

知識天地

行星形成知多少？

大橋永芳（天文及天文物理研究所籌備處副研究員）

人類從哪裡來？宇宙中是否只有地球上有人類？這是每個人都想問的問題。天文學家知道至今仍有類似太陽的恆星正在形成，而且有些恆星也有行星。這表示太陽系並非宇宙中惟一的行星系統。接下來的問題是：這些太陽系外的行星是如何形成的？太陽系的組成在全宇宙中是否是獨一無二的？

天文學家認為行星是在恆星形成的過程中產生的。目前已知恆星是透過其重力塌縮在高密度分子凝結物中形成。此類分子凝結物通常會緩慢旋轉，因此具有角動量。由於在重力塌縮過程中角動量必須守恆，導致凝結物中的物質不會全部掉入中央的新生恆星，因此恆星周圍便會形成盤狀物。這些盤狀物通常稱為「原行星盤」。行星很有可能在這裡形成。詳細研究原行星盤已蔚為行星研究的主流。最初是有恆星形成理論提到年輕恆星周圍的原行星盤，1980 年代的觀測間接證實其存在。儘管如此，欲詳細研究原行星盤，仍需要直接成像。但原行星盤的直接成像並不容易，因為它們就如太陽系一般地「小」（大約是 100AU。1 AU 等於地球到太陽的距離。）。離我們最近的恆星形成區域中的原行星盤，其視角僅有 1 角秒。

然而，拜觀測技術進步與新儀器之賜，1990 年代天文學家已能以更高角解析度進行原行星盤的直接成像。尤其是毫米波干涉儀在原行星盤研究上扮演了重要角色。電波干涉儀是由數個小口徑（10 米）望遠鏡組成的陣列，其功能類似一個大口徑（數百米到一公里）的單碟望遠鏡。毫米波干涉儀對原行星盤的觀測研究之所以如此重要，不僅因其高角解析度，也因其能觀測兩種重要的放射線，一是可追蹤原行星盤表面密度分布的塵埃連續譜，它能看出有關灰塵溫度與質量等特性；二是能追蹤原行星盤運動的分子譜線放射。透過使用毫米波干涉儀天文學家已繪製出若干原行星盤，揭示其質量、大小與運動等物理特性。透過毫米波干涉觀測，我們發現原行星盤具有大小約數百 AU、質量小於 0.01 個太陽系質量的圓盤結構。這些盤狀物事實上類似原太陽系星雲，即 1960 年代理論天文學家認為太陽系形成初期的結構。

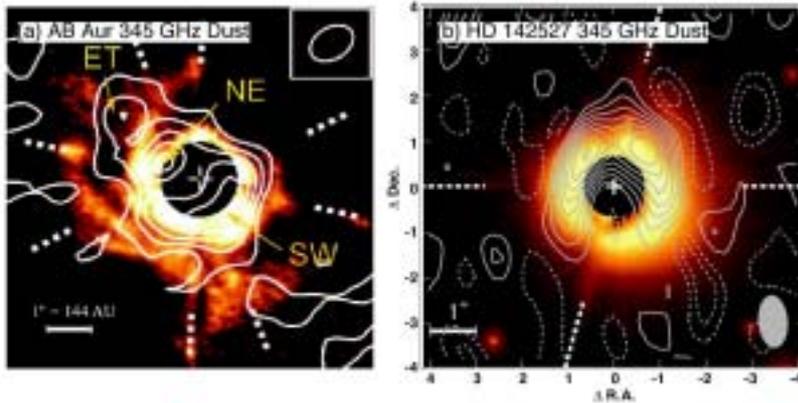
毫米波干涉儀觀測顯示原行星盤似乎沒有很多變化。然而在光學／近紅外線波段對原行星盤進行的新觀測顯示盤的結構有較多的變化。例如，有些盤呈螺旋狀結構，此種結構無法以簡單的圓盤結構解釋。到目前為止我們仍不瞭解這些盤只是特例，還是這些不規則形狀即代表盤中正進行著行星形成等重要的物理過程。由於光學／近紅外線的觀測只能提供散射光的資訊，不能提供任何動力學的資訊，使用干涉儀觀測這些不規則的盤，就成為詳細了解這些盤之物理特性的關鍵。

次毫米波陣列（以下簡稱 SMA）是全世界第一組在次毫米波波段操作的干涉陣列。此陣列位於夏威夷毛納基峰上，由史密松天文台與本處合作興建。此陣列自 2003 年 11 月正式啓用以來已持續獲得許多科學成果。由於原行星盤發出的塵埃連續譜強度與頻率的平方至四次方成正比，而且與毫米波段相比，次毫米波段的分子譜線能追蹤較溫暖而稠密的氣體。預期 SMA 將在原行星盤的研究上扮演獨特的角色。

我們使用 SMA 觀測兩個 Herbig Ae 星的原行星盤：AB Aur 和 HD 142527。Herbig Ae 星是比較年輕的恆星，具有中型的恆星質量（約 2 倍太陽質量）。據估計，AB Aur 的年齡為 2 百萬到 5 百萬年，HD 142527 的年齡為 2 百萬年。在使用 SMA 觀測之前，根據 Subaru 望遠鏡的近紅外線波段觀測，兩個原行星盤都顯出螺旋狀結構。此外，HD 142527 周圍的盤顯示兩個弧形彼此相對的結構。圖一的背景顯示以 Subaru 望遠鏡拍攝到的影像。這些影像是運用日冕觀測儀技術，即把中央恆星的光線遮住，使我們能拍到恆星周圍的微弱光線。然而，在近紅外線下看見的微弱光線大部份是散射光，這表示影像中的結構有可能不是內部的真實結構。

