



中華民國 115 年
春季號

中研院天文所季報
ASIAA Quarterly Press
<http://www.asiaa.sinica.edu.tw>



登天 步步 步步

宇宙距離階梯示意圖。

©NASA/JPL-Caltech經AI編輯調整

丈量宇宙：人類如何測量宇宙的距離？

作者：周美吟

筆者曾經看過一部電影，中文譯名為《丈量世界》，改編自同名小說。電影描述兩位十九世紀的科學家——數學家高斯與博物學家洪堡——如何用截然不同的方法探索與理解世界。高斯幾乎不離開書桌，靠著數學與幾何，在腦中「丈量」地球的形狀；洪堡則親自踏遍山川河流，帶著儀器遠征各地，用實地測量來描繪世界的樣貌。兩人走在不同的道路上，卻都在回答同一個問題：我們所在的世界，到底有多大？

這個問題不只適用於地球。當人類把目光投向夜空時，同樣的疑問再次浮現：那些遙遠的星星和星系，究竟離我們有多遠？我們無法走到那裡，也不能拉一把真正的尺來測量，卻仍然想知道答案。於是，天文學家發展出一套方法，就像為宇宙打造了一把看不見的尺——也就是所謂的「量天尺」，或稱為宇宙距離階梯（Cosmic Distance Ladder，詳細可參考天聞季報 2012 冬季號）。接下來，讓我們看看人類如何從測量附近的星星開始，逐漸量出整個宇宙的尺度。

造父變星的周光關係示意圖。圖中藍點跟黃點代表史匹哲太空望遠鏡觀測到的大麥哲倫雲和銀河系內的造父變星，X 軸是光度變化周期，Y 軸是光度（星等），可以發現兩者間密切相關。變化周期越長，恆星的光度越亮。由周期得知恆星的光度，再和我們看到的視亮度相比，就能推算出恆星的距離。©NASA/JPL-Caltech

第一階：用視差測距離 (Parallax)

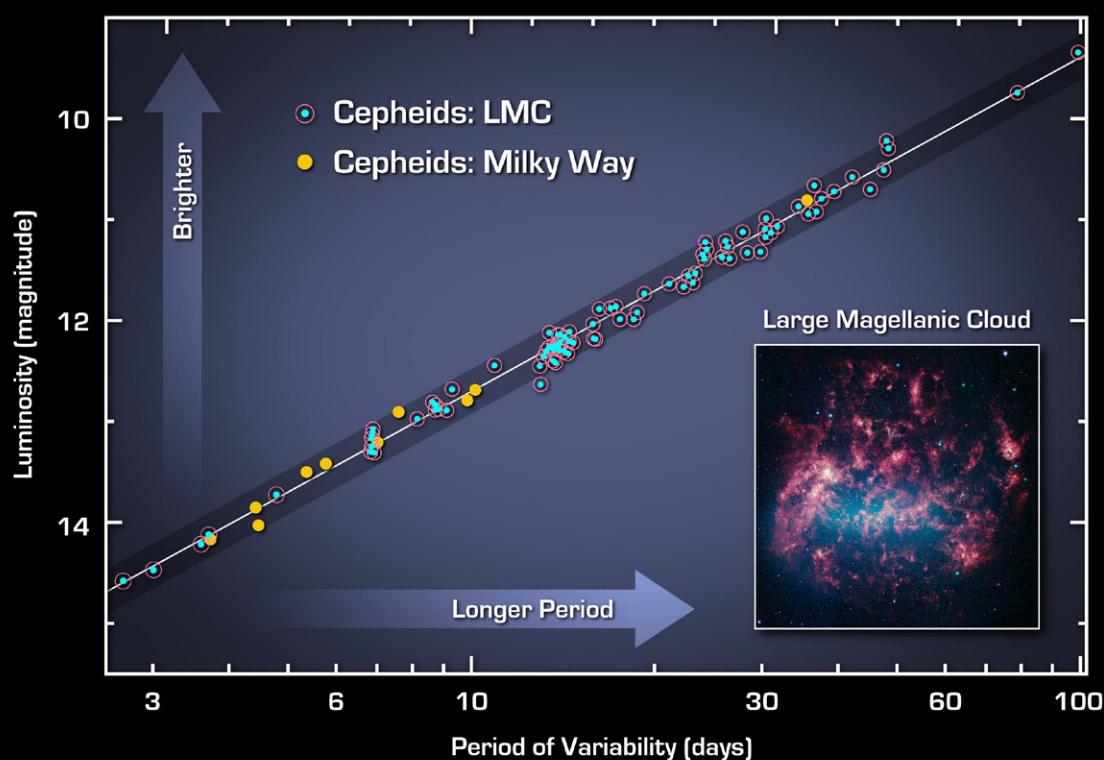
宇宙距離階梯的最底層，就是對附近星星的距離測量。你是否試過用手指擋住視線，然後用左眼和右眼看，會發現手指看起來會稍微移動？這是因為由於兩眼位置不同，看到的背景位置不一樣，這種現象就叫「視差」。

