

# 次毫米波電波天文學與 SMA

文/呂聖元

在歷經多年的興建、測試與調整，由位於美國麻省劍橋的史密松天文台（Smithsonian Astrophysical Observatory，簡稱 SAO）與臺灣的中央研究院天文及天文物理研究所籌備處（Academia Sinica Institute of Astronomy & Astrophysics, ASIAA）共同合作建造之次毫米波陣列（Submillimeter Array，簡稱 SMA），終於在 2003 年 11 月完工並正式啟用。相較於其他天文台，這組全世界首座並是目前唯一在次毫米波段觀測的望遠鏡陣列，究竟具備了哪些獨特的性能，其所能研究的天文課題又包含哪些，筆者榮幸能利用此文略加彙整與介紹。

## 次毫米波與望遠鏡陣列

次毫米波，顧名思義，是針對波長略小於毫米（millimeter）的電磁波而言。相對於眾人略為熟悉之波長較長的無線電波段，或是較短的光學波段，次毫米波段無疑是天文學中相對發展較晚的領域。在先天的條件上，由於地球本身大氣中所含之水氣（ $H_2O$ ）與氧氣（ $O_2$ ），其許多的分子譜線皆落在此一波段，這些分子譜線的輻射與對外來輻射造成的吸收，使得次毫米波段的觀測受到相當限制。在後天的儀器開發上，製造次毫米波段所對應到的高頻段低雜訊之接收機，以及表面精確度（或是說光滑平整度）足夠之鏡面的技術，也是近一二十年才逐漸成熟。正因為這些限制，此一領域的發展，在技術上更具挑戰性，在科學上也更具開創性。

當然，自 1980 年間便已逐漸有次毫米波望遠鏡的興建，其中包括了如美國加州理工學院的次毫米波天文台（Caltech Submillimeter Observatory），由英國、加拿大與荷蘭共同運轉的詹姆斯 - 克拉克 - 馬克思威爾望遠鏡（James Clark Maxwell Telescope），美國亞利桑那州立大學主導的亨利

希·赫茲望遠鏡（Heinrich Hertz Telescope）以及瑞典與歐洲南天天文台次毫米波望遠鏡（Swedish-



圖一、位於毛納基峰頂之次毫米波望遠鏡陣列。

【照片由 Julia Bauman 小姐提供】

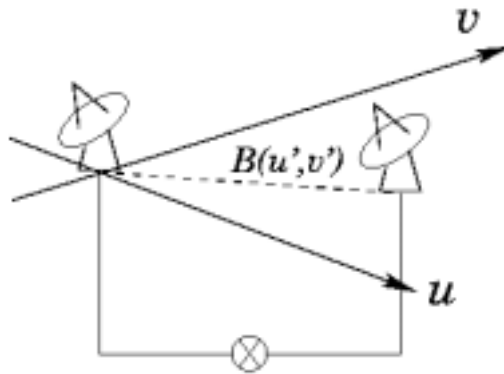
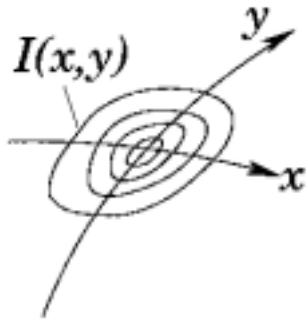
ESO Submillimetre Telescope）等。然而上述這些單天線望遠鏡的大小，大約都在 10 至 15 米左右，所能達到的空間解析度，或說是空間分辨率有限，大約是 10 至 20 秒弧（arcsecond）。為了取得更好的解析度，以便了解觀測天體的細微結構，自然需要直徑更大的鏡面。然而，建造愈大的鏡面，所耗費的成本幾乎與鏡面直徑大小呈級數成長！為了解決此一困境，干涉儀式望遠鏡陣列便因應而生。正如同美國國家無線電天文台（NRAO）為無線電波段所建造的極大陣列望遠鏡（Very Large Array）一般，將個別的小天線分布於一廣大的基地。望遠鏡陣列中，兩兩所組成的配對稱為基線（baseline）。當我們兩兩交叉連結這些分散望遠鏡的訊號，根據干涉的原理，望遠鏡陣列其能達成的空間解析度，便幾乎等同於一座鏡面直徑相當於最長基線之單天線望遠鏡！基線的總數目對望遠鏡陣列進行天文觀測亦有關鍵性的影響。根本上，不同的基線乃偵測天體在不同空間頻率的分布強度，也就是所觀測之天體強度分布的傅利葉轉換

