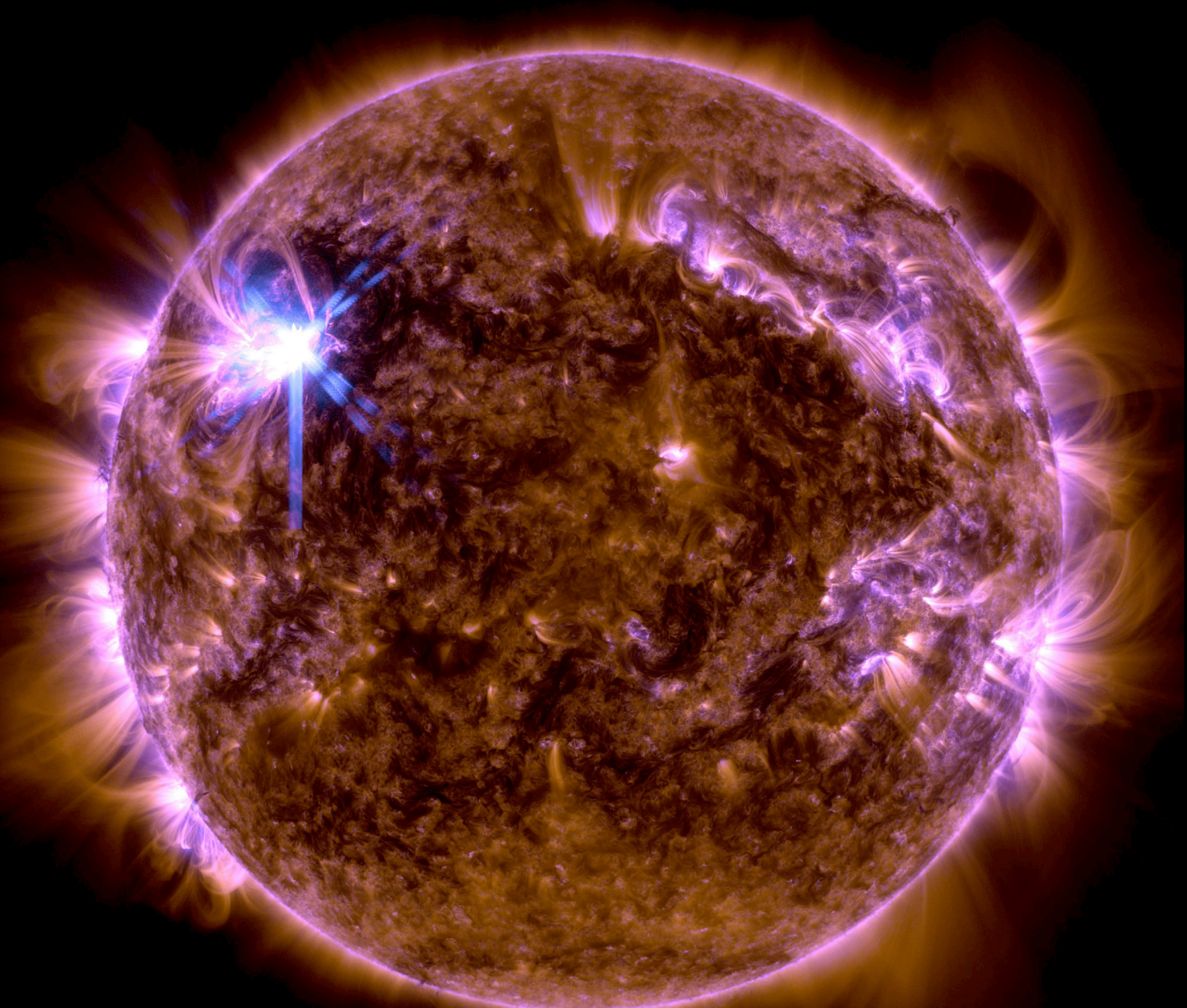


# 淺談太空天氣－從太陽說起

文／楊雅惠

隨著太空科技的迅速發展，太空天氣的預警漸趨重要，它不僅影響衛星任務與太空探索，也對人類的民生經濟、健康，甚至國家安全產生深遠影響，涵蓋的範圍可從太陽、行星際空間、磁層、電離層、大氣層直到地表。近地環境中的太空天氣主要來源是太陽，現階段的太陽除了提供穩定的光和熱，以及源源不斷的太陽風之外，另有突發性的爆發現象，包括：太陽閃焰（solar flare）、日冕物質拋射（coronal mass ejection，簡稱為CME）、日珥/暗紋爆發（solar prominence/filament eruption），以及太陽高能粒子（solar energetic particle，簡稱為SEP）。此外，宇宙射線也是影響太空天氣的重要來源。



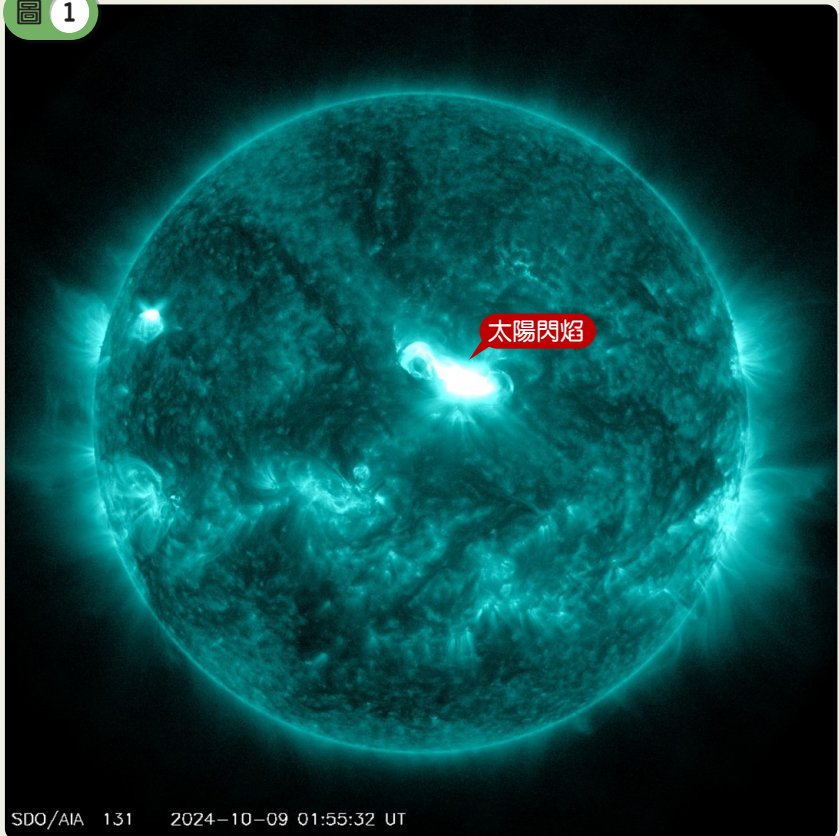
臺灣時間2024年2月22日7時7分，SDO衛星捕捉到X1.8級劇烈太陽閃焰爆發的瞬間，放射出極為刺眼的明亮閃光。影像來源：NASA/SDO/AIA

## 來源

太陽風暴通常是指太陽閃焰與日冕物質拋射，儘管這兩種現象都爆發於太陽的不穩定磁場結構，但對近地環境的影響形式卻大不相同。太陽閃焰是太陽在短時間內釋放出巨大能量的現象，並會伴隨全波段的電磁波輻射及高能粒子的產生，如圖1。而日冕物質拋射則是大量攜帶磁場結構的電漿，從太陽日冕層向外噴發的現象，如圖2、圖3。當日冕物質拋射快速移動時，會在其前方形成激震波（shock），進一步造成帶電粒子的加速，並在行星際空間形成所謂的行星際日冕物質拋射（interplanetary coronal mass ejection，簡稱ICME）。簡而言之，太陽閃焰主要是以電磁波輻射的形式影響近地環境，而日冕物質拋射則是其向外傳播的電漿與磁場結構影響近地環境，兩者皆會產生高能粒子，但其時間演變特性有所不同。在太陽活動較為活躍的時期，太陽有較多不穩定的磁場結構，從而增加爆發太陽閃焰及日冕物質拋射的機會，如圖4。

