

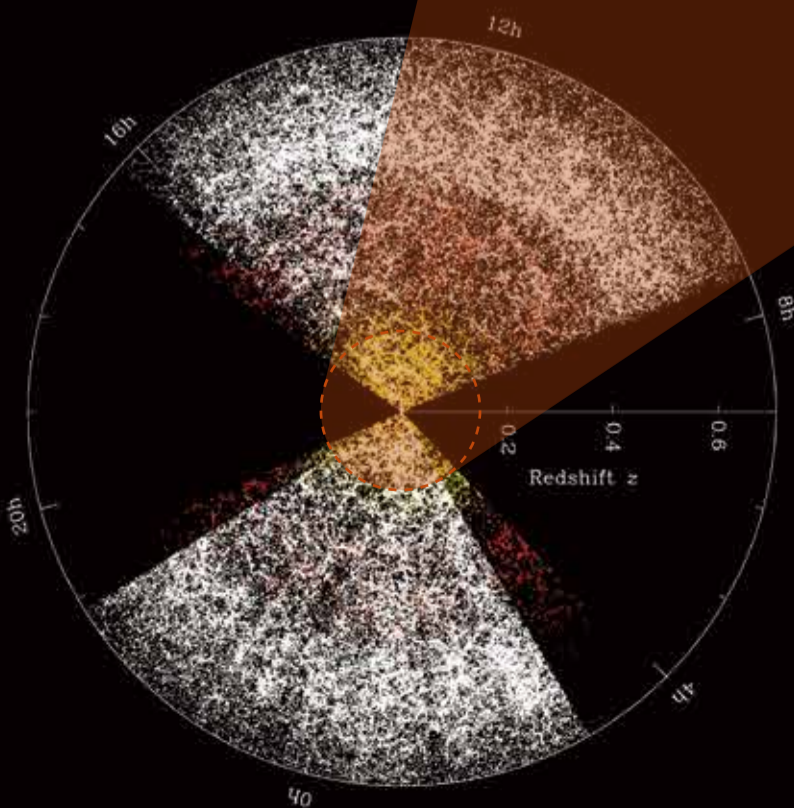
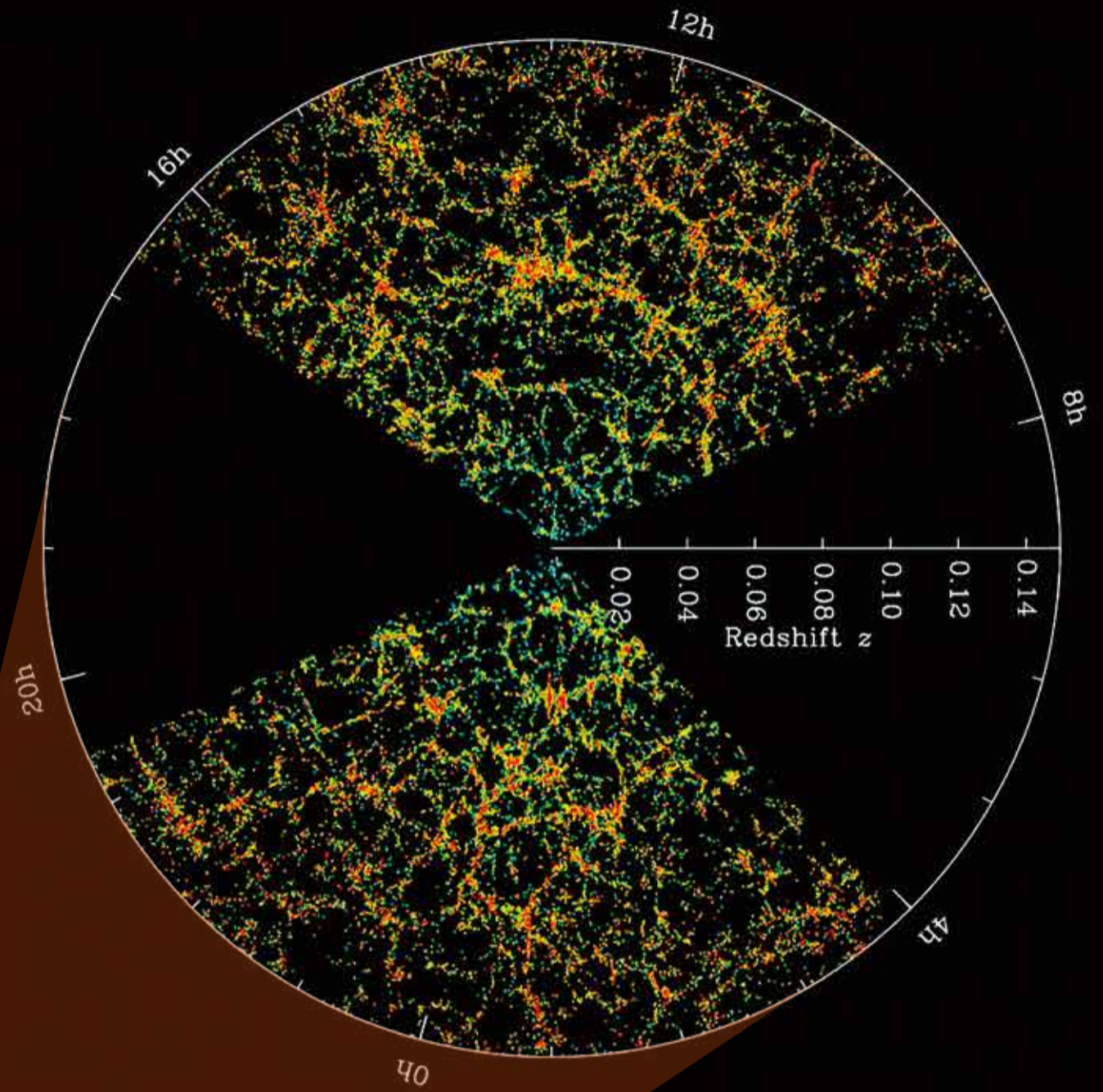
天聞

