

宇宙學的回顧及前瞻

闕志鴻
台灣大學物理系

(一)前言：

1999 年秋，美國太空總署在南加州舉辦一場學術研討會，對象為中高能物理學家，目的是為太空總署下世紀的重大科研方針做背書及暖身。研討會中太空總署做了一個重要的政策宣示，內容為宇宙學將是下世紀太空任務的重要科研主題，並且邀請中高能物理學家踴躍向太空總提出研究計劃。如果美國的科研活動還能在下世紀獨領風騷於國際科學界的話，此一宣示將是未來物理界脈動的重要指標。

(二)世紀末的回顧：

從 1970 末開始，粒子物理學發展出來的對稱破缺的概念迅速地應用在早期宇宙（能量尺度大約為 10^{16}GeV 上下）的演化。暴漲宇宙模型便是在這短短的幾年中得理論學家的廣泛回響。它解決了傳統大霹靂宇宙模型的一個嚴重缺失。在傳統宇宙模型中，整個宇宙從一開始就沒有機會互通訊息，也因此整個宇宙並沒有必要像我們觀測到的宇宙如此均勻，如此對稱。尤其在 1970 年代，天文學家已經知道各方向接收到背景輻射都非常接近黑體輻射，這對當時的天文學家而言是一個相當令人驚訝的現象。暴漲宇宙模型的重點為最早期宇宙的膨脹速率並不像傳統模型那麼快，也因此宇宙的各處有時間以光速互通訊息，互相調整相對的能量密度以達到

相當程度的均勻性及同向對稱性。當然，暴漲宇宙模型還解決了一些其他重要的問題，例如為何宇宙的總能量（膨脹動能加重力位能）如此接近零。從 1980 至 1990 年代陸續的背景輻射測量更指向背景輻射確為均勻黑體輻射。

但是奇妙的是，我們觀測到周圍的大小星系均是從宇宙能量密度的不均勻度發展出來的產物，因此背景輻射一定有這些能量不均勻度的痕跡。當時各方學者的預測均認為測到背景輻射中的不均勻度是遲早的事。主要的論點為背景輻射是宇宙紅位移 $Z=1000$ 時的遺跡，但是在 $Z=5$ 時已經有 quasar 出現了。Quasar 相信是大型的黑洞，它通常存在於星系的核心中。因此，在 $Z=1000$ 時能量不均勻度不能太小，不然 quasar 便沒有足夠的時間產生。

如眾所望，1990 年代初美國太空總署發射的 COBE 衛星終於測到背景輻射的不均勻度。它的溫度變化約為十萬之一。這是角度十度的平均值。COBE 後續幾年的較小角度測量發現溫度變化升為約二萬之一左右。背景輻射的溫度變化隨角度而變是可預期，因為暴漲宇宙模型亦預測宇宙能量密度的微擾強度與尺度的關係。的確，較小尺度的微擾較強，並且增強的程度與觀測到的增強程度相當吻合。但是，這僅是象的一腳。雖是如此，這個結果卻是宇宙學幾十年來的一大進展，終於有一張可依循的藍圖繼續探索這個深奧的宇宙起源的問題。

從 1990 初到今年，不到十年間，宇宙學與暴漲宇宙模型之間的關係卻有數度戲劇性的起伏變化。背景輻射並非觀測宇宙學的唯一對象。X-射線也可用來偵測我們附近幾億光年方圓內的宇宙。特別是星系團中的高熱氣體可發出 X-射線，也因此星系團為 X-射線天文學家建構大尺度結構的一個重要棋子。當理論學家還沈醉在後 COBE 時代暴漲模型的勝利呼聲時，X-射線天文學者迅速地提出一個警訊，宇宙中的物質能量密度不足以達到臨界密度，因此暴漲模型中的另一重要預測（平宇宙）面臨嚴重的挑戰。其中的道理如下。星系團的大小約為一千萬光年，大到足夠當作一個小宇宙。X-射線的亮度可提供這些高熱氣體的總質量。從另一方面，我們亦可從氣體的密度分佈去推算星系團的重力位能，藉以求得星系團的總質量，或求得星系團中暗物質的總質量。氣體質量與暗物質質量的比值可視宇宙中這兩個成份的比例。但是在宇宙標準模型中，氣體的質量密度僅為宇宙臨界密度的百分之五。從此推論，宇宙中暗物質的密度僅為臨界密度的百分之二十。因此宇宙密度僅是臨界密度的四分之一。

面對這個挑戰，暴漲宇宙論的支持者兵分兩路各自提出反擊。一派的說法為暴漲模型可加以修正，提供一個宇宙常數可以存在的空間，因此宇宙常數亦可提供另外四分之三的能量密度來維持應有的平宇宙。另一派接受密度不足的事實加以修正原來的暴漲模型，使得低密度宇宙與暴漲可共存。這些修正使得暴漲模型失掉原來乾淨俐落的特性，原有的預測能力幾乎全失。

