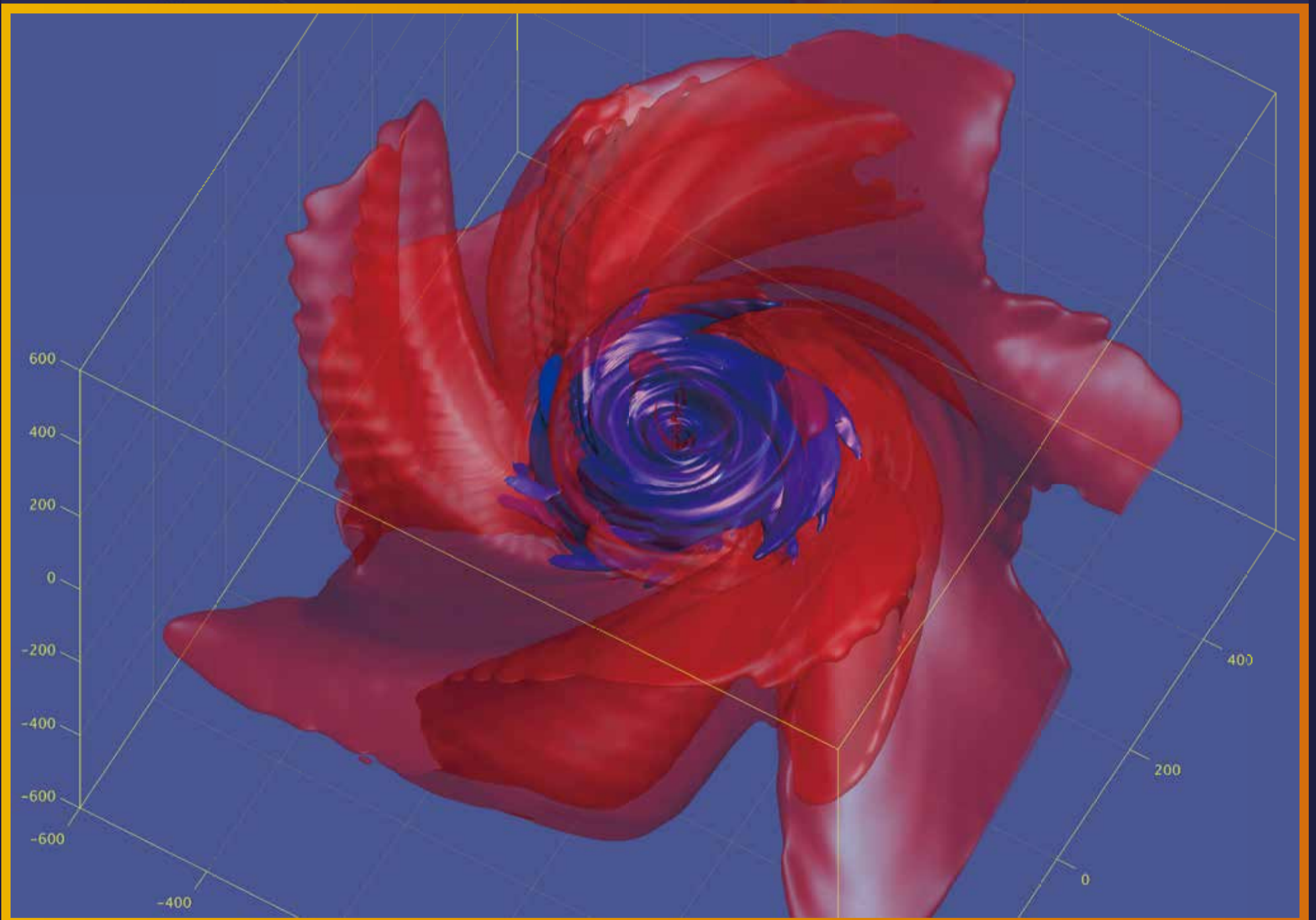




中華民國 109年 夏季號

天聞

多彩魅力的 CHARMS



ZeusTW模擬拱星盤形成過程中的密度分佈。

© 中研院天文所/Ruben Krasnopolsky

透過電腦看宇宙

作者／曾耀寰

人們總以為天文學發展甚早，量子物理的誕生日訂在 1900 年，德國物理學家普朗克當年率先提出量子假說，我們將愛因斯坦提出狹義和廣義相對論的年份，視作重新認識時間和空間關係的開始，那該從何時算是天文學的发端？我們在南法 Lascaux 石窟發現 1 萬 5 千年前人類留下的遺跡，裡頭有一千多尊岩石雕刻和五百多幅壁畫，壁畫除了用木炭勾勒出動物形象的輪廓，並著有土壤和石頭研磨的多樣色彩，壁畫上可以清楚看到略成幾何圖樣的黑點，在天文學家看來，很類似獵戶星座、金牛座和昴宿星團。而在英格蘭的巨石陣，根據考究應有四千多年的歷史，巨石陣的用途仍待釐清，不過特定巨石的排列，似乎可以指出當地夏至日出和冬至日落的位置，種種證據顯示，若單就舉頭觀察天象變化視為天文學的肇始，可以向前追溯上萬年的歷史。

但用上望遠鏡，將天體看得更加清楚明白的始祖，非義大利天文學家伽利略莫屬。伽利略在 1609 年根據來自歐陸有關望遠鏡發明的消息，自製出折射望遠鏡，透過鏡片看到月球凹凸不平的表面以及各項觀測，加深了推翻地心說的信念。但當時的望遠鏡僅止於揭開天空的薄紗，讓人類看清楚宇宙的表象。隨著 19 世紀初光譜學的發展和觀測，天文學家透過物理和數學，才能真正理解我們的宇宙。

