

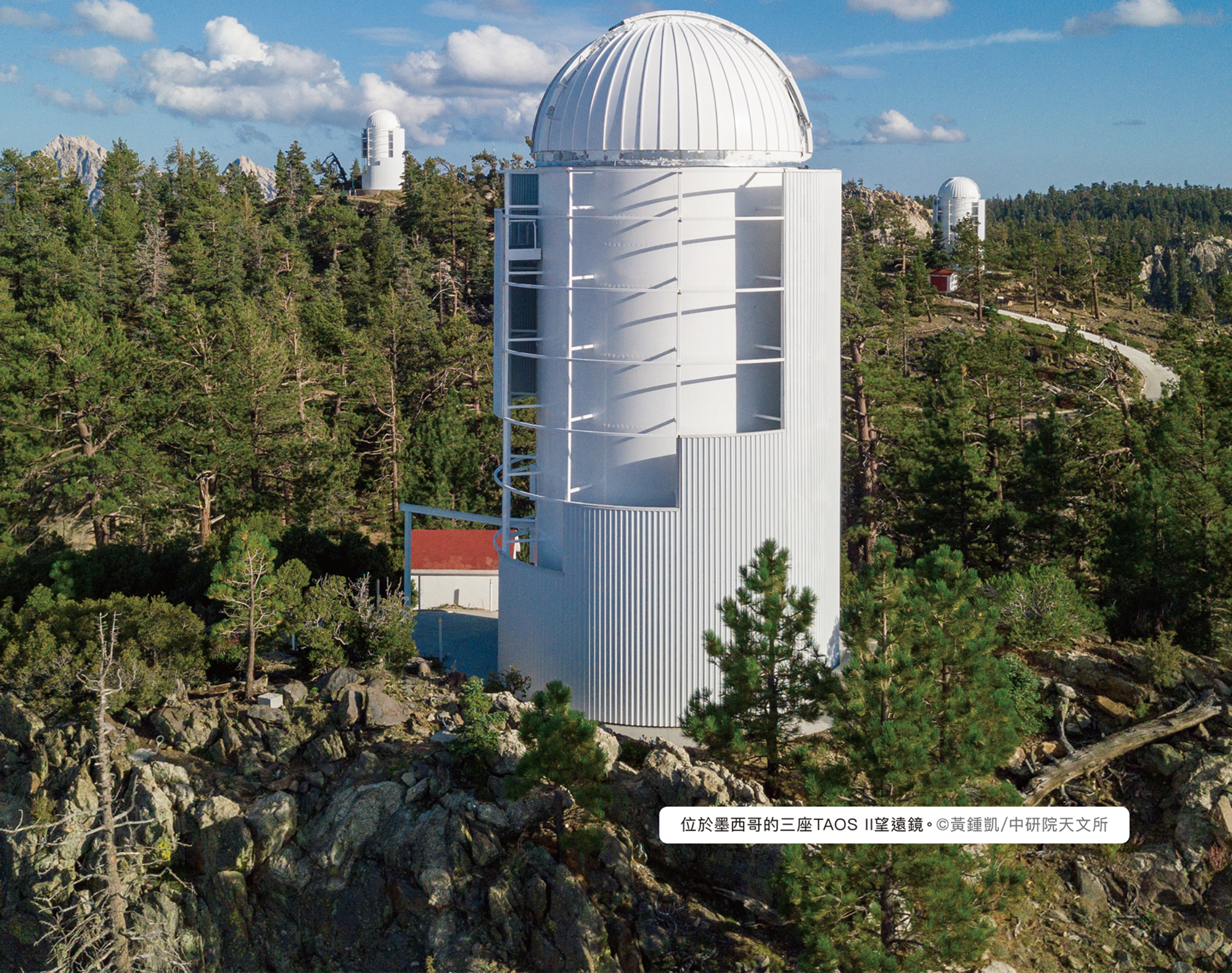
中研院天文所季報
ASIAA Quarterly Press
<http://www.asiaa.sinica.edu.tw>



