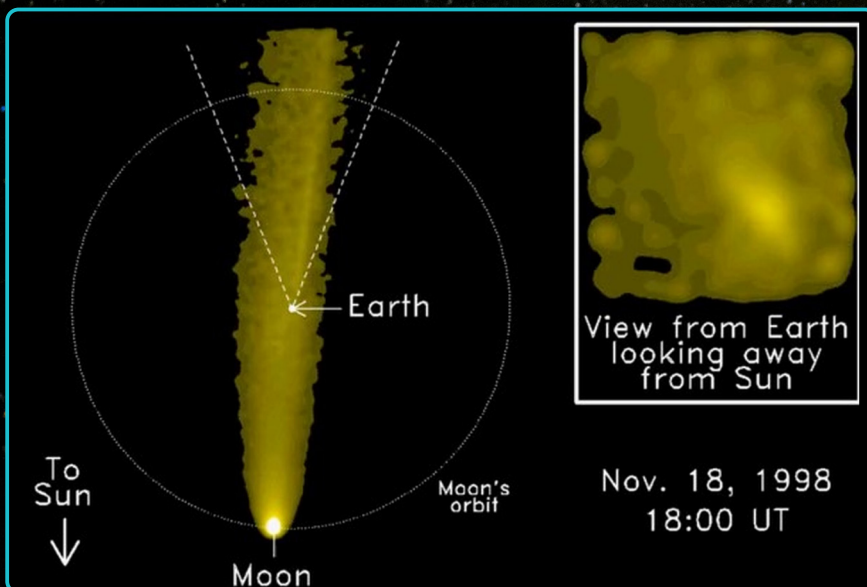
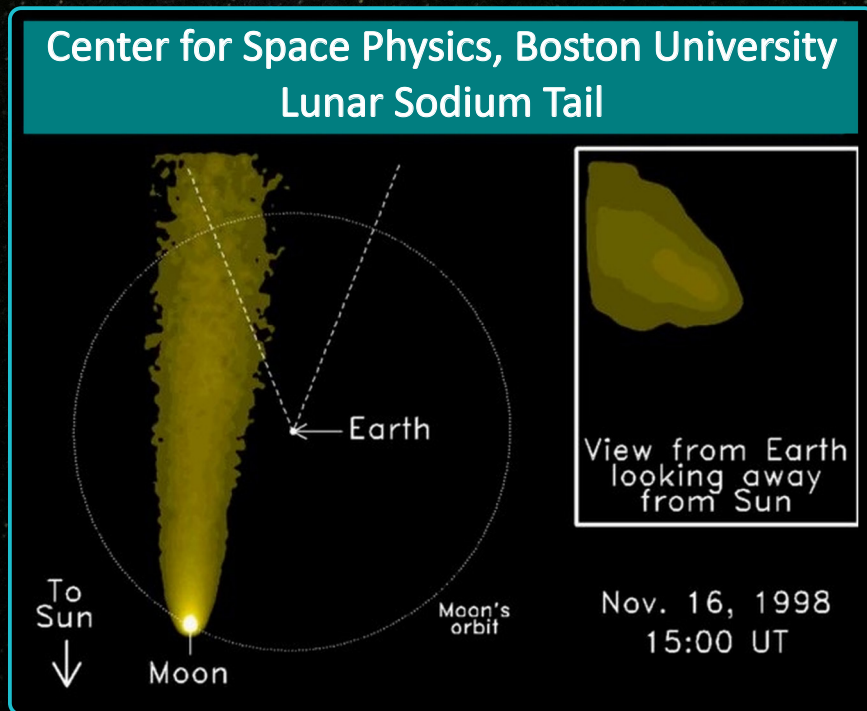


# 新月夜裡，看見月球的「鈉斑」

文／許湊謙

我們知道，不同於地球，月球是個冰冷、佈滿隕石坑的天體；但事實上，月球並不是完全死寂的世界，月球表面存在著一層極為稀薄的氣體環境，其中的成分包含「鈉」。這些鈉原子並不像地球大氣那樣被牢牢束縛在月球周圍，而是不斷被釋放、推離、甚至被帶走，形成一條看不見、卻真實存在的「尾巴」，如同彗星一般。當這條鈉尾在日、地、月連成一線時的投影，從地球看去，便會形成一個亮度集中的區域，稱為「月球鈉斑 (lunar sodium spot)」。



鈉斑形成原因的連續圖解。影像來源：<https://sirius.bu.edu/moontail/>

## 月球不是沒有大氣，而是「抓不住」它

我們習慣說月球沒有大氣，是因為它缺乏像地球那樣厚實的大氣層，但月球其實擁有一層稱為「外氣層 (exosphere)」的氣體環境，如圖1。差別在於地球的大氣由重力牢牢束縛，且氣體分子頻繁碰撞；而月球的重力較弱、氣體稀薄，外氣層中的原子、分子彼此之間幾乎不會碰撞，每個粒子都像獨立運動的。這使得月球外氣層對外在的變動反應較靈敏：太陽輻射的強弱、太陽風的變化，甚至微流星體通量的增加，都可能在短時間內改變外氣層的組成與分佈。

