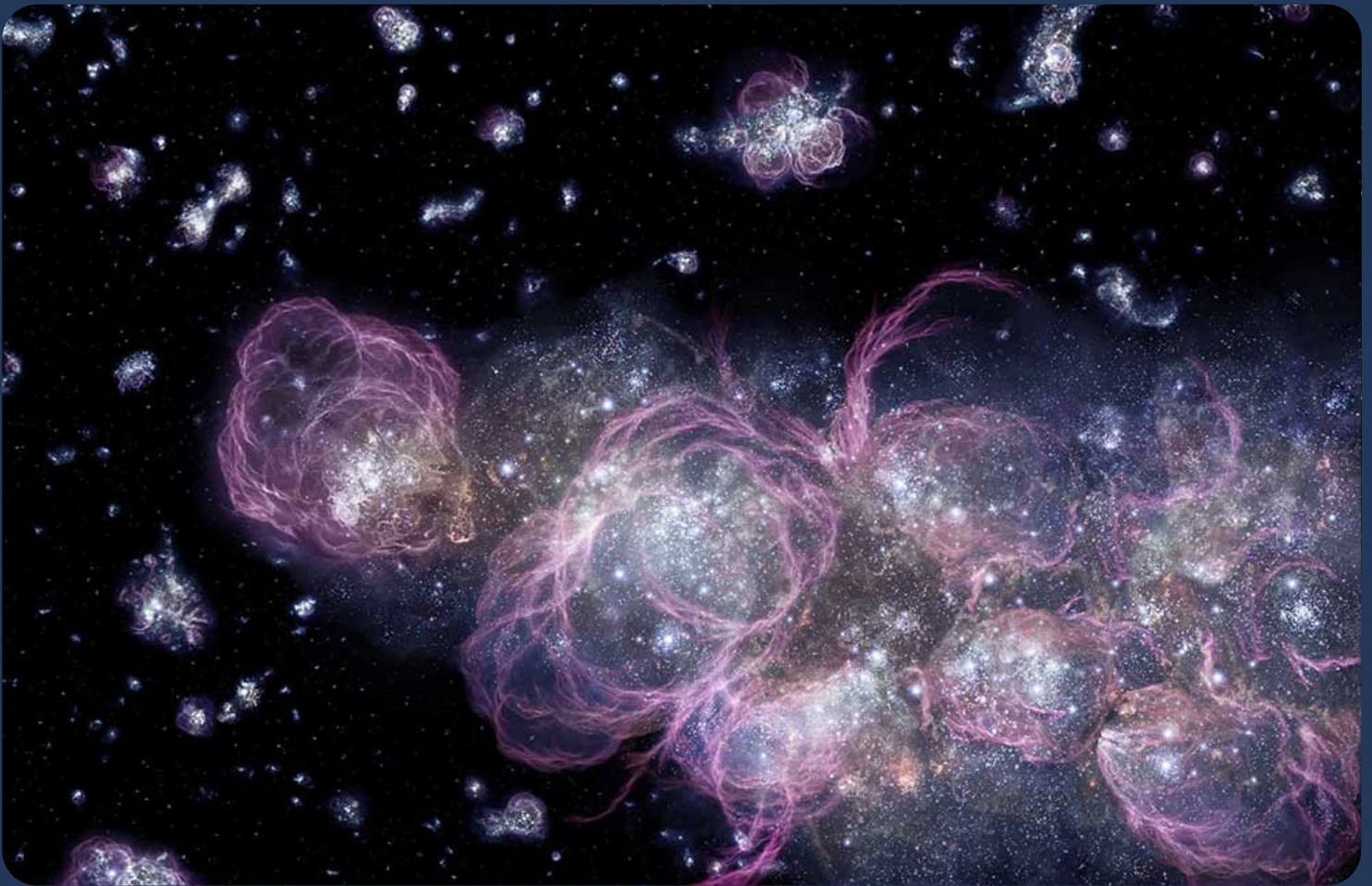


## 追尋宇宙的第一道星光

宇宙誕生後曾經歷一段漫長的黑暗時期，直到第一代恆星誕生後，熾熱的星光才劃破了黑暗。本期天文學教室，將帶大家跟著天文家們的腳步，回到宇宙第一代恆星誕生時期，追尋宇宙的第一道星光。

