

早期宇宙的實驗室：宇宙微波背景

文/郭兆林

A. 引言

在開始談宇宙微波背景前，我們先來回想一下 1920 年物理學的狀況。當時，電磁學與重力理論已經各自成爲完整理論，並且經由實驗一再證實。另一方面，在原子世界出現許多新穎的現象，完全無法以古典物理學理解。在這種狀況下，物理學家是應該尋求電磁學與重力理論在形式上的統一，或是在量子現象的迷霧中摸索前進呢？眾所周知，愛因斯坦選擇了前者，而波耳、海森堡、鮑立等人選擇了後者。愛因斯坦當然清楚物理界正面臨驚天動地的量子革命，他所希望的，是統一後的電磁學與重力理論將會推導出所有量子現象，甚至所有基本粒子都可以用統一場的奇異點表示[1]。不幸的是，愛因斯坦的夢想並沒有實現，他花了三十年的光陰，進展卻十分有限。而另一方面，波耳等人以實驗爲依歸，一開始看似毫無頭緒的現象逐漸歸納出法則，一開始醜陋而武斷的法則逐漸變爲精簡而一貫的力學定律，最後終於帶給我們極其成功，能夠描述所有基本粒子的規範量子場論。

現在，在種種天文學觀測的幫助之下，我們已經知道宇宙中有 70% 的質能是類似宇宙學常數的暗能量，剩下 30% 的物質中有超過 80% 是所謂暗物質，除了重力之外似乎不具有其他交互作用。更有許多證據顯示，極早期宇宙在暴脹場驅使之下，歷經所謂的暴脹時期。「暗能量」、「暗物質」、「暴脹場」，這三種物質或是現象的本質究竟爲何，物理學家沒有確切概念，這不禁讓我回想到 1920 年代的量子迷霧。我們當然盼望數學物理學家們，有朝一日能憑藉數學美感一舉解決暗物質、暗能量、暴脹場等糾結的謎團，並提出一個優雅的答案，不過以歷史爲鑑，我們不應該完全放手讓他們去幹。宇宙微波背景輻射正是物理學家能夠用來探究基本物理的現象學利器。本文簡單

介紹宇宙微波背景輻射，行文不以大霹靂或暴脹時期出發然後隨宇宙年齡演進。我避免了一般常使用的全知敘述觀點，希望這麼做能夠較爲真實地反映出宇宙物理觀念在歷史上與邏輯上的進展。

B. CMB 的發現與早期研究

當我們抬起頭望著夜空，所看見的是許多點狀的恆星、由密密麻麻的恆星組成的銀河、以及一些稱爲星雲的模糊斑點。幾百年以來的天文學，幾乎就等同於利用光學望遠鏡針對這些天體的研究。1930-40 年代電波天文學先驅 K. Jansky 與 G. Reber 等人發現在 10-200 MHz 的頻率（約爲 FM 收音機的頻率），天空看起來完全不同，閃亮的恆星一一消失，最亮的天體是銀河中心、超新星殘骸、以及所謂電波星系。現在我們知道，更高頻的微波波段的天空，更是完完全全不同的光景。首先在微波波段向天上看，是貝爾實驗室的 A. Penzias 與 R. Wilson。兩人在 1965 年將以液態氦（4.2 K）精確校準過的 4.1 GHz（波長爲 7.3 cm）天線接收機，避開銀河平面對準天頂，結果測到額外的噪訊。他們發現此噪訊相當於絕對溫度 3.5 ± 1.0 K 的黑體所產生的熱起伏，均勻佈滿整個天空[2]。Princeton 大學的物理學家 R. Dicke 知道這項消息後，立刻知道兩人發現的是 Gamow 等人所預測的熱霹靂餘音，宇宙起源的證據[3]。這個訊號很適當地被稱爲宇宙微波背景輻射（Cosmic Microwave Background Radiation，以下簡稱 CMB）。Dicke 不僅是傑出的理論物理學家，同時還是個儀器方面的天才。他發明了 Dicke 閘（Dicke switch），讓訊號遠離低頻的 $1/f$ 雜訊，成爲現代的鎖相放大器（lock-in amplifier）的前身。Dicke 也率先發現電波天文學中最重要靈敏度定律： $\Delta T = T_{\text{sys}} \sqrt{t \Delta \nu}$ 。公式中的 ΔT 爲靈敏度、 t 爲觀測時間、

$\Delta\nu$ 電波頻寬， T_{sys} 稱為天線的系統溫度，包括來自接收機本身的雜訊溫度 T_x 以及環境的貢獻。在 Penzias 與 Wilson 發現 CMB 時，Dicke 與他的學生 D. Wilkinson 等人正在建造一具安裝有 Dicke 閘以及液態氮校準源的 3 cm 波長微波接收機，目標正是尋找 CMB！

Penzias 與 Wilson 意外發現 CMB 的過程，以及 Dicke 得知被搶先後的失望，是廿世紀科學史上非常膾炙人口的故事，可與 DNA 雙螺旋結構的發現相提並論。不幸的是，在以訛傳訛之下許多人產生了誤解。首先，兩人並非貝爾實驗室的電波技師，而是科班出身的天文物理學家，分別自 Columbia 與 Caltech 獲得博士學位，他們當時的最大興趣是高銀河緯度的微波輻射。其次，許多人誤以為「意外」等於「僥倖」，然而實驗家都知道相對量測容易，絕對量測卻極度困難。兩人在短短一頁論文中所描述的種種謹慎測試，足以讓現代電波天文學家冒冷汗。

