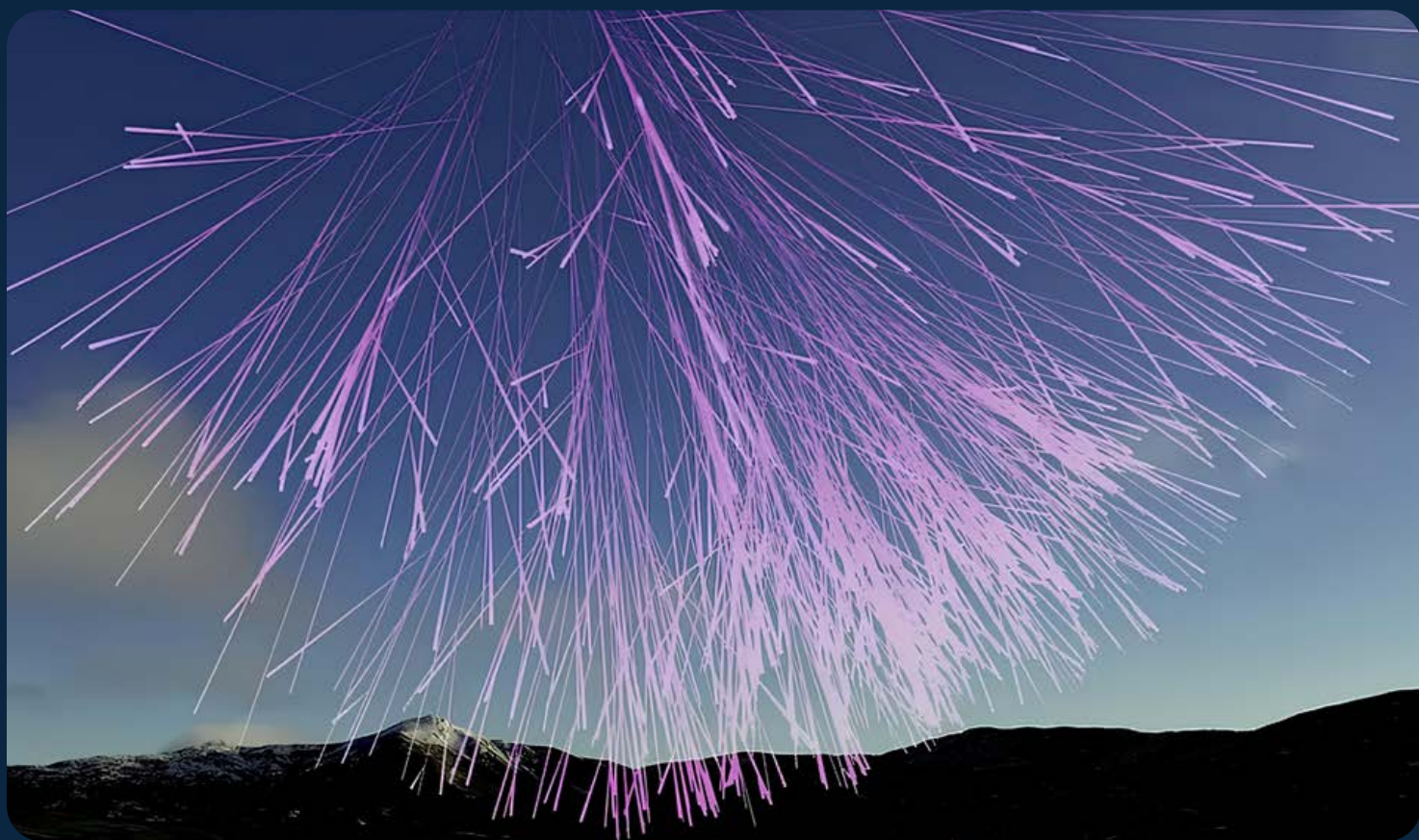


文／許晉翊

當我們前往高緯度國家，在凜冽刺骨的寒風中仰望天空，看見極光在天幕上如精靈般舞動時，很難不為這場自然的燈光秀感到讚嘆。但你是否曾想過，這道來自高空的光芒帷幕，其實與遙遠宇宙中的高能粒子、我們腳下的地球磁場，甚至天文館展示場裡的一個神祕裝置—「閃光箱」，都有密切的關聯？本期我們將透過館內的展示設施，深入探索極光、太陽風與宇宙射線的科學奧祕，一同揭開它們彼此之間精彩又奇妙的連結。



