

# Astrofísica del Sistema Solar

## Evolución Colisional

# Introducción

- Proceso que produjo una sustancial pérdida de masa y un aumento de las velocidades relativas.
- Régimen erosivo - proceso colisional muy intenso.
- Propiedades ópticas dependen de la distancia al Sol.
- El estudio de las propiedades físicas de los objetos provee información relevante del proceso evolutivo.

Es relevante estudiar las poblaciones de objetos  
y sus características

Es relevante estudiar los efectos del proceso colisional

# Introducción

Las poblaciones existentes en el Sistema Solar son:

- Planetas y satélites
- Asteroides
- Cometas
- Objetos transneptunianos
- Polvo

Todas tienen propiedades físicas diferentes, pero la que nos permite estudiar los procesos evolutivos es la población de asteroides. ¿Por qué?

# Distribución de tamaños

- En general puede representarse en ley de potencias en forma acumulativa o incremental:

$$dN(> r) \propto r^{-q} dr$$

o efectuando un cambio de variables:

$$dN(> m) \propto m^{-p} dm$$

- La relación entre  $p$  y  $q$  es:

$$3p = q + 2$$

# Distribución de tamaños

- Una población que evoluciona colisionalmente sin ninguna perturbación externa se relaja a una distribución con  $p = 1.833$  ( $q = 3.5$ ) independientemente de la población inicial (Dohnanyi 1969, 1971) .

- simulaciones más realistas apoyan las conclusiones de Dohnanyi (Chapman y Davis 1975).

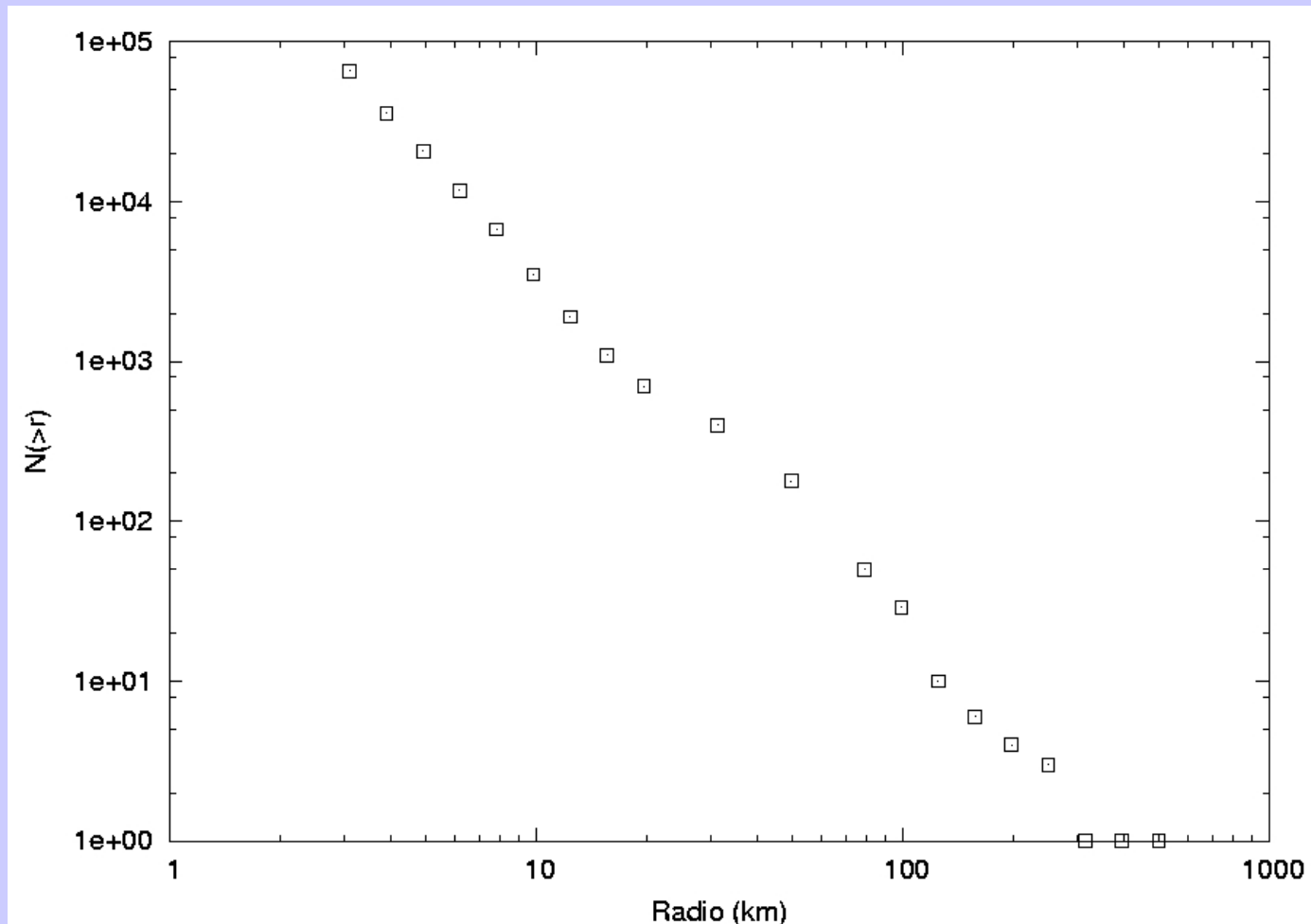
- en la distribución de tamaños observada hay saltos

(Anders

1965; Davis et al. 1974, 1985; Durda et al. 1998).

- distribución con índice variable para tamaños pequeños (Van Houten et al. 1970; Cellino et al. 1991; Belton et al. 1992, 1994).

# Distribución de tamaños



Cinturón principal – Davis et al. (2002)

# Distribución de tamaños

- ¿Qué propiedades físicas afectan una distribución de tamaños?

Las mismas que afectan al proceso colisional!

- densidad.
- porosidad.
- estructura interna.
- distribución orbital.

## Resultado de una colisión:

- Davis et al. (1989), Petit y Farinella (1993).
- Fragmentación o astillado y disrupción.
- Fragmentación catastrófica ( $f_1 < 0.5$ ).
- Craterización.
  
- La energía de la colisión se reparte en cantidades iguales entre target y proyectil.
- Inicialmente asumimos densidades medias iguales.



## Resultado de una colisión:

- Algoritmo de escala - Energía específica  $Q^*$  (Holsapple y Housen 1986):

$$Q^* \propto \left(\frac{S}{\rho}\right)^{\frac{-3\mu}{(\Psi_2-2)}} r^{\frac{3\mu(\Psi_1+\Psi_2)}{(\Psi_2-2)}} v^{(2-3\mu)} \quad (\text{reg. de solidez}),$$