中華民國114年 秋季號



TAOS II 道誓再起



位於墨西哥的三座TAOS II望遠鏡。©黃鍾凱/中研院天文所

TAOS II 計畫 的科學目標與背景

作者：陳英同

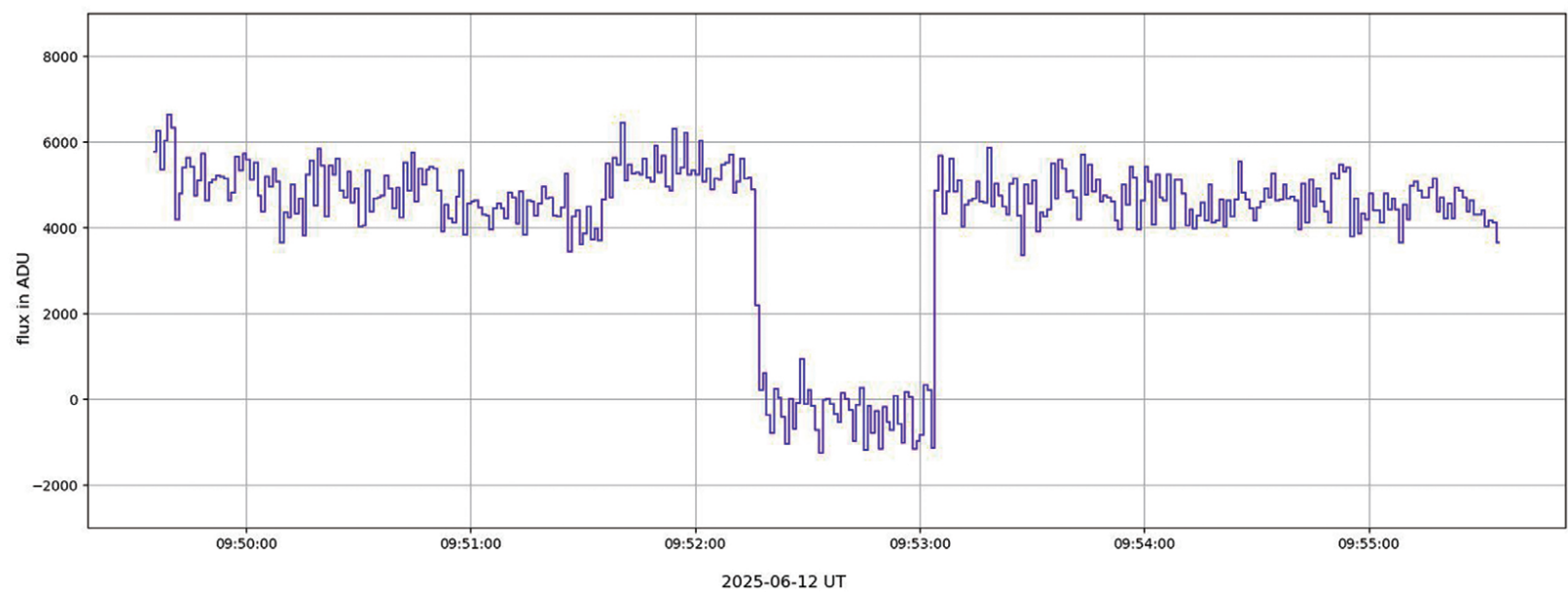
海王星外自動掩星普查計畫（Transneptunian Automated Occultation Survey II，簡稱 TAOS II）是一項由臺灣主導、國際合作進行的天文觀測計畫，利用透過「掩星」現象來探測太陽系邊緣極為微小的天體。簡言之，TAOS II 的科學目標是量測海王星軌道以外的天體（Trans-Neptunian Objects，簡稱為 TNO）數量和尺寸分布，特別是直徑約數百公

尺至幾十公里的天體。這種遙遠冰岩天體被認為是太陽系早期形成時殘留下的「化石」，其數量與大小分布保留著太陽系形成過程和動力演化的重要線索。同時，他們也是短週期彗星的來源區之一，透過清點不同大小的海王星外天體數量，我們可以窺探這些邊陲天體如何在行星引力擾動下離開原有軌道、進入內太陽系成為彗星的機制。由於距離遙遠且體積小，這類天體本身

過於昏暗，當今最大的光學望遠鏡也難以直接偵測到。為了突破這個限制，TAOS II 採用了掩星法：當一顆微小天體恰好從遙遠恆星與地球觀測者之間經過時，會短暫擋住部分恆星的光，導致恆星亮度出現不到一秒的瞬間暗化。TAOS II 望遠鏡陣列即透過高速度、高靈敏度的觀測來捕捉這種「恆星眨眼」現象，從中統計分析掩星事件，以達成探索太陽系外圍小天體的科學目標。



位於墨西哥聖彼德羅馬蒂爾天文台的三座 TAOS II 望遠鏡圓頂。© 王祥宇 / 中研院天文所



TAOS II 實際觀測的創神星（Quaoar）光變曲線資料。© 中研院天文所

海王星外天體的探測意義：

位於海王星軌道約 30 天文單位之外的區域，蘊藏無數冰凍的小天體，包括著名的冥王星，以及直徑數十至數百公里等不計其數的小行星。了解這些小天體的數量和大小分布可以檢驗太陽系形成模型：理論預測這些天體的尺寸分布可能在某個尺度出現轉折，這轉折位置與天體間的碰撞過程以及其組成強度有關，可以反映小天體經過 45 億年的碰撞演化是否被「磨碎」成很小的碎片或仍大量存在。如果觀測到大量公里級這類尺寸的天體，意味著這些天體的結構較強且碰撞過程較不劇烈；反之，若此類天體稀少，則暗示長期碰撞或動力作用已經明顯將這些天體削減為極小的碎片。

TAOS I 的開創性嘗試與局限：

TAOS II 計畫源自於先前 TAOS I 的經驗與成果。TAOS I (Taiwanese-American Occultation Survey, 即「臺美掩星計畫」) 是第一階段的跨國合作掩星巡天計畫，由臺灣、美國及韓國等研究單位合作，在臺灣鹿林天文臺架設了四架口徑 50 公分的自動望遠鏡陣列。該計畫自 2005 年起連續觀測多年，以

