

日地物理 與 太空天氣

天氣狀況是許多人所關切的議題。
你能想像在不久的將來，
「太陽黑子數」以及「太陽風速度」等
有關太空天氣的資訊也將出現在氣象預報中嗎？

■演講人／郝玲妮



郭拾妮教授提供

壯麗的極光是太空天氣的產物。

地球上孕育了各種生命，多采多姿令人目不暇給，而太陽則是這一切動力的源頭。我們知道地球、其他行星與太陽之間有著萬有引力的維繫，也留意到太陽的升起與落下，感覺它似乎永恆地天際帶給我們安定的溫暖和光明，如諺語所言——太陽底下無新鮮事。卻很少人知道太陽是活躍的、富變化的，在它的內部和表面存在許多另人稱奇的物理現象。而太陽與地球及行星交互作用的複雜與繽紛更令太空科學家忙於探討其中的奧秘。

可敬的太陽

太陽系形成的時候，幾乎99%的質量都被太陽所吸附，剩下1%的物質形成了九大行星以及其衛星、小行星和彗星等。它的直徑相當於一百個地球的大小，表面溫度平均約攝氏六千度，中心溫度更高達約攝氏一千六百萬度。太陽內部壓力大約是二千五百億倍的大氣壓力，主要組成的成分是氫與氦，還有少量的碳、鐵、氧等重元素。在這種壓力和溫度的條件下，太陽點燃了「核融合」反應，使得整個太陽系有了光與熱，地球上才能孕育出如此蓬勃的生命。

自從太陽點燃以來，已經歷約五十億年，如果沒有任何意外，它還會繼續發光發熱約五十億年，太陽每秒向四周輻射出的光與熱能，就足足可以供全美國用上九萬年，這麼龐大的能量，我們目前能加以利用的，卻是少之又少。

太陽的威力不只是如上所述，事實上在地面上進行太陽的觀測，只能讓我們看到部分的太陽物理現象，直到一九五七年衛星進入太空，人類正式進入太空紀元之後，我們對於太陽以及它對地球的太空環境影響、日地物理及太陽系物理，才有了較全面的認識。而隨著科技的發展，太陽上的活動已直接或間接地影響到現代文明人的生活了。

著名的太空天氣事件

一八五九年，全世界剛發展起來的電報通訊業務受到強烈太陽風暴侵襲，完全中斷。連平常只在高緯度地區出現的極光，居然也出現在位於北迴歸線附近的古巴、夏威夷等地。而發生在一百年之後的太陽風暴亦相當著名，當年紐約地區曾出現壯觀的極光秀。

一九八九年三月的太陽風暴，導致加拿大魁北克大停電，而一九九八年五月的一場太陽風暴，則是讓許多國家的衛星受損，摩托羅拉（Motorola）更是失去四個通訊衛星，損失慘重。

二〇〇一年三月，地球籠罩在極度惡劣的太空氣候中長達六個星期，除了嚴重影響地面上的通訊、電力系統、飛機航班等外，因為太陽風暴所帶來的高能帶電粒子能穿透太空人身上的太空衣及損毀電子系統，造成執行太空站上的任務與火星探測計畫的困擾，而其他的太空計畫亦受到這次風暴影響而延期或是暫時取消。