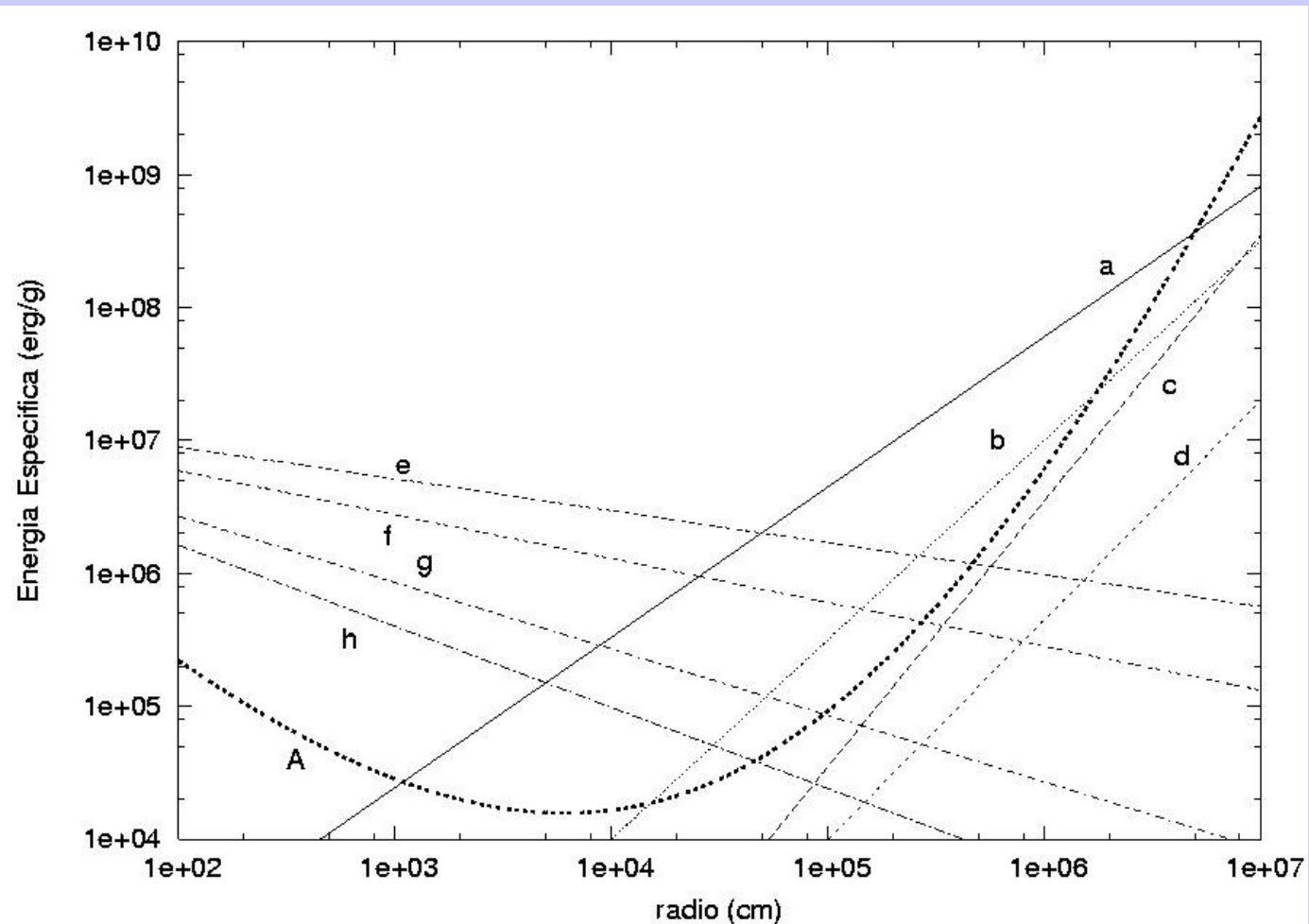
$$Q^* \propto (\rho G)^{\frac{3\mu}{2}} r^{3\mu} v^{(2-3\mu)} \quad (\text{reg. gravitatorio}),$$

$\mu = 2/3$  (depende de la porosidad)     $\Psi_1$  y  $\Psi_2 = \text{ctes.}$

- $Q^* = S/\rho$

$$S = S_0 + \frac{4A\pi G\rho^2 r^2}{15},$$

$S_0 = 3 \times 10^7 \text{ erg cm}^{-3}$   
para basalto  
Davis et al. (1985)



Condición :  $\frac{1}{4}mv^2 \geq Q^*M$

## Resultado de una colisión:

Mayor fragmento:

$$f_l = \frac{1}{2} \left( \frac{2SM}{\rho E} \right)^{1,24}, \quad (f_l < 0.5).$$

Radio del menor proyectil:

$$r = R \left( \frac{4S}{\rho v^2} \right)^{1/3},$$

Número de fragmentos:

$$N(> m) \propto m^{-b},$$

Exponente :

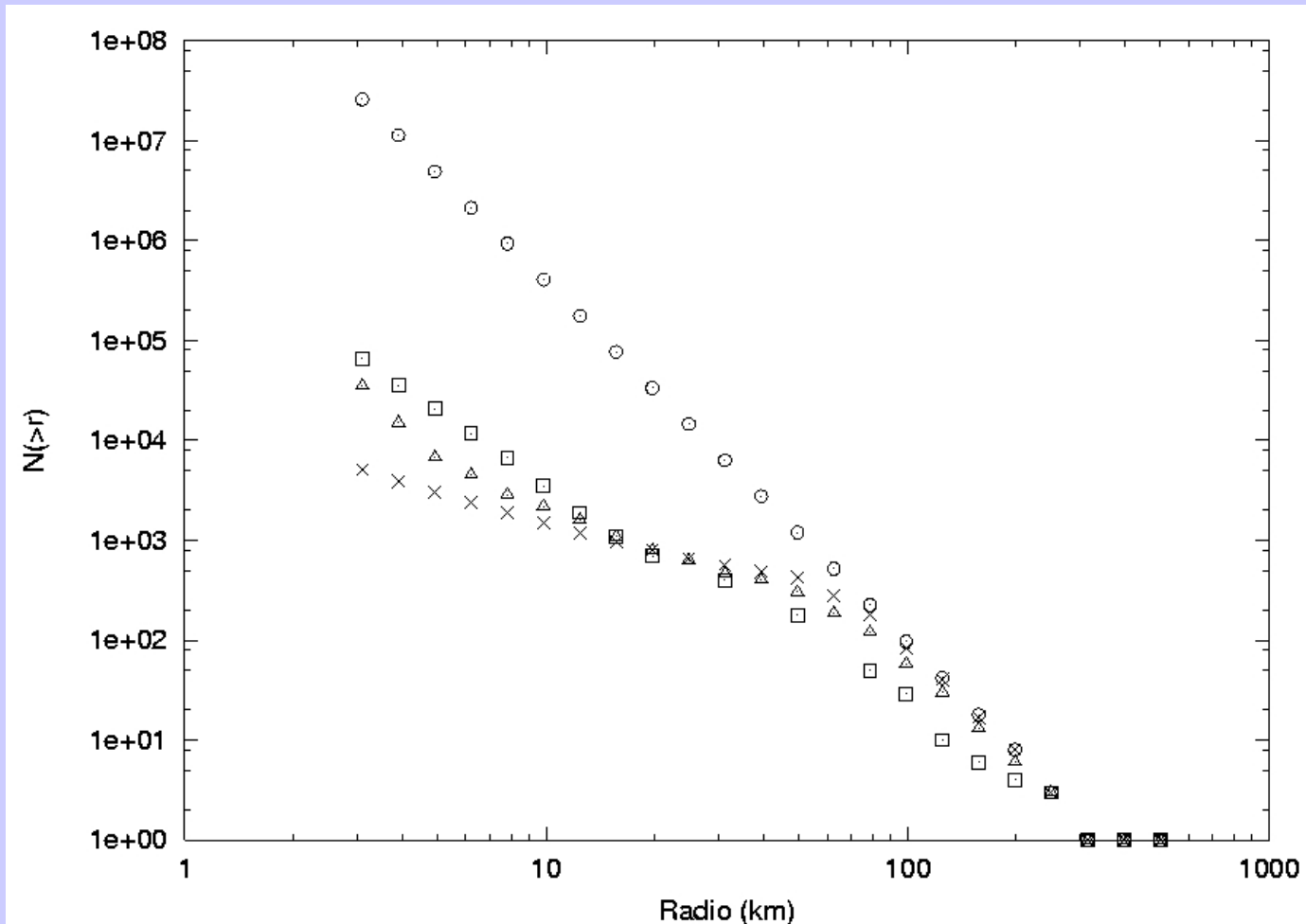
$$b = (1 + f_l)^{-1}.$$

# Evolución colisional:

- Para  $r > 22$  km: se compara los resultados con la distribución observada (Cellino et al., 1991).
- Para  $r < 22$  km:
  - Palomar - Leyden Survey (Van Houten et al., 1970)
  - extrapolar la distribución observada.
- Incertidumbre:
  - $r > 25$  km:  $\pm 0,5$
  - $r < 25$  km:  $\pm N^{1/2}$
- Pob. Inicial: cuadrados
- Pob. Observada: círculos
- Pob. Simulada: triángulos - cruces

