

# Astrofísica del Sistema Solar

Efectos de la Evolución Colisional:  
Tasas de rotación

# Introducción

El proceso colisional en un sistema planetario produce diferentes efectos sobre los objetos que forman las diferentes poblaciones:

- Familias de asteroides.
- Rubble-piles.
- Craterización.
- Formación de regolitos.
- **Tasas de rotación.**

# Tasas de rotación

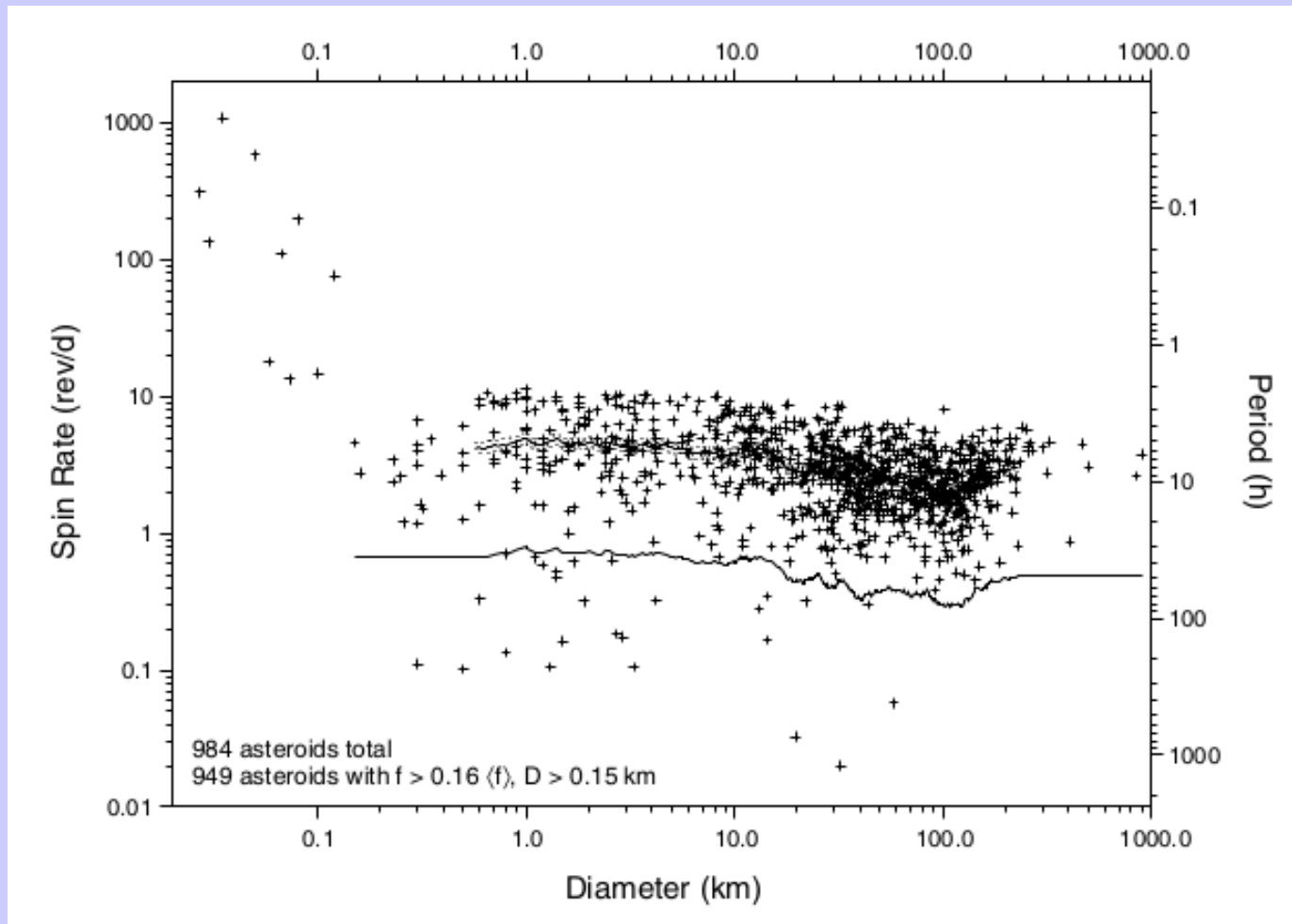
- Se asumen elipsoides triaxiales ( $a > b > c$ ) rotando alrededor del eje de mayor inercia.
- La amplitud de la curva de luz indica la relación de áreas reflectoras para una orientación dada del eje de rotación.
- El momento angular es:

$$\vec{L} = \hat{I}\vec{\omega}$$

donde  $\mathbf{I}$  es el momento de inercia,  $\vec{\omega}$  es la velocidad angular y tanto  $\mathbf{L}$  como  $\mathbf{I}$  se ven modificados por colisiones y otros procesos físicos.

- Desde Tierra no podemos medir  $\mathbf{L}$ , siendo el único observable el **período de rotación** ( $P$ ) o la **tasa de rotación** ( $f$ ).

