

從太空凝視星空——韋伯太空望遠鏡

陳文屏（中央大學天文所）

本文編輯後刊登於「科學人」2023年2月號，此處為作者原始完整版

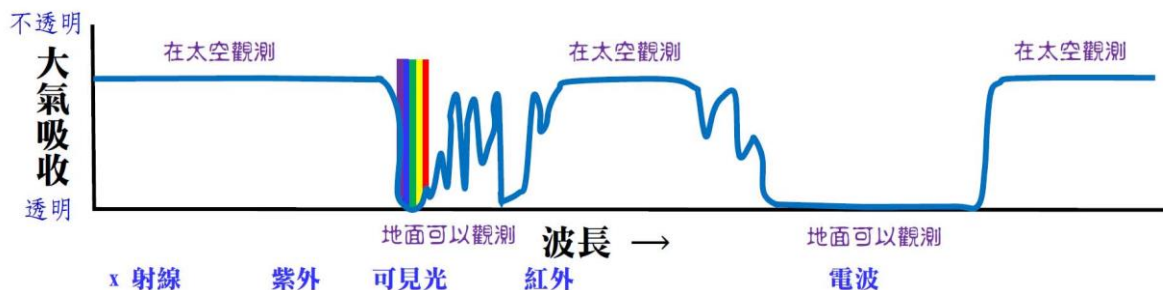
天文觀測

天文學乃觀測的科學，藉由天體發出的訊息來了解天體的性質。除了少數能以太空船前往勘查，或是物質落入地球（例如隕石、宇宙射線、微中子等），否則仰賴的幾乎全是天體發出的電磁波。我們肉眼感應的是電磁波極小的波長範圍，在此「可見光」波長範圍以外，波長稍長者，稱為「紅外線」，稍短者則為「紫外線」。比紅外波長更長（頻率更慢、能量更弱）者，有微波、厘米波、米波等，統稱為「無線電波」，或就稱「電波」。比紫外波長更短者，則是X射線，以及能量最高的伽瑪射線。

不同狀態的物質（原子、分子、離子）處於不同環境（溫度、密度高低），會發出不同的電磁波，有些集中在某些波段，有些波長範圍廣（連續譜），有些只在某些特定能量（光譜線），有些會有偏振。物質也會吸收電磁波。天文觀測的目的，在利用工程技術接收各式電磁波訊號，並以物理、化學知識解讀發射、反射，或吸收物質的性質。天文望遠鏡利用反射或折射原理聚集電磁波，然後以偵測器（接收機）感應記錄，依照電磁波波長不同，望遠鏡與偵測器的運作原理、外觀各異。

太空望遠鏡

地球大氣是生命發展的關鍵，不僅提供我們呼吸所需的氧氣以獲得能量，並且提供大氣壓使得地表保有大量液態水。但是大氣對於觀測宇宙有不利影響：一來是大氣分子（水、二氧化碳等）吸收紫外線及長波（遠紅外、微波等），而不易到達地面。在地表觀測，因此受限於可見光、部分波長接近可見光的紫外線、在紅外波段分子吸收比較不強的「大氣窗口」，另外還有長波電波。要接收天體其他波段的訊號，就必須盡量離開大氣層，例如探空氣球、高空飛機，或是把儀器放在太空。



地球大氣吸收的程度隨電磁波波長而不同，縱軸越高表示吸收強烈。在地表可以接收到可見光、部分電波、以及少數紅外波段。在其他波段則必須脫離大氣才能觀測。太空望遠鏡則不受大氣限制。

地球大氣對於觀察天體的另種影響是空氣擾動，造成影像模糊。這有如游泳池水流動，密度改變造成光波折射變化，以致於在水下看到外面燈光閃爍不已。地球大氣也有一樣的效果，讓星星亮度一閃一閃，且模糊了影像。

囿於工程技術（發射火箭承載）及經費，太空望遠鏡量體無法太大，例如已經工作了 30 年的哈伯太空望遠鏡口徑 2.4 公尺，跟地面上動輒 6、8、10 公尺口徑的光學望遠鏡相比，集光力小了很多，但因為位於太空而有卓越功能。