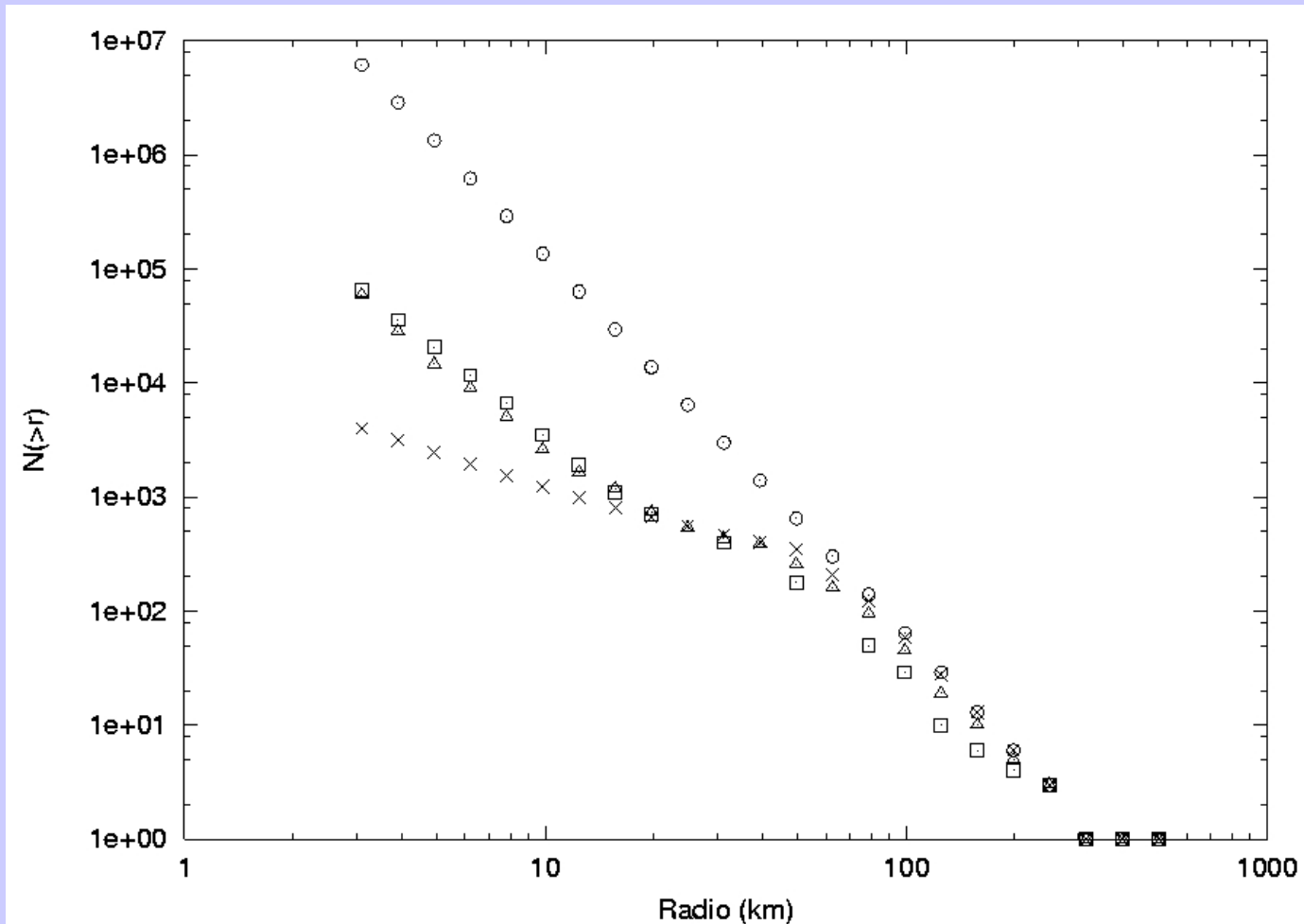
$M_{\text{inicial}} = 1 M_{\oplus}$  (Weidenschilling, 1977)

$p_a = 4,6$   $p_c = 4,72$



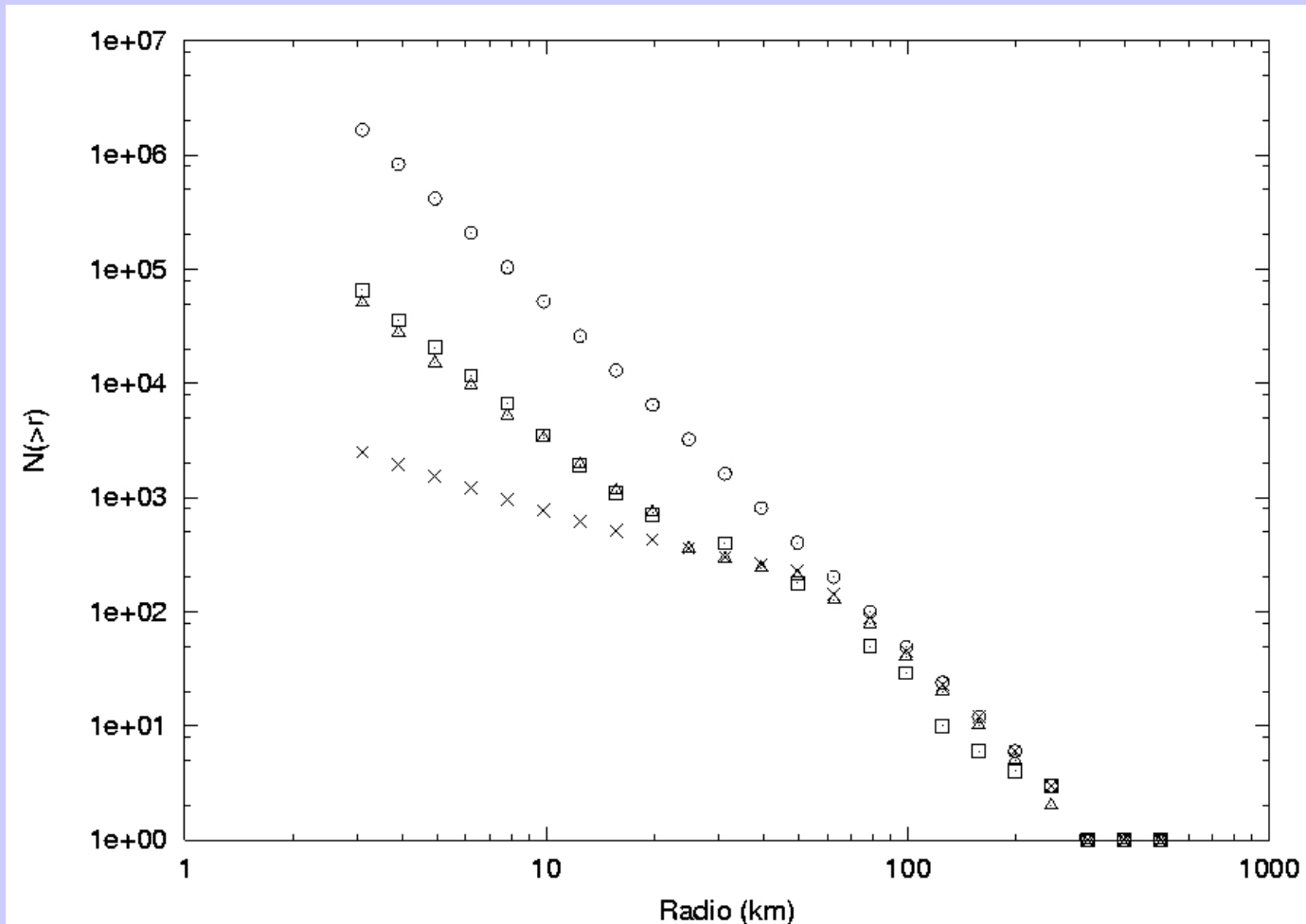
$$M_{\text{inicial}} = 0,0328 M_{\oplus} \text{ (Burbine et al., 1996)}$$