現今的天文觀測除了盡量地收集來自宇宙的星光，希望能有更清楚的成像能力，能看到天體在空間中的細微結構，還可以用望遠鏡收集各種不同波長的星光，從數公分的電波訊號、微米的紅外光、奈米等級的可見光，到更短波長的紫外線、X 射線和伽瑪射線，甚至將星光分解出更加細微的頻率訊號，根據特定波長的星光，為宇宙解密。

以宇宙 137 億年的歲月來看，若從伽利略望遠鏡算起，科學觀測也不過四百多年，所謂朝菌不知晦朔，蟪蛄不知春秋，人類的天文觀測似乎遠不如朝菌和蟪蛄。若要觀察恆星演化，即便是大質量恆星的短壽，也要個百萬年，我們得從舊石器時代就開始收集資料，這根本是天方夜譚。但我們人類真如夏蟲不可語冰嗎？我們現今這麼尖端的望遠鏡只能捕捉宇宙的須臾片刻嗎？

科學必須將客觀、可重複的實驗當作檢驗理論的工具，天文學家沒辦法將太陽放到實驗室，也沒辦法給定各種條件讓太陽重生，但我們有物理（還有化學、地質等等）、數學和電腦，可以在異度空間（cyberspace）重現宇宙。以簡單的星系動力學為例，只要將適當的質點數量放進異度空間，根據兩點之間的萬有引力總和，透過離散數學計算，讓每個質點在設定的異度空間內飛舞，天文學家經過多次電腦模擬實驗發現，橢圓形狀的星系也可以是星系合併之後的產物，這對理解哈伯星系分類之間的星系演化關係，可以提供新的想法。

