

# **El tamaño importa: Yarkovsky desenmascarado**

**Tabaré Gallardo**

[www.fisica.edu.uy/~gallardo](http://www.fisica.edu.uy/~gallardo)

Dpto. de Astronomía, Instituto de Física, Facultad de Ciencias  
Universidad de la República, URUGUAY

14 de abril de 2011

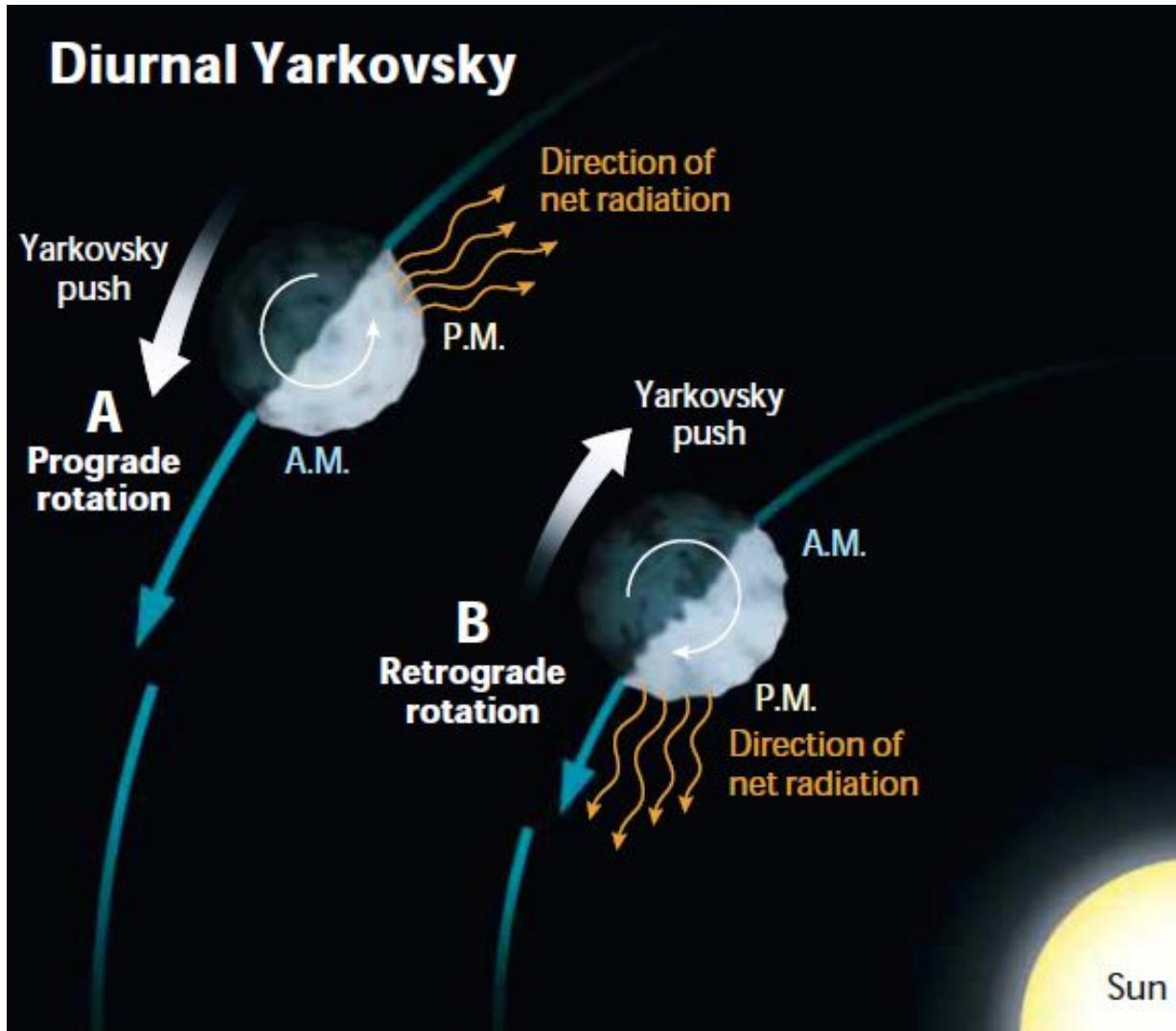
## Ivan Osipovich Yarkovsky (1844 – 1902), ingeniero civil ruso.



"Teoria cinetica de la gravitacion universal en relacion con la formacion de los elementos quimicos" (1888).

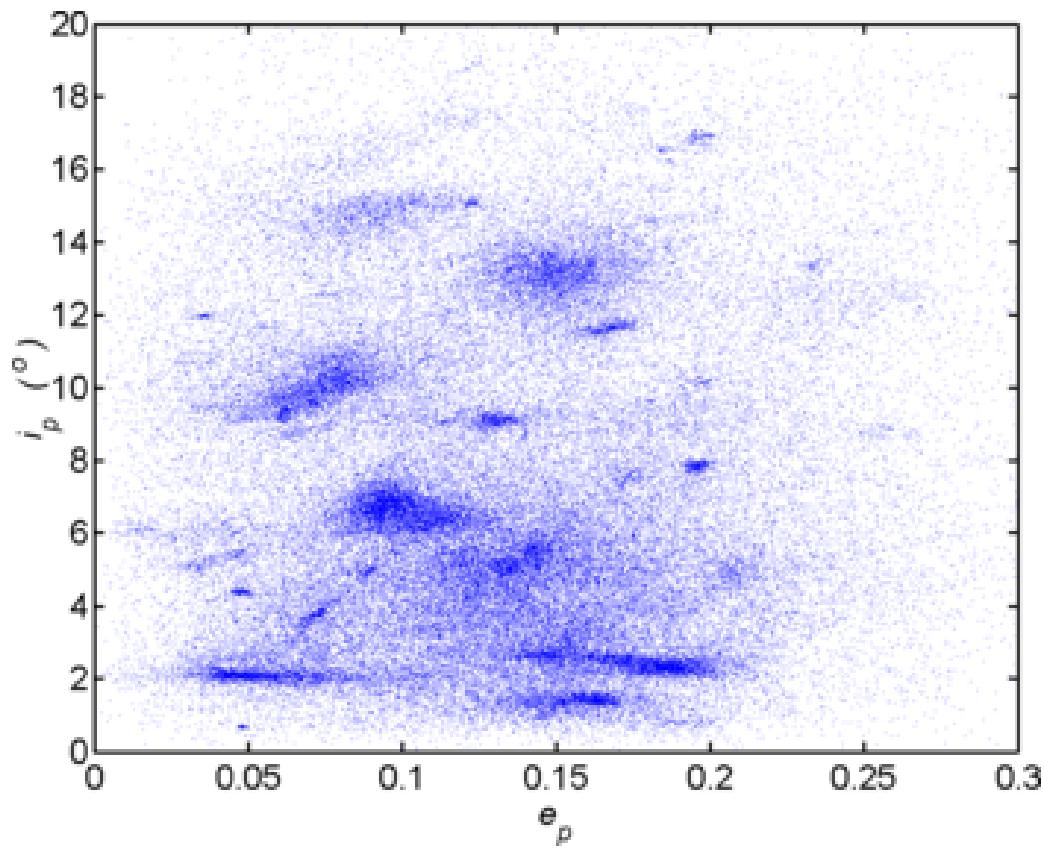
Modelo: compresion del eter por los planetas, arrastre del eter por rotacion, calentamiento por el Sol, expansion del eter y empuje del planeta.

# Variacion orbital por Yarko diurno

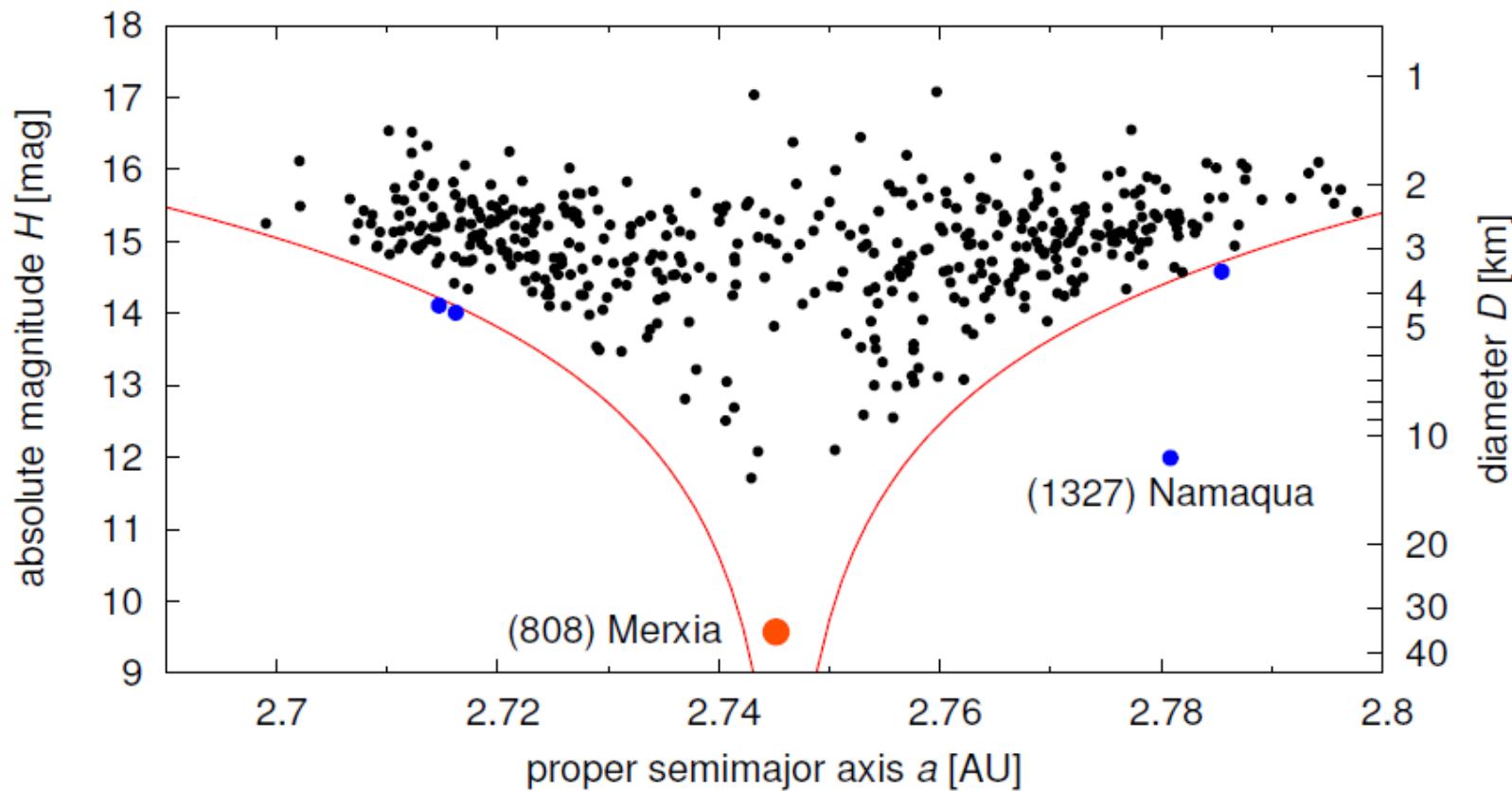


Primera detección: satélite LAGEOS (Rubincam 1987), la perturbación es de  $10^{-11}$ .