$$p_a = 4,3 \quad p_c = 4,80$$



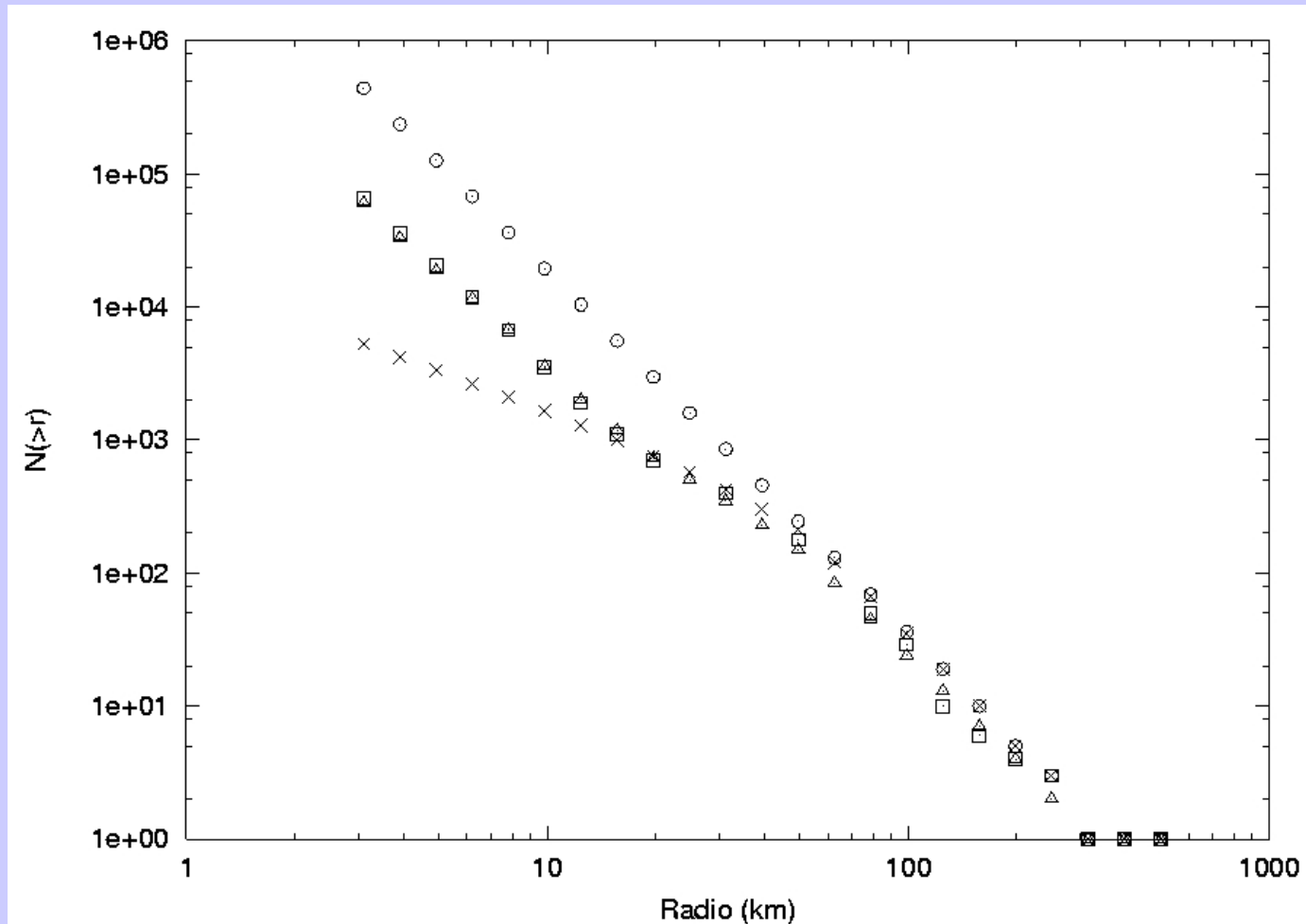
$$M_{\text{inicial}} = 0,0027 M_{\oplus} \text{ (Gil-Hutton, 1997)}$$

$$p_a = 4,0 \quad p_c = 4,96$$



$$M_{\text{inicial}} = 0,0008 M_{\oplus} \text{ (Davis et al., 1994)}$$

$$p_a = 3,7 \quad p_c = 4,96$$

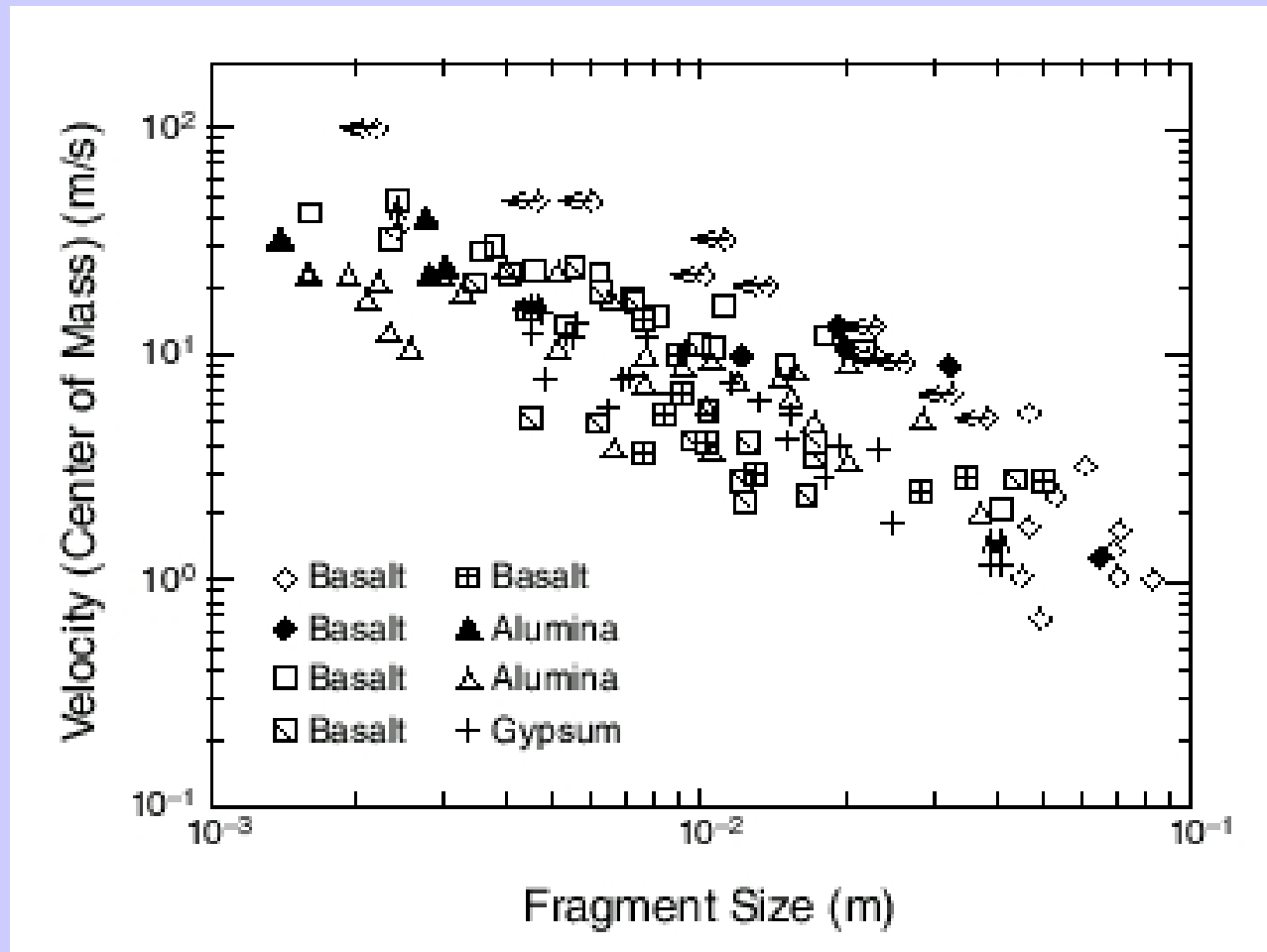




# Campo de velocidades:

- ¿Cómo es el campo de velocidades de los fragmentos?
- ¿Cuánta energía cinética se llevan los fragmentos?
  - $f_{ke} < 0.10$  (Paolicchi et al. 1983)
  - $f_{ke} = 0.20$  (Farinella et al. 1992)
  - $f_{ke} = 0.27$  (Gil-Hutton 1997)

# Campo de velocidades:



(Nakamura y Fujiwara, 1991).