同樣的原理也可以用在天文上。當地球繞太陽公轉時，科學家會在一年中相隔六個月的兩個時間點，觀察同一顆離我們較近的恆星在遠方背景星空中位置的微小變化。科學家把這種微小位移叫做「視差角」，利用幾何和三角函數就可以計算出這顆恆星和地球的距離。

雖然這個方法很直接，但當恆星離我們越遠時，它的視差角就越小，很快就不容易測量了。即使使用精密的望遠鏡，視差最多只能量到幾萬光年以內的恆星，對整個銀河系來說只能算是滄海一粟。

第二階：標準燭光 (Standard Candles)

面對用視差法無法測量距離的較遠恆星或星系時，就需要用間接的方法，我們稱為標準燭光。想像在夜晚迷路時遠方點起的燈火，如果我們知道那盞燈原本有多少瓦，那它看起來有多暗就能告訴我們距離有多遠，這就是標準燭光的概念。



Calibrated Period-luminosity Relationship for Cepheids
NASA / JPL-Caltech / W. Freedman (Carnegie)

Spitzer Space Telescope • IRAC
ssc2012-13a

最著名的一種標準燭光是造父變星（Cepheids）。科學家發現這種類型的恆星光度不是固定不變，而是會周期性地變亮變暗，而且變化周期與它的光度間有一個穩定的關係，也就是「周光關係」。換句話說，如果我們測量出它亮暗變化的周期，就可以知道它的光度，然後再用它看起來多亮來計算距離。

再更遠一些，我們還可以利用 Ia 型超新星（Type Ia supernovae）當標準燭光。這種超新星爆炸時的光度非常一致，亮到可以在數億光年遠之外仍然看得到，這讓科學家能夠測量非常遙遠的星系距離。

