

## 第五講 磁層

### 5.1. 磁層在太空中的相對位置以及組成介質

#### 5.1.1. 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，速度由每秒兩百公里到八百公里不等。其中高速太陽風主要來自日冕洞區域。低速太陽風來自日冕區域。可是日冕區域發生的太陽閃焰與日冕物質拋射，也可造成暫態的高速太陽風。太陽風速的改變以及太陽風中行星際磁場的擾動，都會影響磁層的結構。在磁層與太陽風接壤處，內側磁層電漿密度低，外側太陽風電漿密度高。因此形成了一個明顯的邊界，也就是「磁層頂」(magnetopause)。

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」。區別磁層與電離層的方法，主要是根據它們組成成分上的差異。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magnetosphere、電離層ionosphere、太陽風solar wind、日冕洞coronal hole、日冕corona、太陽閃焰solar flare、日冕物質拋射coronal mass ejection (CME)、暫態transient state、行星際磁場interplanetary magnetic field

#### 5.1.2. 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，所含氦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    |

## 5.2. 磁層(magnetosphere)的外觀

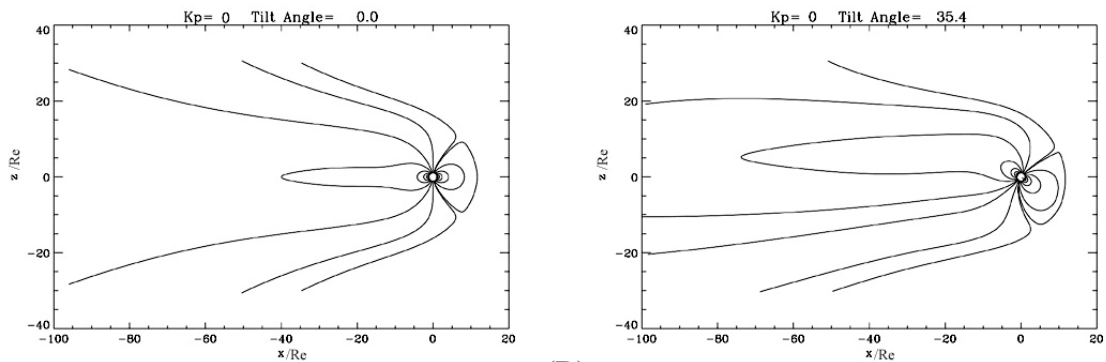
當太陽風吹向地球時，地球原有的磁偶極場在向陽面會被壓的扁一點，而背陽面之地球磁場的磁場線，則被拖拉成尾巴狀。整個地球磁場所佔據的勢力範圍，就是**磁層**。磁層中的背陽處尾巴狀的結構，就叫做**磁尾** (magnetotail)。(問：磁層為何會由原來對稱的磁偶極場，變形到目前這種，有「頭」有「尾」的結構？提示：想想看，哪些物理量，可以改變磁場的大小與方向？)

Tsyganenko利用多年來衛星對磁層的觀測資料，利用統計的方式，找出不同地磁擾動條件下，磁層中主要電流的平均分布情形。根據Tsyganenko模式中的電流分布情形，再加上地球的磁偶極軸隨時間的變動情形，可以求出不同時間、不同地磁擾動條件下的地球磁層中磁場的三維分布情形。(問：如何由電流的空間分布換算磁場的空間分布？)

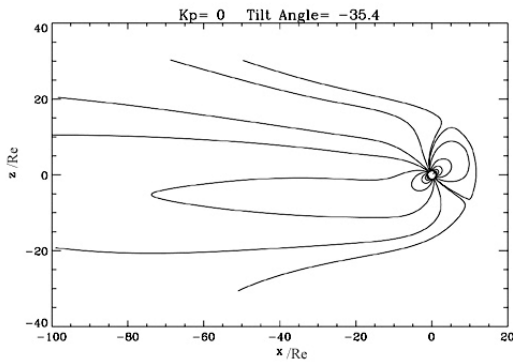
Tsyganenko模式有許多版本，以下我們用1989年的Tsyganenko模式 (Tsy89)，繪出在不同地磁擾動與磁軸傾角的條件下，子午面上磁場線的分布。以了解磁層外觀統計上的平均變化情形。在繪圖時必須選取一個好用的座標系來繪圖。太空科學家為了描述外磁層的觀測，定義了一個**GSM**座標系，此座標系的x軸方向由地球指向太陽；z軸位在地球磁軸與地日連線方向所構成的平面上，方向大致朝北，且垂直x軸。為了方便起見，Tsyganenko模式中定義**磁軸傾角** (tilt angle) 為地球磁軸與**GSM**座標系的z軸之間的夾角。並取向陽偏角為正，背陽偏角為負。圖一與圖二都是根據**GSM**座標系所繪製的磁場線分布圖。(問：如何由磁場的空間分布，求出磁場線的分布？)

圖一是在地磁寧靜期 ( $K_p=0$ ) 不同**磁軸傾角**的條件下，磁子午面上磁場線的分布圖，其中磁軸傾角在圖(A)中為0度、在圖(B)中為35.4度、在圖(C)中為-35.4度。由圖一可知，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為改變。圖一顯示，內磁層的磁場分布，大致可視為磁偶極場，且軸對稱於地球磁軸。至於外磁層中磁尾磁場反轉的區域 (也叫做磁尾電流片，或電漿片，詳見下文)，則是平行於**GSM**座標系的x軸，但是其在**GSM**座標系中的位置，卻不一定位在 $z=0$ 的地方，會隨著磁軸傾角不同而改變。若以內磁層座標系 (**SM**座標系) 來看，電漿片或磁尾電流片的磁緯度，也不一定為零度。不過為了方便起見，我們下文中的討論，都將假設磁軸傾角為0度，這樣一來，電漿片或磁尾電流片就會位在磁赤道面上了。(問：**SM**座標系與**GSM**座標系的三個軸，定義上有何異同？什麼條件下，**SM**座標系與**GSM**座標系會完全一致？)