在月球外氣層中，存在多種原子與分子，包括鈉、鉀、氦與氫等。其中，鈉原子具有一組非常強烈、且位於可見光波段的雙線譜線，稱為「鈉D線」，波長在589.0與589.6奈米，大約是黃光的區間。

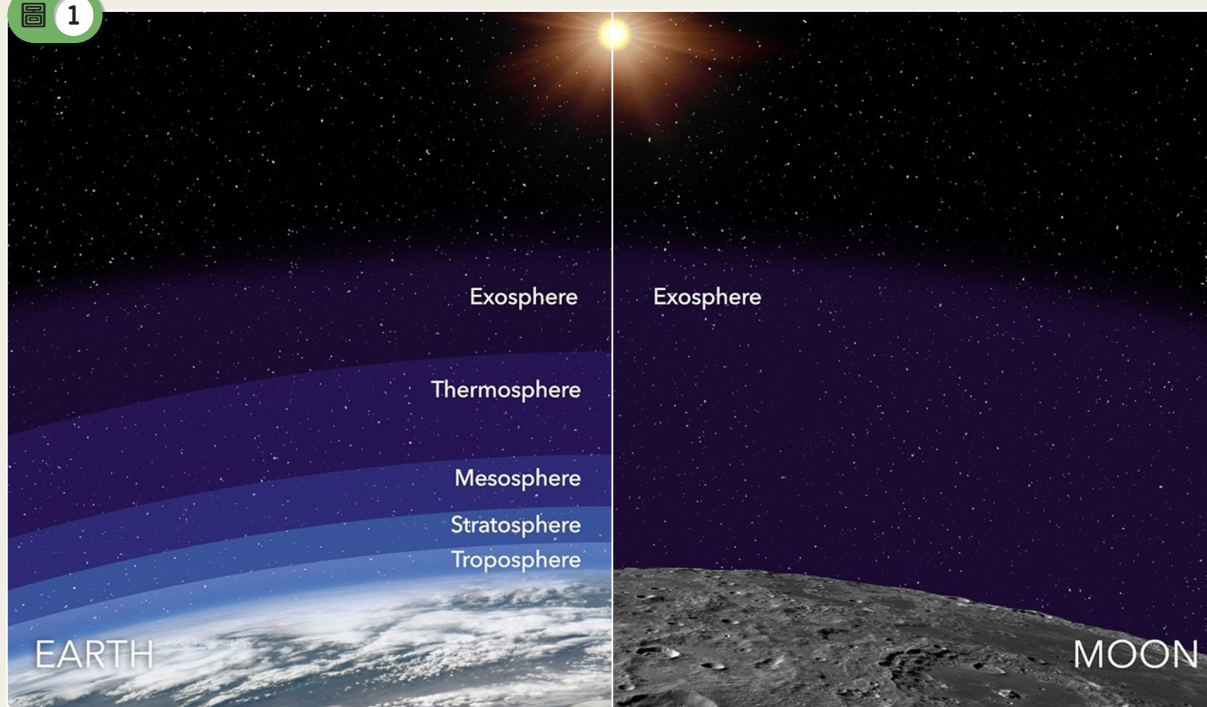
月球的鈉並不是憑空出現的，而是來自它的表面，主要機制有三種。當太陽光照射到月球，強烈

的紫外線讓一些鈉原子獲得足夠能量而逃離表面，這個過程稱為「光子激發脫附 (photon-stimulated desorption)」。同時，來自太陽風的高速帶電粒子，也會撞擊月球表面，把鈉原子「打」出來，稱為離子濺射 (ion sputtering)；第三種則是微流星體汽化 (micrometeorite impact vaporization)，高速星際塵埃撞擊時產生的瞬間高溫，能汽化表面物質並釋放鈉原子。這些機制同時作用，使得月球表面不斷補充新的鈉原子進入外氣層。

## 太陽輻射，不只是照亮月球

在日常生活中，我們認為光沒有重量，但在物理上，由於光的波粒二象性，光子攜帶動量；當大量光子不斷撞擊原子時，就會產生動量轉移對原子施加推力，這便是所謂的「輻射壓」。對多數原子而言，這種推力微不足道，但對鈉原子來說，由於它們能有效吸收太陽光中特定波長的光子，輻射壓的影響便會變得顯著。當鈉原子離開月球表面後，它們的運動逐漸由月球重力主導，轉為受太陽輻射壓推動，慢慢被「吹」向反太陽方向，形成一條達數十萬公里的鈉尾。

