

量天尺

天聞 本報訊 十月廿四日
 中研院天文所季訊
 ASIAA Quarterly Press
 http://www.asiaa.ntu.edu.tw

專刊

量天尺使用說明

為了讓讀者能瞭解觀測原理，特別將量天尺的各個部分，以圖解方式說明如下。本量天尺，係以1天文單位(15萬公里)為一單位，每格代表1天文單位。

量天尺以「距離」為標尺，以距離為一維量度方式。我們所討論的距離，均指在太陽系內之距離。因此，量天尺上所有距離，均指與太陽的距離。至於「時間」與「速度」等物理量，則不在量天尺的討論範圍內。至於「速度」與「時間」等物理量，則不在量天尺的討論範圍內。

量天尺的各個部分，以圖解方式說明如下。本量天尺，係以1天文單位(15萬公里)為一單位，每格代表1天文單位。

量天尺的各個部分，以圖解方式說明如下。本量天尺，係以1天文單位(15萬公里)為一單位，每格代表1天文單位。

量天尺的各個部分，以圖解方式說明如下。本量天尺，係以1天文單位(15萬公里)為一單位，每格代表1天文單位。

量天尺的各個部分，以圖解方式說明如下。本量天尺，係以1天文單位(15萬公里)為一單位，每格代表1天文單位。

量天尺的各個部分，以圖解方式說明如下。本量天尺，係以1天文單位(15萬公里)為一單位，每格代表1天文單位。

量天尺的各個部分，以圖解方式說明如下。本量天尺，係以1天文單位(15萬公里)為一單位，每格代表1天文單位。

量天尺的各個部分，以圖解方式說明如下。本量天尺，係以1天文單位(15萬公里)為一單位，每格代表1天文單位。

量天尺的各個部分，以圖解方式說明如下。本量天尺，係以1天文單位(15萬公里)為一單位，每格代表1天文單位。

量天尺的各個部分，以圖解方式說明如下。本量天尺，係以1天文單位(15萬公里)為一單位，每格代表1天文單位。

量天尺的各個部分，以圖解方式說明如下。本量天尺，係以1天文單位(15萬公里)為一單位，每格代表1天文單位。

量天尺的各個部分，以圖解方式說明如下。本量天尺，係以1天文單位(15萬公里)為一單位，每格代表1天文單位。

量天尺的各個部分，以圖解方式說明如下。本量天尺，係以1天文單位(15萬公里)為一單位，每格代表1天文單位。

量天尺的各個部分，以圖解方式說明如下。本量天尺，係以1天文單位(15萬公里)為一單位，每格代表1天文單位。

量天尺的各個部分，以圖解方式說明如下。本量天尺，係以1天文單位(15萬公里)為一單位，每格代表1天文單位。

量天尺的各個部分，以圖解方式說明如下。本量天尺，係以1天文單位(15萬公里)為一單位，每格代表1天文單位。

量天尺的各個部分，以圖解方式說明如下。本量天尺，係以1天文單位(15萬公里)為一單位，每格代表1天文單位。

量天尺的各個部分，以圖解方式說明如下。本量天尺，係以1天文單位(15萬公里)為一單位，每格代表1天文單位。

量天尺的各個部分，以圖解方式說明如下。本量天尺，係以1天文單位(15萬公里)為一單位，每格代表1天文單位。

量天尺的各個部分，以圖解方式說明如下。本量天尺，係以1天文單位(15萬公里)為一單位，每格代表1天文單位。

量天尺的各個部分，以圖解方式說明如下。本量天尺，係以1天文單位(15萬公里)為一單位，每格代表1天文單位。

量天尺的各個部分，以圖解方式說明如下。本量天尺，係以1天文單位(15萬公里)為一單位，每格代表1天文單位。

量天尺的各個部分，以圖解方式說明如下。本量天尺，係以1天文單位(15萬公里)為一單位，每格代表1天文單位。

量天尺的各個部分，以圖解方式說明如下。本量天尺，係以1天文單位(15萬公里)為一單位，每格代表1天文單位。

量天尺的各個部分，以圖解方式說明如下。本量天尺，係以1天文單位(15萬公里)為一單位，每格代表1天文單位。

Cosmic Distance Ladder

小學生都學過量尺，老師都會教如何用光暈尺量測天體的距離。雖然量尺的用途很廣，但量天尺的用途更廣。量天尺不僅可以用來量測天體的距離，還可以用來量測天體的質量、溫度、光度等等。量天尺的用途非常廣泛，是天文學家的重要工具。



圖為「宇宙距離階梯」的示意圖。圖中展示了從地球到不同天體的距離，包括月球、太陽系行星、鄰近恆星、星團、星系以及超星系團。

雖然有些距離不容易量測（例如地球到月球或月球到太陽），無法直接量測的單位，但我們可以用間接的方法來量測。例如，我們可以用三角視差法來量測恆星的距離。三角視差法是通過觀察恆星在地球繞太陽公轉時的視位置變化來量測距離的。

三角視差法在量測距離上，範圍最廣的是量測鄰近恆星的距離。三角視差法的量測範圍大約在100光年以內。對於更遠的恆星，我們可以用其他的方法來量測，例如紅巨星標準燭光法。

紅巨星標準燭光法是一種利用恆星的顏色和光度來量測距離的方法。紅巨星的顏色和光度與它們的距離有密切的關係。通過量測紅巨星的顏色和光度，我們可以推算出它們的距離。

除了這些方法，我們還可以用超新星來量測距離。超新星是一種非常亮的爆炸現象，它們的光度與距離有密切的關係。通過量測超新星的光度，我們可以推算出它們的距離。

超新星標準燭光法是一種利用超新星的光度來量測距離的方法。超新星的光度與距離有密切的關係。通過量測超新星的光度，我們可以推算出它們的距離。

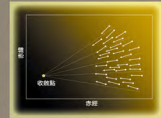
超新星標準燭光法是一種利用超新星的光度來量測距離的方法。超新星的光度與距離有密切的關係。通過量測超新星的光度，我們可以推算出它們的距離。

超新星標準燭光法是一種利用超新星的光度來量測距離的方法。超新星的光度與距離有密切的關係。通過量測超新星的光度，我們可以推算出它們的距離。

超新星標準燭光法是一種利用超新星的光度來量測距離的方法。超新星的光度與距離有密切的關係。通過量測超新星的光度，我們可以推算出它們的距離。

自行 Proper Motion

恆星在天球上移動的現象，稱為自行。自行是恆星在天球上的運動，它是由於恆星在空間中的運動造成的。自行可以用來量測恆星的距離和速度。通過量測恆星的自行，我們可以推算出它們的距離和速度。



自行可以用來量測恆星的距離和速度。通過量測恆星的自行，我們可以推算出它們的距離和速度。自行的量測需要精確的觀測數據和複雜的計算。天文學家通常使用干涉儀來量測恆星的自行。

自行的量測需要精確的觀測數據和複雜的計算。天文學家通常使用干涉儀來量測恆星的自行。自行的量測可以幫助我們了解恆星的運動和演化。

自行的量測可以幫助我們了解恆星的運動和演化。通過量測恆星的自行，我們可以推算出它們的距離和速度。自行的量測是天文學的重要組成部分。

自行的量測是天文學的重要組成部分。通過量測恆星的自行，我們可以推算出它們的距離和速度。自行的量測可以幫助我們了解恆星的運動和演化。

自行的量測可以幫助我們了解恆星的運動和演化。通過量測恆星的自行，我們可以推算出它們的距離和速度。自行的量測是天文學的重要組成部分。

自行的量測是天文學的重要組成部分。通過量測恆星的自行，我們可以推算出它們的距離和速度。自行的量測可以幫助我們了解恆星的運動和演化。

自行的量測可以幫助我們了解恆星的運動和演化。通過量測恆星的自行，我們可以推算出它們的距離和速度。自行的量測是天文學的重要組成部分。

自行的量測是天文學的重要組成部分。通過量測恆星的自行，我們可以推算出它們的距離和速度。自行的量測可以幫助我們了解恆星的運動和演化。

自行的量測可以幫助我們了解恆星的運動和演化。通過量測恆星的自行，我們可以推算出它們的距離和速度。自行的量測是天文學的重要組成部分。

自行的量測是天文學的重要組成部分。通過量測恆星的自行，我們可以推算出它們的距離和速度。自行的量測可以幫助我們了解恆星的運動和演化。

三角視差 Parallax (地面觀測)

三角視差法是一種利用地球繞太陽公轉時的視位置變化來量測距離的方法。三角視差法的量測範圍大約在100光年以內。

三角視差法的量測範圍大約在100光年以內。對於更遠的恆星，我們可以用其他的方法來量測，例如紅巨星標準燭光法。

紅巨星標準燭光法是一種利用恆星的顏色和光度來量測距離的方法。紅巨星的顏色和光度與它們的距離有密切的關係。

除了這些方法，我們還可以用超新星來量測距離。超新星是一種非常亮的爆炸現象，它們的光度與距離有密切的關係。

超新星標準燭光法是一種利用超新星的光度來量測距離的方法。超新星的光度與距離有密切的關係。通過量測超新星的光度，我們可以推算出它們的距離。

超新星標準燭光法是一種利用超新星的光度來量測距離的方法。超新星的光度與距離有密切的關係。通過量測超新星的光度，我們可以推算出它們的距離。

超新星標準燭光法是一種利用超新星的光度來量測距離的方法。超新星的光度與距離有密切的關係。通過量測超新星的光度，我們可以推算出它們的距離。

超新星標準燭光法是一種利用超新星的光度來量測距離的方法。超新星的光度與距離有密切的關係。通過量測超新星的光度，我們可以推算出它們的距離。

三角視差 (衛星觀測)

