

# Astrofísica del Sistema Solar

## Magnetósferas y la interacción con el viento solar

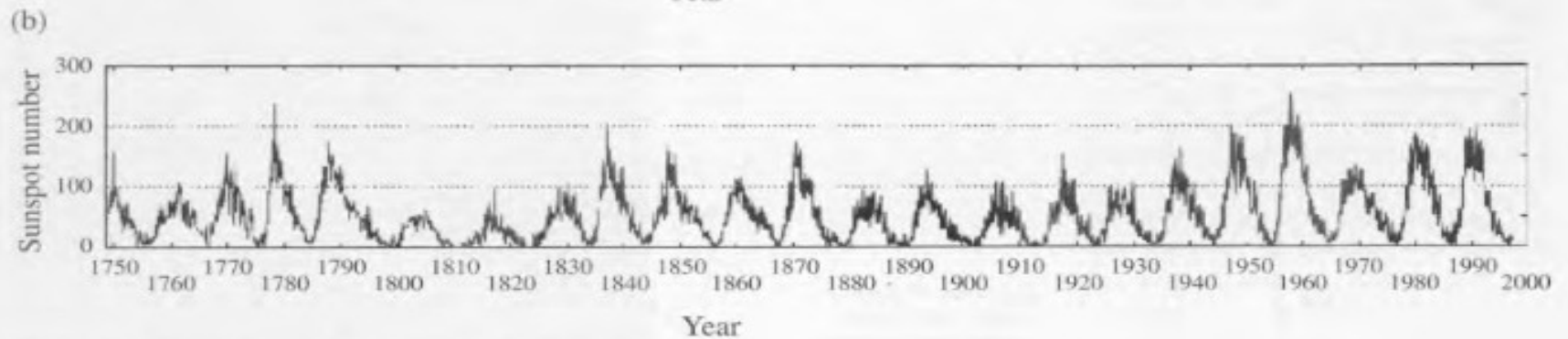
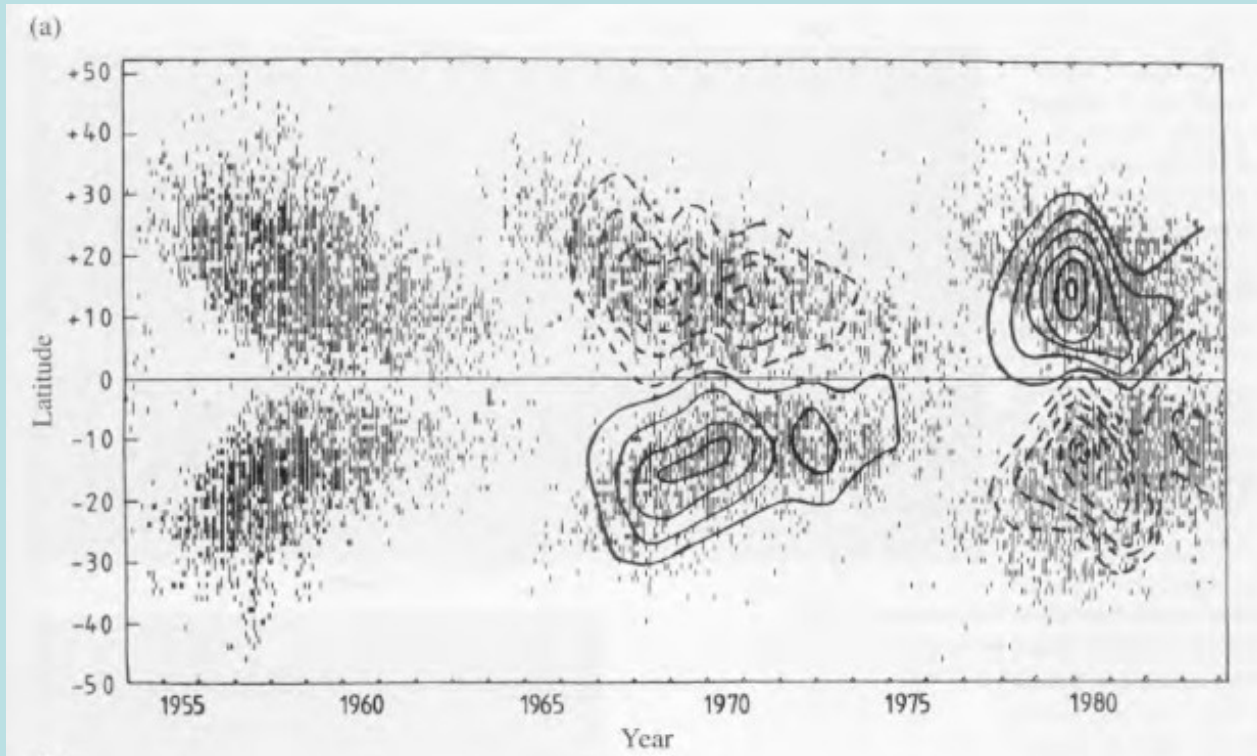
## Viento solar:

- cerca de la superficie solar (en la cromósfera) aparecen **prominencias** que son arcos de material que unen dos **manchas solares** de diferente polaridad.
- las manchas aparecen negras debido a que su temperatura ( $\sim 4000\text{K}$ ) es menor que la fotosférica ( $\sim 5750\text{K}$ ).
- el número de manchas varía en ciclos de 11 años, lapso en el cual también cambia el campo magnético solar.

# Viento solar:

- en ciertas regiones las líneas del **campo magnético solar** se abren al espacio interplanetario y por allí escapan partículas cargadas que forman el **viento solar**.
- el viento solar esta formado principalmente por protones y electrones, con una pequeña proporción de elementos más pesados, iones, etc.

# Viento solar:



# Viento solar:

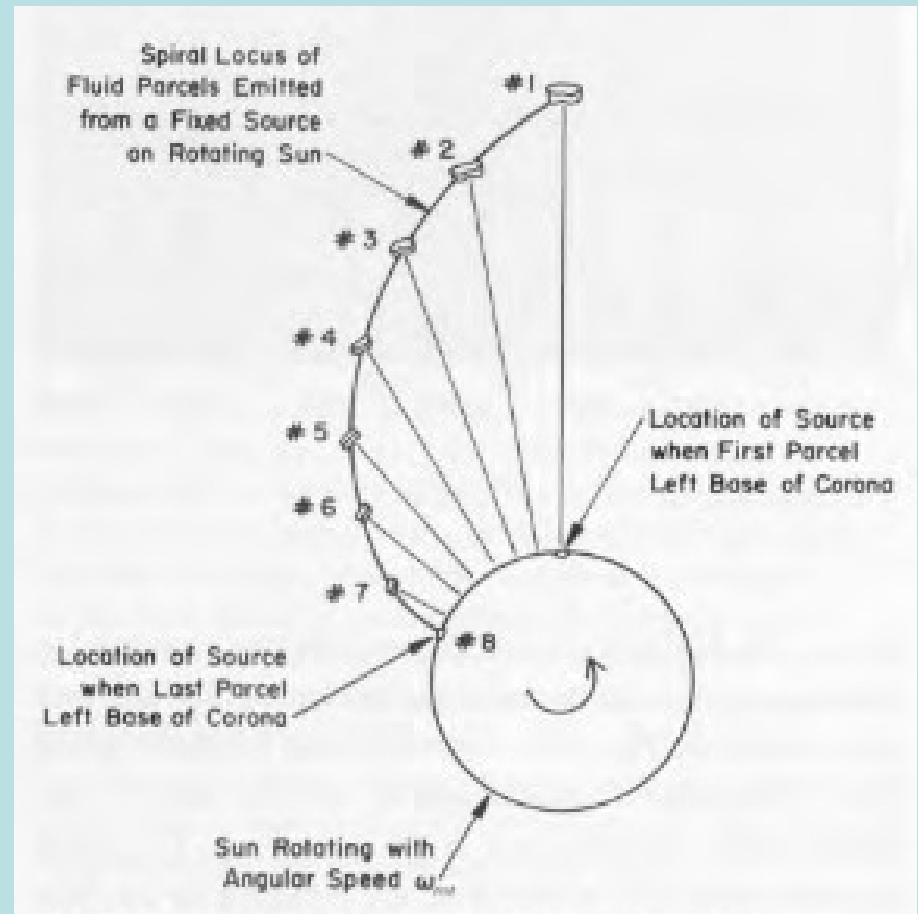
TABLE 7.1 Solar Wind Parameters at Earth's Orbit.