# Tasas de rotación

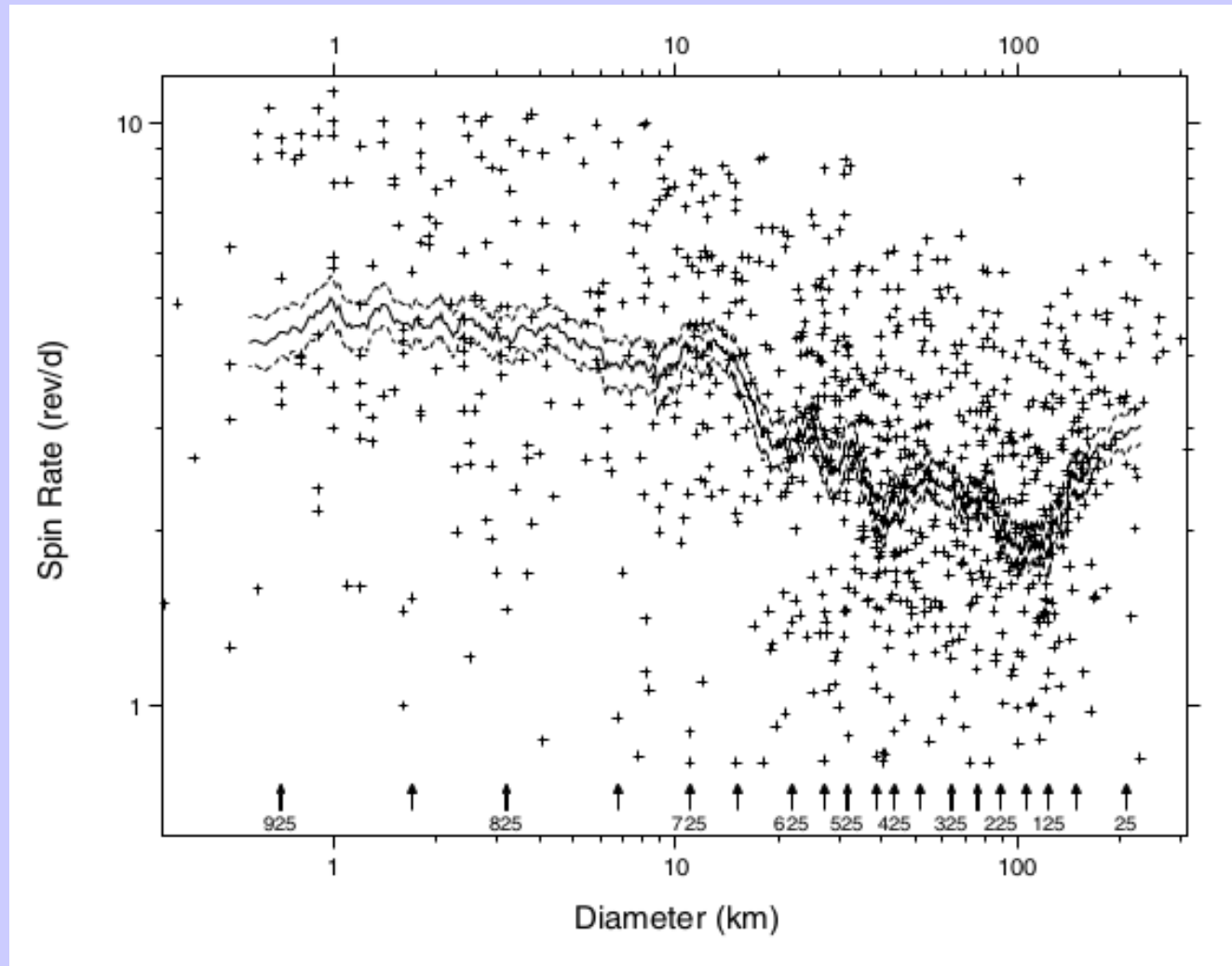


Pravec et al. (2002)

# Tasas de rotación

- Se consideran 984 asteroides con período de rotación bien determinado (cód. de calidad 2 o mayor).
- Se obtiene la media geométrica  $\langle f \rangle$  utilizando un running-box de 50 objetos (Pravec & Harris 2000), pero es posible utilizar la media aritmética sin problemas.
- Los valores medios geométricos que se obtienen son:
  - 3.0 d<sup>-1</sup> para  $D \sim 200$  km
  - 1.8 d<sup>-1</sup> cuando se baja a  $D \sim 100$  km
  - 4.0 d<sup>-1</sup> cuando se alcanza  $D \sim 10$  km.

# Tasas de rotación



Pravec et al. (2002)

# Tasas de rotación

- Sólo el mínimo en  $D \sim 40$  km es significativo para  $\sim 3\sigma$
- El mínimo en  $D \sim 100$  km se puede deber al drenaje de momento angular propuesto por Dobrovolskis & Burns (1984) en donde los fragmentos que escapan en la dirección de rotación se llevan cierto momento angular.
- Por debajo de  $f \sim 0.16 \langle f \rangle$  se consideran **rotadores lentos**.

# Tasas de rotación

- Como  $\omega$  es un vector, su distribución se obtiene combinando las distribuciones de sus tres componentes (distr. Normales), lo que resulta en una distribución maxwelliana:

$$n(f) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{N f^2}{\sigma^3} \exp\left(\frac{-f^2}{2\sigma^2}\right),$$

donde  $n(f) df$  es el número de objetos con tasas de rotación en el intervalo  $(f, f+df)$ . El valor medio y la desviación standard están relacionados por:

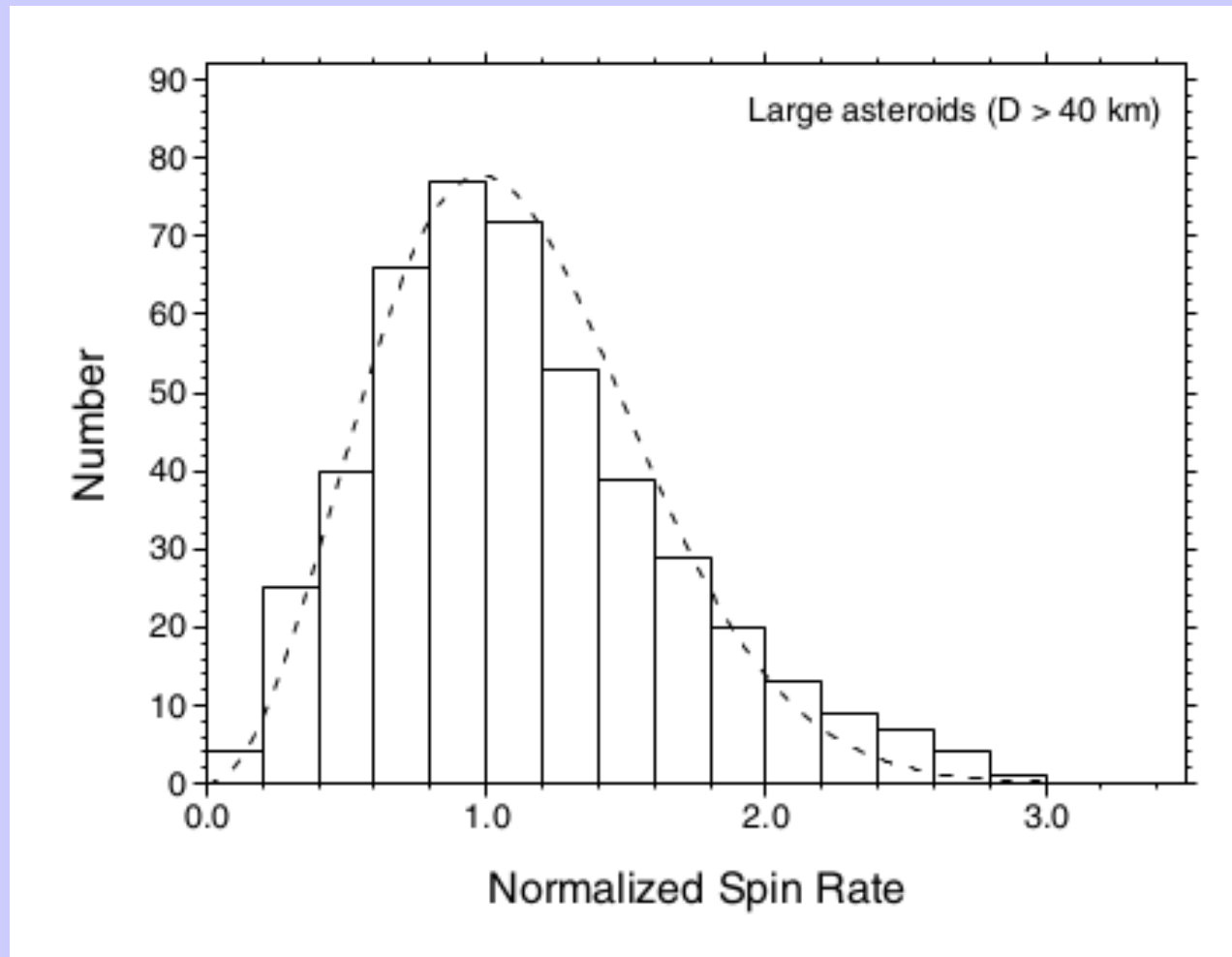
$$\bar{f} = \sqrt{\frac{8}{\pi}}\sigma, \quad \langle f \rangle = 1.440\sigma.$$



# Tasas de rotación

- Usualmente se compara un histograma de tasas de rotación (normalizadas con  $\langle f \rangle$  para el rango de  $D$ ) con una distribución maxwelliana.
- La normalización resuelve el problema de dispersión para diferentes tamaños.
- Si la distribución es próxima a una maxwelliana indica que esta relajada colisionalmente.
- Es de esperar que la distribución real se aparte de una maxwelliana debido a inhomogeneidades de la población (composición, porosidad, masas, etc.).

