

# 李遠哲微波背景輻射陣列

## Yuan-Tseh Lee Array for Microwave Background Anisotropy

陳明堂

Chen Ming-Tang

李遠哲微波背景輻射陣列 (Yuan-Tseh Lee Array for Microwave Background Anisotropy, AMiBA) 為一座陣列式電波望遠鏡，目前由七具 0.6 米直徑的微波天線接收機組成。陣列分布於一面約六米寬的複材平台上，由一具獨特的大型六軸基座負責觀測運作。每具天線是極靈敏的雙極相接收機，其接收頻段為 86 GHz 至 102 GHz，中頻訊號為 2 GHz 至 18 GHz，並採用類比式的相關器，瞬間處理 16 GHz 的寬頻訊號，以達到最大的訊號偵測靈敏度。此望遠鏡座落於美國夏威夷大島海拔 3400 公尺的 Mauna Loa 的緩坡上。此座儀器於 2006 年 10 月正式啟用，並以中央研究院前院長李遠哲命名，以彰顯他對推動台灣天文發展的卓越貢獻。2008 年中 AMiBA 已完成初期科學目標的觀測，目前正進行擴展至 13 座天線的工程，這次升級工程會將天線鏡面直徑由 0.6 米換為 1.2 米。

The Yuan-Tseh Lee Array for Microwave Background Anisotropy (AMiBA, hereafter) is an array-type radio telescope. It is consisted of 7-element, 60 cm diameter, millimeter-wave antenna-receivers. The Array is mounted on a 6 meter platform made of reinforced carbon fiber, and supported by a unique hexapod mount. Every antenna is a very sensitive, dual-polarization receiver. It detects RF signal of 86–102 GHz, and of IF frequency 2–18 GHz. To achieve better sensitivity, the Array is using analog correlator, which simultaneously processes a bandwidth of 16 GHz. AMiBA is located on the slow slope of Mauna Loa, Hawaii, USA, with an altitude 3,400 meters. The Array has been dedicated on Oct, 2006 and renamed as the Yuan-Tseh Lee Array for Microwave Background Anisotropy, to appreciate the long-term support in Taiwanese astronomy development from Dr. Lee. By 2008, AMiBA has finished its initial science observations and progressed into the expansion phase to expand the Array from 7 to 13 elements with 1.2-meter dishes.

### 一、前言

宇宙學 (cosmology) 是天文物理學的一個分支，它是藉由觀測與理論的交互驗證來研究宇宙形成、演化等大尺度結構的學科。但是也由於研究的

目標尺度太大，加上我們正位於被研究的目標之中，所以宇宙學的發展往往比較著重於理論與模擬，而受制於有限的觀測資源。美國的太空總署在 1989 年發射了一顆宇宙科學探測衛星－COBE (Cosmic Background Explorer)，這顆衛星所產生的

觀測資料，促使近代宇宙學的研究，從計算與模擬轉變成一個可經由精密觀測來驗證的科學。COBE 的觀測成果對宇宙學的發展具有革命性的影響，同時掀起一股觀測與實驗熱潮，鼓舞天文學家著手發展與建造新一代的宇宙觀測望遠鏡，這股科學熱潮也影響到我國國內的天文發展。

在 2000 年春天中央研究院天文及天文物理研究所籌備處 (以下簡稱天文所) 主任魯國鏞院士所主持的計畫「宇宙背景輻射陣列」(註 1) 正式啟動<sup>(1,2)</sup>，該計畫的英文名稱為「Array for Microwave Background Anisotropy」，它有一個有趣的英文縮寫—「AMiBA」。大致上來講，我們將要蓋一座儀器來研究宇宙大約剛形成時的現象，AMiBA 的簡稱就跟生物學中研究簡單的原生動物一般地貼切。

天文物理是一門著重觀測與數據的科學，新的發現與立論總是伴隨著新一代的觀測儀器而產生。AMiBA 計畫的目標，就是要在眾多國際競爭對手手中蓋一座具有獨特觀測能力的電波望遠鏡，來研究宇宙背景輻射。因為研究的目標非常特殊，世界上沒有既成的儀器，所以我們必須自行設計、研發所需的儀器與系統，這不是一件容易達成的目標，特別這是第一個由天文所主導的大型實作計畫。

為了克服這項需求，我們組成一個跨系所、跨國際的研發團隊，其中成員來自各個不同單位，有國立台灣大學電機系和物理系、中山科學研究院航空研究所、澳洲國家天文台 (Australian Telescope National Facility)、美國國家電波天文台 (National Radio Astronomy Observatory)、加拿大多倫多大學 (Toronto University)、美國卡內基美侖大學 (Carnegie Mellon University)、英國 Bristol 大學等。而成員的國籍更包括日、澳、美、法、瑞士、墨西哥與智利等不同國家，參與這項計畫的合作廠商也是遍及全球，包括美、日、澳、德、法與波蘭等。

