

天間

中華民國 114 年
春季號

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



神策妙算 洩天機



本所陳科榮助研究員用超級電腦模擬的極新星震波突破。

以不變應萬變： 默契十足的恆星團形成

李悅寧 國立臺灣師範大學地球科學系副教授

恆星形成涵蓋不同尺度之天文現象，可以概括敘述為一系列由重力引發的塌縮碎裂過程，然其中卻牽涉到許多非線性的物理交互作用，如高馬赫數的湍流、低電離的電漿、不規則的磁場、宇宙射線與熱輻射。恆星形成的環境百百種，但若以結果論，所有恆星團的質量組成都令人出乎意料地相似。宇宙作為實驗室，觀測學家抽絲剝繭，理論學家抓耳撓腮，計算學家兩眼發直緊盯螢幕，就為了解釋並驗證恆星形成的過程中，什麼是橫跨宇宙千古不變的通則。

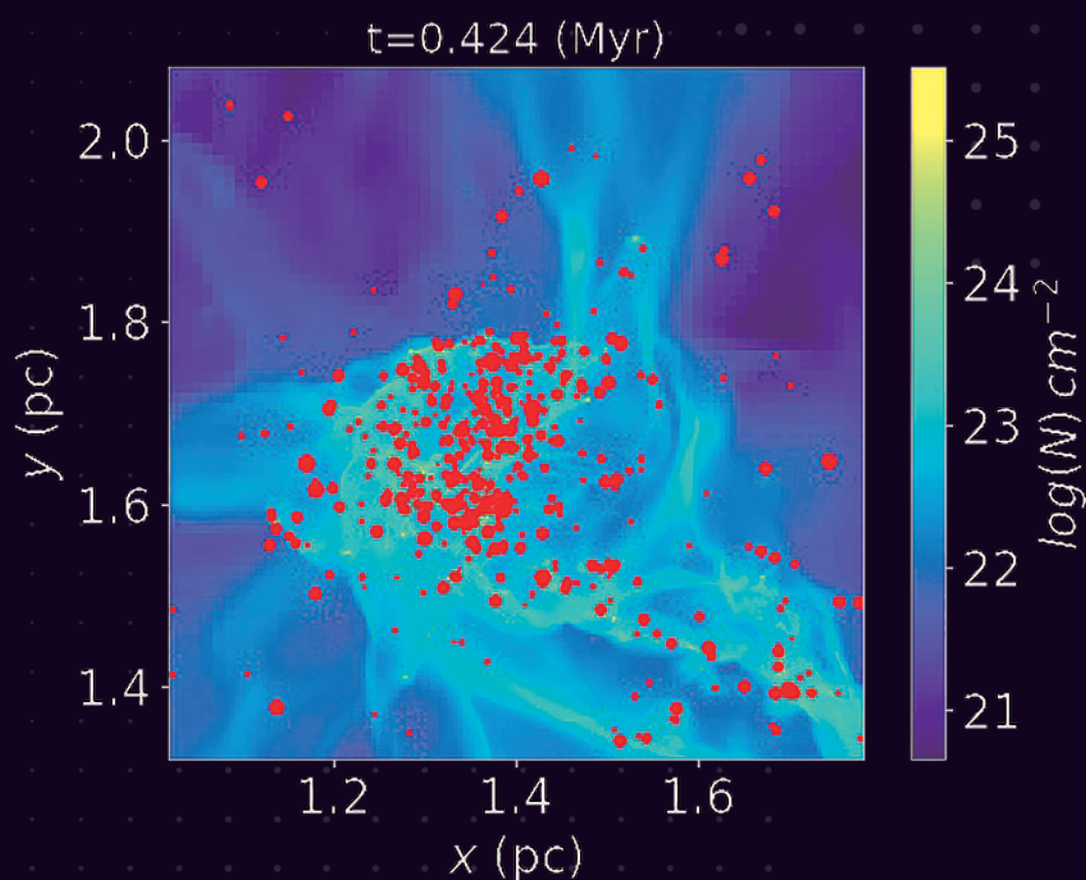
恆星之間看似空無一物的空間，其實存在著稀薄的氣體、光子、塵埃、與磁場，稱之為星際介質。星際介質是個多變的恆星搖籃，直接可觀測的物理量之中，密度、溫度、不規則的湍流運動速度、與磁場強度，皆有橫跨數個數量級的巨大變化，而恆星就是在這樣複雜的環境中誕生。

