

# 宇宙學的十字路口

文/ 李見修

超新星量測的哈伯常數與宇宙微波背景輻射所推測的結果分歧。  
是宇宙模型需要修正？亦或是我們低估了系統誤差？

## 哈伯定律與 膨脹的宇宙

在1920年代，艾德溫·哈伯（Edwin Hubble）根據變星及其他亮星所測得的星系距離，結合維斯多·斯利佛（Vesto Slipher）等人所測得的星系紅移（即速度），發現四面八方的星系都在離我們遠去，而且越遠的星系遠離速度越快！這與1910年代亞歷山大·弗里德曼（Alexander Friedmann）及喬治·樂梅特（George Lemaitre）等人根據愛因斯坦相對論所做出的宇宙正在膨脹的計算吻合，同時也是首次有觀測證據支持宇宙正在膨脹。

## 哈伯常數與 哈伯望遠鏡

根據哈伯定律，星系遠離的速度與其距離成正比，而這個正比的係數，便是哈伯常數。哈伯常數的大小對於我們建立宇宙模型至關重要，因它的倒數告訴我們宇宙的年齡（又稱哈伯時間）。因此天文學家們在過去一個世紀以來想方設法要精準量測哈伯常數。當哈伯在1920年代提出哈伯定律時，他所量測的哈伯常數不甚準確，約在500 km/s/

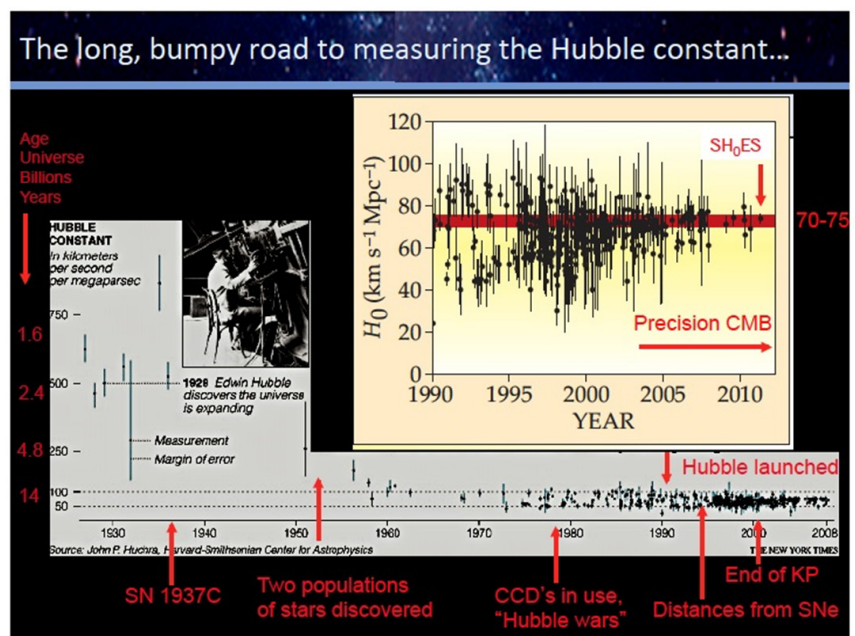


圖1. 過去一個世紀以來對哈伯常數所進行的量測。資料來源：Adam Riess, [http://users.ph.tum.de/ga24wax/2014\\_W1\\_slides/riess\\_miapp.pdf](http://users.ph.tum.de/ga24wax/2014_W1_slides/riess_miapp.pdf)

Mpc。隨著儀器與技術的進步，天文學家們量得更精確，但直到1990年代，哈伯常數仍落在50-100 km/s/Mpc之間（見圖1），誤差範圍在50%上下，而天文學家們也對量測的方式以及正確的數值意見分歧。也因此，在1990年代，當哈伯太空望遠鏡升空時，首要任務就是解決這個分歧。經過數年的努力，在2001年時，哈伯望遠鏡關鍵計畫團隊（HST Key Project）發表結果，測出72 km/s/Mpc，誤差範圍在10%，大大提高了哈伯常數的準確度。

## 超新星、哈伯常數與 暗能量狀態方程

儘管哈伯望遠鏡暫時縮小了大家對哈伯常數的分歧，但是天文學家並不因此而滿足，且希望能更進一步降低誤差。其中的一個原因便是，當哈伯常數的誤差從2%縮小至1%時，我們對於暗能量的狀態方程誤差可以縮小至40%。但是要將哈伯常數的量測誤差縮小至1%實非易事，其中最難的一點就是來自不同儀器所造成的誤差。因此，諾貝爾獎得主亞當·黎斯（Adam Riess）等人便開始著手「超新星、哈伯