在此示意圖中，展現當高能宇宙射線粒子進入地球大氣層時，會與大氣分子發生碰撞，而這些粒子在與大氣分子作用後會崩解，進而產生大量次原子粒子，在一次完整的崩解過程中或許能產生多達數百萬個粒子。圖片來源：NASA

### 太陽系外的來客—宇宙射線

宇宙射線（Cosmic Rays）是一種肉眼看不見、速度極快、能量極高的帶電粒子。它們不只來自太

陽，也來自我們銀河系甚至更遙遠的宇宙，依據其來源，宇宙射線大致可分為兩類：初級宇宙射線及次級宇宙射線。

初級宇宙射線：這類粒子來自恆星，可能源於太陽系外的超新星爆炸、活躍星系核甚至伽瑪射線暴，以及我們自己的太陽，都是屬於發射源本質，因此位列為初級。其中超新星爆炸，如圖1、活躍星系核及伽瑪射線暴所產生的宇宙射線主要成分包括質子（約90%）、 $\alpha$  粒子（約9%）以及少量的重元素原子核與電子，它們以99.9%的光速在宇宙間穿梭；剩下的初級宇宙射線則是太陽發出的，我們將其列為次分類，稱之為太陽宇宙射線，這類粒子來自太陽的爆發活動，例如太陽閃焰或日冕物質拋射（Coronal Mass Ejection），能量雖然較低，但仍具有相當威力。

相較於初級宇宙射線的發射源之外，當初級粒子撞入地球大氣層時，會與大氣分子發生激烈碰撞，產生如繃子（muon）和 $\pi$  介子（pion）等次級粒子，其中有些甚至能穿透地表，這些由初級粒子與地球交互作用所產生的次級粒子，就稱為次級宇宙射線，如圖2。既然這些肉眼看不見的粒子，又如何證明它們的存在呢？答案就藏在天文館一樓的展示品中——閃光箱。

圖 1



超新星爆炸會釋放出大量的高能宇宙射線粒子，而部分粒子能夠跨越遙遠的距離，抵達地球和大氣中的分子相互碰撞。圖片來源：ESO

圖 2

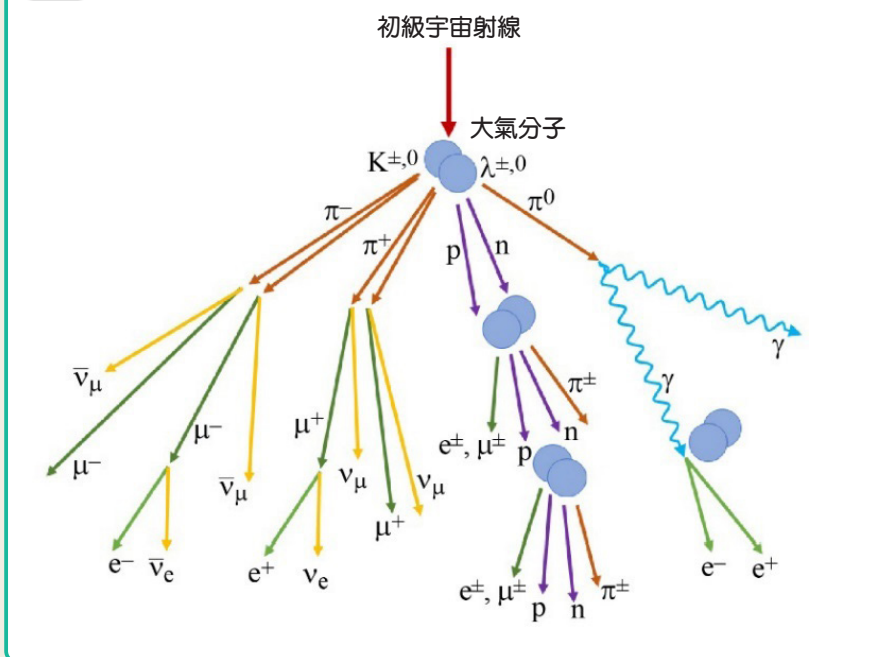


圖1的宇宙射線來自於恆星，都屬於初級宇宙射線之一。當初級宇宙射線粒子進入大氣與分子碰撞時，粒子會崩解產生大量次級粒子。圖片來源：cosmicray.com.au, Robert Hart

