

極光 — 來自太空的訊息

2024年母親節周末，全球許多地區罕見地目睹了壯觀的極光景象。地面上看不看得到極光就像觀星、賞日食、月食一樣需要天時地利，不同的是，天體運行有其規律，而極光卻是得看太陽的脾氣，更精確地說，會不會有極光的產生和太陽風與地球磁場的交互作用有關。當太陽發生如日冕物質拋射（Coronal Mass Ejection，簡稱CME）之爆發事件，或出現日冕洞（Coronal Hole）時，便可能提供合適的太陽風條件，導致地球磁場劇烈擾動，進而引發包括極光在內的各種太空天氣效應。因此，極光可說是惡劣太空天氣下的美麗產物。

文／楊雅惠

從這張由國際太空站拍攝的極光影像可以發現，由於極光是太陽風與地球磁場的交互作用所產生，因此會沿著地球磁場向外伸展，導致極光的頂部已突破至大氣層之外。影像來源：NASA

極光的幕後推手

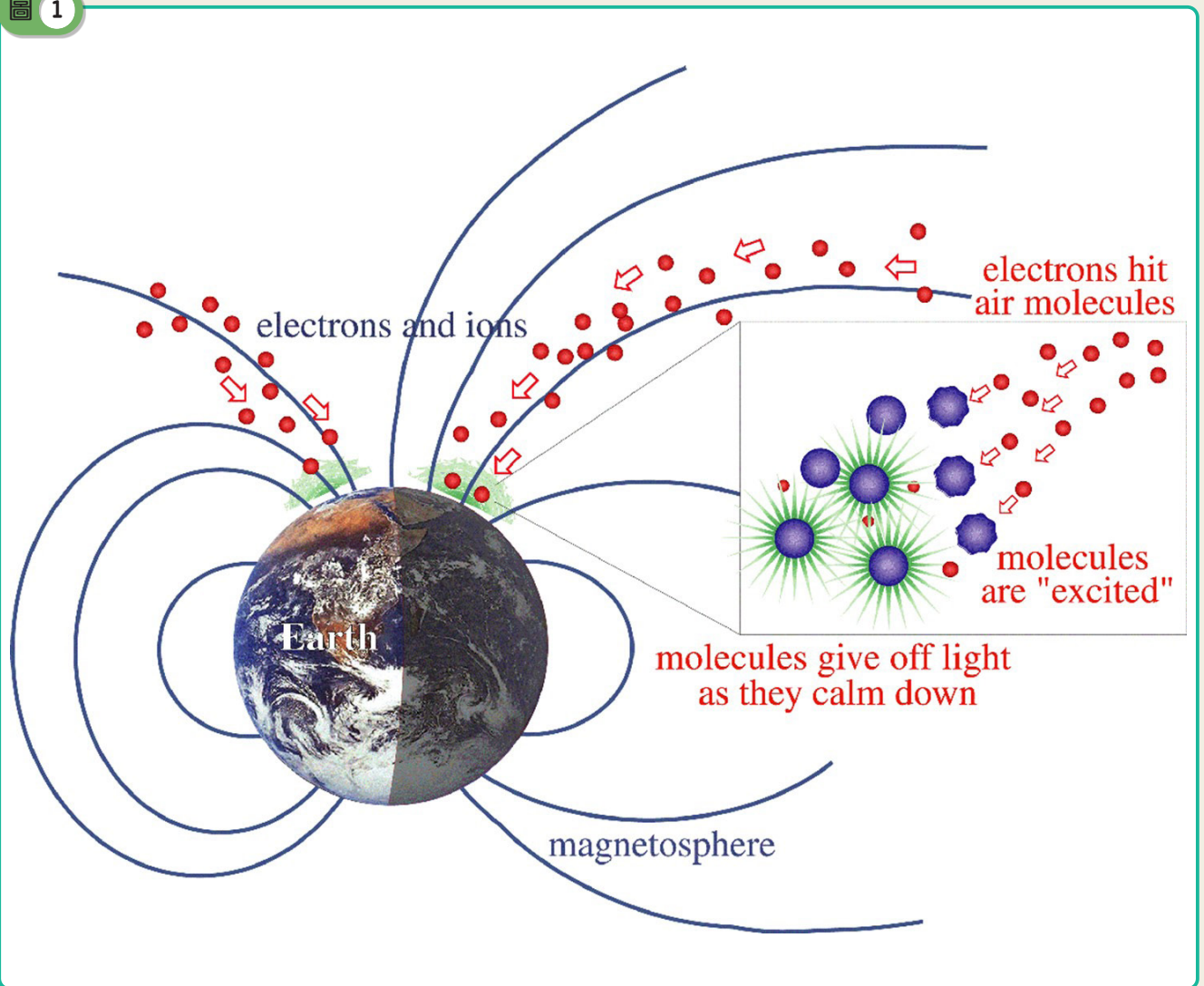
地球磁層是一個由地球磁場主導的空間區域，其最外圍的邊界稱為磁層頂（Magnetopause），能有效屏蔽太陽風電漿粒子直接撞擊地球。然而，在某些特定條件下，太陽風電漿仍能突破磁層頂的保護進入地球大氣。當太陽風中的電子與離子被地球磁場引導至高緯電離層上空時，電子會被順著磁場、方向向上的電場加速。如圖1所示，當大氣中的氣體分子或原子與這些高速電子碰撞後，會被激發至較高能階的準穩定態，並在返回基態或較低能階的準穩定態時，釋放出特定波長的光，此即為極光。除了電子外，自高空沿磁場沉降的質子，也能

被一個方向向下的電場加速而引發極光。質子造成的極光通常較黯淡，且空間分布較模糊，其與電子極光兩者可同時發生，但主要可見極光仍以電子引發的極光為主。

根據電子來源與特性，極光可分為兩大類：

- ①**分立極光（Discrete Aurora）**：呈現明亮而清晰的光帶或弧形，甚至是舞動的光簾，與行星際磁場（Interplanetary Magnetic Field，簡稱IMF）及地球磁場的交互作用有關。
- ②**擴散極光（Diffuse Aurora）**：呈現如霧氣般均勻分布的光，亮度較低，由地球內磁層中的帶電粒子運動引起。

