

# Astrofísica del Sistema Solar

## Fuerzas no gravitatorias

## Fuerzas no gravitatorias:

$$\vec{\mathbf{F}}_g = m\ddot{\mathbf{r}} = -\frac{k^2 \mathcal{M} m}{r^2} \hat{\mathbf{r}} + \vec{\mathbf{F}},$$

- Fuerza de Lorentz.
- FNG en cometas debido a jets.
- Fuerzas debidas a radiación:
  - Presión de radiación.
  - Efecto Poynting-Robertson.
  - Interacción corpuscular.
  - Efecto Yarkovsky.

# Fuerza de Lorentz:

- Si una partícula cargada se mueve en un campo magnético (viento solar) aparece una fuerza:

$$\begin{aligned}\mathbf{F}_L &= \frac{Q(\mathbf{v} \times \mathbf{B})}{c} = \\ &= \frac{Q[(\mathbf{v}_g + \mathbf{v}_{sw}) \times \mathbf{B}]}{c},\end{aligned}$$

- La magnitud de la fuerza está dominada por el término que es independiente del movimiento de la partícula.

# Fuerza de Lorentz:

- Como el campo magnético solar es:

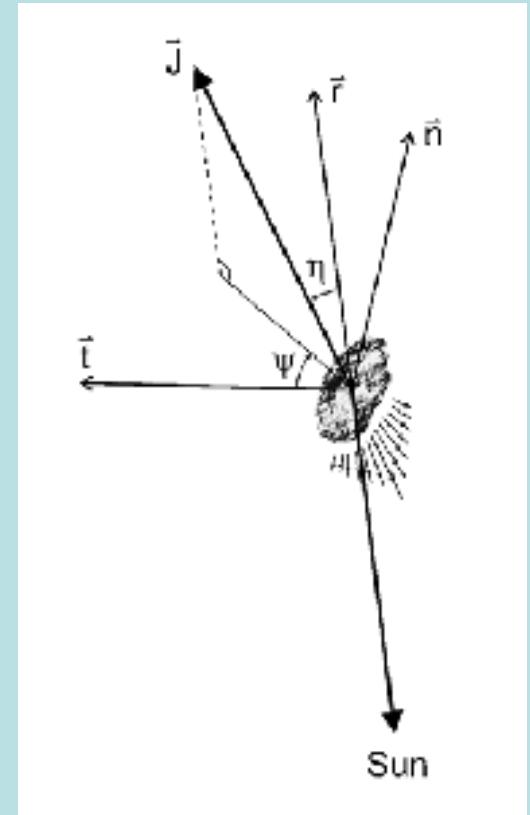
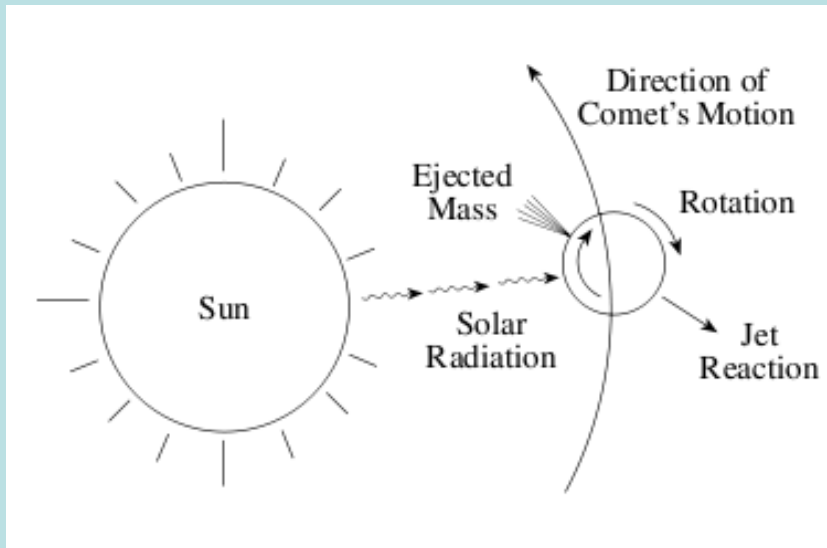
$$B_r = \pm B_{r,0} \left( \frac{r_0}{r} \right)^2$$

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

$$B_\theta = 0$$

- La fuerza dependerá de la latitud heliográfica y de la distancia (Parker, 1958).