文／周毅桓



藝術家筆下所展現早期宇宙的樣貌，根據天文學家推測，在濃密的太初雲氣中，正成群地大量形成第三族恆星。完全由氫組成的大質量恆星因為壽命很短，所以接連不斷的超新星爆發，在恆星形成區遺留下許多擴張中的超新星殘骸。圖片來源：Adolf Schaller for STScI

### 早期的宇宙

關於宇宙的誕生，至今仍充滿未解謎團，其中主流理論認為宇宙是誕生於約137億年前的「大霹靂」（Big Bang）事件，經歷快速膨脹的初期高溫宇宙中充滿高能粒子與光子，彼此劇烈碰撞，直到

宇宙誕生38萬年後，溫度降低，質子和電子開始結合成氫原子、氦原子等，又經歷了一段黑暗時期（Dark Age），物質在萬有引力作用下聚縮，形成了恆星與星系並發出星光，黑暗時期才告結束。天文學家們猜測，宇宙第一代恆星的誕生或可追溯到大霹靂後1億年左右，如圖1。

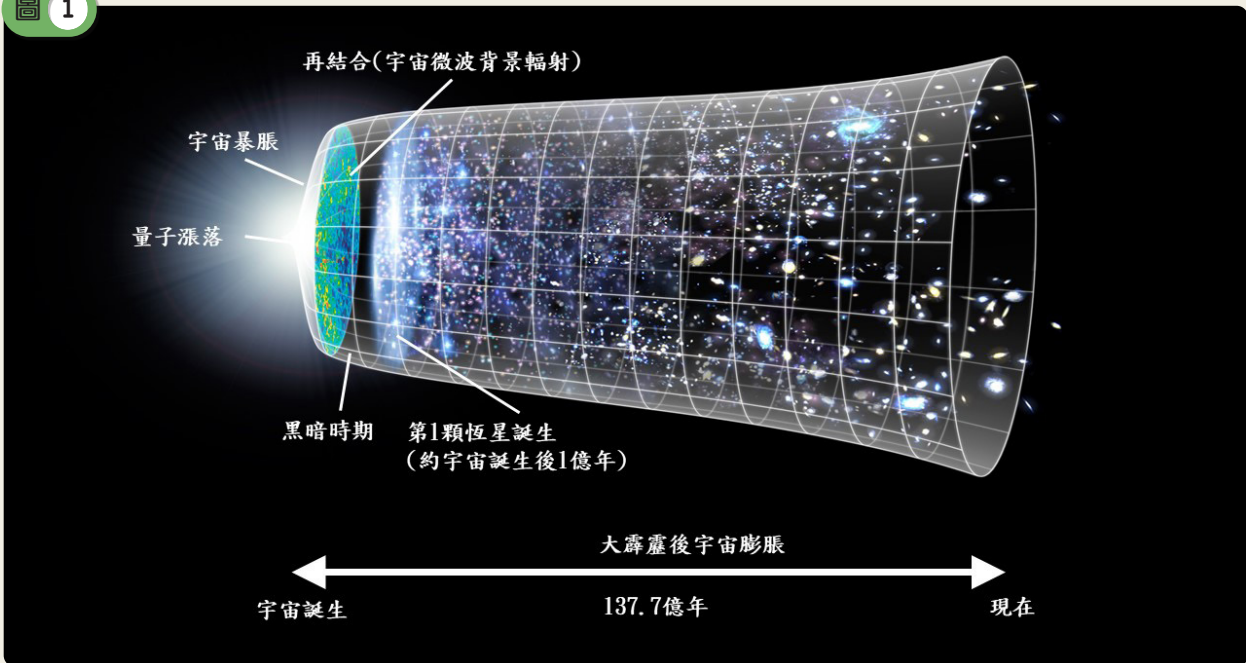
## 恆星的星族與第三族恆星

宇宙的第一代恆星被稱為「第三族恆星」(Population III)，存在於宇宙早期，因宇宙膨脹而離我們非常遙遠，觀測困難，目前尚未被直接觀測

到。

第三族恆星的組成與現今恆星不同，近代恆星形成時混入了早期恆星演化後遺留的物質，因此金屬元素含量比例較高；但第三族恆星形成時的宇宙中僅有氫、少量氦，以及極微量的鋰，因此恆星本身幾乎不含金屬元素，如圖2。