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



中華民國106年
冬季號

強度測繪 探索宇宙演化奧秘



史隆數位巡天計畫 (SDSS) 得到的星系位置及距離分布圖，顯示出星系的分布是不均勻的。

©Michael Blanton and SDSS collaboration

掀起宇宙史的面紗

作者 / Geoffrey Bower 翻譯 / 黃珞文

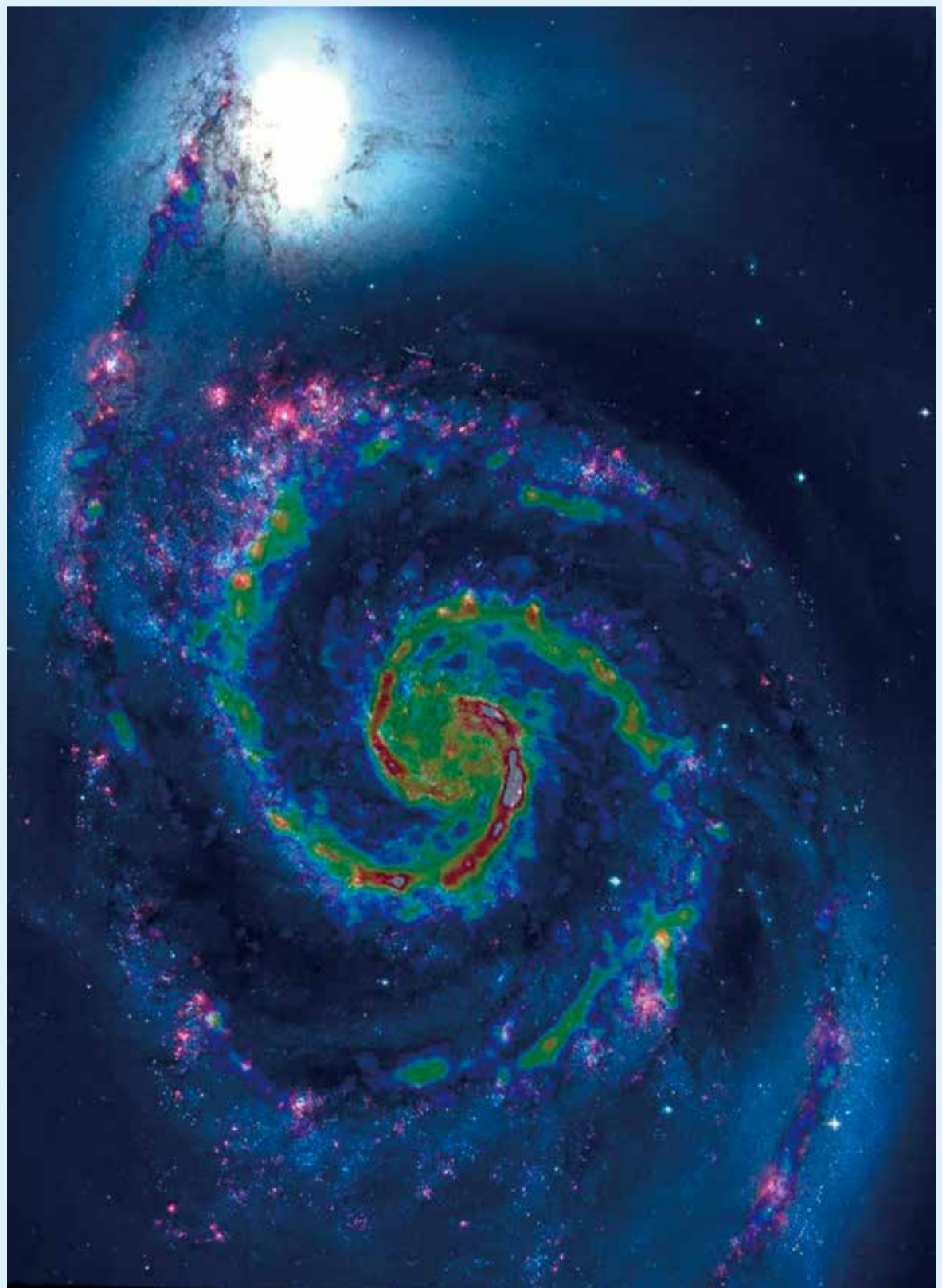
夜空下，抬頭就可以看星星。但如果住在像臺北市這種繁華大城，因為光害，看到的星星可能不多，不過若遠離城市光源到郊區，能看到的星星就多了；要是在地球上最沒光害的地方，譬如夏威夷大島的高山上，人類眼睛能看到幾千顆星星。在沒有光害的夏季夜晚，頭頂上這條光帶由我們銀河系的千億個恆星所組成。我們看銀河系好像一條帶子，因為銀河系本身形狀是扁平的盤（也叫銀盤），而距離盤中心 2 萬 5 千光年的太陽正是內嵌在此盤中，在地球上仰望銀河時，我們的視野是看向銀盤。