電波天文觀測經常受限於天候，主要影響因素來自大氣中水汽的干擾，以及大氣分子對電波訊號的吸收。大型天文望遠鏡總是設址於政治穩定區域中、遠離文明都市 (光害)，並具備基本研究設施 (道路、水、電、網路) 的乾燥高山、高原 (避開水汽)。考慮這些條件，東亞地區並無適當地點可作為大型的天文投資。反而位於太平洋中間的夏威夷島，提供幾近完美的地點，所以我們選擇夏威夷大

島的 Mauna Loa 火山當成 AMiBA 的台址，AMiBA 位於標高 3400 公尺的 Mauna Loa 天文台 (MLO) 區域內。

AMiBA 儀器的開發與製造，所必須具備的知識與先進技術涵蓋不同領域與專業。由於篇幅所限，以下的章節僅就 AMiBA 各部子系統作一簡述，希望由此能夠提供讀者一個關於 AMiBA 整體的概略瞭解。本文將對宇宙論作一非常簡略的敘述，對於儀器和一般天文字宙論<sup>(3)</sup> 進一步的延伸閱讀可參考文後所列之參考文獻。

## 二、AMiBA 觀測與宇宙學

AMiBA 望遠鏡 (圖 1) 是設計來觀測充斥於整個宇宙空間古老的微波訊號。這些自然界的電磁波與常用的微波爐或行動電話的訊號有著相似的波

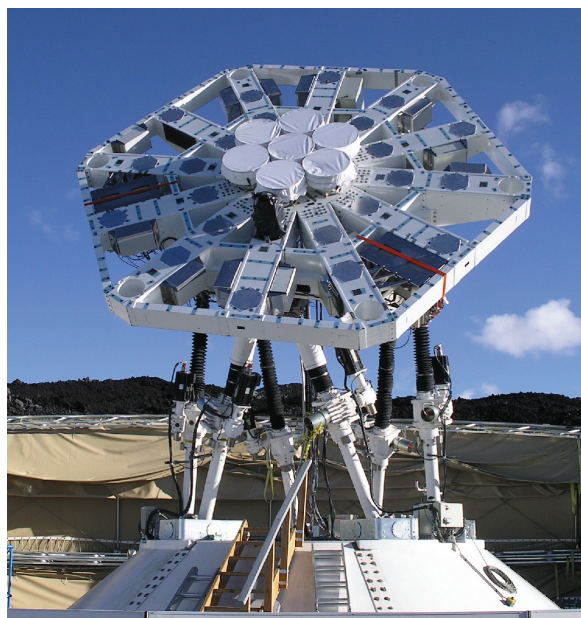


圖 1. 位於夏威夷 Mauna Loa Observatory 的李遠哲宇宙背景輻射陣列，攝於 2006 年 9 月。7 具口徑 60 公分的微波接收機天線已安裝至約六公尺寬的史都華六軸平台上 (Steward platform)。平台由碳纖維材料製成，其上裝置了望遠鏡的各種重要元件。2008 年底陣列天線數目將增加至 13 具，而且天線口徑將從目前的 60 公分增加至 1.2 米。屆時成像的速度與望遠鏡的靈敏度都將大幅提昇。

長，只是它的強度非常非常地弱。另一說法是，它的能量強度只相當於大約 2.7 K (絕對溫度) 的熱輻射能，所以宇宙是一個非常冷的地方，但也因為目前的宇宙已經是一個非常大的空間，這些微波訊號能量的總和卻是一個巨大數目。設想時間早於現在幾億年，當時的宇宙還沒有膨脹至現在的大小，由於能量守恆，所以宇宙的溫度就比現在高。時間再往前溯至 137 億年前，宇宙大約比現在小 1000 倍，溫度大約 3000 K 左右，AMiBA 就是要偵測這些從 137 億年前存在至今的光子。由於這些光子幾乎不再與宇宙中已知的物質產生任何作用，量測這些訊號就是量測宇宙在 137 億年前的情境，因為這一獨特的低溫訊號起源自我們可觀測到宇宙的最遠角落，比任何可觀測到的星體還遠，因此被稱為宇宙背景輻射 (Cosmic Microwave Background Radiation, CMBR)，也因此背景微波輻射提供了一個驗證宇宙學非常獨特的工具與現象。

從地球觀測任何方向，CMBR 所呈現的是一個幾近完美的 2.7 K 黑體輻射 (blackbody radiation) 頻譜，我們的目標是要量測 CMBR 在幾近完美下的缺陷，AMiBA 要偵測不同方向的 CMBR，量測其微波訊號強度隨著不同方向的差異。AMiBA 將會量測這些訊號的偏極化，同時也將針對這些訊號予以成像，這些方向差異是非常微弱的。隨著角度的不同，它的細節變化量也會不同，但是其數量級大約是  $10^{-6}$  K 左右。這些乍看有如無序的隨機變化，實際卻暗藏豐富的結構資訊，分析這些結構資訊，可以瞭解宇宙在 137 億年前的情境，並可用來推論宇宙起源的時間點。