恆星作為宇宙的基本單位，是重要的能量引擎與元素工廠，透過核融合過程將質量轉化為能量，進而發光、發熱，藉由恆星的反饋活動，以輻射、噴流、恆星風創造週遭熱鬧的星際環境。描述恆星特性最重要的參數，就是它的質量，直接決定了恆星的大小、光度、核融合功率、和壽命長短。

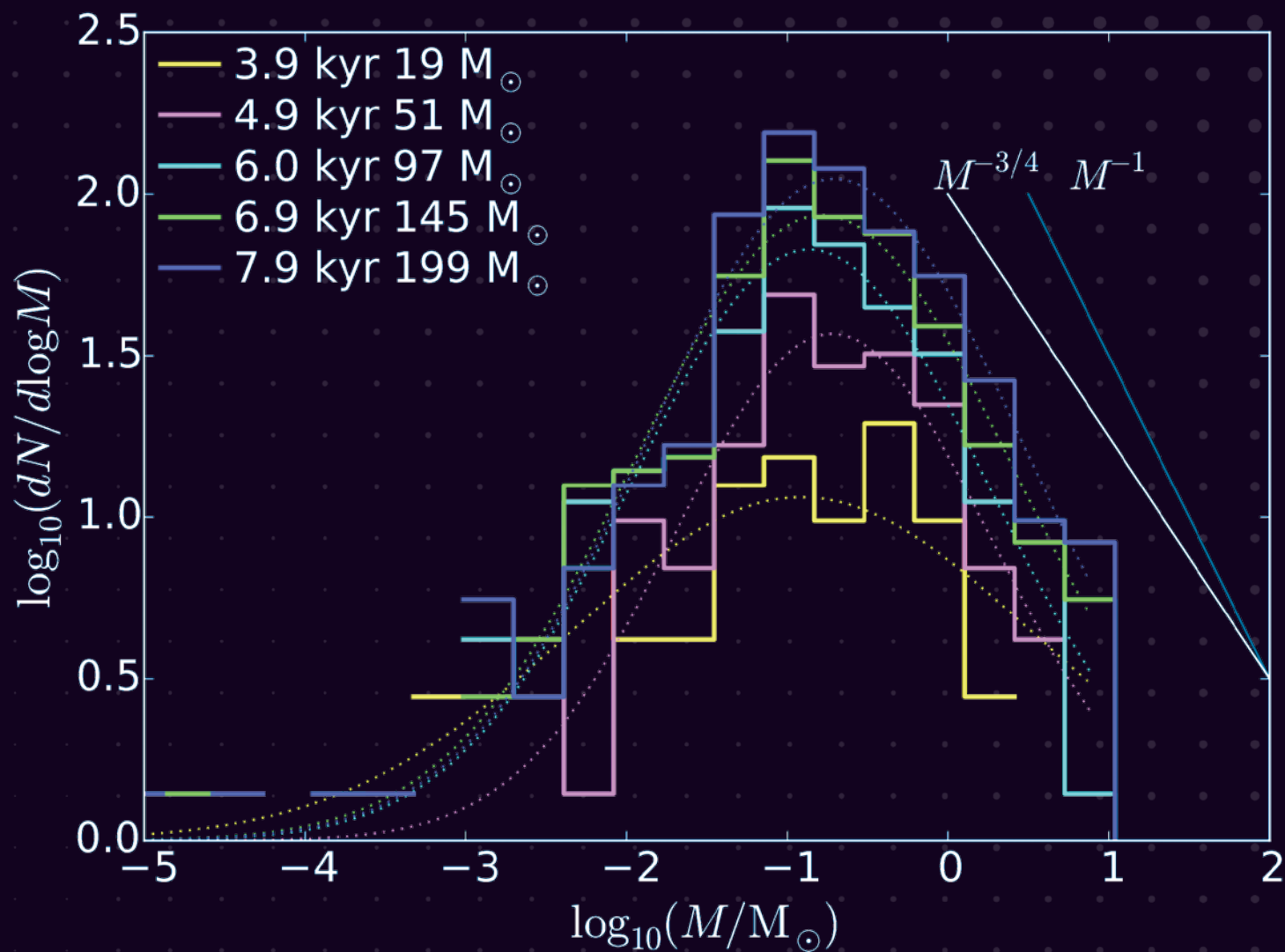
大質量恆星溫度高、活動強、生命短、反饋大、並且大量產生氫氦以外的重元素，改變星際介質的特性，進而影響下一代恆星的形成；與太陽相似質量的恆星則提供恰到好處的能量，對生命的誕生不可或缺；小質量的恆星如恆河沙數，幽暗的微光，卻佔了最多數的質量總和。

