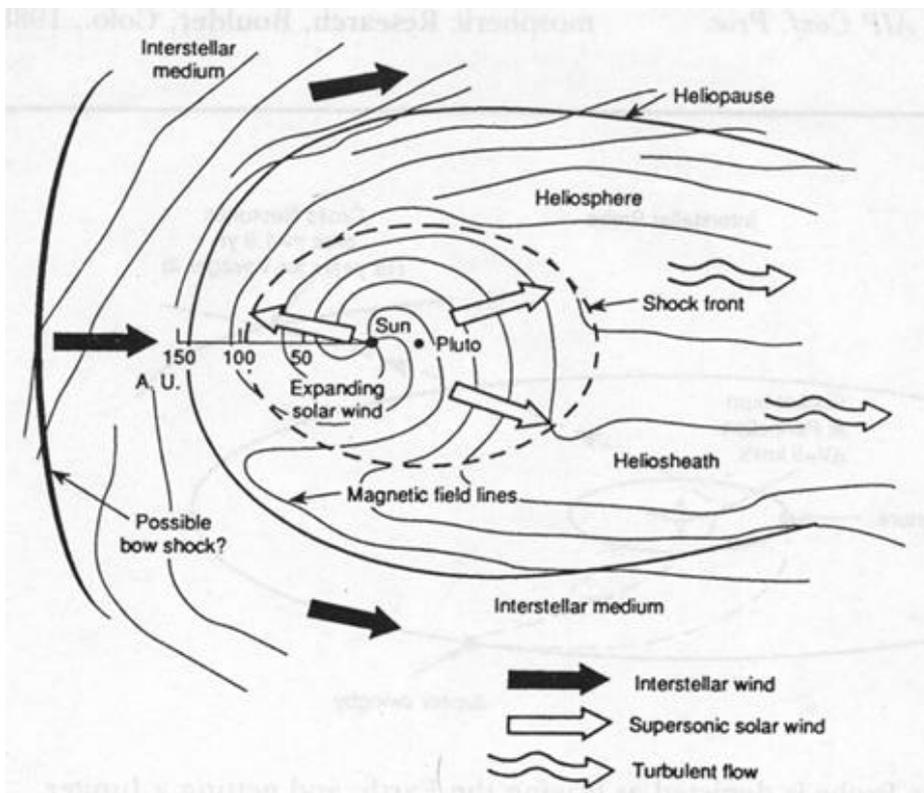


磁層簡介

磁層的相對位置

地球磁層位於電離層與太陽風之間。

太陽是一個大火球。也就是一個密度、溫度都很高的電漿球。太陽風是由太陽表面吹出來的一種高速電漿流。它的速度由每秒兩百公里到八百公里不等。它在離開太陽不到十個太陽半徑處，就已經加速到如此高速。一直到冥王星處，速度仍未減慢。一般相信，在約兩倍冥王星與太陽的距離處，太陽風將會穿過一個接近球殼狀的終止震波面，並減慢成為亂流《見圖十一》。



圖十一、太陽日磁層之黃道面上的剖面圖。虛線表終止震波的可能位置。太陽風穿過終止震波後，速度降為次磁音速。

磁層的電漿來源

磁層中的電漿，大部分來自下方的電離層，小部份源自太陽風。

科學家如何區分電離層的電漿與太陽風的電漿呢？原來相對而言，電離層的電漿，所含氧離子的濃度會比較高些。而太陽風的電漿，所含氫離子的濃度會比較高。

電漿來源	電漿中主要正離子成份
電離層	氫離子、氧離子
太陽風	氫離子、氦離子

磁層與電離層的區分

磁層與電離層之間《並不存在》一個明顯的邊界。所以沒有辦法定義一個「電離層頂」。

磁層與電離層的區別：

磁層中，中性氣體濃度甚低，可以視為完全游離的電漿。電離層中，中性氣體濃度甚高，為部分游離的電漿。

然而，磁層中游離氣體的絕對濃度，遠小於電離層中游離氣體的絕對濃度。因此，磁層對電磁波的影響，不如電離層重要。

磁層頂(magnetopause)，磁層(magnetosphere)、磁尾(magnetotail)

磁層與太陽風的邊界

一般說來，在磁層與太陽風接壤處，內側磁層電漿，密度低、溫度也低。外側太陽風電漿，密度高、溫度也高。因此，形成了一個明顯的邊界，也就是「**磁層頂**」(magnetopause)。

