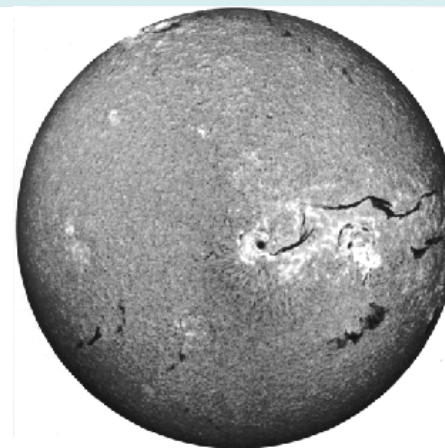


極光 與 磁層風暴

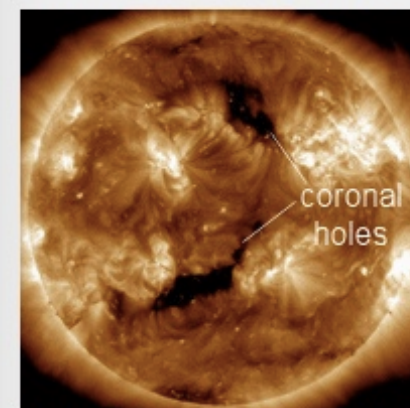
- 極光 大致可區分為 「每天晚上」 都會出現的綠色極光弧，以及「磁層風暴」發生時所出現的各種絢麗極光。
- 因為絢麗極光，隨著出現的緯度、地方時間(local time)的不同，呈現不同的形狀，因此造成這些不同型態的極光，它們背後的物理過程應該也不盡相同。
- 為了要了解 極光 的形成原因
科學家開始研究 與極光相關的 太空物理過程：
 - (1) 太陽 & 行星際空間 物理
 - (2) 磁層物理 & 磁層-電離層 耦合過程

可能造成磁層風暴的 太陽 & 行星際空間 擾動

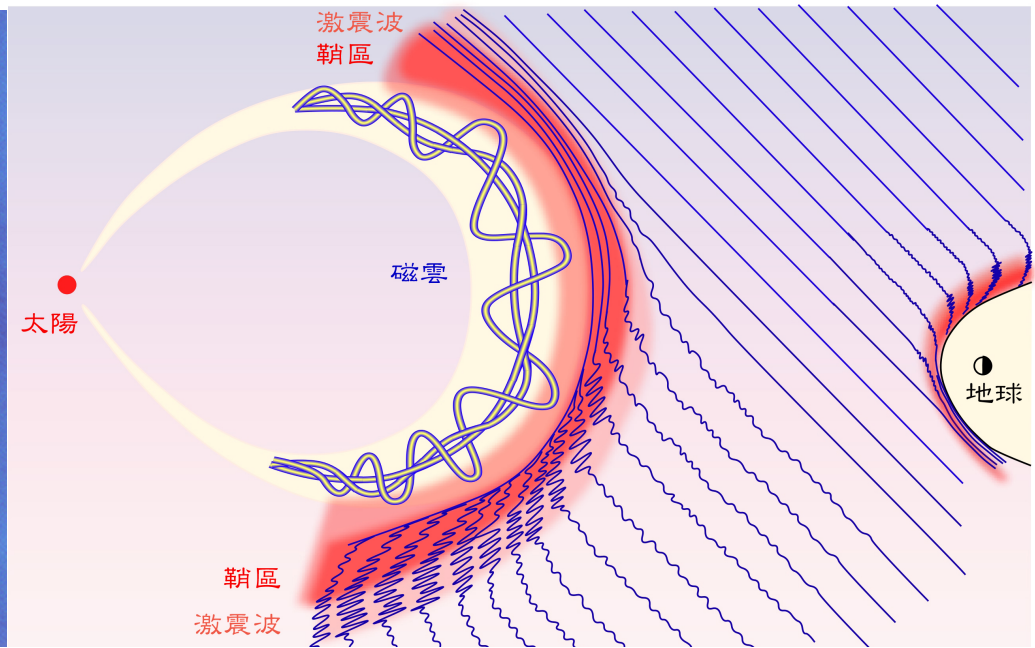
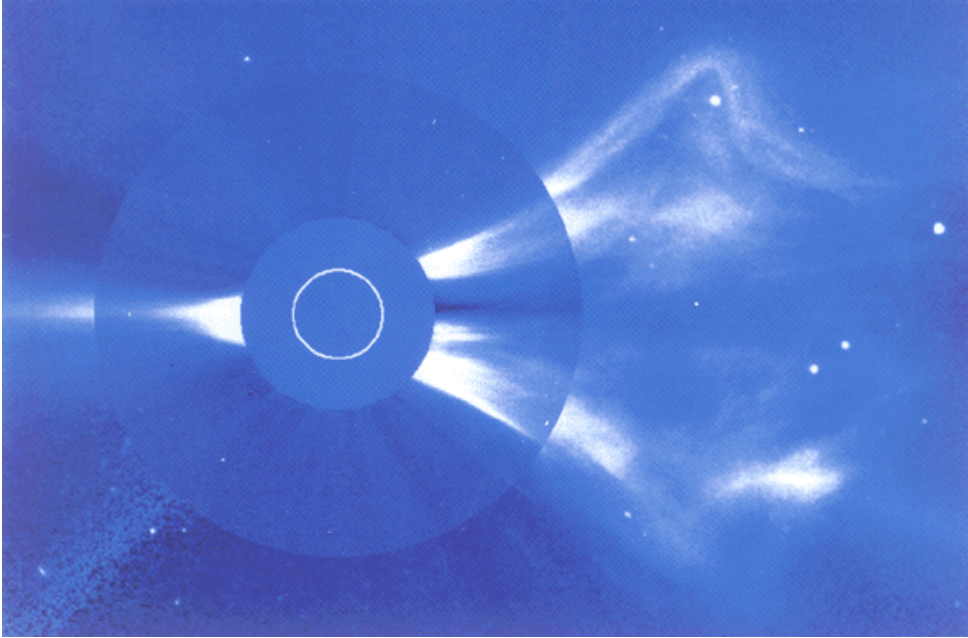
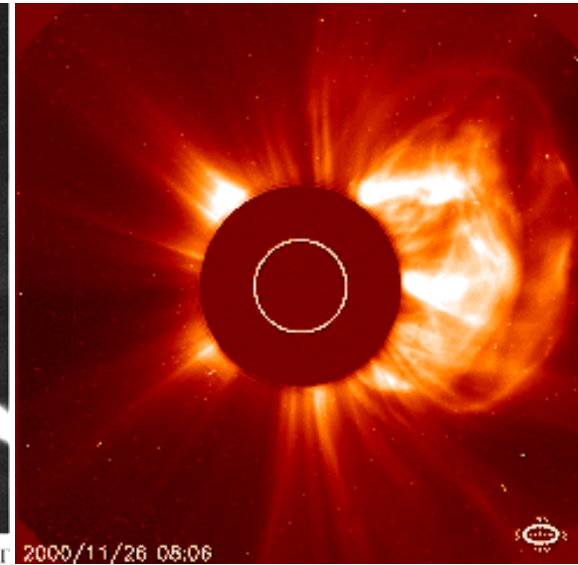
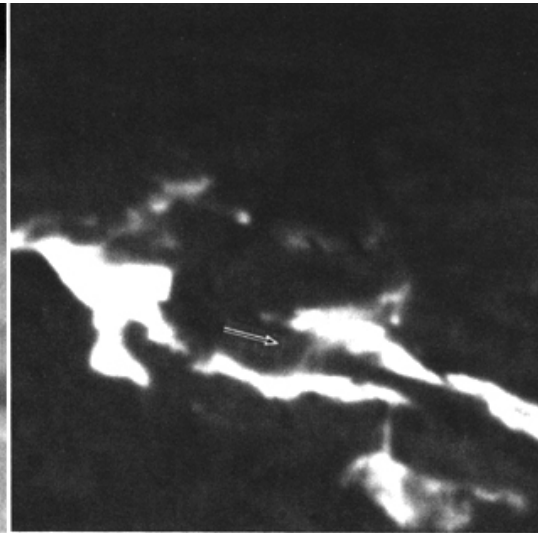
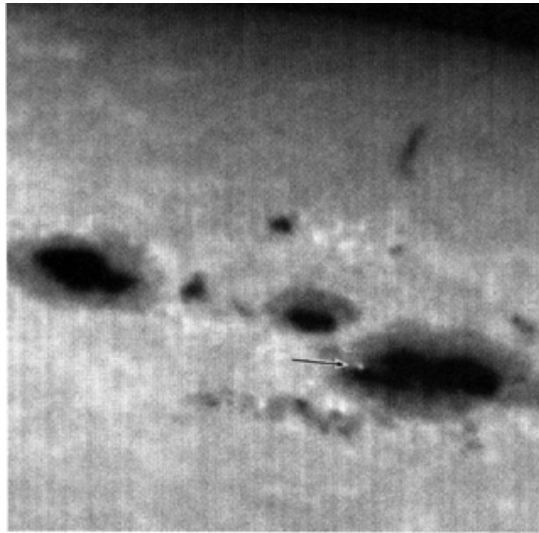
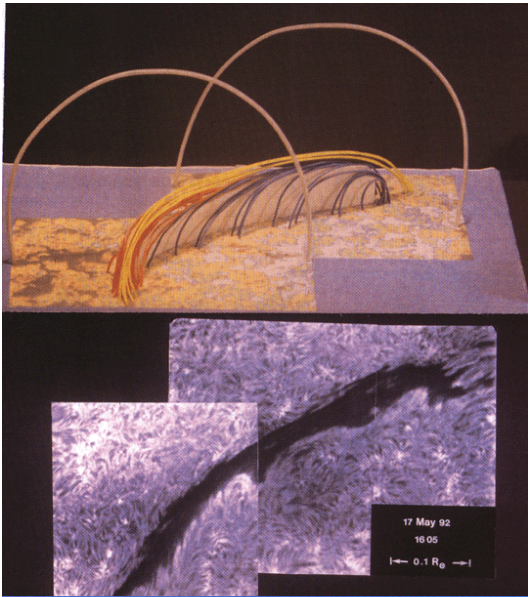
- 太陽光盤 中央 中低緯度區域
發生 太陽閃焰 或 暗紋噴發消失，
造成 環狀日冕物質拋射(Halo CME)
類似正面看吹泡泡糖的樣子，
會產生CME-associated shock 打向地球
- 日冕洞吹出高速太陽風
出現在中低緯度區域的 日冕洞 掃過
太陽光盤 中央的子午線 會在行星際空間產生
co-rotating shock 打向地球