銀河系是宇宙中已知的千億個星系其中之一，這些星系皆由百萬、百億甚至數兆個恆星組成。銀河系有一群鄰近星系，在南半球用肉眼能看到離我們最近的大小麥哲倫雲星系。它們兩個其實是小星系，但因為距離近，所以在夜空中看起來還滿大的。視力好的人在很暗的觀星地點，甚至能看得到距離我們有 2 百萬光年的仙女座星系。肉眼看到的仙女座星系或許只是模糊一團，然而透過望遠鏡，它會呈現出與銀河系極近似的特徵：一個帶有旋臂的盤狀星系，且恆星數量也和銀河系差不多。大約有幾十個星系屬於「本星系群」，其中有些比較年輕，譬如大小麥哲倫雲星系，才剛開始製造恆星，另外有些已步入中年的星系，譬如銀河系和仙女座星系，在幾十億年前就已結束快速製造恆星的高峰期。

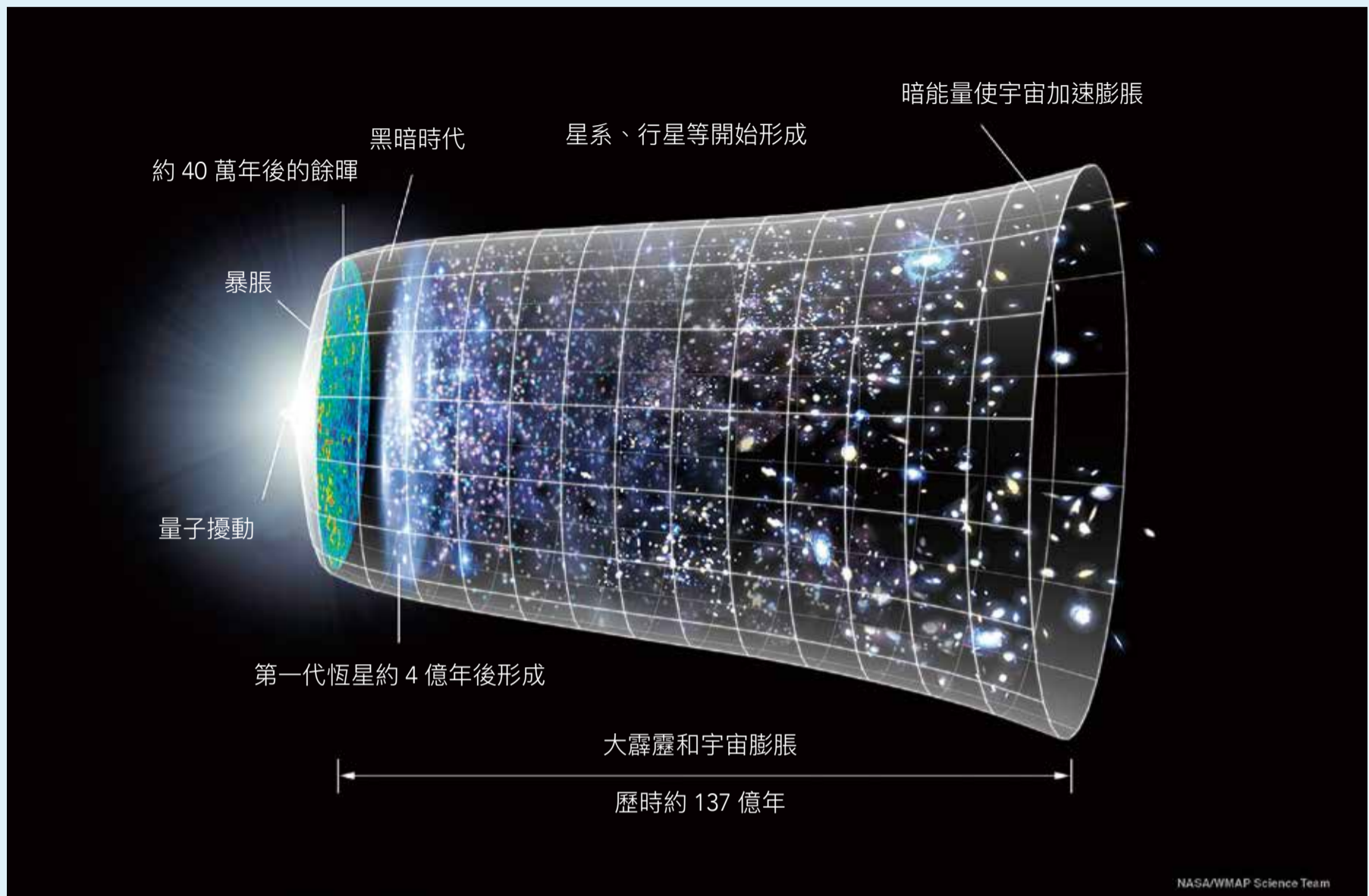
再往外看得更遠，會看到一些結構更龐大的星系團。其中距離我們最近的是室女星系團，除了星系團中心有個大質量的橢圓星系，還包含了數千個體型或大或小、年齡有老有少的星系。要是看到宇宙最大尺度的結構，我們會看到由星系構成的細絲狀結構，包圍著幾乎沒有星系在其中的巨大空洞。

