

知識天地

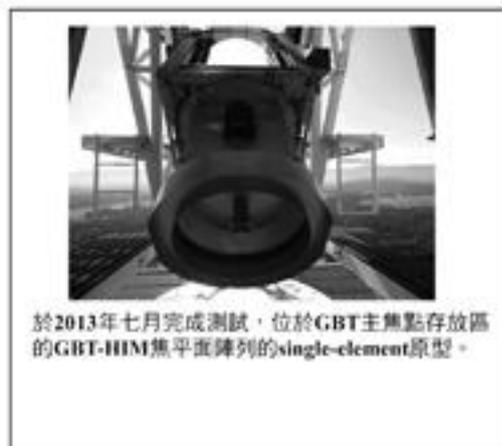
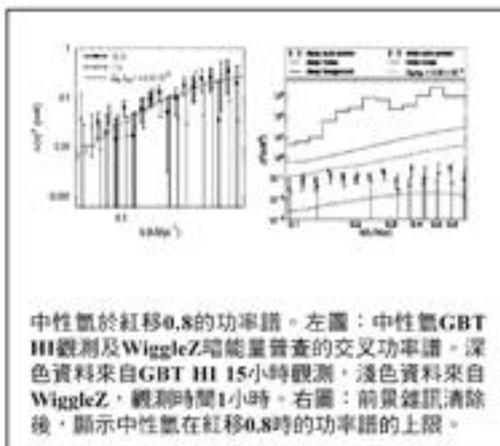
21厘米重子聲學振盪測量

張慈錦助研究員(天文及天文物理研究所)

“重子聲學振盪”(Baryon Acoustic Oscillation, BAO) 在最近十年來已成為一個強大的探測宇宙學工具。它是宇宙早期在光子及重子分佈所留下的烙印：在宇宙復合 (recombination) 發生之前，宇宙處於高溫高密度的電漿游離狀態，光子藉由湯普生散射 (Thomson Scattering) 與質子緊密連結，任何原始的密度微擾可在這由重子與光子組成的介質中傳遞，而傳遞的速度則為此介質的聲速。直到紅移 $z \sim 1100$ ，當宇宙因膨脹逐漸降溫到3000度，質子可與電子結合成為中性氫原子，光子得以自由傳播，成為我們熟知的宇宙背景輻射，此即為前述之「宇宙復合」時期。而此電漿介質不再存在，密度微擾的傳遞即突然停止。此事件在光子與重子的分佈留下一個明確的烙印，其尺度直接對應到此電漿介質聲速可傳遞的最大距離，即宇宙在 $z \sim 1100$ ，或大霹靂後380,000年，聲速的視界 (sound horizon)。從原子物理以及我們對宇宙能量密度的了解，宇宙復合的聲速視界已可準確獲知，在共動座標系約為 ~ 150 Mpc，或5億光年，這成為宇宙學的一把標準尺。

重子聲學振盪在宇宙背景輻射的光子分佈留下了這個大尺度的烙印，形成宇宙背景輻射功率譜的波動特徵；同樣地，重子聲學振盪在宇宙大尺度結構物質分佈也留下了相同的烙印，成為大尺度結構物質功率譜的波動特徵。利用史隆巡天 (SDSS) 的眾多星系及其分佈，此波動特徵在2005年第一次在低紅移被測量到 (Eisenstein et al. 2005)，並從此成為探測宇宙學的重要工具。主要原因即為我們可利用由星系構成的大尺度結構，測量此波動特徵被觀測到的角尺度，而正因為此烙印是一把標準尺，即我們能確切知道此烙印相對的實際物理尺度，所以我們可直接測量宇宙在不同紅移的幾何！更進一步，從廣義相對我們知道宇宙的幾何是由宇宙的質量能量密度所決定，而在低紅移，暗能量主宰宇宙的質量能量密度。因此，利用重子聲學振盪此現象，我們可以測量暗能量的性質！在不同紅移測量重子聲學振盪現象，我們可得知暗能量性質隨紅移，或隨時間之變化。這對暗能量的研究有根本的影響。