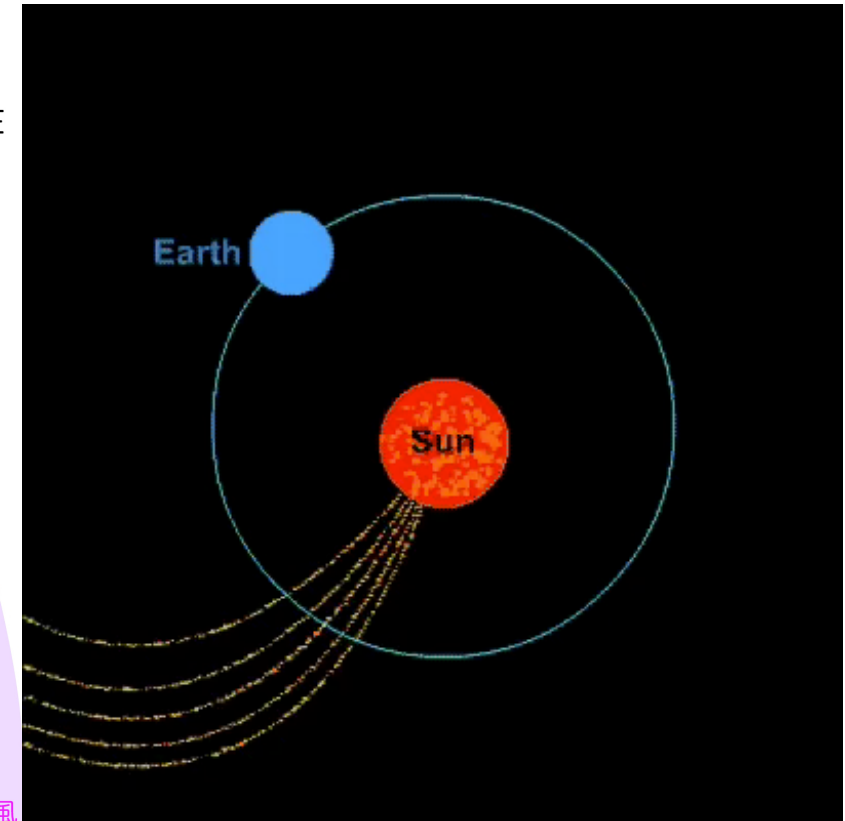
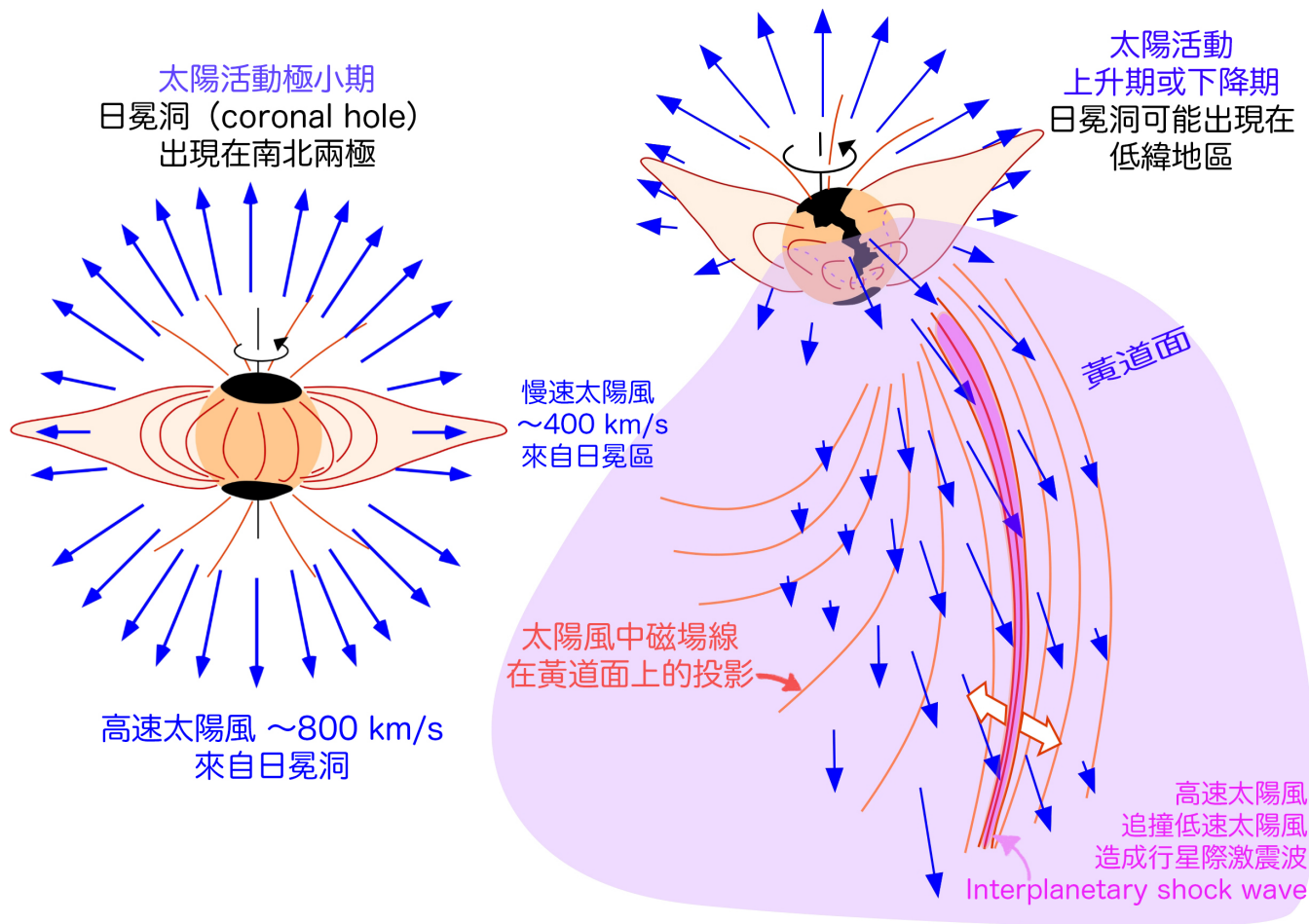
Coronal Holes: 24 May 22



Solar wind flowing from these coronal holes should reach Earth on May 27-28.
Credit: SDO/AIA



當「日冕洞」發生在太陽盤面中央區域時，行星際空間中會發生高速太陽風追撞低速太陽風，造成激震波

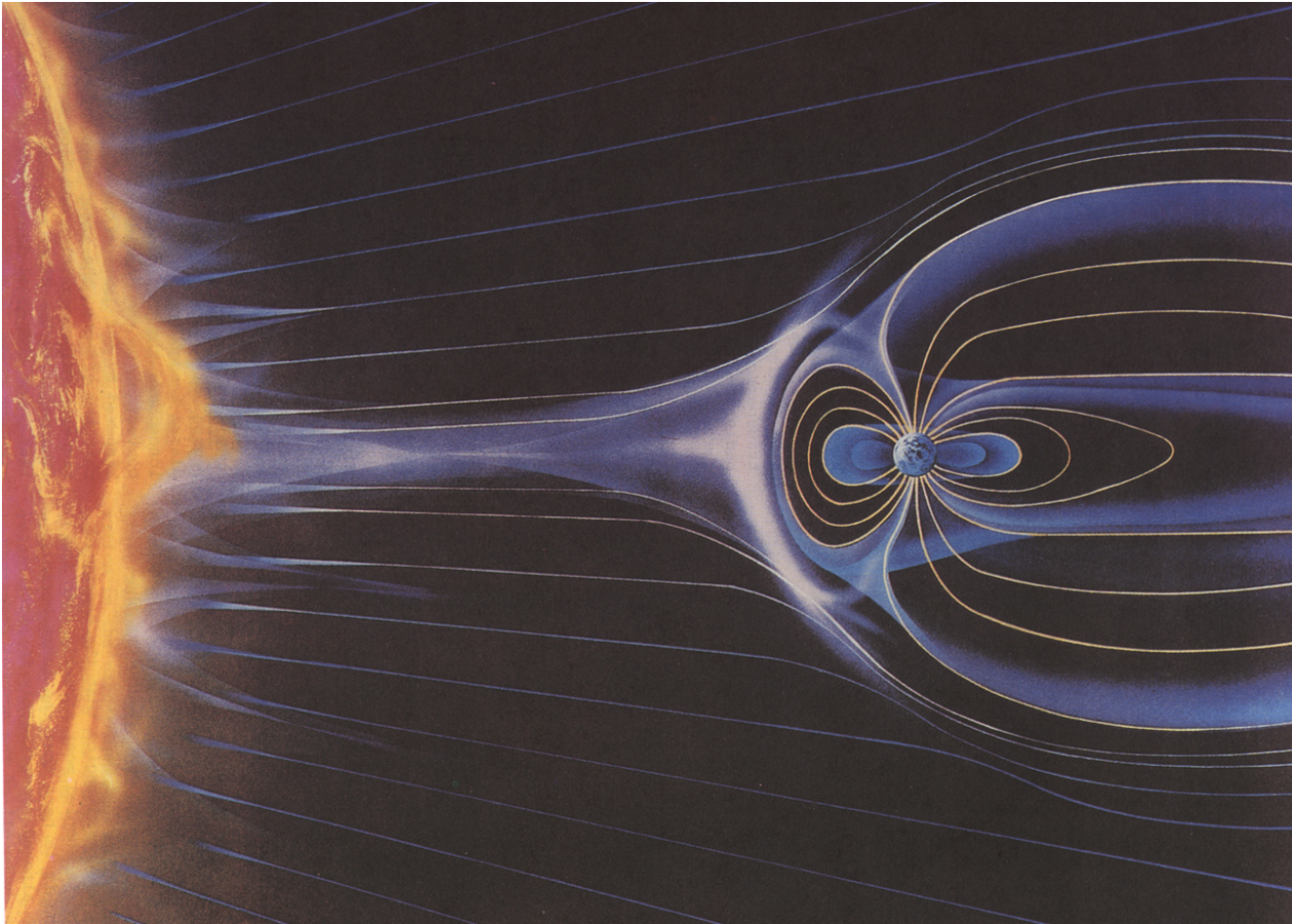


磁層物理 & 造成磁層風暴的 磁層與電離層耦合過程

- 先了解 安靜期 的磁層結構
- 再了解 磁層風暴發生時 的磁層結構如何變化
- 要了解磁層結構，需要一些 電磁學物理知識：
 - 電場怎麼產生
 - 磁場怎麼產生
 - 帶電粒子怎麼在電場與磁場中運動

浸泡在太陽風中的地球磁層

為何不是一個磁偶極場？為何會變成一個有頭有尾的結構？



回答這個問題，
要先了解

電場怎麼產生？

磁場怎麼產生？

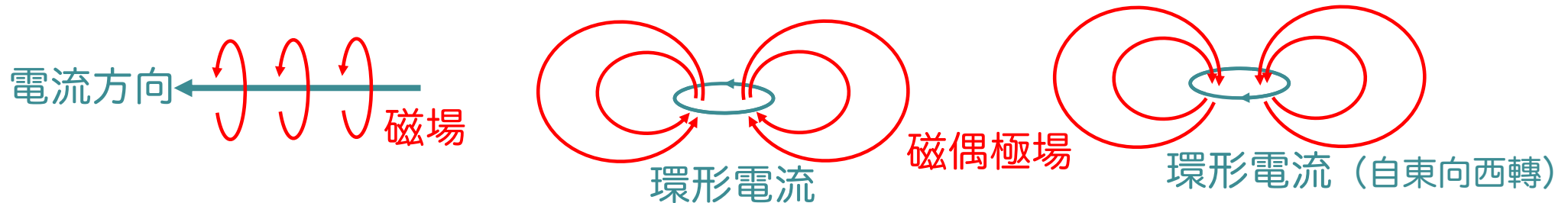
帶電粒子在電場與
磁場中，如何運動？

電場怎麼產生的

- 靜電場
 - 電荷分離：靜電場的方向由正電指向負電。
 - 正負電越接近，靜電場越強。
 - 正負電的帶電量越高，靜電場越強。
 - 運動系統轉換：如果存在背景磁場，則兩個在垂直磁場方向上有相對移動速度的系統，測到的靜電場會不相同。
(就像在不同運動系統上，聽到的警笛聲會不同。)
- 電磁波中的電場
 - 電磁波：電生磁、磁生電
 - 根據楞次定律，隨時間變動的磁場，會產生感應電動勢、感應電場。（電磁爐加熱原理）

磁場怎麼產生的

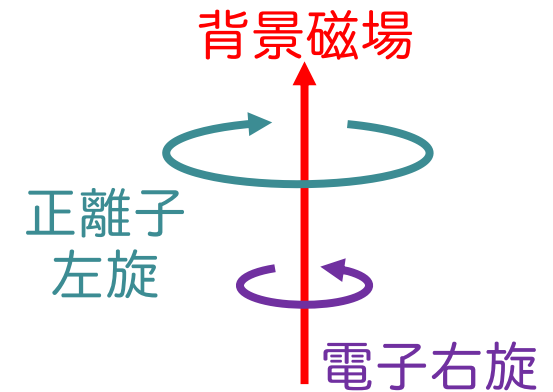
- 磁鐵：量子效應（電子自旋spin整齊排列）
 - 低溫時才有量子效應，溫度高於居禮溫度，磁性消失。
- 電流可以產生磁場：右手定則，“定義”磁場方向。
 - 右手大拇指沿電流方向，另外四指旋轉方向為磁場方向



- 地球的磁偶極場，是由內部一個 自東向西轉的環形電流 所產生的，當此環形電流軌跡 產生波動或變形，地球的磁極位置，也會晃動。
- 電磁波中的磁場：電生磁、磁生電，不靠電流傳播。

