

知識天地

淺談宇宙微波背景輻射

蔣龍毅副研究員（天文及天文物理研究所）

宇宙微波背景輻射（CMB）是宇宙大霹靂所留下的餘暉，形成於大霹靂三十八萬年之後，係宇宙最古老的輻射。宇宙微波背景輻射隨著宇宙接下來138億年的膨脹，溫度逐漸降低，當我們測量到時溫度只有絕對溫度3K左右，因此又常被稱為3K背景輻射。CMB的發現十分意外且極富戲劇性。早在1940、50年代以Gamov為首的科學家就根據大霹靂模型計算出宇宙餘溫溫度，但理論鮮為人知。在1950年代Emile Le Roux 以及 Tigran Shmaonov 都分別在他們的博士論文提及量測到不知名電波，其溫度為 $3 \pm 2\text{K}$ （於波長33cm）以及 $4 \pm 3\text{K}$ （於3.2cm）。1960年代中期，Panzias和Wilson兩位科學家測試隸屬貝爾實驗室的高靈敏度微波號角型天線，他們排除了已知雜訊，甚至清除天線上的鴿子糞，可是無論他們怎麼調整天線指向，全天24小時都可以測得此具同向性的（isotropic）雜訊。至此，他們才意識到此微波雜訊非源自於地球，亦非由特定的天體所發出。但比起前面2位研究生幸運的是，他們把這個消息傳到在Princeton大學的Dicke教授。Dicke本身研究宇宙起源，且當時也在建造相似的望遠鏡準備量測CMB，他立即知道被搶先一步，兩人所發現的正是Gamow等人所預測的大霹靂餘暉，宇宙起源的證據。Panzias及Wilson隨後在1974年摘下諾貝爾物理獎桂冠。在接下來的數十年經過科學家不斷在理論及電波儀器上的進展，1992年NASA Cosmic Background Explorer（COBE）偵測到CMB的黑體輻射特性以及溫度異向性（anisotropy），也就是在3度K有著約萬分之一的起伏，這個發現立即搶佔了國際各大媒體頭條，被劍橋大學霍金教授譽為「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」。COBE的計畫主持人Smoot及Mather在2006年獲頒諾貝爾物理獎。為何量測到CMB的黑體輻射及溫度異向性如此重要呢？這就要從大霹靂理論談起。

在大霹靂理論，宇宙極早期經歷了暴脹（cosmic inflation），約自 10^{-36} 秒宇宙膨脹呈現指數增長。暴脹把原先已達成熱平衡的區域膨脹，致使我們今天能看到CMB同向性。極早期宇宙隨著溫度下降，宇宙經歷了許多相變過程，產生許多基本粒子如夸克、膠子等。溫度繼續下降到一定程度後，強子如中子和質子開始出現，接著輕子如電子、微中子出現，電離態的氫和氦逐步形成。此時輻射和物質緊密耦合在一起成為由充滿著電子、質子及光子交互作用的「光子-重子電漿組成」。此時的宇宙處於不透明狀態，因為光子只要走一小段距離，立即被散射。電漿在重力以及光壓互相拉扯形成了類似受阻滯的簡諧運動，稱為聲波振盪（acoustic oscillation）。隨著宇宙的膨脹，溫度降低至3000K，絕熱冷卻導致電漿的能量密度降低，電子質子結合成氫原子，自由電子減少使得光子自由的在太空中旅行，導致物質與輻射脫耦合（decoupling）。此時宇宙從大霹靂開始歷經了大約38萬年才變得透明，早期宇宙演化的特徵就印記在CMB，所以CMB溫度分佈圖就好像是宇宙嬰兒時期的照片。這些CMB光子隨著宇宙持續膨脹，波長被拉長至微波波段，但仍保有黑體輻射特徵，到達地球時溫度已經降至2.726K。

從理論觀點，太初的物質密度分佈是來自暴脹所放大的量子擾動，而CMB光子在脫耦合之前與物質耦合，故CMB應具備量子擾動的高斯統計特性。根據高斯隨機場理論，CMB因其高斯特性，CMB異向性分佈可藉由功

