

與1的宇宙 ——計算天文物理

計算天文物理在「算計」什麼？

計算天文物理(Computational Astrophysics)是當代天文學領域中一門最具實驗性質的學問。不同於觀測天文物理需要在茫茫星海中找到適合觀測的天體，計算天文物理能夠在小小的(相對於真實天體的大小)電腦裡，由已知的物理與化學方程，配合天文學家感興趣的初始條件，「製造」出一個又一個的模擬天體。天文學家感興趣的問題包羅萬象，囊括各種尺度，從超新星如何爆炸、原始恆星及行星如何在拱星盤上形成、單一螺旋星系如何形成旋臂、星系團中的星系如何碰撞、到宇宙大尺度不均勻結構如何形成，都得以用數值模擬(Numerical Simulations)計算得到其演化的過程。並且可以藉由控制計算的空間解析度，探究演化過程中不同程度的細節。總括而論，天文學家得以利用數值模擬得到天體古往今來、鉅細靡遺的演化過程。

數值模擬的結果，除了經過縝密的測試與檢查，確認其物理正確性，還能與觀測天文學結合，一方面解釋現有觀測資料背後隱藏的來龍去脈，另一方面利用其能夠調整計算解析度的特性，預測未來觀測技術更精進後才能看到的細節。

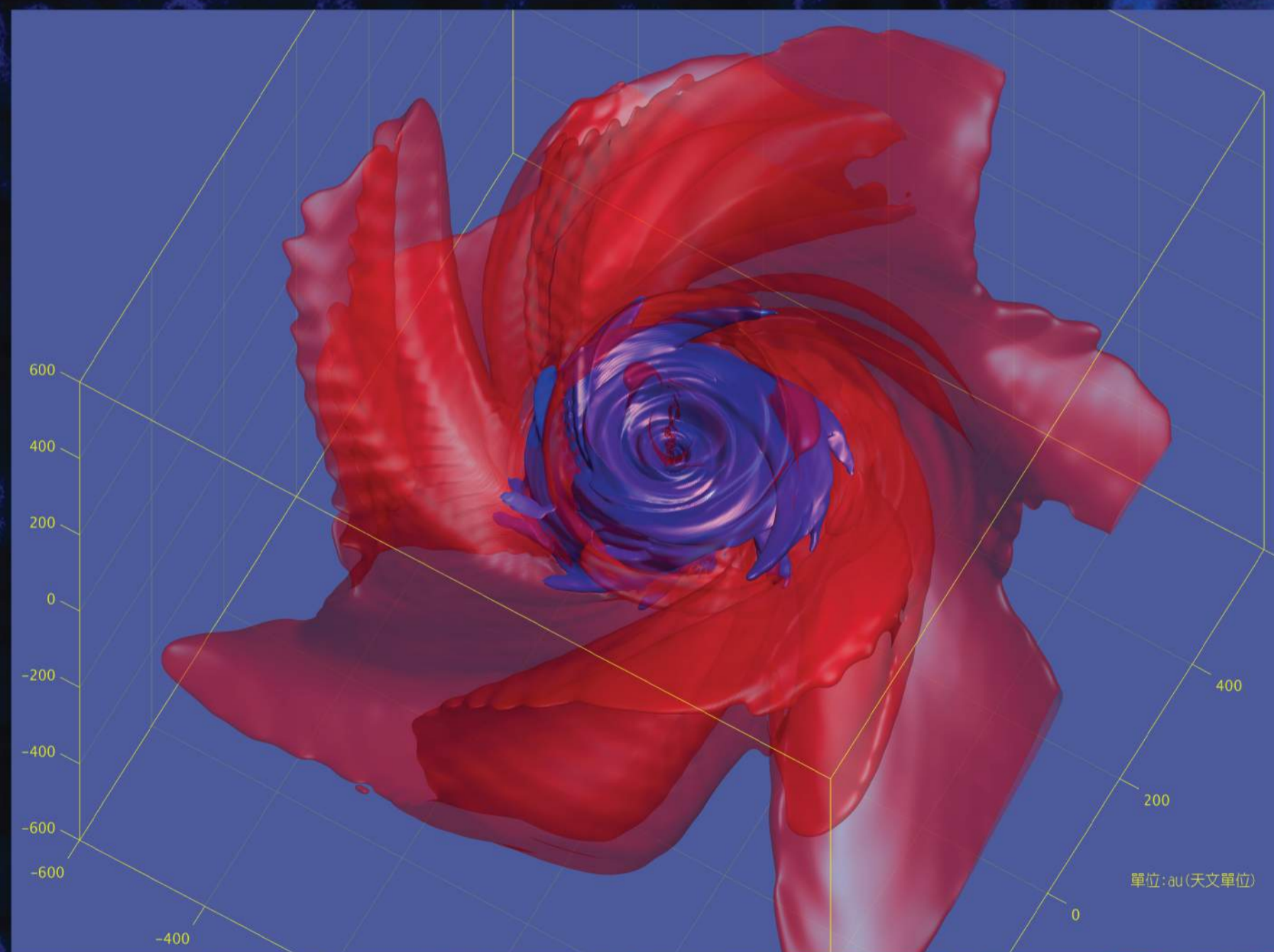
但是實際上，大部份的模擬資料主要告訴我們天體中氣體或塵埃的密度與速度分佈，與目前觀測資料中探測天體傳到我們眼前的電磁波，兩者本質大不相同，無法直接對應。此時，輻射轉移(Radiative Transfer)的計算就得上場。譬如我們想了解一個在重力與磁場影響下形成的拱星盤，在一氧化碳(CO)的發射譜線看來會有什麼結構，我們可以從磁流體力學計算而得的拱星盤模型出發，假設或者實際計算拱星盤內的化學組成與溫度分佈，由這些資訊推測 CO 的發射譜線在拱星盤模型內被吸收或散射的過程，模擬最後被特定儀器觀測到的景象，而得以與真正觀測資料比較，了解模型的描述與假設是否完善。