三角視差法是一種利用衛星繞地球公轉時的視位置變化來量測距離的方法。三角視差法的量測範圍大約在1000光年以內。

三角視差法的量測範圍大約在1000光年以內。對於更遠的恆星，我們可以用其他的方法來量測，例如紅巨星標準燭光法。

紅巨星標準燭光法是一種利用恆星的顏色和光度來量測距離的方法。紅巨星的顏色和光度與它們的距離有密切的關係。

除了這些方法，我們還可以用超新星來量測距離。超新星是一種非常亮的爆炸現象，它們的光度與距離有密切的關係。

超新星標準燭光法是一種利用超新星的光度來量測距離的方法。超新星的光度與距離有密切的關係。通過量測超新星的光度，我們可以推算出它們的距離。

超新星標準燭光法是一種利用超新星的光度來量測距離的方法。超新星的光度與距離有密切的關係。通過量測超新星的光度，我們可以推算出它們的距離。

超新星標準燭光法是一種利用超新星的光度來量測距離的方法。超新星的光度與距離有密切的關係。通過量測超新星的光度，我們可以推算出它們的距離。

超新星標準燭光法是一種利用超新星的光度來量測距離的方法。超新星的光度與距離有密切的關係。通過量測超新星的光度，我們可以推算出它們的距離。

自行 Proper Motion

主序帶平移法 Main Sequence Fitting

造父變星 Cepheid Variable

主序帶平移法是一種利用恆星的光度和顏色來量測距離的方法。主序帶平移法的量測範圍大約在1000光年以內。

主序帶平移法的量測範圍大約在1000光年以內。對於更遠的恆星，我們可以用其他的方法來量測，例如紅巨星標準燭光法。

紅巨星標準燭光法是一種利用恆星的顏色和光度來量測距離的方法。紅巨星的顏色和光度與它們的距離有密切的關係。

除了這些方法，我們還可以用超新星來量測距離。超新星是一種非常亮的爆炸現象，它們的光度與距離有密切的關係。

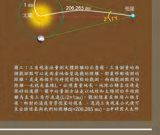
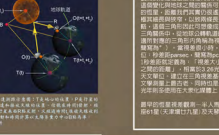
超新星標準燭光法是一種利用超新星的光度來量測距離的方法。超新星的光度與距離有密切的關係。通過量測超新星的光度，我們可以推算出它們的距離。

超新星標準燭光法是一種利用超新星的光度來量測距離的方法。超新星的光度與距離有密切的關係。通過量測超新星的光度，我們可以推算出它們的距離。

超新星標準燭光法是一種利用超新星的光度來量測距離的方法。超新星的光度與距離有密切的關係。通過量測超新星的光度，我們可以推算出它們的距離。

雷達測距與月球雷射測距 Radar Ranging and Lunar Laser Ranging

雷達測距是一種利用雷達波來量測距離的方法。雷達測距的範圍大約在1000公里以內。月球雷射測距是一種利用雷射光來量測距離的方法。月球雷射測距的範圍大約在38萬公里以內。



【量天尺】

小學生都學過測量，老師教導如何用米達尺量桌子的長和寬，難度高一點的測量是教室的大小。如果要求用米達尺量操場跑道的長度，可就用錯了工具，要量數百公尺的跑道，適當的工具是皮尺，同學們一人拉著皮尺的一端，很容易就量出跑道長度。那如果要測量淡水河的寬度、或是地球的周長、月球的距離、星星的距離、甚至是宇宙的大小，絕對是難上青天的任務。

雖然有些測量點不容易到達（例如淡水河的對岸或月球），無法用實體的皮尺，但我們可以用雷射光充當皮尺，測量雷射光來回的時間，便可以推算距離。對於更長距離的測量，我們可以借用埃及人發展的幾何測量來推算距離：只要知道三角形的一個邊長（作為基底），以及相鄰的兩個角度，便可以算出另兩段邊長。

前述兩種在某種程度上，都算是直接測量，限於測量極限，可達的距離遠小於宇宙的一般尺度（例如三角視差法最多只能測量銀河大小的三十分之一）。天文學家接下來用的方式不外乎標準燭光和標準尺兩類。我們知道燭光離我們越遠，亮度也就跟著變暗，變暗的程度和距離的平方成反比。如果我們知道燭光真正的亮度（內秉光度，每單位時間發出的能量），然後測量所看到的亮度，便可以算出距離。如何知道天上星體的真正亮度？這全仗我們對該特殊天體物理特性的瞭解，例如造父變星，我們知道造父變星亮度改變的原因，進而得知它的內秉光度。



圖說:兩種量測宇宙距離的方法(左:根據標準燭光,例如主序帶平移法、造父變星、塔利-費雪關係、超新星;右:根據標準尺,例如桑尼也夫-則多維區效應)。© NASA/JPL-Caltech

同樣的原理，發光體離我們越遠越暗，發光體的尺寸則是離越遠越小。若能事先知道該天體的實際尺寸大小，便可以從看到的角度大小（angular size），推算出距離。這樣的天體便是天文學家所說的標準尺，例如 SZ 效應測量出來的星系團大小即是一例。

限於觀測技術的極限，不同尺度的距離，天文學家用不同的測量方式；就像是爬樓梯一樣，一階一階向著遙遠天際前進。千萬不要認為這座天梯只不過量量距離，要知道測量距離才是瞭解宇宙運行的基礎，否則，一切天象幻化就像是皮影戲布幕上的演出，太虛了！（曾耀寰）



天聞季報海報版與網路版由中央研究院天文及天文物理研究所製作，
以創用 [CC 姓名標示-非商業性-禁止改作 3.0 台灣 授權條款](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/tw/) 釋出。
天聞季報網路版衍生自天聞季報海報版。超出此條款範圍外的授權，請與我們聯繫。
創用 CC 授權可於以下網站查閱諮詢 <https://isp.moe.edu.tw/ccedu/service.php>。

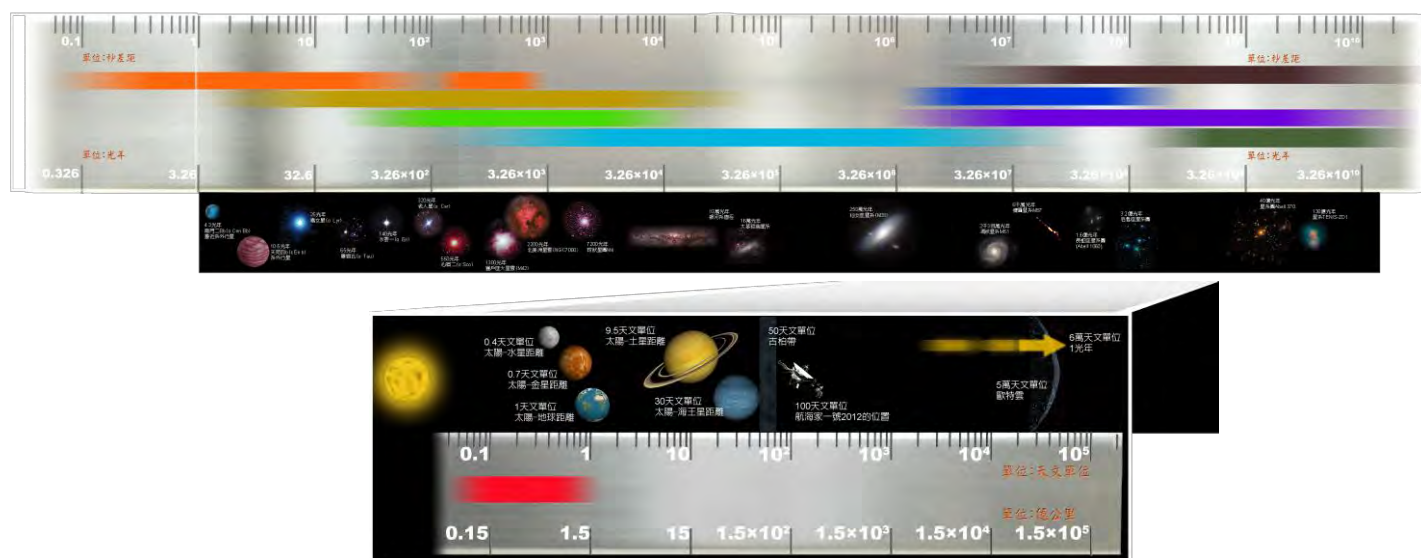
【量天尺使用說明】

為了讓量天這個抽象的觀念變得具體，跨越本專刊正反兩面，我們設計了一把虛擬的尺來介紹宇宙量測的方法。

這把尺以「秒差距」為標準單位，相鄰刻度間以十的倍數增減，尺的上下兩側除標示秒差距外，也標示了對應的光年數。例如：10 秒差距=32.6 光年。

此外，為了特別介紹太陽系內的量測，我們將尺前端 1 秒差距範圍內放大，這把小尺以「天文單位」為單位，相鄰刻度間以十的倍數增減，尺的上下兩側除標示天文單位外，也標示了對應的億公里數。例如：10 天文單位=15 億公里。

