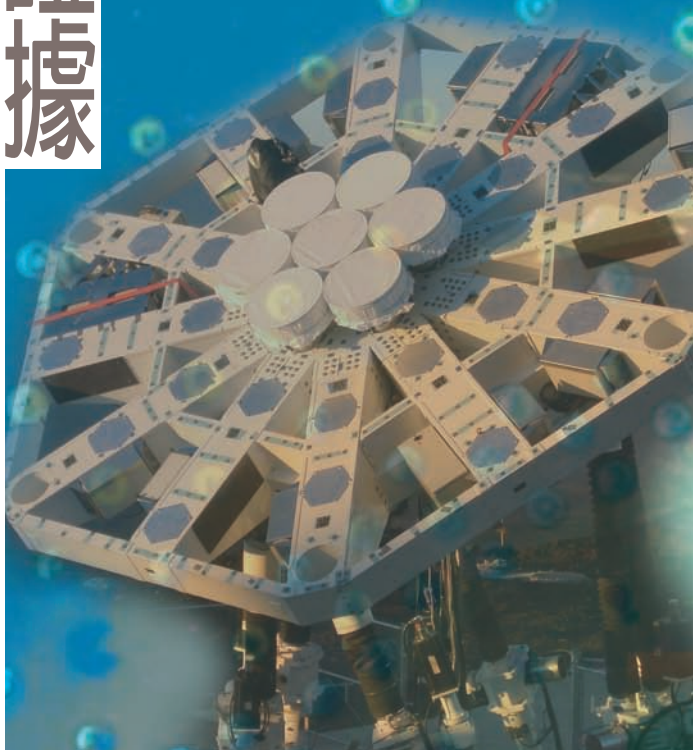


2006年諾貝爾物理學獎 大霹靂理論的證據

我們所在的宇宙從何而來？又將往哪裡去？眾家說法不一，唯有強而有力的佐證，方能獨排眾議為衆人所接受。

吳建宏



1963年，美國貝爾實驗室的彭齊亞斯（A. Penzias）和威爾森（R. Wilson）利用微波天線接收機，無意中發現了宇宙微波背景輻射，為大霹靂理論提供了最重要的證據。之後，科學家競相測量宇宙微波背景輻射的各向異性，尋找宇宙結構與星系的起源。

1992年，美國航空暨太空總署（NASA）的宇宙背景探索者（COBE）衛星，探測到宇宙微波背景輻射的各向異性時，這項發現甚至被比喻為「看見上帝的手」。負責宇宙背景探索計畫的兩位科學家馬德爾（J. Mather）與史穆特（G. Smoot），因研究成果強化了宇宙演化的大霹靂理論，共同獲得去年的諾貝爾物理學獎。

大霹靂模型

1910年代，理論宇宙學家應用愛因斯坦方程式來探討宇宙的動力學，推算出宇宙在不斷地膨脹中。可是當時的天文觀測技術落後，沒有足夠的數據驗證這個學說。到了1920年代，天文學家哈伯（E. Hubble）陸續發現遙遠的星系有紅移現象，也就是說，這些遠方星系是以很高的速度遠離我們所處的星系，表示星系之間的距離隨著時間在增加，印證了宇宙膨脹學說。後來這學說被稱為宇宙的「大霹靂模型」（Hot Big-Bang Model）。此後，宇宙學便從純粹理論的階段推進到一門實質的科學。

我們對宇宙的了解，今非昔比。近40年來，大型的天文望遠鏡如雨後春筍般出現，尤其是90年代升空的哈伯太空望遠鏡（Hubble Space Telescope），更能窺探宇宙深遠的星系。如今，宇宙學家大致上有了一個宇宙演化的圖像，他們認為構成宇宙



圖片來源：<http://www.fnal.gov>

宇宙誕生的「大霹靂模型」圖中左下方的小球代表基本粒子，分別是夸克（ Q ）、電子（ e ）、質子（ p ）、中子（ n ）等。兩個質子和兩個中子產生核反應變成氦核。在最後散射面後，氦核與兩個電子合成氦原子，質子與電子合成氫原子。左上方代表星球、星系漸漸形成。

生核反應，製造出氫、氦等較輕的原子核。溫度降到了約攝氏1萬2千與3千度之間，氦與氫原子核便先後與周遭的電子結合成氦氣和氫氣。

之後，經過140億年的膨脹及冷卻後，今天宇宙的溫度大約是絕對溫度3度（3K），相當於攝氏零下270度！在宇宙膨脹、冷卻的過程中，暗物質密度較高的部分受到內在重力的吸引漸漸聚合，最後經過重力塌陷形成暗暈。這些暗暈隨後成為重力中心，吸引其他氣體形成星系雛形，最後演變成星系和星系團。