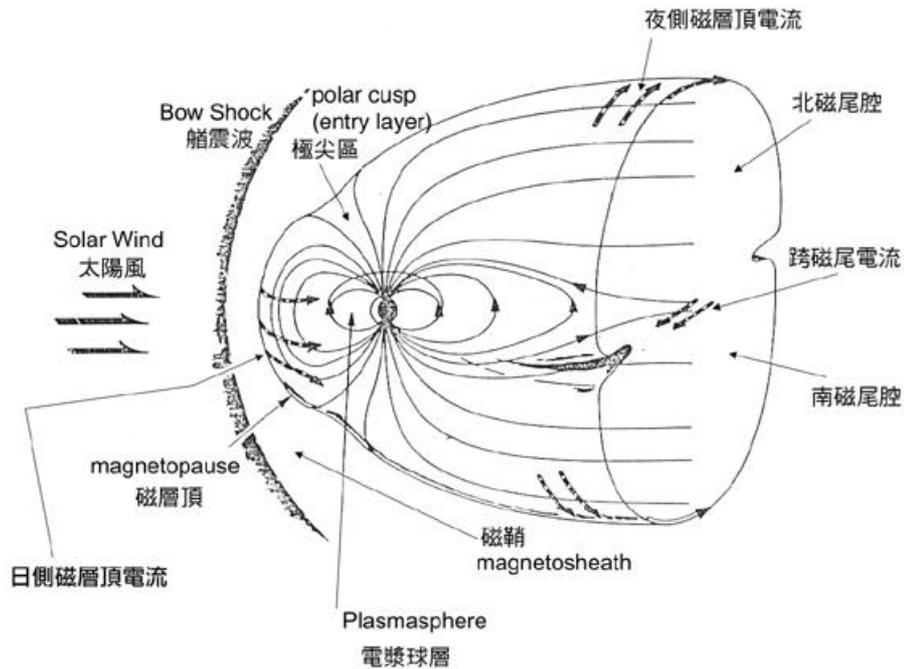
磁層的外觀結構

當太陽風吹向地球時，地球原有的磁偶極場在向陽面會被壓的扁一點，而背陽面之地球磁場的磁場線，則被拖拉成尾巴狀。整個地球磁場所佔據的勢力範圍，就是**磁層**。

磁層中的背陽處尾巴狀的結構，就叫做**磁尾**。

問：磁層為何會由原來對稱的磁偶極場，變形到目前這種，有「頭」有「尾」的結構？

提示：想想看，哪些物理量，可以改變磁場的大小與方向？



圖三 (A) 地球磁層、磁鞘、與船震波之分布。

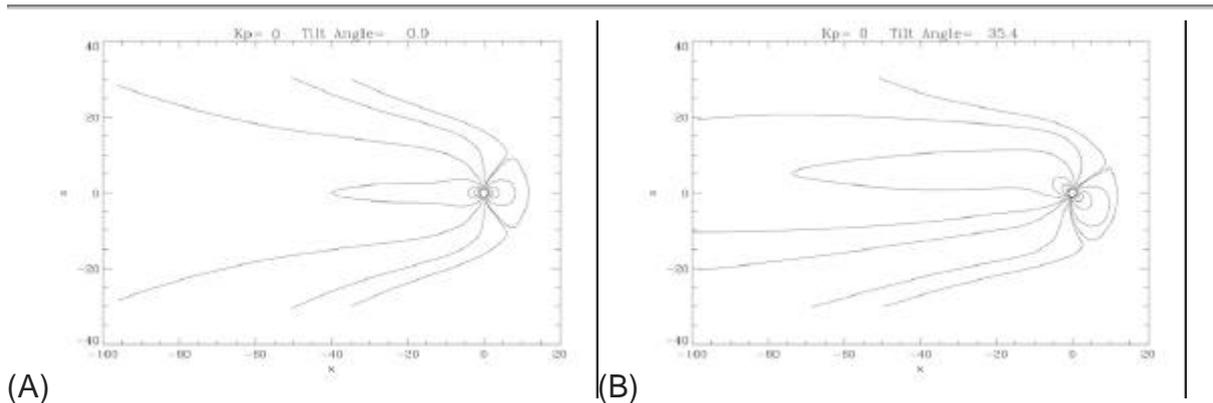
磁層結構會隨著地球磁軸與地日連線方向的夾角不同而略有不同。

圖一就是在不同**磁軸傾角**時，子午面磁層結構圖。

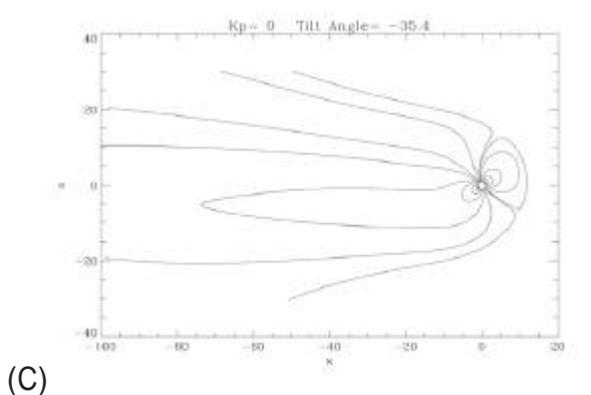
地球磁層與磁層頂的位置與形狀，也會隨著地球磁場擾動程度、太陽風速大小、以及行星際磁場方向等因素的改變，而改變其形狀。

圖二就是在不同地球磁場擾動時，磁層結構與磁層頂分布情形。

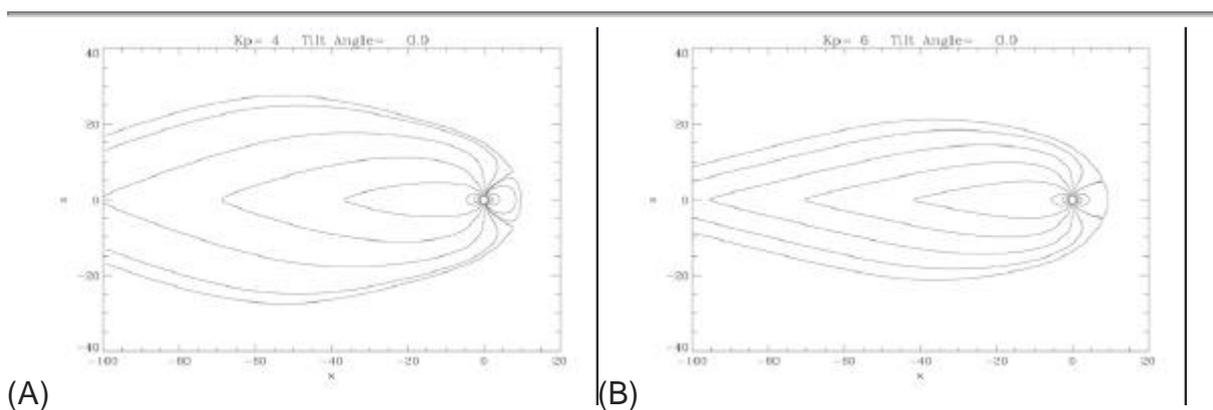
由圖一與圖二可知，地球磁場安靜時期，日側磁層頂的位置距離地心最近約十個地球半徑，而背陽面的磁尾最遠可達數百地球半徑（有時甚至可達一千個地球半徑）。



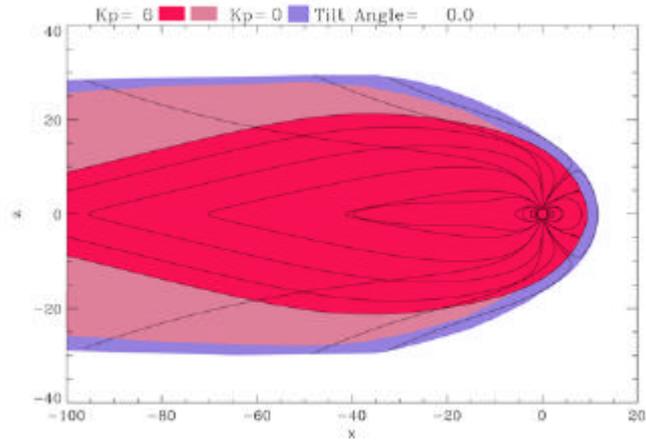
圖一 (A) 當地磁擾動指數 $K_p = 0$ (安靜期) , 且磁軸傾角為 0 度時 , 子午面上地球磁場線的分布情形。 (B) 當 $K_p = 0$ 且磁軸傾角為 35.4 度時 , 子午面上地球磁場線的分布情形。此圖可視為夏至時 , 台灣地區午夜前後的地球磁層結構。磁軸傾角為地磁南極 (在加拿大境內) , 與黃道面 z 軸 (也就是地球公轉軸) 的夾角。



圖一 (C) 當 $K_p = 0$ 且磁軸傾角為 -35.4 度時 , 子午面上地球磁場線的分布情形。此圖可視為冬至時 , 台灣地區正午前後的地球磁層結構。

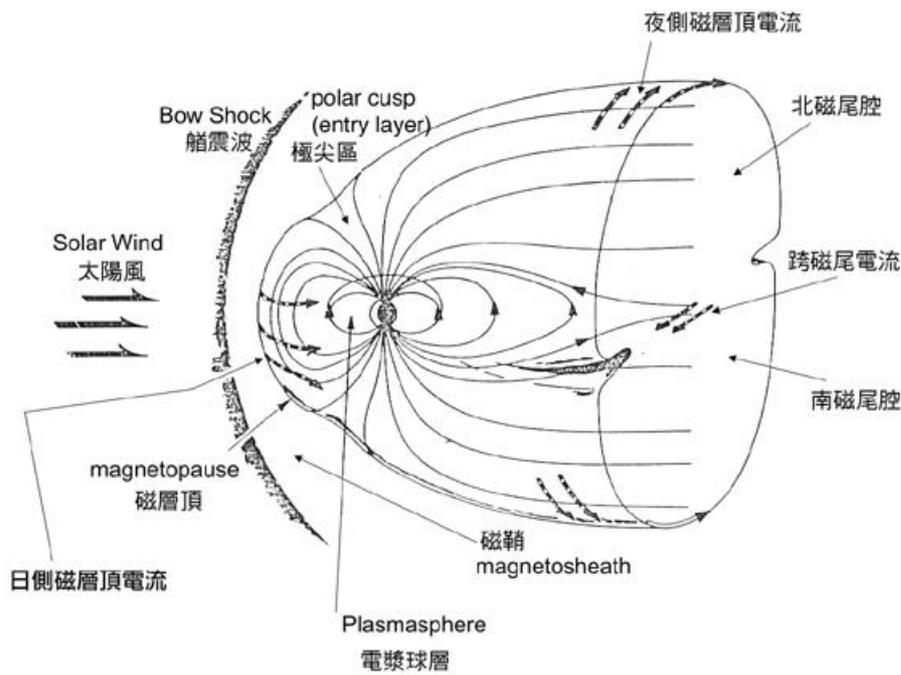


圖二 (A) 當地磁擾動指數 $K_p = 4$ (擾動期) , 且磁軸傾角為 0 度時 , 子午面上地球磁場線的分布情形。 (B) 當地磁擾動指數 $K_p = 6$ (強擾動期) , 且磁軸傾角為 0 度時 , 子午面上地球磁場線的分布情形。

