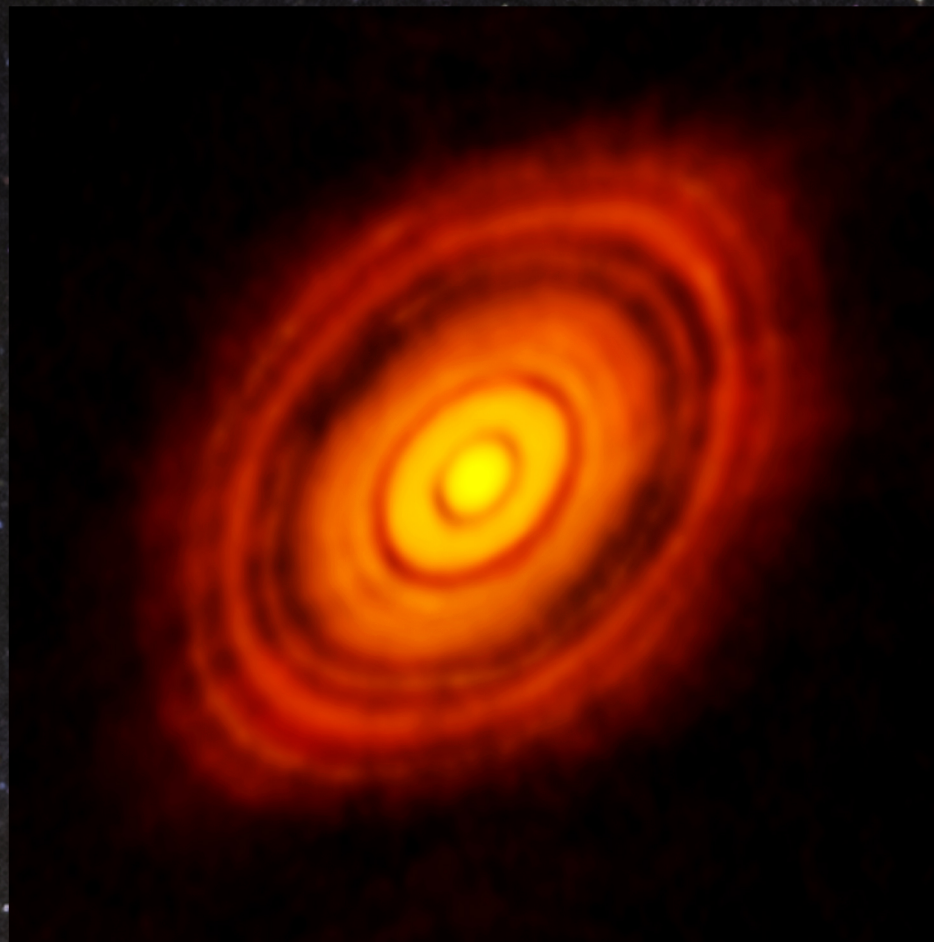


毫米波與次毫米波對應到的是僅約數十度的輻射，正是宇宙中絕大部份氣體與塵埃大約的溫度，因此這個波段乃成為探測宇宙中分子雲氣的最佳利器。藉由毫米與次毫米波的觀測，天文學者得以廣泛研究從太陽系內鄰近我們的行星、銀河系內的各種天體、乃至於銀河系外的其他星系、甚至是宇宙形成之初的原始星系。

2014 年 11 月初，位於智利北部海拔五千公尺寒漠的阿塔卡瑪大型毫米與次毫米波陣列望遠鏡 (Atacama Large Millimeter and submillimeter Array，簡稱 ALMA)，憑藉著它的高解析度與高靈敏度，拍攝到了金牛座中一個年齡估計僅僅百萬年之原恆星 HL Tau 週邊拱星盤中的細微結構。盤面中一系列的亮環與暗隙暗示著行星已在原恆星 HL Tau 的周圍形成！天文學界完全沒意料到在如此年輕的恆星附近，塵埃粒子已經沉澱進而形成如行星般的大天體。這個 ALMA 的影像似乎暗示著行星形成的過程不只發生了，而且發生時間比之前預期得更快更早。如此驚人的結果，正挑戰著所有已知的理論！

