

超新星 錯拿了 2011 年的諾貝爾物理獎嗎?!

撰文 吳俊輝、薛人璋

一提到宇宙，不論老少古今，人們常會問到的問題便是「宇宙有多大？宇宙有多老？」像這類的問題，在人類歷史中有很長的一段時間都停留在哲玄學的範疇，但是拜現代科技之賜，宇宙學已儼然成為一門科學，一門漸精、漸準的實驗及觀測科學。在過去三十多年來，已有 7 位宇宙學家先後獲得諾貝爾物理獎。最近的一次，便是在 2011 年的 10 月由三位觀測超新星的科學家所榮獲（見本刊第 2、3 頁的編者序）。他們於 1998 的觀測結果，造成理論及觀測學界的震撼，而他們於 2011 年的獲獎，也引起物理及天文界的廣泛討論，這究竟是怎麼一回事，讓我們一起來看看！

百年來的觀測突破

眾所皆知的宇宙膨脹事實，一般大多以為是哈伯（Hubble）在 1929 年發現的，其實不盡然如此。早在 1912 年，Slipher 才是全世界第一個發現天體「紅移」現象的人，當時的科學家大多以為，那些所謂的螺旋狀星雲（Spiral Nebula）是位在我們的銀河系內，但 Slipher 的紅移發現顯示，這些天體正以高速遠離我們，強烈暗示了宇宙膨脹。這些所謂的螺旋狀星雲其實就是位於銀河系外的外星系！只是當時的科學家大多並不知情。Hubble 在 1929 年提出哈伯定律，主張外星系「遠離我們的速率」和「到我們的距離」成正比，而他所使用的速率資料其實就是來自於 Slipher 在一零及二零年代的紅移觀測結果。如今大家只知道 Hubble，卻顯少聽過 Slipher...

你或許會好奇，哈伯如此有名，紅移及宇宙膨脹的觀測結果何等重要，為何他或 Slipher 都沒有獲得諾貝爾獎？理由意外地簡單，就是當時的諾貝爾物理獎並不頒給天文學家，而哈伯一生的重要貢獻之

一，便是讓皇家瑞典科學院漸漸願意將諾貝爾物理獎頒給天文學家，遺憾的是，哈伯自己並沒有受惠到。

接下來的重要里程碑，便是在哈伯定律提出的三十多年後，於 1965 年由 Penzias 及 Wilson 所發現、爾後於 1978 獲得諾貝爾物理獎的「宇宙微波背景」（Cosmic Microwave Background，簡稱 CMB）。在哈伯定律之後，人們開始了解，在我們居住的銀河系之外還有外星系，而越往宇宙的深處望去，就等同於看到越早期的宇宙樣貌，因為越遠處發出的光必須要在越早以前出發，才能在現今到達我們。那目前最遠能看到多遠、或者說是多早呢？答案就是大約 140 億年前、宇宙初生時，也就是 CMB，那是我們目前所能觀測到，來自宇宙最遠、最早的光。

接著又過了近三十年，Mather 及 Smoot 所領導的 COBE 太空望遠鏡團隊，在 1992 年確認 CMB 的頻譜呈黑體幅射，而且 CMB 的強度分佈在約 10 度的尺度上有約十萬分之一的強弱變化，被戲稱為上帝

的臉，因而在 2006 獲得諾貝爾物理獎。很多人在當年以為，宇宙學的研究在短期內大概沒機會再得諾貝爾物理獎了，沒想到在五年後的 2011 年，又頒給了三位於 1998 年因觀測宇宙超新星而意外「發現」宇宙正在「加速膨脹」的科學家。這裡的發現之所以用引號，是因為那是頒諾貝爾獎時的官方說法，但仍有討論空間，因為「宇宙加速膨脹說」至今似乎已經不是唯一能解釋該超新星觀測結果的理論，所以諾貝爾獎頒錯了嗎?! 以下娓娓道來。

1998 超新星「發現」宇宙加速膨脹

該發現的動機及原理很簡單，就是所觀測到的超新星亮度，比由觀測距離所推估出的理論亮度小。這裡所謂的觀測亮度，一般常用 Distance modulus (μ) 來表示，定義為「視星等 (m) 與絕對星等 (M) 的差」，而星等是由光通量（單位時間單位面積所接收到的光能）來決定，也就是由該星的光度（相當於單位時間所發出的能量）及距離來決定，因此光通量和距離呈反平方關係，距離越遠，光通量會越小，星等值就會越大（在天文上越大的星等值表示越暗）。對 Ia 型的超新星而言，在爆炸時其光度相同，因此在觀測上常被做為測距時的「標準燭光」，因此上述的 Distance modulus（即對應到本段段首觀念中所稱的亮度），便只是單純的距離的函數，也就是：

$$\mu(z) = m - M = 5 \log \left(\frac{D_L(z)}{10^{-5} \text{ Mpc}} \right) = 5 \log D_L(z) + 25 \quad (1)$$