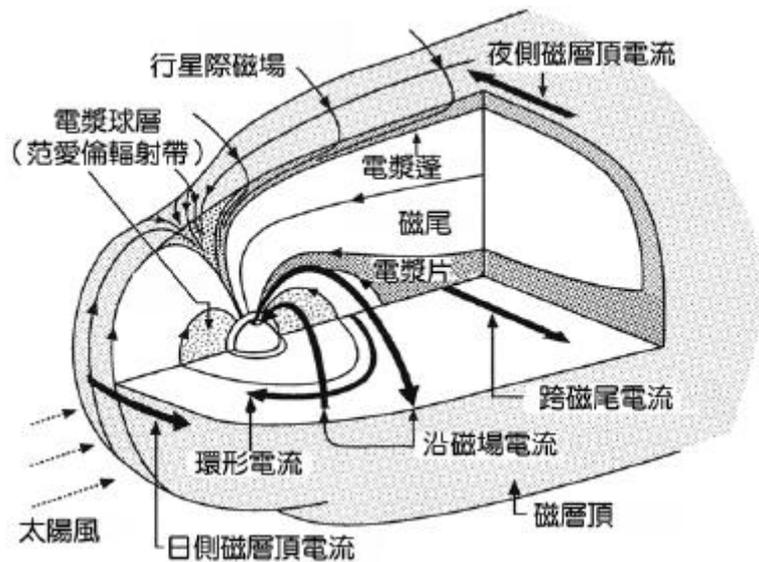


(C)

圖二 (C) 不同 K_p 值時，地球磁層頂的位置與形狀。藍色為 $K_p = 0$ 時的磁層範圍。紅色部份為 $K_p = 6$ 時的磁層範圍。深紅色邊界為 $K_p = 6$ 時，子午面上的磁層頂內部範圍；淺紅色部份為 $K_p = 6$ 時，靠近晨昏兩翼的磁層頂內部範圍。因此， $K_p = 6$ 時，子午面附近的磁尾比較短，晨昏兩翼的磁尾比較長。



圖三 (A) 地球磁層、磁鞘、與船震波之分布。



圖三 (B) 地球磁層頂內部的磁層結構。

艏震波(Bow Shock) , 磁鞘(Magnetosheath)

配合圖三，首先讓我們介紹磁層頂外部的特殊電漿結構。

地球的磁層頂前方，有一個**艏震波**。艏震波與磁層頂之間的亂流區域，我們稱它為**磁鞘**。（見圖三）

艏震波的形成原因：

當高速的太陽風，撞上磁層頂時，因為受到地球磁場的阻擋，必須停下來，於是太陽風速大減。

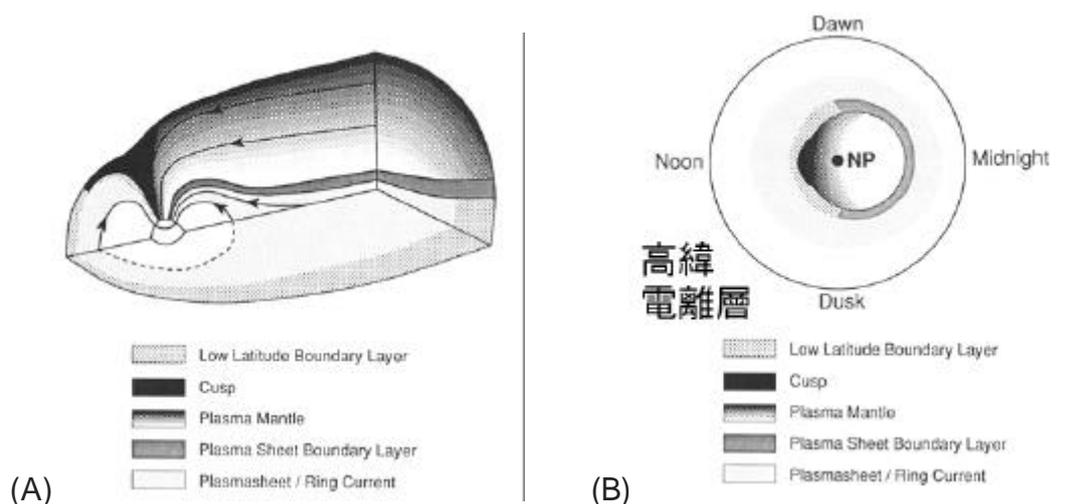
當太陽風速由超磁音速減小到次磁音速的地方，就會自然的形成一個激震波。因為這個激震波的外型，與船在水中航行時，船首前方所形成的艏波（bow wave）很像，因此又稱為艏震波。

問：自然界中的常見的激震波有哪些？試舉例說明它們的特性。

艏震波與磁鞘都是屬於太陽風的勢力範圍。但是由於它們緊接著日側磁層頂，因此也是磁層物理學家，感興趣的研究範圍。**艏震波與磁鞘中，有許多大振幅的波動，是一個很理想的、天然的電漿物理實驗室。**

極尖區(polar cusp)、低緯邊界層(low-latitude boundary layer, 簡寫為 LLBL)、高緯邊界層(high-latitude boundary layer, 簡寫為 HLBL)【又稱：電漿篷(plasma mantle)】

配合圖三、圖四，以下介紹磁層頂內部的磁層結構。



圖四 (A) 地球磁層中的各種邊界層。(B) 磁層中的各種邊界層，沿磁場線，在高緯電離層的投影位置與分布情形示意圖。太空科學家，可以像中醫把脈一樣，藉著在地面觀測沿磁場線，傳來的各種訊息，設法了解整個磁層，尤其是各個邊界層中的變化。

磁層頂好像磁層的皮膚，位在最外圍，阻擋太陽風進入我們的磁層。可是就好像人有七竅與外界相通，磁層頂上，還是有幾個開口，使得太陽風電漿可以進入地球磁層。最明顯的，就是兩個耳朵般的開口，也就是極尖區。

極尖區

極尖區位於南北磁極區，呈喇叭狀（見圖三、圖四）。

極尖區的磁場線與太陽風中的行星際磁場線相接。相接處，磁場強度可為零。

太陽風中的電漿可沿著磁場線直接進入極尖區。

問：磁場線與磁力線哪一種說法比較恰當？

磁層頂好像磁層的表皮，表皮下面還有真皮，再下去才是肌肉與內臟。真皮組織好像表皮的內邊界層。地球磁層的內邊界層，有兩種。一種叫做《低緯邊界層》，另一種

叫《高緯邊界層》或《電漿篷》。這兩區，因為磁場方向不同，使得這兩個邊界層，有著截然不同的特徵。

低緯邊界層

《低緯邊界層》的磁場線連接到磁緯度約 75 度到 85 度之間的電離層。由於這個區域的緯度比起《高緯邊界層》所連接的電離層的緯度來的低（後者約 85 度到 90 度之間），故稱做《低緯邊界層》。

