

神秘的月球地平線輝光

當太陽接近月球地平線時，登陸月球表面的太空人與探測器，都曾在地平線上觀察到神秘的光暈，在這個看似空無一物的月球表面上，這種現象是如何形成的呢？

文／賴彥霖

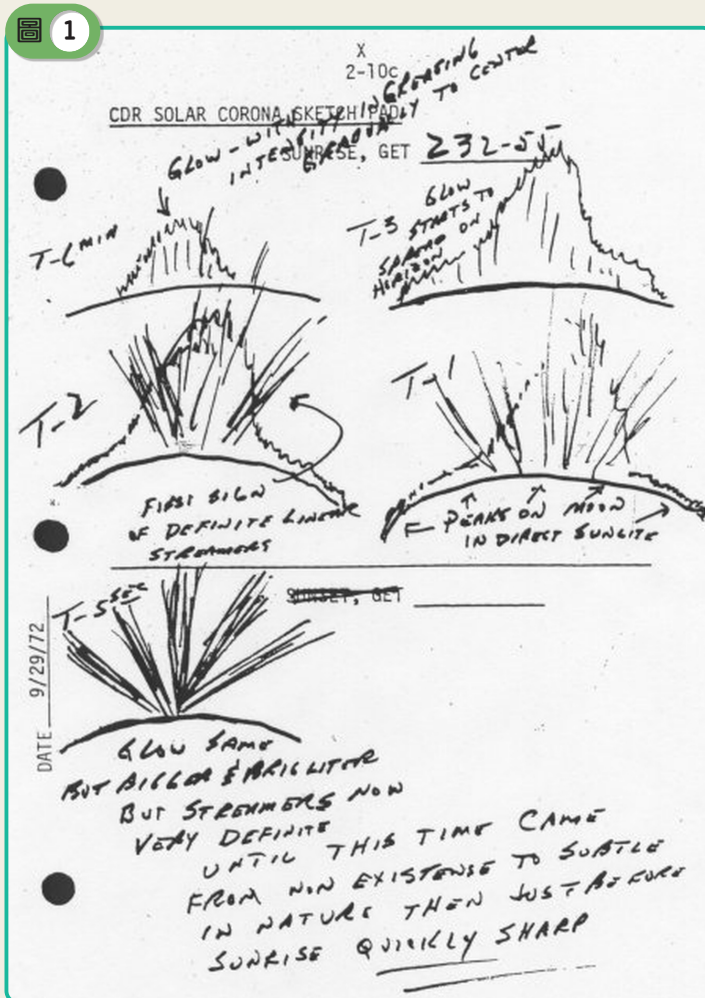


2025年3月2日，Firefly公司的藍色幽靈（Blue Ghost）登陸器在月表成功著陸，回傳的影像顯示出日落後的不尋常光輝。影像來源：NASA。

月球地平線輝光的發現

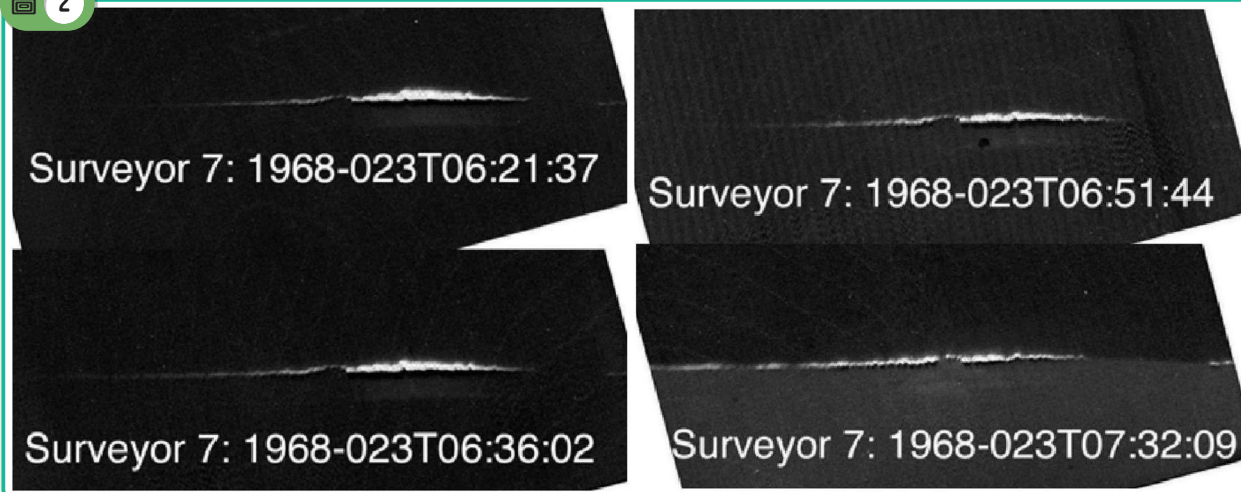
月球地平線輝光（Lunar Horizon Glow，簡稱LHG）指的是太陽接近地平線時，月面邊緣上方出現的微弱光芒。阿波羅8、10與15號太空人曾在月球上日出和日落時多次瞥見這道神祕光帶；不過，最具體的記錄來自阿波羅17號指揮官尤金·塞爾南（Eugene Cernan）的手繪圖，如圖1。