

太陽對地球的影響

文/ 呂凌霄

太陽對地球的影響，最重要的就是提供穩定的光和熱，持續滋養著地球上的萬物。可是如果我們仔細探討這個穩定光源的產生與傳輸過程，我們就能了解，為什麼有時候太陽也會發射一些會傷害我們的短波輻射以及高能粒子，造成惡劣的太空天氣。此外，在探討產生這些短波輻射以及高能粒子的物理過程時，科學家又發現，原來它們還伴隨著太陽表面磁場與電漿（plasma, 註一）的劇烈擾動。而這些擾動如果正對著地球傳過來，它們對我們的影響，可能並不亞於短波輻射以及高能粒子對地球附近太空環境的影響。事實上，隨著科技文明的進步，太空天氣（space weather）的變化，對我們日常生活的影響，也越來越密切。本文將由各種不同的角度，說明太陽活動對地球的影響。

太陽短波輻射與高能粒子對地球太空天氣的影響

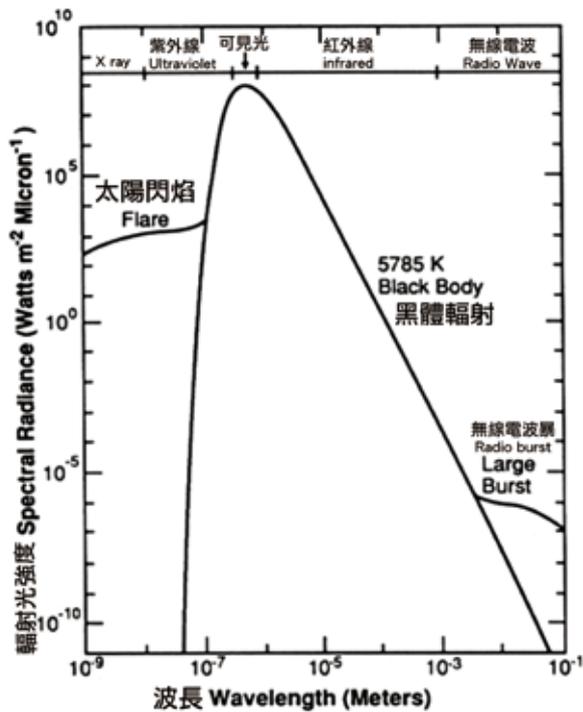
我們都知道太陽是我們的恆星。它像其他恆星一樣，中心部份正在進行所謂的「核融合」（nuclear fusion）反應。也就是說，它利用 $E = mc^2$ 的原理，將核融合反應過程中所損失的一小一點質量，轉換成大大一份能量。所以太陽雖然已經燃燒了將近 50 億年，但是它的生命，才過了約一半。

我們也都知道氫彈爆炸就是一種核融合反應。氫彈爆炸所放出來的短波輻射，會對地表生物造成很嚴重的傷害。太陽在距離地球不過 8 分鐘 20 秒的光程處進行核融合反應，為什麼不會對地球造成傷害呢？原來，太陽在核心處所發出來的短波輻射，須要通過緻密的輻射層（註二），被不斷的吸收再以較長的光波輻射出來。因此如果把核融合反應所產生出來的每一個光子算成一份能量，則每一份能量，平均約需花 17-20 萬年，才能穿過輻射層，然後再以相對快很多的速度穿過太陽的對流層到達太陽表面。所以在太陽核心處所產生的短波，在穿過輻射層後，絕大部份都變成波長較長，對我們無害的光了。殘存之極少量的短波輻射，在經過太陽對流層與地球大氣層的吸收，剩下的 X-ray 與 gamma ray 等短波輻射，數量更為銳減，對地表生物所造成的傷害，也更為降低。

反之，在太陽表面所發生的太陽閃焰（solar flare），因缺乏太陽輻射層的屏蔽，故太陽閃焰所發出的短波輻射，可自由的向外傳播，使得行星際空間中，以及地球的磁層與電離層中，來自太陽的短波輻射量大幅增加。

圖一為太陽輻射光譜圖。在平日，太陽輻射光譜主要由太陽表面的溫度決定。可是到了太陽閃焰發生時，太陽輻射光譜的短波區與長波區，能量都會增加。其中短波輻射是太陽閃焰直接產生的。長波區之無線電波輻射是太陽閃焰放出的高能電子與背景電漿交互作用所產生的。

在強大太陽閃焰發生時，也會產生能量很高的正離子與電子。這些粒子，尤其是高能的正離子，以接近光速的速度離開太陽表面。幾乎與太陽閃焰的短波輻射，一起到達地球。這就是所謂的「太陽高能粒子」事件（Solar Energetic Particle events, 簡稱 SEP events）。太陽閃焰所發出的高能粒子對地面上的生物影響不大，因為一方面有地球磁偶極場的幫忙，抓住了大多數來自太陽的高能帶電粒子，將它們束縛在范艾倫輻射帶（Van Allen Radiation Belts）。剩下的，如果進入地球大氣層，也可藉由頻繁的碰撞來減少高能粒子的能量。可是對那些登陸月球的太空人與未來想登陸火星的太空人而言，太陽閃焰所產生的短波輻射與高能粒子事件就可能造成他們的基因突變與致癆的傷害！例如，在阿波羅 16 號與 17 號兩次登月任務之間那段空檔期，曾經