量天尺內不同顏色的長條各代表一種測量方法。長條的開始與結束，代表各方法目前已知的可量測範圍。長條顏色同時亦有相應標題顏色的專欄文字簡介，例如：橘色長條對應三角視差。為了能讓抽象的測距數字更有具體感，尺的下方輔以實際天體的影像，並標誌其名稱與距離，方便讀者對照。（蔡殷智）



(詳圖請見季報縮圖)

量天尺中的天體影像版權資訊：

- ◆ 太陽、水星、金星、地球、土星、海王星、古柏帶、歐特雲 © 中研院天文所；
- ◆ 航海家一號 © NASA
- ◆ 南門二 Bb、天苑四 b © 中研院天文所；
- ◆ 織女星 © NASA/JPL-Caltech/University of Arizona；
- ◆ 畢宿五 © Lynn Laux；老人星 © NASA；
- ◆ 心宿二、獵戶座大星雲、北美洲星雲、球狀星團 M4、銀河系、大麥哲倫星系、仙女座星系 © 王為豪；
- ◆ 渦狀星系 M51 © NASA/ESA；橢圓星系 M87 © Juan-Carlos Algaba-Marcos/中研院天文所；
- ◆ 長蛇座星系團 © Australian Astronomical Observatory；

- ◆ 后髮座星系團© Leigh Jenkins, Ann Hornschemeier et al. /Goddard Space Flight Center, JPL-Caltech, SDSS, NASA ;
- ◆ 星系團 Abell 370© NASA, ESA, the Hubble SM4 ERO Team, and ST-ECF ;
- ◆ 星系 TENIS-ZD1© 謝寶慶、王為豪/中研院天文所



天聞季報海報版與網路版由中央研究院天文及天文物理研究所製作，
以創用 CC 姓名標示-非商業性-禁止改作 3.0 台灣 授權條款釋出。
天聞季報網路版衍生自天聞季報海報版。超出此條款範圍外的授權，請與我們聯繫。
創用 CC 授權可於以下網站查閱諮詢 <https://isp.moe.edu.tw/ccedu/service.php>。

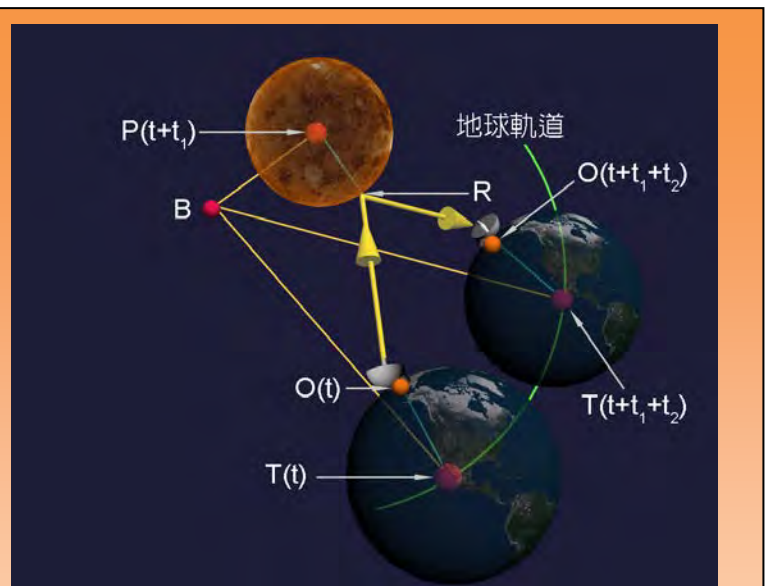
【雷達測距與月球雷射測距】

雷達在二次大戰結束後就成為天文學研究的工具。1946 年接收到月球反射的回波，1961 年金星，稍後更延伸到水星、火星、甚至於木星系統等太陽系天體。

原則上，由於時間可以精確的測量，計算電磁波信號傳播所需要的時間，再乘上電磁波的速度，也就是光速，可以決定距離。實際上，當信號發射、反射、接收時，地球也移動到新的位置，其中的變化可透過天體力學軌道計算來比對。另一方面，透過雷達測定金星等天體的距離和運動，可以準確決定「天文單位」的大小。「天文單位」即 Astronomical Unit，簡寫為 au，最初定義為地球到太陽的平均距離，是測量太陽系內大小天體運動和太陽近旁恆星視差的基礎。國際天文聯合會 IAU 在 2012 年重新定義 $1 \text{ au} = 149,597,870,700$ 公尺。

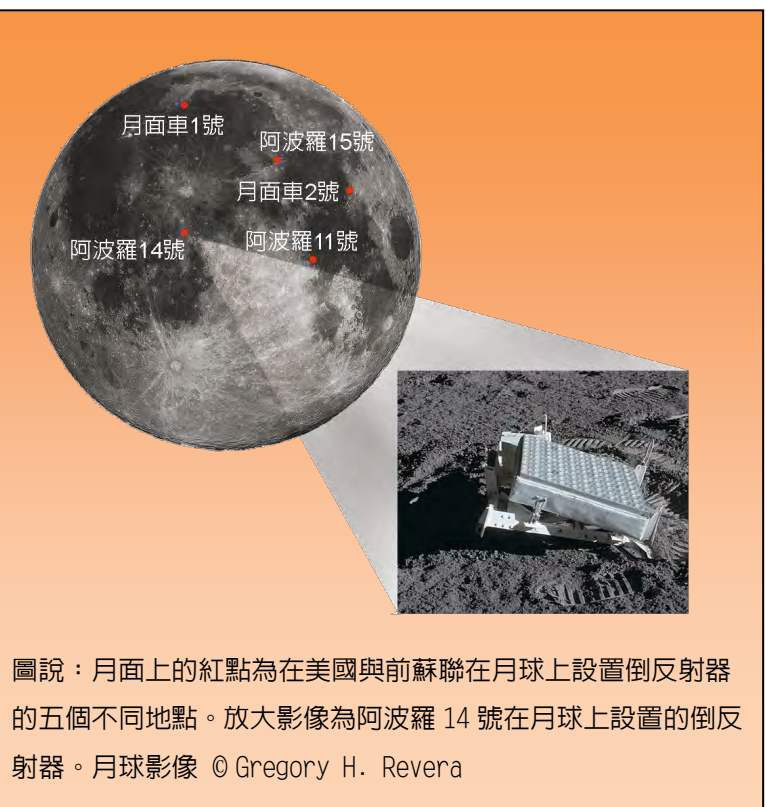
雷達測距需要考慮的實際因素，包括大氣的折射、電子電路和光學系統的延遲、是否通過日冕或太陽風的路徑、相對論的影響、發射與接收兩端相對運動所產生的都卜勒效應等等。觀測精度小於 1 公里，最大的誤差來源是行星的半徑。Victor 和 Stevens 當年使用 13 千瓦的雷達，頻率 2,388 MHz，照射到金星表面只剩 10 瓦，其中的 90% 被金星吸收，其餘往各方向散射，以致於地面上直徑 26 公尺的天線收到信號時僅剩 10-20 瓦。

雷射在 1960 年誕生後，美國阿波羅計畫太空船 11 號、14 號、15 號和前蘇聯的無人太空船月面車 (Lunokhod) 1 號、2 號在月球上五個不同的地點設置了倒反射器 (retroreflectors)，平均面積小於 0.15m^2 ，迄今多半仍順利運作。雖



圖說：行星雷達測距示意圖：T 是地心的位置，P 是行星的位置，O 是雷達和接收天線的位置。信號在時間 t 發射，經過時間 t_1 後由行星表面 R 點反射，又經過時間 t_2 後被天線收到。行星軌道運動和時間計算以太陽系重力中心 B 點為準。

© 中研院天文所



圖說：月面上的紅點為在美國與前蘇聯在月球上設置倒反射器的五個不同地點。放大影像為阿波羅 14 號在月球上設置的倒反射器。月球影像 © Gregory H. Revera

然使用的高能脈衝雷射光束在大氣中擴散角大約只有 4 角秒 (1 度 = 3600 角秒)，照射到月球上卻能涵蓋幾公里寬的區域，再經由倒反射器反射回來，地球接收站望遠鏡所收到的信號，強度差不多只剩下幾個光子。

月球雷射測距 (Lunar Laser Ranging) 的精度小於 2 公分，相對誤差達 4×10^{-11} ，可以用來研究海洋、大氣等地球物理模型，甚至於驗證愛因斯坦的廣義相對論。 (金升光)

