

太陽風 & 外磁層

Solar Wind &

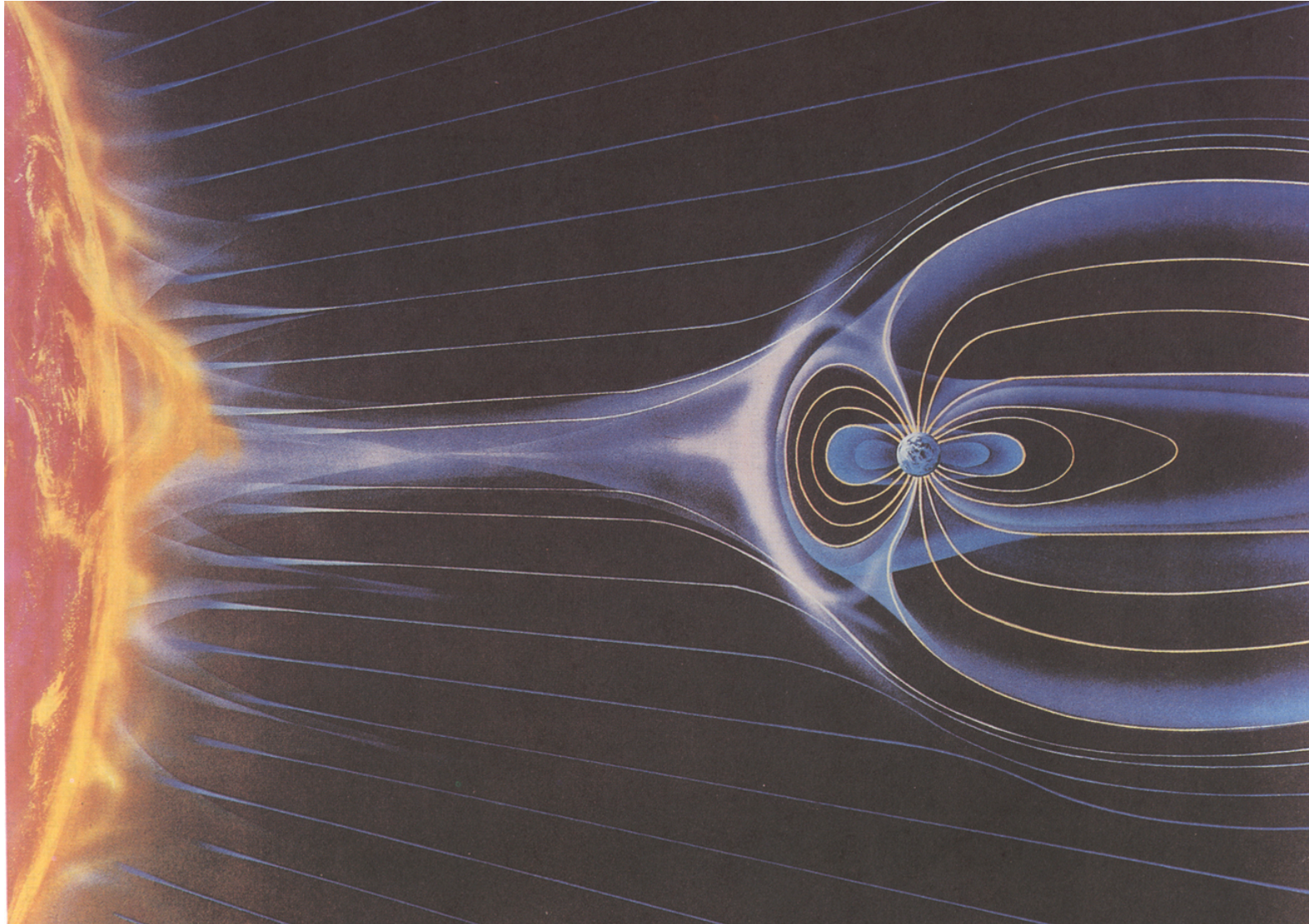
Outer Magnetosphere

呂凌霄

Ling-Hsiao Lyu

Institute of Space Science, NCU

浸泡在太陽風中的地球磁層



什麼是太陽風 Solar Wind ?

- 早期科學家由彗星尾巴結構得知，有太陽風的存在。
- 太陽風是 廣義的日冕 solar corona
 - 日蝕的時候，可以看到 狹義的日冕：
 - 狹義的日冕：靠近太陽處，高溫高濃度的日冕
 - 我們也可用X-ray或EUV光譜觀測 狹義的日冕
- 太陽風是因為太陽的重力場抓不住高溫的日冕大氣，如果太陽磁場也不幫忙束縛這些大氣，它們就會逃逸到廣大的日磁層中。

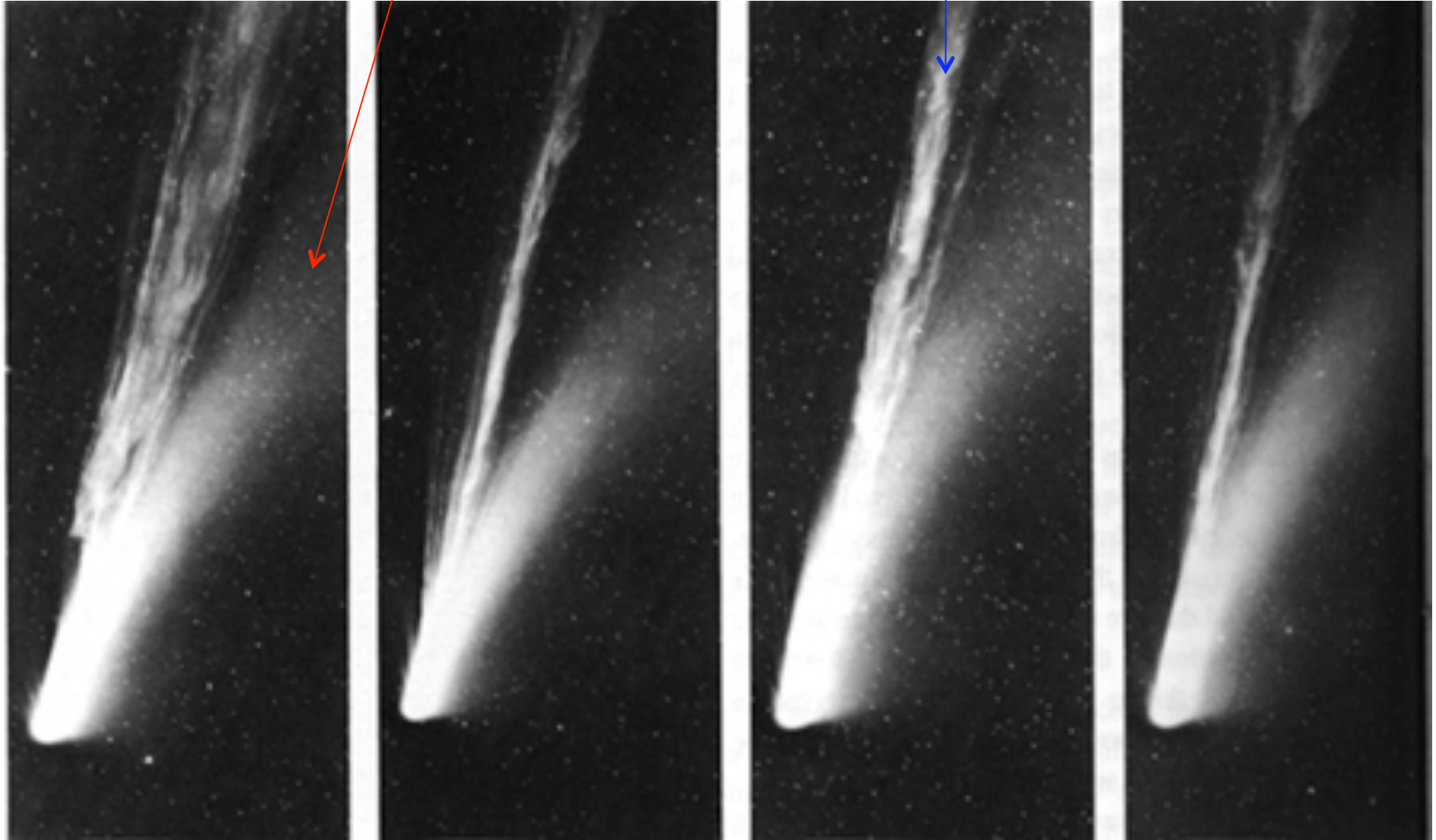
塵埃尾

電漿尾
(離子尾)



塵埃尾

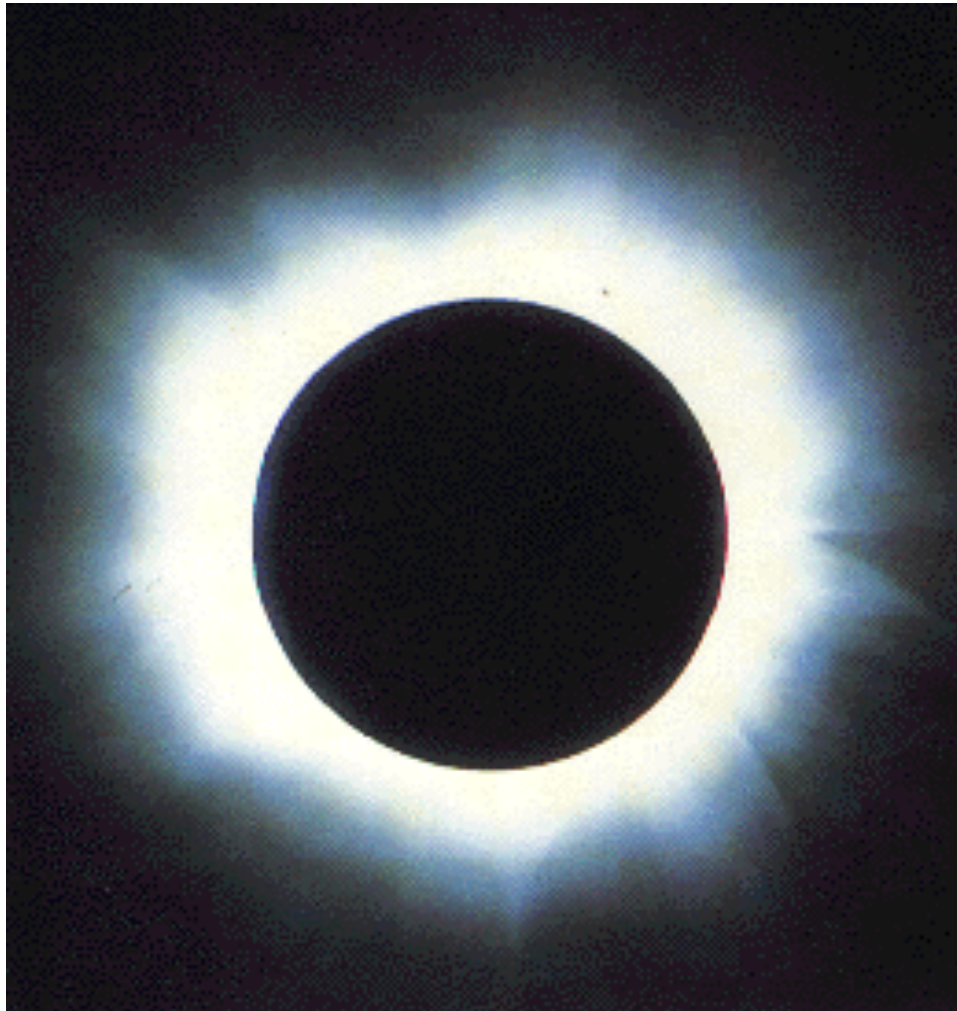
電漿尾
(離子尾)