目前，除了史隆巡天之外，WiggleZ 與 BOSS 這二個大型巡天計劃已更精準的測量到重子聲學振盪的訊跡。同時，有更多更強大的巡天計畫，甚至衛星計劃正積極的興建準備中，包括本所參與的跨國Subaru Sumire Prime Focus Spectrograph (PFS)計畫，eBOSS, HETDEX, DESI, Euclid, WFIRST 等計劃都在為重子聲學振盪及暗能量測量而努力。



以上計畫的概念，均是利用可見光，紅外線波段光源來偵測一個個星系的位置，收集上百萬星系來描繪出大尺度結構，進而進行重子聲學振盪的測量，非常煞費苦心且昂貴，而且這些實驗可能遭受類似的困難及系統誤差。我與我的合作者正致力開發一個新的方向：我們主張使用中性氫發出的21公分電波輻射，利用三維強度繪圖作為測量大尺度結構的有效途徑。

氫原子是宇宙中最豐富的重子元素，中性氫的基態自旋反向超精細躍遷是一個低能量，在譜線上相對孤立且光學薄 (optically thin) 的躍遷，在靜止座標其躍遷能量相對為1.4GHz 或 21公分的無線電波輻射。只要它的自旋溫度與宇宙微波背景的溫度解耦 (decouple)，則可觀測到21公分輻射相對於宇宙背景輻射的發射或吸收，理論上，最遠可觀測到 $z \sim 150$ ，這是非常驚人的高紅移，也將是我們對宇宙早期探測的唯一工具！由中性氫發出的21公分輻射有潛力能探測大部份的哈柏體積 (Hubble volume)，21公分宇宙學有可能徹底改變我們對宇宙的認識。

我們的估算顯示，以目前的技術和成本，利用21公分強度繪圖測量重子聲學振盪的實驗可以對暗能量的屬性產生很好的約束 (Chang et al. 2008)。利用世界最大可操縱的電波望遠鏡，也就是直徑100公尺的美國綠堤望遠鏡 (Green Bank Telescope, GBT)，我們進一步成功地展示了21公分強度繪圖的一系列觀測計劃的可行性 (Chang et al. 2010, Masui et al. 2013, Switzer et al. 2013)：在2010年，我們在Nature報導了中性氫和光學星系之間在 $z = 0.8$ ，10秒差距尺度的相關函數，這是測量到最高紅移的21公分發射輻射，也是第一次檢測21公分在強度繪圖機制的可行性。我們的研究結果顯示，在該紅移範圍內，適度氫含量的確存在，且中性氫確實可用來描繪大尺度結構。

我們更努力執行的是下一個步驟：我們取得更多的GBT觀測時間，普查中性氫紅移範圍 $0.5 < z < 1.1$ ，擴大了觀測天區，與WiggleZ暗能量普查的天區部分重疊。我們發表了中性氫與WiggleZ普查的交叉功率譜，以及中性氫功率譜的上限，如圖一所示。結合兩者，我們首次測量了中性氫在 $z \sim 0.8$ 的宇宙密度。

為了達到測量BAO的大尺度，我們正在建設一個七元件 (7-element) 的陣列接收器，如此一來，利用GBT我們可以更有效地擴大測量天區，可望加速21公分的紅移調查。由筆者所領導的這個GBT-HIM計劃，由中研院天文所的副研究員黃裕津博士及小組負責興建，並與美國國家電波天文臺合作，預計在2015年夏天開始觀測。圖二顯示GBT-HIM的單一元件的原型，在2013年7月在GBT上的測試成功。目前，多個實驗已計劃利用21公分強度繪圖的概念來測量暗能量，包含 BAOBAB, BAOradio, BINGO, CHIME, Tian-Lai，而後二個競爭實驗已在興建中。

我們已經開拓21公分的強度繪圖的領域作為宇宙論的探測工具，從提出理論架構和預測，執行先導觀測計劃以驗證理論概念，並且首次用綠堤望遠鏡偵測到紅移值0.8的21公分譜線。更進一步的數據分析，精準測量21公分在紅移值為0.8的功率譜，以及接收器的興建，都正在進行中。我們希望這個計劃在不久的將來能取得肯定的成果，成功導出暗能量在不同紅移的數值，並了解其性質！