第三階：紅移（Redshift）與宇宙膨脹

當距離變得更遙遠，連單個恆星或超新星都不容易看到時，天文學家

就用另一種方法：觀察光的紅移（redshift）。

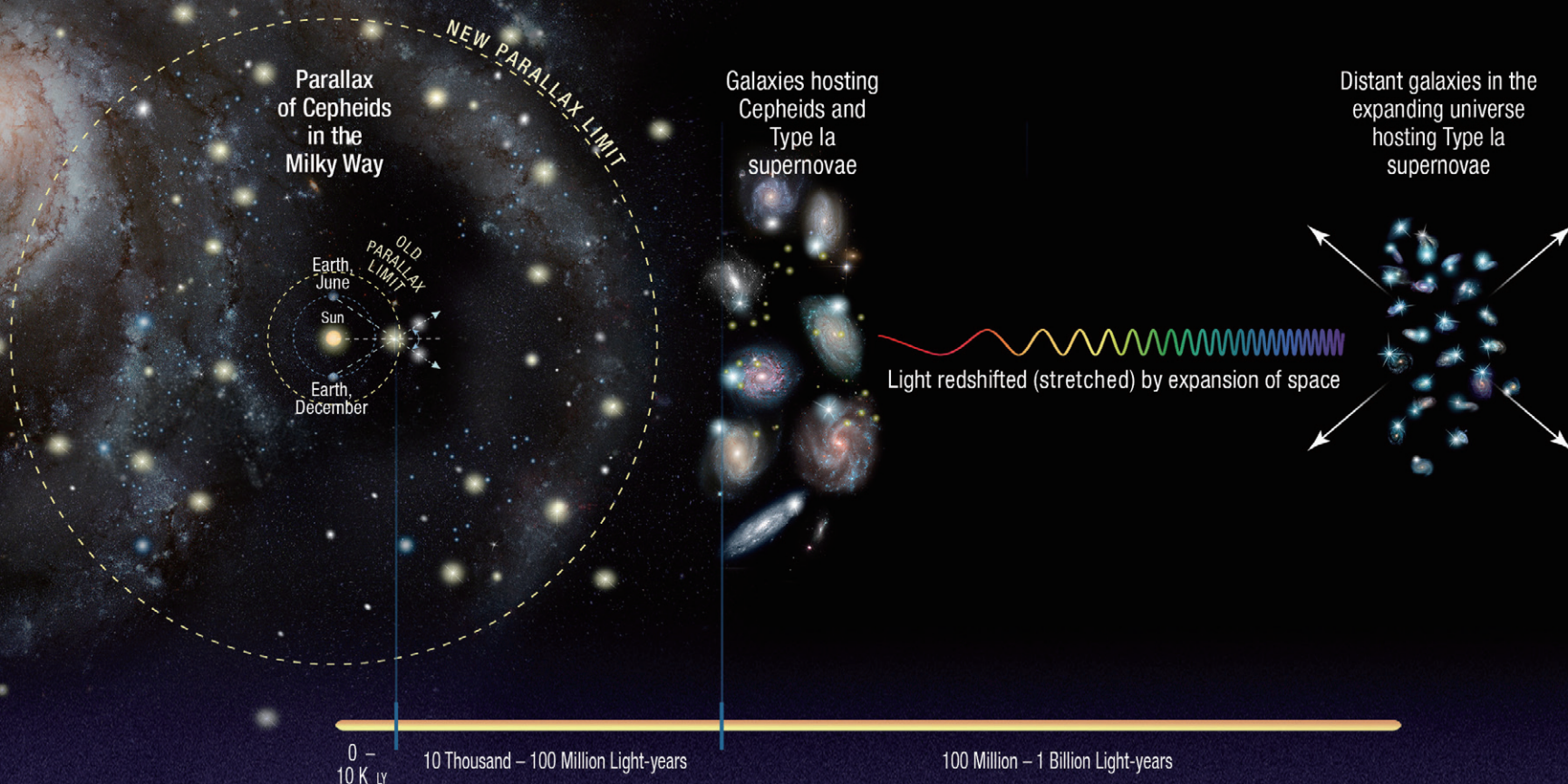
隨著宇宙膨脹，光波一路從遙遠星系傳來時會被「拉長」，就像救護車遠去時聲音變低一樣，這種波長被拉長的現象叫紅移。紅移的程度反映了星系遠離我們的速度，而這個速度又與距離成正比（也就是哈伯定律）。透過已經校準的距離階梯，我們知道一些星系的距離與紅移之間的關係，因此可以用紅移來推算非常遙遠的宇宙距離。

之所以稱為「宇宙距離階梯」，是因為每一種測量方法都建立在前一種方法之上：先用視差測量附近恆星的距離，再利用這些結果校準造父變星等標準燭光，進而測量更遙遠的天體，最後把距離與紅移結合，推算出宇宙尺度。就像爬樓梯一樣，每一階都帶我們走得更遠，而沒有最底層，就無

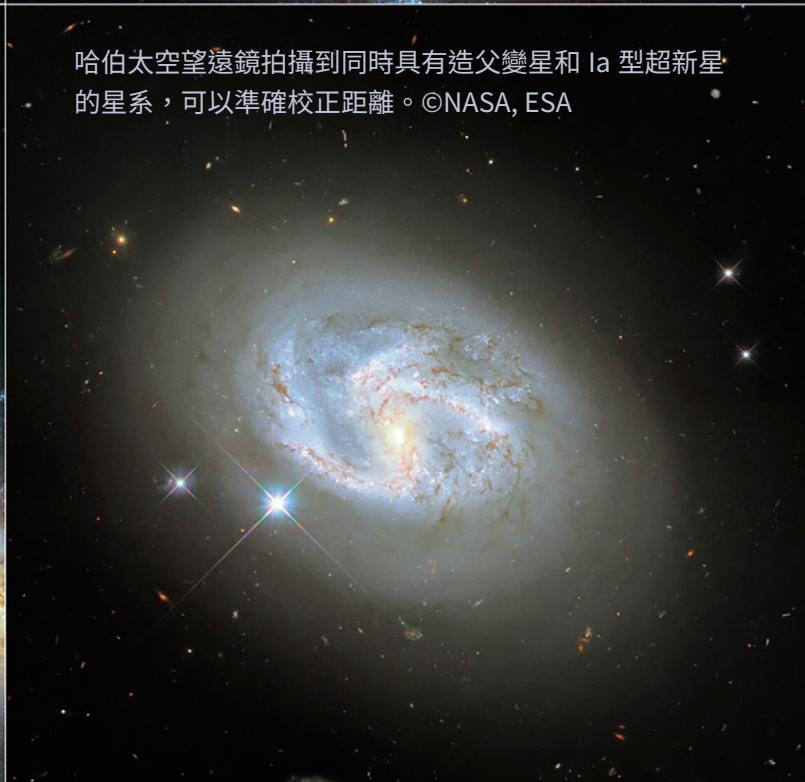
法往上延伸。量天尺的意義不只是知道星系有多遠，它幫助我們了解宇宙的大小與結構、測量宇宙膨脹的速度（哈伯常數），並透過觀測遙遠天體，回溯宇宙的演化歷史。

