

知識天地

淺談暗能量

林彥廷助研究員(天文及天文物理研究所)

想像一下，若你把一顆球向上拋高，它沒有墜回地面，反而加速向太空逃逸。發生這種情況，會做何感想？那種難以置信的驚訝，大概就是十多年前，天文學家首次發現宇宙正在加速膨脹時心中的感覺。

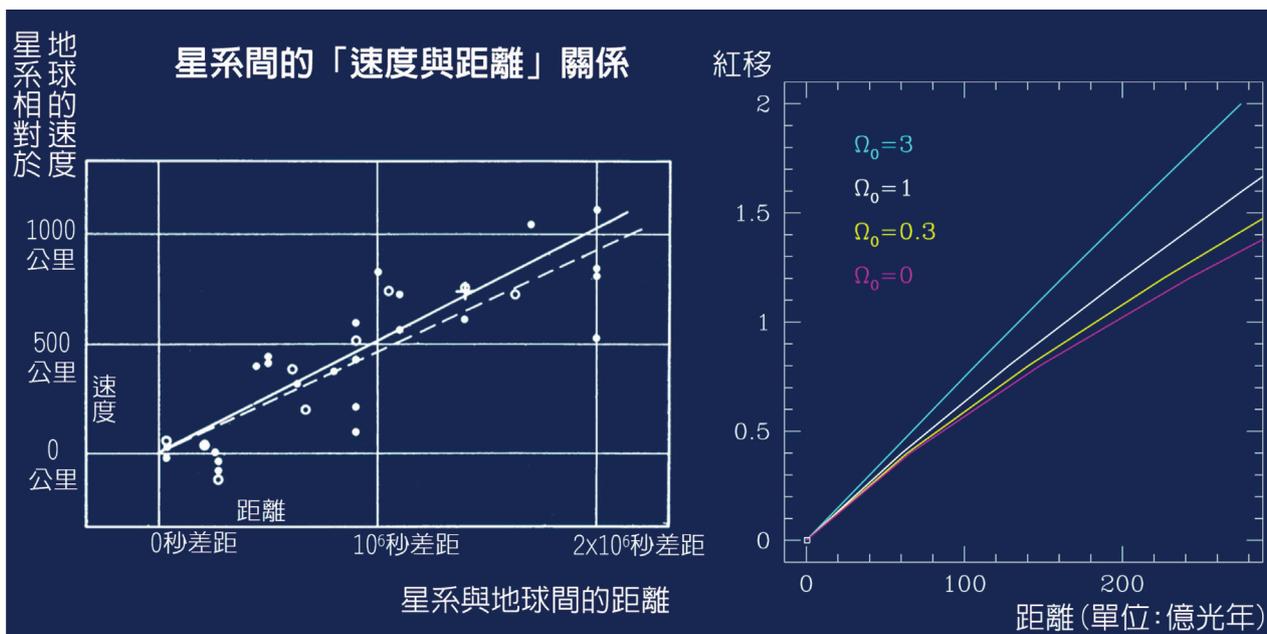
長久以來，大多數天文學家相信宇宙雖然在膨脹，但其中一切物質所產生的重力，終有一天將會克服膨脹的趨勢，中止膨脹，甚至開始向內塌縮。就好比向上拋出的球會再落回地表那樣。然而，「宇宙在加速膨脹」這個發現，顯示除了重力之外，有著其它未知的力量在支配著宇宙。宇宙，其實不是我們想像的那麼簡單！

真有這個額外的力量嗎？會不會是觀測的問題？還是宇宙學的基礎—愛因斯坦的廣義相對論—有著根本上的問題？過去十多年，這些問題深深困擾著天文學家。今日我們普遍認為宇宙真的在加速膨脹，但是原因究竟是什麼，依然沒有定論。預料在接下來的十年間，這方面的研究，仍會是宇宙學界最重要的工作。

觀測宇宙學的主要任務，基本上就是量測宇宙膨脹的歷史，也就是宇宙大小相對於時間的變化。由於膨脹率深受宇宙的成分性質影響，宇宙膨脹歷史可以告訴我們宇宙的成分，以及各成分的相對含量。有了這些資訊，我們將可預測宇宙的命運。比如說：宇宙中所含物質如果不夠多，膨脹會一直持續下去(我們稱宇宙的「幾何結構」是開放的)；反之，所含的物質若太多，它將在有限的時間內塌縮，一切可能盡歸於一個巨大黑洞(我們稱宇宙的幾何結構是封閉的)。怎麼知道物質是太多或太少呢？我們可以拿宇宙中各種物質及能量的密度 ρ 跟宇宙的臨界密度 ρ_c 相比，若是 $\rho > \rho_c$ (或是 $\rho < \rho_c$)，則宇宙是封閉(或是開放)的；如果 $\rho = \rho_c$ ，則我們稱宇宙的幾何結構是平坦的。