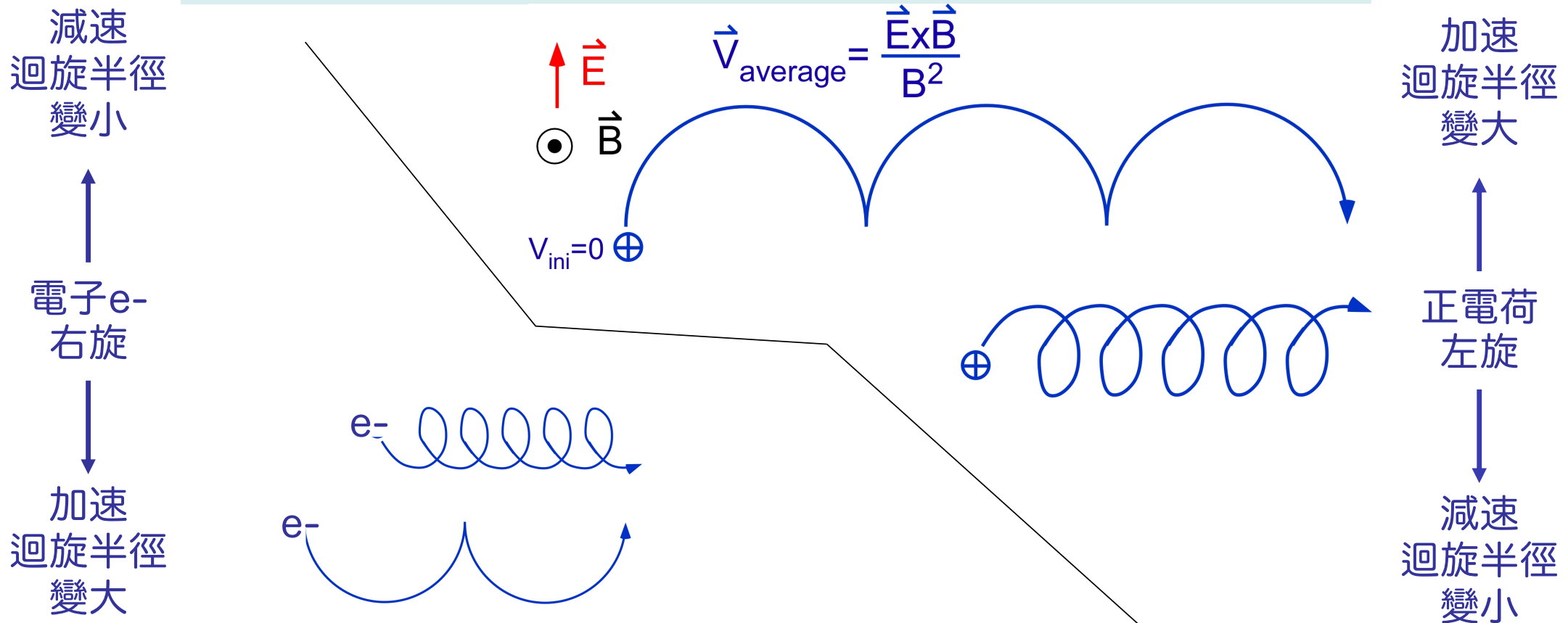
帶電粒子怎麼在電場與磁場中運動

- 在均勻磁場中打轉
 - 帶負電的電子，繞著磁場 右旋，迴旋半徑小
 - 帶正電的正離子，繞著磁場 左旋，迴旋半徑大（砂石車，質量大，迴旋半徑大）
 - 粒子 繞著磁場打轉的速度越快，迴旋半徑越大
 - 磁場越強，粒子繞著磁場打轉的迴旋半徑越小（磁場強：扭力強，類似高級跑車！）
- 在均勻的磁場與電場中 飄移 (EXB drift)
- 在 不均勻的磁場中 飄移 (磁場梯度飄移)
- 在電場 & 不均勻的磁場中，加速或減速 飄移
- 在磁偶極場中打轉 + 彈跳