恆星時常群聚誕生，稱之為恆星團，恆星初始質量函數 (Initial Mass

Function，簡稱為 IMF) 描述星團形成時，恆星質量的數量統計，這是星團很重要的一個表徵，與星際介質初始條件密切相關，也對星團乃至大尺度星系的演化影響重大。舉例來說，總重一百倍太陽質量的氣體塌縮碎裂形成恆星團，可以是 100 顆與太陽相同質量的恆星，也可以是 10 顆十倍太陽質量的恆星，在大尺度的重力量測上看不出差異，但兩者對星團演化的影響將會截然不同，這個差異可以



圖一：形成中的恆星團，恆星誕生在氣體密度高的區域，質量有大有小。© 李悅寧團隊



圖二：數值模擬中的恆星初始質量函數，隨著恆星數量增加，IMF 的形狀沒有明顯改變。© 李悅寧團隊

反映在總光度和光譜上，經由觀測來判斷。

令人費解的是，過去近 60 年的大部分觀測顯示太陽鄰近區域之 IMF 驚人地相似，雖然星際介質的特性多變，IMF 的峰值都發生在約 0.2 太陽質量並在大質量範圍呈現指數遞減。然而，隨著觀測與模擬技術的進步，此一普遍性開始受到質疑和挑戰，極端環境中，可能產生不同形狀之 IMF，然而這些例子包括極不易觀測的遙遠星系、高密度的銀河系中心、和炙熱的早期宇宙。