因為光速有限的關係，所以看得越遠，看到的宇宙時間越為早期，故而能看到宇宙過去經歷過的不同時期。早期宇宙的星系外觀，和目前宇宙裡的典型星系看起來截然不同。早期宇宙星系的不規

則外觀，其實是星系彼此相撞造成的結果，常常也導致新恆星快速誕生。宇宙創生於大霹靂，在最早期還看不到任何星系，只看到大霹靂後留下的餘暉。



這是由哈伯太空望遠鏡和電波望遠鏡所拍攝到的 M51 漩渦星系合成圖，沿著旋臂可以看到那裡的緻密星際介質很多。銀河系和 M51 一樣，也是螺旋星系。 ©Jin Koda。



宇宙歷史圖：從左端的大霹靂開始，到右邊的現在宇宙。 ©NASA/WMAP

宇宙的種種複雜，使我們想問：銀河系和其他星系如何演變成今天的樣貌？是什麼促使星系中的恆星形成？為什麼宇宙裡會有星系團、巨大絲狀結構和空洞呢？

想解答這些問題，驅使天文學家去設計建造新一代望遠鏡。這些問題龐大深奧，並非某一觀測或某一望遠鏡就可獨力解決。巨大光學望遠鏡能看到最早的恆星發出的星光；太空望遠鏡在紅外波段很靈敏，能找到被塵埃遮蔽的恆星；至於電波望遠鏡，能觀測波長在 0.01 公分到 10 公尺之間的電磁波，是探索讓恆星形成的緻密氣體之利器。

在銀河系或其他星系我們都能看到，緻密雲氣因自己的重力作用而塌縮，在中心誕生了新恆星。這些雲氣大多是冷氣體，主要成分是由兩個氫原子組成的氫分子。可惜的是，在這種情況下的氫分