率頻譜完整描述。從光子重子流體的線性微擾理論出發，加上例如空間的曲率、暗物質比例及宇宙的初始條件等基本參數，我們可以得到在不同宇宙參數下的功率頻譜，與量測到的實際CMB頻譜兩相比較，宇宙的模型便清晰呈現。

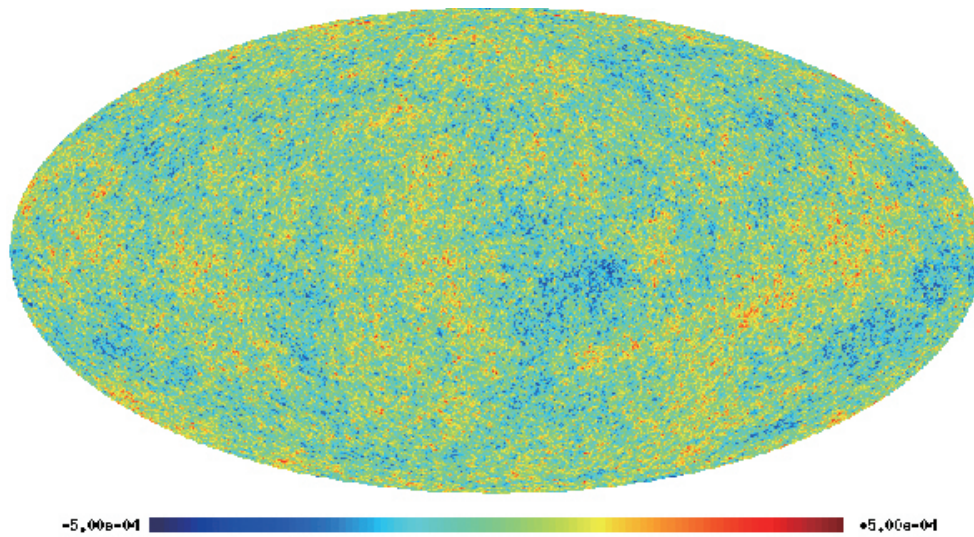
繼COBE之後，許多探空氣球實驗及地面儀器皆致力於量測CMB。其中最值得一提的是如COBE全天域觀測的太空計畫：NASA於2001年發射的Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP)，以及ESA於2009年發射的普朗克衛星(Planck Surveyor)。WMAP的五個波頻涵蓋 23-94千兆赫，Planck衛星上則具有低頻儀 (LFI) 涵蓋 30-70千兆赫波段及高頻儀 (HFI) 涵蓋100-857千兆赫波段總共9個波頻，讓研究團隊可以將背景輻射的訊號，跟各式的銀河前景噪音(foreground)分離開來。更重要的是，WMAP的角解析度及靈敏度都遠比COBE來的高，而Planck具備前所未有的高解析及高感光度，其中7個頻道具備測量偏振訊號的儀器，更是讓量測CMB到達前所未有的精確水準。

WMAP及Planck衛星各自量測到的CMB皆確認當今宇宙標準模型：即包含有宇宙常數之冷暗物質模型。在此模型下，所求得宇宙年齡各為 137.72 及137.98億年，分別含有4.6%及4.9%一般物質，24.0%及26.8%暗物質和71.4%及68.3%暗能量。雙方各自測量到的宇宙膨脹常數（也稱哈伯常數）為70.4及67.8（公里/秒）/百萬秒差距，且CMB異向性分佈滿足高斯隨機場所具有之高斯特性。由於Planck的高解析度以及較寬波段的觀測，Planck結果更排除了旋轉宇宙模型（Bianchi VII-h模型），以及宇宙弦的存在。