## 讓看不見變得可見 —閃光箱

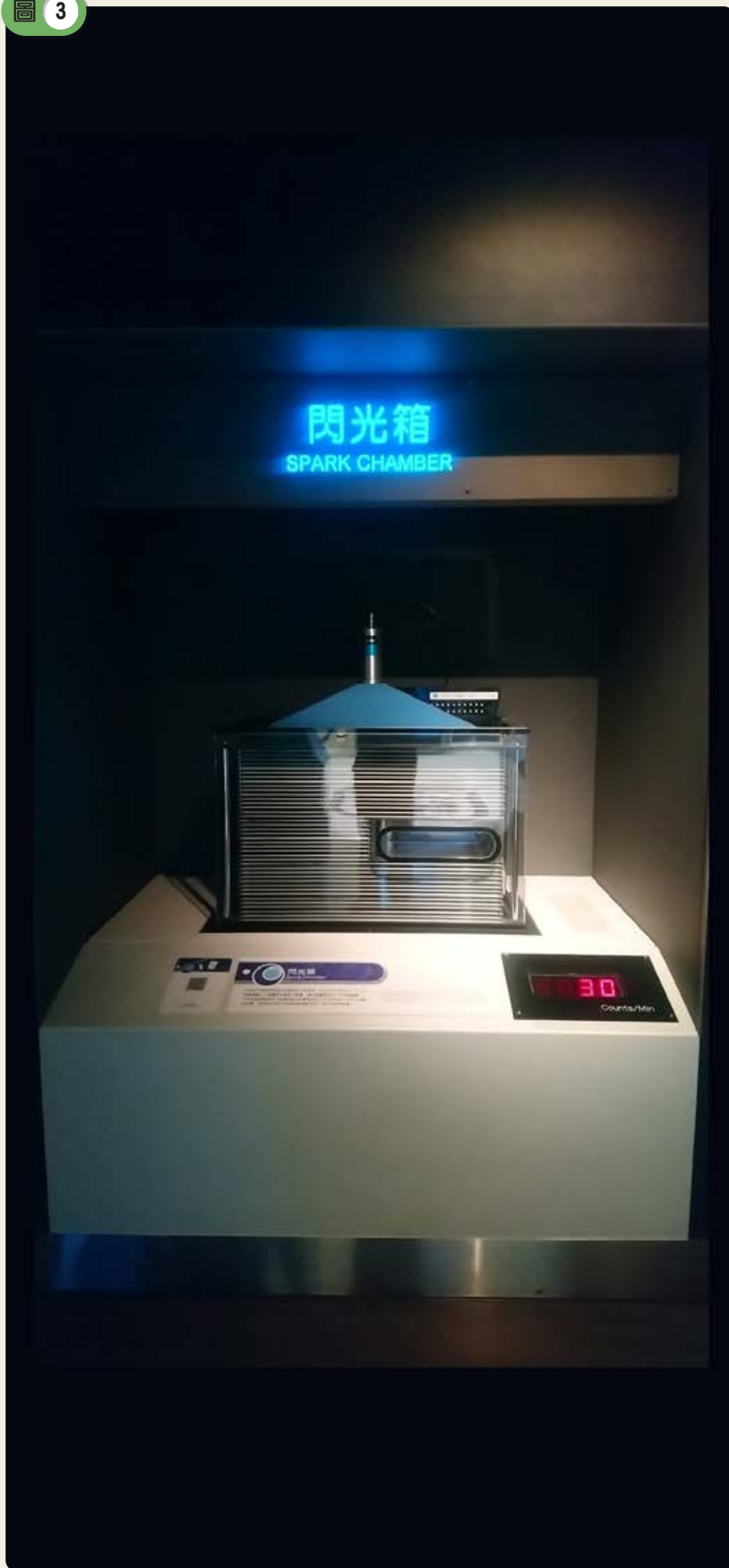
走進展示場一樓，你會看見一個正在發光、伴隨著高分貝的蜂鳴器並有著神秘物質依循軌跡穿越其中的裝置—那就是閃光箱，一種特殊的粒子觀察裝置，如圖3。

閃光箱的原理類似於雲霧室，但以更穩定且高解析度的方式呈現，箱中利用數片金屬板組成，並於其中灌滿氦氣，當宇宙射線等高能帶電粒子穿越其中，會使氣體電離並在軌跡上產生可見光。你可以看到一條條光線閃現，這正是繃子等次級宇宙射線穿越裝置時留下的痕跡。