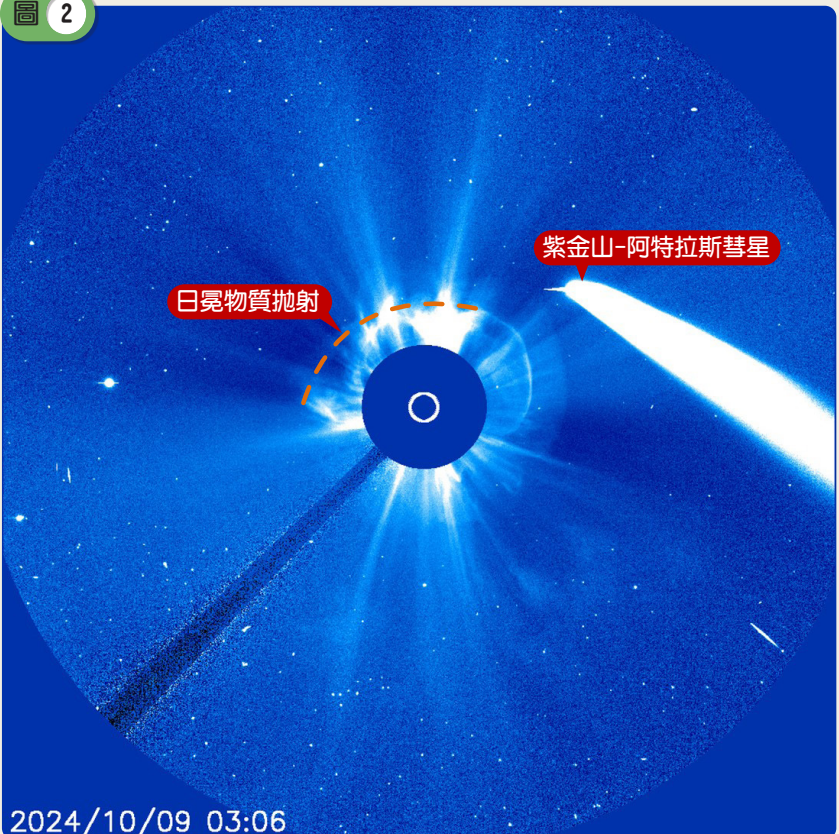
對應2024年10月9日太陽閃焰爆發的日冕物質拋射（CME），此時恰巧紫金山-阿特拉斯彗星通過太陽附近，形成一幅有趣的景象。影像來源：SOHO/LASCO