二〇〇三年十月，美國太空環境中心密切監控太空

天氣的發展並提出警告，全世界各大媒體也報導強烈太陽風暴來襲的消息。在此事件中，日本有兩顆衛星受損。

由以上的例子可以看出，太陽對於地球的影響可是不可小覷的。然而，太陽進行著這樣的活動，已有數十億年，只是到了科技發達的現代，人類才意識到它對我們有多重大的影響。

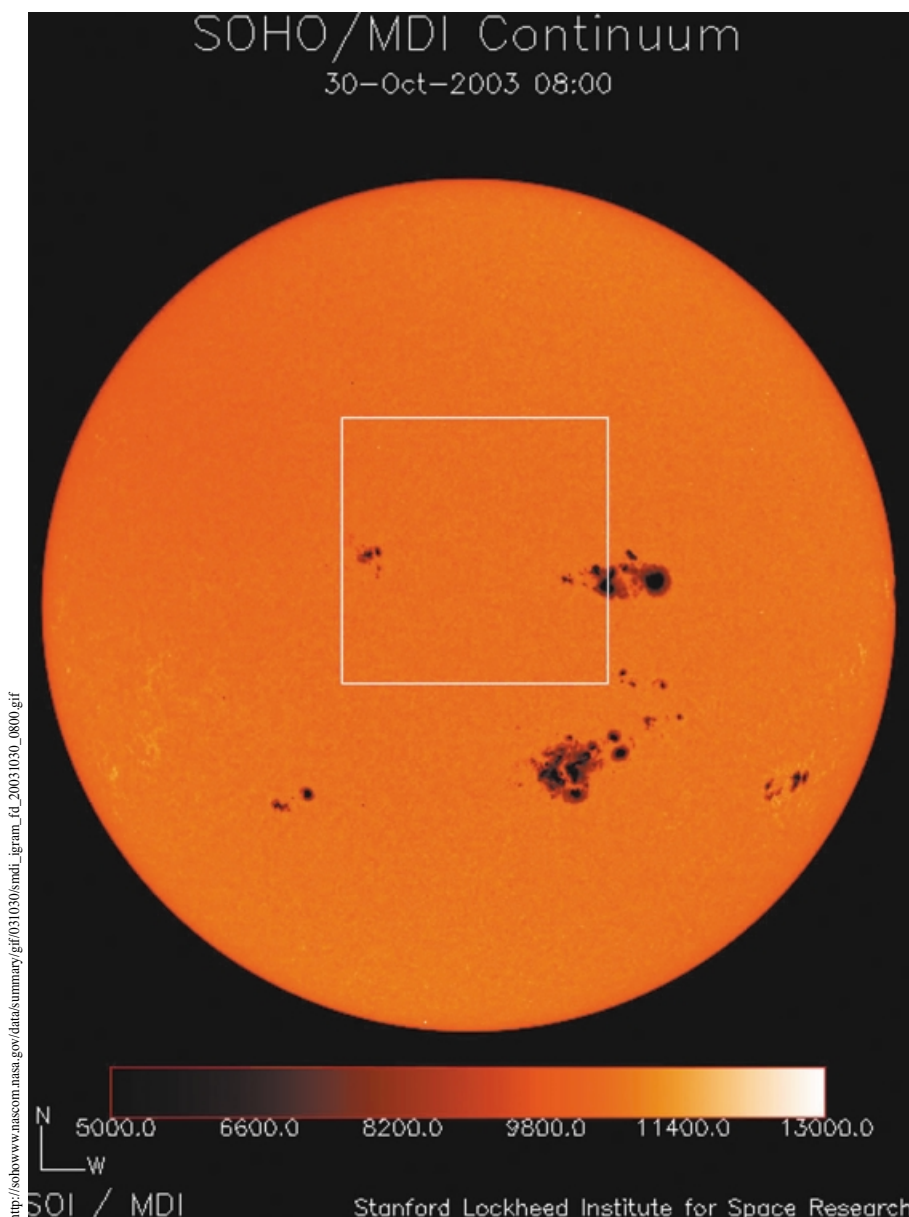
太陽黑子

自古以來，地球上的人們對於每天和我們息息相關的日月星辰等變化觀察入微。中國四千年前即對太陽進行觀測，記錄日蝕的發生。西元

前二十八年也對太陽黑子有所記載，當時把太陽黑子稱之為「金烏」，因為古人認為太陽裡面住著烏鴉，才会有黑點產生。西方世界則一直到了一一二八年才由英國傳教士伍西斯特（Wocester）畫下第一張太陽黑子的草圖。此時人類對於太陽的觀察都還維持在用肉眼觀測的階段，然而由於太陽亮度無法用眼睛直視，因此觀察時都選在清晨或是傍晚才能一睹其面貌。一六一一年時伽利略（Galileo Galilei）利用望遠鏡觀察太陽，並認為太陽黑子是太陽上的烏雲所造成。

直到一七四九年，天文台開始每天記錄太陽黑子的數目，而一百年後，全世界終於建立起觀測網，有系統地對太陽黑子進行觀測。一八四三年英國人史瓦貝（Heinrich Schwabe）透過觀測數據的分析，發現太陽黑子具有11年

二〇〇三年十月三十日由SOHO衛星所觀測到的太陽黑子照片。



的周期變化，在高峰期的時候，太陽黑子每個月可多達兩百顆，但在低峰期就只剩下十幾顆，有很大的差異。太陽黑子為什麼會是黑色的呢？主要是黑子的溫度和太陽表面的六千度比起來低很多，約只有四千度，因此看起來呈現暗黑色。而太陽黑子所出現的區域，雖然溫度較低，卻是太陽磁場超強的地方。我們現在知道，太陽黑子與太陽上猛烈的爆發活動——所謂的太陽風暴有很密切的關係。