計算天文物理在本所的發展

本所的計算天文物理發展，主要由高等理論天文物理研究中心(Theoretical Institute for Advanced Research in Astrophysics, 簡稱 TIARA)與計算天文物理主題計畫(Computational Astrophysics, 簡稱 CompAS)領軍，朝二項重要方向分頭並進：(1) 流體力學與磁流體力學數值模擬工具的開發，目的在於促進本地數值模擬科學的進展，

初步讓本所得以擁有為所內人員感興趣之科學問題量身打造的程式集，進一步讓臺灣天文學界使用並持續發展。目前開發中的「大火程序(Antares code)」專精於流體力學(Hydrodynamics)方程式在螺旋星系、拱星盤、與拱行星盤形成與演化的應用。另一開發中的「臺灣宙斯(ZeusTW)」函式庫由美國普林斯頓大學開發之 Zeus 函式庫特化而來，專精於磁流體力學(Magnetohydrodynamics, 考慮磁場存在的流體力學)計算，已被應用於計算年輕恆星形成時經由重力與磁力影響塌縮的過程中，產生的拱星盤、假盤(pseudodisk, 如圖二)與噴流結構。(2) 完整比較模擬結果與觀測結果之工具的發展，目的在於利用(磁)流體力學的模擬結果，考慮化學過程與輻射轉移計算，能更忠實呈現或預測觀測的精細結構，驗證目前及未來的次毫米波陣列(如阿塔卡馬大型毫米及次毫米波陣列 ALMA)及可見光望遠鏡(如歐洲極大望遠鏡 E-ELT)得到的結果。此計畫，簡稱 CHARMS (全名為 Coordinated Hydrodynamic and Astrophysical Research, Modeling, and Synthesis)，將整合化學過程與流體力學計算，預測分子雲的多樣有機分子分佈，佐以眾多原子與分子在可見光至毫米與次毫米波段線光譜及塵埃連續光譜的計算，探索包括恆星形成最初期的分子雲演化、年老恆星的衰老過程(如圖四)等課題。