《低緯邊界層》的範圍包括了：日側磁層頂內側，以及磁尾磁層頂內側靠近赤道面的區域（見圖四）。

磁尾磁層頂靠近赤道面的區域，地球磁場方向與太陽風方向垂直。因此風切所造成的渦流旋轉軸方向，將與磁場方向平行（或反平行），所以很容易形成渦流。

日側磁層頂內側的低緯邊界層，有時會發生太陽風磁場與地球磁場之磁場線重聯現象。也會產生很多波動。

總而言之，低緯邊界層中，波動多，太陽風電漿與地球電漿的混合速度非常快也很有效率。

高緯邊界層（電漿篷）

《高緯邊界層》的磁場線連接到磁緯度約 85 度到 90 度之間的電離層。由於這個區域的緯度比起《低緯邊界層》所連接的電離層的緯度來的高（後者約 75 度到 85 度之間），故稱做《高緯邊界層》。

電漿篷（或稱高緯邊界層）位於夜側磁尾磁層頂南北區域的內側（見圖三（B）、圖四）。

磁尾磁層頂南北區域，地球磁場方向與太陽風方向平行（或反平行）。因此風切所造成的渦流旋轉軸方向，將與磁場方向垂直，因此很難形成渦流。

在高緯邊界層中，太陽風電漿主要是以擴散的形式與磁層電漿慢慢混合，因此波動比較少。只有在磁暴發生的時候，才會因為日側磁層頂傳來的擾動，在此區域產生波動。

電漿片(Plasma sheet)、磁尾腔(Magnetotail Lobe)、電漿片邊界層(plasma sheet boundary layer, 簡寫為 PSBL)

磁層頂的另一個永久的開口，是位在磁尾的最遠端。太陽風電漿可以由磁尾的最遠端開口，進入地球磁層，形成電漿片。電漿片與南北磁尾腔都位在磁尾區，但是兩者的電漿密度與磁場強度都相差懸殊。

電漿片

電漿片位於磁尾的赤道面，特徵為磁場強度小，電漿密度高（見圖三（B）、圖四）。

本區電漿的來源一半來自太陽風，另一半來自高緯的電離層。

當太陽風在赤道面磁層頂附近吹過時，帶正電的離子會受磁力，左旋進入早晨側磁尾的赤道面低緯邊界層。帶負電的電子會受磁力，右旋進入黃昏側磁尾的赤道面低緯邊界層。這兩片太陽風粒子所形成的平行帶電區，造成地球磁層的跨磁尾電場，方向為晨到昏的方向(dawn-to-dusk)。

跨磁尾的晨昏電場與赤道面南北磁場合起來，會像幫浦一樣自磁尾最尾端抽取太陽風電漿($E \times B$ drift)，進入電漿片。使得磁尾電漿片中的電漿濃度，不會因為距離地球電離層太遠而變得非常稀薄，仍能維持一定的濃度，平均約每立方公分到每十立方公分就有一個電漿粒子。

磁尾腔

南北磁尾腔是位於電漿片與南北電漿篷之間的空腔區（見圖三（A））。

磁尾腔的特徵為磁場強度大，電漿密度低，平均約每一百立方公分才有一個電漿粒子。

南北磁尾腔中的磁場越強，則磁場壓力越大。強大的磁壓，會把電漿片壓得很薄。

電漿片中的電漿，受到磁尾腔中磁場壓力的影響，不易流失到低密度的磁尾腔中，只能沿著磁場線，流向地球電離層，造成極光。

電漿片邊界層

電漿片邊界層位於電漿片（高電漿密度區）與南北磁尾腔（低電漿密度區）的交界面（見圖四）。

造成極光的電漿流，可能就是沿著這個交界面進入高緯電離層（約介於緯度 65 度到 75 度之間，巨大磁暴發生時，對應的電離層緯度，可以更低）。

電漿球層(plasmasphere)、電漿層頂(plasmopause)、環形電流(ring current)、范愛倫輻射帶(Van Allen Radiation Belts)

電漿球層是離地球最近的一圈內磁層。這個區域的磁場很強，電漿濃度也很高。是最早被太空科學家研究的一個區域。這個區域有兩個重要的物理現象：一個是范愛倫輻射帶，一個是環形電流。

范愛倫輻射帶的形成，顯示此區的強磁場為我們地球上生物抓住了許多有害的高能粒子輻射。

環形電流的位置與強度的改變，造成中低緯度的磁暴，對我們的民生科技，影響很大。

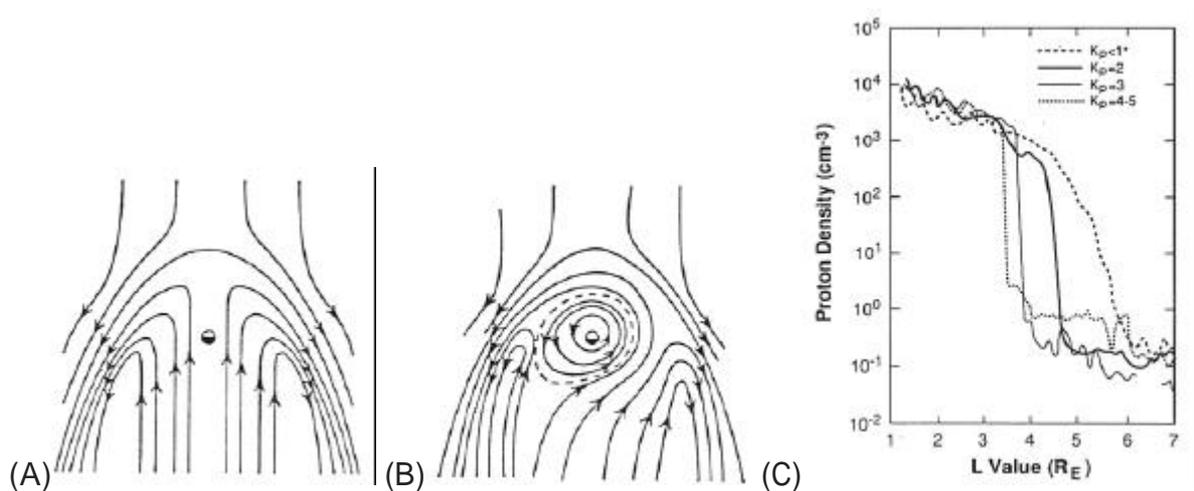
電漿球層

電漿球層是一個高電漿密度的內磁層區域，平均約每立方公分就有一千到一萬個電漿粒子。

電漿球層內之電漿主要來自中、低緯電離層。少部分高能粒子來自磁層（很少數的高能粒子來自磁尾電漿片以及外太空）。

電漿球層的形成與地球自轉有密切的關係。

圖五為描述電漿層之形成的示意圖。



圖五 (A) 表示不考慮地球自轉效應，只考慮太陽風吹過磁尾兩側，在磁層赤道面上造成的環流結構。(B) 表示若加上地球自轉效應，則在靠近地球附近的磁層赤道面上，會產生一圈電漿環流，繞著地球兜圈子，而不會流失到廣大的磁尾空間中。圖中虛線圈內的區域，即為電漿球層在赤道面上的投影。(C) 顯示在不同 K_p 值時，電漿球層內外電漿密度分布情形。密度梯度最大處為電漿球層頂。圖中顯示電漿球層頂的位置，隨著 K_p 值增加而內移，梯度也增加。