另外，AMiBA 將會觀測星系團 (galaxy cluster) 在時空中的分布，星系團是由數個如我們銀河 (或大、或小) 的星系所組成。星系數目可達上千個之多，以組成星系團。除了宇宙本身，星系團是宇宙中最大個體，所以它又可看成是組成宇宙的基本組成分子。我們想要瞭解的問題是，在宇宙的演化過程中，其基本組成分子—星系團—形成的時間流程與空間的分布，這個問題和宇宙的演進有直接關連。然而星系團的觀測並非易事，特別是紅位移比較大的星系團，不管是可見光，或是高能量的 X 光，它所發出的訊號都因為距離與紅位移的因素而

變得極弱，AMiBA 是專門設計來克服這個難題。

根據 Sunyaev & Zel'dovich 效應<sup>(4)</sup> (簡稱 SZE)，在 3 毫米波長 (註 2)，星系團訊號在 CMBR 的背景中呈現出來的是一個陰影，這個類似遮避效應的陰影訊號並不會因距離與紅位移的因素而變弱，因為訊號不是由星系團所產生，而是來自背景的 CMBR。另外，在 3 毫米波長觀測 CMBR 的天空，星系團的 SZE 陰影強度接近其最大值，而 SZE 訊號受到銀河系同步加速輻射及塵埃前景與背景輻射源的污染程度也最低。AMiBA 可說是研究星系團少數的利器之一，特別是在 3 毫米波長下的觀測結果，它是全世界第一個在這一波段中研究星系團的儀器。

### 三、干涉陣列成像

干涉陣列利用孔徑合成 (aperture synthesis) 的技術以合成觀測影像<sup>(5, 6)</sup>。一般望遠鏡的主要規格是以它的視角解析 (分辨) 能力 (angular resolution 或稱角分辨率) 為準，角分辨率正比於望遠鏡的主鏡直徑，同時又隨著觀測波長成反比。目前最大的光學/紅外線望遠鏡為 10 米的主鏡，它的角分辨率可達到百分之角秒 (arc-second, 1 arc-second =  $1/3,600^\circ$ )。在無線電波領域中，由於訊號波長相對於可見光大了幾個數量級，目前的技術無法建造可與光學望遠鏡在解析度上相比擬的單一鏡面望遠鏡。但由於電波波長較長，天文學家可以利用孔徑合成的技術，由數個天線組合成一個干涉陣列，同時作訊號的交互干涉，然後經過後續的訊號處理，合成的影像會比原來單一望遠鏡的解析度更好，如此，以達到一個口徑約天線最大基線的「虛擬主鏡」。

干涉陣列望遠鏡有兩項特色。其一，高解析度，目前世界上主要儀器有美國的「超大陣列」(Very Large Array) 與台灣參與建造的「次毫米波陣列」(Submillimeter Array)<sup>(7)</sup>，還有目前還正在建造的「ALMA」陣列 (Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array)<sup>(8)</sup>。第二項特色是對系統雜訊的排除，特別是個別天線產生的雜訊。陣列每一根天線對同一目標作觀測，並將個別所收到的訊號作比

較，量測其相關性。不具相關性的雜訊，如個別天線所產生的雜訊，將被自動排除，或降低至可忽略的程度，這個特色即是 AMiBA 採取干涉陣列的主要因素。

#### 四、AMiBA 系統

AMiBA 陣列的每個天線就是一個非常靈敏的微波接收機。每台接收機配有各自的冷凍機，將其內部的前級放大器模組降溫到 15 K 左右，以減低接收機的雜訊，提升接收訊號的靈敏度。接收機的運作中心頻率為 94 GHz、頻寬 16 GHz、中頻 (intermediate frequency, IF) 2 GHz 至 18 GHz，相關器採用類比式、四時差相關器 (analog 4-lag correlator)，從天線設計到接收機與相關器的設計、製作以及後級訊號處理、控制軟體，皆由 AMiBA 團隊成員所研發。AMiBA 望遠鏡採用史都華六軸平台 (Steward platform, 或稱 Hexapod) 來承載整個天線陣列系統，平台是由碳纖維複合材料製作而成的，直徑大約 6 米寬。六軸平台的應用常見於特殊工具機與動態模擬器，比較少應用於「全天性指向」的望遠鏡上。它的優點在於具有 6 個自由度的指向能力，對於偏極光的偵測以及一般訊號的調變 (modulation) 將會有明顯的優勢。表 1 條列 AMiBA 陣列的主要規格，圖 2 為訊號路徑的系統示意圖。以下將就個別重要模組作介紹。

由於科學觀測目標的需求，AMiBA 採用 0.6 米與 1.2 米直徑的主鏡 (圖 3)，天線的架構為一 Cassagrain 型式。整個主鏡皆由碳纖複合材料製成，質量不但輕，而且結構強壯。主鏡的製作及製程的開發是由台中磁震科技開發股份有限公司所承製。

