平：用繪本談SDGs，與國際教育接軌一書作者

圖 6



工作中的亨麗埃塔·勒維特。影像來源：Harvard Library

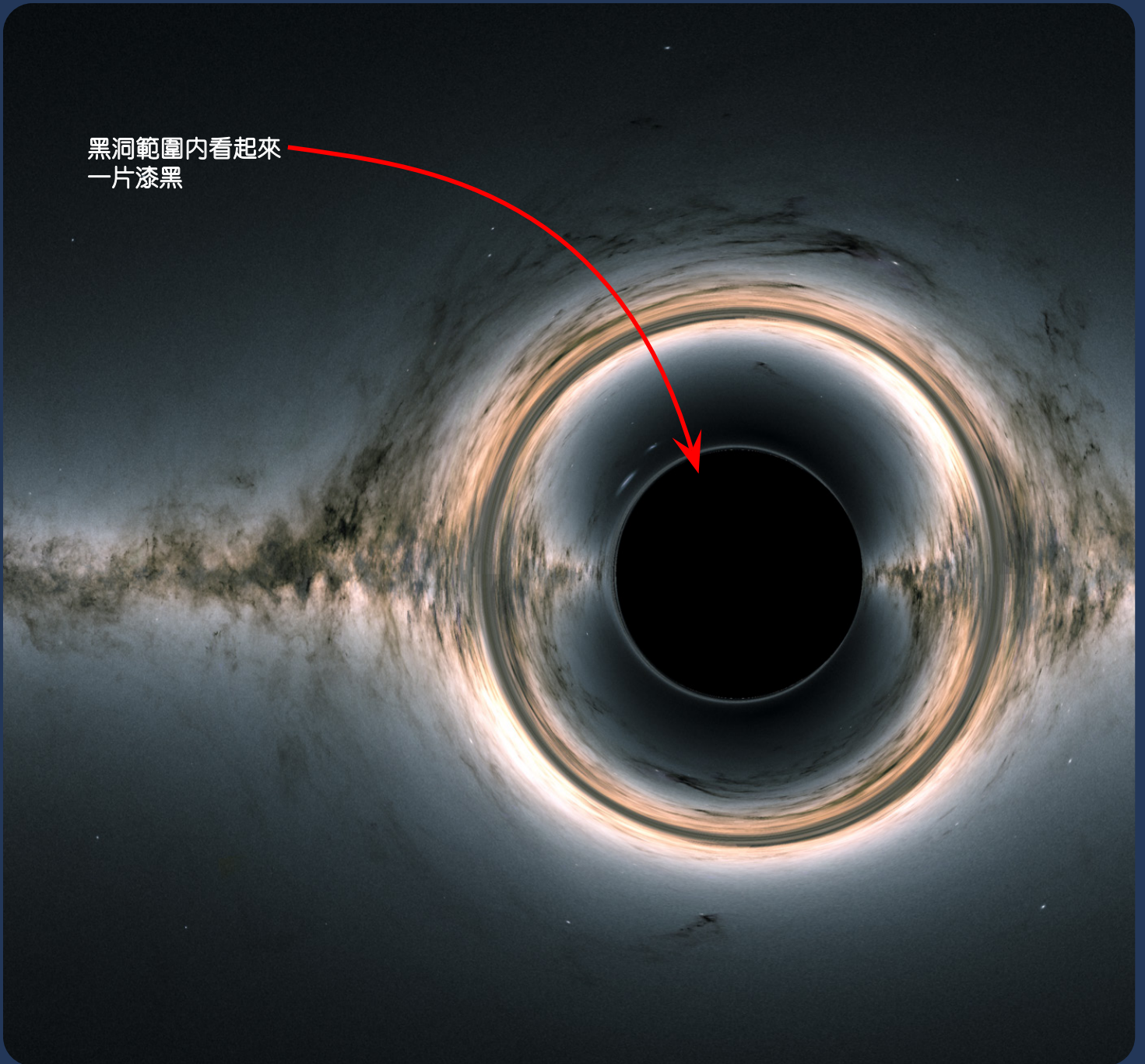


看見看不見的黑洞

黑洞 (Black Hole) 這個詞語雖然有個「洞」字，但它實際上並不是一個物理上的「洞」。之所以會這樣稱呼，是因為它強大的引力連光都無法逃脫，使得那個區域看起來一片漆黑，彷彿深不見底的「洞」。

文／蔡安理

黑洞範圍內看起來
一片漆黑



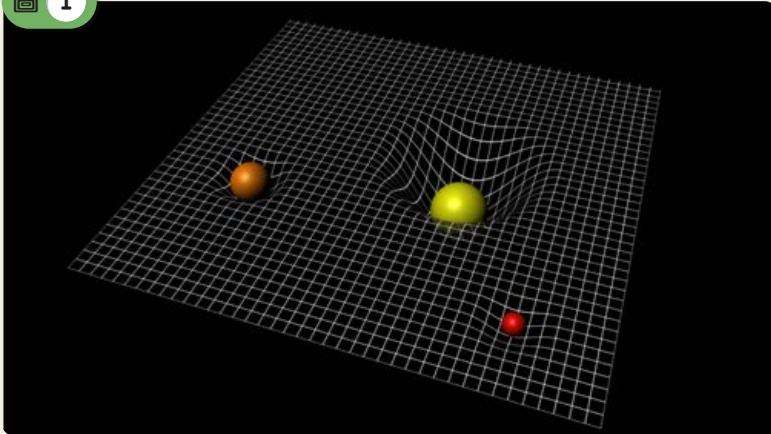
黑洞強大引力不但讓光無法逃脫，也會彎曲經過黑洞附近的光線，如同此模擬示意圖所展現，黑洞彎曲後方銀河系射向我們的光線，呈現出奇特的景象。圖片來源：NASA

根據牛頓力學的萬有引力概念，黑洞是一個質量極大的天體，其產生的引力強到連光都無法逃脫。而愛因斯坦的廣義相對論則提供了更精確的解釋：任何具有質量的天體都會造成時空扭曲。質量越大，扭曲的程度就越大，如圖1。黑洞則是一個質量極其龐大且高度緻密的天體，它所造成的時空扭曲程度大到連光的行進路徑都被徹底彎曲。當光線無法到達我們的眼睛時，我們自然就什麼也看不見，因此該區域看起來就是一片漆黑。

星系中心的超大質量黑洞

目前普遍認為，所有星系中心都存在一個超大質量黑洞，我們的銀河系也不例外。超大質量黑洞與恆星質量黑洞的形成機制與規模都不同。恆星質量黑洞是由大質量恆星在演化末期坍縮形成，質量通常約為數個太陽質量；而超大質量黑洞的形成機制目前仍是天文學界重要的研究課題之一，超大質量黑洞的質量可高達太陽質量的數百萬，甚至數十億倍以上。

圖 1



時空扭曲概念圖，扭曲程度大小受到天體質量大小的影響。圖片來源：ESA

圖 2



合併中的兩個星系NGC 6050和IC 1179，星系合併是目前認為最有可能產生超大質量黑洞的方式之一。圖片來源：NASA/Hubble

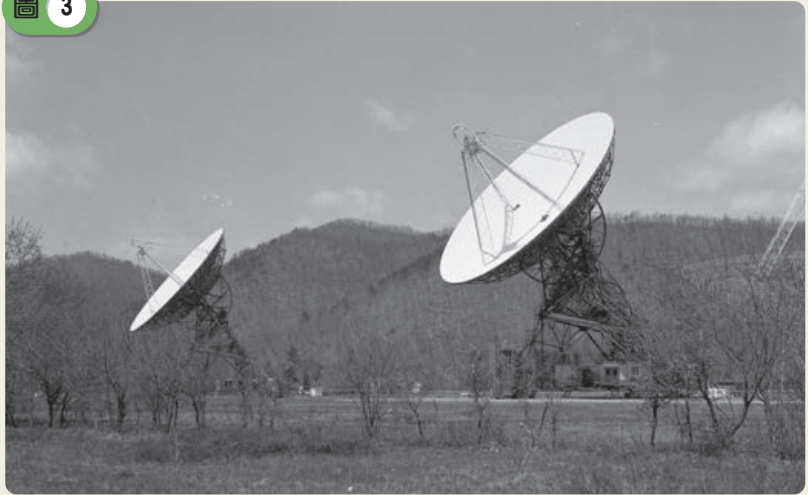
目前已知銀河中心的超大質量黑洞位於人馬座、蛇夫座和天蠍座之間，距離地球約8,000秒差距（約 24,000至 28,000光年）。