圖五 (A) 表示不考慮地球自轉效應，只考慮太陽風吹過磁尾兩側，在磁層赤道面上造成的環流結構。

圖五 (B) 表示若加上地球自轉效應，則在靠近地球附近的磁層赤道面上，會產生一圈電漿環流，繞著地球兜圈子，而不會流失到廣大的磁尾空間中。

圖五 (B) 中虛線圈內的區域，即為電漿層在赤道面上的投影。

此區域中之電漿會沿磁偶極場的磁場線運動，因此三度空間之電漿層的結構，即由通過此虛線內區域的磁力線管所構成。其外觀形態仿若一游泳圈般套在地球的腰上（赤道！），如圖三所示。

電漿層頂

電漿層頂為高密度的《電漿球層》與低密度的《外磁層》空腔的交界面（見圖五 (C)）。

電漿層頂的位置決定了電漿球層的大小。

行星自轉的越快，電漿球層越大。

電漿層頂的位置也會隨著太陽風所產生的晨 昏電場強度增強而內移。

電漿層頂的位置也會隨著磁層頂的位置內移而內移。

電漿層頂處的電漿密度梯度，可以產生逆磁電流。方向由東向西，是構成環形電流的一大主力。電漿層頂的位置內移，會使得環形電流對地面磁場的影響增加，造成中低緯度的磁暴。

環形電流

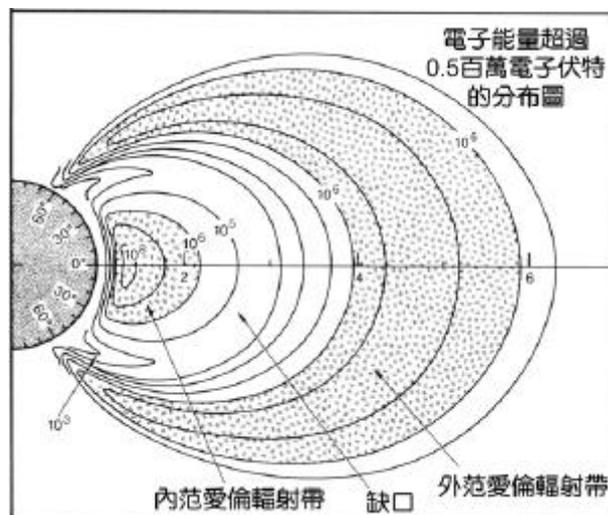
環形電流是位於中低緯上方磁層中的一個自東向西的環形電流迴路（見圖三（B））。

環形電流強度的突然增強，或位置的突然內移（電漿層頂為其主要位置），均可造成中低緯地面觀測到的磁場強度突然減弱的現象，而造成磁暴。

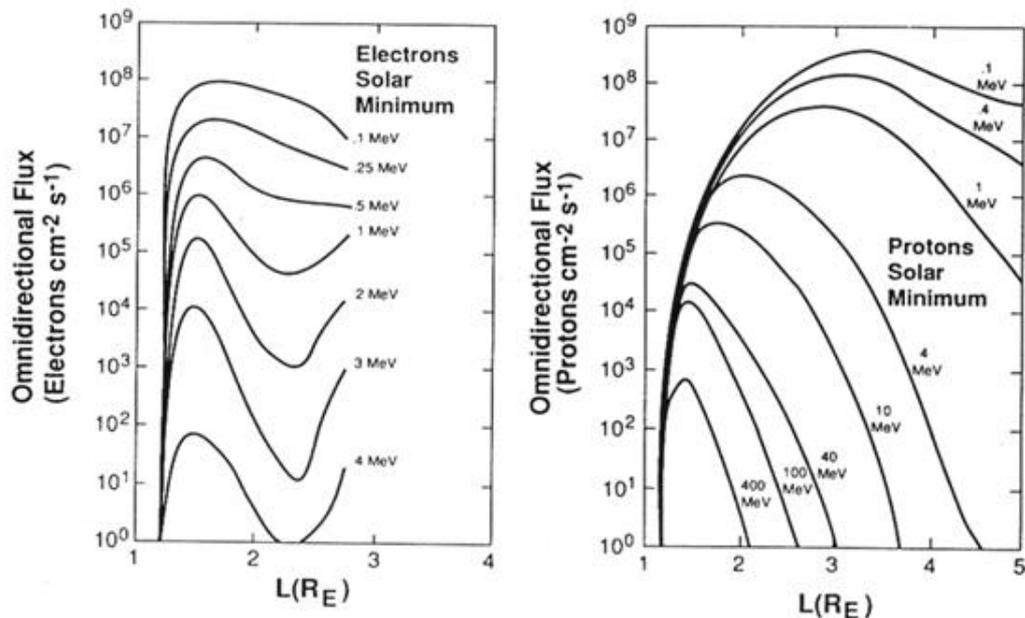
環形電流除了與電漿層頂的位置以及該處的密度梯度有密切的關係，它也與范愛倫輻射帶中，高能粒子的含量有密切的關係。

范愛倫輻射帶

范愛倫輻射帶有兩種。一為《內范愛倫輻射帶》，一為《外范愛倫輻射帶》（見圖六）。



圖六（A）內、外范愛倫輻射帶的空間分布情形。



圖六 (B) 范愛倫輻射帶中的高能電子與高能質子，在不同 L 值的磁場線上的分布情形。內、外范愛倫輻射帶的分野可由高能電子的分布圖看出來。其中， $L = 4$ 的磁場線，表示該磁場線通過磁赤道時，距離地心 4 個地球半徑。

內外范愛倫輻射帶的空間分布

范愛倫輻射帶中的高能電子與高能質子的分布情形如圖六 (B)。內、外范愛倫輻射帶的分野可由高能電子的分布圖看出來。

《內范愛倫輻射帶》約位在一~二個地球半徑上空。

《外范愛倫輻射帶》約位在四~五個地球半徑上空。

比較：電漿球層頂之平均位置約為五~六個地球半徑上空。但有時可以內移至三~四個地球半徑。所以說，《外范愛倫輻射帶》有時在電漿球層內，有時位在電漿層頂外側。《內范愛倫輻射帶》一定位在電漿球層內部。

內外范愛倫輻射帶的形成原因

《內范愛倫輻射帶》的形成原因：超新星爆炸所產生的高能宇宙射線粒子，打入磁層後，被電漿球層內的強磁場所束縛住，同時又與電漿球層內其他粒子碰撞，產生更多新的高能粒子，最後構成的一個高能電子的

輻射帶。

《外范愛倫輻射帶》的形成原因：來自高緯電離層的電漿，沿著磁場到了磁尾區，或者太陽風的電漿，由磁層頂的一些開口處，進入磁層，最後也可能會跑到磁尾區。這些電漿粒子在磁尾區被晨昏電場加速後，會灌進電漿球層中，或鄰近區域，最後構成的一個高能電子的輻射帶。

來自磁尾的高能粒子數量很多，可是每個粒子的能量不如超新星爆炸所產生的高能宇宙射線的能量高，因此無法深入到《內范愛倫輻射帶》的高度。

由於高能粒子在磁偶極場中運動，會發生顯著的漂移運動。包括了「磁場梯度漂移」以及「磁場線曲度漂移」。因為這兩種漂移速度大小均與粒子的動能成正比，而且正、負電荷粒子的漂移方向相反。因此《外范愛倫輻射帶》中這些高能的粒子，數量雖不多，但是所造成的各種漂移電流都相當大（恰巧也是由東向西的電流）。