# Tasas de rotación

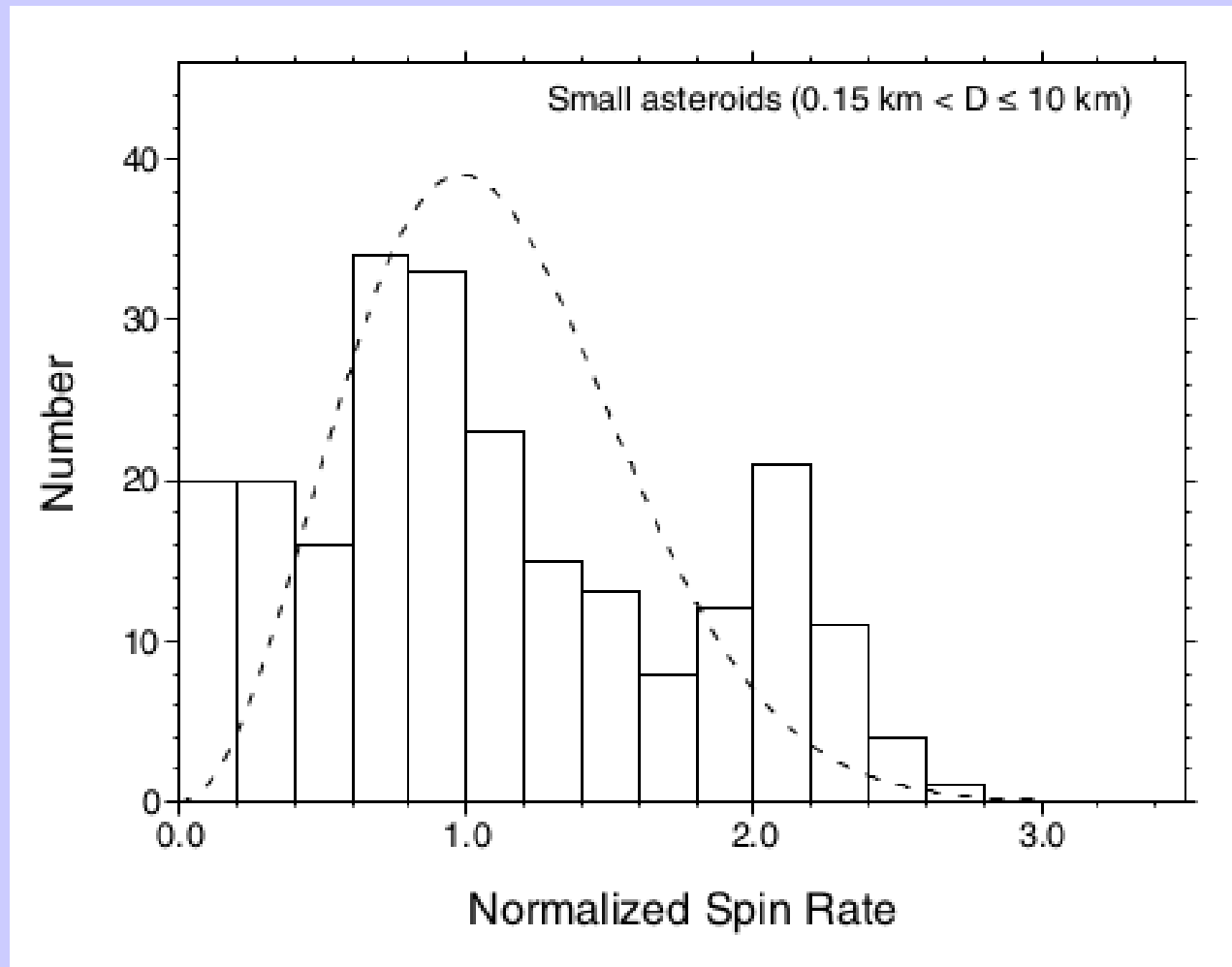


Pravec et al. (2002)

# Tasas de rotación

- Para los objetos grandes la distribución es marginalmente diferente a una maxwelliana (al 95% pero no al 99%) por el exceso de rotadores rápidos.
- Este exceso se debe a objetos de tipo taxonómico M, aunque no se conoce una explicación razonable. Una teoría para explicar las tasas de rotación propuesta por Harris (1979) indicaría que puede deberse a diferencias en la densidad media de los objetos.
- En general, los resultados indican que los objetos con  $D > 40$  km son primordiales o sus remanentes relajados colisionalmente.

