

在接近真空的太空裡，也有天氣現象嗎？有的喔！而且氣象局網站上還有太空天氣的每日預報。太空天氣看似離日常生活很遙遠，然而在科技時代，不管是即時的天氣預報或Google Map導航等，都需要衛星的協助。而生活在太空中的衛星就和太空人一樣會受太空天氣影響。今年2月SpaceX發射的星鏈衛星，就因太空天氣變化使空氣阻力增加，雖調整衛星飛行姿態以降低阻力，仍不幸墜毀，推估造成數千萬美元的損失。太空天氣的影響也能透過地球的電離層和磁場觸及地表，例如在1989年加拿大魁北克省曾因太陽風暴造成大停電，數百萬人在寒冷的冬天陷入一片黑暗；在大型賽鴿比賽前，美國的空天天氣預報中心會接到許多諮詢電話，擔心愛鴿因太空天氣變化而迷路。

走進展場一樓的太空探險區，偶爾發出亮光的閃光箱，與太陽風螢幕裡活躍的太陽表面，這兩個展項介紹了影響太空天氣的兩位主角——太陽風和宇宙射線（圖1）。本篇先介紹太陽風如何影響太空天氣。

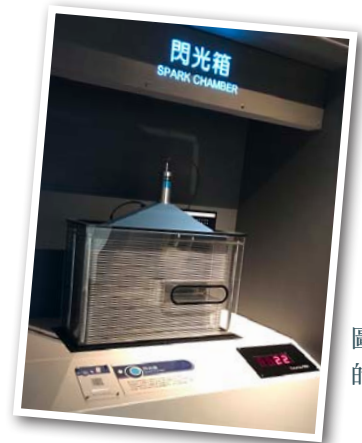
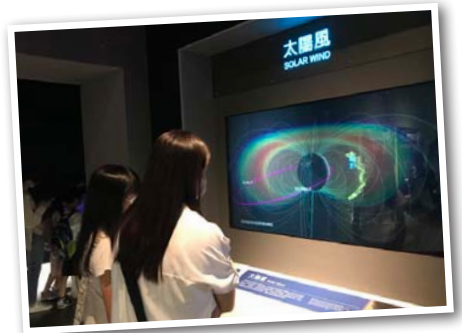
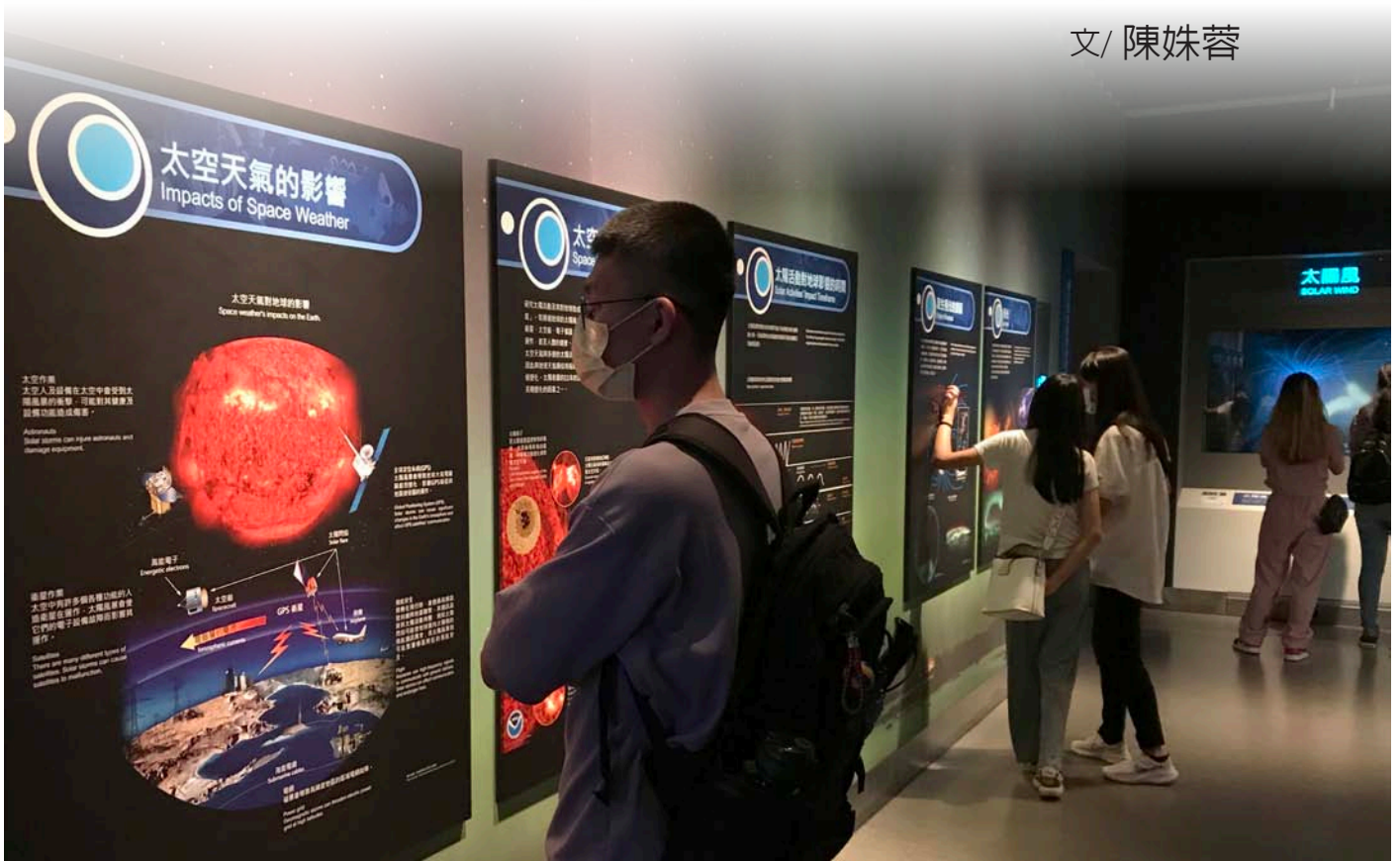