正負電荷在磁場中打轉，會在中心產生一個與背景磁場方向相反的微弱磁場，這就是**逆磁效應**

在均勻的磁場與電場中飄移 E cross B (EXB) Drift



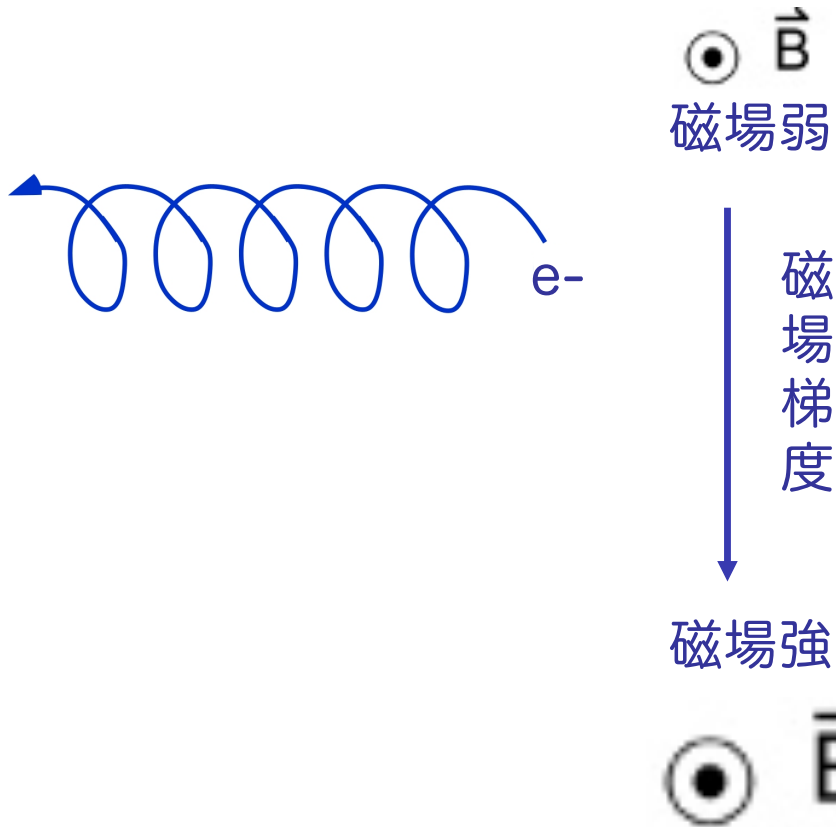
正負電荷，飄移速度相同。如果觀測者跟著飄移速度運動，測不到電場。

在不均勻的磁場中 磁場梯度飄移 電荷相反，飄移方向也相反

磁場弱
迴旋半徑
變大

↑
電子 e^-
右旋
↓

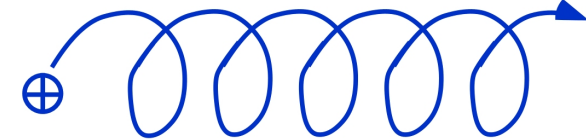
磁場強
迴旋半徑
變小



磁場弱
迴旋半徑
變大

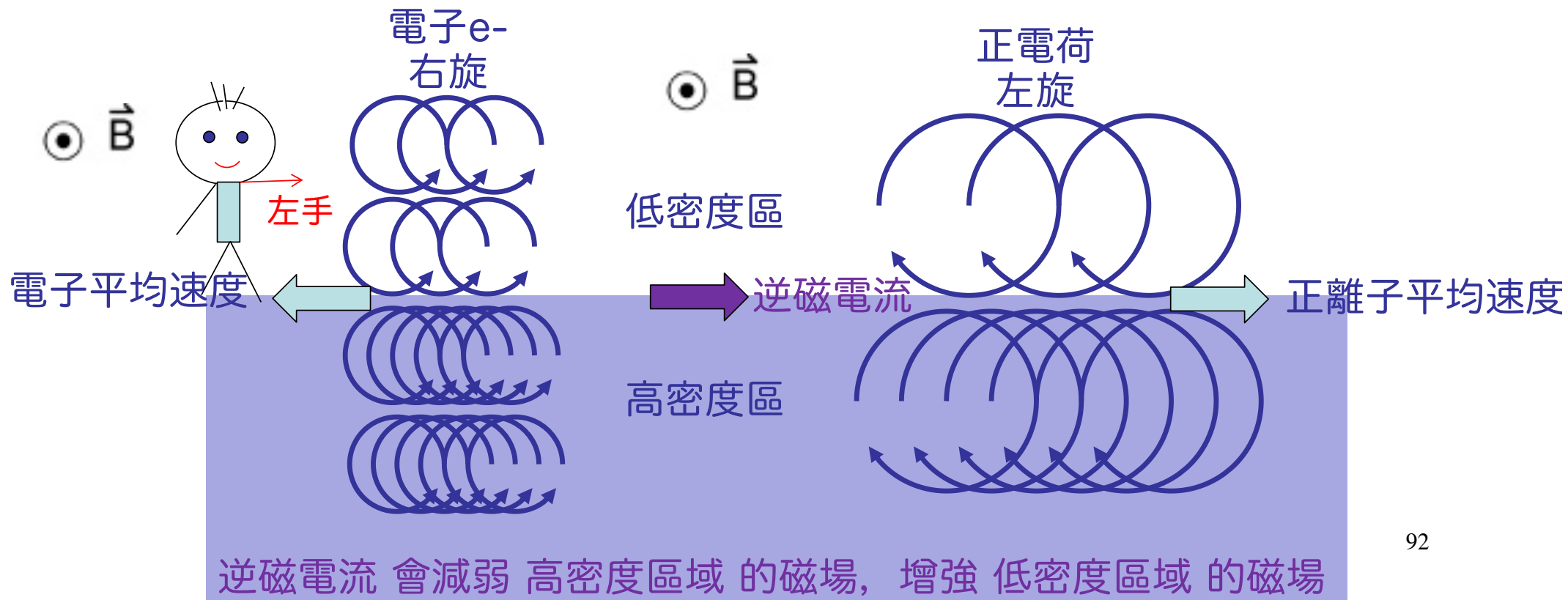
↑
正電荷
左旋
↓

磁場強
迴旋半徑
變小

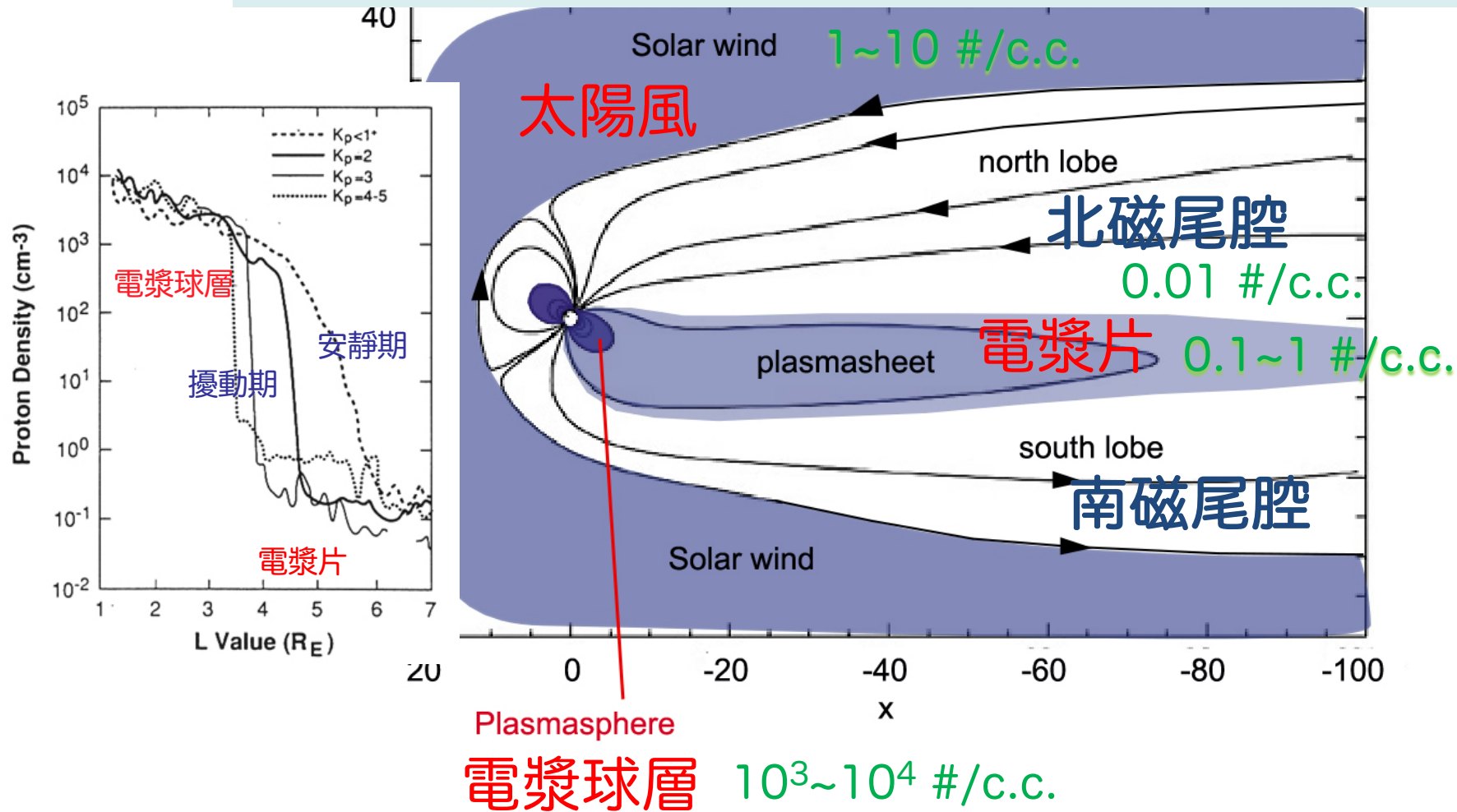


太空中常見的電流 產生機制

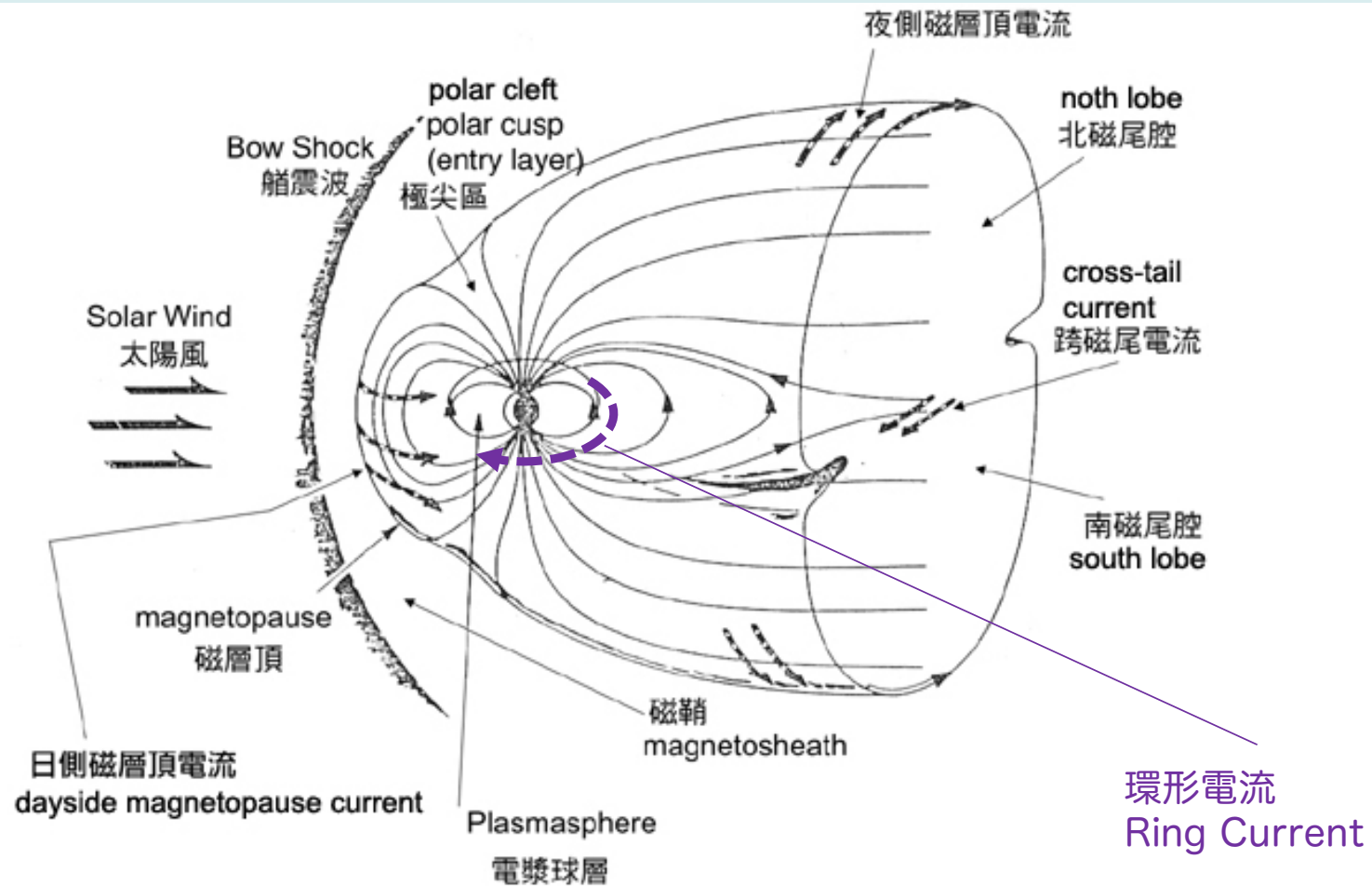
- 磁場梯度飄移 會產生電流
- 電漿密度梯度附近，會出現逆磁電流，成因如下：



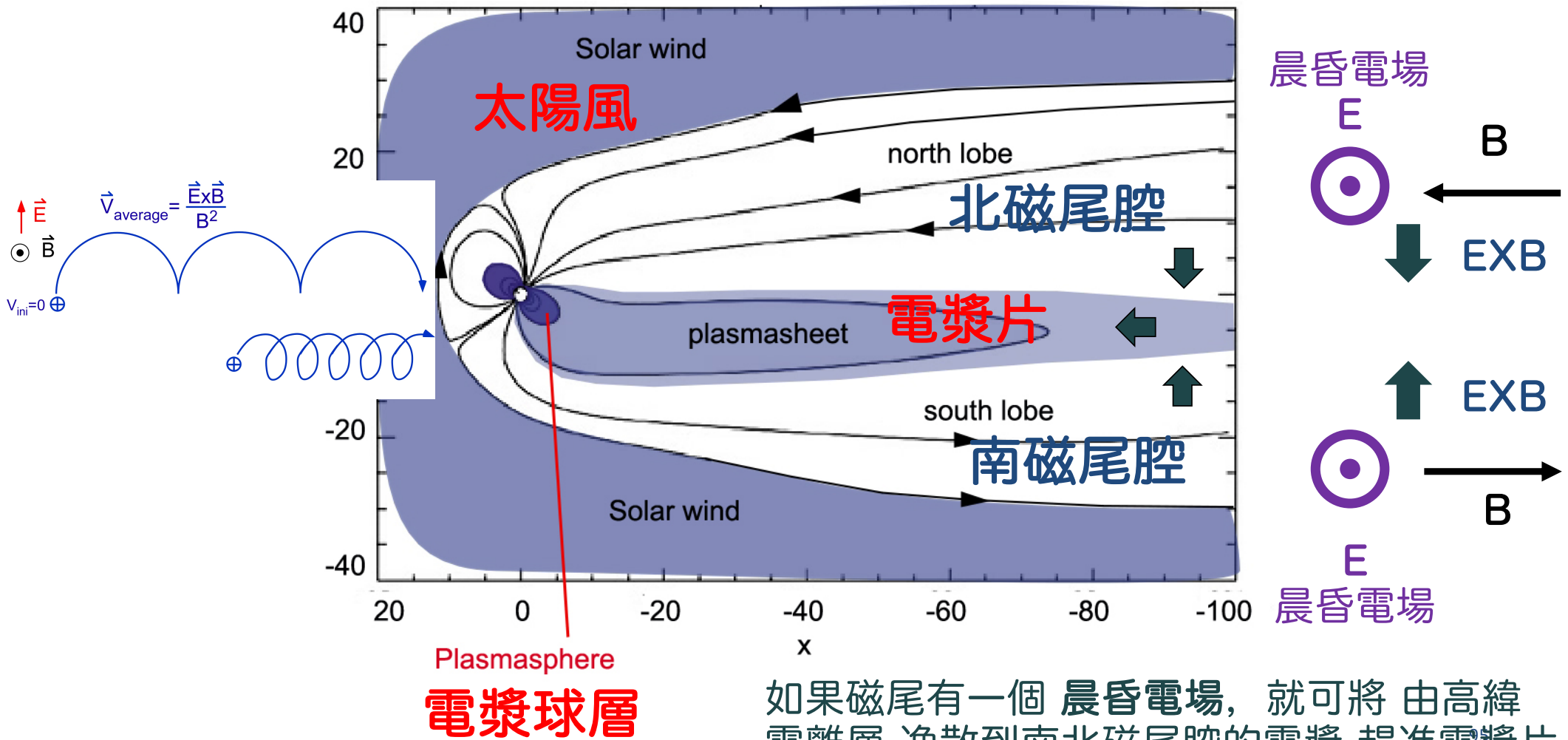
地球磁層子午剖面圖（圖中標有箭頭的線，是磁場線）
（圖中：顏色深淺表示電漿密度高低）



磁偶極場＋逆磁電流 塑造了 磁層的結構



電漿片的形成機制



如果磁尾有一個 晨昏電場，就可將 由高緯電離層 逸散到南北磁尾腔的電漿 趕進電漿片！

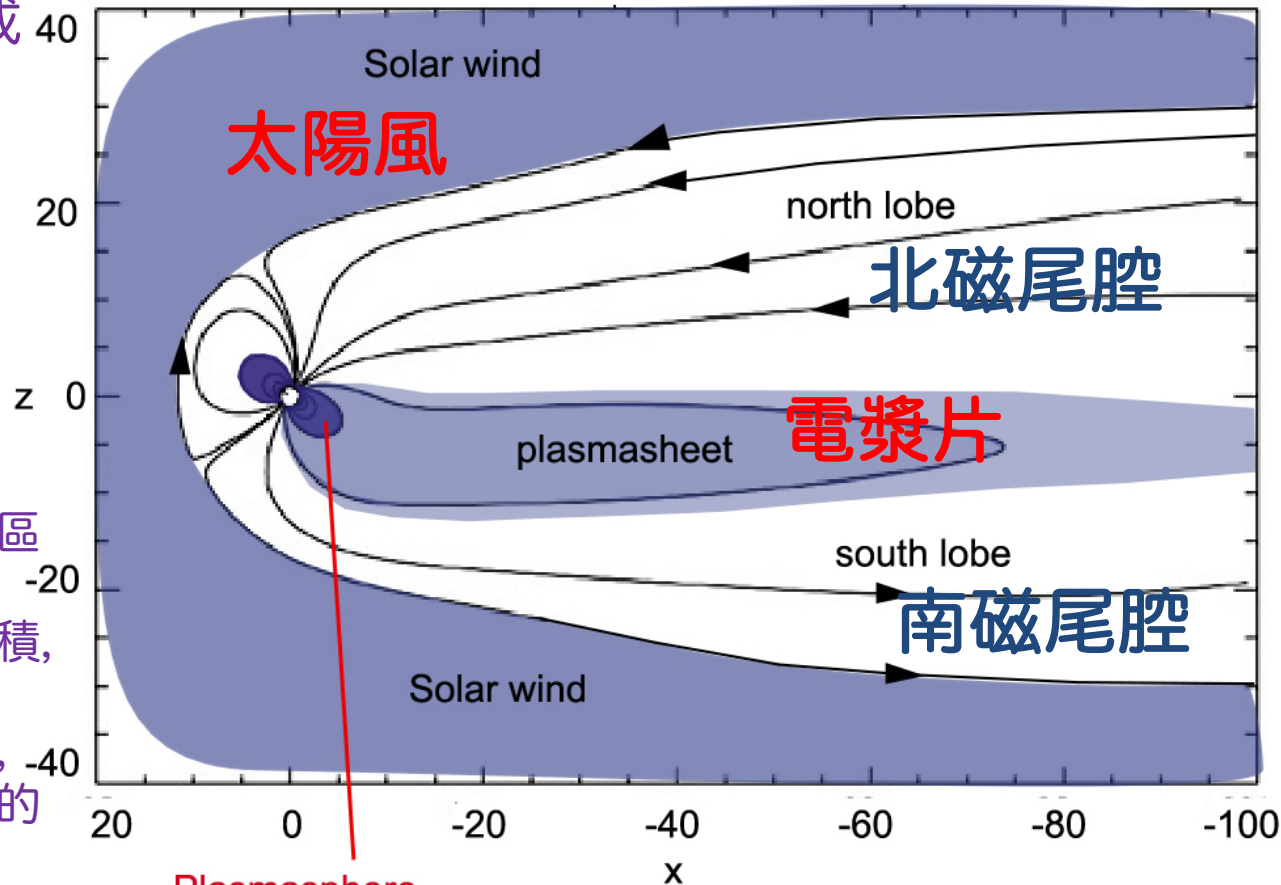
電漿片的形成機制

晨昏電場是形成
磁尾電漿片
的主因

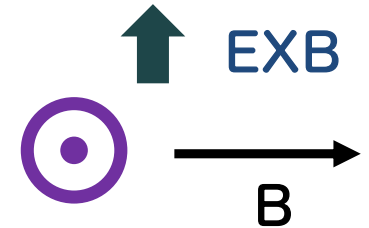
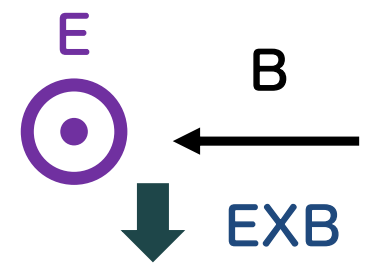
那麼什麼機制
可以產生
晨昏電場？