圖 1



$\Lambda$ -CDM模型是目前最為接受的宇宙模型，宇宙從137.7億年前的大霹靂誕生，歷經暴脹、宇宙誕生後38萬年的再結合時期、黑暗時期，到宇宙誕生後1億年左右第一顆恆星誕生及後續演化。圖片來源：NASA/ LAMBDA Archive / WMAP Science Team

圖 2



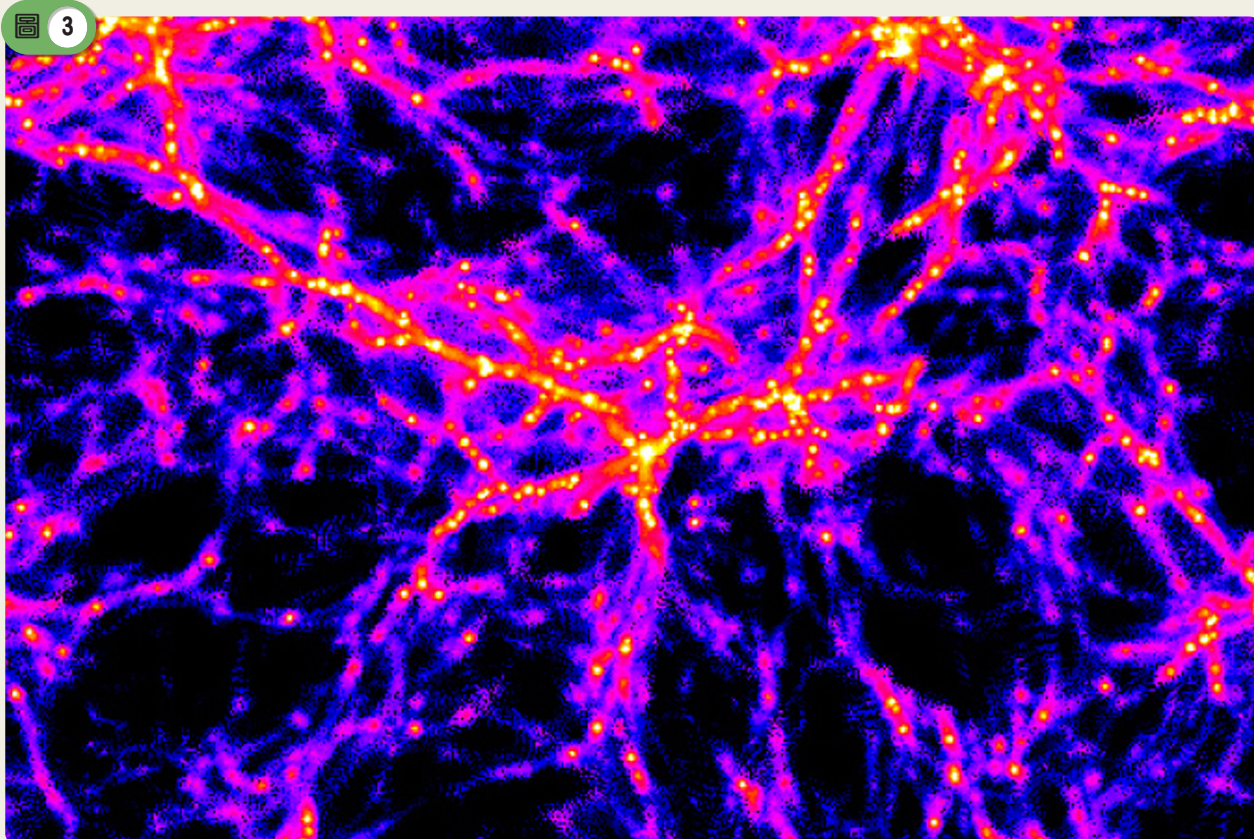
由藝術家描繪的第三族恆星。宇宙的第一代恆星，形成於大霹靂後1億年至5億年間，完全由氫與氦組成，質量可能是太陽的30至1,000倍，壽命只有不到數百萬年。圖片來源：NOIRLab/NSF/AURA/J. da Silva/Spaceengine