回顧當初計畫 ALMA 硬體規格時，科學家們訂定了以下三項主要的核心科學目標：

1. 用少於一天的觀測時間偵測到紅位移 $z = 3$ 時的一般星系（類似於本銀河系）所輻射出一氧化碳 (CO) 或游離碳原子 (C^+) 譜線。
2. 偵測距地球最近的分子雲中原恆星或年輕類日恆星周圍的原行星盤內，氣體分布與運動。藉此我們得以了解這些系統的物理與化學狀態、磁場的結構、甚至偵測到其中因行星形成而在原行星盤面中造成的潮汐裂縫。



圖說：ALMA 觀測之環繞 HL Tau 的原行星盤中塵埃粒子所發出的連續熱輻射影像，其中原行星盤顯示了包括亮環、間隙、斑塊等等各種前所未見的細微結構。(圖片來源：ALMA [ESO/NAOJ/NRAO])

3. 提供觀測各式天體角解析度達 0.1 角秒的「高精準」成像。這裡所謂的高精準度，乃指視野中任一處亮度大於極亮值千分之一的範圍都能正確的成像。

因此這次有關 HL Tau 原恆星盤的觀測，已朝向解決上述第二項科學目標邁進。

實際上，在 ALMA 的計畫書中也清楚的列出了以下多面向的研究課題：

- 透過偵測星際塵埃的熱輻射以研究宇宙早期高紅位移星系的演化序列。
- 利用原子與分子光譜研究恆星形成中星系的化學成份與演化。
- 揭示星系核與類星體中心附近氣體的動力結構。
- 觀測被星際氣體包覆的原恆星、原行星盤、甚至其中的原行星。
- 推導恆星演化後期拱星殼層內同位素與化學成份，以了解恆星內部的核反應過程。
- 提供太陽系內的彗星之彗核、小行星、古柏帶星體 (Kuiper Belt Objects) 以及行星與衛星的精確影像。
- 觀測太陽表面的活躍區域以了解粒子如何加速的機制。

不論是核心或是廣泛的研究課題，我們可以總括的說，透過 ALMA 在毫米與次毫米波段的觀測，將使得我們能更了解宇宙中的星系、恆星、以及太陽系等等天體的起源與演化。而這正是 ALMA 天文台的圖形標誌中所註記的『追尋起源 (In Search of our Cosmic Origins)』的精神！

總結而言，ALMA 所提供的高靈敏度、高空間解析度，廣頻寬、以及高頻譜解析力將使得新一代的天文學者能夠觀測天體諸多前所未見的、微弱的、細密的、甚至是隨著時間變化的影像。而這些新的影像，肯定將如 HL Tau 的觀測一般，為天文各個領域帶來創新的、革命性的發展。

(作者 / 呂聖元)

次毫米波天文學的新紀元

ALMA最新研究成果

UCAT簡介

為擴大各大學參與 ALMA 之範圍，增加各大學 ALMA 使用者的數量，進一步培育訓練新世代的科學家，提升台灣的 ALMA 科學，包括淡江大學、國立台灣師範大學、國立台灣大學、國立中央大學、國立清華大學和國立成功大學等，成立「ALMA-台灣大學聯合團隊」(UCAT, University Consortium of ALMA-Taiwan)，並於 2011 年起，定期舉辦暑期學生專題研究計畫。

(作者 / 周美吟)



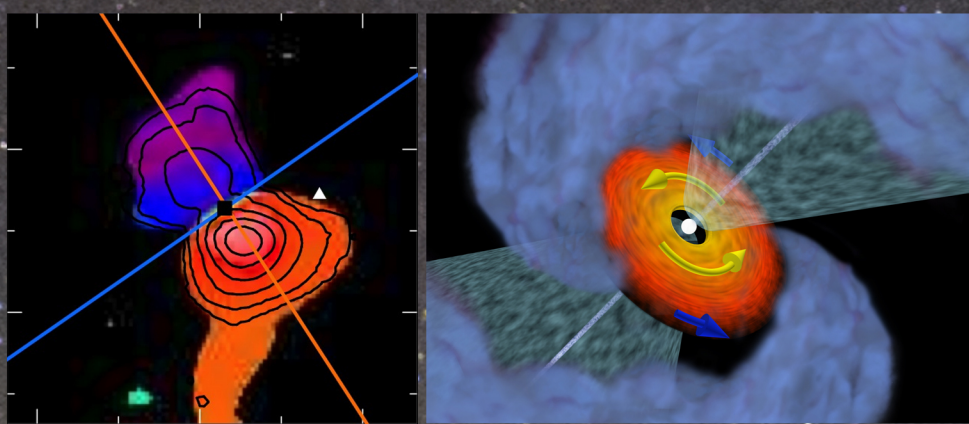
圖說：「ALMA-台灣」的大學聯合團隊 (UCAT) 部分成員參訪位於海拔 2900 公尺的 ALMA「後勤補給基地」。
© 松下聰樹