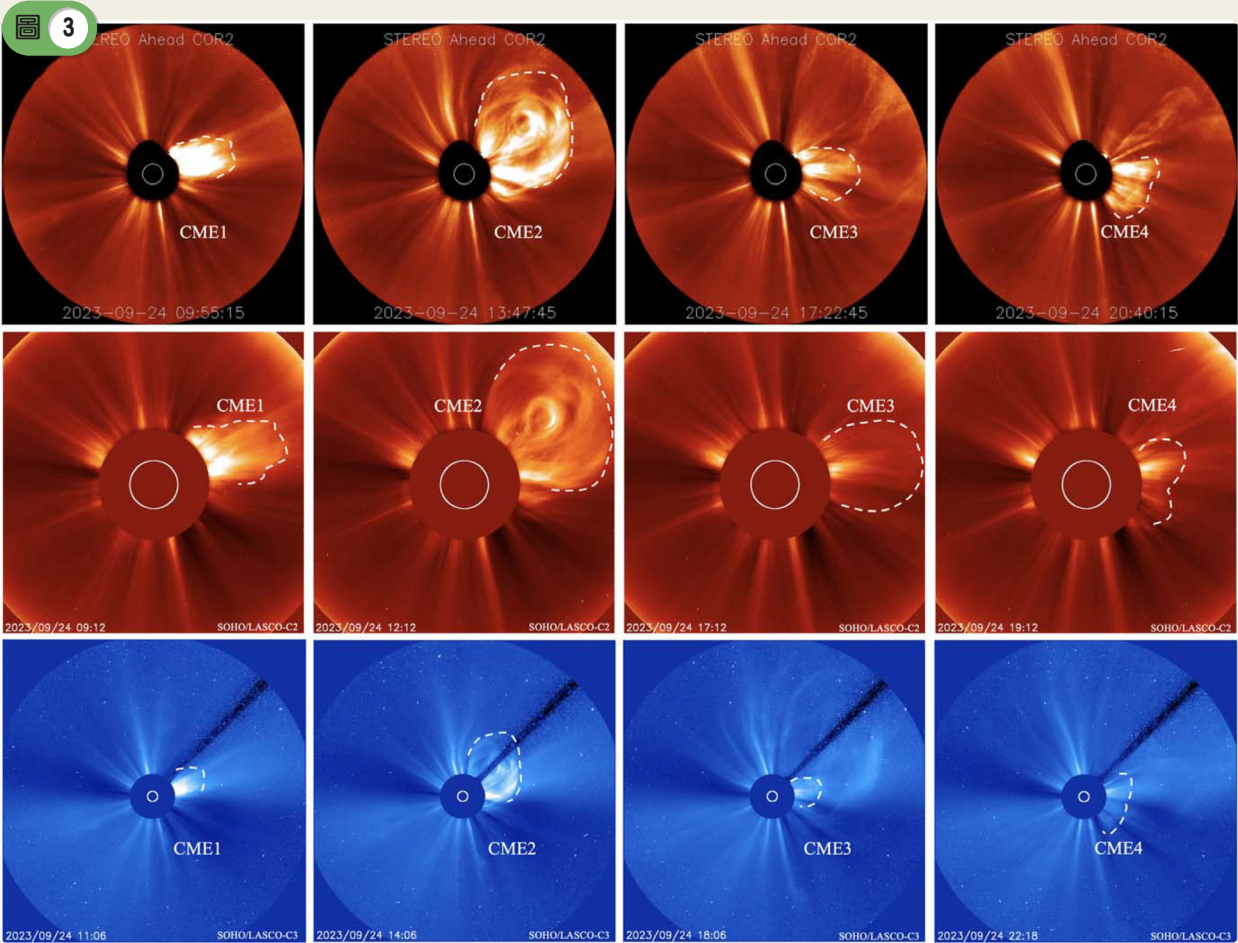
圖 1



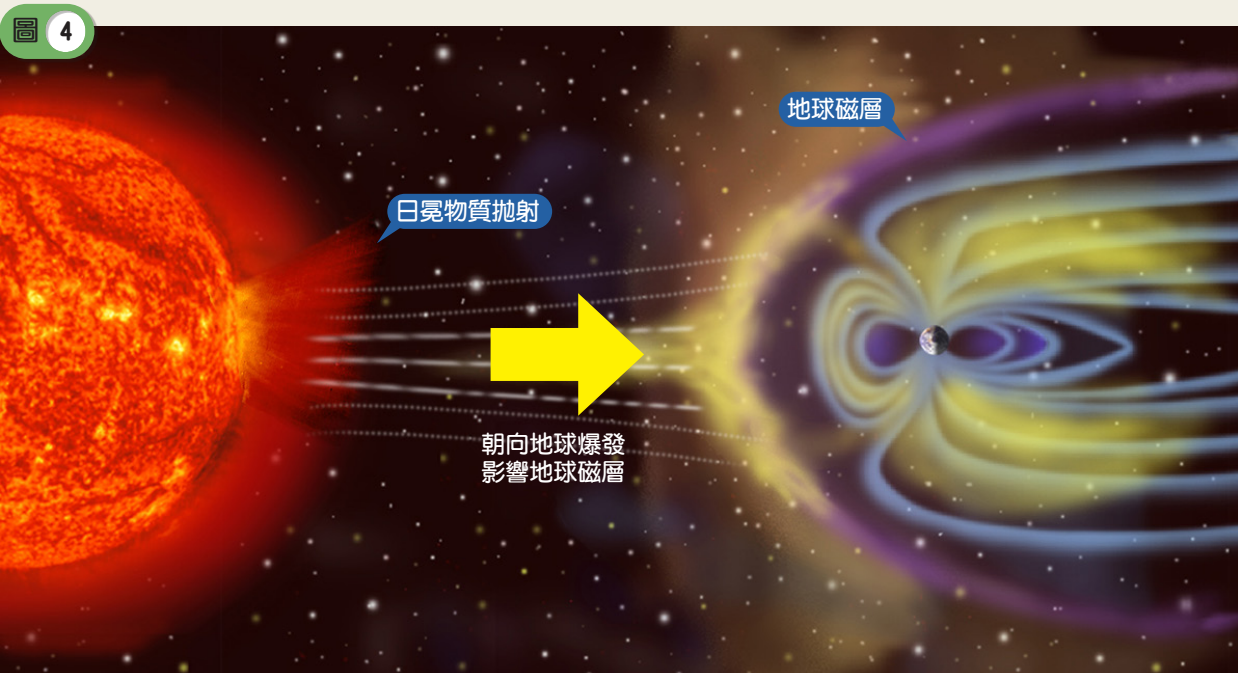
爆發於2024年10月9日的X1.8級太陽閃焰。影像來源：NASA/SDO/AIA

圖 2



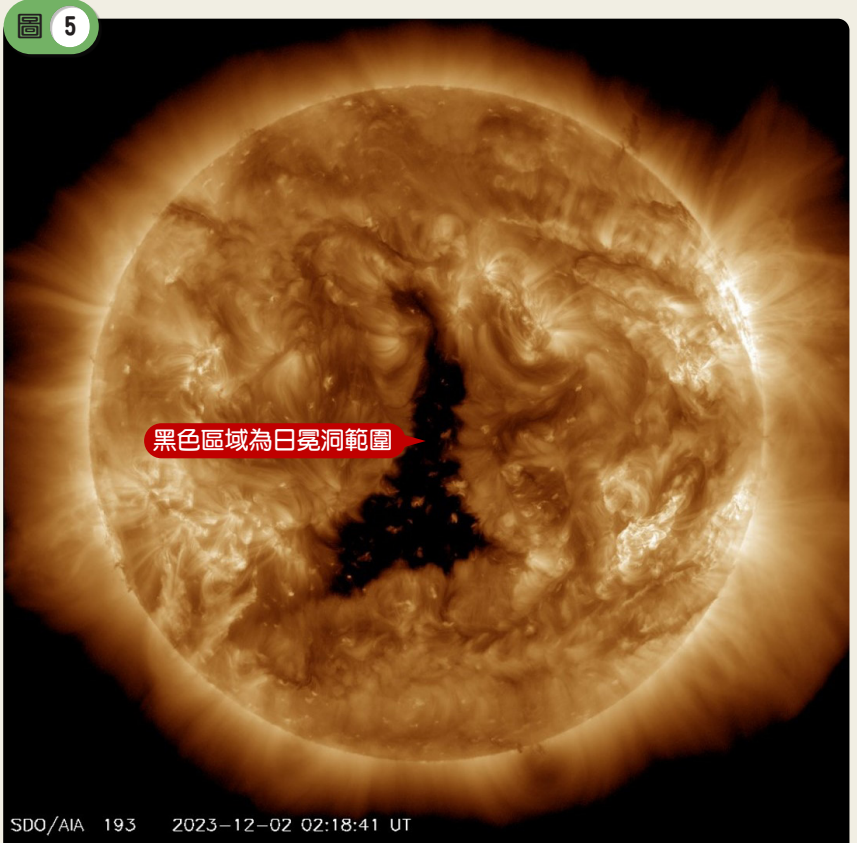


2023年9月24日，透過STEREO衛星的SECCHI/COR2日冕儀、SOHO衛星的LASCO/C2及LASCO/C3日冕儀觀測到4次的日冕物質拋射。虛線標示為不同次日冕物質拋射事件的前緣。實際且精確的前緣位置則是依據差分影像分析及graduated cylindrical shell（簡稱GCS）模型建構所得。影像來源：The Astrophysical Journal, 983:82/Alessandro Liberatore, Paulett C. Liewer, Manuela Temmer, Greta M. Cappello, Yara De Leo, and Paulo Pentead

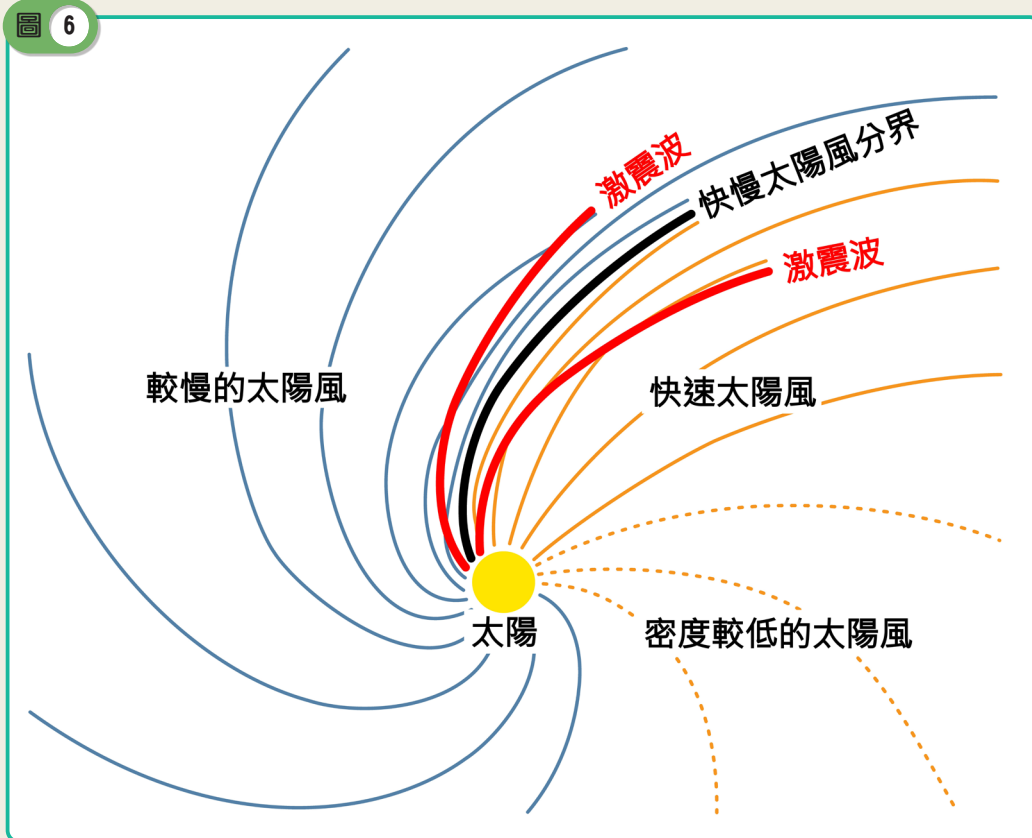


若日冕物質拋射爆發時朝向地球，將會直接影響地球的磁層，進而改變周遭的太空天氣狀況。底圖來源：ESA

除了日冕物質拋射之外，另一種會產生快速太陽風的來源為日冕洞 (coronal hole)，如圖5。當來自日冕洞的快速太陽風追趕上前方較慢的太陽風時，有可能會在行星際空間形成激震波，並加速當地的帶電粒子。這種快慢速太陽風交界的區域稱為共轉交互作用區 (corotating interaction region, 簡稱CIR)，如圖6。若地球遭受快速太陽風的襲擊，且伴隨南向的行星際磁場，將引發地球磁場的劇烈擾動，造成磁暴 (geomagnetic storm)、極光等現象。一般而言，在太陽活動平靜的時期，快速太陽風主要來自於日冕洞，而在太陽活躍時期，快速太陽風則多與日冕物質拋射相關。相比之下，行星際日冕物質拋射通常能引發較強的地磁擾動，對粒子的加速效應也較為顯著。