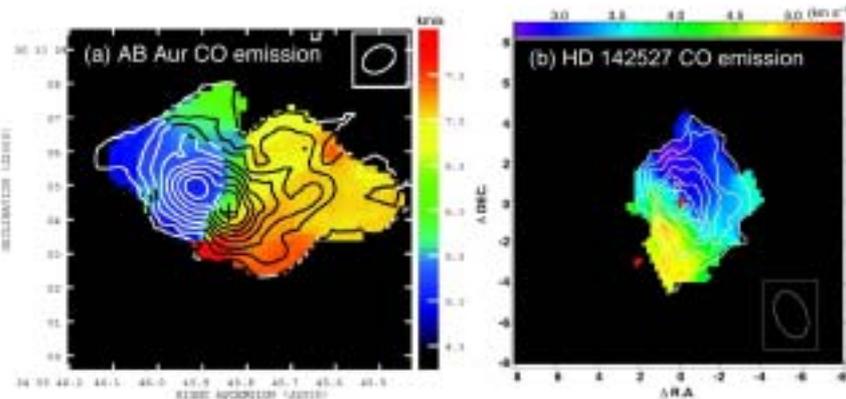
我們使用 SMA 以塵埃連續譜及一氧化碳（以下簡稱 CO）的 345GHz 譜線觀測這些盤。圖一顯示兩個原行星盤的塵埃連續譜與 Subaru 近紅外線觀測的疊合影像。在 AB Aur 的圖上，從東北到西南有一個瘦長的結構。此結

構自然地解釋為以某個角度傾斜的盤狀物。此瘦長結構顯示兩個明顯的高峰，但都不是位於恆星的位置。因此，這兩個峰形成環狀結構圍繞在中央星周圍。這顯示圍繞在 AB Aur 周圍的拱星物質有環狀分佈。此環狀結構的大小約 300 AU，總質量（氣體加塵埃）據估計為 0.0075 太陽質量。同樣地，HD 142527 周圍的連續發射譜顯示兩個高峰，也都不在恆星的所在位置，而在中央星周圍形成一個弧形的結構。此弧形結構很類似 Subaru 影像上兩個弧形彼此相對的結構，其大小與質量據估計分別為 300 AU 及 0.03 太陽質量。先前觀測到的行星盤其塵埃連續譜通常都在恆星的位置上，這顯示 AB Aur 與 HD 142527 周圍的原行星盤與其他的原行盤十分不同。這些奇特的結構是如何形成的尚無明確解釋，但有可能是因為在中央星附近有其他尚未觀測到的恆星或行星。



圖一：使用 SMA 取得原行星盤塵埃連續譜之 345GHz 等高線圖。背景是 Subaru 望遠鏡的近紅外線日冕觀測影像。白色十字代表中央星位置。黑圈顯示各日冕觀測影像遮掉的區域。(a)AB Aur 的影像 (b) HD 142527 的影像。

圖二顯示 CO J=3-2 放射的密度圖。即使 AB Aur 的 CO 放射顯示與其塵埃連續譜相同的瘦長結構，我們仍可輕易看出這兩張圖之間有很大的不同。CO 放射的延伸範圍比塵埃連續譜大，而且 CO 放射顯示在恆星的位置有高峰，塵埃連續譜則無。CO 放射的延伸範圍比較大的原因是 CO 放射能追蹤密度較低的區域，而它在恆星所在位置有高峰的原因可能是 CO 放射對於圓盤中心物質的總量不是很敏感。AB Aur 周圍的 CO 盤大小約為 530 AU 乘 330 AU。除了位於恆星位置的高峰之外，CO 放射顯示恆星位置的東北方有另一個高峰。這個的高峰事實上符合 Subaru 影像上最突出的旋臂，表示有一些氣體成分與最突出的旋臂有關。



圖二：CO 整體強度的等高線圖疊在 CO 的速度場上。不同顏色代表 CO 分子的速度。白色十字顯示中央星的位置。

AB Aur 之 CO 放射的平均速度顯示沿著盤的主軸有清楚的速度梯度。此速度梯度很自然地能藉盤的旋轉來解釋。然而，當我們更仔細地研究 AB Aur 之 CO 放射的速度結構，我們發現有一些氣體不是遵循簡單的圓周旋轉。有趣的是，這些非圓周運動似乎與最突出的旋臂有關。這顯示與旋臂有關的氣體成分可能偏離一般的圓周旋轉。

與 AB Aur 類似，HD 142527 在恆星位置有很強的 CO 放射，但沒有塵埃連續譜。此外，CO 放射顯示有一從東北到西南的瘦長結構，從西北到東南方向的延伸則較弱。測量到的 CO 放射整體大小為 700 AU，沒有明顯的盤狀結構。CO 放射顯示從西北到東南有明顯的速度梯度，可能是由 CO 凝結物的旋轉引起。此速度梯度的大小與繞 2 倍太陽質量之恆星圓周運動一致。在 CO 凝結物西側有一額外的速度梯度，可能表示在中央星周圍的非環形運動，正如 AB Aur 的例子。我們正進一步分析資料，包括與模型進行比較。

SMA 在原行星盤研究上的地位顯然會日益重要。此外，性能更強大的干涉儀 —ALMA 大型毫米波暨次毫米波陣列 — 也將用於原行星盤的研究。此陣列目前正於智利建造中。臺灣（本院天文所籌備處主導）也剛開始參與 ALMA 計畫。SMA 是 ALMA 的先驅；臺灣既參與 SMA 計畫，又參與 ALMA 計畫，在原行星盤的研究上佔有非常關鍵的角色。本處研究人員將嘗試使用 SMA 建立研究原行星盤的架構，將主導未來使用 ALMA 進行之相關研究。