# Familias de asteroides

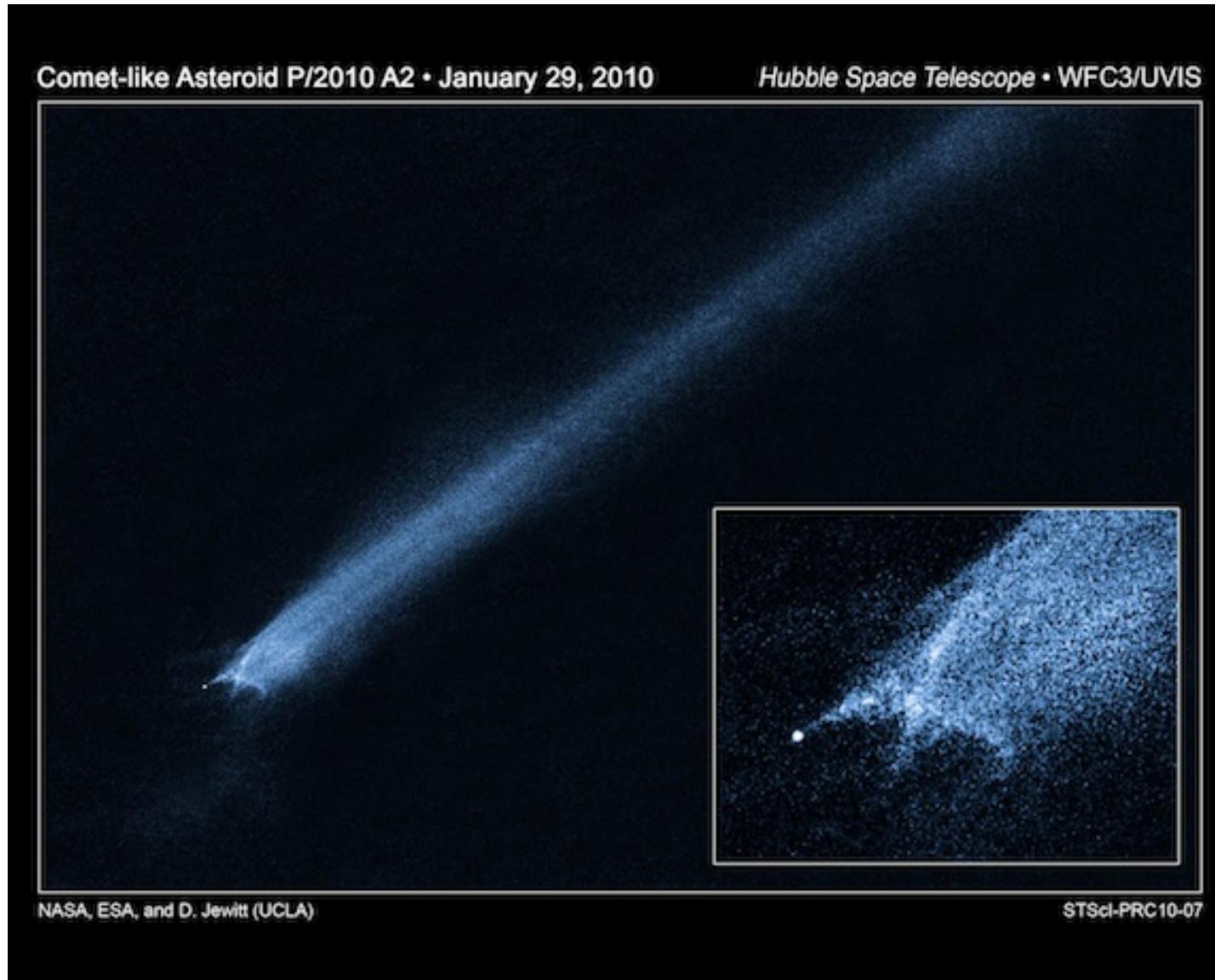


# Difusión de familias por Yarko



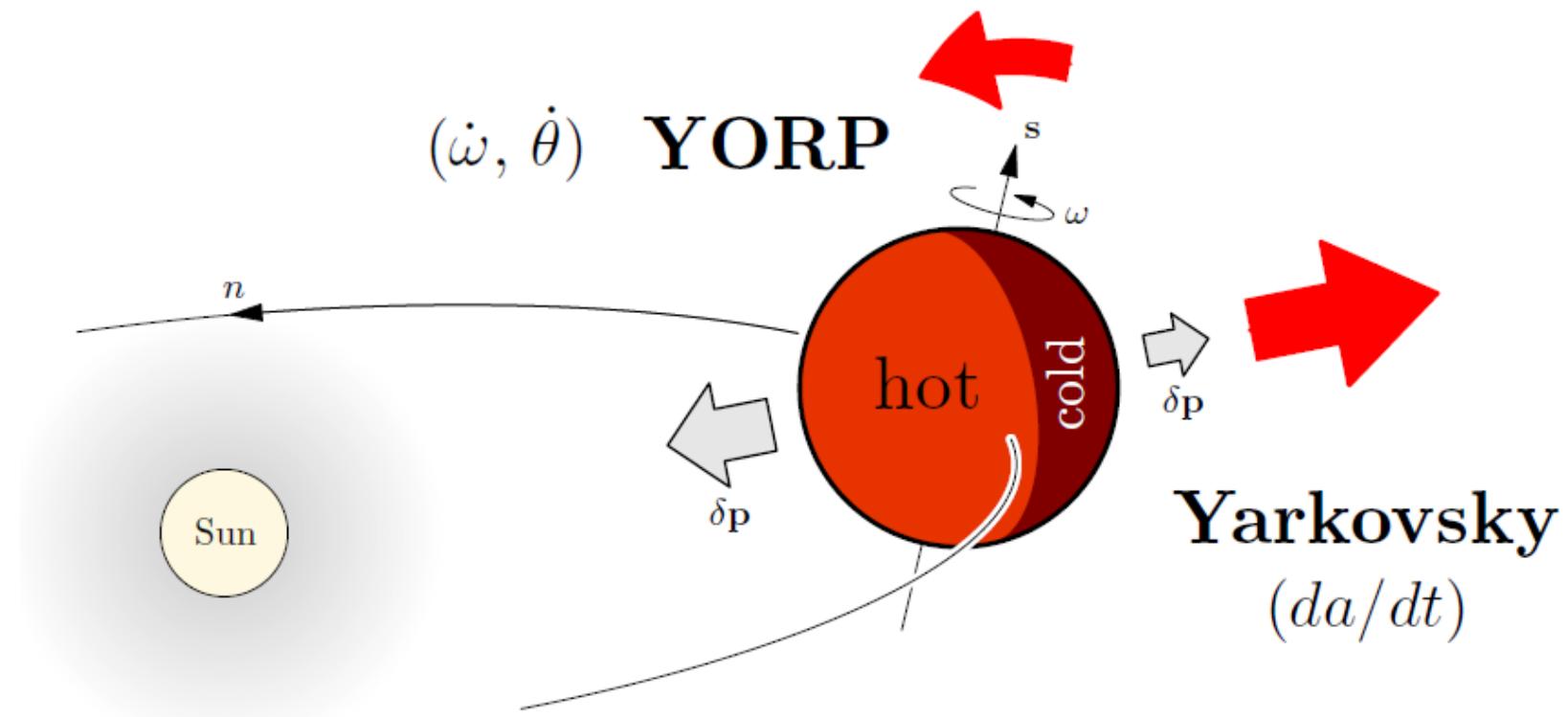
(Broz 2006, PhD Thesis) Los más pequeños se dispersan más que los grandes.

# Primera colision observada



Primera observacion de una colision de un asteroide.

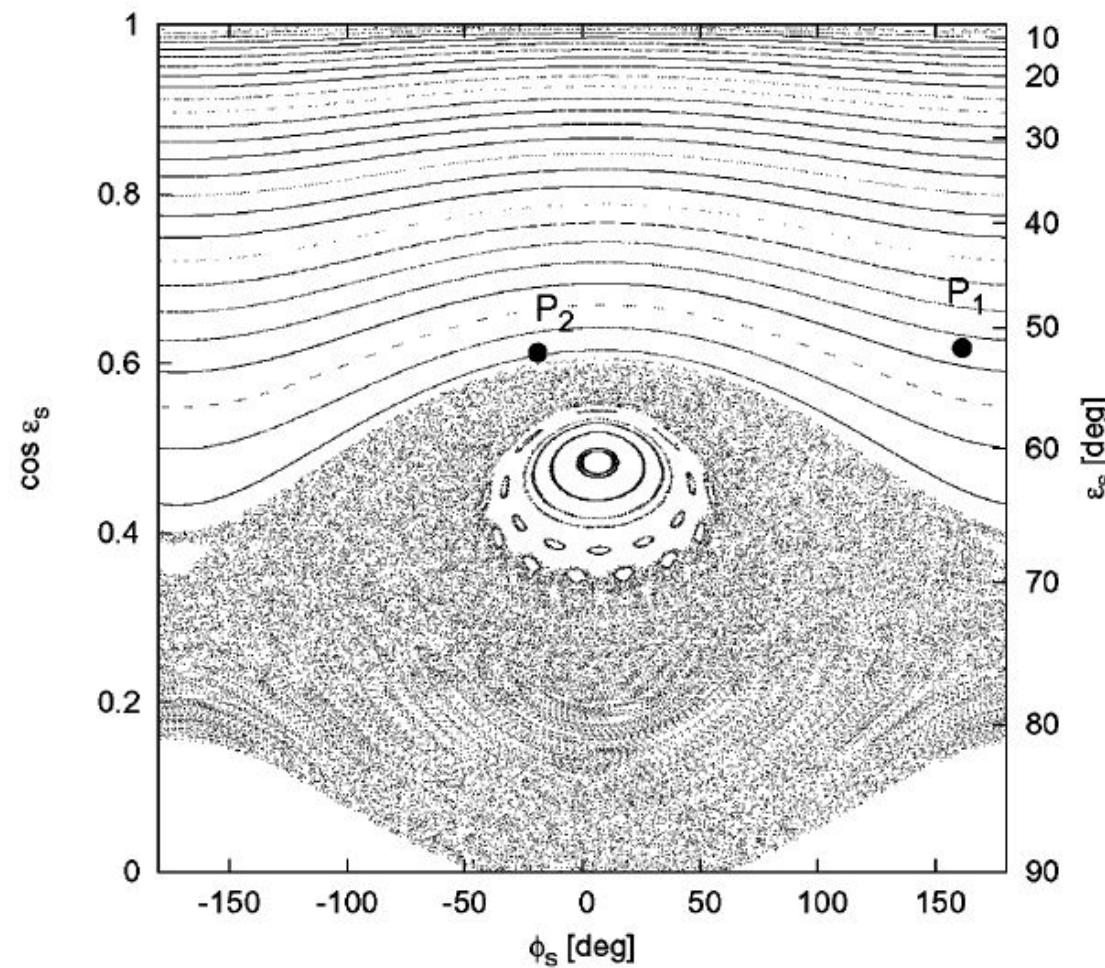
# Yarkovsky/YORP



(Broz, PhD Thesis)

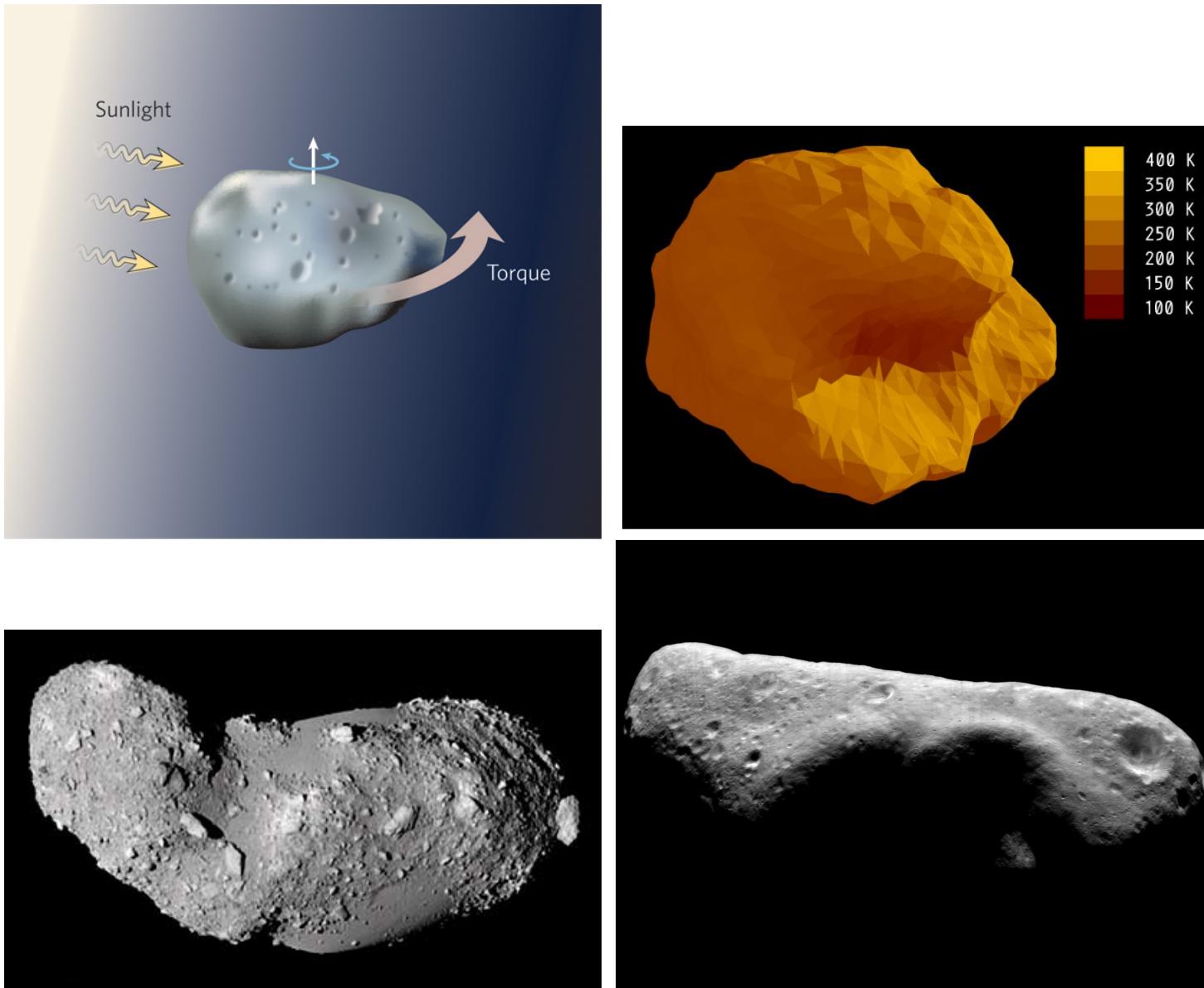
# YORP

Efecto Yarkovsky-O'Keefe-Radzievskii-Paddack (YORP): evolucion del spin y eje de rotacion de los asteroides por efecto Yarkovsky.



Caso de (60) Echo.