答：

- 太陽風吹過赤道區
磁層頂附近，會
造成電荷暫時累積，
產生晨昏電場
- 南向太陽風磁場，
造成日側磁層頂的
磁場結構重組，
而產生 感應電動勢 &
晨昏方向的感應電場



晨昏電場

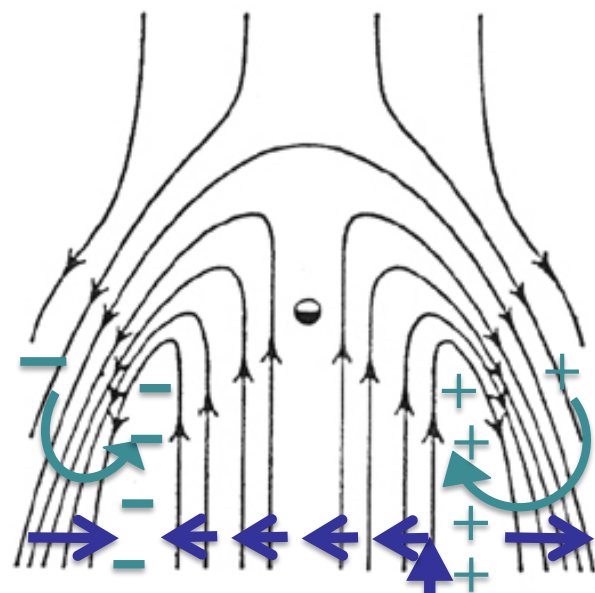


晨昏電場

地球磁層赤道剖面圖（圖中標有箭頭的線，是流線）

太陽風吹過地球磁層

如果地球不自轉……



形成磁尾
電漿片與
南北磁尾腔



B

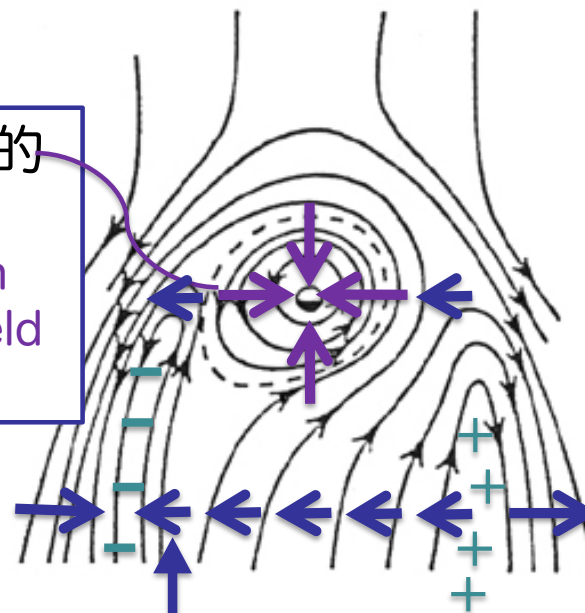
地球磁場

指向地球的
共轉電場
Corotation
electric field
內強外弱

晨昏電場

地球自轉

造成靠近地球的電漿，
繞著地球打轉……



虛線內
形成高電漿密度的
電漿球層

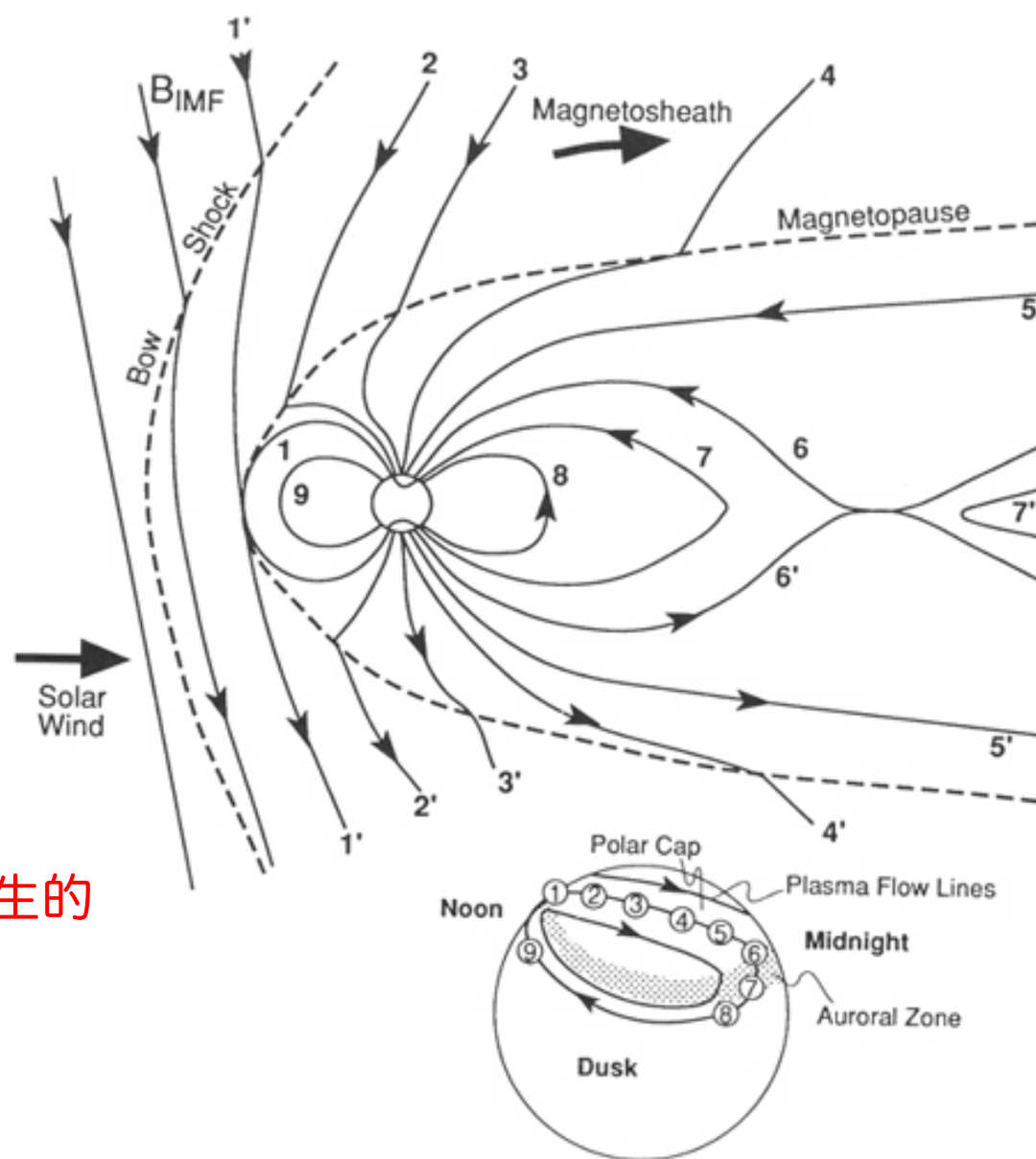
虛線位置：
電漿球層頂
由共轉電場
與晨昏電場
抵消位置決定

因此晨昏電場
增強，電漿球
層頂會內移，
環形電流也會
內移

Southward IMF prior to substorm onset

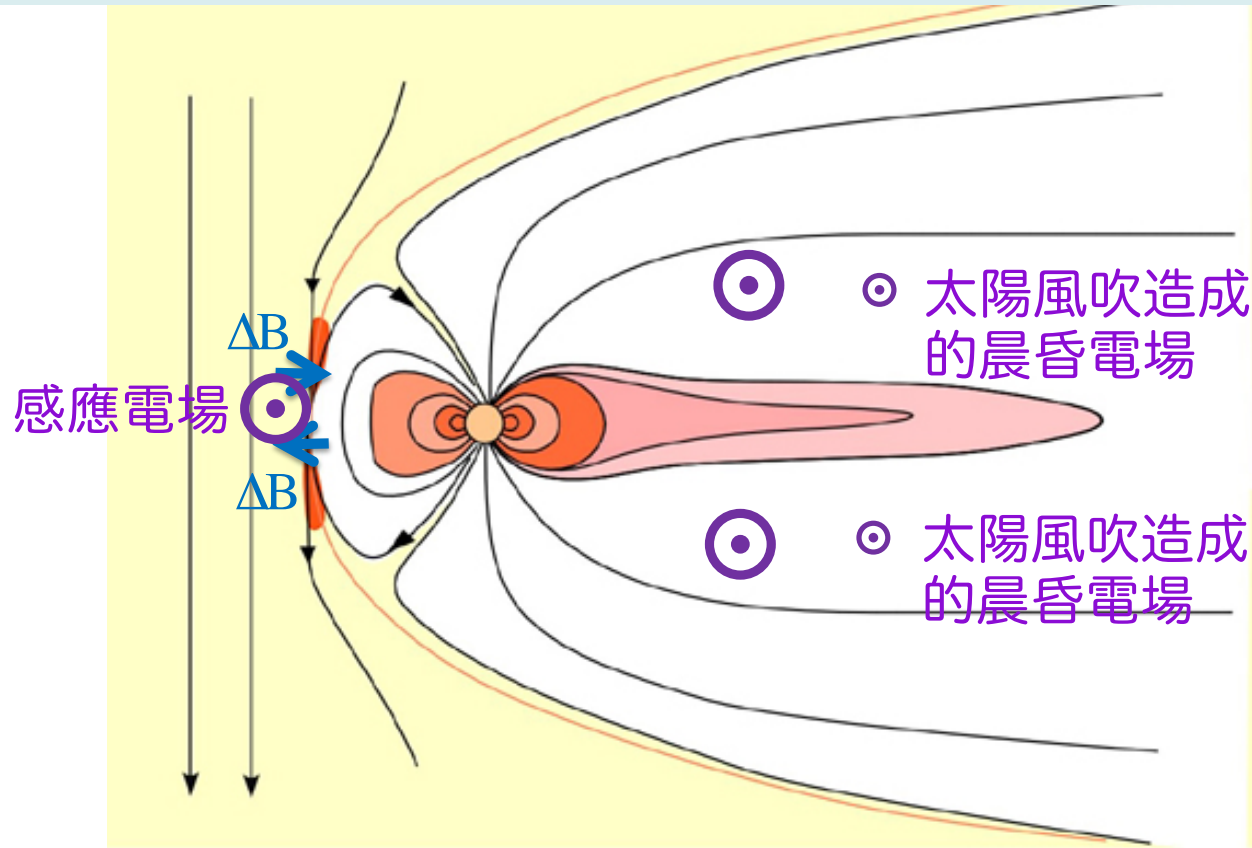
南向的行星際磁場，
可以【打開】地球磁場的封鎖線，
把地球磁層外圍的磁場，
像洋蔥皮一般，一層層剝掉，
壓縮地球磁層，造成
地球的磁暴與磁副暴。