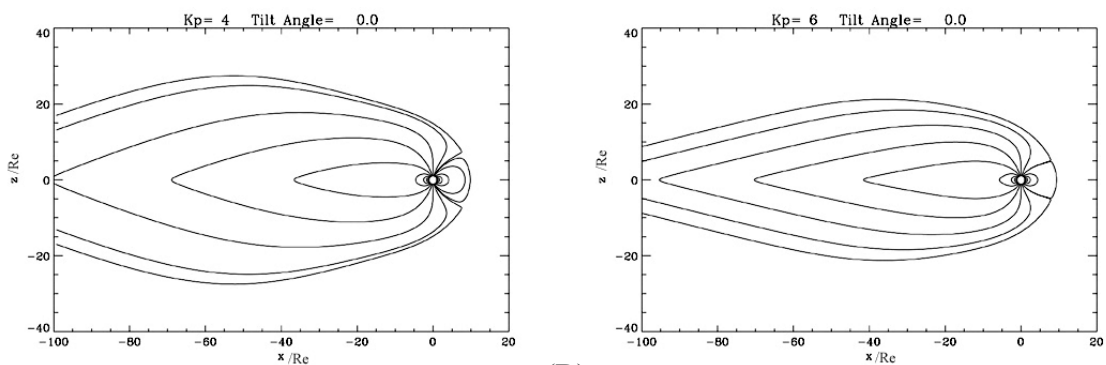
地球磁層的外觀，也會隨著地球磁場擾動程度的大小不同，而改變其形狀。圖二就是Tsyganenko模式中，根據不同地球磁場擾動條件下的統計結果所求出之地球磁場與磁層頂在磁子午面上的分布情形。其中圖 (A) 為地磁擾動指數 $K_p=4$ 時的磁場線分布圖，圖(B) 為地磁擾動指數 $K_p=6$ 時的磁場線分布圖，其中 $K_p$ 值愈大，表示地磁擾動愈強。由圖一、二可知，地球磁場寧靜期，日側磁層頂的位置距離地心約十個地球半徑，而背陽面的磁尾最遠可達數百地球半徑 (有時甚至可達一千個地球半徑)。磁尾平均直徑約40~60個地球半徑。在地磁擾動期，日側磁層頂的位置距離地心，小於十個地球半徑，磁層頂在磁子午面上的張角，也隨地磁擾動增加而減少。不過在磁赤道面上的磁層頂張角，卻會隨地磁擾動增加而增加。這點各位可以用Tsyganenko模式來驗證一下。



(A) (B)  
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, 磁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, 磁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。



(C)  
圖一 (C) 當 $K_p=0$ 且磁軸傾角為 $-35.4$ 度時, 磁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。



(A) (B)  
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, 磁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, 磁子午面上地球磁場線的分布情形。

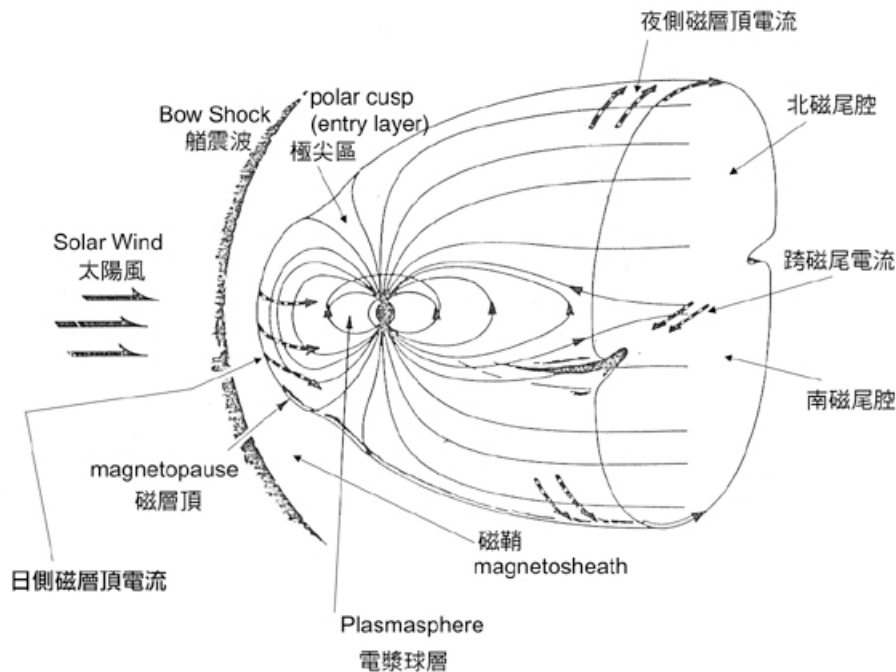
### 5.3. 磁層頂(magnetopause)、船震波(Bow Shock)，磁鞘(Magnetosheath)