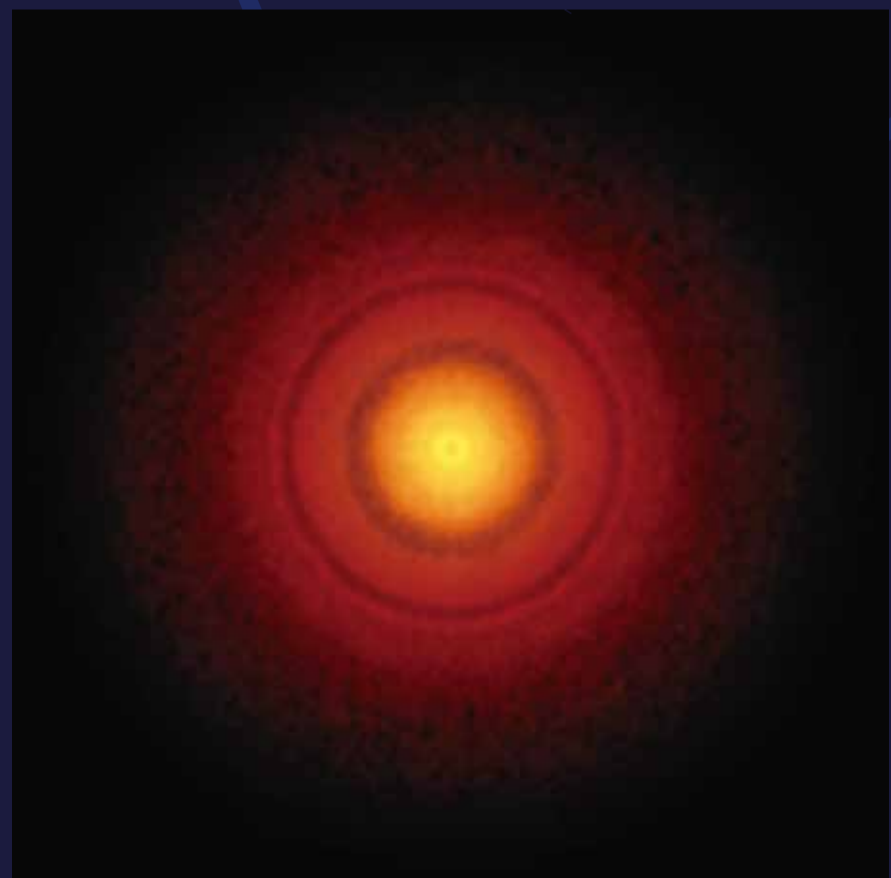
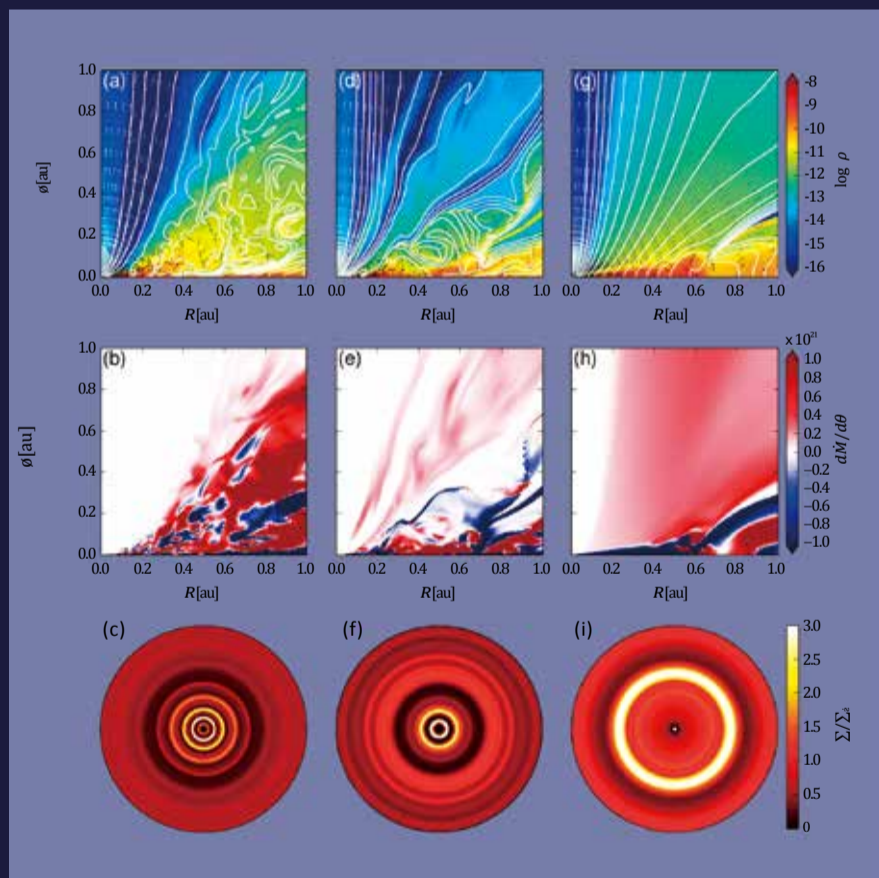
面對現今高靈敏度與高解析度天文儀器，如智利沙漠的阿塔卡瑪大型毫米及次毫米波陣列 (ALMA)，或位在格陵蘭冰層上的格陵蘭望遠鏡 (GLT)，觀測資料具備的細節前所未有，各種不同波長的電磁波所呈現的是各種天體的蛛絲馬跡，而且是當下的快照影像，只要有適當的理論模擬計算，就可以像福爾摩斯一樣，解開事件發生先後的謎團。本所長期投入可見光、紅外線和電波觀測研究，成果豐碩，自 2008 年起，成立天文物理理論與觀測整合研究計畫 (CHARMS)，旨在結合最尖端的理論與計算天文物理，詮釋這些最新觀測天文學得到的資料，作為理論與觀測的橋樑。CHARMS 計畫持續致力於數值計算方法的開發，主要包括三大方向：流體力學與磁流體力學數值模擬程式集 ZeusTW、同時計算化學方程與流體力學方程之數值模擬程式集 KM1/KM2、與輻射轉移計算程式集 SPARX。