來自太陽的「氣息」——太陽風

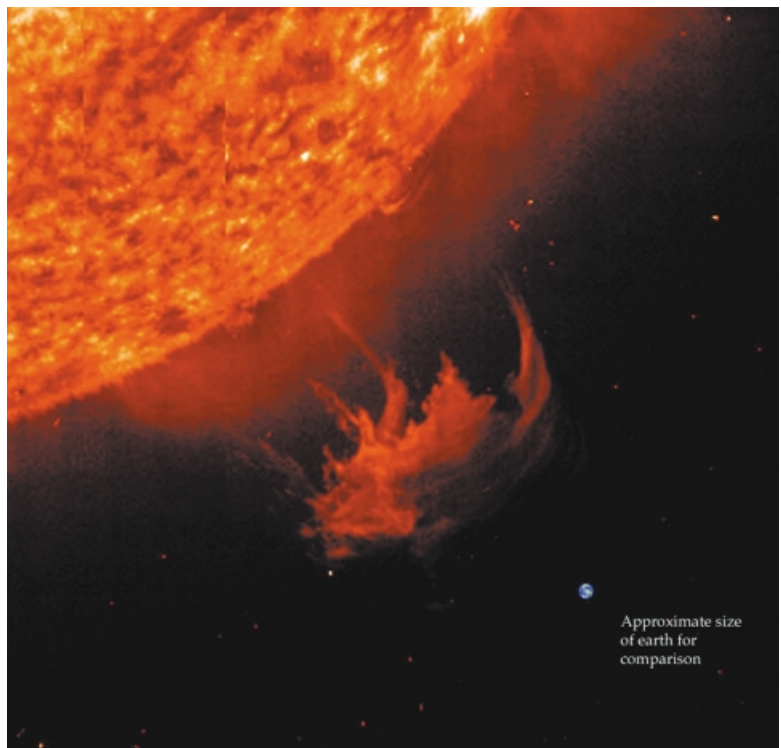
長久以來，我們一直認為太空即是真空，但其實太陽除了發出光與熱外，也對外噴出大量帶電物質，稱之為「太陽風」。太陽雖然每分鐘有數百萬噸的噴發物，但是在廣大的太空中，卻顯得非常稀薄，但不是絕對真空。如果我們把太陽風當成太陽呼的一口氣，那麼太陽的肺活量可以說相當驚人。科學家把從太陽到地球的平均距離（約一千五百萬公里）叫做一個天文單位，而太陽風卻可以吹拂到150個天文單位遠的地方。若以太陽風所及之處來算的話，太陽系的規模遠遠大於目前我們所知道的九大行星的範圍。

太陽風是肉眼看不見的，但是我們由彗星劃過太空時，可以看到太陽風存在的證據。對彗星的觀測，中國早在西元前四百多年就已經有所記錄。當彗星靠近太陽時，受到太陽光壓的影響，產生白色的塵埃尾；此外，彗星還會有藍色的電漿尾（或稱為離子尾）。一九四五年霍夫麥斯特（Cuno Hoffmeister）和比爾曼（Ludwig Biermann）兩人由彗星電漿尾的擺動及彎曲提出太陽風的概念，認為離子尾是太陽風所造成的現象。

一九五八年派克（Eugene Parker）建立太陽風的理論模式，並預測太陽風的速度比音速更快。一九五九年衛星在太空中的觀測，證實太陽風確實存在；其平均速度高達每秒四百公里，比音速快約八倍。太陽風的主要