天線主鏡將訊號聚焦於接收機的前級 (圖 4)，經由喇叭天線 (feed horn)、雜訊耦合器 (noise coupler)、相位延遲 (phase shifter) 以及偏極化 (orthomode transducer) 處理。在此之後，訊號被分成兩路，互為垂直獨立偏極化，各路偏極化的訊號經由濾波器以及混頻器 (mixer)，將訊號從 82 GHz – 106 GHz 降頻到 2 GHz – 18 GHz。從喇叭天線一路到此的接收機前級均位於真空腔中。前級的元件

表 1. AMiBA 系統的主要規格。

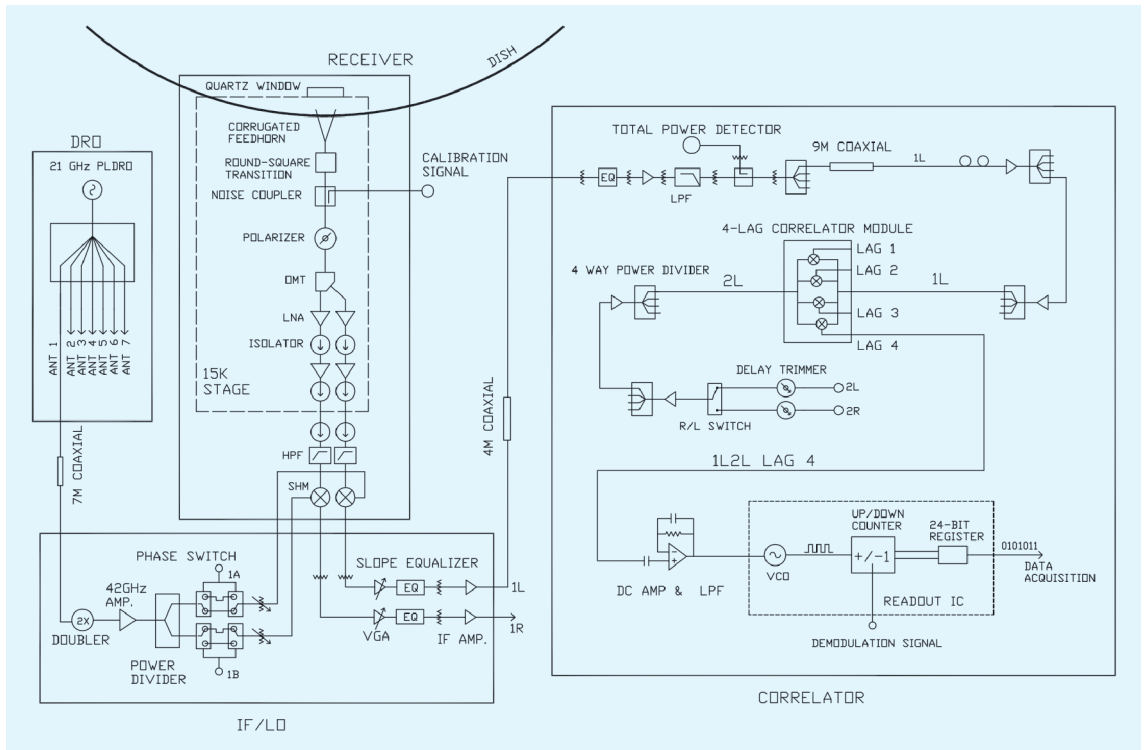
元件名稱	主要規格
陣列天線數	7 組 0.6-meter、13 組 1.2-meter
陣列基座	6-meter 碳纖複合平台 史都華六軸基座
天線基線	長度：0.6 – 6 meter 數目：21 (7 組) 或 78 (13 組)
天線主鏡	$f/2$ 整體碳纖複合材料 0.6-meter 和 1.2-meter 兩者可互換
主鏡視角	23' (0.6-meter) 和 11' (1.2-meter)
最大視角分辨率	2'
接收機的前級	接收頻段：86 – 102 GHz MMIC HEMT 低雜訊放大器 雙極相偵測 低溫冷凍 15 K
接收機雜訊	65 K
訊號降頻	Sub-harmonic 混頻
LO	頻率：42 GHz 訊號源：Dielectric resonant Oscillator @ 21 GHz
IF	頻段：2 – 18 GHz 可調變增益控制
相關器	類比式 4-時差 頻寬：2 – 18 GHz
Flux-density 靈敏度	63 mJy 和 8 mJy

中，除了濾波器與混頻器都必須降至 15 K 的低溫，以提高接收機的靈敏度。真空腔上設計了一個特製的石英窗口，以供天線將高頻訊號餵入。

接收機前級的元件均須特別設計與訂作，其中 W 頻段的低雜訊放大器最為重要，是委由美國 NASA 的 Jet Propulsion Laboratory 製造。它是利用最先進的單晶微波積體電路 (monolithic microwave integrated circuit, MMIC)，採用 InP HEMT (high electron mobility transistor) 製程，另外再加上 JPL 的封裝技術的成品。放大器的雜訊溫度介於 40 K 至 50 K，並提供約 25 dB 的增益，其他元件如喇叭天線、雜訊耦合器、高通濾波器 (high-pass filter) 以及混頻器皆是由我們設計，並委由國內廠商製作。