回到電影《丈量世界》中的兩位主角：高斯與洪堡，一個用數學在紙上丈量地球，一個用雙腳與儀器走遍世界。方法雖然不同，卻都相信世界是可以被理解、被測量的。幾百年後，天文學家面對著遙不可及的星空，即使無法親自前往，但透過視差、造父變星、超新星與紅移，我們一步步搭起了屬於宇宙的量天尺，將看似無法觸及的距離，轉化為可以理解的數字。從丈量地球到丈量宇宙，改變的不是人類的好奇心，而是使用的工具。或許宇宙的尺度永遠超乎想像，但正是這種不斷嘗試測量與探究的精神，讓我們在每次仰望星空時，都離宇宙更近一步。

宇宙距離階梯示意圖。太陽位於左方的小圓圈中心，越往右側測量到的天體距離地球越來越遠。天文學家先利用視差法測量銀河系內造父變星的距離，再用造父變星校準 Ia 型超新星的光度，進而測量遙遠星系的距離。將這些距離與超新星光紅移相比，便能推算出宇宙膨脹的速度，也就是哈伯常數。©NASA, ESA, A. Feild (STScI), and A. Riess (STScI/JHU)







哈伯太空望遠鏡拍攝到同時具有造父變星和 Ia 型超新星的星系，可以準確校正距離。©NASA, ESA

宇宙的脈搏： 一場動搖宇宙學根基的危機

作者：劉雨恩 / 台大物理所碩士生

哈伯常數 (H_0) 影響我們對宇宙年齡、時空結構以及暗能量的理解。理論上，不同的測量方法應該得出相近的結果，但實際情況卻相反——兩種最可靠的方法給出的答案相差近一成。此矛盾在學界被稱為哈伯張力 (Hubble Tension，即哈伯常數的數據分歧)，甚至被稱作「哈伯危機」，因為它挑戰的不只是一個數字，而是整個宇宙學框架。

從哈伯定律到量尺的分歧

故事始於二十世紀初。哈伯 (Edwin Hubble) 發現星系普遍出現紅移，而且遠離速度與距離成正比，這就是哈伯定律，揭示宇宙正在膨脹，而定律的斜率就是哈伯常數。哈伯當年估算的數值高達 500 km/s/Mpc ，後來經過修正降到了更合理的範圍，但直到今天，天文學家仍無法對精確數值達成共識。隨著觀測技術的進步，出現了彼此獨立的測量方法，但它們卻給出不一致的答案。這就像用不同的精密量尺測量同一張桌子，卻得到不同結果，問題不在桌子，而在於我們對量尺的理解。

第一種量尺來自早期宇宙。大霹靂後 38 萬年，宇宙冷卻到透明，留下了宇宙微波背景 (簡稱為 CMB)，這是宇宙的嬰兒照，記錄了光子與物質耦合時的漣漪。天文學家透過分析 CMB 的各向異性，放入標準宇宙學模