# FNG en cometas debido a jets:



La existencia de Jets produce un efecto no gravitatorio en el movimiento del cometa  
Marsden (1968, 1969, 1970, 1971, 1973)

# FNG en cometas debido a jets:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} = & -\frac{k^2 \mathbf{r}}{r^3} + k^2 \sum_j m_j \left[ \frac{(\mathbf{r}_j - \mathbf{r})}{|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}|^3} - \frac{\mathbf{r}_j}{r_j^3} \right] \\ & + \frac{k^2}{c^2 r^3} \left[ \frac{4k^2 \mathbf{r}}{r} - (\dot{\mathbf{r}} \cdot \dot{\mathbf{r}}) \mathbf{r} + 4(\mathbf{r} \cdot \dot{\mathbf{r}}) \dot{\mathbf{r}} \right] \\ & + A_1 g(r) \mathbf{r}/r + A_2 g(r) \mathbf{t} + A_3 g(r) \mathbf{n} \end{aligned}$$

$$g(r) = \alpha (r/r_0)^{-m} (1 + (r/r_0)^n)^{-k}$$

$$\alpha = 0.111262$$

$$r_0 = 2.808 \text{ UA}$$

$$m = 2.15$$

$$n = 5.093$$

$$k = 4.6142$$

## Presión de radiación:

- Es la presión ejercida sobre cualquier superficie expuesta a la radiación electromagnética:

$$\vec{F}_r = \frac{S_0 \pi s^2 Q_{pr}}{r^2 c} \hat{r},$$

- como es una fuerza inversamente proporcional al cuadrado de la distancia es conveniente introducir el parámetro:

$$\beta = -\frac{\vec{F}_r}{\vec{F}_g} = \frac{S_0 \pi s^2 Q_{pr} r^2}{c k^2 M m r^2} = C Q_{pr} \frac{\pi s^2}{m},$$

# Presión de radiación:

- La fuerza neta resultante se puede escribir como:

$$\vec{F}_T = \vec{F}_g + \vec{F}_r = -\frac{k^2(1 - \beta)\mathcal{M}m}{r^2}\hat{r},$$

- que indica que la partícula “ve” un cuerpo central de **masa menor a M** y, por lo tanto, su velocidad real es **superior a la que debería tener**.
- Si  $\beta < 0.56$  la partícula **cambia su semieje** a un valor mayor que el inicial.
- Si  $\beta > 0.56$  la partícula **alcanza velocidad parabólica** y escapa del sistema.



# Efecto Poyting-Robertson:

- Disipa energía y momento angular orbital.
- Como las velocidades de las partículas son mucho menores a la de la luz, la radiación solar parecería provenir de una dirección desplazada en la dirección de movimiento, lo que introduce un frenado en dirección perpendicular al radio vector.
- Además, la partícula absorberá menos energía que si estuviera en reposo debido al efecto Doppler, y el mismo proceso se repetirá cuando la energía sea re-emitida.

# Efecto Poynting-Robertson:

- Considerando presión de radiación y Poynting-Robertson a primer orden en  $v/c$ :

$$\mathbf{F}_{\text{PR}} = |\mathbf{F}_{\text{g}}| \beta \left[ \left( 1 - \frac{2}{c} \frac{dr}{dt} \right) \hat{\mathbf{u}}_r - \left( \frac{r}{c} \left| \frac{d\hat{\mathbf{u}}_\theta}{dt} \right| \right) \hat{\mathbf{u}}_\theta \right],$$

- una partícula a una distancia inicial  $r$ , con  $\beta < 1$  que no sea afectada significativamente por presión de radiación, cae al Sol en espiral en unos  $(400 r^2 / \beta)$  años.