當物理學家發現一個新的物體或現象時，總是會從各個方面來研究它。這些基本研究並不見得是為了解明或檢驗某個特定理論，而是比較接近於出自好奇的基本探索。譬如說，當發現一個基本粒子時，物理學家立刻想知道它的質量、自旋、參與的交互作用等基本物理性質。要了解 CMB 的起源，並且從中發掘隱含的訊息，我們所需要的正是這種基本探索。既然 CMB 是一群光子的集合，物理學家必須要弄清楚的本質不外乎是其頻譜（光子能量分布）、均向性（isotropy，光子方向分布），以及偏極性質（polarization，光子的自旋分布）。Penzias 與 Wilson 在第一時間便做了這些測量，兩人很快就發現，在他們的誤差範圍內 CMB 的頻譜接近黑體輻射、均向、而且不具偏極。40 年來 CMB 的研究，仍然不脫這幾項基本性質。

C. CMB 的輻射頻譜

Hubble 在 1929 年從星系的紅移觀測發現宇宙正擴張當中。若堅持質能不滅定律，並將時間逆轉，會發現越久之前星系之間距離越近，這樣一來必定推論出

宇宙始於高溫的壓縮狀態，這就是大霹靂理論。反之，若不堅持質能不滅定律，同樣將時間逆轉，越久之前星系之間距離固然越近，但同時可以令它們質量越來越小，最後在碰在一起之前消失。這麼一來，整個宇宙就可以維持穩態而不必誕生於某一事件中。對於穩態宇宙論的支持者，宇宙背景輻射不是宇宙起源的證據。他們認為因為宇宙年代久遠（無限久），星際介質吸收星光重新發出熱輻射而形成「CMB」。巧的是，宇宙間所有星光的能量密度，與 3 K 黑體輻射的能量密度相差不遠，這更增加他們的信心。任何星際塵埃都具有化學特性，因此熱輻射一定會具有光譜特徵，然而若 CMB 源自宇宙起源的高溫，則它將是近於完美的黑體輻射。於是測量 CMB 的輻射頻譜成了區分大霹靂理論與穩態宇宙理論的重大關鍵。

1960 年代末期，Berkeley 的新科教授 P. Richards 焦急地找尋新的實驗題目。他已經在超導體、磁學以及超流體等領域做出卓越貢獻，不過邁射與雷射的發明正迅速地讓他使用的遠紅外線光譜學方法變成過去式。邁射與雷射的發明人 C. Townes（Penzias 在 Columbia 的指導教授）此時剛搬到 Berkeley，他告訴 Richards「你一定得來研究這個 CMB」。當時 Cornell 大學的 M. Harwit 等人的火箭實驗發現短於 1 毫米波長的背景輻射似乎超過 3 K 黑體輻射甚多，若這被證實為真，則大霹靂理論就出了問題。Richards 被說動了，於是開始投入心力研究 CMB 的頻譜。

根據 Planck 輻射定律，3 K 的黑體輻射光度會隨著頻率而增加，直到 250 GHz 以上開始隨頻率減少。要測試 CMB 是否為黑體，最好的辦法是在 250 GHz 以上做測量。在這麼高的頻率一般電波天文學的方法已經不管用，而 Richards 的遠紅外線專長正好可以發揮。在接下來的廿年當中，Richards 及其團隊在山頂、高空氣球、火箭進行 CMB 頻譜的測量。他們發現 CMB 強度的確在 250 GHz 以上就開始遞減，果然符合黑體輻射定律[4]。這個領域的高潮，是在 1990 年美國太空總署 COBE 衛星的 FIRAS 光譜儀團隊在美國物理年會公佈結果之際[5]。他們發現，CMB 是完美的黑體輻

射，其溫度為 2.73 K。一夕之間，大霹靂理論獲得廣大的支持，而穩態宇宙說則被打入冷宮。

大霹靂的其他重要意義，如宇宙初始的氦、氘（deuterium）含量，物質/反物質不對稱，平坦問題等，散見於其他書籍，如 S. Weinberg 所著的“The First Three Minutes”、J. Barrow 所著的“The Origin of The Universe”等（二書皆有中譯本）。在大霹靂的理論架構下，CMB 是怎麼產生的呢？宇宙起始於高溫的壓縮態，所有的物質都拆解為最基本的粒子「湯」，這湯的組成隨著擴張冷卻而持續改變。在創生的 30 萬年後，宇宙的溫度低到不再能支持游離氫，於是氫離子紛紛形成中性氫原子。對於光子而言，離子態的宇宙是不透明的，而原子狀態的宇宙則是透明的。於是當我們向宇宙深處看，視線便會落在宇宙從透明變為不透明的交界，這個交界稱為最後散射面（surface of last scattering），CMB 正是最後散射面所發出的熱輻射。CMB 溫度的異向性，帶著宇宙極早期物質分布的資訊，並幾乎原封不動地送到人們眼前，難怪 CMB 常被稱為宇宙學的羅塞塔之石了。

D. CMB 的均向性

CMB 既然是黑體輻射，每個方向的完整頻譜可以由其溫度單一參數完全決定。問題是，在天空不同方向的溫度是否完全一樣？這項性質稱為均向性（isotropy）。Penzias 與 Wilson 在發現 CMB 之時，就注意到它十分均勻，各個方向的強度都幾乎相同。這在第一近似下證實了愛因斯坦的宇宙學原理：宇宙在大尺度是均勻而且均向的。不過，現代宇宙學家知道這不可能完全正確。

首先，由於地球繞著太陽公轉，太陽繞著銀河中心旋轉，而銀河系等本星系團成員也與宇宙的靜止座標系相對運動。簡單的 Lorentz 轉換可以證明運動中的觀察者所見的黑體輻射亦為黑體輻射，而溫度則視運動方向、速度而有所增減。換句話說，Doppler 效應必定會在 CMB 印上偶極（dipole）溫度分布。耐人尋味的是，只要測量 CMB 的偶極，觀測者能夠知道自己