值得一提的是，美國的天文學界每隔大約十年，由「美國科學院」(National Academy of Sciences) 的「國家研究委員會」(National Research Council) 主導，廣納社群意見，討論出天文與天文物理領域的優先順序，提供政府資助參考。一方面讓科學界整體當前重要議題以及所需的設備，另方面避免自相競爭，而能集中資源執行大計劃。例如 1970 年代提出的電波干涉陣列 Very Large Array、1980 年代提出最後成項的哈伯太空望遠鏡，以及 X 射線錢德拉太空望遠鏡、1990 年代的史匹哲紅外太空望遠鏡、2000 年討論的韋伯太空望遠鏡與地面電波干涉儀 Atacama Large Millimeter Array (ALMA)。2010 年的報告列出的優先，則是廣角紅外巡天太空望遠鏡 (Wide-Field Survey Telescope, WFIRST) 以及研究天體時間變化的地面巡天 Rubin 天文台執行 Large Survey of Space and Time (LSST)。最新的 2020 報告，以尋找地外生命、研究黑洞與中子星，以及星系演化為課題重點，硬體方面則建造口徑 20 到 40 公尺的巨大光學望遠鏡，並且規畫未來太空望遠鏡的技術。如此學術界由下而上討論、妥協，政府機構則依照優先順序資助，值得我們學習。

韋伯太空望遠鏡

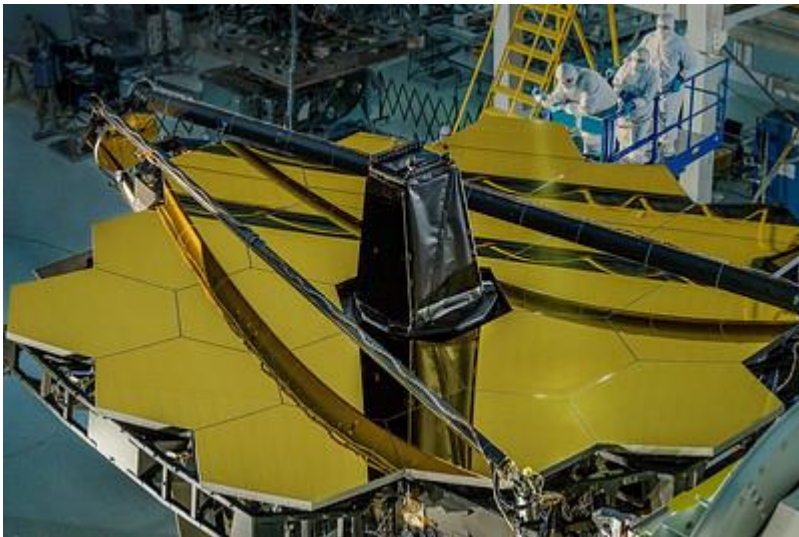
韋伯的故事：韋伯太空望遠鏡從 1996 年開始規畫，原來的名稱是「下一代太空望遠鏡」(Next Generation Space Telescope)，當時的運算為 10 億美金，預計 2007 年發射。之後由於技術與資金問題一再延宕，終於在 2016 年建造完成，總經費膨脹 10 倍。總算在 2021 年底成功發射，成為眾望所歸，接替哈伯太空望遠鏡的「下一代」觀星利器。

James Webb Space Telescope (JWST) 這個一百億美金的計畫，主要由美國 NASA、歐洲航空總署 (ESA)，以及加拿大航空太空總署 (CSA) 研製，另外還有 10 幾個國家合作。主鏡由 18 面六角鏡片拼接而成，整體趨近圓形，相當於口徑 6.5 公尺，鏡片後方由馬達驅動調整對焦。光學採用三個鏡面的設計，次鏡的直徑為 0.74 公尺的凸面鏡，第三鏡進一步校正影像平整，並且擴大視野。光路上的障礙（例如支撐次鏡的支架等等）造成光點除了圓形以外，有了「瑕疵」，使得韋伯的星點影像有六個明亮加上兩個微弱星芒。