(Fourier Transform)。如圖二及以下公式所示，取得的資料，則可經由反轉傅利葉轉換而成像。

$$V(u, v) = \int I(x, y) e^{i2\pi(ux+vy)} dx dy$$

$$I(x, y) = \int V(u, v) e^{-i2\pi(ux+vy)} du dv$$

由於天線的數量與分布有限，我們並無法測量到所有的  $V(u, v)$ ，而能測量的  $V(u, v)$  越多，所得到的  $I(x, y)$  就越可靠。由此可見，對空間頻率強度的取樣完整性，控制了最後影像的品質。望遠鏡陣列中基線的總數目（或根本上依賴於天線的總數）便直接影響到成像的速度。



$$V(u', v') = \int I(x, y) e^{i2\pi(u'x+v'y)} dx dy$$

圖二) 望遠鏡陣列中兩兩天線所組成的配對形成一條基線 (baseline)。當進行天體觀測時，兩天線之間的位置向量在垂直於天體方向上之投影 (或分量)，為所謂的投影基線 (projected baseline)，如圖中之  $B(u, v)$ 。兩天線訊號相關干涉後得到的資料  $V(u, v)$  【在理想近似下】即為天體強度分布  $I(x, y)$  在空間頻率上的傅利葉轉換。透過地球自轉而產生之天體於天空的繞行，一對天線配對之基線所形成的投影基線也會隨之改變，我們因此得以測量不同的空間頻率下，此傅立葉轉換之值。然而，由於基線的數量及分布位置有限，我們無法測量得所有  $(u, v)$  上之  $V(u, v)$ 。

### SMA 的建立

為朝著上述的方向發展，SMA 的計劃概念乃於 1984 年由 SAO 的天文學者提出。陣列實際的研發與設計工作起始於 1989 年。經過一系列的規畫與評估，SAO 於 1991 年決定發展 SMA 陣列望遠鏡，負責陣列的組裝與建造工作。天文台址則選擇位於夏威夷群島中大島 (Island of Hawaii) 上的毛納基 (Mauna Kea)。由於地理位置的關係，毛納基峰頂上的大氣穩定乾燥，晴天率為世界上數一數二，因此毛納基峰頂是全球上進行天文觀測最佳的場所之一。特別是其高海拔與乾燥的大氣，大大減少了由於水氣所造成的吸收與背景雜訊，極有利於次毫米波段的觀測，這也就是為何部份前述的天文台如 CSO, JCMT 皆位於此同一峰頂的原因。史密松天文台所設計的 SMA，為六座直徑 6 米的天線所組成。操作頻段為 230GHz, 345GHz, 690GHz 與 805GHz，即大約涵蓋 1.7 毫米至 0.3 毫米的波段。望遠鏡陣列的基地，則包括廣達 500 公尺的基線，因此可達到的最佳空間解析度為 0.1 秒弧！1996 年 6 月，中央研究院李遠哲院長與美國的史密松機構簽署合約書，同意由臺灣興建兩座望遠鏡，將原本的六座天線增加為八座天線。2000 年 12 月，第一座由天文所製造的天線於國內完成基礎測試，運抵大島毛納基山峰。次年 6 月，第二座天線亦製造完成並通過基礎測試，運抵大島毛納基山峰。2002 年底二座天線在基地完成組裝。台灣兩座天線的加入，雖然僅對陣列內的望遠鏡數目增加 1.3 倍強，但其貢獻不僅是增加陣列對天體次毫米波訊號的總接收面積，更讓原本由六座天線所形成的十五條基線，增加為八座天線所形成的二十八條基線，基線數增加近兩倍，大大提高觀測的效率與所取得天文影像的品質。

