

宇宙論新發現

朱明中

詹姆斯·皮布爾斯 (P. James E. Peebles) 教授作為邵逸夫天文學獎¹的首屆得主，絕對是實至名歸。皮布爾斯教授是現代宇宙學研究的先驅，他的工作為當今宇宙論理論及觀測研究打好基礎。近幾年來，宇宙學的突破性發現接踵而至，震撼整個科學界。美國最權威的〈科學〉雜誌亦評選宇宙學發現為去年最重要的科學突破²。本文簡介宇宙學近年的發展。

宇宙膨脹及大爆炸

一般人都會以為，時間和空間就像宇宙的大舞臺，人類、星辰、和所有其他物質，都只可以在其中活動，不能改變或影響空間的間格，或時間的進程。愛因斯坦於八十年前卻把這個幾千年的迷思打破了。根據他的廣義相對論，物質及能量把時間和空間扭曲，造成萬有引力。怎樣去明白時空的扭曲？愛因斯坦教我們想像空間及時間間隔，並在虛空中劃上刻度表明，就像齊整的網格，讓我們可以「看到」時空。相對論的要點是，這些本來均勻的網格在物質或能量周圍被拉扯變形，變得大小不一。例如接近物質的時間間隔比遠離物質長了，亦即時間的進程被拉慢了。而且宇宙的時空尺度大小可隨時間不斷變化³；情況就好比把代表時空間隔的網格劃在一個氣球的表面（見圖一）。當氣球膨脹或收縮時，網格的大小亦隨之而改變。愛因斯坦發現，他提出的廣義相對論竟然不容許一個恆常不變的時空。換句話說，宇宙必然在膨脹或收縮！這驚人的預測在幾年後得到觀測的印證。首先發現宇宙膨脹的便是著名的天文學家艾雲·哈勃 (Edwin Hubble)，他觀察到遠方的星系都以高速飛離我們的銀河系，而且愈遠的星系其退行速度愈高！既然宇宙在膨脹，我們不難推算出約一百四十億年前宇宙的所有物質都聚在很細小的時空裏，密度及溫度亦必然很高，這個宇宙原始火球不斷膨脹及冷卻，發展成為我們今天的宇宙。這就是著名的大爆炸 (Big Bang) 理論⁴。

大爆炸的兩個主要證據

除了宇宙的膨脹，是否有其他的證據，支持大爆炸理論？有！還有起碼兩項觀測證據 - 宇宙微波背景輻射及輕元素含量，而相關的理論基礎，都由皮布爾斯教授奠定。若果宇宙早期溫度真的很高，物質應放射大量輻射，就如同把一塊碳燒熱它便發光一樣。這些由原始火球發出的光充斥著整個宇宙，並遺留至今天，稱為宇宙背景輻射。它們的波長，隨著宇宙的膨脹而拉長了約一千倍，到今天主要剩下微波波段。事實上，即使普通的電視天線，亦可以接收一小部份差不多完全均勻分佈的宇宙微波背景輻射，成為畫面上「雪花」的一小部份。這可能有點匪夷所思吧？家中的電視竟然可以接收一百幾十億年前發出的訊號！無論如何，宇宙微波背景輻射的存在加上宇宙膨脹，很明確地告訴我們，宇宙曾經很熱，與大爆炸理論相符。微波背景輻射的強度其實亦不是完全均勻，而是在天空不同位置有些微的差別。它們的強弱分佈，或稱為不勻性是源於原始火球的輕微振動。從這些振動，我們可以推算出早期宇宙的物理性質，

¹ <http://www.shawprize.org/b5/announcement/2004/astronomy/index.html>

² C. Seife, *Science*, Vol 302, Issue 5653, 2038-2039, 19 December 2003..

³ C. Misner, K. Thorne, and J. Wheeler, "Gravitation" (Freeman, San Francisco, 1973).

⁴ J. Silk, "The Big Bang", (Freeman, New York, 1989).