圖 1



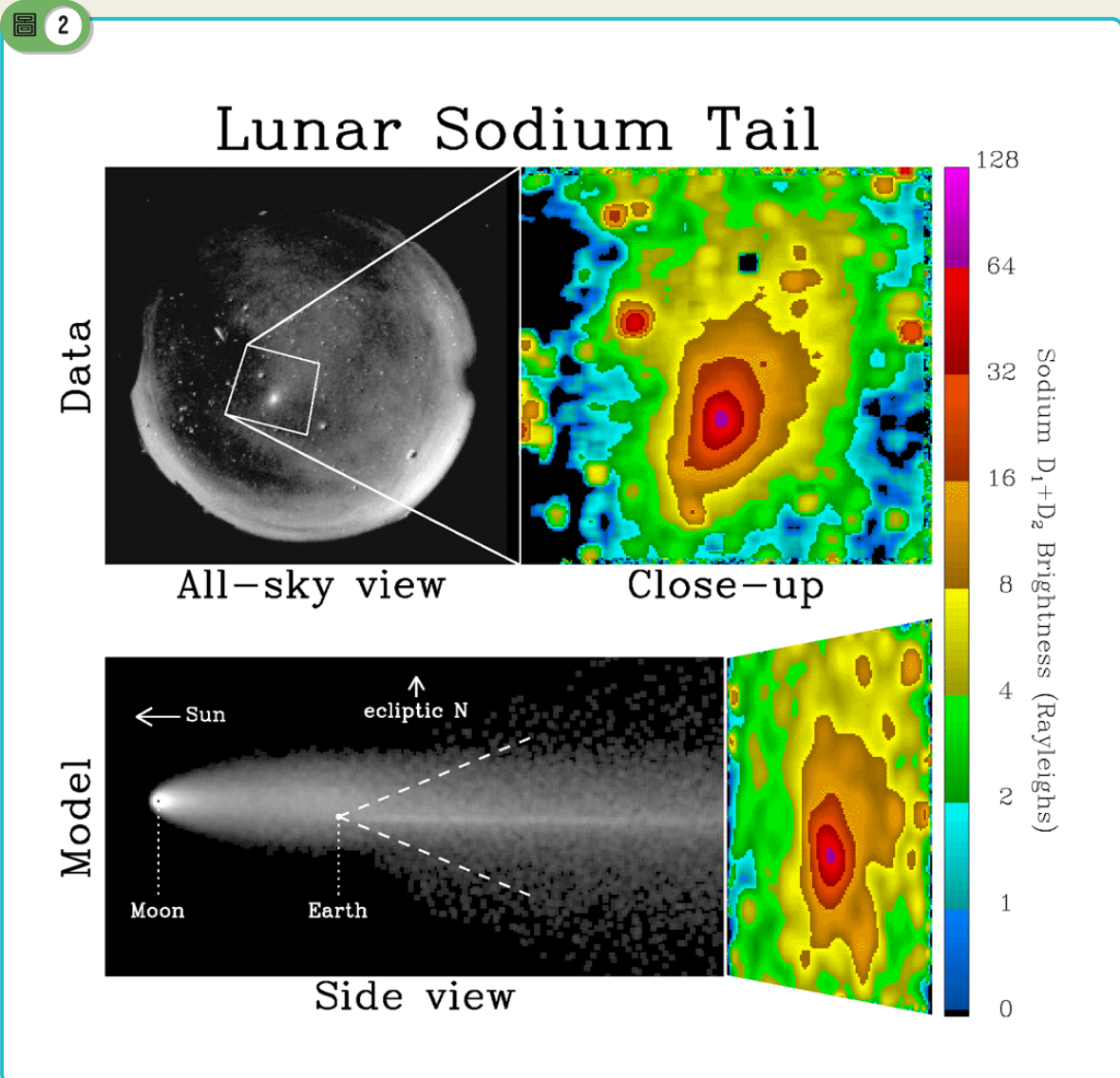
地球的大氣共分為5層，由低至高分別為：對流層、平流層、中氣層、熱氣層、外氣層，而月球僅擁有一層非常稀薄的外氣層大氣，圖中僅顯示地球與月球的大氣分層種類，大氣各分層厚度與天體大小未依實際比例繪製。圖片來源：NASA

## 為什麼觀測的是鈉斑，不是鈉尾？

由於月球的鈉發射強度不像水星強烈，而且月球是地球的衛星，距離地球只有0.002天文單位，用地面上的望遠鏡觀測，一方面是視角尺度太廣，難以用一般視野的儀器捕捉；另一方面是鈉分散到視線空間上的範圍變大、密度變小，導致儀器看上去的亮度變得微弱，因此在月地系統難以用「第三者」的視角去觀測月球鈉尾。

