

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

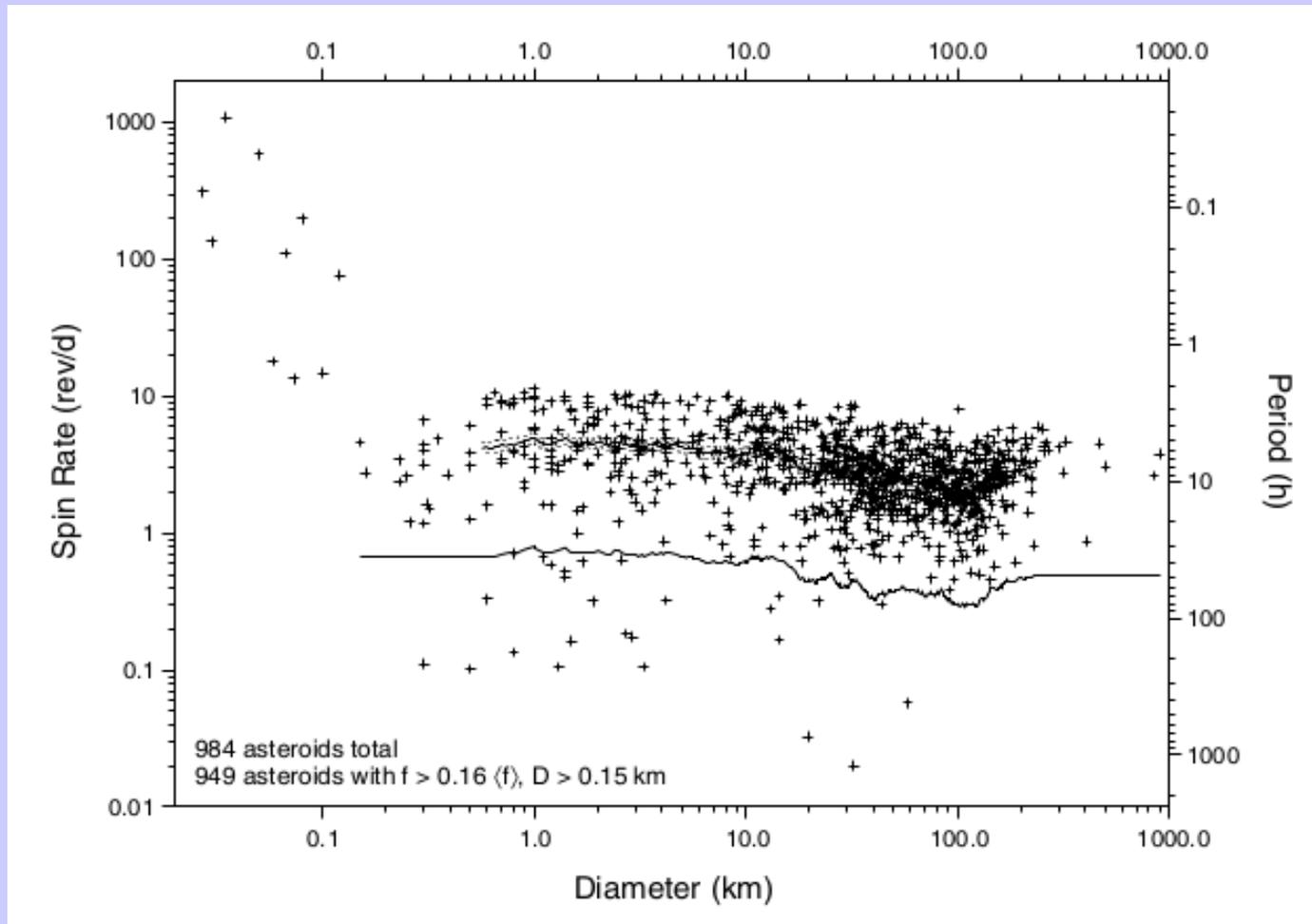
- Se asumen elipsoides triaxiales ($a > b > c$) rotando alrededor del eje de mayor inercia.
- La amplitud de la curva de luz indica la relación de áreas reflectoras para una orientación dada del eje de rotación.
- El momento angular es:

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

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

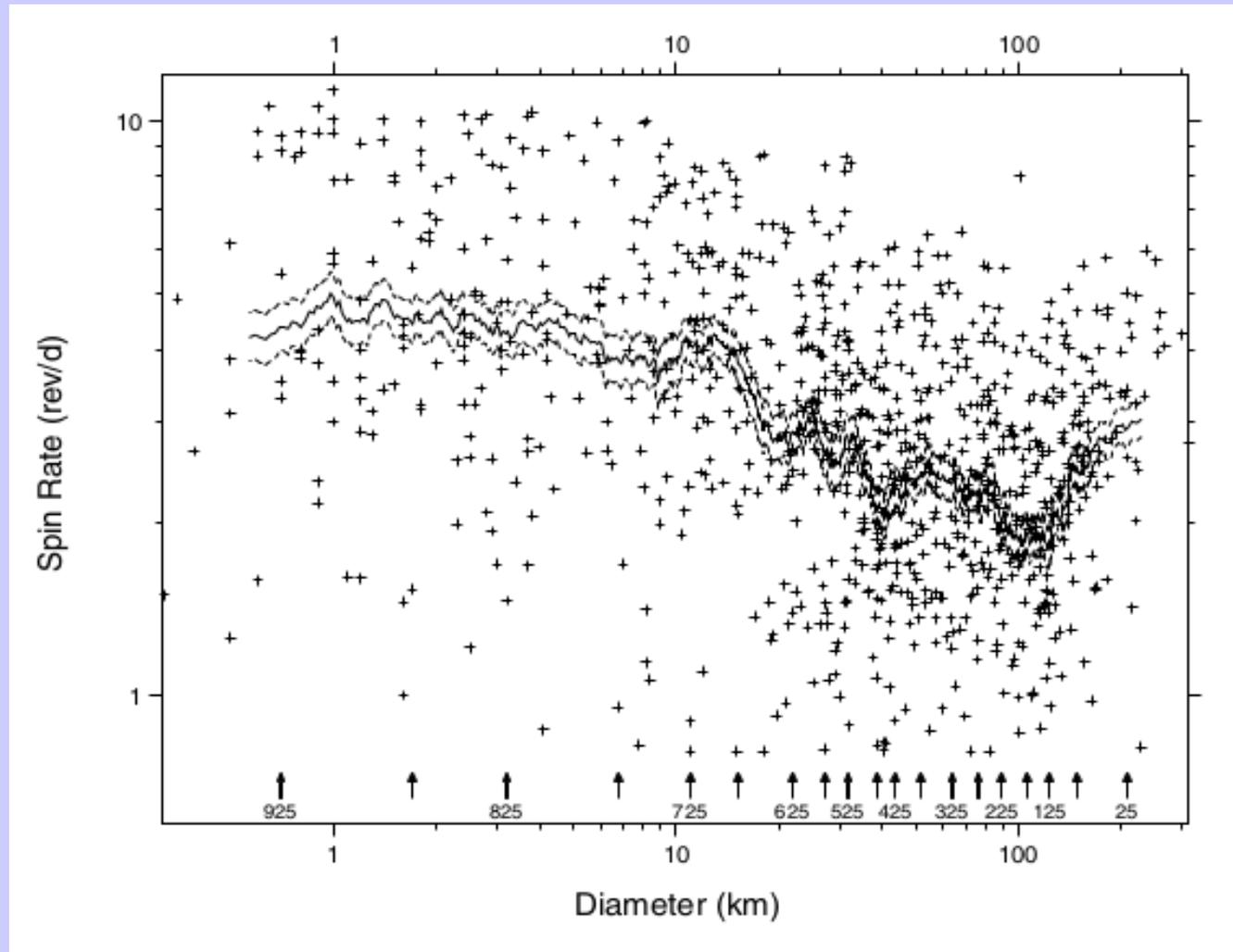


Pravec et al. (2002)

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⁻¹ para $D \sim 200$ km
 - 1.8 d⁻¹ cuando se baja a $D \sim 100$ km
 - 4.0 d⁻¹ 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 ω es un vector, su distribución se obtiene combinando las distribuciones de sus tres componentes (distr. Normales), lo que resulta en una distribución maxwelliana:

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

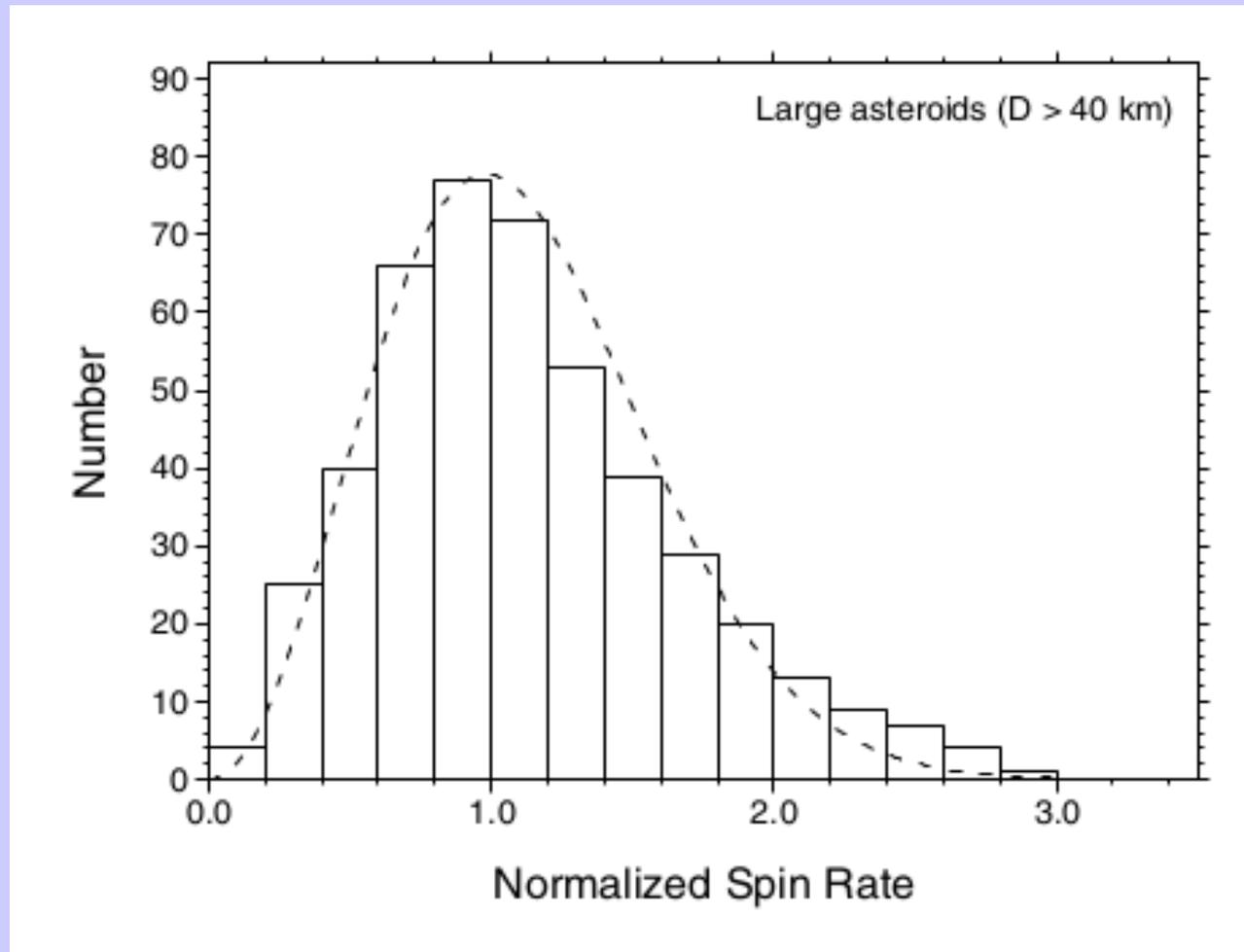
donde $n(f) df$ es el número de objetos con tasas de rotación en el intervalo $(f, f+df)$. El valor medio y la desviación standard están relacionados por:

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

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

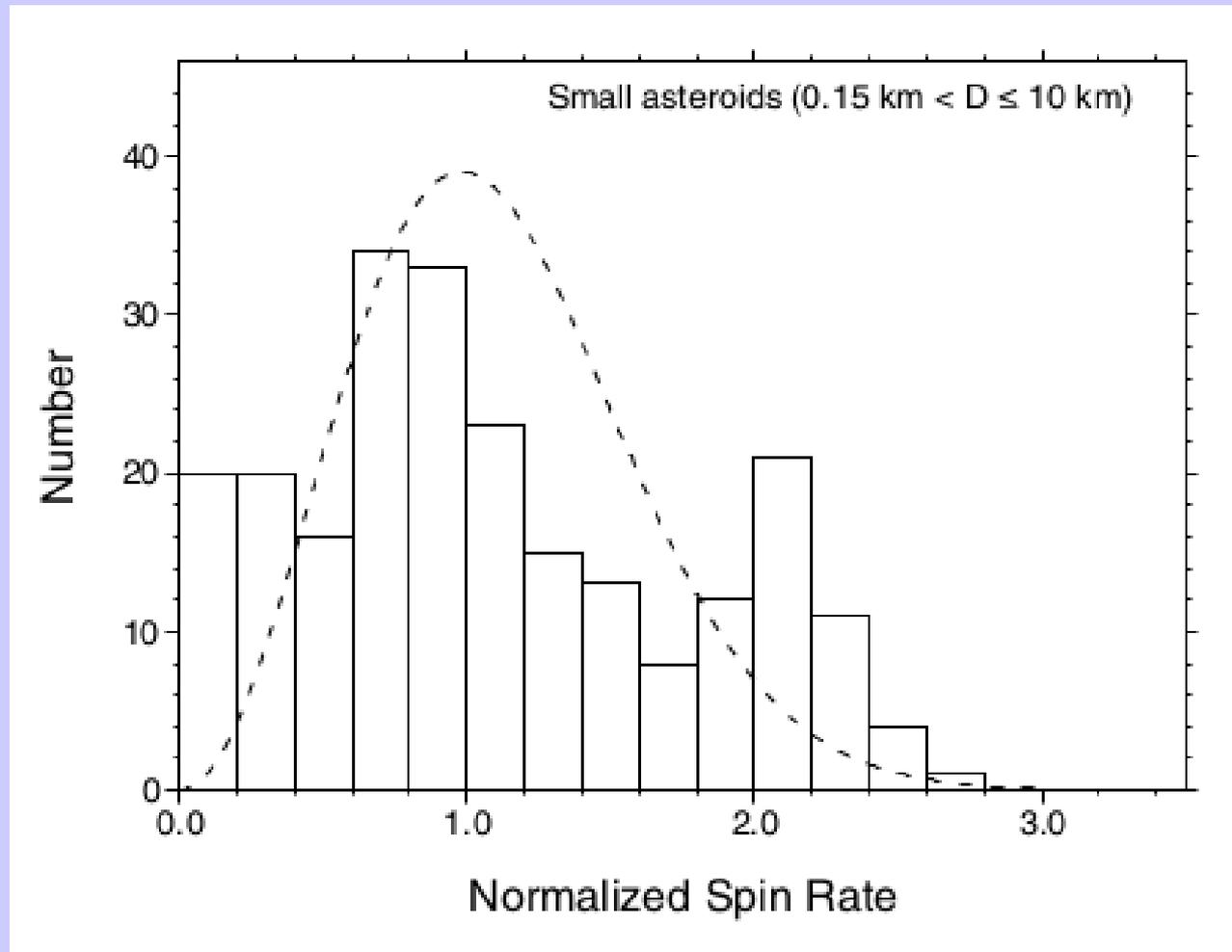


Pravec et al. (2002)