正在進行絕對等速運動，這乍看之下違反了相對論原理。這個論證甚至使一些著名物理學家認為 CMB 不會存在偶極溫度分布。1977 年 Lawrence-Berkeley 實驗室的 G. Smoot 等人將微波接收機安裝在 U2 偵察機上，確切地測到了 CMB 偶極大小為 3.5 ± 0.6 mK，決定了太陽系相對遠方質量的運動速度 390 ± 60 km/s。除此之外，偶極的發現再度證明了 CMB 源自宇宙尺度，而非來自銀河系或本星系群的局部輻射。

CMB 所代表的是宇宙早期的物質分布，而完全均勻的初始條件不可能演化出現在所見的星系結構。因此，除了觀察者本身運動所產生的偶極之外，CMB 必定還帶著現代星系群聚結構的「種子」。這個溫度異向性（anisotropy）應該有多大呢？早在 1946 年蘇聯物理學家 Lifshitz 已經計算出，在擴張宇宙下密度微擾會在重力作用下以與宇宙尺度成正比的方式增長。已知最後散射面的宇宙尺度為現在的 10^3 ，這代表著當時起伏的大小應為現在的 10^3 。由於現在星系結構的密度起伏與平均密度的比約為 1:1，因此 CMB 雖平滑，仍然應該具有大小約 10^{-3} 的溫度起伏，才能解釋現在所見的星系群聚結構。從 1965 年 CMB 被發現之後的 25 年間，在上文提過的 Wilkinson、Richards、Smoot 以及 MIT 的 R. Weiss 等人帶領的團隊的努力下，微波儀器日益靈敏，觀測方法日益精巧，已經將 CMB 溫度測量的精度推展到 10^{-4} ，卻仍然不見任何異向性。另一方面，理論家所預測的 CMB 溫度異向大小似乎總是在觀測上限之下，隨著觀測上限向下調整，他們的理論也往下修正，因此理論宇宙學家已經開始成為被揶揄的對象。

除了群聚結構的種子似乎過小的問題之外，CMB 的均向性還帶來了一項更大的問題。通常兩個物體溫度相同的原因，是在於它們曾經進行熱交換。然而，由於光速有限，在天空上兩個完全不同方向的 CMB，是由兩個不可能進行任何熱交換的早期宇宙區域所發出，用相對論的說法，兩個區域是在彼此的視界（horizon）外。那麼，它們的溫度為什麼會這麼接近？這個問題稱為視界問題。面對視界問題以及所謂的平

坦問題，1970 年代的理論家幾乎要訴諸人擇原理（anthropic principle）來解釋，這當然是投降主義的行為（簡言之，人擇原理的邏輯是「要不是這樣的話，你就不會再這裡問這個問題了」）。1980 年一位年輕的理論家 A. Guth 在聽了 Dicke 給的演講之後，想出一個解決方法。Guth 假設早期宇宙歷經一段暴脹時期，由於在這段時期宇宙的擴張超越光速，現在兩個看似遙遠的區域其實在暴脹之前是處於熱平衡。由於暴脹理論十分成功地解釋許多宇宙學問題，而且與粒子物理密切關係，於是很快地成爲早期宇宙理論的正宗。暴脹理論有一系列明確的預測：（1）宇宙的空間幾何非常平坦；（2）暴脹的量子起伏會造成初始微擾，其頻譜指數（spectral index）接近但略小於 1；（3）初始微擾爲絕熱微擾；（4）初始微擾的分布必須滿足 Gaussian 統計；（5）初始微擾包括純量與張量兩個部分，其中張量微擾的大小直接與暴脹場能量相關。以下將會談到，CMB 的測量已經印證了以上的 1-4 項，而且正積極準備測試第 5 項。

1992 年，在二十多年實驗家與理論家的努力、挫折、以及迷惑之後，COBE 衛星上的另一具儀器 DMR 終於偵測到 CMB 雜訊般的溫度異向性[6]。這個發現立即上了頭條新聞，被 Hawking 譽爲“若非有史以來最重大的發現，也可以說是本世紀最重要的發現”。CMB 溫度起伏之所以重要，不僅在於它代表著宇宙嬰兒時期的狀態、現在所見一切星系結構的「種子」；而且它本身的起源，更可追溯至大霹靂一瞬間的量子測不準效應。關於 COBE/DMR 的發展史可參閱 Smoot 個人記述的“Wrinkles in Time”一書。

CMB 溫度異向性通常以角功率譜（angular power spectrum）表示。角功率譜的概念和測量電壓訊號雜訊的一維度功率譜十分類似。若將天球上的溫度分布記做 $T(\theta, \phi)$ ，並將 $T(\theta, \phi)$ 以球諧函數 $Y_{lm}(\theta, \phi)$ 展開：

$$T(\theta, \phi) = \sum_{lm} a_{lm} Y_{lm}(\theta, \phi)$$

則我們可以定義角功率譜爲：

$$C_l = \langle \sum_m a_{lm}^* a_{lm} \rangle / (2l+1)$$

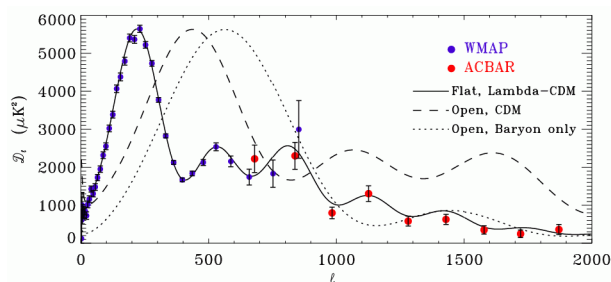
其中 $\langle \rangle$ 記號代表所有可能宇宙的平均。人們習慣重新定義 $D_l \equiv l(l+1)C_l/2\pi$ 爲功率譜。DMR 的解析度約爲 7 度視角，得以探測 C_l 或 D_l 至 $l=20$ 。DMR 發現，在大尺度的 CMB 異向性與 Harrison-Zel'dovich 功率譜（頻譜指數爲 1）相符合，而這正是暴脹理論的預測之一。