# Campo de velocidades:

$$\begin{aligned} f(>v) &= (v/v_0)^{-k} \quad \text{para } v > v_0 \\ f(>v) &= 1 \quad \text{para } v \leq v_0, \end{aligned}$$

Davis et al. (1979)  
 $k \sim 9/4$

- $v_0$  depende del valor de  $f_{ke}$ .
- Correlación entre masa del fragmento y su velocidad

$$v(m) = \tilde{v} \left( \frac{m}{M} \right)^{-k_1}, \quad k_1 = (1 - b/k)$$

$$P[v_r(m), v(m)] = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{3\sqrt{3}v_r(m)^2}{v(m)^3} \exp\left(-\frac{3v_r(m)^2}{2v(m)^2}\right).$$

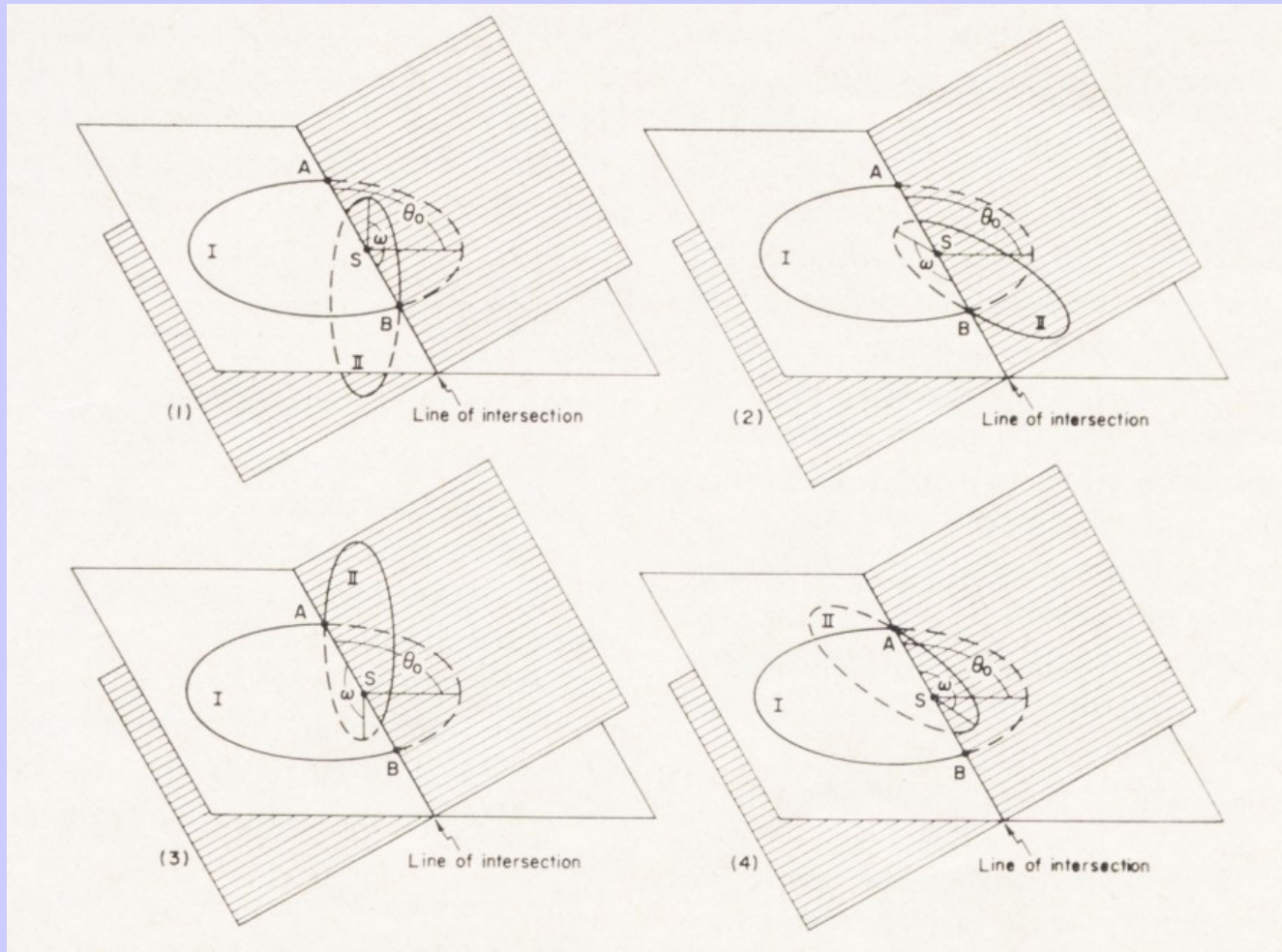
$$v_{\infty} = \sqrt{v_r^2 - v_{esc}^2}$$

Si  $v_r < v_{esc}$  el fragmento se reacumula

# Número de colisiones:

- ¿Cuántas colisiones recibe un objeto en un cierto tiempo?
- Depende de:
  - sección eficaz de colisión.
  - tiempo.
  - número de proyectiles.
  - probabilidad de encuentro.

# Número de colisiones:



(Wetherill 1967)

# Número de colisiones:

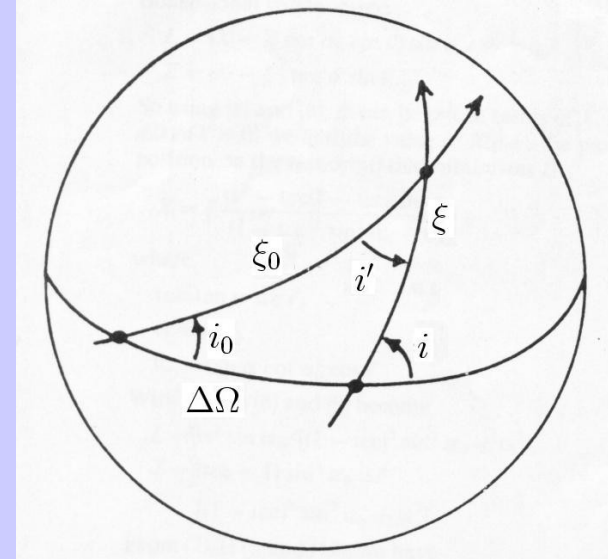
- ¿Cuántas colisiones recibe un objeto en un cierto tiempo?
- El número de colisiones será  $N_{\text{col}} = P_i \tau^2 \Delta t N_{\text{proy}}$ .
- ¿Cómo calcular la probabilidad intrínseca de colisión?
- Método analítico:
  - Öpik (1951), Wetherill (1967), Greenberg (1982).
  - Bottke y Greenberg (1993), Bottke et al. (1994).
- Considera objetos resonantes:
  - Dell'Oro et al. (2001).