圖一、太陽黑體輻射與太陽閃焰發生後的太陽光譜分布圖。靠著輻射層的阻擋，太陽核心的高能輻射，都化作以可見光為主的無害輻射。滋養著地球上的生命。可是，發生在太陽表面的太陽閃焰，所產生的高能輻射，包括宇宙射線（一些高能粒子）以及紫外線、X射線、伽瑪射線的電磁波，卻不受阻擋，可以直接到達地球上空。

發生過一次很強的太陽閃焰與太陽高能粒子事件。科學家事後評估，如果太空任務恰巧在那時進行，這個事件中的高能粒子通量，應足以對太空人的健康造成嚴重影響。至於太空站裡的太空人，由於太空站位在范艾倫輻射帶的下方，表示地球的磁場或許可以有效的保護他們，免於受到太陽高能粒子事件的嚴重傷害。可是太空站裡的太空人仍比地面上的我們受到更多太陽短波輻射以及相對較高之高能粒子的傷害。很不幸的是，大多數太空人，並不了解自己身處險境，只是很天真的認為，他們的太空總署，應該已經將所有的安全問題全盤考量了。

除了太空人與太空生物之外，許多太空觀測儀器，也會受到太陽高能粒子事件的傷害。尤其是粒子探測儀，常常在強烈的太陽高能粒子事件後，受到嚴重毀損，而無法再運作。例如，日本的希望號火星探測器（Nozomi Mars Probe），西元2002年4月間，遇上了太陽高能粒子事件，造

成探測儀器的毀損，終於在隔年，西元2003年12月，宣告放棄此項探測任務。

來自太陽的短波輻射與高能粒子事件，除了會傷害太空人、太空生物、太空粒子探測儀器外，當它們被地球電離層的大氣吸收後，也會改變電離層中的電子濃度，進而改變電磁波在電離層中的傳播路徑(註三)。例如西元 1859 年九月的太陽閃焰就造成了近代有記錄以來第一件惡劣的太空天氣事件。該次事件就與電離層電漿密度大幅改變有關。因為當時人類是透過電離層反射短波無線電波來越洋傳送電報訊息。西元 1859 年九月2日的太陽閃焰曾造成越洋電信全面中斷。後來科學家才知道，這是因為太陽閃焰產生的短波輻射，增加了電離層電子濃度，進而造成短波無線電波在電離層中反射點高度的改變，所以越洋電訊傳送路徑發生改變，以致於收不到應該收到的訊息。經過一百多年的努力，我們現在已經不必靠電離層反射短波無線電波來進行越洋通訊，而是採用比無線電波更高頻的波段，藉由通訊衛星做資料的傳輸。可是這些較高頻的電磁波，雖然不會被電離層中的電子們完全反射，但是仍免不了被它們折射。因此我們所仰賴的衛星通訊與全球衛星定位系統（Global Position System 簡稱GPS）的運作，仍會受磁暴與磁副暴期間電離層電子濃度不均勻變化的影響，進而導致衛星通訊中斷與GPS定位失靈，詳情請見下節的說明。

太陽表面電漿與磁場的擾動對地球太空天氣的影響

在發生太陽短波輻射與高能粒子事件的同時，太陽表面還會產生磁場與電漿的噴發，在行星際空間中造成日冕物質拋射（coronal mass ejection）、磁雲（magnetic cloud）、與激震波（shock wave）。這些噴發事件，如果方向對著地球，就可以在太陽閃焰發生後十幾小時到兩天之內傳到地球附近。此時如果磁雲前半段區域或磁雲與激震波之間的鞘區（sheath），存在有明顯的南向磁場分量，就可以造成地球表面與磁層中強烈的磁暴(magnetic storm)與磁副暴（magnetic substorm）。這些磁暴與磁副暴事件，除了會造成絢麗的極光，

也會改變地球磁層的電流系統，造成地球磁場結構的暫態改變，並引發一聯串惡劣的太空天氣。例如，歷史上最著名的一次惡劣太空天氣，發生在北國的冬天：西元1989年三月13日，加拿大魁北克發生持續超過九小時的大停電，影響了6百萬居民。這次的停電是因為西元1989年三月9日那天，太陽表面的日冕物質拋射，經過一、兩天的時間傳到地球，造成地球上持續數天的磁暴，並伴隨著一陣陣週期為三小時左右的磁副暴。磁暴與磁副暴期間，地球的磁場會隨著時間發生大幅度的改變。這些高空磁場的改變，可藉由磁生電、電生磁的原理（冷次定律 Lenz's Law），先在中高緯電離層中產生極光與強電流，這些強電流再改變低空磁場，於是在地表產生感應電動勢，使負載電線與變壓器中的電流突然增加，造成電流超載而燒毀變壓器，造成大停電。台灣地區的磁緯度很低，因此我們的輸電系統受到磁暴與磁副暴的影響甚微，通常不會造成重大災害。