圖1. 影響太空天氣的兩位主角。

太空也要報天氣（上）

文/ 陳姝蓉



太陽風

太陽風的展項中是太陽動力學天文臺（Solar Dynamics Observatory, SDO）在太空中透過濾鏡拍攝的太陽影像（圖2、圖3）。太陽大氣分為3層，由內而外依序是光球、色球和日冕。平時見到的是光球，而色球和日冕相對光球黯淡，只在光球被遮擋（日全食或利用日冕儀）時才能看見。右圖中紅色為色球（約5萬度）、黃銅色是日冕較熱的區域（約1百萬度）、而藍綠色是閃焰區域（約1千8百萬度）；炙熱的氣體（電漿）會帶著磁場移動，除了勾勒出磁場的樣貌外，也形塑其形態（延伸、扭曲和重聯）等。

太陽不斷放送各種光和物質，影響著太空天氣。其源源不絕的活力來自核心的核融合，能量先是由光傳遞，再由熱對流接力，使表面有如沸騰水面（稱作米粒組織），再搭配磁場的推波助瀾，形成右圖中活躍的太陽表面。太陽的最外層是高達百萬度的日冕，是由氫、氦原子核和電子組成的電漿，快速移動的粒子容易掙脫引力束縛，成為吹拂到太陽系各角落的太陽風。

1943年Cuno Hoffmeister和Ludwig Biermann觀察到彗尾總是背對太陽，認為除了陽光外太陽還會釋放粒子來推動彗星。1958年Eugene Parker用理論模型預測太陽風的存在，並在隨後由蘇聯的Luna 1和美國的Mariner 2太空船證實。太陽每秒約拋出1百萬噸的物質，其速度介於每秒200~800公里間。其中高速太陽風源自