### SMA 的研究課題

SMA 並非為專一研究課題所設計與建造，乃屬於通用型的望遠鏡，因此能利用其研究的領域也就自然非常廣泛；從太陽系內鄰近我們的行星，銀河系內各種天體，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，都在 SMA 研究的範疇之內。從黑體輻射的角度來看，次毫米波段所對應到的溫度約在絕對溫度 10 度左右，這正是宇宙中絕大部份氣體與塵埃所處的溫度。因此，次毫米波的觀測對此類物質自然能作最有效的探索。而次毫米波段，也對應到

眾多分子的轉動或震動譜線帶。特別是相對於毫米波而言，次毫米波段涵蓋的是分子轉動譜線較高能階的躍遷，除了在比較特殊的狀況外，唯有較高的密度與溫度才能激發分子至較高的能態，也才能產生這些譜線的放射或吸收現象。因此，SMA 對宇宙中星際雲氣內緻密而溫暖的區域，能提供最佳的訊息。

#### 宇宙學 (Cosmology) 與星系 (Galaxies) :

宇宙學是近來極為熱門的領域，其中一個重要關鍵問題，便是對大尺度結構與星系形成的了解。目前天文學家普遍相信，星系及星系團等結構的形成，根源於紅移 (red-shift)  $z$  相當 1000 左右時，潛藏於宇宙背景輻射中的微小擾動與極小尺度的不等向性。觀測越早期在形成中的星系，對星系形成的過程也就能了解越多。近年來一項重大的進展，是由 JCMT 之次毫米波輻射相機 (Submillimeter Common-User Bolometer Array, SCUBA) 率先觀測得到之結果。SCUBA 的資料顯示，以往所認為的次毫米波背景訊號，實際上絕大部份是由一個個單一之遙遠而位處於宇宙早期的星系，即所謂“次毫米波星系 (submillimeter galaxies)”所構成。這些星系含有大量的氣體與塵埃，其本身之可見光、紫外光波段的輻射絕大部份均被自身所吸收。反之，由這些豐富氣體與塵埃所放出的遠紅外光 (Far Infrared) 輻射，則透過紅移的作用，而被現今的我們在次毫米波段所觀測到。然而如同先前所述，單天線望遠鏡的空間解析度畢竟有限，所觀測的此類星系之位置，可能對應到數個其他如光學或無線電波段偵測到的星系。唯有利用 SMA 取得之高解析度的連續譜影像，才能為這些次毫米波星系提供更好的定位，從而確認它們所對應到星系。接著藉由整合與分析同一星系多波段觀測的資料，其中甚至包含 SMA 或可觀測到之高紅移的 (CO) 分子譜線，以推得這些早期星系的特性，了解星系在宇宙早期的演化過程。

活躍星系核 (active galactic nuclei) 與超重質量黑洞 (super massive black hole) 如何吸積氣體，星系間的交互作用與吞併時對星系的演化有何影響，以及由大量恆星於短時間內形成所構成的星爆 (starburst) 又是如何被引發，這等等現象也都是 SMA 最佳的研究範疇。無論是上述哪一種現象，都伴隨著緻密的分子雲氣，而這些現象本身在光學波段的

輻射，再次受到星際塵埃的遮蔽以致無法被直接觀測。其中之分子雲氣則因為這些現象激烈的活動受到加熱與激發，甚至有分子噴流的產生。位於次毫米波段之塵埃的連續輻射與分子的譜線，可以直接探索上述現象深層內部的結構與狀態。

#### 分子雲 (Molecular Clouds) 與恆星形成 (Star Formation) ;

恆星形成一直都是現代天文物理學的中心課題，也可說是 SMA 觀測的首要研究方向。由於恆星與原恆星乃孕育於星際間的分子雲內，在可見光波段受到數千百倍的消光作用 (extinction)，因此恆星形成的過程長久以來仍未能被詳細地了解。毫米與次毫米波段的觀測與研究能夠直接偵測分子雲氣及星際塵埃，進而提供了解原恆星系統形成的重要物理與化學參數。次毫米波因此可說是觀測分子雲內部恆星形成的最佳利器。