爲什麼 CMB 溫度異向性的大小不是 10^{-3} ？爲什麼簡單的廣義相對論微擾計算會失靈呢？在 1980 年代，天文學家在測量漩渦星系旋轉曲線時，終於發現宇宙學理論所缺少的關鍵要素—暗物質。現在我們知道，由於暗物質在宇宙中的比例比一般物質高很多，因此微擾結構在重力作用下的演化完全由暗物質決定，而在最後散射面的暗物質密度起伏的確是 10^{-3} 。但是我們所見的質子、電子等一般物質在當時與光子分布密切結合，其密度不均勻只有 10^{-5} 。換句話說，CMB 溫度異向性的大小強烈地、獨立地暗示暗物質的存在[7]。這一點常未受到應有的重視，舉例而言，試圖以 MOND（Modified Newtonian Dynamics）解釋漩渦星系旋轉曲線的人[8]，除了討論它是否滿足相對論協變性之外，也一定得想辦法解釋 CMB 異向性的種種性質才行。

在 DMR 測到 CMB 異向之後，許多理論家立即意識到它的無窮潛力：CMB 的計算雖然牽涉複雜的光子、暗物質、帶電粒子之間的電磁力與重力交互作用，卻是不折不扣的線性微擾理論，一旦所有的關鍵要素都齊全了，其性質是能夠精確預測的。若能在實驗上準確量測 CMB 的功率譜並與理論模型做比較，則可以反過來推算出重子、暗物質含量、宇宙的初始條件、空間幾何學等基本議題。從 1990 年至 1999 年的 10 年之間，可以說是 CMB 理論的黃金時期，在計算機的輔助、astro-ph 電子 preprint 的快速交流之下，CMB 的理論終於收斂，現在各個理論團隊所計算的功率譜已經精確到 1% 以內。對於 CMB 功率譜現象學比較詳細的非技術性介紹，讀者可以參照 Hu & White 於 2004 在 Scientific American 的專文[9]。在這裡以條列方式舉出幾項重大概念：

1. Sachs-Wolfe 平台：最後散射面的視界大小約為 1 度，因此大於 1 度的 CMB 異向性等於是「嵌」在物質分布當中，保留著初始微擾的狀態。若初始微擾屬於 Harrison-Zel'dovich 式，則寫成 $l(l+1)Cl/2\pi$ 的功率譜會形成斜率為零的直線，稱為 Sachs-Wolfe 平台。受限於解析力的 DMR 所測量的就是這個區域的異向性，而 DMR 在 $l < 20$ 所見的確為一平坦的功率譜。
2. 聲波振盪 (acoustic oscillations)：接近 1 度視角的 CMB 異向性開始進入視界，因此開始受重力與光壓影響而偏離初始微擾形式。若宇宙的空間幾何如暴脹理論所預測為平坦，則功率譜在 $l=200$ 之處會出現一個顯著的峰，在較高的 l 則會有這個峰的諧波出現。基波出現的 l 隨著空間幾何的改變而改變，因此測量這個基波的位置是測量空間幾何的一個好辦法。基波與諧波的相對高度可以告訴我們暗物質與重子的相對含量。2000 年 BOOMERANG 與 MAXIMA 兩個高空氣球實驗幾乎同時在接近 $l=200$ 處清楚測到這個基波的存在，證明宇宙為歐幾里德式平坦空間[10, 11]，這完全和 Ia 型超新星的觀測結果契合。這兩個 CMB 實驗的結果，宣告人們正式進入精準宇宙學的時代。
3. 耗散末端 (damping tail)：若宇宙的微擾種子是在最後散射面之前許久就已經種下（如暴脹理論所預測），則視角在半度以下的 CMB 異向會因為受光子擴散的效應而快速減弱[12]，耗散的尺度也可以用來決定重子與暗物質的含量。耗散末端在 2002 年首度由 CBI 干涉儀觀測到[13]，幾個月後 ACBAR 實驗也予以證實[14]。

CMB 溫度異向性的觀測後浪推前浪，是一個進展十分快速的領域，其現況可用兩個靈敏度最高的實驗總結：WMAP 與 ACBAR。美國太空總署的 Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) 是一具裝載有 20-90 GHz 微波共相放大器 (coherent amplifiers) 接收機的人造衛星，於 2001 年 6 月發射。該衛星於同年 10 月抵達地-日的第二 Lagrange 點 (L2)，開始進行觀測。WMAP 第一年的觀測分析成果於 2003 年初發



圖一：CMB 功率譜的理論與實驗比較。WMAP 與 ACBAR 清楚地觀測到聲波振盪的峰谷，以及 $l > 800$ 的耗散末端。實線模型代表平坦空間，由暗能量、暗物質，以及少量重子所組成的宇宙，這個模型不但被 CMB 實驗強烈支持，而且也與 Ia 型超新星、星系及星系團大尺度結構、初始氦含量等等的觀測吻合。長虛線為不具暗能量的開放式宇宙；點虛線為僅具重子的開放宇宙。

