

阿塔卡瑪大型毫米及次毫米波陣列(ALMA) 的恆星形成新視野

中央研究院天文及天文物理研究所 湯雅雯 高培邁 李景輝

恆星怎麼形成？

恆星是在冷而緻密的分子雲中形成。根據簡略版的恆星形成理論，當稠密分子氣體聚集到自身重力大於氣體的熱壓力時，氣體會塌縮並形成恆星。然而在恆星形成的真實場景中，壓力和重力之間的出入平衡並非這麼簡單。因為瀰漫於恆星苗圃中的分子氣體，除了壓力、重力以外，還受到磁場的影響。而磁場，則被認為會阻礙到重力向內拉的效應，也減緩恆星形成的速度。位於智利的阿塔卡瑪大型毫米及次毫米波陣列（簡稱阿塔卡瑪干涉陣列；ALMA）於 2012 年開始進行早期觀測計畫，本文將介紹由台灣的研究人員主導的研究計畫在恆星形成領域的新研究成果。以下第一個主題將介紹究竟磁場在這個過程中，如何影響著氣體塌縮與分布的情況。此外，在氣體塌縮形成原恆星的過程中，絕大多數的角動量會存在於原恆星盤上，這個原恆星盤扮演著胎盤的角色，孕育著位於中心的原恆星。本文第二個主題將報告原恆星盤的精細結構，以及角動量轉移到雙極噴流的證據。當原恆星逐漸吸積足夠的雲氣而演化成成熟的主序星時，當初扮演胎盤角色的原恆星盤內的物質也同時開始聚積，行星就誕生在盤內。本文第三個主題將報告首次觀測到行星形成於早期原恆星盤的氣體螺旋結構，間接證實行星極有可能在演化早期就已形成。

一、藉由磁場探討分子雲塌縮的過程

磁場如何追蹤？

天文學家該怎麼做才能認識遙遠天體的磁場呢？一種方法是測量塵埃的偏振光。由於細長型的塵埃顆粒傾向於將它的短軸和磁場方向平行對齊。塵埃顆粒系統性地沿磁力線對準，使塵埃顆粒的發射譜線與局部(local)磁場垂直，造成偏振光。這使得我們從偏振方向能推斷磁場方

向。由中研院天文所高培邁博士(Patrick Koch)主導的團隊，透過高靈敏度的 ALMA 望遠鏡，觀測了塵埃的偏振光，藉這個方式來了解更多關於銀河系「W51 恆星形成分子雲」的磁場形態。W51 是銀河系中最大的恆星形成分子雲之一，分子雲內大質量原恆星形成區有：W51 e2、W51 e8（見圖一）和 W51 North；ALMA 觀測顯示，這三區都有偏振的發射光。將磁場方向從偏振光中提取出來後，團隊發現，分子雲中含有一從未見過的有序磁場型態：在大質量恆星形成核心周圍的幾個小團塊，呈現類似「彗星形狀」的磁場型態，可能表示這些較小的團塊正被拉向質量更大的核心。目前，該團隊的發現已讓我們知道，磁場型態可以說明恆星形成區內的物質流動情形，而此項關鍵，則有助於我們更了解恆星形成本身的性質。