早期宇宙的化石

我們除了利用天文望遠鏡測量星系的紅移現象、描繪星系間的大尺度結構外，還採用微波天線來探測大霹靂遺留下來的3K熱輻射背景。3K熱輻射主要的成分是微波，我們便稱它為「宇宙微波背景輻射」。1963年，美國貝爾實驗室的彭齊亞斯和威爾森利用微波天線接收機，發現了宇宙大爆炸後遺留下來的宇宙微波背景輻射，為大霹靂模型提供了最重要的證據，他們兩人因此共同獲得1978年的諾貝爾物理學獎。

宇宙微波背景輻射不僅是大霹靂遺留下來的熱輻射，更重要的是，它隱藏著140億年前宇宙的真貌、大尺度結構、星系形成的起源等重要訊息。大霹靂後經過約38萬年的時間，宇宙的溫度降到大約攝

的物質有兩種：重子物質和非重子物質。

重子物質是一般我們所熟悉的物質，大部分是氫和氦，也就是組成地球、太陽、星系等的物質。非重子物質是所謂的「暗物質」（dark matter），它比重子物質多好多倍。暗物質不會發出亮光，相互作用非常微弱，只有在重力作用下會產生塌陷，對大尺度結構及星系的形成具有決定性的作用。

宇宙初期是一小團密度極高且極為炙熱的電漿，由處於熱平衡狀態的基本粒子所組成（如構成質子、中子的夸克、電子等）。宇宙的體積不斷地膨脹，它的溫度便逐漸降低，當宇宙的溫度下降到約攝氏 10^{13} 度時，夸克會結合成為質子和中子，此外還有剩餘的電子和熱輻射。當溫度再下降到約攝氏 10^{10} 度時，質子和中子便產

美國航空暨太空總署的宇宙背景探索者衛星，探測到宇宙微波背景輻射的各向異性時，這項發現甚至被比喻為「看見上帝的手」。負責計畫的兩位科學家馬德爾與史穆特，因研究成果強化了宇宙演化的大霹靂理論，共同獲得去年的諾貝爾物理學獎。

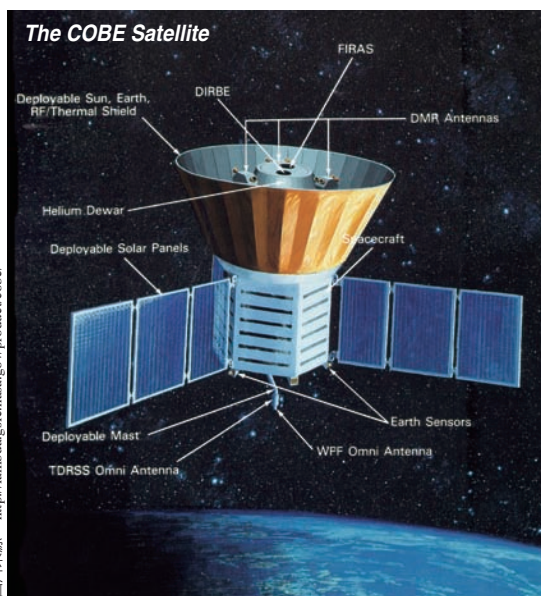


獲得 1978 年諾貝爾物理學獎的彭齊亞斯和威爾森，後面是他們用來發現宇宙微波背景輻射的天線接收機。

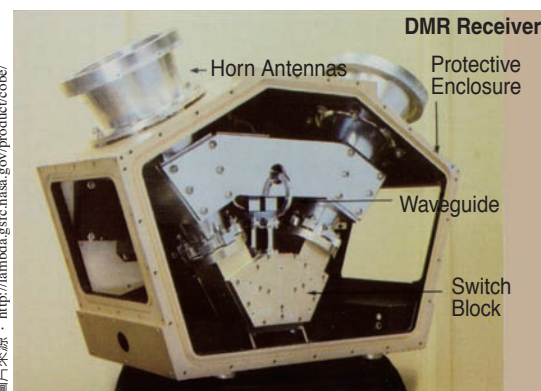
氏 3 千度，電漿中的正電離子漸漸與周遭的電子結合成中性原子，整個宇宙頓然變成中性。此外，當熱輻射的溫度降到攝氏 3 千度時，輻射中的光子多數是紅外線，因為所帶的能量太低，再也不能激發周圍的中性原子，我們稱這個時期為「宇宙最後散射面」。