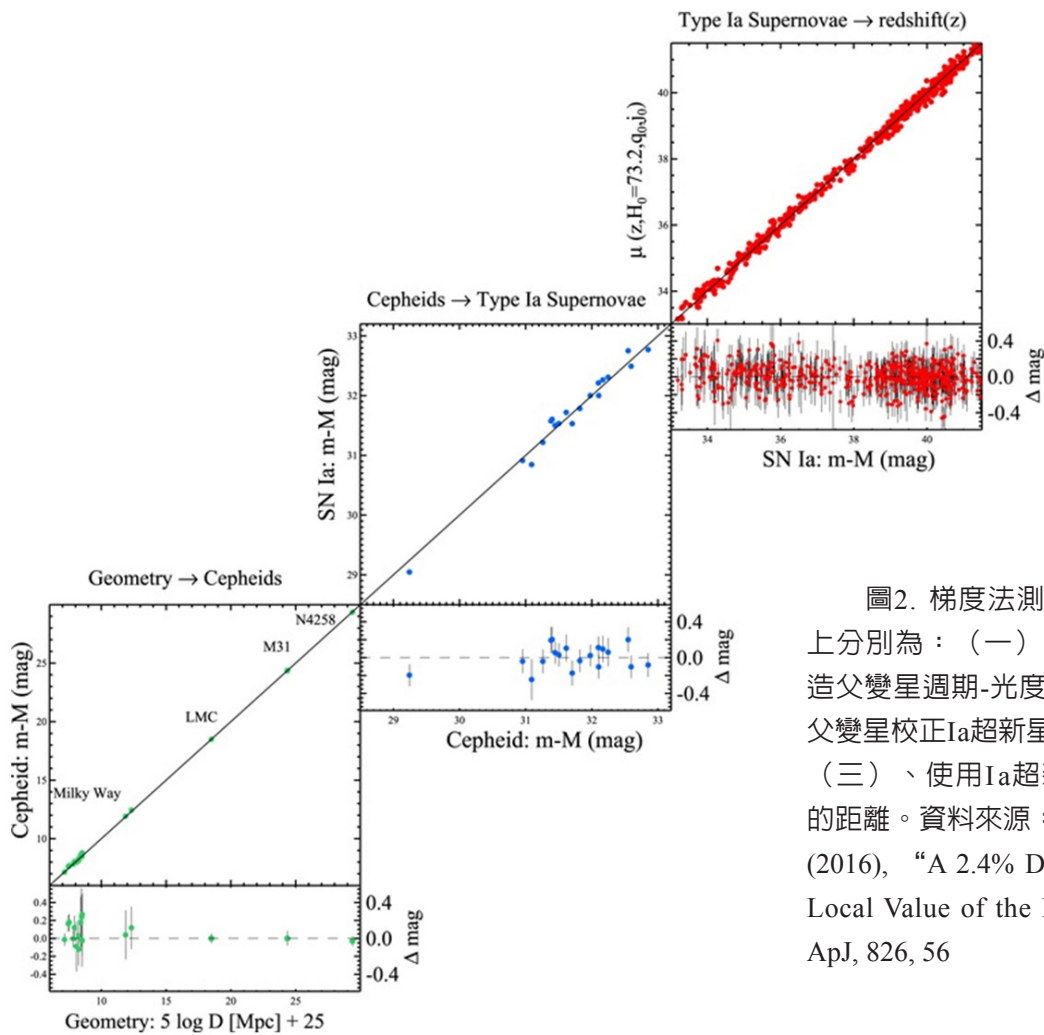


圖2. 梯度法測距離。由左下至右上分別為：（一）藉由鄰近星系校正造父變星週期-光度關係。（二）由造父變星校正Ia超新星的絕對光度峰值。（三）、使用Ia超新星定出遙遠星系的距離。資料來源：Adam Riess et al. (2016), “A 2.4% Determination of the Local Value of the Hubble Constant”, ApJ, 826, 56

常數、與暗能量狀態方程」計畫 (Supernovae,  $H_0$ , and Equation of State; SH0ES)。這個計劃使用距離梯度法，用造父變星與Ia型超新星測距離，並依此量測遙遠星系的距離以及遠離速度，來精準量測哈伯常數。其概念是：一、使用離我們最近的星系做為基準，校正造父變星的週期-光度關係。二、使用離我們較近的超新星宿主星系，同時觀測超新星與造父變星，依此校正超新星的絕對亮度峰值。三、確定了超新星的絕對亮度峰值之後，當我們觀測到遙遠星系的超新星爆發時，便能依靠超新星來定出距離（見圖2）。而為了縮小儀器造成的系統性誤差，SH0ES計劃的觀

