# Astrofísica del Sistema Solar

Fuerzas no gravitatorias

# Fuerzas no gravitatorias:

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

- 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:

$$\mathbf{F_L} = \frac{Q(\mathbf{v}\times\mathbf{B})}{c} = $$
$$= \frac{Q[(\mathbf{v_g}+\mathbf{v_{sw}})\times\mathbf{B}]}{c},$$

•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:

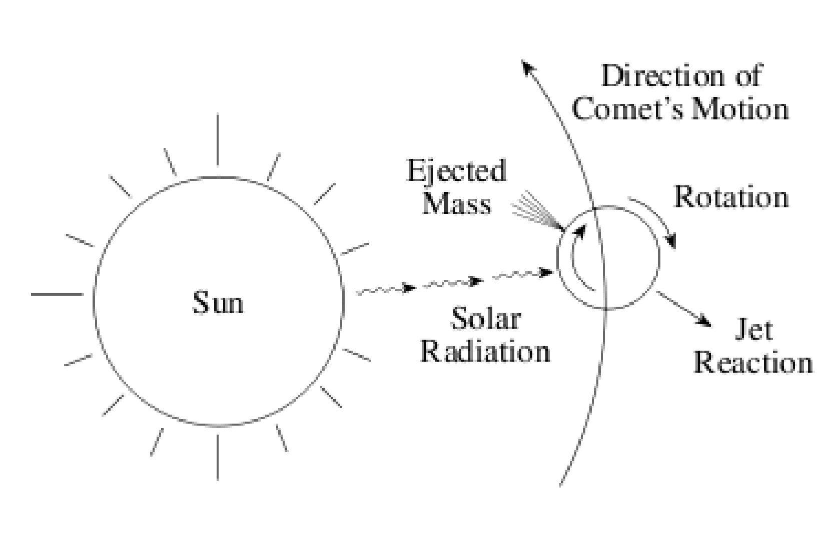
$$B_r = \pm B_{r,0} \left(\frac{r_0}{r}\right)^2$$

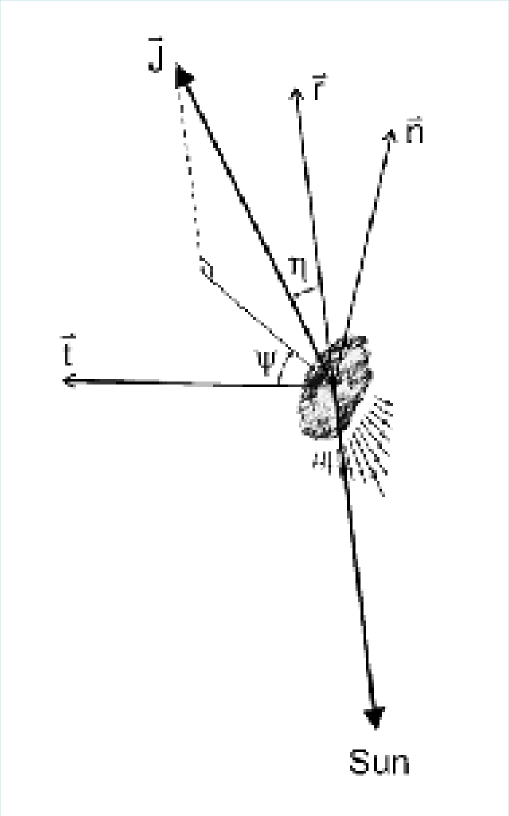
$$B_\Phi = \pm B_{\Phi,0} \frac{r_0}{r} \cos(\beta_{hg})$$

$$B_\theta = 0$$

- 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:

$$\frac{d^2\mathbf{r}}{dt^2} = -\frac{k^2\mathbf{r}}{r^3} + k^2 \sum_j m_j \left[ \frac{(\mathbf{r}_j - \mathbf{r})}{|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}|^3} - \frac{\mathbf{r}_j}{r_j^3} \right]$$

$$+ \frac{k^2}{c^2 r^3} \left[ \frac{4k^2\mathbf{r}}{r} - (\dot{\mathbf{r}} \cdot \dot{\mathbf{r}})\mathbf{r} + 4(\mathbf{r} \cdot \dot{\mathbf{r}})\dot{\mathbf{r}} \right]$$

$$+ A_1 g(r)\mathbf{r}/r + A_2 g(r)\mathbf{t} + A_3 g(r)\mathbf{n}$$

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

$\alpha$ = 0.111262
$r_0$ = 2.808 UA
m =2.15
n =5.093
k =4.6142

Yeomans et al. (1994)

# Presión de radiación:

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

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

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

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

Burns et al. (1979)

# Presión de radiación:

• La fuerza neta resultante se puede escribir como:

$$\vec{\mathbf{F_T}} = \vec{\mathbf{F_g}} + \vec{\mathbf{F_r}} = -\frac{k^2(1-\beta)\mathcal{M}m}{r^2}\hat{\mathbf{r}},$$

• 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 absorverá menos energía que si estuviera en reposo debido al efecto Doppler, y el mismo proceso se repetirá cuando la energía sea re-emitida.