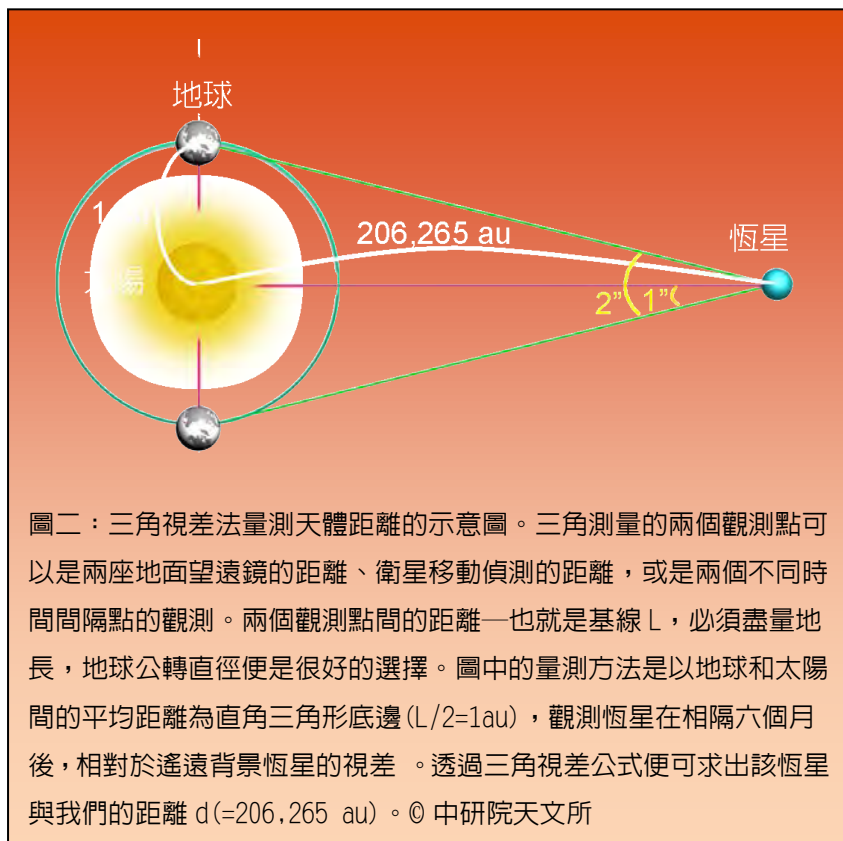
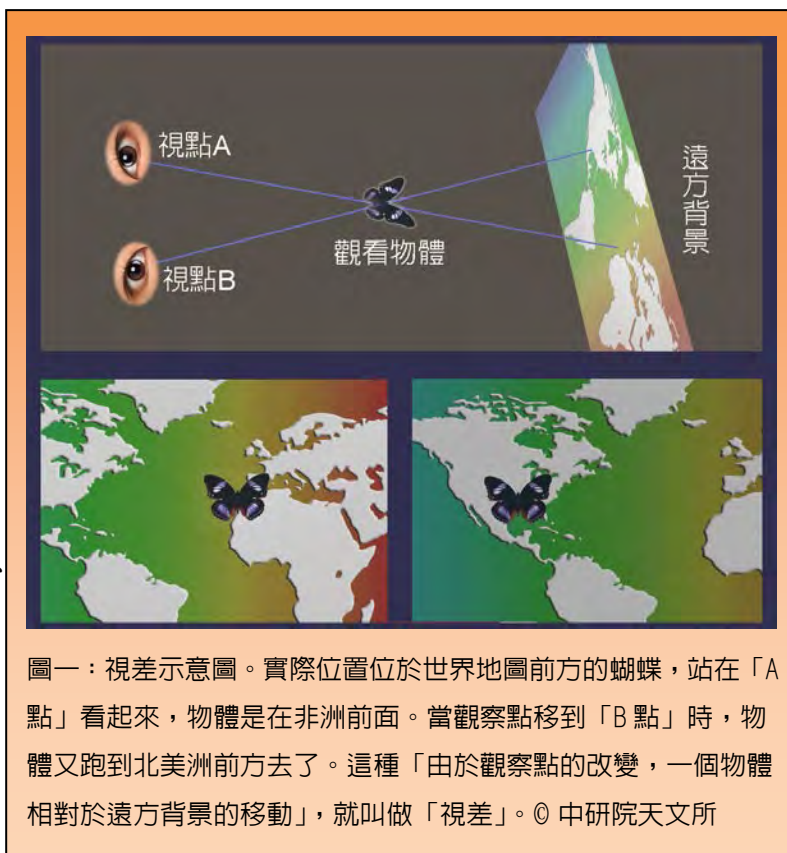


天聞季報海報版與網路版由中央研究院天文及天文物理研究所製作，
以創用 CC 姓名標示-非商業性-禁止改作 3.0 台灣 授權條款釋出。
天聞季報網路版衍生自天聞季報海報版。超出此條款範圍外的授權，請與我們聯繫。
創用 CC 授權可於以下網站查閱諮詢 <https://isp.moe.edu.tw/ccedu/service.php>。

【三角視差】

當我們用「單眼」看東西，從左右眼分別看到的同一物體所在位置卻有差異。如果站在兩個不同點作觀察，物體位置的差異更明顯（如圖一所示）。「由於觀察點改變，物體相對於遠方背景的移動」就叫做「視差」。越近物體造成的視差會越大，越遠越小，因此由視差可以推算物體與觀察者之間的距離。

三角視差是測量距離最簡單的方法，原理是視差及三角函數，在天文學上常應用在月球、太陽、和鄰近恆星的測距上。如圖二所示，地球繞著太陽公轉，不同時間點觀測到鄰近恆星出現在背景天空上的位置會有所變化，這個變化與地球之間的關係可畫成三角形。即便是鄰近的恆星，距離我們其實仍很遙遠，因此這個三角形顯得極其細長與狹窄，以致兩條長邊的長度差異可以完全忽略，這個三角形因此可



想像成直角或是等腰三角形。此三角關係中，從地球公轉軌道的平均半徑（1 au）為底邊所對應的三角形內角稱為視差 p （單位：角秒 arcsec 簡寫為 $''$ ）。當視差很小時，恆星與我們的距離 d （單位：秒差距 parsec，簡寫為 pc）相當於視差的倒數。而 1 秒差距就定義為：「視差大小為 1 角秒時，恆星與我們之間的距離」，相當於 3.26 光年，也就是 206,265.806 天文單位。建立在三角視差基礎上的「秒差距」，是天文學測量上最古老、同時也是最標準的距離量度單位。光年則多使用在大眾化媒體上。

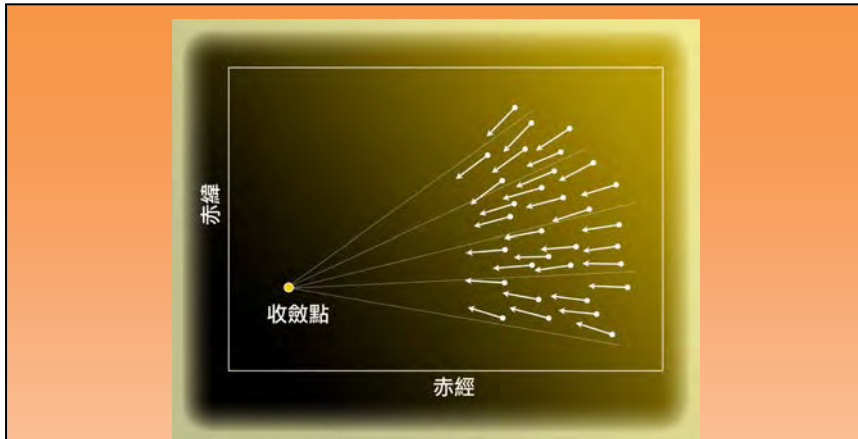
最早的恆星視差觀測—半人馬座 α 星(南門二星)、天鵝座 61 星(天津增廿九星)及天琴座 α 星(織女星)，在 1838 年同時被發表。至今，利用三角視差測量鄰近恆星，一般地面望遠鏡的有效距離可達 100 秒差距。地球大氣層外衛星的有效測量的範圍更推至數百秒差距(約 1,600 光年)—如歐洲太空總署於 1989 發射的依巴谷衛星 (Hipparcos)。哈柏望遠鏡量測有效範圍更遠，達 1000 秒差距 (約 3,260 光年，準確性達千分之一角秒)。預計 2013 上線的歐洲太空總署蓋亞任務，將來可望讓視差角的測量精確度達到 10 微角秒 (1 微角秒=百萬分之一角秒)，將能夠繪製出鄰近地球數萬光年內恆星的位置分佈圖。 (陳筱琪)



天聞季報海報版與網路版由中央研究院天文及天文物理研究所製作，
以創用 CC 姓名標示-非商業性-禁止改作 3.0 台灣 授權條款釋出。
天聞季報網路版衍生自天聞季報海報版。超出此條款範圍外的授權，請與我們聯繫。
創用 CC 授權可於以下網站查閱諮詢 <https://isp.moe.edu.tw/ccedu/service.php>。