# Interacción corpuscular:

- La interacción corpuscular entre la partícula y los protones del viento solar puede ser representada por una ecuación similar a la anterior:

$$\mathbf{F}_{sw}^{\vec{}} = |\mathbf{F}_{g}^{\vec{}}| \beta_{sw} \left[ \left( 1 - \frac{2}{v_{sw}} \frac{dr}{dt} \right) \hat{\mathbf{u}}_r - \left( \frac{r}{v_{sw}} \left| \frac{d\hat{\mathbf{u}}_{\theta}}{dt} \right| \right) \hat{\mathbf{u}}_{\theta} \right],$$

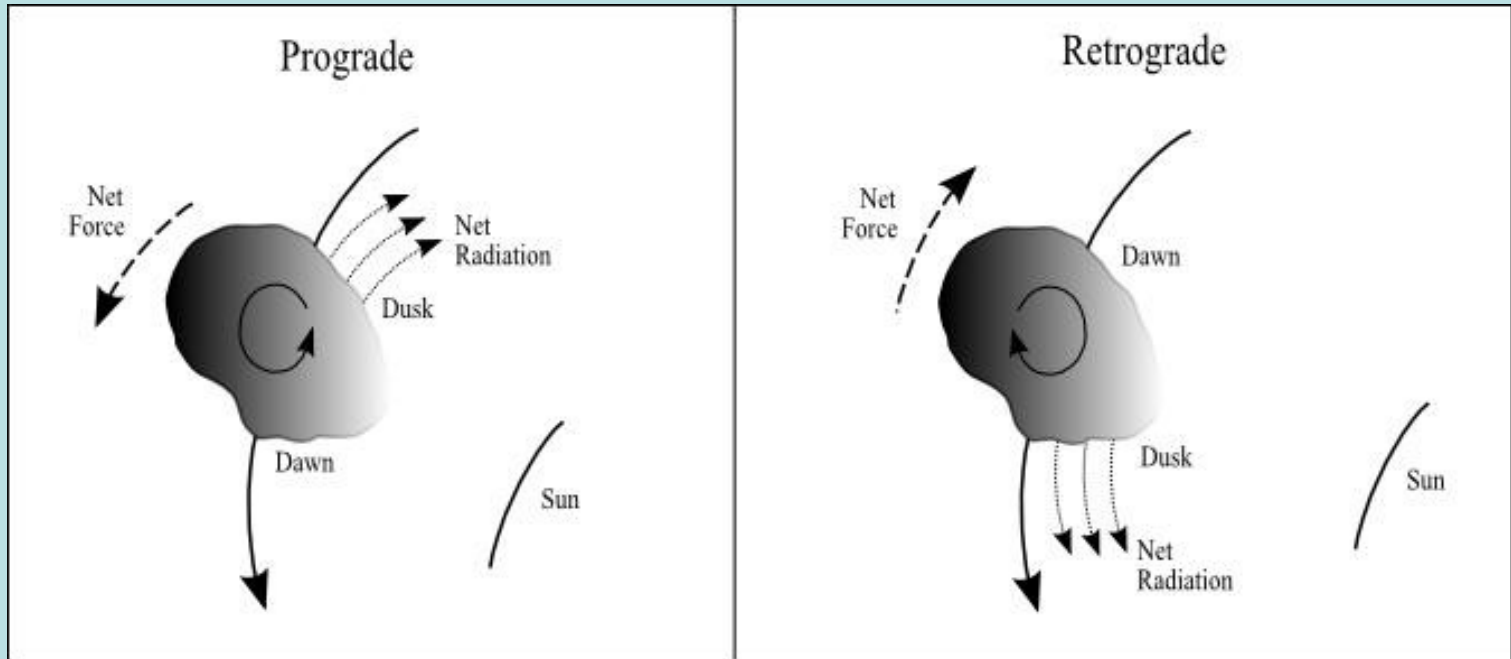
donde:

$$\beta_{sw} = -\frac{\mathbf{F}_{c}^{\vec{}}}{\mathbf{F}_{g}^{\vec{}}} = \frac{m_{p,o} \pi s^2 C_D r^2}{2k^2 \mathcal{M} m r^2} = C_p \frac{\pi s^2}{m},$$