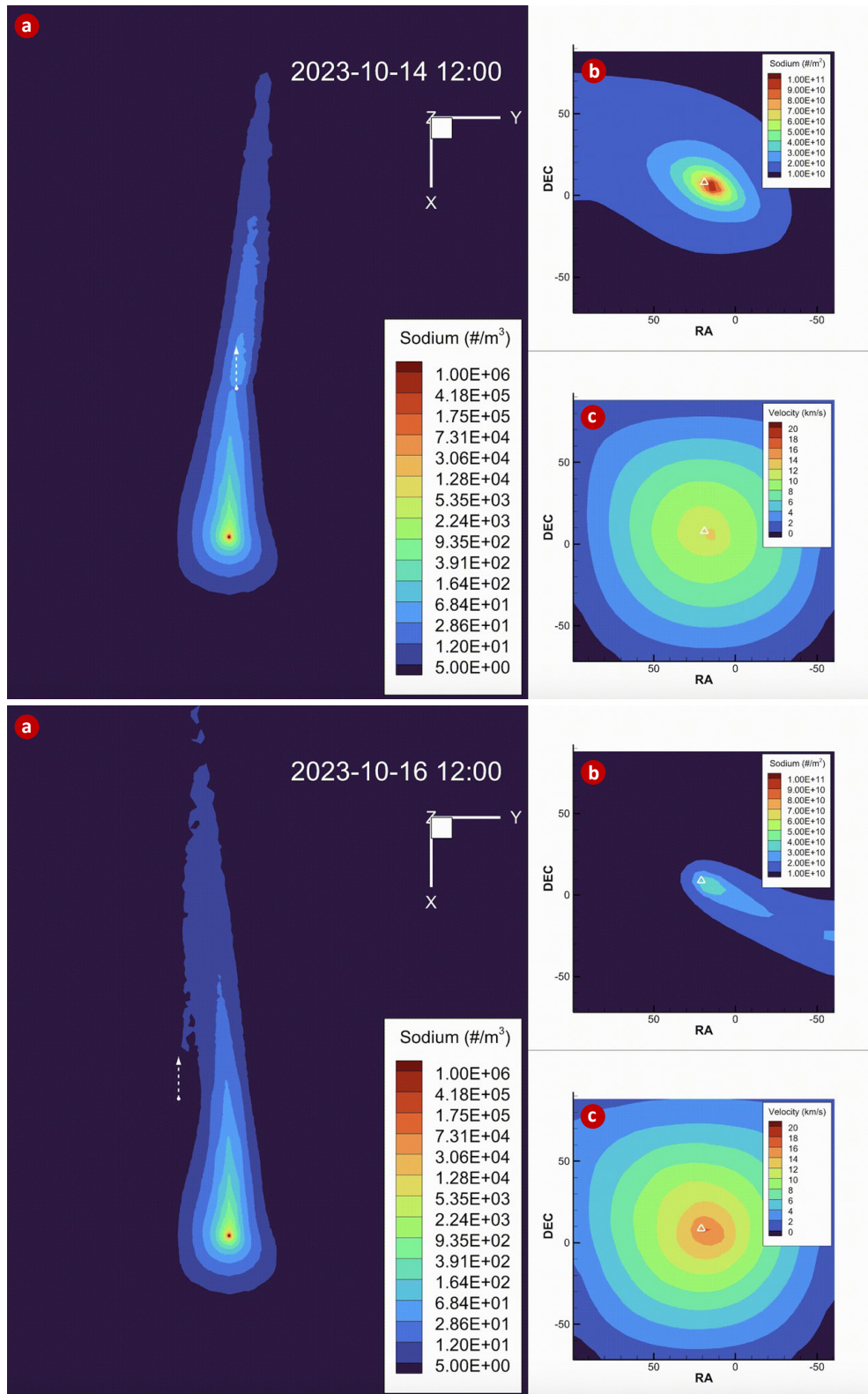
## 為什麼鈉斑只在新月出現？

在新月時，太陽、月球與地球幾乎排列成一直線。此時，地球正好位於鈉尾的延伸方向上，所以當我們沿著日、月、地連線方向觀測，視線方向的鈉原子數量疊加，我們能看到投影在反太陽方向的「鈉斑」，如圖2。換句話說，我們並不是直接看到鈉尾本身，而是看到它在天球上的投影濃縮。當月相稍微改變，觀測方向偏離鈉尾軸線，鈉尾也會因為地球引力扭曲，這種疊加效果立刻減弱，鈉斑也迅速消失，如圖3。這也是為什麼即使在理論上，鈉尾一直存在，但我們在地球上真正「看得到」的機會卻非常有限。



月球鈉尾的觀測影像及模型。新月時，地球位於月球鈉尾中軸線附近，由於沿視線方向的鈉原子疊加效應，從地球往太陽反方向可以觀測到月球鈉斑。影像來源：<https://sirius.bu.edu/moontail/>