# Número de colisiones:

$$P_i = \frac{\pi}{(2\pi)^3 \tau^2} \int_0^{2\pi} \int_{\omega_0} \frac{\tau \phi}{\text{sen}(\xi - \omega)} \frac{P_0}{T} d\omega_0 d(\Delta\Omega),$$

- $P_0$ , duración del encuentro
- $T$ , período orbital
- $\tau$ , radio geométrico
- $\phi = (\chi - \chi_0) / \tau$
- $\chi = \cos(\xi - \omega)$
- límites de integración ( $\xi_0 - \arccos \chi_{0 \min}$ ) y ( $\xi_1 - \arccos \chi_{0 \max}$ ).

Cuando  $|\chi| \rightarrow 1$ ,  $\text{sen}(\xi - \omega) \rightarrow 0$ .



# Número de colisiones:

- ¿Cómo calcular la probabilidad intrínseca de colisión?.
- Método numérico :
  - Se registran acercamientos por integración directa (Marzari et al. 1996).

$$N_{\text{enc}}(d < D) = P_1 D^2 \quad P_i = P_1 / (n_p \Delta t)$$

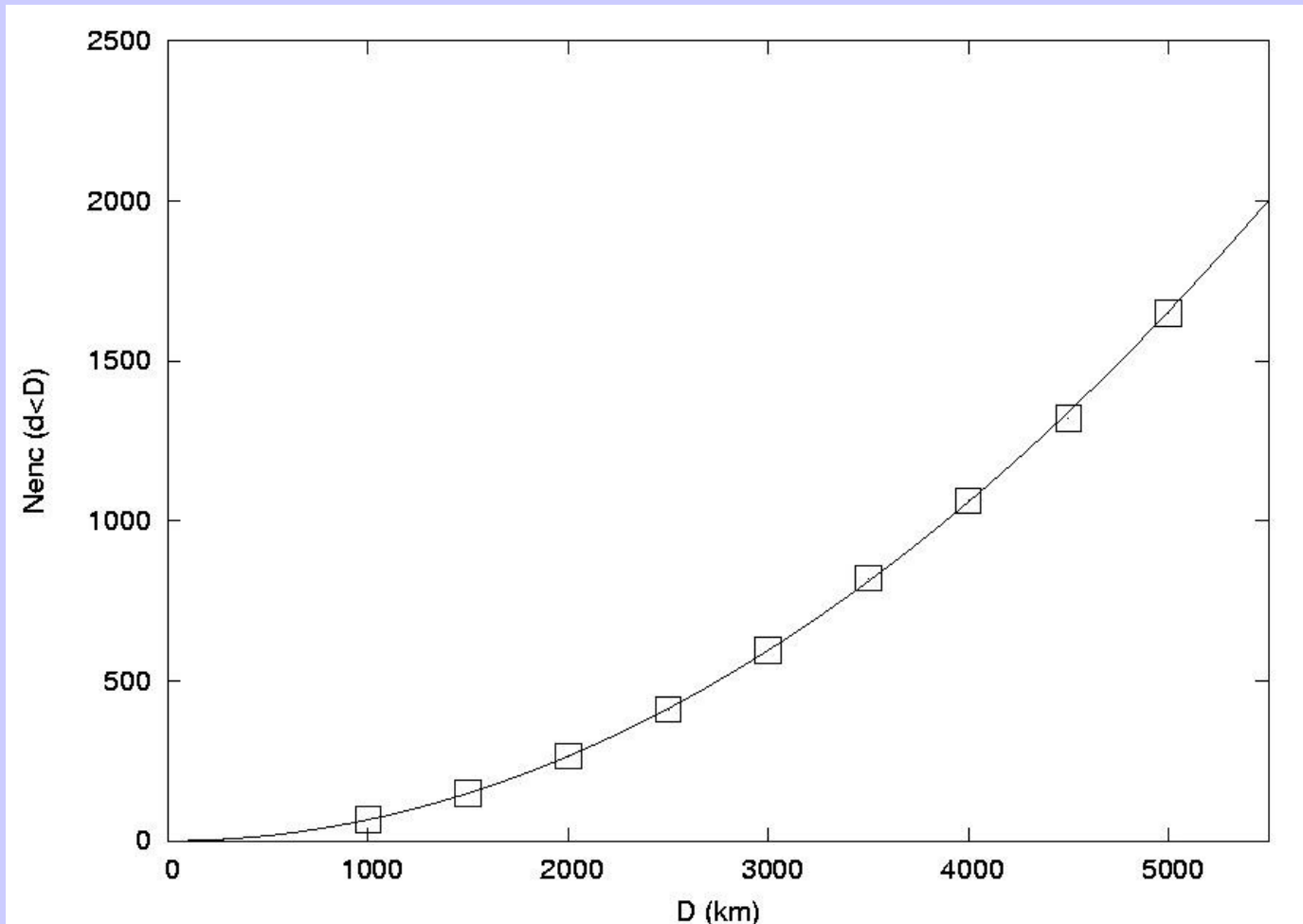
682 asteroides con  $r > 25$  km,  $\Delta t = 10^8$  años:

$$P_1 = 0,662 \times 10^{-4} \text{ km}^{-2}$$

$$P_i = 2,85 \times 10^{-18} \text{ km}^{-2} \text{ año}^{-1}$$



# Número de colisiones:

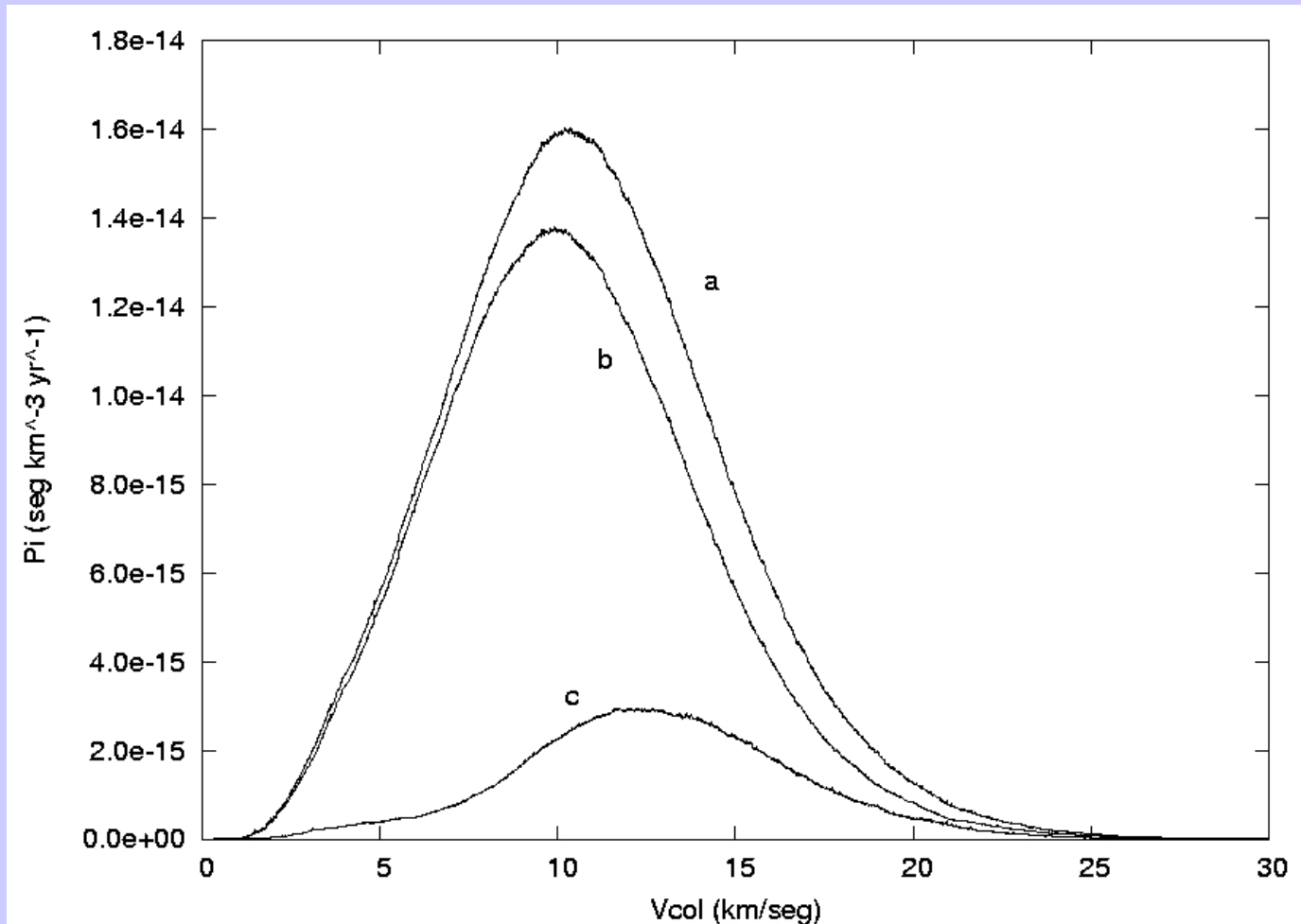


# Velocidad de colisión:

Ejemplo:

- Población de cometas de corto período.
- Hay interacción con el cinturón de asteroides.
- Se considera al cinturón de asteroides como la población de proyectiles.
- Se utiliza el método de Greenberg (1982).
- Se consideran 682 asteroides con  $r > 25$  km.
- Se consideran 159 cometas de corto período: 137 observables y 22 perdidos.

# Velocidad de colisión:



# Velocidad de colisión:

- Muestra total:
  - $\langle v_{\text{col}} \rangle = 10,86 \pm 3,91 \text{ km seg}^{-1}$
  - $\langle \Pi \rangle = 1,51 \times 10^{-18} \text{ km}^{-2} \text{ año}^{-1}$
- Cometas observables:
  - $\langle v_{\text{col}} \rangle = 10,45 \pm 3,81 \text{ km seg}^{-1}$
  - $\langle \Pi \rangle = 1,45 \times 10^{-18} \text{ km}^{-2} \text{ año}^{-1}$
- Cometas perdidos:
  - $\langle v_{\text{col}} \rangle = 12,78 \pm 3,87 \text{ km seg}^{-1}$
  - $\langle \Pi \rangle = 1,88 \times 10^{-18} \text{ km}^{-2} \text{ año}^{-1}$

# Velocidad de colisión:

- 99P/Kowal 1:

$$q = 4,8 \text{ UA}$$

$$\langle v_{\text{col}} \rangle = 3,69 \pm 0,69 \text{ km seg}^{-1}$$

- 8P/Tuttle:

$$\langle v_{\text{col}} \rangle = 22,6 \pm 0,0 \text{ km seg}^{-1}$$

$$\langle \Pi \rangle = 0,22 \times 10^{-18} \text{ km}^{-2} \text{ año}^{-1}$$

- P/Mueller 5:

$$q = 4,0 \text{ UA}$$

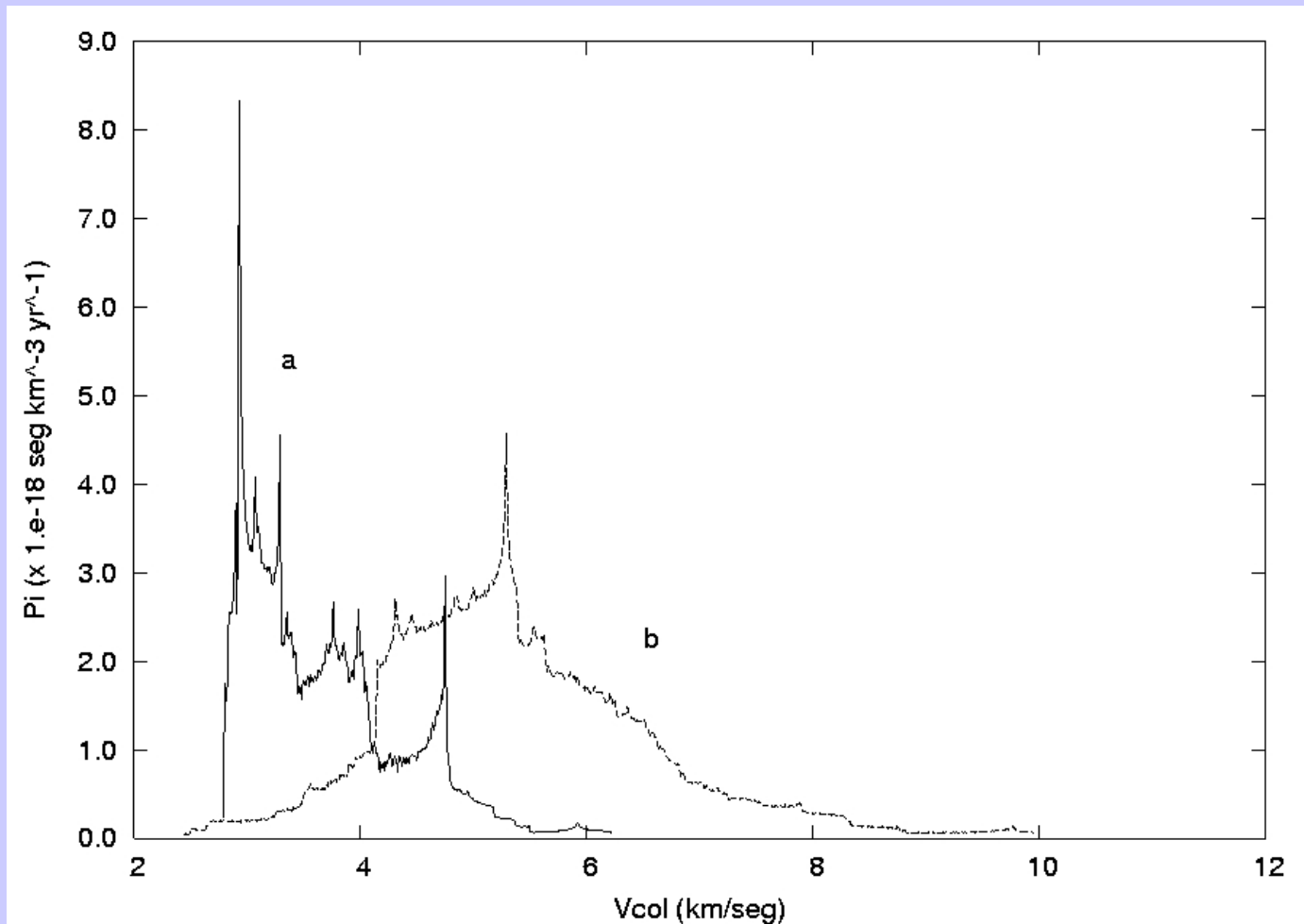
$$\langle v_{\text{col}} \rangle = 5,41 \pm 1,18 \text{ km seg}^{-1}$$