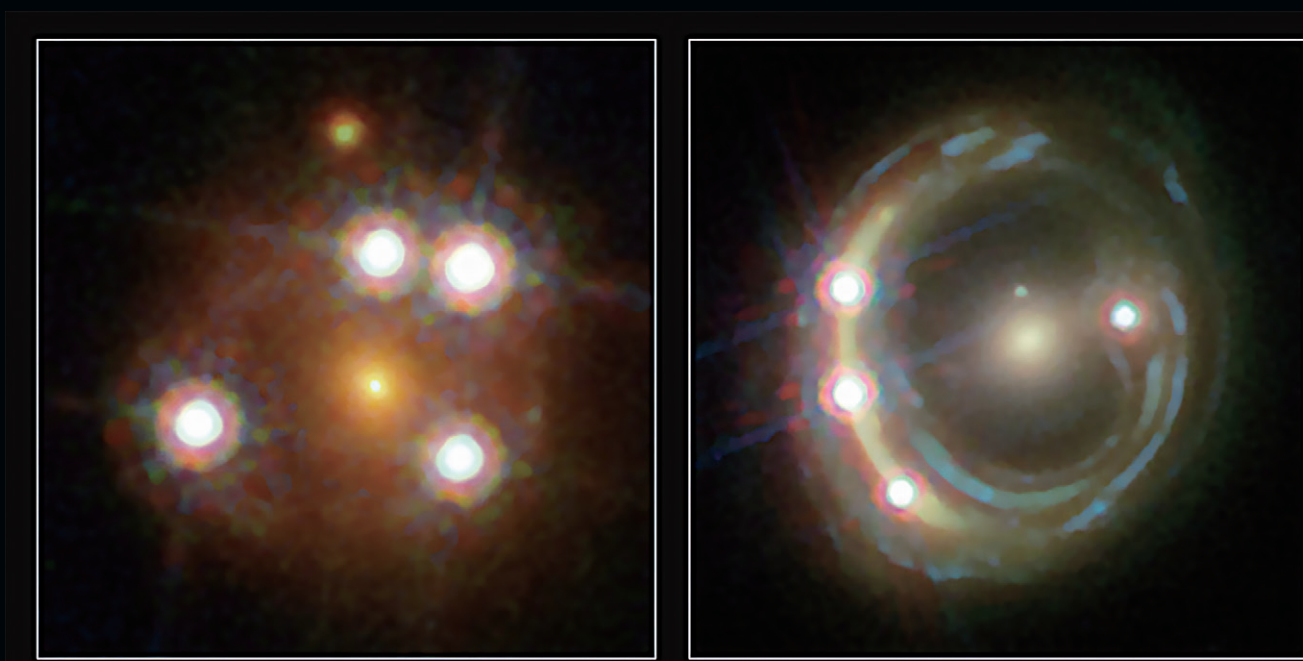
型 (簡稱為 Λ CDM，一個描述暗能量、暗物質與普通物質如何共同塑造宇宙演化的理論)，推算出當今宇宙的膨脹速率。普朗克衛星在 2018 年第三次數據釋出 (Planck PR3) 的分析顯示 $H_0 = 67.36 \pm 0.54 \text{ km/s/Mpc}$ ，數值穩定但偏低。

第二種量尺測量我們身邊的宇宙，稱為宇宙距離階梯。它依賴標準燭光，先用造父變星的光度 - 周期關係校準距離，並進一步用來校準 Ia 型超新星的光度，再藉由這些超新星，比對更遙遠星系內的超新星，來測量距離。2021 年研究團隊利用哈伯 (HST) 和韋伯 (JWST) 太空望遠鏡校正了塵埃消光、恆星集聚及星系集聚的影響，在此方法下推算出 $H_0 = 73.04 \pm 1.04 \text{ km/s/Mpc}$ ，數值明顯偏高。

尋找第三種量尺

兩種方法各自獨立，誤差經過嚴格檢查，卻依然不一致，而且差異幾乎不可能只是「測量運氣不好」。JWST 的紅外觀測大幅減少了傳統測量中的誤差來源，但哈伯張力依然存在。這讓科學家開始懷疑：問題可能不在測量，而在宇宙學模型本身。CMB 的推算依賴 Λ CDM 模型，如果模型忽略了某些早期物理效應，數值可能偏差；而距離階梯雖然基於直接觀測，但也可能隱藏系統性誤差。哈伯張力因此成為當今宇宙學最迫切的謎團之一。

為了破解這個謎，科學家探索其他測量方法。強重力透鏡是一個方向：遠方天體的光被前景星系的重力扭曲，形成多重影像，不同光路的時間延遲可以換算成 H_0 。2019 年 H0LiCOW



計畫的一項重力透鏡時間延遲研究推算出 $H_0 = 73.3 (+1.8/-1.7)$ km/s/Mpc，與距離階梯的結果相近。另一種方法是標準警鈴（Standard Sirens）：雙中子星或黑洞合併產生的重力波能直接測量距離。2021 年 LIGO、Virgo 與 KAGRA 合作團隊的結果為 $H_0 = 68 (+12/-7)$ km/s/Mpc。這種方法結合重力波提供的距離與電磁訊號測得的紅移，才能推算出遠離速度並進一步得到 H_0 。雖然目前重力波事件數量有限，但隨著靈敏度提升，這將成為未來獨立且關鍵的測量方式。

