

# 暗能量宇宙學簡介

李沃龍

中央研究院物理研究所

e-mail: [leewl@phys.sinica.edu.tw](mailto:leewl@phys.sinica.edu.tw)

## 摘要

近年來許多對超新星、宇宙微波背景輻射、和宇宙大尺度結構等的天文觀測結果均指出宇宙正在加速膨脹，而非原先傳統理論所預期的減速膨脹。此一結論違反了我們對重力的基本觀念（重力使得任兩物體永遠互相吸引），也顯示了宇宙中必定存在著一種具斥力性質的「暗能量」，其本質與行為決定了我們宇宙的命運。

暗能量 (dark energy) 佔據了現今宇宙總能量密度的三分之二，對決定宇宙未來的命運，扮演了舉足輕重的角色，因此它可說是目前宇宙學 (cosmology) 上最重要的研究課題。另一方面，由於此一具斥力之新型態「能量」可能和量子理論的發散 (divergences) 以及超對稱破壞 (supersymmetry breaking) 機制有關，它也成了粒子物理研究的重要對象。在一份即將由美國國家科學院國家研究評議會出版的報告<sup>[1]</sup>就把暗能量列為本世紀連結微觀夸克世界和宏觀宇宙的關鍵問題之一。

那麼究竟什麼是「暗能量」<sup>[2]</sup>呢？現代宇宙學利用宇宙尺度因子 (the cosmic scale factor)  $a(t)$  描述宇宙的膨脹。依照愛因斯坦的廣義相對論，宇宙的膨脹和宇宙成分的能量密度  $\rho(t)$  與壓力  $p(t)$  有如下之關係（物理量  $y$  的時間導數以  $\dot{y} \equiv dy/dt$  表示）：

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3}(\rho + 3p) \quad (1)$$

其中， $G$  是牛頓的萬有引力常數。所以「暗能量」必須具備足夠大的「負壓力」方能驅使宇宙加速膨脹。此外，由於在星系及星系團 (cluster of galaxy) 的範圍內無法偵測到此神秘成分的蹤影，暗能量必定相當平滑地 (smoothly) 分布在宇宙中。

因此，暗能量（以下我們用“X”代表此神秘的成分）應當具有下列特性：(a) 暗能量不發射也不吸收光子；(b) 它具有相當大的負壓力， $p_x \sim -\rho_x$ ；(c) 它是幾近均勻的 (homogeneous)，至少在星系團的尺度範圍內都不會積聚形成可觀測、可辨識的結構。由於此神秘成分的壓力大小與其能量密度相當，而一般物質的壓力為零，因此它比較類似於「能量」而非一般的「物質」。所以「暗能量」不等同於「暗物質」(dark matter)，它自成一格，也不是暗物質的替代品。

## 宇宙加速膨脹的觀測證據

目前關於宇宙正加速膨脹的現象有兩項觀測上的證據。第一項「直接證據」是基於對遙遠的 Ia 型超新星觀測資料<sup>[3]</sup>推論得出的：在 1998 年，美國勞倫斯柏克萊國家實驗室（Lawrence Berkeley National Laboratory）進行的「超新星宇宙學計劃」（Supernova Cosmology Project）與澳大利亞 Mount Stromlo 天文台的「高紅移超新星搜尋團隊」（High-Z Supernova Search Team）利用不同的分析技術和不同的高紅移超新星觀測樣本，卻都獲得「宇宙正在加速膨脹而非減速」的結論。

最近在紅移  $z = 1.755$  處所觀測到編號為 SN1997ff 的 Ia 型超新星更進一步地支持宇宙正加速膨脹的現象<sup>[4]</sup>。基本上，天體的紅移大小除了代表該天體與觀測者之間的相對距離比率外，也隱含了宇宙尺度改變的訊息。在宇宙學中一般以足標「0」來表示某一物理量現今的值，而紅移的定義為  $z \equiv (a_0/a(t)) - 1$ 。因為  $0 \leq a(t) \leq a_0$ ，位在紅移為  $z$  處遙遠天體的光是在宇宙只有現在大小的  $1/(1+z)$  時所發射出來的。若宇宙的膨脹速率在過去的某一時刻比現在來得小，則遙遠天體的光度必相對地比假設宇宙一直處於加速狀態的情況來得亮些。SN1997ff 正提供了這樣的例證，其光譜資料中的星等 - 紅移關係圖顯示此超新星比傳統上加速開放之宇宙模型（the open universe）裏的高紅移 Ia 型超新星都來得亮，寓意宇宙在其現存生命的大部分過往歲月裏處於減速膨脹的狀態。