不論是磁暴或磁副暴，磁層中磁場的變化，大都強於地球表面的磁場變化。尤其是夜側同步衛星軌道所在處，地球磁場方向改變尤其劇烈。因此，如果人造衛星的姿態定位是根據地球磁場來做修正，則當地球磁場方向發生巨大改變時，衛星如果還繼續進行姿態修正，就會導致姿態錯誤，使得地面與人造衛星之間的遠距遙控指令，無法正常傳輸。如果人造衛星，姿態改變太多，就可能造成永久性的失聯(註四)。就算不永久失聯，在拯救衛星的過程中，也往往會耗掉許多備用燃料，造成這顆衛星日後提早除役。這類不幸的事件，過去都曾發生過。西元1994年一月20日的地球磁場風暴，曾暫時性的影響了兩顆加拿大通訊衛星 Aniks E1 and E2 與一顆國際通訊衛星 Intelsat K 的運作。而西元1997年一月7日的日冕物質噴發所造成的地球磁場風暴，更造成AT&T的通訊衛星 Telstar 401 永久的失聯，使得AT&T損失約兩億美元。

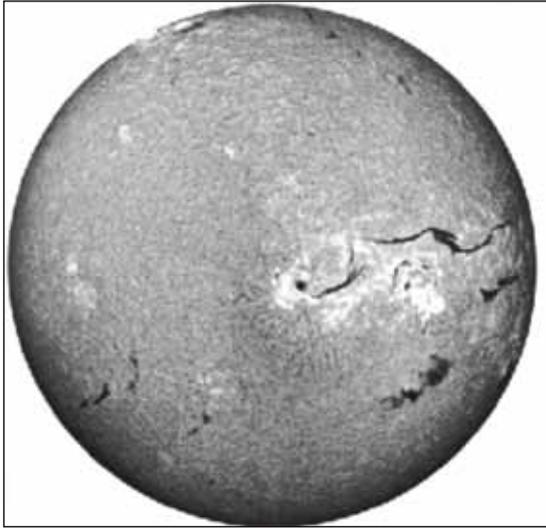
自從AT&T通訊衛星事件後，科技工程師才開始正視地球磁場風暴的警訊。因此目前已經不再有類似的事件發生了。但是還是有不少與磁暴以及磁副暴相關的問題，目前還找不出很好的預警方式。目前最棘手的問題就是在磁暴期間，因為地球磁層中磁場與電場的分布改變，會造成磁

層中電漿密度分布的改變，以致於沿著磁場對應到的電離層中的電子濃度也跟著改變。另外，磁層副暴的極光，也造成極區電離層電子濃度的擾動。由於電磁波穿過不均勻的電漿介質，會發生閃爍現象，就像我們透過營火看坐在對面的群眾，整個臉都扭曲了。這些高頻電磁波的閃爍現象，會影響全球衛星定位系統 GPS 的收訊。影響所及，除了一般仰賴 GPS 開車找路的小市民，生活受到影響，也會造成歐美之間跨極飛機航班（transpolar flights）與美國隱形軍機的飛安問題。由於跨極航班，依賴 GPS 來確認航向，因此極光造成極區電離層電子濃度的擾動，會使得跨極航班之GPS收訊不佳，造成跨極航班的飛安問題。所以依照飛航安全的規定，在磁暴與磁副暴期間，必須取消一些省油的跨極航班，因此增加數十萬美金的飛行成本。除了跨極的商用航班受到影響外，隱形軍機也完全仰賴GPS來飛航與起飛降落，因此 GPS 收訊不佳，對隱形軍機的飛安也造成很大的威脅！

