

Astrofísica del Sistema Solar

Magnetósferas y la interacción
con el viento solar

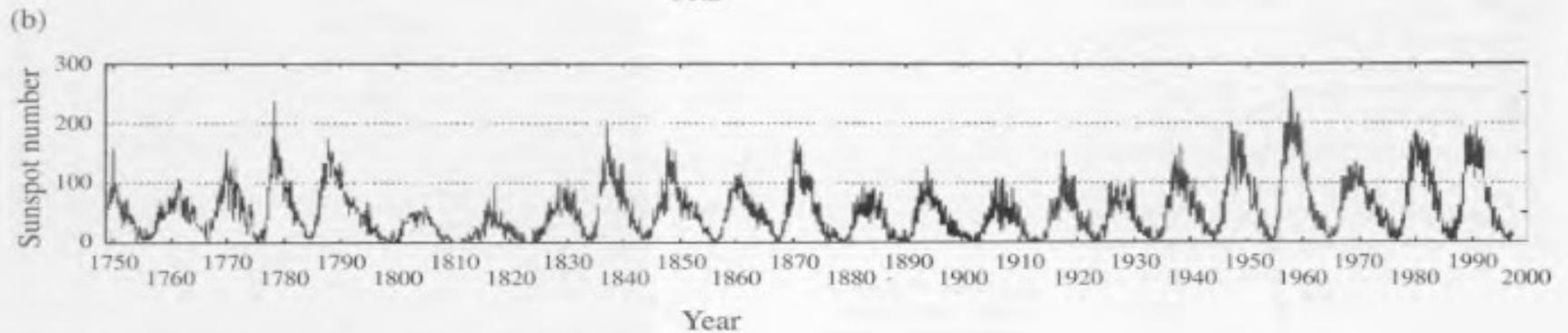
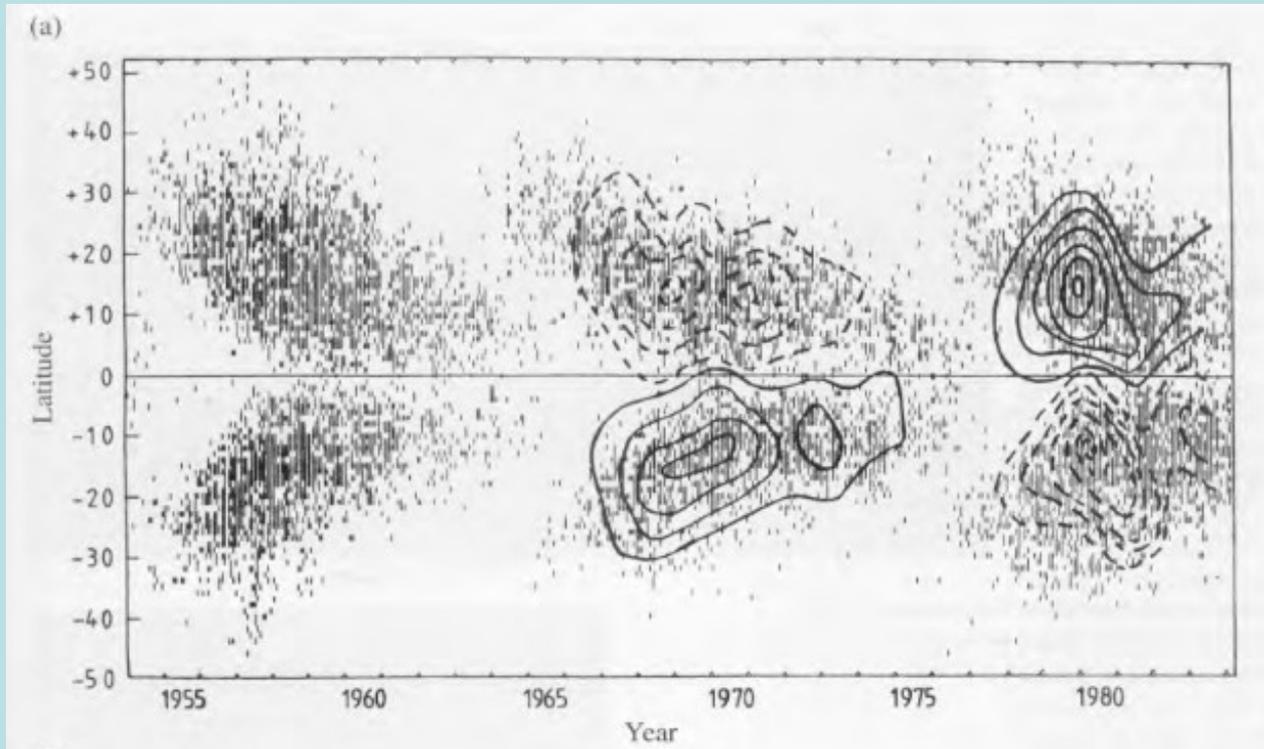
Viento solar:

- 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:

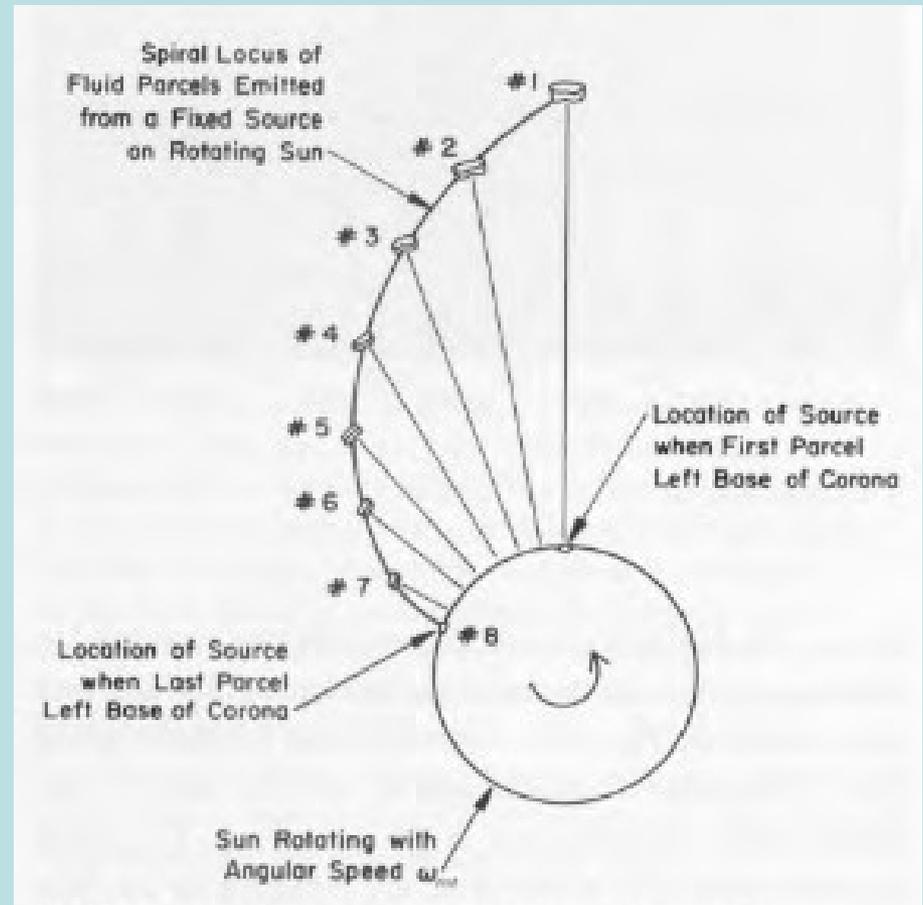
TABLE 7.1 Solar Wind Parameters at Earth's Orbit.

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

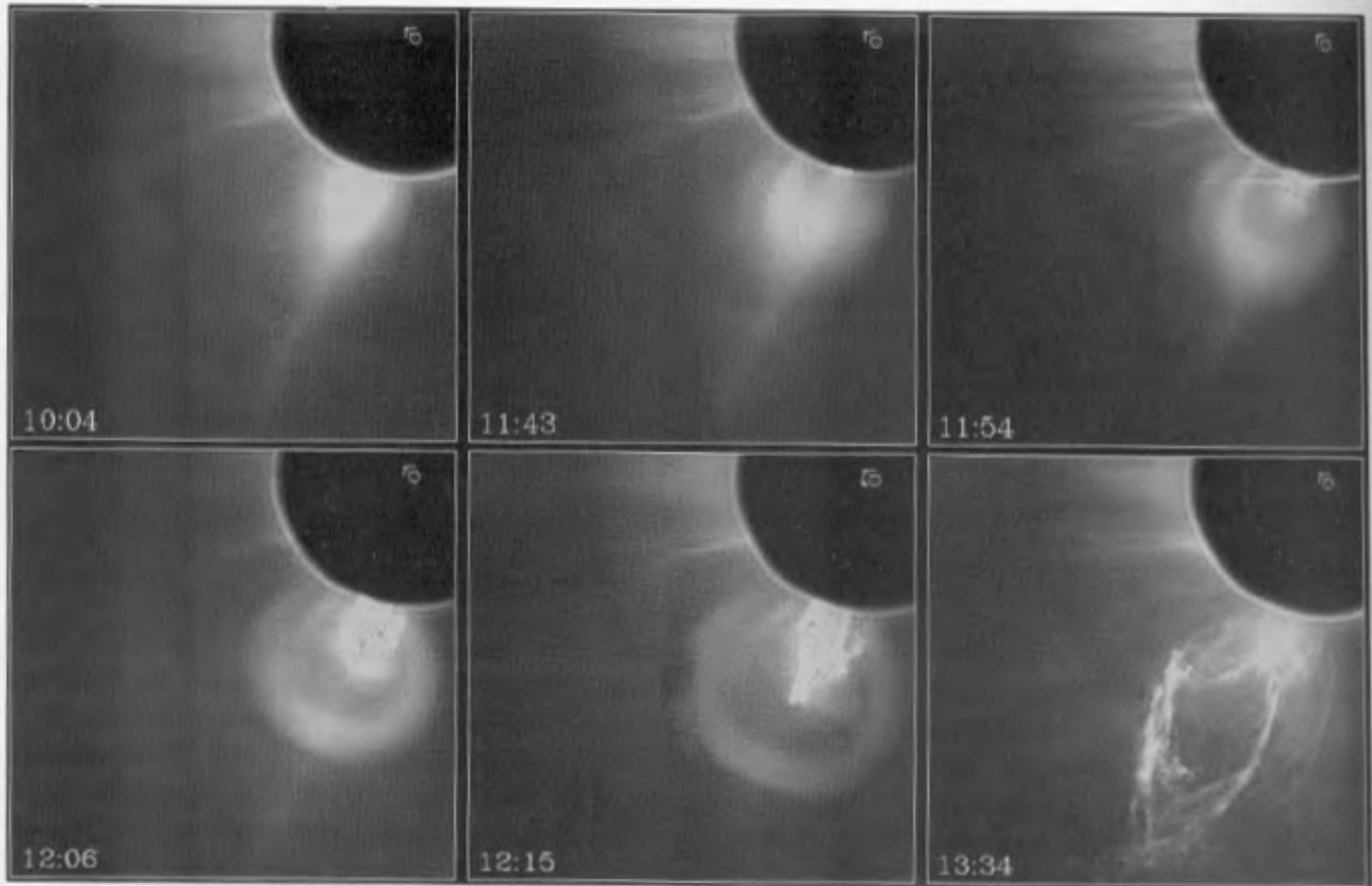
Viento solar:

- 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)