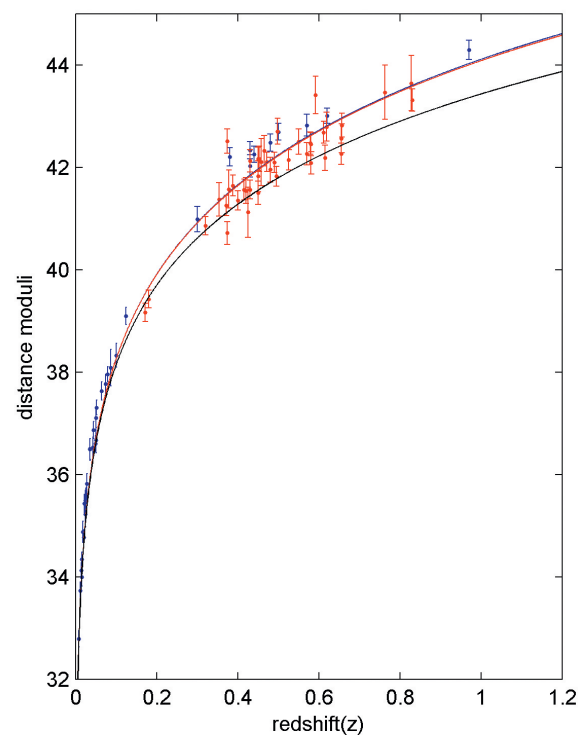
上式中的 $D_L(z)$ 即為距離（luminosity distance），在理論上是紅移 z 的函數，而該函數關係由宇宙學模型中的兩個主要參數決定，即一般物質的能量密度參數 Ω_M 、暗能量的能量密度參數 Ω_Λ 。暗能量和暗物質的主要差異，是暗能量具有「萬有斥力」的怪異性質。簡單的說，理論上只要給定 Ω_M 及 Ω_Λ ，就能寫出 Distance modulus 隨紅移 z 變化的函數 $\mu(z)$ 。附帶一提， $D_L(z)$ 函數基本上可由 Friedmann 方程式推導出來，而 Friedmann 方程式其實就是愛因斯坦方程式在套上合乎於宇宙學定理（宇宙在大尺度上

各物理量是均勻且等向的）的 Friedmann-Robertson-Walker (FRW) model 後所得到的結果：

$$H^2 = H_0^2 [(1+z)^2 (1 + \Omega_M z) - z(2+z)\Omega_\Lambda] \quad (2)$$

上式中的 H 即為哈伯定律中的哈伯參數。而本段中一直指稱的暗能量，其實在上式中是以「宇宙常數 (Λ)」出現，那是暗能量的一個特例，也是目前最主流的暗能量形式，最早由愛因斯坦在二零年代左右提出，當然在當年並沒有超新星的觀測，甚至是在哈伯確立膨脹說之前，當時愛因斯坦提出的動機，是要解釋當年大家普遍相信的宇宙靜態（不脹也不縮），要用該項來抵消平衡掉宇宙中物質間的萬有引力。

對於不同的 Ω_M 及 Ω_Λ 值，以上由理論推導出的 $\mu(z)$ 函數便會不同。因此只要將該理論推估出的函數和實際觀測到的結果相比較，便能估計出最有可



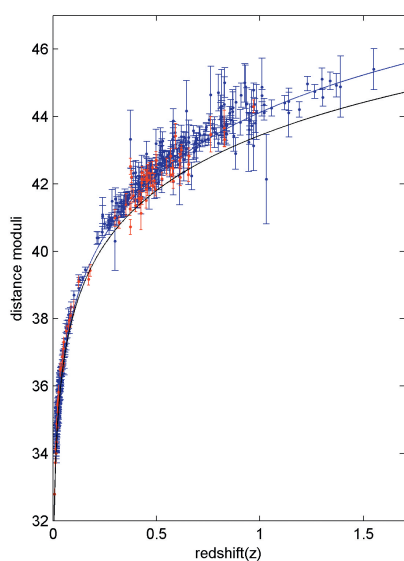
圖一：2011 諾貝爾獎的關鍵，顯示在 1998 年時，由 Schmidt 所領導的 HST (藍) 以及由 Perlmutter 所領導的 SCP (紅) 觀測結果，與理論的減速膨脹模型不符 (黑曲線)，而必須在模型中加入宇宙常數 (暗能量的一種；圖中的紅、藍線)，使宇宙加速膨脹，才能使理論曲線通過觀測點。(本圖乃作者依據當年觀測資料配合已知理論重繪)