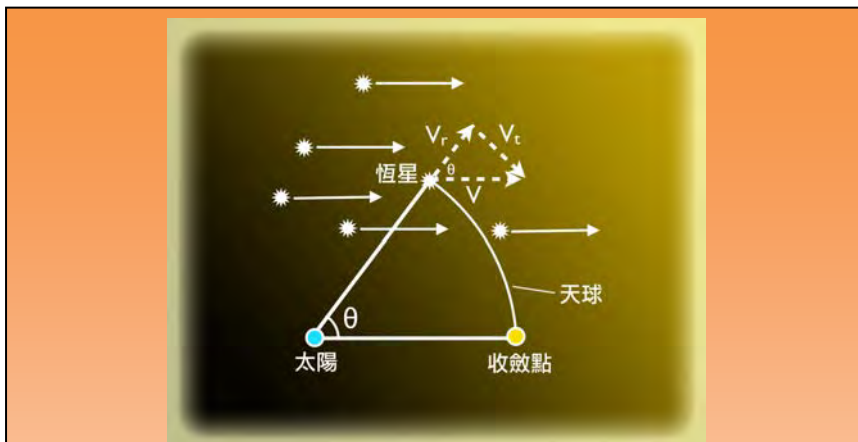
【自行】

天球是天文學上假想出的球面，和地球同圓心、擁有相同自轉軸、但半徑無限大。從地球望出，天空中所有的物體都可視為投影在天球上的物件，而「自行」指的就是「恆星在天球上的移動」。



圖一：星團中恆星在天球上的自行運動。

從地球上看起來，星團中每顆恆星的自行運動都會在天球上劃出一條180度的大圓軌跡，這些軌跡會在「來」和「去」兩個方向的極遠盡頭交會成兩個收斂點。這就好比一輛車子從極遠處駛近，從眼前通過後，又在極遠處消失，車子的尺寸看起來會從一個點，變成一輛車，再變回一個點那樣。假如有個星團從宇宙極遠處接近地球，通過地球附近後，又繼續朝遠方離去，星團中恆星在天球上的自行運動，就會像一簇箭朝著遠方的標靶齊射而去那樣，所有不同位置的恆星都朝著黃色收斂點的方向前進，遠離地球。© 謝寶慶/中研院天文所



圖二：想像我們站在地球之外，從旁觀者立場觀看我們和星團之間的相對運動。

天球上，星團中恆星和收斂點之間的視角(θ)，就等於「恆星實際運動的方向」與「地球上觀看恆星的視向」之間的角度。這些恆星的實際運動速度(V)都有兩個分量：視向速度(V_r)及橫向運動速度(V_t)。視向速度可從恆星光譜吸收線的都卜勒位移除以時間計算出來，然後再由此算出橫向運動速度($V_t = V_r \cdot \tan \theta$)。將橫向運動速度除以恆星在天球上的自行角速度(視角除以時間)，便可得出此恆星與我們之間的距離。觀察星團時，只要收集位在其中的恆星樣本，觀察它們的自行，透過統計，便可推算出星團相對於我們的位置。© 謝寶慶/中研院天文所

因為地球的自轉，所有恆星看起來都像繞著北極星在運行。除此之外，恆星本身也會移動。銀河系的恆星會繞著銀河中心運轉。軌道越接近銀河中心，繞行的角速度越快，越遠則越慢。由於角速度快慢的差別，每顆恆星在天球上的相對位置也會緩慢改變。而恆星在天球上的移動速度，也跟它們和地球之間的距離有關；離地球越遠，移動速度越慢，越近則越快。雖然恆星的自行，短期間內實在很難察覺；不過只要比較數年前拍攝的

照片，就會發現恆星之間的相對位置的確有所變動。

當某個星團從宇宙極遠處接近地球，通過地球附近後，又繼續朝遠方離去。從地球上看起來，星團中每個恆星的自行運動都會在天球上劃出一條180度的大圓軌跡，這些軌跡會在「來」和「去」兩個方向的極遠盡頭交會成兩個收斂點。星團中恆星在天球上的自行運動，就好比一簇箭朝著遠方的標靶齊射而去那樣，所有不同位置的恆星都朝著黃色收斂點的方向前進，遠離地球

(如附圖)。觀察星團時，只要收集位在其中的恆星樣本，觀察它們的自行，並記錄星團中恆星的自行角速度與實際運動速度，透過換算與統計，便可以推算出星團與我們之間的距離。

然而自行只能應用在測量距離地球很近的星團上。星團如果距離地球較遠，個別恆星的自行方向看起來像是彼此平行，無法分辨，收斂點的位置因此無法精確推測，計算出來的距離也不準。此外，恆星若不互屬同一星團，僅分別是天球上某一塊天區的恆星，就沒有所謂的收斂點，無法測得視角，也就無法用這個方法求出距離了。(謝寶慶)

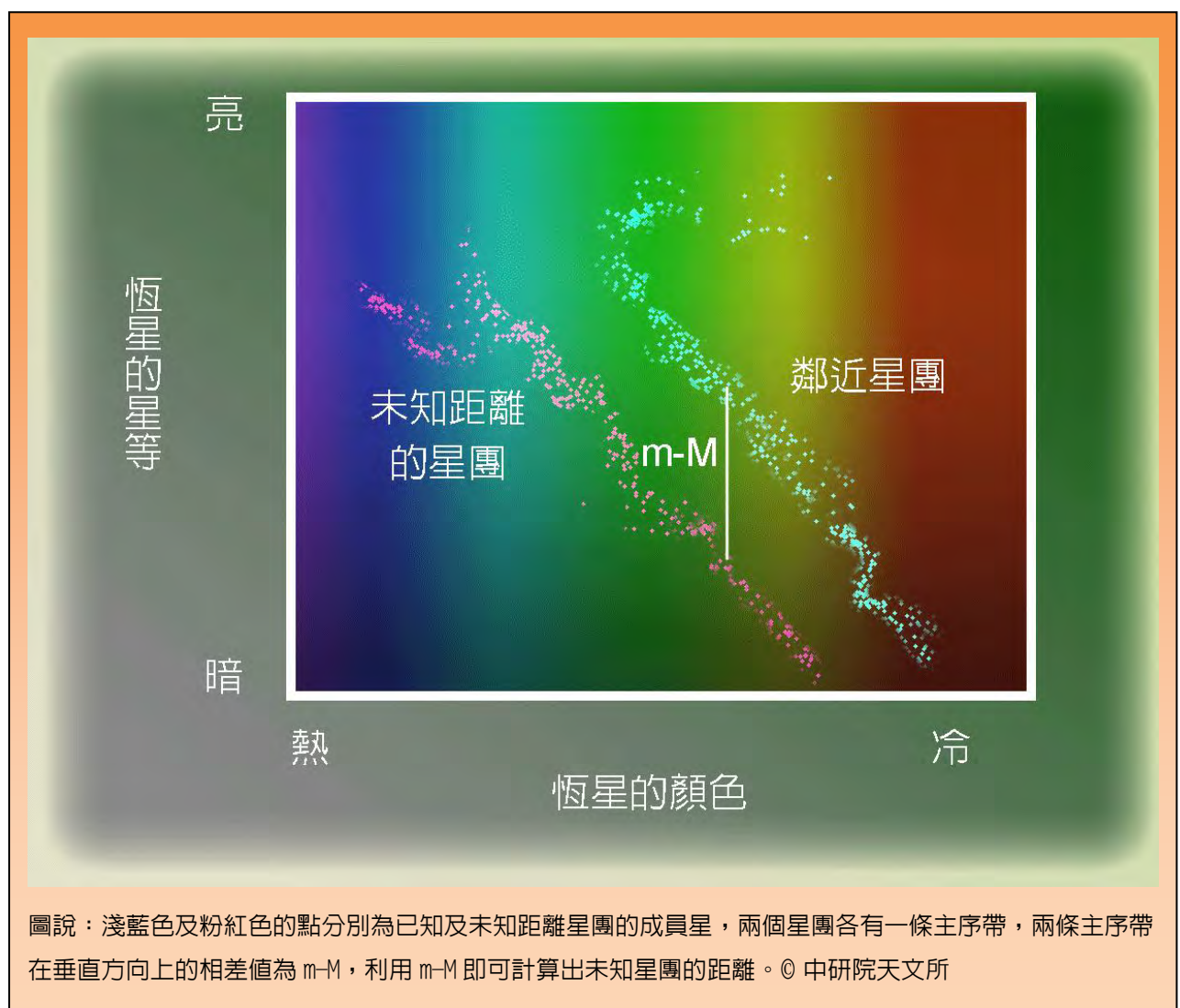


天聞季報海報版與網路版由中央研究院天文及天文物理研究所製作，
以創用CC 姓名標示-非商業性-禁止改作 3.0 台灣 授權條款釋出。
天聞季報網路版衍生自天聞季報海報版。超出此條款範圍外的授權，請與我們聯繫。
創用CC 授權可於以下網站查閱諮詢 <https://isp.moe.edu.tw/ccedu/service.php>。

【主序帶平移法】

赫羅圖（H-R Diagram）是研究恆星相當重要的工具，附圖的橫軸是恆星的顏色，縱軸是恆星的絕對星等，絕大部份的恆星從左上到右下分佈在一條名為「主序帶」的對角線上。位在主序帶上的恆星稱為主序星，其核心正進行著氫的核融合反應。