銀河中心黑洞的發現歷程

1974年，天文學家發現銀河系中心存在一個非常明亮的無線電波源，命名為人馬座A*（Sagittarius

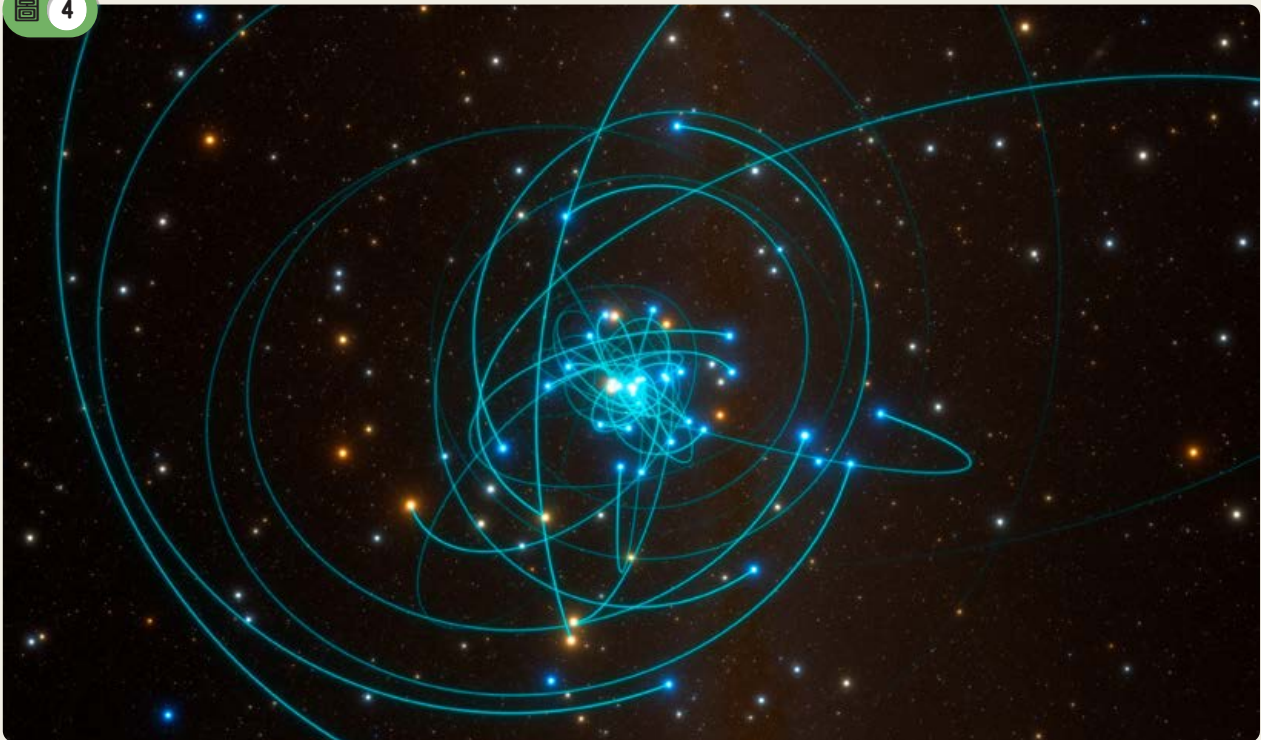
A*）。隨後，他們對人馬座A*附近的天體進行了長達十年的持續觀測，透過分析這些恆星的運動軌跡，推測它們圍繞著一個共同的質心運行。這個共同質心的質量約為400萬倍太陽質量。離共同質心最近的恆星，其距離人馬座A*約只有0.3個天文單位（AU），這個距離大約是水星到太陽的距離。在如此小的範圍內聚集如此巨大的質量，唯一的解釋就是存在一個超大質量黑洞。

圖 3



1960年代就已啓用的綠岸無線電波望遠鏡陣列（Green Bank Interferometer），不只是甚大無線電波望遠鏡陣列（Very Large Array）設計建造之前的測試平台。它本身就是功能齊全、技術先進的無線電干涉儀。而其中最引人注目的是，綠岸無線電波望遠鏡陣列（Green Bank Interferometer）發現了一個來自銀河系中心的強烈點狀無線電發射源。這個極為緻密的天體被命名為人馬座A*，後來被確認為是一個超大質量黑洞。影像來源：NRAO

圖 4



由歐洲南方天文臺的甚大望遠鏡（Very Large Telescope）和凱克望遠鏡（W. M. Keck Observatory）於2018年利用近紅外線波段，拍攝記錄銀河系核心附近的恆星動態，經計算分析軌道後，確認了銀河系核心的超大質量黑洞，而此項研究於2020年獲頒諾貝爾物理獎。圖片來源：ESO

這項推論早期並非基於黑洞的實際觀測影像，而是透過分析天體運動數據得出的結果。直到2019年，事件視界望遠鏡（Event Horizon Telescope, EHT）團隊，如圖5，才成功發表了人類史上第一張黑洞影像，如圖6 a。值得一提的是，臺灣的中央研究院天文及天文物理研究所（簡稱中研院天文所）也是 EHT 團隊的重要成員之一。EHT 本身並非單一望遠鏡，而是由全球多個無線電望遠鏡組成的陣列望遠鏡，其運作原理如同模擬一面直徑與地球相當的巨型望遠鏡，從而獲得足以解析遙遠黑洞的極高解析度。

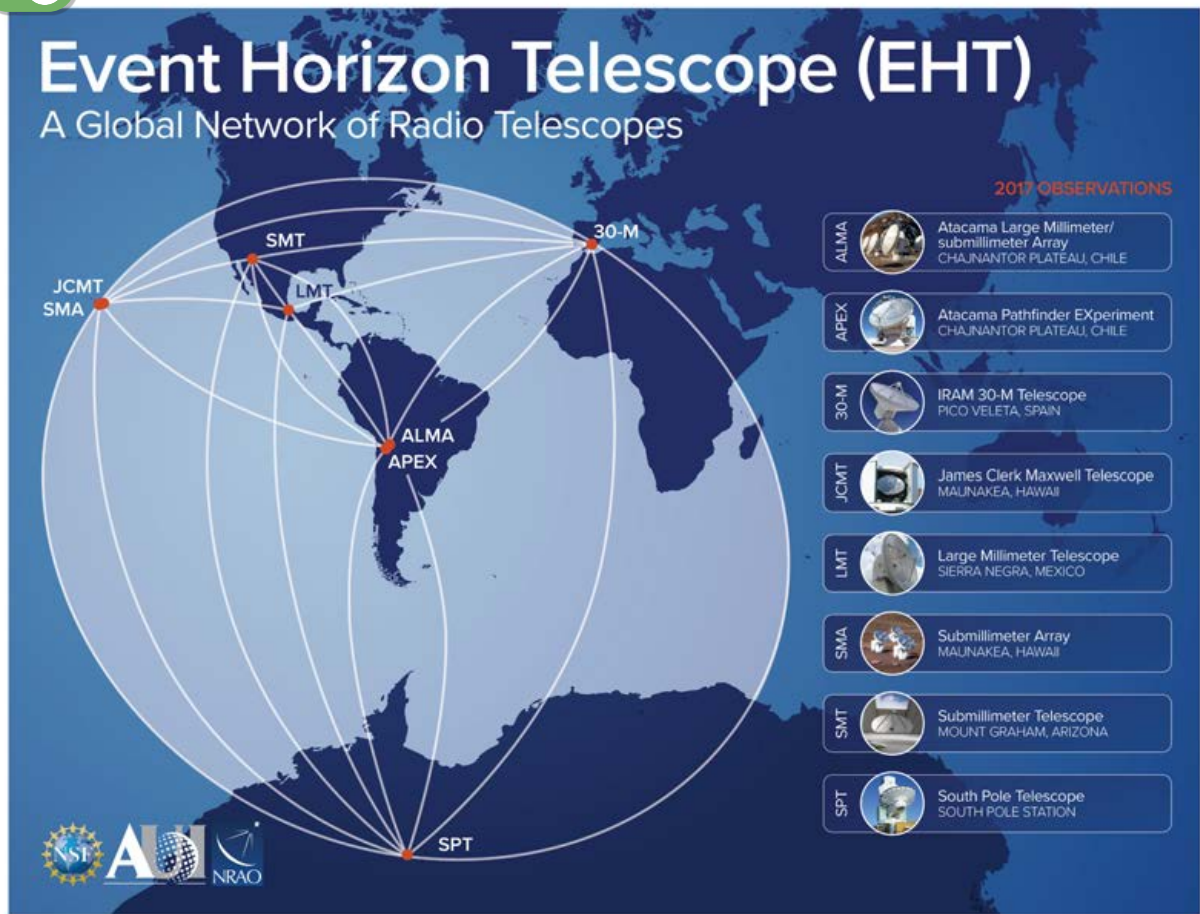
然而，2019年EHT團隊率先發表的人類史上第一張黑洞影像，並非銀

河系中心的超大質量黑洞，而是遙遠橢圓星系M87中心的超大質量黑洞M87*。這是因為儘管銀河系中心的黑洞離我們最近，但形成黑洞影像，僅能由EHT中來源穩定的夜間觀測數據產生，而人馬座A*的無線電發射源以分鐘為單位變化，導致觀測資料的分析難度較高。因此，EHT團隊選擇先處理並發布M87*的影像。直到2022年，EHT 團隊才正式公布了銀河系中心黑洞人馬座A*的影像，這成為人類史上公布的第二張黑洞影像，如圖6 b。