所有接收機的混頻器必須使用同一局部震盪器

圖 2. AMiBA 訊號偵測系統方塊流程圖。



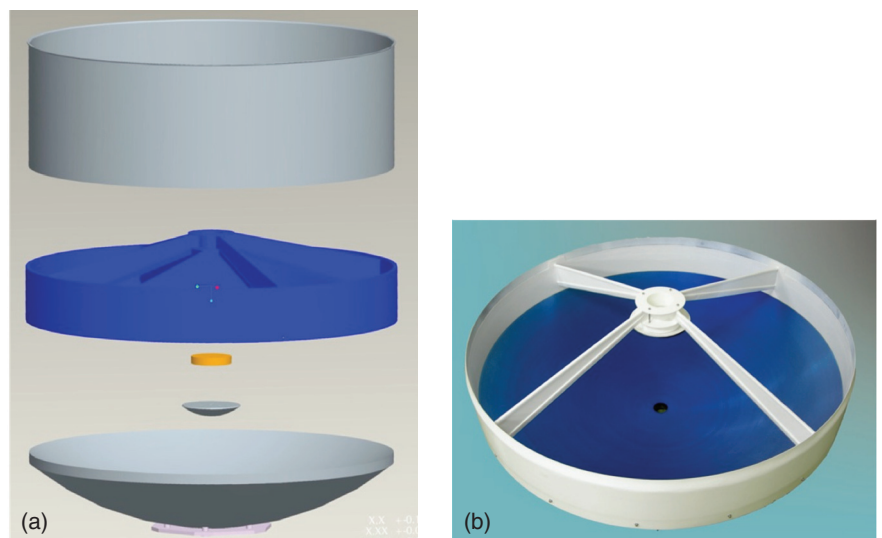
(local oscillator, LO) 訊號，以維持共同的相位參考標準。21 GHz 的局部震盪器來自單一訊號源。局部震盪器的訊號分量成七組訊號傳導至每一接收機的 IF/LO 模組，再經由 2 倍頻放大，並分量為二，以供應接收機中兩路偏極化的混頻使用。每一路的局部震盪器具備相位調變的功能，這是用來獨立地調變 (modulation) 各組 IF 訊號，以配合後極的解調

(demodulation)，來降低或消除系統本身產生的雜訊。

兩組不同的極化訊號降頻後，經由波導管傳導至真空腔外的 IF 放大器模組，然後每組 2 GHz—18 GHz 的 IF 經由傳導線路到達相關器 (圖 5)。IF 傳導線路經由兩次一分四的分量器，再加上濾波、放大、整頻，傳至相關器。整個 IF 傳輸線路提供

圖 3.

AMiBA 1.2-meter 天線。(a) 為設計模擬之分組圖；(b) 為真實的天線照片。鏡面所呈現的藍色色澤，是因其鋁面上加鍍一層二氧化鈦所致。AMiBA 所有天線皆為台中的磁震科技開發股份有限公司承製。



超過 150 dB 的增益，但 IF 訊號的淨增益只有 36 dB，這是因為要補償專為傳導 2 GHz 至 18 GHz 訊號所作的系統設計，以及必須分量 IF 訊號，以提供足夠的基線數使用的損失。

干涉陣列的後級主要由相關器與訊號讀取系統所組成，每一對由不同接收機傳達的 IF 訊號均有一特定的相關器模組處理，其方式是讓兩路獨立的 IF，藉由在各自傳輸線四個不同的時差點產生訊號相乘。四個時差間隔相同，均為  $\sigma = 25$  ps (picosecond)，其相對於零時差的位置分別是  $(-3/2)\sigma$ ， $(-1/2)\sigma$ ， $(1/2)\sigma$  以及  $(3/2)\sigma$ 。如此所產生的相乘訊號經由 Fourier 轉換後，可產生兩組相對於不同頻段的相關值。不同的基線長度與方位產生不同的相關值。藉由陣列不同的排列方式，使用更多的基線數 (天線數目) 以及操作六軸平台產生不同的基線方位，這些方法皆可產生相對於同一影像的相關值。之後，對這些相值作一 Fourier 轉換，即可得到觀測目標的原始圖像 (或稱為 dirty map)，然後再經由一連串的后續影像處理，即可得到合成影像。