雖然 IMF 的普遍性目前仍缺乏強有力的理論證據支持，其在天文學眾多領域不可或缺的地位，使得此普遍性往

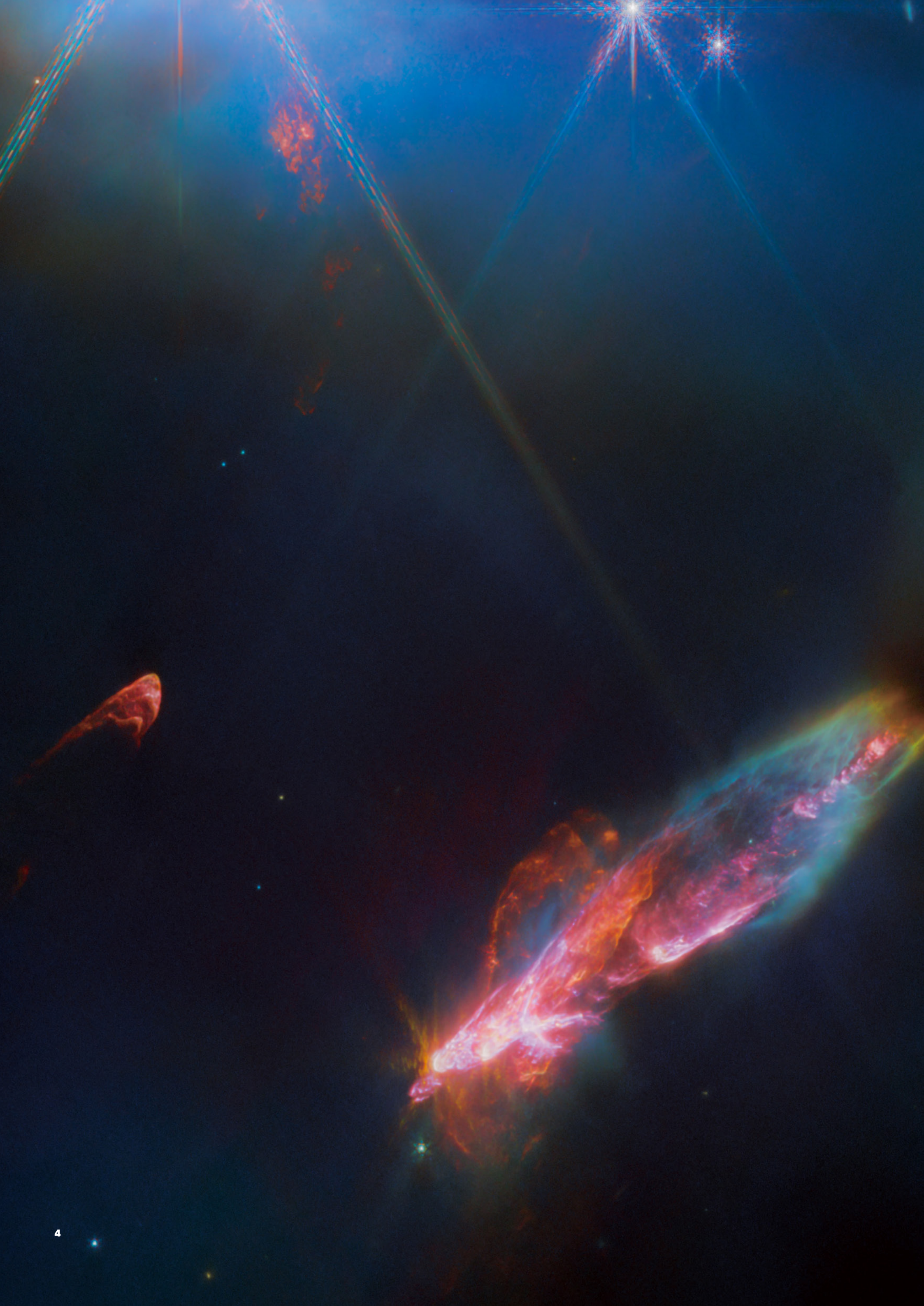
往輕易地被接受為基本假設。為了對恆星初始質量函數提出完整且全面的解釋，我們觀測恆星形成環境中的各種密度分佈與動能特徵，以此作為數值模擬的初始條件來產生含有各種質量恆星的星團（如圖一）並量測數值實驗中得到的 IMF（如圖二），並藉由重力與湍流交互作用的理論模型，依環境特性對 IMF 做出預測，並從多個面向切入探討，以釐清此迷惑，使往後研究在需要使用恆星初始質量函數的時候，有理可據。

在探討恆星科學的過程中，理論天文物理與計算模擬扮演了極為關鍵的角色。透過理論模型，我們可以推測恆星的誕生、演化與結局，從巨大的氣體雲塌縮形成原恆星，到最終成為白

矮星、中子星甚至黑洞。這些模型幫助我們解釋觀測到的現象，例如恆星的光譜、亮度變化以及行星系統的形成過程。然而，單靠理論是不夠的，因此計算模擬成為現代天文研究的重要工具。

計算模擬讓我們在電腦中「重現」宇宙的演化過程，大幅提升我們對宇宙的理解，是一門結合理論物理、數學與電腦程式的跨領域科學。如果你對宇宙的奧秘感到好奇，或對物理與程式設計有興趣，未來也能透過「神機妙算」般的計算模擬，解開宇宙的「天機」，成為探索星辰的先鋒！

（本文改寫自國立臺灣師範大學研究亮點網）





韋伯太空望遠鏡觀測到的年輕原恆星系統 HH 211，可以看到明顯的噴流和其中的精細結構，中心原恆星年齡僅約一萬歲，質量約為太陽質量的二十分之一。© ESA/Webb, NASA, CSA, Tom Ray (Dublin)