	Quiet solar wind	Fast solar wind	Magnetosheath
Density (protons $\text{cm}^{-3}$ )	5–8	8–12	8–18
Velocity ( $\text{km s}^{-1}$ )	300–500	500–900	100
Electron temp. (K)	$10^5$	$10^5$	$10^6$
Magnetic field ( $\gamma$ )	3–10	8–16	8–20

# Viento solar:

El viento solar se mueve radialmente hacia afuera alejándose del Sol.

El **campo magnético** del viento solar toma una forma aproximada por una **espiral de Arquímedes**.



## Viento solar:

Las **componentes radial y acimutal** del campo cerca de la Tierra son aproximadamente de igual magnitud (3 nT a 1 UA; Landgraf 2000).

$$B_r = \pm B_{r,0} \left( \frac{r_0}{r} \right)^2$$

$$B_\phi = \pm B_{\phi,0} \frac{r_0}{r} \cos(\beta_{hg})$$

$$B_\theta = 0$$

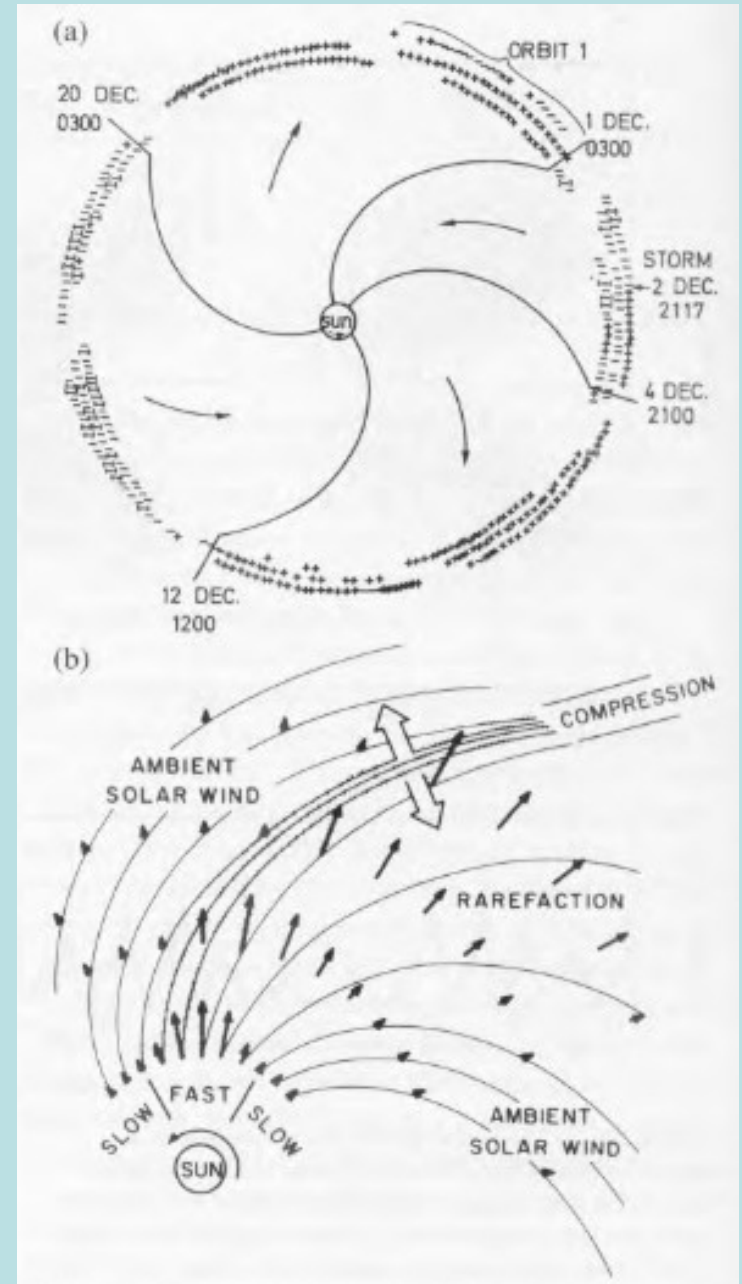
## Viento solar:

- Debido a que el flujo magnético total que atraviesa una superficie cerrada alrededor del Sol debe ser cero, existen flujos magnéticos **ingresando o escapando del sol** que se encuentran balanceados.
- El cambio de dirección abrupto del campo magnético produce **los fenómenos de desconexión en las colas de iones de los cometas.**



# Viento solar:

La variación en velocidad del viento solar produce fenómenos de **compresión y rarefacción del campo.**



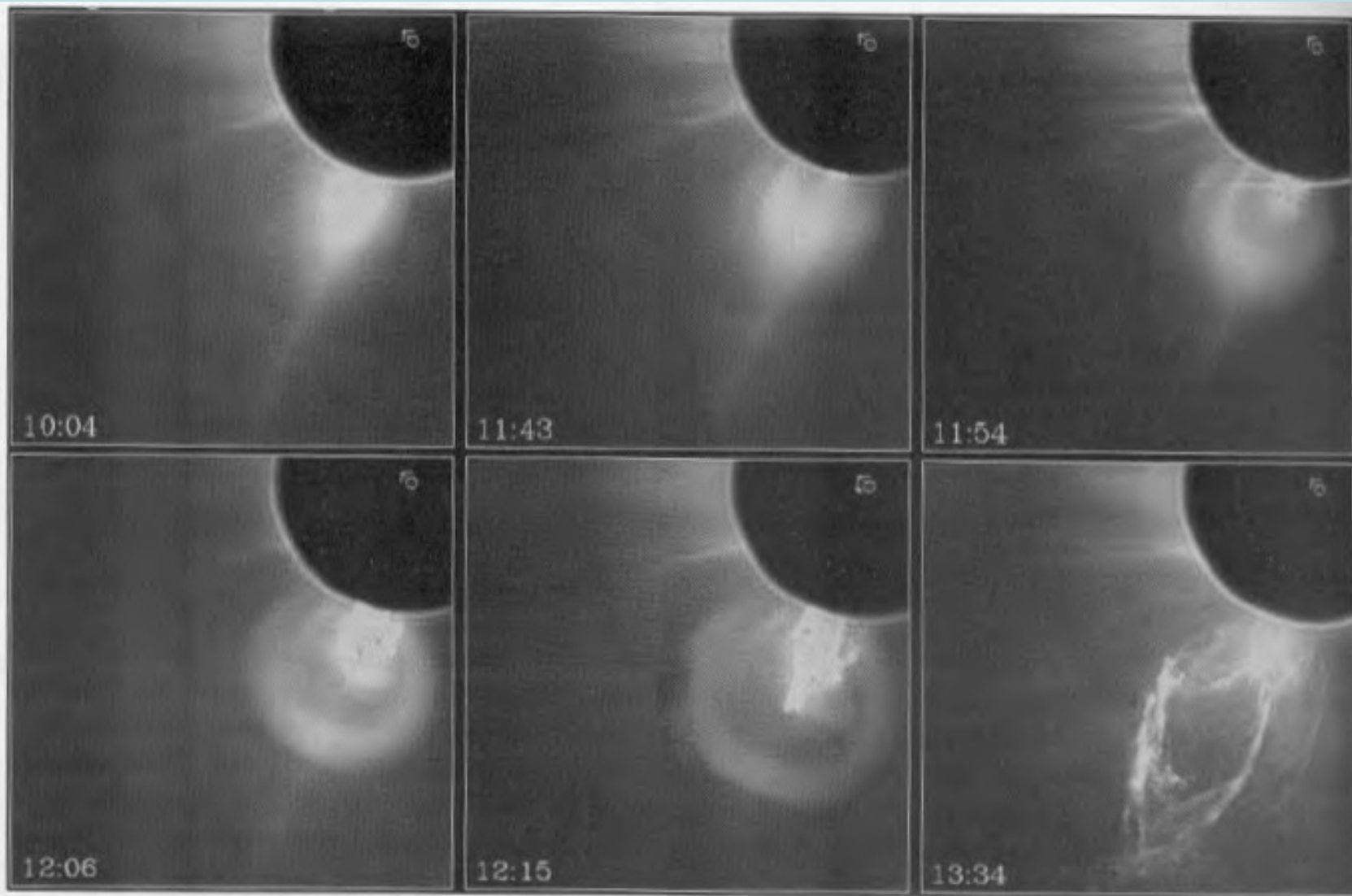
# Viento solar:

- Cuando una prominencia hace erupción e introduce grandes cantidades de masa en el medio interplanetario se habla de una **eyección de masa coronal**.
- Las velocidades de las eyecciones de masa coronal son altas (800 a 2500 km/s) y producen **shocks y compresiones en el viento solar**.
- Un shock es la **mayor fuente de partículas energéticas** en el sistema solar, mientras que una compresión **perturba las magnetósferas planetarias**.

# Viento solar:

- La respuesta del ambiente cercano a un cuerpo del sistema solar al medio interplanetario se denomina **clima espacial**.
- El clima espacial es de especial importancia por sus efectos sobre **la superficie de ciertos cuerpos** y sus efectos en **equipos electrónicos**.

## Eyección de masa coronal ( $v \sim 2000$ km/s)



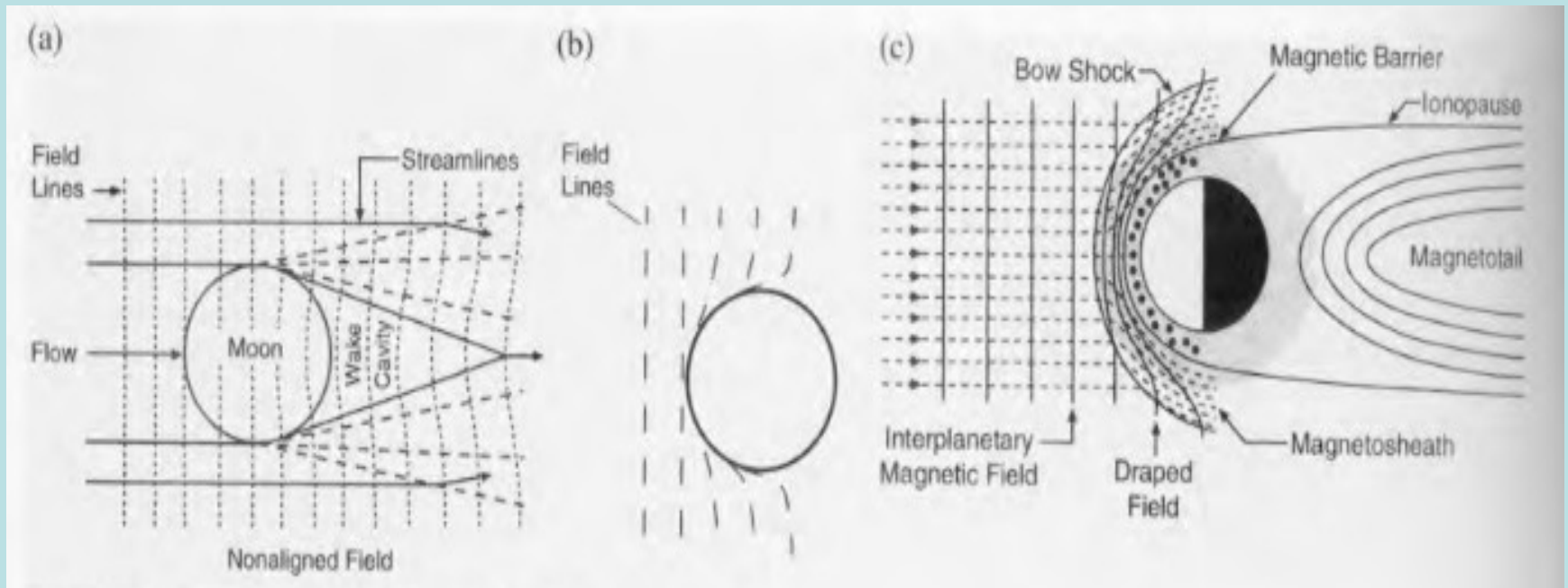
# Interacción con el viento solar:

- Todos los cuerpos del sistema solar interactúan con el viento solar de alguna manera.
- En los cuerpos **sin un campo magnético** la interacción dependerá de su **conductividad**.
- En el caso de la Luna y los asteroides que son **rocosos y conductores pobres**, las partículas golpean el cuerpo y son **absorvidas** mientras que las líneas magnéticas se **difunden a través del objeto**.

# Interacción con el viento solar:

- Si el cuerpo es algo conductor, su movimiento a través del campo magnético interplanetario generará una **corriente eléctrica** y las líneas de campo se **curvarán debido al flujo del viento** alrededor del objeto.
- Si el objeto tiene una **ionósfera** (buen conductor) se generan corrientes que **impiden** que el campo interestelar se difunda a través del objeto.

# Interacción con el viento solar:



## Interacción con el viento solar:

- En el caso de los objetos con **campos magnéticos internos**, se produce una **interacción** entre ambos.
- El campo magnético del objeto queda confinado a una cavidad que se denomina **magnetósfera**. Su forma dependerá de la intensidad del campo magnético planetario y del flujo del viento solar.



# Interacción con el viento solar:

- El límite de la magnetósfera se denomina **magnetopausa** cuya posición está determinada por la equiparación de presiones:

$$P_{sw} = P_m$$

$$P_{sw} \approx \rho v^2$$
$$P_m = \frac{B^2}{8\pi} + P_g$$

# Interacción con el viento solar:

- La cola magnética esta formada por dos lóbulos de polaridad diferente separados por una región neutra.
- Como el viento solar viaja más rápido que las ondas en este medio, se produce un shock en arco por delante de la magnetósfera a partir del cual el viento solar pierde velocidad.

# Magnetósferas planetarias:

TABLE 7.2 Characteristics of Planetary Magnetic Fields.

	Mercury	Earth	Jupiter	Saturn	Uranus	Neptune
Magnetic moment ( $\mathcal{M}_{\oplus}$ )	$4 \times 10^{-4}$	1 <sup>a</sup>	20 000	600	50	25
Surface $B$ at dipole equator (gauss)	0.0033	0.31	4.28	0.22	0.23	0.14
Maximum/minimum <sup>b</sup>	2	2.8	4.5	4.6	12	9
Dipole tilt and sense <sup>c</sup>	+14°	+10.8°	-9.6°	0.0°	-59°	-47°
Dipole offset ( $R_p$ )		0.08	0.12	~0.04	0.3	0.55
Obliquity	0°	23.5°	3.1°	26.7°	97.9°	29.6°
Solar wind angle <sup>d</sup>	90°	67–114°	87–93°	64–114°	8–172°	60–120°
Magnetopause distance <sup>e</sup> ( $R_p$ )	1.5	10	42	19	25	24
Observed size of magnetosphere ( $R_p$ )	1.4	8–12	50–100	16–22	18	23–26

# Magnetósferas planetarias:

TABLE 7.3 Plasma Characteristics of Planetary Magnetospheres.