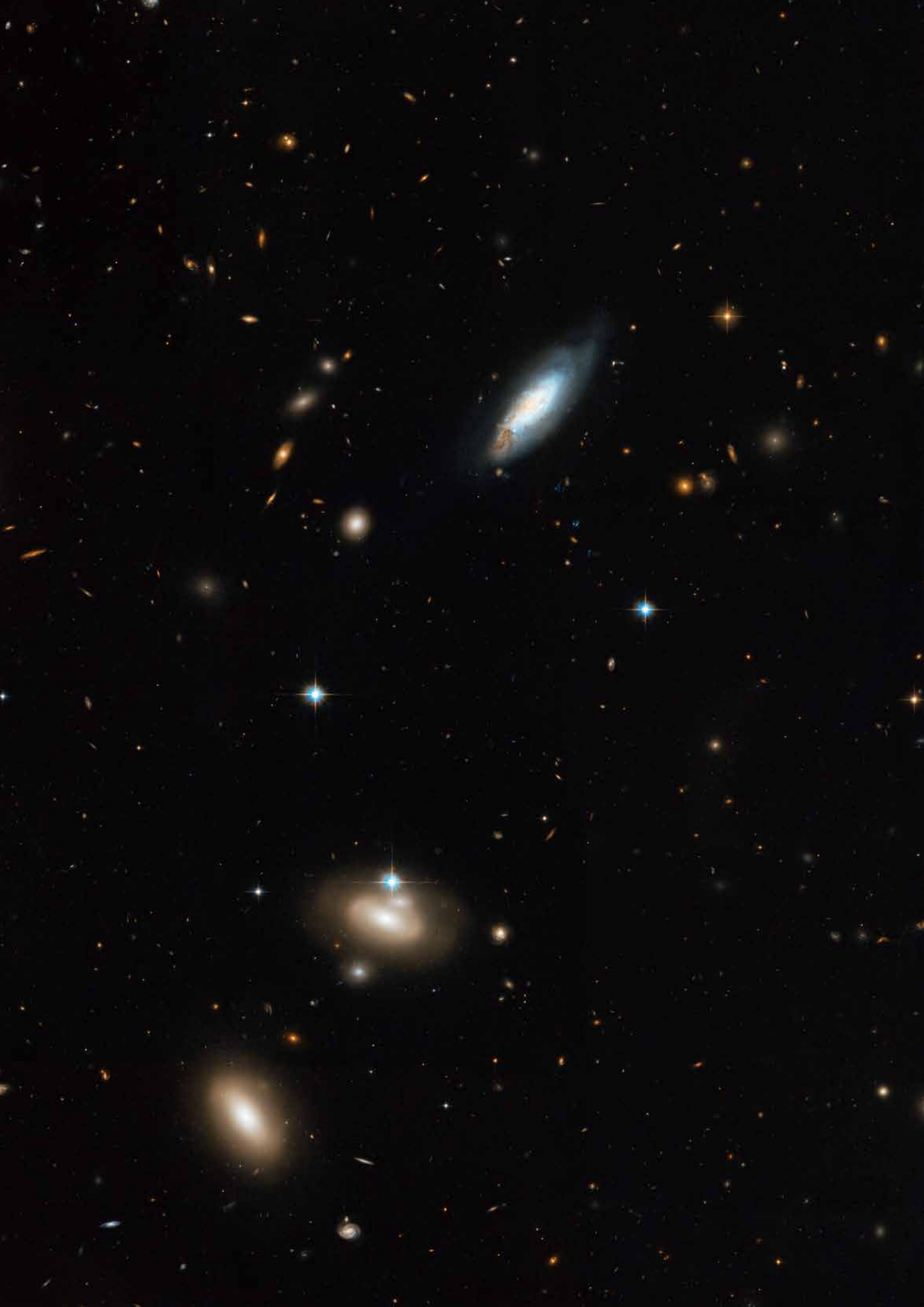
子是觀測不到的。因此，天文學家設計了一種技術，藉經常和氫分子偕伴出現的其他分子來追蹤氫分子。其中，一氧化碳（CO）是數量最豐富又最容易偵測到的。這種一氧化碳不是燃燒石化燃料產生的，而是在極低溫又緻密的分子氣體中，兩個原子在慢速碰撞下所造成。