# Aceleracion rotacional



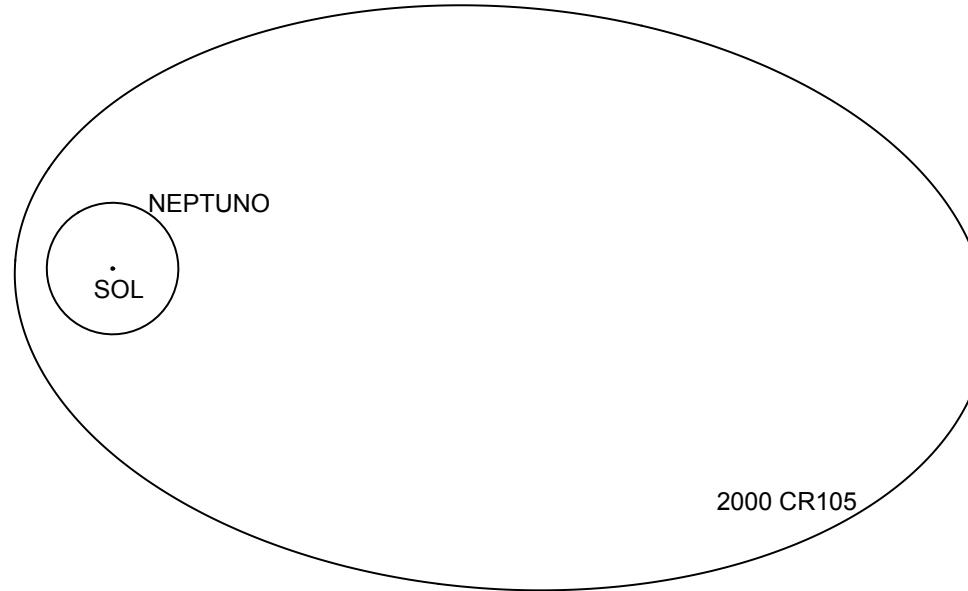
# Resonancias en el Sistema Solar

- Ocurren cuando existe una **commensurabilidad** entre algunas **frecuencias fundamentales** del sistema.
- **Frecuencias fundamentales:** periodos orbitales, rotacionales, precesion del plano orbital o linea de los apsides.

Ejemplos:

- orbita-orbita (resonancias de movimientos medios)
  - asteroides con Jupiter (3:2, 1:1)
  - transneptunianos con Neptuno
  - Pluton-Neptuno (2:3)
- spin-orbita
  - Tierra-Luna (1:1)
  - Sol-Mercurio (1:2)
- resonancias seculares: periodos de circulacion de ( $\varpi, \Omega$ )

# Resonancias de Movimientos Medios



Comensurabilidad entre periodos orbitales:

$$\frac{P_{\text{aster}}}{P_{\text{planeta}}} = \frac{n}{m} \quad m, n \text{ enteros}$$

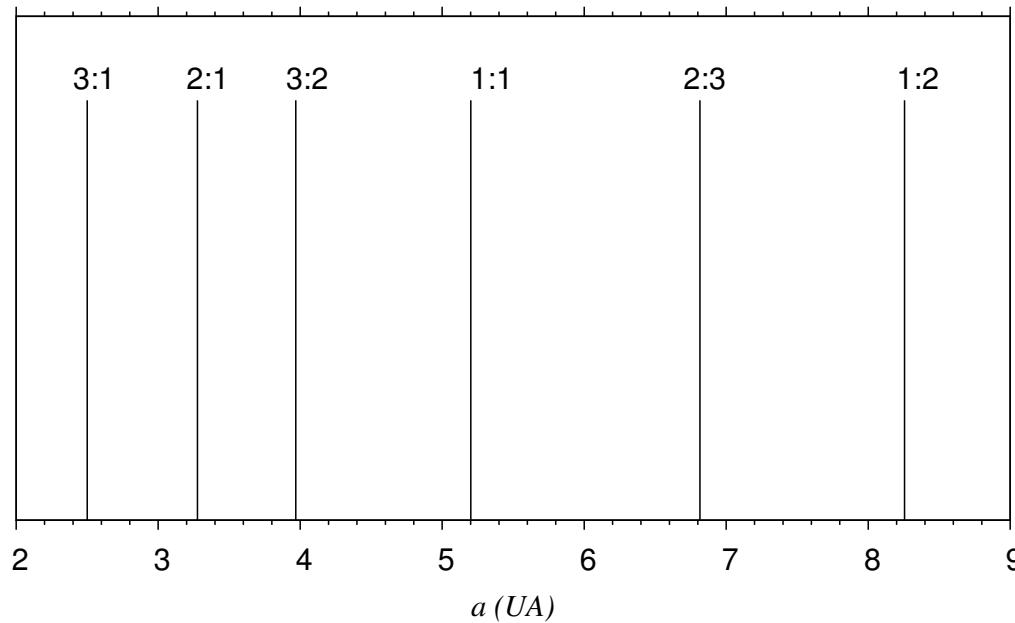
Por Kepler los periodos ( $P$ ) estan correlacionados con los semiejes ( $a$ ) de las orbitas:

$$P \propto a^{3/2}$$

entonces las órbitas resonantes son aquellas de semiejes definidos por:

$$a \simeq a_p \left( \frac{n}{m} \right)^{2/3}$$

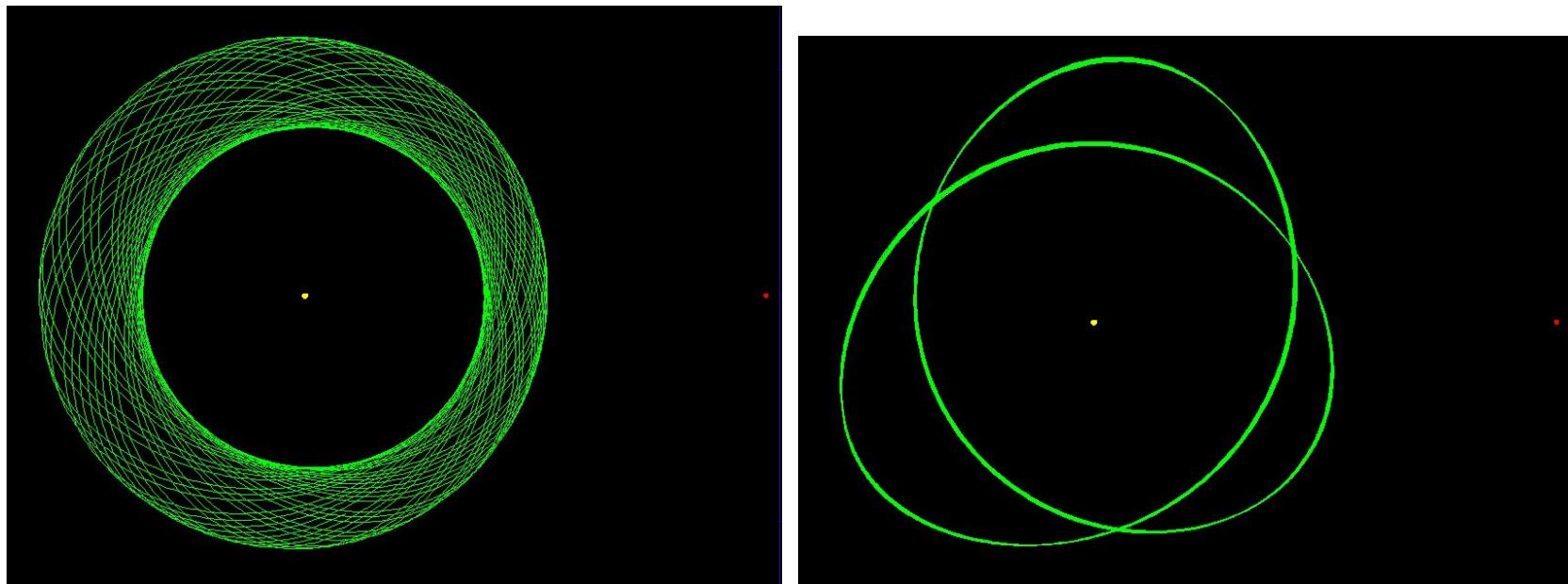
Dado un planeta con cierto semieje  $a_p$  las resonancias quedan perfectamente definidas.



Localización de algunas resonancias con Jupiter.

# ¿Que tienen de especial las Resonancias?

- Al repetirse sucesivamente las mismas configuraciones Sol-Planeta-Asteroides con el transcurso del tiempo (miles de años) surge una perturbación que genera puntos de equilibrio y toda una estructura en el espacio de fases.



- Las órbitas resonantes se manifiestan presentando oscilaciones en sus elementos orbitales ( $a, e, i$ ) entorno de esos puntos de equilibrio.

# ¿Son las resonancias estados comunes en el Sistema Solar?

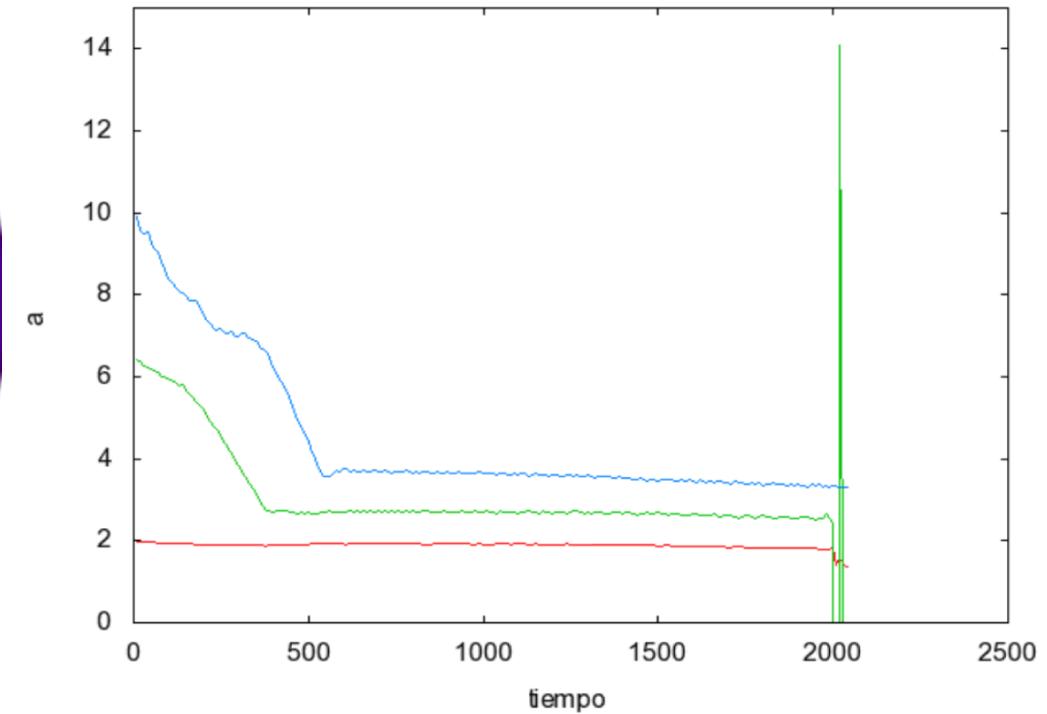
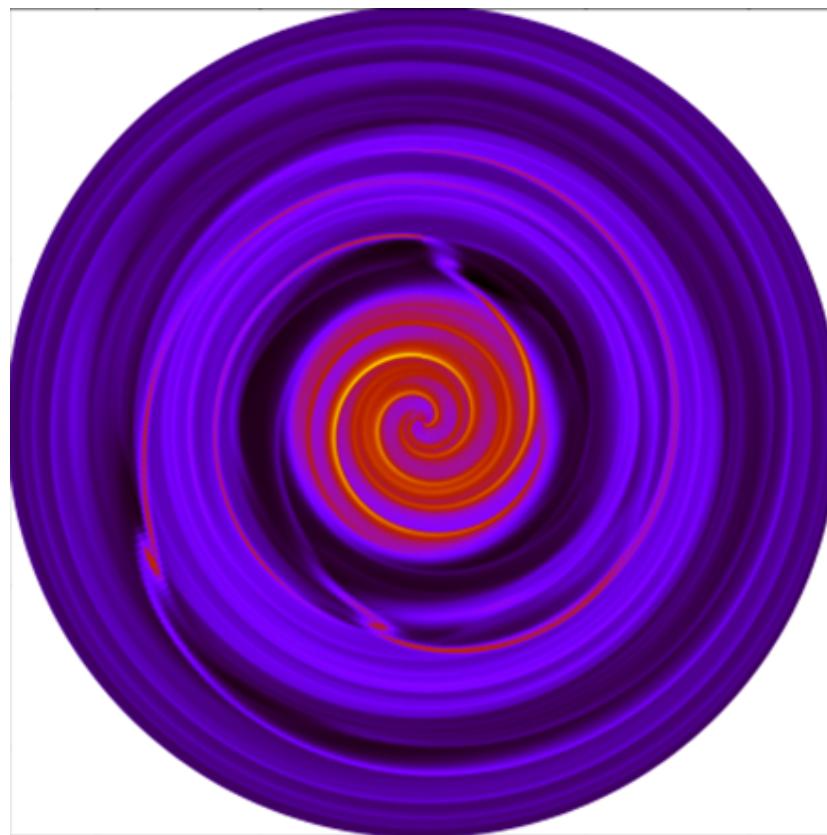
Si

¿Por que?