磁場在許多天體結構形成與演化過程中扮演不可或缺的角色，例如形成恆星的分子雲核、年輕恆星或黑洞周邊的噴流和吸積盤。若要瞭解這些天體，得靠磁流體力學的理论加以解釋，藉由數值方法，可以得到該天體的質量分布，甚至是動力結構隨時間演化

的過程。而這些天體內擁有各種不同的原子分子，藉由相關化學方程的計算，也可以求得天體的化學組成與溫度在空間中的分布狀況，以及隨時間的演化。由於透過望遠鏡得到的是一幅幅各種電磁波的分布影像，我們還可以藉由電磁波與介質的輻射機制，得知在各種物理和化學的條件下，電磁波通過天體後，所輻射出的強度和分布，其結果可以直接和觀測數據比對，瞭解理論假設和模型是否能正確解釋天文現象。

天文觀測得到的影像，就像是散在一地，不知排列先後的事件片段，透過理論和數值模擬，人們才能將它——順序串起，娓娓述說多彩魅力的宇宙故事。

QR code 可看到模擬動畫



左圖是三種不同性質的原始拱星盤的數值模擬，顯示垂直密度分佈 (上排)、質量吸積 / 流失率 (中排)、盤面密度分佈 (下排) (Suriano, Li, Krasnopolsky, & Shang 2017)，產生了類似右圖 ALMA 觀測到 TW Hya 的環狀結構 (S. Andrews (Harvard-Smithsonian CfA); B. Saxton (NRAO/AUI/NSF); ALMA (ESO/NAOJ/NRAO))。© 中研院天文所





哈伯太空望遠鏡慶祝 30 周年，所公布的「宇宙珊瑚礁」圖片。圖中的大星雲是 NGC 1414，左下方藍色的星雲是 NGC 2020，皆位於距離我們約 16 萬光年遠的大麥哲倫雲星系。©NASA, ESA, and STScI