表。WMAP 的解析度和靈敏度都比 COBE 高出很多，因此它能夠測量功率譜至 $l=650$ 左右。WMAP 的功率譜精確地顯示了 Sachs-Wolfe 平台以及前兩個聲波振盪峰，在與理論比較之後再度確認 1999 年開始為人所知的事實：宇宙具有平坦的空間幾何、由暗能量、暗物質，以及佔很小比例的重子（質子、中子）所組成；初始微擾的頻譜指數十分接近而略小於 1、符合 Gaussian 統計，正如暴脹理論所預測。WMAP 所定出的準確宇宙學參數衝擊既大而廣，現在最佳的微中子絕對質量上限即是 WMAP 與星系結構巡天計畫 SDSS 所設下。研究基礎物理的理論家紛紛設法從 WMAP 的資料的蛛絲馬跡（例如頻譜指數偏離 1 的方式）中尋找新物理；而關心星系生成、星球演化的天文物理學家，終於可以將背景宇宙學的演化這項不確定的因素剔除，直接採用 WMAP 的宇宙參數而專注在星際介質、回饋等機制上頭。在觀測結果發布的兩年半以來，平均每天有 3-4 篇論文引用 WMAP 的資料。

Arcminute Cosmology Bolometer Array Receiver (ACBAR) 利用極為靈敏的毫米波熱度計 (millimeter-wave bolometers) 作為偵測器，在 150 GHz 的波段以位於南極的 Viper 望遠鏡進行 CMB 異向性的觀測。由於望遠鏡的口徑大 (2m)，觀測頻率高，因此 ACBAR 的解析度遠勝於 WMAP。ACBAR 的資料證明了先前 CBI 的結果，清楚地顯示了高 l 的 CMB 角功率譜受光子擴散效應急速減小。目前在 $800 < l < 3000$ 範

圍的 CMB 測量就屬 ACBAR 最為靈敏[14]。ACBAR 在結果發表之後至今又累積了兩年的數據，預計將會再度大幅改進中高 l 的 CMB 功率譜量測。

歐洲太空署的 Planck 衛星，預計在 2008 年發射。該計畫結合高靈敏度的熱度計、高解析度、以及人造衛星計畫的全天域能力，預期將會取代 WMAP 與 ACBAR，提供最靈敏的 CMB 溫度異向性測量。

E. CMB 的偏極

在前文中提過，偏極是光子最基本的性質之一。Penzias 與 Wilson 在 1965 年的文章中報告，在他們的誤差範圍 (10%) 內 CMB 並不具偏極。1968 年 M. Rees 指出，CMB 的溫度起伏必定會透過 Thomson 散射而形成偏極[15]，不過這方面的理論進展接下來卻沉寂了幾十年。雖然尋找 CMB 溫度異向的實驗家們「順便」將偏極的上限向下推，1980 年 R. Weiss 撰寫 CMB 實驗回顧論文時，承認實驗家完全不知 CMB 偏極要從什麼視角尺度找起[4]。COBE/DMR 發現了 CMB 溫度異向之後，理論家才開始重新將注意力集中在 CMB 的性質。1996 年，兩個理論研究團隊幾乎同時做出一個具有基本重要性的發現。

線性偏極的電磁波可以用 Stokes 參數中的其中 3 個表示， I 、 Q 、 U 。其中 Q 與 U 用來量測偏極輻射的大小以及方向。 Q 與 U 視座標定義而有所改變，所以不是很基本的偏極分量。宇宙學家發現[16, 17]，如果以偏極量的變化方向作為局部座標，將偏極分解為與變化方向平行以及與變化方向呈 45 度角的兩個分量（分別稱為 E-mode 與 B-mode），則依據簡單的鏡像對稱原理，線性的純量微擾完全不會造成任何的 B-mode 偏極。換句話說，要是觀測到 B-mode 偏極，等於是看到了張量微擾，也就是宇宙重力波背景。

在暴脹理論中，張量微擾直接由質能微擾所產生的重力波造成，而純量微擾的大小則與暴脹場的衰變率有複雜關係。因此，張量微擾的大小直接告訴我們暴脹場的能量，而其頻譜更可告訴我們暴脹場如何衰

變。由於暴脹場的能量在 10^{16} GeV 左右，傳統的加速器絕對無法直接加以研究。通常宇宙學家以符號 r 來表示張量微擾與純量微擾的功率比。根據現有的觀測，我們知道 $r < 0.3$ ，也就是說 CMB 異向性有一大半以上是純量形式的微擾。

最主要由純量微擾產生的 E 偏極，是 CMB 物理的必然結論。如同溫度功率譜，在視角小於 1 度的 E-mode 偏極具有聲波振盪所形成的峰谷。2002 年，在 CMB 發現的 37 年後，在南極觀測的 DASI 團隊首度偵測到 CMB 的 E-mode 偏極[18]。隨後 WMAP、CBI、CAPMAP、BOOMERANG 也都偵測到符合理論預測的 E-mode 偏極量。WMAP 與 DASI 在大尺度的 E-mode 偏極量測暗示初始微擾是絕熱型微擾 (adiabatic perturbations)，這再度與暴脹理論的預測吻合。然而，受限於靈敏度，現有的 E-mode 資料僅在於證明宇宙學家對於 CMB 的了解是正確的，而未能進一步限制宇宙參數。至於宇宙重力波背景所造成的 B-mode，更是實驗家積極探求的目標。因此，CMB 偏極的精確測量是非常重要的實驗領域。本文接下的篇幅將會討論偵測 CMB 偏極，特別是探測 B-mode 偏極的方法，以及實驗家所面臨的挑戰。