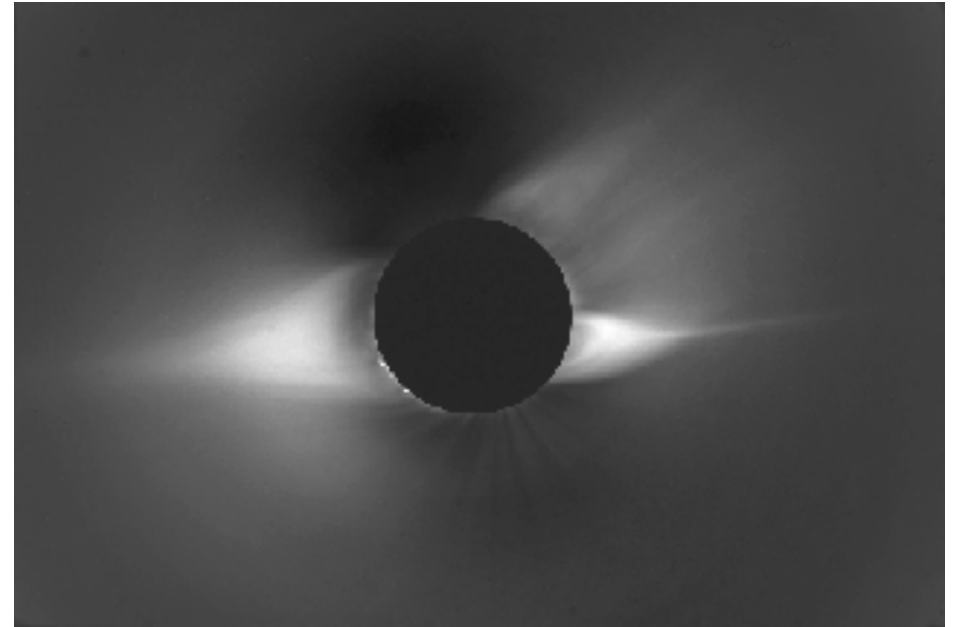
什麼是太陽風 Solar Wind ?

- 早期科學家由彗星尾巴結構得知，有太陽風的存在。
- 太陽風是 廣義的日冕 solar corona
 - 日蝕的時候，可以看到 狹義的日冕：
 - 狹義的日冕：靠近太陽處，高溫高濃度的日冕
 - 我們也可用X-ray或EUV光譜觀測 狹義的日冕
- 太陽風是因為太陽的重力場抓不住高溫的日冕大氣，如果太陽磁場也不幫忙束縛這些大氣，它們就會逃逸到廣大的日磁層中。

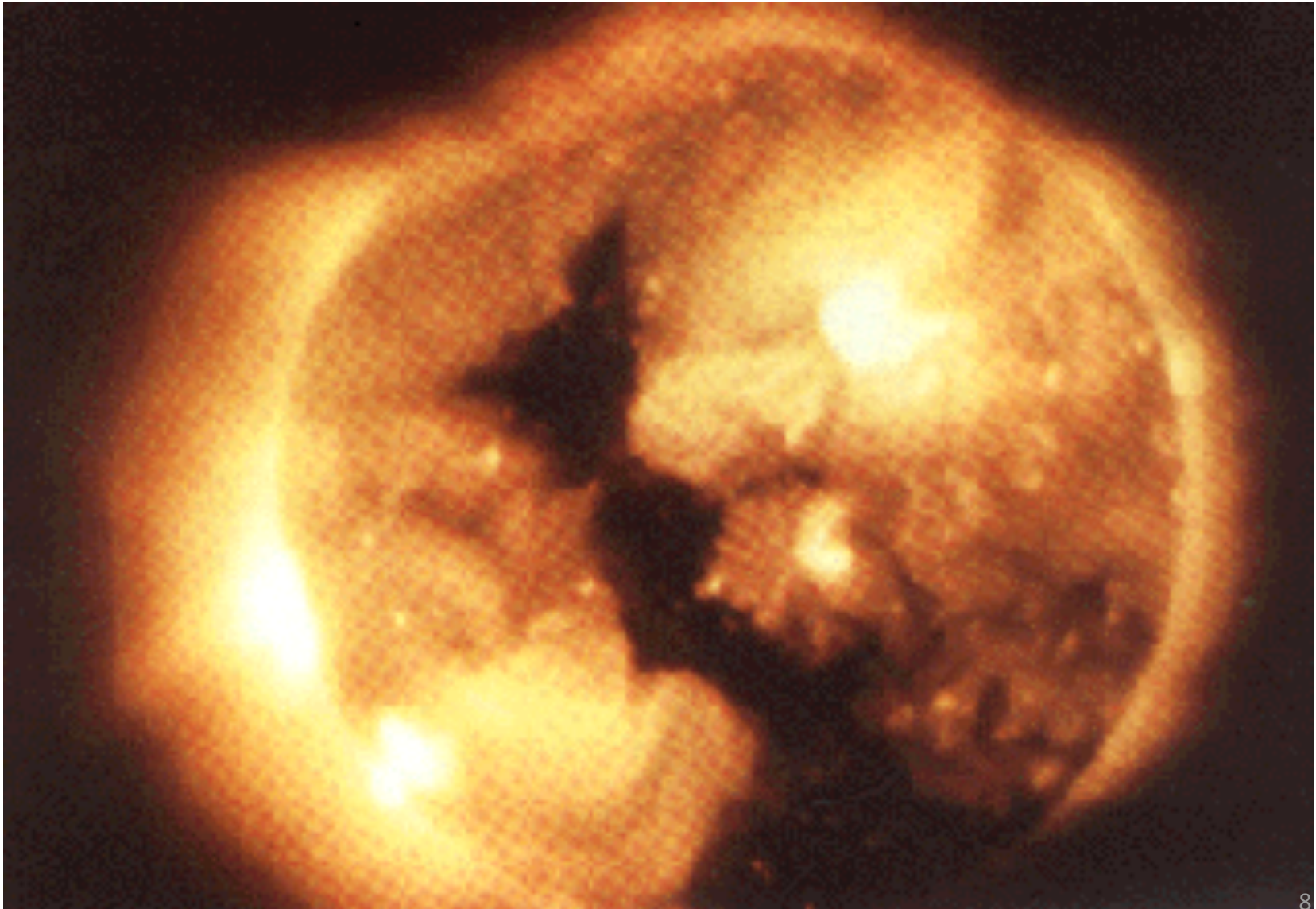
太陽黑子數目極大期的日冕分布
(沒有日冕洞)



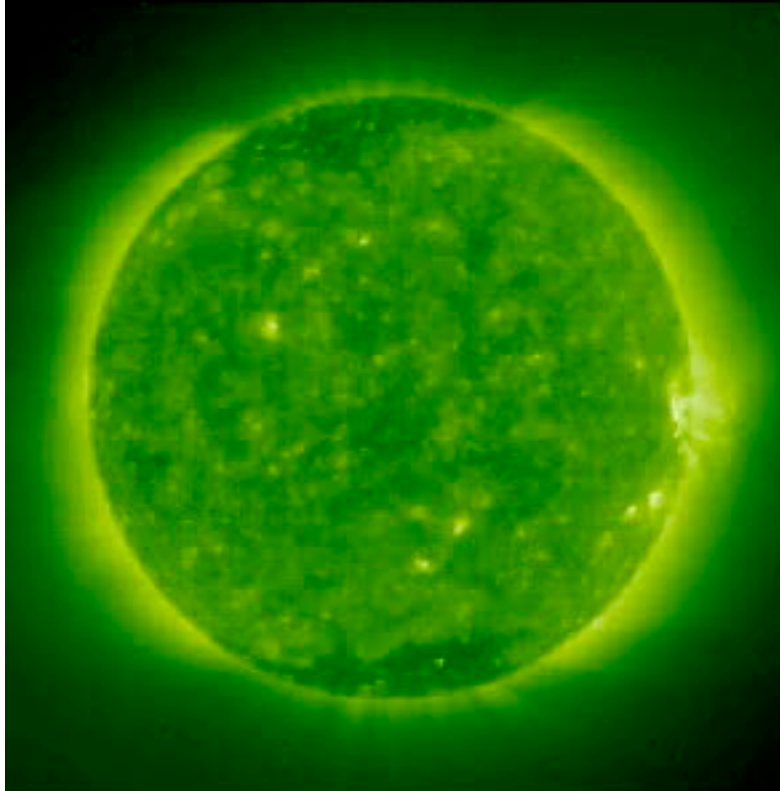
太陽黑子數目極小期的日冕分布
(有清楚的南北日冕洞)