黑洞理論與計算探索： M87 黑洞新解

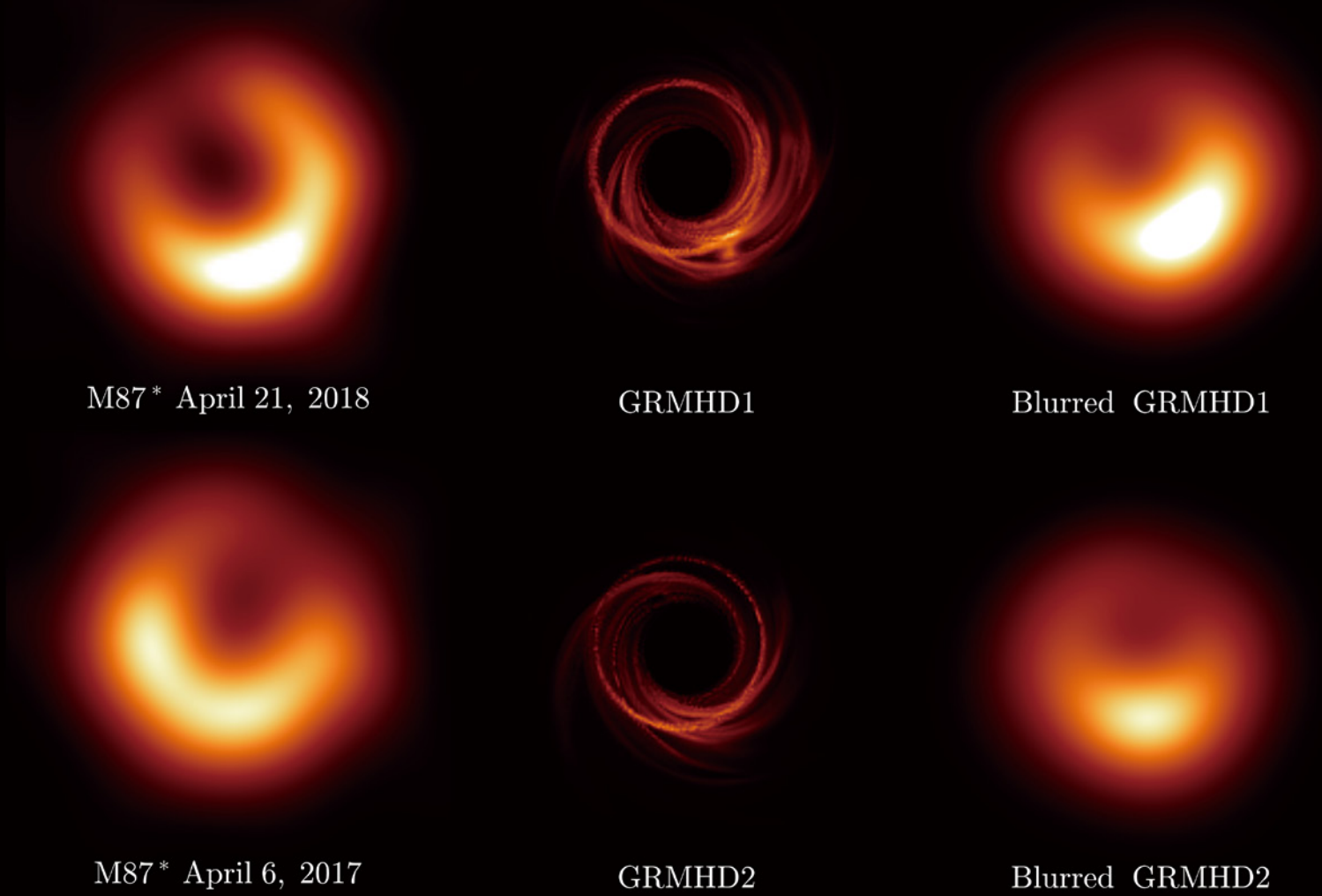
卜宏毅 國立臺灣師範大學物理系助理教授

具有 65 億個太陽質量的 M87 黑洞，位於距離地球約 5500 萬光年的 M87 星系中心。事件視界望遠鏡（Event Horizon Telescope，簡稱 EHT）團隊於 2017 年觀測 M87 黑洞的影像並於 2019 年公布，是人類史上第一次直接觀測到黑洞的樣貌。EHT 是由全球多個電波望遠鏡組成的聯合觀測系統，藉由地球上不同區域望遠鏡的協

同工作，模擬出一台相當於地球大小的望遠鏡，以獲得足夠高的解析度。M87 黑洞影像中展現了一個明亮的環狀結構，看起來就像一個「甜甜圈」，中間的黑暗區域就是所謂的黑洞暗影，是由於光無法逃脫黑洞的強大重力所形成，而環的亮度不對稱則是因高溫繞行黑洞的電漿所放出的輻射，受到強重力場的重力透鏡效應造成。