隨著電腦計算能力隨莫耳定律的急速增進，天文學家亦可同時檢測這些不同的宇宙模型如何產生

今日的星系。最近幾年的公論為原來的暴漲模型無法產生今日的星系分佈。反而上述的兩種修正模型較有機會產生今日的星系分佈。當然，因為這些修正使得未知的參數增多，也因此電腦模擬計算具有微調的空間來產生大多數人樂意見到的結果。

1998 年中的最重大的發現為何？根據美國科學雜誌的調查為「加速膨脹的宇宙」。此發現藉由觀測遠距離的超新星爆發而得。筆者於 1998 年的雙月刊對此發現已有介紹，因此不再重述。宇宙的膨脹行為和宇宙能量密度的形式有密切關係。普通物質（包括暗物質）由零維粒子構成，它只能讓宇宙的膨脹減速。但是宇宙常數可視為一個三維的場，它可使宇宙膨脹加速。

最近兩年的宇宙學研究方向朝著嘗試解釋宇宙常數這個場邁進。此場和 Higgs 場的機制類似，只是它的質量約為百分之一電子伏特。從這個角度切入，似乎中高能物理學家可有相當大的揮灑空間。在此，重要的子方向又可分為兩方面，一是如何解釋這個場的產生機制，一是如何以現有科技去直接探測這個場的存在。

除了宇宙常數場之外，今年物理界的新話題也可能在不久的將來和宇宙加速膨脹有牽連。今年方興未艾的重要話題為 4+N 維空間。這是復古的 Kaluza-Klein 模型的新扮相。其中 N=2 的款式最受矚目。在高維空間的理論裏，重力常數 G 的單位和四維空間的重力常數不同，也提供了一個很大的自由度來調整蒲朗克質量。高能物理界的理想是四種基本力的統一，但問題的癥結在於蒲朗克質量大得離譜，或重力常數小得離譜，使得這方面的嘗試都顯得牽強。但是有了多餘的空間維度，重力常數可調大，亦即蒲朗克質量調小。新舊蒲朗克質量之間

的關係大約為 $M_N^2 = M_o^2 / L^N$ ，其中 N 為多餘空間的維數而 L 為多餘空間的平均半徑。從各個不同(科學及非科學)的角度，人們可找出 M_N 的最佳值，它大約是未來加速器可達到的能量， 10^4GeV 。同時，多餘空間的半徑 L 不能太大，這也對 N 做了限制，例如，N=1 時，L 約為太陽系半徑。這個選擇不行，因為太陽系的動力行為符合 4 維空間的重力場。下一個選擇為 N=2。此時 L 的大小約為 0.1 至 0.01 公分。目前對重力場的檢測均未達這麼小的尺度(亦即量測 0.1 公分大小的物質的重力場)，因此這個選擇可行。當 N 再大時亦可，但將愈難測試。N=2 選擇有趣之處是 L 對應的能量也大約在百分之一電子伏特附近，因此多餘的二維空間可能可以扮演宇宙常數的角色。古典的 Kaluza-Klein 理論便是利用多餘空間的重力能量，使之於四維空間中顯出等效的大尺度力，並影響四維空間的演化。這個觀點就筆者所知目前尚無重要的工作在網路上出現，但這應是遲早的事。

(三) 下世紀前十年的展望：

就如同任何的實驗科學，宇宙學的實質進展依賴於實驗的結果。從天文物理的角度而言，背景輻射的進一步偵測仍是突破現狀的重要切入點，因為它保有 $Z=1000$ 時的歷史遺跡。其他波段的觀測也扮演重要的角色，如高解析度的 X-射線可進一步測量 $Z>1$ 的星系團，可見光的全天區深度觀測以建構星系的大尺度分佈等等。上述的各個波段在歐美已有重大的計劃正在規劃中，其中可見光的星系深度觀測(Sloan Digital Sky Surveys)已正在進行，預計兩年內完成。美國的 X-射線觀測衛星也已於 1999 年中

上空；歐盟的 X-射線觀測衛星也將於近幾年內執行任務。在背景輻射的量測上，美國將於近年內發射特定目標的衛星(MAP)來進行研究；歐盟也將於 2008 年發射另一衛星(PLANCK)來爭取領先地位。這些特定目標的實驗都可能隨時有突破性的發現，改寫宇宙學目前的面貌。