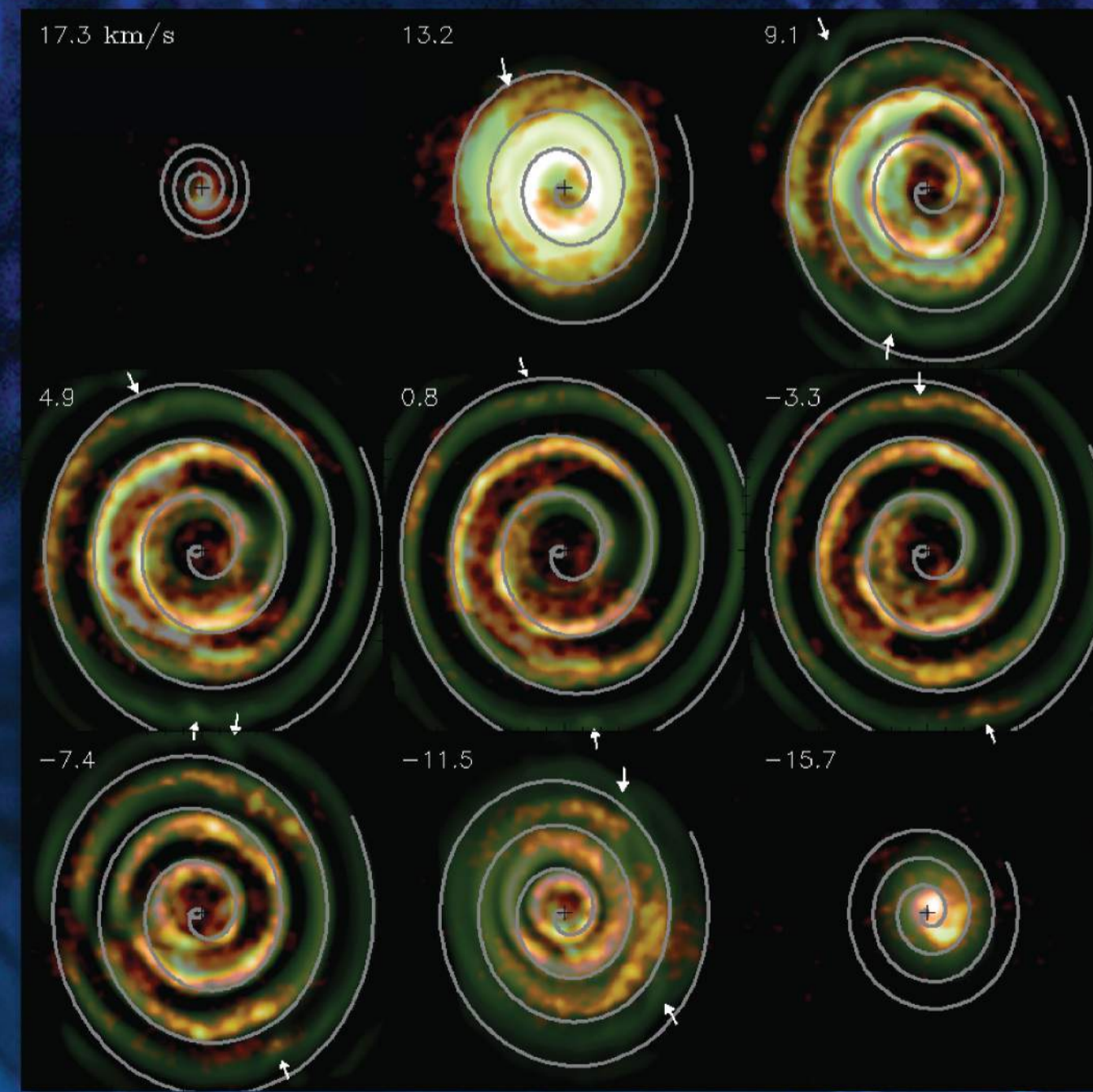
(作者 / 劉君帆)



圖二：ZeusTW 模擬拱星盤形成過程中的密度分佈。即將形成恆星的分子雲核帶有磁場，在形成恆星的過程中，磁場增強並將阻止中央的氣體旋轉，使得拱星盤難以形成。若分子雲核中的紊流得以增加磁場重聯的機會，並造成其假盤(pseudo disk)結構扭曲，如紅色區域所示，則磁場得以減弱或是改變方向與旋轉軸垂直，幫助維持分子雲核中央的旋轉，最終得以形成穩定的拱星盤，如藍色區域所示。