不論是對於近似太陽的低質量原恆星系統 (low mass protostars)，或是高於8-10倍太陽質量的重質量原恆星系統 (high mass protostars)，其中分子雲坍縮的確切動力結構，或是決定最後恆星質量之氣體的吸積與噴流之存在與驅動的機制，天文學家至今仍無正確的了解。特別是這些質量吸積及噴流的形成等作用都位於極為接近原恆星的小尺度範圍之內，也都與高密度或高溫的分子氣體有關。因此藉著次毫米波以高空間解析度及頻譜解析度的分子譜線觀測才能清楚分辨這些時常相伴發生的現象之氣體組態與運動結構，從而了解其中運作的機制。

在現今理論中，磁場對於形成恆星之分子雲氣的支撐與分裂有極重要的影響；在觀測上的證據卻仍然極為缺乏。我們了解塵埃之連續輻射與分子之譜線，皆會因為磁場的存在而產生偏極的現象。若能觀測兩互相垂直偏極方向之輻射，即能掌握輻射偏極化的完整資訊，藉此推導出分子雲中磁場的分佈與強度。然而要能精準測量微小偏極化的輻射，需要極好的訊噪比，是相當困難的實驗。根據星際塵埃連續輻射之強度與其頻率成3至4次方的關係，在次毫米段的訊號強度相較於毫米波段自然使得觀測能較精準有效。

#### 環星盤 (Circumstellar Disks) 與天文化學 (Astrochemistry) :

我們了解近似太陽恆星形成過程中的環星盤，極有可能進一步演化成如太陽系的行星系統，亦透過都普勒譜線位移效應於上百個恆星系統中間接探知太陽系外行星的存在，然而直接觀測的證據卻仍然缺乏。利用 SMA，我們能對位於銀河中較接近我們的年輕恆星系統，進行高解析度的觀測，來嘗試了解原恆星周圍的環星盤內氣體與塵埃是如何地分布運動並演化為原行星系統 (protoplanetary system)。對外太陽行星系統形成的過程與時間尺度的了解，將令我們對太陽系本身的形成有更深的認識。

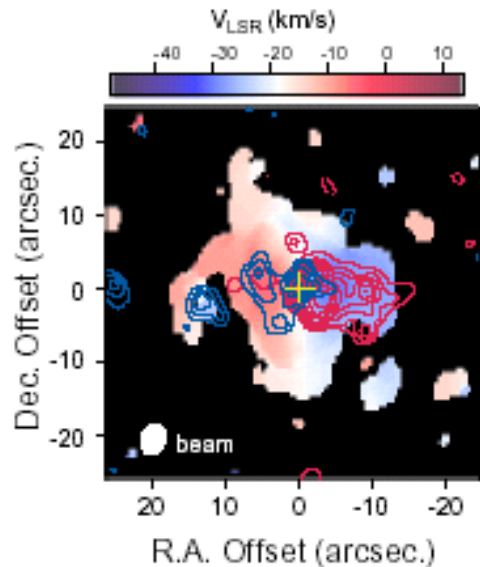
SMA 所能同時提供的 2GHz 廣頻寬與 0.2MHz 高頻譜解析度，是目前其他毫米與次毫米波天文台所望其項背的。這使得我們得以對數種或甚至數十種化學分子同時進行其譜線觀測，特別是針對重質量恆星形成之分子雲核心區域中，或是輕質量恆星之環星盤，原行星盤中 (protoplanetary disks) 其緻密氣體的化學成份、分布與演化有更多的了解，甚至進而發掘新的分子的存在。此類化學的研究，讓我們得以判斷出氣體與塵埃表面的相互作用所產生的化學複雜度以及生命必備元素的主要儲藏所。對於宇宙中抑或是地球上生命的起源及分布，或可能提供極重要的線索。

環星包 (Circumstellar Envelopes) 與後主序星之演化 (Evolved Stars) :