每分鐘約有20到40顆粒子穿越館內的閃光箱，這些大多來自太陽系外的初級宇宙射線，也有部分屬於經過地球大氣層交互作用後的次級宇宙射線。在高精密設計的閃光箱裡，科學家甚至可以從軌跡的粗細、長度與角度推測出粒子的種類與能量，因此這不只是一項展示，還是一場即時進行的宇宙實驗！

在如前頁圖2的崩解過程最後階段，有少數次級粒子能夠到達地表，當這些粒子穿過閃光箱中的氦氣，和分子碰撞後呈現出發光軌跡。

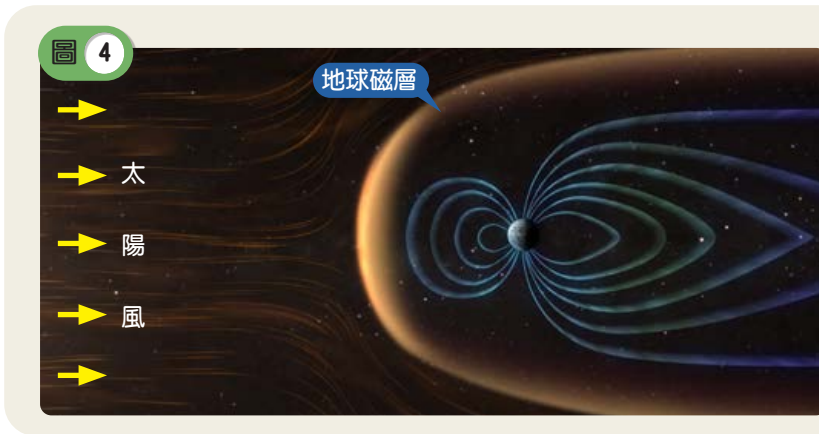
圖 3



## 來自太陽的物質—太陽風

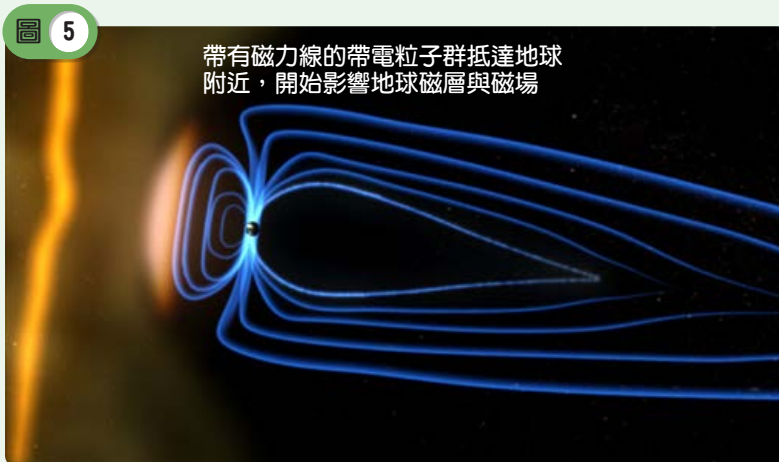
除了來自遙遠宇宙的粒子，太陽本身也會不斷釋放高能粒子流，這就是所謂的「太陽風」(Solar Wind)，如圖4。太陽風主要由電子、質子及少量氦核與重離子組成，其速度介於每秒300至800公里之間。當太陽活動劇烈，例如：發生太陽閃焰或日冕

物質拋射時，如圖5~圖8，太陽風的強度與速度都會飆升，對地球產生深遠影響。地球的磁場會像保護罩一般，導引大部分太陽風偏離地球表面，而少數無法被偏離的帶電粒子，也會被大氣層給阻攔在外。當前面那些已被偏折的帶電粒子進入極區，沿著磁力線以束狀撞進大氣，就會產生一場美麗的邂逅——極光。