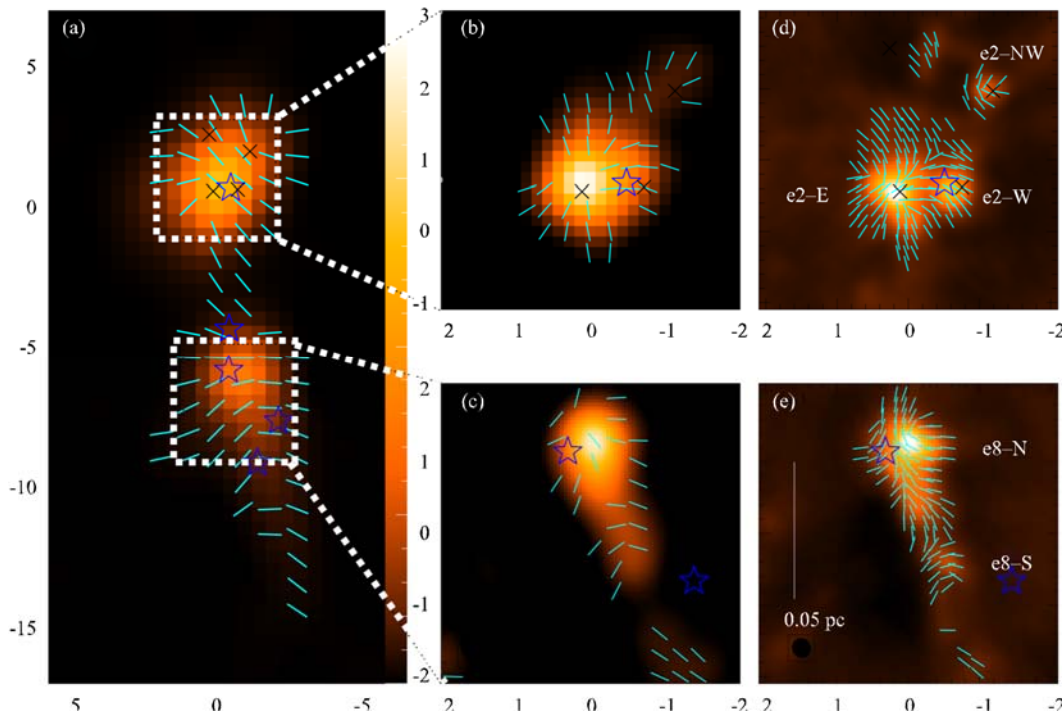
導引恆星形成

究竟 W51 中的磁場對恆星形成是助力還是阻力？為了探索這個問題，Koch 和合作者引入了 $\sin \omega$ 這個參數，其中 ω 是局部重力和局部磁場間的夾角。

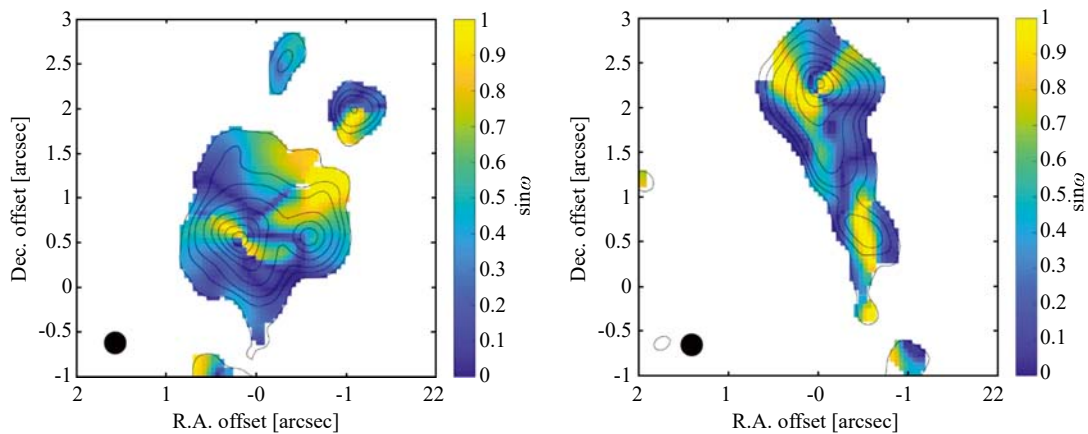
當重力與磁場之間的夾角較小時（ $\sin \omega$ 值趨近於 0），磁場對分子雲塌縮不太有影響。如果重力和磁場垂直（ $\sin \omega$ 值趨近於 1），磁場會減緩氣體往內掉落(infall)，抑制恆星形成。

基於這個 $\sin \omega$ 參數，他們發現了一些重力不受磁場影響的狹窄通道。這些磁力通道可導引氣體流向緻密核，協助了恆星形成的過程（如圖二）。

綜合 Koch 團隊的觀測結果，我們得知 ALMA 望遠鏡擁有強大的偏振觀測能力，未來將協助取得更多新發現。這次及後續可望發表的塵埃偏振觀測，將持續為我們揭露分子雲中微妙的磁性結構，深入探討磁場在恆星形成中的作用。



圖一 (a)、(b)、(c)三欄內的藍色線段顯示的是由「次毫米波陣列」(SMA)取得的大質量原恆星 W51 e2 和 W51 e8 (Tang *et al.* 2009)的磁場型態，與之對照的(d)、(e)欄，是新 ALMA 觀測取得磁場型態。橘色彩色背景顯示的是塵埃粒子的熱輻射強度，越亮表示溫度越高、或是塵埃粒子越多（即重力越強）[引用自 Koch *et al.* 2018]。