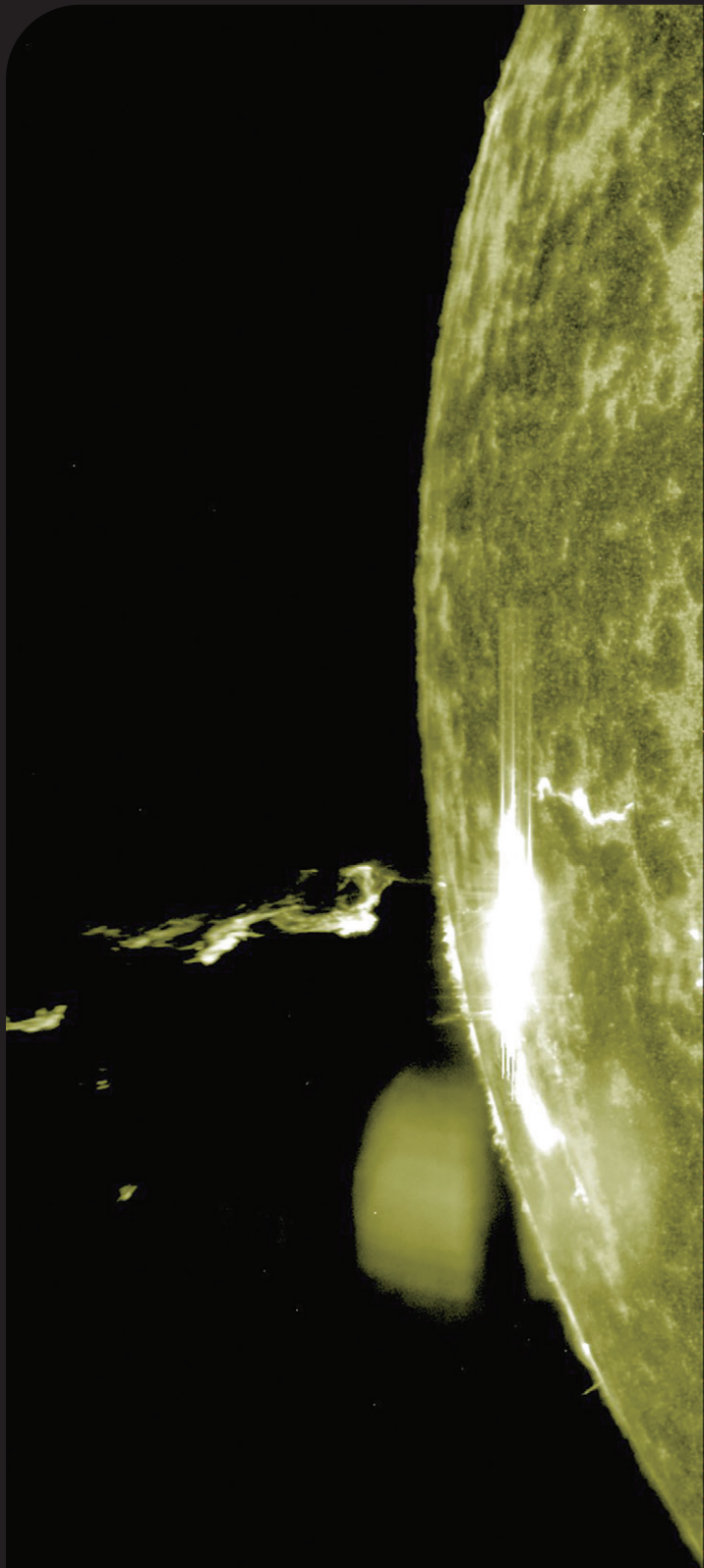
4 架望遠鏡同時監測約 500 顆恆星的亮度，每秒拍攝 5 次影像 (5 Hz)，耐心等待其中某顆星因遠方小天體掩蔽而發生短暫變暗。在長達六年的觀測中，TAOS I 累積了超過十億筆的恆星亮度測量資料。雖然最終並未偵測到明確的掩星事件，但這一結果本身為科學提供了寶貴訊息：它為 TNO 的數量給出了上限約束。換言之，TAOS I 證實了若干模型預言的大量小天體是不存在的，否則按照觀測範圍早應探測到掩星跡象。這項開創性的嘗試一方面驗證了掩星搜尋技術的可行性，另一方面也指出需要更高靈敏度的設備才能深入揭示 TNO 族群。