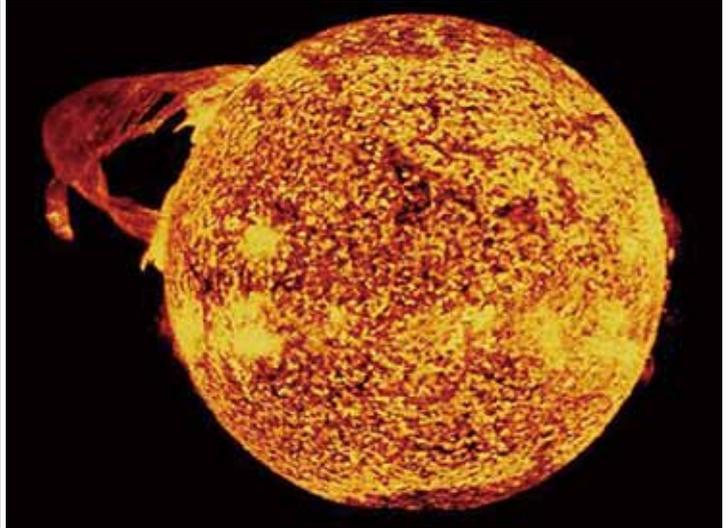
磁副暴期間，高緯地區地表磁場的變化，約五倍於磁暴與磁副暴期間中低緯地區地表磁場的變化。因此高緯地區，每逢磁副暴期間舉行的賽鴿比賽，都會造成賽鴿業者不少的損失。台灣的地磁緯度很低，因此只有遇到非常強烈的磁暴，例如西元2003年十月底的強烈磁暴，才會造成賽鴿迷失方向，造成賽鴿業者莫名的損失。此外根據統計，磁暴所造成的磁場擾動與感應電場，也會造成高科技積體電路製造業者的產品瑕疵率的提升。

如何預測惡劣太空天氣現象

要成功預測惡劣太空天氣現象，科學家需要了解造成太陽閃焰的物理機制與造成地球磁暴與磁副暴的物理機制。目前科學家在這些方面的了解，還有很大的努力空間。其中產生太陽閃焰，通常與色球層中日珥（prominence）或暗紋（filament）的噴發有關。日珥即暗紋，是一種由對流層頂部所浮出來的強磁力管。束縛在其中的電漿，無法與四周高溫的電漿透過對流或波動交換能量，只能用輻射方式吸熱與散熱，因此溫度比四周電漿低，甚至存在中性的氫原子。因為中性的氫原子會吸收、散



圖二、利用氫光譜所拍攝到的太陽盤面上暗紋與太陽黑子的分布情形。



圖四、噴發中的太陽日珥，很像太陽的耳朵。此圖為 Skylab IV 利用超紫外光 (EUV) 所拍攝到之太陽影像。

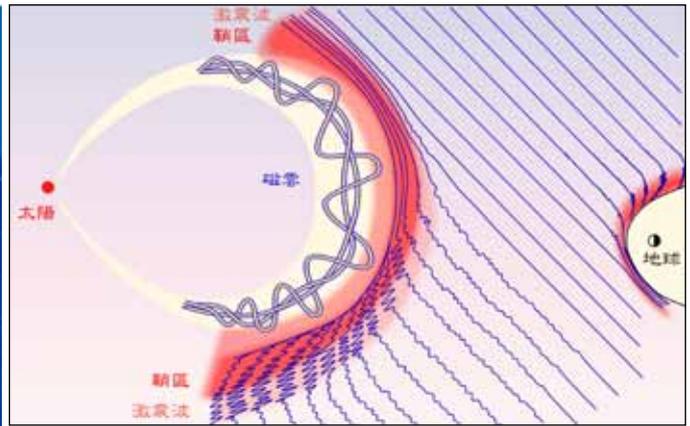
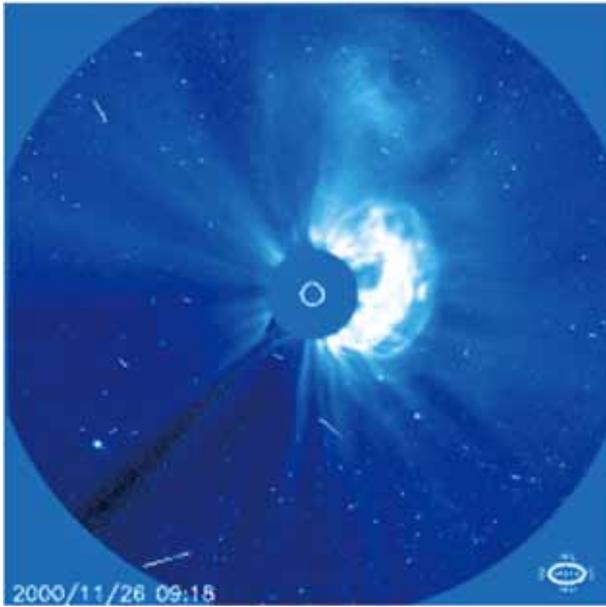


圖三、日食時所拍攝到的紅色之日珥與藍色之日冕。

射來自太陽表面屬於氫原子能階之特定波長的光源，因此鎖定氫光譜觀測，看起來比較暗，故稱暗紋（大陸翻譯做暗條），如圖二所示。當它轉到太陽光盤邊緣時，用它所散射的氫原子能階光譜觀看它，襯著黑暗的星空，顯得特別明亮，因此被稱為 prominence，如圖三所示。中文翻譯做日珥，因為正在噴發中的 prominence 看起來像太陽的耳朵。如圖四所示。