最年輕的原始行星盤

圍繞在「原始恆星」周圍的「原始行星盤」是行星形成的場所，然而「原始行星盤」在何時以及如何形成仍然是一個懸而未決的謎。

太陽系內的所有物質都遵守著「克卜勒定律」，亦即離太陽較近的內行星繞太陽的速度比離太陽較遠的外行星快。若是圍繞在原始恆星周圍的盤狀物也遵守克卜勒定律，我們就稱之為「克卜勒盤」。天文學家相信「克卜勒盤」內的物質運行在穩定軌道上，最終會有行星生成。因此找到深藏在分子雲內原始恆星周圍的「克卜勒盤」，將會使我們對早期階段行星形成的過程有深入了解。

由清華大學天文研究所賴詩萍教授與其碩士班研究生穆美蓉(Nadia Murillo，現於德國馬克斯普朗克外太空研究所攻讀博士)所領導的團隊使用 ALMA 發現了迄今為止觀測到的最年輕的「原始行星盤」，而且它的年齡比大多數的理論預測還年輕！研究團隊觀察位於「蛇夫座 Rho 星恆星形成雲」內的三重原始恆星系統 VLA1623，發現三重星的主



圖說：左圖為ALMA觀測到的VLA1623A氣體分子運動分布。右圖為原恆星中央的「克卜勒盤」示意圖。箭頭代表「克卜勒盤」上物質運動的方向，靠近原恆星的部分速度較高，符合克卜勒行星運動定律的預測。© Murillo, Lai, et al.、右圖繪製：蔡殷智

星 VLA1623A 尚在恆星形成相當早期的階段，包裹在厚厚的灰塵與氣體中，而且被一個盤狀結構包圍著。利用 ALMA 強大的解析度，他們得以分析盤狀結構內的氣體運動，確認此盤狀結構為「克卜勒盤」，大小約為海王星軌道半徑的五倍。使用克卜勒定律他們計算出中心的原始恆星質量只有太陽質量的 0.2 倍，顯示 VLA1623A 相當年輕並且仍在成長。先前的理論模型預測「克卜勒盤」無法在恆星形成的早期階段形成，然而此研究證明事實並非如此，因此可能在「克卜勒盤」的形成中有其它因素發揮作用。

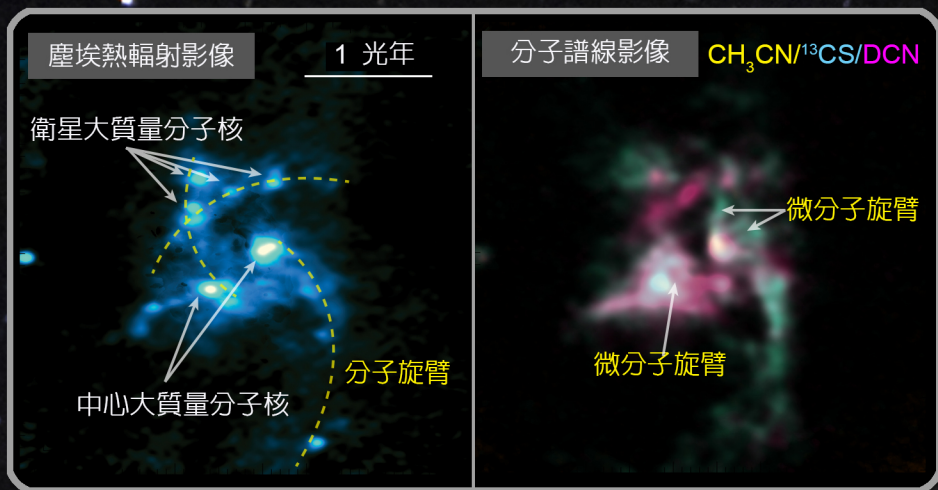
(作者 / 穆美蓉、賴詩萍)

孕育大質量恆星的分子旋臂

大質量星團的形成，一直是天文物理學最難解的問題之一。大質量恆星一旦形成，威力強大的恆星風以及高能量輻射很可能在短時間就將周圍的分子氣體吹散，使得母分子雲中的恆星形成活動驟然停止。然而，夜空中許許多多的星團存在，暗示著自然界一定有形成大質量恆星和星團的方法，也就是形成它們的母分子雲必須有著特殊的幾何與動力學結構。