M87 黑洞周圍明亮的環狀結構直徑只有約 43 微角秒，這相當於從地球看見月球表面上一個甜甜圈的大小。

EHT 團隊根據 2018 年的觀測，去年（2024 年）更公布 M87 黑洞影像出現了一些新的變化，例如影像中最亮的區域發生了偏移。這些變化是由於黑洞周圍的吸積盤，也就是



M87 黑洞的觀測與理論影像比較：（左圖）EHT 團隊在 2018 年和 2017 年觀測到的 M87 影像；（中圖）在兩個不同時間的電腦模擬影像範例；（右圖）將電腦模擬影像考慮觀測解析度後，經過模糊處理的影像。©EHT 團隊

環繞黑洞旋轉的氣體，內部的湍流（turbulence）活動所引起的。這些湍流導致環中最亮的部分從 2017 年的位置逆時針偏移了約 30 度，2018 年的觀測也幫助 EHT 團隊更加確認 M87 黑洞的旋轉方向。科學家發現，以右手定則來看，黑洞的旋轉軸是指向遠離地球的方向，也就是在天空中投影看起來是順時針旋轉，這為研究黑洞自轉的物理機制提供了更多線索。

就在今年（2025 年）一月，EHT 團

隊比較 2017 年與 2018 年的觀測與理論模型，利用統計分法分析影像中最亮區域的偏移如何能讓科學家得以更深入對 M87 黑洞及其周圍環境的認識。為了分析這些觀測資料，EHT 團隊建立了一個超過 18 萬張的黑洞影像資料庫，幫助科學家更準確地分析黑洞周圍的吸積流結構和動態過程。這些模擬的黑洞影像是根據相對論性磁流體力學，數值模擬黑洞吸積流與噴流環境，並考慮該環境的輻射表現所計算而來。這個影像資料庫

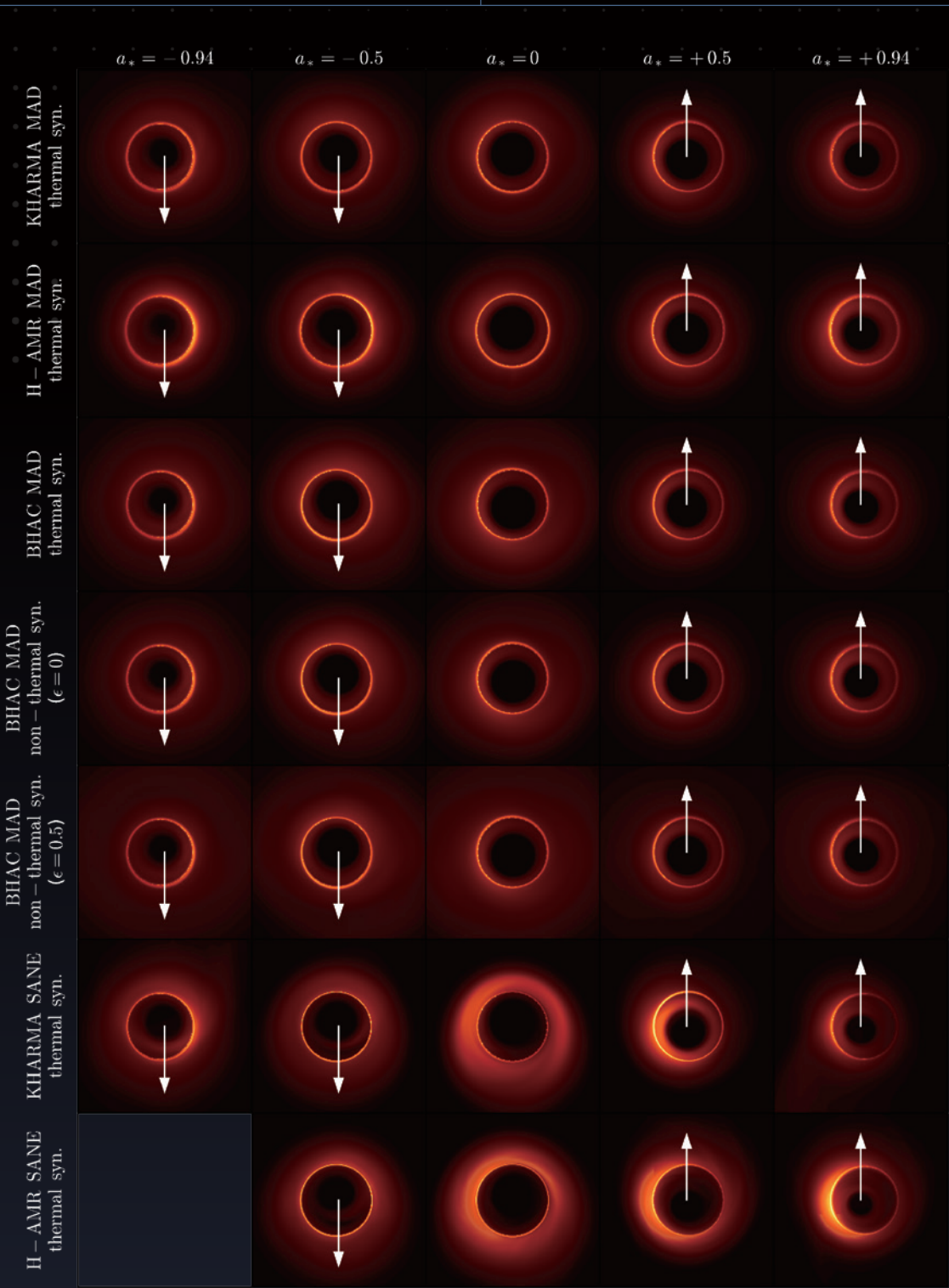
中，不僅考慮到電子能量的分佈，還加入了吸積盤與黑洞旋轉方向相傾斜的模型。這些模擬與觀測比較的結果，也提供了未來改進黑洞吸積模型的重要基礎。