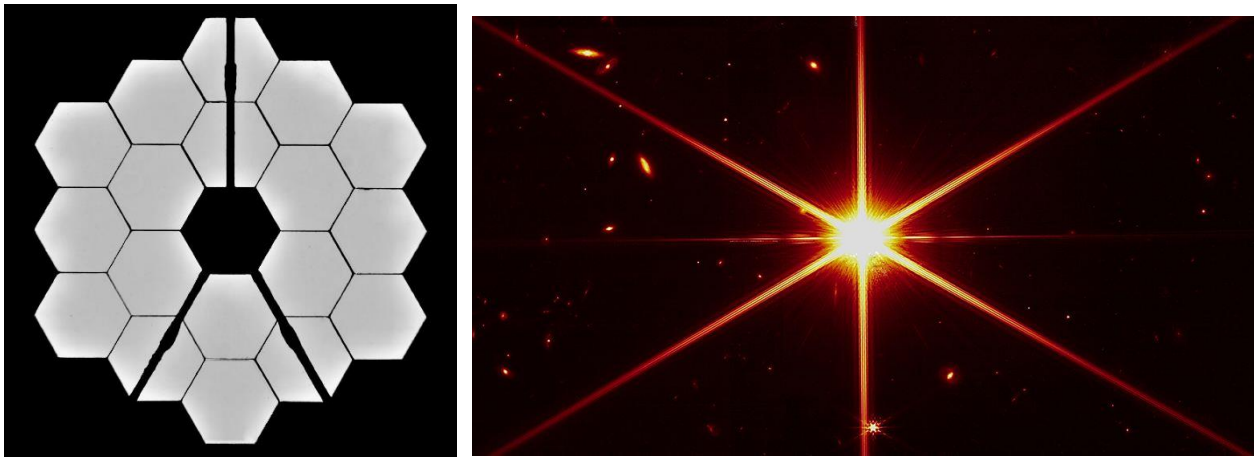


在實驗室中的韋伯望遠鏡可看到 18 片拼接六角鏡面

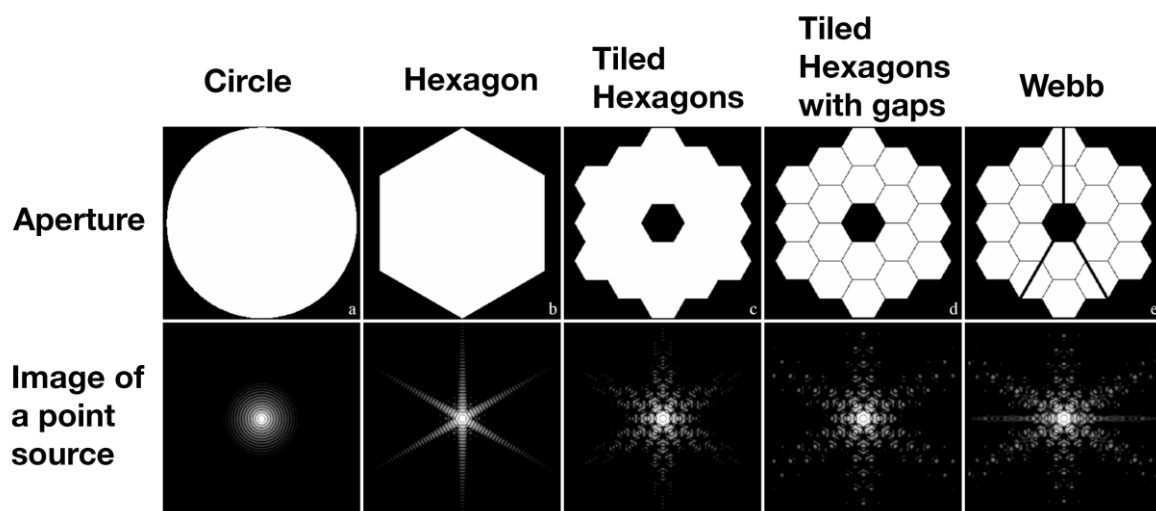
https://en.wikipedia.org/wiki/James_Webb_Space_Telescope#/media/File:JWST_Full_Mirror.jpg



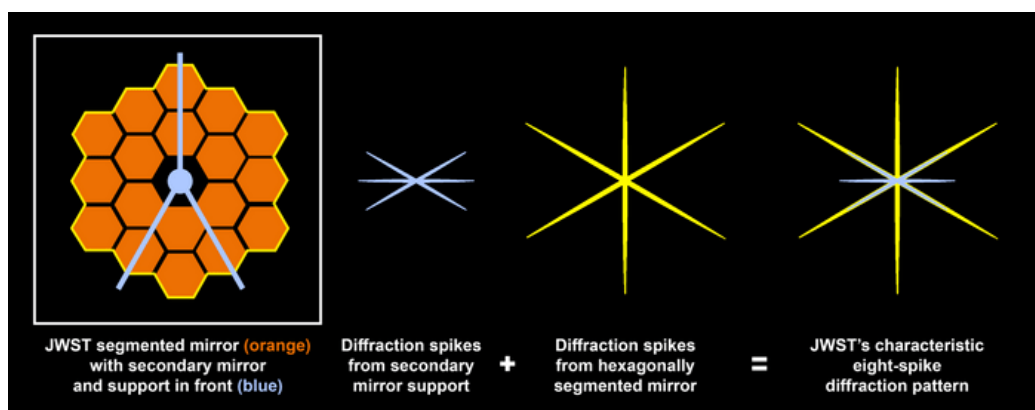
<https://www.flickr.com/photos/nasawebbtelescope/26504730220/>