F. CMB 偏極的觀測與未來展望

偵測微波波長的光子有兩種完全不同的方法。首先，從 Jansky 至 Dicke、Penzias/Wilson，COBE、DASI、CBI、WMAP 這一路下來的電波天文學傳統採用共相放大器來增強電磁波訊號，然後再以平方律偵測器將已經放大的電磁波轉為與天線溫度成正比的電壓訊號。由於共相放大的技術在低頻率比較容易，幾十年來隨著科技的進展，共相放大器越來越向高頻發展，現在已經涵蓋微波波段。共相放大器的最大優點，在於它可以維持波的相位資訊。若將來自不同天線帶有相位信息的訊號相乘，可以形成干涉儀，不但增加解析度也改進增益穩定性。另一方面，Richards 等出身遠紅外線物理學的實驗家採用熱度計，直接把微波光子當作能量偵測。由於短波長光子帶有較大的能量，

因此這些物理學家必須將已在遠紅外線建立的技術推展到「低頻」的微波波段，也就是要減小熱度計的熱傳導常數，並將偵測器冷卻到 0.3 K 以下。由於共相放大器保留相位資訊，因此其靈敏度受限於量子力學的測不準原理。用上文提到過的接收機雜訊溫度 T_x 來表示，靈敏度的絕對限制為 $T_x > h\nu/k$ (ν 為頻率， h 為普朗克常數， k 為波茲曼常數)。直接偵測器無法用來建造干涉儀，不過其最大好處，在於它不受量子靈敏度限制。

從 CMB 的發現到現在，實驗方面的進展多半是以「質」取勝。實驗家想辦法控制儀器的系統誤差（利用 Dicke 閘、鎖相偵測技術、或干涉儀），以所知的物理原理增加每個偵測器的靈敏度（降低偵測器溫度與微波負載），想辦法到最好的觀測環境進行實驗（南極、智利、高空氣球）。現在，這個時代已經接近尾聲。DASI 與 ACBAR 已經在地球上最好的觀測點（南極點）實驗，每個偵測器單元也都逼近理論極限。然而，B-mode 偏極的偵測卻需要進一步改善這些實驗的靈敏度達 10 倍甚至 100 倍之多。於是，CMB 實驗現在進入了以「量」取勝的時代—用最多偵測單元的儀器才有希望成為贏家。極度渴求靈敏度的 CMB 干涉儀的最大技術困難與成本來源，在於計算來自不同天線訊號乘積的關聯器（correlator）。由於現有的干涉儀已經接近技術瓶頸，B-mode 偏極的測量幾乎不可能來自基於共相放大器的干涉儀。進行中的 CMB 干涉儀計畫有 Chicago 大學的 SZA、Cambridge 的 AMI、以及台灣的 AMIBA 等，這些實驗多將主要目標放在由星系團所產生的 CMB 次級效應（SZ 效應）。

Princeton 大學的 CAPMAP 實驗[19]以共相放大器做為偵測器，並使用大直徑碟形天線來提供所需的解析力。在該實驗中，共相放大器的增益不穩定問題由混波器（hybrid）與高頻鎖相調變（modulation）改善。雖然目前 CAPMAP 實驗不似 CBI 或 DASI 靈敏（參見表 1），但由於它不受限於關聯器，因此 CAPMAP 的觀測策略有極大的改進空間。CAPMAP 的團隊與 CBI 團隊合作提出 QUIET 實驗計畫[20]，預計在 CBI 位於

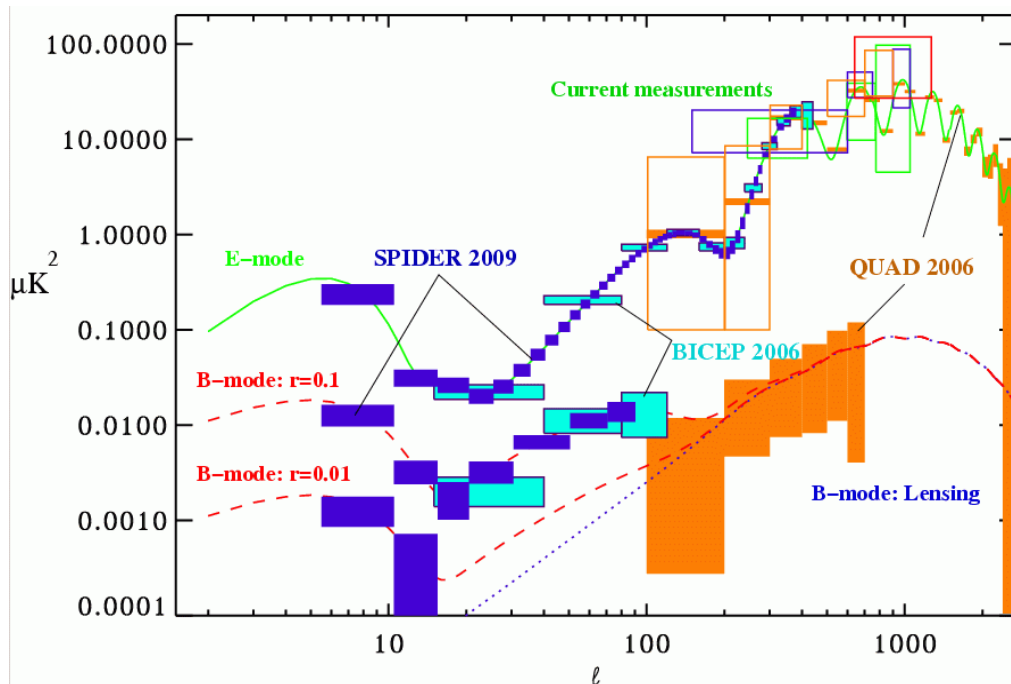
智利的觀測架台上設置 2-3 具約 2 米的反射鏡，每具望遠鏡裝設數以百計的共相放大器封裝偏極單元。QUIET 現在仍在企畫階段，根據預測在完成後它將有機會測到 B-mode 偏極。