他於1972年9月29日繪製的觀測草圖，因當時相機的曝光與動態範圍有限，無法直接成像，塞爾南便以手繪方式記錄了他在月球軌道的太空艙內，觀察到日出前月球地平線上方出現神祕光暈的過程，從最初微弱的亮弧，到逐漸發展為放射狀、清晰可辨的「光束」。

事實上，早在阿波羅計畫之前，1960年代的無人探測器「測量者7號」（Surveyor 7）便在月球日落後約一小時拍攝到沿西方地平線的微弱亮帶，如圖2。自此，月球地平線輝光成為月球科學的重要懸案。當時主流解釋認為，該亮帶源自近地表微米塵埃粒子對太陽光的散射，暗示月面上方存在一著層極為稀薄的塵埃薄霧；這一線索也開啓了對月表懸浮塵埃研究。



阿波17號太空人尤金·塞爾南的月球地平線輝光手繪圖。圖片來源：NASA/Apollo 17 astronauts

圖 2



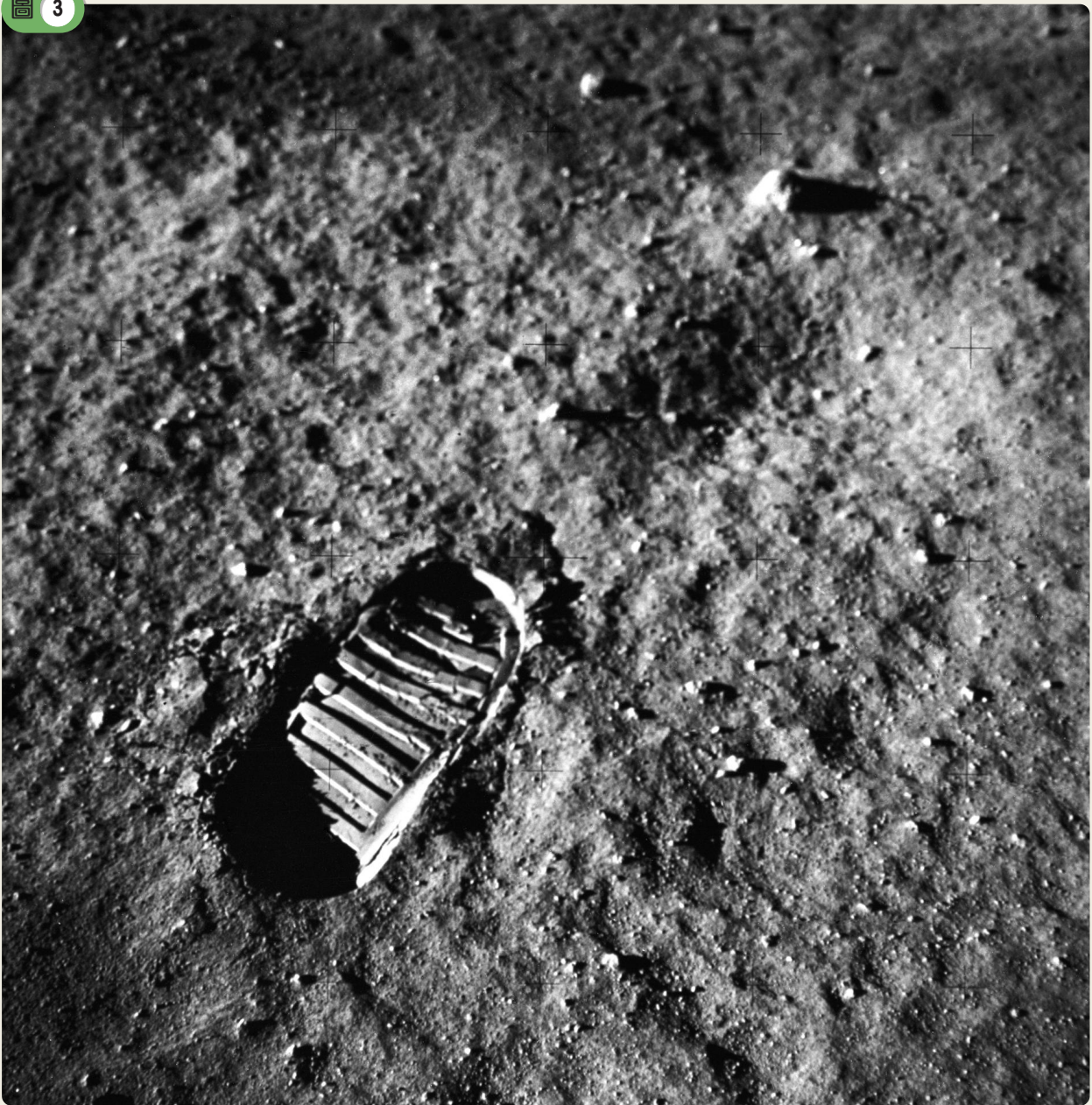
測量者7號觀測到的月球地平線輝光。影像來源：The Planetary Society