上圖中，a 為2019年發表，位於M87星系中心的超大質量黑洞M87*的影像，b 為2022年發表，位於銀河系中心的超大質量黑洞人馬座A*的影像。影像來源：ESO

圖 5



在以上示意圖中，標示出事件視界望遠鏡陣列，以及首度發表黑洞影像時參與的成員。此望遠鏡陣列是由全世界多個大型無線電望遠鏡所組成。圖片來源：ESO

M87*黑洞與人馬座A*黑洞的比較

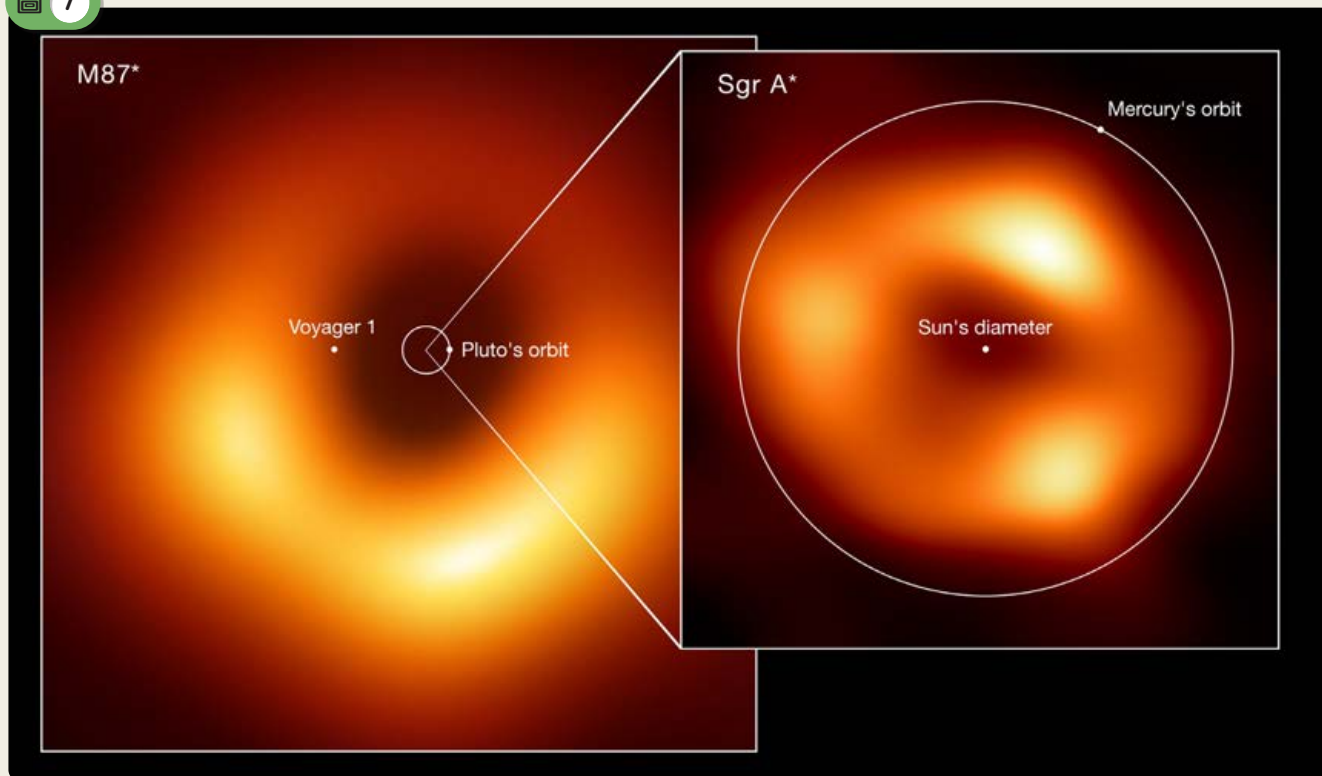
圖7呈現了這兩個黑洞的比較：左圖為M87*中心黑洞與冥王星軌道的相對大小，右圖則為人馬座A*與水星軌道的相對大小。雖然M87*的實際大小約是人馬座A*的2,000倍，但由於M87*的距離也約是人馬座A*的2,000倍，因此兩者在地球天空中觀測到的視大小（apparent size）大致相同。實際上，M87*的質量約為太陽的65億倍，而人馬座A*的質量則約為太陽的400萬倍。

結語

這些質量極其龐大的緻密天體，不僅是宇宙中最引人入勝的現象之一，更是驅動著我們對時空本質、物質極限以及宇宙起源的思考。隨著天文學家們透過事件視界望遠鏡（EHT）看到黑洞，從間接推論走向直接成像，我們正逐步揭開這些宇宙巨獸的神秘面紗。未來，對超大質量黑洞形成機制及其與星系共同演化的持續探索，將為我們理解廣闊宇宙提供更多關鍵線索。