圖二 從“W51 e2”（左圖）和“W51 e8”（右圖）這兩個大質量原恆星得到的 $\sin \omega$ 參數和其周圍環境的分布情形。顏色偏黃的部分顯示磁場會減緩氣體掉落，抑制恆星形成；顏色偏藍的部分則顯示磁場對分子雲塌縮影響不大。圖片版權：Koch *et al.* (2018)。

二、一個正在孕育的太陽系：目擊胚胎恆星正在吸食「太空漢堡」並吐出旋轉的雙極噴流

多年來天文學家一直在找恆星形成最早期

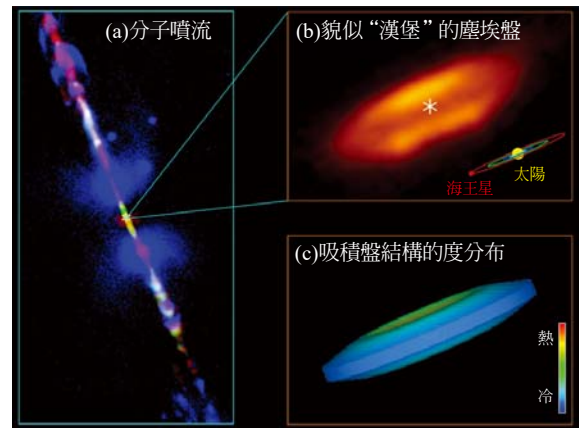
階段的吸積盤，想確定它們的結構、如何形成、吸積過程怎麼發生。此外，原恆星（又稱「恆星寶寶」）還驅動了強而有力的雙極噴流，是恆星形成時期一個最奇特的標桿。藉由對此噴流的觀測可進一步探討吸積盤是如何餵食原恆星。

由中研院天文所李景輝博士率領的研究團隊，借用 ALMA 最優異的解析力，不只偵測到吸積盤，並且很清楚呈現其中許多結構細節，尤其是來自其垂直剖面的部分。挑戰現有的吸積盤形成理論。同時也首度顯示出吸積盤的垂直結構，並對行星形成初期的塵埃顆粒如何長大和沉澱過程提供線索。過去理論天文學一直沒辦法好好解釋，在恆星形成最早階段的盤是如何產生，因為磁場會減緩塌縮物質的旋轉速度，這使得早期新生原恆星周圍形成環繞的盤在理論上很難成立。這項新發現意味著磁場阻撓盤形成的效果，可能不如我們過去以為的那麼強大。而新解析出來的旋轉噴流，不僅確認了噴流能將吸積盤最內緣過剩角動量帶走，解決天文學懸宕多年的難題，也讓吸積盤餵食原恆星的完整情境躍然呈現。

所觀測天體的性質和觀測成果：

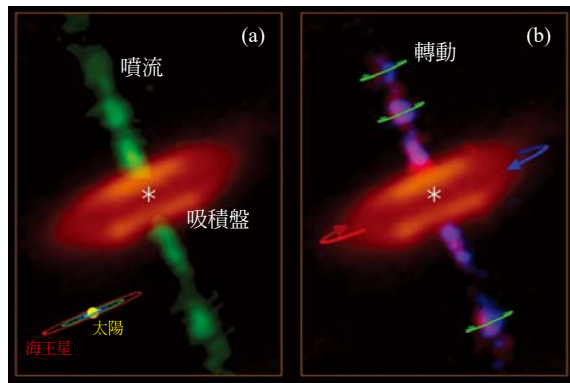
HH212 是位在獵戶座的一個原恆星系統，距離地球 1300 光年。在這個系統的中心恆星年齡是 4 萬年，相當於太陽年齡的十萬分之一，質量則為太陽五分之一；具有強力的雙極噴流，顯示出它吸積的效率應該很高。在過去，當望遠鏡解析力最多能看到此系統中央約 200 個天文單位(1 天文單位為太陽到地球的平均距離)時，只能看到有個扁平包層朝中心盤旋，預期在靠近原恆星的地方，可能有個小小塵埃盤。現在 ALMA 解析力提升到 8 個天文單位，比原來好 25 倍，不僅實際偵測到塵埃盤，而且在次毫米波段，成功解析這個盤的結構。觀測上看到的這個盤(見圖三)，幾乎是以它的側面面對著地球，半徑約 60 個天文單位，盤中間有一道明顯的暗帶，夾在兩個明亮構造之間，此特徵形成原因是由於這道暗帶的溫度比較低而且不透明。本次是首度在次毫米波段偵測到這個暗帶，造成盤子看起來像個漢堡形狀，和其他在可見光或近紅外光波段看過的一些散射光造成的盤的剪影很相似。這道暗帶的結構清楚地顯示，塵埃盤呈喇叭狀，中心較薄外圍較厚，與吸積盤理論模型相符。