3



月球鈉尾與鈉斑的數值模擬結果。上、下兩組圖分別對應模擬2023年10月14日與2023年10月16日。**a** 顯示月球反太陽方向的鈉原子空間分佈（以密度表示）；**b** 為模擬結果在天球座標中的投影，顯示鈉斑在天空中的分佈形態；**c** 為對應區域的速度分佈，反映鈉原子運動。隨著月球—地球—太陽相對位置的改變，鈉尾形態與天球投影位置亦隨之變化。影像來源：國立中央大學天文研究所

## 另一條鈉尾： 水星給我們的啟發

其實，在研究月球鈉斑之前，科學家早已在太陽系另一個天體看過更為壯觀的「鈉尾」——水星。

水星距離太陽更近，表面溫度極端、太陽輻射強烈，也幾乎沒有傳統意義上的大氣。早在1980年代，科學家便利用地面望遠鏡，在水星的光譜中發現強烈的鈉發射訊號，並確認水星反太陽方向存在一條長達數百萬公里的鈉尾，如圖4。這條鈉尾的存

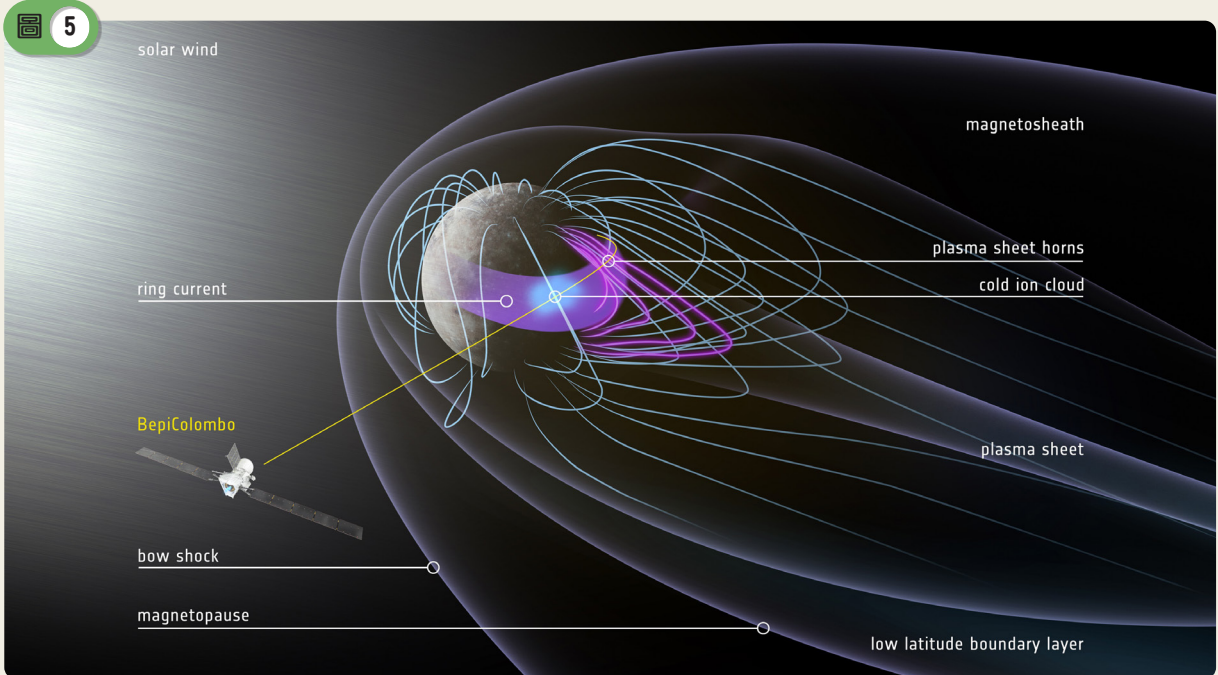
在，成為理解「無大氣天體（airless bodies）如何與太陽互動」的重要里程碑。

水星與月球的鈉尾，形成機制在本質上相當類似：鈉原子從表面釋放後，受到太陽輻射壓推動，逐漸被帶往反太陽方向。然而，兩者之間仍存在差異：水星的引力較強、表面溫度變化劇烈，且部分鈉的釋放與行星磁層及太陽風交互作用密切相關，如圖5、圖6，水星的偶極場（dipole）會影響鈉外氣層；相較之下，月球的磁場是局部性的結構，其鈉外氣層更直接反映太陽輻射與微流星體的撞擊效應，亦會受到地球引力的影響。