蔡安理：臺灣天文研究聯盟/國立中央大學TARA科學家

圖 7

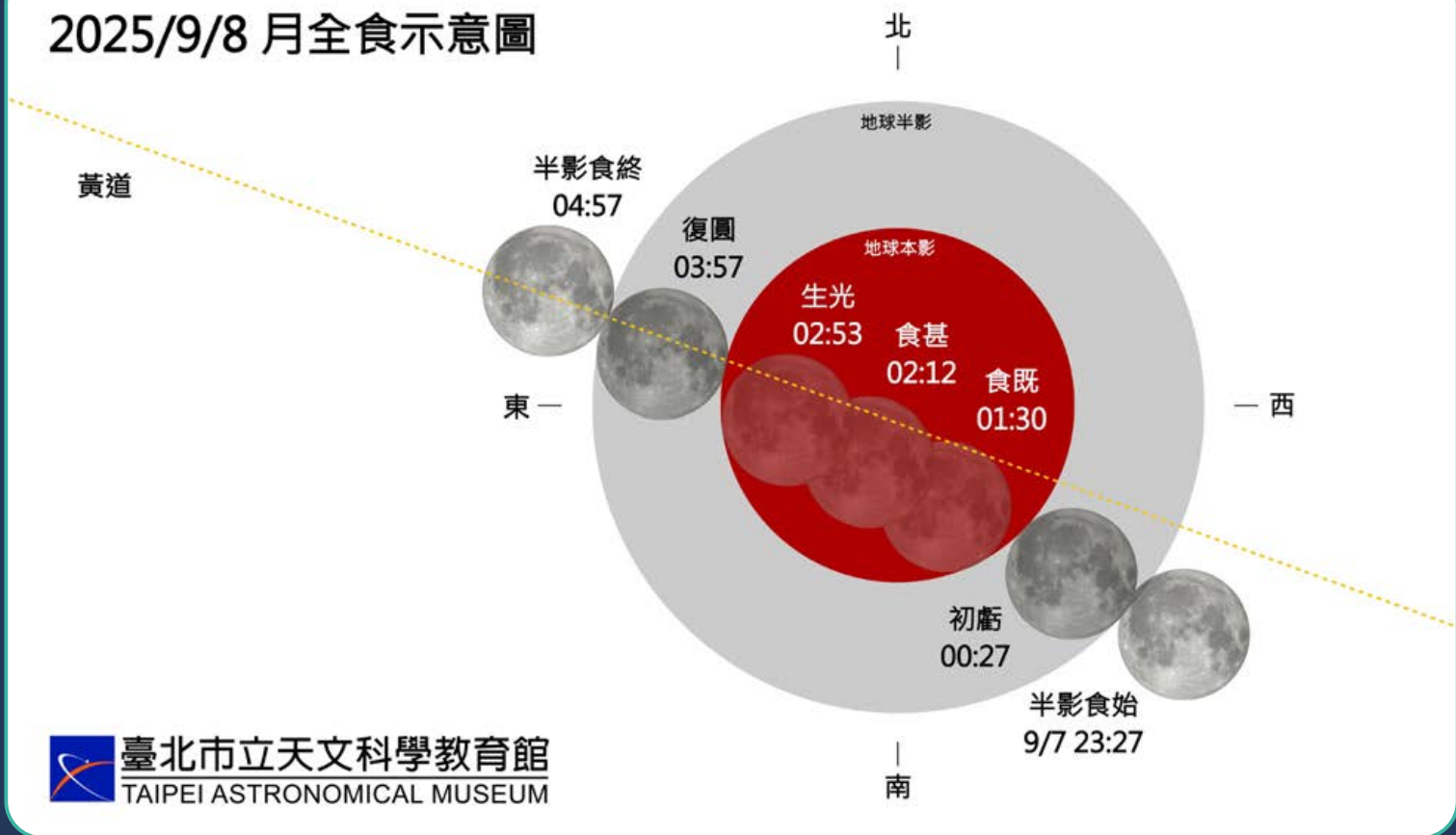


M87*黑洞與人馬座A*黑洞的比較圖。影像來源：ESO

文／吳昆臻

2025年9月8日凌晨，當月球運行至地球影子之內，上演難得的月全食奇觀。本次月全食也是今年**重要天象表**唯一列為五顆星的重大天象，用肉眼即可觀察到月偏食過程、月球虧缺及月全食時月球呈現紅色調的景象，也可另外準備雙筒望遠鏡或天文望鏡，將月球放大觀察及觀測月食過程月掩星情況，透過相機拍攝也有不少值得記錄的重點，本篇將介紹這次月食觀察及記錄方式。

2025/9/8 月全食示意圖



 臺北市立天文科學教育館
TAIPEI ASTRONOMICAL MUSEUM

2025年9月8日月全食過程，本次月食臺灣地區難得全程可見，上次臺灣地區全程可見是2018年1月31日。

月全食觀測概況

本次月全食於亞洲全境、澳洲西半部及非洲東部部分地區全程可見，西非及歐洲可見月出帶食，

澳洲東半部及日本可見月沒帶食。臺灣地區全程可見，本影食歷時3小時30分，全食歷時1小時23分，食分為1.362。月食各階段發生的時間如上圖及下頁的表1。

表 1 本次月全食各食象發生的時間及位置

食 象	時 間		位 置	
	日期	時刻	仰角 (°)	方位角 (°)
半影食始P1 (半影月食開始)	9/7	23:26:54	57	171
初虧U1 (月偏食開始)	9/8	00:26:42	57	198
食既U2 (月全食開始)	9/8	01:30:18	50	221
食甚 Greatest (月全食最大食分)	9/8	02:11:43.1	43	232
生光U3 (月全食結束)	9/8	02:53:12	36	241
復圓U4 (月偏食結束)	9/8	03:56:48	23	251
半影食終P4 (半影月食結束)	9/8	04:56:30	11	259

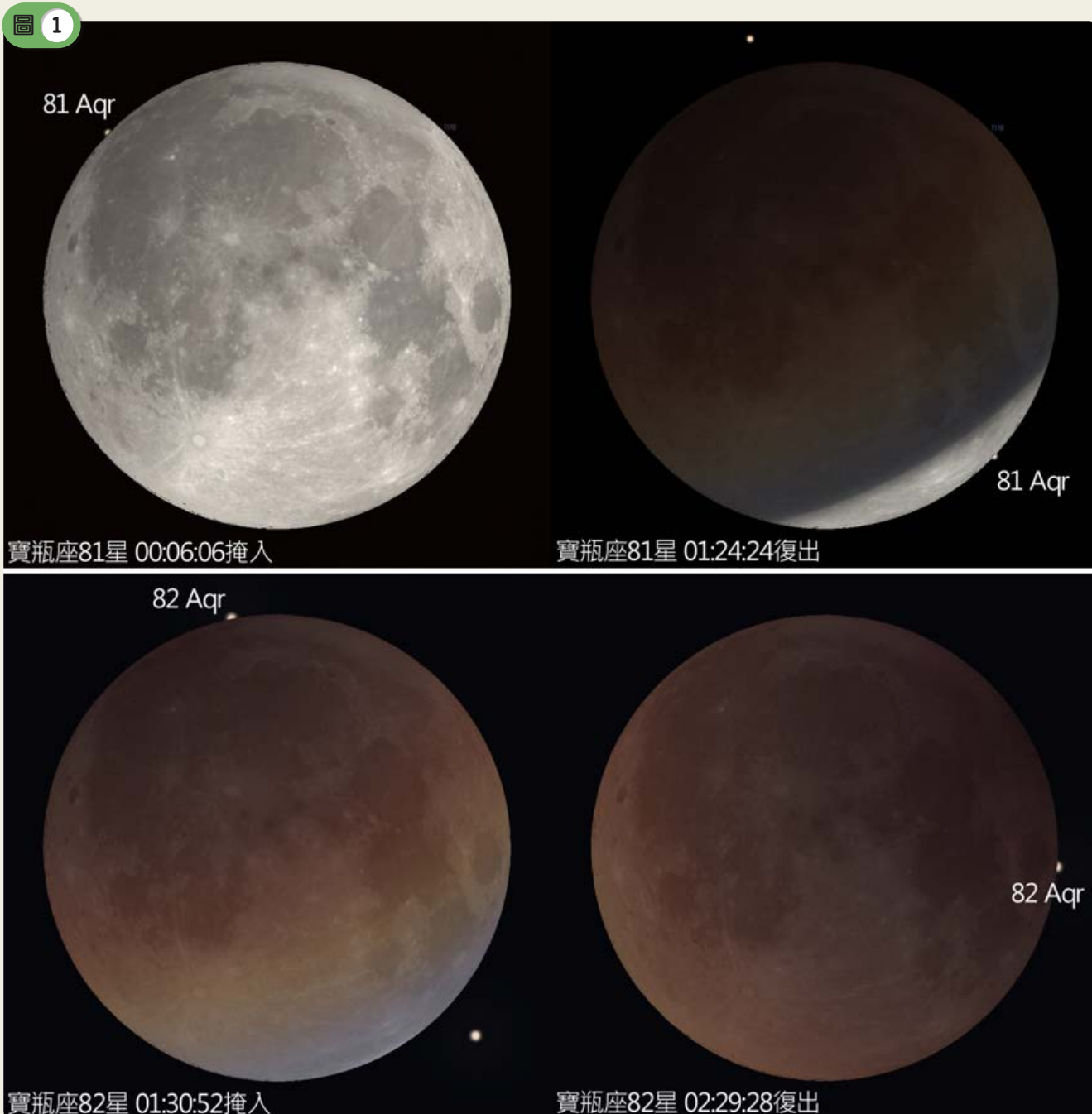
臺灣各食象發生食間及可見情況說明

本次月全食臺灣地區發生於9月7日深夜至9月8日凌晨，各食象發生食間及可見情況如下：

- ① 9月7日 23:27 半影食始P1，為月球開始進入地球半影區，因半影區中尚有部分陽光可到達，進入半影區的月球亮度僅微幅下降，肉眼不易察覺其亮度變化，需以攝影方式拍攝比對。
- ② 9月8日 00:27 初虧U1，月球開始進入地球本影區是月偏食的開始，此刻之後肉眼可看到月球虧缺情況，虧缺區域隨月食演進逐漸增多。
- ③ 9月8日 01:30 食既U2，月球完全進入本影區，是月全食的開始，此刻起的月球呈現出暗紅色，隨著月球深入地球影子深處，月球亮度會逐漸再變暗一些。
- ④ 9月8日 02:11:43 食甚 Greatest，月球來到地影最深處，此時應為月球亮度最暗的時刻，之後月球逐漸朝地影邊緣前進，月面越靠近本影邊緣側區域亮度會逐漸變亮。
- ⑤ 9月8日 02:53 生光U3，月球邊緣再次內切地球本影區，結束82分月全食過程，之後月球逐漸露臉。
- ⑥ 9月8日 03:57復圓U4，月球完全脫離地球本影，恢復滿月應有的圓貌，但月球尚在地球半影中，相機拍攝尚能分辨位於半影區中的月球亮度稍暗。
- ⑦ 9月8日 04:57 半影食終P4，月球完全離開地球半影區，結束整個月食歷程。