©Ruben Krasnopolsky / 中研院天文所

參考文獻:Li, Krasnopolsky, Shang, & Zhao 2014, ApJ, 793, 130



圖四：恆星生命末期，表面物質會向外吹散，形成球狀氣體殼層。若有伴星在旁，其對主恆星的重力擾動，會影響恆星散出物質呈現螺旋狀分佈。此外伴星在公轉過程中，其重力將吸引螺旋狀氣體殼層在公轉平面上聚積，形成質量聚集團塊。伴星可能因為較冷暗而不易被觀測，但可藉由研究螺旋結構及其中質量團塊的位置，幫助推測伴星的質量、位置、及觀測視角。本圖為有機分子氫基乙炔(HC₃N)分子譜線的強度分佈圖，每張圖左上角數字為氣體相對於主恆星的速度，正值為遠離觀測者運動，負值為朝向觀測者運動，大略顯示不同殼層的向外擴張速度；橘色及白色部分為實際觀測結果，綠色是本所CHARMS計畫中分子譜線計算函式庫SPARX由流體力學模擬結果計算輻射轉移後的譜線強度分佈圖，能夠忠實呈現觀測結果。附加其上的白色螺旋線為一簡化之阿基米德螺旋模型(Archimedes' spiral)。白色箭頭指出螺旋結構中的質量聚集點。

©金孝寬 / 中研院天文所

參考文獻:Kim, Hsieh, Liu, & Taam 2013, ApJ, 776, 86

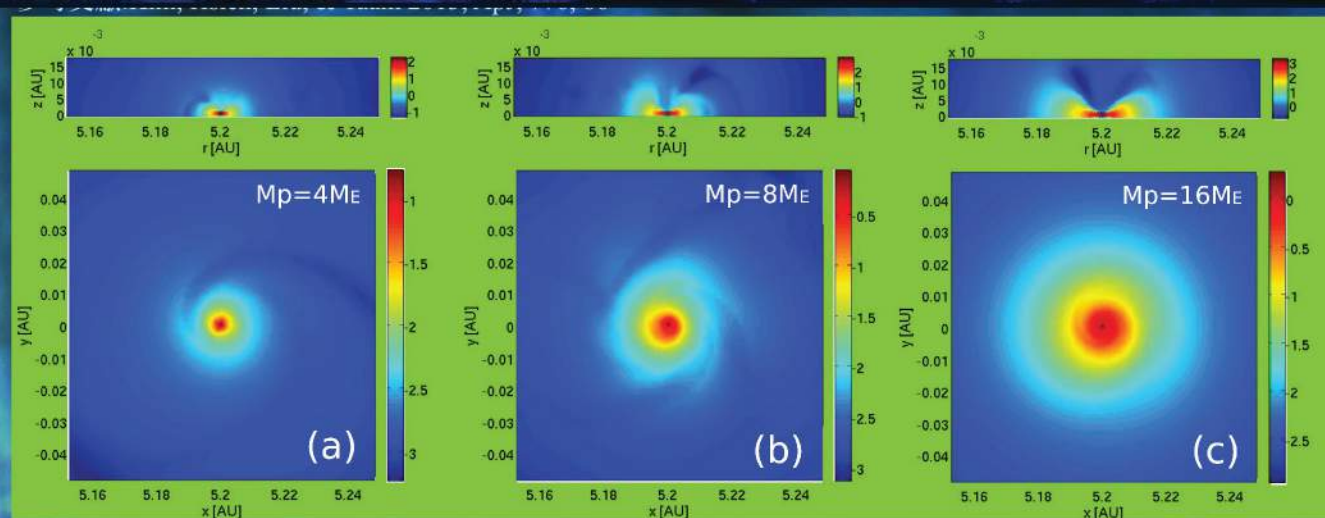
計算流體力學的應用 — 拱行星盤的形成與演化

拱行星盤 (circumplanetary disk) 是在行星形成過程中在原行星附近形成的吸積盤。它主要由氣體還有塵埃所組成。它不但與行星吸積質量的過程有關，我們也相信衛星的形成與拱行星盤有密不可分的關係，所以拱行星盤也被稱為原衛星盤。在拱行星盤演化的早期，如果原行星質量不算大(約海王星以下的質量)，其周圍的拱行星盤主要是從高處吸積氣體與質量，而且這些氣體大都還會回到拱行星盤。要完整描述這樣的氣體動力行為，我們要求這個計算必須是三維的，而且要能同時演化拱行星盤與拱行星盤。