# Efecto Yarkovsky:

- Se debe a la anisotropía existente en la cantidad de energía irradiada en diferentes regiones del objeto (Rubincam 1995, 1998, 2000).
- Debido a la rotación y a la inercia térmica se produce un gradiente térmico en la superficie del objeto.
- La radiación térmica emitida en las zonas calientes (tarde) se lleva más momento angular que las zonas frías (mañana) y produce un desbalance térmico que afecta el movimiento del objeto.

# Efecto Yarkovsky:



# Efecto Yarkovsky:

- Consideremos un objeto esférico, que esta rotando y es calentado por la radiación solar.
- La reacción producida en forma normal por un elemento de superficie  $dA$  debido a la diferencia térmica es:

$$dF = \frac{2\sigma T^4 dA}{3c}$$

- La fuerza transversal resultante en el plano orbital es:

$$F_Y = \frac{8}{3} \pi s^2 \frac{\sigma T^4}{c} \frac{\Delta T}{T} \cos \psi$$

# Efecto Yarkovsky:

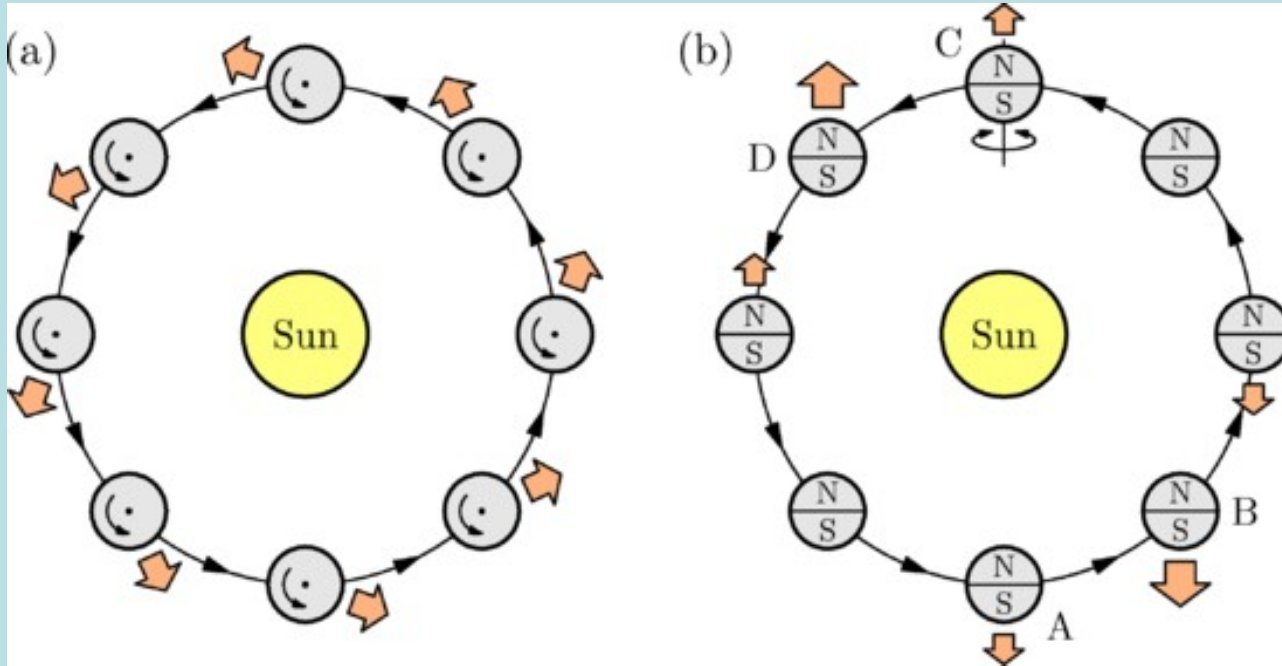
- Utilizando las ecuaciones planetarias de Lagrange en primer orden:

$$\left(\frac{da}{dt}\right)_Y = \frac{2}{Mn^2a} (\mathbf{F}_Y \cdot \mathbf{v})$$