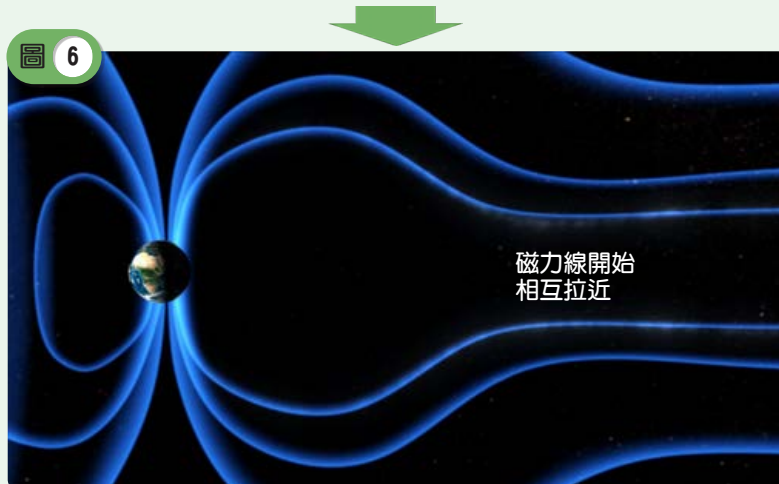
太陽風會影響地球磁層，進而改變地球周遭磁場的狀況。圖片來源：NASA

### 日冕物質拋射：引發磁重聯現象與強烈極光的圖解



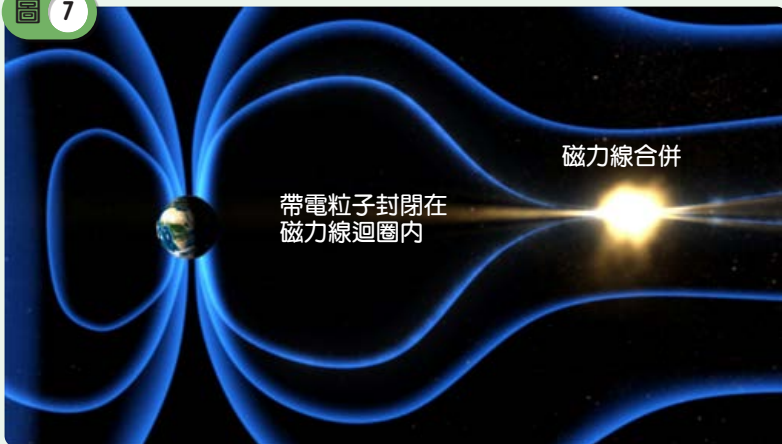
當太陽帶電粒子群抵達地球附近，除了從太陽側進入地球南、北極大氣會產生極光之外，由日冕物質拋射所帶來的帶電粒子群，有可能因磁重聯現象從背向太陽側進入地球大氣，產生更強烈的極光，產生過程與機制說明如下：

當日冕物質拋射帶來高密度且帶有磁場的帶電粒子群到達地球附近，開始影響磁層與地球週遭磁場。圖片來源：NASA



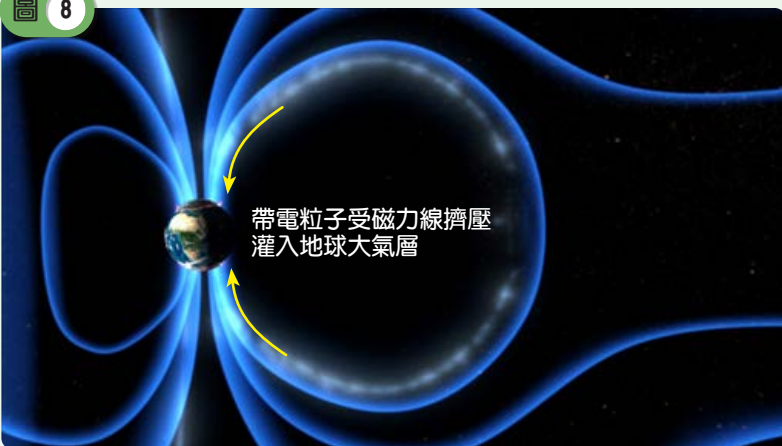
因帶電粒子所帶磁場與地球磁層磁力線合併，以及粒子本身進入磁場所產生的感應電流影響，背向太陽側的磁力線開始相互拉近。圖片來源：NASA