圖2. 太陽活躍的大氣，圖中可見到磁場帶著電漿突出太陽表面的「日珥」。



圖3. 太陽動力學天文臺在不同波段（溫度）拍攝的太陽大氣，炙熱的電漿勾勒出磁場結構，圖中較亮的區域常是太陽黑子所在之處，因影像不在可見光範圍，故顏色皆為後製。

南北兩極的冕洞區，因其磁力線向星際延伸，讓物質順著磁場逃離，形成紫外光和X光影像中黑色的冕洞。

然而，太陽風的影響不是來自「風」而是磁場，稀薄的太陽風連弄亂頭髮都有困難。幸好地球如防護罩般的磁場會抵擋其攻擊，雖只有少部分粒子入侵，但兩磁場的對決仍會使地磁劇烈變化，並對衛星、電力和通訊系統等造成威脅。

閃焰與日冕巨量噴發

黑子是太陽盤面上因溫度較低而較暗的區域，中等大小的黑子約和地球一樣大（圖4）。1908

年天文學家George Hale發現太陽黑子的磁場較強，成為了解太陽活動的關鍵。黑子是磁場突出太陽表面留下的腳印，因強磁場阻礙下方的熱往表面流，形成溫度較低因而較暗的區域。然而，在紫外光或其他較短波長的太陽影像中，較亮、較活躍的區域常是黑子所在之處。

黑子群是閃焰或日冕巨量噴發等太陽風暴的產地，當突出表面的磁場（帶著電漿）因彼此方向不同而抵銷（重聯）時，會如同爆炸般釋放大量能量，並伴隨閃焰或是日冕巨量噴發。閃焰是太陽表面的短暫閃光，光涵蓋各種波段並挾帶著接近光速的高能量粒子，約八分鐘就抵達地球。

閃焰常伴隨著更具破壞力的日冕巨量噴發，噴出的大量物質假如朝向地球約3~4天就可抵達。

1859年Richard Carrington和Richard Hodgson在黑子群附近見到閃光，這是閃焰的第一個紀錄。在18小時後日冕巨量噴發抵達地球，除了讓極光延伸到低緯度的墨西哥和非洲外，也引發強烈的地磁風暴。電報線路因地磁劇烈變動產生很高的電流，導致電報系統故障、電塔發出火花，甚至在關閉電源的情況下，電報員還可依靠此電流通話。這也是首次將太陽活動與地磁風暴連結起來。

太空天氣對地球磁場的影響

地球磁場會阻擋來自太陽風的帶電粒子，其守備範圍稱作磁層，其大小和形狀會隨著兩者勢力消長而改變。當太陽風吹向地球，迎風面（白天側）的磁層會被擠壓，而夜晚側則往外延伸形成磁尾，產生如彗星狀的磁層（如圖5）。

然而磁層的防護並非滴水不漏，仍有幾個開口能讓太陽風進入地球磁層，例如地磁南北極如漏斗狀的極尖區（polar cusp），兩者的磁力線會在此相接，因此太陽風粒子會沿著磁力線進入磁層。

極光

極光的產生與穿過磁層的粒子有關。假如太陽風挾帶的磁場與地球磁場相反，在兩者靠近時磁場會抵消、磁力線會重聯，這讓地球磁場宛如被撥開的洋蔥（如圖5的迎風面），並讓粒子有機會順著磁