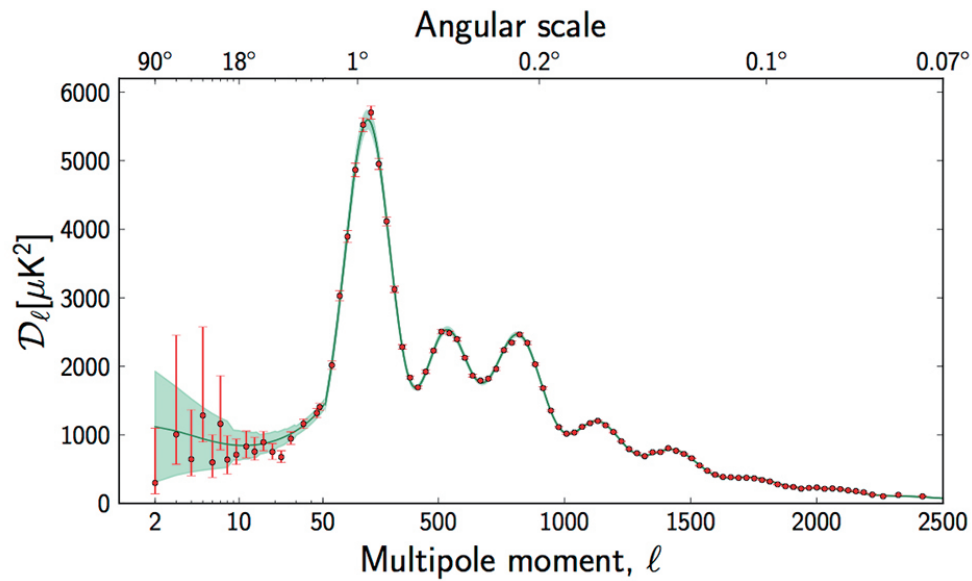
雖然標準模型幾乎能描述我們所觀察到的宇宙，WMAP及Planck還是發現一些無法解釋的異常，例如在波江座附近的冷斑點（Cold Spot），以及大尺度之溫度波動強度過低等。冷斑點於天空中跨幅約為滿月的20倍，顧名思義在此區域的CMB溫度比高斯隨機場所預期的還低上0.00015K。雖然此過低溫度亦可純屬隨機，但發生的機率大約只有1/200。因其跨幅甚巨，自2003年發現以來一直都沒有令人滿意的解釋。另一個令科學家困惑的是在功率頻譜上四極矩的強度偏低。其他異常還有太空兩側的溫度波動並不對稱，四極八極矩方向指向同一方向等。這些異常雖然都尚未解決，但隨機出現多落在1/200-1/500的機率，不足以讓科學家推翻現有之標準模型。

CMB另一個特性是偏震性。偏振是光子最基本的性質之一，一般任何偏振模式可以被分為兩部分：E-模式包括徑向（radial）及角向（azimuthal）偏振，B-模式則形成右旋或者左旋偏振。CMB的溫度起伏與物質耦合，光子在脫耦合的瞬間透過湯普森散射而形成E-模式偏振，在視角小於1度的E-模式偏振在功率頻譜上具有如聲波振盪所形成的波峰波谷。而B-模式除了藉重力透鏡能由E轉化外（僅在小尺度），另一個則是宇宙暴脹期間的重力波。因大尺度B-模式偏振只能由太初重力波產生，而B-模式偏振強度可分辨不同的暴脹模型，所以測量CMB的B-模式偏振成了檢驗暴脹理論的最佳利器。不過由於我們不清楚暴脹訊號有多麼弱，加上許多前景偏振噪音，測量著實不易。2014年BICEP2團隊宣稱測量到大尺度的B-模式偏振訊號，但由於在無從得知前景噪音強度而估算錯誤，後來與Planck團隊合作，得出所測量到的B-模式大部分來自於銀河系具偏振特性的灰塵。

CMB的重要性可比擬破解古埃及文字的羅賽塔石碑，其溫度及偏振異向性之統計特徵及功率頻譜包含豐富的宇宙訊息。相較於其他天文物理領域，CMB實驗所耗費的資源不多，卻在我們對宇宙的了解極有貢獻，我們更期待在不久的將來，CMB偏振訊號的量測可將大霹靂理論最後一塊拼圖-暴脹理論完整拼湊起來。



圖一 Planck所量測之溫度異向性分佈（單位 K）。影像上的色彩細微變化代表背景輻射在2.725K的微小溫度起伏。根據大霹靂理論，這些對應著早期宇宙物質分佈的細微差異，是現今我們所觀測到的星系、星系團以及宇宙大尺度結構的種子。



圖二 Planck 所量測之溫度異向性功率頻譜。在角度1度以內所看到的波即為聲波振盪。波的位置以及振盪幅度皆受到宇宙曲率及暗物質比例等之宇宙參數影響。