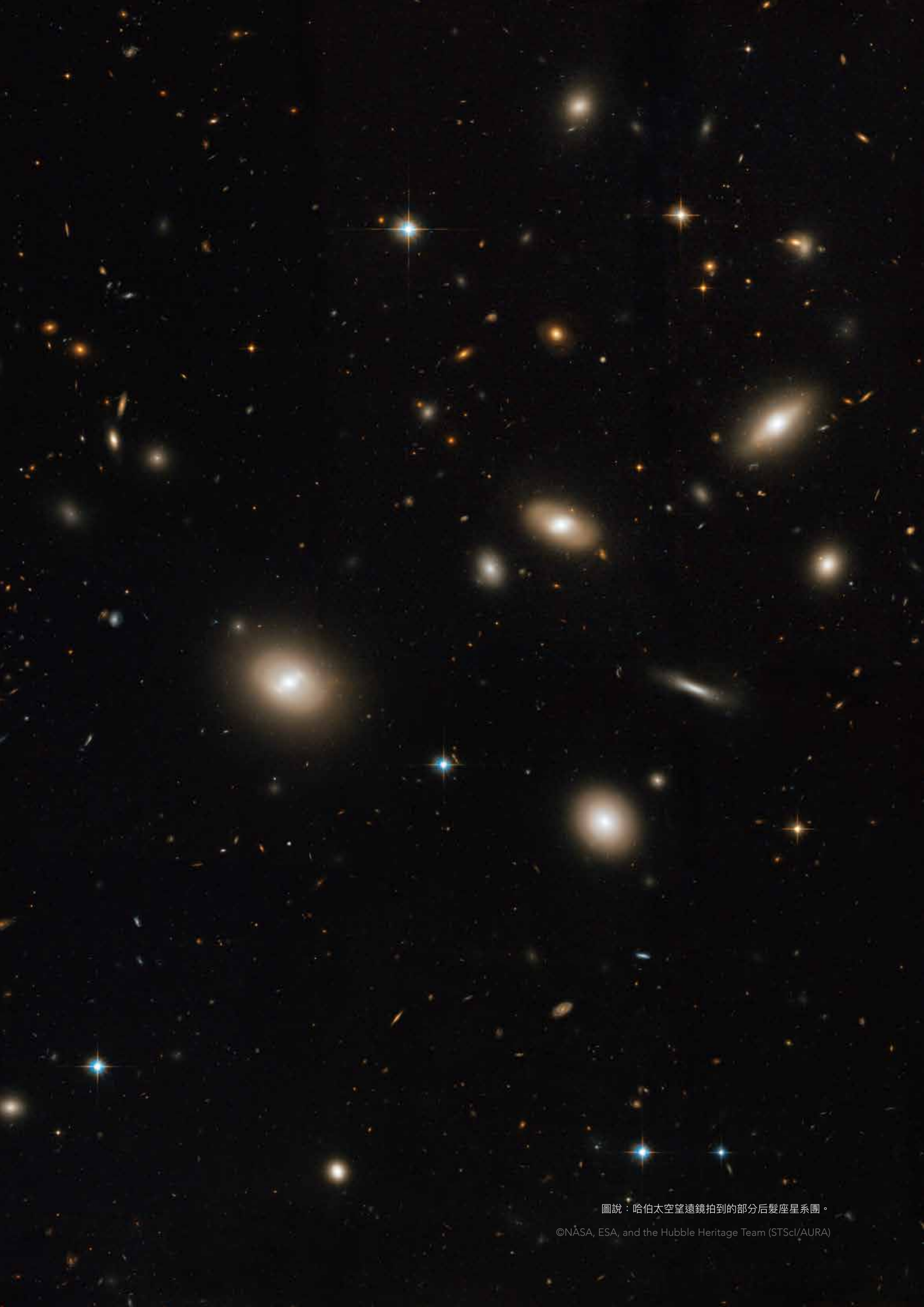
結果，幫銀河系和附近星系繪製一氧化碳分布圖的天文學家發現，一氧化碳分布在星系的旋臂結構，也就是新恆星形成的地方。在遙遠（早期）宇宙中，天文學家只偵測到質量最大、恆星形成活動最劇烈的星系，那些地方也同樣顯示出有大量一氧化碳，表示正在孕造新恆星。

然而，要想弄清楚整個宇宙裡恆星及星系怎麼形成的完整故事，不能只靠最亮最大的星系所提供的資料，還必須參考那些非常小的星系。小星系本身製造的

恆星數量雖然非常少，但小星系的總數遠多於最大型星系，以至於小星系製造出的恆星總數還是占大多數。然而，即使用全世界最大的電波望遠鏡，例如位於智利的 ALMA，也沒辦法偵測到那些暗淡的小星系。要是看不到小星系又想搞清楚星系演化，就像你了解世界經濟，卻只觀察有錢人怎麼過生活一樣，行不通。

要解決這個問題，我們可以使用強度測繪（intensity mapping）的技術，也就是一次觀測大區域的天空，取得這個大體積內所有星系發出的訊號總和，並測繪和統計不同大體積內的強度變化。因為不需要單獨偵測到個別的星系，所以不會有星系太小而被遺漏的問題。雖然拍不到教人眼睛為之一亮的天文美圖，但確實能讓我們創建出一個橫跨宇宙歷史長河的資料庫，配合理論模型，幫助我們更了解星系及恆星如何形成與演化。





圖說：哈伯太空望遠鏡拍到的部分后髮座星系團。

©NASA, ESA, and the Hubble Heritage Team (STScI/AURA)