<https://web.archive.org/web/20220712181705/https://www.bbc.com/news/science-environment-60771210>



<https://bigthink.com/starts-with-a-bang/james-webb-spikes/>



<https://www.sciencefocus.com/space/diffraction-spikes-jwst/>

<https://webbtelescope.org/contents/media/images/01G529MX46J7AFK61GAMSHKSSN>

(左) 韋伯望遠鏡的主鏡經過次鏡反射的「自拍」，可以看到三條支撐桁桿，一條垂直，另兩條與其相交 150 度；(右) 韋伯的測試影像顯示由於整體鏡面並非完整圓形，造成中央星點呈現雪花光斑及六道光芒。另外每支次鏡桁桿邊緣各自形成兩道較小的繞射圖樣。光學設計使原來該有的 12 道圖樣，有 4 道重疊，最後形成長、短不同共八道星芒。

跟前一代哈伯太空望遠鏡相比，哈伯的口徑為 2.4 公尺，重達 11 公噸，韋伯望遠鏡總重 6.2 公噸，只有大約一半的重量，得以搭載火箭進入太空。傳統的望遠鏡面常使用玻璃等材質，取其輕量且耐漲縮。但韋伯望遠鏡改用鈹製作，這是週期表第四個元素，常用在飛彈、戰機、武器、衛星等，質輕而堅，可以耐受發射時候的震動，且在韋伯操作的攝氏零下 223 度，幾乎完全不會漲縮，成就了精確而穩定的成像品質。能夠大量取得這樣的國防戰略物資，同時也是美國的整體國力的展現。

鈹的鏡胚外層也非如一般望遠鏡鍍鋁，而是鍍金，有利反射紅外波。哈伯的設計在觀測紫外光及可見光波段 (0.1 到 0.8 微米；1 微米相當於 1000 奈米，也就是 1 萬埃)，以及近紅外 (0.8 到 2.5 微米)。韋伯望遠鏡的觀測波段則在 0.6 微米 到 28 微米。觀測中紅外波段的能力讓韋伯有了科學契機，但在工程上要求也嚴格。例如哈伯望遠鏡的溫度大約攝氏 15 度，望遠鏡本身就是個熱源，不利紅外觀測。即使盡量遮住陽光，溫度仍然不均而造成機械漲縮。

