

知識天地

恆星形成之謎與電波望遠鏡

李景輝研究員（天文及天文物理研究所）

當夜晚降臨，抬頭看到滿天的星星，或許你會像古人一樣，將較明亮的星星連成數個星座，並訴說星座間浪漫動人的神話故事。但當白晝來臨，點點星光卻又即刻消失在太陽的強光底下。或許你會好奇星星到底是什麼，它們又是如何形成的。星星和太陽都高掛在天空，兩者有何關係呢？其實，大多數的星星都像太陽一樣，也是一顆巨大火球，只不過它離我們很遠，所以顯得很小，很弱。離地球最近的一顆星星約有四光年之遙。如果把太陽放到那個距離，它也會是一顆星星。

不是每顆星星都是恆星，只有那些像太陽一樣，質量足夠大以持續產生氫核融合，讓自己不斷發光的才稱為恆星。恆星雖然壽命很長，但也像生物一樣，有生也有死。我們的太陽約在46億年前誕生，現是中年期，約在50億年後會因燃料用盡而死亡。我們銀河系的年齡約為136億歲，幾乎與宇宙一樣老。在這漫長歲月裡，恆星不斷的形成與死亡。太陽相對年輕，屬第二或第三代恆星。

在銀河系裡，除了有數千億顆恆星，也有許多各種不同的星際雲氣。有一種雲氣稱為分子雲，主要由氫分子組成。它含有微小塵埃顆粒，會對可見光和近紅外線產生消光作用，所以在那些波段拍攝的圖像裡，會以暗雲（烏雲）呈現。分子雲會因自身重力不穩定，或因附近的干擾，譬如超新星的衝擊波等等，內部產生一些高密度區，稱為雲核。雲核會因重力塌縮，形成恆星。

早期的恆星形成理論非常簡單，只考慮重力效應，也就是只考慮雲核的物質會因重力塌縮而四面八方不斷往核中心掉入，並在那裡形成恆星。剛開始時，核中心的質量很小，所形成的星體稱為原恆星，即恆星的前身。但雲核的物質會不斷餵食原恆星，使其成長。當成長到百分之八個太陽質量時，原恆星的中心便會開始產生氫核融合，轉變成恆星。恆星最終的質量取決於雲核物質的多寡，最大可長到數十個太陽質量。但如果雲核的物質不足讓原恆星的質量大到可以產生氫核融合時，原恆星便會形成棕矮星，即所謂的失敗恆星。

然而，恆星形成過程卻非如此簡單，我們不但觀測到物質往雲核中心掉入，也觀測到物質從雲核中心往外噴出到星際介質。而且，觀測結果也顯示雲核是一個磁化旋轉核，不但因帶有角動量而旋轉，並且帶有磁場。在重力塌縮的過程，磁場和角動量也會被帶到雲核中心。所以一個較完整的恆星形成理論必需加入磁場和角動量，但這卻讓恆星形成過程變得非常的複雜，難以預測。譬如角動量，如果分子雲的角動量完全被帶進雲核中心，那物質到達雲核中心時將會旋轉非常快，就好比一個花式溜冰的女孩，在張開雙臂旋轉後，將雙臂收回至胸前時，她會旋轉非常快。這樣物質只能繞著原恆星旋轉，而無法順利的餵食原恆星，使其成長。同樣的，如果分子雲的磁場也完全被帶進雲核中心，那磁場所產生的磁壓便會足以抗衡重力塌縮，使物質無法往裡掉。如何處理多餘的角動量和磁場便是現今恆星形成理論最棘手的難題。那些從雲核中心往外噴出的物質是否就是為了帶走多餘的角動量與磁場呢？目前的理論根據不同的假設會有不同的結果，必需由觀測結果來判斷何種假設較合理，何種假設需改進。