彗星的藍色電漿尾是太陽風的作用所產生。



太陽閃焰規模相當大，右下角的地球在比例上顯得微不足道。

成分是電子與質子，並攜帶來自太陽的行星際磁場。

太陽風暴

一般太陽風是相當平靜的，但是有時候太陽表面卻會發生太陽系中最猛烈的爆發事件，其威力相當於一千萬倍的火山爆發。這種爆發我們稱之為「太陽閃焰」

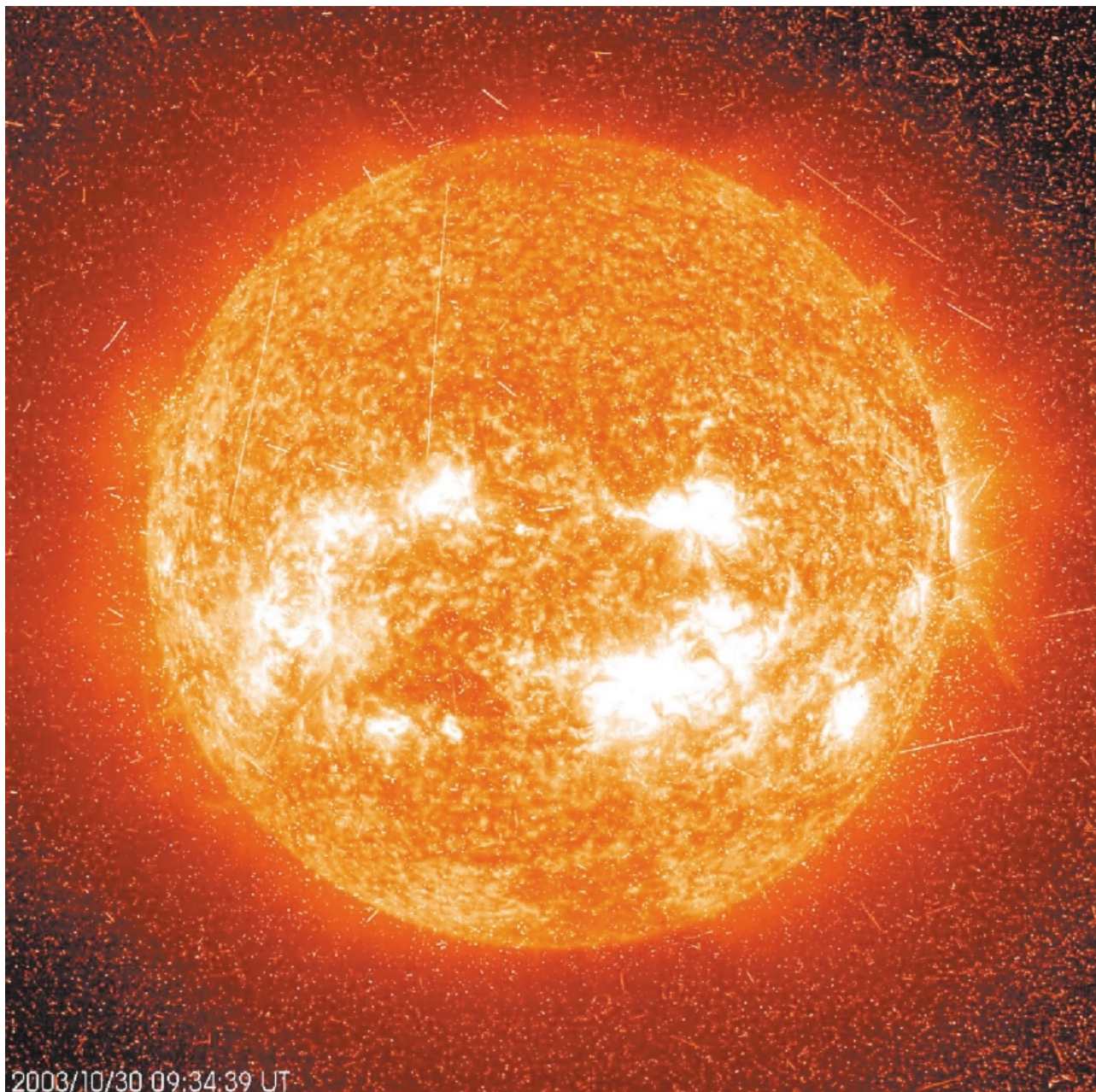
(solar flare)。一八五九年十一月，蓋林頓 (Richard Carrington) 與哈德森 (Richard Hodgson) 第一次觀測到太陽閃焰 (不尋常的白光) 的產生，並推測其發生在太陽黑子的上方，十八小時之後地球便發生了相當大的磁暴現象，也就是前述歷史上著名的太空天氣事件。這也是人類第一次建立了太陽上的現象與地球上反應的關聯。