配合圖三，首先讓我們介紹磁層頂與其外部的特殊電漿結構。

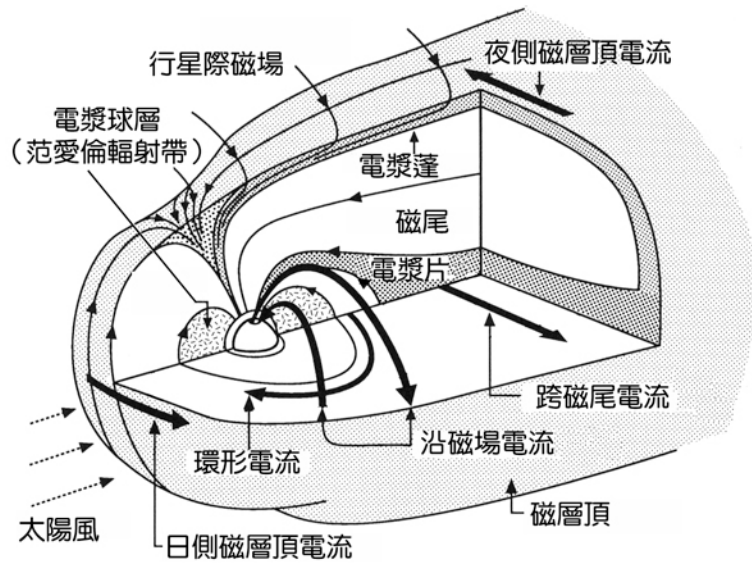
**磁層頂**為地球磁層最外圍的邊界，與太陽風相接壤。**磁層頂**內側磁層電漿密度低，外側太陽風電漿密度高。由電漿密度梯度的方向與地球磁場的方向，可以估算磁層頂上《逆磁電流》的方向。在日側磁層頂上的電流方向大致沿晨—昏方向。在夜側磁層頂上的電流大致沿昏—晨方向。（圖三）（問：什麼是《逆磁電流》（diamagnetic current）？它與《磁化電流》（magnetization current）有何不同？）

地球的磁層頂前方，有一個**船震波**。船震波與磁層頂之間的亂流區域，我們稱它為**磁鞘**。船震波的形成原因簡述如下：

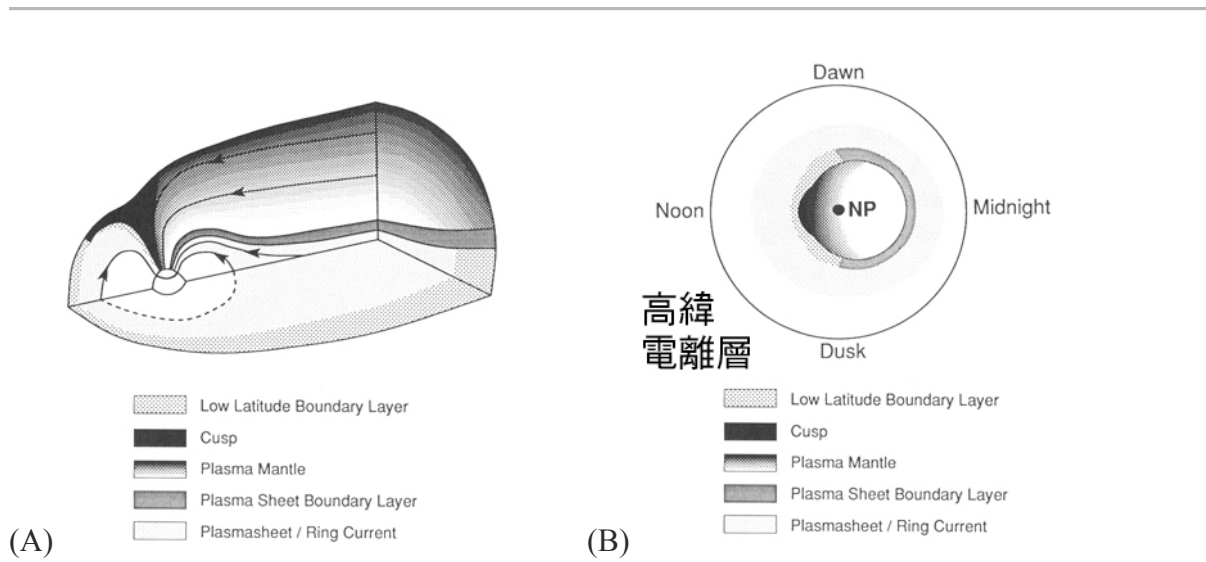
當高速的太陽風，撞上磁層頂時，因為受到地球磁場的阻擋，必須停下來，於是太陽風速大減。當太陽風速由超磁音速減小到次磁音速的地方，就會自然的形成一個激震波。因為這個激震波的外型，與船在水中航行時，船首前方所形成的船波（bow wave）很像，因此又稱為船震波。（問：自然界中的常見的激震波有哪些？試舉例說明它們的特性。）**船震波與磁鞘都是屬於太陽風的勢力範圍**。但是由於它們緊接著日側磁層頂，因此也是磁層物理學家，感興趣的研究範圍。**船震波與磁鞘中，有許多大振幅的波動，是一個很理想的、天然的電漿物理實驗室。**



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。



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。

## 5.4. 磁層頂附近的邊界層：極尖區、低緯邊界層、高緯邊界層（電漿篷）

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。磁層頂也好像磁層的表皮，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。地球磁層頂的內邊界層，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。

### 5.4.1. 極尖區(polar cusp)

極尖區位於南北磁極區，呈喇叭狀（見圖三、圖四）。由前述磁層頂上逆磁電流的分布可知，在日側晨—昏方向磁層頂電流方向若連接夜側磁層頂昏—晨方向電流，可在極尖區四周形成圓形電流迴路。這樣的迴路電流所產生的磁場方向，與地球磁場方向相反，造成極尖區在磁層頂附近磁場強度為零。於是磁場線可在磁場強度為零處相交，太陽風中的電漿可沿著相交的磁場線直接進入極尖區。因此極尖區是太陽風直接影響地球電離層電漿環流的區域。（問：為何磁場線可在磁場強度為零處相交？請根據磁場線的定義說明之。）