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

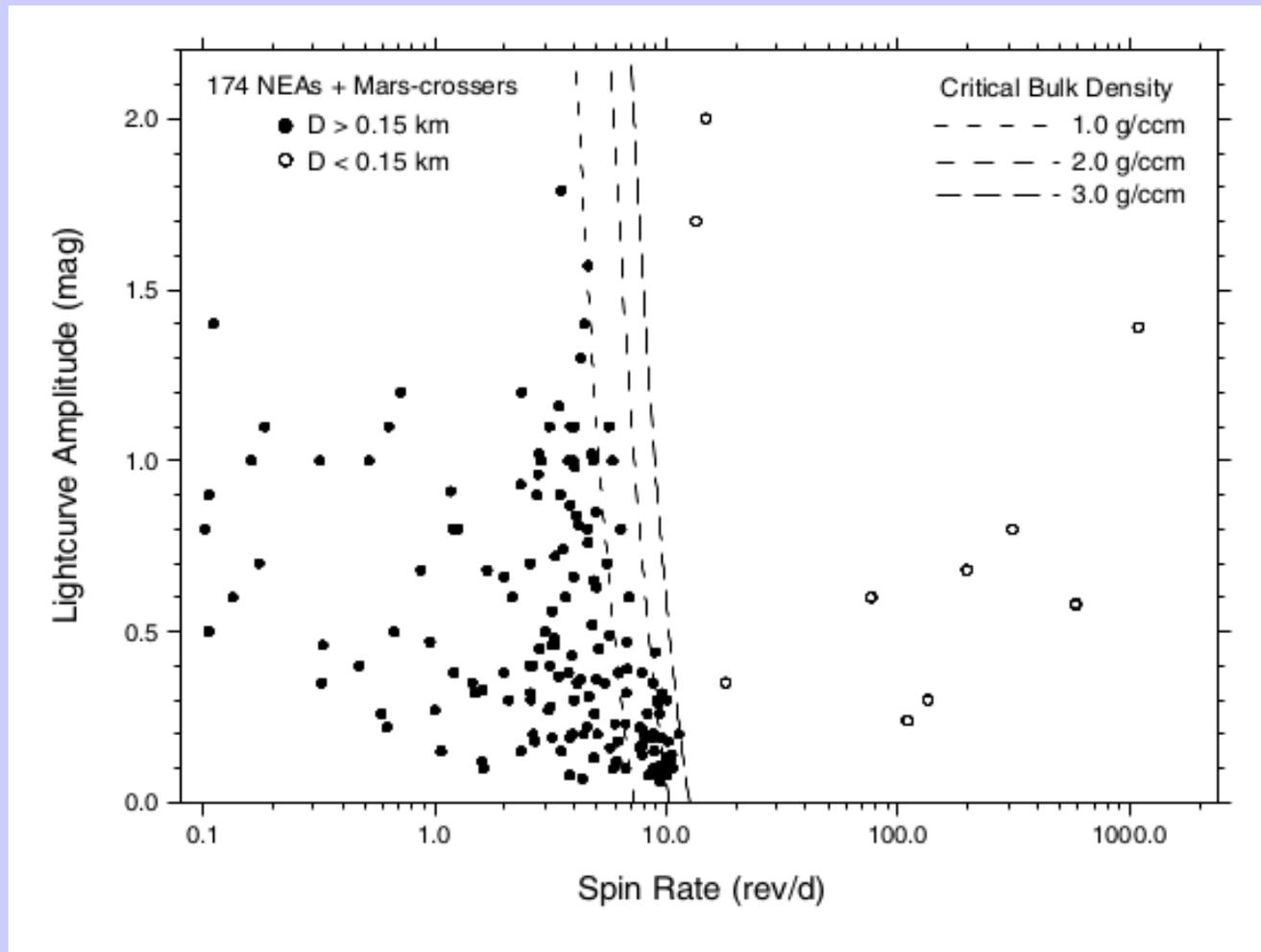


Pravec et al. (2002)