圖 1



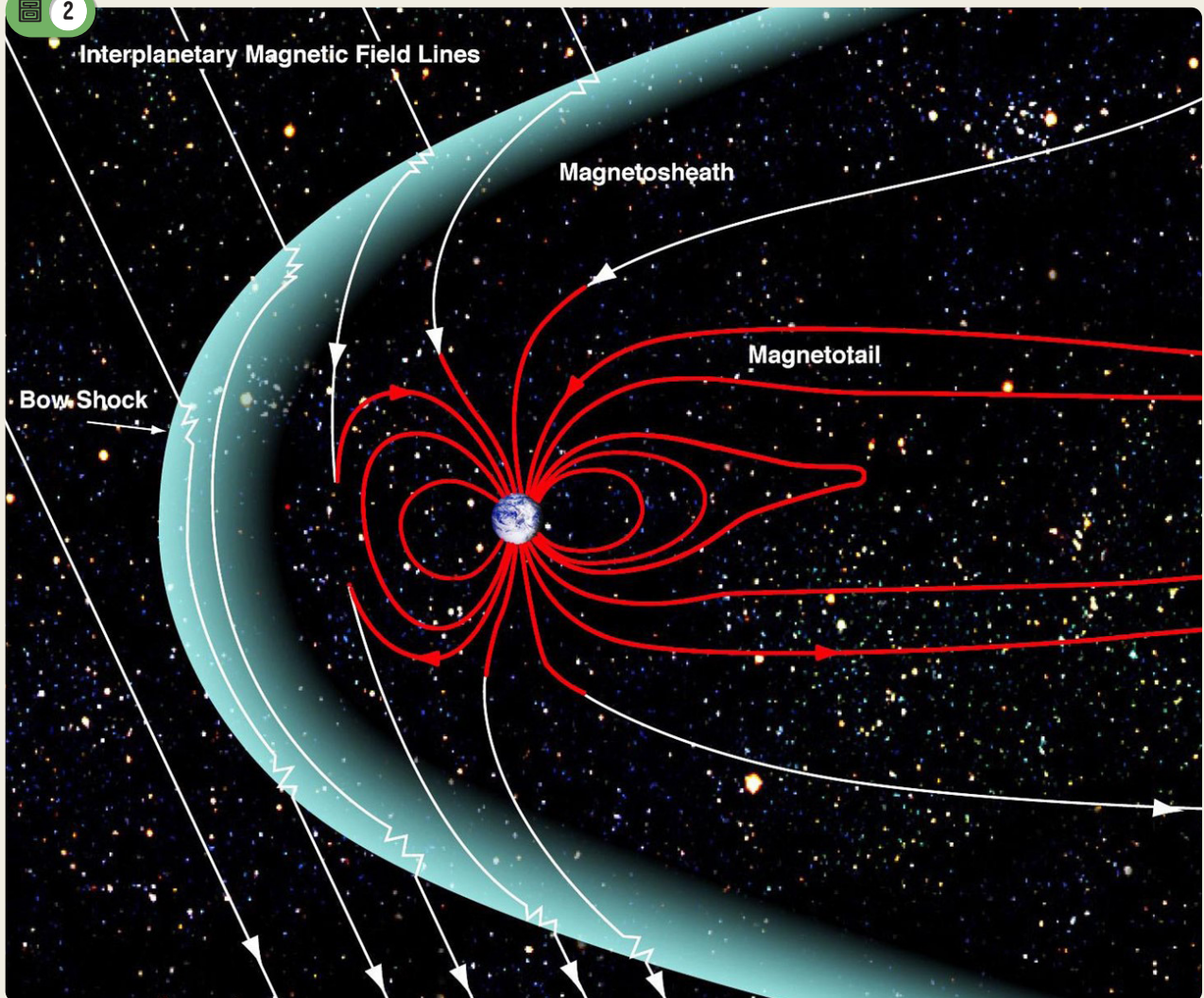
極光產生示意圖。圖片來源：NASA

在一般的太陽風情況下，只有在地球南北兩極的極尖區（Polar Cusp），太陽風電漿可以沿著磁場線進入地球高層大氣，若這些電漿粒子在極區上空被加速，則可產生日側極光。然而，由於極光的亮度遠不及太陽光，即便發生日側極光，往往不易被人眼察覺。若行星際磁場的方向與地球磁層的磁場方向相反，尤其是當南向行星際磁場隨太陽風電漿抵達地球時，如圖2所示，會在日側磁層頂引發磁場重組（Magnetic Reconfiguration），改變該處的磁場結構，使行星際磁場與地球磁場相連，這些相連後的磁場隨太陽風被帶往磁尾（Magnetotail），導致磁尾的磁場拉伸，並在磁赤道附近再次發生磁場重組，使得該處的電漿可沿著磁場，由磁尾進入地球高緯度地區上空，進一步引發夜側極光，而磁尾處的磁場在經過磁場重組後，也逐漸回復至原本的形態。上述整個過

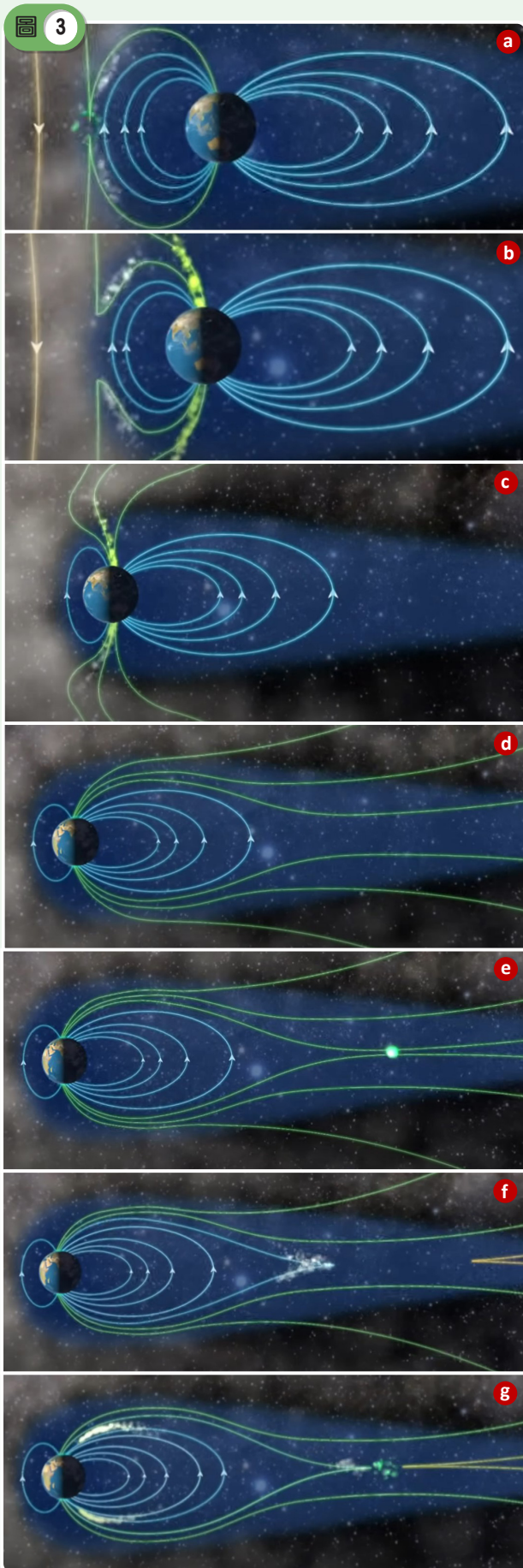
程稱為地磁副暴（Geomagnetic Substorm），如圖3，通常可透過極區附近的地磁測站偵測到對應的磁場擾動。南向行星際磁場強度愈強且持續時間愈久，造成地球磁場擾動就愈大，極光分布範圍就愈廣、強度也愈強。