關於各種漂移電流的成因，是比較深入的電漿物理問題，需要大二以上的物理背景知識，才能進一步深入的介紹。

科學家發現《外范愛倫輻射帶》中的高能粒子漂移所攜帶的電流，是構成環形電流的一個另一個重要部分。因此有時便簡稱《外范愛倫輻射帶》為《環形電流區》。不過，要記得，《外范愛倫輻射帶》中的高能粒子所攜帶的電流，並不等於環形電流。低能粒子的密度梯度在電漿層頂處所造成的逆磁電流，也是構成環形電流的一大要素。

磁層模型(Magnetosphere Models)

1、愛克斯福特 - 漢斯模型：封閉式之磁層模型。
(Axford-Hines Model : Closed Magnetosphere Model)

圖七：封閉式磁層模型，以及此模型所預測之(a)磁層赤道面，與(b)高緯電離層中電漿流流動情形。

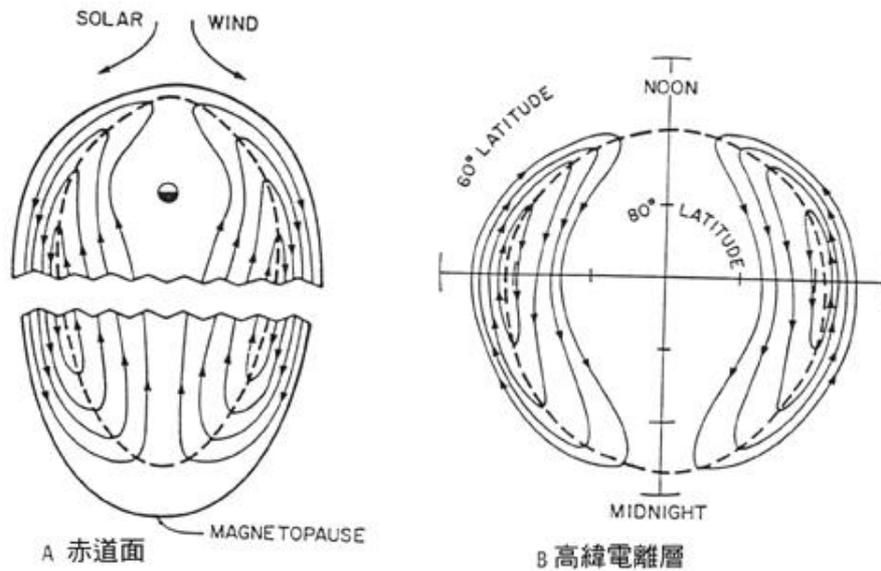
2、當吉模型：開放式之磁層模型。
(Dungey's Model : Open Magnetosphere Model)

圖八（A）：行星際磁場為南向時之開放式磁層模型，以及磁力線重聯情形。

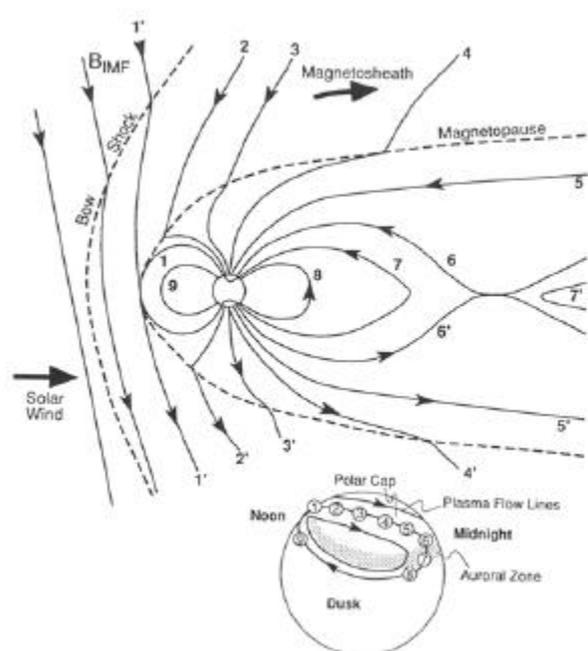
圖八（B）：行星際磁場為具有北向分量以及昏 - 晨分量時，開放式磁層模型，以及磁力線重聯情形。

3、混合模型：

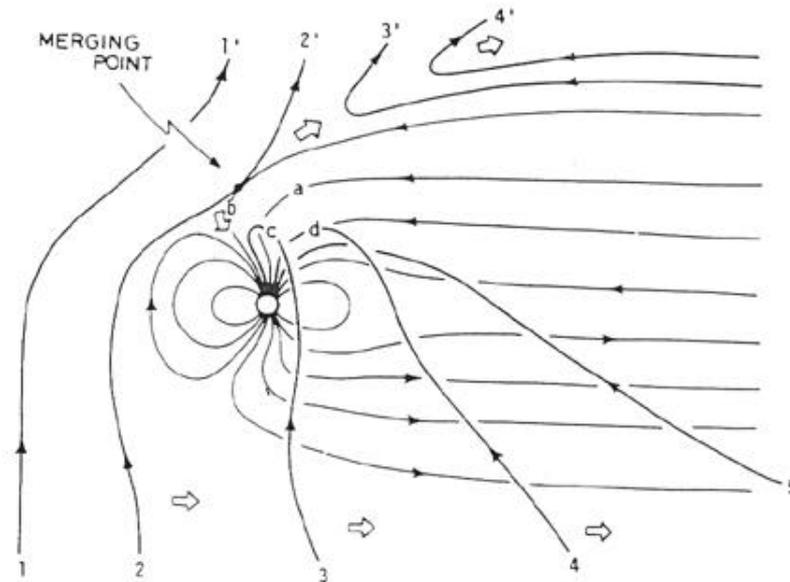
封閉式磁層模型上，暫時性的出現區域性的磁場重聯現象。如觀測得到之「磁通量轉換事件」[Flux Transfer Event (FTE)]，見圖九。



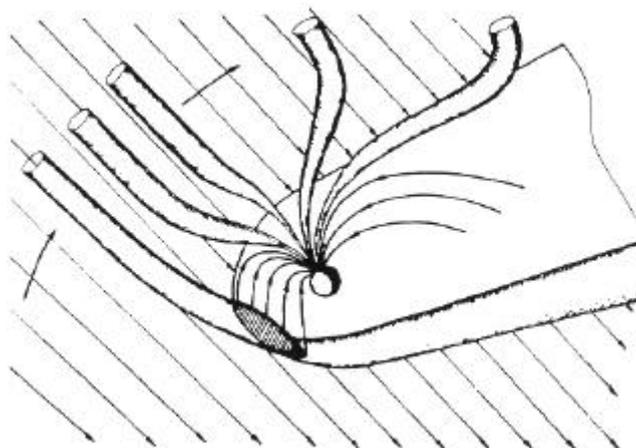
圖七、封閉式磁層模型，以及此模型所預測之電漿在(a)磁層赤道面，與(b)高緯電離層中流動的情形。(Axford-Hines Model : Closed Magnetosphere Model)。



圖八 (A) 行星際磁場為南向時之開放式磁層模型，以及磁力線重聯情形。(Dungey's Model : Open Magnetosphere Model)。



圖八 (B) 行星際磁場為北向但同時具有一個昏 - 晨方向之分量時，行星際磁場可能在北極區的早晨方向磁層頂，以及南極區的黃昏方向磁層頂，與地球磁場發生磁場線重聯情形。