- 96P/Machholz 1:

$$\langle v_{\text{col}} \rangle = 23,8 \pm 0,0 \text{ km seg}^{-1}$$

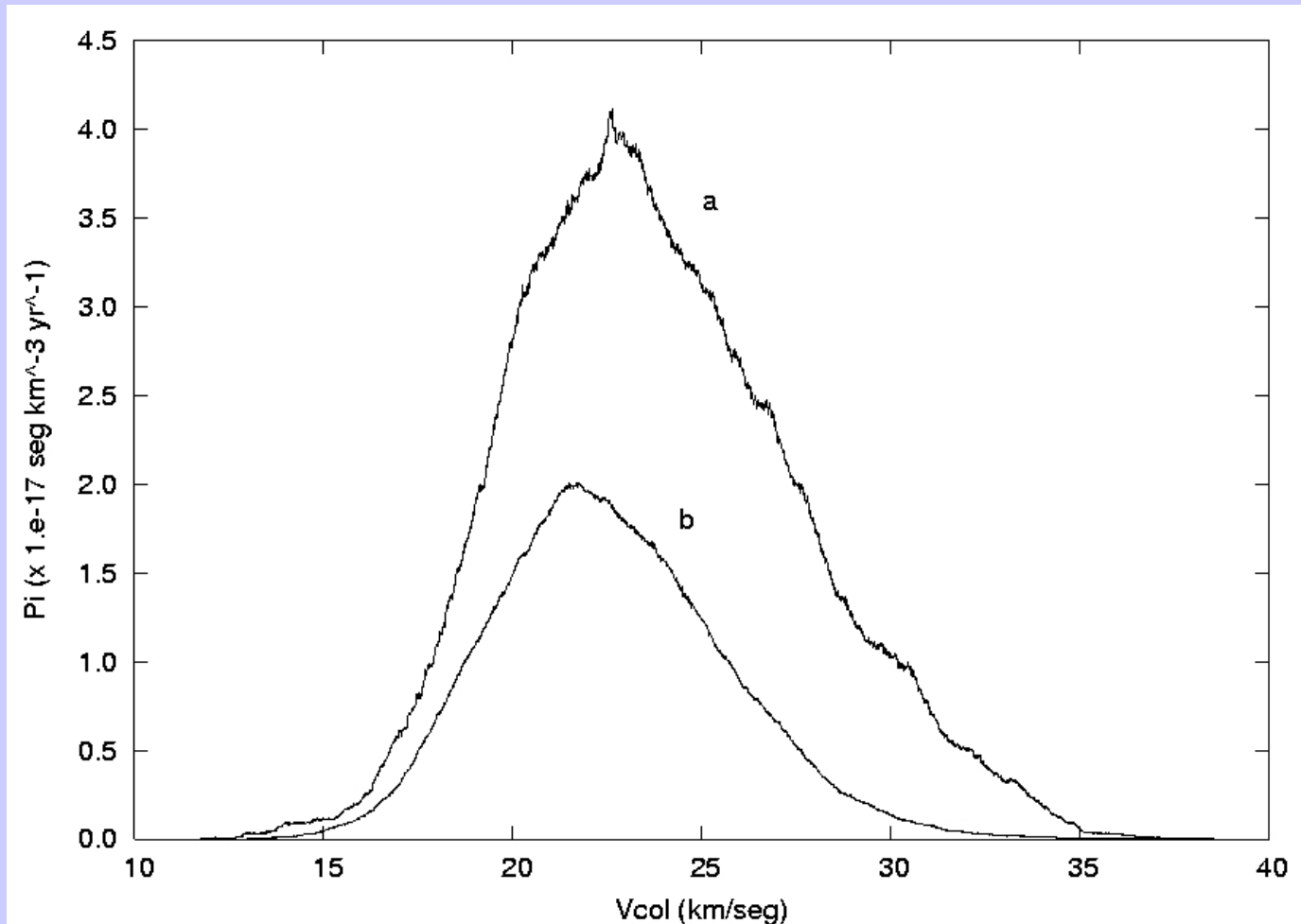
$$\langle \Pi \rangle = 0,52 \times 10^{-18} \text{ km}^{-2} \text{ año}^{-1}$$

# Velocidad de colisión:



a) 99P/Kowal 1; b) P/Mueller 5

# Velocidad de colisión:



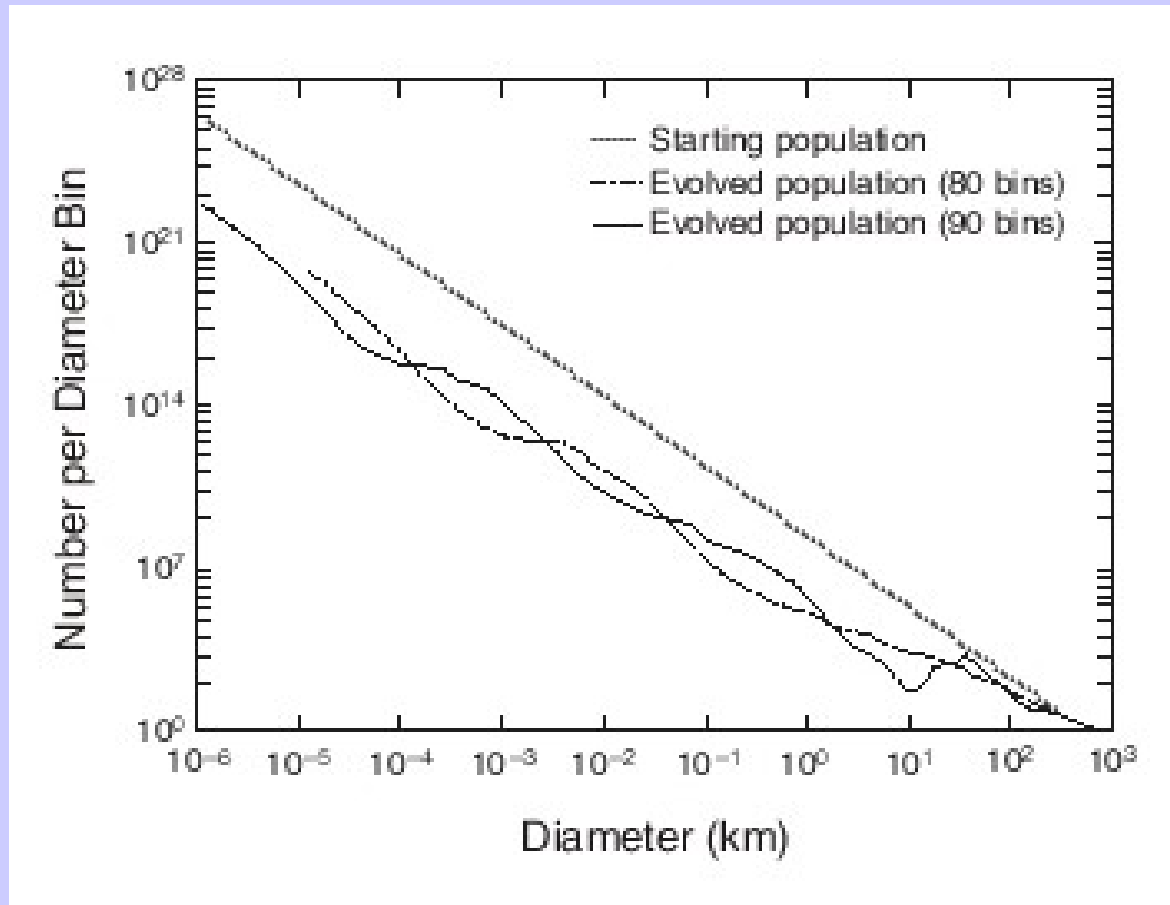
a) 96P/Machholz 1; b) 8P/Tuttle

# Preguntas:

- Dada una cierta distribución en ley de potencia, ¿qué rango de tamaños dominan el área total?.
- ¿Cómo afecta la reacreación la distribución de tamaños?.
- ¿Un objeto reacetado es más o menos resistente a las colisiones?.
- Si creamos una distribución de tamaños inicial teórica, completamente arbitraria, y la hacemos evolucionar posiblemente terminemos con una distribución bastante ondulada que aparentemente no representaría correctamente a la población final (ver la siguiente figura). ¿Pueden dar alguna explicación de por qué sucede esto?.



# Poblaciones finales onduladas:



- Davis et al. (2002) *Asteroids III*, pp.545-558
- Petit and Farinella (1993) *Cel. Mech.* 57, 1.
- Farinella and Davis (1992) *Icarus* 97, 111.
- Bottke et al. (2005) *Icarus* 179, 63.
- Wetherill (1967) *J. Geophys. Res.* 72, 2429.
- Marzari et al. (1996) *Icarus* 119,192.
- Holsapple (1993) *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.* 21, 333.