# Efecto Poyting-Robertson:

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

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

• 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:

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

donde:

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

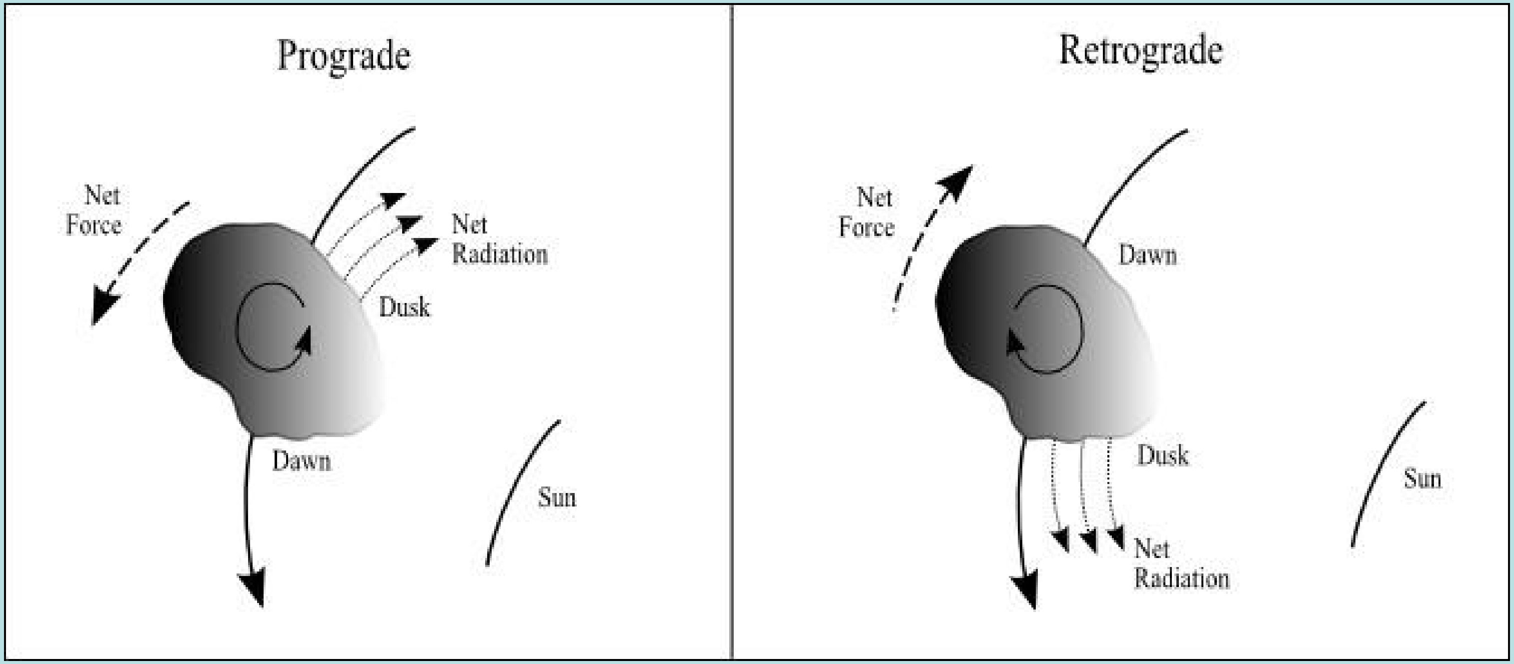
# Efecto Yarkovsky:

- 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 trasversal 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:

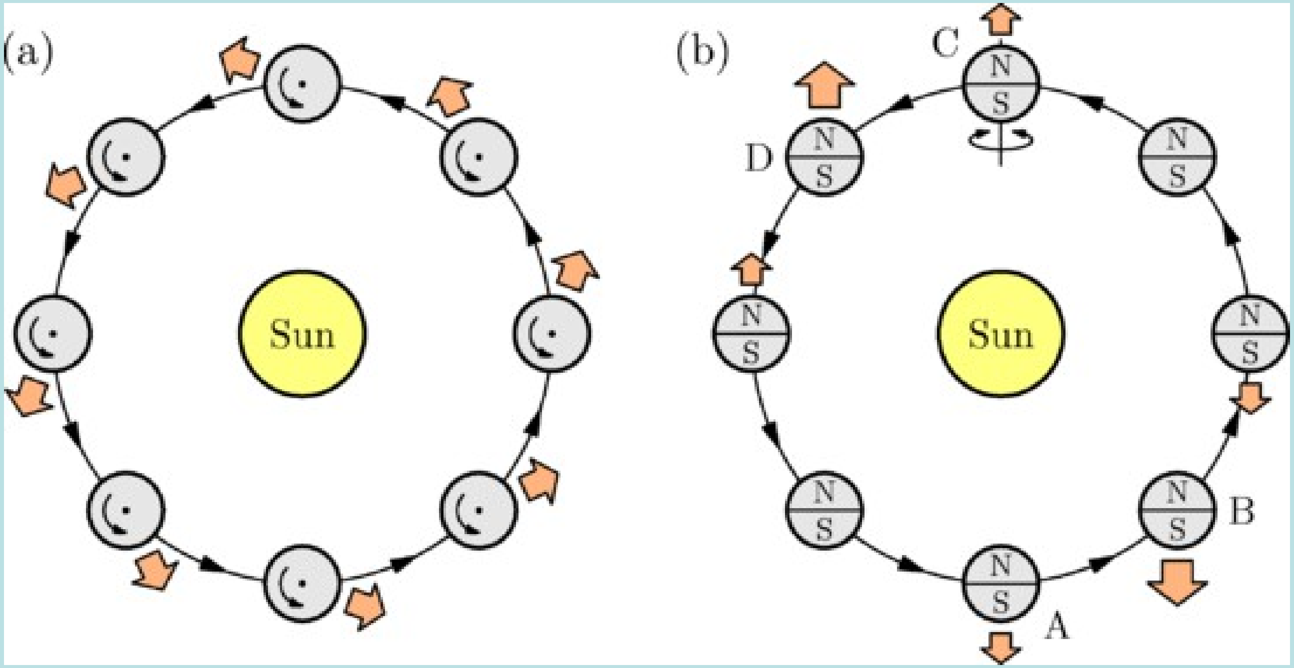
• Utilizando las ecuaciones planetarias de Lagrange en primer orden:

$$\left(\frac{\mathrm{d}a}{\mathrm{d}t}\right)_Y = \frac{2}{Mn^2a}(\mathbf{F_Y} \cdot \mathbf{v})$$

• Siendo el cambio en semieje:

$$\left(\frac{\mathrm{d}a}{\mathrm{d}t}\right)_Y \simeq 2{,}5 \times 10^{-4} \left(\frac{UA}{10^6\,yr}\right) \frac{500\,m}{s}\ \cos\psi,$$

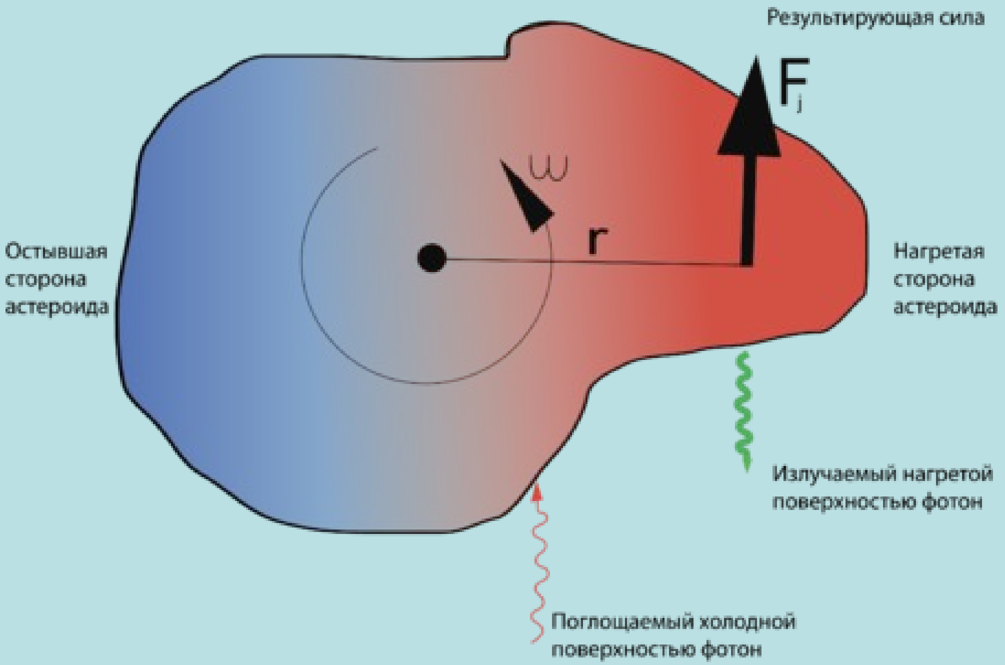
# Efecto Yarkovsky:




Diurno Estacional

# Efecto YORP:

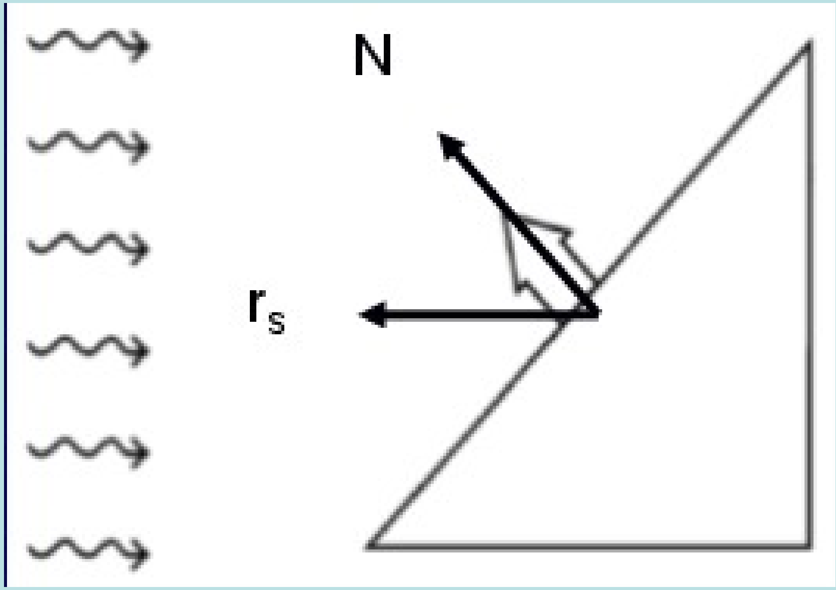
• Es la contraparte rotacional del efecto Yarkovsky.
• **Y**arkovsky – **O**’Keefe – **R**adzievskii – **P**addack.
• La idea es que si cada dA emite energía térmica y el objeto no tiene una figura de equilibrio, se produce un torque que cambia la rotación y la oblicuidad.



# Efecto YORP:

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

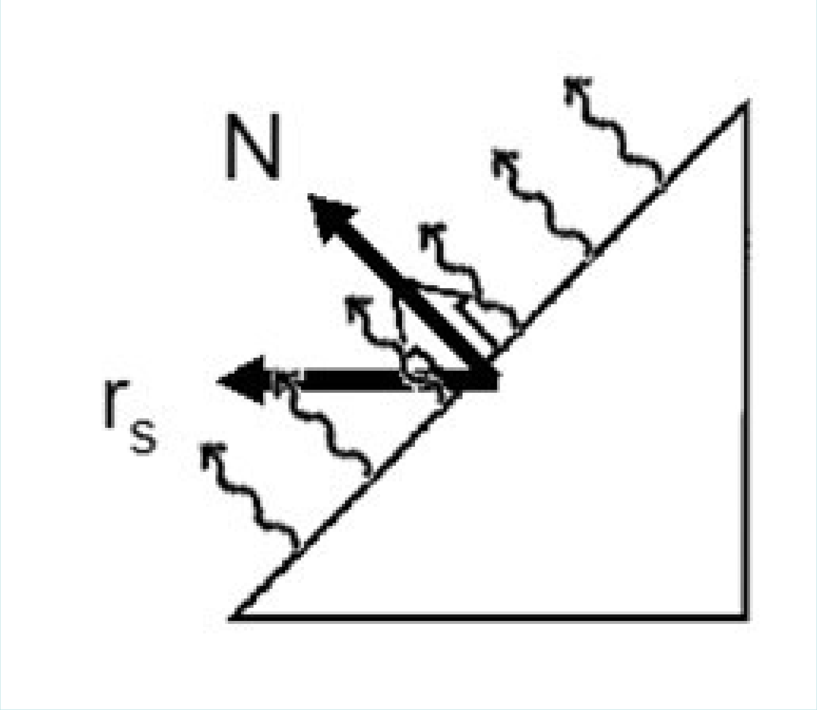
$$S dA = (\mathbf{r_s} \bullet \mathbf{N}) F_s dA$$



# Efecto YORP:

• Si la energía absorvida 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:

$$\mathbf{L} = I\omega\hat{\mathbf{u}}_{\mathbf{A}} \qquad d\mathbf{L} = \mathbf{P}$$

- que se puede escribir como:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\mathbf{P} \bullet \hat{\mathbf{u}}_{\mathbf{A}}}{I} \qquad \frac{d\hat{\mathbf{u}}_{\mathbf{A}}}{dt} = \frac{\mathbf{P} - (\mathbf{P} \bullet \hat{\mathbf{u}}_{\mathbf{A}})\hat{\mathbf{u}}_{\mathbf{A}}}{I\omega}$$