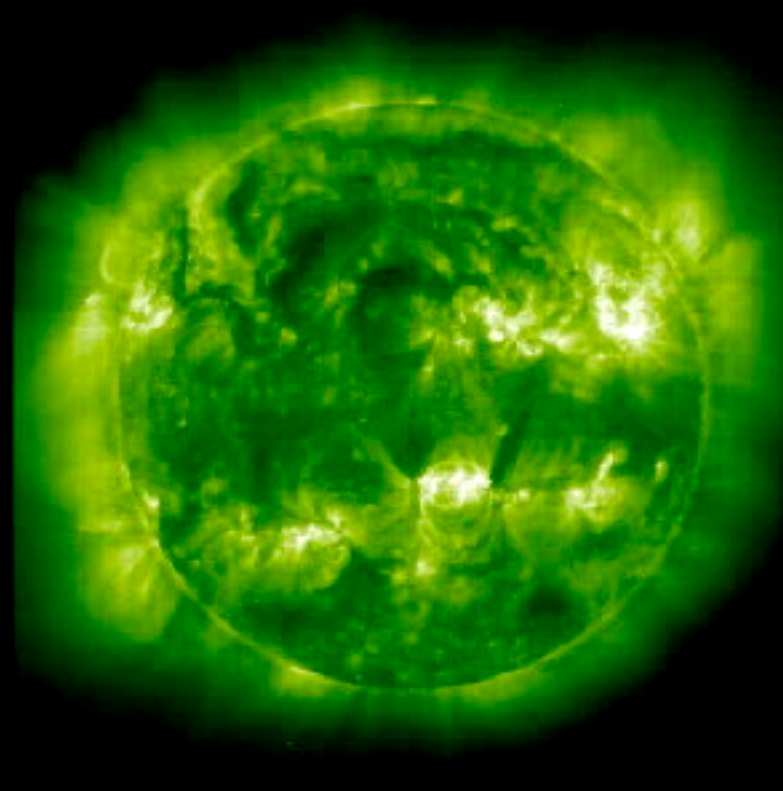
Skylab (1973) Hard-X ray image



EIT 195 Å
Dec. 1996



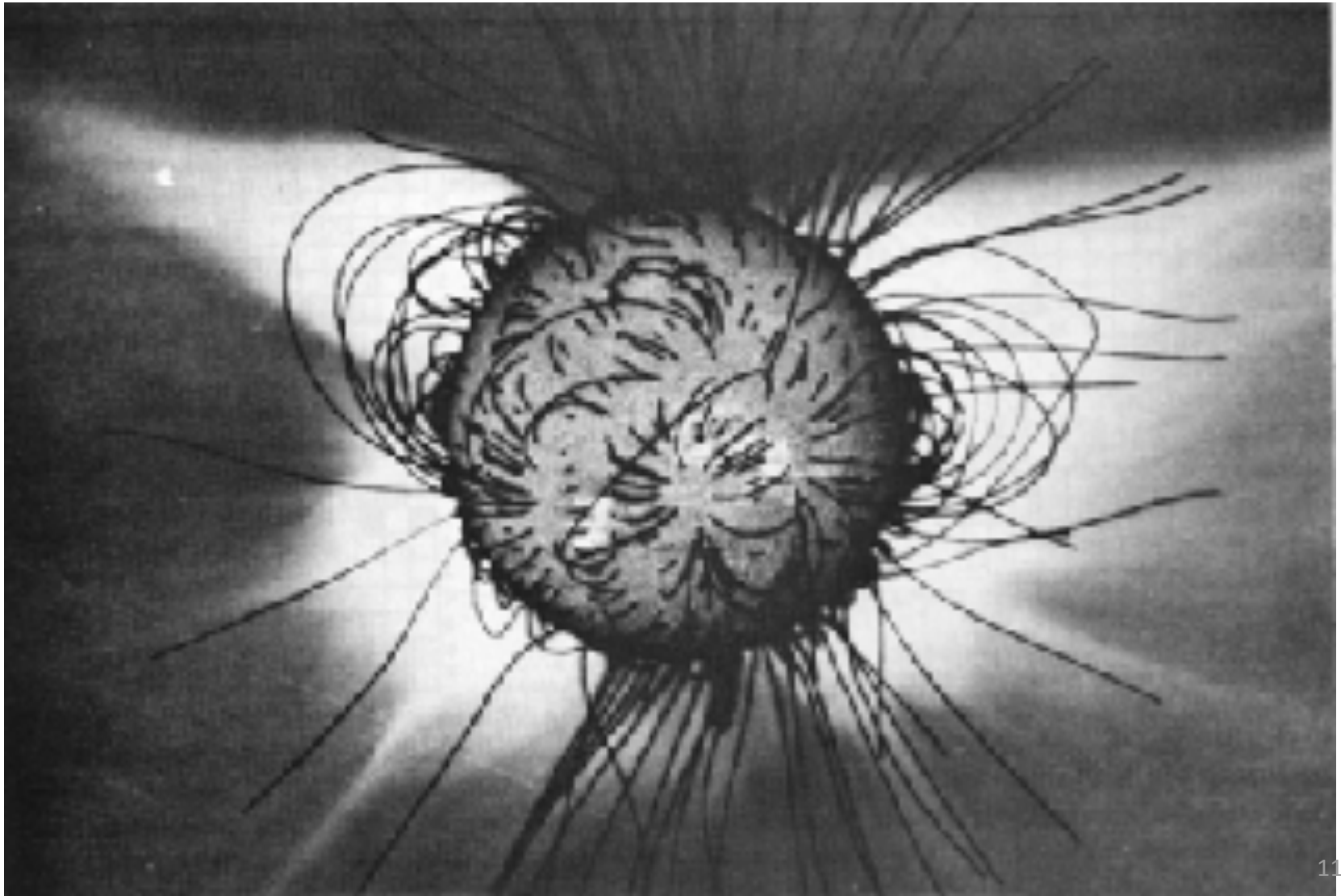
EIT 195 Å
June 1999



什麼是太陽風 Solar Wind ?

- 早期科學家由彗星尾巴結構得知，有太陽風的存在。
- 太陽風是 廣義的日冕 solar corona
 - 日蝕的時候，可以看到 狹義的日冕：
 - 狹義的日冕：靠近太陽處，高溫高濃度的日冕
 - 我們也可用X-ray或EUV光譜觀測 狹義的日冕
- 太陽風是因為太陽的重力場抓不住高溫的日冕大氣，如果太陽磁場也不幫忙束縛這些大氣，它們就會逃逸到廣大的日磁層中。

日冕與日冕洞附近磁場線分布情形



日冕與日冕洞附近磁場線分布情形

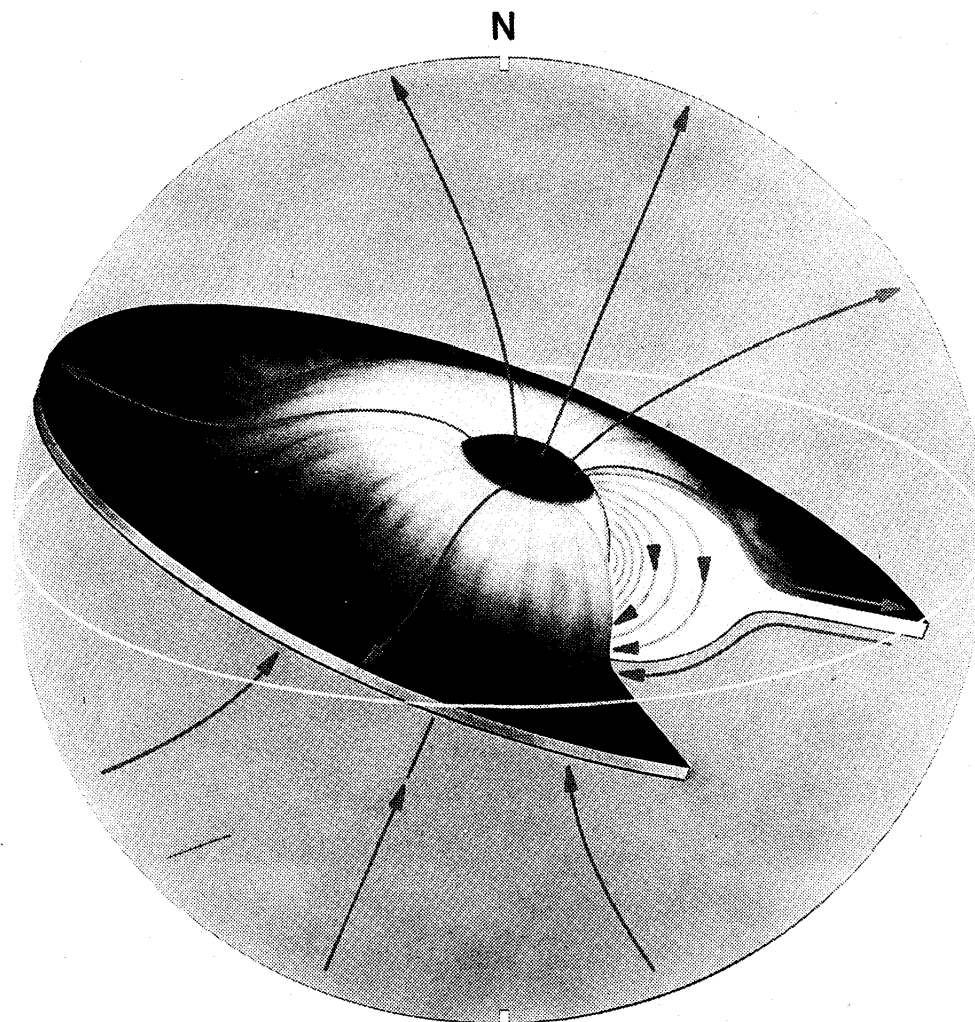


FIG. 4.9. Sketch of the corona and the interplanetary current sheet if the solar dipole field is tilted with respect to the solar-rotation axis (in the vertical direction). (From Hundhausen, 1977.)

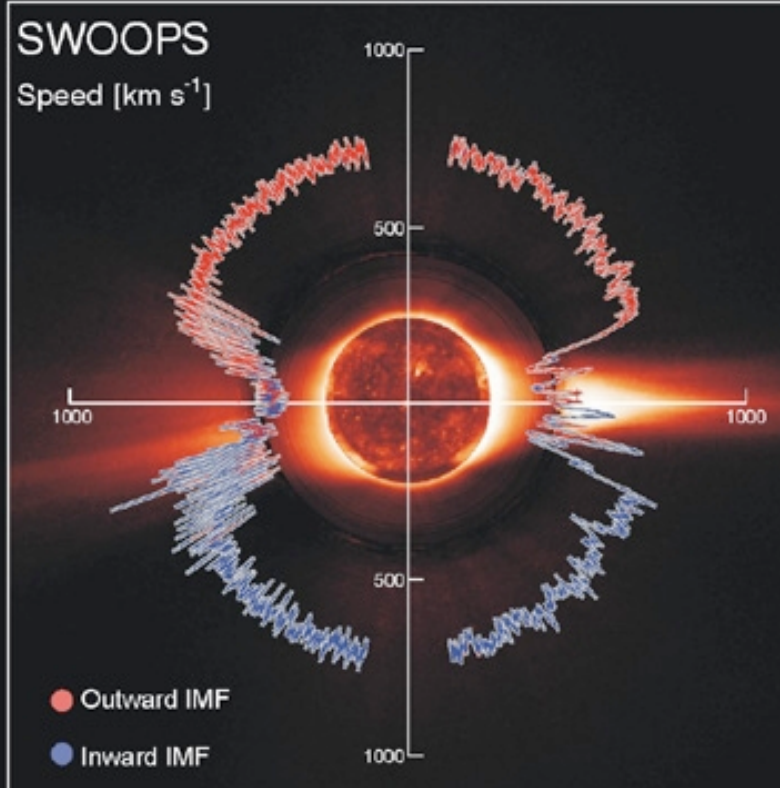
高速太陽風 來自太陽表面 的日冕洞區域



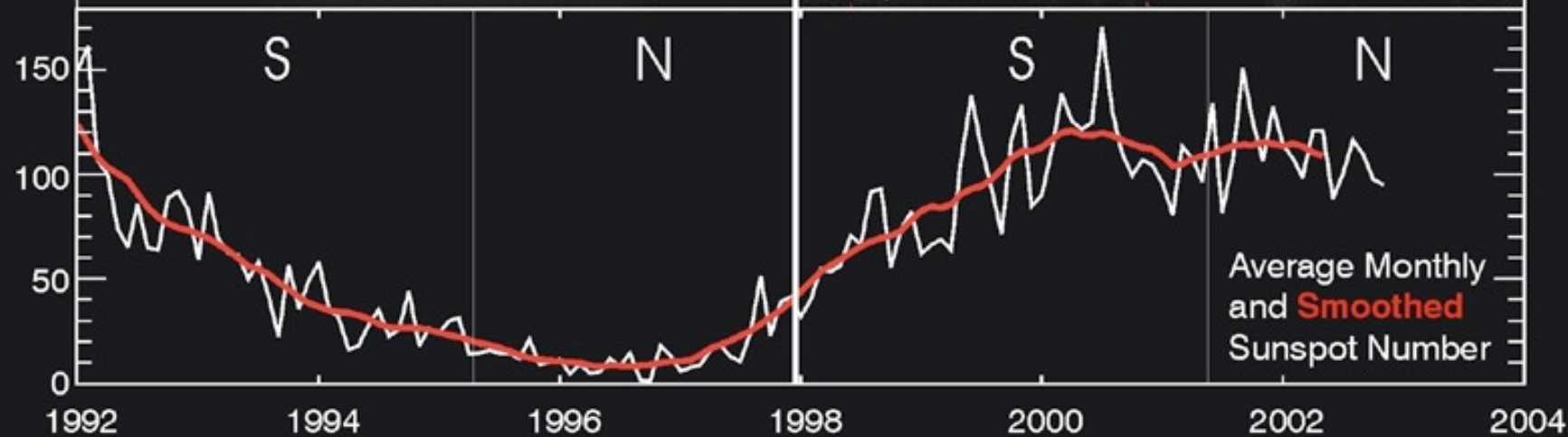
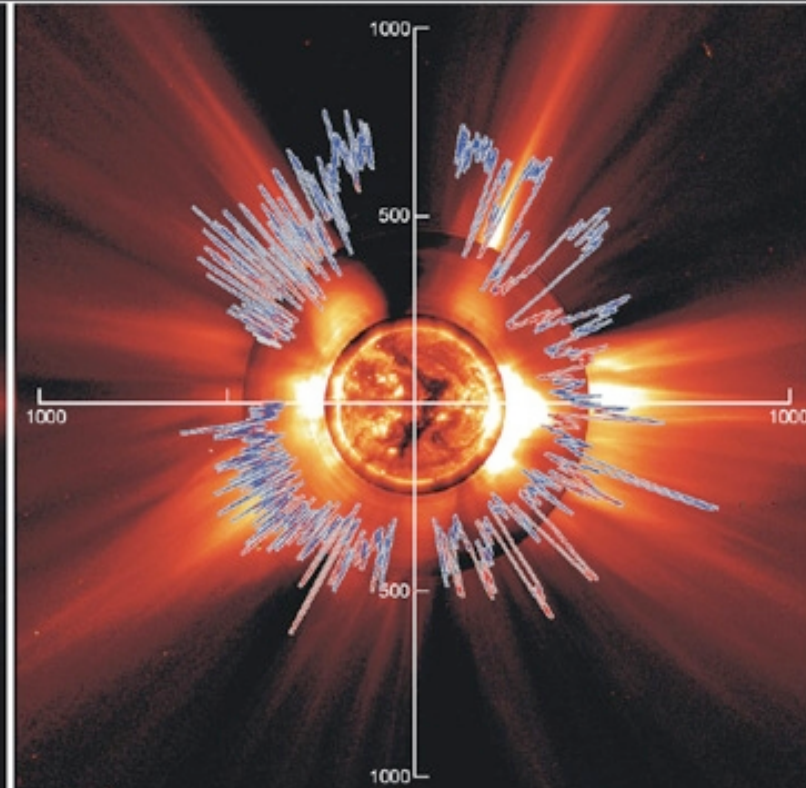
Ulysses First Orbit