## 第三族恆星生成環境的理論模型

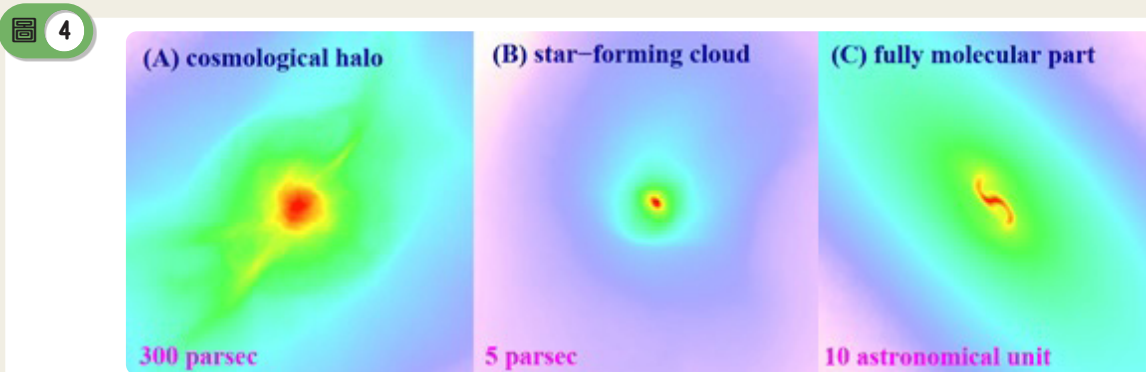
科學家們以 $\Lambda$ -CDM模型為基礎，運用電腦模擬，嘗試描述第三族恆星的特性、生成方式與對早期宇宙的影響。根據模擬，黑暗時期的宇宙中佈滿了中性氫與氦原子，這些太初雲氣（primordial gas

clouds）會形成絲狀結構，在連結結點處的太初雲氣因萬有引力作用而收縮形成原始星系，如圖3。

太初雲氣中除了可見物質外還有暗物質，它們起初混合在一起，當中的氫分子因和其他粒子碰撞，輻射紅外光後溫度降低，在萬有引力作用下收縮集中，形成原星系的盤面，但暗物質仍散佈在整團雲氣中，因此在原星系外圍形成暗物質暈，如圖4。



電腦模擬宇宙誕生後20億年左右的狀態。宇宙中的原始物質結成絲狀結構，其交錯處稱為結點，星系便誕生於此。  
圖片來源：ESO



電腦模擬第三族恆星的生成環境。普通物質和暗物質原先混合在一起，後來分離形成原星系及其外圍的暗物質暈。  
圖片來源：Yoshida 2008

天文學家推測第三族恆星是在近百萬個太陽質量（ $10^6 M_{\odot}$ ）的小型暗物質暈（dark matter minihalos）中誕生。由於太初雲氣中幾乎不含金屬，而星際雲氣在金屬含量低的情況下較不利於冷卻，因此形成的恆星質量較大。根據模擬，第三族恆星可能介於30到1,000個太陽質量間。

由於第三族恆星的質量較大，表面溫度可能高達100,000K，會產生強烈的高能輻射，當這些高能量紫外光照射星系際介質時，中性氫與氦將會被游離，形成大量自由電子，而當這些自由電子重新和氫與氦原子核結合時，便會發出萊曼 $\alpha$ 與He II波長的紫外光，如圖5。