### 5.4.2. 低緯邊界層(low-latitude boundary layer, LLBL)

《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得低（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磁赤道面的兩翼區域（見圖四）。位在兩翼的《低緯邊界層》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。位在日側磁層頂內側的《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。

### 5.4.3. 高緯邊界層(high-latitude boundary layer, HLBL) also called 電漿篷(plasma mantle)

《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（約75度到85度之間）來得高，故稱做《高緯邊界層》。高緯邊界層（或稱電漿篷）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）。如果此處風切能造成渦流，其旋轉軸方向勢必與此區地球磁場方向垂直，因此磁場張力將抑制這樣的渦流形成。因此渦流結構很難在《高緯邊界層》中形成。所以在高緯邊界層中波動振幅比較小，太陽風電漿主要是以擴散的形式與磁尾腔中的電漿慢慢混合。只有在磁暴發生的時候，才會因為日側磁層頂傳來的擾動，在此區域產生較大振幅的擾動與波動。

## 5.5. 磁尾的細部結構：電漿片、磁尾腔、電漿片邊界層

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。

### 5.5.1. 電漿片(Plasma sheet)

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。帶負電的电子會受磁力，右旋進入黃昏側磁尾的赤道面低緯邊界層。此晨昏兩側的帶電區，造成地球磁層內部晨→昏方向的電場 (dawn-to-dusk electric field)。反之，位在兩翼《低緯邊界層》較外側區域的電場方向則為昏→晨方向。

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。另一方面，跨磁尾的晨→昏電場也可以藉著Alfvén wave傳入磁尾腔，乃至電離層。其中磁尾腔中的晨→昏電場與南、北磁尾腔背陽、向陽的磁場合起來，也會像幫浦一樣( $E \times B$  drift)自磁尾腔不斷的抽取由高緯電離層所逸散出來的電漿，把它們灌入電漿片。因此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太稀薄，總能維持一定的濃度，平均約每立方公分到每十立方公分就有一個電漿粒子（ $1 \sim 0.1 \#/\text{c.c.}$ ）。

因為電漿片中磁場方向在空間上的變化很大，約在一個正離子的迴旋半徑以內，就反轉了將近180度：由背陽方向轉為向陽的方向。因此這個區域正離子的運動，就像很多大卡車在崎嶇的道路上行駛，自然會造成混亂的車陣。因此電漿片中平均正離子溫度約為平均電子溫度的七倍以上。不論電子或正離子它們的平均溫度與密度都為鄰近磁尾腔的电子與正離子的十倍以上。如此強大的溫度梯度與密度梯度，可造成晨→昏方向的逆磁電流。此晨→昏方向的跨磁尾電流與昏→晨方向的夜側磁層頂電流連成南北兩個線圈狀電流迴路。線圈電流所圍繞的磁尾腔中磁場強度均勻，不會因為距離地球太遠而減弱太多。

### 5.5.2. 磁尾腔(Magnetotail Lobe)

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。磁尾腔中平均約每一百立方公分才有一個電漿粒子（ $0.01 \#/\text{c.c.}$ ）。

磁尾腔的電漿密度如此低的原因之一是因為磁尾腔中的晨→昏電場與南、北磁尾腔背陽、向陽的磁場合起來，會像幫浦一樣( $E \times B$  drift)抽取磁尾腔中的電漿，把它們灌入電漿片。

磁尾腔的磁場強度大是因為磁尾腔外圍被高電漿密度的太陽風與電漿片包圍著，此電漿梯度造成南北磁尾腔四周各形成了一圈線圈狀的逆磁電流，為南北磁尾腔提供了穩定且強度不弱的磁場。也就是說，南北磁尾腔中的磁場主要是由附近電漿產生的。而地球磁偶極場對此區的磁場貢獻甚小。

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阻擋，不易回流到低密度的磁尾腔中，只能反向拋出磁層，回到太陽風中；或沿著磁場線，衝向地球電離層，造成極光；或衝入內磁層，增加內磁層中高能粒子的數目（可因此提高外范愛倫輻射帶中的環形電流強度，詳見下文）。

### 5.5.3. 電漿片邊界層(plasma sheet boundary layer, PSBL)

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）。造成極光的快速電漿流與場向電流，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）。受到快速電漿流的影響，以及強大密度梯度的影響，人造衛星觀測結果顯示，電漿片邊界層中的波動比電漿片以及磁尾腔中的波動都來得顯著。



## 5.6. 內磁層的細部結構：電漿球層、電漿球層頂、環形電流、范愛倫輻射帶

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。

### 5.6.1. 電漿球層(plasmasphere)

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是來自中、低緯電離層的低能量電漿。少部分高能粒子則來自磁尾電漿片、太陽風、以及外太空。電漿球層的形成與強大的地球磁偶極場以及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)表示若忽略地球自轉效應時，低能電漿粒子在磁赤道面上漂移運動的流線示意圖。這些流線是根據太陽風吹過磁尾兩側，所造成的地球磁層內部晨→昏方向的電場，以及兩翼《低緯邊界層》區域的昏→晨電場，與北向的地球磁場所造成的 $E \times B$  drift，而畫出來的流線分布圖。圖五(B)表示若加上地球自轉效應，則這些低能粒子，在靠近地球的區域（虛線內），會沿著到由電離層傳來的co-rotating electric field與北向地球磁場所造成的 $E \times B$  drift方向，繞著地球兜圈子，而不會流失到廣大的磁尾空間中。圖中虛線會經過黃昏側一個速度為零的區域。（通常通過速度為零那點的流線不只一條。這些通過速度為零的流線可構成一個區分流線特性的邊界層。在電漿球層頂附近的這組流線，有個名字，叫做Alfven layer。）  
（問：為什麼通過速度為零那點的流線可以不只一條？）