	Mercury	Earth	Jupiter	Saturn	Uranus	Neptune
Maximum density ( $\text{cm}^{-3}$ )	1	1000–4000	>3000	~100	3	2
Composition	$\text{H}^+$	$\text{O}^+$ , $\text{H}^+$ , $\text{N}^+$ , $\text{He}^+$	$\text{O}^{n+}$ , $\text{S}^{n+}$ , $\text{SO}_2^+$ , $\text{Cl}^+$	$\text{O}^+$ , $\text{H}_2\text{O}^+$ , $\text{H}^+$	$\text{H}^+$	$\text{N}^+$ , $\text{H}^+$
Dominant source	solar wind	ionosphere <sup>a</sup>	Io	rings, satellites	atmosphere	Triton
Production rate (ions $\text{s}^{-1}$ )	?	$2 \times 10^{26}$	$>10^{28}$	$10^{26}$	$10^{25}$	$10^{25}$
Ion lifetime	minutes	days <sup>a</sup> , hours <sup>b</sup>	10–100 days	1 month	1–30 days	1 day
Plasma motion controlled by:	solar wind	rotation <sup>a</sup> solar wind <sup>b</sup>	rotation	rotation	solar wind + rotation	rotation (+ solar wind?)

# Magnetósferas planetarias:

En una magnetósfera las partículas cargadas no relativistas se mueven debido a fuerzas externas y a la fuerza de Lorentz:

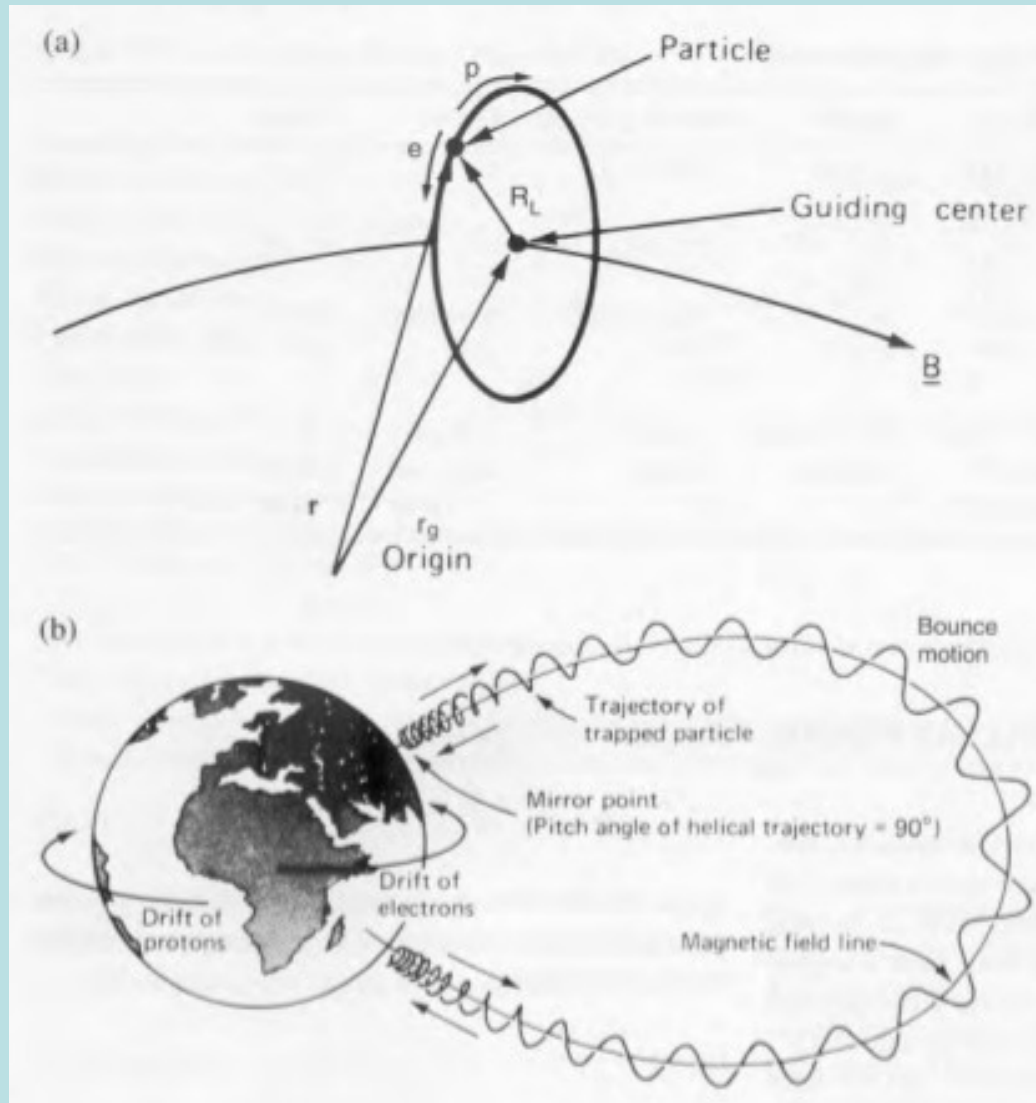
$$m \frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} = \mathbf{F} + \frac{q \mathbf{v} \times \mathbf{B}}{c}$$

El campo de una magnetósfera planetaria **decrece** a medida que se incrementa la distancia. Esto induce una fuerza:

$$\mathbf{F}_i = -\mu_b \nabla B$$

$$\mathbf{v}_B = \frac{\mu_b c \mathbf{B} \times \nabla B}{q B^2}$$

# Magnetósferas planetarias:



## Interacción con un asteroide:

Las superficies no conductoras que son iluminadas obtienen un potencial de equilibrio debido a la ganancia y pérdida de electrones por el viento solar y el efecto fotoeléctrico.

$$I_{\text{sw}} = n_{\text{sw}} \sqrt{\frac{k_B T_{\text{sw}}}{2\pi m_e}} \left( 1 + \frac{q_e \phi_s}{k_B T_{\text{sw}}} \right), \quad n_{\text{sw}} = \frac{5.0}{d_{\text{sol}}^2},$$
$$I_{\text{ph}} = I_{\text{ph0}} \exp\left(\frac{-q_e \phi_s}{k_B T_{\text{pe}}}\right) \sin \theta_{\text{alt}}, \quad I_{\text{ph0}} = \frac{2.8 \times 10^9}{d_{\text{sol}}^2}.$$

# Interacción con un asteroide:

Los granos obtienen un potencial dependiendo del balance entre viento solar, capa electrostática y efecto fotoeléctrico.