TAOS II 的提升與延續：

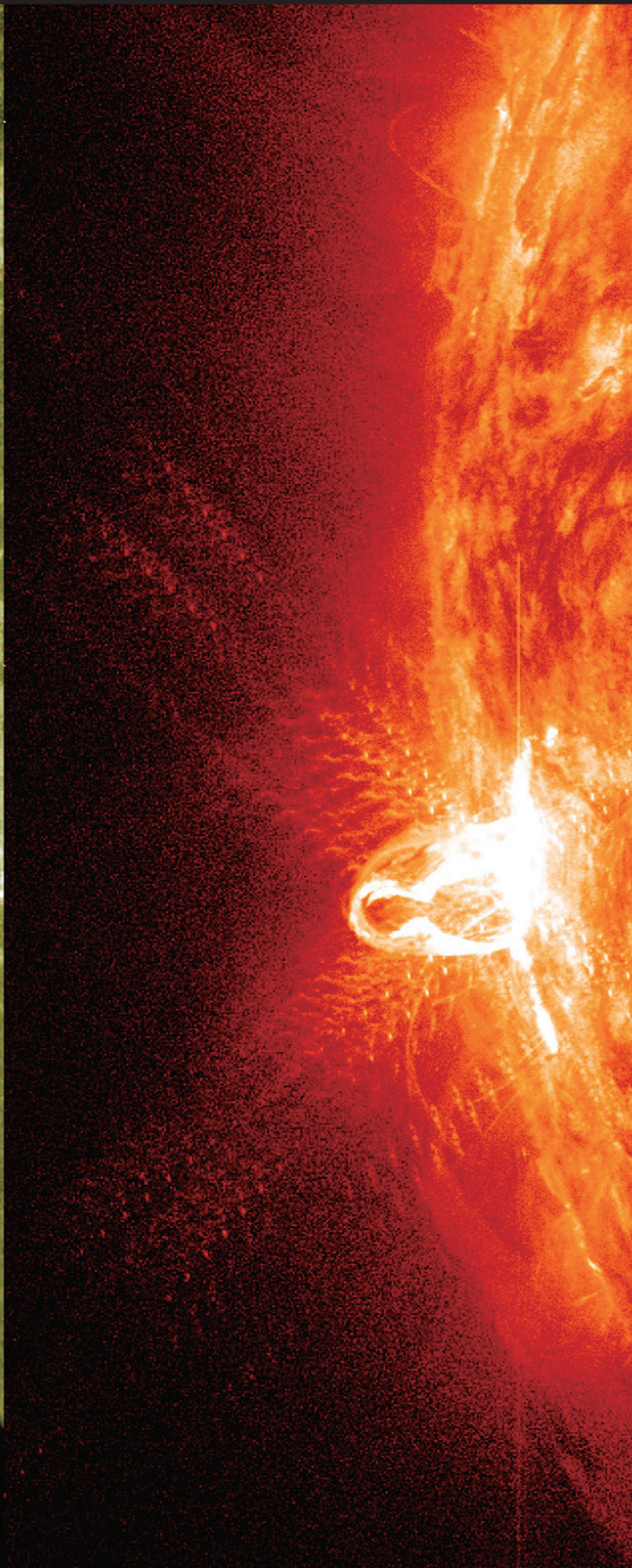
總結 TAOS I 的經驗後，本所著手設計升級版的第二階段計畫，也就是 TAOS II。相比前代，TAOS II 在多方面大幅強化。首先，新計畫選址在視野遼闊、天氣穩定的墨西哥聖彼德羅馬蒂爾國家天文台（簡稱為 OAN-SPM）。SPM 天文台位處墨西哥西北部海拔近 2800 公尺的偏遠山區，夜空暗黑且大氣穩定，非常適合進行高精度的微弱光變觀測。其次，

TAOS II 配備了三台口徑 1.3 米的全自動望遠鏡，每台都裝載最新研發的高速數位相機。單台望遠鏡的集光力遠勝過 TAOS I 的 0.5 米望遠鏡，使得可監測的恆星數量和亮度精度大為提升。同時，相機讀出速度也顯著提高，達到每秒 20 張影像 (20 Hz)，每幅畫面中可同時監看數千顆恆星。三台望遠鏡協同運作時，TAOS II 實際上能對數千顆恆星進行毫秒尺度的亮度監測，如此龐大的觀測視野和高速取樣大幅增加了捕捉稀有掩星事件的機率。由此產生的資料量也極為驚人——預計每年將累積超過 300 兆位元組 (300 TB) 的原始影像數據。相較之下，TAOS II 的靈敏度預期將比 TAOS I 提升約 100 倍。這項新巡天的設計目標是能夠「看到」TAOS I 未能看到的，更小、更暗天體造成的微弱掩星現象，提供 TNO 數量密度分佈。2017 年底三台望遠鏡在墨西哥完成安裝，並於 2025 年正式開始科學觀測運行。透過更強大的裝置，TAOS II 將延續並拓展前驅計畫的科學使命，朝著實際檢測到海王星外小天體掩星事件邁進。

