

立足臺灣，放眼宇宙：

AMiBA 計畫 (宇宙背景輻射陣列)

文·圖／林凱揚

宇宙的起源，星系與各式各樣的天體如何演化，乃至於其未來的發展，這些問題一直存在人們的心中，但是卻沒有令人滿意的答案。1929年Hubble (Edwin Hubble) 觀測到了膨脹中的宇宙，為大霹靂 (Big Bang) 學說提供了強有力的證據。而1964年發現的宇宙微波背景輻射 (Cosmic Microwave Background, 簡稱CMB)，更直接觀測到了大霹靂之後熾熱的早期宇宙所留下的餘光。但是天文學家們並不因為大霹靂的成功而滿足，更多的實驗被設計來更精確地檢驗宇宙學模型。1992年COBE衛星 (Cosmic Background Explorer) 發表了CMB的觀測結果，確定CMB為近乎完美的黑體輻射，但是從不同方向接收到的輻射卻存在約10萬分之一度 (Kelvin) 的差異。這微小的差異來自於宇宙的物质/能量分布的不均勻性，而這樣的不均勻分布勢必會因為重力的作用而不斷被放大，並逐漸演化成現在我們所觀測得到的各式天體 (星系團，星系，恆星，行星等)。1998年另一個觀測結果為宇宙學帶來了又一波革命，透過觀測一種作為標準燭光的超新星 (Type Ia supernova, SNIa)，人們發現宇宙不但在膨脹，而且現在正處於加速膨脹的狀態。這樣的結果大大地影響了宇宙年齡的計算，以及對於構成宇宙的能量密度的分配的了解。另一方面，WMAP衛星 (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) 自2001年升空後，持續對CMB進行觀測，以其精確度為宇宙學參數定下嚴格的限制。

透過CMB量測大霹靂時期宇宙的研究，少有能出WMAP之右者。然而CMB所能提供的資訊卻不僅限於大霹靂時期的宇宙而已，尤其在角分 (arcminute) 尺度範圍，一些已演化形成的天體，其對CMB造成的次級不均勻性效應將比早期的不均勻性更強。透過對這些次級效應的觀測，我們將更了解造成這些效應的天體，進一步還能透過量測這些天體的數目如何隨時間增加，對宇宙學參數有獨立又互補的了解。我有幸參與的AMiBA計畫的一部分，就是希望能對CMB上角分尺度的不均勻性有更多的了解。

李遠哲宇宙背景輻射陣列

(The Yuan-Tseh Lee Array for Microwave Background Anisotropy, 簡稱AMiBA)

AMiBA使用干涉儀技術，於3毫米波段偵測 CMB 的訊號。除了可用來探討CMB於小尺度的擾動外，其另一重要的科學目的是用來偵測CMB光子被沿著視線方向上的星系團散射所造成的擾動。AMiBA完全是臺灣出資，由中研院天文所 (ASIAA) 與臺大物理系共同主導，並與臺大電機系，Australia Telescope National Facility (ATNF)，Carnegie Mellon University (CMU)，the National Radio Astronomy Observatory (NRAO)，以及Jet Propulsion Laboratory (JPL) 合作的一項大型望遠鏡計



圖1：AMiBA的7天線陣列階段。平台直徑約6米，天線直徑則為0.6米。平台下方為目前世界上最大的用於天文觀測的六腳基座（hexapod mount）。

畫，這是亞洲第一個專門用於宇宙學研究的望遠鏡。AMiBA座落於夏威夷大島上毛納羅山海拔3400公尺處，大氣中的水氣相當稀少，較不會吸收微波訊號，又因遠離人煙，人為無線電波的干擾也相對降低。AMiBA從最早始於2001年的設計研發至2006年望遠鏡硬體與軟體完成共耗時6年，而於2006年底起啟用。