月球表面的懸浮塵埃

為了解開地平線輝光之謎，科學家把目光投向月球表面的月壤（lunar soil）。月壤是月球表層未固結的細碎物質，如圖3，其厚度依地點不同而異，一般從幾公分到數公尺不等。月壤主要由岩石風化碎屑、玻璃質顆粒與細微塵埃所構成，與地球上的泥土在成因與性質上有極大差異。地球土壤的形成涉及水、空氣的侵蝕風化作用，而月壤的成因主要

來自玄武岩及斜長岩的物理風化。月球上的岩石在反覆遭受微流星、太陽風高能粒子和宇宙射線轟擊，被粉碎、瞬間高溫熔融，接著快速冷卻，形成富含玻璃質的微粒。隨著時間推移，這些碎屑不斷被再次撞擊、磨損，變得更加細碎。其顆粒直徑通常在數十微米以下，遠比地球上的沙粒還要細小且許多顆粒形狀尖銳不規則。此外由於月表暴露在宇宙電漿環境中，這些表面塵埃都帶有靜電且具有黏著性。

圖 3



月球表面的月壤，顆粒遠比地球上土壤細小，且顆粒形狀尖銳不規則。影像來源：NASA

圖 4



實驗室模擬月球塵埃因靜電力而彈射離開地面。圖片來源：Science Alert

然而，若要在月球表面產生如薄霧般的塵埃懸浮現象，光是細小塵粒的存在還不夠，還需要能將這些塵粒舉離地面的機制。不同於地球有濃厚大氣與風的作用，月球表面幾乎真空，不存在可吹起塵埃的氣流。因此，月塵之所以能夠從地表揚起、懸浮甚至短暫漂浮於空中，主要仰賴兩種自然機制：**靜電力作用與微流星體撞擊**。

在月球的**白天**，月表的塵埃受到太陽光照射而放出光電子，因此會讓日間的塵埃粒子帶正電，但到了**夜晚**，少了光子把電子帶走，且來自太陽風的電子則更容易沉積在表面，讓地

面偏**負電**。這種日夜交替造成的帶電差會在晨昏交界形成強烈的表面電位梯度與局部強電場，此電場可達數百伏特，塵埃顆粒會在靜電排斥下被推升到數公里高空，形成「塵埃噴泉」現象。為此，科學家們在實驗室裡模擬了月球表面塵埃因靜電力而彈射離開地面，如圖4，並推估塵埃大小與抬升高度的關係。