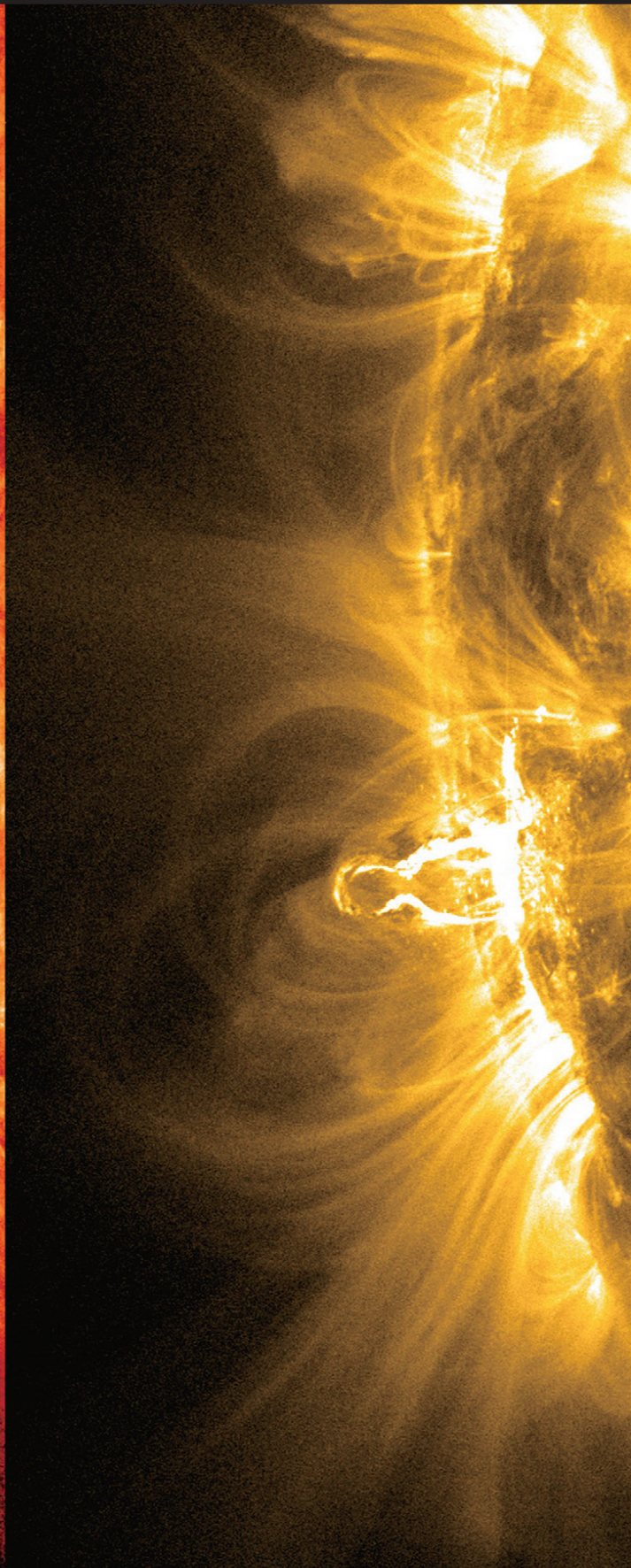




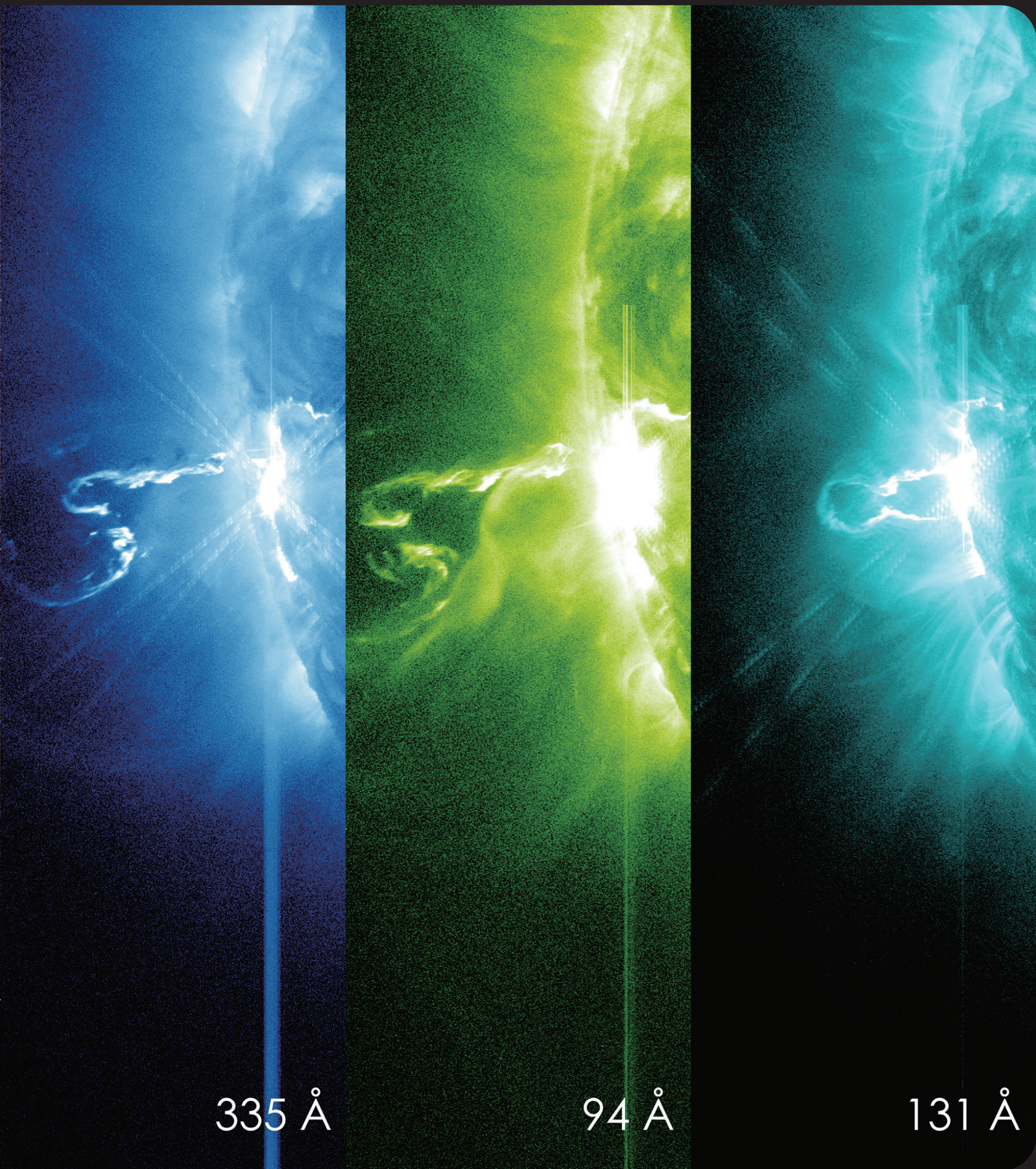
1600 Å



304 Å



171 Å



美國太空總署太陽動力學觀測站在 2014 年觀測到不同波長的太陽閃焰。©NASA/SDO

TAOS II： 追蹤「海王星外小世界」 的大計畫

作者：黃鍾凱

在太陽系海王星以外的地方，有許多小小的冰天體靜靜地繞著太陽轉。它們距離我們非常遙遠，用望遠鏡拍照也很難看清。但有一種方法，可以「間接」找到它們——就是觀察它們在運行時，從我們的視線中「擋住」遠方星星的光，這個現象叫做「掩星」。TAOS II 是利用掩星法尋找那些位於

海王星外、難以直接觀測的天體。本所與國際團隊合作，從 2010 年開始在墨西哥 SPM 天文台建造三台專用光學望遠鏡，目的是捕捉宇宙中恆星被小天體遮住的瞬間。TAOS II 望遠鏡採用非常廣角（F/4）的光學系統，視野可達 2.3 平方度，意味著在單次拍攝中能捕捉更多畫面，就像是用手

機的廣角相機一樣。在天文觀測中，口徑越大代表集光面積越大，直徑 1.3 公尺的主鏡也就能看到更暗的天體。在這兩項優勢的加持下，預期每張影像中可觀測到接近 10,000 顆天體。

TAOS II 相機使用 CMOS 感光元件，單張影像接近九千萬像素。如果將這



左：兩個高 12 米的望遠鏡基座吊掛。右：外殼骨架施工。© 黃鍾凱 / 中研院天文所