事實上，5-6-7 並不是連續發生的



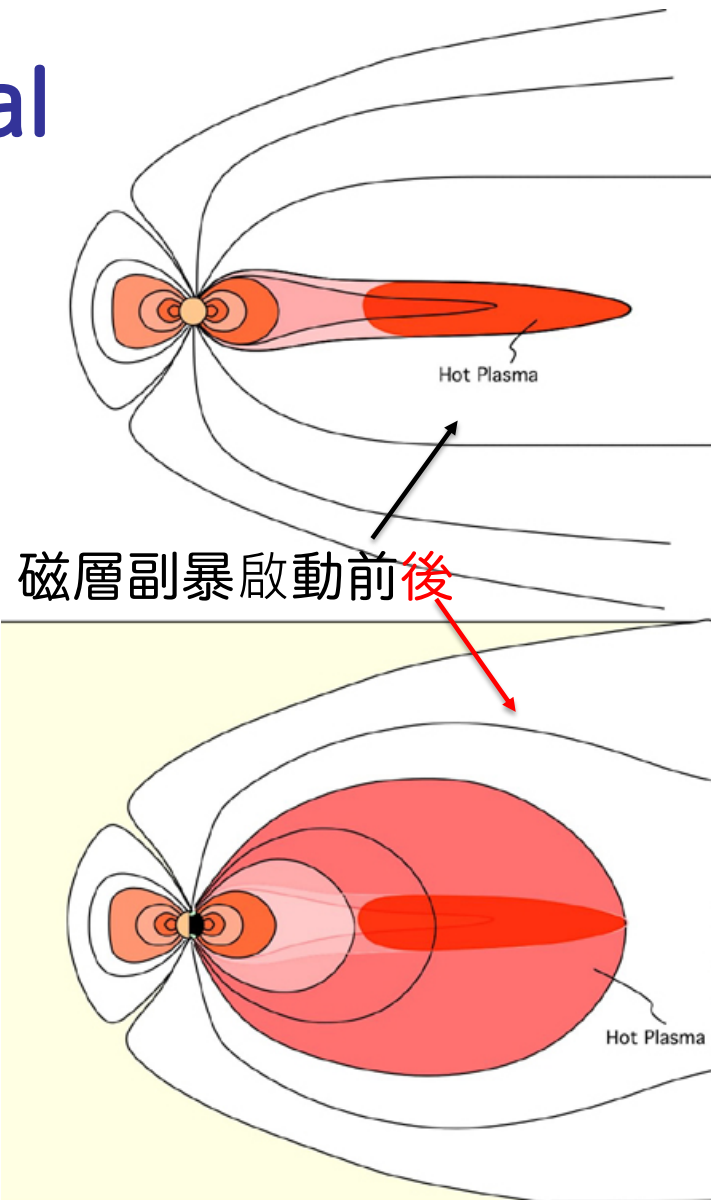
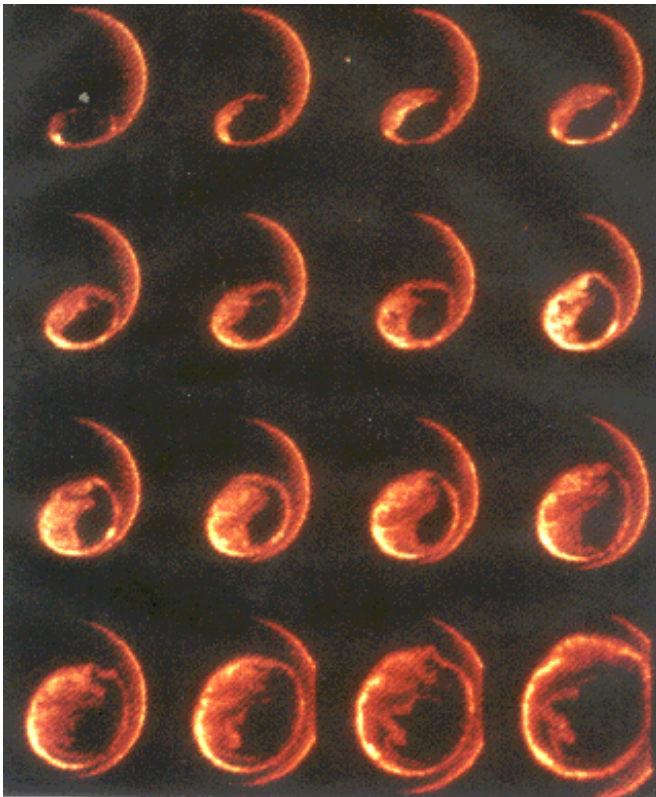
壯觀的分立極光發生之前，必有一段時間，
地球是浸泡於南向行星際磁場之中