就是那道光

連結現實與模擬的橋樑

作者 / 劉君帆

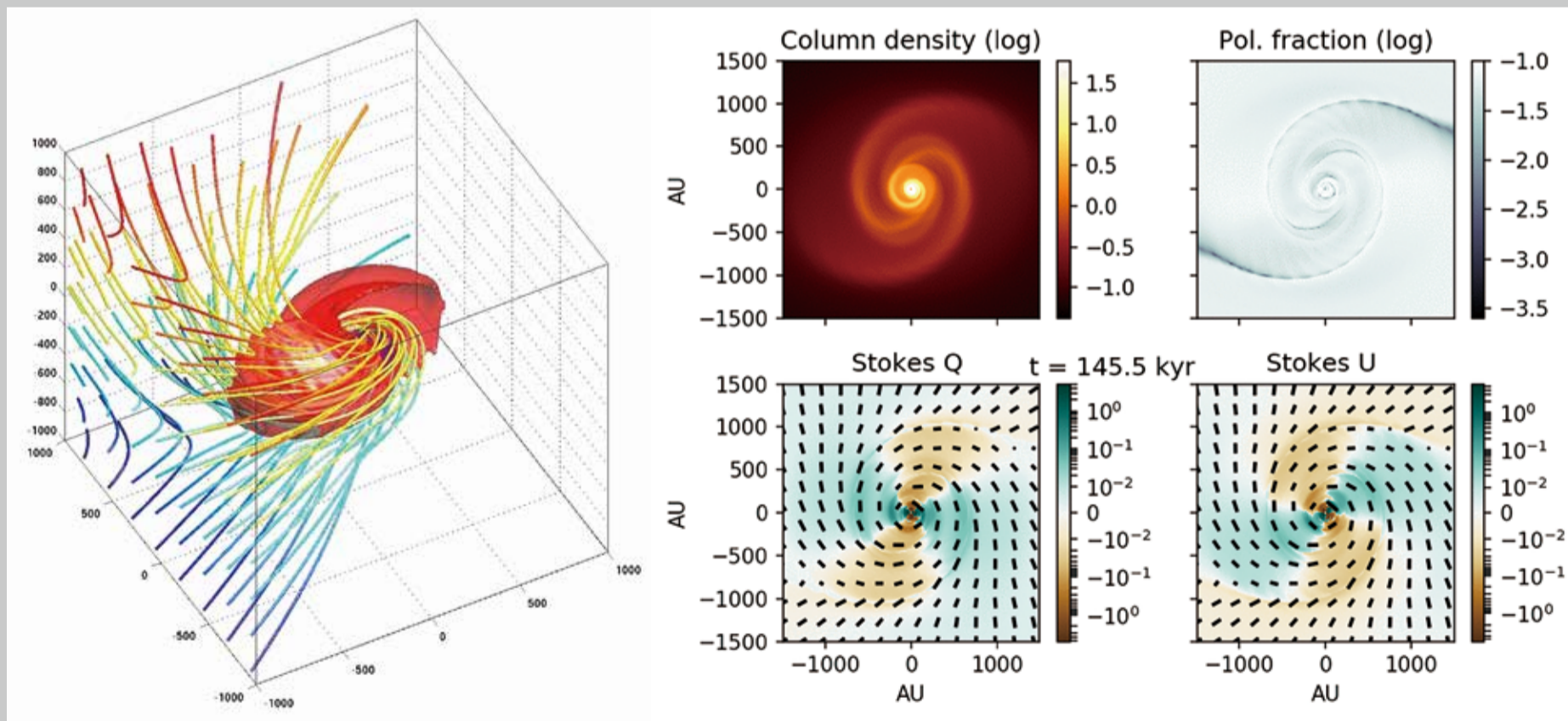
天文學是一門仰賴觀測的學問，而觀測得到的數據又需要物理與化學定律的驗證與解釋，所以能夠同時發展相輔相成的觀測與理論，對於天文研究的發展至關重要。天文觀測的結果是時間長河中某個特定時間點的照片，想要知道天體演化的來龍去脈，常常需要輔以數值模擬，使用類似縮時攝影的方式，找出背後的物理化學機制。想要知道數值模擬的結果能不能解釋觀測嗎？是不是把觀測結果跟模擬結果，放在一起比較，像是「找碴」一樣的抓出兩者不同之處，差異最少的就是最好的模型嗎？

很遺憾地，大多的狀況下都容易淪為「蘋果比橘子」，又為何是如此呢？

想大致回答這個問題，就要試著了解觀測與數值模擬的結果各自代表的意義。傳統天文觀測，除了本世紀新進發展的微中子與重力波觀測，不外乎是藉由觀測不同波長的電磁波而得來，必須要能夠「發光」的天體，才能被觀測到。至於數值模擬，則是關注氣體或塵埃如何依照流體力學方程式的指導，在重力、磁場、紊流等現象的影響下，如何運動。所以癥結在於含量

最多的物質不一定就是最亮的物質。且不論暗物質，宇宙中豐度最高的氫元素，雖然是最常用於數值模擬的物質，但是現實中大部分的氫，不論是原子態或是分子態，要不是處於量子力學禁制躍遷 (forbidden transition) 的狀態，要不就是環境又冷又暗，使得模擬的結果很難直接對應觀測。