圖九、封閉式磁層模型上，暫時性的出現區域性的磁場重聯現象。如觀測得到之「磁通量轉換事件」 [Flux Transfer Event (FTE)]。

磁層對我們的重要性

磁層的偉大任務之一：擋掉外來的高能粒子

地球的磁偶極場，好像地球在發氣功，形成的氣功罩，可以擋掉絕大多數外來的高能粒子與太陽風電漿！

那些對地面上生物有害的高能粒子，有些來自太陽表面的太陽閃焰，有些來自外太空，它們是新星爆炸以及超新星爆炸的產物！

磁層的偉大任務之二：蓋住地表大氣層，避免流失太快

我認為磁層的另一項偉大任務，就是為我們的大氣層提供一個蓋子。磁層中的磁場，抓住電漿，所以電離層的電漿，不會流失太快。所以磁層是電離層的蓋子。電離層又是下層大氣的蓋子。所以地表的大氣層，歷經四十九億年，還能維持如此高的密度。這是單靠地球重力場所拉不住的。

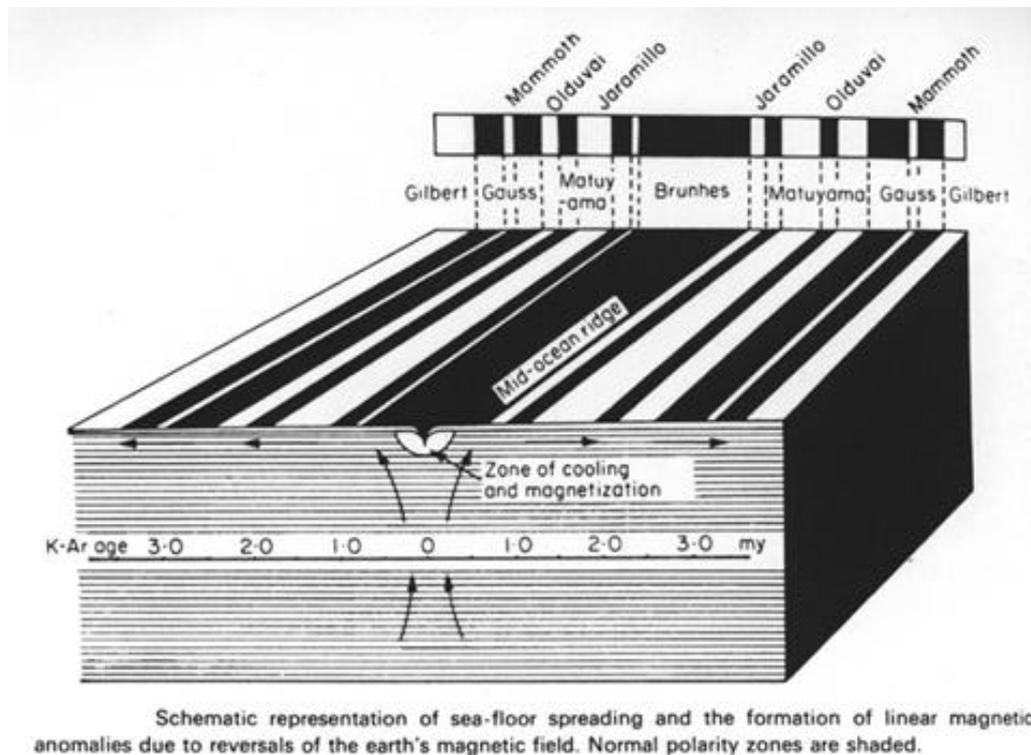
磁層的危機：

要了解地球磁層的危機，就先要知道地球的**磁偶極場**是如何形成的？又會如何變化？

地球內部高溫的岩漿中，帶正電的粒子們與帶負電的粒子們，平均運動速度不完全相同的結果，可以產生電流，進而產生磁場。這個磁場長得很像一個大磁鐵四周的磁場。我們稱它為地球的**磁偶極場**。

由於地球的**磁偶極場**，是靠著內部岩漿中帶電粒子的相對運動所產生的電流來維繫。而這些電流所產生的磁場，又足以影響這些帶電粒子的運動。因此這個電流並不是一個百分之百穩定的電流。

根據大西洋海底，中洋脊兩側岩石中，含鐵岩層的磁場排列情形，科學家可以估算地球磁偶極場的反轉情形。由圖十可知，地球的磁偶極場，每隔數十萬年或數百萬年，就會反轉。反轉一次，估計約需一千年或數千年。



圖十、根據大西洋底的海底山脈上不同年代的岩石之中，鐵的磁極排列方向，所估算出地球磁場在過去1.7億年來的變化情形，其中黑色部分與白色部分，分別表示當時地球磁場之磁偶極的方向是朝南或朝北。（本圖取自 Ronald T. Merrill and Michael W. McElhinny 所著的 "The Earth's Magnetic Field" 一書）。

地球磁偶極場每次反轉的時候，不僅流失掉不少大氣，使得大氣層與電離層濃度減低，也使高能粒子有更多機會，進入大氣層，甚至穿過大氣層！因此每次地球磁偶極場的反轉，也就是地球上生命的浩劫。但是也可能是一個大轉機，因為可以發生突變，不必慢慢的等進化！因此說不定，下次的地磁反轉，可以變出比人類還聰明，更懂得永續發展的生物呢！這樣想來，人類要想《千秋萬世》《永續發展》，所需要考慮的問題可不是另一個五十億年，也不是下一次的彗星撞地球，而是下一次的地球磁場反轉了！（不過彗星撞地球時，對地球內部岩漿所造成的巨大擾動，也許正是歷史上，導致地球磁場反轉的元兇之一呢！）

好了，吹牛吹完了。不論如何，科學家正努力了解造成《活星球》內部磁場反轉的物理機制，並進一步的學會如何偵測它的預兆。現在談《預測磁場反轉》就好像古人談《未雨綢繆》，今人談《預測地震》一般，好像是在說大話，但是絕非一件不可能辦到的事。

隨著高科技的發展，我們發現磁層中的許多暫態變化（磁暴與磁副暴），都與我們的高科技生活息息相關。所以姑且不去煩惱哪一天地球磁場開始反轉了該怎麼辦，我們還是需要了解地球磁層中的其他變化對我們的影響有很多重大？煩惱該如何預防它們！（這就好比，大地震固然可怕，土石流也不可忽視，而且應善加預防！你是不是還能想出更多相似的例子呢？）

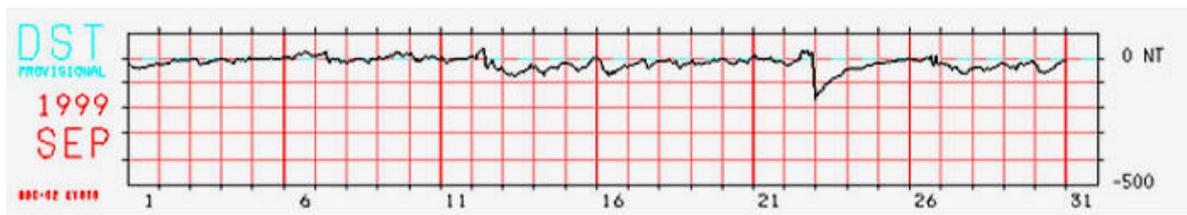
導致磁層暫態變化的主要外來因素：

磁層中為什麼會有暫態變化呢？原來這與太陽風的速度、太陽風的壓力、以及太陽風中磁場的方向，都有密切的關係。當然也與太陽表面的活動有關係。一般說來，只要太陽風用力壓磁層，不論是日冕洞所噴出來的高速太陽風，或是日珥噴發所帶來的高壓磁雲，或是行星際震波撞上我們的磁層，如果能再配上「南向的」行星際磁場，都可以將地球磁層外皮（磁層頂）剝開，壓得變形，並導致磁暴與磁副暴。