此外，地球內磁層中的電漿粒子會沿磁場在南北兩極之間來回運動，若在運動過程中與其它粒子碰撞，將改變其運動方向與磁場的夾角，稱為投擲角（Pitch Angle）。當投擲角小的帶電粒子沿磁場運動至地球高緯度地區，便有可能掙脫當地磁場束縛而進入高緯地區上空，引發擴散極光。與來自磁尾的粒子相比，這些產生擴散極光的粒子能量較低，因此擴散極光往往較為昏暗。

圖 2



南向行星際磁場（白色）與地球磁層磁場（紅色）作用示意圖。圖片來源：NASA/Goddard/Aaron Kaase



地磁暴的過程說明圖解

當太陽風抵達地球附近，帶電粒子除了從日側進入地球南、北極大氣會產生些許極光之外，主要是被帶往地球磁尾的電漿，因磁場拉伸與重組，從地球的夜側進入大氣產生極光，過程與機制說明如下，圖片來源：NASA Video

a ~ **b** 南向行星際磁場隨太陽風抵達地球，開始引發磁場重組，此時些許帶電粒子會沿著磁場從日側方向往南北極移動，進入地球大氣引發些許極光。

c 重組的磁場，隨著太陽風通過地球而被帶往磁尾。

d 磁場線往磁尾方向拉伸。

e 從南、北往磁赤道靠近。

f 發生磁場重組。

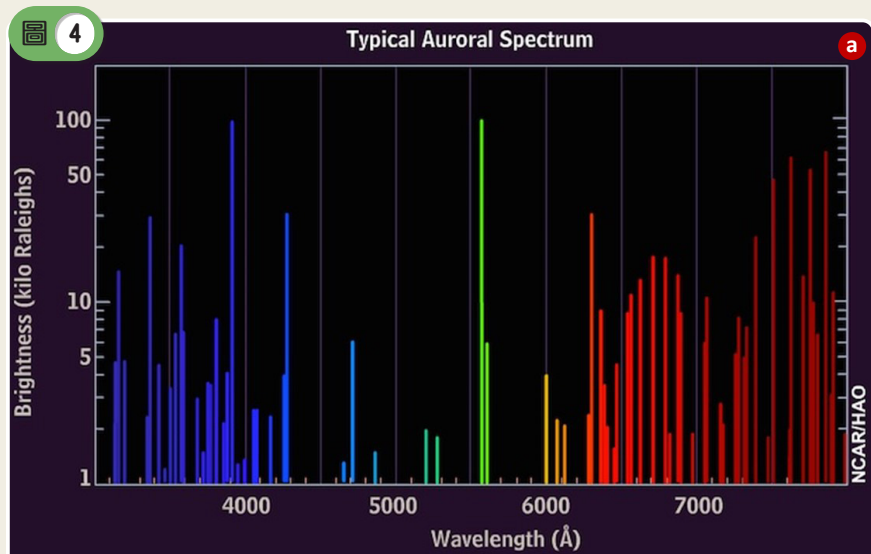
g 在磁尾磁場重組處的電漿，會從地球夜側沿磁場線進入地球大氣引發極光。

極光的色彩密碼

極光的顏色是由多種因素共同決定的，包括：帶電粒子的能量、大氣中不同氣體隨高度的分布情形，以及大氣氣體本身的電性。帶電粒子的能量決定它們能夠進入大氣層有多深，也決定了會在哪個高度產生極光，粒子能量越高，穿透越深，越能在大氣層較低的高度產生極光。不同高度中存在著不同種類的氣體原子和分子，帶電粒子在哪个高度與哪種氣體原子或分子碰撞，會影響極光的顏色。舉

例來說，高空中的氧原子被激發後會發出綠光或紅光，氮分子則會發出紫色或藍色光。圖4顯示極光的光譜及大氣層不同高度的發生特性。各種顏色當中，以綠色極光最為常見，而在強烈地磁副暴時，則可見到血紅色或紅綠相間的極光。另外，大氣氣體密度也是影響極光能否產生的重要因素。在高層大氣中，由於氣體密度較低，原子與分子間的碰撞機率小，帶電粒子與氣體作用後產生的光容易被穩定釋放出來。但在較低的大氣層中，氣體密度較高，原子和分子間頻繁的碰撞可能會中斷激發態的發光過程，而使極光不易形成。

a 不同顏色極光的光譜。圖片來源：NOAA



b 大氣層不同高度所產生的極光發生特性。圖片來源：NASA

PRIMARY COLOR	ALTITUDE	COMPOSITION
RED	> 193.1 km	Oxygen
GREEN	120.7~177.0 km	Oxygen
BLUE	120.7~177.0 km	Nitrogen
PINK	< 96.6 km	Nitrogen