透過 ALMA 首次證實形成大質量恆星團的分子雲中心埋藏尺度為數光年的巨大有序結構，且顯示該結構具有幾何上類似環繞在低質量原恆雙星 (protobinary) 周圍的「環雙星盤」般的旋臂，唯尺度與質量皆放大了上千倍。這些緻密旋臂圍繞著的中心大質量分子核，以及旋臂本身，為形成星團中質量最大恆星的搖籃。

ALMA 觀測結果顯示這些大質量星團的母分子雲極有可能發生整體性的重力塌縮，使得分子雲的中心由於殘餘的角動量形成尺度約為 3 光年，扁平緻密的大質量盤狀氣體結構。形成最



圖說：ALMA 對大質量恆星形成區域 G33.92+0.11 中心部份的造影。左圖：1.3 毫米波段塵埃熱輻射影像。右圖：三色合成影像，黃綠紅分別顯示 CH_3CN 譜線， ^{13}CS 譜線，以及 DCN 譜線。 CH_3CN 主要集中於包覆大質量恆星的熱分子核， ^{13}CS 則顯示溫熱的緻密分子氣體以及受衝擊區域。DCN 譜線與 1.3 毫米波段塵埃熱輻射皆指示緻密分子氣體的分布。©ALMA(ESO/NAOJ/NRAO)、呂浩宇及研究團隊

大質量恆星的大質量分子核位於該盤狀結構的中心部位。高密度的盤狀結構形成旋臂，並進一步塌縮形成圍繞中央的大質量衛星型分子核 (satellite cores)。盤狀氣體結構受自身的高密度屏蔽，不易受到初形成的大質量恆星的恆星風以及紫外輻射的破壞。這就是大質量恆星可以繼續形成的關鍵！

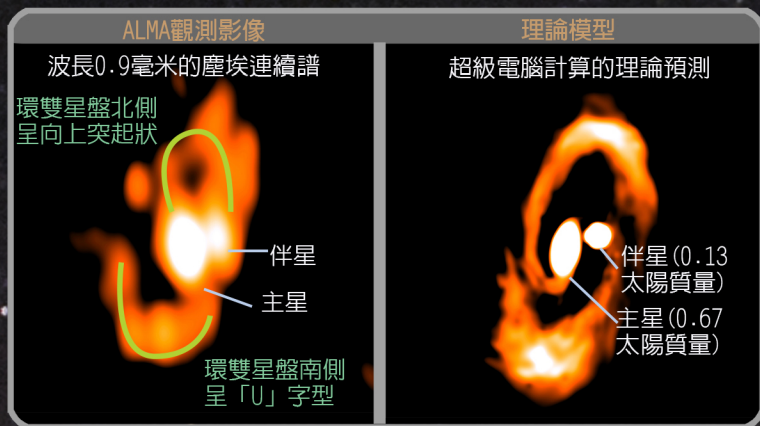
(作者 / 呂浩宇)

恆星雙胞胎形成過程

恆星形成於星際間由氣體與微塵組成的分子雲。質量近似於太陽的這類恆星大多是雙胞胎恆星，因此，追溯雙恆星如何誕生的詳細機制在天文研究上益形重要。理論上，環繞在胚胎期雙恆星外有個盤面，它會朝盤中央餵養雙恆星寶寶，提供它們在長大期間所需要的塵埃氣體物質。雖然最近有些研究已經看得到環繞在雙恆星寶寶周圍的「環雙星盤」，但解析力和靈敏度不足，未能提供盤面氣體運動細部特徵的影像。

由本所高桑繁久博士所主導的團隊先後使用次毫米波陣列望遠鏡 (SMA) 與 ALMA 觀測距離地球 460 光年遠，位在金牛座的 L1551 NE 雙恆星。觀測是用波長 0.9 毫米的塵埃連續發射譜線來追蹤星際介質分布狀況；以及一氧化碳的分子發射譜線，經都卜勒效應計算後得知氣體運動情形。L1551 NE 雙星系統裡的兩個新生恆星質量分別是太陽質量的 0.67 倍和 0.13 倍，兩個新恆星之間的距離是 145 au (au 是天文單位，等於地球到太陽的平均距離： 1.5×10^8 公里)。結果研究團隊發現了雙星周圍各自伴隨著一塊氣體團，及環繞雙星的「環雙星盤」，其盤面大小約 300au，是海王星公轉軌道的 10 倍大。