另一關於宇宙現正加速膨脹的推論證據來自對宇宙成分能量密度的測量。宇宙微波背景不均向性（CMB anisotropy）的觀測指出當今宇宙之總密

度參數（ $\Omega \equiv \rho/\rho_c$ ）為  $\Omega_0 = 1.0 \pm 0.04$ ，是一平坦的（flat）宇宙，而其中物質密度與能量密度之和必須等於臨界密度  $\rho_c$ 。然而幾乎所有關於宇宙大尺度結構的天文觀測，例如微波背景的不均向性、星系團裏的重子比率等，都一致顯示宇宙中的物質密度只佔臨界密度的三分之一左右，即  $\Omega_M = 0.33 \pm 0.04$ 。因而可知約有三分之二的臨界密度不見了，此一消失的能量密度恰巧為  $\Omega_X = 0.67 \pm 0.06$ <sup>[5]</sup>。

我們知道平坦宇宙的 Friedmann equation 規範了描述宇宙膨脹的哈伯參數（Hubble parameter  $H \equiv \dot{a}/a$ ）及宇宙成分密度之關係： $H^2 = 8\pi G\rho/3$ 。另由各成分之能量守恆  $\dot{\rho}_i = -3H(\rho_i + p_i)$  可知

$$\rho_i \propto a^{-3(1+w_i)} \propto (1+z)^{3(1+w_i)} \quad (2)$$

其中  $w_i$  代表了各不同成分的物態方程（equation of state  $w \equiv p/\rho$ ）此式告訴我們現今宇宙中的輻射密度（ $w_R = 1/3 \Rightarrow \rho_R \propto a^{-4}$ ）應當遠小於一般的物質密度（ $w_M = 0 \Rightarrow \rho_M \propto a^{-3}$ ）如此一來，宇宙的減速參數（deceleration parameter  $q = -(\ddot{a}/a)/H^2$ ）與各成分的密度參數（ $\Omega \equiv 8\pi G\rho/H^2$ ）應維持如下之關係：

$$q = \frac{\Omega_M}{2} + (1+3w_X)\Omega_X \quad (3)$$

很明顯地，若宇宙正加速膨脹， $q < 0$ ，必然導致  $w_X < -1/3$ 。因此可推導出暗能量具有斥力般的負壓力並相當均勻平滑地分布於宇宙中，其能量密度以小於  $a^{-2}$  之比例隨時間緩慢變化。

宇宙常數與暗能量

愛因斯坦在 1917 年發現其重力場方程式會導致收縮或膨脹的解。為了維持一個靜態的宇宙觀，他在場方程式中引入了著名的宇宙常數  $\Lambda$ 。1929 年當哈伯對星系的觀測結果，確立了宇宙膨脹的事實後，愛因斯坦終於放棄了宇宙常數，且將其稱之為他一生中最大的錯誤。造化弄人，七十年後的超新星觀測卻又開啟了宇宙常數的復活運動。

若將宇宙常數引入愛因斯坦方程式，則 (1) 式右端必須加上相應的負壓力項 ( $\Lambda/3$ )。如果宇宙中只存在一般正常的物質，即  $\rho + 3p > 0$  且  $\Lambda = 0$ ，則宇宙膨脹的加速小於零，顯示宇宙膨脹的速率因重力之吸引而減小。反之，若  $\Lambda > 0$  且足夠大，一般正常物質的重力相吸效應將被此宇宙常數克服，進而驅動宇宙加速膨脹。因此，宇宙常數可說是「暗能量」源頭最簡單的解釋。