圖中日側磁層頂地球磁場與行星際磁場重聯/結構重組時，
造成強大的感應電場，可壓縮整個磁層。



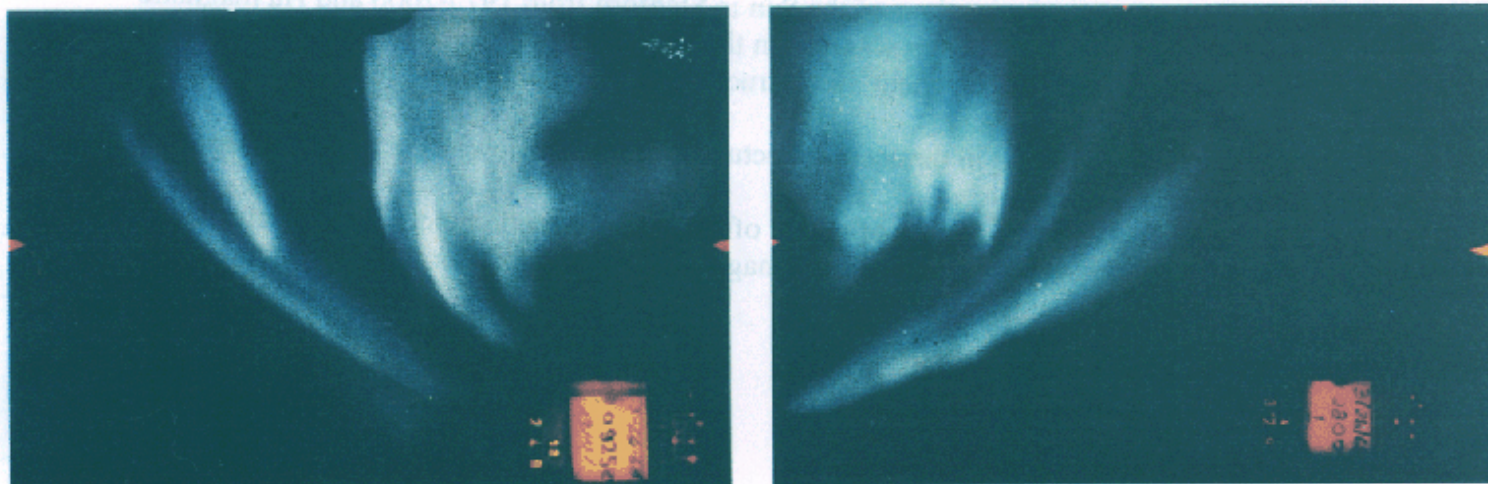
造成極光橢圓圈auroral oval 分布的原因

磁層副暴
發生時，
繞極人造
衛星 所
拍攝到的
紫外光的
極光分佈
影像

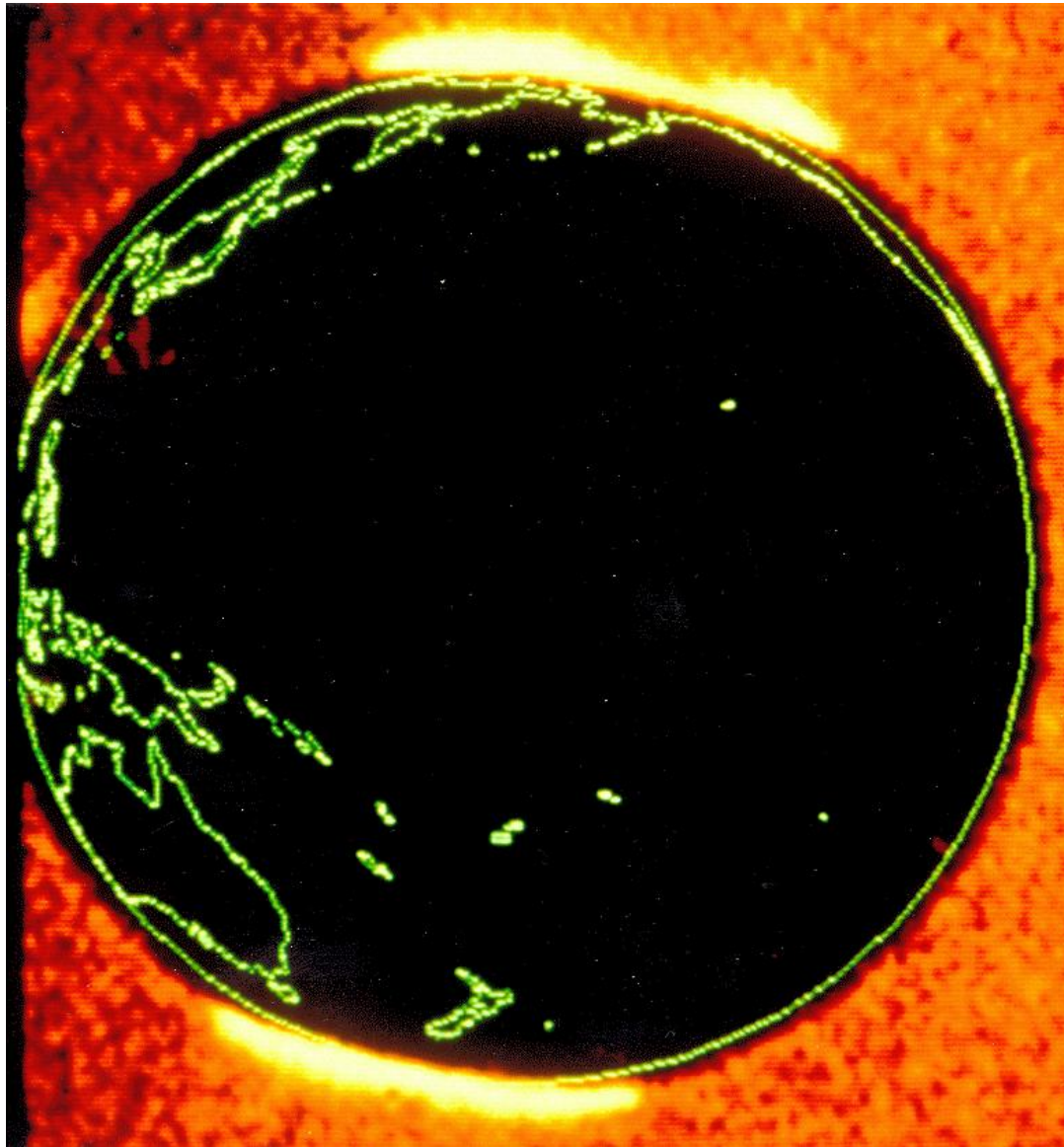


分立極光成對出現在南北 高緯夜空 表示它們同時來自磁尾

圖4. 利用飛機同時在紐西蘭與阿拉斯加上空所拍攝的南、北極光，如同鏡中影像。

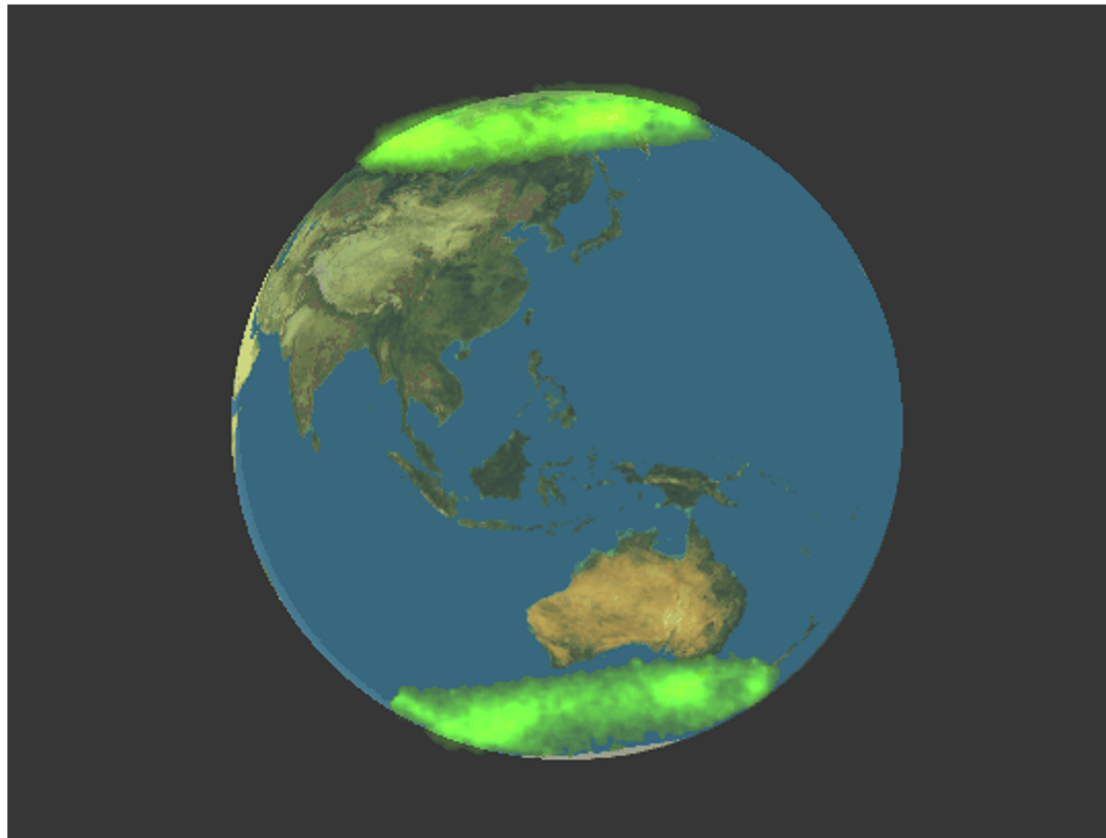


早期人造衛星
DE-1,2
所拍攝到的
南北極光
的紫外光照片
(組合照片)



人造衛星POLAR同時拍攝到 南北極光的紫外光照片

<http://www.gsfc.nasa.gov/topstory/20011025aurora.html>

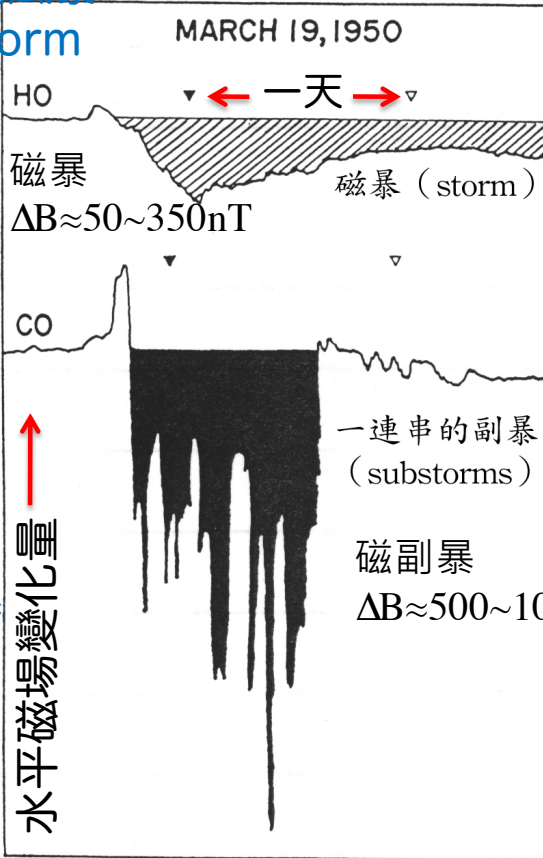


磁暴與磁副暴

環形電流位置
強度的改變
造成地面磁場風暴
magnetic storm

HO: 夏威夷測站代碼
CO: 阿拉斯加測站代碼

夏威夷
 $B_0 \approx 35000 \text{ nT}$

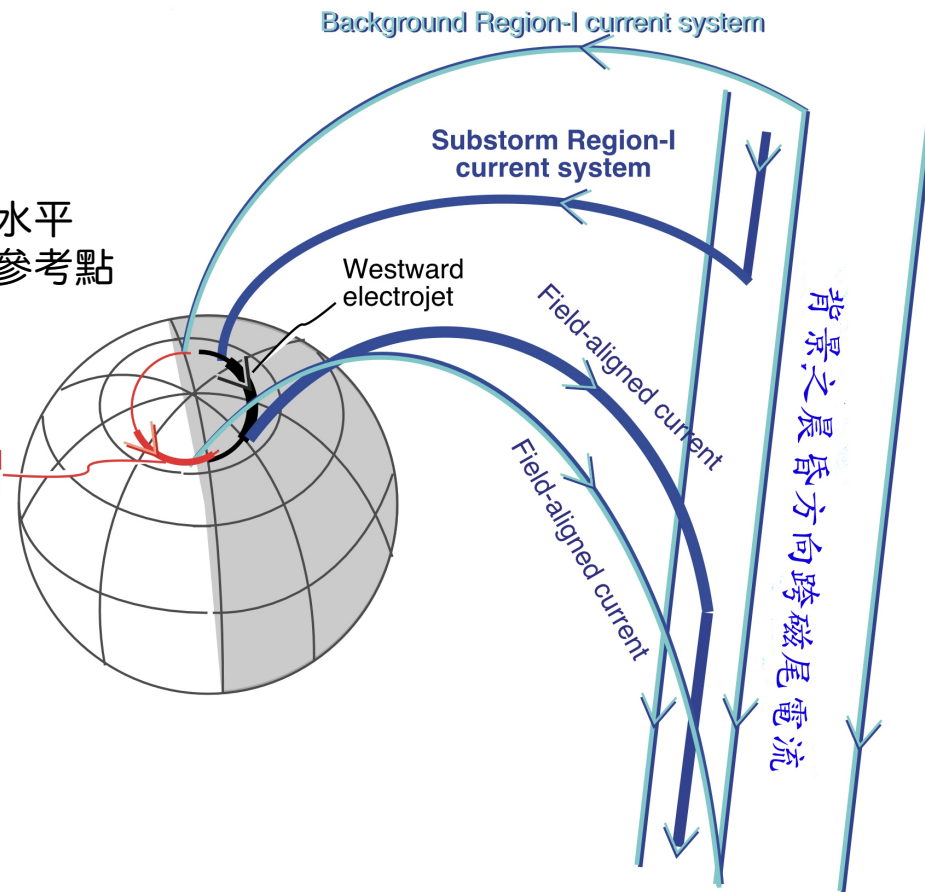


阿拉斯加
 $B_0 \approx 70000 \text{ nT}$

電離層電流
增強造成
地面磁場風暴
substorm

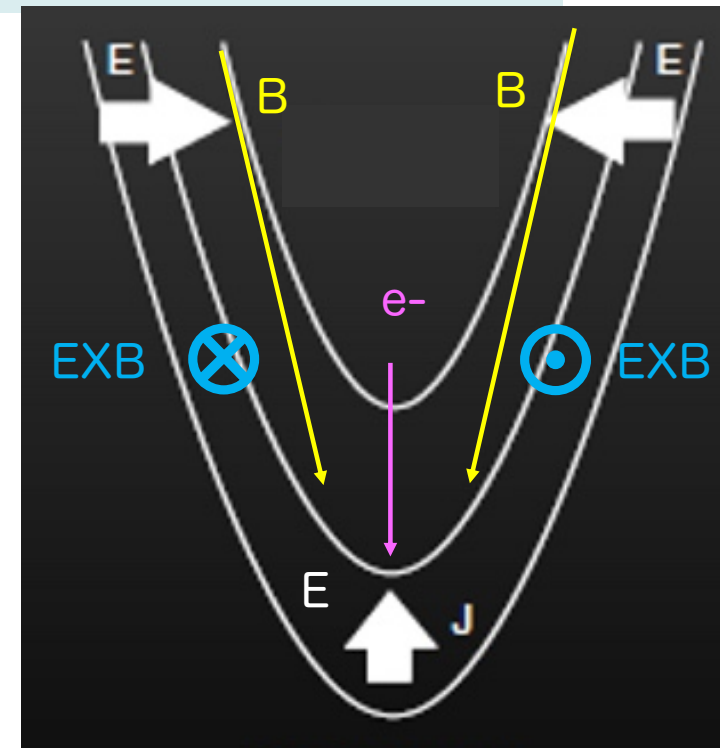
平日水平
磁場參考點

Eastward
electrojet

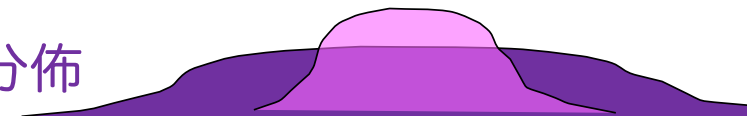


極光電子 加速 與 飛舞

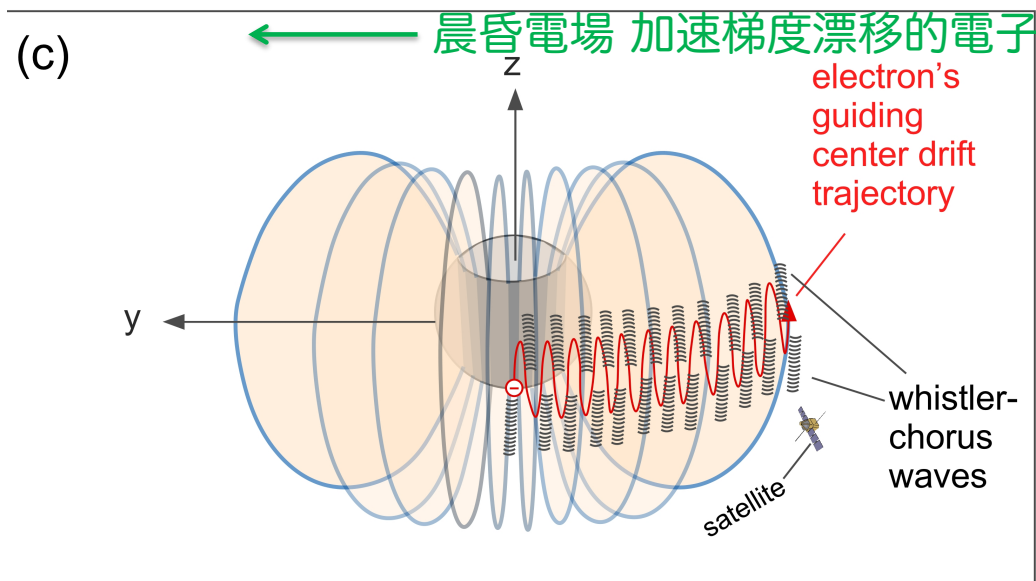
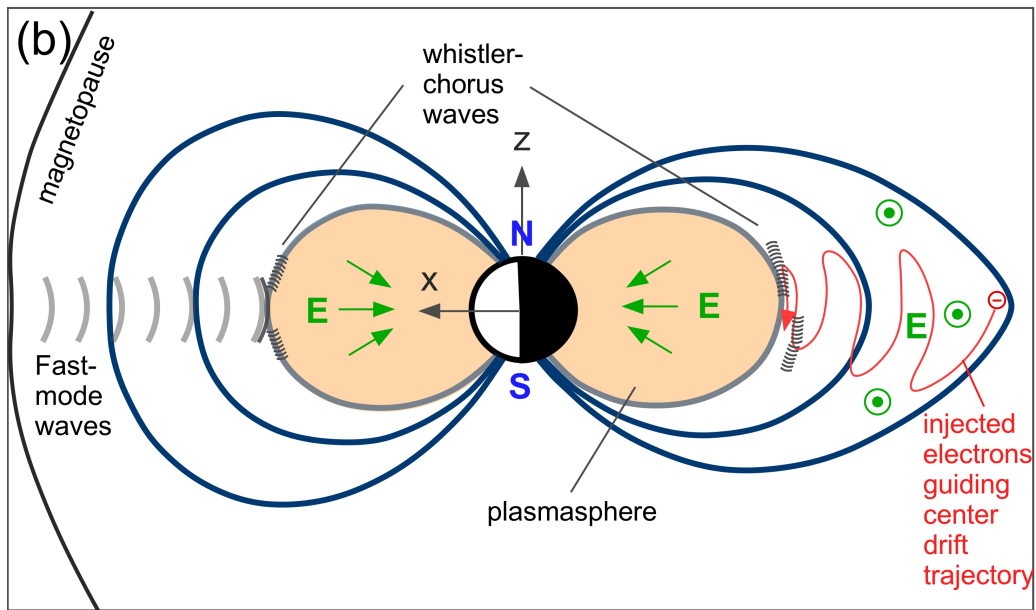
- 高濃度沉降電漿會在強磁場區產生 電荷分離，電離層為良導體，必須為等電位，於是在靠近電離層一側，形成向上的電場，加速電子
- 極光弧兩側電場反向，背景電漿 $E \times B$ 飄移形成速度切，產生小尺度的右旋渦流
- 夜側電離層中導電率分布不均勻，電流集中在強導電區流動，產生電噴流。
- 電離層E層的霍爾效應，產生大尺度左旋渦流
- 霍爾電場以波動形式，來回在磁層與電離層中傳播，產生新的場向電場加速電子，改變極光分佈。