當然在這個群雄並起，各據一方的局勢裏，地面上的背景輻射實驗是有它不利之處。譬如，地球的大氣及地面對輻射的反射均是影響測量精確度(需達 10^{-6})的不利因素。但是地面的背景輻射實驗亦有它的優勢。譬如，它有較大的空間、時間及彈性來操控儀器，它所需的經費較小，可視當時科學進展做適時的調整，並且它可在短時間內做出重要的初步發現，讓後續的衛星觀測做收尾的工作。

目前美國加州理工學院在智利已經建造一個小型的無線電觀測陣列(CBI)，將進行小尺度背景輻射的觀測，它的結果將進一步對修正後的暴漲模型加以檢驗。另外加州柏克萊大學，加州理工學院及芝加哥大學將利用原有的無線電陣列針對早期星團做一系列的觀測。此構想目前正在規劃中，預計不久的將來也會執行。

早期星系團的觀測是有它對宇宙學重大的意義。因為早期星系團及背景輻射均保有對早期宇宙的共同記憶，保留各自不同的痕跡。背景輻射的主要微擾屬於大尺度的(角度大於半度左右)，而星系團屬於小角度的(角度介於一角分至半度之間)。除了利用 X-射線來測量星系團的高溫氣體外，毫米波段亦可用來偵測更早期的星系團。它的原理相當簡單。當背景輻射通過高熱氣體後，光子的能量均提升一些。從黑體輻射的光子分佈圖可得知，在低頻波段它將造成光子數減少(因為正斜率)，而在高頻

波段它造成光子數增多（因為負斜率）。這稱為 S-Z 效應。一般而言，S-Z 效應的觀測均選擇低頻波段，因此星系團對背景輻射具擋光的效果。更妙的是擋光的效應不因星系團的遠近而有太大的差別，這個優點比起 X-射線觀測好太多了。因為 X-射線測量發射光，越遠的星系團射的 X-光越弱，再加上宇宙膨脹紅位移的影響，X-光的亮度和 $(1+Z)^4$ 成反比。再大的望遠鏡口徑也追不上自然的定律。

除了 S-Z 效應外，地面無線電陣列觀測的另一個重要目標是測量宇宙大爆炸時重力波在背景輻射裏的痕跡。上述的 MAP 及 PLANCK 均無測量此方面的儀器，也因此 2010 年後背景輻射研究的標的將是重力波的痕跡。光子和重力波的散射會對光子的偏極產生一定程度的影響。因此若背景輻射的偏極微擾中存在特定的形式(pattern)，則可證實宇宙重力波的存在，也可用來檢驗暴漲模型，或其他新的模型。光子的偏極可用一個二維的向量場 \mathbf{P} 來代表，且 \mathbf{P} 是位置的函數。任何一個向量場均可分解為 $\mathbf{P} = \nabla\phi + \nabla\times\mathbf{A}$ ，前者無旋度而後者具有旋度。光子和電子的散射為雙極(dipole)作用，因此其偏極僅具前者。但光子和重力波的散射為四極作用，也因此能造成旋度。光子的旋度極化程度正比於重力波的強度，而極化 pattern 的尺度亦提供另一個訊息。這些不同的訊息均能用以檢驗不同的理論模型。

(四)結語：

以上介紹的僅是較顯著的理論問題，以及較顯著的實驗。就像所有的科學一樣，宇宙學重大的突破常常是依賴一兩個重要的實驗結果或理論的革新。但是這些舉足輕重的結果卻又往往是建立在多個小突破上。有時，重要的突破也並非是需要花費

鉅大的實驗。最近一兩年發現的宇宙加速膨脹便是一個明顯的例子。他們利用中型望遠鏡作有系統的長期觀測，搜尋遙遠星系的超新星爆發現象，進而得到宇宙的膨脹速度。這是個花費不大，但花時間的實驗。

宇宙學中另外的兩個大問題是暗物質的本質及反物質的遺失。礙於篇幅的關係，本文對這兩個問題均著墨不深。從理論的角度而言，目前高能物理界流行的超對稱粒子可能是暗物質的候選者。至於為何宇宙中物質密度遠大於反物質密度，理論上可從早期宇宙暴漲結束後的物質產生期間找到答案。這兩個主題的實驗均相當不容易做。偵測反物質世界的實驗將於幾年後在國際太空站上進行。台灣的高能實驗團隊在這個計劃中也扮演一個具相當份量的角色，目前也有初步的實驗結果。至於是否能如預期般偵測到反物質世界的蛛絲馬跡，這是值得大家拭目以待的。

歡迎刊登廣告

「物理雙月刊」是一份報導物理界動態發展之刊物，其內容深入淺出，涵蓋物理新知、物理專文、人物專訪、物理消息、研討會消息等專欄，為台灣物理界人士所熟知。若有需要，歡迎學校各系所或廠商利用本刊物刊登廣告，有意者請向物理學會李衷潔小姐聯絡。

TEL:02-23634923