$$I_{\text{ph},d} = \pi r_d^2 q_e I_{\text{ph}0} \exp\left(\frac{-q_e \phi_d}{k_B T_{\text{pe}}}\right),$$

$$I_{\text{sw},d} = \pi r_d^2 q_e n_{\text{sw}} \sqrt{\frac{8k_B T_{\text{sw}}}{\pi m_e}} \left(1 + \frac{q_e \phi_d}{k_B T_{\text{sw}}}\right),$$

$$I_{e,d} = \pi r_d^2 q_e n_{\text{pe}} \sqrt{\frac{8k_B T_{\text{pe}}}{\pi m_e}} \left(1 + \frac{q_e \phi_d}{k_B T_{\text{pe}}}\right),$$

para un grano  
cargado  
positivamente



# Interacción con un asteroide:

La carga del grano y la aceleración adquirida se obtienen de:

$$\frac{dQ}{dt} = I_{\text{ph},d} - I_{e,d} - I_{\text{sw},d},$$

$$\frac{dv_z}{dt} = \frac{Q}{m_{\text{grain}}} E(\Delta z) - g,$$

# Interacción con un asteroide:

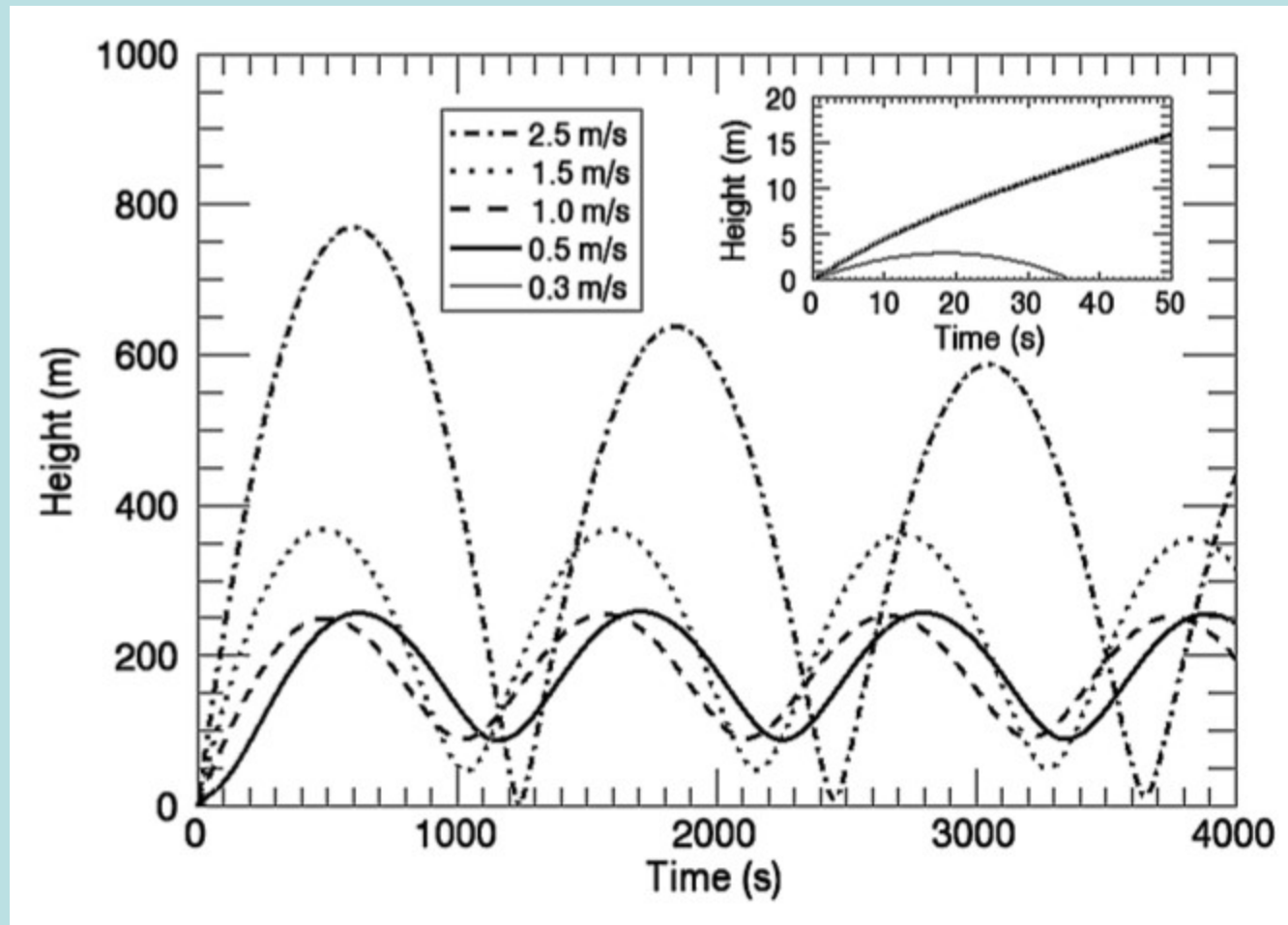
Donde el campo eléctrico y la densidad es:

$$n_{pe}(\Delta z) = n_{pe0} \left( 1 + \frac{\Delta z}{\sqrt{2}\lambda_{D0}} \right)^{-2},$$
$$E(\Delta z) = E_0 \left( 1 + \frac{\Delta z}{\sqrt{2}\lambda_{D0}} \right)^{-1}, \quad \lambda_{D0} = \sqrt{\frac{k_B T_{pe}}{4\pi q_e^2 n_{pe0}}},$$

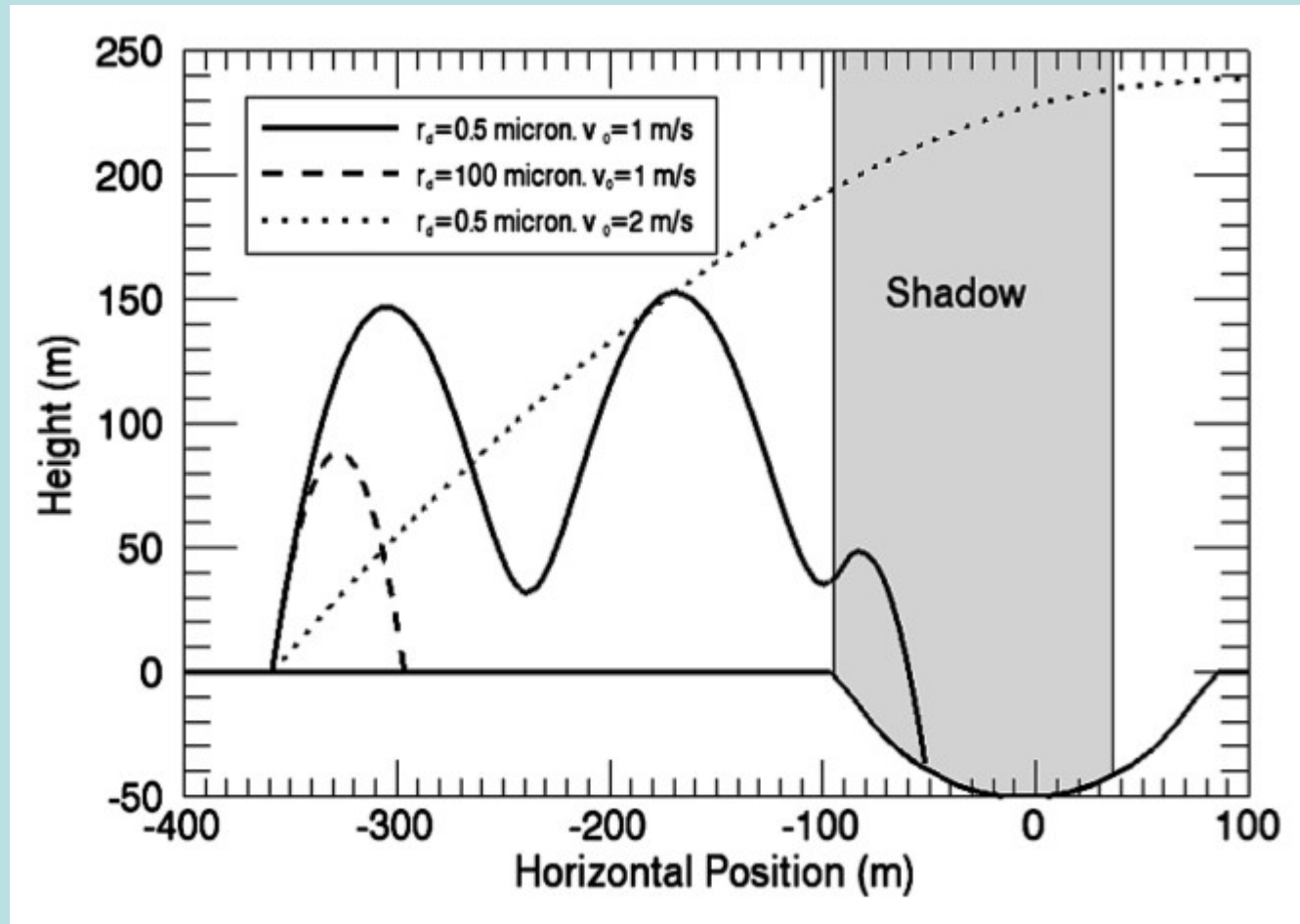
$$E_0 = \frac{2\sqrt{2}\phi_s}{\lambda_{D0}},$$