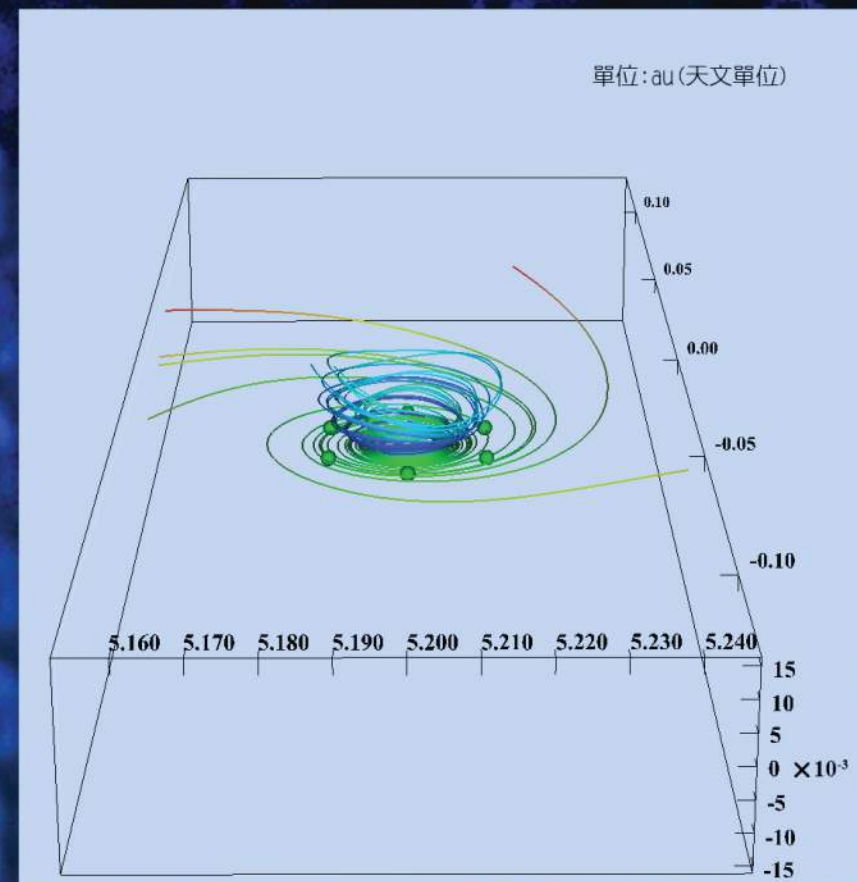
本所自行研發的大火程序已經被應用在研究螺旋星系、棒狀星系、拱行星盤的演化，也獲得了相當不錯的成果。以上所提的這些問題大都能以二維的近似來簡化計算，使得我們能夠在有限的計算資源下，在合理的時間內獲得結果。然而，當一個天文問題沒有辦法做合理的二維近似時，三維的計算也就無法避免了。拱行星盤的形成與演化便是這樣的一個例子。為了研究拱行星盤的細節，我們必須把原本只能在二維卡氏座標系解流體力學的大火程序推廣到能解三維柱狀座標系的流體力學，還必須

採用多層巢狀(nested grid)的網格結構來同時演化拱行星盤與拱行星盤。整個龐大的運算必須更有效率的平行化，也要同時發展相應的分析工具與視覺化程序。當然這些發展可以應用在更一般的天文問題上面，例如星系的對撞過程。我們因為要研究拱行星盤的形成與演化而推廣了原本的程序，這個發展過程是複雜且辛苦的。到目前為止，能做到跟大火程序相當而且能如此細緻研究拱行星盤的程序並不多。近年來系外行星的大量發現，研究拱行星盤有其觀測上與理論上的重要性。雖然計算天文的發展方向是由特定科學主題來主導的，其發展結果卻是一般而且能被更廣泛的應用。每一種應用都使得我們對天文的觀測結果有新的詮釋，也對天文理論有更深刻的理解。

(作者 / 王祥旭)