圖4. 本館拍攝的太陽盤面，可見上方有許多黑子群，右下角的地球為比例尺。

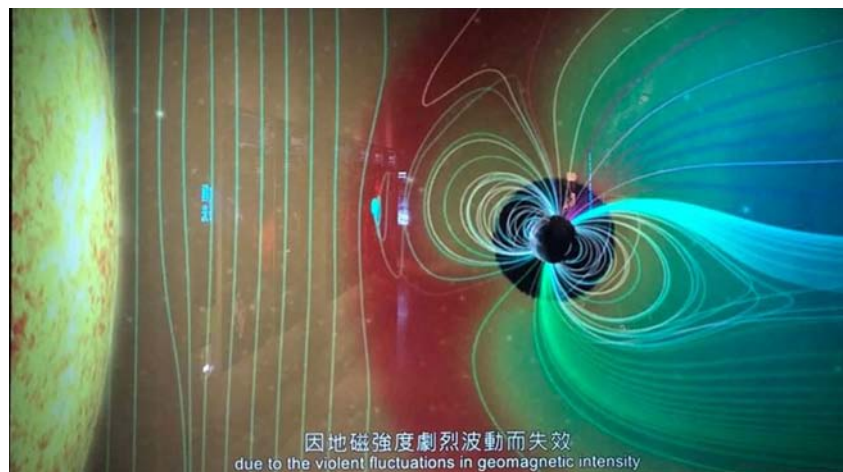


圖5. 展項中的影片是太陽風與地球磁場角力過程的模擬，其中線條代表磁場而顏色則代表粒子數量。迎風面兩軍勢力以磁層頂為分界（紅色：粒子多），而向外延伸的是磁尾（藍色：粒子少）。

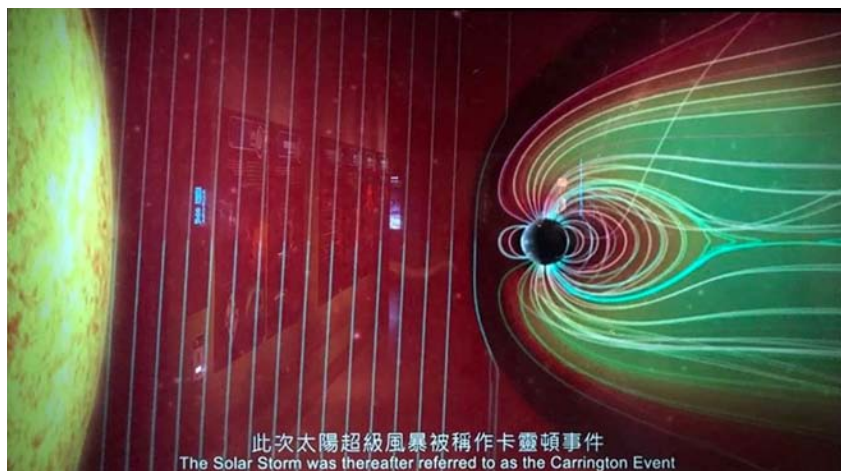
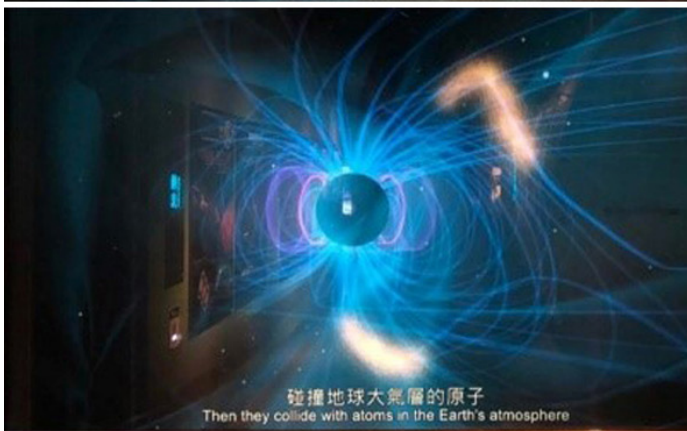
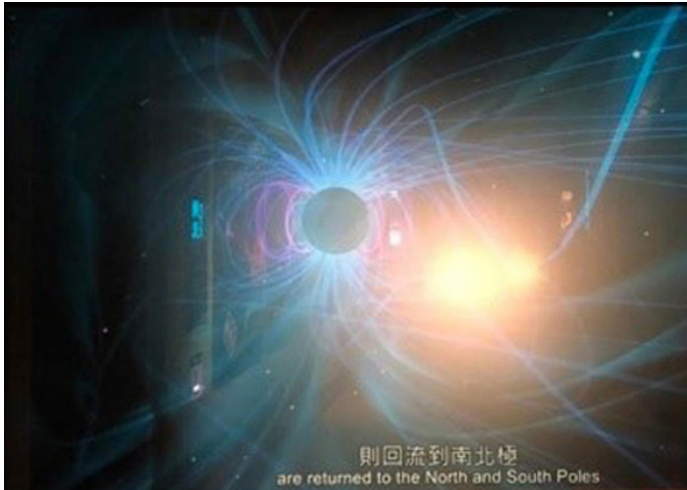