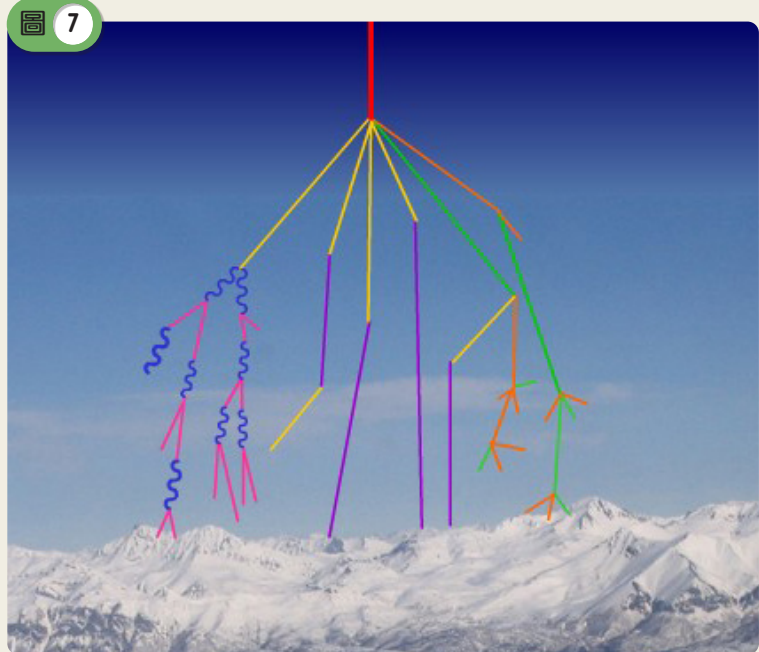


2023年12月02日，由SDO衛星AIA所拍攝的日冕洞影像，影像來源：NASA/SDO/AIA。



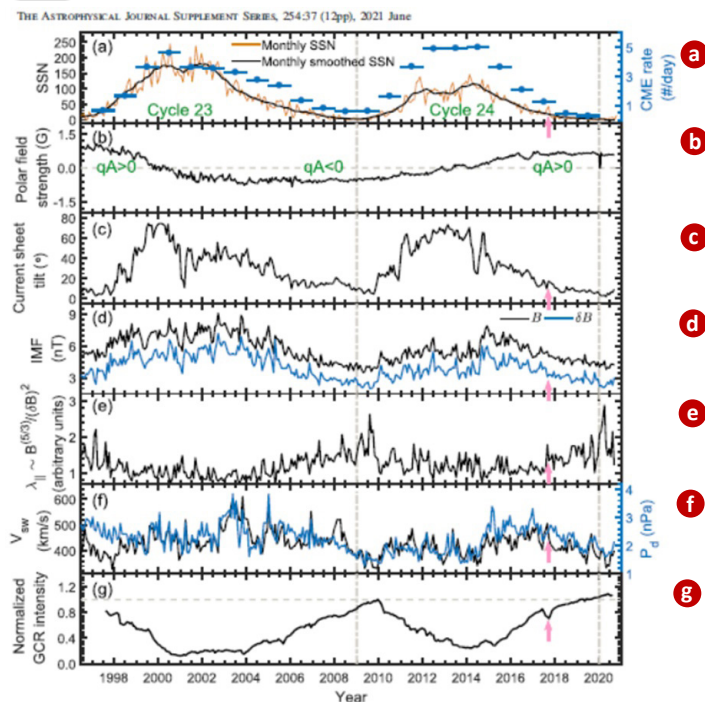
共轉交互作用區示意圖，介於兩個激震波之間的快、慢速太陽風交界區域，即為共轉作用交互區。圖片來源：The Heliospheric Magnetic Field

近地環境中偵測到的高能帶電粒子，主要來自太陽風暴所產生的太陽高能粒子，這些粒子包括電子、質子及重離子，之所以稱為高能，是因為這些粒子的能量遠高於一般太陽風電漿粒子。在討論太空天氣時，尤其關注高能質子的影響，因為它們可能對衛星電子設備及人體健康構成一定程度的風險與危害。此外，來自超新星爆炸的銀河宇宙射線（Galactic Cosmic Ray，簡稱GCR），也是近地環境中一個重要的高能粒子來源，當它們進入地球大氣層後，會與大氣原子碰撞產生次粒子，如中子與綑子等，如圖7，科學家可藉由觀測這些次粒子的通量變化，來分析宇宙射線強度的時間變化。長期地面觀測顯示，行星際日冕物質拋射能調節進入地表的銀河宇宙射線通量，推測應是特定的行星際磁場結構能有效限制這些高能粒子的運動，降低它們進入地球大氣層的機會。因此，在太陽活動較為活躍的時期，近地環境中偵測到的宇宙射線通量通常較低，反之則較高，如圖8。



當宇宙射線穿透並進入大氣層時，會與大氣中的分子發生碰撞，觸發所謂的「空氣簇射」現象。這些高能粒子與大氣分子相互作用後會發生崩解，並產生大量次原子粒子。在一次完整的簇射現象中，可能形成數以百萬計的粒子。示意圖中展現了空氣簇射現象的簡略過程，其中紅色線代表穿入大氣的宇宙射線，與大氣粒子碰撞後，產生多種次原子粒子，包含質子（綠色標示）、中子（橘色標示）、介子（黃色標示）、綑子（紫色標示）、光子（藍色標示），以及電子與正電子（粉紅色標示）等。圖片來源：NOAA/windows2universe.org

圖 8



此圖為1996年至2020年間，每27天平均的太陽風與行星際參數的變化。其中：**a** 為太陽黑子數與年度日冕物質拋射（CME）發生率，**e** 為69.4~237.9百萬電子伏特能量範圍內的銀河宇宙射線強度。可看出銀河宇宙射線強度和太陽黑子數呈現相反變化的趨勢，其中粉紅箭頭標示處即因日冕物質拋射影響，造成銀河宇宙射線強度降低。圖片來源：The Astrophysics Journal/Variations of the Galactic Cosmic Rays in the Recent Solar Cycles