Al menos 3 razones:

- hay muchas resonancias posibles ( $m, n$  enteros arbitrarios)
- tienen cierta *fuerza* (**strength**) y *pegajosidad* (**stickiness**)
- existen mecanismos (como Yarkovsky) que producen variaciones en  $a$  llevando las órbitas hacia estados resonantes

## Ejemplo: migración planetaria

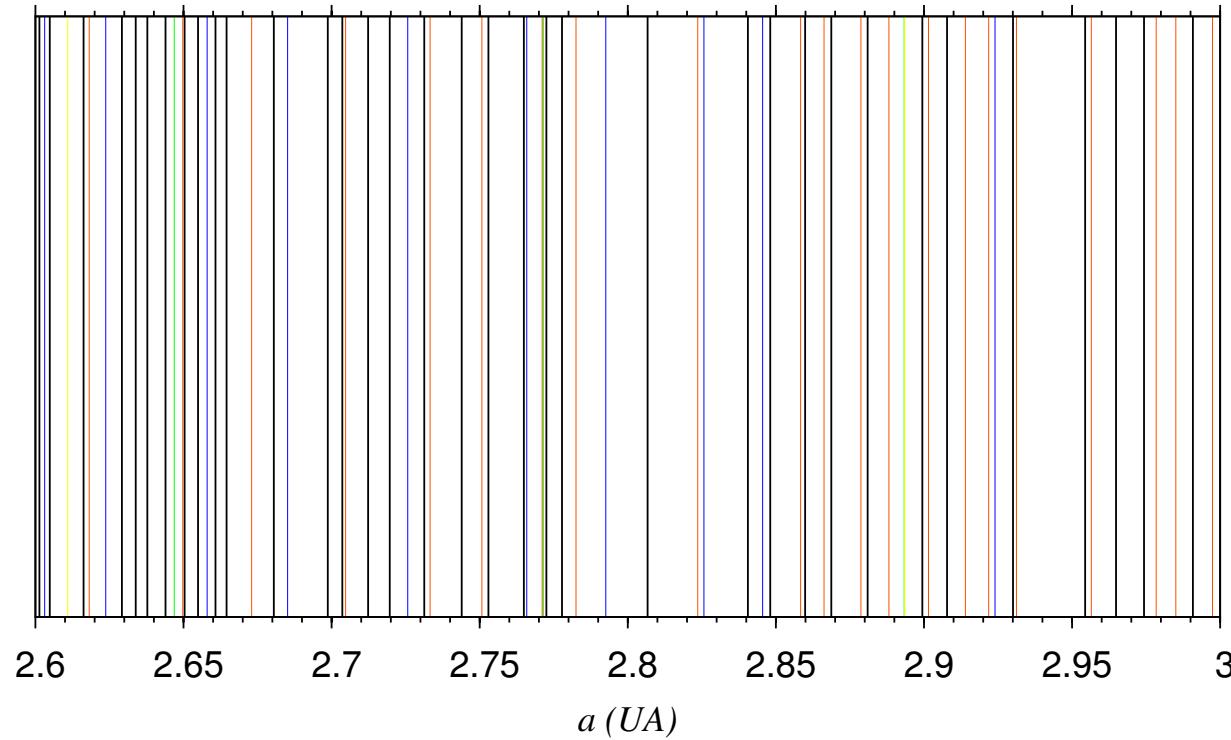


Los 3 planetas intercambian momento angular con el disco de gas migrando hacia la estrella hasta que quedan presos en una resonancia (experimento de S. Rabelo siguiendo Marzari et al 2010).

# Fuerza de una Resonancia

¿Cuales son las resonancias importantes?

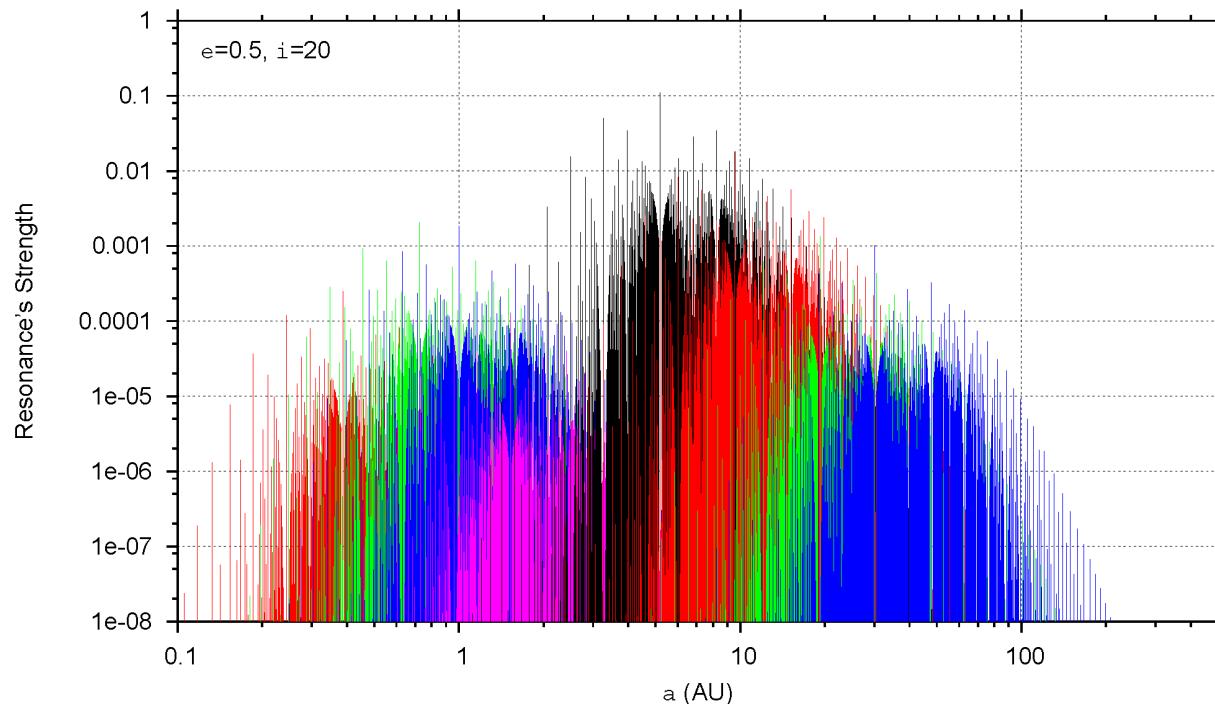
¿Como saber si la resonancia 2:3 es mas o menos importante que la 21:30?



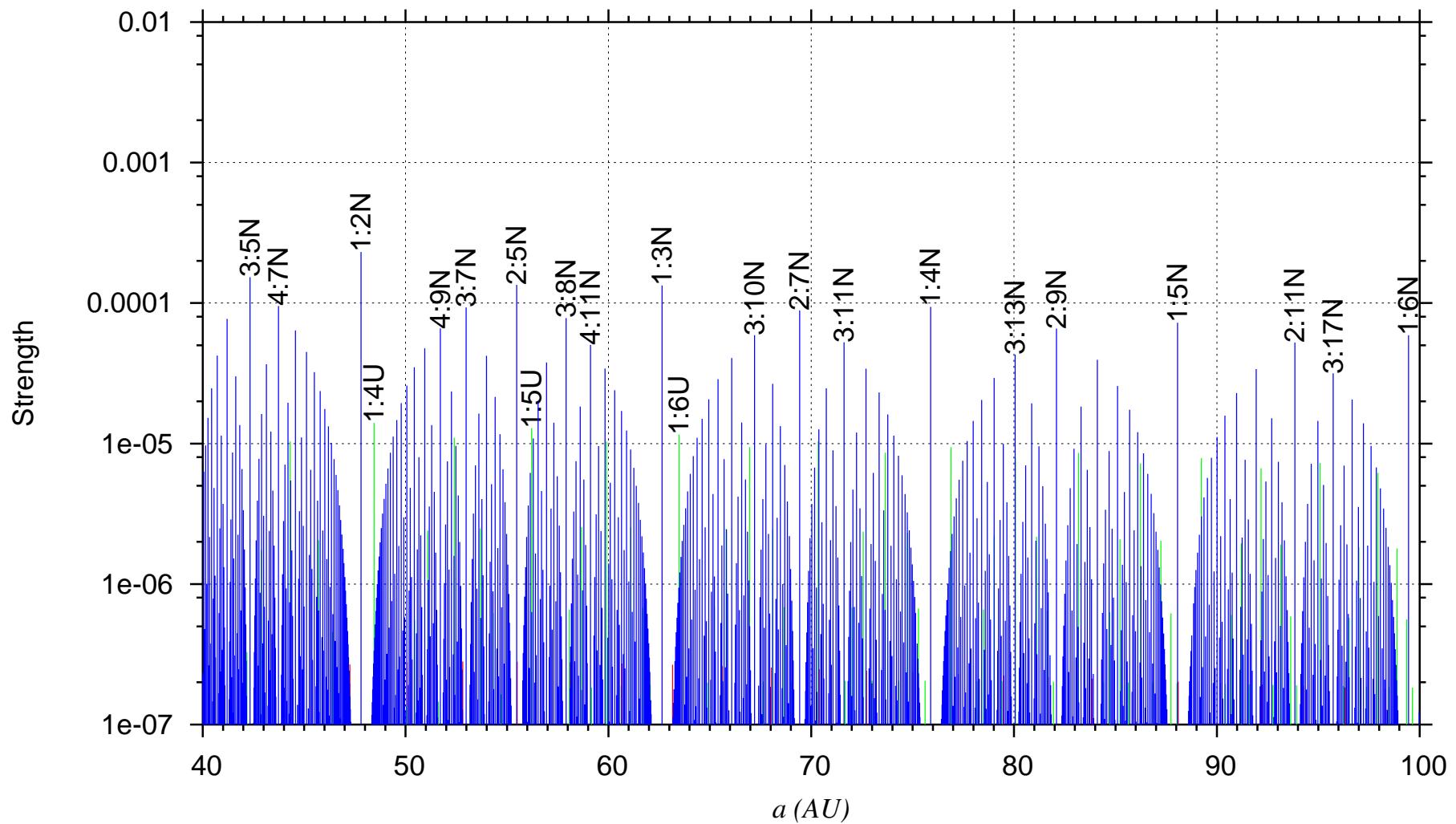
Localización de resonancias entre 2.6 y 3.0 UA.

# Atlas de Resonancias en el Sistema Solar

- No existia metodo general para evaluar la fuerza de las resonancias.
- Propusimos un metodo (y algoritmo) basado en la amplitud de la funcion perturbadora resonante (Gallardo 2006, Icarus 184, 29-38).
- Con este metodo pudimos evaluar la **fuerza** de todas las resonancias en el Sistema Solar.



## Ejemplo: Región Transneptuniana



Formula magica: "1:4" + "2:9" = "3:13"

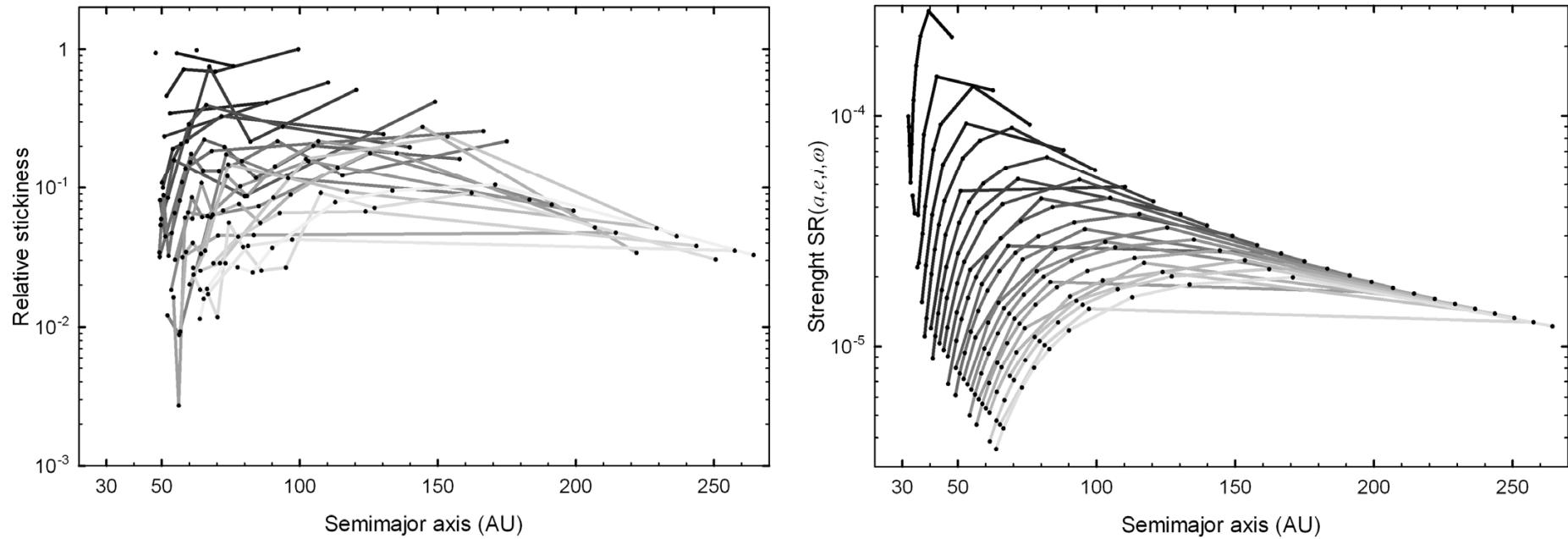
# Objetos reales en resonancia con planetas terrestres (1)

Nombre	$a$ (UA)	$e$	$i(^{\circ})$	$\omega(^{\circ})$	resonancia	$\sigma(^{\circ})$
2004 XY60	0.640	0.79	23.7	131	6:5V *	lib at 320, amp 150
2002 VE68	0.723	0.41	8.9	356	1:1V	QS
2001 CK32	0.725	0.38	8.1	234	1:1V	HS
2004 GU9	1.000	0.13	13.6	281	1:1E	QS
1994 TF2	0.993	0.28	23.7	350	1:1E	HS-QS
2004 BO41	0.997	0.47	34.9	256	1:1E *	HS-QS
85770 1998 UP1	0.998	0.34	33.1	234	1:1E *	HS-QS
2001 GO2	1.006	0.16	4.6	265	1:1E	HS-QS
2000 WN10	1.001	0.29	21.4	225	1:1E *	HS-QS
2002 AA29	0.994	0.01	10.7	100	1:1E	HS
2003 YN107	0.997	0.01	4.2	84	1:1E	HS
3753 Cruithne	0.997	0.51	19.8	44	1:1E	HS
1997 AQ18	1.147	0.46	17.3	37	1:2V *	lib at 290, amp 40
2000 EF104	1.147	0.41	10.8	347	1:2V *	lib at 295, amp 15
2005 ML13	1.147	0.24	6.8	221	1:2V *	lib at 80, amp 40
2002 AA	1.147	0.30	11.2	65	1:2V *	HS
1994 CB	1.149	0.14	18.2	288	1:2V	HS