如果測量無誤，唯一的解釋就是新物理。一個熱門假說是早期暗能量（Early Dark Energy，簡稱為 EDE）。它假設宇宙早期曾短暫存在一種能量，讓膨脹速率在特定時期增加，使 CMB 推算的 H_0 升高，與距離階梯一致。另一種可能是早期宇宙多了額外的輻射成分，例如類似微中子的粒子，略微改變膨脹時程。還有假說認為暗物質與暗能量可能存在交互作用，微調了宇宙的演化。這些新物理假說很吸引人，但要同時符合 CMB、星系分布和元素豐度等觀測數

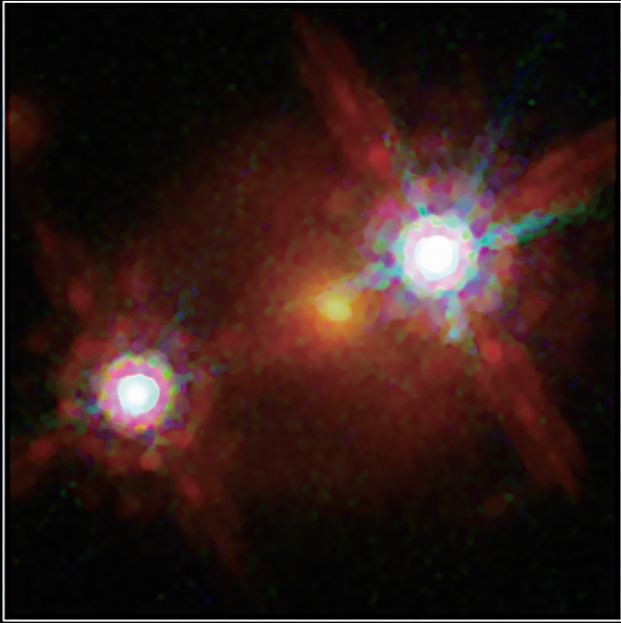
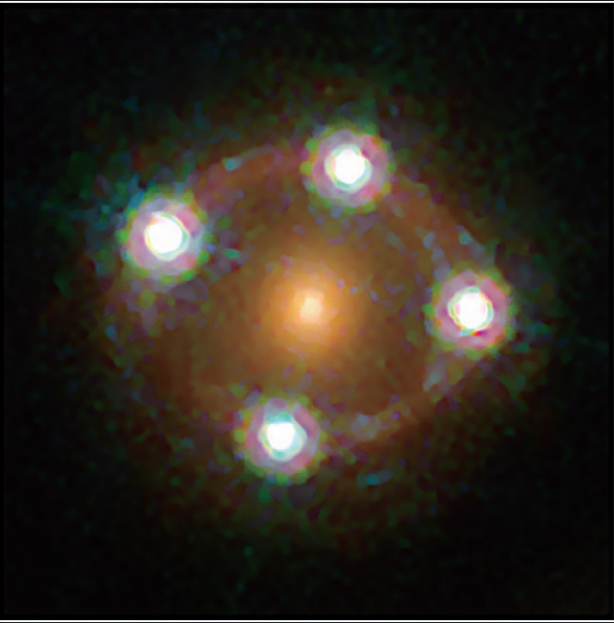
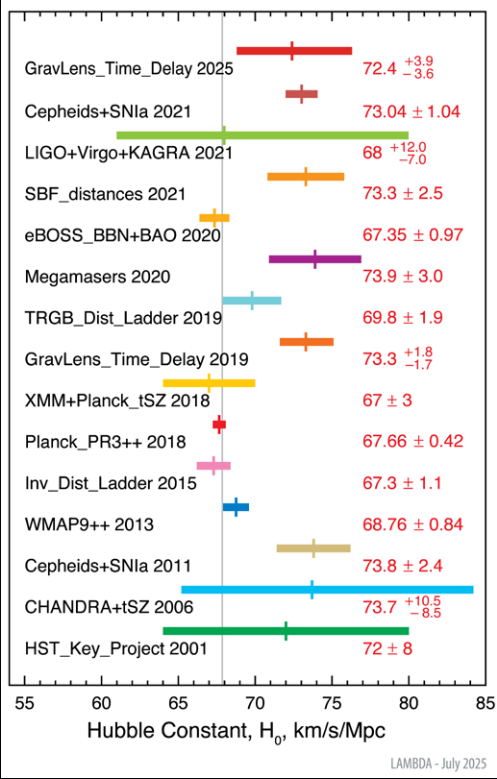
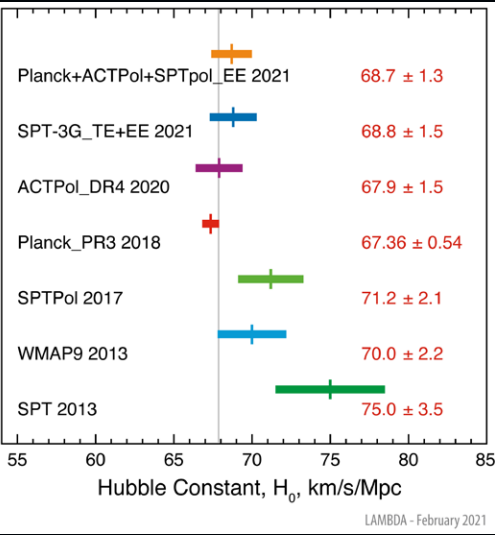
據，挑戰極大，目前尚未有完美答案。