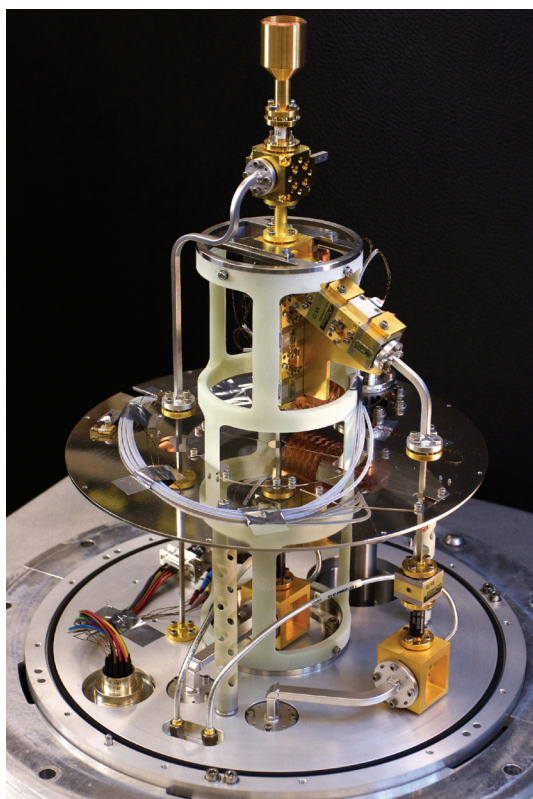


圖 4. 真空腔中的 AMiBA 接收機的前級。

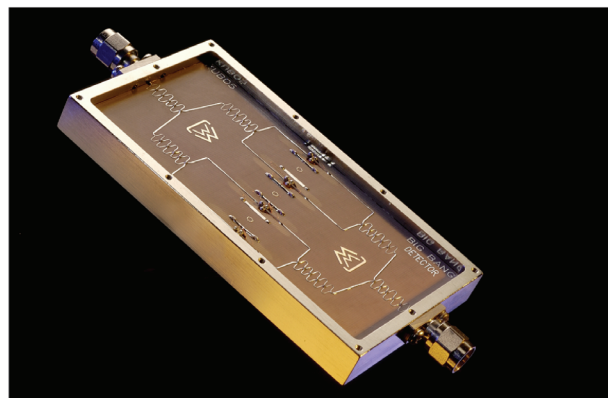


圖 5. AMiBA 相關器模組。訊號由上下兩方進入相關器。各路訊號經由兩次分量後，與另一路訊號相乘。四組相乘器的位置間隔差 (lag) 為  $\sigma$ ，相對位置分別是  $(-3/2)\sigma$ 、 $(-1/2)\sigma$ 、 $(1/2)\sigma$  與  $(3/2)\sigma$ 。 $\sigma$  值為 25 ps (以光速在自由空間的傳遞為主)。每一組基線由一模組負責處理。

AMiBA 陣列的所有天線均安置於同一平台上，由單一六軸基座支撐與操控。為了降低由陣列轉動所產生不必要的雜訊，所有訊號處理系統與相關器及局部震盪器訊號源均安置於平台上。平台本身必須足夠硬挺，以支撐所有儀器，並保持平面的平整度；同時它的質量必須輕，以滿足六軸機座的承載限制。平台的製作由複材纖維製成，並採用七片式的組裝而成，平台與六軸基座合為六軸平台，其運作方式是由控制六根可伸縮的螺桿長度與長度變化的速率來完成望遠鏡的指向與目標的追蹤控制。

六軸平台是由六根可伸縮的螺桿所支撐，螺桿的下方固定於地面上，兩兩一組成正三角分布。它們的接點為全方性聯接頭 (universal joint)。螺桿上方亦經由全方聯接頭，接於平台下方三角點。六軸平台提供比傳統基座更多的操縱方式與陣列轉向的變化，非常適合於 AMiBA 的小型天線陣列。平台式的機械結構讓我們可以直接從平台下方去維修接收機與其他重要元件，其機械結構相對上比較輕巧簡單。然而 AMiBA 所使用的是世界上最大的六軸平台，同時它也是第一具可操作於全天性觀測望遠鏡平台。它的控制方法比傳統基座複雜，另外，它的承載重量亦不高。

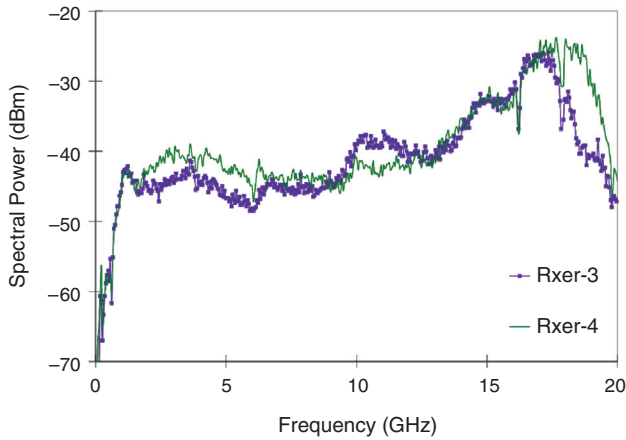


圖 6. AMiBA 接收機系統 IF 的操作頻段 2—18 GHz。高頻部分的訊號強度被特別提高，以因應訊號經由纜線傳遞所發生的額外高頻損耗。圖示是 AMiBA 其中的兩台接收機的量測資料。