常用來標記宇宙膨脹的計量單位是紅移。若紅移是 z ，代表宇宙的大小是現在的 $1/(1+z)$ 倍。現今宇宙所對應到的 $z=0$ ；紅移越大，代表宇宙越小，也就是指越早期的宇宙。

要測定宇宙膨脹的歷史，也就是想量得天體到地球的距離與其紅移的關係。上世紀20年代，比利時的勒麥特(Georges Lemaitre)及美國的哈柏(Edwin Hubble)便利用我們鄰近的星系，首次嘗試測量這個關係。如今，我們把這個關係通稱為哈柏圖(Hubble Diagram, 圖一)。



圖一：左圖為哈柏於1929年發表的哈柏圖。橫軸是星系跟地球的距離(單位是秒差距，一秒差距為3.26光年)，縱軸是星系相對於我們的速度，相當於紅移。哈柏發現，大多數的星系都在離我們遠去，距離我們越遠的星系，離開的速度越快。這就是著名的哈柏定律。根據這個發現，人們瞭解宇宙正在膨脹，以及宇宙可能有個開端。右圖顯示含有不同物質密度($\Omega = \rho/\rho_c$)的宇宙，在哈柏圖上的軌跡將會不同。我們

若能將哈柏圖延伸到很高的紅移，便能探知宇宙的組成。哈柏早年所探測的宇宙範圍，只相當於這右圖左下角的小方框而已。左圖©PNAS, 15(3), 1929；右圖©本院天文所。

測量紅移，其實相當簡單。宇宙隨著時間膨脹，光子的波長也會隨之拉長，從遙遠星系來的光會被「紅移」到較長的波段。假設原本的波長是 λ_e ，光到達地球時，被觀測到的波長會變成 $\lambda_o=(1+z)\lambda_e$ 。因此，我們若能從光譜中判斷出來自遙遠物體的發射或吸收譜線，由這些譜線真正的波長及觀測波長，即可量出該物體的紅移。

另一方面，要量測遙遠物體到地球的距離，就不是簡單的工作了。我們通常得依賴「標準蠟燭」或「標準尺」，也就是得拿實際亮度或長度不會隨時間變化的物體或現象作比較。拿標準蠟燭來說，假設我們觀測到的亮度是 f ，而它真正的亮度是 L ，那麼，在距離小的情況下，我們就可以用平方反比的關係($f \propto L/d^2$)來求得蠟燭跟我們的距離 d 。這個原理雖然簡單，但實際上在宇宙中找到好的標準蠟燭並不容易。首先，標準蠟燭得夠亮，足以讓我們橫跨大半宇宙觀測到它們；其次，它們的亮度要穩定，或至少能夠校準；再者，它們不能太稀有，不然也很難得到大量的樣本來減小統計誤差。

上個世紀的60年代，哈柏和桑帝致(Allan Sandage)在動用了當時全世界最大口徑的望遠鏡，耗費了數十年心力觀測後，才將哈柏圖延伸到紅移0.02的範圍。然而，由於他們方法上的一些根本問題，這仍不足以讓我們判定宇宙的參數。