為了比較數值模擬與觀測的結果，一門被稱為「輻射轉移 (radiative transfer)」的學問於是發展起來。在現實生活中，我們常見的電影動畫裡的真實感，來自於正確



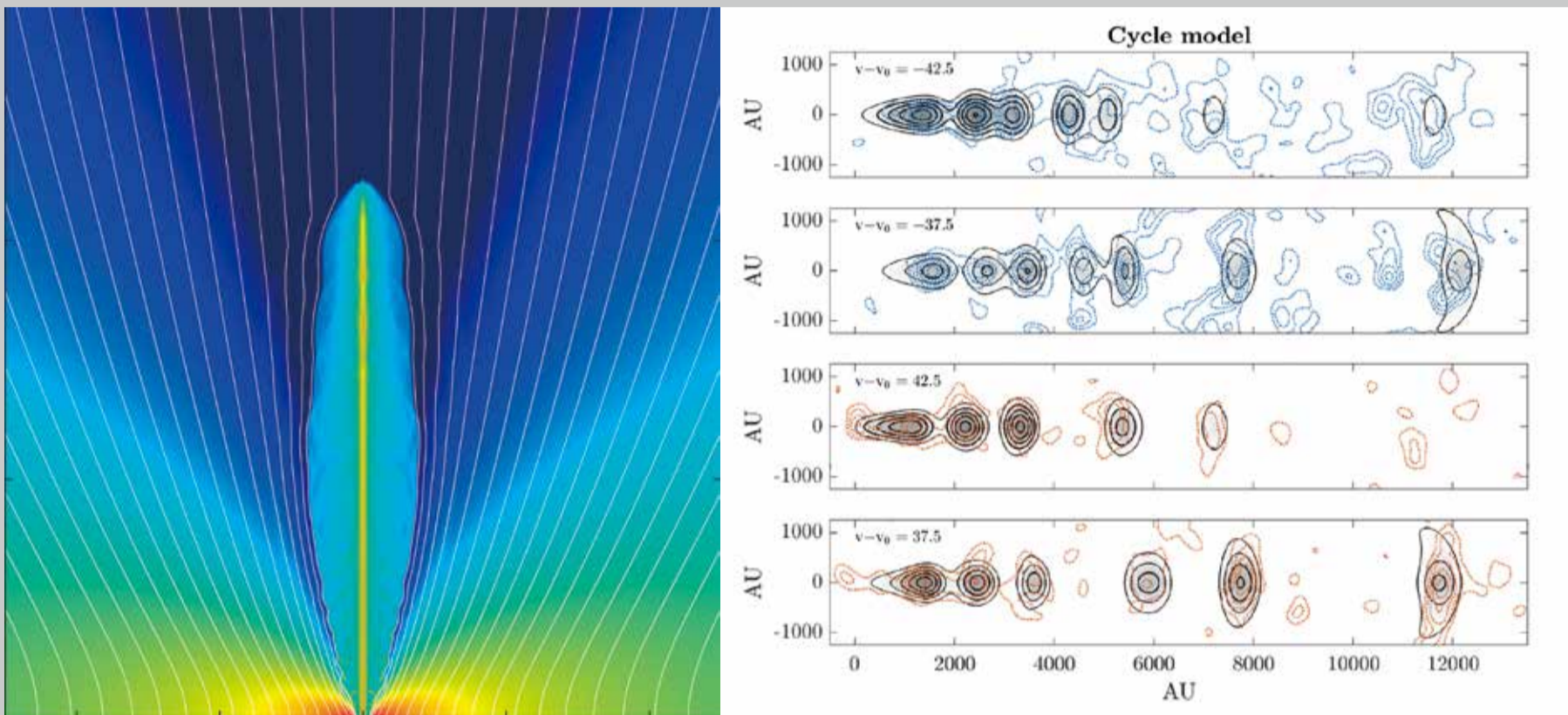
本所 CHARMS 團隊研發的 ZeusTW 數值模擬程式計算所得氣體密度與磁場的分佈 (Li, Krasnopolsky, & Shang 2013)，以及研發的 Perspective 輻射轉移程式計算而預測的發光強度與極化率圖像，顯示原始雲核在特定磁場排列的影響下，可能出現隨時間變化的旋臂結構 (Väisälä, Shang, Krasnopolsky et al. 2019)。© 中研院天文所