事實上，宇宙常數曾數度被引用，以解釋天文物理上所遭遇的困難，例如宇宙的「年齡問題」。透過星球演化的理論計算，顯示某些宇宙中最古老的星體年齡可達 150 至 180 億年。假設宇宙僅由我們可觀測到的物質所組成 ( $\Omega_M \approx 0.3$ ) 而不含宇宙常數，則其年齡約在 100 至 130 億年左右。若我們使用物質主控的平坦宇宙模型 ( $\Omega_M = 1$ )，情況更糟，宇宙年齡約 80 至 110 億年。但若平坦宇宙計入宇宙常數 ( $\Omega_M \approx 0.3, \Omega_\Lambda \approx 0.7$ )，宇宙年齡為 120 至 160 億年，可輕易地容納宇宙中最古老的星體，解決此問題<sup>[6]</sup>。

然而，以宇宙常數作為暗能量並非廉價的選擇，必須面對至少兩個非常基本而嚴肅的難題 - 「宇宙常數問題」(the cosmological problem) 及所謂的「宇宙巧合問題」(the cosmic coincidence problem)。

從量子場論 (quantum field theory) 的觀點來看，宇宙常數基本上就是真空量子場的能量。在目前的物理理論裡並不存在任何的法則或對稱性可推導出真空能量密度 ( $\rho_{vac}$ ) 必為零的結果。事實上，由於至今仍沒有一套標準的量子重力場論，我們甚至不清楚究竟該如何在重力場中計算  $\rho_{vac}$ 。今天宇宙的能量密度已知非常接近臨界密度  $\rho_c \approx 2 \times 10^{-47} \text{ GeV}^4$ ，若使用普朗克能量尺度  $M_{Planck} \equiv 1/\sqrt{8\pi G} \approx 10^{18} \text{ GeV}$  來估算真空能量起伏，則可獲得理論與實際觀測值的驚人落差：

$$\rho_{vac}^{(theory)} \sim M_{Planck}^4 \approx 10^{72} \text{ GeV}^4 \approx 10^{120} \rho_c^{(obs)} \quad (4)$$

此一理論值與觀測值似乎無法克服的巨大差異即是所謂的「宇宙常數問題」。

另外，由於  $\Lambda$  是一不隨時間而變的常數， $\Omega_\Lambda/\Omega_M = \rho_\Lambda/\rho_M \propto a^3$ ，所以宇宙常數對宇宙的影響隨著宇宙的膨脹，與時俱進。但是為什麼現今我們所處的宇宙恰巧呈現出物質和宇宙常數勢均力敵的態勢呢 ( $\Omega_M \sim \Omega_\Lambda$ )？實際上不只針對宇宙常數，任何「暗能量」的選擇都必須能合理解釋此一「巧合問題」。

## 第五元素與暗能量

第五元素 (quintessence) 指的是除了重子 (baryon)、光子 (photon)、微中子 (neutrino) 及暗物質 (dark matter) 外構成宇宙的第五種要素，一般以一緩慢滾落至其位勢底部基態的純量場  $\psi$  來代表。 $\psi$  場的能量密度與壓力是

$$\rho_\psi = \frac{\dot{\phi}^2}{2} + V(\phi), \quad p_\psi = \frac{\dot{\phi}^2}{2} - V(\phi) \quad (5)$$

以第五元素作為「暗能量」的主要原因為：

(a)以  $\rho_0$  緩慢地變化至零的特質試圖解釋「宇宙常數問題」；(b)開啟解決宇宙「巧合問題」的可能性；(c)利用天文觀測的結果，在現象學的層級上瞭解其演化的物理機制。

探索第五元素的本性基本上有兩條途徑。第一是以合理的物理假設(例如如此純量場必須符合許多粒子物理上的考慮)，建立模型  $V(\phi)$ ，然後計算各項宇宙參數，比對觀測結果，並達成上述(a)(b)兩偉大目標。在文獻裡不乏各式各樣第五元素的位勢  $V(\phi)$ ，可惜的是我們對暗能量的本質可說是一無所知，故目前並無一模型可稱得上成功地解決那兩大理論物理難題。

另一探求暗能量本性的方式是充分利用天文觀測的結果來限制模型，以最少的理論假設在現象學上探討，希望在對暗能量本質有了粗淺的了解後能有助於尋求「宇宙常數問題」與「巧合問題」的解答。

不論使用哪一種方式，都必須充分把握暗能量的物態方程  $w \equiv p_x/\rho_x$ 。宇宙常數的物態方程是  $w = -1$ 。依據式(5)，第五元素的物態方程則是隨時間變化而落在一定範圍的 ( $-1 \leq w \leq 1$ )：當動能主控時  $w = +1$ ，當位能主控時則和宇宙常數相同。由於一般正常物質的物態方程都為一常數值，隨時間變化的物態方程非常詭異，更增添了暗能量的神秘色彩。