圖6. 這是1859年卡靈頓事件的模擬，可見到磁層改變非常明顯，磁層頂累積更多電漿且非常靠近地球。



場進入高層大氣，形成白天側的極光。部分粒子則被帶往磁尾儲存，當磁層改變或磁尾發生磁重聯時（如圖7：磁場如拉長的彈弓會在重聯後將儲存的能量釋放出來，並將粒子拋向地球），粒子會沿著磁場移動到極區形成夜晚側的極光。這裡描述的僅是產生極光的其中一種方式。

極光發生在離地約80~250公里的電離層內，其發光機制與霓虹燈類似。高速撞進大氣的電子會將能量分給沿途遇到的原子或分子，直到能量用罄。獲得額外能量激發的原子或分子，會在回到穩定態時放出光，這就是極光。

每種原子和分子都有自己獨特的光譜，就跟指紋一樣。決定極光顏色的因素與氣體分布（較重的氣體分布的海拔較低）和密度，以及撞進大氣的電子能量等有關。在離地250公里左右的紅色極光是氧原子發出的，而常見的綠色極光是由離地約100~250公里的氧原子所發出。偶爾會在極光下緣見到粉紅色、暗紅色或藍色的條紋，這是由離地100公里左右的氮分子所發出。極光是由太陽風與行星的大氣和磁場交互作用所產生，因此木星、土星上也有極光（見圖8、9）。

極光模擬器中使用幫浦降低內部氣壓（以

圖7. 圖為太陽風展項中演示的夜側極光產生過程。當磁尾的不同方向磁場靠近重聯時（上），釋放出的能量會將帶電粒子往地球拋（中），粒子沿著磁力線移動到極圈附近，撞擊大氣產生極光（下）。



圖8. 哈伯望遠鏡拍攝的土星環和雲帶（可見光）與極光（紫外線）合成影像。圖片來源：NASA, ESA, Hubble, OPAL Program, J. DePasquale (STScI), L. Lamy (Obs. Paris)

模擬高空狀況），並利用電子模擬太陽風。電子經過電壓加速後會撞擊選按的氣體使其發光，展示窗中央是模擬地球，按鈕可調整極區磁場強弱，可選擇不同的氣體來觀察顏色變化。

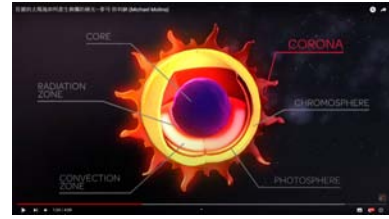
參考資料：NASA（Solar Storm and Space Weather - Frequently Asked Questions、Scientists Recreate Earth's Northern Lights）、SDO & SpaceWeather、SDO Guide、一探太空中的風火雷電 李奕德、太空教室學習資料庫 呂凌霄

陳姝蓉：臺北市立天文科學教育館



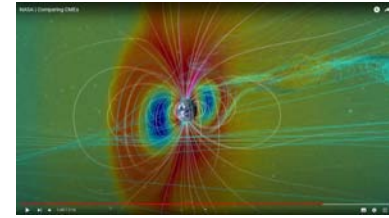
圖9. 哈伯望遠鏡拍攝的木星影像（可見光）與極光（紫外光）。
圖片來源：NASA, ESA and J. Nichols（University of Leicester）