挑戰一氧化碳觀測

作者／林凱揚

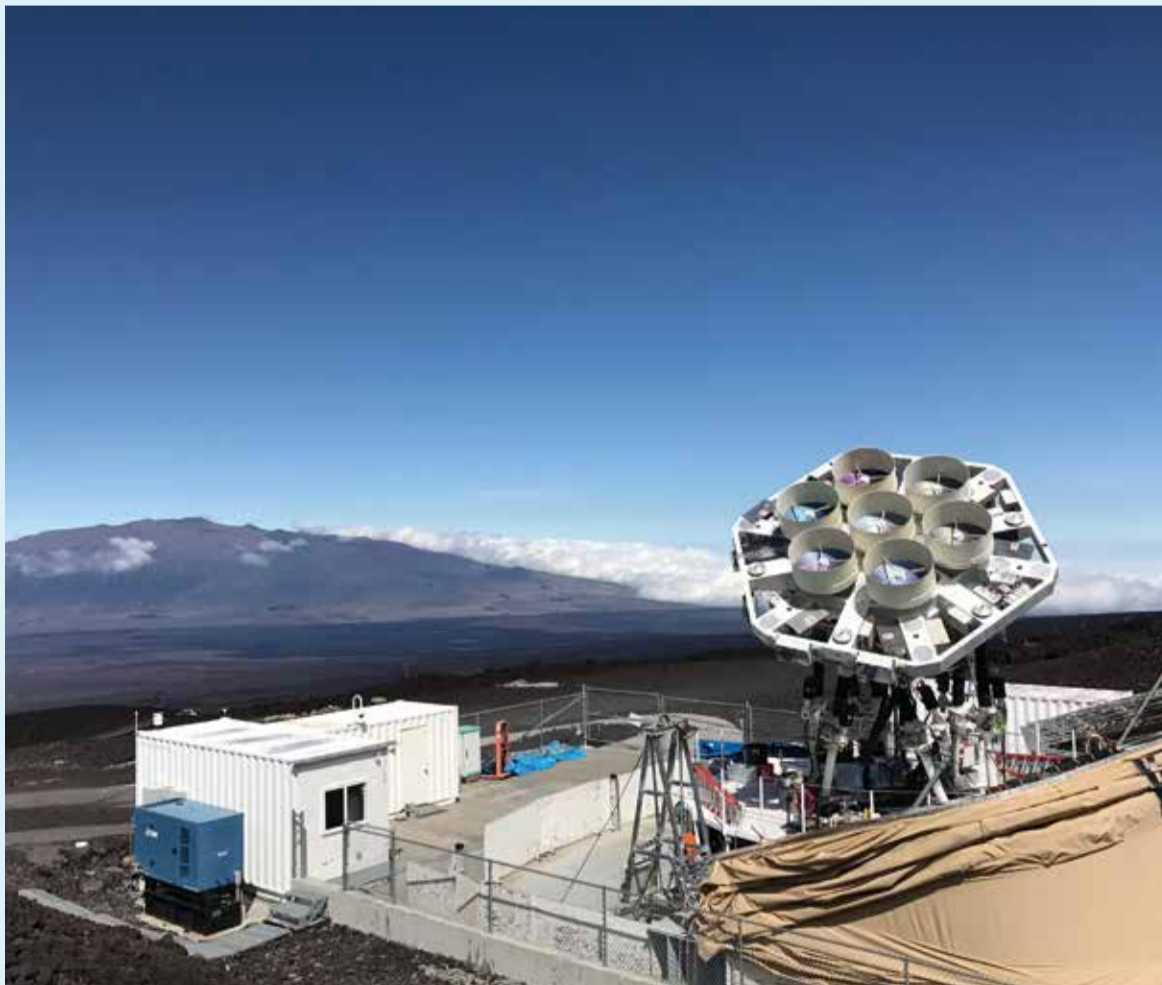
AIM (ASIAA Intensity Mapping) 計畫要觀測一氧化碳 (CO) 分子在宇宙中的分佈，並探究 CO 分子的數量隨著宇宙演化如何改變。CO 分子之所以成為天文學家喜愛的目標，除了因為它數量僅次於氫分子，普遍存在於所有分子雲之中外，更是由於 CO 能夠放出很明亮的譜線。這些譜線落在較高頻的微波或稱毫米波的波段，頻率約為 115 GHz、230 GHz、345 GHz... 等。觀測時，當發出譜線的分子雲位於本銀河系或是鄰近的星系時，接收到的譜線頻率會因為兩者間的相對運動而變 (都卜勒效應)；而當發射源來自更加遙遠的距離時，則因為宇宙膨脹的關係，接收到的波長會變長而頻率會降低。換句話說，同一條譜線，接收時頻率越低代表來源離我們越遠，頻率越高越接近譜線的原始頻率，則是從離我們越近的地方發出的。因

此觀測分子譜線的強度測繪 (IM)，就如同替宇宙中的分子分佈進行了斷層掃描，可以描繪出氣體的 3D 分佈。

座落於夏威夷毛納洛火山的李遠哲陣列，恰好就是一座非常適合運用 IM 技術的望遠鏡。第一個在李遠哲陣列上執行的計畫稱為 AMiBA 計畫 (Array for Microwave Background Anisotropy, 宇宙背景輻射陣列)，其目標為觀測宇宙背景輻射穿越星系團時發生的能譜變化。由於此能譜變化與星系團內的熱氣體蘊含的能量相關，我們因此可以得知所觀測的星系團其總質量大小以及是否正在成長等資訊。在經過七個天線與十三個天線兩個階段，並觀測了超過二十個星系團之後，於 2014 年底功成身退，改由 AIM 計畫接手。