Tasas de rotación

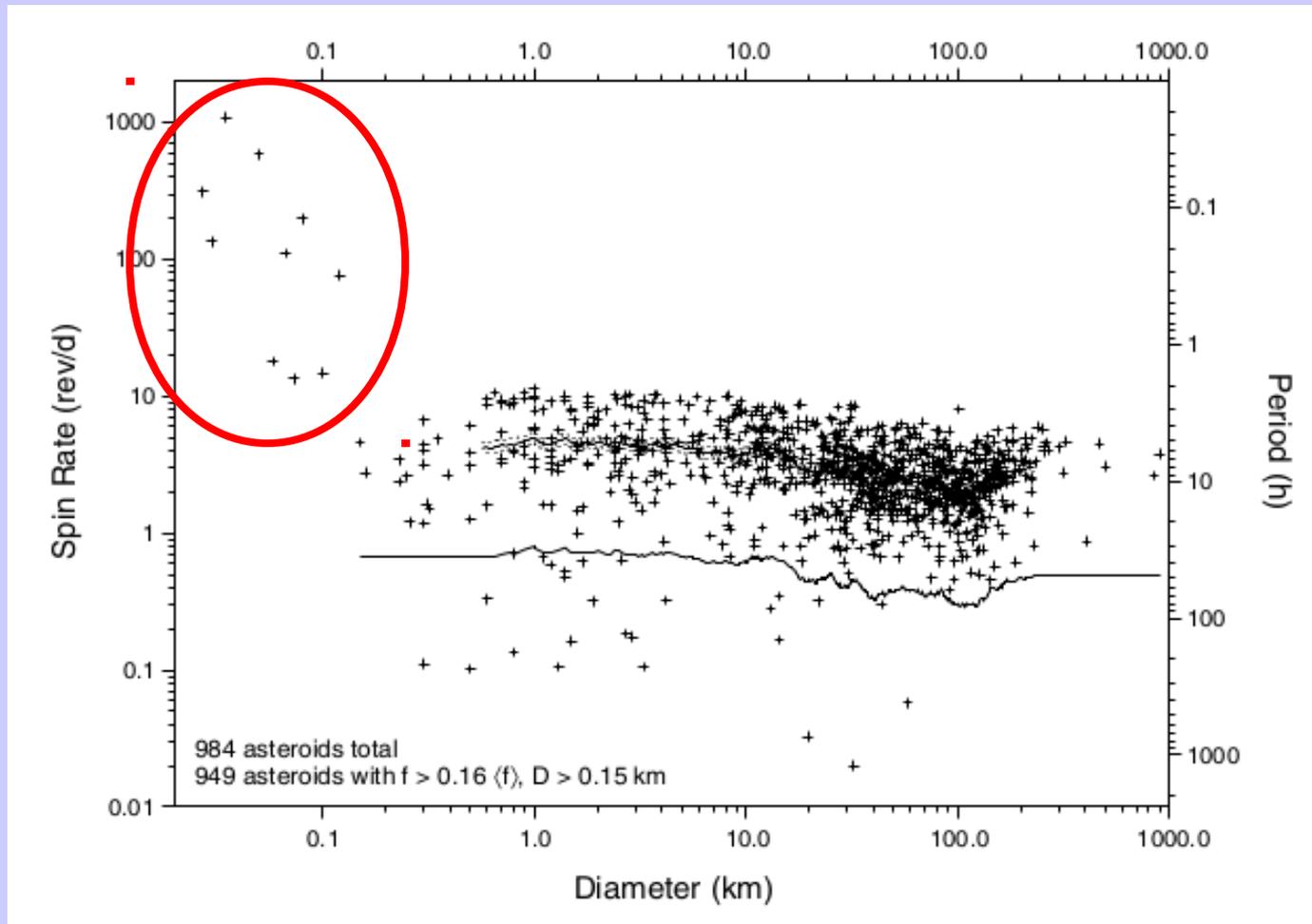
- Los objetos con $10 < D < 40$ km no se analizan por ser un rango de tamaños donde $\langle f \rangle$ cambia significativamente.
- La distribución para objetos con $0.15 < D < 10$ km es claramente no-maxwelliana existiendo excesos de rotadores rápidos y lentos.
- Estudios previos (Fulchignoni et al. 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



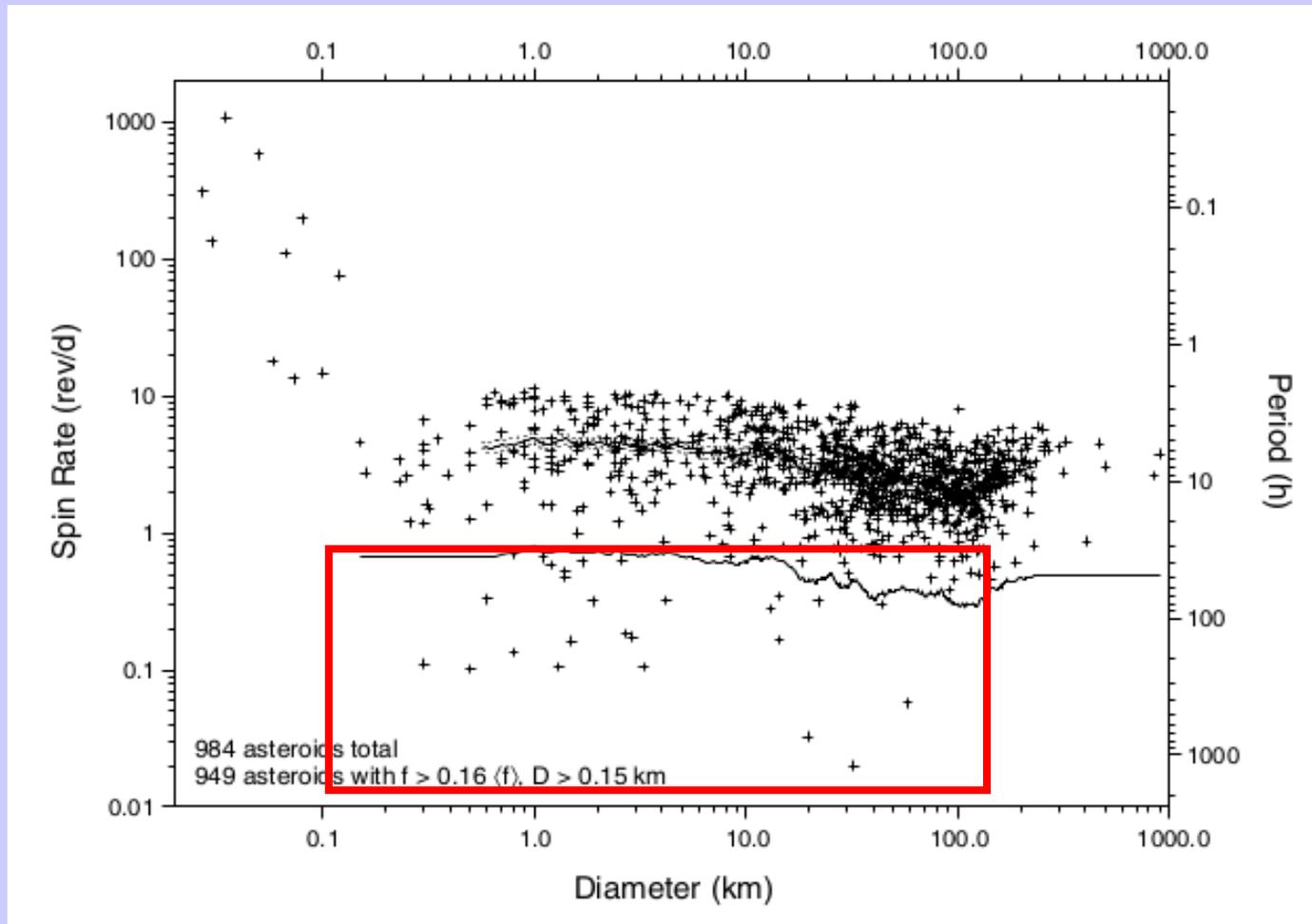
Pravec et al. (2002)