AMiBA計畫主要分成兩階段：第一個階段由7個0.6米的天線組成（見圖1），並於2007至2009年間完成6個在紅移（redshift）0.09至0.32之間的星系團的觀測與科學分析；而第二階段是將AMiBA擴充升級到13個1.2米的天線陣列以獲取更高的解析度與靈敏度（見圖2）。相較於過去的7天線陣列，目前新的13天線陣列對於點光源的觀測，可達到8倍以上的靈敏度，也就是說可增快觀測速率達60倍以上，有利於觀測視角分部較小的更紅移星系團，以及獲得數量更多的星系團觀測數據。此一階段的科學觀測已於2011年正式展開。

何謂Sunyaev-Zel'dovich (SZ) 效應？

當CMB的光子通過星系團時，由於星系團中帶有高溫電子，光子受到電子的碰撞而產生逆-康普頓散射（光子由電子處獲得能量與動量），此一效應屬於CMB的次級不均勻性，稱之為Sunyaev-Zel'dovich (SZ) 效應（Sunyaev & Zel'dovich, 1972; Birkinshaw 1999）。由於星系團中高溫氣體的溫度與密度與星系團中暗物質的分布及其所造成的重力場相關，而SZ效應的大小直接反映其中高溫氣體的特性，因此SZ效應是用來研究星系團非常重要的一項工具，並且與其他經由X-ray、重力透鏡和動力學觀測等方式得到星系團資訊有相輔相成的作用。