因為構成日珥或暗紋的磁力管是由一個幾乎沿著磁力管流動的電流所維持的。磁力管之磁場強度越強，就表示其中電流強度越強。因為磁能是以電流的方式存在於環境中，當這些磁能存得太多時，就會找機會釋放。通常日珥或暗紋與四周不同的磁場結構之間，也是以電流片相互區隔。若此電流片與沿著磁力管流動的電流相互影響或交流時，就會造成磁場結構重組，同時產生強大的感應電動勢，造成日珥或暗紋的噴發。一般說來，黑子群複雜的運動，可引發日珥或暗紋的噴發。但是歷年來的觀測結果顯示，黑子群複雜的運動並非引發日珥或暗紋噴發的唯一機制。一些日冕洞邊緣的日珥或暗紋噴發，往往與日冕洞中開放磁力管的波動有關。

日珥或暗紋噴發時，一部份電漿落回太陽表面光球層，造成太陽閃焰，一部份電漿被日珥或暗紋推著向外噴出，造成日冕物質拋射（coronal mass ejection 簡稱 CME），如圖五所示。噴發後的日珥或暗紋進入行星際空間中，就成了磁雲（magnetic cloud），如圖六所示。磁雲與前方的高密度日冕物質，像子彈一般一起向外射出時，在它們的前方，會壓出一個激震波（shock wave）。激震波與噴發之日冕物質之間是一個磁場強、密度高的鞘區（sheath）。如果鞘區或磁雲前半段的磁場方向朝南，就可以把地球北向的磁場“打開”，讓太陽風與激震波的能量，大量的灌入地球磁層，並以電流磁能的方式，存在地球磁尾，直到儲存了足夠的



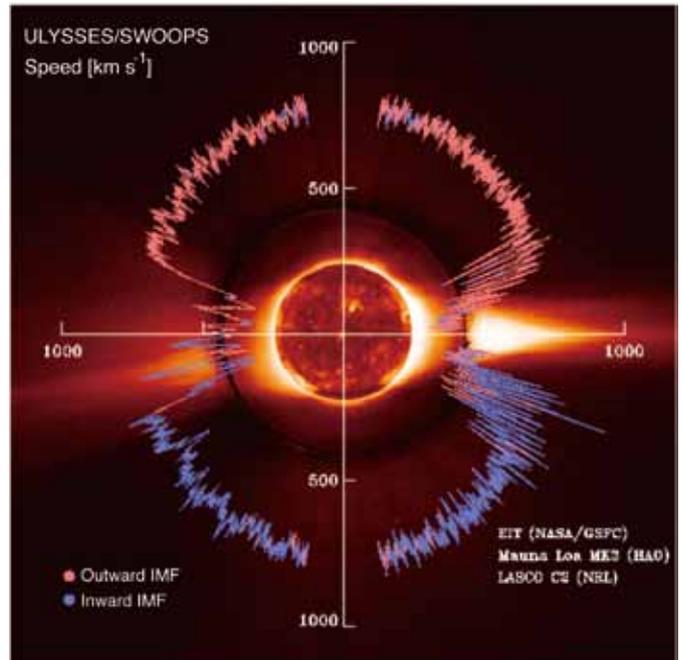
↑圖六、磁雲示意圖。噴發後的日珥或暗紋進入行星際空間中，就成了磁雲。

←圖五、日冕物質拋射事件。此圖為 SoHO/LASCO 利用白光，並遮去離太陽中心三個太陽半徑的光線，所拍攝到的日冕物質拋射影像。

能量，就會像地震那樣，“伺機”釋放能量，造成磁副暴與磁暴。這裡用“伺機”兩字來形容釋放能量的過程，這是因為科學家對造成地球磁尾能量釋放過程，尚未達到共識。或許就像刮風下雨那樣，本來就有不只一種的物理機制，可以造成這樣的風暴。這就是科學家還需繼續努力研究磁層副暴的緣故。

目前科學家對以光速傳來的太陽閃焰以及高能粒子事件的預報，相當力不從心。因此面對它們對太空人與太空儀器的損害，只能自求多福。不過科學家倒是可以根據太陽閃焰，來預防未來十幾小時到一週之內的磁暴與磁層副暴所造成的損害。不過，因為很難預測鞘區與磁雲前方磁場的方向，所以很難成功預報磁暴與磁層副暴的強度。這因為被壓縮的北向行星際磁場，對地球的影響，遠小於被壓縮的南向行星際磁場。所以如何成功預測鞘區與磁雲前方磁場的方向，是目前科學家努力研究的課題之一。