張力的意義

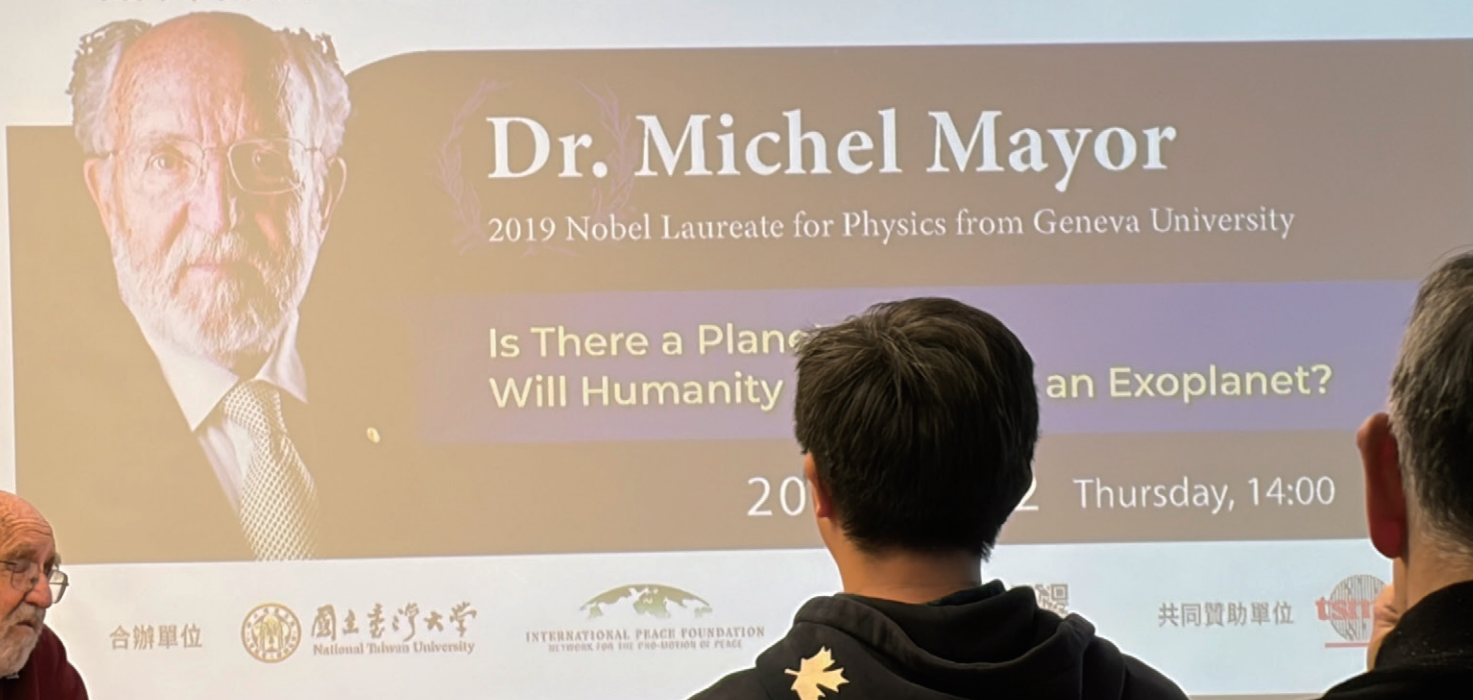
哈伯常數不只是一個數字，它是檢驗宇宙學模型的關鍵，影響宇宙年齡的估算：數值越高，宇宙越年輕；數值越低，宇宙越古老。它還關係到我們對暗能量和宇宙結構的理解。如今，