7天線陣列觀測結果

AMiBA計畫的第一階段首要目標為校驗望遠鏡、儀器，以及分析工具的適用性。我們仔細

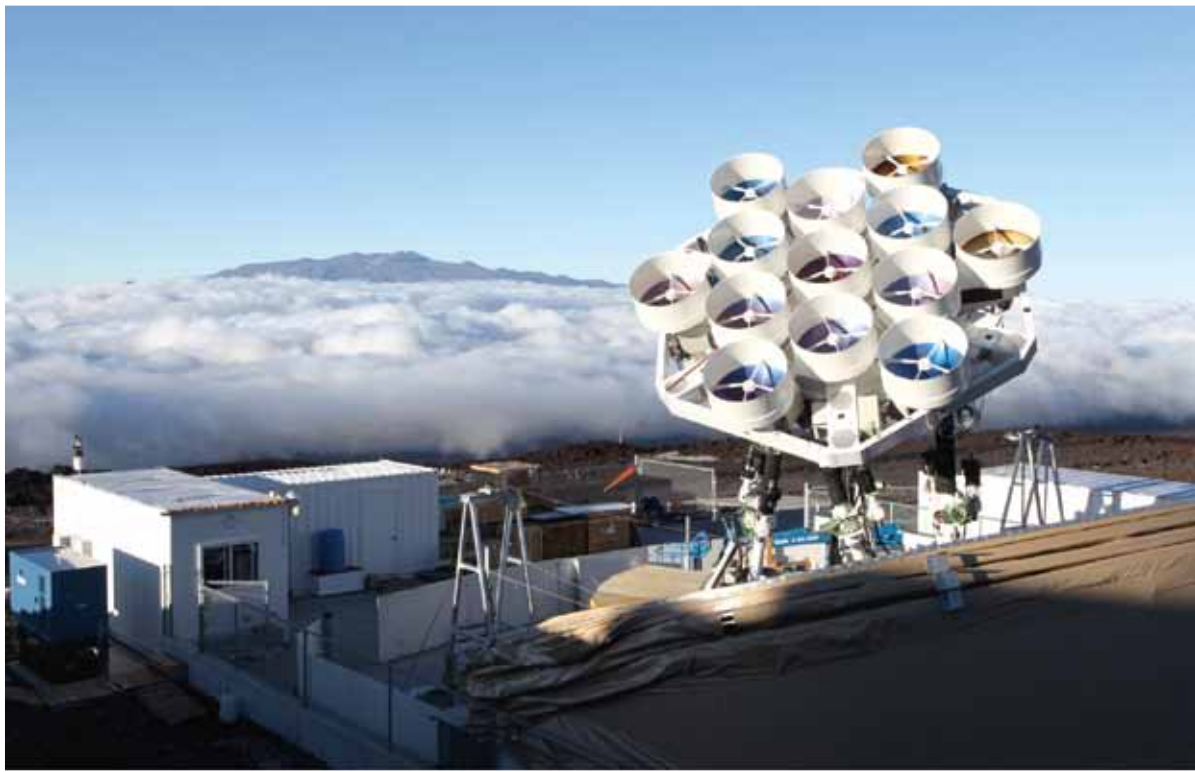


圖2：AMiBA的13天線陣列。平台與基座和圖一相同，天線直徑則增大為1.2米。背景可見同處夏威夷大島的毛納基山。

地分析了資料雜訊的特性（Nishioka et al. 2009），估計CMB及點源對SZ訊號的混淆（Liu et al. 2010），處理與校準資料並去除系統誤差（Wu et al. 2009），並決定系統的工作效率（Lin et al. 2009）。

在此階段我們共觀測了6個星系團，首先偵測到SZ訊號的，是其中最亮且距離我們最近的星系團，名為Abell 2142（Ho et al. 2009）。此星系團正處於合併的過程，因此其暗物質與氣體分布不會有圓對稱。比較了由AMiBA得到的SZ訊號，以及由光學望遠鏡Subaru所得到重力透鏡的結果，來分析其氣體以及暗物質的分布。結果如圖3所示，背景彩色部分為AMiBA/SZ訊號分布，而白色等高線表示暗物質分布，可以清楚地看到兩者都顯現出由西北向東南延展的結構，代表氣體與暗物質的分布相近。

在2009年發表的論文中（Umetsu et al. 2009），我們結合了4個由AMiBA/SZ觀測的星系團，配合Subaru重力透鏡的分析，探討氣體相對於暗物質質量比例與星系團半徑的

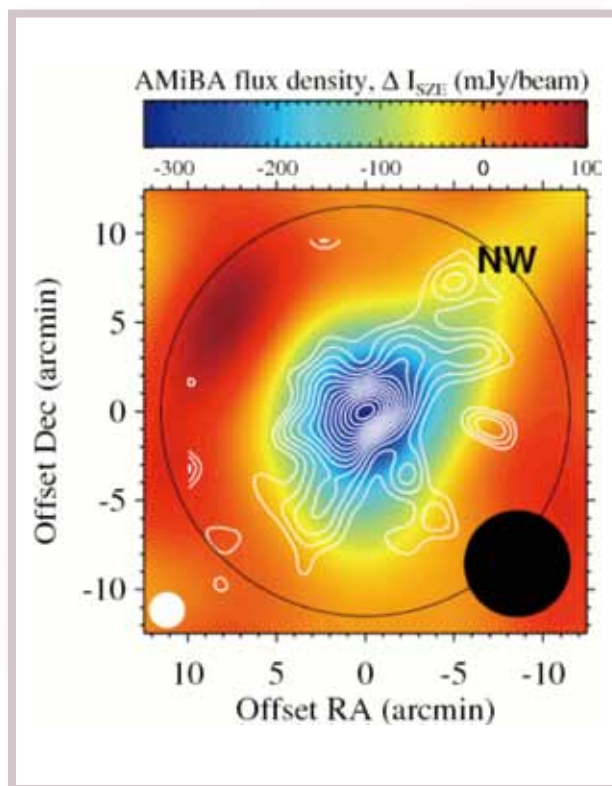


圖3：Abell 2142的SZ訊號（彩色）與暗物質分布（白色等高線）相符，表示氣體與暗物質皆可觀測到星系團合併的過程。（Ho et al. 2009）

變化關係（如圖4所示）。此類分析對於理解星系團密度與溫度分布的模型有重要的貢獻，然而還必須有更多的樣本以得到更具統計意義的結論。

其他重要的AMiBA 結果還包括運用SZ與X-ray 資料來量測哈伯常數（Hubble constant; Koch et al., submitted），星系團的 cluster scaling relations（Huang et al. 2010; Liao et al. 2010），以及星系團氣體特性的探討（Molnar et al. 2010）。