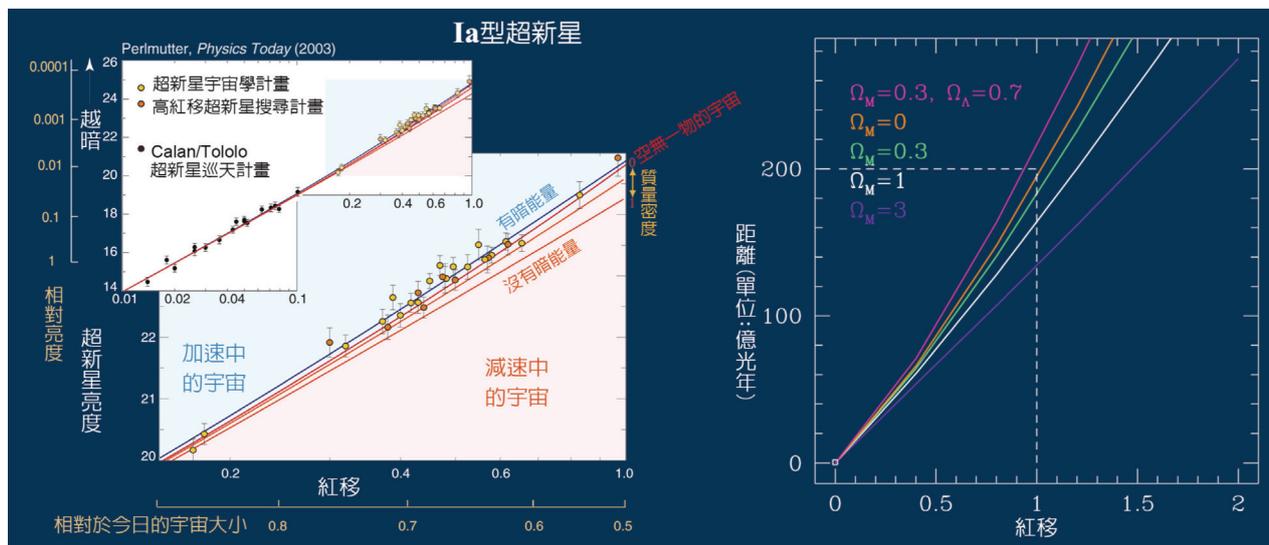
1989年，美國柏克萊國家實驗室的柏木特(Saul Perlmutter)決定採用新的標準蠟燭—Ia型超新星一來建構哈柏圖。超新星非常地亮，最亮的甚至和整個星系一樣亮，早在30年代，就有人建議用超新星當標準蠟燭。不過到了80年代後期，人們才發覺超新星其實有許多種，而其中只有Ia型超新星最適當當作標準蠟燭，至此用超新星探測宇宙的時機才漸趨成熟。即便如此，柏木特的團隊仍然花了近十年，才克服種種挑戰，得到讓人信服的成果。

用超新星來探測宇宙，困難在哪裡？首先，一個普通星系大約每數百年才有一個Ia型超新星。所以我們必須同時觀測大量的星系，並運用特別的觀測模式，才能有效率地發現、追蹤、並確認超新星的類型。其次，最亮跟最暗的Ia型超新星亮度差了大約三倍，因此它們其實不算真的標準蠟燭；我們還必須找到校準它們的方法才行。此外，宇宙中充斥着塵埃，它們會吸收星光、讓物體變暗，因此我們也得修正塵埃的影響。再者，我們必須確定超新星的性質不會隨時間而變，也就是要能保證「宇宙早期爆炸的超新星，跟我們鄰近宇宙中發現的超新星，性質都一樣」。這一切努力都是希望能把統計及系統性的誤差降低，以便能藉由超新星在哈柏圖上的分佈，求出宇宙的參數。

柏木特領導的「超新星宇宙學計劃SCP」進行的前幾年，收獲相當少。直到1994年，由澳洲國立大學的史密特(Brian Schmidt)及哈佛大學的瑞思(Adam Riess)主導的「高紅移超新星計畫HST」團隊加入戰局之後，良性競爭下，雙方一一克服了上述困難，終於在1998-99年間，先後發表了哈柏圖(圖二)。共同結論是：在所有假設宇宙僅由物質所組成的模型中，遙遠的超新星實際上看起來比模型預測的更暗；也就是說，宇宙膨脹的速度比想像中更快，才能把超新星放到夠遠的地方，讓他們的亮度跟觀測相符。宇宙正在加速膨脹中！

這是個驚人的結論，完全推翻近百年來人們對宇宙的認知。當初柏木特等人想要量測的其實是宇宙的減速度，不料在十年奮鬥之後，卻得到全然相反的結果。這究竟意味著甚麼？要符合超新星的哈柏圖，宇宙中不能只有物質，還必須存在有某種能提供「負壓力/反重力」的能量形式。對於這種難以想像的能量形式，天文學家現在以「暗能量」來稱呼它。

暗能量其實也不是什麼新觀念。早在愛因斯坦提出廣義相對論時，他的方程式中就包含了一個「宇宙常數」項，那便是暗能量最基本的一個形式。當初愛因斯坦引進宇宙常數，是為了讓他的宇宙模型可以永久穩定；不過當他從哈柏那裡得知宇宙正在膨脹之後，便把宇宙常數從方程式中刪掉了。到了二十世紀末，宇宙常數才又重現江湖，天文學界一開始的反應是半信半疑。所幸，一來有SCP跟HST兩個團隊同時獲得類似結果，二來，本世紀初許多其他的宇宙學觀測也支持暗能量存在的推論，持懷疑、反對態度的陣營漸漸減少。今日，我們總算架構出宇宙學的標準模型，而其中暗能量扮演著很重要的角色。