此外日珥或暗紋的噴發也不是唯一可以造成地球磁層副暴與磁暴的原因。圖七為 Ulysses 太空船所觀測到的太陽風分布情形。觀測結果顯示，來自極區日冕洞所



圖七、Ulysses 太空船所觀測到的太陽風的分布情形。觀測結果顯示，來自極區日冕洞所吹出來的太陽風風速要比來自低緯日冕區所吹出來的太陽風風速快很多。

吹出來的太陽風風速要比來自低緯日冕區所吹出來的太陽風風速快很多。在太陽活動的極小期到極大期與極大期到極小期之間的黑子數目上升期（raising phase）與下降期（declining phase），日冕洞會由極區，向中低緯延伸，出現類似象鼻子（elephant trunk）般的分布，如圖八所示。因此日冕洞所吹出來的高速太陽風，可追撞前方由同一緯度不同經度之日冕區所吹出來的慢速太陽風，如圖九所示，並在行星際空間中，造成大震幅的激震波與持續的低



圖八、Skylab 太空船利用短波 X 光 (hard X-ray) 所觀測到太陽表面類似象鼻子 (elephant trunk) 般分布的日冕洞結構。日冕區，被磁場束縛的電子密度高、溫度也高，可達到百萬度，電子繞磁場運動會放出X光，但因為強度不夠強，會被地球電離層吸收，因此要靠衛星或太空船，飛到電離層上方來觀測。日冕洞區，因為電子可沿著開放的磁場線，散逸到廣大的太空中，因此電子密度低，所以放出的X光強度弱，因此X光影像中，日冕洞區光度暗、呈現黑色。在太陽活動的極小期到極大期與極大期到極小期之間的黑子數目上升期 (raising phase) 與下降期 (declining phase)，日冕洞會由極區，向中低緯延伸，出現類似象鼻子 (elephant trunk) 般的分布。



圖九、高速太陽風追撞低速太陽風之示意圖。

頻電磁波擾動。科學家稱這種激震波為 co-rotating shock (與太陽自轉相關的激震波)，稱其後方高速太陽風中的低頻電磁波擾動為 co-rotating interaction region (簡稱 CIR)。這些擾動傳到地球附近，也可造成地球的磁暴與磁副暴。其後續對地球的影響，與太陽閃焰與日冕物質拋射所產生的激震波類似。其中高速的太陽風所伴隨的 CIR，也可透過磁層頂將能量傳給地球，儲存在磁尾，再伺機釋放能量，造成中等強度的磁副暴與磁暴。由於這些 CIR 出現週期與太陽自轉週期相近，因此是最容易預測的一種週期性太空天氣變化。相當適合根據它的出現週期來預先安排出國觀賞極光之旅。

太陽活動對氣候的影響

太陽表面的活動，除了會影響我們現代人的高科技生活，也會間接影響地球上的氣候。我們都知道，

黑子的觀測記錄中有一段時期，太陽黑子數非常少，史上稱之為「芒得極小期」(Maunder minimum)。這段時期，全球天氣非常冷，也稱作「小冰河時期」。為了說明兩者之間可能的關係，我們先來看看太陽活動與「地表宇宙射線」之間的關係。

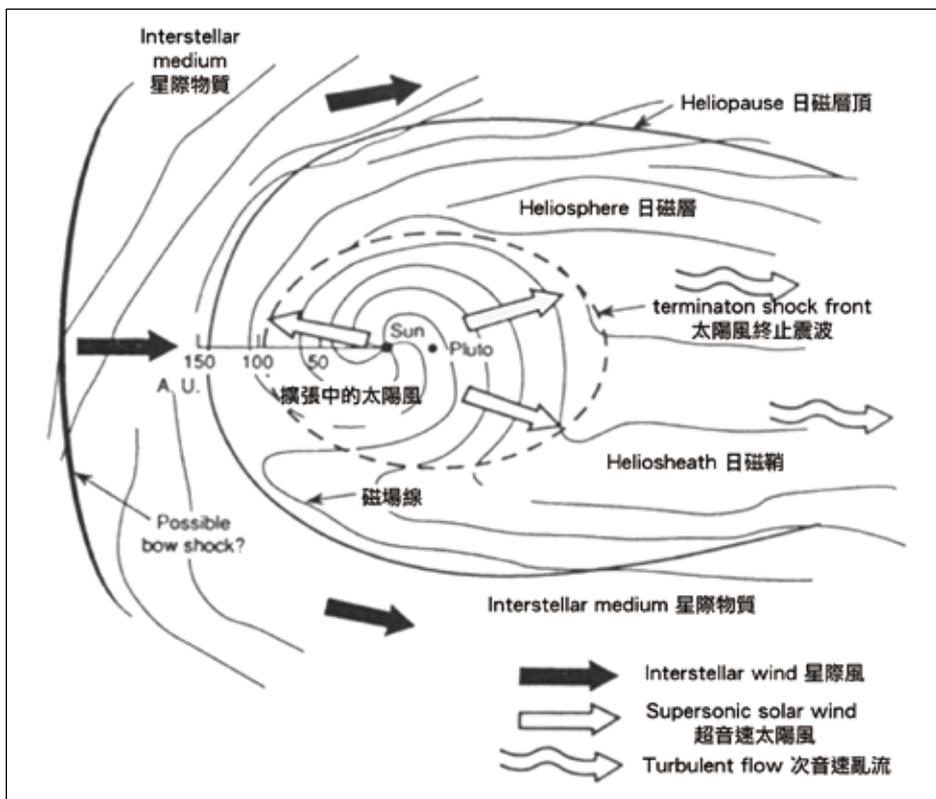
宇宙射線 (cosmic ray) 是一種高能的正離子。太陽閃焰與超新星爆炸，都會產生高能的正離子與電子。可是電子的「靜止質量」很小，所以在遠距離傳播時，很容易受到途中電場與磁場的影響而減速或偏轉。因此當我們考慮來自外太空的高能粒子時，通常強調的是高能的正離子，並把它們稱作「宇宙射線」。由於太陽閃焰所產生的高能宇宙射線，能量遠不如超新星爆炸所產生的宇宙射線能量高。因此太陽閃焰所產生的高能宇宙射線，大多數被束縛在外范艾倫輻射帶區域。只有很強烈的太陽閃焰，才能造成內范艾倫輻射帶中，高能粒子的數量增加。超新星爆炸所產生的宇宙射線能量很高，因此它們或被束縛在內范艾倫輻射帶，或進入中性大氣。所以地面上所觀測到的宇宙射線，大多源自於超新星爆炸所產生的宇宙射線，而非太陽閃焰所產生的高能粒子。