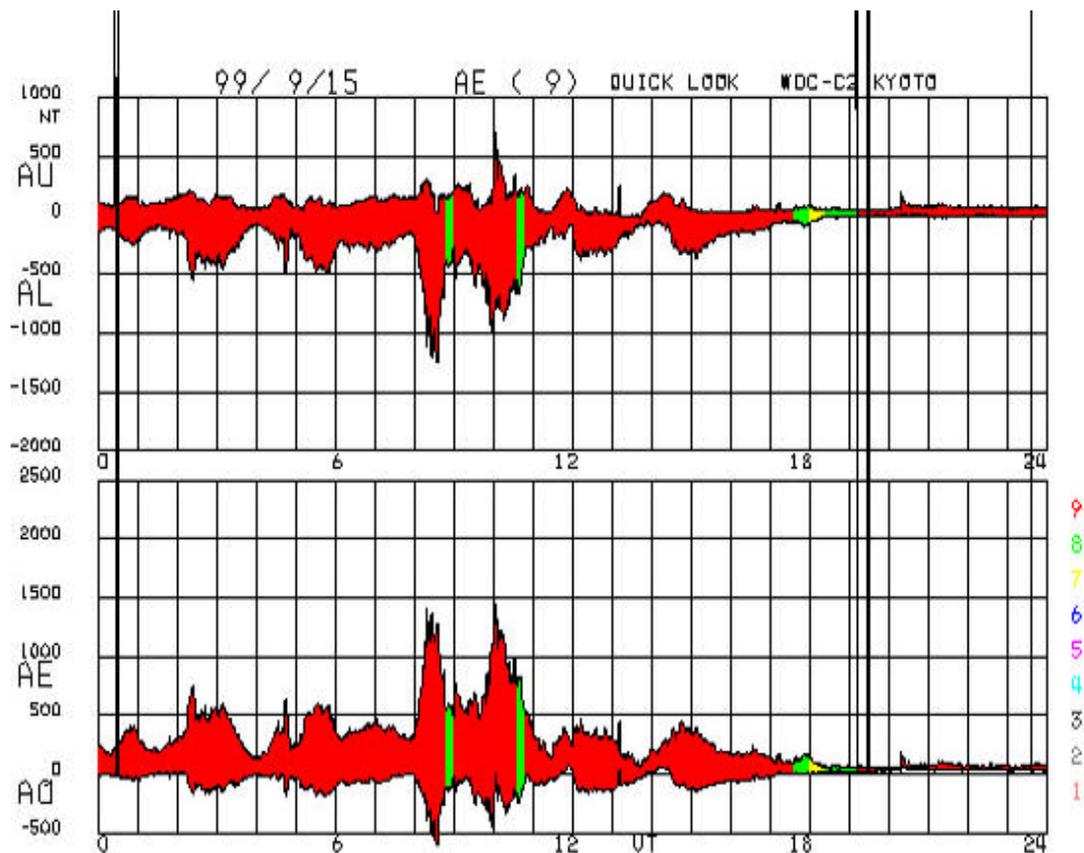
磁暴與磁副暴

	磁暴	磁副暴
影響地表緯度區域	中、低緯區域	高緯地區
持續時間	約 3 天至一個多星期	約 3 小時
地表磁場變化	約 0.0005 高斯	約 0.005-0.01 高斯

	磁暴	磁副暴
磁場增強處相對的上空電流變化情形	<p>日側磁層頂內移（由十個地球半徑內移到八個地球半徑，甚至六個地球半徑）。於是日側磁層頂上自西向東電流內移。</p> <p>於是日側地表磁場增強（初始相位 SSC）。</p>	<p>高緯地區日側電離層東向電噴流增強（約一百公里上空）。</p> <p>於是高緯地區日側地表磁場增強（AU 指數變化）。</p>
磁場減弱處相對的上空電流變化情形	<p>1、電漿球層頂內移（由六個地球半徑內移到四、五個地球半徑，甚至三個地球半徑）。於是電漿球層頂上自東向西環形電流內移。</p> <p>2、《外范愛倫輻射帶》的高能粒子數目增多（由磁尾電漿片中灌入）自東向西環形電流強度增強。</p> <p>1 & 2：使得中低緯地表磁場減弱（主相位 main phase）。</p>	<p>高緯地區夜側電離層西向電噴流增強（約一百公里上空）。</p> <p>於是高緯地區夜側地表磁場減弱（AL 指數變化）。</p>
磁場擾動的相位變化	<p>初始相位：日側磁層頂內移。</p> <p>主相位期：電漿球層頂內移，《外范愛倫輻射帶》的高能粒子數目增多。自東向西環形電流強度增強。</p> <p>恢復期：磁層頂與電漿球層頂還原到安靜期的位置。</p>	<p>成長期：磁尾電漿片上由晨到昏的電流逐漸增強。磁尾電漿片變薄，連原來接近磁偶極場的區域的磁場也變成磁尾的形狀。</p> <p>爆發期：磁尾電漿片變厚。磁場變成比較像磁偶極場的結構。原來應該經由磁尾電漿片由晨到昏的電流，被迫改道，先沿磁場線流入晨側電離層，再經由西向電噴流以及東向電噴流由黃昏側流出電離層，再沿磁場線流入黃昏側磁尾。</p> <p>恢復期：磁層還原為成長期以前的模樣。</p>
地面觀測資料範例	Dst index（中低緯磁暴時，磁場變化情形）參見圖十二	Aurora index（極光橢圓圈區，磁副暴時，磁場變化情形）參見圖十三



圖十二、地面觀測資料範例：Dst index (代表：中低緯磁暴時，磁場變化情形)



圖十三、地面觀測資料範例：Aurora indices ; AU, AL, AE=AU-AL, AO=(AU+AL)/2 (代表：極光橢圓圈區，磁副暴時，磁場變化情形)

磁暴與磁副暴對民生科技的影響：

磁層中的磁場結構改變，表示三維空間中，電流分布的改變，也表示會產生感應電動勢與感應電場。這些感應電場以及突如其來的電漿流，都可以毀損許多衛星上的儀器以及地表的儀器，或降低積體電路或晶圓片的製作良率。甚至影響胚胎的分裂成長。

此外，通訊用的同步衛星，一般都在 6.6 地球半徑的高度飛行。並且依照該處的地球磁場方向，自動修正飛行方向。但是當磁層中發生巨大的暫態變化時（如：磁層副暴，見極光講義中的磁尾變形示意圖。），該處

(6.6 地球半徑) 的磁場方向，變化很大。因此，如果沒有事前關掉「自動修正飛行方向」這項功能的話，很可能等磁層副暴結束後，就找不到這顆衛星了。即使用地面雷達找到了，也往往需要浪費很多備用燃料，才能把飛丟的衛星給抓回原位，繼續運行。用了太多的備用燃料，將導致這顆人造衛星提早「壽終正寢」，相當可惜。

總而言之，預測磁層以及電離層中的**太空天氣變化**，對許多高科技產業，已經是一項刻不容緩的工作了。

作者：

呂凌霄	國立中央大學太空科學研究所	lyu@jupiter.ss.ncu.edu.tw
-----	---------------	---------------------------