如總質量等。近幾年來宇宙論觀測的很多突破，都由宇宙微波輻射不勻性的觀測而得到⁵(圖二)。而皮布爾斯教授是宇宙微波輻射不勻性研究的先驅。

另一個大爆炸的證據，是輕元素的比例。自然界各種物質都由原子(atoms)組成，而原子內部則有原子核(atomic nucleus)及外圍的電子(electrons)。原子核很細小，由帶正電荷的質子(protons)及不帶電荷的中子(neutrons)結合而成，不同數目的質子及中子便組成不同的元素。例如氫(Hydrogen)原子核只有一顆質子，而氦(Helium)原子核則有中子及質子各兩顆。宇宙早期溫度太高了，粒子即使曾經聚合，亦很快解散，所以早期宇宙物質只是一大堆熾熱的質子、中子及電子。隨著宇宙膨脹，原始火球的溫度下降，質子和中子才開始結合成氘(Deuterium)、氦等輕元素的原子核，這過程稱為大爆炸核合成(Big Bang Nucleosynthesis)。不過，原始火球冷卻得很快，只夠時間製造出最輕的幾種元素，核合成便停止了。皮布爾斯教授根據宇宙膨脹的速度推算出原始火球溫度及密度的變化，從而計算核合成的速率及各種輕元素的比例。他的計算結果與觀測大致吻合，又一次證明大爆炸理論的正確⁶。

黑暗物質與黑暗能量

不過，皮布爾斯教授計算輕元素比例時發現，由質子、中子等組成的普通物質，只可以佔宇宙總質量的一小部份，其他大部份是由不知甚麼組成，不放射亦不吸收光的物質，稱為黑暗物質(dark matter)⁷。近幾十年來，天文學家利用大型望遠鏡觀測遠方星系及恆星的運動，亦證實了宇宙必然存在大量黑暗物質。物質多了，物質之間的萬有引力也大，是否會有一天宇宙的膨脹被萬有引力拉停了，甚至變成宇宙塌縮？

欲知宇宙膨脹的未來，天文學家放眼宇宙最遠的過去。只要量度出很久以前宇宙膨脹的速率，與現在比較，我們便可以知道萬有引力把宇宙膨脹減慢的程度。怎樣量度以前的脹速？我們看得見遠方的星體，是靠它發出的光，而光的傳播速度雖然很高，卻是有限的。因此我們接收到的星光都是以前發出的。距離愈遠，星光需要愈多時間才到達我們的望遠鏡，我們觀測到的就是愈早以前發出的光。我們只要量度很遠的星系的飛離速度，便知道很久以前的宇宙膨脹速率了。問題是，星體愈遠，星光愈暗，觀測愈難！幸好自然界有一類光源是標準而明亮的，即 IA 類超新星(Type IA Supernovae)⁸。當質量比太陽大幾倍的恆星耗盡燃料而死亡時，總會經過一次猛烈的爆炸，把星球的外殼推出太空，並於短時間把恆星光度增加上百億倍！這便是超新星。而且，相信 IA 類超新星是由同樣狀態及質量的星星開始爆炸，所以它們的光度都應該是一樣的。幾年前，兩組美國天文學家分別量度一大批遠方 IA 類超新星的飛離速度及距離，同時得出一個驚人的結果：宇宙膨脹不但沒有減速，竟在加速⁹！那是說宇宙除了

⁵ <http://background.uchicago.edu/~whu/araa/araa.html>

⁶ J. Peebles, "Principles of Physical Cosmology" (Princeton, 1993).

⁷ 朱明中，中大物理系科普講座「黑暗物質與黑暗能量」，

http://www.phy.cuhk.edu.hk/public_lectures/

⁸ M. Livio, "The accelerating universe: infinite expansion, the cosmological constant, and the beauty of the cosmos", (Wiley, 2000).

⁹ A. Goobar and S. Perlmutter, ApJ. **450**, 14 (1995); S. Perlmutter *et al.*, ApJ. **483**, 565 (1997); A.G. Riess *et al.*, ApJ. **493**, L53 (1998).