圖 7



背向太陽側的磁力線因不斷靠近終於合併，形成封閉的磁力線迴圈，也將由日冕物質拋射帶來的部分帶電粒子封閉在迴圈中。圖片來源：NASA

圖 8



磁力線迴圈收縮恢復原狀，同時擠壓封閉在迴圈中的帶電粒子，讓這些粒子沿著磁力線從地球的南、北兩極灌入大氣層，與大氣分子碰撞而引發強烈的極光現象。圖片來源：NASA

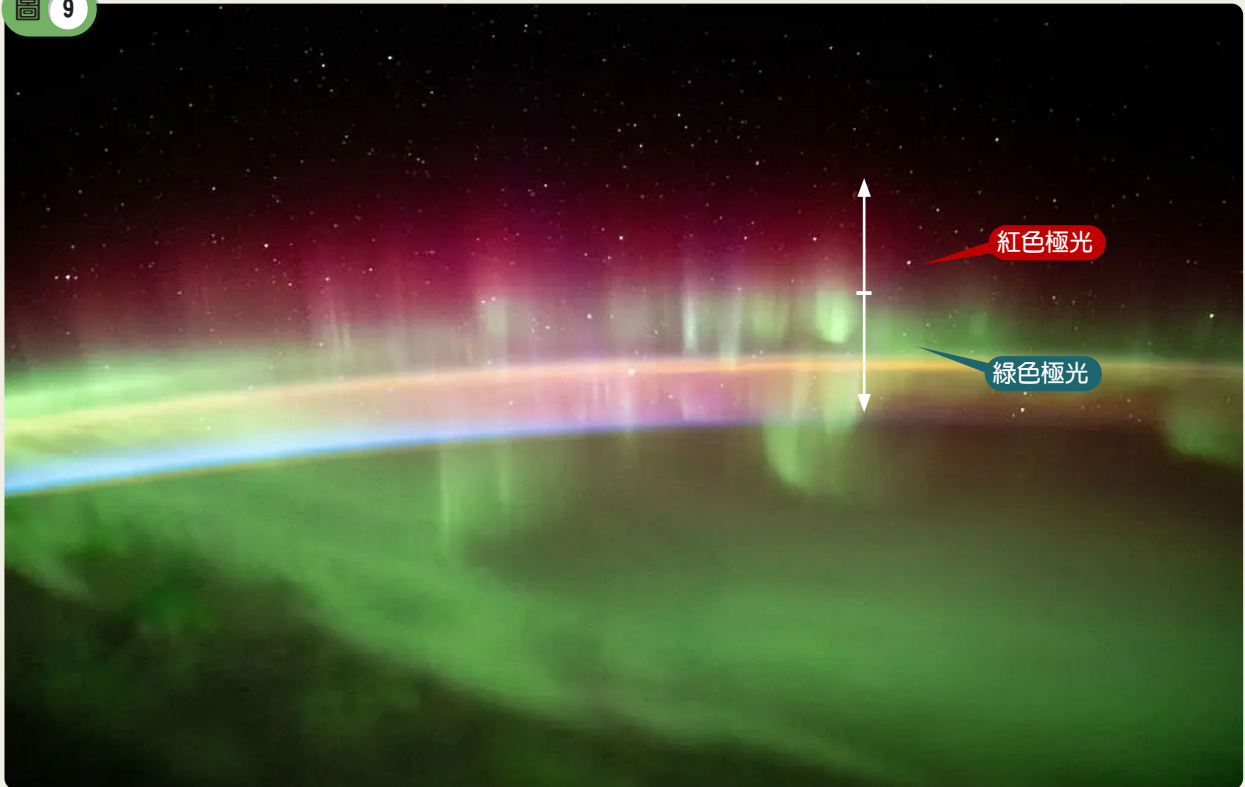
## 與天空共舞的粒子—極光

極光 (Aurora) 是太陽風與地球磁場及高層大氣互動的結果，當高速帶電粒子撞擊大氣中的氧原子或氮分子時，這些氣體會被激發，隨後釋放光子，形成我們肉眼可見的極光，不同的氣體與高度的組合，會產生出不同的顏色：

綠色極光最為常見，主要來自於120公里至400公里高空的氧原子，此處的氧濃度較高，當它從一個特定的激發態跳回較低能階時，就會釋放出這種波長的綠光 (557.7奈米)，這也是極光中最亮、最常見的一種顏色。而300公里以上大氣層中的氧原子，由於原子之間的距離極遠，維持穩定的時間較長，稱為亞穩態，其激發態能量不同，但其能階差的能量較小，因此釋放的是

紅光 (630奈米)，波長較長。大部分的極光都是紅、綠兩色的混合或變體。有些粒子的能量則更高，能夠激發穩定的氮分子成為離子，當這些氮分子離子回到低能階時，所釋出的光最常見的為藍紫色光 (427.8奈米)，這是極光中最常見的藍色成分之一，而且氮分子需要更高的能量才能破壞其穩定狀態，因此只能夠在120公里至200公里的低空及高能粒子的撞擊下才可見，也正因如此，藍色極光非常少見。值得特別一提的是，雖然宇宙射線與太陽風都屬於高能帶電粒子，但只有太陽風才會產生極光。這是因為宇宙射線速度太快、能量太高，通常直接穿透大氣層，即使產生次級粒子，也不會像太陽風那樣被地球磁場導入極區，如圖9~圖10。

