



座落於南美洲智利北部的阿塔卡瑪大型毫米及次毫米波陣列（簡稱ALMA）是史上規模最大、耗資最鉅的地面望遠鏡計畫。高原的稀薄空氣與沙漠的乾燥環境成就了一個絕佳的次毫米波觀測環境，搭配超高規格的軟硬體，這座甫於三年多前開始科學運作的望遠鏡已經捎來諸多令人驚奇的新訊息。預期在未來的幾年，這座具有極佳靈敏度與空間解析力的新世代望遠鏡將會為小至太陽系中的行星、衛星或彗星的形成與演化，大至宇宙的起源等重大天文課題帶來革命性的進展！

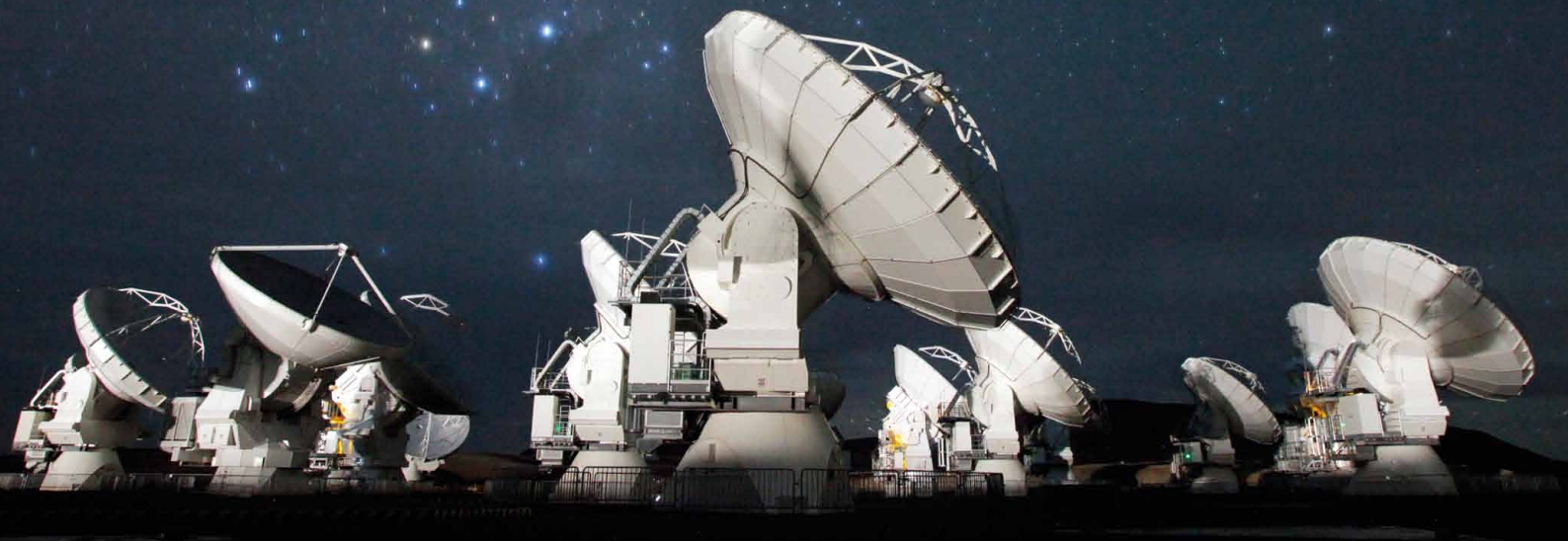
探尋宇宙的起源

阿塔卡瑪大型毫米波及次毫米波陣列

文/ 蘇裕農

ALMA

Atacama Large Millimeter/submillimeter Array



矗立於阿塔卡瑪沙漠高原上的ALMA（Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)）

ALMA 簡介

國際合作

「ALMA」國際合作計畫有三個主要合作夥伴，分別是北美團隊、歐洲團隊，以及東亞團隊。透過中央研究院與科技部的資助，臺灣經由東亞與北美加入ALMA的團隊，並由中央研究院天文及天文物理研究所擔任臺灣的執行機構。

ALMA規格

ALMA是由兩座陣列共66座天線所組成：「12米陣列」（12-m Array），又稱為主陣列，包含50座直徑12米的天線，由北美團隊（包括臺灣）以及歐洲團隊負責興建。

「Atacama 密集陣列」（Atacama Compact Array），包含4座12米及12座7米的天線，由東亞團隊（包括臺灣）負責興建。ALMA的觀測波是介於0.3毫米至9.6毫米的毫米波與次毫米波，總共分成十個頻段。最佳空間解析力可達0.005角秒，靈敏度則比現有的同波段望遠鏡好上100倍！