研究團隊為 L1551NE 雙星系統形成機制構建了



圖說：理論模型顯示有兩條旋臂各從主星與伴星延伸出來，連接到環雙星盤。模型符合 ALMA 觀測到的結構特徵。左圖 © 中研院天文所、右圖 © 日本法政大學

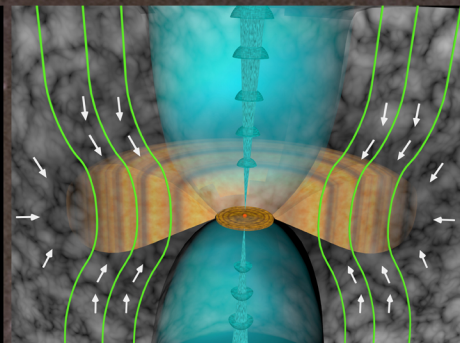
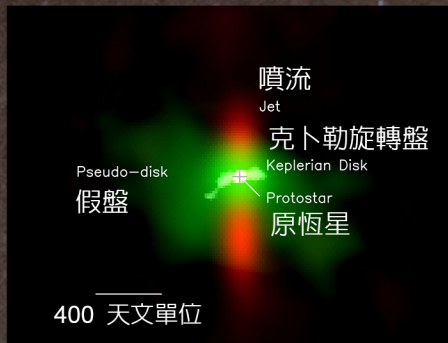
理論模型，ALMA 觀測到的特徵，經數值模擬後皆可重現，兩個旋臂分別自新生雙恆星向外伸出。將觀測中實際看到一氧化碳分子發射譜線與理論預測的氣體運動加以比較探討後，首次確認氣體在旋臂上轉速較快，而旋臂內側轉速則較慢，並呈現了朝中央恆星方向塌縮的跡象，亦即代表物質餵食成長中新生雙恆星的過程正在進行。研究結果表示，雙恆星寶寶會震動環繞在它周圍的環雙星盤，誘導物質朝向中央塌縮，以餵養並成長為雙恆星。

(作者 / 高桑繁久，編譯 / 黃珞文)

HH 212 原恆星系統中的假盤、旋轉盤及噴流

恆星是在分子雲核內部藉重力塌縮形成的，然而由於磁場和角動量的存在，形成過程中的細節非常複雜。使用位於智利的史上最大地面望遠鏡 ALMA，我們可以在前所未有的靈敏度和解析力下，描繪出恆星形成區的影像，詳細研究恆星形成的過程。

HH 212 是個很年輕的恆星形成區，中央有個星齡約三萬六千年、質量約五分之一太陽質量的形成中恆星（原恆星），位於距離我們約一千三百光年遠的獵戶座。我們使用 ALMA 取得這個恆星形成區的影像，發現其核心物質並不直接落入原恆星，而是先透過一個我們稱之為「假盤」的扁平結構，再透過一個濃密的克卜勒旋轉盤（左圖）才落入的。這個結果與現今磁化旋轉核的塌縮模型是一致的（右圖），而假盤（棕色）與克卜勒盤（深棕色）是由於磁場與角動量共同造成的效果而



圖說：（左圖）ALMA 取得的 HH 212 合成影像，圖中顯示透過塵埃連續譜取得的假盤（綠色）及克卜勒盤（亮綠色）影像，以及透過 HCO^+ 氣體觀測取得的雙極噴流（紅色）。（右圖）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。綠色的線條代表磁場，箭頭代表氣體運動方向。左圖 ©Lee et al. 2014、右圖 ©蔡殷智

形成的。在假盤與克卜勒盤的界面上有吸積震波 (shock) 形成，將假盤轉變為克卜勒盤。有趣的是，原恆星也以高準直超音速雙極噴流的形式，把質量噴入星際介質（左圖）。這噴流似乎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原恆星中。