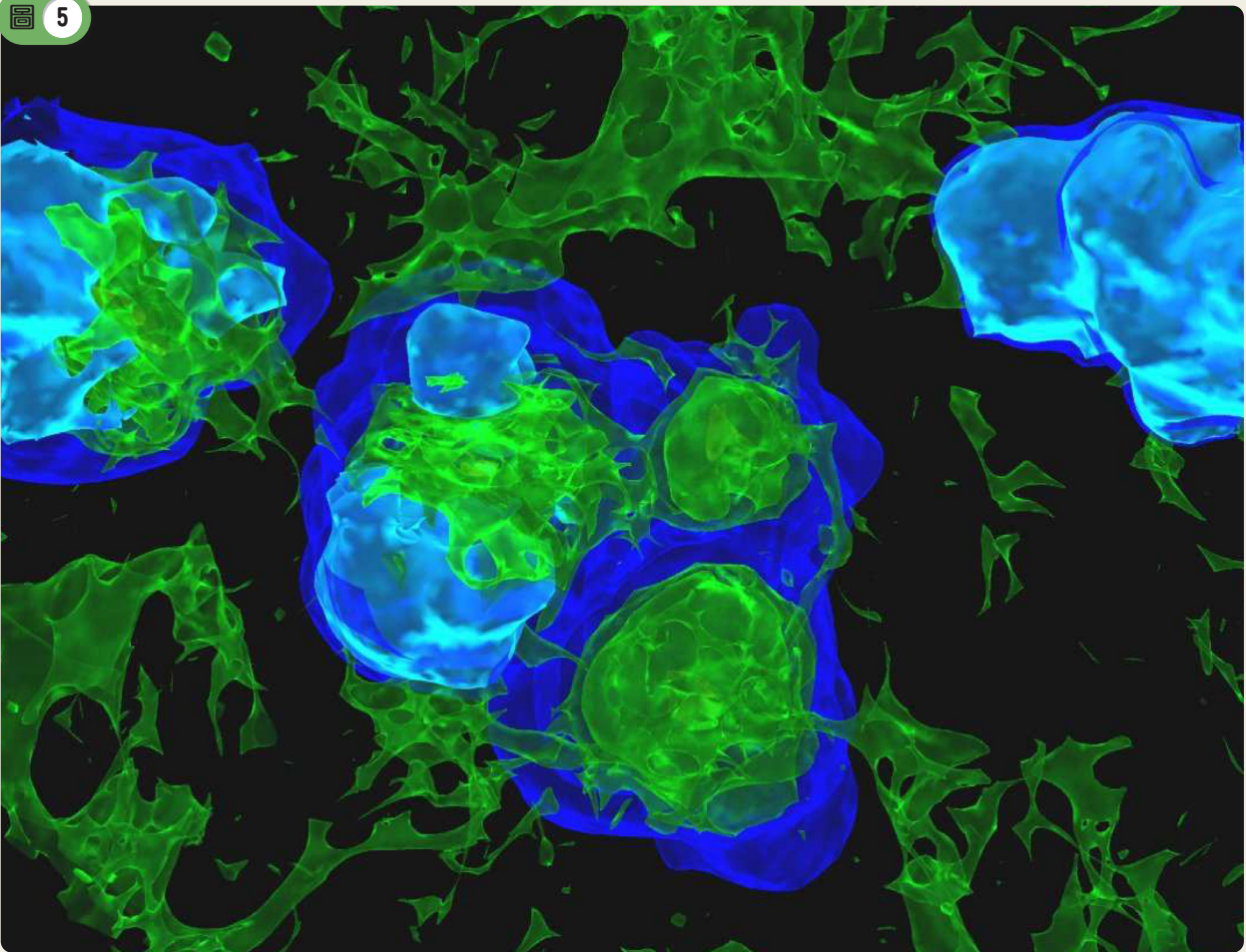
恆星的質量越大，壽命會越短暫，相較於我們太陽的壽命約100億年，第三族恆星可能僅存活短短

幾百萬年，在它們生命終結會發生超新星爆炸，將核心中由融合反應產生的金屬拋出，進入星系際介質（intergalactic medium）中，成為新一代星系與恆星的組成成分。

## 尋找第三族恆星的觀測線索

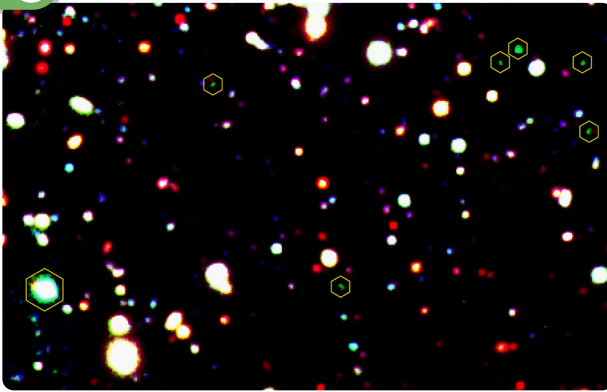
儘管尚未直接觀測到第三族恆星，但目前已有一些間接觀測證據對模擬結果提供佐證。天文學家們在2001年以歐洲南方天文臺甚大望遠鏡（European Southern Observatory, Very Large Telescope），在紅移大約3.04，也就是大霹靂後22億年左右的時代，觀測到宇宙的絲狀結構，初步驗證了早期宇宙會形成絲狀結構的預測，如圖6。