SWOOPS

Speed [km s^{-1}]



Ulysses Second Orbit



太陽風是均勻的嗎？

高速太陽風的
leading edge
有高密度且高速的
shocked solar wind

高速太陽風（粗線）
密度低（細線）

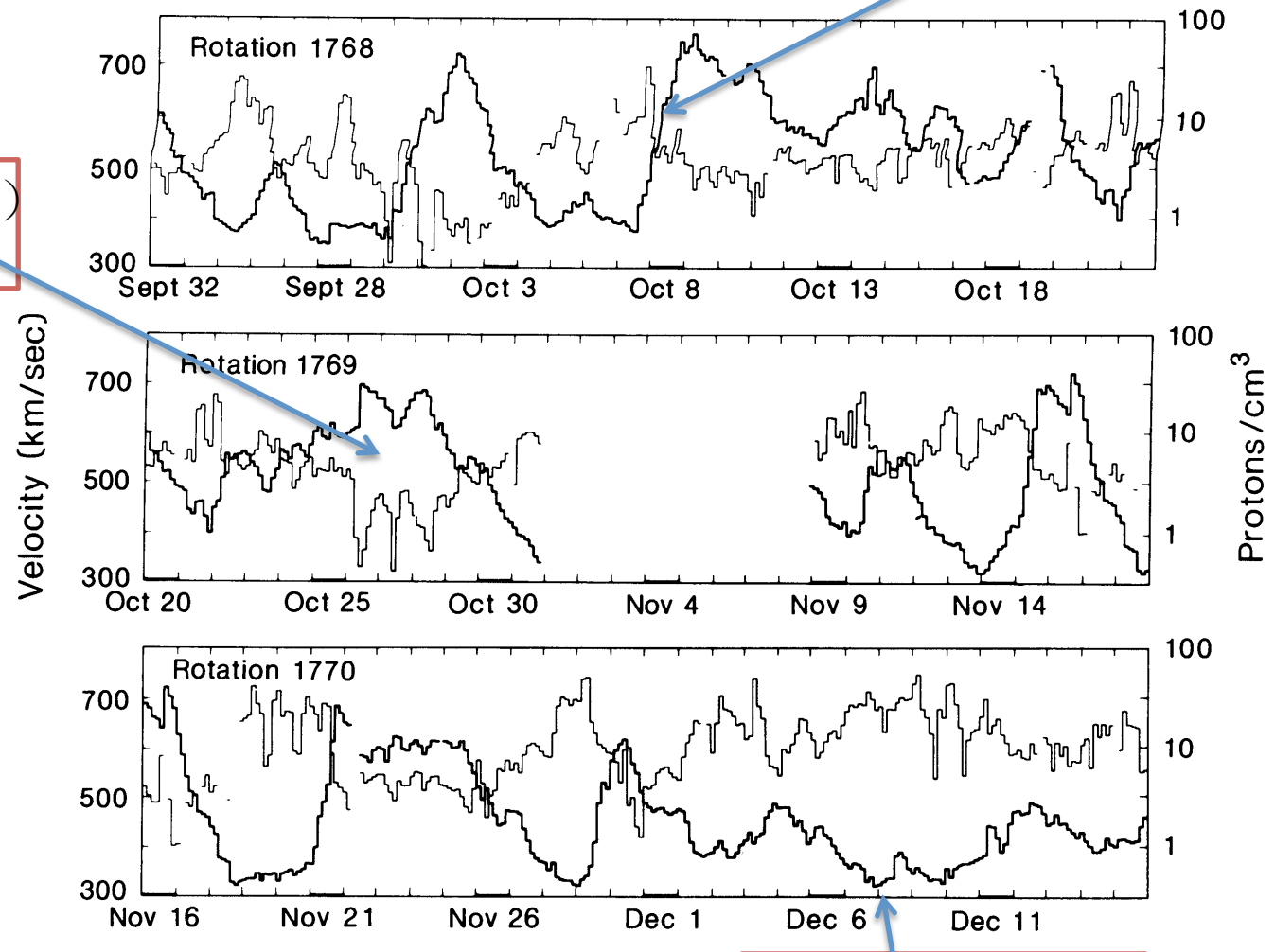
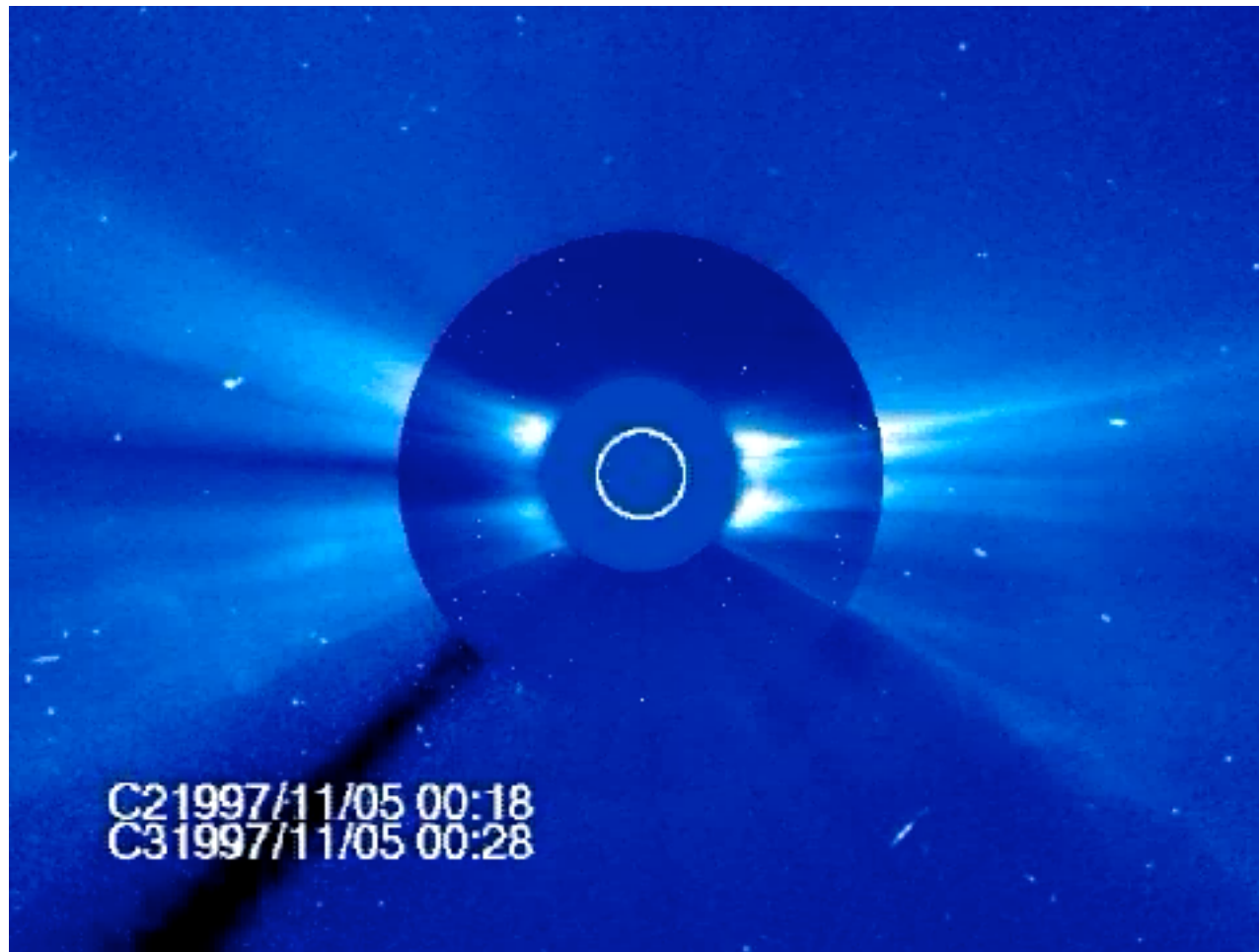


FIG. 4.12. Solar-wind speeds and densities observed with an instrument on the *Mariner 2* space probe in 1962. The display of these quantities as functions of time has been broken into three panels.