些資料全部讀出，單張影像容量約為 170 MB；若整晚拍攝此類影像，硬碟空間很快就會用盡了。此時便能善用 CMOS 的優勢——每個像素都能獨立讀出。想像一張照片中布滿密密麻麻的各式天體，但我們需要監測的僅是其中幾顆目標星。與其先完整拍下所有天體再去檢查目標星，不如一開始就只讀出目標星周圍的影像，略過不關心的部分。這不僅節省了檔案容量，也能減少後續資料處理的時間。當相機開始工作時，三台望遠鏡會同時指向同一片天區，並同步拍攝 10,000 顆天體。由於觀測的事件時間尺度極短，大多數只有 0.2 秒，我們會以每秒 20 張的速度拍攝，類似錄影方式，才能完整捕捉事件變化的細節。當同一事件被三台相機同時觀測到時，我們對事件的信心度會大增，證據就更具說服力。

計劃啟動與技術準備

要讓天文觀測站開工，三樣關鍵角色缺一不可：望遠鏡、圓頂和相機。望遠鏡就像觀測站的「眼睛」，必須精準又穩定；圓頂是它的「房子」，平時幫它遮風擋雨，觀測時只開一條窄縫給它「偷看」天空，避免外界干擾。因為市面上找不到符合 TAOS II

需求的相機，我們乾脆自己研發了一款高速 CMOS 相機——每片感測器有 1920×4608 像素，一共有十片感測器，能高速連拍，非常適合捕捉掩星這種轉瞬即逝的天文事件。2013 年 5 月，我們在墨西哥 SPM 天文台舉行開工典禮，同年 11 月三台望遠鏡正式驗收。這座天文台位於海拔約 2800 公尺的山上，距離最近的城市恩塞納達（Ensenada）得開 4-5 小時的車才能到。沿途是乾燥的沙漠和草原，隨處可見像刺蝟一樣的巨大龍舌蘭。這裡的平地年降雨量不到 100 毫米，山上也只有 500-600 毫米，和台灣山區動輒 5000-6000 毫米的雨量相比，乾燥得多，非常適合設置天文觀測站。