太陽閃焰大約可以維持數分鐘之久，由於溫度高達數百萬度，會發出強烈的 X 射線與 γ 射線以及其他高能

電子與質子。

這些高能輻射與帶電粒子約 8~30 分鐘即可到達地球，可穿透太空衣，對於在太空艙外執行任務太空人的生命與安全造成威脅，同時會損毀衛星的電子系統並干擾電波通訊。

太陽風暴除了太陽閃焰之外，還有所謂的「日冕拋射物質」(coronal mass ejection)。早期在地面上觀測日全蝕即知道有日冕的存在，但日冕的劇烈活動現象則是在一九七〇年後，太空船攜帶望遠鏡到太空中，利用 X 光對



二〇〇三年十月三十日SOHO衛星所觀測到太陽劇烈活動的照片。

太陽進行觀察才被發現。

當太陽進入活躍期時，日冕的活動也會跟著旺盛起來，日冕拋射物質發生時會噴發出大量的帶電物質（稱為電漿團），這些電漿團的溫度可高達幾百萬度，質量約一百億噸，在太空中的行進速度更高達約每小時一百至五百萬英哩，平均幾天即可到達地球。日冕拋射物質的能量相當於十萬個颱風，範圍則大約是30~40個地球大小。

太陽閃焰與日冕拋射物質的物理產生機制目前都不甚清楚，尚是研究中的主題。比較確定的是，其發生在活躍的太陽黑子附近，此處磁場非常強，磁力線極度被拉扯、扭曲，導致不穩定的結構，而磁能最終須獲得釋放時即會伴隨著劇烈的太陽風暴。

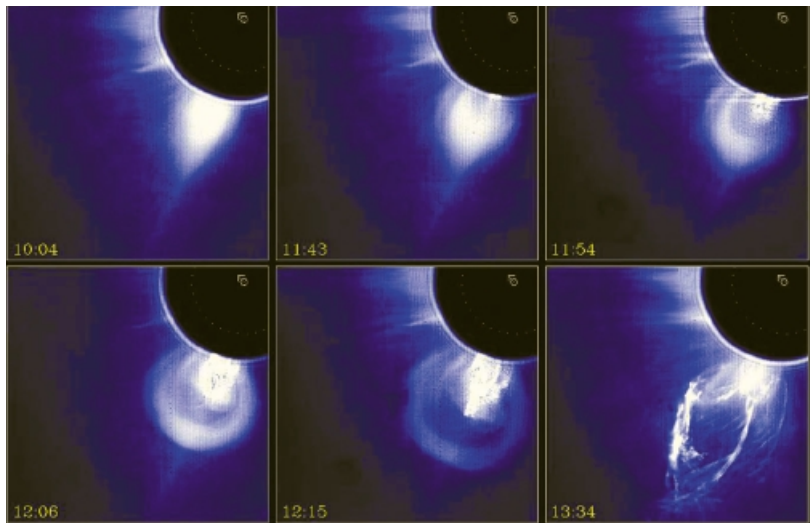
地球磁場——天然的屏障

太陽的活動如此猛烈，地球上的生命在其威脅之下卻仍能欣欣向榮，發展得如此豐富而多樣化，主要是因為地球自身磁場的保護——磁層宛如一個天然的屏障。

最早發現地球磁場並加以運用的是中國人，在一〇〇〇年時發明了羅盤。一六〇〇年時，英國的吉爾伯特（William Gilbert）提出地球是一巨大磁鐵的說法。在一七四〇年，葛拉漢（George Graham）發現羅盤上的指針會呈現不規律擾動，而攝西爾士（Anders Celsius）則發現羅盤指針變化與極光的活動有相當大的關係。但直到一八三〇年全球建立了磁場觀測站，我們對地球磁場的變化才有較全面的研究，並發現太陽上的活動與地球磁場大幅擾動（所謂的磁暴），有很密切的關係。一八五二年英國人沙拜思（Edward Sabine）發現地球磁暴發生的頻率與太陽黑子數相關。一八五九年的大磁暴即是在觀測太陽閃焰18小時後發生，開始建立了日地物理與太空天氣的雛型。