## 影響效應

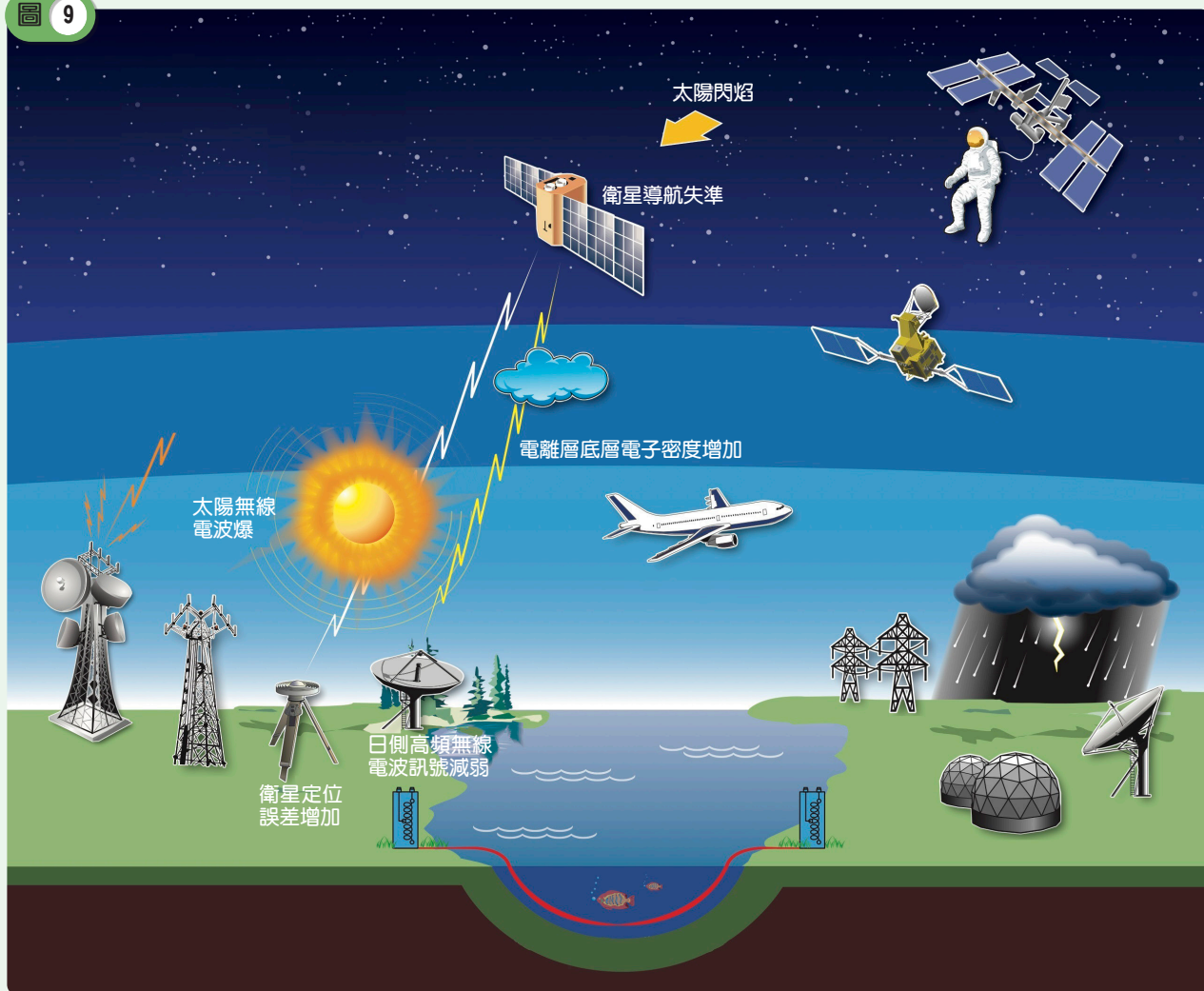
由於不同類型的太空天氣來源具有不同的本質特性，它們對地球的影響也存在著差異，因此預警時間與影響範圍的時空尺度皆不相同。為了提供有效且適切的太空天氣資訊，美國國家海洋暨大氣總署（National Oceanic and Atmospheric Administration，簡稱為NOAA）將太空天氣依其來源與性質分成三大類別：電磁波、高能帶電粒子與磁化電漿，分別對應於R、S、G三種指標，並根據相關的物理參數細分為1到5級，由輕微至極端不等。以下將逐一介紹各太空天氣指標對應的影響效應。

R指標代表Radio Blackout，為無線電通訊中

斷，好發於太陽閃焰期間的地球日側區域。當太陽閃焰爆發時，伴隨產生的X射線與極紫外線（extreme ultraviolet，簡稱EUV）僅需約八分鐘即可抵達地球，這些短波輻射會增加電離層中的游離度，使得日側電離層底層的電子密度增加，導致原本仰賴電離層傳播的高頻無線電波（3 MHz~30 MHz）訊號減弱，造成無線電通訊暫時中斷的現象，將影響航空、軍事與救援行動中的無線電連線。此外，在太陽閃焰期間，位於日側地區的全球衛星導航系統（Global Navigation Satellite System，簡稱GNSS）地面接收站也會受到影響。由於電離層電子濃度的變化，這些接收站可能無法接收到來自四顆以上衛星的訊號，進而發生定位與導航失準的情況。這類太空天氣效應通常持續數十分鐘至數小時之久，如圖9。

### 太空天氣：電磁波對地球的影響與威脅圖解

圖 9



示意圖中呈現因太陽閃焰所帶來的危害。底圖來源：NASA

由於R指標與伴隨閃焰產生的短波電磁輻射有關，因此以太陽閃焰強度作為分級量尺。目前主要以在地球同步軌道上運行的GOES (Geostationary Operational Environment Satellite) 衛星，如圖10、圖11，測得的1~8Å軟X射線通量峰值與時變曲線，來量化太陽閃焰的強度與起訖時間，閃焰強度由低至高依序為A、B、C、M、X級。舉例來說，若GOES衛星量測的1~8Å通量達到10~5 W/m<sup>2</sup>，表示有一個M1級的太陽閃焰正在發生，NOAA會將R指標定為R1，代表地球日側地區將有可能遭受高頻無線電

波通訊中斷，或是定位導航失準的情況。若GOES衛星偵測到M5級以下、M5~M9、X1~X9、X10~X19、X20級以上的太陽閃焰，則分別對應至R1、R2、R3、R4、R5，如圖12。