9



國際太空站拍攝的極光影像，可明顯分辨出上層的紅色極光與下層的綠色極光，而且極光頂部已突出大氣層之外。圖片來源：NASA

10



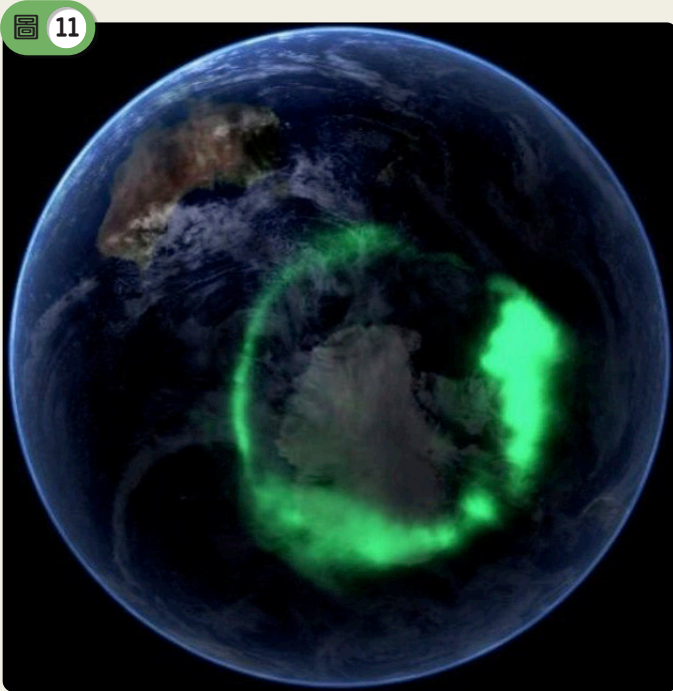
與上圖對照，可發現常見的極光形狀是從地面向天空看去，與太空中所見的形狀完全不同。攝影：吳昆臻

## 天邊閃爍的奇蹟，極光何處尋？

極光主要出現在磁極周圍的「極光橢圓區」(Auroral Oval)，是一個環繞地磁極的橢圓區域，如圖11。觀賞極光的最佳地點通常位於高緯度地區。不過，有時在太陽風特別強烈時，極光也會向中緯度擴展。像是2003年萬聖

節風暴、2024年5月的太陽風暴，如圖12，美國、日本甚至中國東部都曾目睹極光的奇景。

然而，台灣地處磁緯度極低，即便太陽風再強，出現極光的可能性依然微乎其微。想親眼看見極光，還是得飛一趟高緯度地區才行。



由美國太空總署IMAGE衛星，於2005年9月11日所拍攝的南極洲極光影像，可明顯看出極光橢圓區的位置。圖片來源：NASA

**Large Aurora Event Possible Friday Night**

**Geomagnetic Storm WATCH for May 11, 2024**  
 Updated: 2024-05-09 1:30pm EDT  
 WHAT: Several CMEs will quite likely reach Earth and lead to highly elevated geomagnetic activity

**EVENT:**  
 A coronal mass ejection (CME) is an eruption of solar material. When they arrive at Earth, a geomagnetic storm can result. Watches at this level are very rare.

**TIMING:**  
 The CMEs are anticipated to merge and arrive at Earth by late on May 10th or early on May 11th.

**EFFECTS:**  
 The general public should visit our webpage to keep properly informed. The aurora may become visible over much of the northern half of the country, and maybe as far south as Alabama to northern California.