低速太陽風（粗線）
密度高（細線）

日冕物質噴發 coronal mass ejection
(CME) 也可產生高速且高密度的太陽風



太陽風（廣義日冕）的溫度

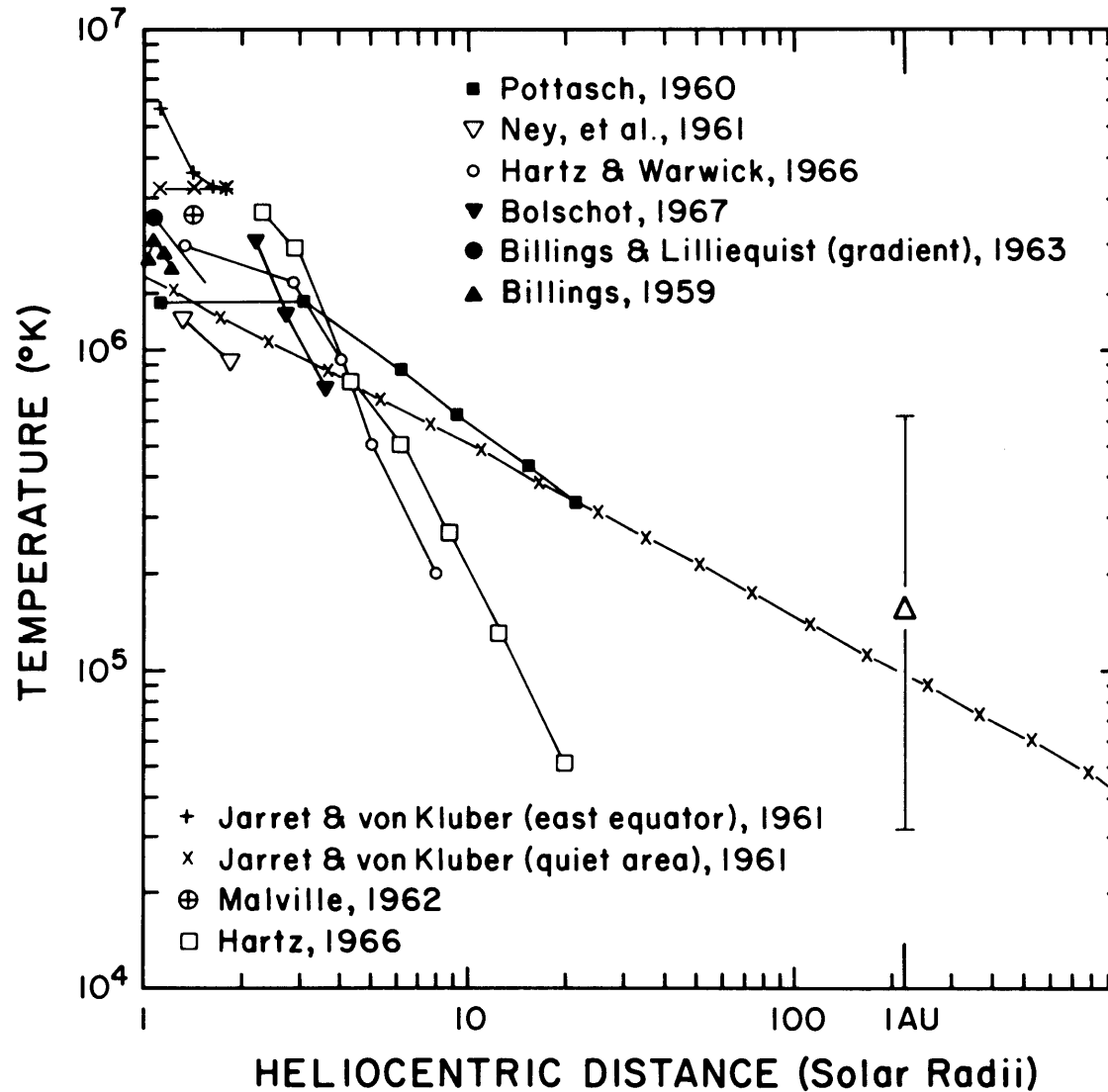
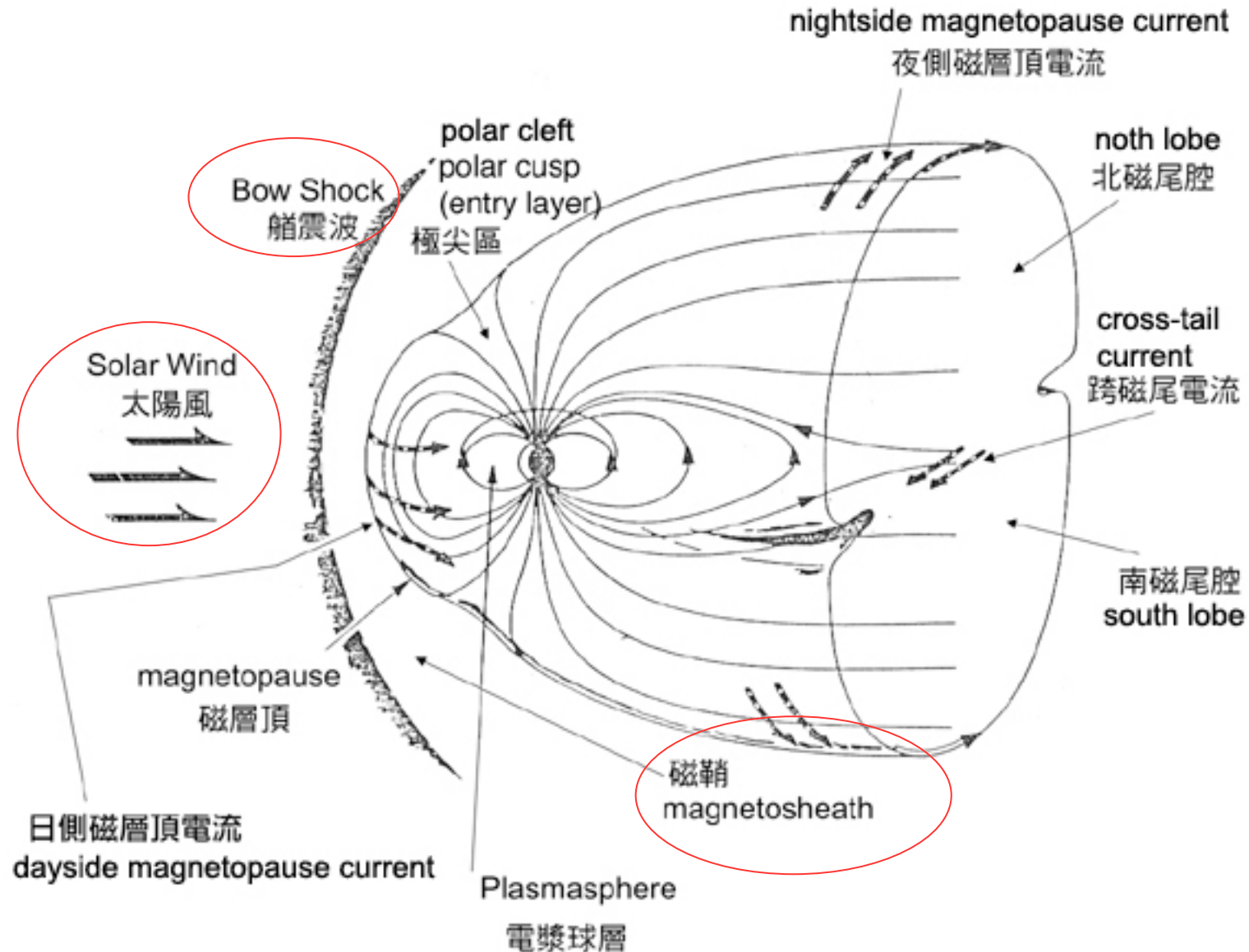


FIG. 4.1. Coronal temperature measurements at various heliocentric distances. (Adapted from Newkirk, 1967.)