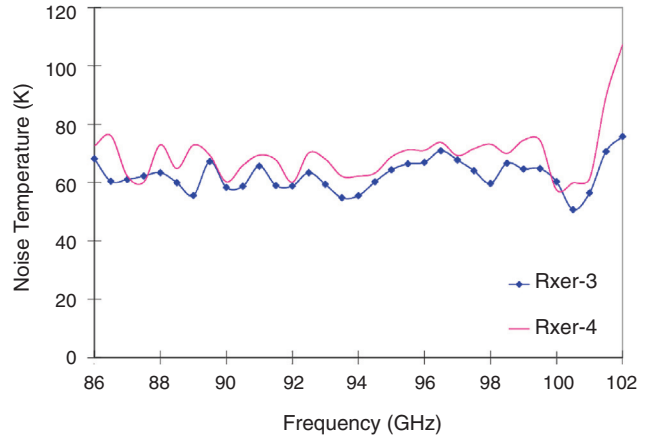


圖 7. AMiBA 接收機系統的雜訊溫度。圖示為 AMiBA 其中兩台接收機的量測資料。

## 五、AMiBA 性能與初期觀測結果

接收機的功能是以它的雜訊溫度為基準，AMiBA 接收機系統的雜訊溫度大約介於 55 K 至 75 K 之間(圖 6 與圖 7)，它的高頻部分呈現比較高的雜訊值。量測到的雜訊中 50 K 是由頻段的 LNA 所貢獻，其餘的雜訊則由 LNA 之前的被動元件產生，這種成效是目前此類型的接收機可達到的最佳結果。

AMiBA 相關器處理 2 GHz—18 GHz 的訊號相關，採用如此寬頻的原因是要增加系統的靈敏度。四個時差的相關器所產生的兩個頻率有助於收到訊號頻譜作進一步的分析。當然，AMiBA 可嘗試更寬頻段，或是增加時差數目，二者均可提昇系統的靈敏度。在操作上，相關器的有效頻寬最大可達到 13 GHz，但其普遍值約只有 10 GHz。此值低於原預計的 16 GHz，主要是因為相關器模組在 2 GHz—18 GHz 之間，頻率響應的變化率超出預期。有效寬頻可藉由增加時差的數目來提昇，或者必須重新設計相關器模組。受限於經費，目前的規格是我們所能夠做的。儘管如此，AMiBA 的相關器系統是世界上的干涉陣列中最寬頻的相關器。

AMiBA 七組天線所合成的靈敏度可達到每小時 63 mJy，未來增加至 13 組後可達到 8 mJy。雖

然如此，在實際觀測的操作上，我們還是必須考慮到環境所產生的訊號 (ground pick-up)，這些環境產生的實際訊號雖然微弱，但經由長期的訊號積分，將產生明顯的訊號，因此在觀測策略上必須採取多重目標觀測，然後再經由影像的相減，以求得真正的 CMB 訊號。

AMiBA 望遠鏡從最初觀測木星所發射的電磁波訊號(圖 8)合成的影像，以驗證系統運作，至 2007 年使用由 7 座天線組成的陣列，對 6 個大質量

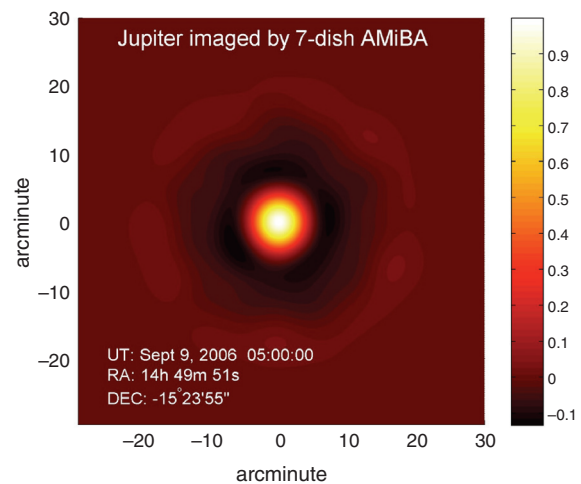


圖 8. AMiBA 望遠鏡所「看到」的木星影像，這是干涉陣列經由觀測木星所發射的電磁波訊號(波長 3 毫米)合成的影像。我們所研究的宇宙背景輻射，它的強度約比木星的訊號小一百萬倍。