在研究雙極噴流方面，藉由 ALMA 解析力的提升，果然偵測到噴流在旋轉(圖四)。噴流的角動量非常的小，換算得知噴流噴發的位置應該



圖三 HH212 原恆星系統的噴流和盤：(a)噴流由不同分子偵測到的合成影像，影像來自於甚大望遠鏡 VLT (McCaughrean *et al.* 2002)和 ALMA (Lee *et al.* 2015)。中間橘色部分顯示 ALMA 於次毫米波段所取得的塵埃包層和盤的影像。(b)塵埃盤的放大影像。星號標示中心原恆星的可能位置，盤中間有一道明顯的暗帶，造成盤子看起來像個漢堡形狀。右下角是和太陽系大小的比較示意。(c)理論模型推導出的吸積盤溫度分布。圖片版權：ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)/中研院天文所李景輝團隊。

就在吸積盤上距離中心恆星約 0.05 個天文單位的地方，和目前的噴流發射理論相當吻合。(水星至太陽距離約為 0.4 個天文單位，約為噴流噴發位置的八倍遠。)新發現顯示出在原恆星周圍吸積盤(太空漢堡)最內圈區域，噴流的確將物質的一部分角動量帶走了，減慢了那裡的轉動，因此，中心恆星才能從吸積盤獲得物質。李景輝研究員表示：「在大多數恆星寶寶的案例中我們都能看得到噴流，就像沿著吸積盤自轉軸飛馳而出的一串子彈。噴流的功能一直是個謎。它是否如同目前的噴流發射模型所預測的，在轉動呢？但因其口徑極窄，且轉動幅度極小，所以過去一直無法確認。現在因為 ALMA 同時兼備超高的空間和速度解析力，不僅解析到距離原恆星只有 10 個天文單位的噴流，同時還偵測到其旋轉運動。」這看起來，「恆星寶寶彷彿每咬一口太空漢堡(吸積盤)就會射出一顆旋轉子彈。」

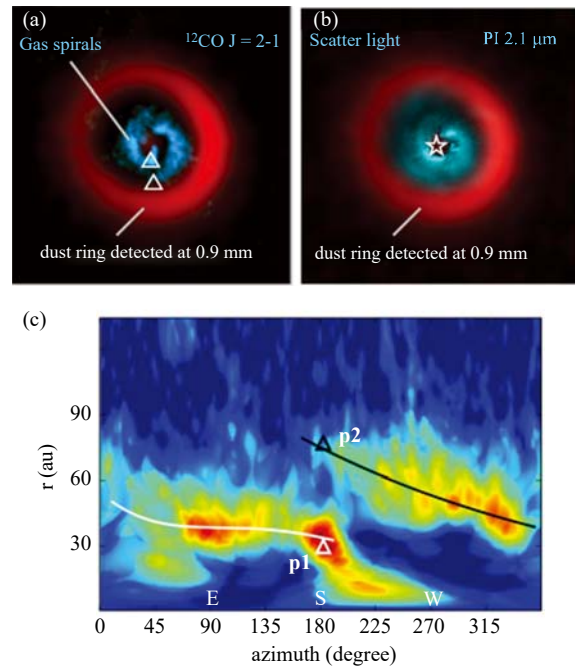


圖四 在 HH 212 原恆星系統裡的噴流和吸積盤。(左圖)顯示從橘色的吸積盤之最內圈盤面，噴出綠色的分子噴流。(右圖)噴流的紅移部份(紅色，譜線紅移代表物體朝我們遠離)和藍移部份(藍色，譜線藍移表示朝我們靠近)分佈在兩側，顯示噴流在轉動(如綠色箭頭所標示)。紅色和藍色箭頭用來標示吸積盤的轉動方向，與噴流一致。圖片版權：ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)/中研院天文所李景輝團隊。