太陽黑子數是太陽表面磁場擾動的一個指標。太陽黑子數越多，太陽的輻射量與太陽閃焰也越多，所以來自太陽的宇宙射線也越多。

太陽黑子數越少、來自太陽閃焰的高能宇宙射線量也越少，但是來自太陽的宇宙射線能量不夠高，所以不易進入地球表面，因此地表所測得的宇宙射線量，除了在南北極的高緯地區外，都應該與太陽的活動無關。然而觀測顯示，地表測得的高能宇宙射線量，隨著太陽黑子數的減少而增加。為什麼會如此呢？原來，來自外太空的宇宙射線，其前進路線會受到「太陽風終止震波」(solar wind termination shock) 附近磁雲(magnetic cloud)數量的多寡影響。太陽風終止震波位在約一百個地日距離處，為太陽風受到星際物質減速成為亂流的區域，如圖十所示。當太陽黑子數多時，太陽表面磁場擾動活躍，會造成較多日珥或暗紋的噴發，噴放出較多的磁雲。這些磁雲累積在日磁層頂與太陽風終止震波附近，造成大振幅的磁場擾動，可改變宇宙射線的前進路線阻擋外太空超新星爆炸所產生的超高能宇宙射線，進入太陽內磁層。當太陽黑子長期不出現時，終止震波附近的磁雲漸漸消失減少，因此來自外太空的超高能宇宙射線，就可以長驅直入，來到地球附近，進入地球大氣，製造大量的凝結核，改變成雲降雨的分布。雲和雪會增加地球表面的全反射率(Albedo)，反射陽光，減少地表所能吸收到的熱量。因此造成地球氣候的改變，引發小冰河時期！

總結

本文中我們介紹了日珥或暗紋的噴發對地球太空天氣與太空氣候之短期與長期的影響，以及日冕洞在太陽表面的分布情形對地球太空天氣的影響。其中日珥或暗紋的噴發所造成的太陽閃焰，會發出短波輻射與高能粒子，以光速向外傳遞，造成太空人與太空儀器的傷害。而日珥或暗紋的噴發所產生的日冕物質拋射，或由日冕洞所吹出的高速太陽風追撞前方來自日冕區之低速太陽風，都可造成行星際激震波。行星際激震波撞擊地球磁層，視其磁場的南北分量，有一半的機會，可以造成強烈的磁暴與磁副暴。磁暴與磁副暴期間所增強與改變的電離層電流與磁層電流，會在地面與空中造成不同程度的惡劣太空天氣，造成中高緯地區的大停電、衛星通訊與GPS收訊不良，導致飛安問題，以及其他民生財產的損失。台灣目前處於低磁緯地區，因此受到的影響不大。但是隨著地球磁極朝著東半球晃動過來，約三百年後，台灣地區也可能有機會看到極光，同樣的，也可能開始會受到惡劣太空天氣的影響。



圖十、太陽風終止震波與日磁層頂分布示意圖。

補充說明

註一、太陽與電漿 (plasma)：太陽是一個大火球。根據古典物理的分類（不考慮低溫的量子簡併態），物質可分為四種物理狀態。由低溫到高溫依次為固態 (solid state)、液態 (liquid state)、氣態 (gas state)、與電漿態 (plasma state)。火就是一種電漿態。太陽除了表面色球層 (chromosphere) 中的少數區域，存在一些中性的氣態物質外，其他區域，包括色球層下方的光球層 (photosphere)、色球層上方的日冕 (corona)、以及太陽內部，都是完全游離的電漿態。順便一提，對岸的大陸學者將 plasma 翻譯成一個冗長的名詞「等離子體」。將「太空物理」翻譯成「空間物理」。在醫學界，plasma 就是無色的血漿。本文中，我們統一採用國內太空物理界的翻譯，稱 plasma state 為電漿態。