c 從國際太空站所拍攝的極光影像可以明顯看出，紅色、綠色極光出現在不同的高度，呈現出美麗的色彩分層景象。影像來源：NASA

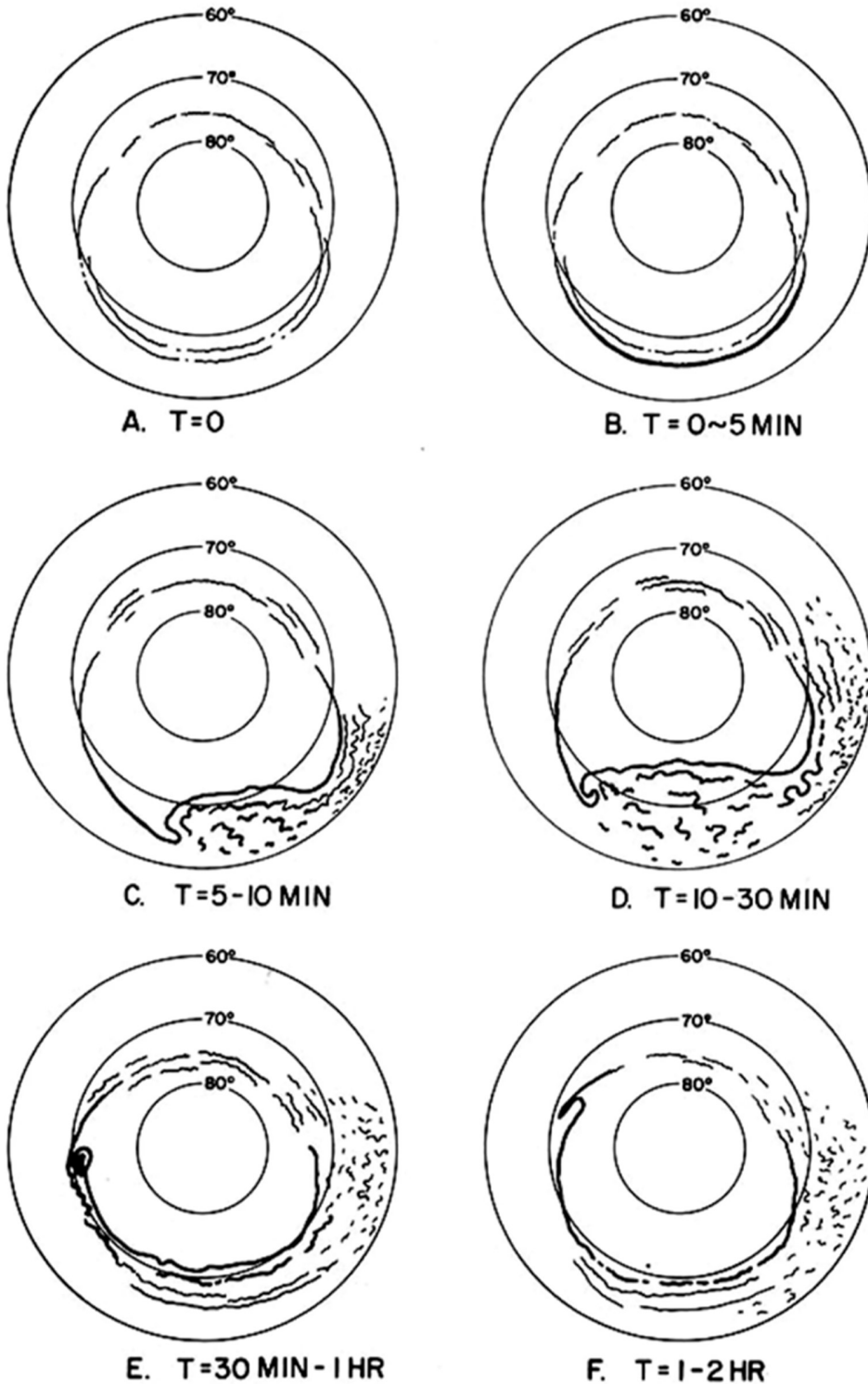


太空中的極光

由於極光空間分布範圍廣，地面上單點觀測難以掌握極光的全貌。為了瞭解極光的演化過程，科學家赤祖父俊一 (Syun-Ichi Akasofu) 早期利用

地面多處測站的全天相機記錄，檢視磁副暴期間各測站的同步極光影像。觀察到極光會先出現在子夜區域並朝高緯地區擴展，而後逐漸往晨側方向移動及低緯地區擴展，繪製出極光隨時間演化的經典圖像，如圖5。

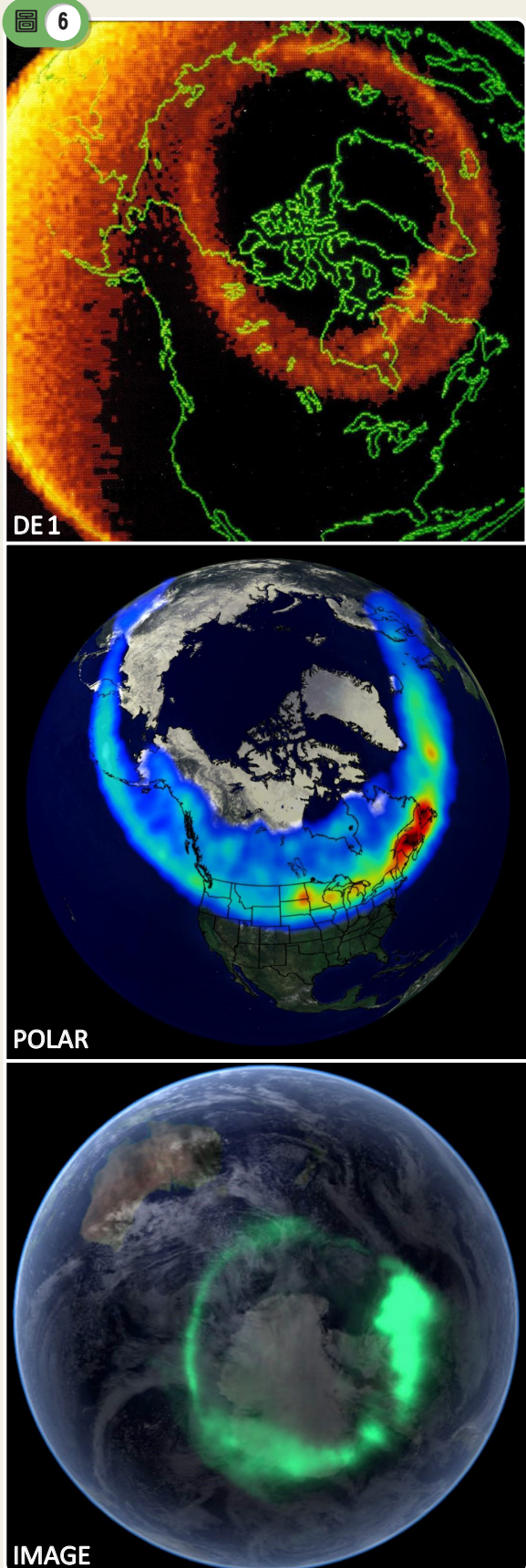
圖 5



科學家赤祖父俊一繪製之極光隨時間的演化圖像。圖片來源：S.-I. Akasofu (1964)