事實上，恆星一生中絕大部分時間皆處於主序星的階段。如果將已知距離星團中的成員星標示在赫羅圖上，大部份的恆星都會分佈在主序帶。其中，只有少數距離我們較近的星團可以用三角視差或自行法量出距離。鄰近星團的距離一旦被量測出來，就可以拿它們的主序帶作為標準或量尺，再利用「主序帶平移法」來推算我們銀河系中其他星團的距離。



對於那些已知距離的恆星或天體，天文學家會用以下公式算出它們的絕對星等：
 $m-M = -5 + \log_{10} d$ (m -視星等； M -絕對星等； d -距離)

所謂的「視星等 m 」就是觀測到的恆星亮度等級；而「絕對星等 M 」是恆星在距地球 10 秒差距（32.6 光年）時該有的視星等，可作為恆星實際光度的量度。只要測得未知距離恆星的視星等，以及知道同類已知距離恆星的絕對星等，距離就可以被計算出來。

在赫羅圖上畫上已知距離星團的主序帶（絕對星等 vs 顏色），及未知距離的星團的主序帶（視星等 vs 顏色），這兩條主序帶大致相互平行。將未知距離星團的主序帶平移到已知距離星團主序帶的位置，這兩條主序帶會互相重疊，而這個平移量就是 $m-M$ ，由上面的公式就可以推算出未知星團的距離 d 了。（李昫岱）



天聞季報海報版與網路版由中央研究院天文及天文物理研究所製作，
以創用 CC 姓名標示-非商業性-禁止改作 3.0 台灣 授權條款釋出。
天聞季報網路版衍生自天聞季報海報版。超出此條款範圍外的授權，請與我們聯繫。
創用 CC 授權可於以下網站查閱諮詢 <https://isp.moe.edu.tw/ccedu/service.php>。

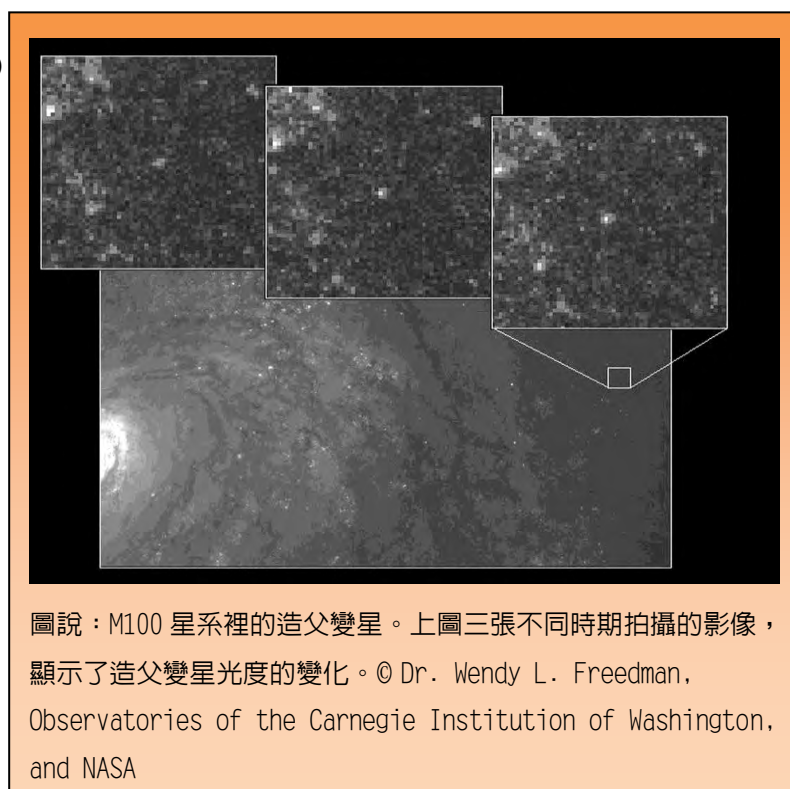
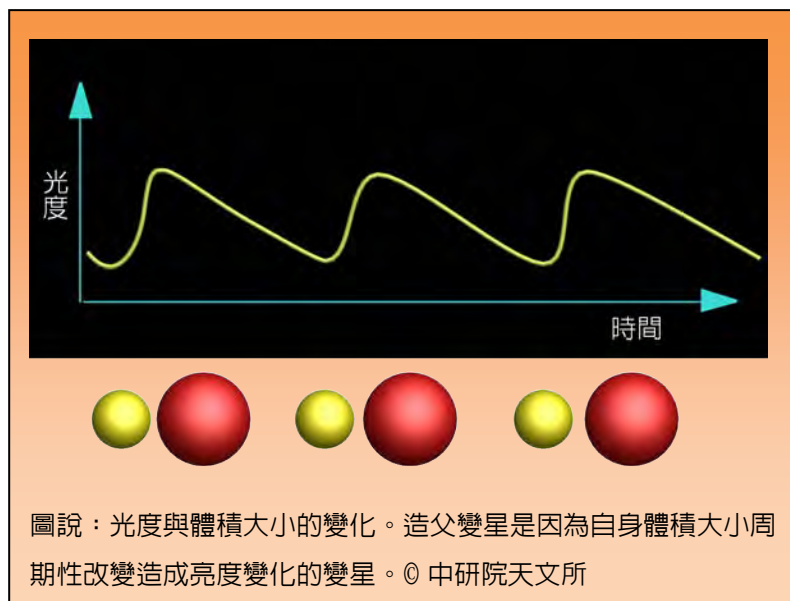
【造父變星】

造父變星是變星的一種，變星是指亮度會隨時間改變的恆星，通常恆星會穩定地發光，不會在短時間內有明顯的變化，但一些特殊的物理現象會改變恆星的亮度。造父變星亮度的周期性變化是恆星的自發行為所造成。

造父變星是因為自身體積大小周期性改變造成亮度變化的變星。1784年皮賈（Edward Pigott）首次發現天杼四（ η Aqr）是顆亮度周期性變化的脈動恆星。一個月後，古德力克（John Goodricke）發現造父一（ δ Cep），也有類似變化。1894年比羅波斯基（Aristarch Belopolsky）發現造父一的徑向運動變化和亮度變化一致。1914年夏普利（Harlow Shapley）根據理論計算，顯示造父變星的亮度、溫度和徑向運動變化和星體的徑向脈動一致。於此同時，勒維特（Henrietta Leavitt）在小麥哲倫星雲內觀測 25 個造父變星，她發現了周期和視亮度的周光關係。

由於這些造父變星同屬於小麥哲倫星雲，離地球的距離大致相同，因此關係式也適用於光度，這稱作造父變星的周光關係。周光關係表示亮度的變化周期越長，造父變星的光度也越強。這是可以猜想得到的，一個光度越強的恆星，通常體積也越大，因此體積的周期改變也需要較長的時間。

有了造父變星的周光關係，我們只要測量視亮度（ B ），便可以推算出光度（ L ），而視亮度是隨著觀測距離（ D ）的平方成反比 $B=L/(4\pi D^2)$ ，有了光度和視亮度，便可以算出造父變星的距離。（曾耀寰）