圖 5

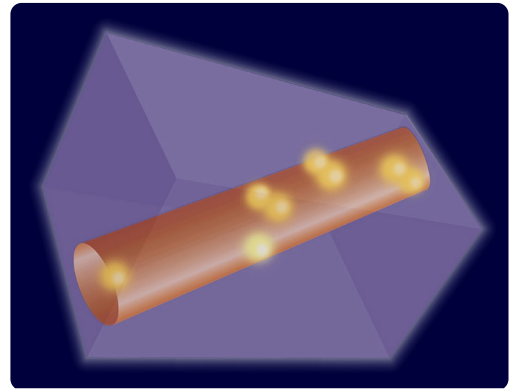


電腦模擬第三族恆星高能量星光與恆星風將周圍的分子雲游離，在恆星死亡後留下一個個游離氣泡（藍色區域），而分子雲（綠色區域）在恆星風擠壓下，部分區域密度增大，促成新恆星誕生。圖片來源：Johnson 2007, Bromm 2009

圖 6



歐洲南方天文臺（ESO）甚大望遠鏡（VLT）在紅移約3.04處所拍攝到的六個星體（黃框），可能就是建構星系的基本單位（Galaxy Building Blocks）。這些星體距離非常遙遠，使得原本萊曼α的紫外光經過紅移後成為綠色的可見光。



若將這些星體繪製於三度空間中，可看出它們都分佈在一條狹長結構中，天文學家認為這可能就是理論模型中的絲狀結構。圖片來源：ESO

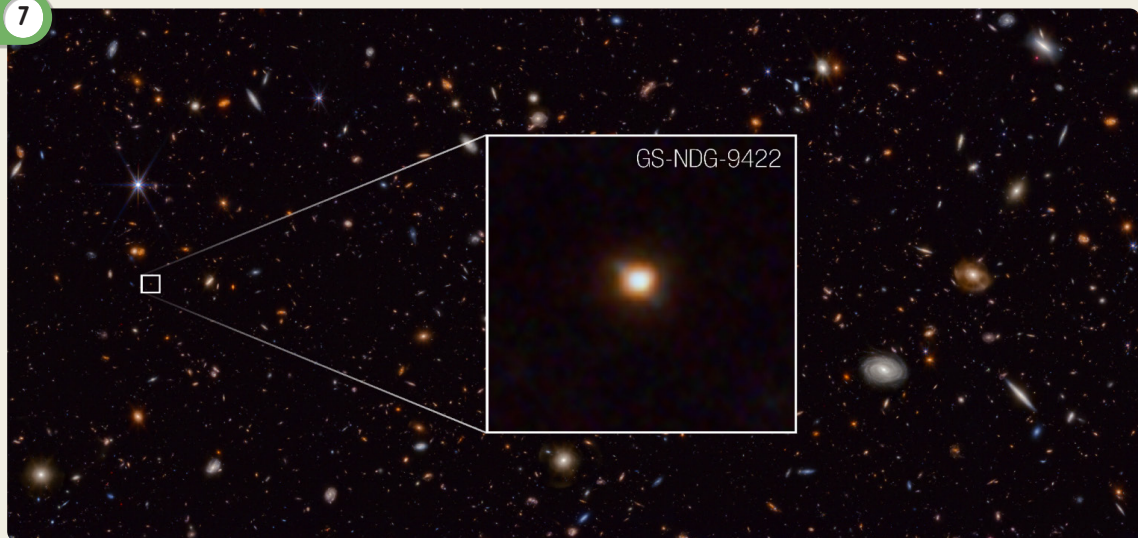
## 韋伯太空望遠鏡 早期宇宙觀測任務

在韋伯太空望遠鏡升空後，越來越多遙遠的早期宇宙面貌被發現，其中編號GS-NDG-9422的星系非常特別，它位於紅位移5.9、相當於大霹靂後約10億年，也就是第一代恆星的時代，這個星系中的雲氣因被恆星加熱而比恆星還亮。根據推算，加熱雲氣的恆星表面溫度可能高達攝氏80,000度左右，

遠高於宇宙後期誕生之大質量恆星的攝氏40,000至50,000度，但由於星系的化學組成複雜，所以當中應該已沒有第三族恆星，不過它的恆星的確與現代恆星大不相同，而GS-NDG-9422很可能正處於從早期星系轉變為成熟星系的階段。相信不久後有更多激動人心的新發現，將逐步揭曉早期宇宙與初代恆星的真相。