本次月食臺灣地區全程可見，月食過程月球位於南到西南西方天空，本影食期間月球仰角皆超過20度，觀測條件極佳，只要確定此方位區間無遮蔽即可；唯一小小的影響是9月8日天文曙光始時間為04:20、航海曙光始為04:47，天色會開始微亮，還好此時月食已經進行到復圓U4階段之後，微亮的曙光僅影響到半影月食後半段，僅會對拍攝記錄有很輕微影響。

此外，本次月食過程有2次較明亮的月掩星現象，如圖1，分別是月偏食階段，月球將掩6.2等寶瓶座81星，00:06:06掩入、01:24:24復出；全食階段月球將掩6.15等寶瓶座82星，01:30:52掩入、02:29:28復出，要觀察掩星情況，必須要藉由望遠鏡協助，或利用拍攝、錄影方式記錄才能進行。



以星圖軟體Stellarium模擬月本次月食將有2次掩星情況，模擬地點為天文館，其他地點發生時間及掩入復出位置會有些微差異。

月全食的紅色調

月全食期間，月亮雖已完全進入理應完全無光線的地球本影，但月球並不會因完全無光線反射消失，主因為地球大氣層可以折射太陽光，將波長較長的紅光折射至本影中的月球，如圖2。每次月全食月球呈現紅色調的情況和亮度都不同，影響變數包括食分大小（月球進入地球影深度）、大氣塵埃

（如火山爆發）與觀測條件等，如圖3。

為了描述月全食期間月亮的亮度與顏色變化，法國天文學家 André Danjon 建立了一套 Danjon Scale 等級制度，如表2，等級從L=0到L=4，數值越高表示月亮越亮、顏色越鮮明，月全食過程不妨可順便比對當下月球是屬哪個等級，也可以將拍攝到的月全食影像比對等級情況。

太陽光中的紅色光可經由地球大氣層折射至月球，使本影中的月球呈現紅色色調。



2018年7月28日月全食不同時間色調比較，圖左拍攝時機為月球完全進入地球本影食既之後，影像右側為半影方向，整體亮度明顯比左側明亮許多；圖右則為進入本影最深處食甚後情況，色調不僅更暗深紅色也更暗，相機曝光量也需增加許多。攝影 吳昆臻



表 2 Danjon Scale 各等級可見情況

Danjon 等級	月球情況
L = 0	幾乎看不見的月亮，非常暗淡，近乎黑色。
L = 1	非常暗紅或灰棕色，細節難以辨認。
L = 2	深紅或銅紅色，暗處與亮處對比明顯。
L = 3	磚紅色，月亮表面仍可見細節。
L = 4	明亮的橘紅色或銅橙色，整體光線較強且均勻。

記錄月食情況 長鏡頭間歇攝影

使用長焦鏡頭（300mm以上為佳）或望遠鏡擴大攝影對月球做特寫拍攝，用以記錄月食過程變化，手機相機若有10X以上變焦功能也可以嘗試此方式拍攝，後續再將不同時間影像拼貼在一起，即可完成整個月食過程的全紀錄，如圖4。

半影月食過程雖肉眼較難辨識出月球變暗情

況，但相機拍攝能清楚辨識出月球變暗情況，故相機拍攝月食過程也要將半影月食過程納入拍攝計畫中，才是最完整的月食紀錄。

焦距越長的鏡頭放大效果越大，相對取景的範圍越小，將拍攝裝置架設於三腳架上可減少相機晃動，也便於穩定調整拍攝裝置指向，而月全食過程的月球較為昏暗，曝光時間需要拉長至數秒鐘，若能將拍攝裝置架設在赤道儀等追蹤裝置上追蹤，將可得到較佳效果，拍攝過程也因有追蹤裝置追蹤，抵銷地球自轉移動，就不用得一直調整鏡頭指向，相對也會輕鬆很多。

圖 4



利用星圖軟體Stellarium模擬本次月全食每間隔10分鐘情況，再將各影像拼貼在一起，呈現整個月食過程變化，影像拼貼方式可參考〈EASY拍星空22〉之長鏡頭日食過程-日食拼拼樂段落介紹。

記錄月食位置及變化 廣角間歇攝影

使用廣角鏡頭或短焦距長鏡頭搭配適當固定的取景拍攝，後續透過影像軟體後製將全部影像疊合在一起，就能將月食過程月球虧缺及位置變化同時呈現同一幅影像上。

要完成廣角間歇攝影紀錄，需先做好取景規劃，如圖5，包括選擇適當鏡頭焦段以涵蓋月食過程，以及取景構圖，現場拍攝要將相機架設於三腳架上，取景將月球放置於預先構圖對應位置，全程都保持相同的取景，並以固定間隔時間進行拍攝，過程中要適時調整曝光參數使月球曝光適中，拍攝設定及後續影像處理可參考〈EASY拍星空19〉之「廣角間歇攝影拍攝」及「間歇攝影影像疊合」二段內容。

間歇攝影拍攝時機 與曝光控制

要完整有系統的記錄月全食過程，必須事先擬訂好適當拍攝時機，拍攝時機可規劃以食甚時間作為基準，再規劃基準往前及往後相同間隔時間作為拍攝的時間點，如要完成圖4月全食全紀錄拼貼影像，拍攝間隔為10分鐘，而要完成如圖5涵蓋全景的廣角間歇攝影，其拍攝間格為5分鐘，拍攝間隔時間長短並無絕對數值，主要由拍攝主題、後製影像呈現及現場情況決定，若拍攝過程是雲來雲去不穩定天氣，可縮短取樣間隔或拍攝時機，以取得足夠相同間隔影像。另外，長鏡頭拍攝也可針對各個食象時間發生的時間點特別進行拍攝記錄。



以星圖軟體Stellarium查詢及規劃本次月食取景情況，以直幅取景使用28mm鏡頭恰可涵蓋全程並結合地景，詳細查詢步驟可參考〈EASY拍星空32〉之取景規劃及間歇攝影取景規劃二段內容。

設定曝光參數，一開始可先依表3的月食曝光指南查得曝光參數設定並試拍，再依影像情況調整參數使月球各區域曝光適中，如圖6，月食過程月球亮度變化大，得隨時依拍得影像情況做調整，以這次月食為例，全食前的偏食過程隨著食分增加及仰角降低，曝

光時間應會比參數表稍增加，進入全食之後得依當時月球亮度情況適度拉長曝光時間，後續也可以依影像情況判斷當下Danjon等級；食分較大及全食可另以不同程度曝光值進行記錄月球樣貌，並可進一步進行高動態範圍影像處理，如圖7，呈現更多細節。

表 3 月食曝光指南

ISO	光圈值								
	1.4	2	2.8	4	5.6	8	11	16	22
25	1.4	2	2.8	4	5.6	8	11	16	22
50	2	2.8	4	5.6	8	11	16	22	32
100	2.8	4	5.6	8	11	16	22	32	44
200	4	5.6	8	11	16	22	32	44	64
400	5.6	8	11	16	22	32	44	64	88
800	8	11	16	22	32	44	64	88	128
1600	11	16	22	32	44	64	88	128	176
食象	快門速度								
無月食									
滿月	1/4000	1/2000	1/1000	1/500	1/250	1/125	1/60	1/30	1/15
半影月食									
食分=1	1/2000	1/1000	1/500	1/250	1/125	1/60	1/30	1/15	1/8
月偏食									
食分=0.00	1/2000	1/1000	1/500	1/250	1/125	1/60	1/30	1/15	1/8
食分=0.30	1/1000	1/500	1/250	1/125	1/60	1/30	1/15	1/8	1/4
食分=0.60	1/500	1/250	1/125	1/60	1/30	1/15	1/8	1/4	1/2
食分=0.80	1/250	1/125	1/60	1/30	1/15	1/8	1/4	1/2	1 秒
食分=0.90	1/125	1/60	1/30	1/15	1/8	1/4	1/2	1 秒	2 秒
食分=0.95	1/60	1/30	1/15	1/8	1/4	1/2	1 秒	2 秒	4 秒
月全食									
Danjon 值 : L=4	1/2	1 秒	2 秒	4 秒	8 秒	15 秒	30 秒	1 分	2 分
Danjon 值 : L=3	2 秒	4 秒	8 秒	15 秒	30 秒	1 分	2 分	4 分	8 分
Danjon 值 : L=2	8 秒	15 秒	30 秒	1 分	2 分	4 分	8 分	15 分	30 分
Danjon 值 : L=1	30 秒	1 分	2 分	4 分	8 分	15 分	30 分	-	-
Danjon 值 : L=0	2 分	4 分	8 分	15 分	30 分	-	-	-	-