圖五(B)中虛線圈內的區域，為電漿球層在磁赤道面上的剖面結構。因為電漿球層內的低能電漿粒子除了 $E \times B$  drift漂移運動外，還會沿磁偶極場的磁場線做迴旋（gyro motion）與彈跳運動（bounce motion or mirror motion），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。（問：什麼是彈跳運動？為什麼電漿粒子在磁偶極場中會進行彈跳運動？）

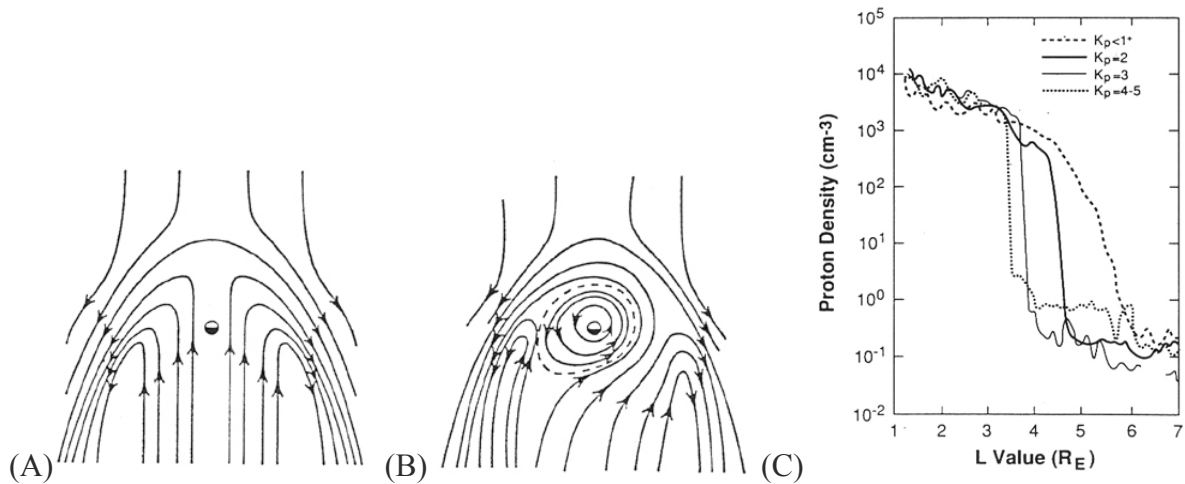
### 5.6.2. 電漿球層頂(plasmapause)

電漿球層頂為高密度的《電漿球層》與低密度的《外磁層》空腔的交界面。圖五(C)顯示在寧靜期( $K_p < 1$ ) 電漿球層頂約位在 $L=5\sim 6$ 的磁殼附近。其中L-磁殼(L-Shell)是指通過磁赤道時，距離地心為L個地球半徑的磁偶極場磁場線所涵蓋的區域。在磁暴期間( $K_p > 3$ ) 電漿球層頂的位置可內移到約 $L=3\sim 4$ 的磁殼附近。（見圖五（C））。

電漿球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。一但行星自轉固定了，電漿球層頂的位置會隨著磁層內晨→昏電場強度增強而內移。造成磁層內晨→昏電場強度增強的原因，大致有二。第一種情形是因為太陽風風速增加，使得太陽風吹過磁層兩翼所造成的磁層內晨→昏電場強度增強。第二種情形是發生在行星際磁場有足夠強的南向分量時，會與地球磁場在日側磁層頂發生磁場線重聯現象。

磁場線重聯時，會產生很強的感應電場，方向也是沿晨→昏方向。由於重聯後的地球磁場線會被太陽風帶走，運送到磁尾，因此日側磁層頂的位置會內移。而強大的感應電場，大約在20分鐘左右後，可傳遍地球磁層，導致電漿球層頂內移。因此觀測上常顯示日側磁層頂內移後約20分鐘左右後電漿球層頂的位置也跟著內移。

電漿球層頂處的電漿密度梯度，可以產生逆磁電流。方向由東向西，是構成環形電流的主要電流來源。電漿球層頂的位置內移，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。（問：日側磁層頂內移與電漿球層頂內移，分別會對地面上的水平磁場大小造成何種影響？）



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<sub>p</sub>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<sub>p</sub>值增加而內移，梯度也增加。

### 5.6.3. 環形電流(ring current)

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。

電漿球層頂處的電漿密度梯度會造成逆磁電流，是造成環形電流的原因之一。外范愛倫輻射帶中，高能粒子的漂移運動是造成環形電流的另一個原因。

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」(grad-B drift) 以及「磁場線曲度漂移」(curvature drift)。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，所造成的漂移電流恰巧也是由東向西的電流，所以也是構成環形電流的原因之一。這些高能粒子的數量雖不多，但是磁暴與磁副暴發生時，濃度突增，且分布非常不均勻，因此會造成Partial

Ring Current以及Region II 場向電流系統，詳見第六講磁暴與磁副暴的說明。下文中即將介紹的《外范愛倫輻射帶》中，就有很多這樣的高能粒子，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，才是構成環形電流的主因。