此後，熱輻射便慢慢地與宇宙中的物質失去接觸，不再與物質產生相互作用，而獨自成為宇宙背景輻射，整個宇宙也變成透明。由於在最後散射面之前的宇宙是處於熱平衡狀態，它的熱輻射光譜是一個黑體輻射的分布，因此在最後散射面之後，宇宙背景輻射的光譜仍是一個黑體輻射的分布。因為經過 140 億年的宇宙膨脹，宇宙背景輻射除了冷卻成為微波輻射外，它的本質不會有所改變，所以今天我們探測到的宇宙微波背景輻射，可以讓我們直接觀察 140 億年前宇宙的模樣，從而窺探宇宙誕生約 38 萬年後的初期狀況。

1920 年代，天文學家哈伯陸續發現遙遠的星系有紅移現象，也就是說，這些遠方星系是以很高的速度遠離我們所處的星系，表示星系之間的距離隨著時間在增加，印證了宇宙膨脹學說。後來這學說被稱為宇宙的「大霹靂模型」。



美國航空暨太空總署的宇宙背景探索者衛星（The COBE Satellite）。



微差微波射電儀（DMR），可以讀出從上端兩個角形天線饋入的宇宙微波背景輻射的溫度差。

宇宙背景探索者

1989 年，美國航空暨太空總署位於馬里蘭州的戈達德太空飛行中心，發射宇宙背景探索者（COBE）衛星，衛星上酬載了 3 個當時靈敏度最高的科學儀器，包括「散狀紅外線背景實驗儀（DIRBE）」、「微差微波射電儀（DMR）」和「遠紅外線絕對光譜儀（FIRAS）」。散狀紅外線背景實驗儀負責尋找宇宙紅外線背景輻射，微差微波射電儀描繪整個宇宙的微波背景輻射，遠紅外線絕

對光譜儀則用來測量宇宙微波背景輻射的光譜，同時與黑體輻射比對。

遠紅外線絕對光譜儀首次測量宇宙微波背景輻射的溫度準確到小數後三位，大約是 2.725 K，並且證明宇宙微波背景輻射的光譜的確是一個幾近完美的黑體輻射，與大霹靂理論的預期非常一致。

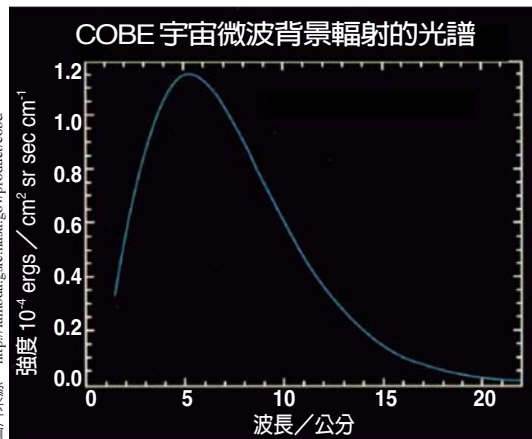
1992 年初，微差微波射電儀測量到宇宙微波背景輻射的溫度各向異性，亦即在不同方向的微波輻射溫度有非常細微的差異。微差微波射電儀把微波天空（microwave sky）分割成好幾個像素，然

後分別去量每個像素的溫度，發現有幾十萬分之一度的差異。微差微波射電儀的研究成果又給予大霹靂理論一強力的支持，使我們能對宇宙誕生約38萬年後的初期階段進行觀測，有助於了解星系形成的過程。

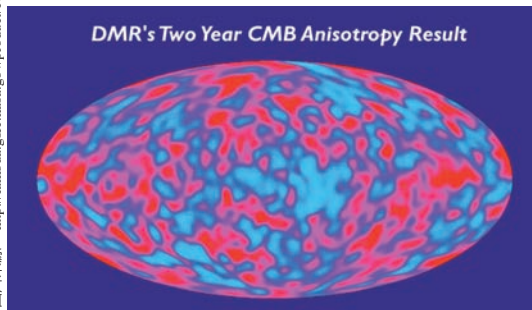
現年61歲的馬德爾(J. Mather)服務於美國航空暨太空總署的戈達德太空飛行中心，62歲的史穆特(G. Smoot)則任職於加州大學柏克萊分校的勞倫斯柏克萊國家實驗室。當年，馬德爾負責宇宙背景探索者衛星整體計畫的協調，專精天文物理學的史穆特則是測量宇宙微波背景輻射各向異性的微差微波射電儀計畫主持人。