能的 Ω_M 及 Ω_Λ 值。圖一便是 2011 諾貝爾獎的關鍵，顯示在 1998 年時，由 Schmidt 所領導的 High-z Supernova Search Team (HSST；圖中的藍色資料點) 以及由 Perlmutter 所領導的 Supernova Cosmology Project (SCP；圖中的紅色資料點) 所觀測到的結果。HSST 所觀測的外星系超新星其紅移範圍為 0.16 至 0.62 (Riess, 2008)，而 SCP 為 0.18 至 0.83，圖中的黑色曲線則是理論預測的傳統減速膨脹模型，顯然與觀測資料不符，因此若在模型中加入宇宙常數 Λ (暗能量的一種)，使宇宙加速膨脹，則修正後的理論曲線 (藍、紅曲線分別對應到兩組觀測資料)，則與觀測相符！兩組觀測資料所估出的宇宙參數分別為 $(\Omega_M, \Omega_\Lambda) = (0.24, 0.76)$ 及 $(0.28, 0.72)$ ，再再顯示若此理論正確，則宇宙中有高達七成的物質是暗能量！！你相信嗎？

近十多年來的新發展

圖二是繼 1998 年後、至今為止的十多年間，在 Ia 型超新星觀測上主要成果的總覽。其中主要的新觀測資料包括 CfA (為 HSST 的後續計畫) 觀測到共約 200 顆紅移值在 1.5 以下的超新星、ESSENCE (Equation of State: SuperNovae trace Cosmic Expansion) 觀測到共約 200 顆紅移值在 0.15 至 0.70 之間的超新星、Union2 (為 SCP 的後續觀測) 觀測到共約

300 顆紅移值在 1.5 以下的超新星、Supernova Legacy Survey (SNLS) 觀測到共約 250 顆紅移值在 0.15 至 1.1 之間的超新星。在圖二中，藍色代表



圖二：1998 至 2011 年間，Ia 型超新星觀測結果總覽，包括 1998 當年的舊結果 (紅)，及十多年來的新結果 (藍)，皆與理論的減速膨脹模型不符 (黑曲線)。顯然十多年來的新結果與舊結果相符，更奠定了 2011 年諾貝爾獎的獲獎。(吳俊輝、薛人璋等：準備發表中)

的是這些新資料，而紅色則代表 1998 年的資料，以方便比較。顯然這十多年來的新觀測結果，大致上與 1998 年的結果相符，更加奠定了 1998 年成果的可信度，也促使其獲得了 2011 的諾貝爾獎。

在過去這十多年間，在宇宙學模型的探討及參數的估測上，除了有超新星的觀測外，另外在宇宙微波背景 (CMB) 領域也有重要貢獻。筆者之前參與的 MAXIMA 計畫，在 2001 年不約而同地與 Boomerang 計畫發表了「宇宙幾何為平式 (flat)」的論文成果，也就是主張 $\Omega_M + \Omega_\Lambda \approx 1$ ，而超新星的觀測在理論上其實大致上就是在約束 $\Omega_\Lambda - \Omega_M$ 的值 (將 (2) 式代入 (1) 式即可看出，或從 (2) 式中已可隱約看出)，也就是觀測上要求 $\Omega_\Lambda - \Omega_M \approx 0.4$ ，而該結果和 CMB 的結果在參數平面 $(\Omega_M, \Omega_\Lambda)$ 上正巧互補 (見圖三)，因此兩式一連立，即可準確地分別估得 Ω_M 及 Ω_Λ 值，很明顯地前者大約三成，後者大約七成，這便是今日宇宙學模型的基本架構！

其它的替代模型

之前提過數次，標準的宇宙加速膨脹搭配暗能量的做法，並不是唯一能解釋 1998 超新星較暗淡的怪異結果，舉兩個例子來看：

◎ Modified Friedmann equation:

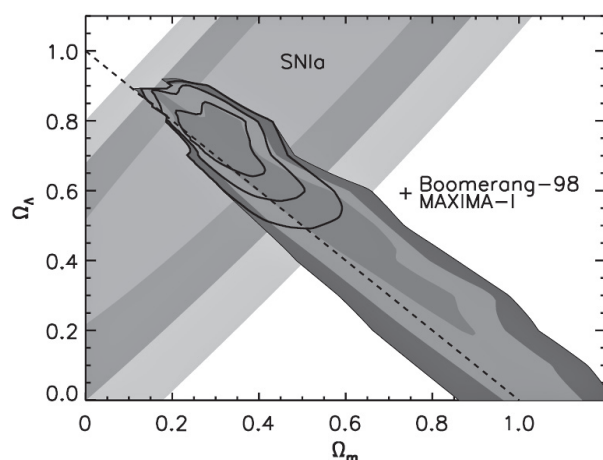
$$\left(\frac{H}{H_0}\right)^2 = (1 - \Omega_M) \left(\frac{H}{H_0}\right)^\alpha + \Omega_M (1+z)^3$$

◎ Dvali-Gabadadze-Porrati (DGP) model:

$$\left(\frac{H}{H_0}\right)^2 = \Omega_k (1+z)^2 + \left(\sqrt{\Omega_M (1+z)^3 + \Omega_c} + \sqrt{\Omega_c}\right)^2$$

$$\Omega_M = 1 - \Omega_k - 2\sqrt{\Omega_c} \sqrt{1 - \Omega_k}$$

這兩個理論都是在理論架構上動手腳，可直接和 (2) 式作比較，而其它類似手法的理論也不在少數。這些理論中有很一部分的共同想法，即在挑戰傳統的廣義相對論及宇宙學模型，設法找出一個架構能讓宇宙沒有暗能量、能讓宇宙不加速膨脹、卻又



圖三：1998 超新星觀測和 2001 宇宙微波背景觀測的結合，正好可在參數平面 (Ω_m, Ω_Λ) 上定出 Ω_m 及 Ω_Λ 值（此圖截錄自筆者的著作 Jaffe et al. 2001）。

能解釋超新星的觀測結果（另見本期陳丕燊及顧哲安等的專文介紹）。這類的論文在近年來有如過江之鯽出現，卻也偶而淪為亂槍打鳥、甚或造成論文出版的環保問題。能夠化解此危的，便是更多各類觀測計畫的推行，以期能以更完整、更完全的角度來檢視我們的宇宙，本期中有一文（林彥廷撰）即以此為核心作為介紹。

結語

縱使未來數年後，科學家確認超新星的觀測亮度之所以較理論推估值暗淡「並非」由宇宙加速膨脹造成，至少在 1998 年的「觀測」結果屬實，而這個結果儼然已為宇宙學界甚至於更廣泛的物理學界，激起一道正向的前進漣漪。這就像 1907 年成為第一位獲得諾貝爾獎的美國人 Michelson，在當年利用干

涉儀量測光速時，是為了要研究偵測後來被認為不存在的光波傳遞介質「以太」；就像愛因斯坦在二零年代提出的宇宙常數理論，雖在現今已成為宇宙學中極重要的一環，但當年他提出的動機是為了要解釋為什麼宇宙是靜止的！人類的文明是靠不斷的 try and error 演進的，因此在過程中，我們所犯的任何錯其實都是值得珍惜、玩味的。



copyright@TEDxTaipei

作者

吳俊輝
台灣大學物理系暨天文物理所
E-mail: jhpw@phys.ntu.edu.tw



薛人璋
台灣大學物理系
Email: b98901087@ntu.edu.tw

參考文獻

- [1] HSST (High-z Supernova Search Team), Riess et al., Astron.J.116:1009-1038, 1998 (arxiv:astro-ph/9805201)
- [2] SCP (Supernova Cosmology Project), Perlmutter, <http://iopscience.iop.org/0004-637X/517/2/565>
- [3] Union+CfA, Hicken et al., 2009, <http://iopscience.iop.org/0004-637X/700/2/1097/>
- [4] Modified Friedmann Equation, arXiv:astro-ph/0301510v1
- [5] DGP(Dvali-Gabadadze-Porrati model), arxiv:hep-th/0005016
- [6] CfA: CfA3, <http://iopscience.iop.org/0004-637X/700/1/331>
- [7] ESSENCE, <http://iopscience.iop.org/0004-637X/666/2/694>
- [8] SCP: Union2, arXiv:1004.1711v1
- [9] Supernova Legacy Survey, arXiv:1010.4743v1
- [10] Jaffe et al., 2001, Phys.Rev.Lett., 86, 3475.