#### 宇宙實驗室

暗能量是低能的物理現象，它大概無法從粒子加速器裡產生。此外，在星系、甚或星系團的範圍內都無法偵測得到它。因此，我們所處的宇宙本體大概是惟一適合研究暗能量的實驗室了。

暗能量最主要的物理效應是影響宇宙的膨脹速率。在一平坦的宇宙裡，若假設暗能量服從能量守恆定律  $d(\rho_x a^3) = -p_x da^3$ ，則宇宙膨脹速率在時空中的變化只簡單地與  $\Omega_M$  及  $w(z)$  兩參數有關：

$$\frac{H^2(z)}{H_0^2} = \Omega_M (1+z)^3 + \Omega_x \exp\left\{3 \int_0^z [1+w(x)] d \ln(1+x)\right\}$$

雖然  $H(z)$  可能無法直接測量，它影響了兩個可觀測量：位於紅移  $z$  處目標的共動距離 (comoving distance)，即

$$r(z) = \int_0^z \frac{dx}{H(x)}$$

和密度微擾 (density perturbations) 的成長，

$$\ddot{\delta}_k + 2H\dot{\delta}_k = 4\pi G\rho_M \delta_k$$

其中  $\delta_k$  代表了共動波數 (comoving wavenumber) 為  $k$  的密度微擾。因為共動距離與光度距離 (luminosity distance)  $d_L$  相關， $d_L(z) = (1+z)r(z)$ ，藉由大尺度的觀測資料，例如遙遠的標準蠟燭 (standard candles，例如 Ia 行超新星)，與在共動體積單元內星系及星系團的數量密度等之測量，可推導出暗能量的效應。目前已知關於暗能量的觀測結果顯示<sup>[8]</sup>：

- (i) 在 95 % 的信心水準下，暗能量的物態方程之上限為  $w < -0.7$ ，並偏好以宇宙常數代表暗能量，即  $w = -1$ 。
- (ii) 因為「巧合問題」，暗能量主控的時代才剛開始不久，因此探索暗能量的最佳紅移區段為低紅移的  $z = 0.2$  到  $z = 2$  範圍。
- (iii) 由於光子的最後散射截面 (the last scattering surface) 位於  $z \approx 1100$  前後短暫的時空範圍。

疇，自該截面發射之宇宙微波背景對於暗能量的探索雖可提供一定的幫助，卻無法解析隨時間變化的物態方程  $w_0$ 。

- (iv) 只要系統誤差能處理好，星系及星系團的數量與 Ia 型超新星對物態方程的測度具有相同的效力。
- (v) 弱重力透鏡效應 ( weak gravitational lensing ) 是研究隨時間變化之物態方程的利器。

### 宇宙之命運與暗能量

幾乎所有現存的廣義相對論課本，在宇宙學的章節裡都會提到宇宙曲率參數 ( curvature parameter, 分別是 +1、0、-1 ) 所對應的三種空間型態及其未來命運：曲率為正的封閉宇宙在膨脹至一定程度後，終將歸於陷縮的境況；曲率為零的空間是平坦宇宙的幾何型態；負曲率的開放宇宙則與平坦空間都會永無止境地膨脹。這種空間幾何型態和宇宙命運相聯繫的簡單圖像，其實是假設物質主控 ( matter dominated ) 的宇宙模型所導出的結論。

有暗能量存在的宇宙則自成一格，使得此種空間幾何型態與未來演化的對應關係更加複雜<sup>[9]</sup>。如前所述宇宙常數的性質，足夠大的暗能量可克服重力的相吸效應，使得分布在宇宙裡的任兩物體相互遠離對方，體現宇宙之加速膨脹。在此一物理機制的作用下，即便封閉的宇宙也容許永無止境的膨脹解。反之，開放的宇宙亦可因為存在類似負的宇宙常數 ( 如許多超弦理論 superstring theory 所預言 ) 之暗能量成分而重新陷縮。此外，若暗能量有耗散效應 ( dissipation )，宇宙也可能回歸物質主