圖五：大火程序計算而得的拱行星盤 (circumplanetary disk) 密度結構分佈。質量低於海王星 (質量約為地球的 16 倍) 的行星如何在周圍形成拱行星盤仍是一未解的問題，利用大火程序的全域三維空間計算能力，我們得以瞭解原始行星周圍氣體如何與更外圍的拱行星盤 (circumstellar disk) 交互作用，產生拱行星盤。圖 (a)(b)(c) 分別約為 4、8、與 16 倍地球質量的行星造成的拱行星盤之垂直 (上列) 與水平 (下列) 結構。© 王祥旭 / 中研院天文所



圖六：低質量拱行星盤 (約海王星質量) 附近的三維流場。每一條線的顏色變化代表時間序，愈藍的部份代表較早的時間，愈紅的部份代表較晚的時間。此圖說明了拱行星盤由盤面的上方 (較藍) 吸積氣體，而這些吸積的氣體大部分由盤面 (較紅) 離開回到拱行星盤。也就是說這些吸積的氣體並不是被原行星束縛的。這個結果闡明了拱行星盤的存在對於行星形成是不利的。

© 王祥旭 / 中研院天文所

參考文獻: Wang et al. 2014, ApJ, 790, 32



圖一：螺旋星系 NGC1097 的觀測照片，可見顯著的螺旋狀結構。明亮的區域多為大質量恆星所在，在星系中心，還能看到一圈明顯的環狀亮星結構。在這環狀亮星結構之外，有二條暗黑狹窄的通道，一般認為是高密度氣體和塵埃的所在。©ESO

大火程序應用於星系的觀測比對

大火星 (Antares) 又名心宿二，是位於天蠍座一顆相當亮眼的超紅巨星。傳說中國早在四千多年前三皇五帝時代，即開始觀測大火這顆亮星。但在計算天文物理界 (computational astrophysics)，「Antares」有了另一個意義。

近數十年來全世界計算天文物理隨著電腦運算能力增強而有了蓬勃的發展。本所已故的理論天文物理學家袁旂教授有鑑於透過公式推導和分析的發展必然有限，加上近數十年來全世界計算天文物理的蓬勃發展，袁教授深感在臺灣發展計算天文物理以補理論分析不足的必要性。因此，袁教授自 2001 年起，和時任臺大數學系教授的陳宜良博士合作，並組成研究團隊，全力開發屬於臺灣自主研发的天文模擬軟體。除了領導團隊內部日常的研究和開發工作之外，袁教授且不定期邀請國外計算物理的專家來臺訪問，更於 2003 年在臺北舉辦大型計算天文物理國際研討會，

匯集世界各地精英學者來臺，以推廣臺灣計算天文物理的視野。

經過近十年的努力，這套天文模擬軟體逐漸成形，其計算成果也陸續開始發表於國際知名的天文期刊。為了紀念中國天文發展悠久的歷史，袁教授將此軟體命名為「大火程序」 (Antares Code)。

大火程序的核心，其實就是運用電腦和數值計算方法來求解流體力學的運動方程式，可以和氣象預報所運用的大氣或海洋的模擬計算類比。在宇宙間雖然絕大部份的空間處於近乎絕對真空的狀態，但是由於天文物理的時間軸通常是以百萬或億年計，而空間軸是以光年的數量級計，稀少量的原子和分子，在這樣的空間內仍然無以數計，而且有足夠的時間像我們在地球上所熟悉的流體一般進行無數次的碰撞。由於相當多數的天文系統處於盤狀結構，如星系盤 (galactic disk)、



圖三：左圖為大火程序模擬的結果之一。圖中所示的是模擬的氣體密度分佈，紅色為氣體濃厚的區域，而藍色為氣體稀薄的區域。右圖為模擬的結果和觀測的比對。圖中可見大多數模擬出來的螺旋結構都和觀測十分吻合，更重要的是此模擬成功地重現了觀測所示的二條高密度氣體和塵埃通道。

© 林達宜 / 中研院天文所

參考文獻 :Lin et al. 2013, ApJ, 771, 8

拱星盤 (circumstellar disk)，甚或是黑洞外的吸積盤 (accretion disk) 等等，大火程序專門針對這類型的幾何結構進行求解。而這類型的計算得到的結果，可以同時提供給我們這類系統空間上的結構以及時間上的演化的資訊。後者，時間上的演化，是傳統理論天文物理鮮少能夠提供的；這也是為什麼近年來計算天文物理的發展，是天文研究進步的一大推手。