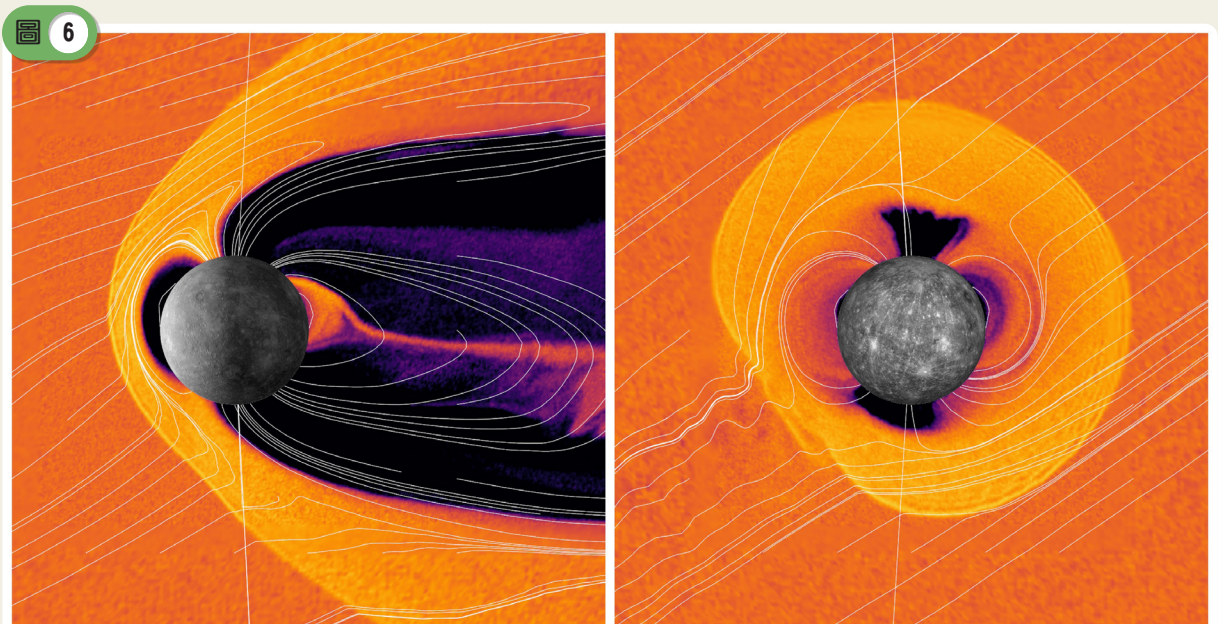
圖 4



水星鈉尾與昴宿星團。鈉的發射線在黃光波段，因此可以看到水星發出強烈的黃光，其可以用專門的鈉濾鏡拍攝。影像來源：Sebastian Voltmer <https://voltmer.de/>



貝皮可倫坡號 (BepiColombo) 探測器於2023年6月19日第三次掠過水星，穿越了弓形震波、磁層頂與低緯邊界層 (LLBL)，並在通過夜側 (night side) 的時間測量冷離子、重離子、稀薄的電漿結構與赤道附近的環電流，揭示水星磁層中擁有活躍的電漿交互作用。圖片來源：ESA



水星周遭區域看來似乎空無一物，但其實充滿著各種中性與帶電粒子。由於水星自身帶有磁場，在強烈太陽風擠壓下，壓力平衡的介面形成一個圓弧面，為「磁層頂」，整體形成背向太陽延伸的磁層。也因為水星靠近太陽，承受著高強度且多變的太陽風，但其磁場強度僅約為地球的1%，導致水星的磁層體積小且變化劇烈。電腦模擬結果顯示，在水星公轉軌道處典型的太陽風強度下，磁層中的帶電粒子密度可區分為高密度（黃色標示）與低密度（紫色、黑色標示）區域，磁力線則以白色線條呈現。如模擬圖所顯示，與地球磁層類似，來自太陽風的帶電粒子容易在極尖區 (polar cusp) 進入水星磁層轟擊水星表面，可能使該處產生較多鈉原子，為水星表面-外氣層物質交換的重要途徑，這也是鈉外氣層在水星和月球之間較有差異之處。未來，當歐洲太空總署 (ESA)、日本宇宙航空研究開發機構 (JAXA) 的探測器貝皮可倫坡號 (BepiColombo) 預計於2026年底進入環繞水星軌道後，將以前所未有的高解析度探測水星的磁層構造。影像來源：ESA

## 在鹿林天文臺，等一個新月

與水星不同，月球是地球的衛星，距離地球非常近，鈉斑在天空中看起來非常大，直徑約達3度（月球本身的視直徑大小約0.5度，水星則只有幾角秒）。這意味著傳統天文望遠鏡的視野往往太小，無法一次涵蓋整個結構；同時，鈉斑本身是極為微弱的散射光源，又在可見光範圍內，很容易被大氣散射與光害淹沒。

因此，從地面觀測月球鈉斑，並不是「把望遠鏡指向月亮」這麼簡單，而是一項需要在光學設計、濾鏡選擇、追蹤方式與資料處理上精心規劃的任務。這也解釋了為什麼即使在全球天文社群中，成功觀測月球鈉斑的案例仍然不多。