在 30 GHz 運作的 CBI 與 DASI 是當前最成功、最靈敏的 CMB 干涉儀，兩實驗並提供了最早的 E-mode 偏極量測。不過由於關聯器的技術瓶頸，CMB 實驗家開始紛紛放棄干涉儀，而轉向其他技術。這些干涉儀計畫所留下的觀測架台、台址、以及富有經驗的團隊都是很重要的資源。CBI 與 CAPMAP 的合作（QUIET 計畫）是一例，DASI 與 QUEST 的合作則是另一例。QUEST at DASI，簡稱 QUAD，是一具安裝在 DASI 架台的 2.6 米反射望遠鏡[21]。QUAD 接收機安裝有 31 個使用熱度計的微波偏極單元，在比較之下，先前的 BOOMERANG 只用了 4 個偏極單元，卻在短短幾天的觀測時間內便偵測到 CMB 的 E-mode 偏極（表 1）。QUAD 已於 2005 年 2 月開始在南極觀測，預計能夠精確量測在 $200 < l < 2000$ 範圍的 E-mode 偏極。至於在這個尺度的 B-mode 則受限於重力透鏡的非線性效應干擾而無法清楚測得（圖二）。QUAD 的姊妹計畫 BICEP[22]則有 49 個熱度計偏極單元，以直徑 25 cm 的聚乙烯折射鏡提供約 1 度的視角解析力。BICEP 望遠鏡已經運抵南極，預計於 2006 年初開始觀測，將在兩年的時間內精確量測 $20 < l < 400$ 範圍的 E-mode 偏極。BICEP 是接下來幾年中對 B-mode 最靈敏的計畫，其解析度與巡天區域是依理論預測的 B-mode 偏極功率譜而設計，若天文前景能夠控制住的話，BICEP 可望偵測 B-mode 或將 B-mode 限制在 $l < 0.1$ 以下。

如果 $l < 0.1$ ，則實驗就得大幅增加偵測器數目至上千個單元，以便達成 B-mode 偏極所需要的總靈敏度。QUIET 的封裝偏極單元是一個辦法，不過共相放大器受限於量子極限而無法在 90 GHz 以上進行有效觀測。若要大幅增加不受限量子極限的熱度計的偵測單元數目，人們則必須放棄以一個個場效電晶體（FET）讀取的半導體鍺（Germanium）熱度計，而改用以 SQUID 讀取的超導相變偵測器（TES, transition edge sensors）。

由於 SQUID 本身的雜訊極低，一次讀取多個 TES 偵測器也不會影響靈敏度。SPIDER[23]、EBEX[24]、POLARBEAR[25]就是朝這個方向發展的 CMB 偏極計

畫。SPIDER 最特別的地方在於它計畫繪製半個天空的 CMB 偏極，尋找宇宙重游離化在極大視角 ($l < 15$) E 與 B 功率譜所形成的隆起 (圖二)。



圖二：CMB 偏極實驗比較。空心方塊為來自 DASI、CBI、CAPMAP 與 BOOMERANG 的現有測量，實心方塊為三個實驗 (QUAD、BICEP、SPIDER) 的預計靈敏度。最上方的理論曲線為 E-mode 偏極功率譜，兩條長虛線如標記所示為當 $r=0.1$ 的 B-mode 與當 $r=0.01$ 的 B-mode；點虛線是單是重力透鏡產生的 B-mode。圖中可見 $l > 200$ 的 B-mode 是由重力透鏡效應產生，這對於重力波背景的量測是個干擾。BICEP 與 SPIDER 在大尺度進行觀測以便避開此一干擾。

表一：CMB 偏極實驗比較。表中的前 4 個實驗已經有結果發表，而以*註記的計畫尚未獲得補助。靈敏度與年份以斜體字表示者為預估值。DASI、CBI、以及 AMIBA 為干涉儀，CAPMAP 與 QUIET 使用共相放大偏極器 (coherent amplifier)，而其他計畫使用熱度計 (bolometer)。干涉儀的瞬時解析單元數的計算法為緊密陣列安排下，primary beam 中的 synthesized beam 數目。BOOMERANG、EBEX、SPIDER 為高空氣球計畫，觀測時間約為 10 至 25 天，其他計畫皆為地表實驗，可觀測幾個月或 1-2 年。表中可看出 7 個天線單位的 AMIBA 靈敏度略遜於 CAPMAP 計畫，而 13 個天線單位的 AMIBA 則略勝 CAPMAP。

CMB 偏極 實驗與屬性	CMB 頻段 (GHz)	解析度 (角分)	單元靈敏度 ($mK_{\text{cmb}} \cdot \sqrt{s}$)	瞬時解析 單元數	PI 機構	年 (西元)
DASI	30	21'	1.8	94	Chicago	2000-2004
CBI	30	6'	1.3	54	Caltech	2000-2005
BOOMERANG	145	12'	0.15	8	Caltech	2003
CAPMAP	40, 90	6', 4'	2.4	32	Princeton	2002- (觀測中)
QUAD	90, 150	6', 4'	0.4	62	Stanford/Cardiff	2005- (觀測中)
BICEP	90, 150	60', 40'	0.35	98	Caltech	2006
AMIBA-7	90	4'	3.8	30	ASIAA/NTU	2006
AMIBA-13	90	3'	2.0	54	ASIAA/NTU	2007-2008
EBEX	150	8'	0.12	660	Minnesota	2008
QUIET*	40, 90	21', 9'	0.4	1952	Chicago/JPL	>2009
POLARBEAR*	90, 150	5', 3'	0.4	2000	Berkeley	>2009
SPIDER*	90, 145	60', 40'	0.12	1280	Caltech	>2009