總之，環形電流除了與電漿球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。

#### 5.6.4. 范愛倫輻射帶(Van Allen Radiation Belts)

##### 5.6.4.1. 內外范愛倫輻射帶的空間分布

范愛倫輻射帶有兩種。一為《內范愛倫輻射帶》(inner radiation belt)，一為《外范愛倫輻射帶》(outer radiation belt) (見圖六)。內、外范愛倫輻射帶的分野可由高能電子的分布圖圖六(A)看出來。圖六(B)則為內磁層(電漿球層)中的高能電子與高能質子的分布情形。由圖六(A)，可以得知內、外范愛倫輻射帶的空間分布情形：

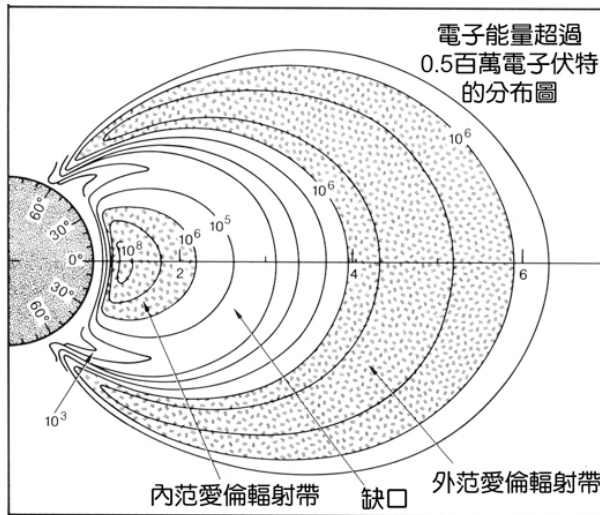
《內范愛倫輻射帶》約位在 $L=1\sim 2$ 的磁殼區域。《外范愛倫輻射帶》約位在 $L=4\sim 6$ 的磁殼區域。其中 $L$ -磁殼( $L$ -Shell)是指通過磁赤道的位置距離地心為 $L$ 個地球半徑的磁偶極場磁場線所涵蓋的區域。

注意：電漿球層頂之平均位置約為 $L=5\sim 6$ 的磁殼位置。但有時可以內移至 $L=3\sim 4$ 的磁殼位置。所以說，《外范愛倫輻射帶》有時在電漿球層內，有時可超出電漿層頂外側。但《內范愛倫輻射帶》一定位在電漿球層內部。

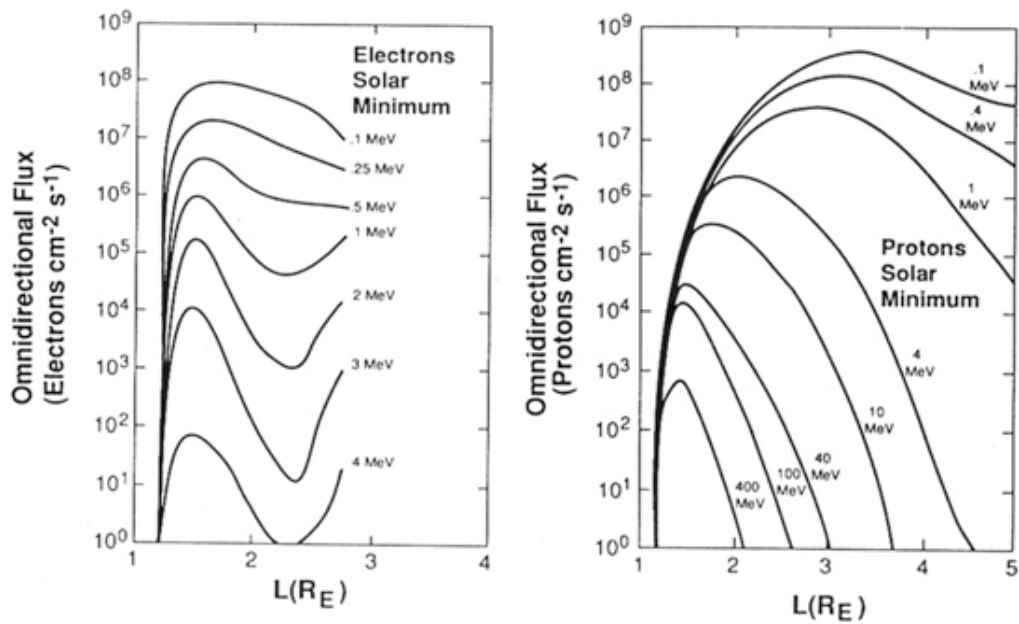
##### 5.6.4.2. 內外范愛倫輻射帶的形成原因

《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。這些來自磁尾的高能粒子數量雖然很多，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，因此被地球磁場束縛住，無法深入到《內范愛倫輻射帶》的高度。(問：地球磁偶極場透過哪些機制束縛帶電粒子，使它們無法大幅跨越不同的 $L$ -磁殼，深入到《內范愛倫輻射帶》所在的 $L$ -磁殼?)