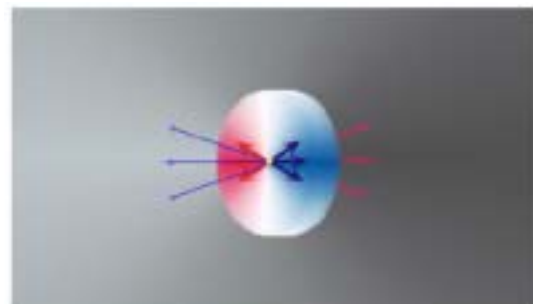
中質量恆星演化的後期首先進入所謂紅巨星 (Red Giant) 的階段，此時大量的氣體散失於星際空間中，形成環星包。當含有大量恆星內部核融合反應所製造之重元素 (碳、氮，氧，磷，硫，矽等) 的氣體向外移動時，溫度同時逐漸降低，氣體中之原子與離子逐漸於其中結合而成分子與塵埃。利用 SMA 的成像，我們能觀測氣體散失過程中分子與塵埃的分布，了解分子塵埃形成的物理及化學機制，這對整個分子雲中各種重分子豐度如何的變化息息相關。

繼紅巨星階段後，恆星進入近巨星分支 (Asymptotic Giant Branch, AGB) 階段，持續其氣體的快速散失，並隨之變成為 (原) 行星狀星雲 ([proto]-planetary nebula)。球形對稱的恆星，究竟如何演化出終極結構多采多姿的行星狀星雲，此間由 AGB 至 PPN 階段之快速轉變必定有決定性的影響。一般相信在 AGB 階段的末期，恆星風的表現產生

的巨大的改變，甚至產生雙極 (bipolar) 或多極 (multi-polar) 之包含一氧化碳 (CO) 的分子噴流結構；人們對這些噴流的成因卻仍未能了解。如同研究恆星形成的情形，SMA 能對這些緻密高溫的分子噴流能做廣泛的觀測，以分析分子噴流中密度、溫度等分布結構，進一步推算它們被驅動的原因。



(A)



(B)

圖三 A 由 SMA 所觀測之 V Hya。距離地球約 1200 光年之 V Hya 為於 AGB 階段之後主序星。從 SMA 所對其一氧化碳分子放射譜線之觀測成像可看出低速運動的 CO 分子主要呈現一南北方向狹長的分布。藍色與紅色之等高線圖則分別代表著以東西向分布，相對我們以高速接近或遠離運動的分子。

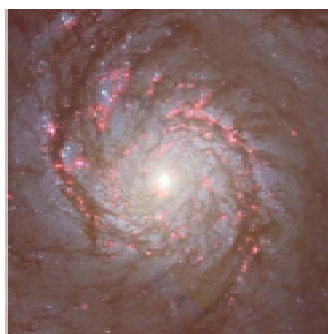
圖三 B 簡單圖示所觀測之 V Hya 氣體的運動形態：南北狹長的低速運動氣體，乃是由側面所見之一個慢速擴張的環星盤。近似柱狀的氣體噴流，則由東西方向高速噴出。

【圖三由中央研究院天文所科學家平野上美 (Naomi Hirano) 博士提供】

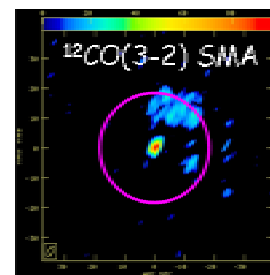
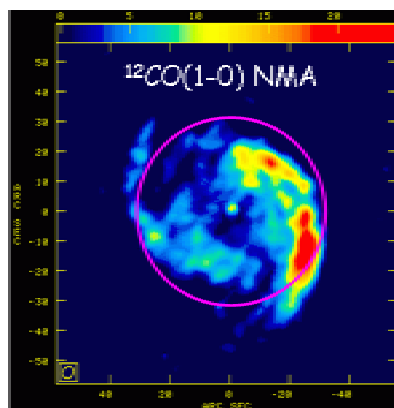
## 太陽系 (Solar System) :