點選 QR code 可看到模擬動畫



點選 QR code 可看到模擬動畫



由 ZeusTW 計算而得的外流之氫分子密度分布示意圖 (Shang, Krasnopolsky, Liu, & Wang 2020) , 以及 Synline 譜線強度計算程式計算 (黑色等高線) 與實際觀測原始恆星 IRAS 04166+2706 (藍色與紅色等高線) 的一氧化碳譜線強度疊合圖, 作為比較之基準 (Wang, Shang, & Chiang 2019) 。© 中研院天文所

計算光的散射、折射及反射，也是一種簡化的輻射轉移計算。天文物理中的計算只是更複雜，但是目的都是為了想方設法接近能被觀測到的電磁波強度。

其中一個可供觀測的結果，是氣體的連續光譜與其因為塵埃散射而產生的極化程度。這裡的例子是一個將形成恆星的原始雲核，因為重力而向著原始雲核的重力中心塌縮，同時雲氣裡的磁場影響重力塌縮的過程，很可能使其由球狀塌縮轉成盤形塌縮。我們可由數值模擬得到磁場強度與分子氣體在三維空間中的分佈，但是兩者皆無法直接被現有儀器觀測。所以我們需要進一步計算可被觀測的物理量。首先，將視線方向上的氣體密度

相加，得到的數值在一般情況下將會正比於觀測到的連續光譜強度；另一方面，計算而得到的磁場分布，在假設原始雲核的塵埃隨著磁場排列的基本假設下，可以得到極化光的方向與強度。

另一個例子是分子譜線的計算，分子譜線是偵測原始恆星外流 (outflow) 的利器，尤其是一氧化碳 (CO) 與一氧化矽 (SiO) 更是被廣泛發現於恆星形成不同階段的分子外流中。我們由程式計算出的分子外流密度與速度分布，可經由溫度分布的假設與估計，以及分子豐度之計算 (經由化學反應計算或是觀測推得之豐度)，得到一氧化碳分子譜線強度與速度在空間中的分布圖。

近半世紀以降，電腦科學的發展，特別是叢集計算 (cluster computing) 與圖形處理單元 (graphic processing unit) 的進展，使得複雜的高解析度輻射轉移計算成為可能；而觀測技術上，探測電波波段的阿塔卡瑪大型毫米及次毫米波陣列 (ALMA)、格陵蘭望遠鏡 (GLT)，或是下世代 30 公尺等級可見光與紅外光望遠鏡，都在持續推進觀測資料的解析程度。模擬與觀測的相互競爭合作，將是現今與未來天文學發展的指向，本所的 CHARMS 計畫，希冀整合本所既有模擬與觀測基礎，幫助恆星形成研究發展如有神助 (work like a charm) ！

超級電腦模擬「磁星」驅動超新星爆炸

超新星是現代天文物理前沿主題之一，在理論與觀測上饒富科學價值，獲得許多深入探討。新一代的大型超新星巡天觀測，揭露許多前所未見的天體爆炸，豐富的觀測結果也顛覆了先前所建立的超新星物理知識。從觀測中我們已知，年輕超新星內所包裹的快速旋轉磁星 (magnetar)，發出的輻射可使超新星大幅增亮。超新星爆炸時會產生大量紊流，所以紊流對於超新星的爆炸與亮度，自然是扮演著關鍵角色。然而，現行的一維模型本身無法模擬流體的不穩定性與紊流形成。

本所陳科榮助研究員表示：「流體不穩定性在日常生活中隨處可見，比如說如果把墨水放在純水上面，墨水的密度比較大，很自然會往下沉，造成兩個不同性質的流體混合。可想而知，模擬這類的物理機制至少需要二維或三維的空間，因為一維尺度就像單車道，一旦堵車，後面的車沒法往前，至少需要兩個車道，後面快速的車輛才有超車的機會，這邊墨水就像是高速車輛，需要超車才能混合。」