ALMA建置地點

大氣層中的水氣會吸收毫米跟次毫米波段的電磁波，因此，水氣可說是毫米與次毫米波觀測的最大敵人。為了減低水氣的干擾，毫米與次毫米望遠鏡總是建置在乾燥的地方。位處智利北部查南托沙漠高原的ALMA陣列運轉中心（AOS，也就是66座天線工作的地點），海拔達5000米，是絕佳的毫米與次毫米波觀測環境！後勤支援基地（OSF）海拔近3000米，距天線運轉中心只有一小時車程，提供陣列運轉一切必要的支援，天文學家也在此處操作望遠鏡，進行科學觀測。

陣列式望遠鏡

為了探索更遠更暗的星體，靈敏度更

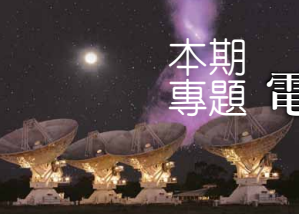
好、解析度更佳的大型望遠鏡是必要的憑藉。不論觀測的波段是可見光、紅外線、還是毫米波或次毫米波，通過大口徑望遠鏡的觀測總能發現更多微小細節，也比較容易看到遙遠黯淡的星體。這也是天文學家熱切追求建造大型望遠鏡的緣由。但望遠鏡的角解析度不僅與口徑有關（與口徑成反比；口徑越大，角解析度越小，視力越佳），也正比於觀測的波長。也就是說，直徑需達10公里的毫米波望遠鏡才能與10公尺級的光學望遠鏡有相同的視力，但建造一座10公里大的天線幾乎是不可能的任務！這時陣列式望遠鏡就派上用場了。毫米波或次毫米波陣列由眾多小型天線組成，其角解析度由最長基線（基線是天線與天線間的距離）來決定。ALMA的最長基線達15公里，視力比哈伯太空望遠鏡好上10倍，能辨別500公里外的一元硬幣。



後勤支援基地鳥瞰圖（Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO), Carlos Padilla, Acknowledgement: General Dynamics C4 Systems）



位於智利首都聖地牙哥的ALMA總部（Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)）



台灣的參與

硬體的建制與測試

東亞接收機前段整合測試中心：ALMA 觀測的頻段有十個，每個頻段均有對應的高性能接收機模組來接收處理天體發出的微弱訊號。中央研究院天文所與中山科學研究院航空研究所合作建立「東亞接收機前段整合測試中心」(EA FEIC)，其任務是組裝並測試來自美國、加拿大、日本、法國、荷蘭及英國所提供的接收機模組，使成為完整的接收機前段次系統。我們的接收機前段整合測試中心總共交付了分屬東亞、北美及歐洲團隊的26套前段次系統，是ALMA三個前段整合測試中心之最，可說是最有效率的接收機整合測試中心！前段次系統是ALMA的核心元件之一，也因為東亞接收機測試中心的高效率，ALMA才得以在2011年秋季開始先期科學觀測。

前段維護特種車：ALMA臺灣團隊負責主導兩輛名為「梅花」與「藍鵲」的「前段維護特種車」(Front End Service Vehicle；FESV)的製造。這兩輛已運抵智利服役的特種車，將可增進陣列運作的效能、減少陣列運轉的碳排量、並降低研究中斷的風險。



於臺中整合測試完成後剛運抵智利的接收機前段次系統
(Credit: Yu-Nung Su)

科學觀測

ALMA在2011年秋季正式開放學術使用，利用已經通過運轉測試的天線進行先期科學觀測。到目前為止，ALMA已三次公開向全球天文研究學者徵求觀測計畫書，共徵得近3,500份觀測計畫書。這些計畫書經審查委員會按計畫的科學價值加以評量，只有六百餘份通過嚴格的審查。在這一極高水平的競爭環境中，臺灣總共通過了四十餘份計畫書，表現亮眼！截至目前為止，已有數個觀測成果發表於國際知名期刊。



執勤中的「前段維護特種車」，這由台灣團隊主導製造的特種車可以增進陣列運作的效能並減低運轉的碳排量

(Credit: ALMA(ESO/NAOJ/NRAO), Carlos Padilla(NRAO/AUI/NSF))



天線的搬運移動是一件大工程，圖為運往AOS（ALMA陣列運轉中心）途中的12米天線 (Credit: Yu-Nung Su)