基礎設施建設與場地準備

2014-2016 這幾年，我們的重心不在觀測，而是在「蓋舞台」。先鋪好電力線、光纖管道，確保未來望遠鏡有穩定電力和快速網路可用。2015 年，三座高 12 米的望遠鏡基座拔地而起，就像三個巨型石墩，穩穩地站著，不怕強風吹，也不怕被圓頂擋到視線。到了 2016 年，圓頂開始組裝。它們不只是望遠鏡的「防風雨外套」，還能旋轉、開合，配合望遠鏡追蹤天

空。施工過程不輕鬆，地形複雜、環境要求嚴格，但團隊還是完成了道路、電力、基礎和基座的工程，為望遠鏡正式登場做好了萬全準備。

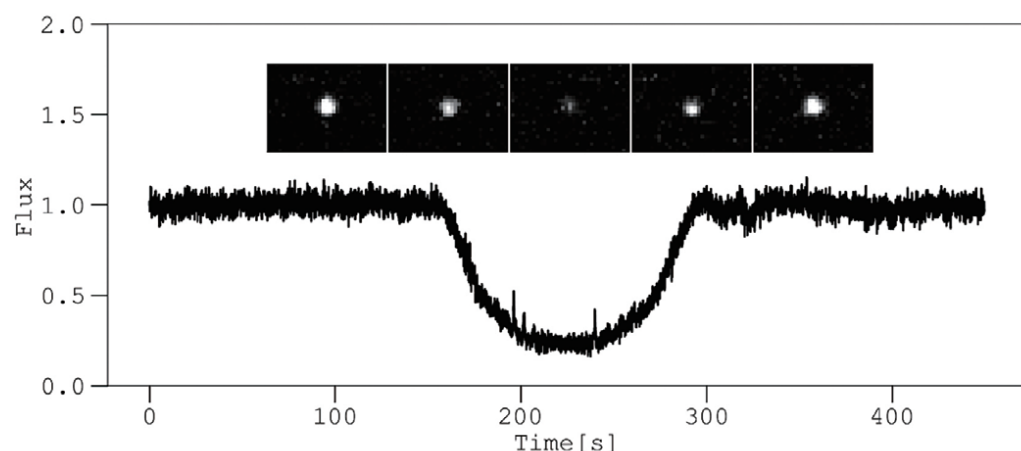
2018-2020：光學測試

2018 年，TAOS II 進入光學與系統測試，驗證望遠鏡的科學實力。8 月中，我們用工程測試用相機成功觀測到冥王星掩星——冥王星從一顆背景恆星前經過，整個過程長達 150 秒。雖然 TAOS II 的目標是捕捉不到 1 秒的短暫掩星，但這次觀測不僅驗證了高速讀取功能，也大大增添了信心。然而 COVID-19 疫情導致天文台暫時關閉，僅剩台北與恩塞納達的遠端工作繼續。

2021- 現在：科學用相機登場

疫情趨緩後，科學用相機從台北運至墨西哥 SPM 天文台，進行嚴格測試與調整，確保在各種環境下穩定運作。由於多年停擺，主鏡與次鏡積滿灰塵，影響反射率，團隊為其進行徹底清潔並重新鍍膜，大幅提升望遠鏡性能。2023 年，科學相機順利安裝，搭配先進光學與機械設備，TAOS II 系統逐步完善，為正式科學觀測奠定基礎。

自 2010 年啟動，TAOS II 從藍圖逐步實現為高效觀測系統。歷經技術研發、基礎建設、望遠鏡與圓頂安裝、光學測試等階段，系統整合了客製化高速 CMOS 相機（ 1920×4608 像素，每秒 20 張），能精準捕捉短暫掩星事件。計畫展現了台灣在天文觀測技術的自主研發實力，並與美國、墨西哥、加拿大等國際夥伴緊密合作。目前，TAOS II 將持續優化遠端控制與資料處理系統，預計九月開始科學觀測，在五年內捕捉足夠掩星事件，為太陽系邊陲天體提供關鍵數據，在國際天文領域中占有一席之地。



圖為 2018 年 8 月中所觀察的冥王星掩星事件，可以看到背景星（圖中的亮點）慢慢變暗再變亮的全過程。© 黃鍾凱 / 中研院天文所

發現遙遠天體「菊石」—— 揭開太陽系邊陲的祕密

太陽系的最外圍是否隱藏著「第九行星」？由本所王祥宇研究員與陳英同博士帶領的國際團隊，利用位於夏威夷的 Subaru 望遠鏡，發現了一顆非常遙遠的外太陽系天體——「2023 KQ14」，暱稱為「菊石」（Ammonite）。