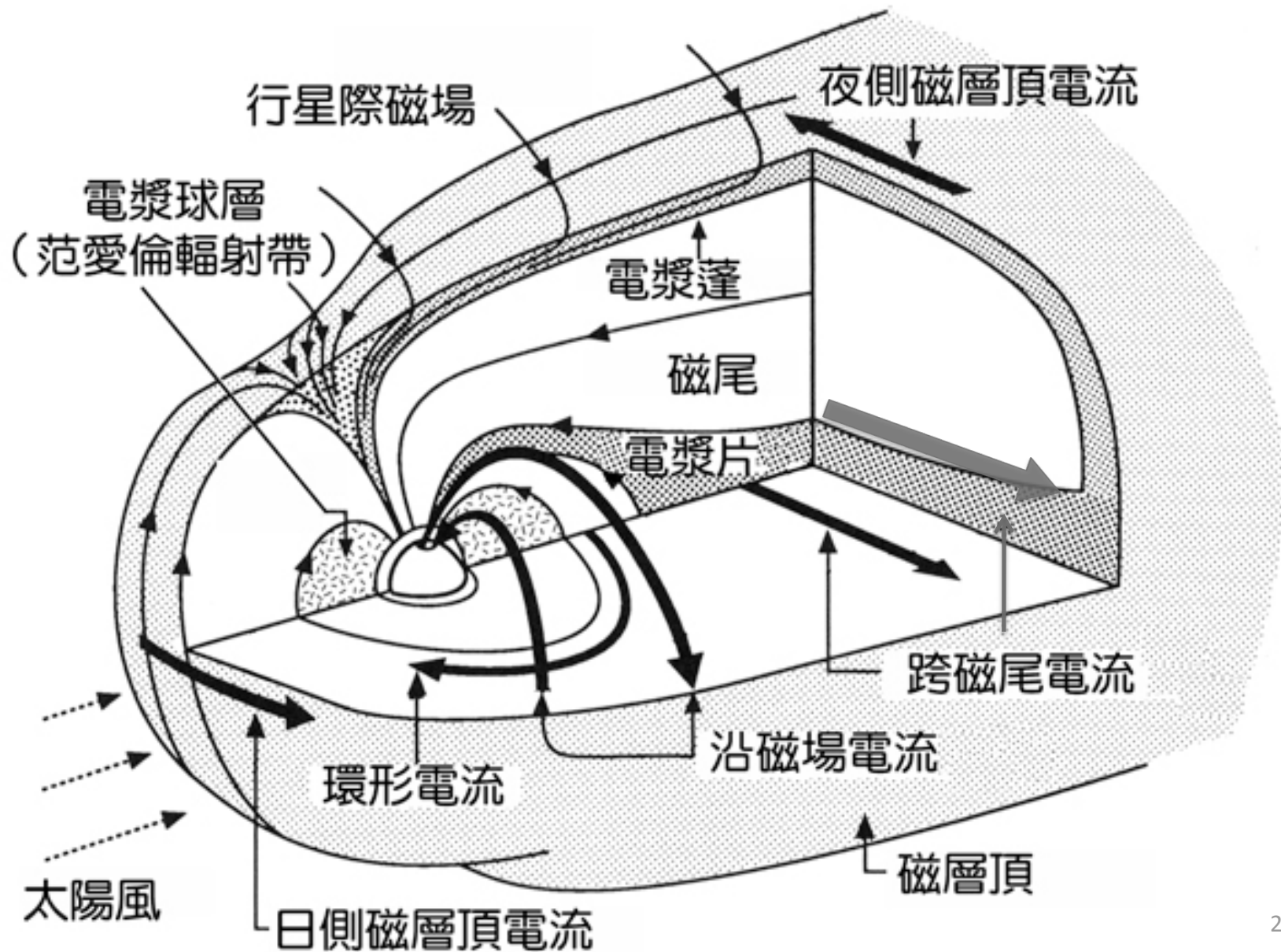
磁層的結構



Example of Bow shock



“電流”多位在“電漿密度梯度”比較大的區域

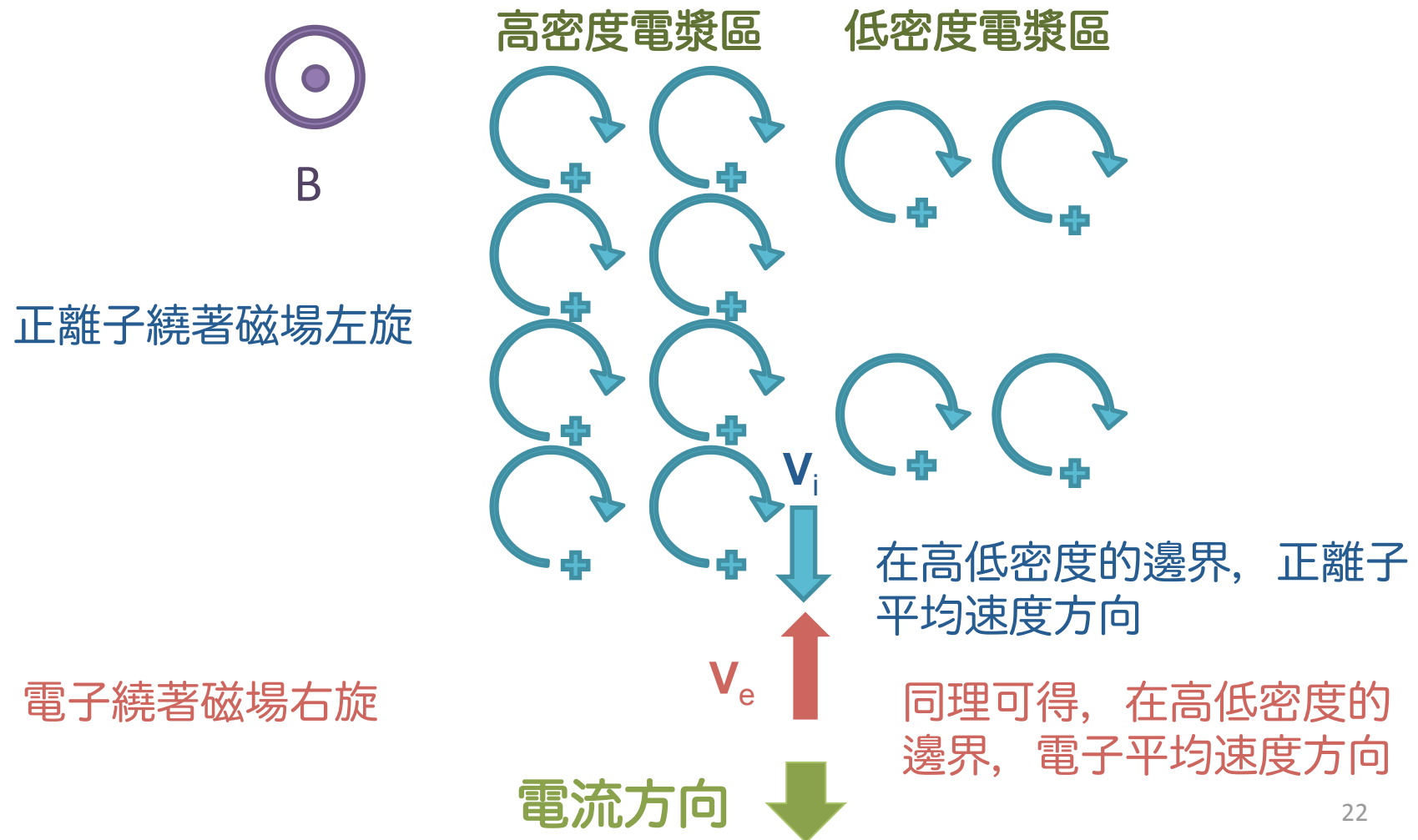


要了解平均磁層結構， 需要回答的兩(三)個問題

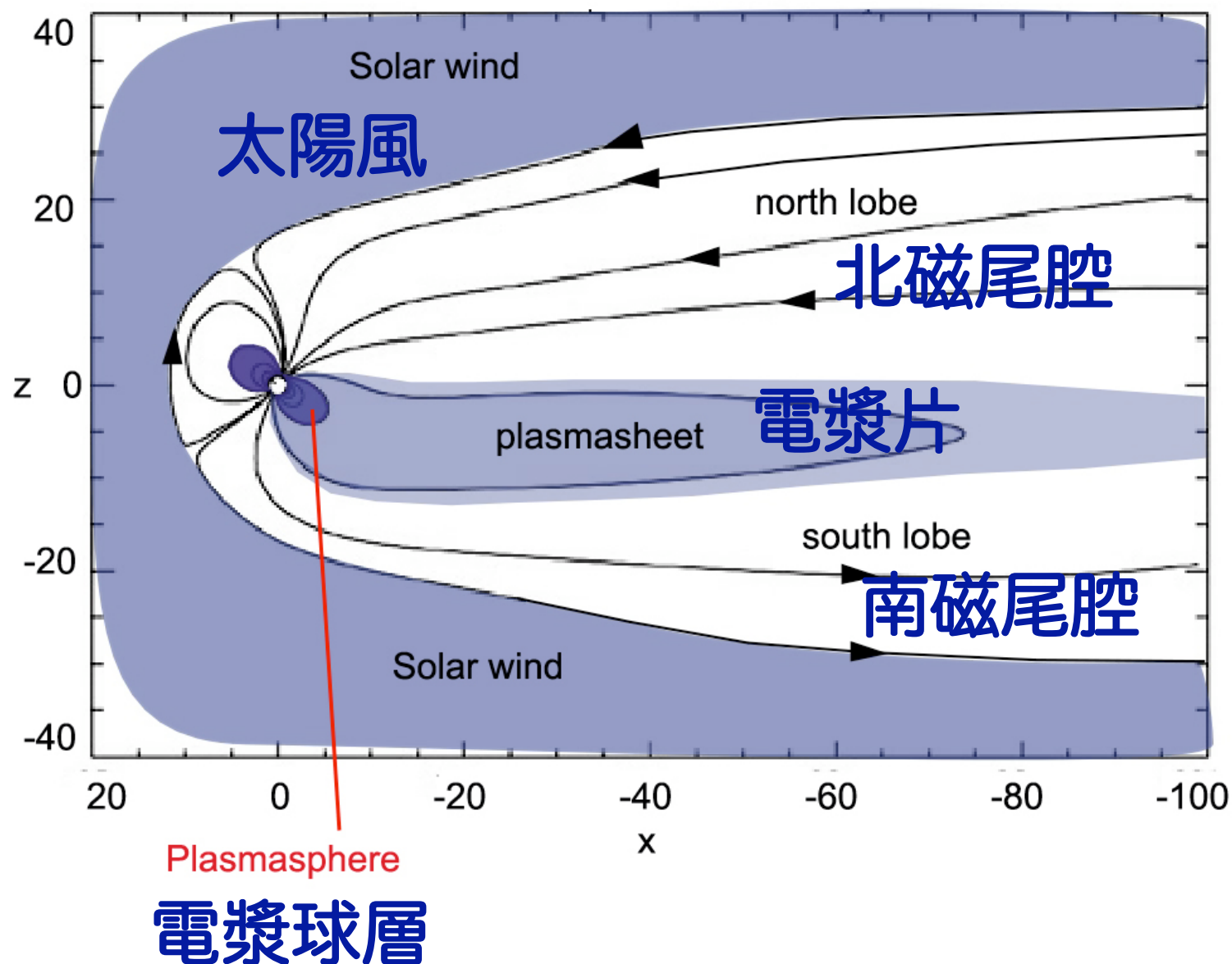
- 為什麼地球磁場會由簡單的磁偶極場“變形”成為像彗星一般拖著一條長尾巴，又有點像大烏賊的模樣？
 - 這個問題的答案是：磁層中的電流系統，造成了地球磁場結構的改變！
 - 由前述平均磁層特性的簡介，可以看出來，大多數的電流，都位在“電漿密度呈現梯度”的地方，所以我們要進一步問：
- 為什麼“電漿密度梯度”會造成“電流”？
- 為什麼會出現“電漿密度不均勻”的現象？

磁層中的電流系統

- “電漿密度梯度”會造成“逆磁電流”



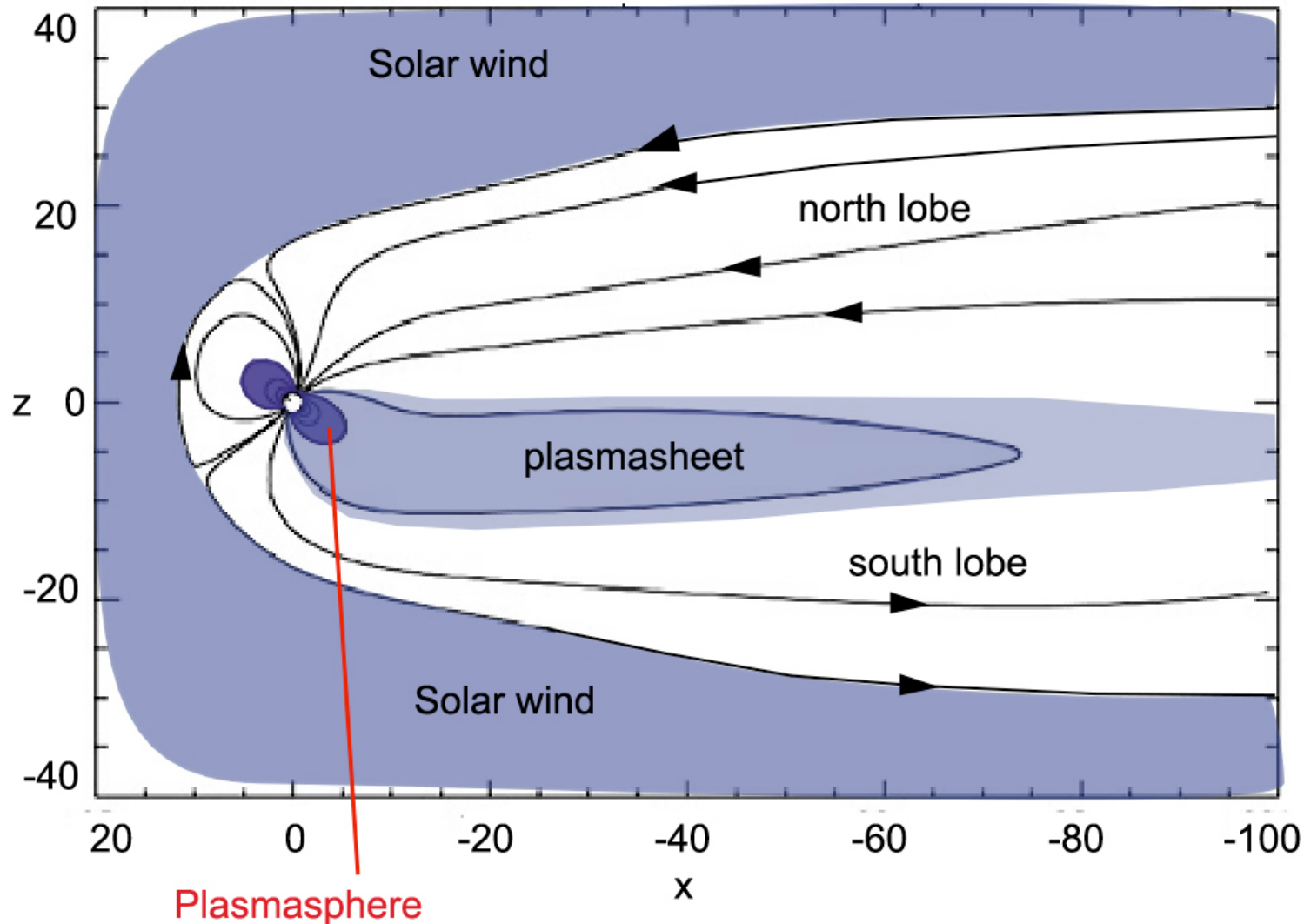
地球磁層子午剖面圖（圖中標有箭頭的線，是磁場線）
（圖中：顏色深淺表示電漿密度高低）



Diamagnetic Currents in the Magnetosphere

The plasma density is higher in the darker regions. (why?)

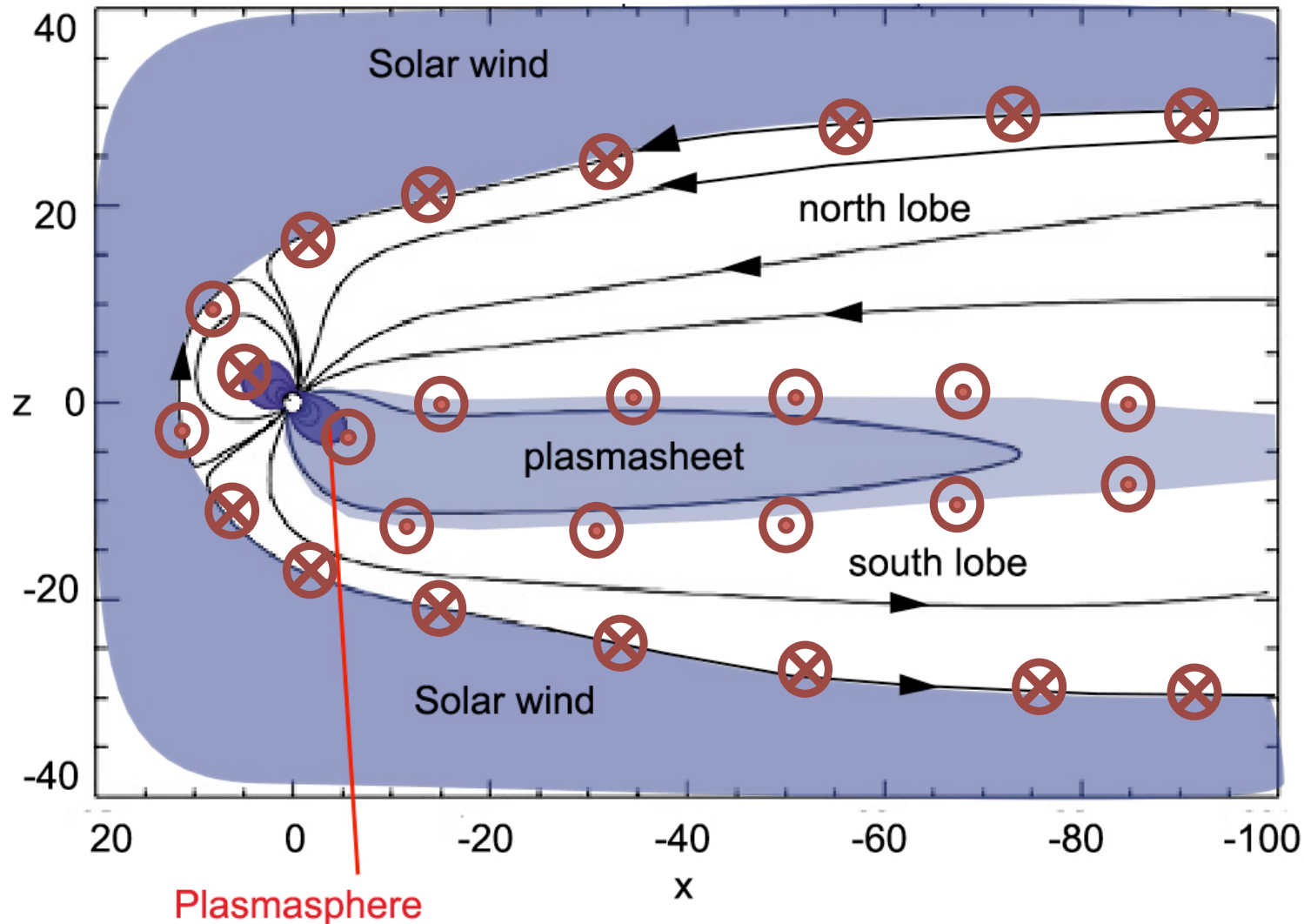
We can determine the locations and directions of the diamagnetic currents.