<https://www.mreclipse.com/LEphoto/>

月球曝光指南：

先找到相機設定的ISO值及鏡頭光圈值對應位置後，再向下查詢各月食過程，即可得到各食象的理論曝光值，拍攝後再依影像情況做調整。

圖 6



3幅不同曝光程度的月球影像比較，圖右可看到月球亮的區域呈現亮白看不到其中細節代表曝光過度，而圖左則是曝光不足致月球整體偏暗，圖中為曝光較適中影像。攝影 吳昆臻

圖 7



相同時間以不同程度曝光拍攝接近食既時的月球，後續以HDR（高動態範圍）後製處理，以呈現月球亮部及暗部情況。影像中在亮暗交界處藍色調是經由地球大氣較外層的臭氧層的折射光線，俗稱綠寶石帶（turquoise fringe）或藍帶，若以單一曝光進行拍攝，在食既前及生光後最為明顯。攝影 吳昆臻

長鏡頭間歇攝影若是架設在三腳架上拍攝，因採固定攝影無追蹤以抵銷地球自轉移動，在全食階段應注意曝光時間勿過長，不然影像中的月球會因位移有模糊脫線情況，最長曝光時間可用400法則概估（曝光時間（秒）=400/（鏡頭焦長（mm））），在獲得清晰影像前提下若無法加長曝光時間，最後就只能調高ISO值維持適當影像亮度，雖提高ISO值影像雜訊也會被提高，後續可透過後製將多幅影像疊合以降低影像雜訊。

一般拍攝月食得讀錶於預定拍攝時間按下快門，還得不時調整參數，單眼相機拍攝妥善運用排程快門線搭配包圍曝光功能，就能輕鬆拍攝月食並能有多點時間欣賞月食情況，排程快門線能控制相機於特定時間觸發快門拍攝，包圍曝光功能則一次拍攝不同曝光程度影像，事後再從中挑選曝光最適中影像，相關操作及測定詳情請參考〈EASY拍星空6〉「輕鬆拍月食」段落說明，而

更進階的拍攝方式可利用電腦程式排程進行月食拍攝，減少調整快門時的震動，以獲得更多不同程度曝光影像，電腦程式排程說明請參考《臺北星空77期·日食拍攝技巧》「利用排程軟體拍日食」段落說明。

9月8日的月食是近年臺灣地區觀測條件佳且全程可見的重大天象，十分令人期待，本篇先介紹本次月食情況及部分記錄及拍攝方式，下期還將繼續介紹其他觀測重點及拍攝方式。距離本次月食還有2個月，不妨開始準備拍攝器材，將這難得的重大天象記錄下來。〈EASY拍星空〉將繼續分享拍下美麗的星空的訣竅，敬請期待。

吳昆臻：臺北市立天文科學教育館

粉絲專頁：Kenboo 愛看星星的昆布

<https://www.facebook.com/AstroKenboo/>

排程快門線搭配包圍曝光功能的運用

一般拍攝月食得讀錶於預定拍攝時間按下快門，還得不時調整參數，使用單眼相機拍攝妥善運用排程快門線搭配包圍曝光功能，就能輕鬆拍攝月食並能有多點時間欣賞月食情況，設定步驟如下：

① 相機設定包圍曝光至±1至±3

包圍曝光會拍攝一組至少3幅不同曝光量影像，事後再從中挑選一張曝光最適當影像，影像存取RAW格式還可另進行更大幅度及細部曝光調整。

② 相機拍攝於連續拍攝，如圖8。

③ 排程快門線曝光時間設定3~5秒及設定拍攝間隔時間，如圖9。

此步驟是以與②搭配，當快門線觸發相機拍攝第一幅影像影像並存取，過程約歷時不到1秒，此時因快門線還處在曝光過程，再加上相機設於連拍，相機會馬上拍攝第二幅影像，存取後快門線若還在曝光過程，相機會繼續拍攝第三幅影像，再搭配①包圍曝光設定，就可以一次獲得3幅不同曝光程度影像。排程快門線設定拍攝間隔時間，就可以自動在下個拍攝時機拍攝下一組影像。

④ 於排定拍攝時間啟動排程快門線。

另外，更進階的拍攝方式可利用電腦程式排程進行月食拍攝，減少調整快門時的震動，以獲得更多不同程度曝光影像，電腦程式排程說明請參考《臺北星空77期·日食拍攝技巧》「利用排程軟體拍日食」段落說明。

圖 7



圖 8





每天都可以觀測6小時的日全食！

文／謝翔宇

你可能第一眼以為這又是一張尋常的日全食照片，但其實它並不屬於地球上曾發生的任何一次日全食，而是一場完全人造的太空日食！而且從現在開始，這樣的景象科學家們每天都能重現。

歐洲太空總署的Proba-3任務，透過兩顆衛星在軌道上維持約150公尺的精準編隊，其中一顆負責遮光、一顆精確觀測，兩者位置穩定精準控制在1公釐之內，成功製造出完美的人造日全食。搭載的ASPIICS儀器能穩定觀測太陽外層大氣—日冕，並突破傳統觀測的極限，將視野推進至僅1.1倍太陽視半徑處，首次深入過去難以觀測的空隙區域。

這項創舉讓以往需仰賴自然日食的日冕觀測得以常態化，每19.6小時即可重現一次，且單次可持續觀測長達6小時。這對研究太陽風與日冕物質拋射等劇烈活動極具意義，有助於揭開日冕為何遠比太陽表面還要高溫的謎題，也為理解太空天氣如何影響地球提供關鍵資料。Proba-3將偶發的自然奇觀，轉變為可控制的太空觀測平台，是太陽科學與太空工程的雙重突破。

網址：https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/Proba-3/Proba-3_s_first_artificial_solar_eclipse



來源：ESA/Proba-3/ASPIICS/WOW algorithm

美星映象館

Astronomical photo gallery

責任編輯／吳昆臻

南風車星系 (M83) 丁南昌



▲ 時間：2025/04/25

地點：南投縣信義鄉新中橫塔塔加

儀器：Askar 103 APO望遠鏡、ZWO ASI2600MC冷卻相機、iOptron GEM28赤道儀

參數：冷卻至-10°C、單幅曝光600秒，20幅疊合，總曝光3.3小時

後製：PixInsight、Adobe Photoshop

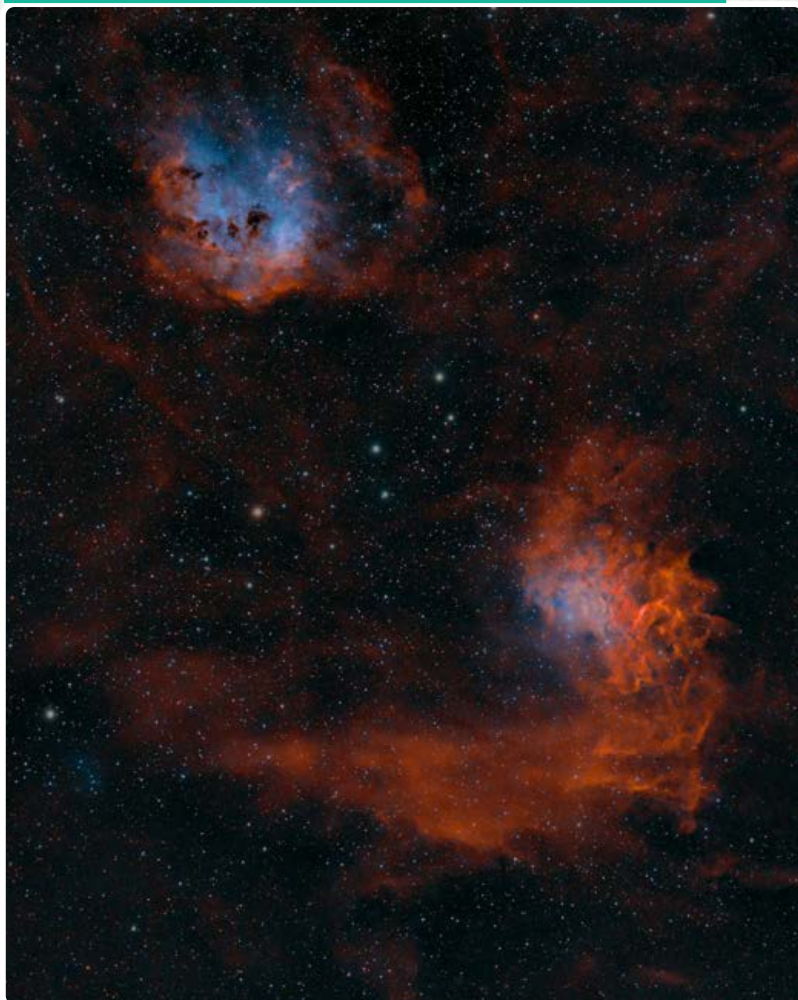
說明：M83是一個面向地球的棒旋星系，位於長蛇座，距離我們約1500萬光年，是本星系群中最明亮、也最活躍的星系之一。它的螺旋臂清晰、對稱，布滿了粉紅色的HII區和藍白色的年輕恆星，是恆星誕生非常旺盛的區域。