# Tasas de rotación

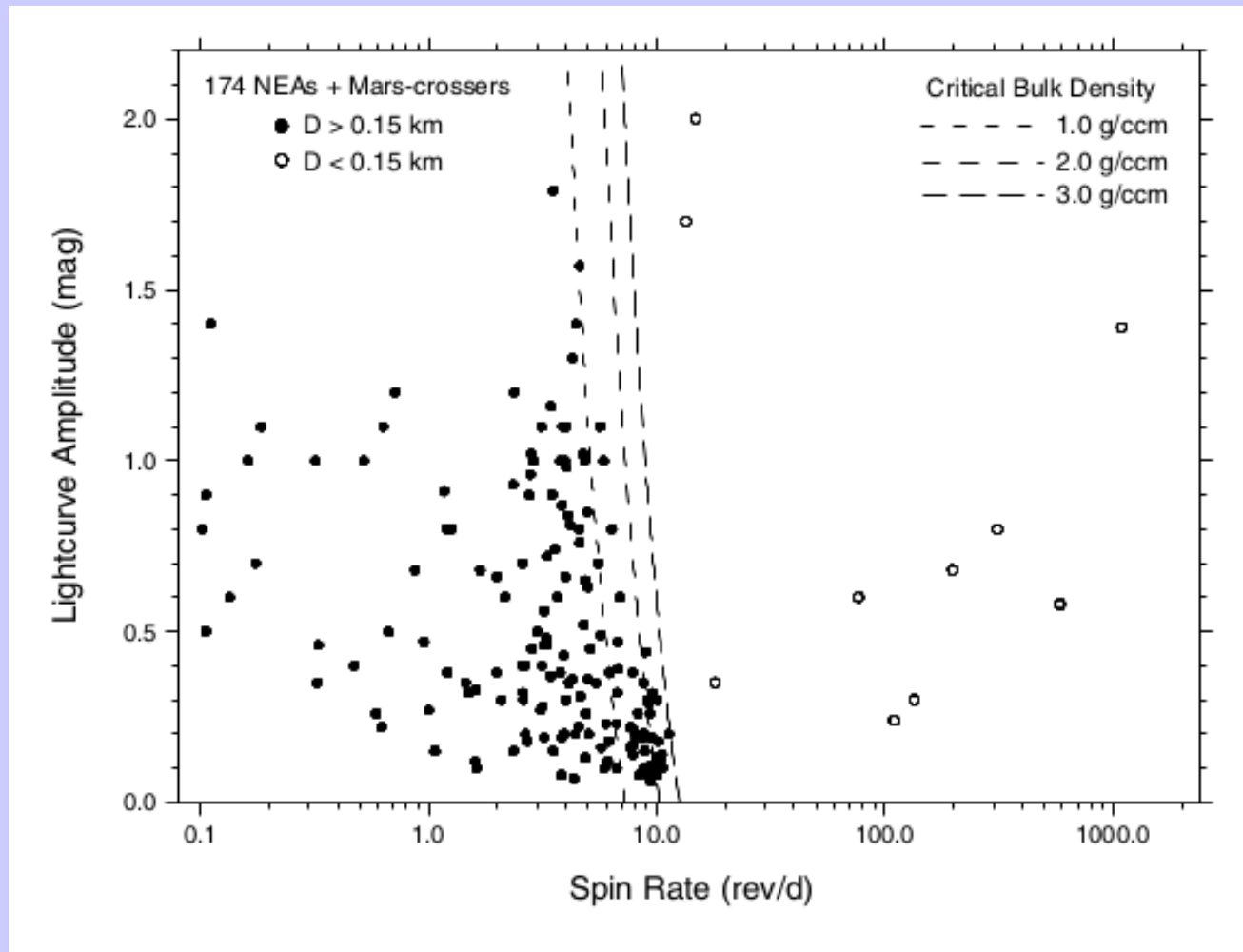


Pravec et al. (2002)

# Tasas de rotación

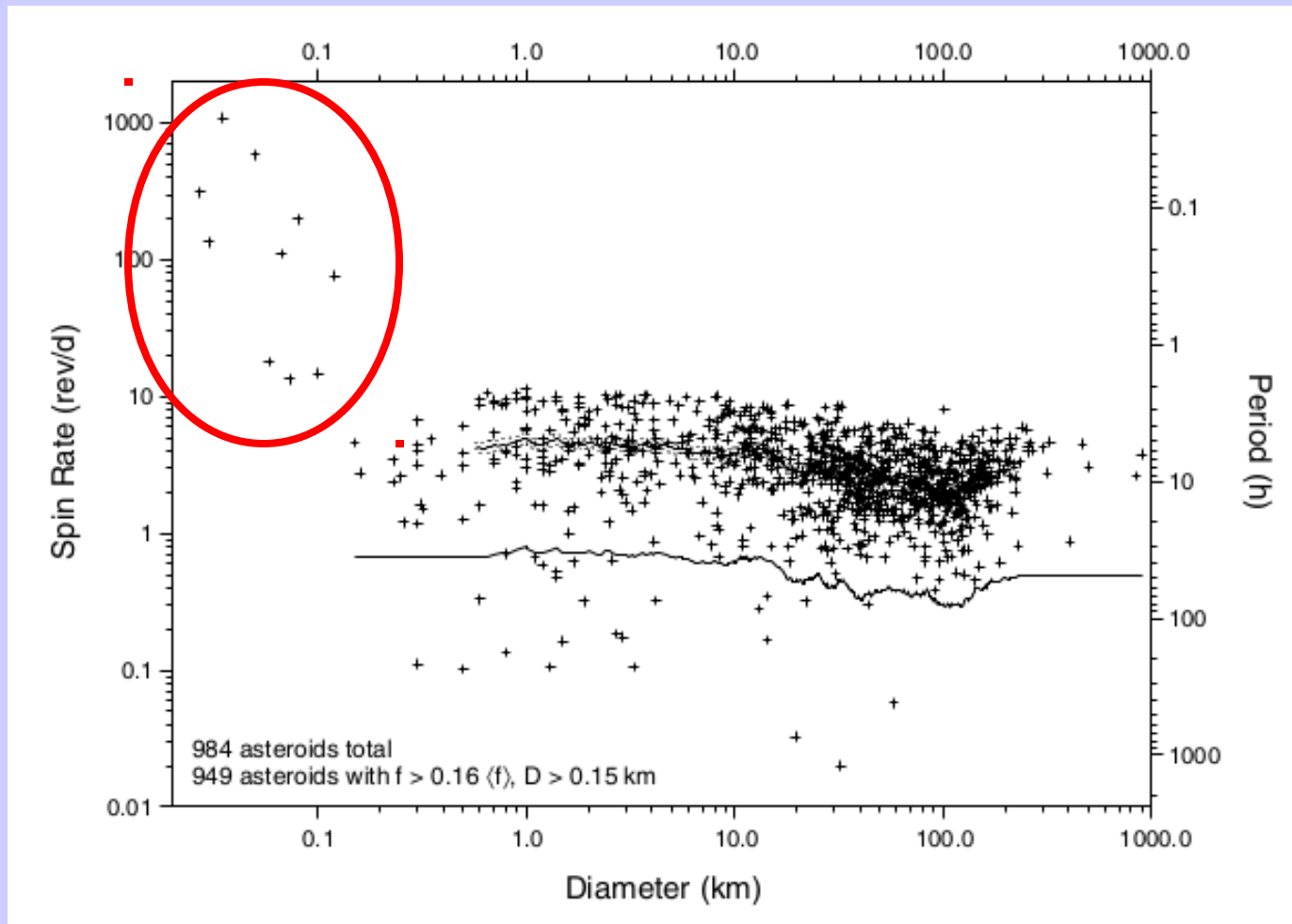
- Los objetos con  $10 < D < 40$  km no se analizan por ser un rango de tamaños donde  $\langle f \rangle$  cambia significativamente.
- La distribución para objetos con  $0.15 < D < 10$  km es claramente no-maxwelliana existiendo excesos de rotadores rápidos y lentos.
- Estudios previos (Fulchignoni et al. 1995) intentaron ajustar la distribución con 2 maxwellianas pero el ajuste no es bueno.
- Para los objetos con  $1 < D < 10$  km parecería que existe un límite en  $f = 12 \text{ d}^{-1}$ . Más allá de este límite pueden ser monolíticos.
- Para rotadores muy rápidos ( $f > 6 \text{ d}^{-1}$ ) los objetos tienden a una forma esferoidal indicando que son agregados gravitatorios casi sin resistencia a la tensión.