周毅桓：臺北市立天文科學教育館

圖 7

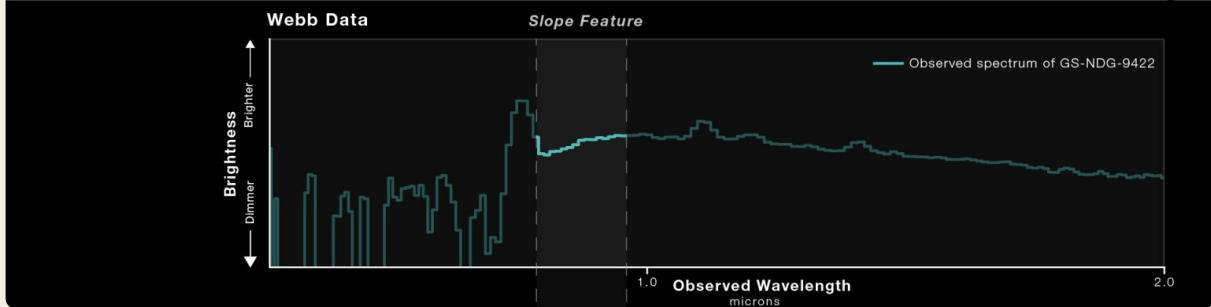


韋伯太空望遠鏡在2024年時觀測到星系GS-NDG-9422的位置。圖片來源：NASA, ESA, CSA, STScI, Alex Cameron (Oxford)

8

GALAXY GS-NDG-9422

## NEBULAR LIGHT OUTSHINES STARLIGHT



韋伯太空望遠鏡於2024年時所拍攝的早期星系GS-NDG-9422及其光譜，根據電腦模擬分析，發現其中恆星的溫度非常高，被加熱的雲氣甚至比恆星還亮。圖片來源：NASA, ESA, CSA, Leah Hustak (STScI)

### 參考資料：

1. James Webb Space Telescope (STScI), What Were the First Stars Like? Retrieved from <https://webbtelescope.org/contents/articles/what-were-the-first-stars-like>
2. NASA. Early Universe. Retrieved from <https://science.nasa.gov/mission/webb/early-universe/>
3. NASA, LAMBDA Archive Team.  $\Lambda$ CDM Model of Cosmology. Retrieved from [https://lambda.gsfc.nasa.gov/education/graphic\\_history/univ\\_evol.html](https://lambda.gsfc.nasa.gov/education/graphic_history/univ_evol.html)
4. Abraham Loeb (2008), 譯者：李沃龍。宇宙的黑暗年代。科學人，第29期。
5. Richard B. Larson, Volker Bromm, Scientific American. The First Stars In The Universe. (2004)
6. Jonathan O' Callaghan, Scientific American. At Last, Astronomers May Have Seen the Universe's First Stars. (June 13, 2023)
7. Volker Bromm, Richard B. Larson (2004). The First Star. Annual Reviews of Astronomy and Astrophysics.42:79-118, doi: 10.1146/annurev.astro.42.053102.134034
8. Volker Bromm, Naoki Yoshida, Lars Hernquist, Christopher F. McKee (2009). The formation of the first stars and galaxies. Nature, 459, 49-54, doi: 10.1038/nature07990
9. NASA Webb Mission Team, Goddard Space Flight Center. (2024). In Odd Galaxy, NASA's Webb Finds Potential Missing Link to First Stars. Retrieved from <https://science.nasa.gov/missions/webb/in-odd-galaxy-nasas-webb-finds-potential-missing-link-to-first-stars/> (Sep 25, 2024)
10. Roger Freedman, Robert Geller, William J. Kaufmann. (2019). Universe 11 Edition. New York, United States of America: Macmillan Learning.

### Youtube 相關影片：

- 韋伯太空望遠鏡-再游離與星系演化動畫  
[https://www.youtube.com/watch?v=qK39sKNux7Q&ab\\_channel=JamesWebbSpaceTelescope%28JWST%29](https://www.youtube.com/watch?v=qK39sKNux7Q&ab_channel=JamesWebbSpaceTelescope%28JWST%29)
- 威爾金森微波各向異性探測器 (WMAP)  
[https://www.youtube.com/watch?v=cnE4oYcCw8g&t=96s&ab\\_channel=NASAGoddard](https://www.youtube.com/watch?v=cnE4oYcCw8g&t=96s&ab_channel=NASAGoddard)
- 歐洲南方天文台-觀察第一代恆星的灰燼  
[https://www.youtube.com/watch?v=dtaym\\_HF1A&ab\\_channel=EuropeanSouthernObservatory%28ESO%29](https://www.youtube.com/watch?v=dtaym_HF1A&ab_channel=EuropeanSouthernObservatory%28ESO%29)