ALMA 正在兌現天文迷的夢想！

科學研究—冷宇宙研究的利器

毫米及次毫米波的望遠鏡是探索冷宇宙的利器！我們知道廣互星際的空間並非一片虛無，而是充填著各式各樣的星際介質。一般來說，原子態與分子態的星際介質跟恆星比起來要冷上許多，大抵只有 10 – 100 K，因此可見光望遠鏡是看不到它們的，必須借助毫米及次毫米波望遠鏡。這些低溫的星際介質與恆星的生老病死以及宇宙的起源有很大的關係！ALMA的觀測波段介於0.3毫米與9.6毫米之間，特別適合探測太空的低溫物質。藉由ALMA這座具極佳靈敏度與空間解析度的望遠鏡，小至太陽系中的行星、衛星、彗星，本銀河系的恆星形成，大至星系及宇宙起源等重要天文課題，預期都將有突破性的進展。ALMA主要的科學目標有三：

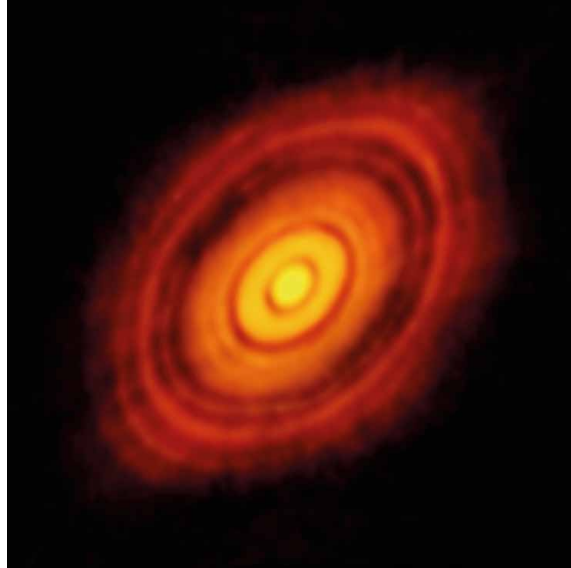
宇宙的起源：宇宙之初的遙遠星系在可見光波段非常黯淡！ALMA能偵測到宇宙在其年齡僅僅目前十分之一時的星系，幫助我們了解宇宙誕生之初的演化。

恆星與行星的起源：在可見光波段，由於塵埃的阻絕，我們無法直視深埋於星際雲氣中的初生恆星與行星。但在次毫米波段，我們的視界可直達星際雲氣的最深處。高解析度和高靈敏度的ALMA可以讓我們直接看到正在形成中的恆星與行星。

高品質的影像：在高靈敏度的加持下，ALMA提供的高解析力影像將為天文學家揭開眾多天文之謎。

『行星搖籃』的細微面貌

位於金牛座的 HL Tau 是一顆年紀約莫只有一百萬年的初生恆星，距離我們只有450光年之遙，是探索恆星與行星形成的理想目標。日前，ALMA以長基線模式觀測取得的HL Tau 超高解析度影像，讓我們得以窺見行星是如何在類太陽恆



ALMA最新取得之年輕恆星HL Tau周遭的影像。這張空間解析度達5AU的影像，讓我們看見許多前所未見的『行星搖籃』細節，挑戰了先前理論的認知！ALMA 臺灣團隊計畫主持人賀曾樸院士說：「這張圖像已充分詮釋了我們為什麼要建造ALMA望遠鏡，它讓我們得以窺見行星是如何在像太陽一樣的恆星周圍形成。」
(Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO))

星的周圍形成。透過精細約太陽到地球五倍距離(5AU)的解析度，ALMA的影像清晰地展現恆星盤上微粒塵埃的分布，並清楚的呈現出許多前所未見的『行星搖籃』細節！這種解析度只有ALMA的長基線模式能達成，其他天文儀器即便是哈伯太空望遠鏡，都無法提供如此詳盡的新資訊。

類似像HL Tau這樣的年輕恆星，誕生於重力塌縮的氣體和微粒塵埃雲中。隨著形成過程的進展，剩下的塵埃會黏在一起，變成砂粒、小石頭甚至更大的岩石，落在一層薄薄的盤面上。這些冰凍的石塊會在盤中聚集形成小行星、彗星甚至行星。但是一旦它們的質量夠大，這些年輕行星將會在盤面造成環、缺口和破洞。這個ALMA影像提供了目前最清楚的證據，證明這個過程不只發生了，而且發生時間比之前預期得更快更早。

在過去30年間，我們對行星形成的了解大部分來自於理論。如此等級的精緻影像都靠藝術插畫家想像或電腦模擬來傳達。如今藉由ALMA，我們已可以直接觀測到這類細節。HL Tau的高解析度影像顯示出ALMA長基線模式能達到的水準，以及未來觀測時能提供哪些全新的方向來探索宇宙。

蘇裕農：中央研究院天文及天文物理研究所
特殊性約聘技術人員