

本院1998年年輕研究人員著作獎得獎人 研究成果簡介

宇宙微波背景輻射 —早期宇宙的化石

吳建宏

物理研究所副研究員

廣義相對論最重要的結果之一是愛因斯坦方程式，它把時空的扭曲與物質的分佈聯繫起來。1910年代，宇宙學家們應用愛因斯坦方程式來探討宇宙的動力學，結果得到一個不斷在膨脹或收縮中的宇宙。後來到了1920年代，天文學家哈伯陸續發現遙遠的星雲有紅移現象，慢慢引證了宇宙膨脹學說。

當然，我們對宇宙的了解，今非昔比，近三十年來，大型的天文望遠鏡如雨後春筍，尤其是前幾年昇空的哈伯太空望遠鏡(HST)，更能窺視遙遠的星系。我們除了利用天文望遠鏡繼續測量星系的紅移現象、和描繪星系間的大區域結構外，還採用微波天線來探測「大霹靂」遺留下來的熱輻射背景。1963年，宇宙微波背景輻射初次被發現；1992年，宇宙背景探索者(COBE)衛星負載之DMR探測儀測量到由宇宙物質分佈不均而指印在背景輻射之各向不同性，這些宇宙物質的密度微擾是大區域結構和星系形成的起源。記得數年前當COBE DMR探測到宇宙微波背景輻射的各向不同性時，宇宙學家雀躍萬分，甚至比喻此項發現為「看見上帝之手」。此項發現，不但使「大霹靂模型」又多了一根基石，更可以間接測試「暴脹宇宙論」。

首先讓我們對「大霹靂宇宙模型」(Big Bang Model)作一個初步的了解。早期的宇宙，是一個體積小但能量高達 10^{19} GeV ($1 \text{ GeV} = 10^{13} \text{ K}$, K為絕對溫度)的火球，如果我們採信粒子物理的理論，那時候構成宇宙物質的基本粒子，包括輕子(即電子和微中子等)、夸克子、光子、膠子和介子等。因為那時候的溫度極高，它們都處於熱平衡狀態中。當宇宙不斷的膨脹，溫度不斷的下陷時，較重的粒子會陸陸續續的衰變成較輕的粒子。當宇宙的溫度降到1 GeV時，夸克子—膠子離漿便會產生相變，合成為強子，這些強子絕大部份是重子—質子和中子。除此以外，宇宙中還有剩下來的輕子和熱輻射。當宇宙的溫度再降到1 MeV時，質子和中子會產生核反應，製造出輕核子D、 ^3He 、 ^4He 及 ^7Li 等，此個階段叫做「大霹靂核合成」(Big Bang Nucleosynthesis)。溫度到了大約1 eV時，輕核子會吸取電子合成為輕元素；整個宇宙亦同時變成透明，意謂熱輻射中止被物質散射，而變成自由的黑體輻射(我們因此叫此個時刻為「最後散射面」)。再經過一百多億年的演變，宇宙中的輕元素不斷聚集，成為今天我們觀察到的星團、星系和星系集團等；剩餘的黑體輻射就是我們所謂的「宇宙微波背景輻射」，它現在的溫度大約是3 K，幾乎接近絕對零度。所以，我們偵測宇宙微波背景輻射的特性，不但可以直接窺探早期宇宙的最後散射面，還可以推算熱輻射經過一百多億年的旅程後，由宇宙物質的大區域密度微擾所引起的重力紅移。

總括來說，宇宙學家現在大致上有了一個宇宙的圖像，他們認為構成宇宙的物質，除了上述的物質外，還有所謂的冷黑暗物質(Cold Dark Matter)，它可能佔了宇宙總物質的八成以上，並對大區域結構的形成具有決定性的作用。再者，如果我們相信「暴脹宇宙論」，它不但可以一併解決許多「大霹靂模型」內含的宇宙難題，也預測了今天的宇宙是非常平坦的（即是說宇宙的總能量密度剛好等於臨界密度）；並且在早期宇宙暴脹時期所產生的能量密度微擾有一特定的階譜，不同的階譜對大區域結構的形成或宇宙微波背景輻射的各向不同性等會有不同的影響。目前，大部份宇宙學家都信相所謂的平坦CDM模型：宇宙是平坦的，重子物質的能量密度佔了宇宙總能量的百分比 Ω_B 滿足 $\Omega_B h^2 \approx 0.01$ （ h 是無單位的哈伯常數，定義為 $H=100 h \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ ，此關係式是根據「大霹靂核合成」的理論，與測量宇宙輕元素分佈的結果而來），其他的物質是非重子性的冷黑暗物質—如超對稱粒子、重微中子、或軸子等。一般相信 h 值大約是0.5，所以 $\Omega_B \approx 0.04$ ，即是一般我們所熟悉的物質祇佔了宇宙全部物質的4%，其他96%都是未知道為何物的黑暗物質；從平坦CDM模型，我們亦可以算出宇宙的年齡大約是一百三十億年，這個理論值與觀測一些星團壽命的結果大致相符。所以，有了觀測的結果和理論的輔助，宇宙學已漸漸進入一個定量的階段；我們相信以COBE及其後續的背景輻射探測儀的高精確度、HST的強大探遠能力和其他在進行中的天文觀測等，宇宙學將會進入一個新的紀元，其目標就是要準確地測量宇宙參數，如宇宙年齡、哈伯常數、和物質密度等等，來測試各別不同的宇宙模型，最後描繪出宇宙的真貌。