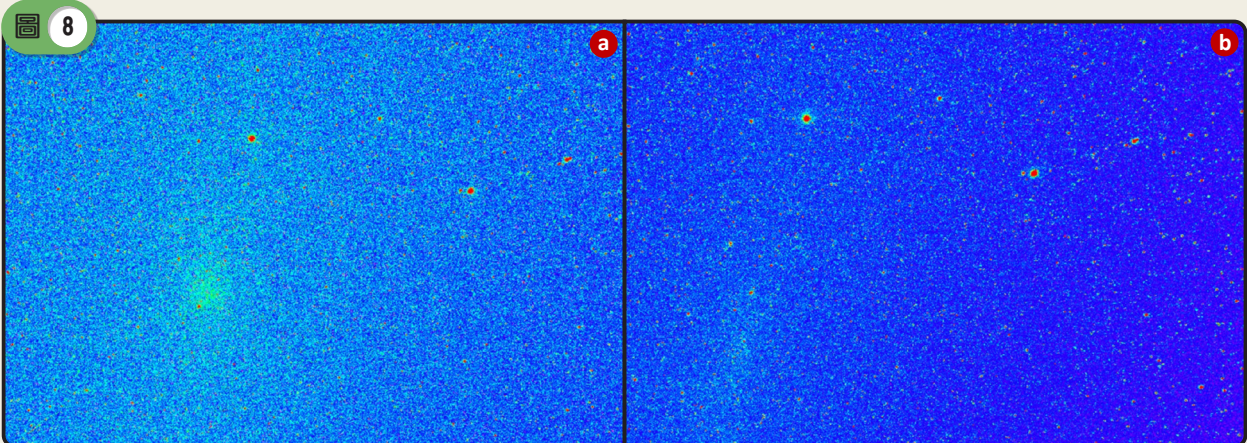
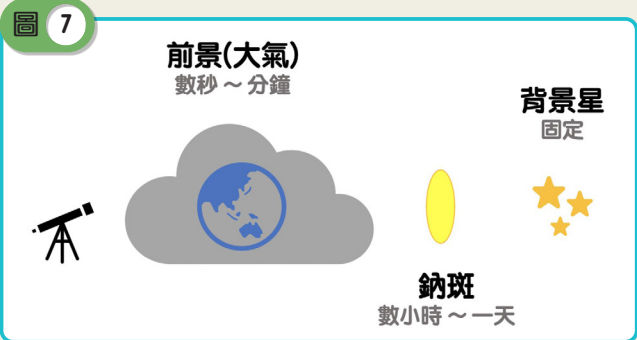
1998年，波士頓大學團隊用全天相機（all-sky camera）捕捉到鈉斑；起初，我們也使用全天相機，希望能以全天視野直接拍下鈉斑，然而，由於全天相機無法追蹤，曝光時間一拉長，滿天的星點便會拖成星軌，反而淹沒了微弱的鈉訊號。於是我

們改變策略，重新設計了一套專為觀測月球鈉斑的系統。這套系統結合了廣角鏡頭的寬廣視野與赤道儀的追蹤能力，能在長時間內穩定對準同一個座標曝光，讓微弱的光子一點一滴累積起來。

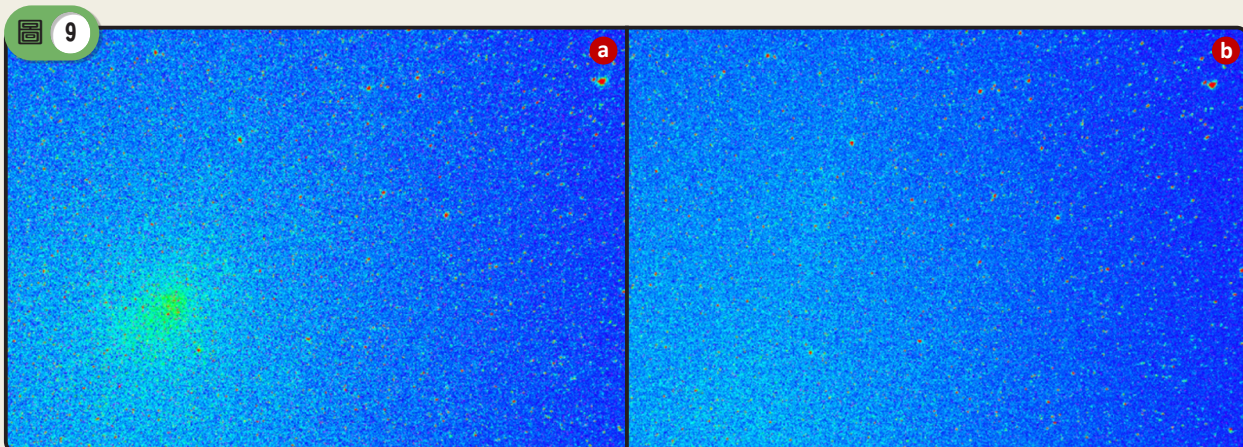
而真正的挑戰還在拍攝之後——確認這不是大氣、光害或儀器造成的假象。首先，亮斑出現的位置，正好落在理論預測的「地球影子方向」（也就是天球上太陽的反方向），與模擬結果一致。其次，排除前景和背景：鈉斑的變化時間尺度長達數小時，慢於大氣訊號的快速變動，能夠排除前景天氣變化影響；另背景恆星在影像中始終固定不動，若該亮斑在不同日期呈現明顯變化，且不隨恆星背景共同移動，則可排除其為背景天體的可能性，如圖7。