菊石的近日點為 66 天文單位（au），屬於極罕見的「類賽德娜天體」（Sednoids）。這類天體的軌道遠在海王星的引力影響之外，目前已知的只有 4 顆，而菊石是最新發現的一顆。特別的是，菊石的運行方向與其他 3 顆不同，顯示外太陽系的結構比科學家原先想像的更複雜，也讓「第九行星」存在的可能性變得更低。

已知的類賽德娜天體包括：賽德娜（近日點 76 au）、2012 VP113（80 au）和 Leleākūhonua（65 au）。它們的軌道異常，曾被認為可能是第九行星或其他重力來源造成的結果。菊石的出現，證明這片過去幾乎沒有發現天體的「空白區域」其實並非真正空無一物，而是過去望遠鏡能力不足所致。

大多數類賽德娜天體軌道方向一致，但菊石軌道卻朝另一方向。這意味著，如果第九行星真的存在，它必須能解釋這個例外情況。陳英同指出：「發現菊石，就像在太陽系的邊緣找到遺失的拼圖，讓我們更了解外太陽系的多樣性。」

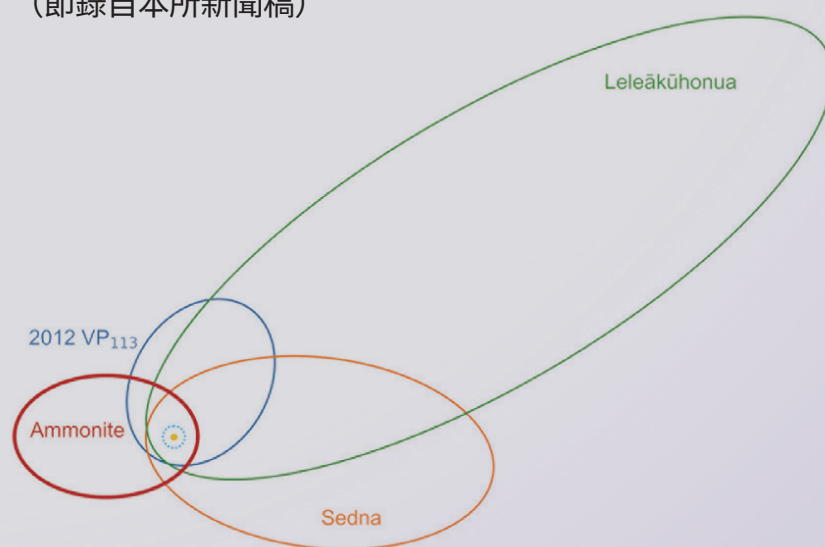
團隊使用位於夏威夷毛納基山上的 8.2 米 Subaru 望遠鏡，搭配本所與日本國立天文台合作研發的廣角可見光相機 HSC，搜尋這類暗淡又移動緩慢的天體。2024 年，團隊再

用加法夏望遠鏡（CFHT）進行後續觀測，並比對過去十多年的資料庫影像，最終確認菊石的軌道。

電腦模擬顯示，菊石的軌道數十億年來幾乎沒有改變，不受其他行星影響，成為保存最完好的太陽系「化石」之一。它可能自太陽系誕生初期就存在，保留了早期的軌道樣貌。另一項模擬顯示，大約 42 億年前，菊石與其他類賽德娜天體可能曾經呈現軌道群聚現象，後來因某顆古老行星的消失，才變成現在的分布。

王祥宇表示，菊石讓我們更接近了解太陽系外圍的真相：「不論是曾經擦身而過的恆星，還是隱藏行星的影響，菊石的發現都是揭開這段歷史的重要一步。」

（節錄自本所新聞稿）



菊石（紅圈）與其他三顆類賽德娜天體的軌道。中間的淺藍小圈代表海王星軌道。© 陳英同（中研院天文所）

天聞季報編輯群感謝各位閱讀本期內容，特別感謝台北藝術院院長、國家文官學院講座教授張禮權博士惠賜刊頭題字。本季報由中央研究院天文所發行，旨在報導本所相關研究成果、天文動態及發表於國際的天文新知等，提供中學以上師生及一般民眾作為天文教學參考資源。歡迎各界來信提供您的迴響、讀後心得、天文問題或是建議指教。來信請寄至：「臺北市 羅斯福路四段 1 號 中央研究院 / 臺灣大學天文數學館 11 樓 中央研究院天文所天聞季報編輯小組收」。歡迎各級學校師生提供天文相關活動訊息，有機會在天聞季報上刊登喔！

發行人 | 彭威禮。執行主編 | 周美吟。美術編輯 | 王韻青、楊翔伊。執行編輯 | 曾耀寰、劉君帆。
發行單位 | 中央研究院天文及天文物理研究所。
天聞季報版權所有 | 中研院天文所。ISSN 2311-7281。GPN 2009905151。
地址 | 中央研究院 / 臺灣大學天文數學館 11 樓。(臺北市羅斯福路四段 1 號)。
電話 | (02)2366-5415。電子信箱 | epo@asiaa.sinica.edu.tw。