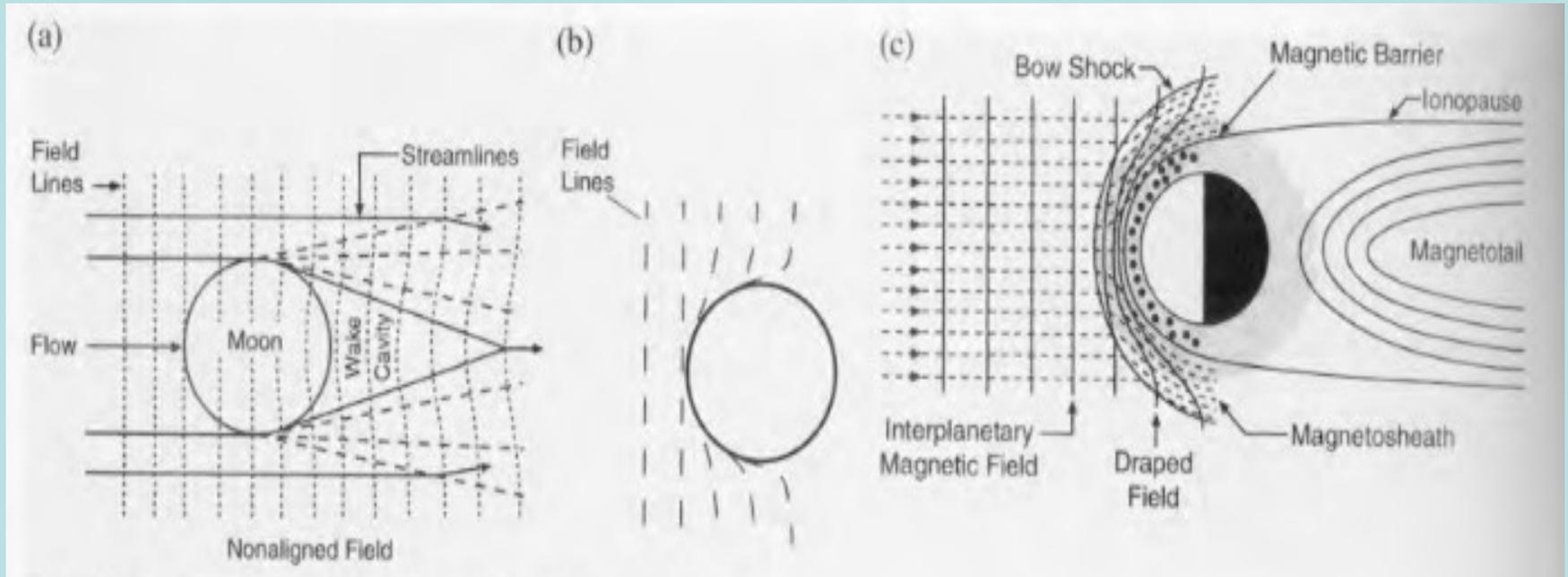
Interacción con el viento solar:

- 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})	4×10^{-4}	1 ^a	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 ^b	2	2.8	4.5	4.6	12	9
Dipole tilt and sense ^c	+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 ^d	90°	67-114°	87-93°	64-114°	8-172°	60-120°
Magnetopause distance ^e (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 (cm^{-3})	1	1000–4000	>3000	~100	3	2
Composition	H^+	O^+ , H^+ , N^+ , He^+	O^{n+} , S^{n+} , SO_2^+ , Cl^+	O^+ , H_2O^+ , H^+	H^+	N^+ , H^+
Dominant source	solar wind	ionosphere ^a	Io	rings, satellites	atmosphere	Triton
Production rate (ions s^{-1})	?	2×10^{26}	$>10^{28}$	10^{26}	10^{25}	10^{25}
Ion lifetime	minutes	days ^a , hours ^b	10–100 days	1 month	1–30 days	1 day
Plasma motion controlled by:	solar wind	rotation ^a solar wind ^b	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:

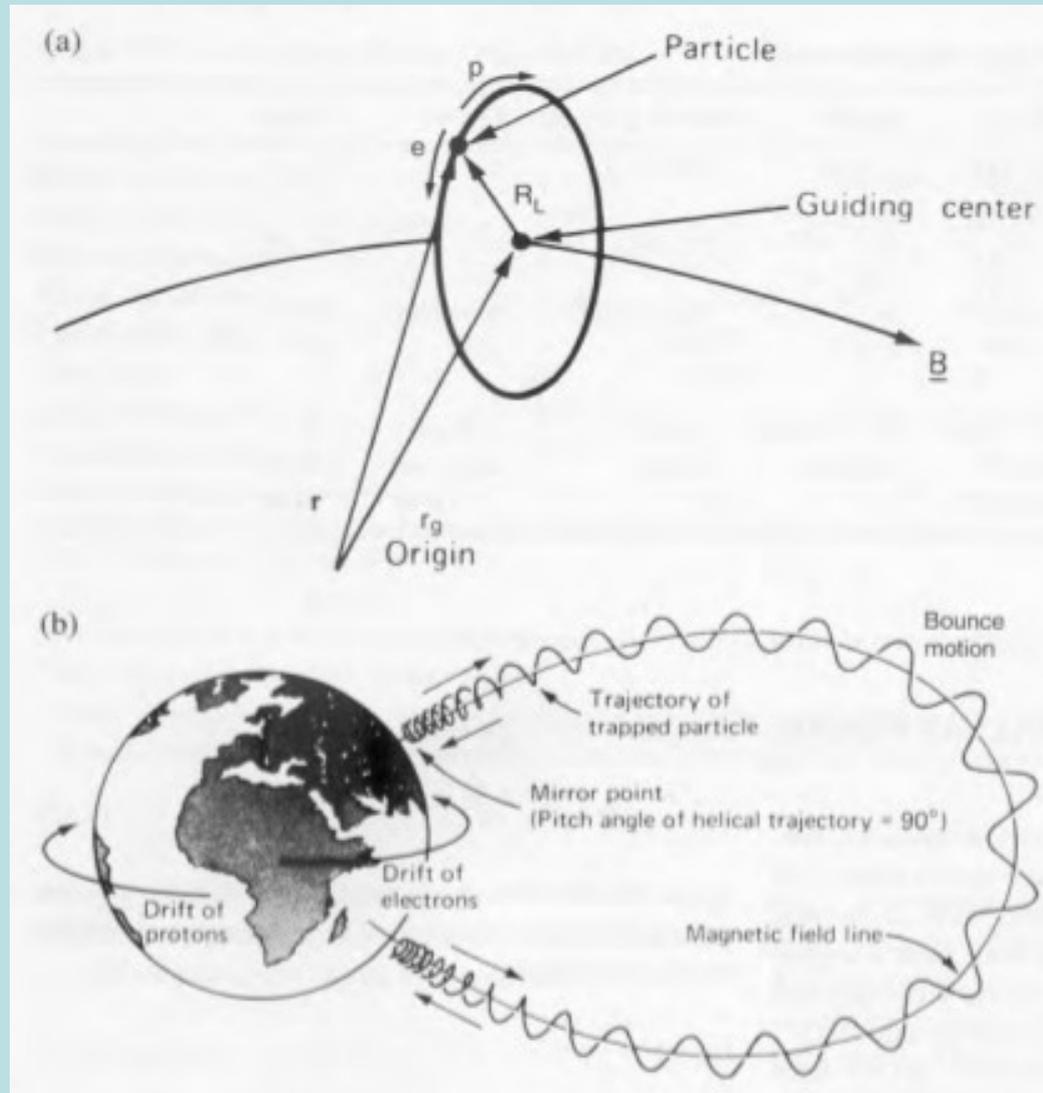
$$m \frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} = \mathbf{F} + \frac{q \mathbf{v} \times \mathbf{B}}{c}$$