三、在新生恆星形成盤裡的塵埃間隙發現旋臂：暗示行星正在形成

ALMA 取得新生恆星「御夫座 AB」拱星盤的一張銳利影像，顯示在寬闊塵埃間隙中有氣體旋臂，暗示著行星正在形成(見圖五)。行星誕生於塵埃顆粒和氣體組成的拱星盤。根據理論預測，當行星在盤面上運行時，會收集軌道上的塵粒，形成「塵埃間隙」(即「空洞區」)，同時也會產生盤上的螺旋波。要更明確知道早期行星能夠誕生的時間和地點，找到初生行星隱藏於盤上的確鑿證據，必須藉由能看得到盤之組成物質且具有高解析力的 ALMA。

目前為止，僅有少數案例分別觀測到「塵埃間隙」或「旋臂」。由中研院天文所湯雅雯博士領導的研究團隊取得最新的 ALMA 影像，第一次清晰呈現「有氣體旋臂在寬闊的塵埃間隙中」——兩者都同時觀測到了。首度發現在塵埃間隙的氣體旋臂暗示了此系統至少有 2 個行星：一個距離母恆星大約 80 個天文單位造成了塵埃環；另一個距離恆星大約 30 個天文單位，造成我們看到的旋臂狀特徵。



圖五 新生恆星御夫座 AB 拱星盤影像。(a)：ALMA 取得的新影像，紅色環由次毫米大小的塵埃組成，藍色旋臂結構由氣體組成(Tang *et al.* 2017)。(b)對照於先前由 Subaru 望遠鏡取得的藍綠色微米塵埃粒子影像(Hashimoto *et al.* 2011)，螺旋結構明顯地由氣體與微米塵埃粒子組成。(c)氣體螺旋結構的極座標分佈。在行星極可能生成的位置 p1 以內，氣體的螺距角明顯地增大，顯示 p1 位置有不尋常的機制造成此現象。

先前在近紅外波段觀測到的御夫座 AB 星影像中，旋臂位於本次新觀測到的氣體旋臂內側(更接近恆星)。這可能是由於盤上的氣體旋臂凸起並且有相當的厚度，造成恆星的光大部份在旋臂內側被散射出來，形成近紅外波段看到的旋臂。除了三維空間的資訊，這些氣體旋臂還提供了運動速度的第四維觀點，更有助於了解行星和盤之間的交互作用。旋臂上的氣體運動速度大致上和盤的轉動速度一致，而只有在距離中心恆星 30 個天文單位——疑似是行星形成的地方——氣體運動速度比較快，意味著靠近行星的地方，這些氣體繞著行星運轉。

參考文獻

- [1] J. Hashimoto, M. Tamura and T. Muto *et al*, “Direct Imaging of Fine Structures in Giant Planet-forming Regions of the Protoplanetary Disk Around AB Aurigae” 2011-03 ApJL 729 L17
- [2] P. M. Koch, Y.-W. Tang, P. T. P. Ho, H.-W. Yen, Y.-N. Su and S. Takakuwa, “Polarization Properties and Magnetic Field Structures in the High-Mass Star-Forming Region W51 Observed with ALMA”, ASTROPHYSICAL JOURNAL: 855, 39, 2018-03
- [3] C.-F. Lee, P. T. P. Ho, Z.-Y. Li, N. Hirano, Q. Zhang and H. Shang, “A Rotating Protostellar Jet Launched from the Innermost Disk of HH 212”, Nature Astronomy: 1, 015, 2017-07
- [4] Lee C.-F. Lee, Z.-Y. Lee, P. T. P. Ho, N. Hirano, Q. Zhang and H. Shang, “First detection of equatorial dark dust lane in a protostellar disk at submillimeter wavelength”, Science Advances: 3(4), e1602935, 2017-04
- [5] M. McCaughrean, H. Zinnecker, M. Andersen, G. Meeus and N. Lodieu, “Standing on the shoulder of a giant: ISAAC, Antu, and star formation”, The Messenger: 109, 28-36, 2002
- [6] Y.-W. Tang, S. Guilloteau, A. Dutrey, T. Muto and B.-T. Shen *et al.*, “Planet Formation in AB Aurigae: Imaging of the inner gaseous Spirals observed inside the Dust Cavity”, ASTROPHYSICAL JOURNAL: 840, 32, 2017-05
- [7] Y.-W. Tang, P. T. P. Ho, P. M. Koch, J. M. Girart, Sh.-P. Lai and R. Rao, “Evolution of Magnetic Fields in High Mass Star Formation: Linking field geometry and collapse for the W51 e2/e8 cores”, ASTROPHYSICAL JOURNAL: 700(1), 251-261, 2009-07