極光——天空中的簾幕

極光是太陽活動對地球所產生的各種影響中，最美麗燦爛的一項產物。古羅馬時代視它為日出女神，亞里



從連續照片中可以看到日冕拋射物質的噴發過程。

斯多德則稱之為發光的雲，甚至有天堂之門等等的稱呼，而到了一二三〇年，挪威人才稱之為「北極光」。

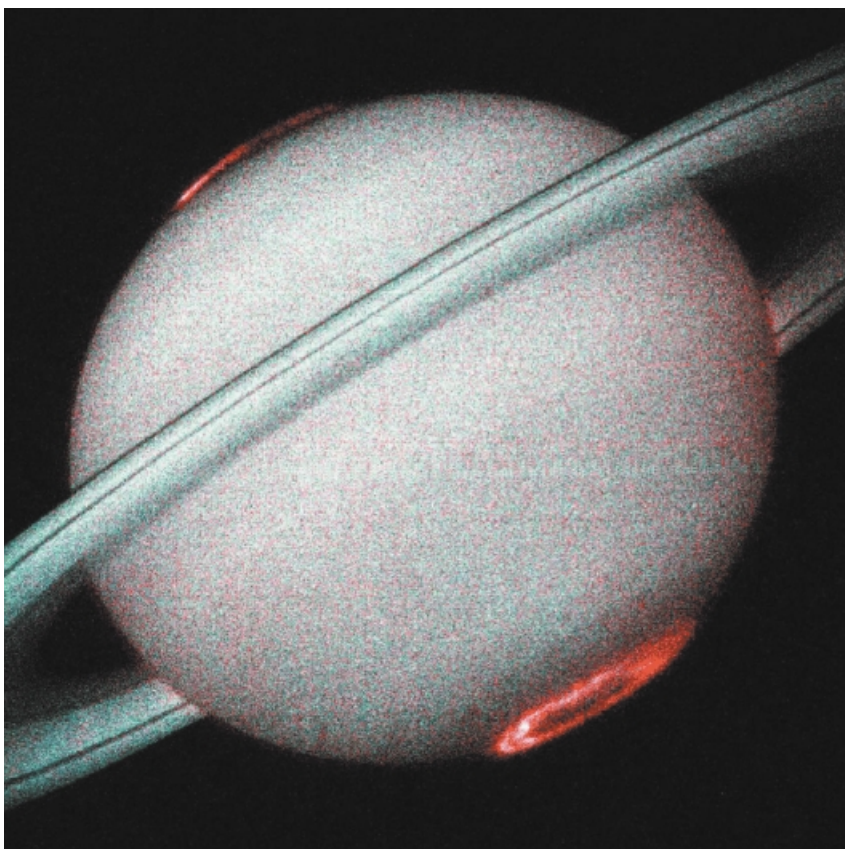
富蘭克林則認為極光可能是雲層上端之閃電所發出的光芒。

極光可同時發生在北半球與南半球。最早發現這個事實是在一七七〇年九月，英國人到澳洲時第一次觀測到南極光，而剛好同一天，在清朝的史書中也記載觀測到北極光，這是極光在南北半球同時發生之第一次紀錄。許多位於南、北緯60~70度的高緯度國家每年有上百次的機會觀賞到壯麗的極光秀；中緯度地區每年約有10~20次的機會可看到極光；而由於太陽黑子周期的影響，每10年約有一次可在赤道地區發現極光。一九〇九年靠近赤道的新加坡也觀測到極光。

除了地球之外，太陽系中只要有磁場與大氣層的行星，如外行星的木星與土星，都可以發現極光的現象。

日地物理

在一九〇〇年時，電磁學的理论已經完備，因此對於觀測到的太陽黑子、太陽閃焰、地球磁暴、極光等現象，我們嘗試以電磁學理論與實驗了解其產生的原理及日地的關係。一九〇二年挪威的科學家柏克蘭（Kristian Birkeland）在實驗室中模擬極光產生的實驗，他利用電子束打在磁球上會在磁球的南北極產生亮光的結果，提出極光是由來自太陽的電子束所產生。但是實際上地球