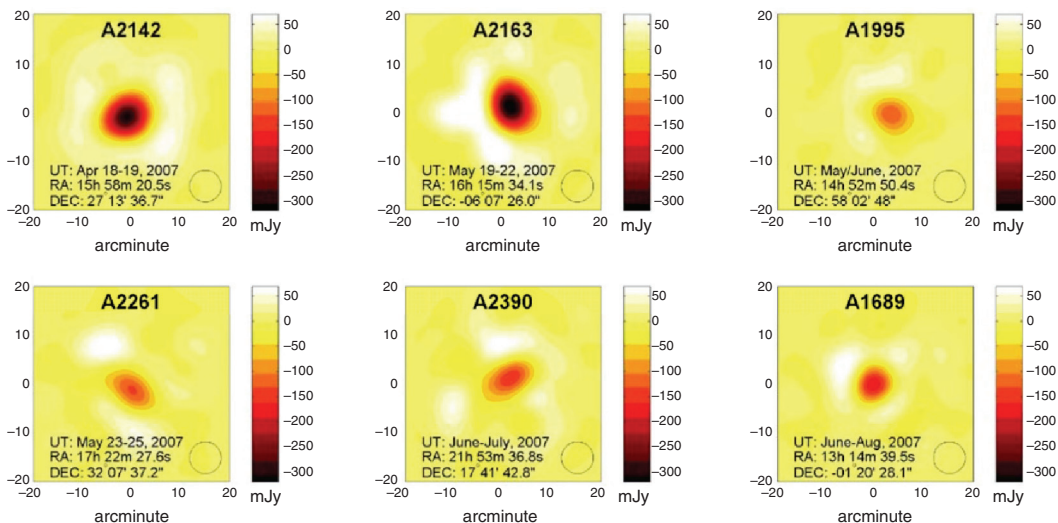


圖 9. AMiBA 觀測六個大質量星系團首度獲得的 SZE 影像。每一影像均經由數小時的積分所獲得。

星系團 (galaxy cluster) 進行長期觀測，為的是要研究星系團的物理特性，並嘗試從中獲得背景宇宙學的限制條件。圖 9 顯示 AMiBA 觀測該 6 個大質量星系團所得到的影像，其中可看出 SZE 「陰影」，這類觀測是熱星系團內氣體中熱能含量的測量工具。

## 六、結論

大型計畫的執行必須腳踏實地，並且按部就班，執行步調必須配合實際面與時程，更何況 AMiBA 是國人第一次嘗試主導的大型天文儀器建造計畫。AMiBA 計畫始於 2000 年春天，大約兩年後完成初步的執行構想，完成 AMiBA 原型機組並架設在 MLO 上，以測試及驗證我們的設計。2004 年進行 AMiBA 台址的破土與後續的土木工程，2005 年位於 MLO 的 AMiBA 望遠鏡陣列略具雛形，同時我們的工作專注在六軸平台的架設與測試。2006 年所有相關的天線、接收機與相關器等模組一一地被安裝在六軸平台上，2006 年 9 月成功地取得第一組 AMiBA 合成影像，驗證我們的設計與能力，此時距離 AMiBA 計畫的起始已 6 年半，經歷三任天文所籌備處主任 (計畫主持人)。AMiBA 望遠鏡已於 2006 年 10 月 3 日正式由本院李前院長遠哲先生與台灣大學李校長嗣涔先生共同啟用 (圖 10)，同時為了彰顯李前院長遠哲先生多年來對於國內天文研究與 AMiBA 計畫的支持，於啟用典禮當中由李嗣涔校長宣布將 AMiBA 正式命名為「李遠哲微波背景輻射陣列」。2007 至 2008 年是初期的科學觀測，已成功的取得數個星系團 SZE 的影像，並建立起充分的實際觀測經驗與有效的數據處理能力。目前 AMiBA 正進行擴展至 13 座天線的工程，這次的升級工程會將天線鏡面直徑由 0.6 米換為 1.2 米，並使成像速度增加近 60 倍，屆時 AMiBA 將會成為一座更強大、更有效率的天文利器。



圖 10. AMiBA 望遠鏡已於 2006 年 10 月 3 日正式由中央研究院李前院長遠哲與國立台灣大學李校長嗣涔共同啟用。

## 附註

1. AMiBA 是教育部追求卓越計畫—「宇宙學與粒子天文物理 (CosPA) 計畫」的一部分，追求卓越計畫的目標是促進跨領域研究，並大規模整合獨立的研究計畫。
2. AMiBA 接收頻段為 86 GHz 至 102 GHz，相當於 3 mm 的波長。

## 參考文獻

1. K. Y. Lo, *et al.*, in *AIP Conference Proceedings*, **586**, 172 (2001).
  2. P. T. P. Ho, *et al.*, *Modern Physics Letter A*, **23**, 1243 (2008).
  3. 方勵之, 宇宙的創生, 亞東書局 (1988), *Scientific American* (2004).
  4. R. A. Sunyaev and Y. B. Zel'dovich, *Comments Astrophys. Space Phys.*, **2**, 66 (1970).
  5. 鄭興武, 李太楓, *科儀新知*, **14** (3), 4 (1992).
  6. A. R. Thompson, J. M. Moran, and G. W. Swanson Jr., *Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy*, New York: John Wiley & Sons Press (1986).
  7. 陳明堂, *科儀新知*, **21** (6), 5 (2000).
  8. <http://www.alma.nrao.edu/>
- 

- 陳明堂先生為美國伊利諾大學博士，現任中央研究院天文及天文物理研究所籌備處研究員。
- Chen Ming-Tang received his Ph.D. in physics from the University of Illinois at Urbana-Champaign, USA. He is currently a research fellow in the Institute of Astronomy and Astrophysics, Academia Sinica.