Diamagnetic Currents in the Magnetosphere

The plasma density is higher in the darker regions. (why?)

We can determine the locations and directions of the diamagnetic currents.



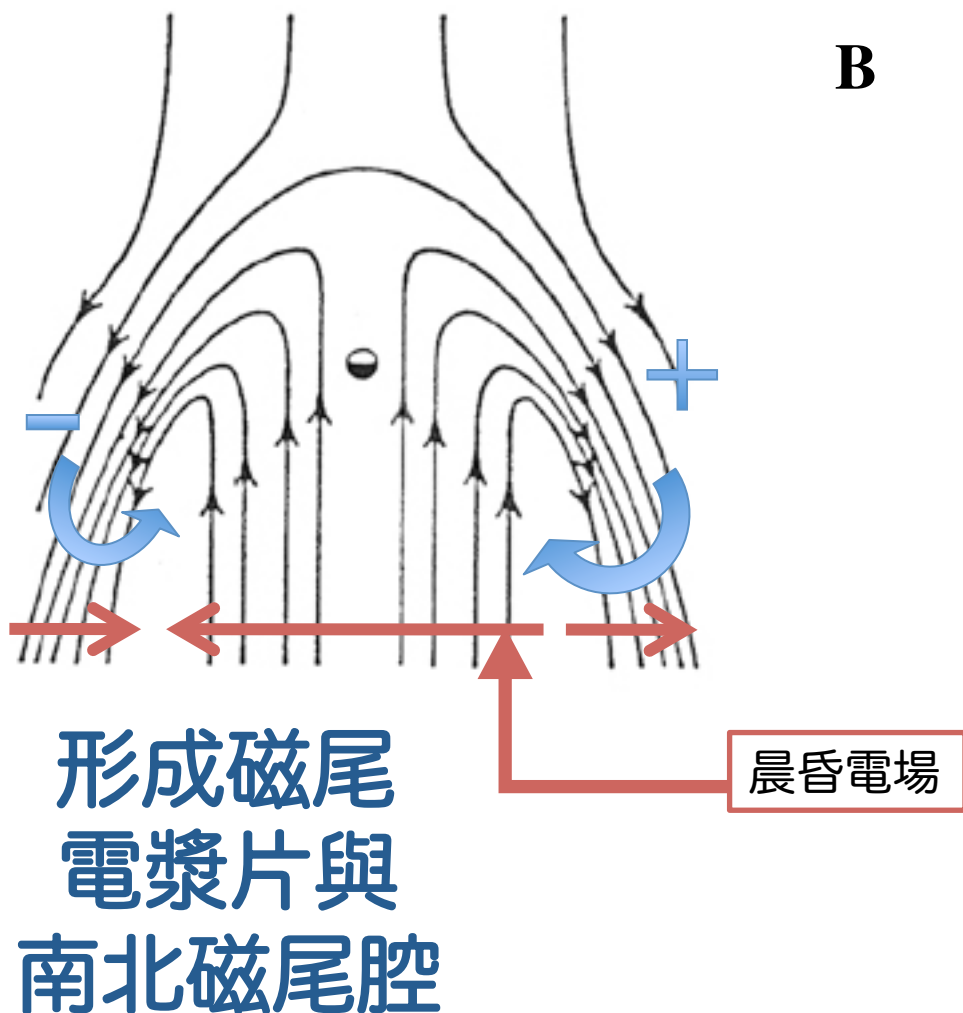
要了解平均磁層結構， 需要回答的兩(三)個問題

- 為什麼地球磁場會由簡單的磁偶極場“變形”成為像彗星一般拖著一條長尾巴的模樣？
 - 答案：磁層中的電流系統，改變了地球磁場的結構！
- 觀測顯示，磁層中大多數的電流，都位在“電漿密度梯度”比較大的地方
- 為什麼“電漿密度梯度”會造成“電流”？
- 為什麼磁層中會出現“電漿密度非常不均勻”的現象？

地球磁層赤道剖面圖（圖中標有箭頭的線，是流線）

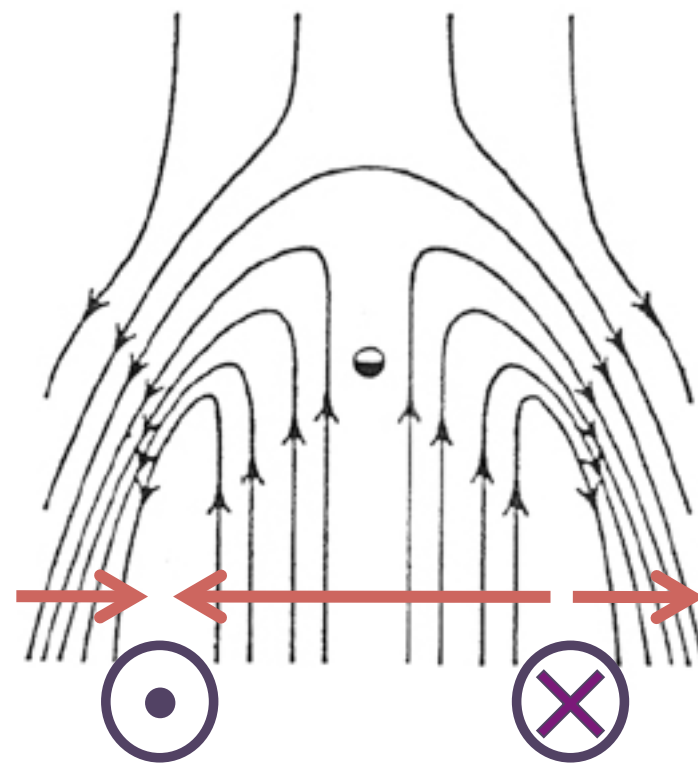
太陽風吹過地球磁層

如果地球不自轉……



B

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \mathbf{E}_{\perp} &= \nabla \cdot (-\mathbf{V} \times \mathbf{B}) \\ &= -\mathbf{B} \cdot (\nabla \times \mathbf{V}) + \mathbf{V} \cdot (\nabla \times \mathbf{B}) \\ &= -\mathbf{B} \cdot \boldsymbol{\Omega} + \mathbf{V} \cdot \mathbf{J} / \mu_0 \\ &\approx -\mathbf{B} \cdot \boldsymbol{\Omega}\end{aligned}$$



$\boldsymbol{\Omega}$

$$-\mathbf{B} \cdot \boldsymbol{\Omega} < 0$$

$$\nabla \cdot \mathbf{E}_{\perp} < 0$$

$$\boldsymbol{\Omega} = \nabla \times \mathbf{V}$$

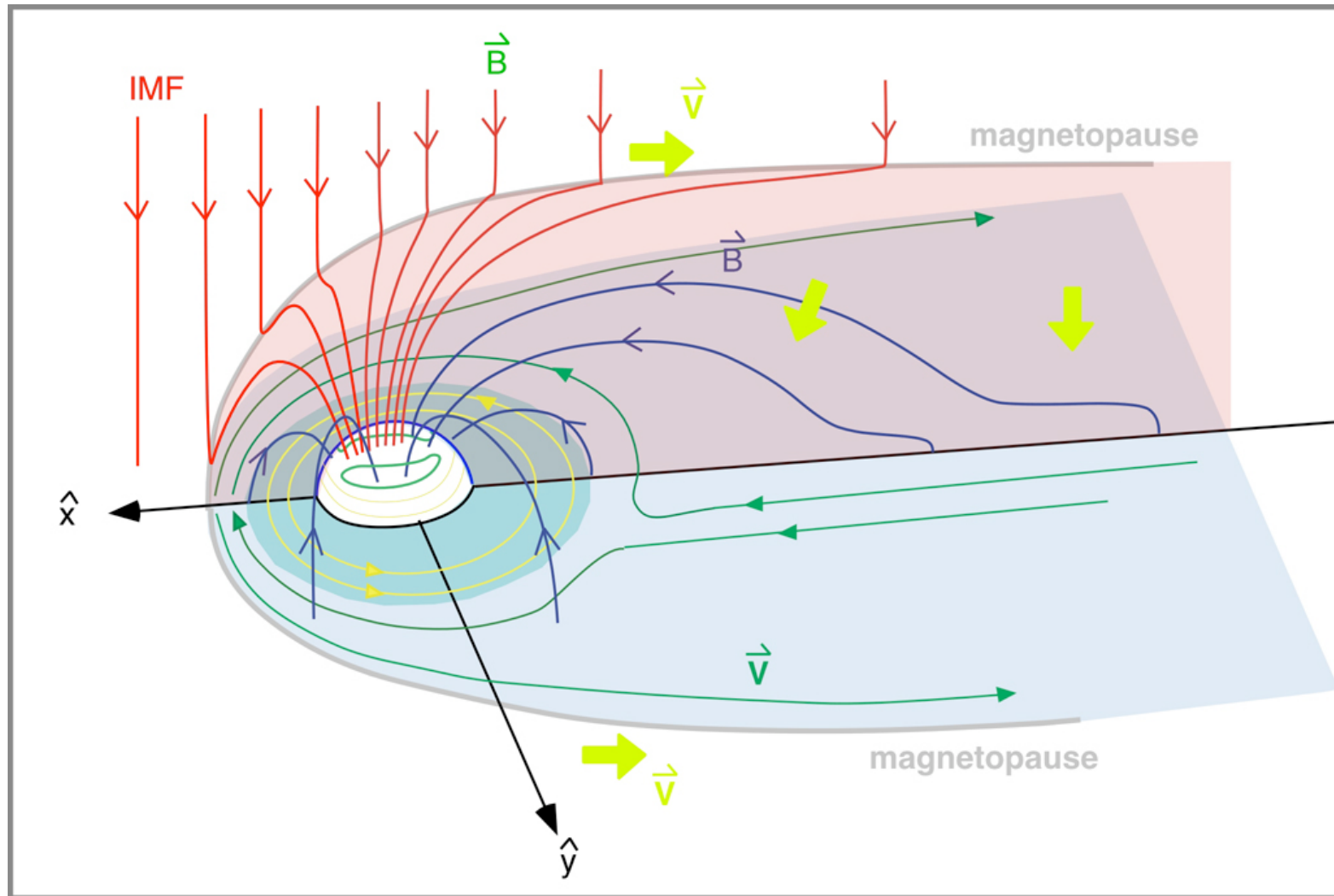
$$-\mathbf{B} \cdot \boldsymbol{\Omega} > 0$$