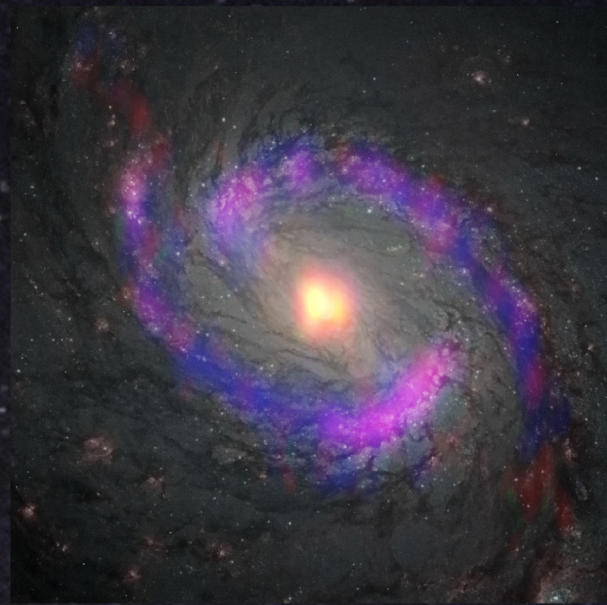
（作者 / 李景輝）

超大質量黑洞周圍環境意外的相對溫和

ALMA 陣列望遠觀測了位在鯨魚座，距離地球 4700 萬光年的一個螺旋星系 M77。M77 是個已知在其星系中心位置有活躍星系核 (AGN) 的星系。在 M77 星系的 AGN 外圍環繞著一圈環狀星暴 (Starburst) 區，該區直徑 3500 光年。ALMA 把分子如何分布在活躍星系核中心的環核盤 (circumnuclear disk) 及外圍的星暴環解析得相當清楚。觀測結果顯示一氧化碳 (CO) 主要分布在星暴環區域，而複雜的有機分子如氰基乙炔 (HC₃N)、氰甲烷 (CH₃CN) 等，卻集中在環核盤裡。此外，一硫化碳 (CS) 和甲醇 (CH₃OH) 則在星暴環區和環核盤都有。

AGN 中心可能有超大質量黑洞。黑洞吞噬附近物質時周圍會生成一個溫度很高的盤面，並發出強烈 X 射線或紫外線。有機分子若暴露在此環境下，原子鏈會斷裂、分子也將被破壞。因此一般認為，環核盤的有機分子極難生存。但 ALMA 新出爐的觀測結果剛好相反，環核盤中有機分子竟然含量豐富，令人跌破眼鏡。研究小組認為，大量氣體在環核盤中像金鐘罩一樣幫忙阻隔了 X 射線和紫外線。相對之下，星暴環的氣體密度比環核盤低很多，阻隔薄弱，有機分子無法生存。

目前不少研究團隊都積極參與觀測並著手建立一些 AGN 理論模型，但究竟遮罩對這些分子產生何種效應，一系列的相關研究現在才剛剛起步。本次觀測結果跨出重要的第一步，未來將能更了解 AGN 鄰近區域氣體之結構、溫度、密度等等。研究團隊也冀望 ALMA 為他們取得更多精密的觀測細節，在持續追蹤的天體目標中，獲得更重要的結果。



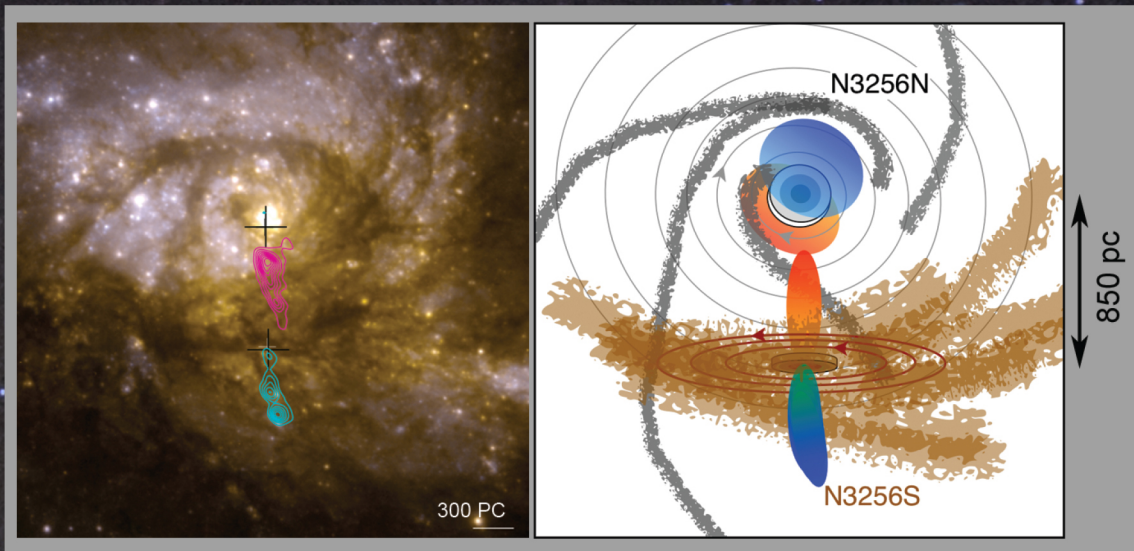
圖說：M77 星系中心。氰基乙炔(黃色)在星系中心的環核盤區含量豐富，一氧化碳(藍色)則主要分布在星暴環區，而一硫化碳(紅色)在環核盤和星暴環兩處皆有分布。©ALMA(ESO/NAOJ/NRAO), S. Takano et al., NASA/ESA Hubble Space Telescope