瑞典皇家科學院表示，馬德爾與史穆特獲獎的原因是發現宇宙微波背景輻射的黑體輻射本質，並且，他們根據微差微波射電儀取得的測量數據，觀察宇宙誕生約38萬年後的初期階段狀況，他們偵測到的宇宙微波背景輻射的各向異性，也有助於證明星系形成的過程。諾貝爾物理學獎評審委員會主席卡爾森表示，馬德爾與史穆特兩人並未證實大霹靂理論，但提出非常強烈的支持證據，是本世紀最偉大的發現之一，提升我們對所生宇宙的了解。

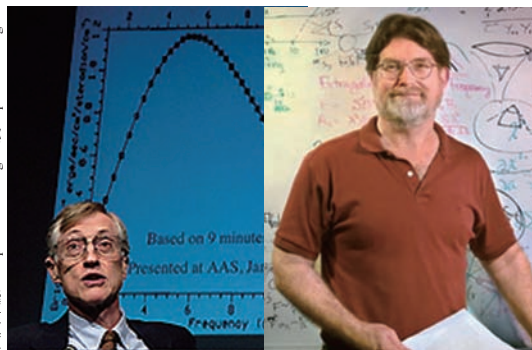
瑞典皇家科學院又表示，藉由確證大霹靂理論的預測，並佐以直接的量化證據，兩位科學家把初期宇宙的研究，從大



透紅外線絕對光譜儀可以精確地測量宇宙微波背景輻射光譜，測量數據完全與 2.725K 黑體輻射的光譜（圖中曲線）重疊。



微差微波射電儀歷經兩年測量宇宙微波背景輻射的溫度各向異性所得的結果，圖中紅色的部分表示溫度較高，藍色的部分溫度較低，然而溫度的高低僅相差幾十萬分之一度而已。



獲得 2006 年諾貝爾物理學獎的馬德爾與史穆特

量的理論探究，轉型進入直接觀察與測量的新紀元。科學院的頌詞說：「兩位得獎者從宇宙背景探索者衛星的大量觀測數據，進行非常詳盡的分析，在現代宇宙學演進為精確科學的發展上扮演了重大的角色。」

對重力紅移的佐證

廣義相對論最重要的預測之一是「重力紅移」，它把重力場與能量兩者關聯在一起。當我們爬上樓梯的時候，會覺得很費力氣，這是因為我們身體不停地背著地球的重力場作功，增加我們的位能。換句話說，要增加重力位能，我們得消耗體力。同樣的道理，當我們向天頂發射一束白光，往前進的光子能量會漸漸減少，也就是光子的頻率會降低。光子跑得越高，頻率降得越低，就會使得光束的顏色稍微偏向紅色，這種現象叫作重力紅移。

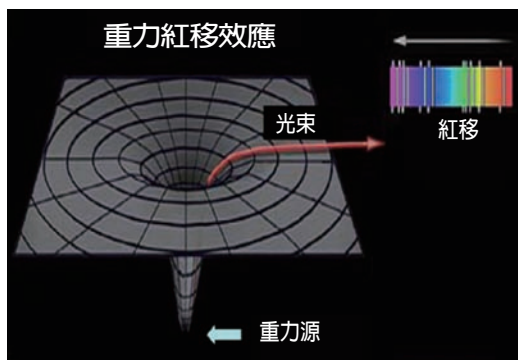
白矮星重力場的重力紅移效應，早在廣義相對論提出之後不久就被觀測到了，此後科學家相繼在太陽及地球的重力場測量到重力紅移效應。

利用各式各樣大型天文望遠

經過 140 億年的宇宙膨脹，宇宙背景輻射除了冷卻成為微波輻射外，它的本質不曾有所改變，因此今天我們探測到的宇宙微波背景輻射，可以讓我們直接觀察 140 億年前宇宙的模樣，從而窺探宇宙誕生約 38 萬年後的初期狀況。

鏡測量星系的分布，人類逐漸開始了解宇宙的結構。整個宇宙由數以億萬計的星系組成，它們大致平均分布於宇宙中。但許多星系密集聚成星系團，形成星系團間的大尺度結構，它們的存在使我們對宇宙單純的看法變得更複雜，迄今我們對宇宙結構的起源仍然只是一知半解。