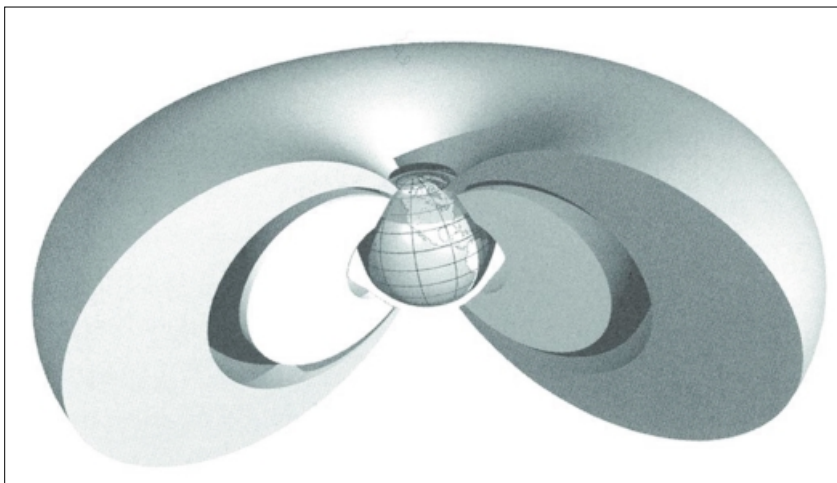


鄧玲妮教授提供

土星上的極光現象，也在南北極同時發生。

的極光並非發生在地球磁極的正上方，其說法因而受到質疑。另一個科學家史湯姆（Carl Stormer）的理論研究則顯示，從太陽過來的電子會被地球磁場捕獲而無法自由進出南北極。

一九三〇年夏普曼（Sydney Chapman）和法拉洛（Vincent Ferraro）兩人提出太陽同時噴發出電子與質子等帶電粒子，而這些粒子在靠近地球磁場時會形成電流並



鄧玲妮教授提供

如同甜甜圈般環繞地球的兩層范艾倫帶示意圖。

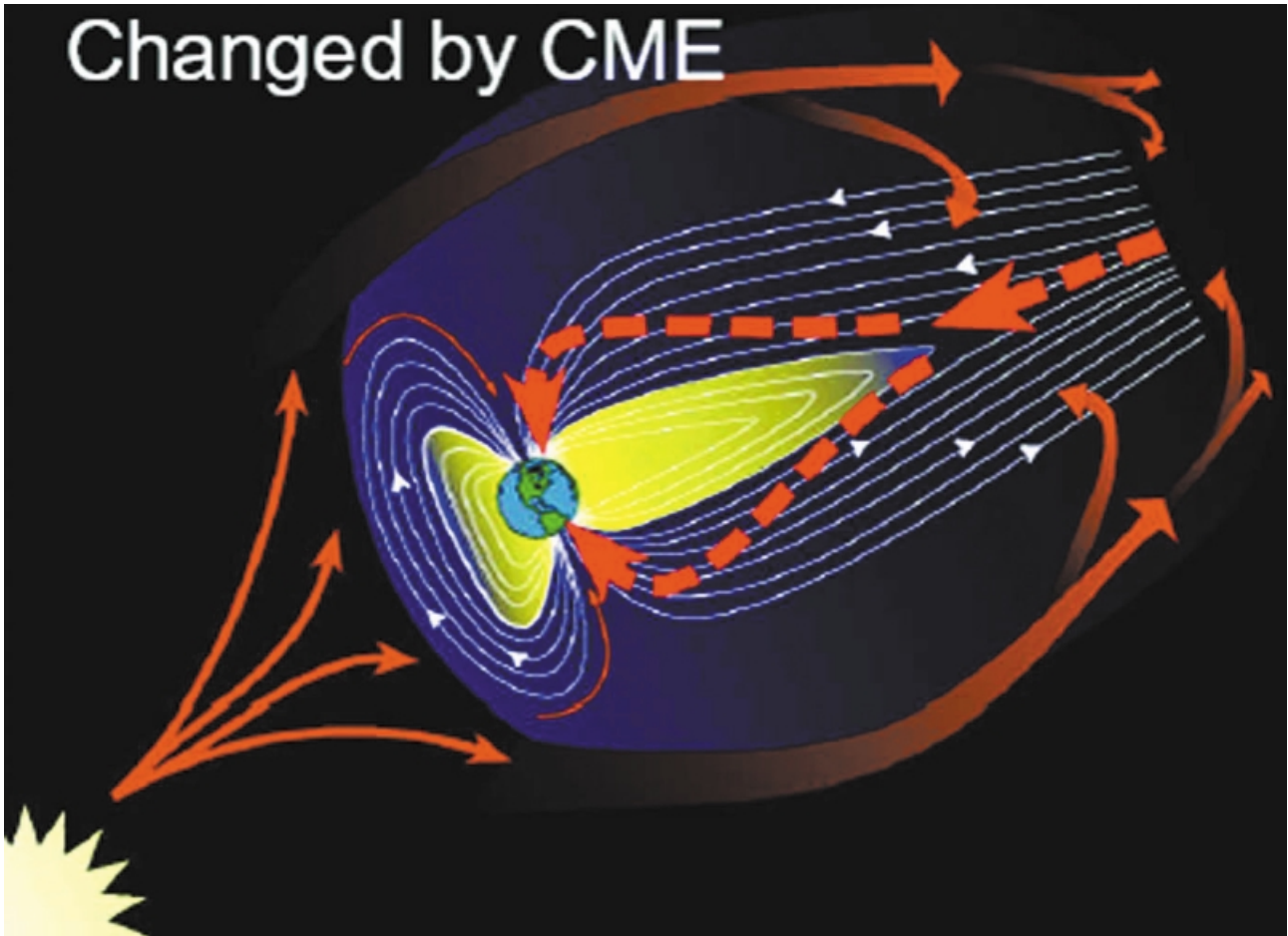
將地球磁場規範在一個空腔之內。一九五九年高特（Thomas Gold）正式稱之為磁層。地球磁層是一個非常好的保護層，可擋住99%的太陽風，使其無法直接進入地球表面。但即使是只有1%的太陽風粒子可進入地球磁層也足以造成顯著的太空天氣。