**Tomorrow Night's Aurora Forecast**  
 Forecasted for 8 (Range 0 to 11)  
 Forecasted G-Scale: 4 (Range 0 to 5)

**Likelihood of Aurora**  
 Creation Time 2024-05-10 01:14:29

For more info go to: <https://www.swpc.noaa.gov/communities/aurora-dashboard-experimental>

由美國國家海洋暨大氣總署所發布，2024年5月11日的G4等級的劇烈地磁風暴預警，可見預報的極光帶已覆蓋加拿大全境。圖片來源：NOAA

## 歷史、神話與科學的結合 — 天文館極光特展

極光的美麗不僅吸引現代科學家，也早早進入了人類文明的想像。古籍《山海經》：「鍾山之神，名曰燭陰，視為晝，瞑為夜，吹為冬，呼為夏，不飲，不食，不息，息為風。身長千里……其為物，人面蛇身赤色，居鍾山下。」國內地球科學學者趙丰便認為古代的地磁北極較偏向北亞，因此這段描述很可能就是描述極光。極光也與現代科技密切相關，強烈太陽風暴不僅會帶來壯觀極光，也可能干擾通訊衛星、電力系統，對人類文明產生衝擊。因此，現今許多國家的氣象與太空機構都設有「太空天氣預報」，持續監測太陽風活動，如圖13。

如果你已經對極光心生嚮往，不妨親自來一趟臺北天文館。在「遇見歐若菈—追極光科學指南」特展中，如圖14，我們透過模擬展示、互動裝置與豐富影像，帶你從多角

度認識極光的成因、種類與文化意涵。此外，別忘了回到常設展示區，站在閃光箱前，看見那些每天從宇宙飛來，穿越你我身邊的神祕粒子，這些看不見的宇宙來客，正是極光舞者的遠房親戚，也為我們開啓了一扇認識宇宙的窗。從遙遠星系到極地高空，從閃爍軌跡到光影流瀉，宇宙正透過極光與我們說話。而你，準備好傾聽了嗎？

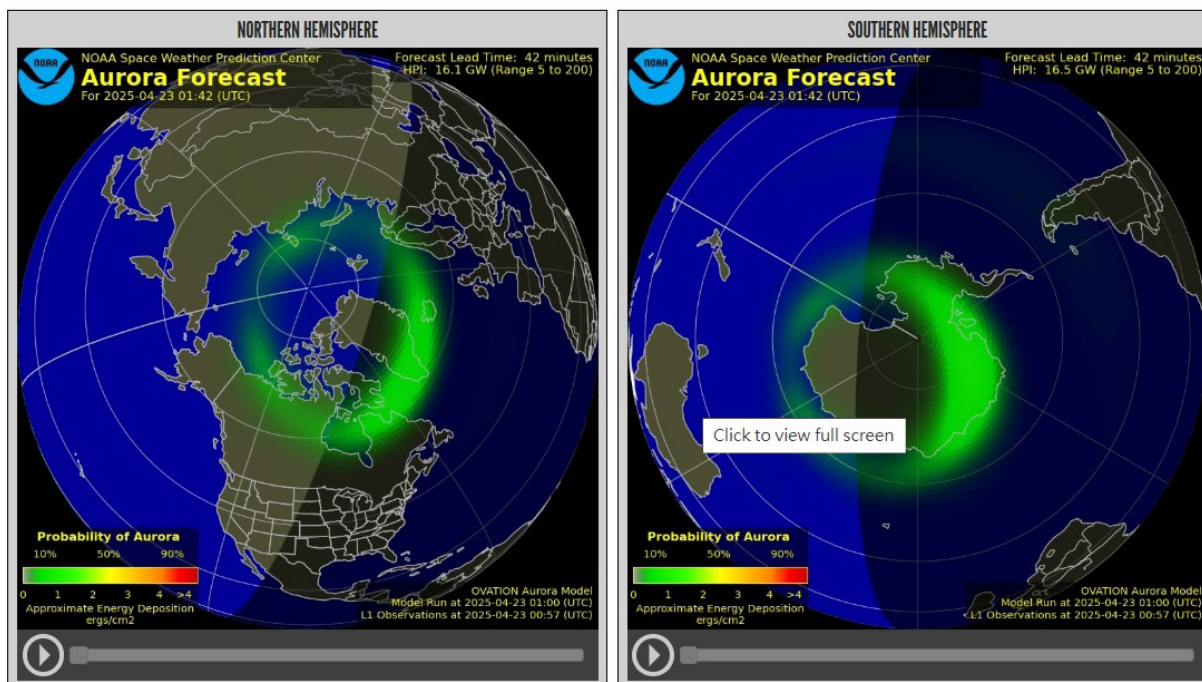
許晉翊：臺北市立天文科學教育館



臺北天文館的極光主題特展，展出時間為4月2日至10月12日。

圖 13

### AURORA - 30 MINUTE FORECAST



美國國家海洋暨大氣總署所發布的30分鐘極光預報，可見30分鐘後南、北兩極的極光預測。圖片來源：NOAA