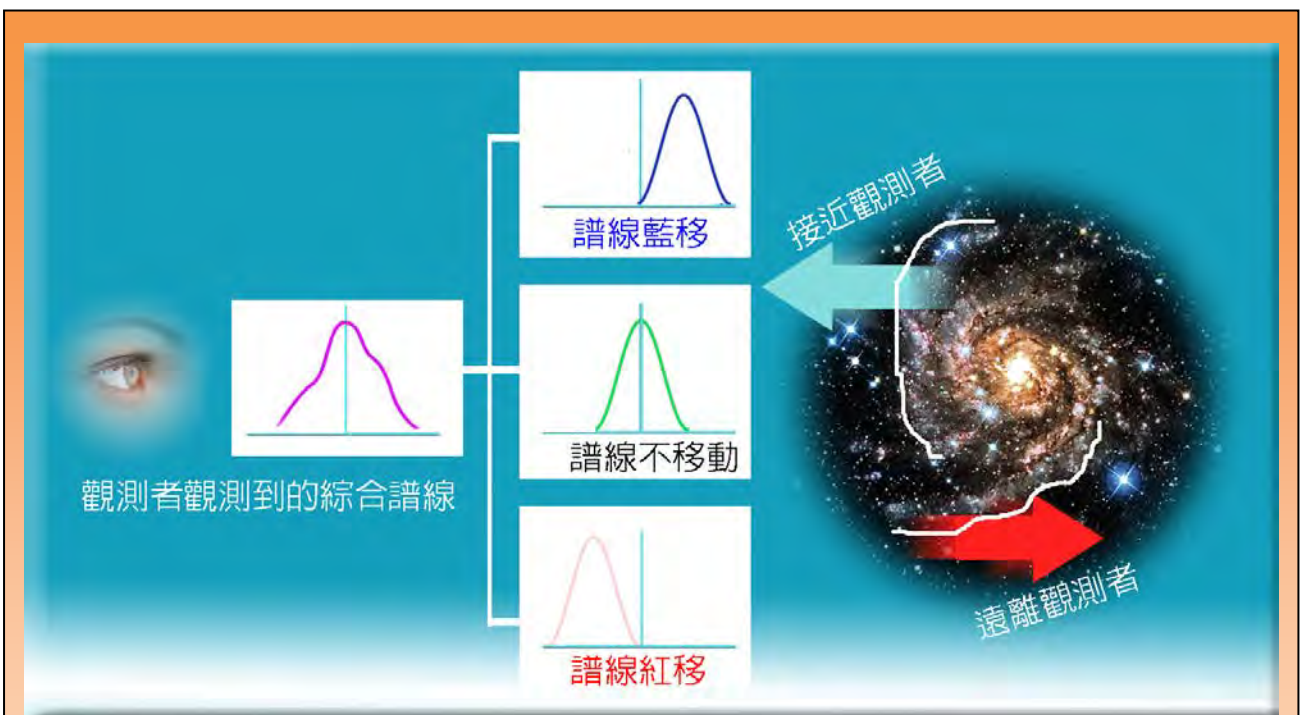


【塔利-費雪關係】

1977年，在研究過10個離地球較近的螺旋星系後，塔利(Brent Tully)和費雪(Richard Fisher)發表了一個關係式：星系的光度正比於自轉速度的四次方。這就是所謂的塔利-費雪關係式(簡稱TFR)。

TFR的背後，藏著什麼樣的物理意義呢？首先，影響星系自轉的力量是什麼？是重力—星系內恆星間的重力，除非恆星間相互吸引的重力夠強大，否則自轉越快的星系越容易解體。所以自轉越快的星系重力越大，而重力越大則表示星系內的恆星越多，恆星越多則整個星系就越亮(所有恆星的光度加總)。從整個推理結果可得知：星系的自轉速度越快，整個星系就越亮。

星系的明亮程度，和星系與觀測者間的距離是有關的；光度相同的星系，距離越遠的，看起來就越暗。在實際的觀測上，星系的距離並不容易測量，而星系自轉速度的測量，則容易得多。透過TFR，從星系自轉速度可以計算出星系的光度，再和觀測到的星系亮度做比對，就可以推導出星系的距離了。



圖說：星系的自轉速度如何測量呢？螺旋星系內部除了恆星之外，還充斥著大量的中性氫原子，中性氫會產生波長21公分的電波，在無線電波段形成譜線。當星系自轉時，向觀測者視線接近的區域，譜線會因為都卜勒效應而發生藍移(波長變短)，從觀測者視線遠離的區域，譜線則會發生紅移(波長變長)，這一藍一紅的變化，會使綜合譜線的寬度變寬，透過都卜勒效應，就可以求出自轉速度了。© 中研院天文所

TFR 測距適用於螺旋星系和不規則星系，對沒有明顯自轉現象的橢圓星系並不適用。橢圓星系的測距，可以利用法貝爾-傑克遜關係 (Faber-Jackson relation) 和角直徑-速度彌散度關係 (D- σ Relation)，這兩種方法的原理都與 TFR 類似。(蔡殷智)



天聞季報海報版與網路版由中央研究院天文及天文物理研究所製作，
以創用 CC 姓名標示-非商業性-禁止改作 3.0 台灣 授權條款釋出。
天聞季報網路版衍生自天聞季報海報版。超出此條款範圍外的授權，請與我們聯繫。
創用 CC 授權可於以下網站查閱諮詢 <https://isp.moe.edu.tw/ccedu/service.php>。

【超新星】

超新星是某些恆星在瀕死前所引發的一場大爆炸。這樣的爆炸可以釋出極大的能量，短時間內亮度超過整個超新星所在的星系，並持續幾周至幾個月。想像你在暗房裡打開一盞燈泡，過一段時間再關掉，觀測到宇宙中的超新星大概就是這種感覺。

根據光譜有無氫譜線，天文學家大致將超新星分為 I 型和 II 型兩大類。它們個別還可再細分出許多種類型，但是能用來測量距離的只有 I 型中的 Ia 型超新星，因為其他超新星的絕對亮度我們無從得知。

舉例來說，II 型超新星是大質量恆星演化到接近末期時，核心崩塌引發的劇烈爆炸。它們爆炸前質量有多大，周邊有什麼天體，我們都無法確定，因此無法得知它們的絕對亮度。但是 Ia 型超新星不一樣，目前公認的模型推測，它們是由中低質量恆星組成的雙星系統演化而來的。在雙星系統裡，質量較大的主星演化較快，先成為白矮星後，其伴星才演化成巨星並拋出物質落到白矮星上，造成白矮星質量持續增加。一旦質量到達 1.4 倍太陽質量，也就是錢卓極限（Chandrasekhar limit）時，其電子簡併壓力便無法支撐自身重力，白矮星開始向內塌縮、並點燃碳氧融合反應。而其內部的高溫會讓融合反應失控，造成毀滅性的爆炸，這樣的爆炸即為 Ia 型超新星。此模型告訴我們，所有 Ia 型超新星都有一樣的質量，就是 1.4 倍太陽質量，所以它們的絕對星等都是一樣的。如果我們可以知道它們的絕對星等，則只要我們觀測到 Ia 型超新星，知道它的視星等後，根據星等的定義就可求得該超新星與我們的距離。



圖說：位於風車星系（又稱 M101 或 NGC 5457）的 Ia 型超新星 SN2011fe。左圖箭頭標出 SN2011fe 爆發前的位置，右圖則可看出 SN2011fe 爆發後其明亮程度可比擬其所在的星系。© BJ Fulton (Institute for Astronomy, University of Hawaii)/Las Cumbres Observatory Global Telescope/Palomar Transient Factory/Space Telescope Science Institute.

Ia 型超新星在宇宙學研究中扮演非常重要的角色，1998 年就有天文學家發表了利用 Ia 型超新星證明宇宙正在加速膨脹的成果，他們觀測 50 幾顆 Ia 型超新星後，發現它們的亮度比預期暗。這代表它們與我們之間的距離比預期遠，因而證明宇宙正在加速膨脹，推測宇宙終會在寒冷與死寂中結束一切。2011 年諾貝爾物理學獎即頒發給相關研究團隊，以表揚他們在宇宙學中所做出的貢獻。(楊淳惠)



天聞季報海報版與網路版由中央研究院天文及天文物理研究所製作，
以創用 CC 姓名標示-非商業性-禁止改作 3.0 台灣 授權條款釋出。
天聞季報網路版衍生自天聞季報海報版。超出此條款範圍外的授權，請與我們聯繫。
創用 CC 授權可於以下網站查閱諮詢 <https://isp.moe.edu.tw/ccedu/service.php>。

【桑尼也夫-則多維區效應】

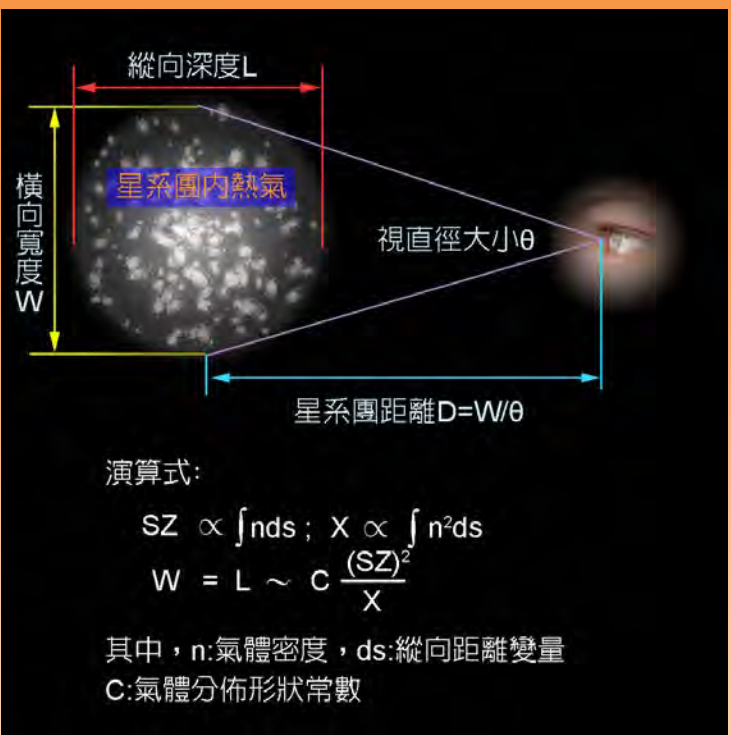
有一種測量宇宙距離的方法，是觀測已知大小物體（標準尺）的視直徑，並用三角關係推斷物體的距離。這種方法定義出來的距離稱作角直徑距離（angular diameter distance D ）。不過宇宙中我們所知的標準尺並不多，在這裡我們要利用遙遠星系團的特性來測量距離。

宇宙中，除了恆星會聚集成一個星系，許多星系也會因為萬有引力而聚集成一個星系團。星系團內充滿了高熱的氣體，溫度超過一億度。當氣體內的高能電子與原子核碰撞時，電子便會輻射出 X 射線。不同於宇宙中其他的 X 射線源，星系團的 X 射線並不像是個點光源，而是彌漫分佈於星系團的範圍內。