## Objetos reales en resonancia con planetas terrestres (2)

Nombre	$a$ (UA)	$e$	$i(^{\circ})$	$\omega(^{\circ})$	resonancia	$\sigma(^{\circ})$
2001 DH47	1.522	0.03	24.3	16	1:1M	lib at 290, amp 40
5261 Eureka	1.523	0.06	20.2	96	1:1M	lib at 301, amp 6
101429 1998 VF31	1.524	0.10	31.2	310	1:1M	lib at 295, amp 25
1999 UJ7	1.524	0.03	16.7	48	1:1M	lib at 70, amp 40
36017 1999 ND43	1.522	0.31	5.5	52	1:1M *	HS
2005 XD1	1.586	0.29	17.9	199	1:2E *	HS
1996 DH	1.586	0.27	17.2	351	1:2E *	lib at 280, amp 40
2000 VF39	1.587	0.16	33.7	221	1:2E *	lib at 70, amp 40
2000 SC45	1.841	0.17	25.3	77	2:5E *	lib at 165, amp 115
2004 JY6	1.841	0.07	32.8	348	2:5E *	lib at 180, amp 60
2004 XB	1.841	0.09	11.7	61	2:5E *	lib at 130, amp 50
2004 RQ9	1.842	0.09	18.4	85	2:5E *	lib at 320, amp 30
1999 JB11	1.842	0.25	37.1	31	2:5E *	lib at 170, amp 170
2003 YP22	1.842	0.11	16.3	267	2:5E *	lib at 230, amp 120

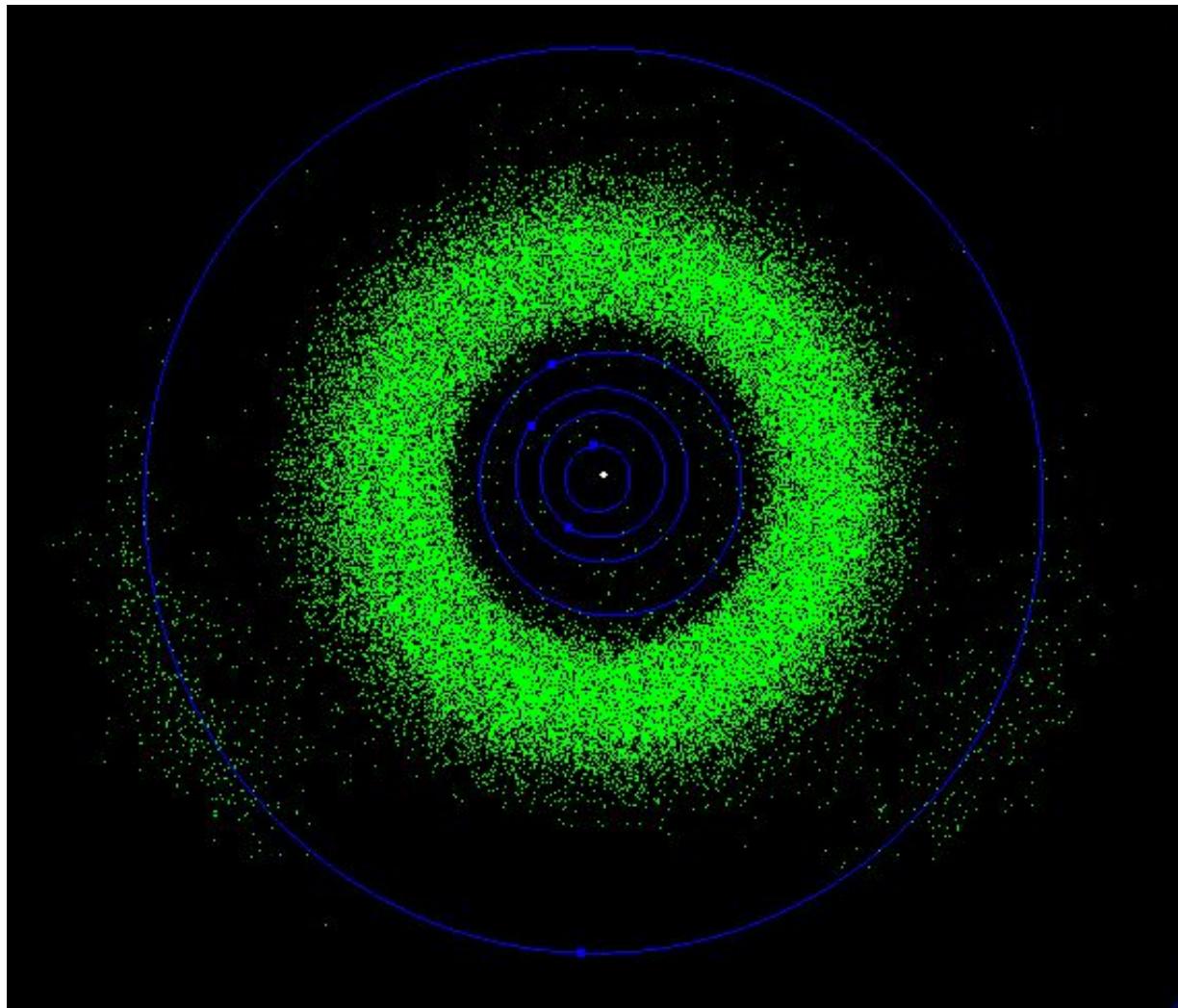
# Stickiness y Fuerza



Lykawka y Mukai (2007) correlacionaron el "stickiness" y la "fuerza" de las resonancias en la region transneptuniana.

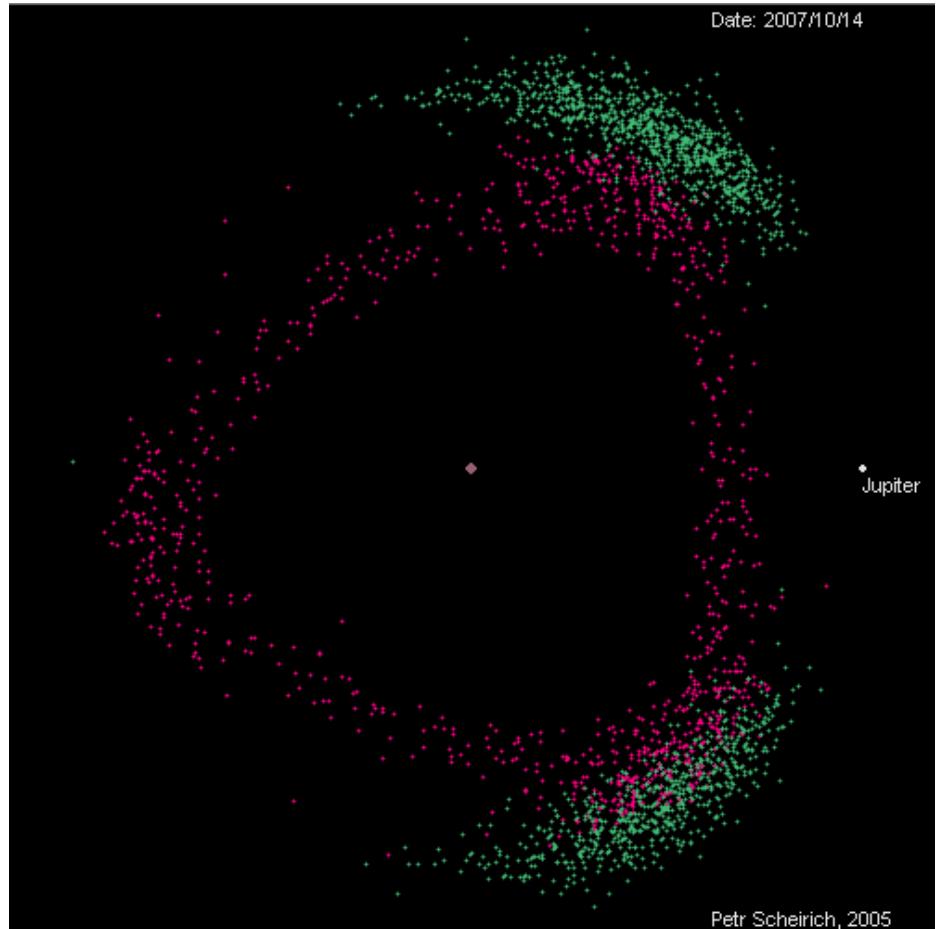
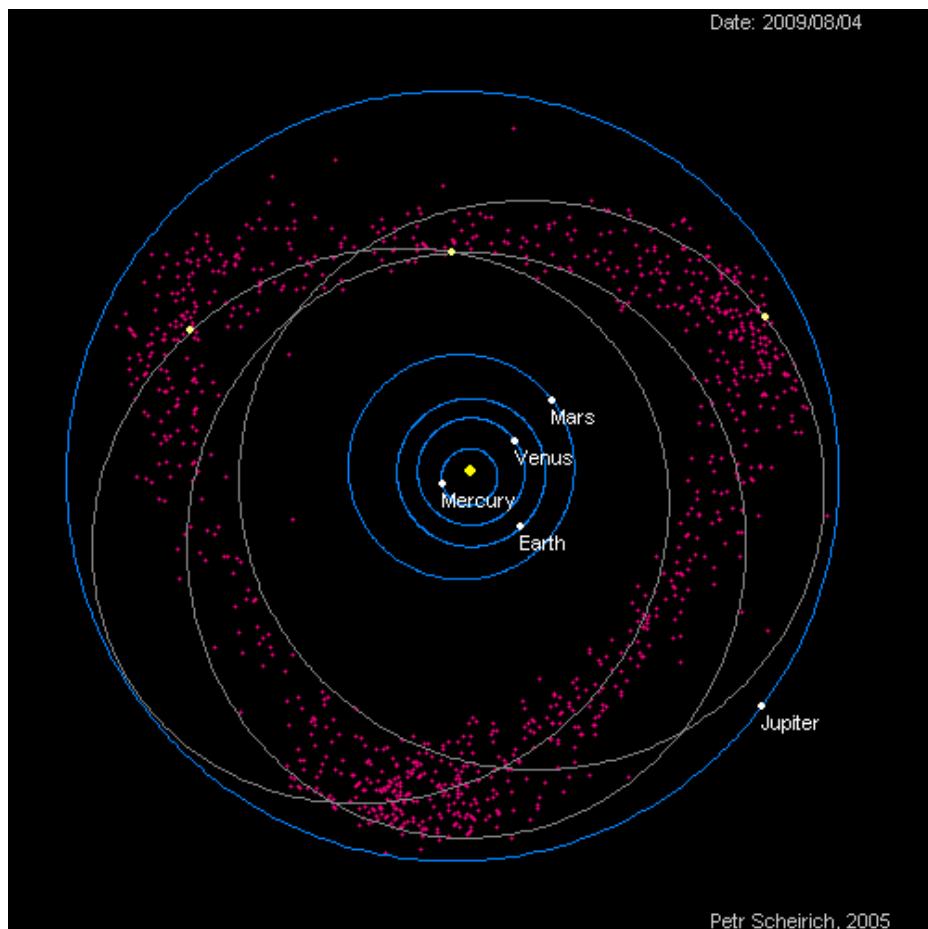
Sitio Atlas de resonancias: <http://www.fisica.edu.uy/~gallardo/atlas/>