圖 10

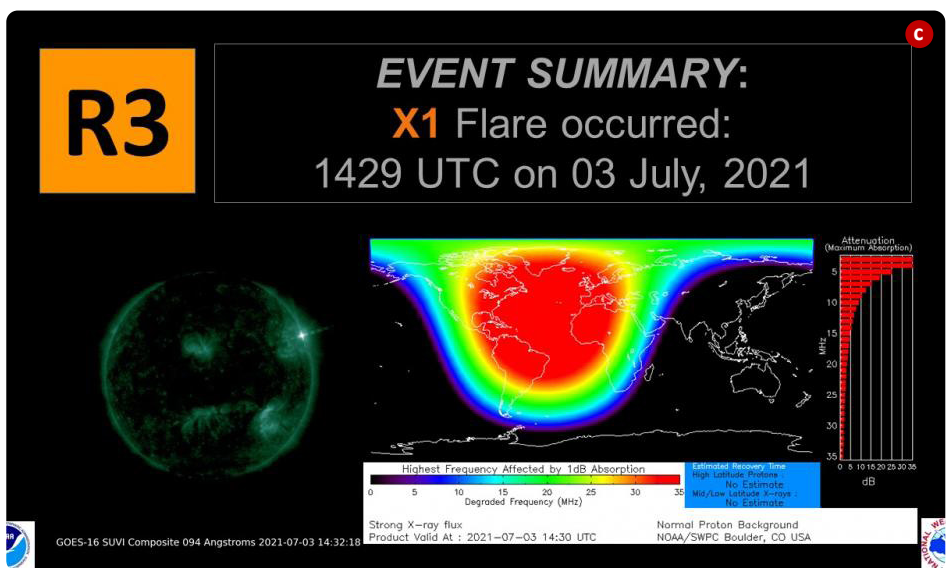
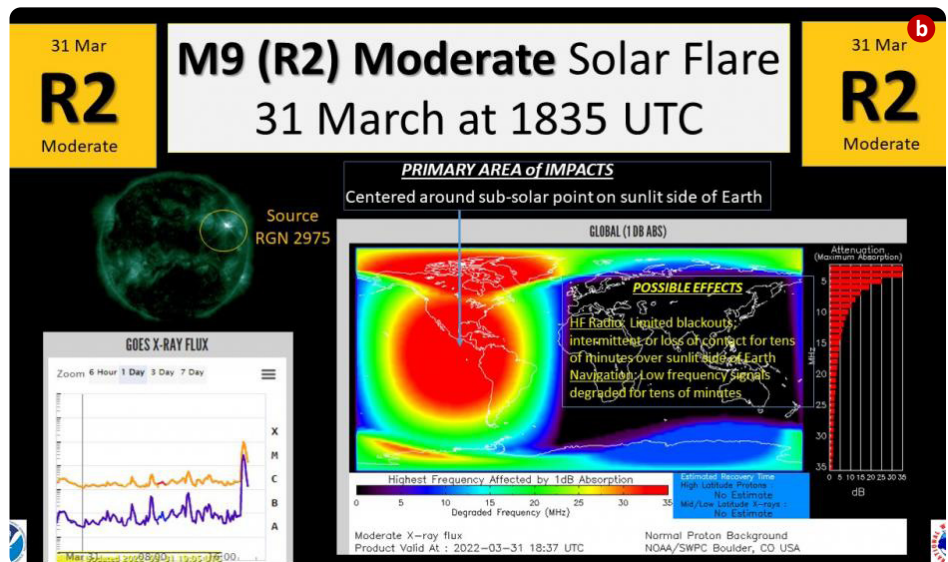
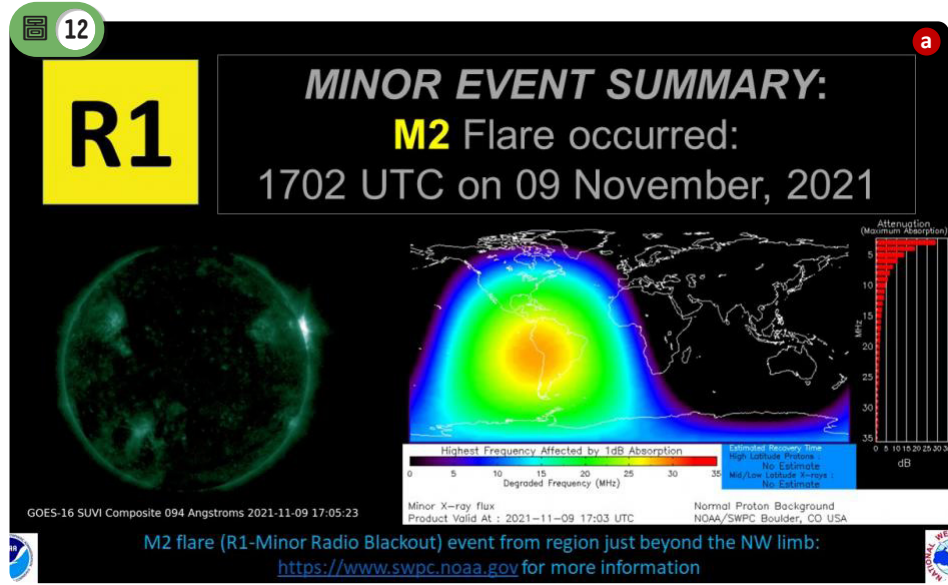


在洛克希德馬丁公司的利特爾頓無塵室內，GOES-R氣象衛星已組裝完成等待升空。影像來源：NOAA

圖 11



GOES氣象衛星除了監測與預測地球的天氣變化外，另一主要任務就是監測太陽閃焰的X射線輻射、太陽高能質子事件，以及地球磁層的磁場變化，對於危害地球的太空天氣現象提出預警。圖片來源：NOAA



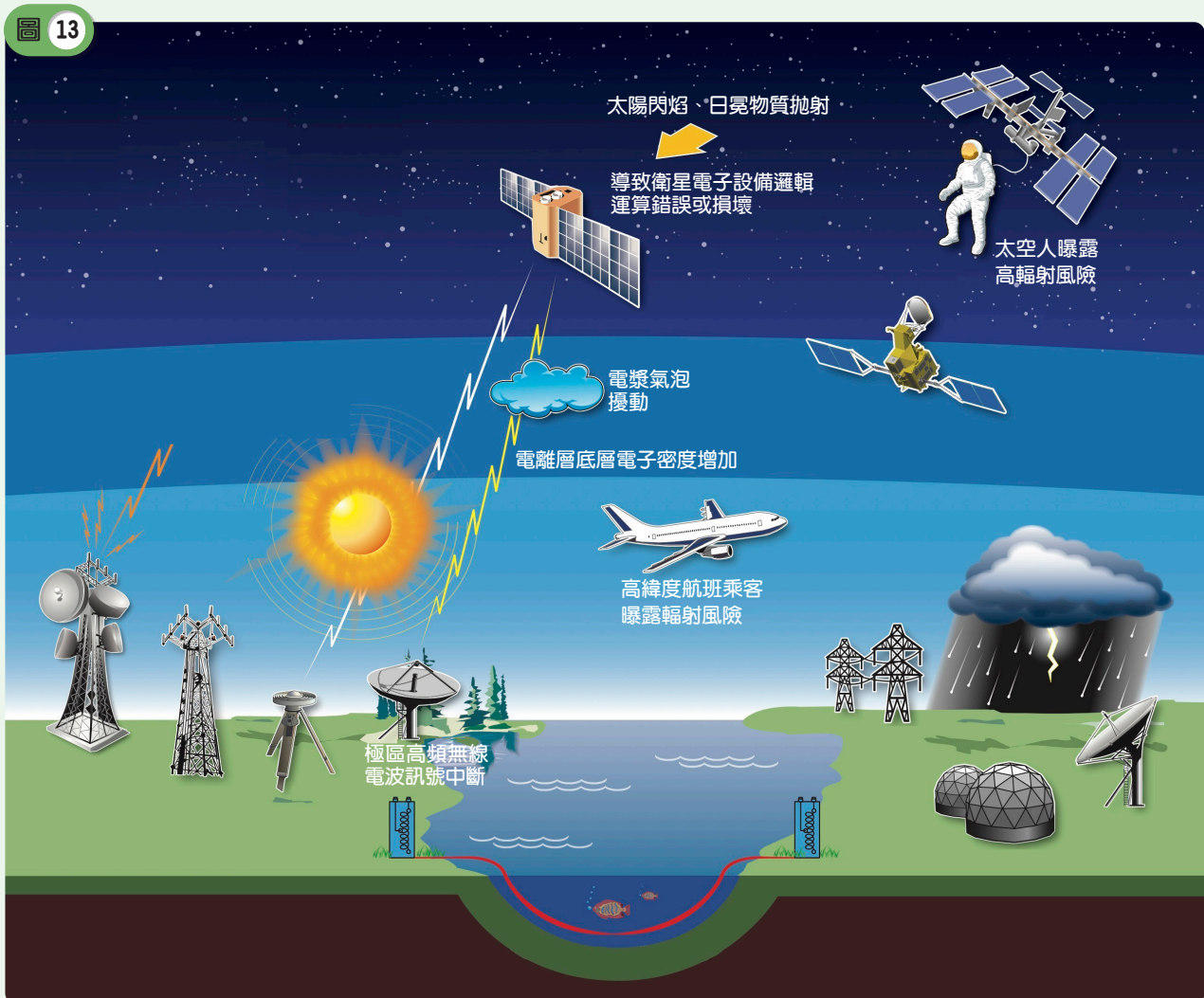
在美國國家海洋暨大氣總署網站中，分別對於電磁波、高能帶電粒子、磁化電漿所產生的太空天氣危害進行即時的監測、分析和預警，圖中展現的是對於不同等級R指標，分別為：**a** R1 (如:2021年11月9日的M2級太陽閃焰)、**b** R2 (如:2022年3月31日的M9級太陽閃焰)、**c** R3 (如:2021年7月3日的X1級太陽閃焰)的預警內容。影像來源：NOAA