圖二：左圖是SCP跟HZT計畫所發表的哈柏圖。橫軸是紅移，縱軸是超新星的亮度，相當於距離。圖中淡紅色區域代表減速中的宇宙，藍色區域代表加速中的宇宙。超新星的分布明顯偏好加速中的宇宙。跟圖一相較，超新星讓我們把哈柏圖延伸到八億年前的宇宙，讓我們能夠準確量出宇宙參數，並首次明確顯示出暗能量讓宇宙加速膨脹的效應。右圖則類似圖一右的哈柏圖，不過橫軸是紅移，縱軸是距離。最上方的紫紅色曲線代表宇宙學的標準模型，其他的曲線是僅含物質的宇宙模型。超新星觀測的範圍，大致由虛線代表。左圖©Perlmutter, 2003, Physics Today, v.56, p.53；右圖©本院天文所。

宇宙學標準模型的產生，是由超新星觀測打頭陣，推論出宇宙中必有一股具備負壓力/反重力、質能密度大約是 $0.73\rho_c$ 的能量形式存在；再者，大尺度結構的觀測結果顯示宇宙中物質的含量並不大，質能密度大約是 $0.27\rho_c$ （其中主要為暗物質，一種物理學仍不能解釋的基本粒子或現象）；最後，宇宙背景輻射的觀測在在顯示出宇宙是平坦的（ $\rho=\rho_c$ ）。從此水到渠成，標準模型就此圓滿。這個模型極其簡單，卻又極其成功，能夠解釋許多非常不同的觀測結果。

當然，這個模型雖然成功，卻不是所有人都滿意，主要就在於我們對暗物質及暗能量的本質都沒什麼頭緒。許多頂尖的物理學家認為，釐清暗物質及暗能量的本質是當前最重要的物理課題。為了方便分類起見，對於任何質能狀態，我們可以用一個物態方程式(equation of state) $w=p/\rho$ 來定義；此處的 p 是壓力， ρ 是能量密度。對暗物質而言， $w=0$ 。愛因斯坦所提出的宇宙常數是暗能量的最簡單形式，它的 $w=-1$ 。一般來說，任何 $w<-1/3$ 的「質能狀態」都能讓宇宙加速膨脹。因此，要瞭解暗能量究竟是甚麼，可行的方法就是去量它的 w 值，以及 w 隨著時間的可能變化。

到目前為止，絕大多數觀測結果都顯示 w 非常接近-1。暗能量或許就是宇宙常數？物理學對宇宙常數最好的解釋是「真空的能量」。由於量子微擾，「真空」並非空無一物，其中其實隨時會有粒子生成與湮滅。根據量子場論算出來的真空能量，竟是宇宙學觀測值的 10^{122} （1後面接122個0）倍大。因此，即便「單純」如宇宙常數，我們也無法合理解釋它的來源。

暗能量也可能代表在重力、電磁力、強作用力、弱作用力之外的另一種我們所不知道的力。果真如此的話，一般而言它的 w 值將隨時間改變。因此，這個新的作用力在各個紅移都應該有不同的 w 值。

還有另外一種可能性：愛因斯坦是錯的！如同牛頓力學無法應用在極強的重力場那樣，愛因斯坦的廣義相對論也可能在極大尺度下不適用。最近幾年有許多學者朝這個方向研究，希望能藉由修改廣義相對論，發展出更完整的重力理論。然而，跟這些新理論相比，廣義相對論的預測仍然更符合絕大多數的觀測結果。

對於暗能量性質及來源的真相，雖然我們仍然在五里霧中，但至少我們知道下一步該怎麼走：全面量測宇宙結構演化的速率，以及膨脹的歷史。藉此我們可量出 w 在不同紅移的值，以便界定究竟廣義相對論或新重力理論，哪種正確？究竟是宇宙常數，還是新的作用力？

為了表彰超新星觀測帶動暗能量研究的貢獻，2011年諾貝爾物理獎便頒發給柏木特，史密特，和瑞思三人。下一個世代，有許多大型天文觀測計畫即將展開，包括本所積極參與的Subaru望遠鏡的「堇(Sumire)」計畫，這些都可望幫助釐清暗能量的本質。就讓我們拭目以待！