$$\nabla \cdot \mathbf{E}_{\perp} > 0$$

大多數電漿會沿著 $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ 的方向飄移

晨昏電場使得南北磁尾腔的電漿向“電漿片”集中

- 太陽風吹過地球磁層頂，或南向行星際磁場，在日側磁層頂與地球磁場聯結時所產生的感應電動勢，都可造成晨昏方向的電場

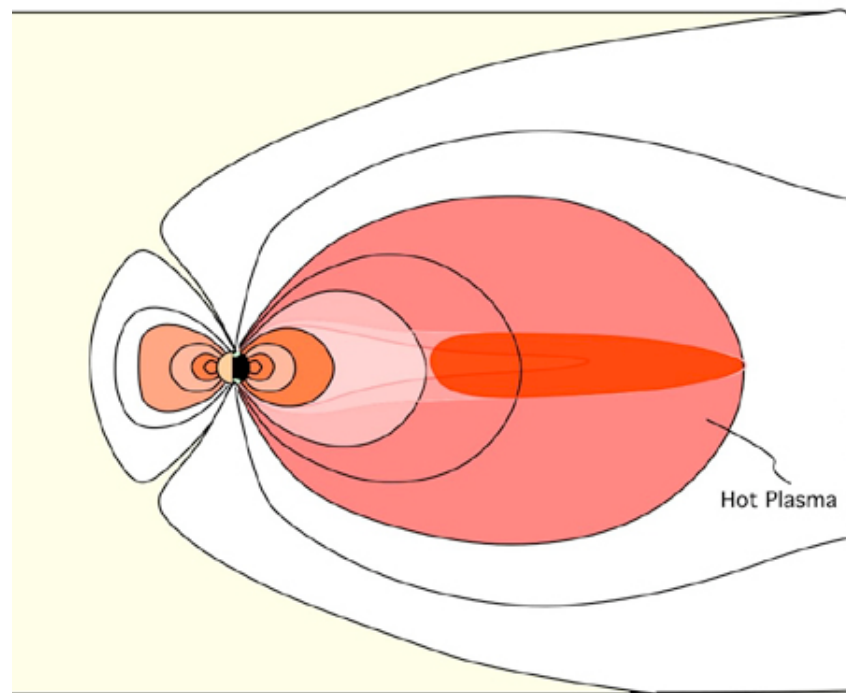
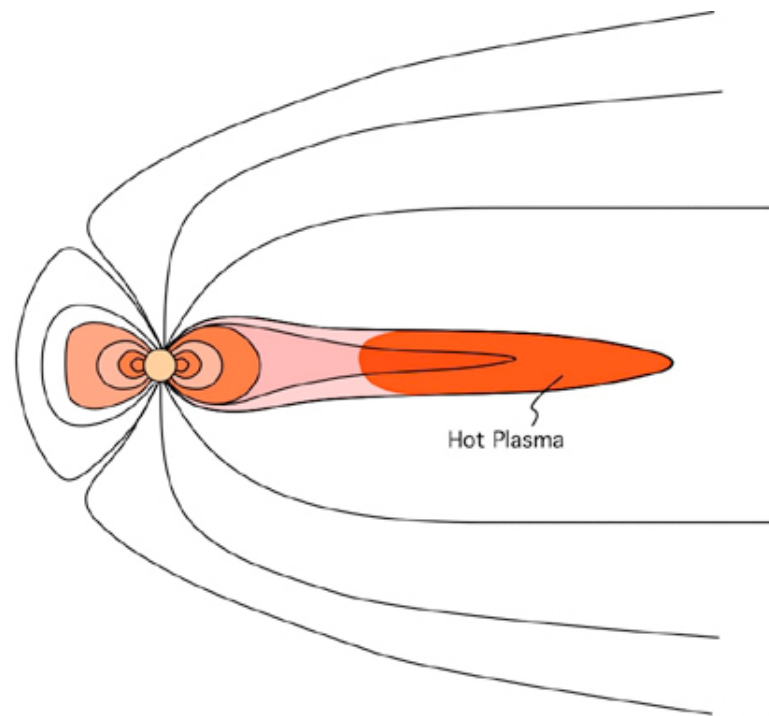


外磁層中密度不均勻分布的成因

- 太陽風吹過地球磁層頂：造成晨昏電場
- 外磁層中的電漿（大多數來自電離層，少數來自太陽）沿著 $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ 的方向飄移($\mathbf{E}$ cross $\mathbf{B}$ drift)，於是：
 - 南北磁尾腔的電漿，向電漿片(plasma sheet)集中，造成低密度的磁尾腔，高密度的電漿片。
 - 太陽風的電漿，也會由磁尾後方，灌入電漿片。
 - 如果磁張力不及壓力梯度力，電漿片會被越拉越長。

造成極光橢圓圈 auroral oval 分布的原因

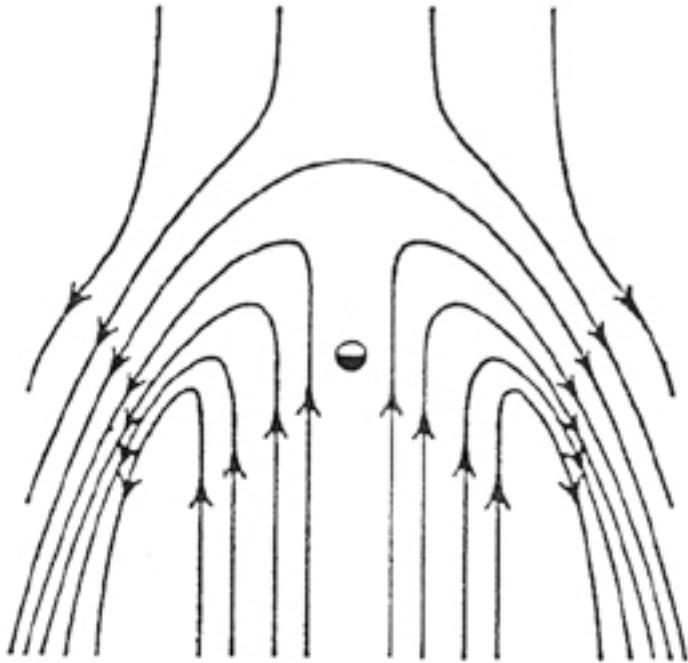
磁層副暴發生時，紫外光的影像



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

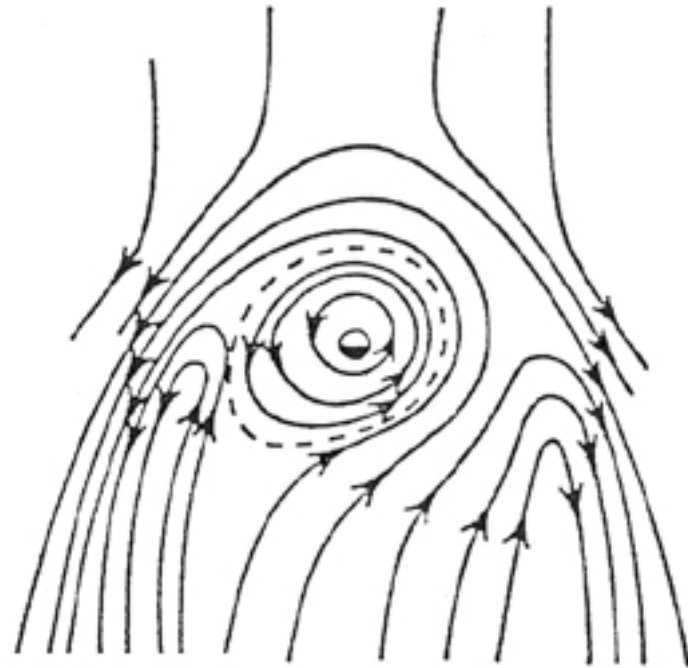
如果地球不自轉……



形成磁尾
電漿片與
南北磁尾腔

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

Flux Transfer Events (FTE)

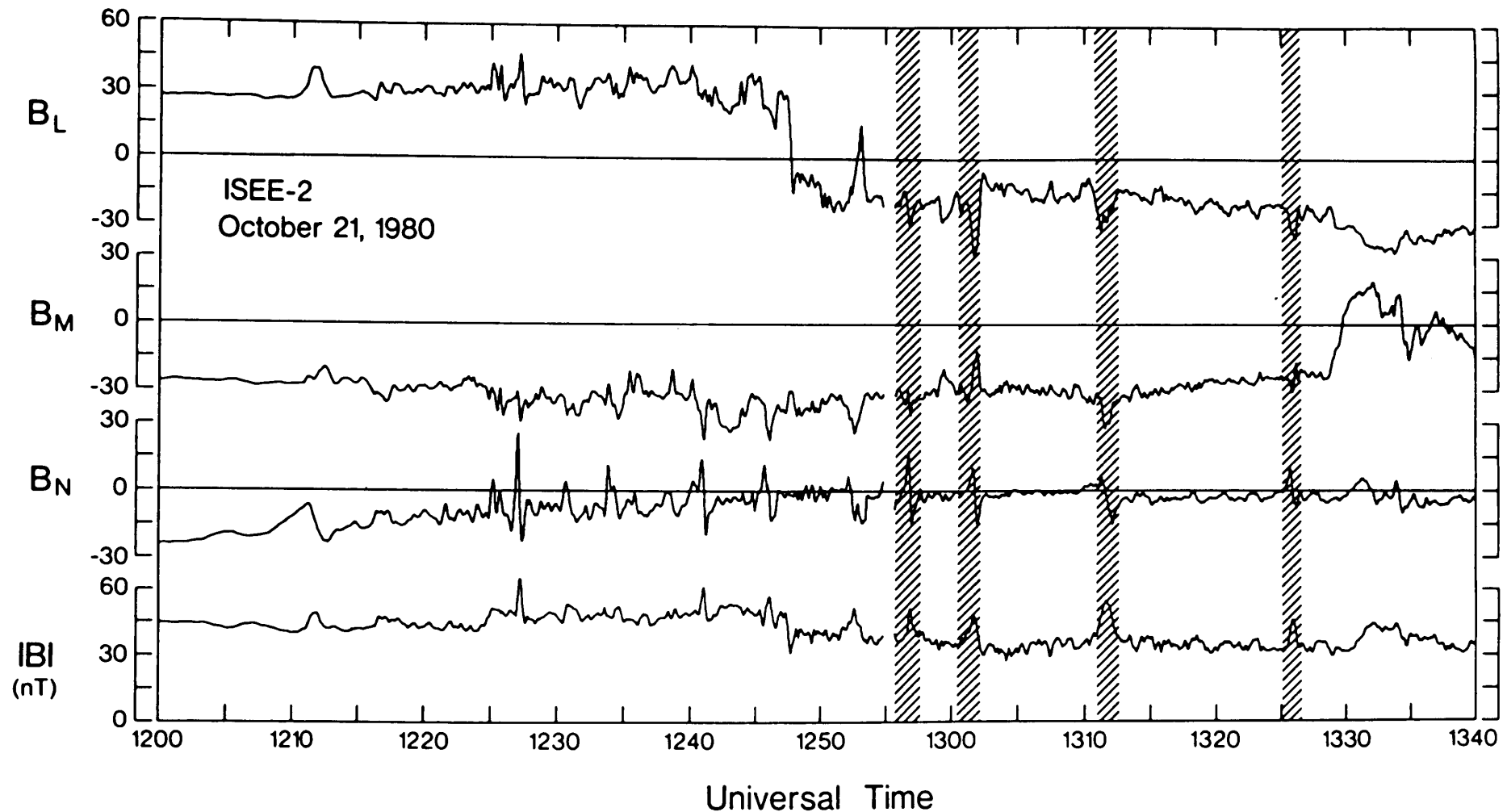


FIG. 9.26. Magnetometer data from *ISEE 2* during an outward magnetopause crossing on 21 October 1980, showing a series of FTEs. The data are in boundary-normal coordinates. *ISEE-2* crossed the magnetopause at 1247 UT, marked by the sign change in B_L . At least seven FTEs, each marked by a positive and then negative excursion in B_N , occurred. The four observed in the magnetosheath are marked by cross-hatching. (Adapted from Elphic, 1990.)