測皆來自於哈伯太空望遠鏡，也因此可以將系統誤差降到最小，在2016年發表哈伯常數為73.24，誤差範圍僅2.4%的結果。

### 超新星量測與普朗克衛星的結果有所出入？

除了距離梯度法，我們也可以由宇宙微波背景輻射推測哈伯常數。在大爆炸之後殘留下來的餘熱約為3K，因為輻射波段為微波，所以一般稱之為宇宙微波背景輻射。當我們將所觀測到的宇宙微波背景輻射，以及其不均勻性，與理論宇宙模型擬合，

便可推估出哈伯常數。然而根據2015年歐洲普朗克衛星 (Planck satellite) 的宇宙微波背景輻射觀測結果，推估出的哈伯常數是67.8，誤差範圍為1.3%。這與距離梯度法有顯著的分歧（大於3倍標準差，見圖3）。因為宇宙微波背景輻射並沒有直接量測哈伯常數，而是基於理論模型的擬合，因此這分歧的結果暗示我們現有的宇宙模型並不完善。另外一個可能是，我們低估了距離梯度法以及宇宙微波背景輻射的系統誤差。

現下一般對距離梯度法最大的批評是Ia超新星是否真的可以當作標準燭光？早期認為Ia超新

星是由白矮星不斷吸積伴星（通常為紅巨星）的物質，當質量超過錢卓西卡極限（1.44倍太陽質量）時而爆炸形成超新星。也因為爆炸時的質量固定，我們可以依理論推測Ia超新星爆炸時的亮度峰值。但是根據最近的觀測結果發現，Ia超新星不一定是從白矮星吸積伴星質量而來，也有可能是由兩顆白矮星對撞而來。那麼Ia超新星的亮度峰值就不是固定的，也就不能拿Ia超新星來當標準燭光？

雖然Ia超新星的前驅有待進一步的了解，但是這並不影響他們作為標準燭光。這是因為當我們使用Ia超新星測距離時，並非直接比較理論與觀測亮度峰值，而是使用許多已知宿主星系距離的鄰近超新星，建立光變曲線模板（見圖4），並與此光變曲線模板擬合，來推測遙遠超新星的距離。而SH0ES團隊在使用Ia超新星推測距離時，首先要求所有遙遠的超新星都必須在達到最大亮度前觀測到。其次當遙遠超新星光變曲線與模板有所出入時（代表非典型Ia超新星，或是源自兩個白矮星對撞），將此超新星屏棄不用。這兩點大大的排除了Ia超新星測距離的誤差。

## 重力透鏡時間延遲與超新星結果一致

除了距離梯度法之外，另外一個直接量測哈伯常數的方法，是透過重力透鏡時間延遲。根據愛因斯坦的相對論，大質量的天體會造成時間與空間顯著的彎曲，聚焦遠方背景天體的光，有時可看到同一天體被聚焦為多個影像，因此又稱為重力透鏡效應（見圖5）。這多個被聚焦的影像會通過不同的彎曲時空，因此抵達地球上的觀測者時會有時間差（見圖6）。而這時間差與哈伯常數的大小成正比，因此量測時間差可讓我們直接量測哈伯常數。