解析到這種尺度的模擬在技術上有多困難？陳科榮表示：「這個模擬空間尺度大約是 100 個天文單位，相當於一個太陽系大小，但是磁星本身的半徑只有 10 公里，大約跟台北市差不多大，整整差了近百億倍。如果把人體比喻成一個超新星，磁星就像是一顆小小的冠狀病毒，卻

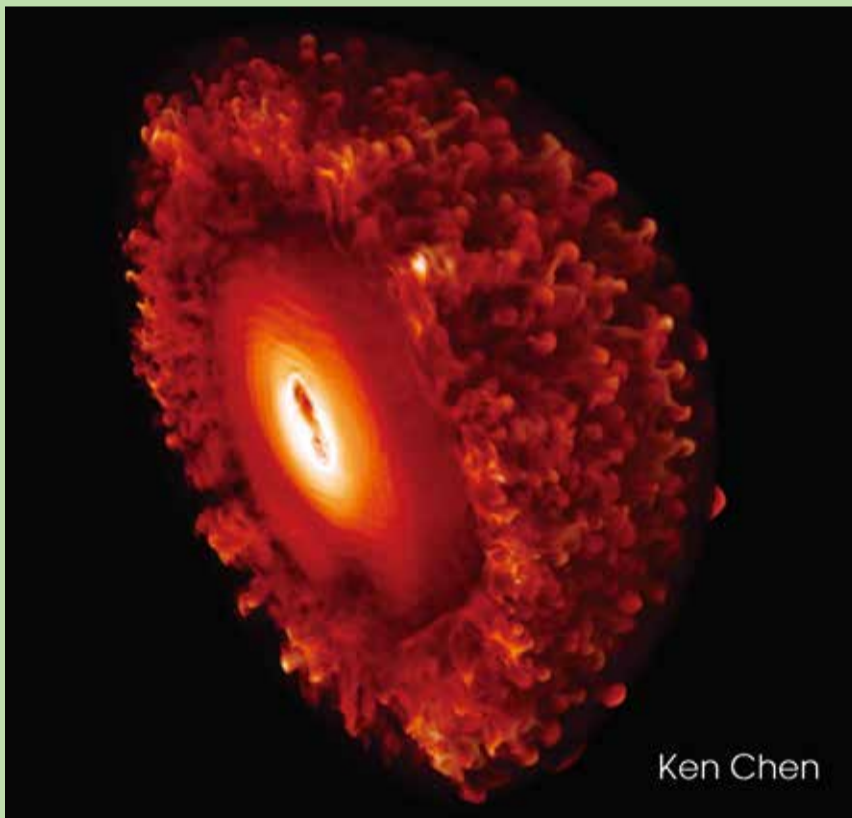
能對人體健康有強大的危害，所以必須發展新的數值方法，來把這麼小卻重要的物體解析出來。」

陳科榮利用他多年的超新星研究經驗，發展了全球獨家的超高解析度演算法。由於模擬所需要的計算資源非常龐大，需要數百萬電腦小時，只有位於美國柏克萊國家實驗室的國家能源計算中心提供的超級電腦，才有辦法執行這樣大型的數值計算。最後，他再利用本所的高效能電腦來進行資料分析與繪圖。

從模擬結果發現，這類超新星的爆炸殘骸，會在磁星能量所致的熱氣泡裡、以及超新星推開周遭氣體時的爆炸震波，形成流體力學不穩定性。在這兩種情況下，都會造成比一般超新星更多的流體混合，顯著影響爆炸事件的光變曲線和光譜，這是之前一維簡化模型無法得到的結果。

另外還發現，磁星所放出的輻射能量可以將內部的重元素如鈣、矽、鐵加速到每秒 12000 公里，解答了存在多年的難題：『核心塌縮超新星如超新星 1987A，為何能在其早期就觀測到高速的鐵元素？』。此項研究成果也將應用在解釋更多相關超新星觀測資料與探索脈衝星的物理性質。

(摘自本所新聞稿)



包裹在超新星內部、快速旋轉的「磁星」，是宇宙中磁場最強的天體，藉由磁場所釋放的能量，與一般超新星爆炸不相上下。© 中研院天文所 / 陳科榮



史上首度對磁星所驅動的熱氣泡以三維模擬呈現。© 中研院天文所 / 陳科榮

天聞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 | 朱有花 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、蔣龍毅

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