雲核溫度非常低，約10 K（零下263°C），但隨著重力塌縮，雲核中心溫度會慢慢升高。它會發射塵埃輻射及各種分子發射譜線，主要是在電波（毫米及次毫米波段）及遠紅外線波段。分子有其特定的發射譜線，利用都卜勒效應，我們即可取得物質的運動模式及速度。好比一輛救護車所發出的聲音，當車向我們駛來時，其音調變高，離我們駛去時，其音調變低。同樣的，分子發射譜線的頻率也會因物質運動方向而變高或變低。利用此原理，我們便可以獲得雲核物質的運動模式及速度，譬如旋轉，塌縮，外流，及噴流等。

雲核裡的結構與運動模式非常細微，需要非常高的空間與速度解析度來解析。電波的波長遠比遠紅外線長，較易解析速度，加上電波技術已非常先進，速度解析度可達非常高，足以解析雲核裡細微的運動模式。此外，電波的天線可做得非常大（口徑在十米以上）。再利用干涉原理，將許多天線結合，形成陣列望遠鏡，不單大大增加接收面積，即提高靈敏度，更大大增加空間解析度，足以接收雲核非常弱的電波訊號並解析雲核裡細微的結構。所以電波陣列望遠鏡已成為研究恆星形成的最佳利器。

目前全球有史以來規模最大的電波望遠鏡計畫便是ALMA計畫（圖一）。ALMA全名為Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array，中文為阿塔卡瑪大型毫米及次毫米波陣列。它是北美，歐洲，及東亞多國合作的國際計畫。臺灣有幸經由北美及東亞參與此項計畫。ALMA觀測的波長為毫米與次毫米，是哈伯太空望遠鏡無法觀測的範圍，用於探測低溫物質。陣列所在地—智利北部海拔五千米的阿塔卡瑪沙漠，是高原地形與沙漠氣候，大氣具高度透明度與穩定度，非常適合進行毫米與次毫米波觀測。陣列建設工程始於2005年，並於2013年3月舉行啟用儀式，預計使用壽命為50年以上。整個陣列有66座天線，包括由50座12米天線所組成的主陣列，以及由4座12米與12座7米天線所組成的緻密陣列，接收面積（靈敏度）為其它同波段望遠鏡的30倍。主陣列散佈的範圍，直徑大至16公里（大如臺北盆地），使其空間解析度高達哈伯太空望遠鏡的10倍，能從墾丁看清台北101大樓頂上的一元硬幣。運用ALMA，對於宇宙的起源，星系、恆星、行星乃至生命形成等重要天文課題的研究，可望有突破性的進展。ALMA已於2011年9月開始進行初期科學觀測，應用16-34座天線，靈敏度已超越其它同波段望遠鏡的10-20倍。

恆星形成區HH 212具有一個美麗壯觀的噴流系統（圖二），成為常用的教材例子。它非常年輕，而且很近，位於冬季星空獵戶座腰邊的分子雲核裡，距離我們約一千三百光年，讓我們可以端詳恆星形成初期的過程。它的中央有個星齡約三萬六千年、質量已長到五分之一太陽質量的新生恆星。藉著ALMA塵埃輻射及 HCO^+ 分子譜線的觀測，我們獲得該恆星形成區的結構影像和運動模式（圖三左），發現其核心物質並不是四面八方直接落入原恆星，而是先透過一個扁平的假盤（pseudo-disk），再透過一個薄而濃密的克卜勒盤（Keplerian disk）才落入的。這個結果與現今磁化旋轉核的塌縮模型大致符合（圖三右），證實了磁場和角動量的必要性。假盤（棕色）主要是因物質沿磁力線（綠線）掉入而形成的，它之所以稱為假盤是因為它不是一個因旋轉而形成的旋轉盤，裡頭的物質主要還是因重力往中心掉。克卜勒盤（深棕色）是一個旋轉盤，主要是因角動量守恆而使掉入的物質快速旋轉而形成的。它也是一個吸積盤，裡頭的物質會慢慢的往中心掉，在內部最深處餵食原恆星。目前天文觀測儀器還無法透徹地解析餵食區。