註二、太陽內部結構：科學家利用日震學 (solar seismology or helioseismology)，也就是一種與探測地球內部結構相似的震波傳播理論，來探測太陽內部。因為聲波傳播速率的平方值會正比於「氣體溫度與平均質量的比值」，如果越靠近太陽中心「氣體溫度與平均質量的比值」越高，則太陽表面所產生的震波，向太陽內部傳播時，會因為下層波速比上層波速快，而向上折射。這樣一來就可藉由分析太陽表面不同點的震動相位相關性，反推波的行進路線，再反推太陽內部溫度、密度、甚至氣體流速大小與方向的空間分布。我們的太陽內部剛好滿足「氣體溫度與平均質量的比值」，由內而外遞減的特性，因此科學家可用日震學來探究太陽的內部結構。根據「日震學」的觀測結果，太陽內部約四分之一個太陽半徑內的電漿，溫度與密度都高到足以進行核融合反應。這個區域被稱為太陽的核心 (core)。太陽的核心外圍是一層緻密的輻射層 (radiative zone)，範圍大約位在 0.25 個太陽半徑到 0.7 個太陽半徑之間。太陽輻射層之外，是太陽的對流層 (convective zone)，也是太陽磁場產生區，範圍大約位在 0.7 個太陽半徑到 1 個太陽半徑之間。由星球的演化看來，太陽內部這三層的分布，應該不是永遠不變，因此這只能說是現階段太陽內部結構的描述。

註三、電離層中電子濃度如何影響電磁波的傳播？我們都知道，把一個鑲了正電荷的絕緣體靠近一個導體球，該導體球表面的電子就會朝向該正電荷靠近，造成該導體球表面出現正負電荷的分布，以抵消絕緣體上正電荷所產生的電場，使得導體球

內部維持等電位、零電場的狀態。也就是說良導體中的自由電子可將外加電場屏蔽於外。同理，電離層中的電漿，不論是低空之部份游離電漿或高空之完全游離電漿，也是相當好的導體，尤其是其中的電子，因為質量輕，所以可以快速移位，以抵消外加電場。可是如果外來的電場是一個會隨時間一直改變方向的電磁波電場，這時就要靠電子們一直來回奔波震盪，才能完全將電磁波中的電場屏蔽於外。這就好像打籃球時，進攻那一方（類比於電磁波），如果能快速左右傳球，就可以成功切入對方籃下。反之，防守那方（類比於電漿），如果有些隊員已經五犯離場，則在人手不足的情況下，通常很難守住對方切入籃下。反之，如果比賽規則允許防守那方，增加人手，則只要防守那方人手夠多，則就算對方左右傳球頻率再快，還是可成功阻斷對方攻勢。同樣的，當電磁波打入電離層中，如果電磁波頻率不夠高（低於當地電漿的震盪頻率），就會被高密度的電漿所反射（電漿震盪頻率隨著電漿密度增加而增高）。如果電磁波的頻率高於當地電漿頻率但遠低於紫外光頻率，則此電磁波應可順利通過此電漿，只是行進方向恐怕會發生一些偏折（折射）。當電磁波頻率高於紫外光頻率，這時籃球就變成了包子，會被吃掉。因為中性大氣會吸收波長短於紫外光的短波輻射，發生游離。

註四、衛星失聯：衛星失聯的原因很多，可能是單純的接收機故障，也可能是衛星姿態不對。這就好像用遙控器打開電視，可是電視機被轉了一個方向，於是遙控器所發出去的開機訊息，電視機就收不到了，我們也就無法開機了。造成衛星姿態偏轉的原因很多。例如低軌道衛星往往因為大氣摩擦力大而造成衛星姿態偏轉。如果地面控制台發現得太晚，就會來不及把衛星姿態轉回來，而導致衛星永遠失聯。但有時候雖然及早發現了，可是衛星上已無備用能源，所以也無力再把衛星姿態轉回來。中華衛星一號(福衛一號?)，就是因為大氣摩擦導致姿態偏轉而與地面失聯。同樣的，由於在磁副暴期間，夜側同步軌道（6.6個地球半徑）附近的地球磁場，受磁層電流重新分布的影響，常發生接近70-80度的偏轉，因此如果地面控制中心還任憑夜側同步軌道通訊衛星在磁副暴期間依照當地磁場自行調整姿態，就可能導致通訊衛星的訊號接收器不面對地面，這樣我們就很難再由地面繼續控制這顆衛星，而造成這顆衛星永遠失聯了。

呂凌霄：國立中央大學太空科學研究所副教授