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:

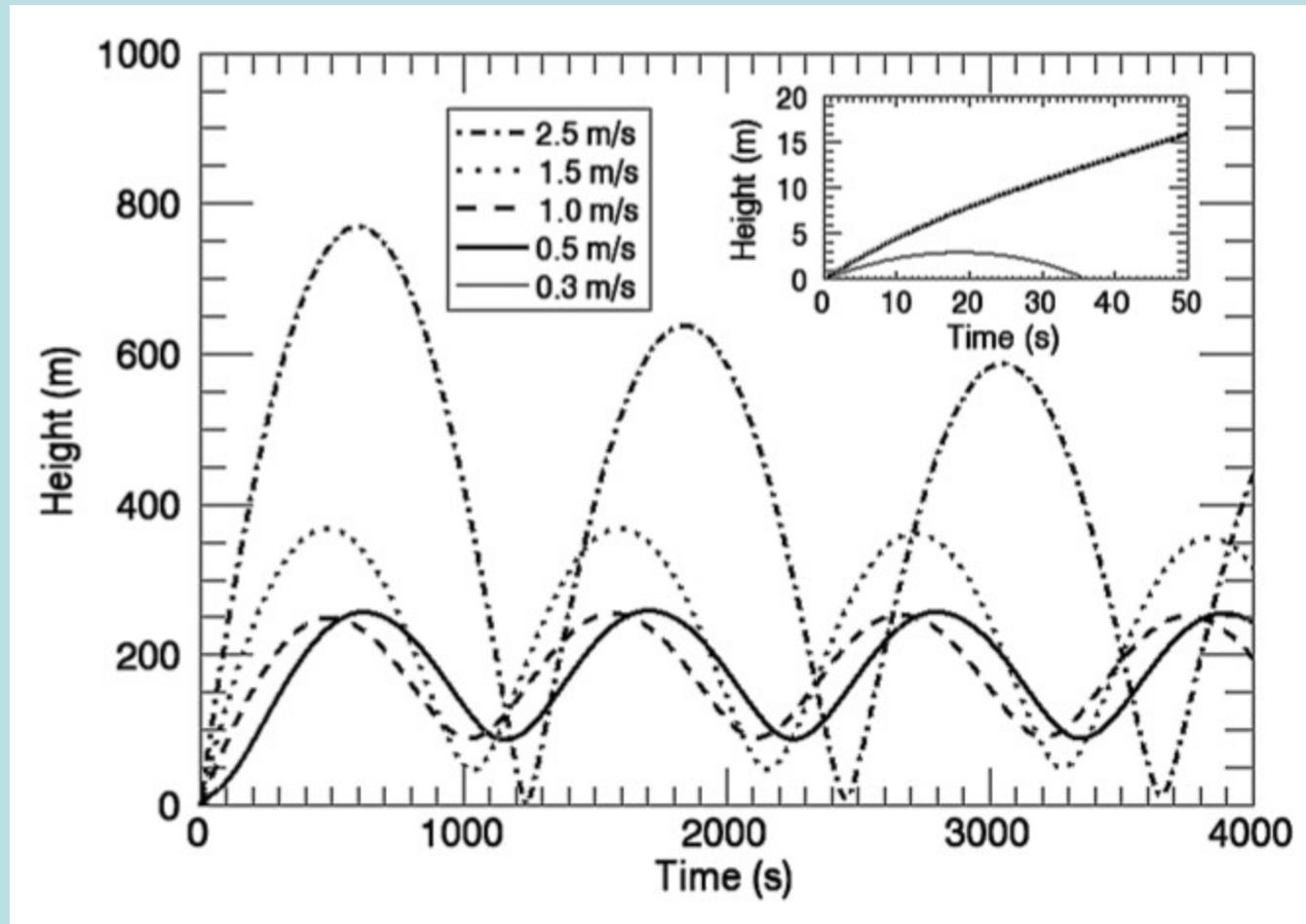
Donde el campo eléctrico y la densidad es:

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

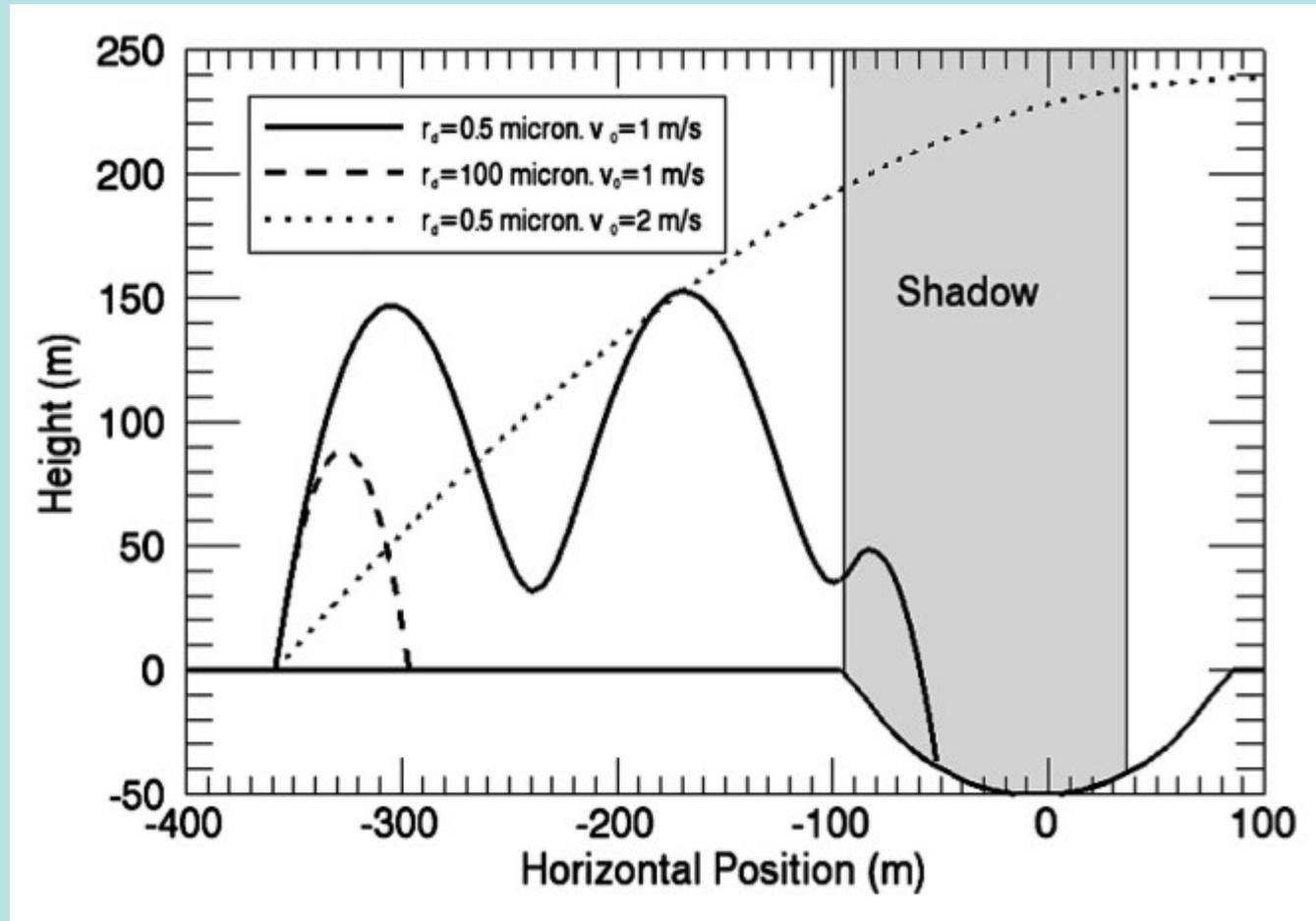
$$E_0 = \frac{2\sqrt{2}\phi_s}{\lambda_{D0}},$$

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

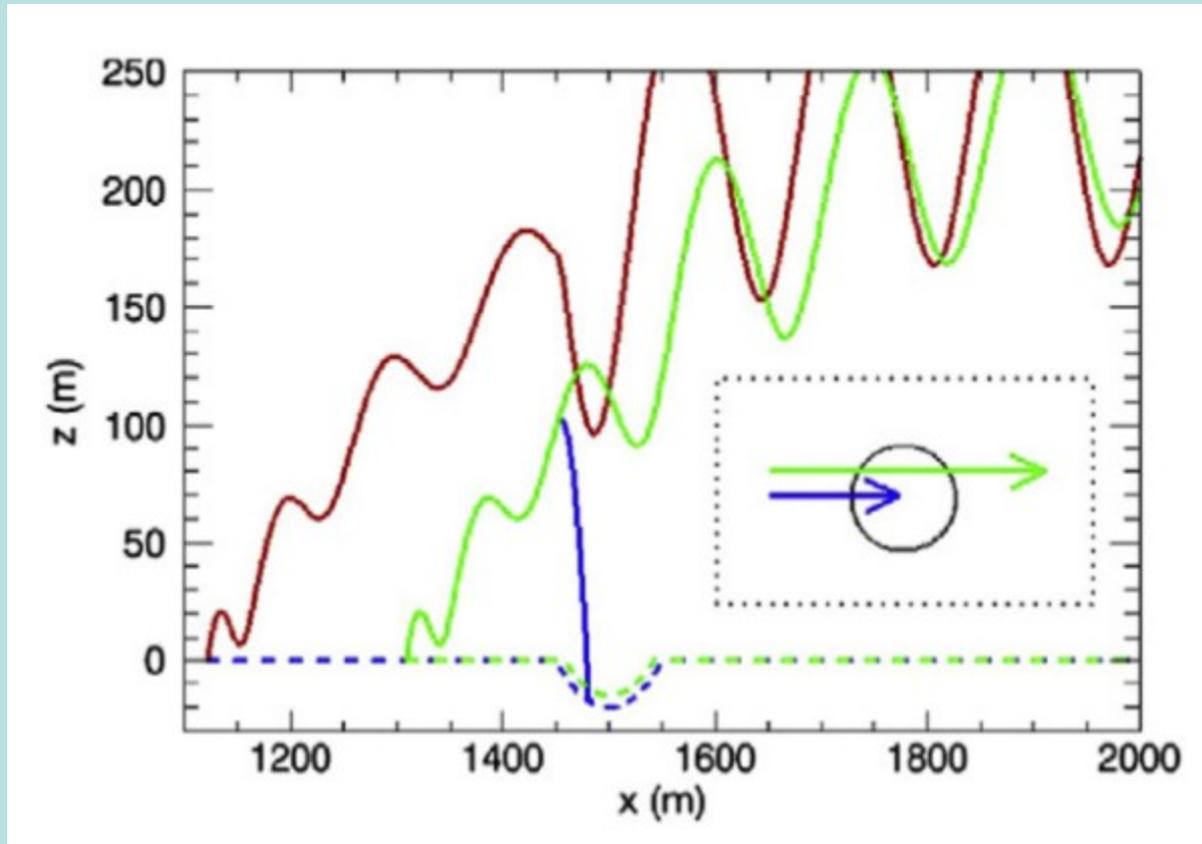
Interacción con un asteroide:



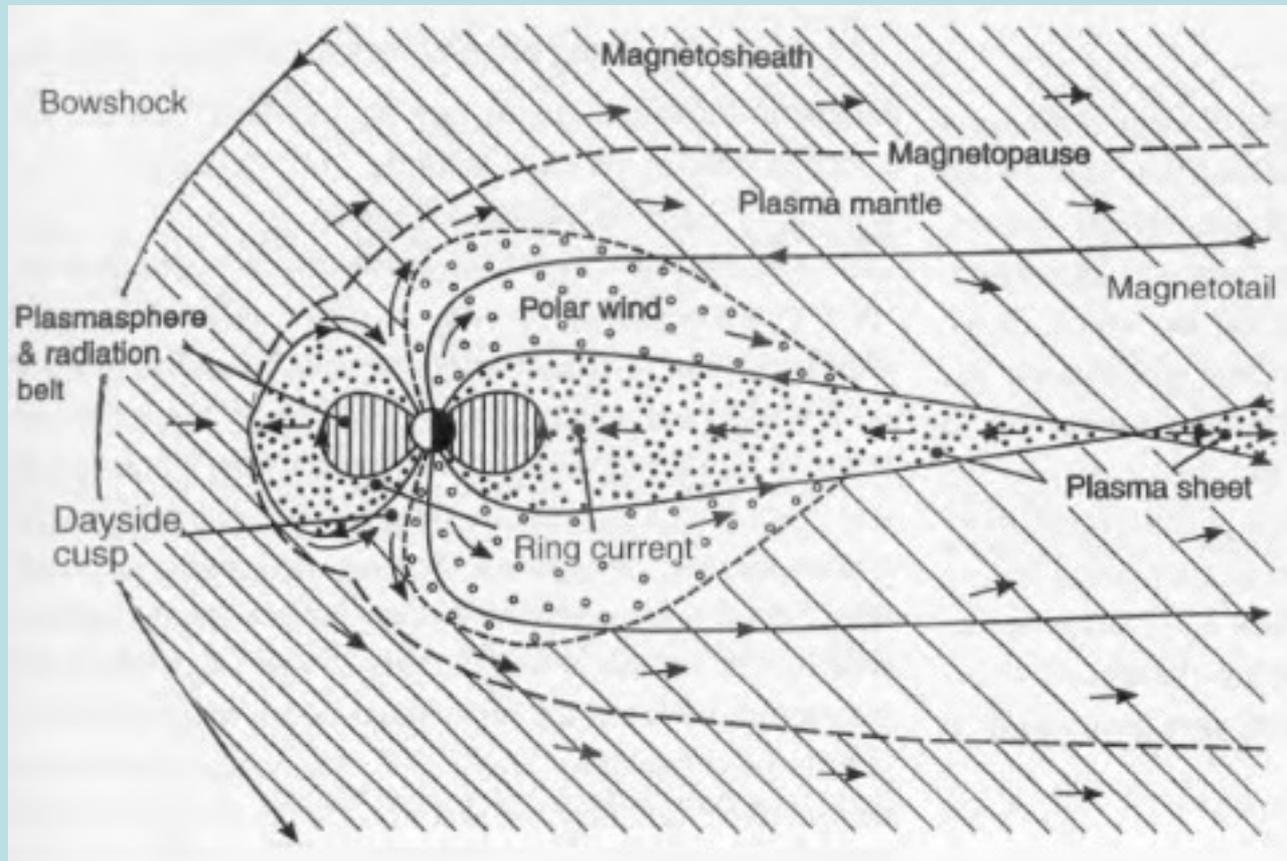
Interacción con un asteroide:



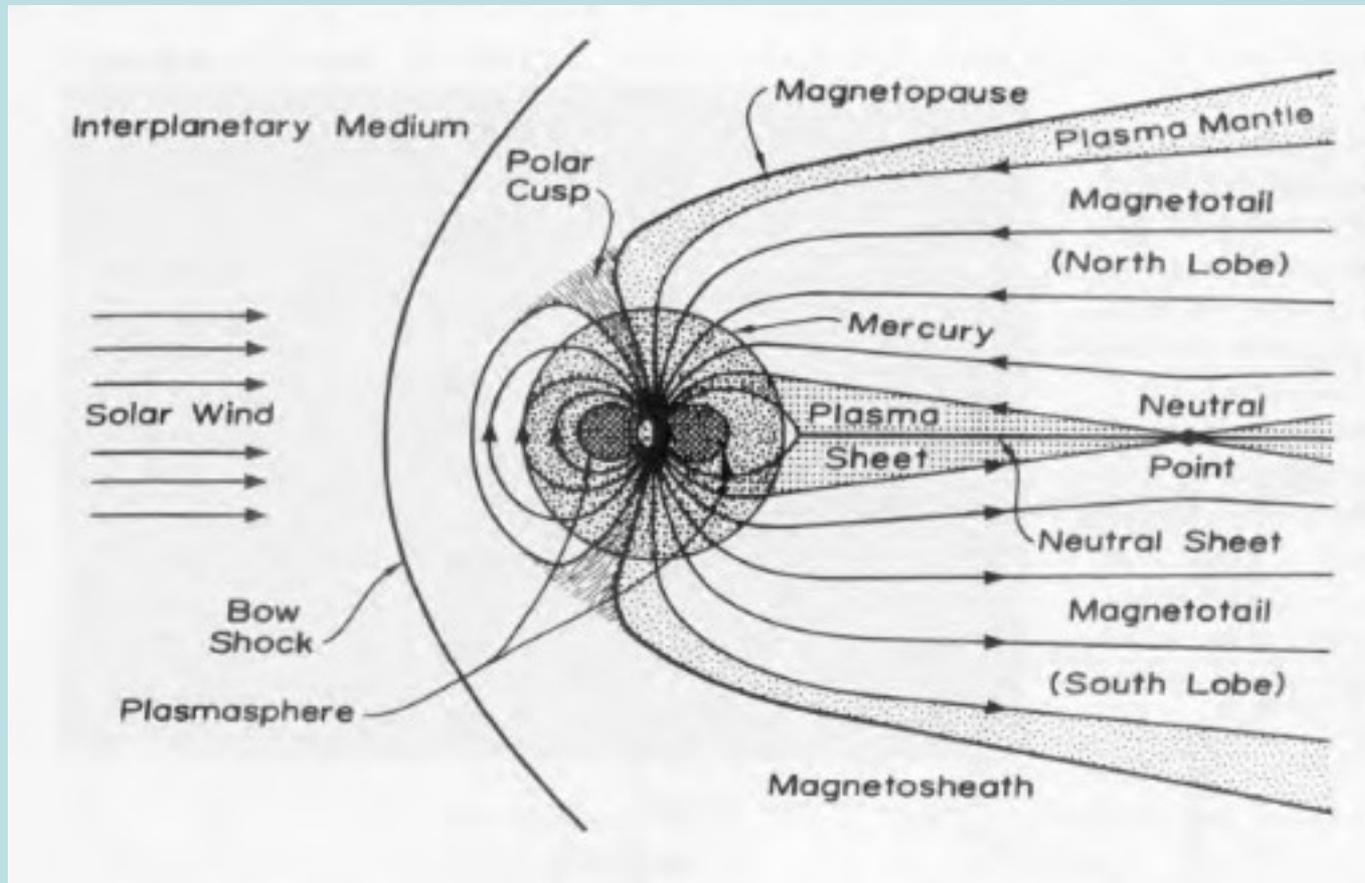
Interacción con un asteroide:



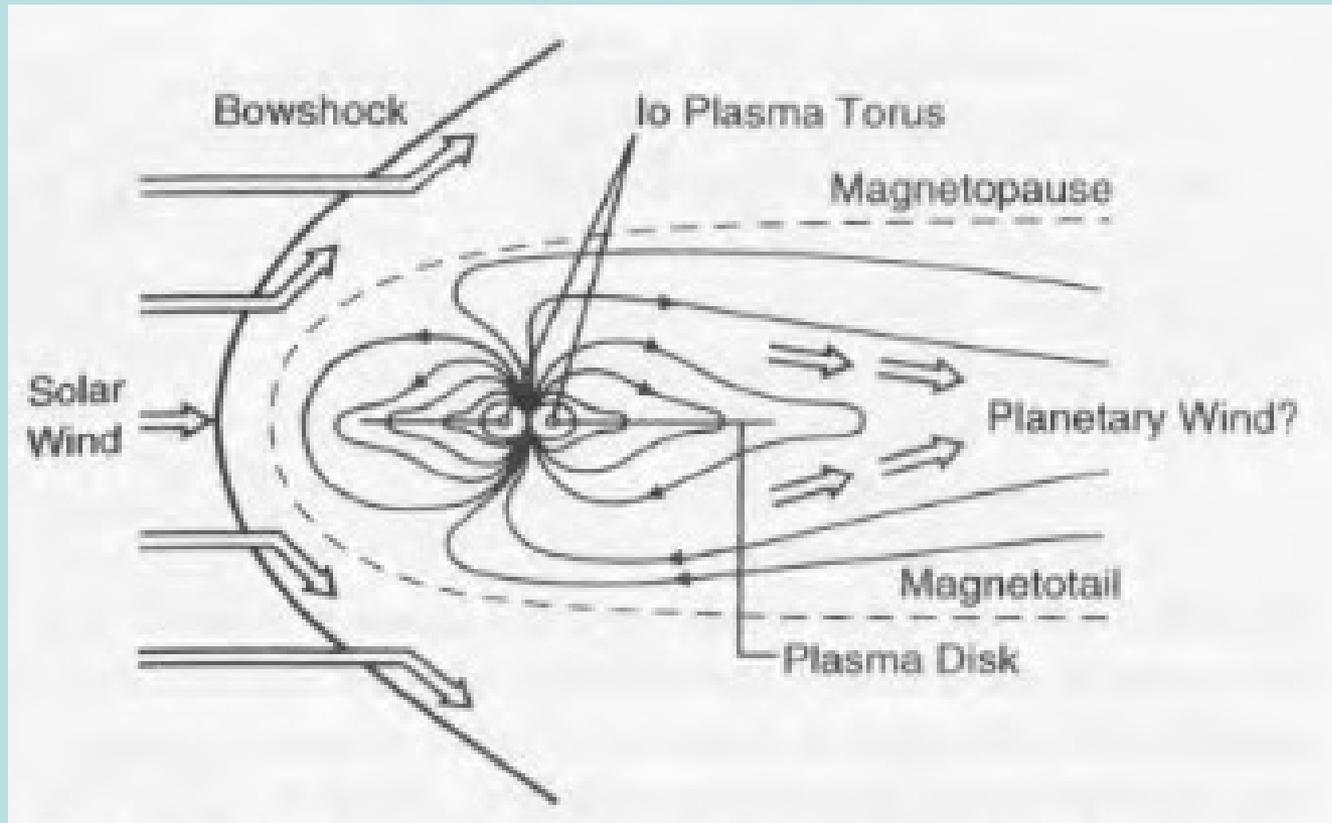
Interacción con la Tierra:



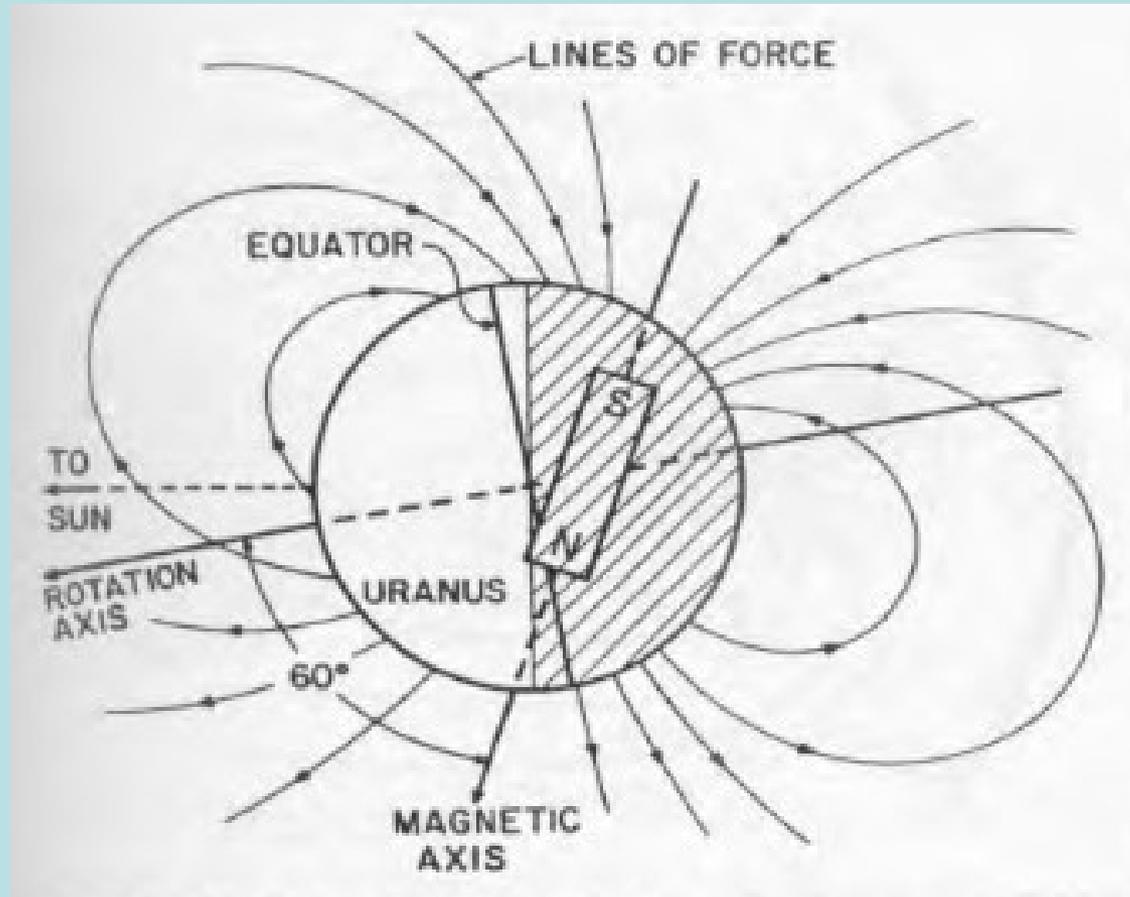
Interacción con Mercurio:



Interacción con Júpiter:

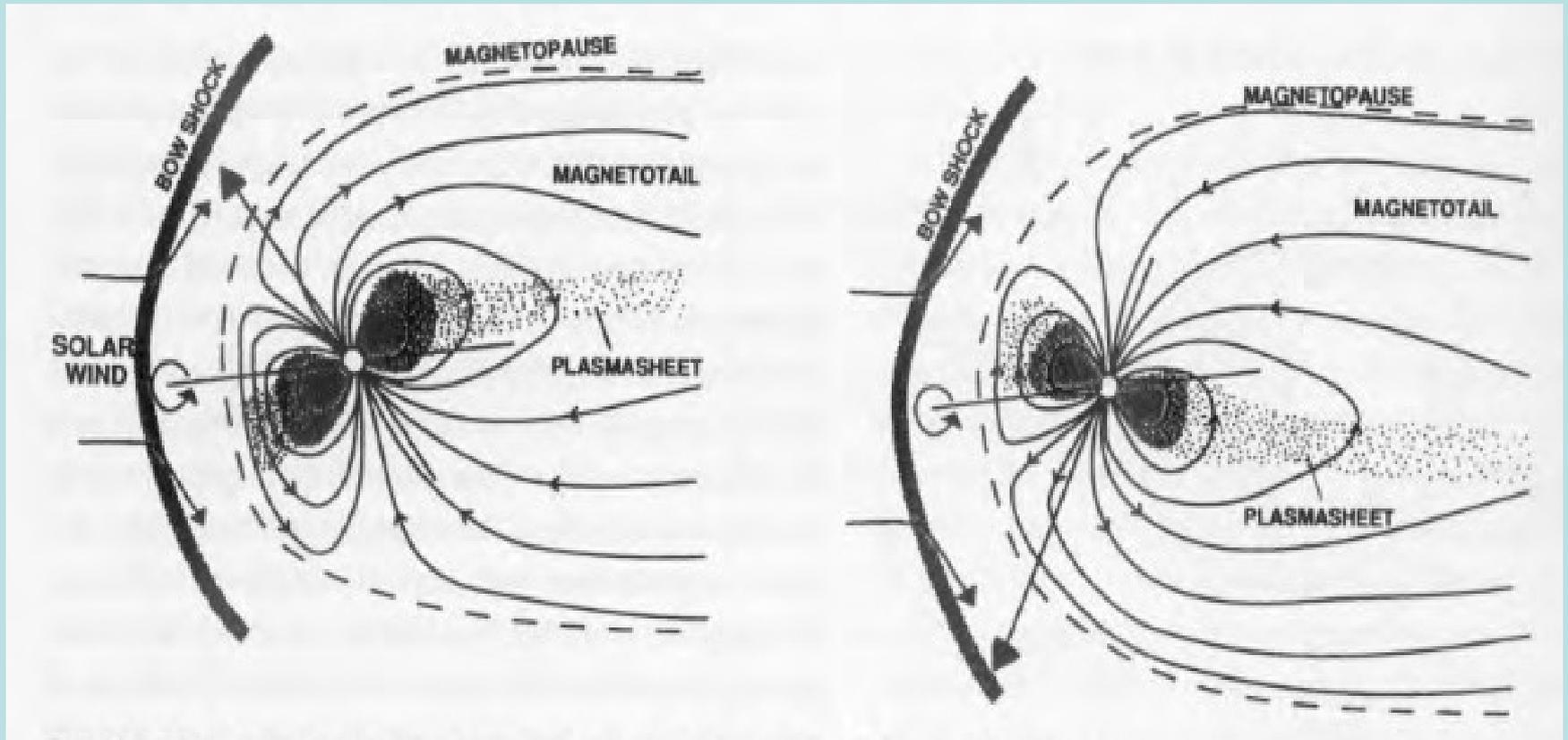


Interacción con Urano:



Interacción con Urano:

encuentro con Voyager 2 (1986)



Interacción con Neptuno:

encuentro con Voyager 2 (1989)