# Resonancias en el Cinturón de asteroides



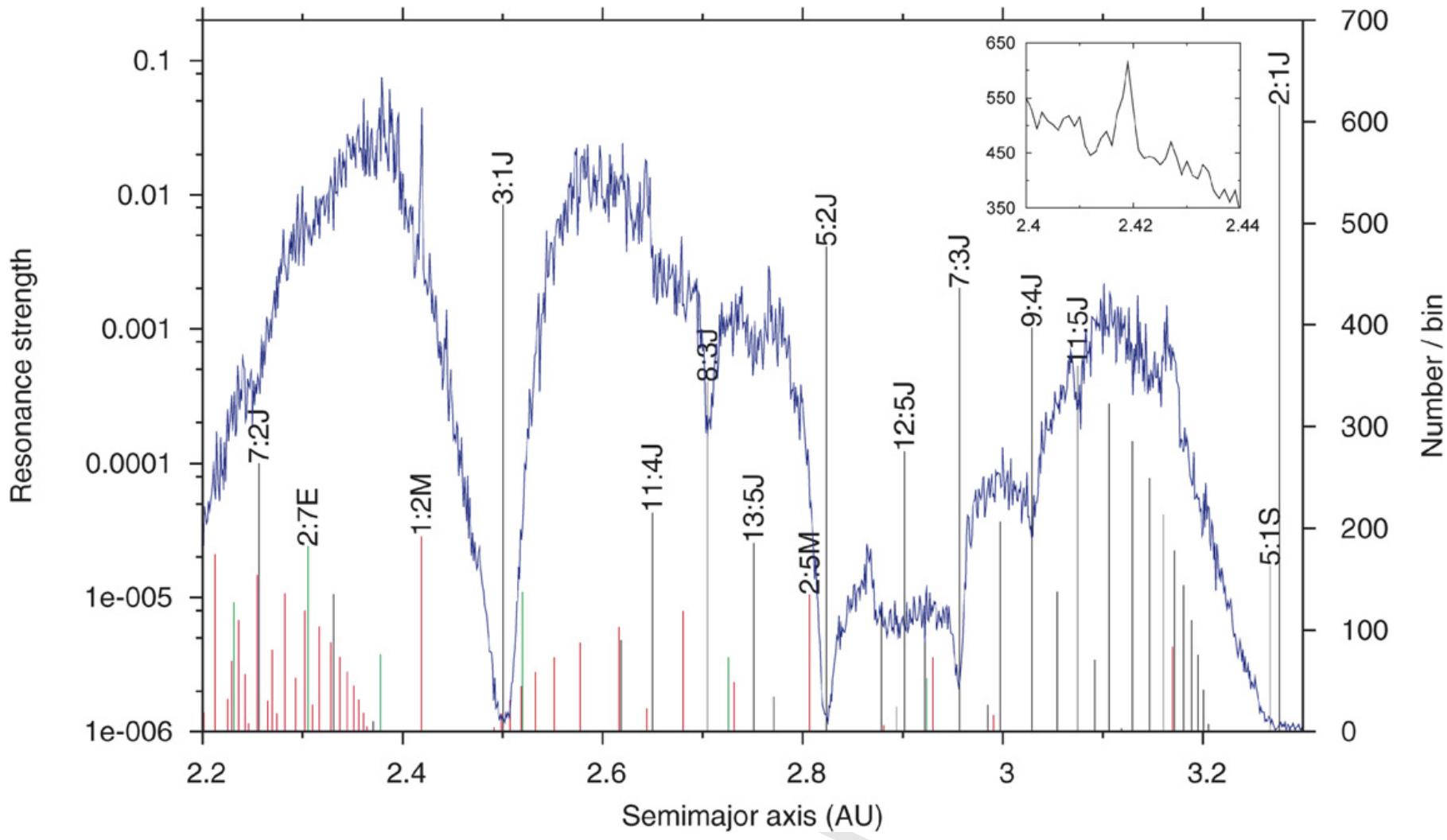
(applet de Makoto Yoshikawa)

# Hildas y Troyanos de Jupiter



(animaciones de Petr Scheirich)

## Cinturon de asteroides: histograma de $a$



Existe una concentracion de asteroides en la resonancia externa 1:2 con Marte. La densidad (asteroides /  $\Delta a$ ) es aproximadamente superior en un 20% en la resonancia.

# Búsqueda de asteroides resonantes en la 1:2M

- Integración orbital de  $\sim 4000$  asteroides con  $2.415 < a < 2.423$  UA por 30.000 años
- Analizamos la evolución del **ángulo crítico** de la resonancia 1:2M

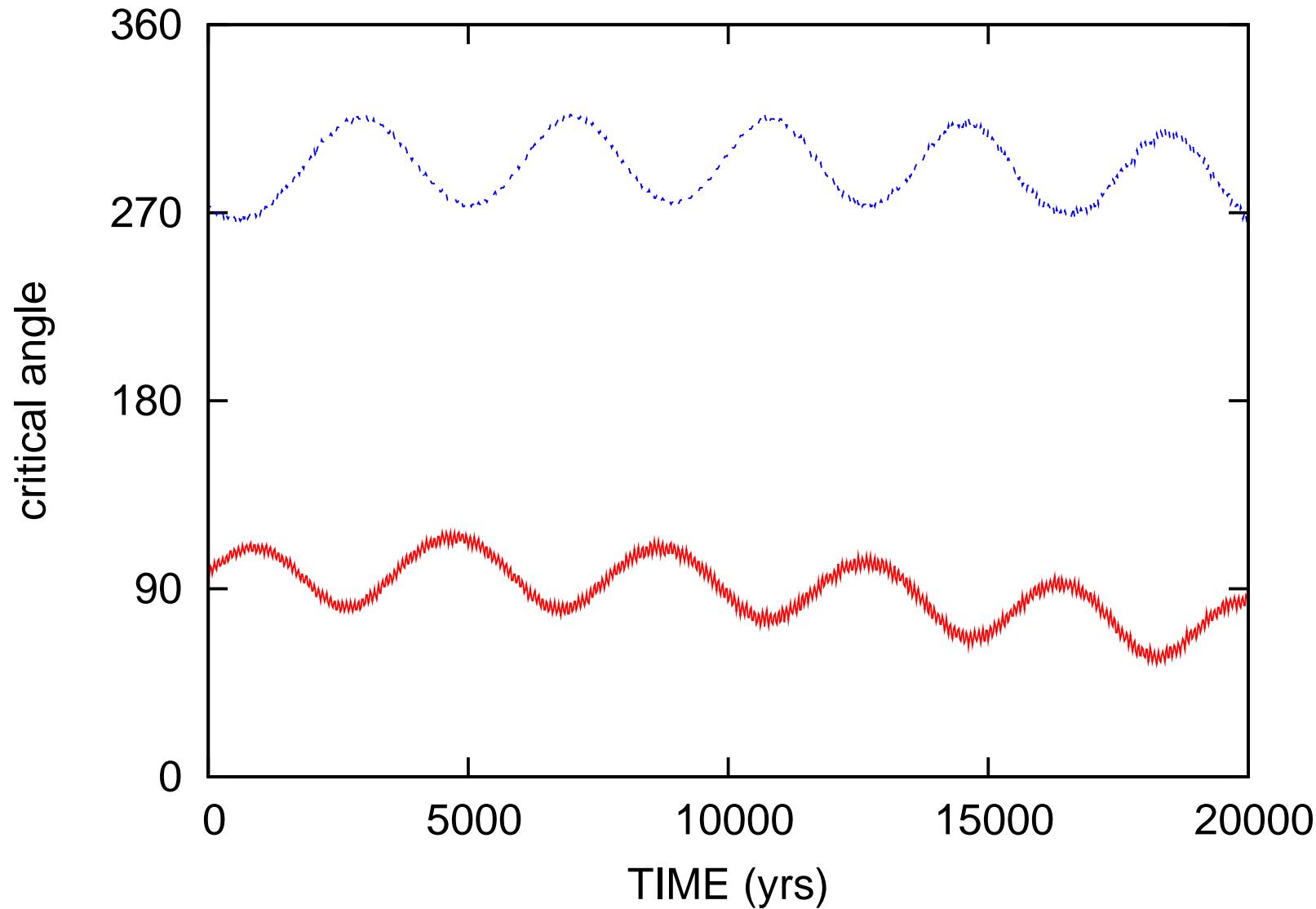
$$\sigma(t) = 2\lambda - \lambda_M - \varpi$$

si  $\frac{d\sigma}{dt} = \begin{cases} > 0 & \text{siempre} \\ < 0 & \text{siempre} \end{cases} \implies \text{NO hay resonancia}$

si  $\frac{d\sigma}{dt}$  oscila entorno de cero  $\implies$  SI, hay resonancia  
y en este caso  $\sigma$  oscila (**libra**) entorno a un punto de equilibrio (**centro de libración**) con cierta **amplitud**.

- Resultado: aproximadamente 1500 asteroides evolucionando en la resonancia 1:2 exterior a Marte (Gallardo 2007, Icarus).

## Ejemplo: libraciones ("asimetricas")

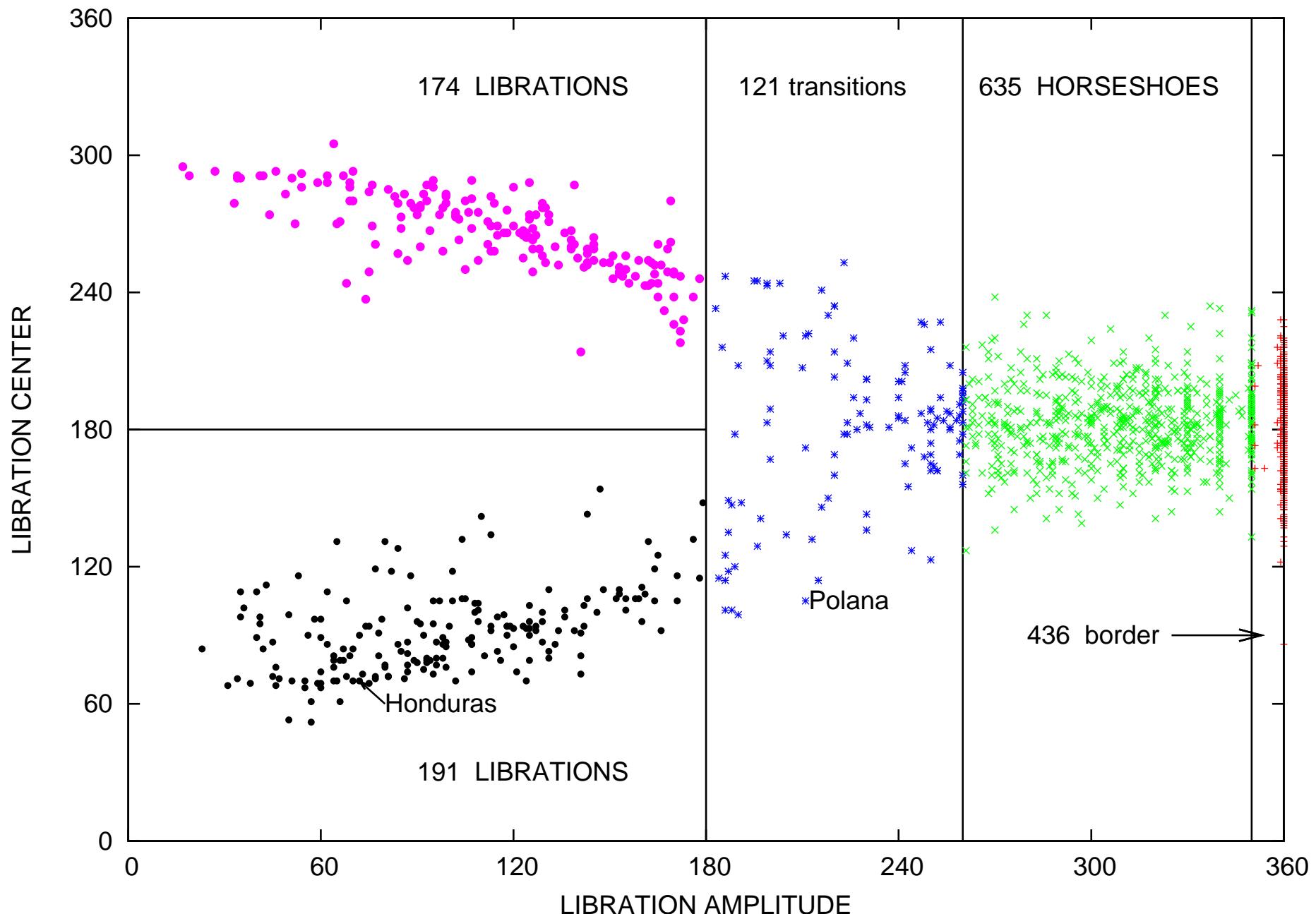


## Los mas grandes ( $D > 10$ km)

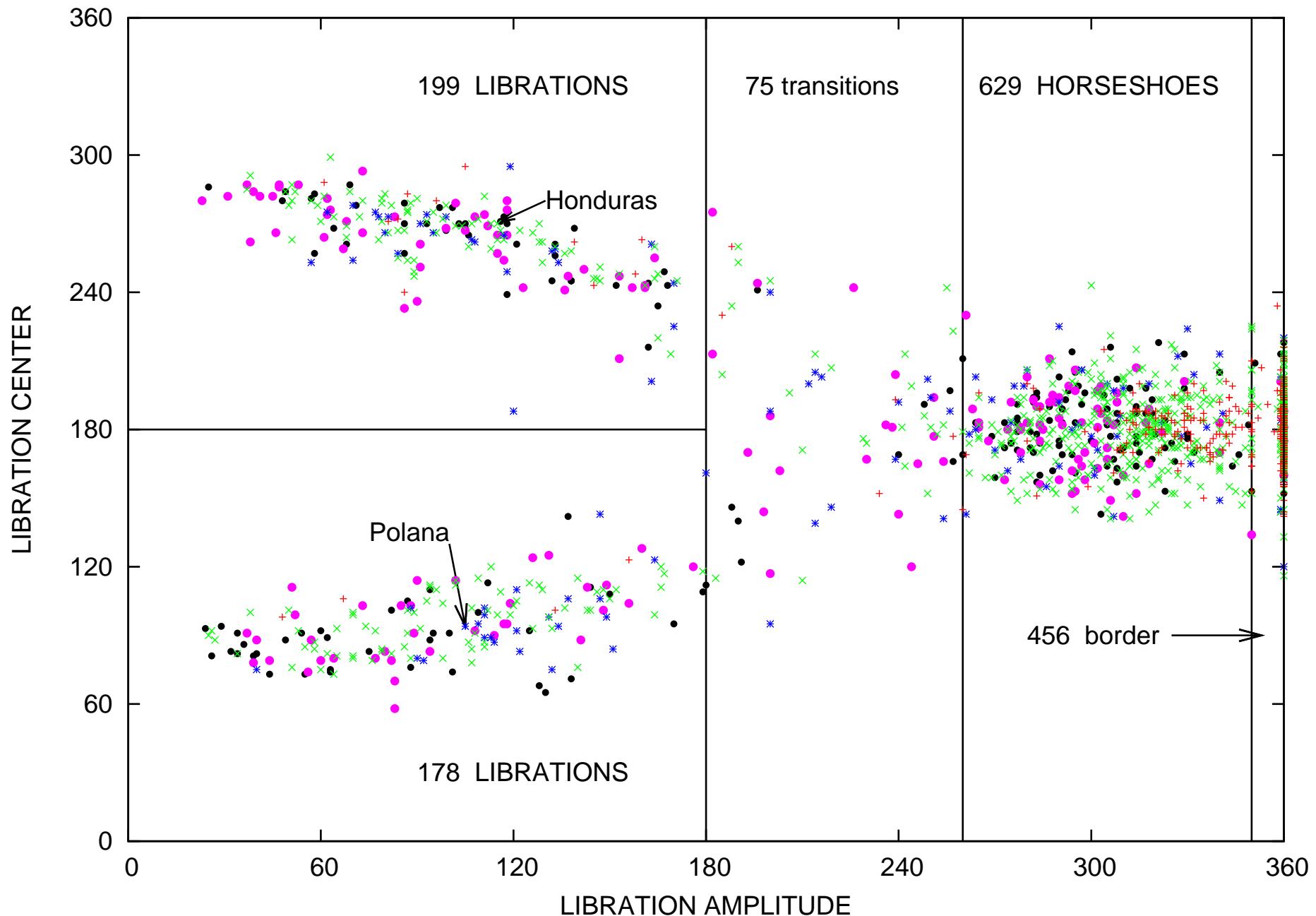
Asteriode	$H$	$e_p$	$i_p(^{\circ})$	$\sigma_c(^{\circ})$	$\Delta\sigma(^{\circ})$
(142) Polana	10.2	0.1573	3.198	105	211
(1998) Titius	12.2	0.0848	7.764	70	124
(3665) Fitzgerald	12.6	0.1151	9.557	289	95
(9652) 1996 AF2	13.0	0.1967	6.860	96	125
(2798) Vergilius	13.1	0.0438	5.944	214	200
(11576) 1994 CL	13.3	0.1394	11.111	80	131
(11055) Honduras	13.5	0.1937	11.774	70	72
(11751) 1999 NK37	13.7	0.1347	2.656	94	142
(8748) 1998 FV113	13.7	0.0917	5.937	226	170
(42786) 1998 WU4	13.8	0.1196	22.383	141	197
(2994) Flynn	13.9	0.1974	2.649	275	102