除了靜電力的影響外，**微流星體撞擊**也是月塵揚起的重要機制。月球大約每天會有約幾噸的微流星，用數十公里每秒的速度撞擊月球表面，這些高速微流星體會將撞擊點周圍的岩石或塵埃撞碎並拋射到空中，也會形成短暫的塵埃雲，當有流星雨來臨時，這個現象會更為明顯。

其他可能之成因

除了月表懸浮塵埃對陽光的散射之外，造成月球地平線輝光的可能來源至少還有三類，第一是來自**太陽日冕**的餘光：當太陽貼近月緣時，可能因為繞射或是日冕本身的亮度就很高，即使太陽本體被月球擋住，仍可能有一圈亮弧在月緣。第二是黃道光，黃道光是太陽系黃道上遍布的微細塵粒，受到太陽照射後散射出來的光芒，在特定方向上（如太陽、月球、觀測者成一直線），黃道光有可能出現在月緣上，也可能會出現類似月球地平線輝光的現象。第三是觀測**儀器的效應**，鏡頭內反射的鬼影與雜散光造成的光暈、感測器殘影非線性以及遮光罩不良或相機指向控制不佳，都可能製造假訊號，造成月緣亮光。總而言之，要區分這些來源，需結合**表面與軌道多點同步**觀測、搭配電場與塵埃資料來分析才能了解真實月球地平線輝光的成因。