前中研院天文所研究員，現任職於德國馬克斯普朗克研究所的蘇游瑄博士等人，便是使用這個方法，量測出哈伯常數為71.9，誤差範圍僅4%，並與距離梯度法結果一致。

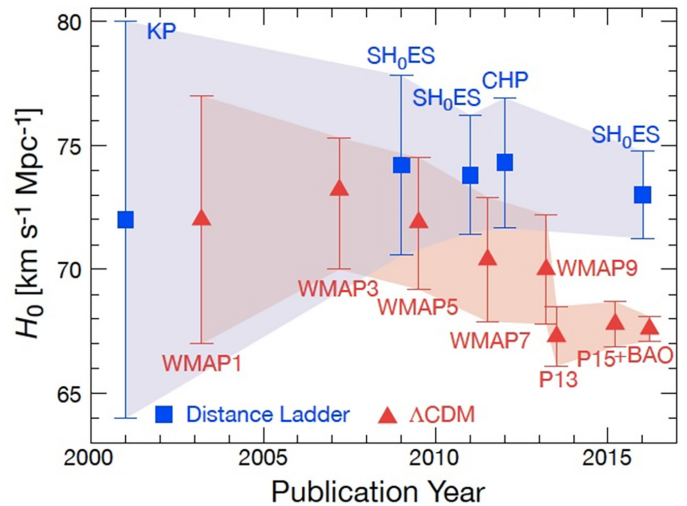


圖3. 距離梯度法（藍色方形）與宇宙微波背景輻射（紅色三角形）近十幾年量測的哈伯常數。普朗克衛星所推估的結果（P13, P15）與距離梯度法有顯著的差異。資料來源：Wendy Freedman (2017), “Cosmology at a crossroads”, Nature Astronomy, 1, 0121

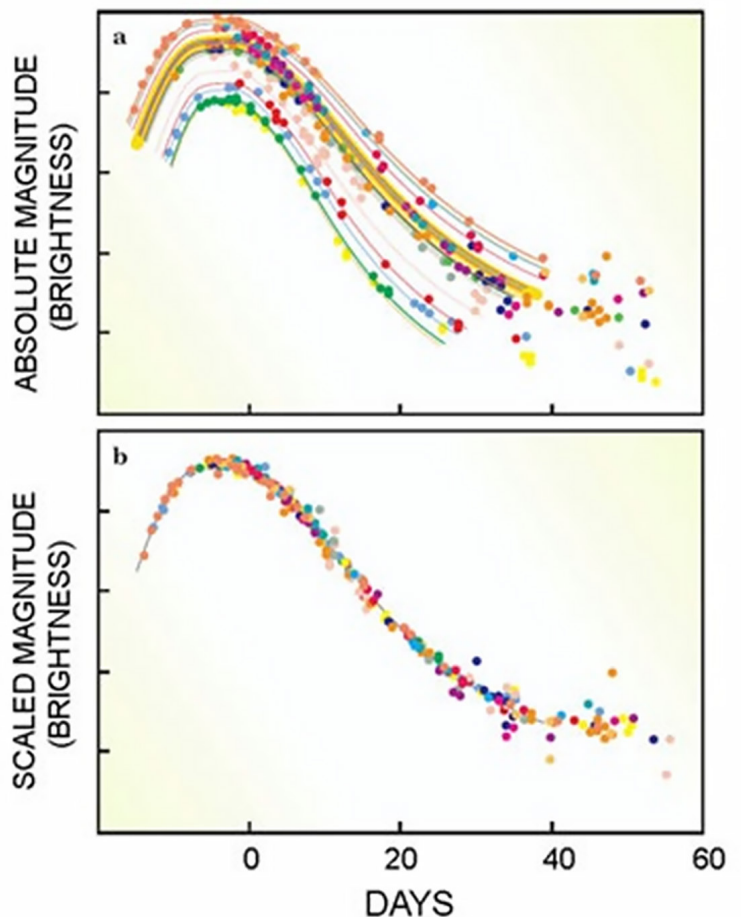


圖4. Ia超新星光變曲線（上）以及模板（下）。資料來源：加州大學柏克萊分校勞倫斯實驗室超新星宇宙學計畫，<http://www-supernova.lbl.gov/public/papers/aasposter198dir/aasposter.html>

## 展望

目前距離梯度法最大的不確定性來自於我們對造父變星的距離量測不夠精準。隨著蓋亞 (Gaia) 望遠鏡的升空，我們將能藉由視差法大大降低銀河系中造父變星的距離誤差，使得距離梯度法可以在2020年將哈伯常數的量測誤差縮小至1%。同時，隨著許多正在進行以及即將上線的大規模巡天計畫，我們可望發現大量適合時間延遲量測的重力透鏡系統，在不遠的將來使用重力透鏡量測哈伯常數至百分之一的精準度，檢驗距離梯度法。

在宇宙微波背景輻射方面，將有南極望遠鏡 (South pole telescope, SPT) 以及智利的阿塔卡馬宇宙學望遠鏡 (Atacama Cosmology telescope, ACT) 等計畫，提供宇宙微波背景輻射，驗證普朗克衛星的結果。期待在不遠的將來，我們能了解哈伯常數的分歧，究竟是來自低估的誤差，或是有未知的物理機制。