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⁻³ 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)

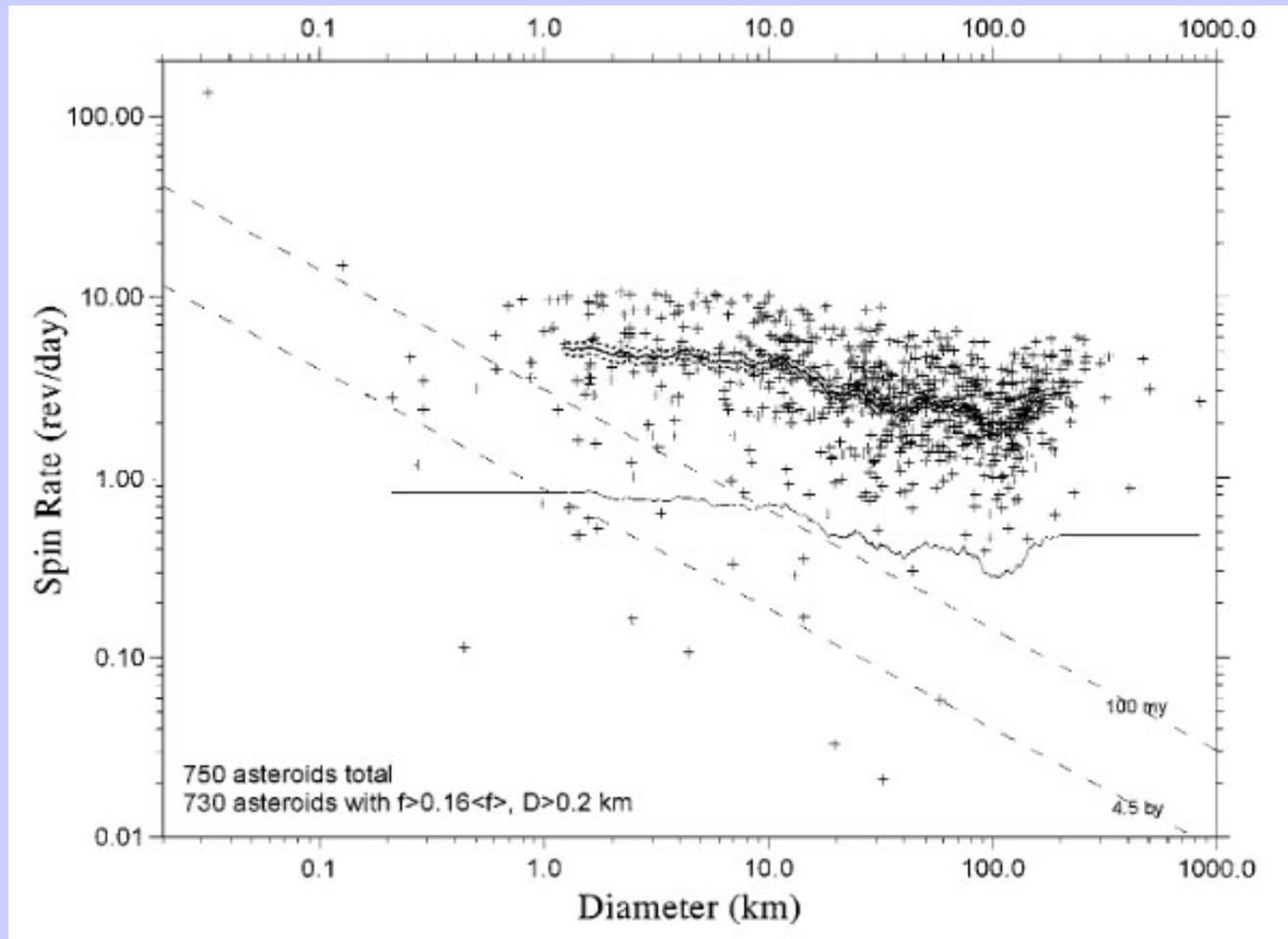
Tasas de rotación

- 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 φ y fase de rotación θ .
- 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 φ 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_θ 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:

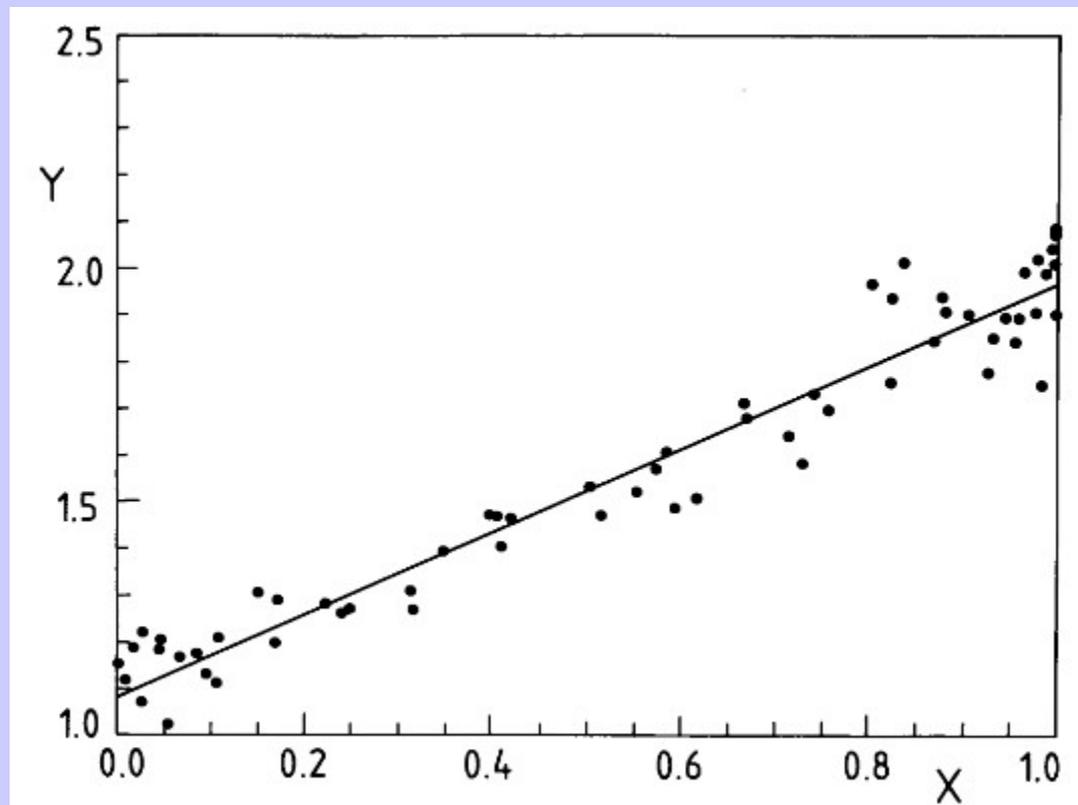
$$y = Bx + C$$

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 λ_i y β_i en un instante t_i para las coordenadas del polo λ_0 y β_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