當宇宙熱輻射從宇宙誕生約38萬年後的宇宙最後散射面出發，穿越星系間的大尺度結構來到現在的地球時，宇宙物質不均匀的分布會透過重力紅移效應，印記在宇宙微波背景輻射的溫度各向異性上。微差微波射電儀記錄的宇宙微波背景輻射各向異性的結果，就是測量到宇宙物質大尺度結構在重力場上所引起的微小波動起伏，這些物質密度微小的起伏是宇宙大尺度結構和星系形成的起源。



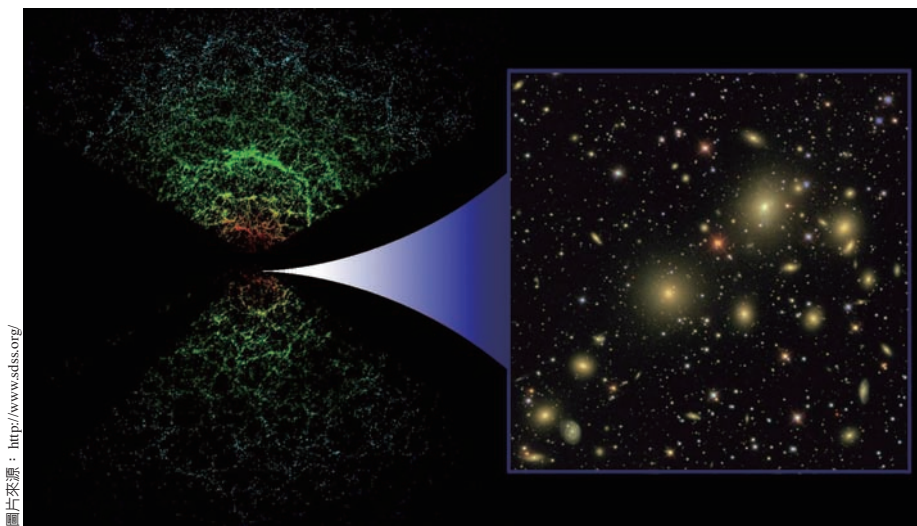
重力紅移效應，圖中網狀曲線代表重力源所產生的重力場分布。

因此，初期宇宙的物質分布大致均勻，僅有些微的起伏，星系、地球、人類之所以能出現、存在，就是這些小小的不均匀所造成的。物質密度較高的地方重力較強，會吸引其他能量朝此聚集，經過一百多億年，就會形成星球、星系。而物質密度低的地方，物質被吸走，成為星系之間的廣大太空。這個星系形成的起源，跟大霹靂理論所預測的結果相當吻合。

後續的研究

宇宙背景探索衛星探測宇宙微波背景輻射各向異性的結果，是研究初期宇宙的轉捩點，也促使宇宙微波背景輻射的理論研究和測量技術的發展進入黃金時期。微差微波射電儀的微波天線接收機，對著天空時的角解析度不是很高，大約只有7度，就是這樣把微波天空分割成好幾個像素，來測量宇宙微波背景輻射的大尺度各向異性。

若要仔細觀測宇宙背景輻射的最後散射面，以獲得更多關於初期宇宙的訊息，得增加接收機的解析度，把微波天空分割成更多個像素。可是，個別實驗的觀測時程有限，像素的數目越多，每個像素被觀測的時間便減少了，以致儀器的雜訊干擾了原本的訊息，因此只好發展更精密、低雜訊的接收機。從宇宙背景探索衛星發射升空到現在，可說是歐美各國競相研發高精密、低雜訊接收機



圖片來源：<http://www.sdss.org/>

2003年，史隆數位天空調查（Sloan Digital Sky Survey）觀測到六萬多個星系的分布圖。

2006年10月在夏威夷毛納洛峰正式舉行落成典禮的宇宙微波背景輻射陣列望遠鏡，是由中央研究院和台灣大學合作研製的，未來將觀測宇宙微波背景輻射穿越星系團所產生的溫度差異，探尋星系團的結構及宇宙的演化。