相較於 AMiBA 計畫，AIM 計畫需要較高的頻譜解析度 (spectral resolution)，這是因為相鄰的接收頻率來自空間中不同區域的 CO 譜線，兩者的分佈可能是弱相關或是無相關，因此需要各自加以偵測而不能逕行疊加。再從另一個角度來看，同時能觀測的頻率範圍 (bandwidth) 越大，代表能探測的宇宙縱深越大，最後所得到的統計誤差也越小。為此，本所運用了天文界的開放 CASPER 架構 (Collaboration for Astronomy Signal Processing and Electronics Research, <https://casper.berkeley.edu/>) 自行研發高頻譜解析度的寬頻數位相關系統。除了應用於 AIM 計畫，這個數位相關系統的技術也被用在 wSMA 與 GLT 等計畫中。

AIM 計畫預計分三階段逐步探索 CO 在大尺度分佈上的演化問題。第一階段先使用李遠哲陣列進行觀測，目標是紅移在 1.4 (宇宙年齡 45 億年) 和紅移在 2.6 (宇宙年齡 25 億年) 左右的宇宙。在這兩個宇宙年齡時，宇宙中的恆星形成率正從高原期逐步降低，朝向現在宇宙般較和緩的速率演化。分子氣體作為恆星形成的燃料和氣體回收場，究竟是如何演化的，一直是天文學家們非常關心的問題。AIM 計畫第二階段預計建造適合更低頻段的接收系統，提高在紅移 2.6 區域的靈敏度，並進一步朝紅移 6 (宇宙年齡僅 9 億年) 的宇宙邁進。在第三階段，則需要另一個更低頻的陣列，配合第二階段的觀測，運用兩條不同的 CO 譜線對紅移 6 的宇宙進行觀測，這麼做是希望能消除單一譜線觀測可能存在的系統誤差。紅移 6 是非常早期的宇宙，接近第一代恆星和星系的形成時期 (宇宙年齡約 4 億年時)，天文學家預期當時的恆星形成模式也許和現在不同，氣體中的重元素也較少，如果能成功觀測 CO 的分佈，將會是一大突破。目前第一階段的新硬體已經在李遠哲陣列上進行系統整合測試，預計 2018 年上線開始觀測。



位於夏威夷毛納洛火山的李遠哲陣列望遠鏡。 © 中研院天文所



本所也有參與的 TIME 計畫，將使用位於美國亞利桑那州 Kitt Peak 的 12 米望遠鏡。照片中的天線原本是 ALMA 的其中一座原型機，2013 年底被搬移到 Kitt Peak，其精細的表面是進行次毫米波長觀測時的極佳工具。©Thomas Folkers

世界上的其他強度測繪計畫

作者／林凱揚

運用原子或分子譜線進行強度測繪 (IM) 研究是最近約十年間興起的新領域，最早的目標是中性 (非游離的) 氫原子的 21 公分譜線。這條譜線相當不易觀測，目前只有離本銀河系較近的星系才能被單獨測量，想要研究中性氫原子在更遙遠的早期宇宙如何演化，則只有運用 IM 技術同時觀測大範圍內的許許多多星系才能辦到。這方面目前進行中的實驗有 CHIME (Canadian Hydrogen Intensity Mapping Experiment)、HIRAX (Hydrogen Intensity and Real-time Analysis eXperiment)、MeerKAT 等。

另一方面，中性氫原子也大量存在於尚未被恆星和星系產生的高能光子所游離的極早期宇宙。在宇宙由幾乎完全中性 (年齡小於約 4 億年) 轉變到幾乎完全游離 (年齡大於約 8 億年) 的這一短暫時期內，中性氫原子氣體的分佈必然產生巨大的變化。

觀測這一過程，可能是解開最早期恆星誕生之謎的第一把鑰匙。進行中的實驗則有 HERA (Hydrogen Epoch of Reionization Array)。

其他的原子或分子譜線的 IM 計畫雖然較晚開始，可是最近也都到了開花結果的時候。量測 CO 譜線的除了 AIM 計畫外，還有運用完全不同的技術的 COMAP 計畫。另一個常被用來追蹤分子氣體的分佈與恆星形成活動的譜線，是碳原子單一游離 (C^+) 之後的譜線。在早期宇宙，尤其是重元素較稀少的時候， C^+ 有可能比 CO 更普遍，因此也有如 CCAT-p、TIME (Tomographic Ionized-Carbon Mapping Experiment，本所也有參與)、STARFIRE 等計畫正在進行中。除此之外，規劃中的下一代太空觀測站 SPHEREx，其目標則是用 IM 觀測因為恆星形成而游離的氫原子譜線。



中央研究院 2017 年院區開放日，本所活動集錦。© 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：朱有花。 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、蔣龍毅。 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。