圖六 (A) 內、外范愛倫輻射帶的空間分布情形。

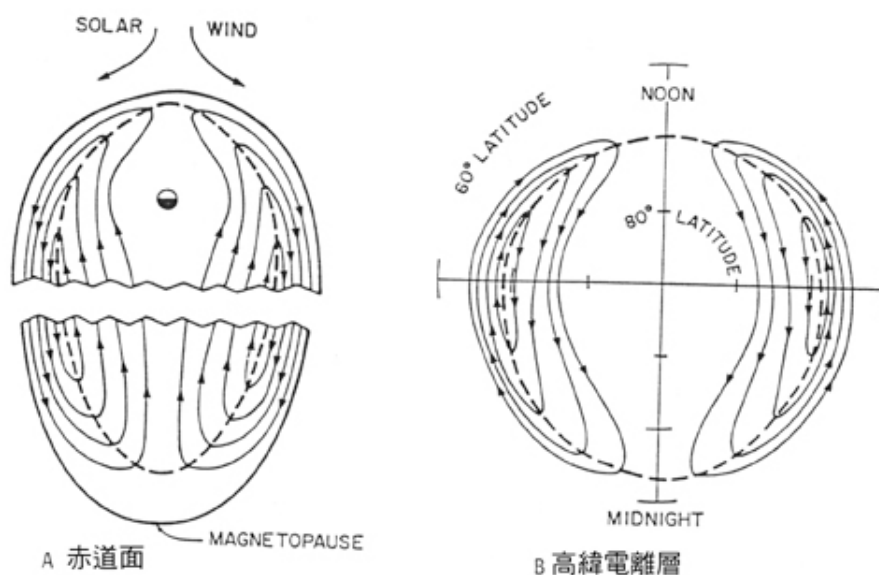


圖六 (B) 范愛倫輻射帶中的高能電子與高能質子，在不同  $L$  值的磁場線上的分布情形。內、外范愛倫輻射帶的分野可由高能電子的分布圖看出來。其中， $L = 4$  的磁場線，表示該磁場線通過磁赤道時，距離地心 4 個地球半徑。

## 5.7. 磁層模型(Magnetosphere Models)

### 5.7.1. 封閉式磁層模型—Axford-Hines模型

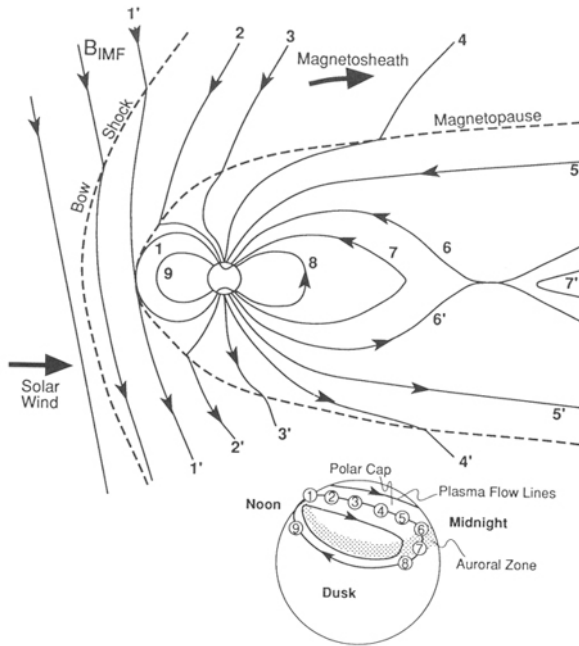
Axford and Hines認為高速太陽風吹過磁層時，可藉著渦流將太陽風的動量傳入磁層，帶動地球磁層內部電漿的流動。因此它們認為地球磁層的外型，應該很像一滴眼淚 (tear drop)。這就是封閉式磁層模型，圖七為此模型所預測之(A)磁層赤道面，與(B)高緯電離層中電漿流動情形。其中造成磁赤道面上電漿流動的電場，也可透過艾爾文波Alfven wave，傳到高緯電離層，帶動高緯電離層的電漿一起流動。



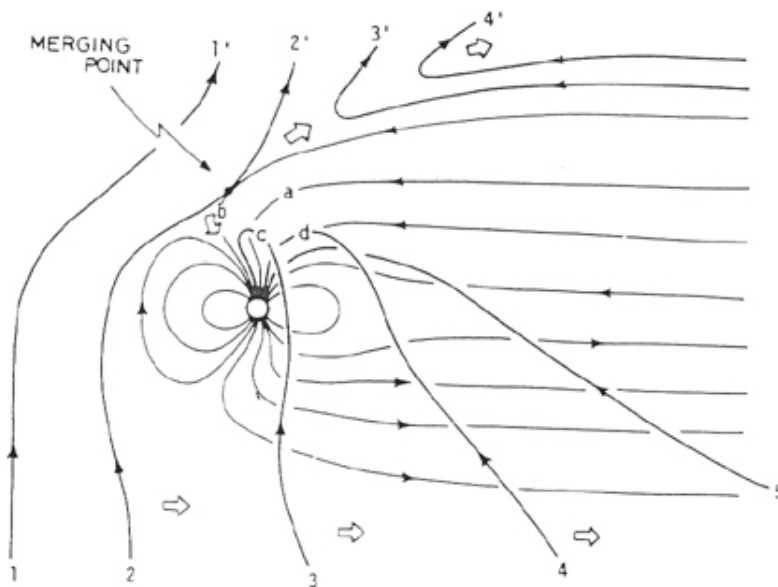
圖七、封閉式磁層模型，以及此模型所預測之電漿在(A)磁層赤道面，與(B)高緯電離層中流動的情形。(Axford-Hines Model : Closed Magnetosphere Model)。

### 5.7.2. 開放式磁層模型—Dungey模型：

Dungey認為當行星際磁場可透過磁場線重聯過程，與地球磁場直接相連，使太陽風電漿直接地球電漿混合。而重聯後的磁場線則被太陽風帶到夜側磁層，再度藉著磁場線重聯過程，與地球磁場線分離。這就是開放式磁層模型。圖八是開放式磁層模型的示意圖，其中(A)為南向行星際磁場時的開放式磁層模型以及磁場線重聯情形；(B)為行星際磁場具有北向以及昏—晨分量時的開放式磁層模型及磁場線重聯情形。