- ▶ 時間：2023/10/12~2024/01/12，共三晚
地點：新竹縣尖石鄉宇老觀景台
儀器：Sigma 135mm F1.8 DG HSM Art 鏡頭、ZWO ASI071MC Pro 冷卻相機
參數：Gain94、光圈F2.8、單幅曝光300秒，72幅疊合，總曝光6小時
後製：Astro Pixel Processor、Adobe Photoshop CS6
說明：紅紗如夢，黑馬如風，星塵霧氣氤氳，光影塵埃交雜，冬季獵戶座分子雲複合體中的M78區域，展現了令人著迷的繽紛與神秘。

繽紛 M78 周邊 王朝鈺



燃燒的御夫座 IC 405與IC 410 馬宇慧



- ◀ 時間：2025/1/29
地點：新竹縣湖口鄉自宅屋頂
儀器：William RedCat 51 WIFD 望遠鏡、ZWO ASI2600MC Duo 冷卻相機、iOptron GEM28 赤道儀
參數：冷卻至-10°C、單幅曝光300秒，48幅疊合，總曝光4小時
後製：PixInsight、Adobe Photoshop
說明：畫面主體為御夫座的火焰星雲（IC 405、下）與蝌蚪星雲（IC 410、左上）。本次後製使用 PixInsight 的 Narrowband Normalization 套件，原始影像中兩個星雲中心為亮橘色，透過 H α 窄頻色板處理，展現其中心藍色反射特性。同時也深入研究 SHO、H α 、H α -OIII、SII-H α 等色板差異與應用。

M65 (左) 、M66 (右) 星系 林啓生



▲ 時間：2025/2/28

地點：南投縣信義鄉新中橫塔塔加地區

儀器：高橋MT160望遠鏡、Baader MPCC3修正鏡、PLAYER ONE Uranus-C相機、高橋EM200USD赤道儀、離軸導星裝置

參數：單幅曝光100秒，123幅疊合，總曝光3.4小時

後製：PixInsight、Adobe Photoshop，萬明德影像處理

說明：春天夜空中有著一大堆大小不一的星系，視直徑比較大的大多被編入M天體目錄中。M65和M66位在獅子座東邊三顆呈直角三角形、直角點這顆星的南側位置。M65盘面斜對我們，M66旋臂幾乎正對地球。1990年代曾經在逢甲夜市旁租處透天厝屋頂，以16公分牛頓反射鏡看過它們的身影，現在光害更嚴重了，在原地再度見其光蹤已不可能。

風車星系 (M101) 黃歆杰



▲ 時間：2023/6/20、2025/4/29

地點：雲林縣臺西鄉自宅樓頂

儀器：Askar FRA400望遠鏡、Nikon D610相機、Sky-Watcher AZ-GTi電動經緯儀（赤道儀模式）、STC AM濾鏡、L-Quad Enhance濾鏡

參數：ISO500、單幅曝光600秒×24幅；ISO1600、單幅曝光300秒×16幅，總曝光5.3小時

後製：PixInsight、Adobe Photoshop

說明：風車星系位於大熊座尾部、北斗七星勺柄附近，是眾多星系目標中較大且明亮的一個，直徑估計是銀河系的兩倍左右，屬於北天中相對容易拍攝的深空目標。

夏季天蠍座調色盤星雲

林 侑 立



- ◀ 時間：2024/07/04
- 地點：南投縣仁愛鄉合歡山小風口停車場
- 儀器：SAMYANG 135mm F2.0 ED UMC鏡頭、Nikon D610相機、iOptron SkyGuider Pro赤道儀
- 參數：ISO800、單幅曝光120秒，54幅疊合，總曝光1.8小時
- 後製：Siril、PixInsight、Adobe Photoshop
- 說明：暑假期間用最便宜的設備想辦法拍出最好的效果。

IC 4592藍馬頭星雲

陳 志 航

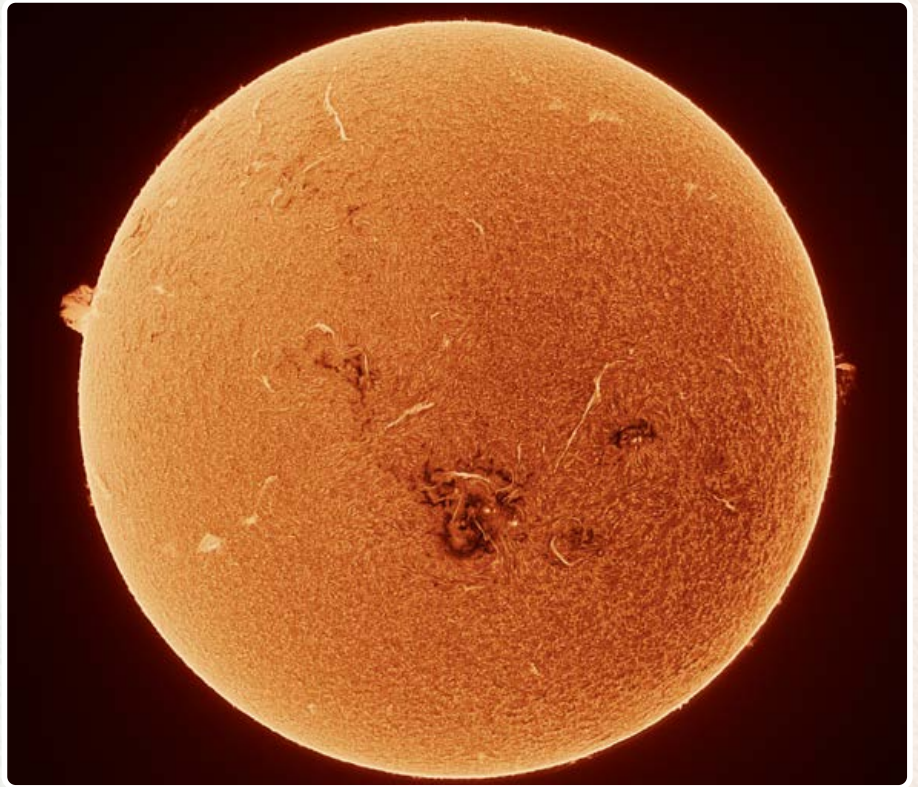


- ▲ 時間：2023/4/17、2023/4/18
- 地點：南投縣仁愛鄉合歡山昆陽停車場、南投縣仁愛鄉合歡山小風口停車場
- 儀器：Takahashi FSQ85ED望遠鏡、FL1.01X平場鏡、Canon 60D (改) 相機、Takahashi EM-11 Temma2 Jr赤道儀
- 參數：ISO800、單幅曝光300秒，84幅疊合，總曝光7小時
- 說明：IC 4592是一片明暗雲氣交織的反射星雲，由天蠍座 ν 星照亮，營造出迷人的藍色調性，因此被稱為藍馬頭星雲。

- 時間：2025/6/2
地點：新北市中和區
儀器：ACUTER鳳凰座40太陽日珥觀測望遠鏡、ZWO ASI678MM天文相機、SolarQuest自動尋日雲台與腳架、筆記型電腦
參數：曝光1毫秒、總幀數861、影片長度50秒，取樣前50%影像疊合
後製：AutoStakkert!4、Adobe Photoshop
說明：最近的太陽活動非常旺盛，使用特殊的日珥觀測望遠鏡搭配天文相機與專用拍攝軟體，便能用錄影疊圖法拍攝出一般太陽減光濾鏡無法觀測的窄頻波長影像。照片中可見左右兩側皆有比地球更大的日珥噴出，太陽表面亦呈現明顯活動痕跡，畫面十分精彩。