# Tasas de rotación



Pravec et al. (2002)

# Tasas de rotación



Pravec et al. (2002)

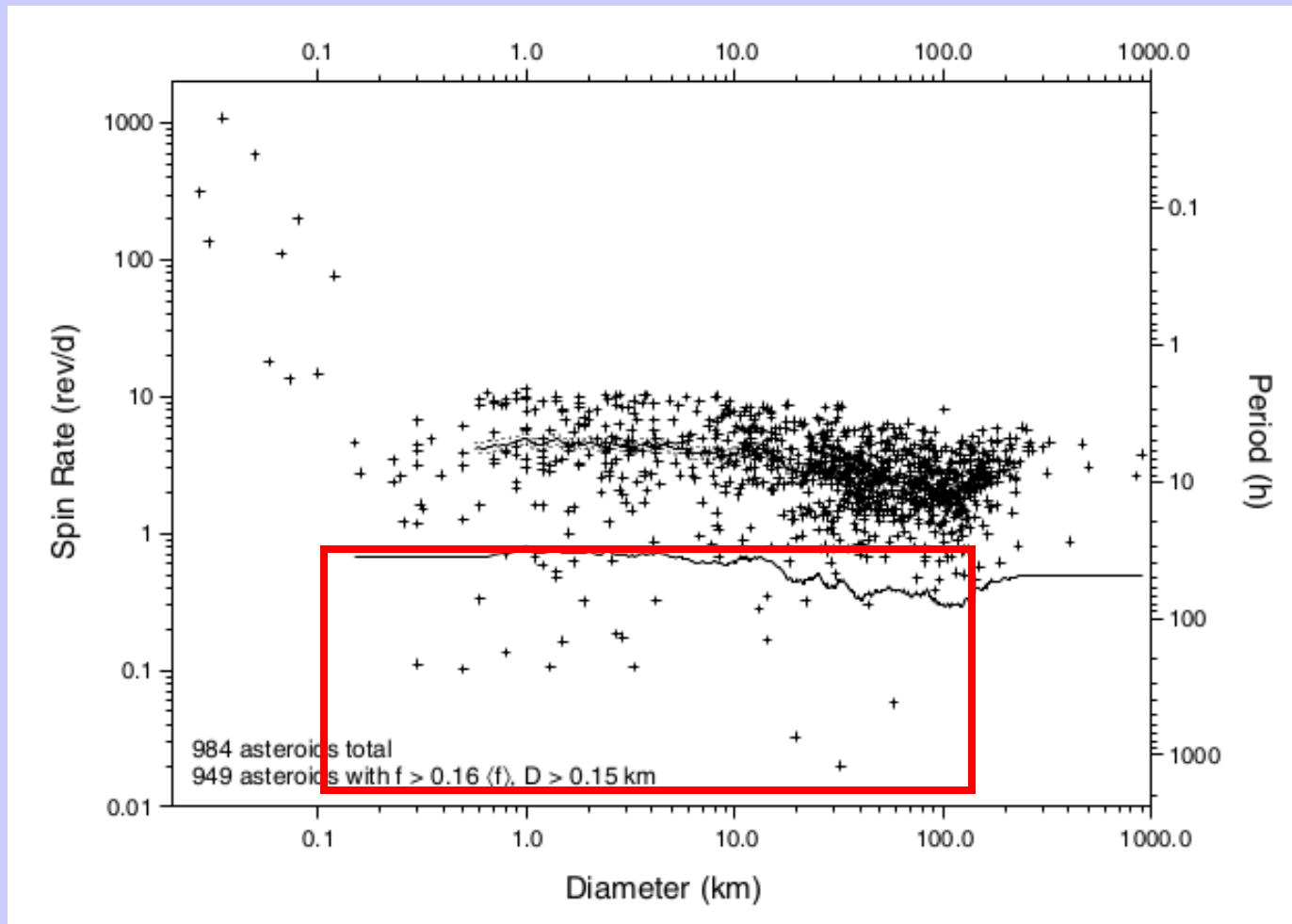
# Tasas de rotación

- Los objetos con  $D < 0.15$  km rotan con períodos menores a las 2 hs.
- Su estado de tensión no se puede sostener por gravedad y requiere cierta resistencia. Posiblemente sean monolíticos:
  - 1950 DA tiene  $D = 1$  km,  $\rho > 2.9$  g cm<sup>-3</sup> y  $P = 2.15$  hs.
  - 2001 OE84 tiene  $D \sim 0.9$  km y  $P = 29.19$  min.
  - 200 DO8 tiene  $D \sim 80$  m y  $P = 1.3$  min.
- El período de rotación límite se encuentra igualando las aceleraciones centrífuga y gravitatoria:

$$\frac{Gm}{r^2} = \omega_c^2 r \implies P_c = \frac{3.3 \text{ h}}{\sqrt{\rho}}, \quad (\text{unidades cgs})$$