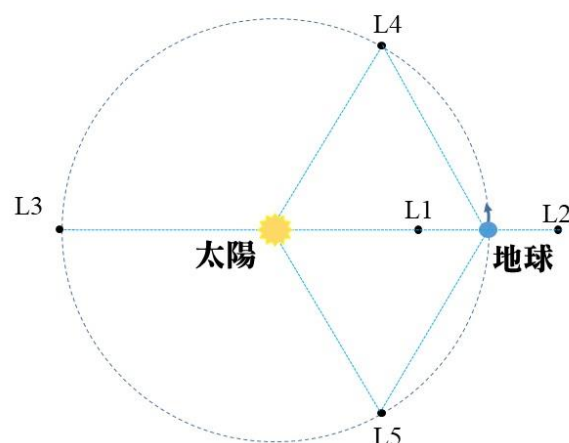


(左) 韋伯望遠鏡由鈹元素製作的鏡胚，(右) 之外以黃金鍍膜，有利反射紅外波



（左）韋伯的主鏡、次鏡，以及（右）第三鏡

韋伯望遠鏡的另個特色是其位置。哈伯望遠鏡在地面上空，以大約 600 公里的軌道繞行地球。不僅受日照，也受到地球與月球的光害，同時因為大氣摩擦，軌道會衰減，偶爾需要太空梭任務去「推一推」。韋伯則位於地日拉格朗日點之一的 L_2 軌道，背向太陽離地球約 150 萬公里之處。所謂拉格朗日點，是在兩天體附近，第三個天體能夠維持不變相對位置的區域。根據克卜勒行星運動定律，離太陽較遠，引力較小，原本應該繞行慢些（否則就甩出去了），但在 L_2 附近，受到太陽及地球同方向的合力，因此可以跑快些，維持跟地球一樣的週期繞行太陽。這樣太陽、地球及月球三者都在望遠鏡同一邊，望遠鏡得以維持低溫，有利穩定成像，另外沒有了「白天」的干擾，少了地球跟月球的光害，適合觀察天體。 L_2 區域有眾多望遠鏡，例如之前的 WMAP、Planck、Herschel，還有 Gaia。但是望遠鏡放在 L_2 軌道，雖然通訊方便，卻幾乎無法維修，韋伯並非固定在軌道上，而仍然移動位置以讓太陽能板充電。說起來，哈伯望遠鏡繞行地球，屬於「人造衛星」，而韋伯望遠鏡則是繞行太陽，應該算是「人造行星」了。



韋伯主要配備紅外波段的儀器，包括偵測近紅外以及中紅外的相機（取得影像，測量亮度）、光譜儀（測量強度如何隨波長變化），部分儀器還加裝擋光器（有如日全食的時候，月球擋住太陽的原理），就能夠減弱明亮的恆星光線，而觀測其周圍的環境，或繞行的系外行星。

讓我們來點數字。點光源透過望遠鏡所形成的影像，並非是無限小的光點。對於圓形入射孔鏡（主鏡），所呈現的影像為中央一個亮圓，然後往外依序為交錯的暗、亮紋圈。一般以中央亮圓的張角來亮化光學品質，大約是 $\theta \approx 1.22 \lambda / D$ ，這裡 λ 是觀測的波長，而 D 則是望遠鏡口徑， θ 的單位則是徑度。如果以角秒當單位，同樣的公式成為

$$\theta \approx \frac{\lambda_{\mu m}}{4 D_m} [\text{角秒}]$$

這裡波長以微米為單位，口徑以公尺為單位。以近紅外 2 微米為例，韋伯望遠鏡的繞射極限大約為 0.1 角秒，差不多是 40 公里之外，大約從中壢看台北一元硬幣的張角。

韋伯之前也有其他紅外太空望遠鏡，例如史匹哲 (Spitzer Space Telescope；口徑 0.85 公尺) 或是 Wide-field Infrared Survey Explorer (WISE；口徑 0.4 公尺)，這些甚至可以觀測遠紅外波段，但口徑都小，可以把整個望遠鏡安放在冷媒（例如液態氦）當中，而這些冷媒會逐漸揮發，限縮了望遠鏡只能有幾年甚至幾個月壽命。哈伯望遠鏡的紅外儀器則使用冷媒及冷凍機。韋伯因為位置優越，靠遮陽板、散熱器，及冷凍機達到制冷效果，大大延長望遠鏡起碼 10 到 20 年的壽命。

韋伯望遠鏡在 2021 年 12 月 25 日發射升空，原來折疊起的望遠鏡在太空開展，並檢查各式光、機、電功能，於隔年 1 月抵達抵達 L_2 ，在 7 月公開第一批影像，從此開啟韋伯的驚奇之旅。