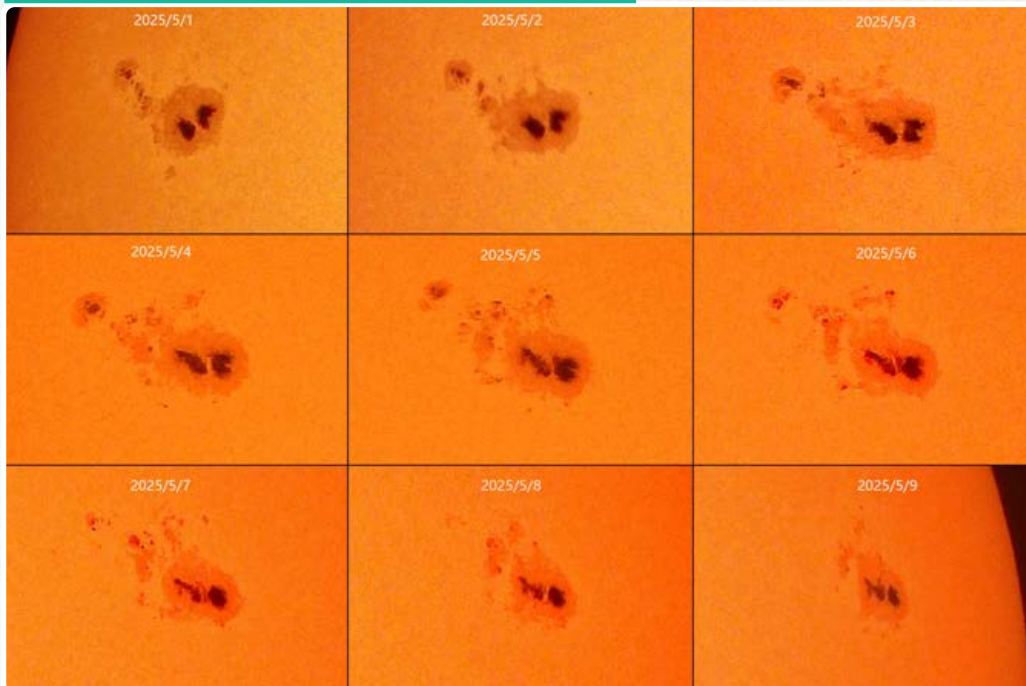
活耀的太陽表面及日珥

黃路克、盧彥霖



太陽黑子群AR4079紀錄

謝易翰



- 時間：2025/5/1~5/9
地點：臺南市安平區
儀器：NIKON P1000相機 @2000mm、巴德膜太陽濾鏡
參數：ISO100-140、光圈F6.3-F8.0、單幅曝光1/500-1/640秒，自動模式
後製：Adobe Photoshop
說明：近年是太陽黑子活躍期，4月29日從SOHO網站注意到有一大型黑子群AR4079剛從太陽邊緣出現，開始每日記錄此太陽黑子群的變化。AR4079大小約為地球直徑的11倍。因天氣因素成功記錄9天，取其中較佳的照片用Photoshop裁切、格放、編排與修飾。

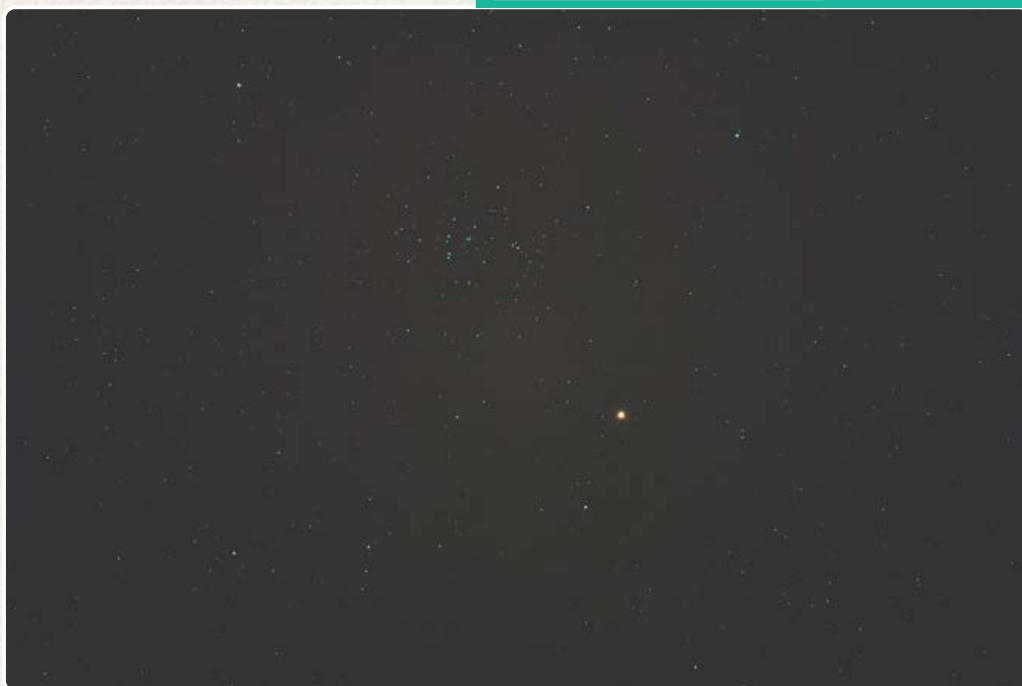
南十字座 蔡明翰



◀ 時間：2022/6/18
地點：澳大利亞新南威爾斯州Manton，遠端遙控拍攝
儀器：Askar ACL200望遠鏡、QHYCCD QHY600PH C相機、Avalon Instruments M-Zero HQ赤道儀
參數：單幅曝光120秒，27幅疊合，總曝光54分
說明：南十字座是南半球最著名的星座之一，由四顆明亮星星組成十字形，常用於辨識南方方向，對南半球文化與航海歷史具有重要意義。

▼ 時間：2025/5/2 20:20~20:34
地點：新北市鶯歌區
儀器：NIKON AF-S NIKKOR 70-200mm f/2.8E FL ED VR鏡頭@200mm、Nikon D7500相機、iOptron 星空雲台
參數：ISO1600、光圈F2.8、單幅曝光3秒，98幅疊合
後製：Nikon原廠軟體、Sequator、Adobe Photoshop CS6
說明：單幅曝光3秒拍攝98幅後，先用原廠軟體處理暗角，再經Sequator挑選最佳影像進行疊合，最後用Photoshop CS6微調。雖然在充滿光害的市中心拍攝，不時還有高積雲干擾，但幸好成果還算不錯。

火星接近 M44 星團 王彥翔



水星合月 林家名

▶ 時間：2025/3/1 18:45
地點：臺南市安平區
儀器：Canon EF-S 18-55mm f/4-5.6 IS STM
鏡頭、Canon EOS 800D相機
參數：ISO1600、光圈F5.6、單幅曝光1.6秒
說明：因為水星相當接近太陽，僅有東大距及西大距前後較容易觀賞。

▼ 時間：2020/7/22 19:25
地點：花蓮縣花蓮市環保公園
儀器：Sigma 150-600mm F5-6.3 DG DN OS
Sports鏡頭@600mm、Canon EOS
RP相機
參數：ISO800、光圈F9、單幅曝光2.8秒
說明：剛要落入中央山脈的眉月，地球照很明顯，與中央山脈山脊上的樹影前景構成了一幅迷人的畫面。



眉月下山 林柏偉



夏季銀河與弦月初升 簡承禾



- ◀ 時間：2025/03/24 約02:30
- 地點：南投縣仁愛鄉合歡山小風口停車場
- 儀器：NIKON NIKKOR 24-70mm f/4 S鏡頭@24mm、Nikon Z5相機
- 參數：ISO4000、光圈F4、單幅曝光20秒，5幅疊合
- 後製：Sequator、Adobe Photoshop
- 說明：下弦月初升，在長曝光下，宛如日出，與銀河共照山頭，色溫逐漸分化成黃、藍兩層。

校園銀河 洪銘均



- ▲ 時間：2025/04/30 01:40
- 地點：基隆市中正區海洋大學商船系館頂樓
- 儀器：Samyang 12mm F2.8 ED AS NCS Fisheye鏡頭、Canon EOS R8相機
- 參數：星空：ISO1000、光圈F2.8、單幅曝光20秒，24幅疊合
- 地景：ISO1000、光圈F2.8、單幅曝光20秒
- 後製：Adobe Lightroom、Adobe Photoshop
- 說明：拍攝夏季銀河季節到了，4月底銀河約在22點左右升起，但實際到達可拍攝高度約要到1點左右才方便拍攝。跟朋友吃完宵夜後，獨自前往校內商船學系頂樓拍攝。校內光害Bortle scale約為6級，商船頂樓可降低至5~6級。原本以為這樣的光害等級無法拍攝到銀河，嘗試性地拿出相機拍攝單張後成功捕捉到銀河輪廓。透過疊圖與Lightroom修圖成功拉出銀河，再透過Photoshop結合前後景，順利完成這張「校園銀河」的拍攝。

浩瀚宇宙無限寬廣

穹蒼之美盡收眼底