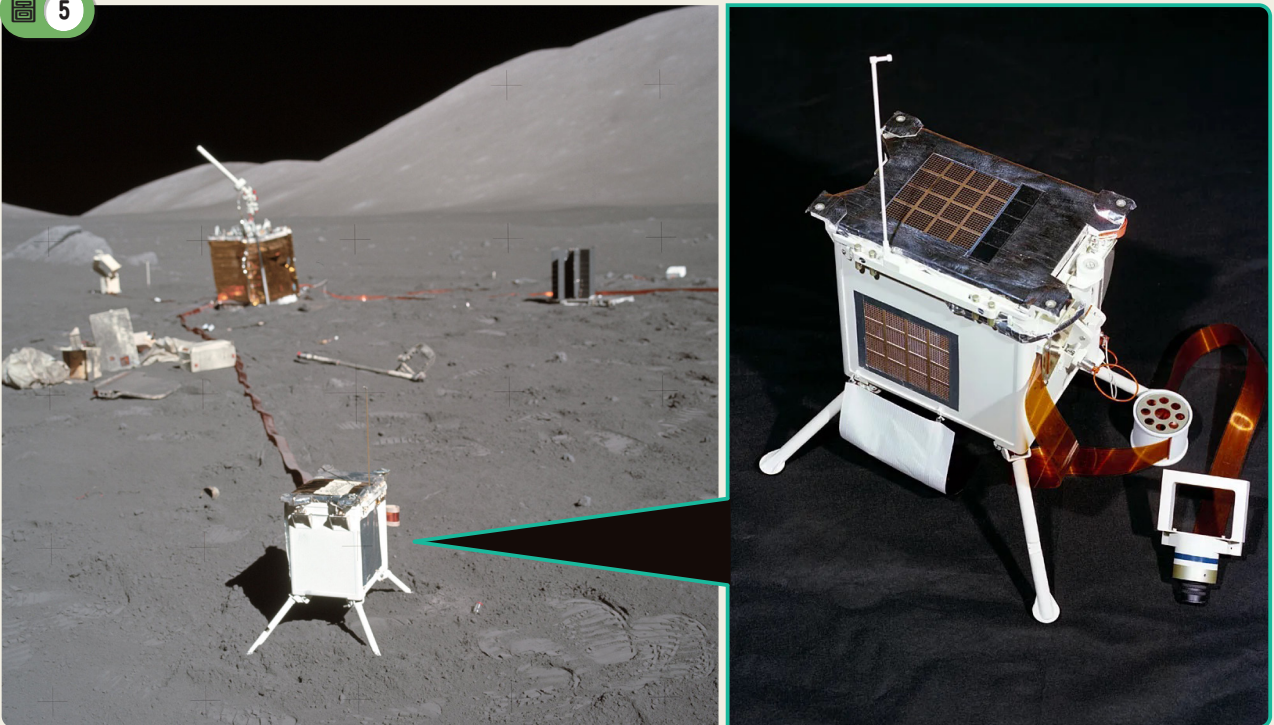
太空任務與觀測

阿波羅計畫之後的數十年間，科學家持續尋找月球地平線輝光與懸浮塵埃的證據。NASA的

克萊門汀號（Clementine）在1994年繞月期間，嘗試用照相機找尋出現在月球邊緣的亮帶，雖在影像中隱約看見跡象，但訊號多被更亮的太陽日冕與黃道光淹沒，難定下結論。NASA的月球探測軌道飛行器（LRO）則在2011年特別讓太空船進入月球陰影區，利用照相機和紫外光譜儀對月緣進行長時間曝光，以尋找塵埃散射造成的亮光。結果只見到極低的訊號，低於儀器可檢測下限，因此即使塵埃造成的輝光存在，其亮度也非常微弱，更像是一層薄薄的朦朧光暈，而非肉眼輕易可見的強光帶。

與此同時，重新檢視阿波羅時期的現地觀測也提供了線索。阿波羅17號在月海部署的月球拋射體與流星體實驗儀（LEAM），如圖5，原設計用來量測微流星撞擊，但在黎明前數小時多次記錄到「額外」粒子事件：粒子以低速、近水平方式由東或西方向飄來，與典型撞擊拋射的高速彈道不符，看起來是有其他的來源。更奇怪的是，日出後不久儀器迅速升溫，使得科學家不得不關閉儀器電源，根據後續分析推測，可能是帶電月塵黏附在儀器表面，使得表面變暗、吸熱升溫所致。雖然LEAM的運作時間有限，未能定下結論，但這些特徵與黎明時塵埃大量遷移的推測相符，被視為月表靜電塵埃活動的重要間接證據。

圖 5



阿波羅17號部署在月面的月球拋射體與流星體實驗儀（LEAM）。影像來源：NASA

進入21世紀後，科學界對月球塵埃環境展開更直接的探測。NASA在2013年發射了月球大氣與塵埃環境探測器（LADEE），如圖6，這是一艘繞月飛行的太空船，專門測量月球外氣層與塵埃分布。LADEE從2013年11月開始進行觀測，在離月表二十至一百公里的低空軌道上進行了數個月的量測。在此期間，LADEE的月塵探測儀LDEX多次測量到月面上空存在的稀薄塵埃雲。這些塵埃主要來自於微小流星高速撞擊而不是靜電力拋射，因撞擊能量高，能把細小塵埃拋到較高的高度使得LADEE能夠觀測到。

LDEX的觀測資料顯示，這層塵埃雲的密度分布隨時間和空間而變化，如圖7：清晨時段月表上空的塵埃濃度較高，這正是月球繞日運動時朝向行進方向的一側，更容易遭到迎面而來的微流星體撞擊。此外，在流星雨期間，例如每年的雙子座流星雨發生時，LDEX偵測到月球塵埃雲的密度有明顯的增加。這些現象符合微流星體流撞擊增加時，拋射較多塵埃的預期。此外，LADEE上的紫外及可見光譜儀也曾嘗試尋找塵埃散射陽光的訊號，結果並未發現任何肉眼可見的輝光現象。