# Tasas de rotación



Pravec et al. (2002)

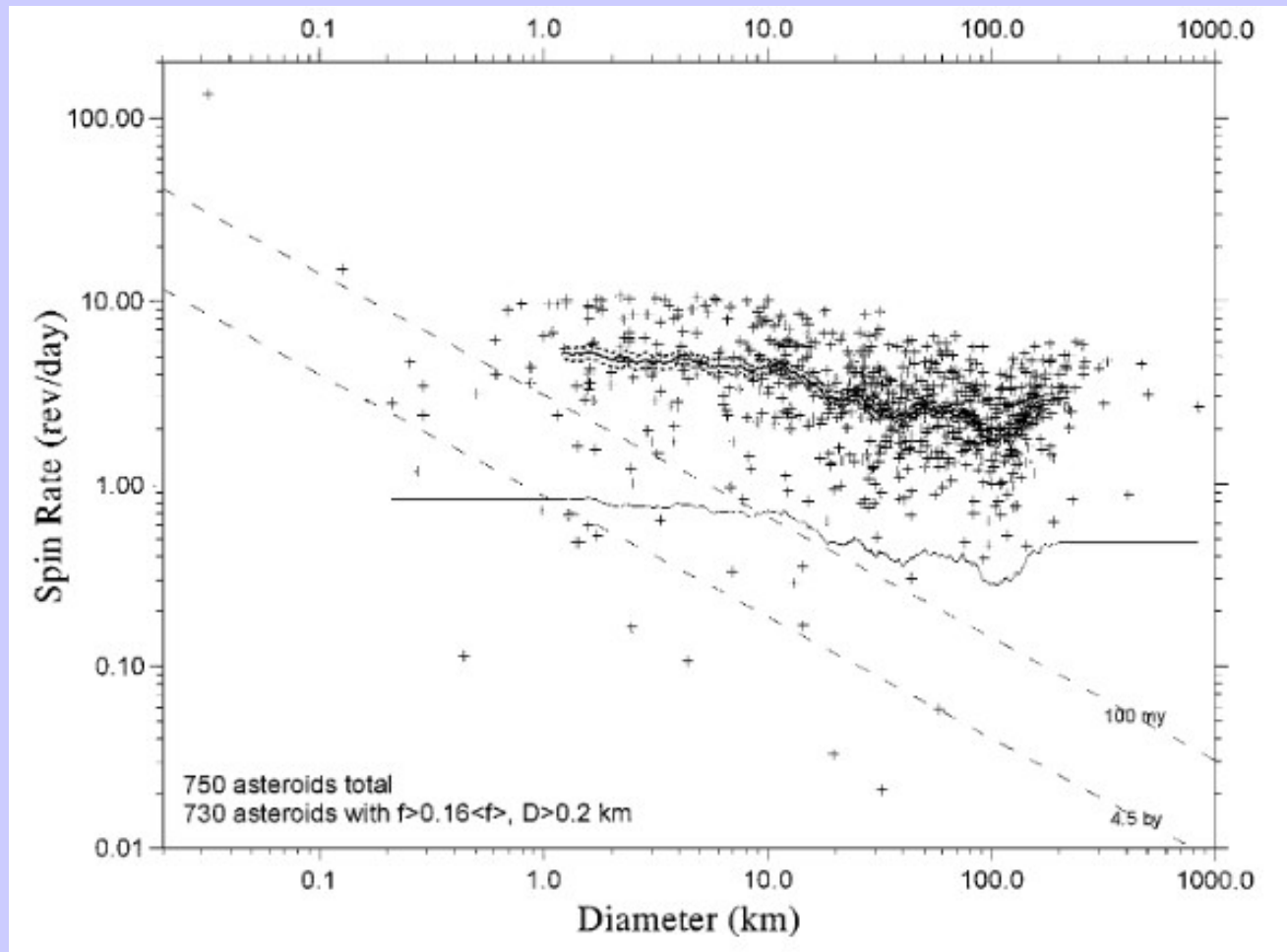
# Tasas de rotación

- No hay explicación única para los rotadores lentos debido a sus diferencias en tamaños, composición y tasas de rotación.
- Se han propuesto diferentes mecanismos:
  - presión de radiación (Rubincam 2000)
  - desgasificación de núcleos cometarios
  - fuerzas tidales al acercarse a planetas (Scheeres et al. 2000)
  - evolución tidal de binarios (Weidenschilling 1989)
  - desintegración de binarios con masas 1:5 (Harris 2002)
  - objetos en estado de precesión (Harris 1994)

# Tasas de rotación

- Cuando un objeto recibe una colisión sufre variaciones de gran amplitud respecto a una rotación alrededor del mayor eje de inercia.
- La rotación se vuelve irregular y compleja debido a la variación del momento angular.
- La curva de luz puede aparecer como “quasi-periódica” pero con más de una frecuencia fundamental que no son constantes.
- Si hay disipación de energía interna estos estados de excitación se amortiguan a un estado de rotación constante alrededor del eje de máximo momento de inercia.
- La escala de tiempo para este proceso es (Burns & Safronov 1973)  $\tau \sim \mu Q / (\rho K^2 r^2 \omega^3)$ .