終於，我們在2025年2月28日的新月夜晚，影像中出現了一個緩慢變化、卻穩定存在的亮斑。隔天再拍攝時，這個亮斑已明顯變淡並位移，如圖8；而在下個月的新月觀測中，同樣的現象再次重現，如圖9。所有證據都指向同一個結論：我們真的拍到了月球的鈉斑。

月球鈉斑與前景大氣、背景恆星的比較示意圖。地面觀測時，望遠鏡所接收到的光訊號同時包含來自地球大氣的前景散射、月球鈉斑，以及遙遠恆星的背景光。前景大氣結構隨時間快速變化，其特徵時間尺度約為數秒至數分鐘；背景恆星位置固定，長時間不會變動；而月球鈉斑的亮度與形狀變化則發生在數小時至一天的時間尺度上。透過分析時間尺度上的差異，可有效區分鈉斑訊號與大氣或背景天體的影響。



2025年2月新月期間觀測影像。a 為2025年2月28日新月當天的觀測結果，可見影像左下方出現一個亮度集中的區域，對應於月球鈉斑的位置；b 為新月後一天2025年3月1日所拍攝的影像，相較於新月當天，鈉斑結構明顯變得較為彌散，且其位置亦出現輕微位移。影像來源：國立中央大學天文研究所



2025年3月新月觀測影像。如同2月的觀測，**a**為2025年3月29日新月當天的觀測結果，同樣可見影像左下方出現一個亮度集中的區域，對應於月球鈉斑的位置；**b**為新月前一天2025年3月28日所拍攝的影像。影像來源：國立中央大學天文研究所

## 從鈉斑看見月球的「呼吸」

月球鈉斑的觀測價值，並不僅止於「我們看到了什麼」，而在於「它告訴我們什麼」。在沒有濃厚大氣保護的天體上，表面與太空環境之間的物質交換並非穩定不變的，而是隨著外在環境變動。鈉外氣層正是這種變化最直接、也最敏感的指標之一。

當太陽活動增強、太陽風壓力上升時，鈉原子的釋放效率、空間分佈都可能產生可觀測的改變；反之，在太陽活動較為平靜的時期，鈉斑的亮度與範圍也可能隨之縮小。換句話說，月球鈉斑不只是月球自身的現象，而是一個能即時回應太陽風的「太空天氣感測」。

在太空探測任務高度發展的今日，或許會有個疑惑：既然能派遣探測器前往月球，為何還要花力氣進行困難的地面觀測？事實上，兩者扮演的角色截然不同。太空探測器能提供局部、近距離、高精度的測量，但其時間跨度往往受限於任務設計與軌道配置，也耗費大量成本；地面觀測則能在不同於太空任務的尺度上持續進行，捕捉外氣層隨太陽活動週期變化的長期趨勢。對於像鈉斑這類只在特定

幾何條件下短暫出現的現象而言，地面觀測反而具有彈性與覆蓋性。

此外，地面觀測所發展出的技術，也往往能反饋到其他天體的研究中。月球鈉斑的觀測策略，便與水星鈉尾、彗尾，甚至部分系外行星的氣體研究相互呼應。這也是為什麼一直以來，水星與月球外氣層是行星科學中連結「地面觀測」、「太空任務」與「太陽物理」的重要橋樑。而這種長期連續觀測，正是理解外氣層動態變化所不可或缺的關鍵。

## 新月夜，並非一無所有

新月的夜晚，看似月亮從天空中消失，然而，正是在這樣的時刻，月球隱秘的一面，才得以被揭示。鈉斑提醒我們，即使在看似靜止、無生命的天體上，仍存在著持續進行的物理過程，無聲地回應著來自太陽的能量。

透過這些微弱的光，我們不只是看見月球的「尾巴」，更看見了整個太陽系中，無大氣天體如何與太空環境互動的真實樣貌。而這些知識，正是人類在重新走向月球、走向更遠的行星之前，必須理解的重要一課。

許濠謙：國立中央大學天文研究所 博士候選人