天文學家正從不同角度逼近真相，像是從四面八方圍繞同一個謎團。最終，這些方法可能會收斂到一致的數字，化解哈伯張力；也可能分歧依舊，推動我們探索新物理的領域。不管結果如何，哈伯張力本身不是錯誤，而是推動科學進步的動力。當不同的精密量尺給出不同答案時，我們必須重新檢視每一個假設。這份挑戰，或許正是一把鑰匙，指引我們揭開宇宙更深的秘密。

這兩張圖表整理了不同方法和年份的哈伯常數測量結果。左圖主要來自 CMB 的觀測結果，右圖則彙整了距離階梯、重力透鏡、重力波與其他方法。可以看到 Planck PR3（2018，左圖第四個）和 Cepheids+SN1a（2021，右圖第二個）的數據分歧明顯。
©NASA / LAMBDA Archive Team



H0LiCOW 計畫團隊使用重力透鏡效應看到的類星體影像（照片中周圍的亮點），由於類星體光度會隨時間變化，天文學家可以看到這些影像在不同時間點「閃爍」。光點到達地球的時間差異取決於光路徑的長短，不同光路的时间延遲，和哈伯常數直接相關。©ESA/Hubble, NASA, Suyu et al.



從第一顆系外行星到尋找第二個地球—— 諾貝爾獎得主 Michel Mayor 中研院開講

Mayor 教授至本所
進行座談交流。
© 中研院天文所

作者：周美吟／蔡尚旻

中央研究院「臺灣橋梁計畫」(Taiwan Bridges) 系列第四場講座於 2026 年 1 月 22 日舉行，邀請 2019 年諾貝爾物理學獎得主、日內瓦大學榮譽教授 Michel Mayor 主講，講題為「是否存在『B 行星』——人類會移居到系外行星嗎？」。演講吸引逾 400 名聽眾參與，顯示大眾對系外行星與外星生命議題的高度關注。

Mayor 教授是首位以徑向速度法發現繞行類太陽恆星之系外行星的天文學家。演講中，他回顧 1995 年發現飛馬座 51 號恆星旁行星 51 Pegasi b 的歷程。這顆「熱木星」的存在顛覆了當時對行星形成的理解，其極短的公轉

週期迫使天文學界重新思考行星形成與遷移的理論框架，也開啟了系外行星研究的新時代。

隨著高精度光譜儀與太空望遠鏡的發展，系外行星研究已從「是否存在」邁向「精確量測與統計分析」。Mayor 強調，徑向速度法在測量行星質量方面仍具不可取代性，目前的技術已能偵測類地行星造成的微弱恆星擺動。透過長期觀測累積的大樣本資料，天文學家得以描繪行星族群的整體分布，進一步回答行星形成條件與出現頻率等關鍵問題，為尋找宜居行星奠定基礎。

談及「第二個地球」，Mayor 指出，

真正的挑戰不僅在於找到大小與位置合適的行星，更在於確認其大氣成分與物理環境。他表示，人類雖正逐步逼近答案，但距離全面理解仍有一段路。演講最後，他也提醒，與其期待移居系外行星，人類更應珍惜目前唯一確知適合居住的家園——地球。

演講結束隔天，Mayor 教授亦至本所與同仁及學生座談，討論主題涵蓋行星形成理論、外星生命以及太空探索的哲學與倫理議題。活動最後，本所致贈《天聞季報》予 Mayor 教授，並獲得其親筆簽名，為此次學術交流畫下圓滿句點。有關 2019 年諾貝爾物理學獎的相關研究內容，可參考《天聞季報》2020 年春季號。

天聞季報編輯群感謝各位閱讀本期內容，特別感謝台北藝術院院長、國家文官學院講座教授張禮權博士惠賜刊頭題字。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：「臺北市羅斯福路四段 1 號 中央研究院 / 臺灣大學天文數學館 11 樓 中央研究院天文所天聞季報編輯小組收」。歡迎各級學校師生提供天文相關活動訊息，有機會在天聞季報上刊登喔！

發行人 | 彭威禮。執行主編 | 周美吟。美術編輯 | 王韻青、楊翔伊。執行編輯 | 曾耀寰、劉君帆。
發行單位 | 中央研究院天文及天文物理研究所。
天聞季報版權所有 | 中研院天文所。ISSN 2311-7281。GPN 2009905151。
地址 | 中央研究院 / 臺灣大學天文數學館 11 樓。(臺北市羅斯福路四段 1 號)。
電話 | (02)2366-5415。電子信箱 | epo@asiaa.sinica.edu.tw。