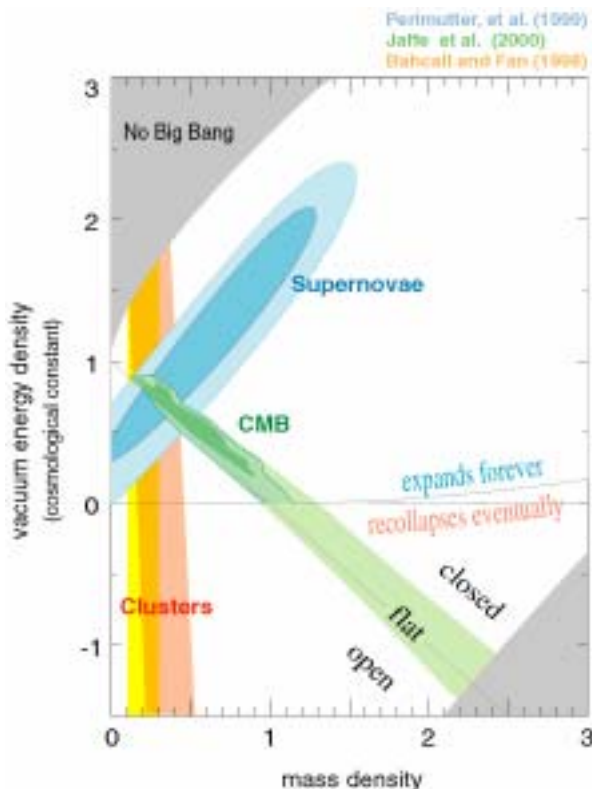
控時代，重複過往的演化軌跡。所以「暗能量」的本質究竟為何，確實牽動了宇宙未來的命運。

### 挑戰與展望

我們有足夠的理由相信「暗能量」的研究，勢將形塑新宇宙學的風貌，甚或導致理論物理無與倫比的變革。

雖然 Ia 型超新星的觀測提供了暗能量存在的直接證據，許多重要的相關議題，仍須我們深入探究：Ia 型超新星究竟是不是標準蠟燭？超新星光度曲線是否因未知的物理機制而演化？不同紅移區段的超新星分布群落是否相異？演化又會對暗能量的直接證據帶來什麼衝擊？

除了超新星宇宙學，利用其他獨立的方法來確立暗能量的存在是相當必要的。圖一<sup>[10]</sup>顯示了幾種不同天文觀測方法 ( 超新星、宇宙微波背景輻射、宇宙大尺度結構之測量資料 - 例如星系團的弱重力透鏡效應等 ) 產生的參數空間信心水準分布圖。



圖一 幾種不同的天文觀測結果決定了宇宙在真空能量與物質密度參數空間的位置及信心水準分布。圖中也標示了不同的宇宙模型及擴張演化所對應的區域。

未來十年的研究目標,主要希望能夠精準(仍容許 5% 的誤差)測量暗能量的物態方程  $w$ , 並探索其對時間的變化。如此才能區分出宇宙常數與其他型態的暗能量成分。在確定暗能量的物態方程後, 下一步則要觀測暗能量在重力場中的成團性質 (clustering properties): 宇宙常數均勻分布在空間中, 但理論上允許第五元素在非常大的尺度範疇內可能呈現微弱的成團效應。這些目標的達成, 將對宇宙結構的演化研究, 造成重大且深遠的影響。

#### 參考文獻：

1. National Research Council, "Connecting Quarks with the Cosmos : Eleven Science Questions for the New Cosmology", <http://www.nap.edu>
2. D. Huterer & M. S. Turner, Phys.Rev. D60 (1999) 081301.
3. S. Perlmutter, et. al. Astrophys. J. 517(1999)565 ; A. G. Reiss, et. al. Astron. J. 116(1998)1109.
4. N. Benitez, et. al. astro-ph/0207097 and reference therein.
5. M. S. Turner, astro-ph/0106035.
6. J. Lisle, "The Cosmological Implications of Hipparcos", see the website at <http://ucsu.colorado.edu/~lisle/Home.html>
7. S. Carroll, astro-ph/0107571.
8. M. S. Turner, astro-ph/0202007.
9. L. M. Krauss & M. S. Turner, Gen.Rel.Grav. 31 (1999) 1453.
10. 請參見 SNAP 網站：<http://snap.lbl.gov>