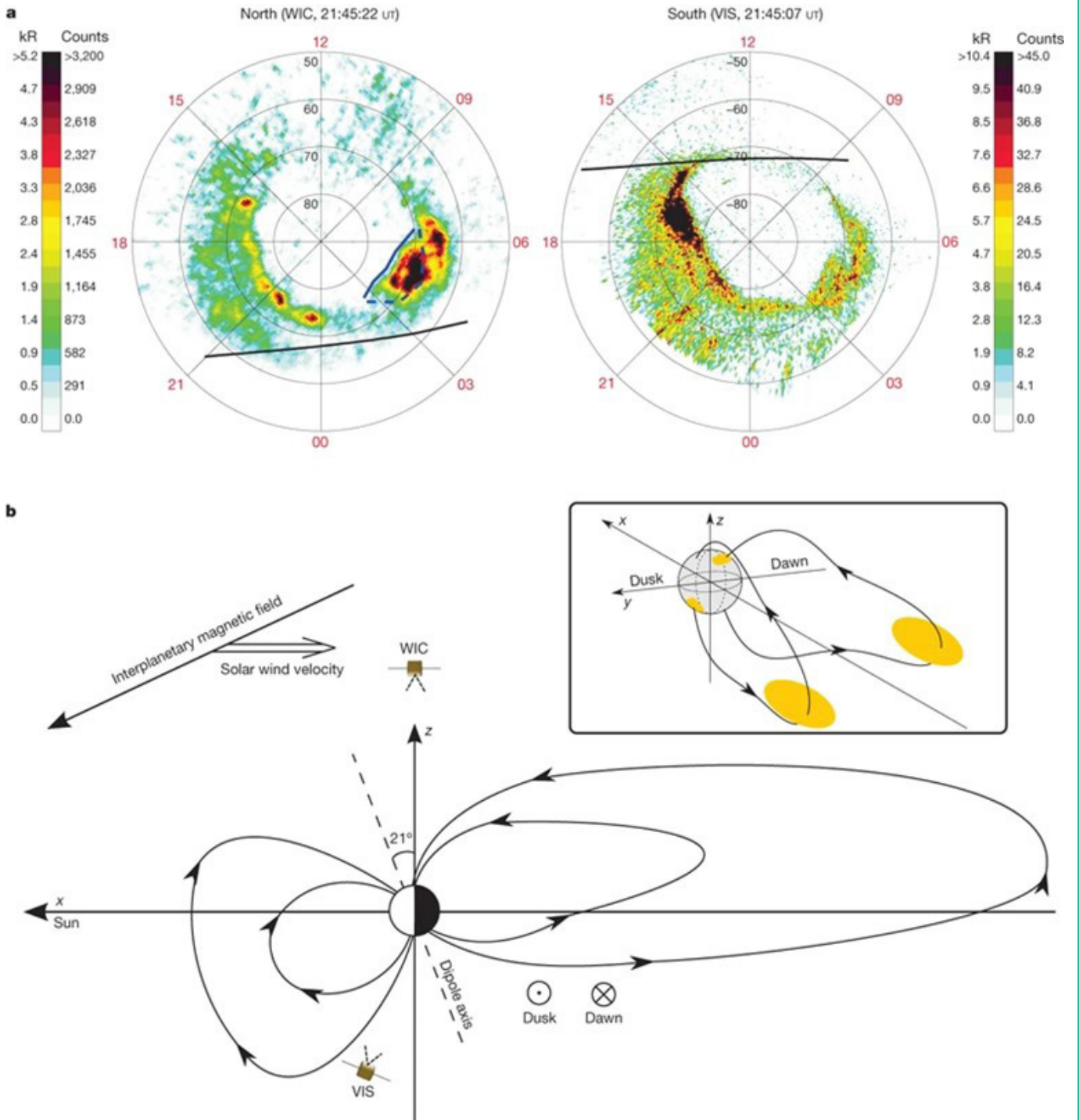
在太空中觀測極光時，常利用可見光與紫外線波段來進行探測，例如早期的DE 1 (Dynamics Explorer 1)、POLAR、IMAGE (Imager for Magnetopause-to-Aurora Global Exploration) 等人造衛星，皆曾用於極光觀測，見圖6。圖中所示的極光影像經套色處理後，可清楚看出極光的分布範圍，稱為極光橢圓圈 (Auroral Oval)，以及極光強度在日側與夜側的差異，呈現明顯的不對稱特徵。若能利用兩顆分別穿越南北極區的人造衛星，在同一時間進行同步觀測，便能比較並解析南北兩極的極光結構，圖7即為一觀測實例，其中北半球的極光影像來自IMAGE衛星，南半球則由POLAR衛星所獲得。從圖中可看出，南北兩極的極光皆呈現明顯的日、夜側空間分布差異，另可看到北半球的極光在清晨側較為強烈，而南半球最強的極光則出現在黃昏側。這種南北不對稱現象可以解釋為，來自磁尾不同區域的電漿沿著不同的磁場線，分別流入南北極區的上空，因而造成極光強度與分布的不同。此外，若將人造衛星上的現地磁場量測結果，與地面測站全天相機所拍攝的極光影像，如圖8，結合分析，將有助於瞭解極區上方磁場形態與極光演化發展的關係。

除了地球之外，太陽系中其它擁有磁場的行星—如木星、土星、天王星、海王星—也會產生極光現象。這些行星的極光與地球類似，主要源自於太陽風與磁層的交互作用，但也可來自其衛星所釋放的電漿粒子。舉例來說，位於木星磁層中的木衛一，因其劇烈的火山活動，持續噴發出電漿，這些帶電粒子被木星磁場捕獲後，成為木星極光的重要來源之一，並對極光的形態與變化造成影響。近年來，韋伯太空望遠鏡 (James Webb Space Telescope) 利用近紅外波段成功捕捉到木星極光活動的影像，如圖9 a、b，並與哈伯太空望遠鏡同步拍攝的紫外線影像進行比較，發現兩者之間呈現出明顯差異。目前科學家正著手分析這些差異背後的成因，深入探討不同波段所觀測到的極光現象。對此研究有興趣的讀者，可參閱Nichols等人於2025年發表的論文。此外，韋伯太空望遠鏡的近紅外觀測亦證實了海王星存在極光活動，如圖9 c。