EHT 團隊發現，當氣體螺旋流向黑洞時，可以與黑洞的旋轉方向一致，也可以相反。而根據觀測資料，因為湍流的無序性，當氣體的旋轉方向與黑洞的旋轉方向相反時，更能解釋對 M87 黑洞的多次觀測資料。這些分析讓我們對黑洞周圍的氣體運動有了更深入的認識，也顯示出這種動態和混沌的環境對研究黑洞物理的重要性。透過這些新發現，科學家得以建立更符合實際狀況的理論模型，並進一步探索吸積盤中的複雜動力學。

目前，EHT 團隊已經著手分析 2021、2022、2023 和 2024 年的觀測資料。這些資料將提供更強的統計約束，並有望揭示更多 M87 黑洞的演化秘密。EHT 也正嘗試用更高頻率觀測，以獲得更好的解析度，期待能看到更多黑洞周圍的細節。同時，理論科學家們也在不斷改進模擬技術，試圖更精確地還原黑洞周圍的物理過程。

黑洞是宇宙中最極端的天體之一，同時也是理解宇宙運行規律的關鍵。透過研究 M87 黑洞，我們不僅能驗證愛因斯坦的理論，還能探索許多未知的物理現象，例如吸積盤中的湍流、黑洞噴流的形成過程，以及光線如何在極端引力場中彎曲。事件視界望遠鏡的突破性研究也激勵了年輕人對天文學的興趣。未來，隨著技術的進步，我們對宇宙的理解也將越來越深入，並期待揭開更多關於黑洞的奧秘。

（本文改編自臺師大新聞稿）



2025 年 EHT 團隊理論分析 M87 黑洞，論文中所展示部分黑洞影像資料庫的影像。每張黑洞影像代表了不同的黑洞轉速和吸積流環境系統，在假設不同輻射特性所模擬出的平均動態影像。圖中白色箭頭代表黑洞旋轉軸的投影方向。©EHT 團隊

仰觀天象 即物窮理 —— 理論天文物理的探索與發展

本所的理論天文物理研究，目標是幫助我們了解大到宇宙、小至行星尺度間的起源與演化。簡單來說，宇宙中恆星、行星和各種結構是怎麼誕生、如何演變的，是科學家們想研究的重點。這些過程其實非常複雜，包括像重力、流體運動和光的傳播等等，但基於物理理論，我們可以利用電腦模擬和數學計算，慢慢揭開其中的秘密。