NOAA使用代表Solar Radiation Storm的S指標，來量化太陽高能質子事件（solar proton event，簡稱SPE）所帶來的輻射威脅。這些質子通常在太陽閃焰或日冕物質拋射期間被加速，雖然它們速度不及光速，但也非常快，通常在太陽風暴發生數十分鐘內會衝擊地球。一旦這些高能質子沿著磁場進入地球兩極區域時，會增加極區電離層底層的電子密度，造成高頻無線電波訊號減弱，導致極區的高頻無線電通訊變得困難或完全中斷，這種現象稱為極冠吸收（Polar Cap Absorption，簡稱PCA）。此外，行經極區航班的乘客和機組人員，也可能會遭遇輻射風險。另一方面，高能質子還會對衛星及其他太空設備造成威脅，引發單粒子效應（Single Event

Effect，簡稱SEE），導致衛星上的電子元件發生故障，甚至可能造成永久性損害。對於在太空艙外執行任務的太空人而言，高能質子可能構成嚴重的輻射風險，如圖13。

當GOES衛星偵測到能量高於10 MeV的質子通量超過10 pfu時，即視為S1級，表示近地環境正遭受太陽高能質子的襲擊，影響時間可能持續數小時至數天不等。隨著質子通量每增加一個量級，S指標會繼續升高，代表太陽高能質子的威脅也越大。在太陽高能質子事件期間，太空人需避免進行艙外活動，衛星上的儀器可能需要暫停運作，極區的高頻無線電通訊可能會中斷，跨極航班也需考慮調整航線。

### 太空天氣：高能帶電粒子對地球的影響與威脅圖解



示意圖中呈現因太陽高能質子事件，例如日冕物質拋射所帶來的輻射威脅。底圖來源：NASA

太陽風電漿與行星際磁場的影響則以指標G表示，代表Geomagnetic Storm。簡單來說，磁暴為地球磁層磁場與行星際磁場作用後所引發的地磁擾動現象，持續時間約三天到一個多星期。相較於典型的太陽風，引發磁暴的太陽風結構通常太陽風速度較快、電漿密度較高，且其行星際磁場中的南向分量較強，數天內可從太陽傳播到地球。若衛星利用地球磁場進行姿態校正或控制，地磁的劇烈變動將增加衛星姿態定位的困難，可能導致衛星暫時性甚或永久性失聯。此外，磁場的快速變化會產生感應電流，這些磁暴感應電流（Geomagnetically Induced Current，簡稱GIC）會影響地面的電力系

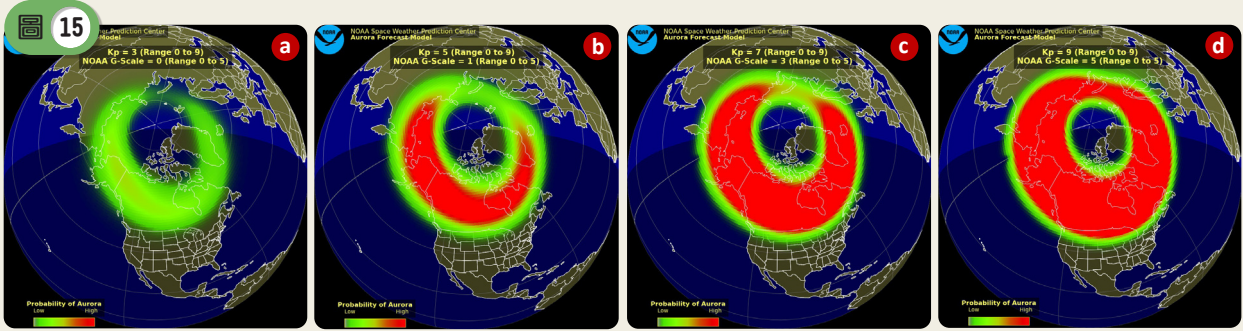
統，造成輸供電異常，甚至在磁暴期間，強大的瞬時電流還有可能損壞電力設施中的變壓器，進而導致大規模停電，如圖14。

為了評估太陽風結構對近地環境的影響程度，G指標以地磁指數Kp作為分級量尺。Kp指數描述全球綜觀的地表磁場擾動情形，並且經常用來預測極光的可見範圍。Kp值範圍為0到9，每三小時更新一次，Kp值越高，表示地磁擾動越強，極光的可見範圍會向越低緯度地區擴展。當Kp值達5時，NOAA會將G指標定為G1，表示地球磁層正處於明顯的擾動狀態，衛星姿態定位及地面電力系統可能會受到影響，在高緯度地區有機會看到極光。Kp值6以下、Kp值6、7、8、9則分別對應於G1、G2、G3、G4、G5，表示地球磁層的擾動情形與影響範圍也越劇烈，如圖15、圖16。

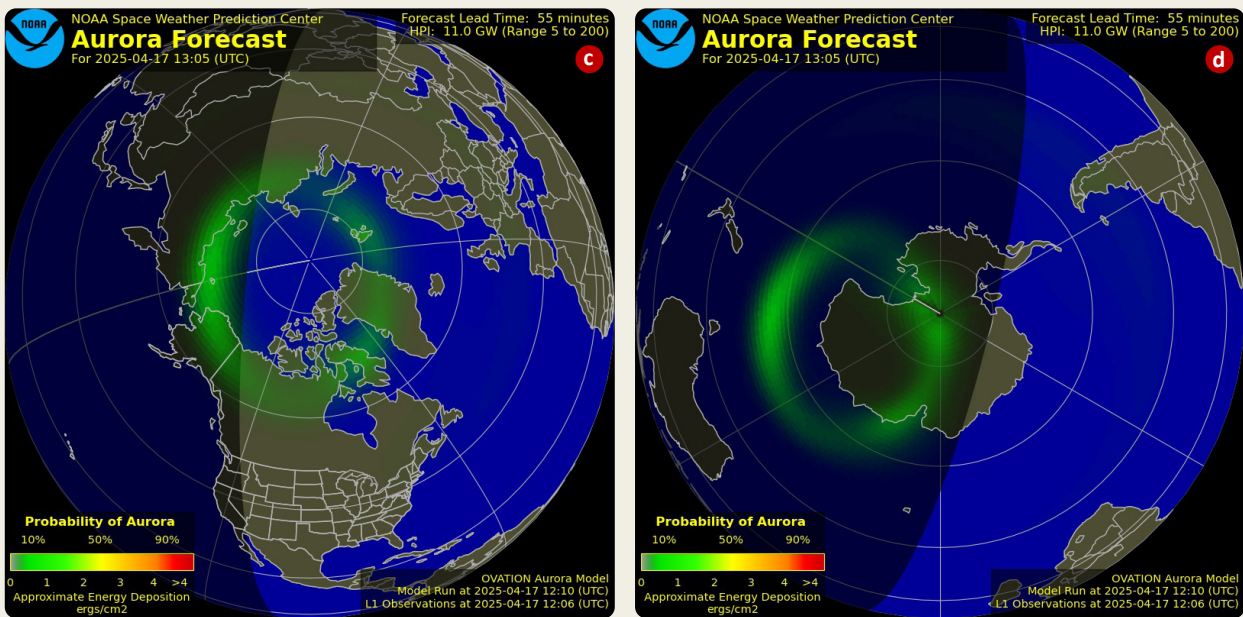
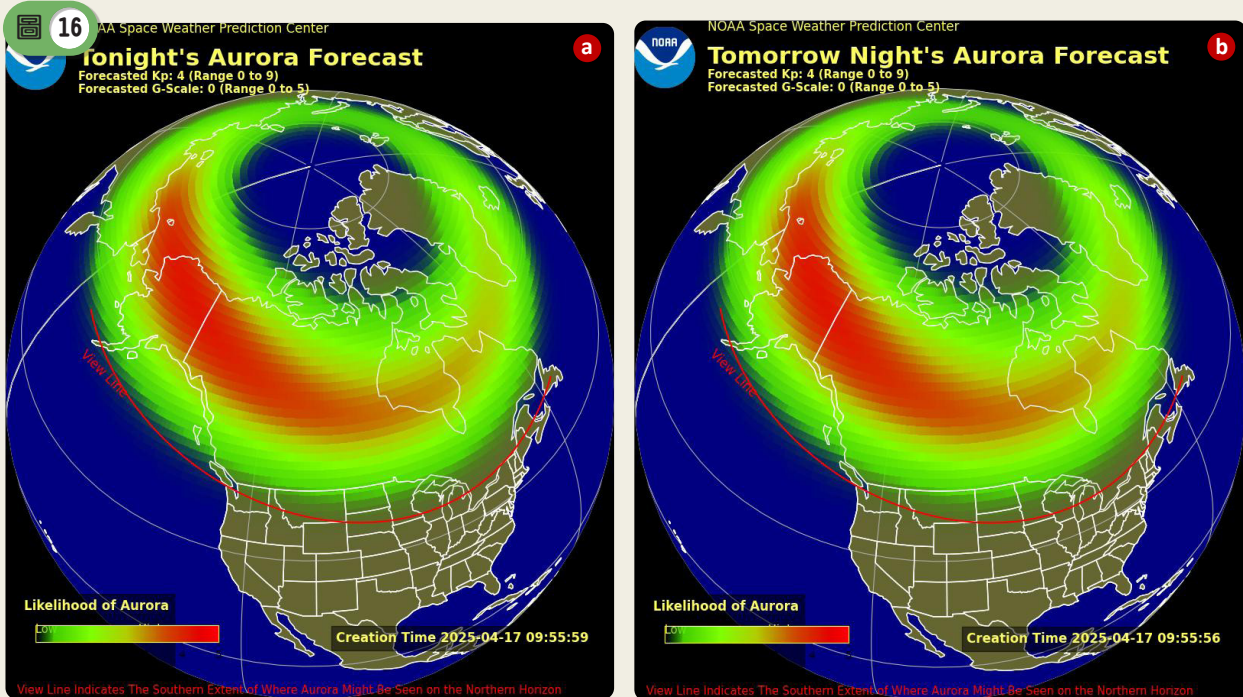
### 太空天氣：磁化電漿對地球的影響與威脅圖解