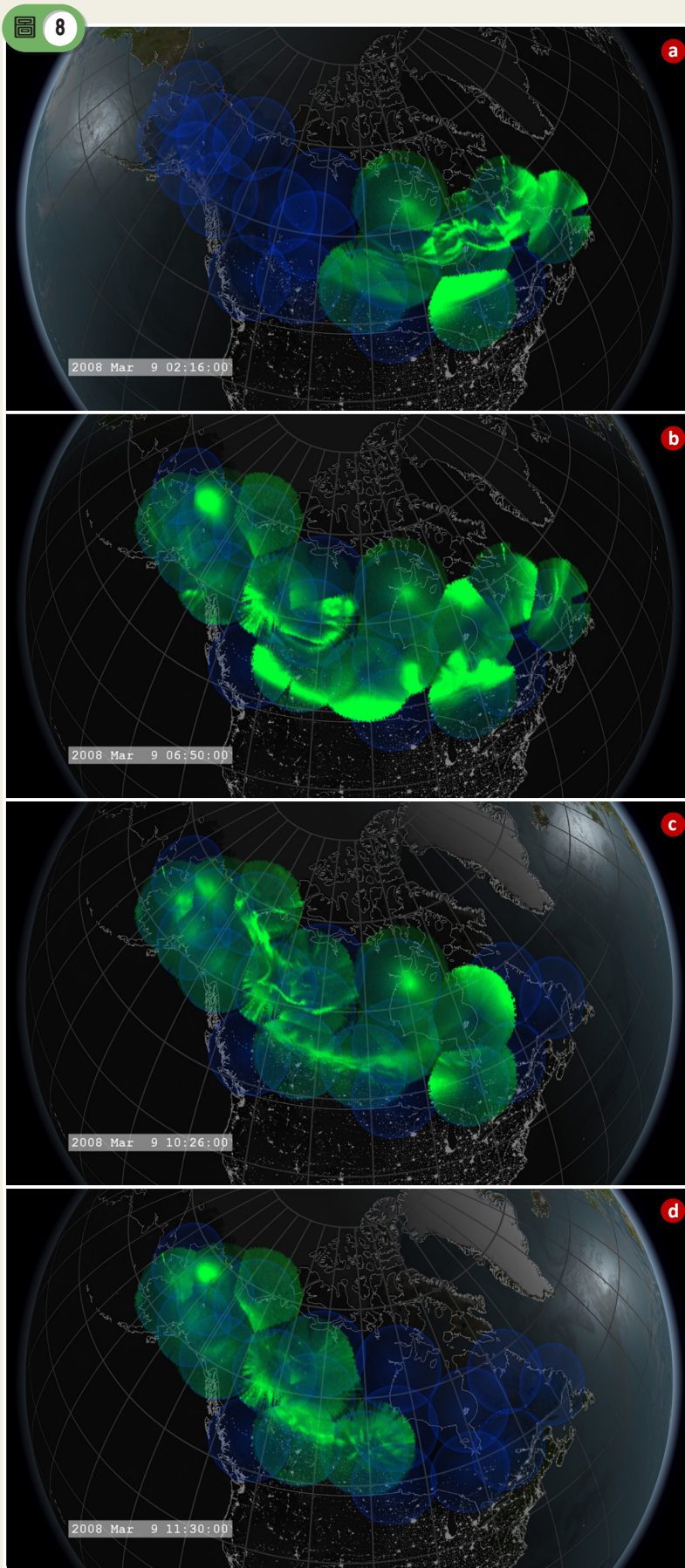


人造衛星DE 1、POLAR、IMAGE之極光觀測實例。影像來源：NASA

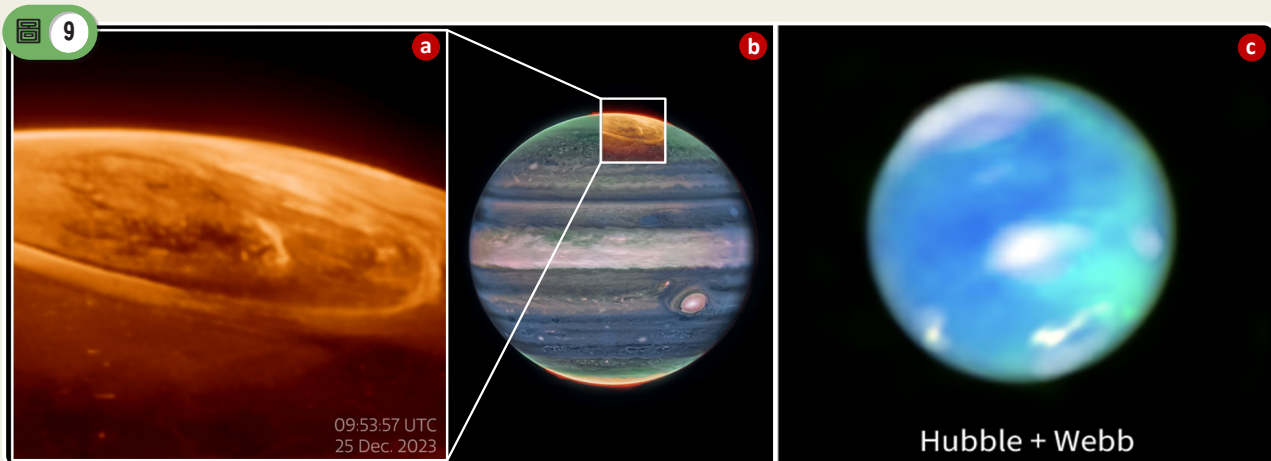
7



南北兩極不對稱極光結構的觀測實例之一。圖照來源：Laundal and Østgaard (2009)



THEMIS衛星地面測站之全天相機拍攝的極光演化影像，由 a 至 d 依拍攝時間順序排列。影像來源：NASA/Goddard Space Flight Center Scientific Visualization Studio