YouTube相關影片：



壯麗的太陽風如何產生絢爛的極光—麥可·莫利納（Michael Molina）

https://www.youtube.com/watch?v=czMh3BnHFHQ&list=PLJ8E8c-HgjwwX_etTMgR40NhA6BXbtRnu&index=15



NASA | Comparing CMEs

https://www.youtube.com/watch?v=cLLq6plMjU0&list=PLJ8E8c-HgjwwX_etTMgR40NhA6BXbtRnu&index=14

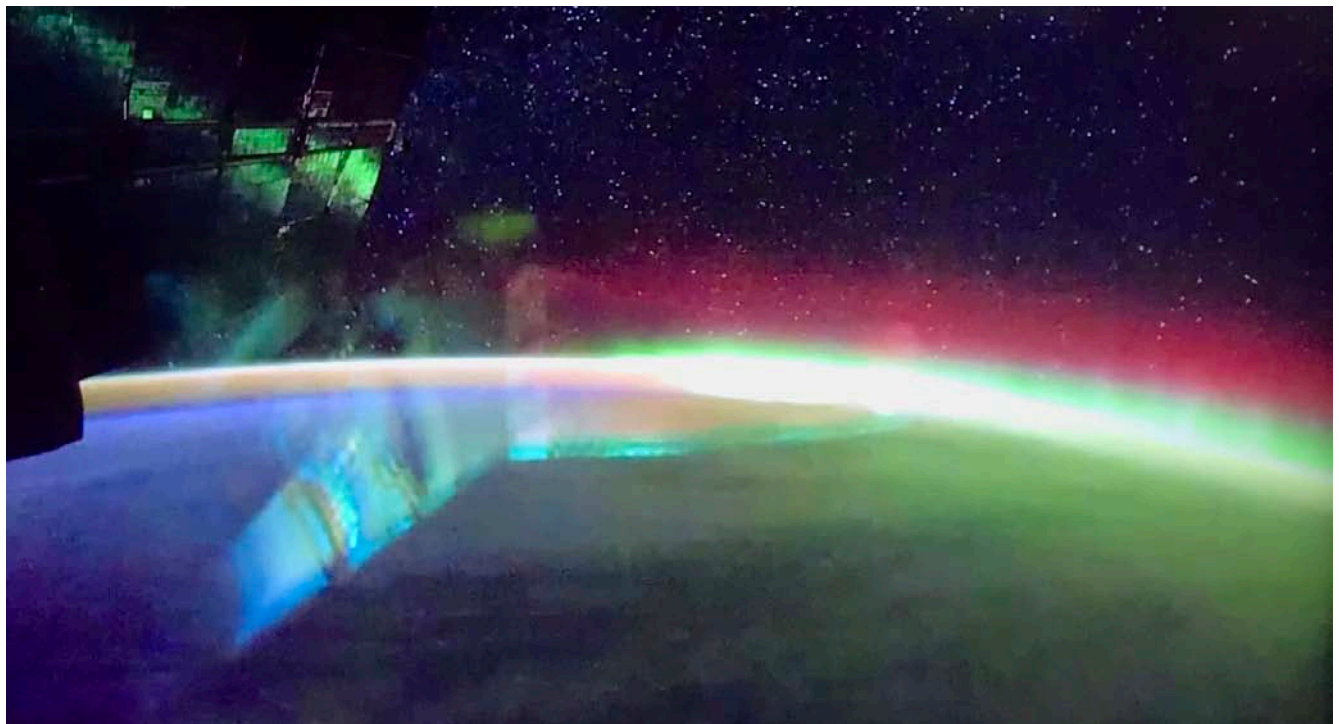


圖10. 展項的影片中可見到國際太空站上所拍攝的極光，圖中左側太空站下方黃色光芒來自大氣反射陽光。