由於袁旂教授主要專攻的研究領域是螺旋狀星系 (spiral galaxy) 的結構成因，大火程序初期的應用對象，即是針對這類型星系進行模擬研究。分析螺旋星系 NGC 1097 (圖一) 的結構成因，此星系具有顯著的二螺旋結構。更重要的是，觀測證據顯示該星系有二條高密度的氣體和塵埃通往星系核心，而該核心具有顯著的環狀亮星結構，暗示著有非常活躍的恆星形成活動。我們認為這些高密度氣體和塵埃的形成，是來自於該星系的大型棒狀結構的引力，而

正是因為這些物質被重力和流體碰撞推進而流向星系中心，加速了星系中心恆星形成的活動。利用大火程序，我們成功地模擬出 NGC1097 的結構，並且驗證了這個假說 (圖三)。

大火程序仍在持續發展當中。近年來，這套程序開始被應用在拱星盤和行星形成的研究上。我們預期在短期的未來，更豐富的物理機制將會被加入到程序之中，以及其它不同的幾何結構。伴隨著超級電腦平行運算的能力持續增加，我們相信這套程序未來將能夠具備足夠的廣度和深度，以應用到各類型尖端的天文物理研究之上。

(作者 / 楊朝欽)

計算天文物理學家甘苦談

理論天文物理學家試圖用我們在地球上熟知的物理理論來解釋天文觀測到的種種奇特現象。這過程首先需要解釋觀測的現象，還可能做出觀測上的預測並驗證物理定律的適用範圍。二十世紀後至今，電腦科學的快速發展，讓許多原本在一般條件下無法解的物理方程式，轉變成能利用超級電腦的高速運算而得到答案，計算天文物理的發展也迎上這股潮流。

計算天文物理包含了許多的面向，其中包含了待解的天文問題、超級電腦系統的建構、數值方法的發展及程式撰寫與測試、數值模擬結果的分析與視覺化、與觀測比較以建立理論、理論的預測等等。因牽涉的範圍廣，需要結合不同領域的人才，故經常由一個團隊組成，想從事計算天文物理的研究人員，可能需要同時具有天文物理、數值方法、電腦建構、程式設計等相關知識與技術。另一方面，雖然國外也有許多的程

式碼已經可供下載免費使用，但通常只能拿到較舊的版本，也不易得到技術支援。然而，想要探索天文中最新端的理論，要能自己掌握所有細節與相關的物理是必要的。建立計算天文物理的平台是艱辛的過程，一方面需具有極度的細心與耐心，另一方面建立過程中其他研究的時間也因此被大幅壓縮。不過，一旦數值平台成熟後，並結合觀測數據，對於快速推進天文理論的發展是可預期的。

總而言之，數值天文模擬是一個團隊工作，臺灣的計算天文物理正處於發展中，我們真摯地期待不久的將來，能有更多的新血投身於這個領域，對理論天文貢獻一己之力。

(作者 / 王祥旭、嚴健彰)



圖七：2015年七月在本所舉辦的計算天文學暑期學校。此次暑期學校觸及的理論相當廣泛，其中包括了數值磁流體力學、多體粒子自重力的模擬、數值平行運算技術、數值結果的視覺化。涉獵的天文主題有宇宙演化、恆星形成、星系形成、拱星盤的形成與演化、黑洞吸積盤、星群的演化等等。圖中為來自臺灣以及國外的學生，還有在臺灣從事理論方面的天文學家們正專心聆聽普林斯頓大學天文系的 Jim Stone 教授所教授的數值磁流體力學。

發行人 | 朱有花

執行主編 | 周美吟

美術編輯 | 蔡殷智

執行編輯 | 曾耀寰、劉君帆、蔣龍毅

底圖版權聲明 | 螺旋星系 NGC1097，經影像處理而成。

原圖版權 ©ESO

發行單位 | 中央研究院天文及天文物理研究所

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)2366-5391

電子信箱 | epo@asiaa.sinica.edu.tw

天間季報版權所有 | 中研院天文所

ISSN 2311-7281 GPN 2009905151



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，有機會在天文季報上刊登喔！