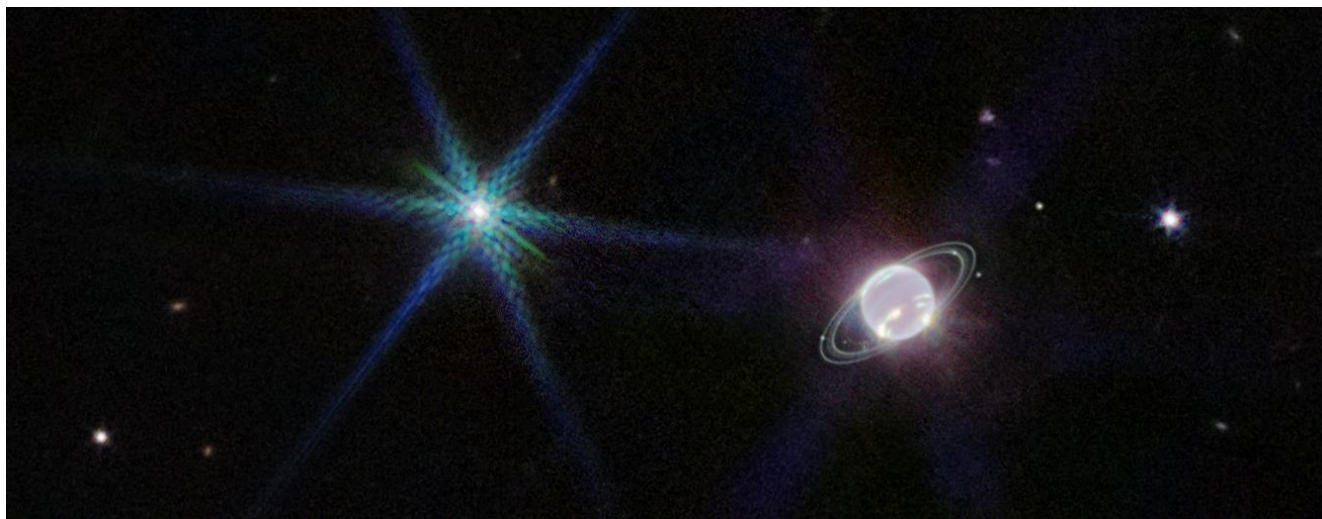
韋伯的科學目標

在紅外波段觀察天體有幾個特色。首先溫度低的天體輻射集中在長波，適合觀察類似棕矮星、系外行星、太陽系的小型天體等。還有則是紅外波比較能夠穿越宇宙塵埃。日常生活的霧霾就是擋光的例子，而無論是剛誕生的恆星、星系，都被大量塵埃圍繞，可見光不易透出，但在紅外波段則可以進行觀測。另外，遙遠的天體發出的光線需要一段時間才到達地球。我們接收到越遙遠的天體訊號，來自越早時期，也就是宇宙越年輕時候的資訊。研究這些天體的性質，有

如活生生「考古」，讓我們了解第一代恆星怎麼誕生，以及它們如何群聚成為星系，如何演化到今天宇宙的樣貌。由於宇宙膨脹，遙遠天體的訊號都紅移了，也就是原來恆星主要輻射在可見光，因為宇宙紅移而集中在紅外波段，這就是為何哈伯望遠鏡再怎麼長期曝光，因為望遠鏡及儀器無法偵測中紅外，也看不到宇宙早期的天體。這也是為何韋伯的主要科學目標為「宇宙第一批恆星及星系」、「星系的早期演化」、「恆星與行星形成」，以及「行星系統及生命起源」。

韋伯望遠鏡口徑大，能偵測紅外輻射，又放在太空絕佳位置，當然「指到哪裡驚艷到哪裡」。所發布的影像總讓人稱道，除了前所未有的清晰，也因為這些訊號肉眼無法看到，其實沒有所謂顏色，而都是影像處理的「假色」；如何讓這些影像看起來自然、舒服，是技術也是藝術（沒有標準）。影像之外，真正精彩的是光譜資料，以及類似日冕儀遮住亮星以觀察其周圍行星等，但是這些可能就只能發表在學術期刊讓專家讚嘆了。

韋伯望遠鏡發布的漂亮影像網路上很多。這裡針對太陽系、恆星、星系等天體各選其一來欣賞，這些是讓我初見眼睛為之一亮的影像，當然很主觀。太陽系裡的天體很多已經有太空船前往就近觀看，但這幅 9 月發布的紅外影像，人為的顏色幾乎有點科幻，又清楚得有點嚇人，除了海王星的光環，還有 14 顆衛星其中的 7 顆，包括最明亮、星芒顯著的「海衛一」(Triton)。平常所見海王星的可見光影像呈現偏藍色調，這是因為其大氣中的甲烷氣體吸收了紅光與紅外光，也因此在這張近紅外波段影像，海王星相對比較灰暗，高層大氣的甲烷冰先反射了陽光，形成表面明亮斑紋，類似這樣的細節（例如表面微弱的赤道環），以及長時間監測它們的（季節）變化，讓行星大氣科學家興奮不已。



海王星 2022/09 <https://www.nasa.gov/feature/goddard/2022/new-webb-image-captures-clearer-view-of-neptune-s-rings-in-decades> 連結有天體名稱