對太陽系內行星或其衛星系統之組成與變化的研究，是了解太陽系形成及演化的根本。特別是如土星的衛星泰坦 (Titan)，似乎蘊含了與地球相近的氮氣與大量的有機分子，並有表層海洋的存在；或許其環境與地球形成之初的狀態有相當大的相似之處，甚至有可能培育生命的種子。泰坦的研究對地球本身的演化自然極具價值。由於這些行星或衛星之大氣組成，好比CO或HCN，在次毫米波段皆有重要的轉動譜線，也因此次毫米波觀測在行星大氣的研究上可提供相當的貢獻。透過SMA，火星上的CO，與泰坦上的CO, HCN, HC<sub>3</sub>N都已成功的被觀測。這些大氣的溫度分布與成份比例隨高度的變化，可以藉由對分子譜線強度與寬度的模型計算中推測。大氣成份中的同位素比例，也可以透過不同同位素原子所合成的分子其譜線之相對強弱來訂定。這些由地球進行的遠端觀測，將與太空探測任務的實地測量相輔相成。

從目前的線索看，來來往的彗星，普遍被認為可能蘊含太陽系形成時之初始物質。過去毫米與次毫米波段的觀測，便已在彗星中偵測到20多種如可見光等波段無法觀測的分子，而這些成份中，有許多是複雜的有機分子，好比甲酸 (HCOOH) 與甲酸甲酯 (HCOOCH<sub>3</sub>)。這些彗星是否為早期地球帶來大量的有機物，並進一步成為孕育生命的泉源呢？這仍有待未來多方的研究。然而目前藉由SMA的觀測，我們將能更了解彗星的組成成分，以及這些分子在彗星之彗髮 (coma) 的分布、其物理狀態及甚至隨彗核 (nucleus) 旋轉的時間變化。SMA今年稍早即對歷經接近的彗星 Comet Linear T7 與 Comet Neat Q4 進行觀測，其成果讓人拭目以待。總括而言，結合天文所參與的中美掩星計畫 (Taiwan-America Occultation-Survey)，對彗星與小行星這類太陽系外緣原始物質的探索，將可披露太陽系形成之初及其演化過程的奧秘。



HST Hubble Heritage



圖四左) 由哈柏太空望遠鏡所拍攝之渦漩星系 M51 (the Whirlpool Galaxy, M51)。M51 距離地球約兩千七百萬光年之遠，其中心存在一活躍星核。照片中明亮的部分乃是由星光所造成，而明顯的渦漩狀黑暗帶，則是氣體與塵埃分布的位置。在氣體旋臂中，由於可見光波段的星光被其吸收，因而顯得黑暗。

圖四中) 由日本野邊山毫米望遠鏡陣列 (Nobeyama Millimeter Array, NMA) 所觀測，一氧化碳分子轉動譜線 (J=1-0) 在 M51 內之輻射強度分布圖。我們可看出其強度的分布，正顯示出渦漩狀的氣體旋臂的氣體含量。

圖四右) 由 SMA 所觀測，一氧化碳分子轉動譜線 (J=3-2) 在同樣星系 M51 內之輻射強度分布圖。如文內所述，分子轉動譜線 J=3-2 相較於 J=1-0 需要較高的氣體溫度才足以激發並放出輻射。與圖三 A 相比，可以明顯看出在此星系中心有較強的一氧化碳 J=3-2 分子譜線輻射，代表了星系中心有著較高溫氣體的存在。這些高溫的氣體應是與此星系中心之活躍星核有關。

【圖四由中央研究院天文所博士後研究員松下聰樹 (Satoki Matsushita) 博士提供】

## 展望

對於上述許多的課題的研究，在 SMA 初期測試運轉的階段便已經得到相當的成果，這些結果近期也將

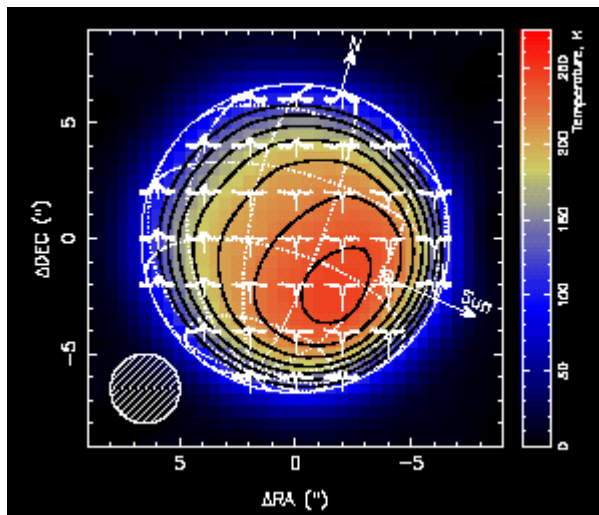
在天文物理期刊通訊 (Astrophysical Journal Letter) 中專刊發表。事實上，SMA 雖然已經開始運轉，多項儀器的安裝仍在持續的進行。這其中包括了所有頻段兩個接收機的安裝，以提供所有波段及其輻