當然，除了以數量取勝，B-mode 偏極的測量還有其他挑戰。在 CMB 與我們之間有許多天體，而且太陽系所處的銀河系多多少少也會發出偏極的微波輻射。由於這些輻射的來源都在 CMB 之前，因此統稱為天文前景 (astronomical foregrounds)。天文學家對於微波頻段的偏極所知不多，因此要區分天文前景與真正的 CMB 的方法，只能同時在許多頻率進行觀測，藉由 CMB 的黑體頻譜性質，與同步輻射、塵埃熱輻射等輻射機制區隔。一般咸認要真正無疑問地偵測到 B-mode 偏極，至少要在 3-4 個微波頻段進行高靈敏度觀測才行。此外，由於 B-mode 的偏極量實在太小，儀器本身的多種偏極效果都要小心列入考慮。天文前景、儀器偏極效果、偵測器發展策略等等考量可在參考文獻[26]中找到。

G. 結語

CMB 頻譜、溫度及偏極異向性帶有龐大的宇宙學資訊。與其它的基礎物理與天文物理領域相比，CMB 實驗所耗費的資源不多，卻做出極重大貢獻。藉由理論與實驗的比對，我們已經開始了解宇宙的幾何、組成成分、演化，以及創生。這些問題不僅具有基本重要性，也對基礎物理學有廣泛的衝擊。在粒子加速器逼近技術與資源極限之後，基本物理學的前緣將仰賴宇宙學觀測，而 CMB 偏極的量測將是其中非常重要的一環。

參考文獻

- [1] Einstein, A., "The Meaning of Relativity", Appendix II.
- [2] Penzias, A. & Wilson, R., "A Measurement of Excess Antenna Temperature at 4080 Mc/s.", 1965, ApJ, 142, 419
- [3] Dicke, R. H. et al., "Cosmic Black-Body Radiation", 1965, ApJ, 142, 414
- [4] Weiss, R., "Measurements of the cosmic background radiation", 1980, ARA&A, 18, 489

- [5] Mather, J. C. et al., "A preliminary measurement of the cosmic microwave background spectrum by the Cosmic Background Explorer (COBE) satellite", 1990, ApJ, 354L, 37
- [6] Smoot, G. et al., "Structure in the COBE differential microwave radiometer first-year maps", 1992, ApJ, 396L, 1
- [7] Vittorio, N. & Silk, J., "Fine-scale anisotropy of the cosmic microwave background in a universe dominated by cold dark matter", 1984, ApJ, 285L, 39
- [8] Bekenstein, J., "Relativistic gravitation theory for the modified Newtonian dynamics paradigm", 2004, PhRvD, 70h3509
- [9] Hu, W. & White, M., "The Cosmic Symphony", 2004, Scientific American, February issue.
- [10] deBernardis, P. et al., "A flat Universe from high-resolution maps of the cosmic microwave background radiation", 2000, Nature, 404, 955
- [11] Hanany, S. et al., "MAXIMA-1: A Measurement of the Cosmic Microwave Background Anisotropy on Angular Scales of 10° - 5° ", 2000, ApJ, 545L, 5
- [12] Silk, J., "Cosmic Black-Body Radiation and Galaxy Formation", 1968, ApJ, 151, 459
- [13] Pearson, T., "The Anisotropy of the Microwave Background to $l = 3500$: Mosaic Observations with the Cosmic Background Imager", 2003, ApJ, 591, 556
- [14] Kuo, C. -L. et al., "High-Resolution Observations of the Cosmic Microwave Background Power Spectrum with ACBAR", 2004, ApJ, 600, 32
- [15] Rees, M. J., "Polarization and Spectrum of the Primeval Radiation in an Anisotropic Universe", 1968, ApJ, 153L, 1
- [16] Kamionkowski, M. et al., "A Probe of Primordial Gravity Waves and Vorticity", 1997, PhRvL, 78, 2058

[17] Seljak, U. & Zaldarriaga, M., "Signature of Gravity Waves in the Polarization of the Microwave Background" , 1997, PhRvL, 78, 2054

[18] Kovac, J. et al., "Detection of polarization in the cosmic microwave background using DASI" , 2002, Nature, 420, 772

[19] Barkats, D. et al., "First Measurements of the Polarization of the Cosmic Microwave Background Radiation at Small Angular Scales from CAPMAP" , 2005, ApJ, 619L, 127

[20] <http://quiet.uchicago.edu/>

[21] http://www.stanford.edu/group/quest_telescope

[22] http://www.astro.caltech.edu/~lgb/bicep_front.htm , 2005 年 10 月起改名為 Robinson Gravitational Wave Background Telescope

[23] http://www.astro.caltech.edu/~lgb/spider_front.htm

[24] <http://groups.physics.umn.edu/cosmology/ebex>

[25] <http://bolo.berkeley.edu/polarbear>

[26] Weiss, R. et al., "Task Force on Cosmic Microwave Background Research" , July 11, 2005

作者簡介

郭兆林

美國柏克萊加州大學天文物理學博士，現於加州理工學院擔任博士後研究員。

E-mail: clkuo@astro.caltech.edu

健仁氣體股份有限公司

一個以服務為經營宗旨的氣體經銷商

給您一個完整的氣體資訊 讓您的使用更安全



提供-----

工業用焊接氣體、醫療用、排氣
測試用氣體、各種比例混合氣、
各類稀有特殊用氣體 N_2O WF_6
 Xe LHe Ne SiH_4 Kr 等

【歡迎來電洽詢】

各類氣體相關零配件
液態低溫容器 壓力容器
新竹縣竹北市泰和里博愛街

760 巷 6 號

電話: (03) 5516256

傳真: (03) 5551732