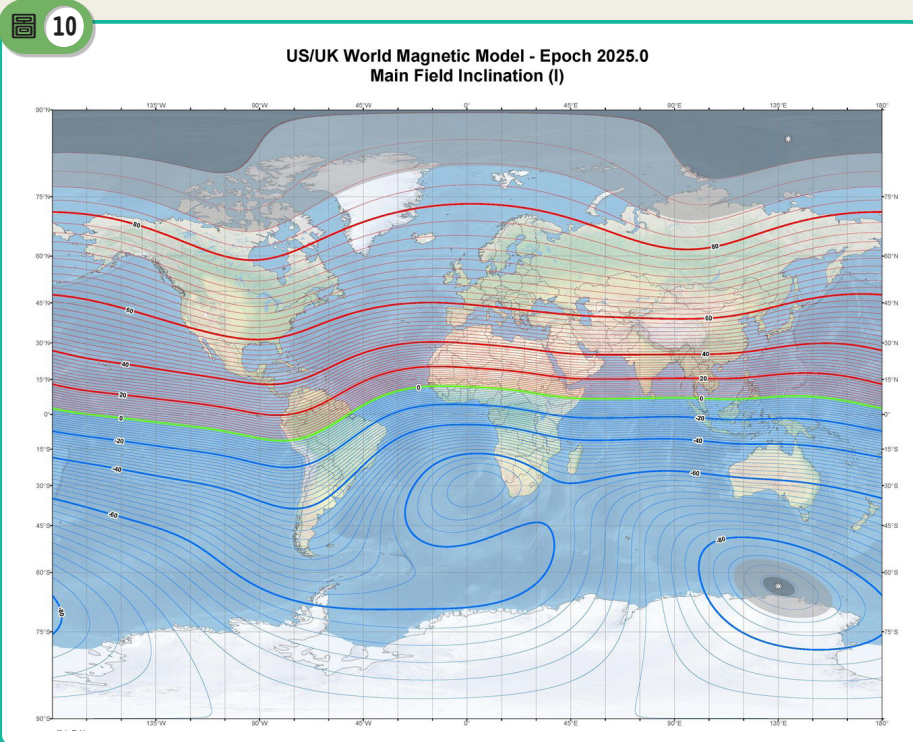


韋伯太空望遠鏡拍攝之 a、b 木星與 c 海王星的極光活動。影像來源：NASA/Webb

低緯度極光

極光通常出現在高緯度地區，特別是接近地磁極的兩極區域。然而，當南向的行星際磁場強度增強、太陽風速度加快、電漿密度升高時，會引發劇烈的地磁擾動，導致極光可見範圍向低緯度擴展，甚至出現在平常難以觀測到的地區，近年來便有數次罕見的低緯度極光事件。根據spaceweather.com的報導，2023年4月23、24日、2024年5月10、11日，以及2024年10月10、11日，全球多個低緯度地區皆出現極光現象。其中，2023年4月的極光曾南至美國與墨西哥邊境城

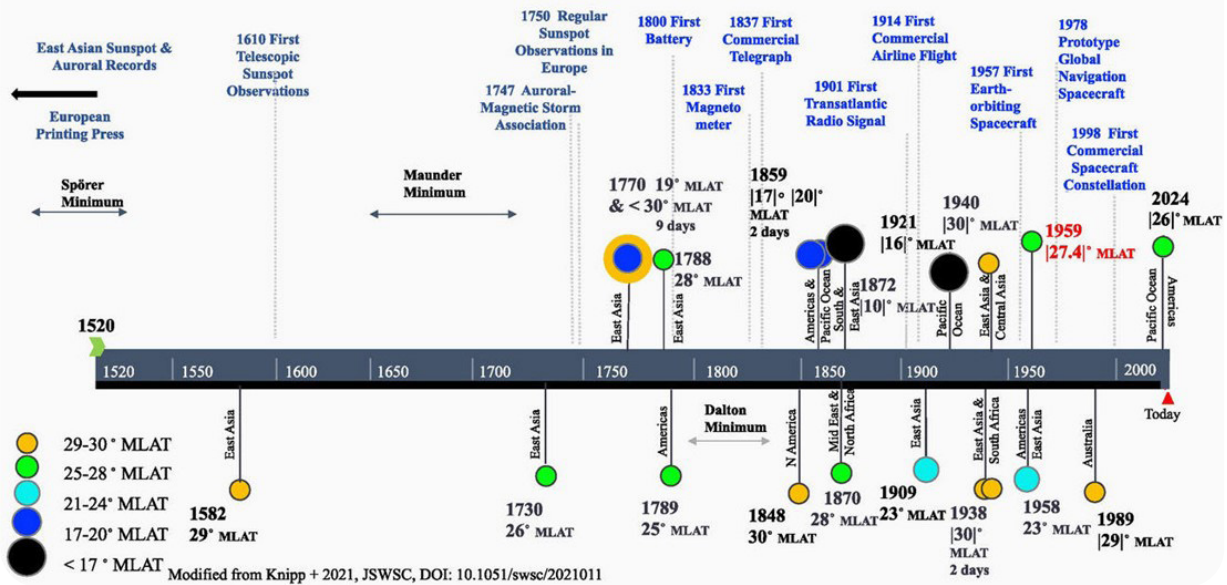
市Terlingua，其地理緯度僅 29.5°N 。而2024年5月與10月的極光活動更強，連位於緯度 23.2°N 的墨西哥城市Mazatlán都能目睹壯麗的極光景象。值得注意的是，雖然墨西哥與臺灣在地理緯度上相近，但在地磁緯度上卻有顯著差異。根據圖10顯示的地磁傾角分布，墨西哥位於約 51°N 的地磁緯度，而臺灣僅約為 35° ，因此即便處於類似的地理位置，臺灣在這兩次極光盛會中仍難以觀測到極光。2024年5月的極光甚至擴展至地磁緯度約 26° ，創下近500年來低緯度可見極光的記錄之一，如圖11。



地磁傾角全球分布圖。圖片來源：NOAA

圖 11

500 Years of Space Weather Storms with Aurora Visible at or Equatorward of 30° Magnetic Latitude



近500年低緯度可見極光記錄。圖片來源：spaceweatherarchive.com

根據美國國家海洋暨大氣總署（National Oceanic and Atmospheric Administration，簡稱NOAA）所制定的太空天氣分級標準，如圖12所示，上述的2023年至2024年間的三次大規模極光事件，分別對應G4（劇烈）與G5（極端）等級的地磁暴，這些事件皆與朝向地球正面而來的日冕物質拋射有關。圖13展示2024年5月與10月兩次極光事件期間的太陽風環境與相關日冕物質拋射，其中太陽風數據來自位於0.99 AU的DSCOVR衛星，而日冕物質拋射則取自SOHO衛星LASCO酬載上的C3日冕儀，製作成連續差分影像（running-difference image），以好辨識日冕物質拋射的運動，如影像中的白色外圍結構即代表日冕物質拋射前緣的位置。從圖中可看出，這兩次極光事件皆是因強烈的南向行星際磁場隨環形日冕物質拋射（Halo CME）襲擊地球所引發。

根據SOHO/LASCO記錄的事件清單，2024年5月8日與9日兩天內，連續發生了五次環形日冕物質拋射。這類環繞整個太陽周緣的快速日冕物質拋射，若其運動方向朝地球而來，且具備強烈的南向行星際磁場分量，會與地球磁場發生劇烈作用，觸發大規模的地磁擾動與極光活動。這也說明，觀測及分析太陽風與日冕物質拋射特性的變化，是預警地磁暴與極光發生的重要依據。

參考資料：

Nichols, J.D., King, O.R.T., Clarke, J.T. et al. Dynamic infrared aurora on Jupiter. Nat Commun 16, 3907 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41467-025-58984-z>