- Siendo el cambio en semieje:

$$\left(\frac{da}{dt}\right)_Y \simeq 2,5 \times 10^{-4} \left(\frac{UA}{10^6 \text{ yr}}\right) \frac{500 \text{ m}}{\text{s}} \cos \psi,$$

# Efecto Yarkovsky:



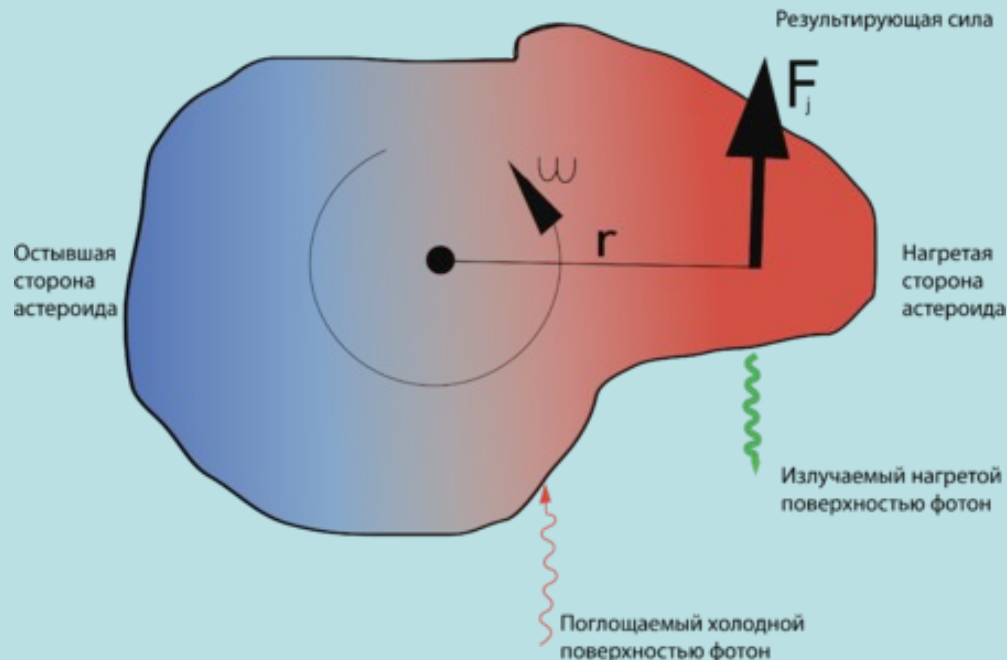
Diurno

Estacional



# Efecto YORP:

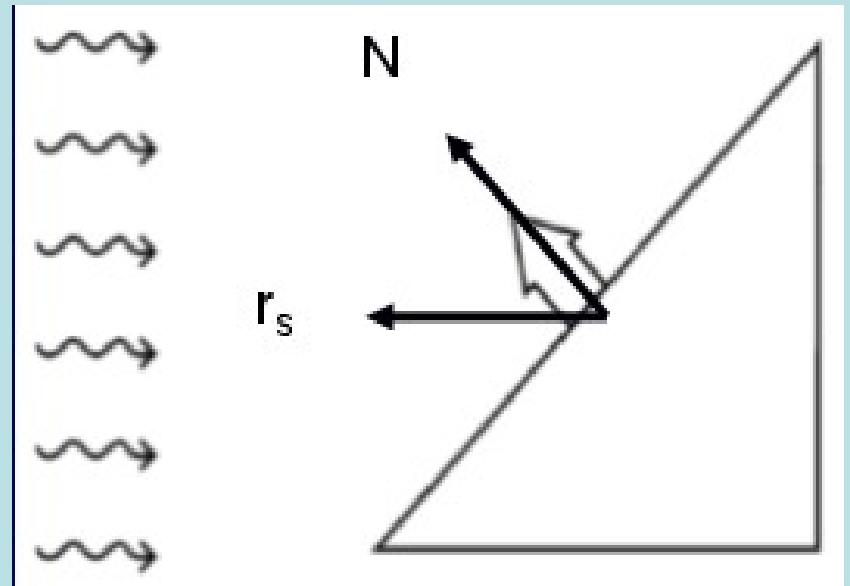
- Es la **contraparte rotacional** del efecto Yarkovsky.
- **Y**arkovsky – **O**'Keefe – **R**adzievskii – **P**addack.
- La idea es que si cada  $dA$  emite energía térmica y el objeto no tiene una figura de equilibrio, **se produce un torque** que cambia la rotación y la oblicuidad.