射偏極化的完整資訊；雙波段同時觀測的發展，以增加望遠鏡的使用效率及高頻觀測的可靠度；與 JCMT 及 CSO 連線的準備，讓系統的訊號接收面積增加數倍之多。這一系列的升級，將使 SMA 的功能得以發揮到極致。

展望次毫米波段觀測儀器的發展，便不得不提到將建址於智利 Llona de Chajnantor 5000 公尺高原的 Atacama Large Millimeter Array (ALMA)。此一由歐、美、日為首的大型跨國合作計畫將興建六十四座直徑十二米，十二座直徑七米及四座直徑十二米的天線，座落於基線可達十公里長的基地上，以觀測自 1cm 之微波波段至 0.3mm 之次毫米波段的天體訊號。完成之後的 ALMA 將具備更佳的廣頻寬、高靈敏度、以及高解析度特性。就靈敏度為例，它將是現今毫米及次毫米波段望遠鏡中最佳者的百倍；而其 10 毫秒弧的解析度，不但超越其他波段之望遠鏡，如極大陣列望遠鏡 (VLA) 與哈柏太空望遠鏡 (HST) 達十倍之多，更亦是現今同等波段望遠鏡所能達到的數十至百倍。ALMA 龐大數量的基線，也會使其成為全球在毫米及次毫米波段天體觀測成像能力最強大的電波望遠鏡。目前 ALMA 的設計與建造已在如火如荼的進行，相關的前導計畫，包括了日本的 ASTE (Atacama Submillimeter Telescope) 與以德國為首的 APEX (Atacama Pathfinder Experiment) 兩座單天線次毫米波望遠鏡，都已座落於智利的基地從事早期的測試工作與特別是針對南天的科學觀測研究。在可預見的未來，次毫米波天文學將更蓬勃發展。

回顧中研院天文所參與 SMA 的建造，不僅僅有所內微波混頻元件及接收機等實驗室同仁的戮力付出，亦有許多機構與大學院校的共同參與，像是負責天線主反射鏡與本體的中山科學院航空研究所與中國造船股份有限公司基隆總廠，製造主反射鏡支架的耐特股份有限公司，以及接收機組建的南州精密工業有限公司。此外，史密松天文台的遠端協助，日本野邊山天文台及大陸紫金山天文台的共同研發，不僅僅提升國內的技術水準，也代表日漸頻繁之國際合作的成功。SMA 計畫的完成，象徵中研院天文所已發展出高水準的科技團隊，同時關鍵的是為臺灣累積參與未來參與

相關技術發展與科學研究所需的重要實力。筆者寄望未來國內天文界的學者能共同參與 SMA 此一全世界首座次毫米波望遠鏡陣列之運轉與操作，善用 SMA 所提供的觀測時間，在廣大待開發的次毫米領域探索未知的宇宙。



圖五) 由SMA於2003年11月12日首次以八座天線所觀測之結果成像。圖中顯示火星之表層1.3毫米之熱輻射以及火星大氣內一氧化碳(J=2-1)之吸收譜線。觀測時火星之視直徑約為13.3秒弧，觀測的空間解析度則約為3秒弧。如文中所討論，火星大氣中一氧化碳的垂直(高度)分布與溫度變化可由此吸收譜線之線寬結合理論模型推算而得。【圖五由美國史密松天文台 Mark Gurwell 博士提供】

#### 作者簡介

呂聖元

美國伊利諾州立大學天文研究所博士(1999)。  
現任中央研究院天文及天文物理研究所助研究員。  
主要研究方向為恆星形成及天文化學。

E-mail: [syliu@asiaa.sinica.edu.tw](mailto:syliu@asiaa.sinica.edu.tw)