的戰國時代，確實帶動了整個微波測量技術的發展。

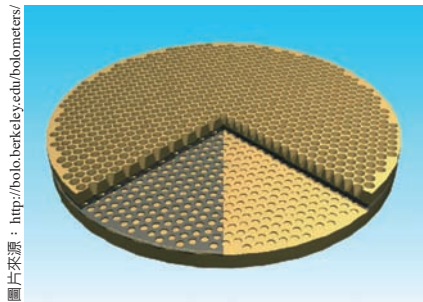
繼宇宙背景探索衛星之後，觀測宇宙微波背景輻射在小尺度的各向異性，如雨後春筍般蔚為風潮。由於宇宙背景探索衛星的任務非常成功，美國航空暨太空總署在2001年發射另外一枚叫魏金森微波各向異性探測器（Wilkinson Microwave Anisotropy Probe，簡稱WMAP）的科學衛星，專門觀測宇宙微波背景輻射在小尺度的各向異性。今年3月魏金森微波各向異性探測科學團隊發表了首3年的觀測結果。

這個高解析度的宇宙微波背景輻射各向異性圖，可以讓我們清楚地看到，在宇宙誕生約38萬年後的宇宙最後散射面，它蘊藏著許多關於宇宙初始狀況的信息，科學家們可以據此精確地推算出宇宙的年齡、宇宙膨脹的速度、宇宙物質和暗物質的成分及密度等。

歐洲太空總署（ESA）也將於2007年發射一枚叫作普朗克（Planck）的科學衛星，觀測宇宙微波背景輻射在更細小尺度的各向異性。因此，宇宙學已進入一個新的紀元，其目標就是要更精確地測量上述的宇宙參數，來檢驗各別不同的宇宙理論模型，最後描繪出宇宙的真相。

我國參與現況

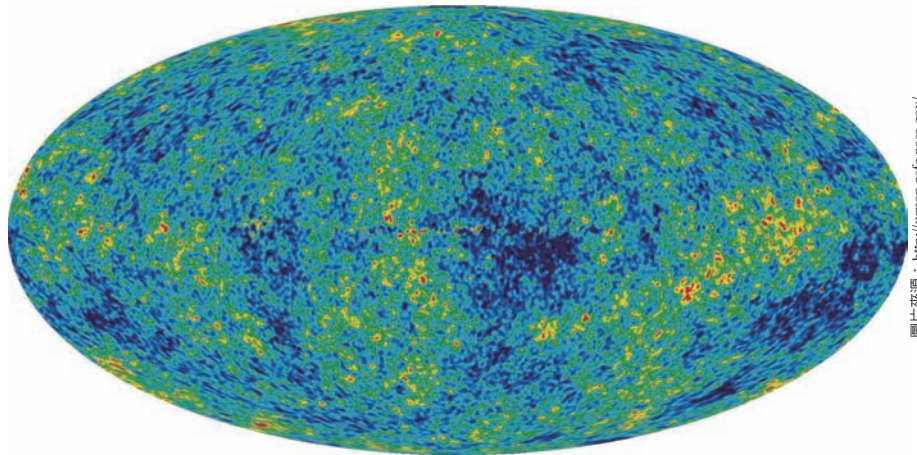
國內在10年前開始策劃宇宙微波背景輻射的研究觀測，當年中央研究院天文所魯國鏞所長（中央研究院院士，現為美國國家電波天文台台長）積極整合國內宇宙學領域的科學及技術人才，並且遊說國外



美國加州大學柏克萊分校宇宙觀測組研製中的高精密接收機，上層是角形天線陣列，下層是積體測輻射熱計，可同步觀測宇宙微波背景輻射，大大增強了接收機的靈敏度。



由台灣研製、座落在夏威夷毛納洛峰上的宇宙微波背景輻射陣列望遠鏡（AMiBA）。



魏金森微波各向異性探測器（WMAP）觀測宇宙微波背景輻射各向異性的首3年結果，圖中的解析度比宇宙背景探索衛星的結果好上三十多倍。

專家共同參與研究宇宙微波背景輻射的計畫。去年（2006）10月在夏威夷毛納洛峰正式舉行落成典禮的宇宙微波背景輻射陣列望遠鏡（AMiBA），就是由中央研究院和台灣大學合作研製的，未來將觀測宇宙微波背景輻射穿越星系團所產生的溫度差異，探尋星系團的結構及宇宙的演化。

最後，筆者想指出，這些研究主要是為了探尋宇宙的起源，雖然對民眾生活沒有直接影響，但科學家為了追求大自然的奧秘與滿足好奇心，所研發出來的新技術和創造出來的新科學，日後必會對人類生活的進步有所幫助。 □

吳建宏

中央研究院物理所