萬有引力，必定有更大的斥力，稱為「真空斥力」，而對應的能量，便是「黑暗能量」(dark energy)。這個發現亦被〈科學〉雜誌評選為一九九八年最重要的科學突破¹⁰。有趣的是，當年愛因斯坦曾經引入「宇宙常數」(cosmological constant)以抗衡萬有引力，使宇宙維持不脹不縮的穩態。當哈勃發現宇宙膨脹後，愛因斯坦才後悔引入這神秘的、代表真空斥力的宇宙常數。黑暗能量的發現，不啻是替宇宙常數翻案！而且，前述宇宙微波背景輻射不勻性的數據，亦支持黑暗物質及黑暗能量的存在，數值上與其他觀測亦完全吻合。

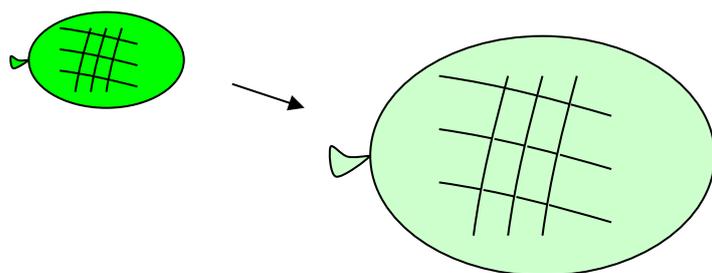
香港中文大學的相關研究

在香港從事宇宙論研究的人屈指可數，集中在香港中文大學及香港大學物理系。在中大，我和幾個研究生過去幾年從事一些宇宙學理論研究，包括宇宙微波背景輻射不勻性的理論計算、以中微子星解釋部份黑暗物質、黑暗能量的模擬、及早期宇宙物理性質研究等。

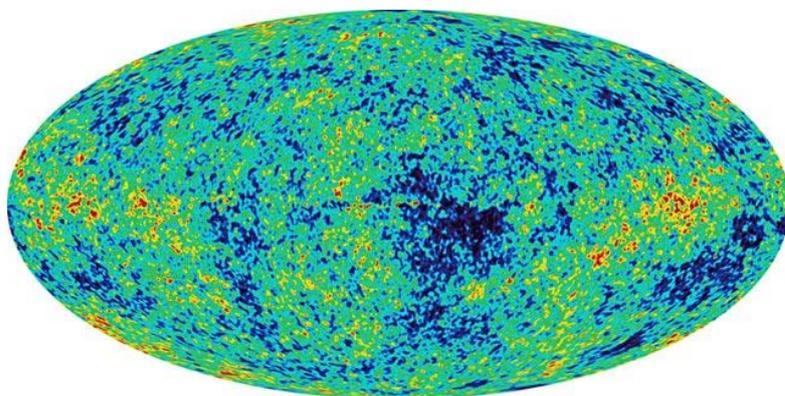
宇宙論的新世紀

那究竟黑暗物質是甚麼？它們如何分佈？黑暗能量又究竟如何產生？黑暗能量及黑暗物質遵從怎樣的物理定律？科學家驚覺我們大致熟悉的物質和能量，只是宇宙微不足道的一小部份。我們基本上完全不明白宇宙大部份的物質及能量！人類對自然探索了那麼多年，竟處於比瞎子摸象更尷尬的境況！諷刺的是，科學家放眼到宇宙最深遠之處，才發現我們是如此無知。

這倒令科學家興奮！正如其他重大的科學發展一樣，宇宙學的新發現引發更多的疑問，打開更多研究領域的大門，促成更多更新鮮、更意想不到的發現。沒有人知道明天的宇宙觀是什麼模樣，但肯定的是，關於天文及宇宙的理論仍會繼續使人著迷，激盪人類的思考。



圖一 時空間隔就像劃在汽球表面的網



圖二 宇宙微波背景輻射在全天空的強弱分佈。圖中紅及黃色部份代表微波輻射稍強於平均，而藍色部份則稍弱。宇宙微波背景輻射的不勻性反映出原始火球的輕微振動。數據由 Wilkinson

¹⁰ J. Glanz, *Science*, Vol 282, Issue 5397, 2156-2157, 18 December 1998.