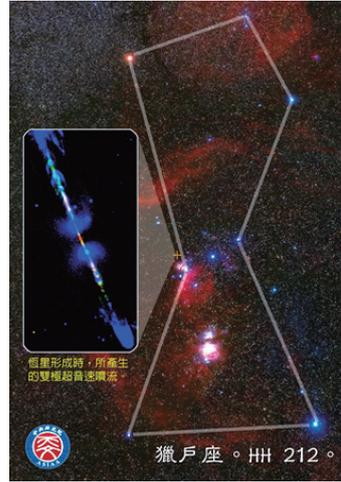
噴流現已公認為恆星形成的標竿，凡有噴流的地方必有恆星在形成。噴流的發射機制迄今尚未確定，但相信是磁場和角動量的合作結果，將部份物質從吸積盤內部以磁離心力甩出去而形成的。也就是說噴流能間接提供我們吸積盤內部的特性，使得我們有機會探究迄今尚未解開的餵食過程之謎，揭開恆星形成的奧秘。

HH 212噴流呈高度準直，很可能便是帶有環形磁場的結果，就如橡皮筋一樣，環形磁場可以綁住噴流，使其物質不會散開。這噴流也有細微的擺動，但擺動的幅度並沒有隨著距離增加而增大，很可能是因有極向磁場做為噴流骨幹的結果。就如鐵絲般，極向磁場將噴流物質串連起來，讓擺動幅度變小。噴流相信也能將克卜勒盤內部最深處的多餘角動量帶走，使得盤中的物質能順利落入新生恆星中。目前天文學家正計畫運用ALMA來測量噴流的角動量和磁場強度，以驗證現有的噴流發射機制。

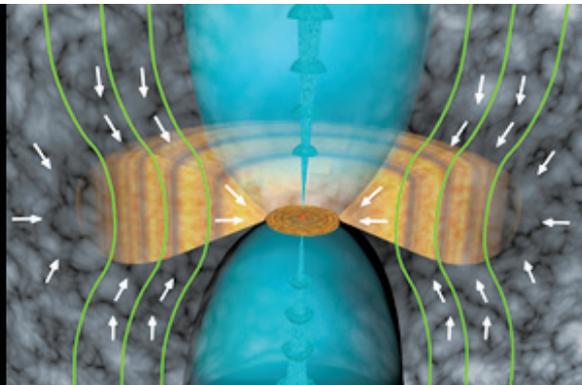
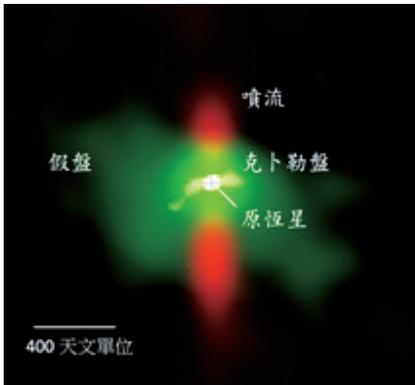
接下來的幾年，ALMA將會對恆星形成研究課題帶來突破性的進展。尤其是吸積盤的形成，噴流的發射機制，及恆星的餵食過程等等。此外，吸積盤之後也會演化成原行星盤，形成行星系統。



圖一：ALMA的鳥瞰圖。(ESO/EFE/Ariel Marinkovic)



圖二：獵戶座星空圖(王為豪提供)。左邊插圖為HH 212 噴流合成影像：紅色及綠色為ALMA取得的SiO及CO分子氣體影像(李景輝等人, 2015)，藍色為近紅外線氫分子氣體影像(McCaughrean等人, 2002)。



圖三：(左) ALMA取得的 HH 212 合成影像，圖中顯示透過塵埃輻射取得的假盤(綠色)及克卜勒盤(亮綠色)影像，以及透過HCO⁺分子氣體觀測取得的雙極噴流(紅色)(李景輝等人, 2014)。(右)：根據磁化旋轉核塌縮模型繪製的示意圖，圖中顯示假盤(棕色)、克卜勒旋轉盤(深棕色)、及雙極噴流。綠色的線條代表磁力線，箭頭代表氣體運動方向。圖片版權：蔡殷智(中研院天文所)