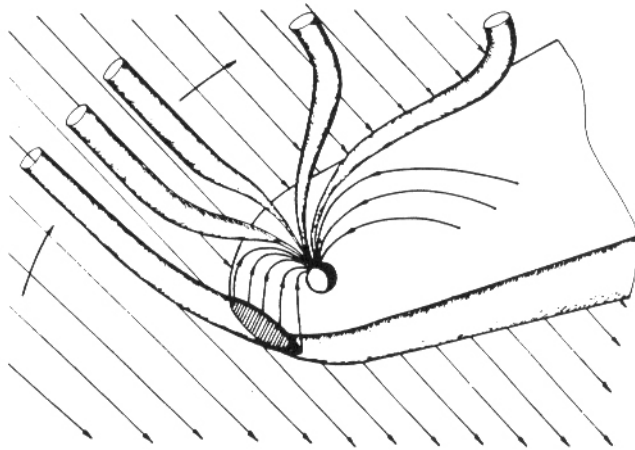
圖八 (A) 行星際磁場為南向時之開放式磁層模型，以及磁力線重聯情形。(Dungey's Model : Open Magnetosphere Model)。



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。

### 5.7.3. 混合式模型

觀測上，完全開放的磁層模型幾乎不曾觀測到。常看到的反而是部份開放部份封閉的混合式磁層結構。圖九為觀測所看到的「磁通量傳遞事件」(Flux Transfer Event, FTE)。這就是一種封閉式磁層模型上，暫時性的出現區域性的磁場重聯現象 (patchy and intermittent reconnections)。



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。即觀測上所看到的「磁通量轉換事件」 [Flux Transfer Event (FTE)]。

## 5.8. 磁層對我們的重要性

### 5.8.1. 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！這些對地面上生物有害的高能粒子，一部份來自太陽表面的太陽閃焰，另一部份來自外太空，主要是新星爆炸以及超新星爆炸的產物！

### 5.8.2. 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。所以磁層中的電漿球層是電離層的蓋子。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。

## 5.9. 磁層的危機（十萬年□百萬年後的惡劣太空氣候預報）

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？

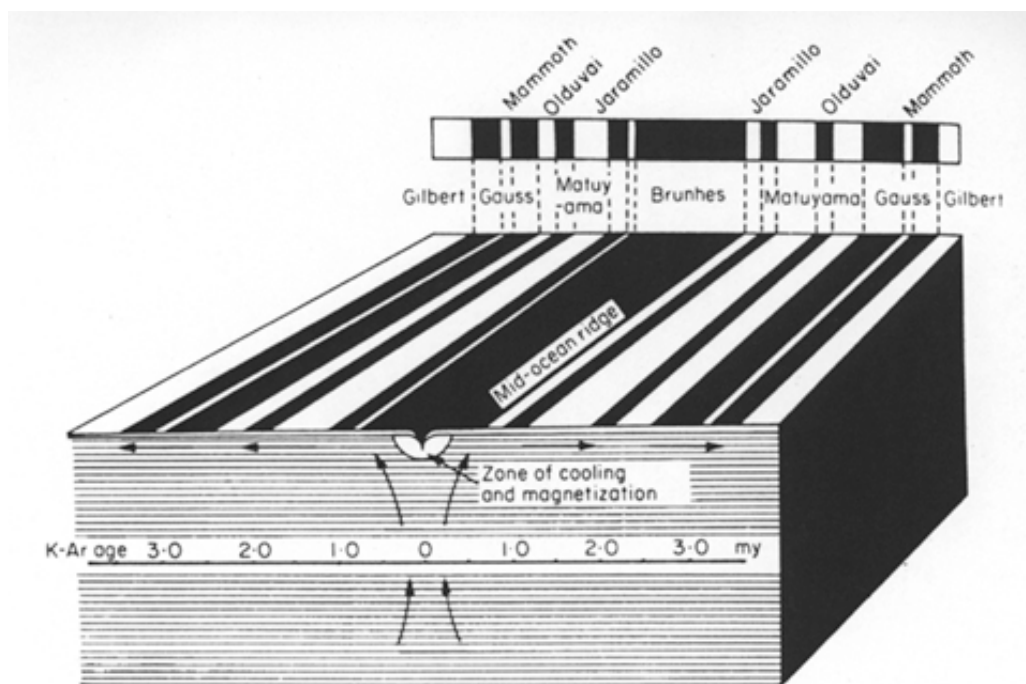
地球內部高溫的岩漿中，帶正電的粒子們與帶負電的粒子們，平均運動速度不完全相同的結果，可以產生電流，進而產生磁場。這個磁場長得很像一個大磁鐵四周的磁場。我們稱它為地球的磁偶極場。由於地球的磁偶極場，是靠著內部岩漿中帶電粒子的相對運動所產生的電流來維繫。而這些電流所產生的磁場，又足以影響這些帶電粒子的運動。因此這個電流並不是一個百分之一百穩定的電流。

根據大西洋海底，中洋脊兩側岩石中，含鐵的岩層中，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。估計每次反轉，歷時約一千年或數千年。

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。





Schematic representation of sea-floor spreading and the formation of linear magnetic anomalies due to reversals of the earth's magnetic field. Normal polarity zones are shaded.

圖十、根據大西洋底的海底山脈（中洋脊）兩側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）。

### 5.10. 磁層的暫態變化（太空天氣）

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？了解該採取什麼樣的防範措施，以減輕它們對我們的民生科技所可能帶來的傷害！（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？）

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。關於磁暴與磁副暴的詳情，請參見第六講磁暴與磁副暴。