本所計算天文物理計畫（CompAS）自 2012 年起承繼 2000 年起源自本所、本院數學所及台灣大學數學系共同合作的 CFD-MHD 主題計畫，主要目標是為理論天文物理問題開發高效能的計算流體力學和磁流體力學程式。基於袁旂教授的遠見，台灣第一個自行開發的 Antares「大火程序」可應用於螺旋星系中氣體盤的結構和演化、原行星盤中的行星遷移、行星

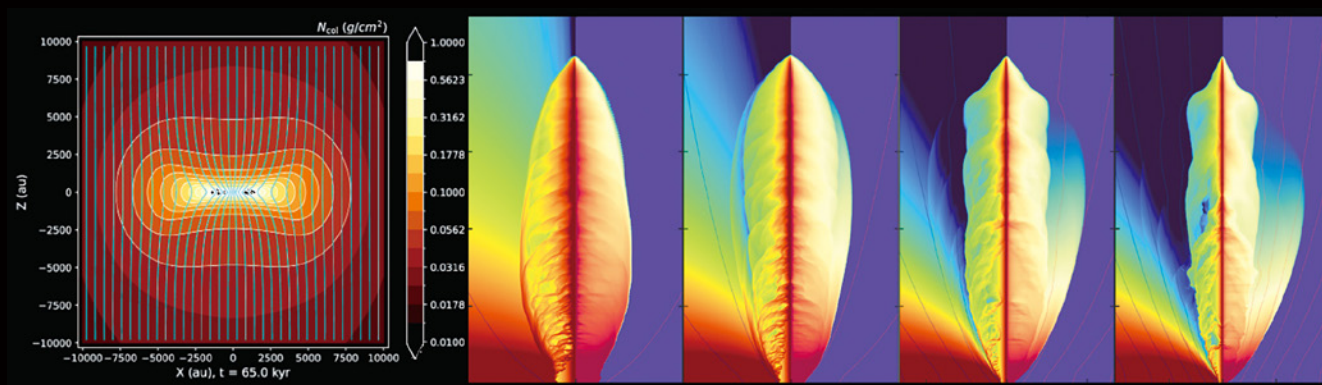
與星盤的相互作用以及拱行星盤的形成。為了開拓高效能運算時代的視野，轉型後的 CompAS 不僅在開發演算法取得進展，也作為各種新開發程式的關鍵孵化器，繼續努力精進，不斷追求並保持在數值演算法和科學計算技術的最新發展前沿。

理論天文物理的研究不只是「空談」，還能和觀測天文學合作，把各種波段的望遠鏡（如阿塔卡瑪大型毫米及次毫米波陣列 ALMA 或韋伯太空望遠鏡 JWST）拍攝到的天體影像，和模擬結果做比較，進一步了解前因後果。這些高解析度的觀測資料，包含非常多細節，需要用電腦計算來分析出它們背後的物理意義。為此，科學家們研發了一些軟體工具，像是模擬氣體和磁場如何互動的程式、化學反應的計算工具，還有分析光線如何穿過雲氣的模型。這些工具可以幫助我們更

加了解宇宙中的各種現象，像是恆星如何誕生、行星盤怎麼形成，甚至黑洞附近的物質如何運動等等。

本所天文物理理論與觀測整合研究計畫（CHARMS）自 2008 年以來致力於數值計算方法的開發，已研發多項程式工具，也應用在許多領域，如：恆星誕生之前的氣體雲如何塌縮、行星誕生搖籃的原行星盤如何聚集、年輕恆星的噴流和氣體分子外流如何形成、大質量恆星和小質量恆星的形成和演化過程等。

隨著觀測儀器越來越進步，未來會得到數量越來越多、細節更豐富的資料，用來研究和分析的軟體和理論也要不斷演進，為臺灣的天文學研究提供更多支持，推動我們更深入了解宇宙的奧秘。



本所自行開發之數值計算程式，模擬原始恆星形成過程中產生的假盤（左，Väisälä, Shang, et al. 2023）與噴流（右，Shang, Liu, Krasnopolsky, & Wang 2023）現象。

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

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。
天間季報版權所有 | 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。