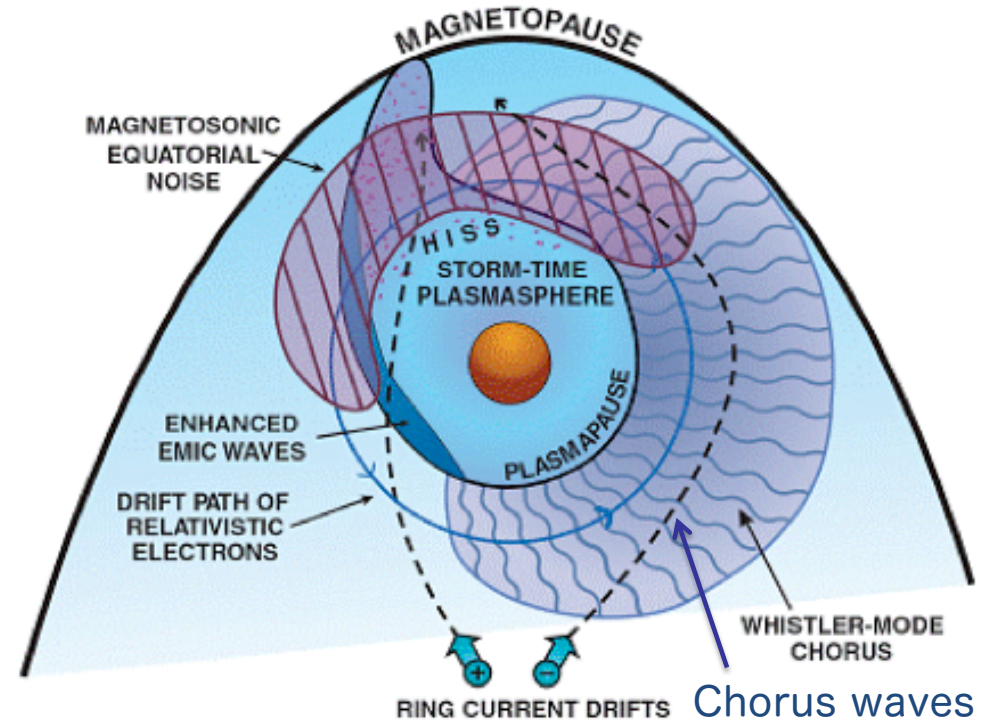
正離子密度分佈



電子密度分佈



脈動極光 & 合唱波 成因



磁赤道面波動分佈示意圖
[Thorne, 2010]

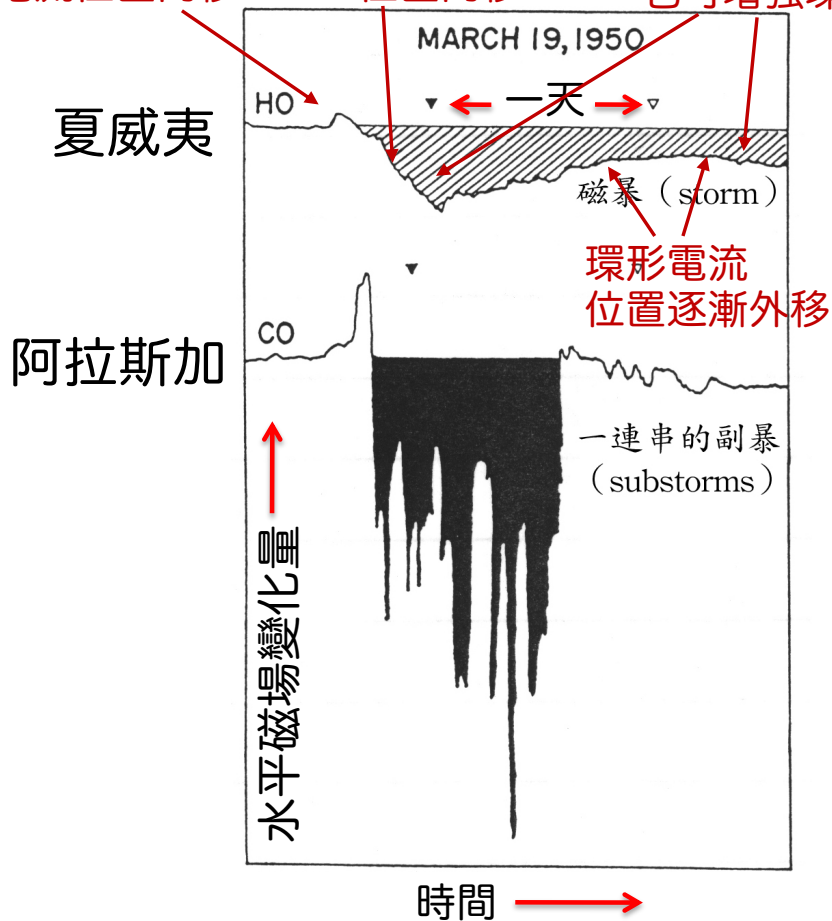
Chorus waves
合唱波 造成
Pulsating Aurora
脈動極光

中低緯磁暴

日側磁層頂
電流位置內移

環形電流
位置內移

磁副暴期間磁尾灌入
高能電子 & 正離子
他們的梯度飄移
也可增強環形電流



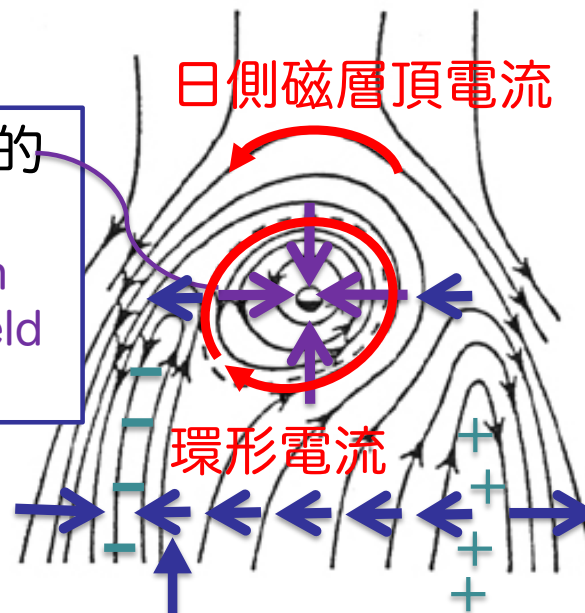
地球自轉

造成靠近地球的電漿,
繞著地球打轉....



指向地球的
共轉電場
Corotation
electric field
內強外弱

晨昏電場



虛線位置：
電漿球層頂
由共轉電場
與晨昏電場
抵消位置決定

因此晨昏電場
增強，電漿球
層頂會內移，
環形電流也會
內移

造成極光與副磁暴的條件

- 長時間的南向的行星際磁場
 - 因為地球磁場在磁鼻附近是北向的
- 高速太陽風 或 日冕物質噴發
 - 行星際激震波撞擊地球磁層 最好搭配 南向的行星際磁場
- 高緯電離層夜側的「導電率」，在垂直磁場方向呈現「不均勻」的分佈
 - 有利於極光電噴流的形成
 - 春秋天的極光比較多，強度比較強（夏半球導電率高）
 - 相關物理過程對一般聽眾而言太難懂了，所以決定略過不講了
- 磁副暴的引發：
 - 南向行星際磁場轉為北向時
 - 持續南向的行星際磁場造成每三小時發生一次磁副暴

https://www.youtube.com/watch?v=grn_aRL9nVA

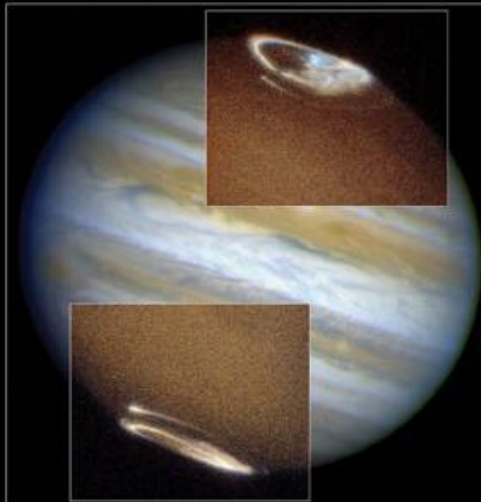
其他行星上的極光

- 極光的形成與磁場結構有關
- 極光的顏色與大氣成分有關
- 只有同時具有「磁層」又有「中性大氣」的行星，
才會有極光。
 - 地球是太陽系「類地行星」中，唯一有大氣、
又有磁層的行星。
 - 太陽系的「類木行星」都是既有大氣、也有磁層
的行星。
 - 系外行星若有綠色極光，表示該行星上有氧氣。



Earth Aurora

地球
Earth



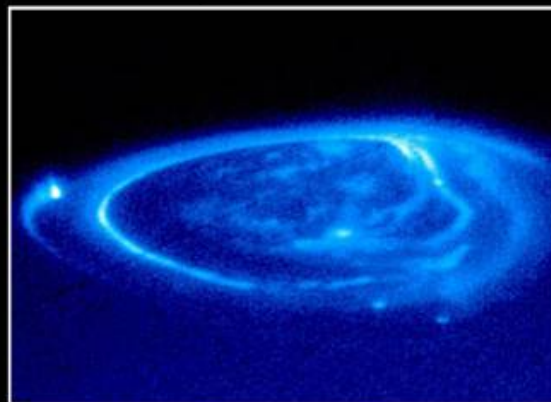
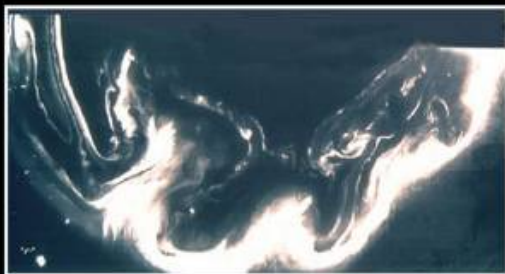
Jupiter Aurora
Hubble Space Telescope • STIS • WFPC2

木星
Jupiter



Saturn Aurora
Hubble Space Telescope • STIS

土星
Saturn



規劃觀賞極光的行程

- 要看每天晚上都會出現的綠色極光（這種極光 光度不強）
 - 最好選春秋天
 - 最好選沒有月亮的日子
 - 天上沒有雲的日子
- 要看太陽閃焰或日冕洞所造成的絢麗極光
 - 在出現 太陽閃焰或暗紋消失造成 Halo CME 之後的兩天內，飛去極區看極光（缺點：很難預測閃焰發生時間&磁場方向）
 - 如果前一次 日冕洞產生漂亮的極光，估算它下一次掃過的時間（27天後），提早三週買機票飛去極區等著看極光
 - 天上不要烏雲密佈、最好選春秋天

總結

- 人類了解了電磁學，有了量子物理能階光譜的概念，才終於能了解極光的發光原理。
 - 不過要想完全瞭解各種極光的動態變化，科學家還有很長的路要走。
- 希望大家有機會都能去看看讓人屏息的極光秀。
- 每次目睹的極光，只是整個極光分佈的一小部分。
- 聽完這次的演講，希望大家對 磁層風暴期間 極光的分佈，與重複發生時間，有更完整的認識。
- 聽完這次的演講，希望大家對磁層的靜態 & 動態結構，也能有初步的認識。