(來源 /ALMA 新聞稿，編譯 / 黃珞文)

隱藏在併合星系中的雙極噴流

星系有時會和另一個星系相撞，最終合而為一。由於另一個星系的潮汐擾動，通常會導致大量氣體流向星系中心而產生星爆現象，或是點亮星系中心的超大質量黑洞成為活躍星系核。這也是為什麼鄰近宇宙中最明亮的星系主要都是併合星系。然而，併合星系如何隨時間演化，明亮的星系核心和流入氣體的回饋機制為何等等，都是現在熱門的研究議題。

ALMA 觀測到本星系群 (Local Group, 距離約 1.3 億光年) 最明亮星系 NGC 3256 的分子氣體。這是個正在併合的星系，中間兩個星系核相距約三千光年。這兩個星系核都各有一道分子氣體的噴流，噴流速度每年損失約 50 個太陽質量，與星系碰撞導致的恆星形成率相當。其中南方星系核 NGC 3256S 的噴流



圖說：左圖底圖為哈伯太空望遠鏡所觀測 NGC 3256 星系的影像。等高線圖顯示由 ALMA 所觀測到的一氧化碳分子譜線輻射強度。紅藍色表示透過分子譜線的都卜勒位移推導出之一氧化碳分子的相對運動速度，分別代表氣體相對觀測者遠離與接近。右圖為 NGC 3256N、NGC 3256S、以及分子噴流方向（紅藍色）的示意圖。© 中研院天文所

較明顯，速度可能超過 2000 km/s，從星系核心加速到約一千光年的距離。是什麼驅動這個異常的高速噴流呢？本所的坂本和博士認為可能在南方星系核中隱藏了一個活躍星系核，而目前這個星系核的可見光、紅外光和 X 射線觀測資料也發現有一個低亮度的活躍星系核位於其中。

(作者 / 坂本和，編譯 / 周美吟)

和虛擬ALMA天線拍張照！

想和虛擬 ALMA 天線拍張酷酷的照片嗎？請按照下面三個步驟：

1. 前往 AppStore 或 GooglePlay 下載 AReader，安裝到智慧型手機或平板等手持裝置上。
2. 在對外網路正常下，把手機或平板的相機對準右下角這張圖，App 會自動感應。
3. 稍等一下就會有虛擬的天線出現在螢幕上了。ARader 會詳細說明如何改變天線角度、大小，準備找大家來和虛擬天線一起照張團體照吧！按下快門的方式是：用手機的截圖功能！

更多有趣內容請參觀 ALMA 兒童版中文網站

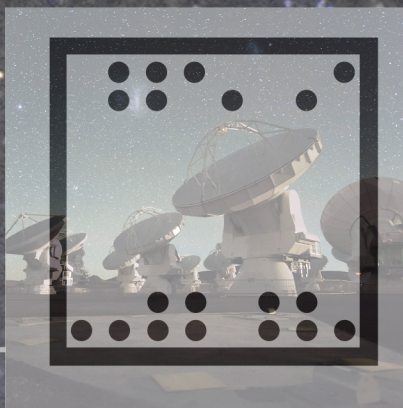
<http://kids.alma.cl/?lang=zh>

(來源/ALMA kids 網站，編譯/黃珞文)

註：右上圖之虛擬天線為手持裝置下的虛擬影像，本所無實體模型可供拍照。



圖說：本所工作人員與虛擬天線合影。© 中研院天文所



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、蔣龍毅

底圖版權聲明 | Under the Spell of the Magellanic Clouds ©ESO/C. Malin

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！