另一方面氣體內的自由電子會將微波背景輻射的光子散射開來，改變微波背景輻射的光譜。簡單來說，較低頻率的光子會從電子獲得能量而變成較高頻率的光子，觀測通過星系團的較低頻率背景輻射時，所測得的輻射較周圍更弱；反之在較高頻波段觀測的話，星系團方向的輻射較周圍更強。這個宇宙背景微波光子通過星系團所產生的變化效應被稱為桑尼也夫-則多維區效應（Sunyaev-Zel'dovich effect，簡稱 SZ 效應）。

要如何利用星系團的特性得到我們所需的標準尺呢？簡單來說，先假設星系團呈圓球狀，從 SZ 效應和 X 射線觀測，可得到星系團的縱深，然後再推出星系團的橫向寬度。

如圖示，X 射線和 SZ 效應都源自星系團中的高溫氣體，SZ 效應與視線方向上的「氣體密度總和」成正比，而 X 射線的強度則與「氣體密度平方總和」成正比。因此 SZ 效應的平方除以 X 射線強度應正比於視線方向的縱向深度、和一個由氣體密度分佈所決定的形狀常數 C 。由於大多數的星系團氣體皆近似於球形分佈，星系團的橫向寬度 W 與縱向深度 L 可視為很接近，如果知道視直徑 θ 的大小，便可推算出星系團的距離 $D (=W/\theta)$ 。（林凱揚）



縱向深度 L

橫向寬度 W

星系團內熱氣

視直徑大小 θ

星系團距離 $D=W/\theta$

演算式：

$$SZ \propto \int n ds; \quad X \propto \int n^2 ds$$
$$W = L \sim C \frac{(SZ)^2}{X}$$

其中， n : 氣體密度， ds : 縱向距離變量
 C : 氣體分佈形狀常數

圖說：利用星系團的 X 射線強度跟 SZ 效應強度，可以算出星系團的縱向深度，亦約等於其橫向寬度。再由橫向寬度與觀測得到的視直徑大小，便可以計算星系團的距離。© 中研院天文所

範例：

假設密度均勻，根據右圖演算式：

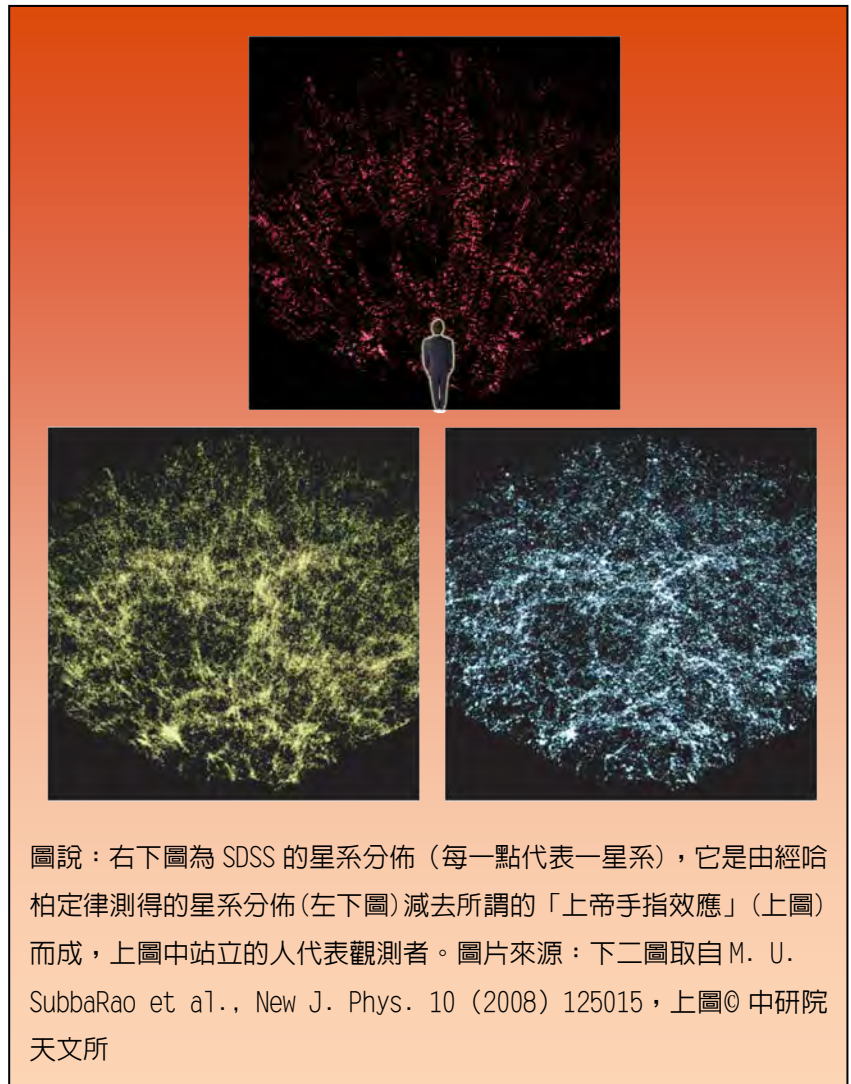
$$SZ \propto nL$$
$$X \propto n^2L$$
$$\frac{(SZ)^2}{X} \propto \frac{n^2L^2}{n^2L} \propto L = W = \text{星系團橫向寬度}$$


【哈柏定律】

當所有上述測距方法都無法適用更遙遠的星體時，我們只能運用哈柏定律來約略估算其距離。斯萊弗 (Vesto Slipher) 於 1917 年率先發現星系紅移現象，且幾乎所有星系相對於地球都是遠離的。隨後哈柏 (Edwin Hubble) 運用造父變星特性定位星系的距離 d ，在結合斯萊弗的觀測數據後於 1929 年發現：星系遠離的徑向速度 v 和它與我們的距離成正比，即 $v=Hd$ ，其中 H 為哈柏常數。而後天文學家了解到星系間距及其相互遠離速度成比例的現象實為「宇宙論原則」(cosmological principle) 之必然結果。哈柏定律為宇宙學相當倚賴的距離指標，星系遠離的徑向速度可用都卜勒效應測量星系的紅移 z 求得 ($v\sim cz$; c 為光速)，透過哈柏定律可得知星系的距離。

哈柏定律作為支撐物理宇宙學的三大發現之一 (其他二個為宇宙微波背景輻射及太初核合成)，哈柏常數的估算是 1929 年以來宇宙學最重要的研究課題之一。美國 NASA 利用 WMAP 觀測到的高精度宇宙微波背景輻射測定 H 值約為 71.9 km/s/Mpc 。2012 年 10 月天文學家利用 NASA 的 Spitzer 紅外線太空望遠鏡觀測造父變星的特性，發表的 H 值約為 74.3 km/s/Mpc 。

然而，星系的徑向速度不全然是宇宙膨脹所造成的。例如，星系團除了會成群的遠離 (現稱為哈柏流 Hubble flow)，也會因星系彼此間的重力牽引產生團內局部的接近或遠離速度。這「多餘」的徑向速度便是宇宙學巡天測量上有名的「上帝手指 (Finger of God) 效應」的成因。運用哈柏定律時，需要加上這個修正因子。(蔣龍毅)



天聞季報海報版與網路版由中央研究院天文及天文物理研究所製作，
以創用 CC 姓名標示-非商業性-禁止改作 3.0 台灣 授權條款釋出。
天聞季報網路版衍生自天聞季報海報版。超出此條款範圍外的授權，請與我們聯繫。
創用 CC 授權可於以下網站查閱諮詢 <https://isp.moe.edu.tw/ccedu/service.php>。

發行人\賀曾樸
執行主編\陳筱琪
美術編輯\蔡殷智
執行編輯\金升光、曾耀寰、楊淳惠、蔣龍毅
發行單位\中央研究院天文及天文物理研究所
地址\臺北市羅斯福路四段一號天文數學館 11 樓
電話\ (02)2366-5391
電子信箱\ epo@asiaa.sinica.edu.tw
天聞季報版權所有\中研院天文所

天聞季報編輯群感謝各位閱讀本期內容。本季報由中央研究院天文所發行，旨在報導本所相關研究成果、天文動態及發表於國際的天文新知等，提供中學以上師生及一般民眾作為天文教學參考資源。歡迎各界來信給我們，提供您的迴響、讀後心得、天文問題或是建議指教。

來信請寄至『10617 臺北郵政 23-141 號信箱 中央研究院天文所天聞季報編輯小組收』；或是寄至電子信箱：epo@asiaa.sinica.edu.tw。



天聞季報海報版與網路版由中央研究院天文及天文物理研究所製作，
以創用 CC 姓名標示-非商業性-禁止改作 3.0 台灣 授權條款釋出。
天聞季報網路版衍生自天聞季報海報版。超出此條款範圍外的授權，請與我們聯繫。
創用 CC 授權可於以下網站查閱諮詢 <https://isp.moe.edu.tw/ccedu/service.php>。