"los Polanas" mas grandecitos

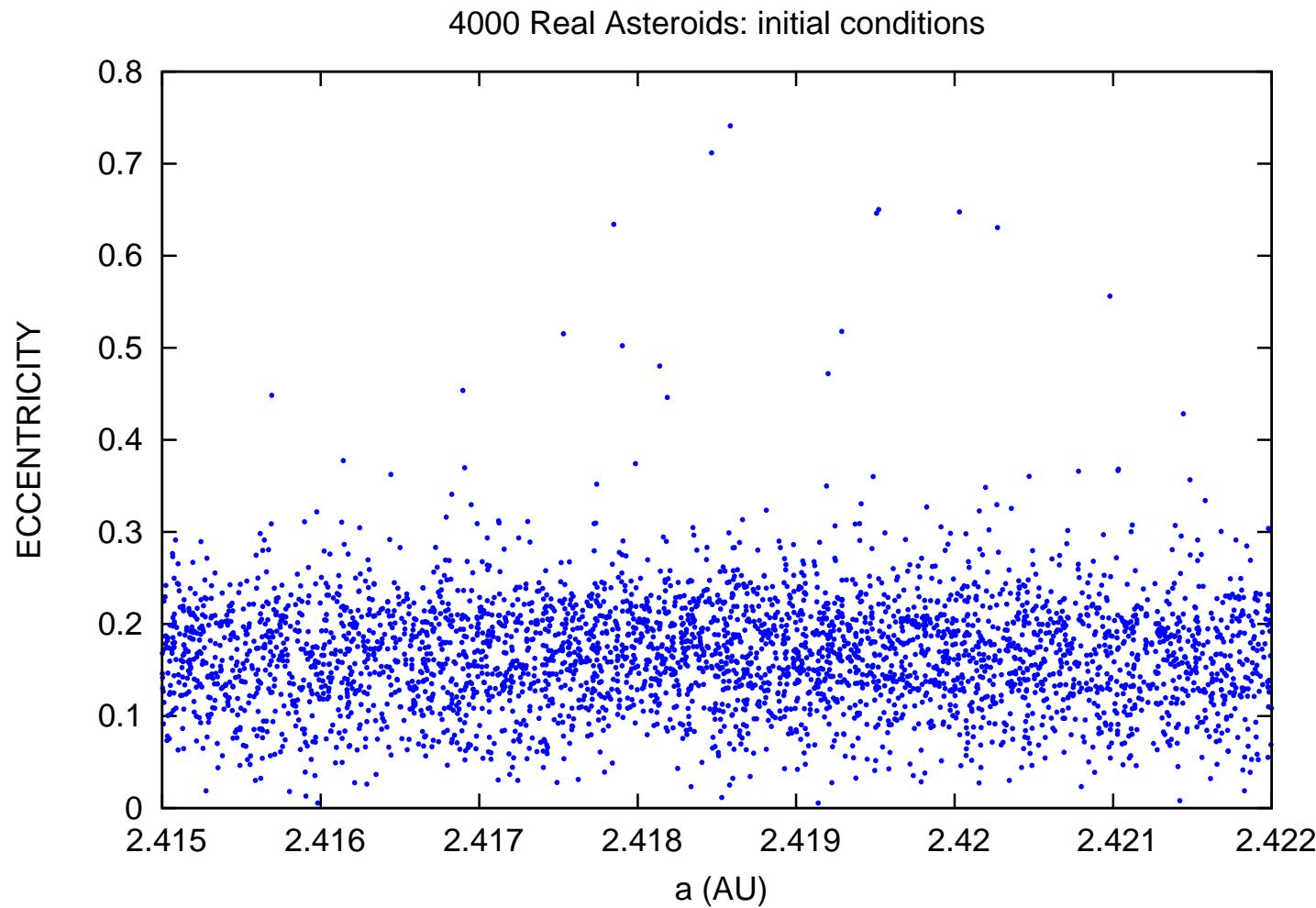
# La población HOY



# Luego de 1 millón de años



## Elementos orbitales instantaneos



No parece haber una concentracion. Los elementos instantaneos son la suma de varios terminos.

## Excentricidad "propia"

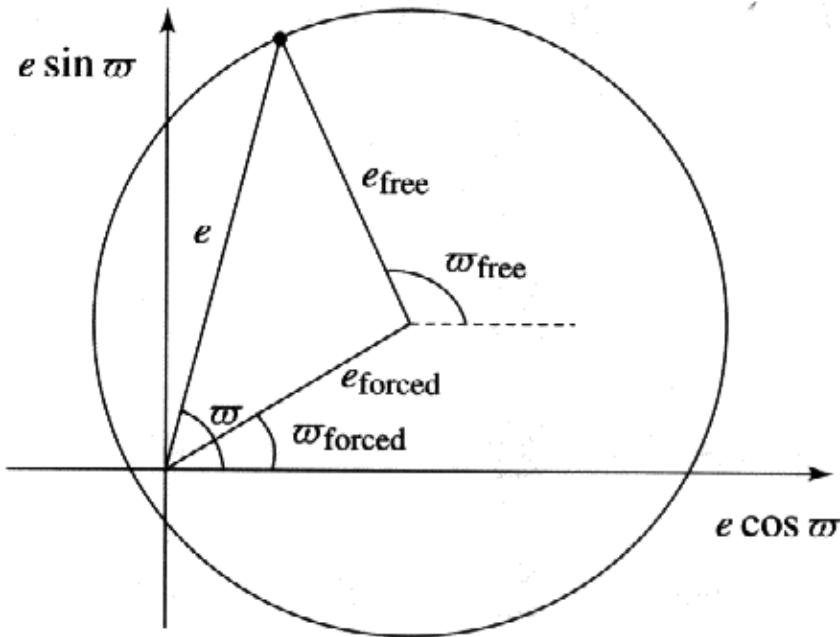
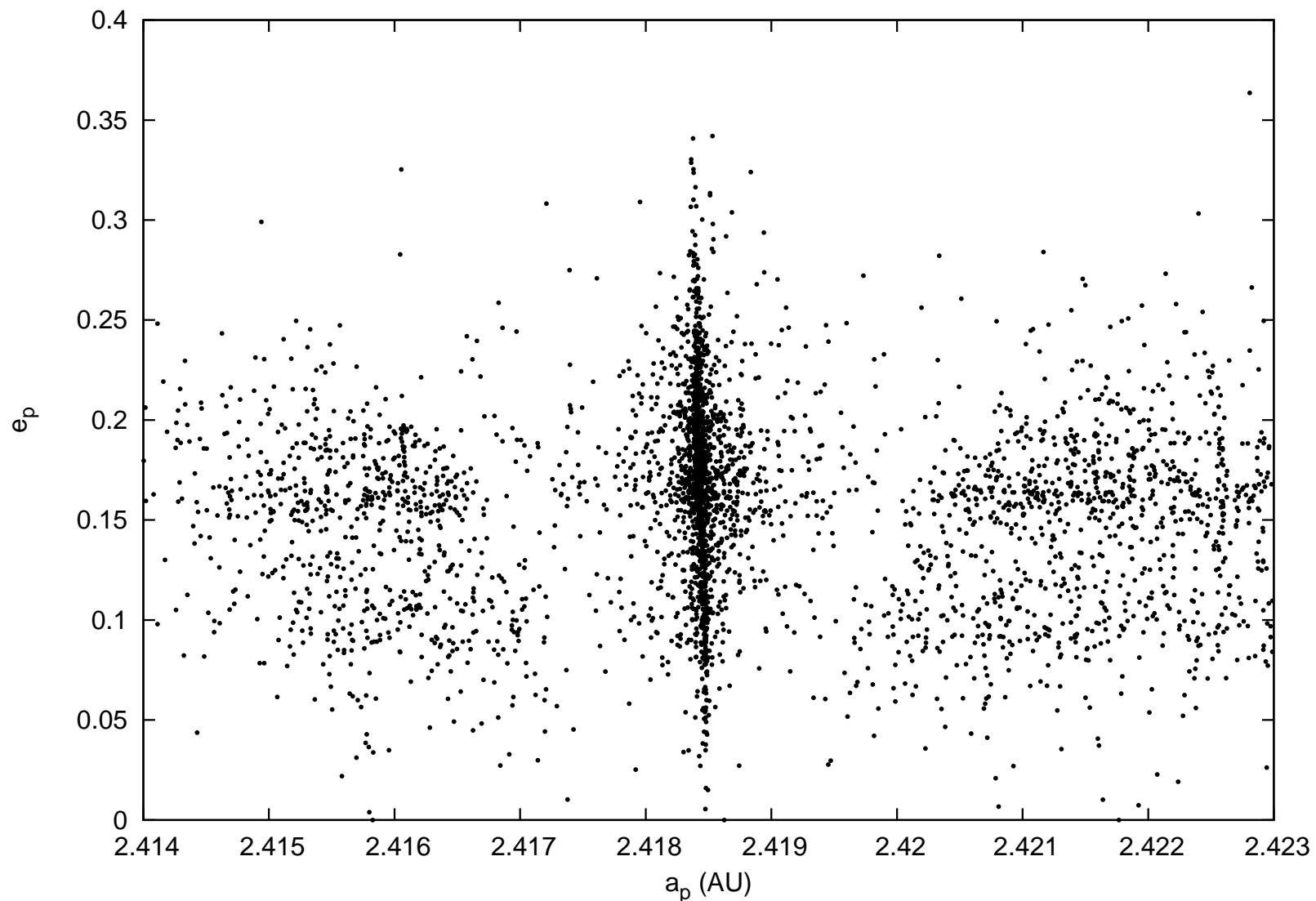


Fig. 7.2. The geometrical relationship among the osculating, free, and forced eccentricities and longitudes of pericentre for the case  $e_{free} > e_{forced}$ .