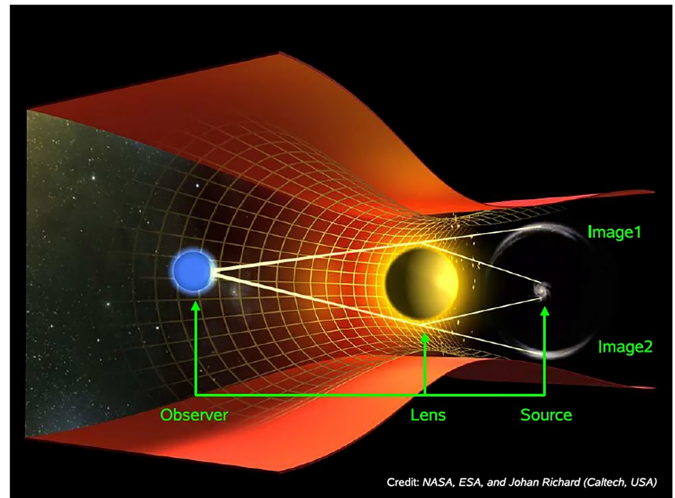


圖5. 重力透鏡示意圖。資料來源：NASA/ESA/Johan Richard

李見修：Subaru望遠鏡支援天文學家

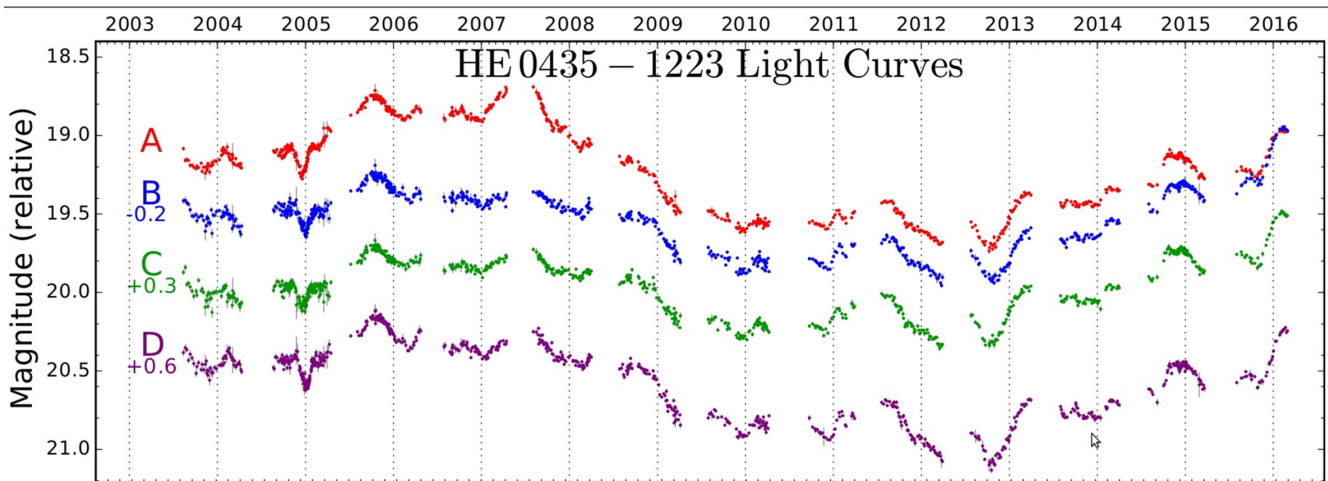
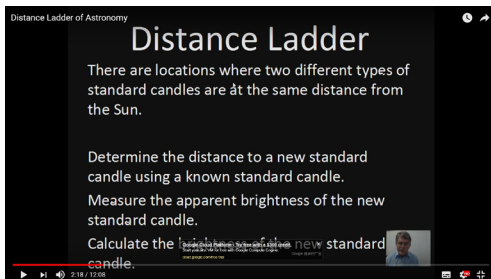


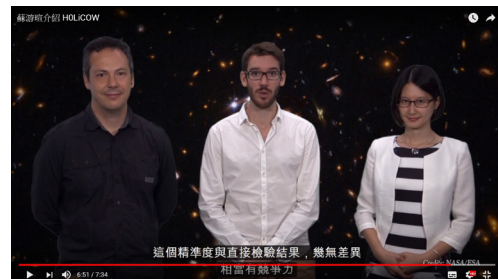
圖6. 重力透鏡時間延遲。資料來源：H0LiCOW團隊 (<https://shsuyu.github.io/H0LiCOW/site/paperV.html>)

### YouTube相關影片：



距離梯度法

<https://www.youtube.com/watch?v=L7xdwbuTtp8>



H0LiCOW使用重力透鏡時間延遲量測哈伯常數

<https://www.youtube.com/watch?v=h-ISrSrFTKY>