一九五八年美國發射第一顆人造衛星，攜帶愛荷華大學的范艾倫教授的蓋格計數器，用來偵測太空中的高能帶電粒子。在這次的探測中，人類首次發現太空並非真空，而是到處都充滿著各種高能粒子，且在太空中形成環繞著地球的兩個類似甜甜圈的范艾倫帶。也就是這內外兩個范艾倫帶幫我們擋住了大部分來自太陽及外太空的各種高能粒子。

除了磁層與范艾倫帶在外圍阻擋與吸收大部分來自太陽與外太陽的帶電粒子之外，地球高層大氣的電離層（高度在離地表40~800公里）也幫我們吸收許多的高能輻射；而大氣層中的臭氧層則可以幫我們吸收掉太陽的紫外線，更往下的濃密大氣層也會吸收一些光與宇宙射線等，這一層層包裹著地球如同蠶繭般的多重防護罩，使得地球上的生命得以在溫室中孕育與演化。

地球的磁層由於受到太陽風的吹拂與壓迫，因此不像普通磁鐵的磁力線，成爲一個對稱的形狀，而是在面對太陽的向日面被壓縮得較扁，而背對太陽的夜側面則向後延伸形成如彗星尾般長長的磁尾。分開磁層與太陽風的邊界稱爲磁層頂。當在日冕拋射物質的強力吹拂下，向日面的磁層頂會被擠壓靠近地球，有些原來在磁層內的人造衛星會因而進入太陽風中，而暫時失去磁層的保護並造成損壞。

除了地球原有的磁場，太陽風與日冕拋射物質也都帶有磁場。當磁場



郝玲妮教授提供

日冕拋射物質襲擊地球磁層的示意圖。

方向與地磁相反時，會發生所謂的磁重連現象。這情況發生時，太陽風或日冕拋射物質的高速帶電粒子會繞到磁尾進入夜側的地球磁層，並沿著磁力線進入高緯度地區的電離層。當這些帶電粒子高速撞擊高空大氣中不同的原子、分子或是離子，使其成激發狀態後，再釋出光子而形成了所謂的極光。

日地物理與太空天氣的重要性

太空紀元讓我們對太陽、地球的太空環境、日地關係、太陽系與整個宇宙有了嶄新的認識。原來似乎遙不可及的太陽與我們的地球竟是如此密切相關聯。太空天氣會影響衛星的運行、無線電通訊、導航、定位、或是電纜與油管導線等，以及太空人與經過極區飛機乘客的安全，甚至和我們息息相關的氣候等。未來人類將會越來越仰賴太空，各種太空計畫正加快腳步進行，太空站與衛星可能變得相當普遍，還有載人的行星探險等。太

陽系物理的研究亦有助於我們了解宇宙中許多類似的電漿系統。增強對日地物理的研究與太空天氣的監控，才能讓我們作好萬全的準備工作，減少太空探索的風險、經濟上的損失與生活的不便。 □

科學是一種生活的態度，是一種運用邏輯思考的方法和追根究柢的精神，去解決在日常生活上和宇宙探索中所遇見的問題的態度。為了讓社會大眾了解科技發展的趨勢，由國科會主辦，中央大學理學院科學教育中心承辦的「2003展望系列演講」於焉誕生，本篇為秋季「探索未知」系列，民國九十二年十月三日第三場講座的演講實錄。

演講人／郝玲妮
中央大學太空科學研究所
文字整理／李健成
本刊特約文字編輯