當COBE DMR發表探測到宇宙微波背景輻射的各向不同性的結果後，許多論文探討此各向不同性的來源。COBE的測量有一個特性，就是它的微波接收器的孔徑很大，亦即是它的分辨率較低，所以只能探測到大區域性的各向不同性。除了一些細節上的差異外，大家都一致認為COBE的大區域各向不同性是大區域度規的起伏對微波背景產生重力紅移的現象。目前，只有「暴脹宇宙模型」才可以製造出大區域度規的起伏。可是，大區域度規的起伏有兩種，一種是能量密度微擾，另一種是重力波，光靠COBE的結果是不可以分辨出來的。R.L. Davis et al.指出要分辨這兩種起伏有兩種方法。其一是測量小區域性的各向不同性：因為重力波有別於能量密度微擾，它是色散的，所以不會引起小區域性的各向不同性。其二是研究此兩種起伏會不會對微波背景產生不同的極化性。

隨即，大部份的人力集中研究第一種方法，並且發現微波背景小區域性的各向不同性的特點，跟宇宙參數有關。例如，美國太空總署(NASA)在2000年發射昇空的MAP宇宙微波探測衛星，將會測量小區域性的各向不同性，預料可以準確地判斷不同的宇宙參數。當時，我跟博士後吳家樂對這個題目很感興趣，但覺得研究這方面的人太多了，競爭太激烈，於是，我們便決定轉投入研究微波背景的極化性。

上面提到，微波背景的大區域各向不同性，是因大區域能量密度微擾或重力波引起的；而微波背景的小區域各向不同性，則是當宇宙背景輻射離開最後散射面時留下來的。在電磁學裡，我們知道當單一光子被電子散射後，會被極化的；但如果入射光的強度是各向

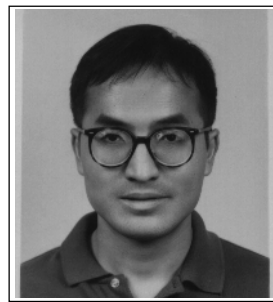
相同的，則散射出來的光並沒有極化性。所以，當帶有各向不同性的宇宙背景輻射離開最後散射面時就會被極化。上面亦提到，經過最後散射面後，整個宇宙變成透明。但是，一般認為在宇宙結構形成初期，所釋放出的熱輻射可以把整個宇宙再游離化。此時，宇宙背景輻射可以與游離電子有更多的散射機會，而產生相當程度的極化。

微波背景各向不同性的計算，主要是去解輻射傳遞方程式；而計算極化性則更為複雜，要多加上一個湯臣散射項，一般需要大量計算機的運算。1993年初，我們嘗試利用長波極限去解傳遞方程，幸運的得到一些簡單的結果。這些結果當然只適用於大區域的極化性。我們的初步結論有二點：第一，利用微波背景大區域的各向不同性和極化性，不可能分辨出大區域度規的起伏是來自能量密度微擾或重力波；第二，若宇宙的早期經過一段再游離的時期，大區域的微波背景會有相當程度的極化，根據極化的程度，可以回推宇宙再游離的歷程。之後，陸續有其他的研究結果出現，它們大抵與我們的結果吻合。當時，美國布朗大學P. Timbie教授（現已轉到威斯康辛大學）旗下的實驗小組正計畫探測微波背景大區域的極化性。我們便幫忙計算他們所用的探測器的預期訊號。

爲了有更精確的結果，我們緊著開始用數值的方法去解碰撞性輻射傳遞方程式。這個時候，微波背景極化性方面的研究已經慢慢多起來。我們首先精確地計算出微波背景大區域的極化性，修正了以前的近似計算，並進一步指出重力波的重要性。這些結果後來得到M. Zaldarriaga et al.與M. Kamionkowski et al.的佐證，他們甚至提出一個嶄新的方法去研究微

波背景的極化性。

現在我們知道，微波背景的極化程度，無論是大區域性或抑是小區域性，頂多是各向不同性的十份之一，亦即是只有百萬份之一的極化性。要測量如此微弱的訊號，其困難度可想而知。但是，人類探尋宇宙奧秘的好奇心，並未因此而卻步。除了美國NASA MAP的探測外，歐洲太空總署(ESA)亦計畫在2006年發射PLANCK衛星，測量宇宙微波背景輻射的各向不同性和極化性。到那時候，我們對早期宇宙將會有突破性的了解。



吳建宏

學經歷：

國立台灣大學物理系
學士(1984)

美國明尼蘇達大學物

理學博士(1989)

本院物理研究所博士後研究助研究員(1992-97)、副
研究員(1997-迄今)

氫原子與鑽石表面的作用

張煥正 林景泉

原子與分子研究所副研究員

一般人對鑽石的瞭解是它是世間最強硬的物質，可以作切割之用，它亦能抗化學腐蝕，價值高於珠寶，但對科學家而言，鑽石具備了其它物質所沒有的特點：高光穿透率，高熱傳導度及高電阻係數，在常溫時，鑽石的熱傳導度是銅的五倍，電阻係數是 $10^{13} \Omega\text{cm}$ ，爲非導