未來的展望

AMiBA 13天線陣列目前正在進行觀測，在約一年的觀測時間內，已經取得了近20個星系團的觀測資料，並且分析得到了所有星系團的SZ訊號。這些資料將被用來研究星系團的氣體分布，演化程度，以及被用來校準星系團的質量推測，並應用到更廣泛的宇宙學研究之中。☞（本專題策畫／物理學系陳政維教授）

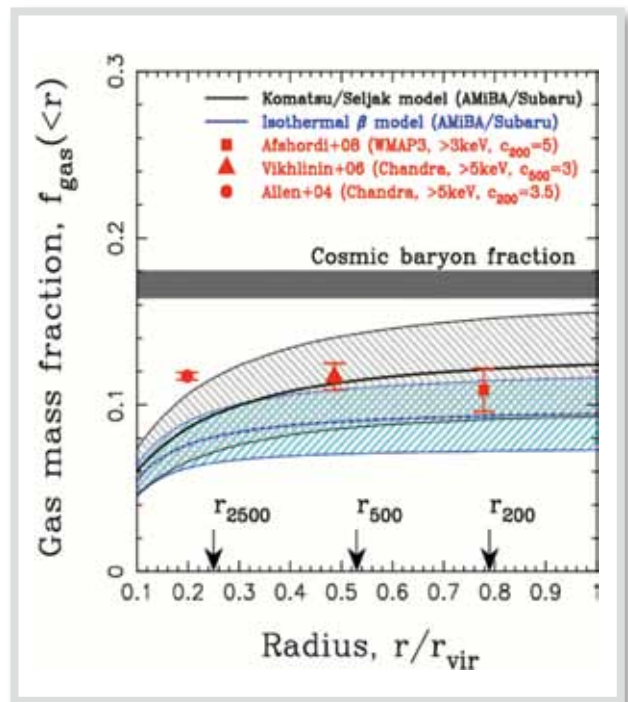


圖4：累積的氣體質量對星系團總質量比值隨星系團半徑的分布。（Umetsu et al. 2009）

參考文獻：

- [1] M. Birkinshaw 1999, Phys. Rep., 310,97
- [2] P.T.P. Ho et al. (AMiBA) 2009, ApJ, 694, 1610
- [3] C.W.L.Huang et al. (AMiBA) 2010, ApJ, 716, 758
- [4] P.M. Koch et al. (AMiBA) 2010, ApJ, submitted
- [5] Y.-W. Liao et al.(AMiBA) 2010,ApJ, 713, 584
- [6] K.Y. Lin et al. (AMiBA) 2009, ApJ, 694, 1629
- [7] G.C. Liu et al. (AMiBA) 2010, ApJ, 720, 608
- [8] S.M. Molnar et al. (AMiBA) 2010, ApJ, 723, 1272
- [9] H. Nishioka et al. (AMiBA) 2009, ApJ, 694, 1637
- [10] R.A.Sunyaev, Y.B. Zeldovich, 1972, Comments on Astrophysics and Space Physics, 4, 173
- [11] K. Umetsu et al. (AMiBA) 2009, ApJ, 694, 1643
- [12] J.H.P. Wu et al. (AMiBA) 2009, ApJ, 694, 1619



林凱揚小檔案

1999年清華大學物理系畢業，2001年臺灣大學物理所碩士，2006年臺灣大學物理所博士，現於中央研究院天文所擔任博士後研究員，並自2011年起擔任AMiBA計畫科學家。主要研究的興趣為觀測宇宙學、星系團與電波干涉儀。