銀河系恆星形成區

更讓人毛骨聳然的應該是 6500 光年之外的老鷹星雲其中的「創世之柱」(Pillars of Creation)了。上圖左邊是哈伯望遠鏡的影像（1995 及 2014 年），當年發表時就造成轟動，清晰顯示恆星在濃厚的塵埃雲中誕生，當鄰近的大質量恆星風以及強烈輻射吹散了雲氣，裸露出如指尖般的初生恆星。被塵埃遮擋的星球其偏藍的光線受到散射，而紅光比較容易透出，因此星球顏色偏紅。韋伯的影像顯示了更多塵埃雲細節，「指尖」的星球更突出，而中紅外波更容易透出，讓星星更多、更亮（明顯星芒），即使哈伯影像中雲氣最濃密之處現在也顯示出星球。韋伯影像中，上方中央以及右方的雲柱，有如「流血」般的紅色條紋，是恆星胚胎時期（不到幾十萬

年)，吸收周遭物質同時將部分噴出，這些噴流撞擊鄰近雲氣而形成的弓形震波。這張照片在10月底發布，應景了萬聖節，也讓網路上充滿了「庫司拉」的聯想。



<https://www.nasa.gov/feature/goddard/2022/nasa-s-webb-takes-star-filled-portrait-of-pillars-of-creation>

互撞的星系

這張六月發布的影像由超過 1000 幅韋伯影像拼接而成，目標是 **Stephan's Quintet**，雖然稱為「史蒂芬五重星系」，但其實只有四個星系有關連，構成個小星系群，距離我們約 2 億 9000 萬光年，第五個、也就是最左邊的星系則距離我們只有 4000 萬光年，跟這個星系群無關，但影像中能夠清楚看出個別瀕死恆星所製造的塵埃發出的明亮紅外輻射。星系群當中的星系則彼此引力拉扯，雲氣衝撞而產生震波，以紅色標示。最上方的星系核心異常明亮，屬於活躍星系核，是超大質量黑洞吸積周圍物質而發光。對於這樣鄰近的緊密星系群，研究它們互動，有助於瞭解早期宇宙，因為體積小，而彼此碰撞頻繁，對於恆星誕生，以及星系演化的影響。



https://en.wikipedia.org/wiki/Stephan%27s_Quintet#/media/File:Stephan's_Quintet_taken_by_James_Webb_Space_Telescope.jpg

宇宙大尺度結構

韋伯望遠鏡這張星系團 **SMACS0723** 的近紅外影像，包含了數千個星系，龐大的重力透鏡效應將遠方背景的星系亮度放大，且影像變形成弧形。此星系團的光線來自 **46** 億年前，而背景被重力透鏡增亮的星系，有些是大霹靂之後十億年正在誕生的星系，它們發出的光線由於宇宙紅移，移往紅外波段，適合韋伯觀測，勝過哈伯的靈敏度。由於是紅外影像，顏色乃後製標示。影像中除了明亮而具星芒的個別星球，多半是星系，藍色的星系多由恆星組成而缺乏塵埃；紅色的星系則富含塵埃而正大量誕生恆星；綠色則標示星系當中碳氫化合物的輻射。除了近紅外影像，韋伯也取得中紅外波段的影像與光譜，初步顯示此影像中其中一個星系距離我們 **131** 億光年，是目前看到最遠的星系。



[https://en.wikipedia.org/wiki/James_Webb_Space_Telescope#/media/File:Webb's First Deep Field \(adjusted\).jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/James_Webb_Space_Telescope#/media/File:Webb's_First_Deep_Field_(adjusted).jpg) NASA, ESA, CSA, and STScI

本文介紹的韋伯太空望遠鏡，以 **James E. Webb** 為名，他在 1961 到 1968 年擔任 NASA 署長，任內執行多項重大太空任務，包括阿波羅登月，算是稀有以行政人員為任務命名的例子。前幾年有人提起 **Webb** 曾參與美國政府開除同性戀雇員，NASA 調查後，認為並沒有不當處置，因此維持望遠鏡的名稱。但也因為對人稱疑義，有些媒體不再稱「韋伯」望遠鏡 (**Webb**) 而就稱 **JWST**。

我剛拿到博士學位時，正逢哈伯太空望遠鏡升空。猶記當時開光，發現影像不如預期，原來是工程犯了錯，使望遠鏡影像不佳，後來太空人幫忙戴上眼鏡（修正光學），才恢復視力，領了 30 年風騷。現在由韋伯望遠鏡站上舞台中央，另外也陸續有讓人期待，無論是地面或太空的觀天利器。我今年在大學服務滿 30 年，正好見證天上、地上的世代輪替。