# Tasas de rotación



Pravec & Harris (2000)

# Ejes de rotación

- Se asumen elipsoides triaxiales ( $a > b > c$ ) rotando alrededor del eje de mayor inercia, con ángulo de aspecto  $\varphi$  y fase de rotación  $\theta$ .
- La sección que presenta al observador es:

$$S = \pi(abc) \left[ \sin^2 \phi \left( \frac{\sin^2 \theta}{a^2} + \frac{\cos^2 \theta}{b^2} \right) + \frac{\cos^2 \phi}{c^2} \right]^{1/2}$$

- El máximo y mínimo se produce para  $\varphi$  0 o 90 grados:

$$S_{max} = \pi(abc) \left[ \frac{\sin^2 \phi}{b^2} + \frac{\cos^2 \phi}{c^2} \right]^{1/2}, \theta = 0^\circ$$

$$S_{min} = \pi(abc) \left[ \frac{\sin^2 \phi}{a^2} + \frac{\cos^2 \phi}{c^2} \right]^{1/2}, \theta = 90^\circ$$

# Ejes de rotación

- El brillo  $I_\theta$  para una cierta fase de rotación será proporcional al área de la sección en ese instante.
- Si se introducen dos variables nuevas:

$$y = I_\theta^2 \quad x = \cos^2 \theta$$

podemos escribir:

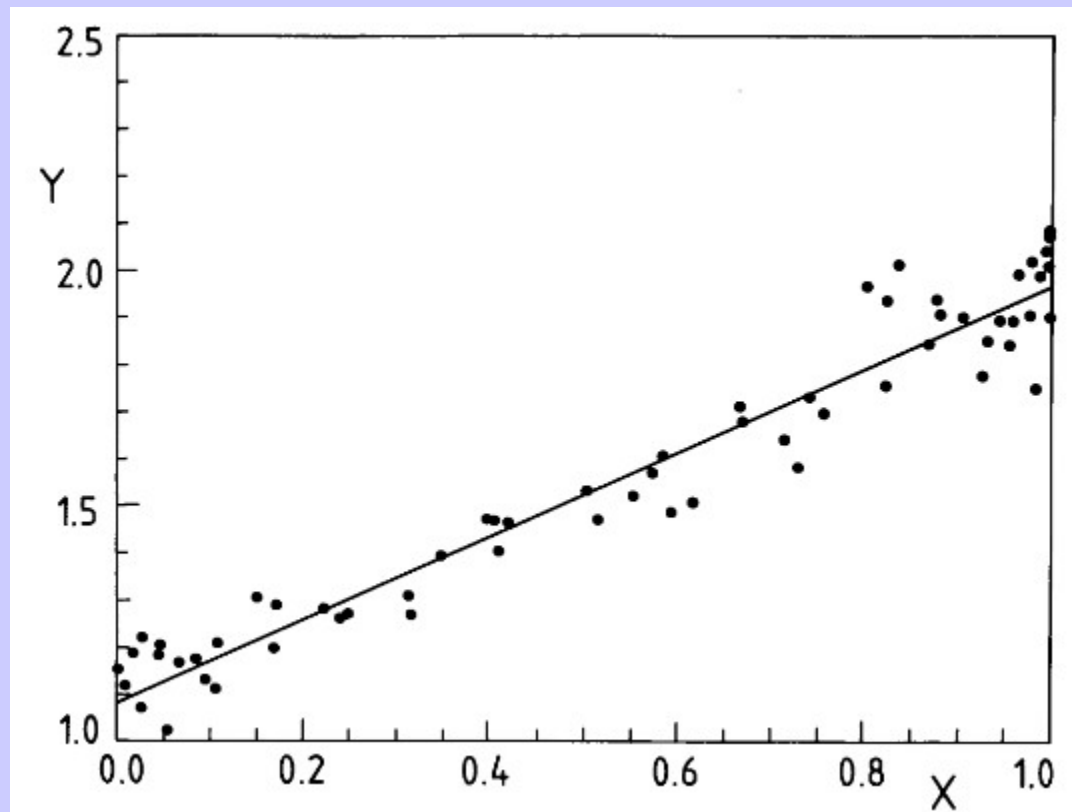
$$y = Bx + C$$

donde:

$$D = \frac{B}{C} = \frac{(1 - \cos^2 \phi) \left( \frac{a^2}{b^2} - 1 \right)}{(1 + \cos^2 \phi) \left( \frac{a^2}{c^2} - 1 \right)}$$

# Ejes de rotación

- (624) Hector observado el 7 de Marzo de 1967 (Dunlap & Gehrels 1969).  $D = B/C = 0.814$



Pospieszalska – Surdej & Surdej (1985)

# Ejes de rotación

- Si definimos las cantidades:

$$\gamma = \left(\frac{a}{b}\right)^2 \quad \delta = \left(\frac{a}{c}\right)^2$$

Para un objeto en coordenadas eclípticas  $\lambda_i$  y  $\beta_i$  en un instante  $t_i$  para las coordenadas del polo  $\lambda_0$  y  $\beta_0$ , tenemos que:

$$0 = \sin \beta_i \sin \beta_0 + \cos \beta_i \cos \beta_0 \cos(\lambda_i - \lambda_0) + \\ + \operatorname{sgn}(\cos \phi) \left[ \frac{(\gamma-1)-D_i}{D_i(\delta-1)+(\gamma-1)} \right]^{1/2}$$

**Método de Amplitud - Aspecto**



# **Ejes de rotación**