楊雅惠：國立中央大學太空科學與工程學系 教授、國立中央大學太空科學與科技中心 中心副主任

12



NOAA Space Weather Scales

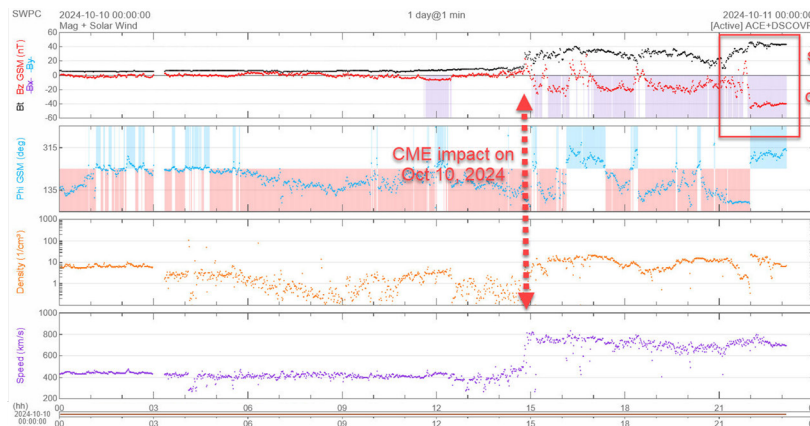
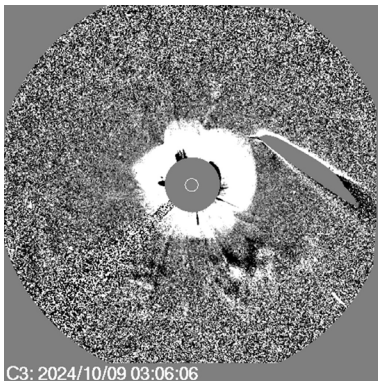
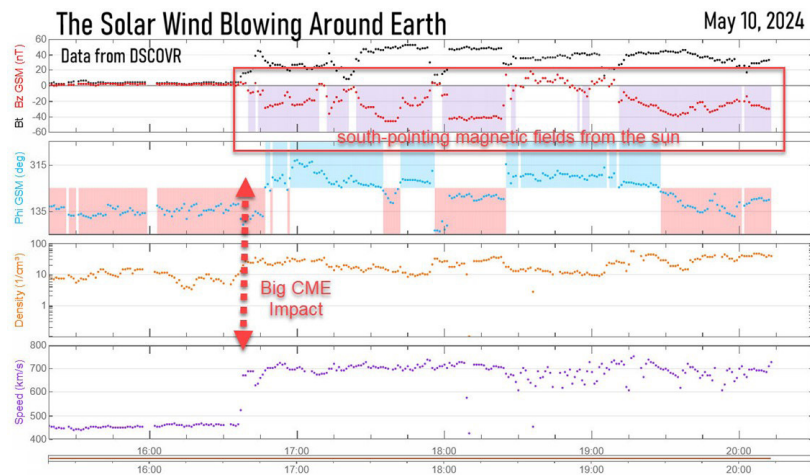
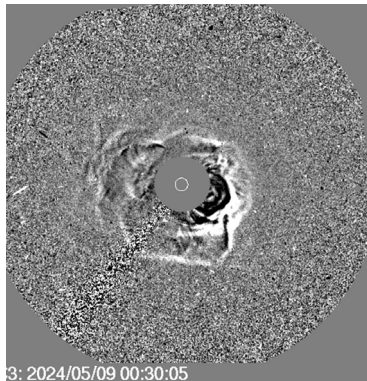


Category		Effect	Physical measure	Average Frequency (1 cycle = 11 years)
Scale	Descriptor	Duration of event will influence severity of effects		
Geomagnetic Storms				
G 5	Extreme	<p>Power systems: widespread voltage control problems and protective system problems can occur, some grid systems may experience complete collapse or blackouts. Transformers may experience damage.</p> <p>Spacecraft operations: may experience extensive surface charging, problems with orientation, uplink/downlink and tracking satellites.</p> <p>Other systems: pipeline currents can reach hundreds of amps, HF (high frequency) radio propagation may be impossible in many areas for one to two days, satellite navigation may be degraded for days, low-frequency radio navigation can be out for hours, and aurora has been seen as low as Florida and southern Texas (typically 40° geomagnetic lat.).**</p>	Kp=9	4 per cycle (4 days per cycle)
G 4	Severe	<p>Power systems: possible widespread voltage control problems and some protective systems will mistakenly trip out key assets from the grid.</p> <p>Spacecraft operations: may experience surface charging and tracking problems, corrections may be needed for orientation problems.</p> <p>Other systems: induced pipeline currents affect preventive measures, HF radio propagation sporadic, satellite navigation degraded for hours, low-frequency radio navigation disrupted, and aurora has been seen as low as Alabama and northern California (typically 45° geomagnetic lat.).**</p>	Kp=8, including a 9-	100 per cycle (60 days per cycle)
G 3	Strong	<p>Power systems: voltage corrections may be required, false alarms triggered on some protection devices.</p> <p>Spacecraft operations: surface charging may occur on satellite components, drag may increase on low-Earth-orbit satellites, and corrections may be needed for orientation problems.</p> <p>Other systems: intermittent satellite navigation and low-frequency radio navigation problems may occur, HF radio may be intermittent, and aurora has been seen as low as Illinois and Oregon (typically 50° geomagnetic lat.).**</p>	Kp=7	200 per cycle (130 days per cycle)
G 2	Moderate	<p>Power systems: high-latitude power systems may experience voltage alarms, long-duration storms may cause transformer damage.</p> <p>Spacecraft operations: corrective actions to orientation may be required by ground control; possible changes in drag affect orbit predictions.</p> <p>Other systems: HF radio propagation can fade at higher latitudes, and aurora has been seen as low as New York and Idaho (typically 55° geomagnetic lat.).**</p>	Kp=6	600 per cycle (360 days per cycle)
G 1	Minor	<p>Power systems: weak power grid fluctuations can occur.</p> <p>Spacecraft operations: minor impact on satellite operations possible.</p> <p>Other systems: migratory animals are affected at this and higher levels; aurora is commonly visible at high latitudes (northern Michigan and Maine).**</p>	Kp=5	1700 per cycle (900 days per cycle)

* Based on this measure, but other physical measures are also considered.
 ** For specific locations around the globe, use geomagnetic latitude to determine likely sightings (see www.swpc.noaa.gov/Aurora)

NOAA太空天氣分級指標。圖片來源：NOAA

13



2024年5月及10月兩次極光事件對應的太陽風環境與日冕物質拋射。圖照來源：spaceweather.com, NASA