$$n_{pe0} = \frac{2I_{pe0} \sin \theta_{alt}}{v_{pe}}, \quad v_{pe} = \sqrt{\frac{2k_B T_{pe}}{m_e}} \sim 880 \text{ km/s},$$

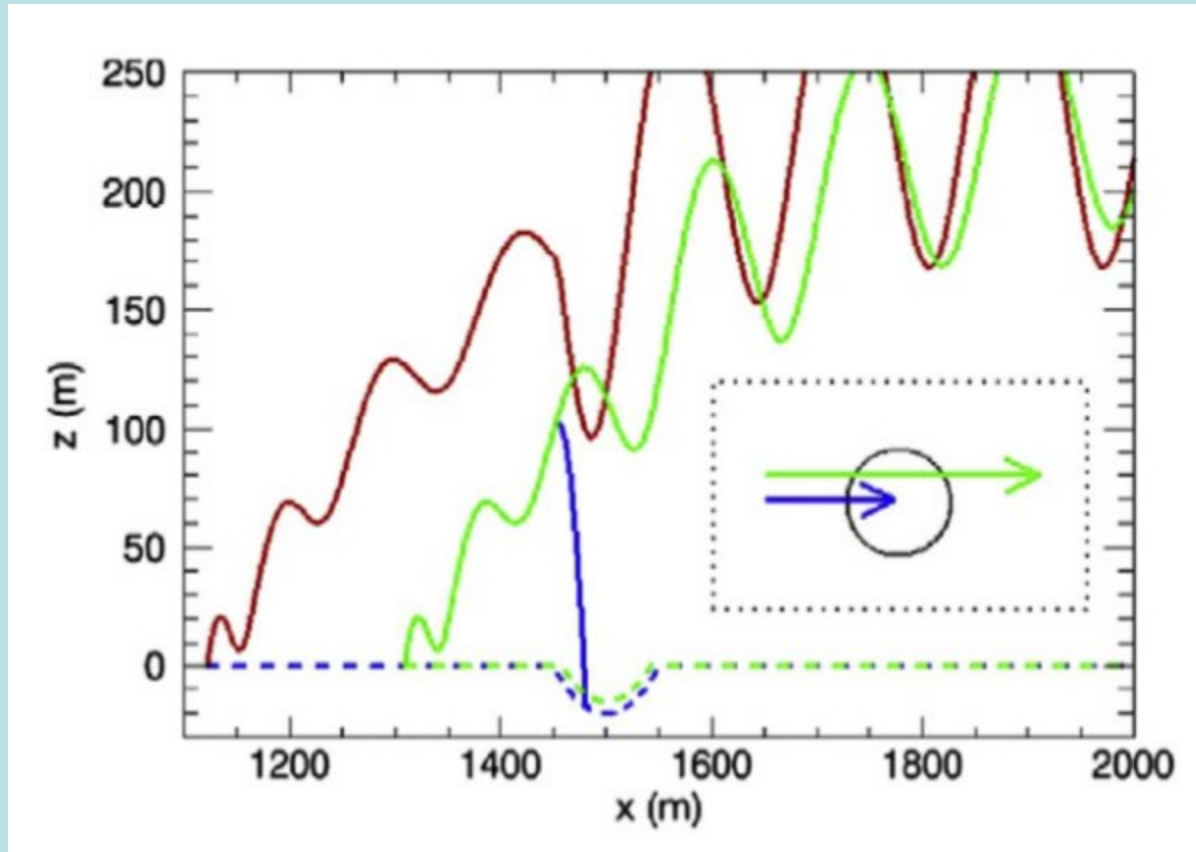
# Interacción con un asteroide:



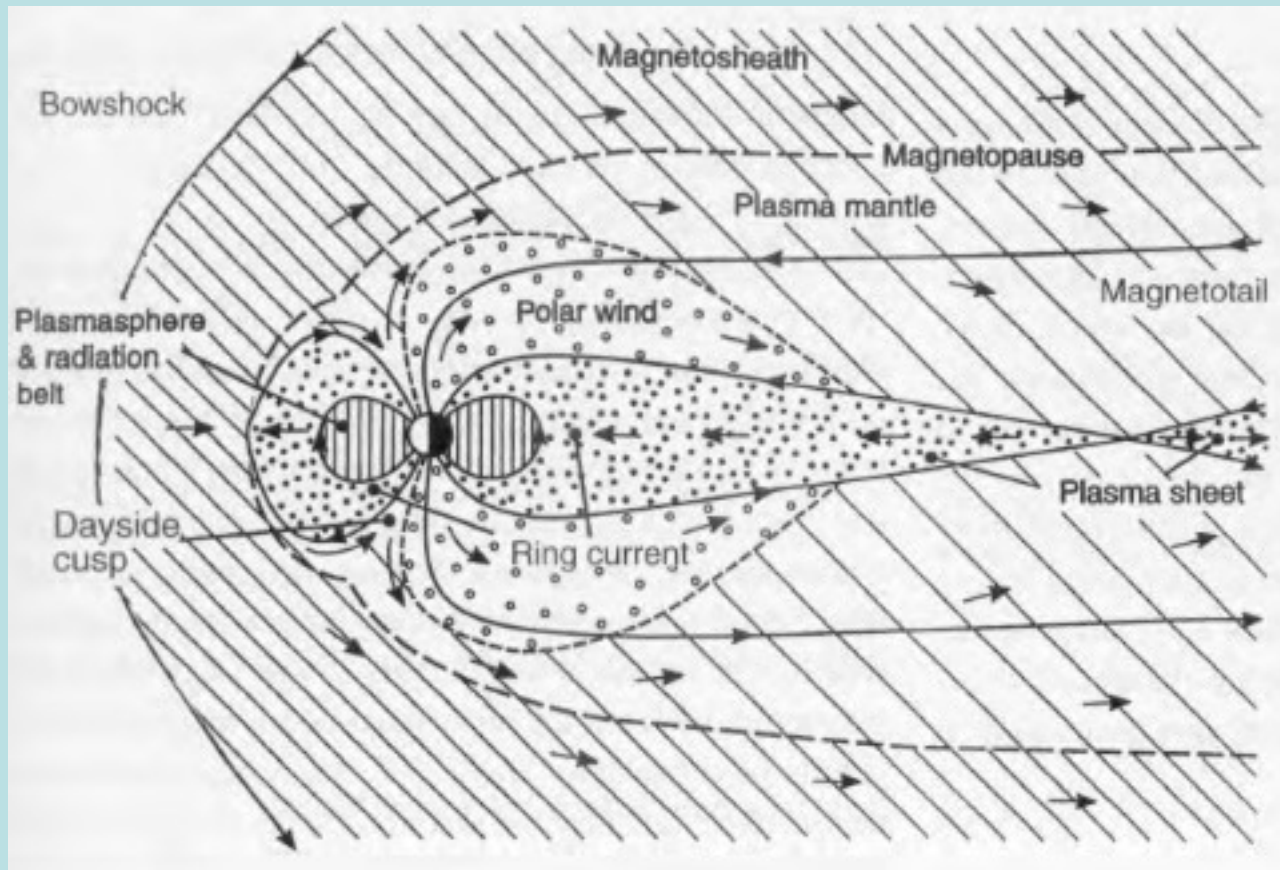
# Interacción con un asteroide:



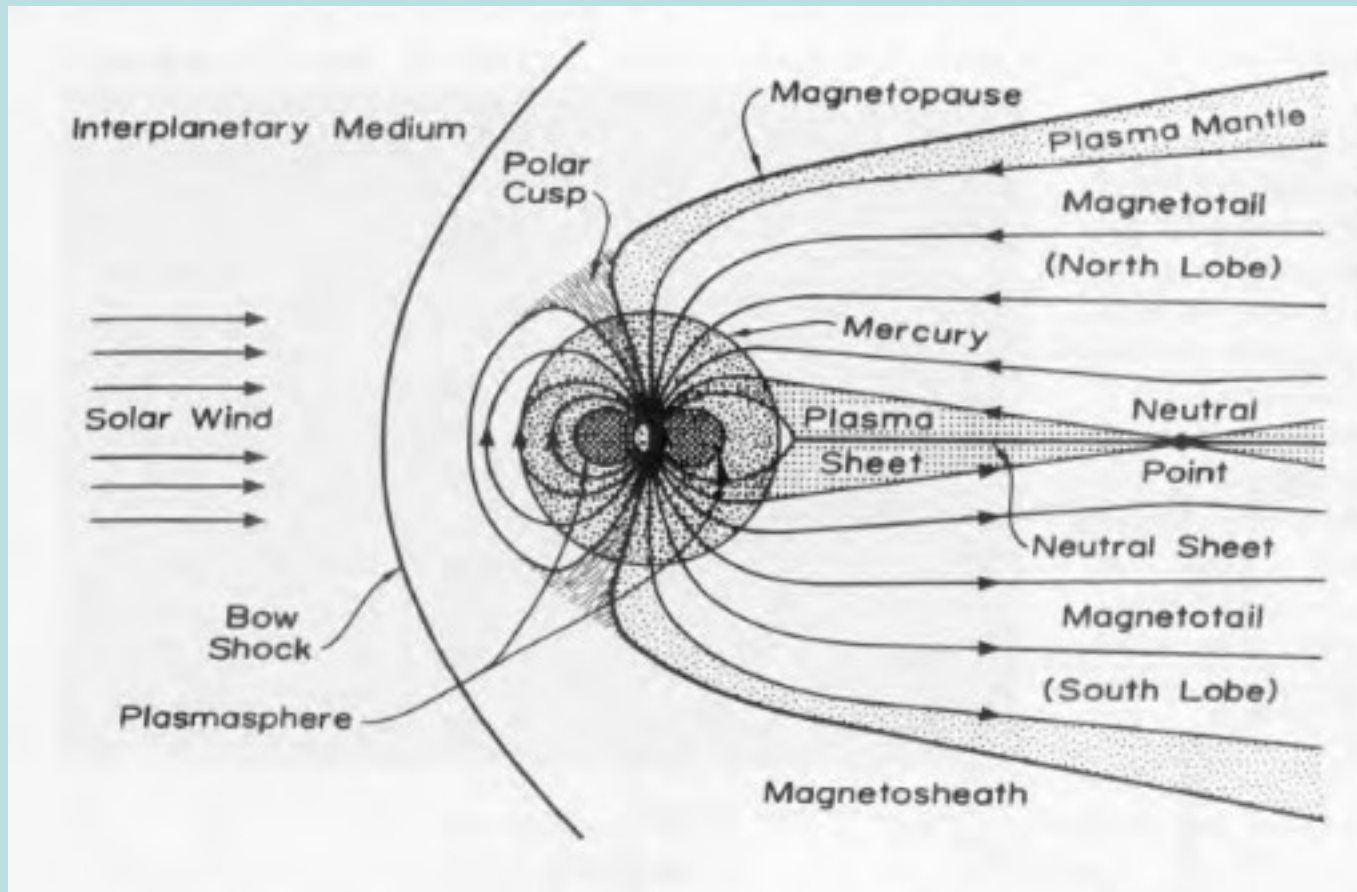
# Interacción con un asteroide:



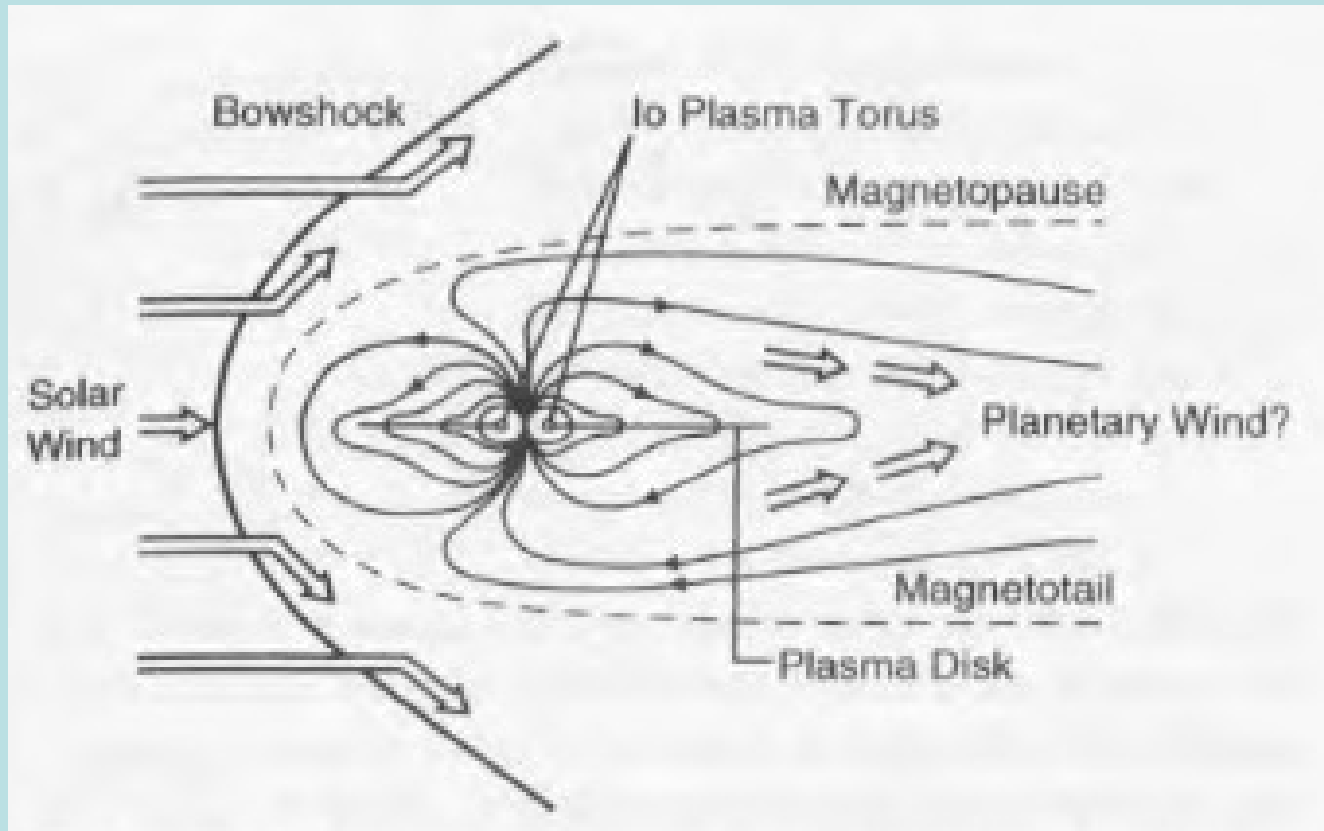
# Interacción con la Tierra:



# Interacción con Mercurio:

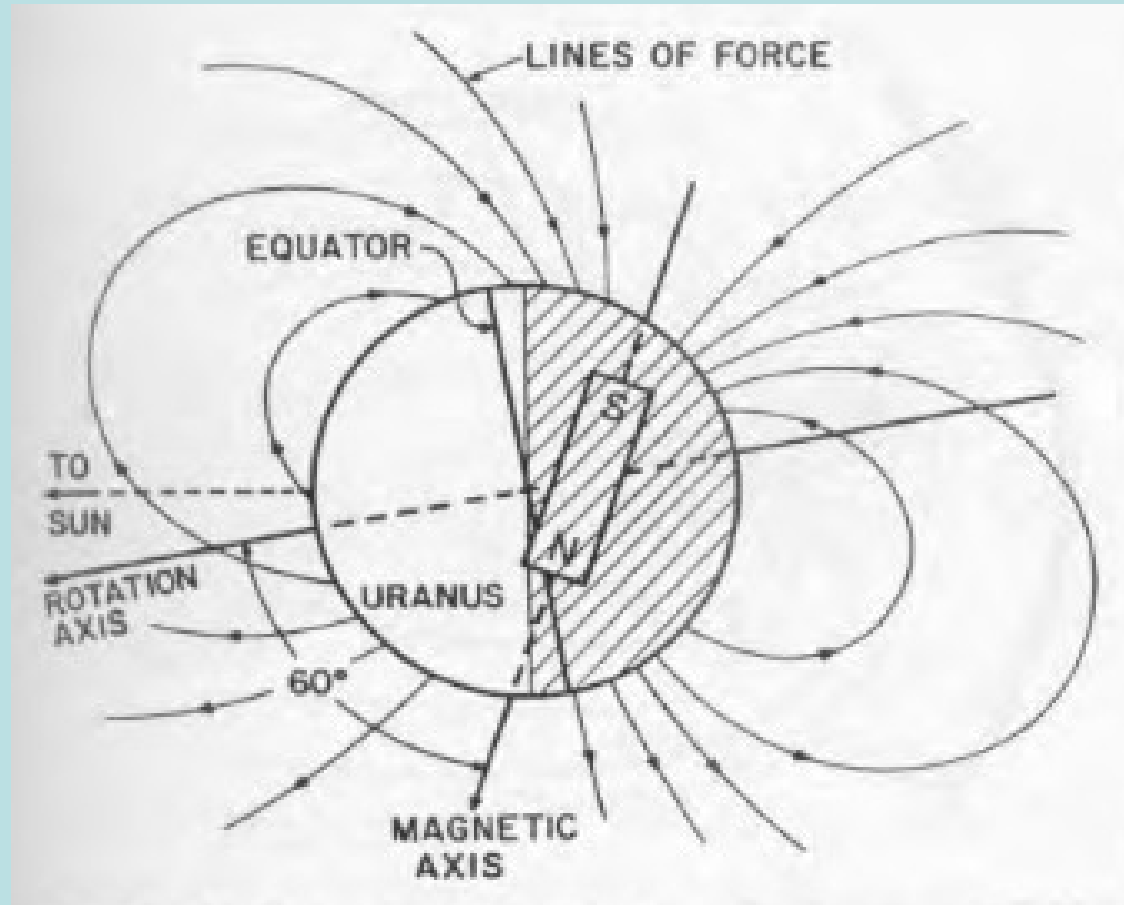


# Interacción con Júpiter:



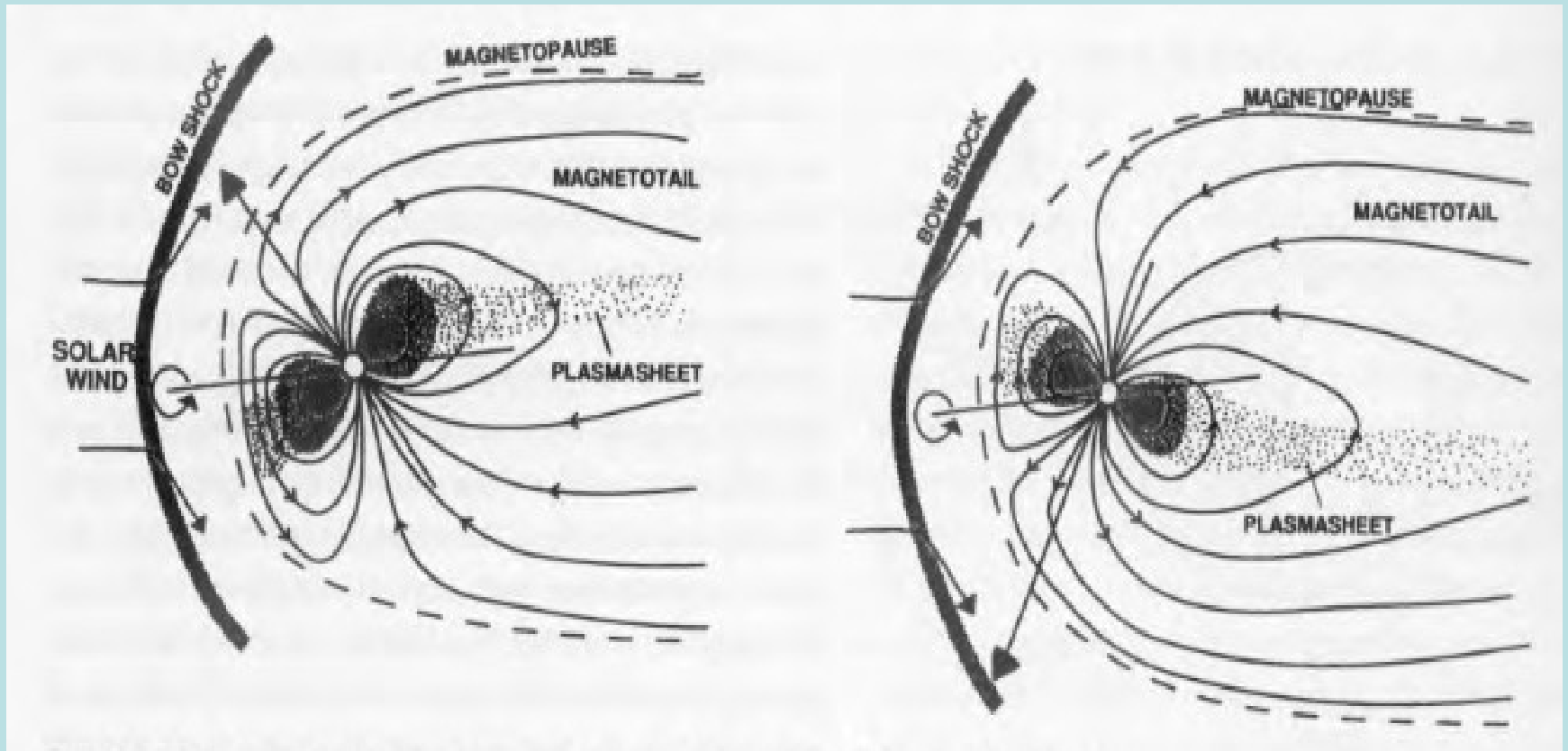


# Interacción con Urano:



# Interacción con Urano:

encuentro con Voyager 2 (1986)



# Interacción con Neptuno:

encuentro con Voyager 2 (1989)