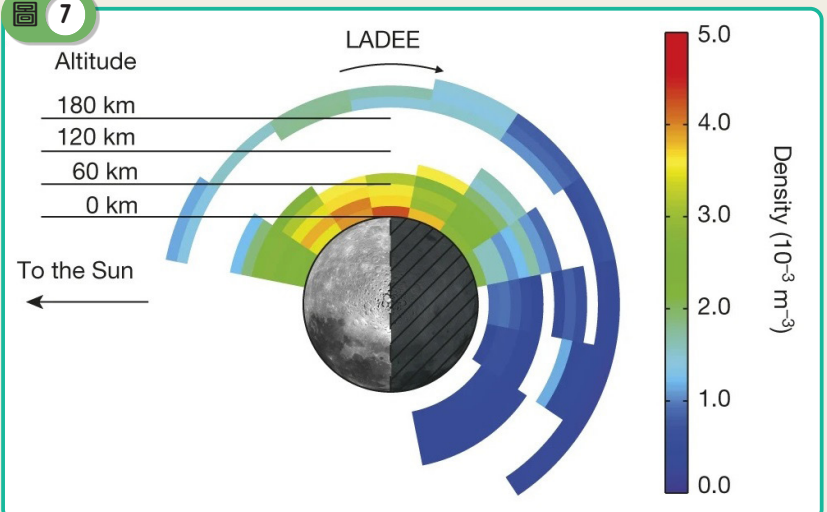
上述這些太空任務的發現，除了短暫流星雨撞擊引能夠發的大量塵埃雲之外，月球上並沒有長期持續且濃密的塵埃雲，得以產生類似月球地平線輝光的效果，因此使得阿波羅任務中觀察到地平線輝光的成因更加撲朔迷離。

圖 6



在低軌道上繞月飛行的月球大氣與塵埃環境探測器（LADEE）想像圖。圖片來源：NASA

圖 7



LADDER探測器量測到的塵埃密度時間與空間分布圖。圖片來源：Nature/A permanent, asymmetric dust cloud around the Moon, M. Horányi, J. R. Szalay, S. Kempf, J. Schmidt, E. Grün, R. Srama & Z. Sternovsky

未來展望

2025年3月2日，Firefly公司的藍色幽靈（Blue Ghost）登陸器，如圖8，在月表成功著陸，展開約14個地球日的科學觀測任務，並回傳了高解析月表日落影像，見圖9。從傳回的照片可看到，太陽沉入地平線後，天空並非立即一片漆黑，而是出現了細

微而複雜的光影變化。這批資料可用來檢驗半世紀來月球地平線輝光的線索：當太陽貼近地平線時，月緣是否真的出現與塵埃相關的微弱光輝。不過，判讀這些影像必須十分謹慎，因為除了近地表塵埃的散射之外，太陽日冕與黃道光在月緣的光暈，也可能產生看似相同的亮弧或光帶。因此，科學家需要以多波段觀測與扣除背景用以區分各種來源。

圖 8



藝術家筆下所展現，藍色幽靈登陸器降落至月球表面前瞬間的想像圖。圖片來源：Firefly Aerospace

藍色幽靈登陸器拍攝到日落後的不尋常光輝。影像來源：NASA

圖 9



未來數年內，阿提米斯（Artemis）登月計劃，如圖10，以及有更多商業月球酬載服務計畫（Commercial Lunar Payload Services，簡稱CLPS），它們將陸續在月球各地部署科學儀器。其中一些任務會是再次驗證地平線輝光的絕佳機會。另外，月塵本身已是對登月工程與載人探月的一大挑戰。阿波羅任務回報月塵強黏附、強磨蝕特性，容易附著於太空衣、頭盔或是光學與儀器表面，清除困難且會加速磨損；長期暴露也可能對太空人的呼吸道、眼部與皮膚造成傷害。NASA近年已制定對抗月塵規劃，並在未來任務中將加入防塵材料、除塵電極的設計，以確保人員長期駐留與月球基地設施的可靠性。

從最初阿波羅時代的偶然一瞥，到現代探測任務的專門求證，月球地平線輝光現象激發人類無盡的好奇心。如今我們了解了基本月球塵埃的特性與其靜電懸浮機制，但針對高空塵埃濃度、晨昏光散射成因等問題仍待解決。隨著人類重返月球並長期駐留的目標逐漸實現，了解神秘月球地平線輝光的科學意義不僅在於滿足好奇，更在於保障未來探索的安全，月塵所引發的種種挑戰將不可避免。在未來的任務中，或許太空人就能再次親眼目睹那傳奇的月球地平線輝光，屆時，還能利用最新的攝影器材和光學設備記錄下更清晰的證據，最終能解答這一道謎題。

賴彥霖：中央大學天文研究所博士後研究員

圖 10



在阿提米斯（Artemis）登月計劃中，準備由環繞地球軌道航向月球的獵戶座太空船想像圖。圖片來源：ESA