# Efecto YORP:

- Si  $dA$  es un elemento de superficie,  $S$  la insolación y  $F_s$  el flujo solar:

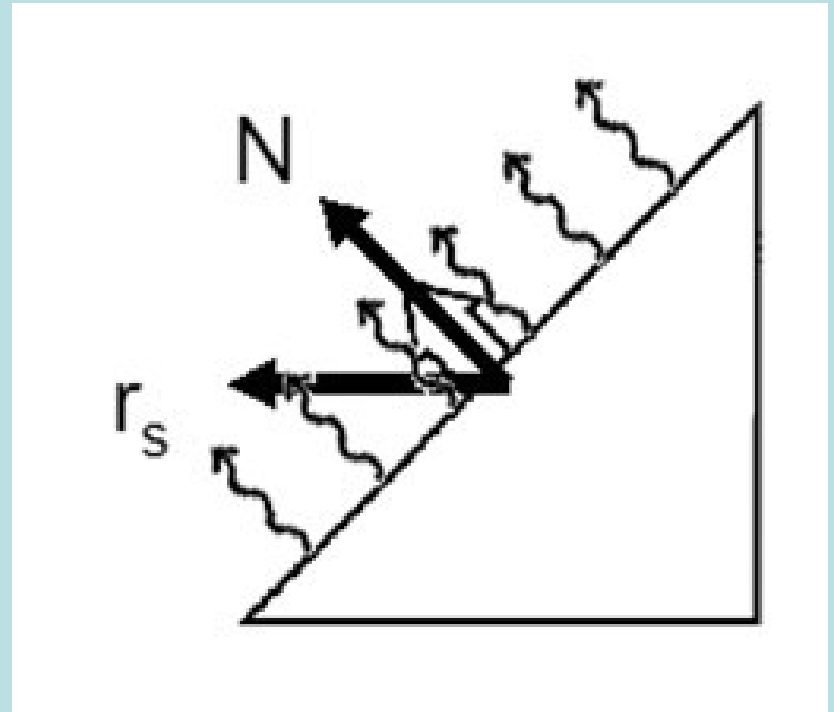
$$SdA = (\mathbf{r}_s \bullet \mathbf{N}) F_s dA$$



# Efecto YORP:

- Si la energía absorbida es re-irradiada inmediatamente, la fuerza resultante sobre  $dA$  es:

$$\mathbf{f} = -2(\mathbf{r}_s \bullet \mathbf{N}) \frac{F_s \mathbf{N}}{3c}$$



# Efecto YORP:

- Esta fuerza genera un torque:

$$d\mathbf{P} = \mathbf{r} \times \mathbf{f} dA$$

- Si  $L$  es el momento angular, tenemos que:

$$\mathbf{L} = I\omega\hat{\mathbf{u}}_A$$

$$d\mathbf{L} = \mathbf{P}$$

- que se puede escribir como:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\mathbf{P} \cdot \hat{\mathbf{u}}_A}{I}$$

$$\frac{d\hat{\mathbf{u}}_A}{dt} = \frac{\mathbf{P} - (\mathbf{P} \cdot \hat{\mathbf{u}}_A)\hat{\mathbf{u}}_A}{I\omega}$$