示意圖中呈現因太陽風電漿、行星際磁場影響所帶來的威脅。底圖來源：NASA



上圖是Kp值分別為：**a** 3、**b** 5、**c** 7、**d** 9的極光可見區域範圍與出現機率示意圖。影像來源：NOAA

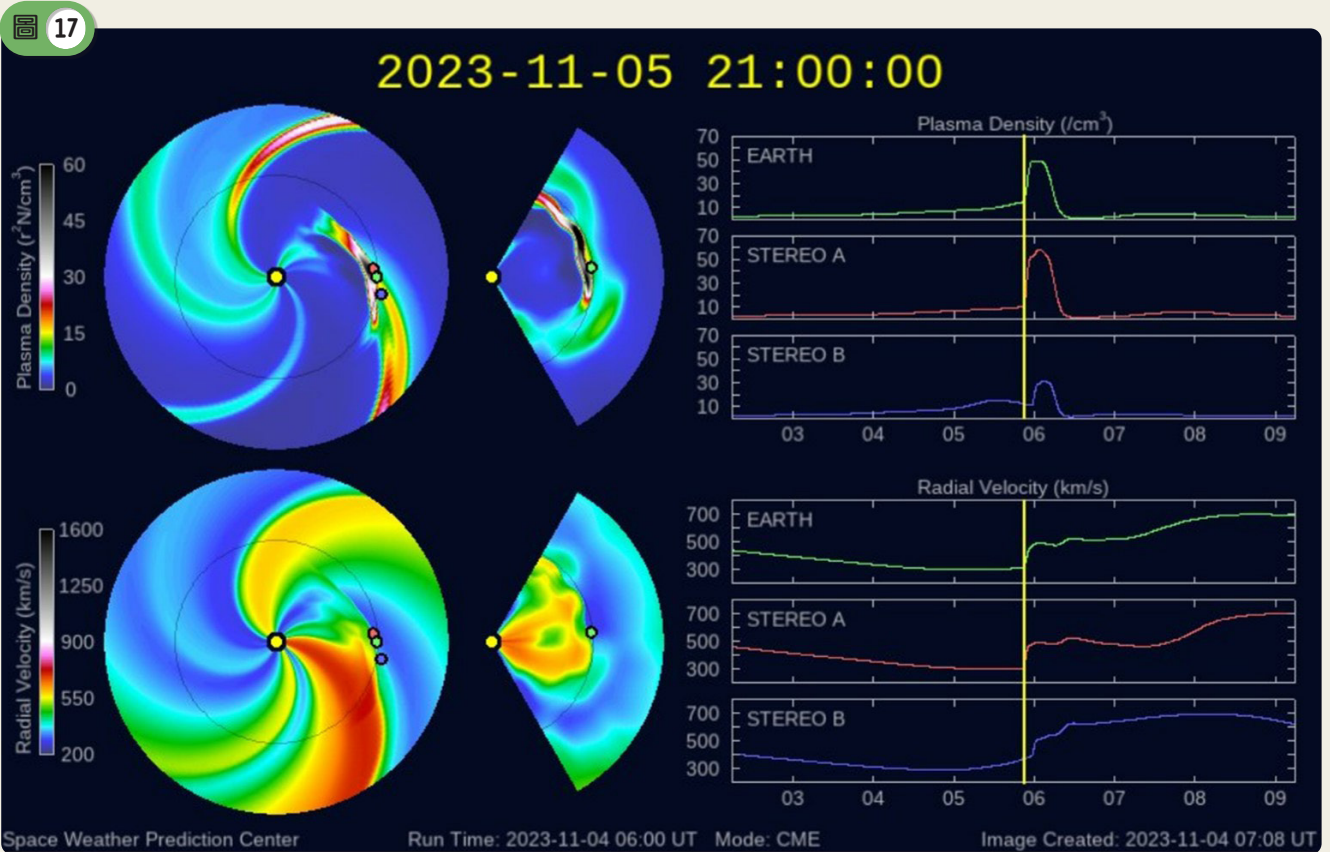


上圖為2025年4月17日的極光預報，其中**a**為當晚的極光可見區域範圍與出現機率，**b**為隔日晚上的極光可見範圍與出現機率，**c**為北半球約1小時後的極光出現機率，**d**為南半球約1小時後的極光出現機率。影像來源：NOAA

## 預警

太空天氣對近地環境的影響，雖然可以分為電磁波輻射、高能粒子以及太陽風這三大類，但實際上，這些效應並非各自獨立，而是彼此密切相關。舉例來說，當太陽爆發M級以上的太陽閃焰時，往往也會伴隨日冕物質拋射事件，導致地球先後遭遇不同層面的影響。然而，僅靠衛星在地球磁層或電離層中的現地觀測資料，或是地面監測數據，並不足以在有限的時間內預測太空天氣的發展，更難以即時發出預警。因此，科學家必須透過理論模型或經驗公式，來提前預測太空天氣的動態。

為了爭取更多的預警時間，太陽影像遂提供有用的參考資訊。預測模式可綜合分析多項來自太陽的關鍵參數，包括：太陽磁場的分布、太陽閃焰的強度與爆發位置、日冕物質拋射的位置、速度、方向與範圍等。透過這些資訊，科學家可以估算高能粒子對地球可能造成的衝擊，以及模擬太陽風結構抵達地球的時間與可能的影響強度，如圖17。這些預測工具的應用，讓我們有機會事先掌握太空天氣對地球可能造成的影響，進而提供相關單位預警資訊，及時採取適當的應對措施，減少太空天氣對地球環境與現代科技設施（如衛星、通訊、電力系統等）所帶來的潛在威脅。



WSA-ENLIL太陽風模式預警案例。影像來源：NOAA/SWPC

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