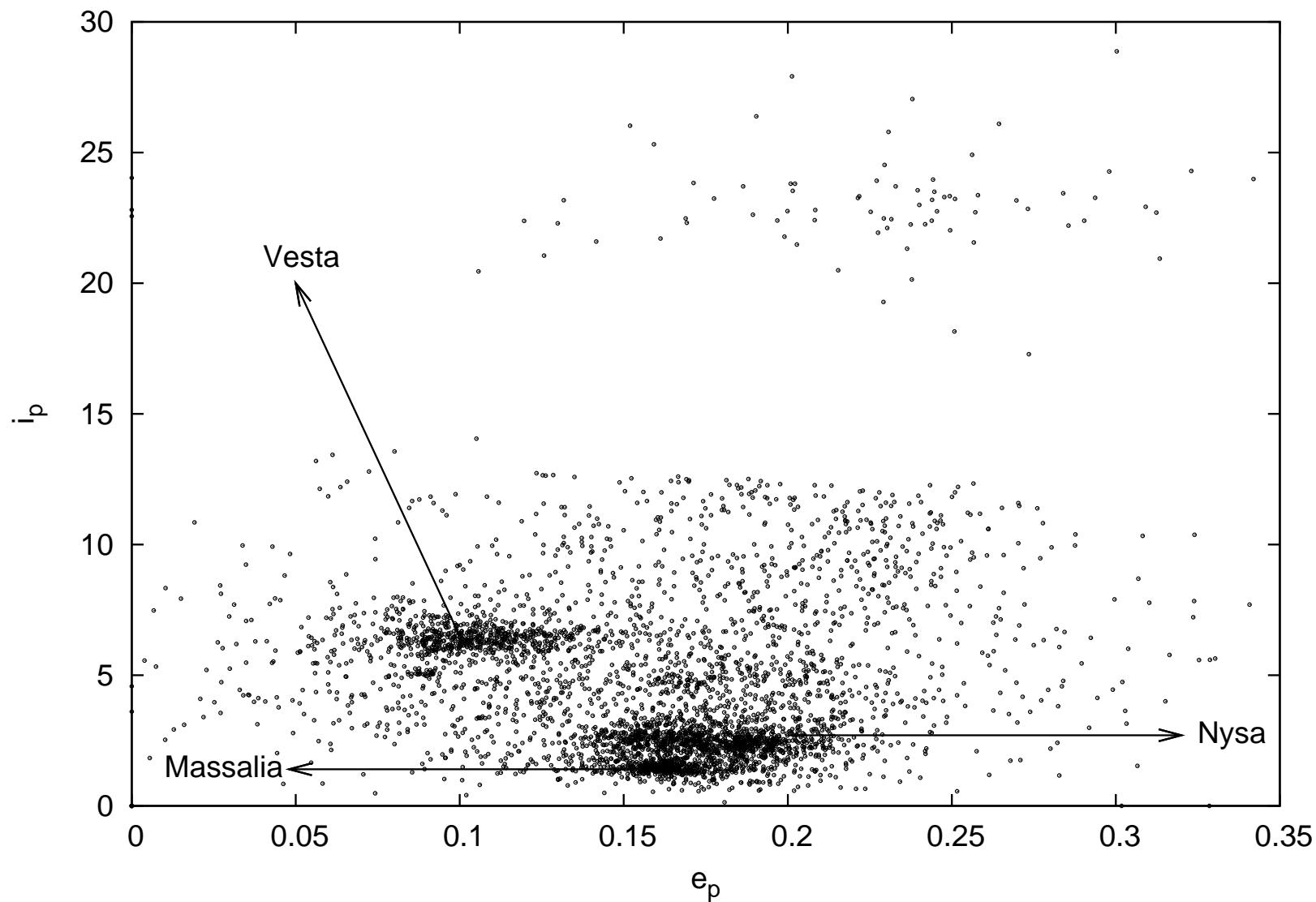
(ver animacion)

## Estructura de la resonancia en $(a_p, e_p)$

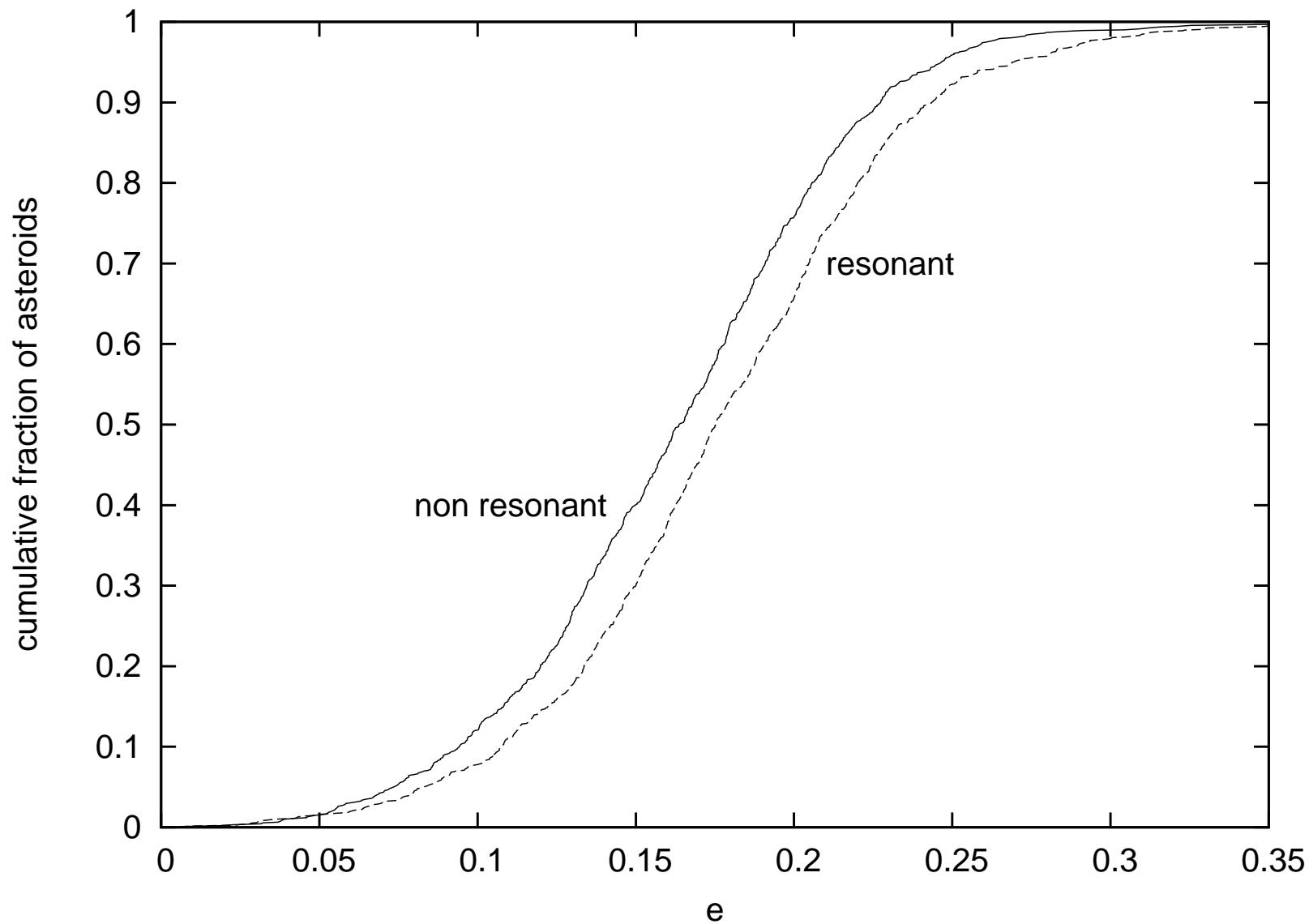


Ahora si vemos la concentración en  $a \simeq 2.4184$  UA.

### 3 familias presentes

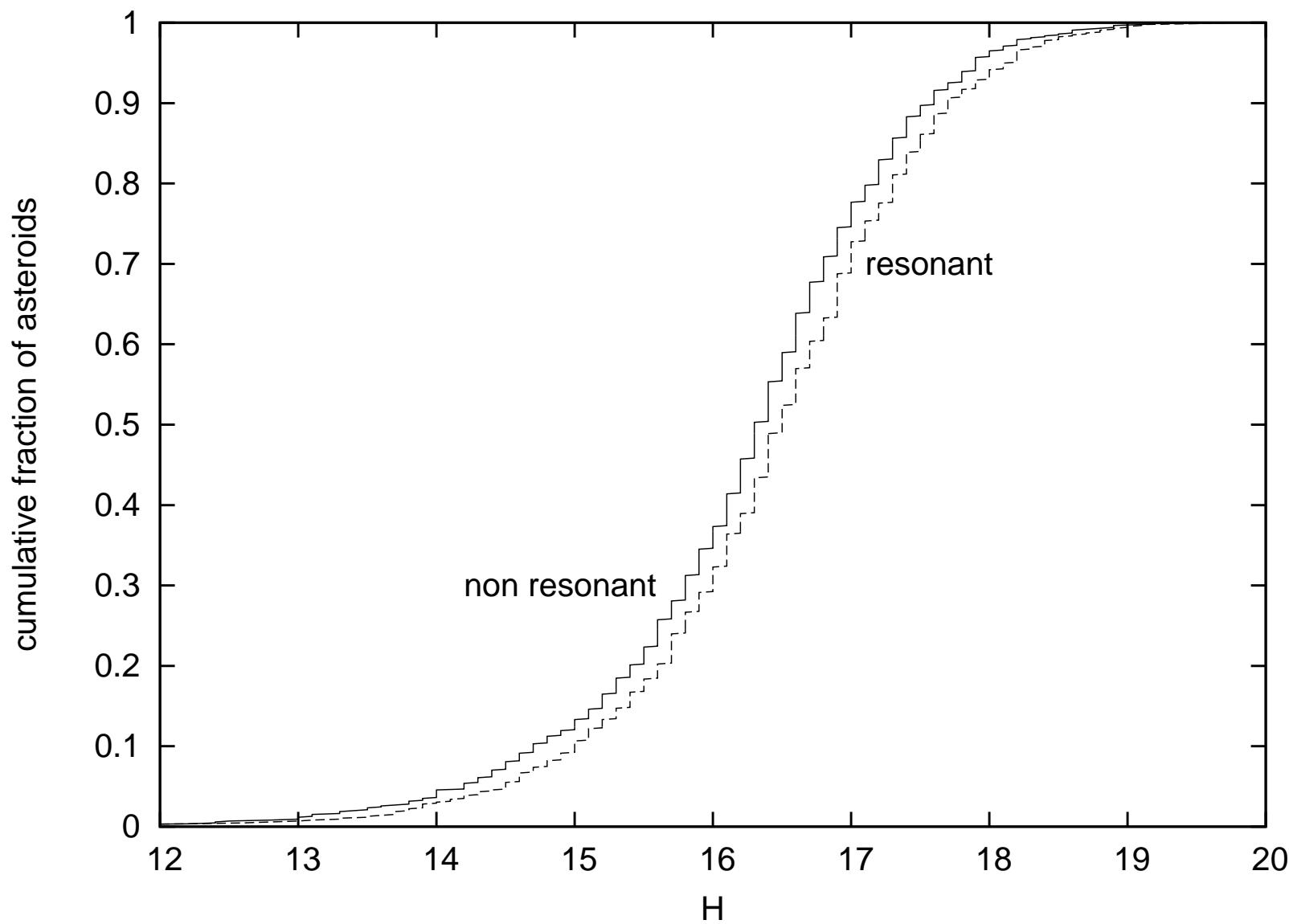


# Propiedades de los asteroides resonantes: excentricidades altas

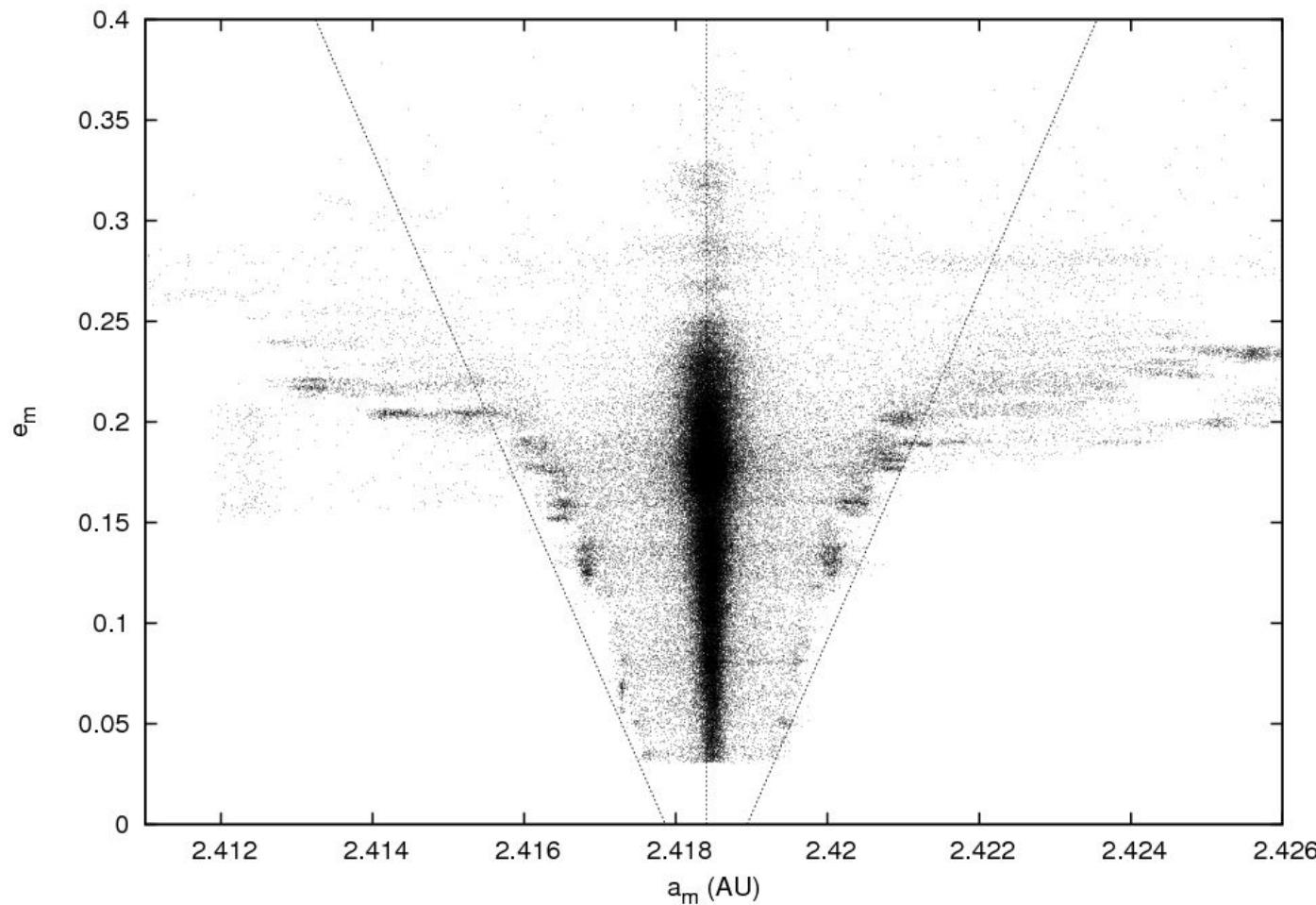


Las órbitas están excitadas.

## Tamaños ( $H$ ): son mas chicos

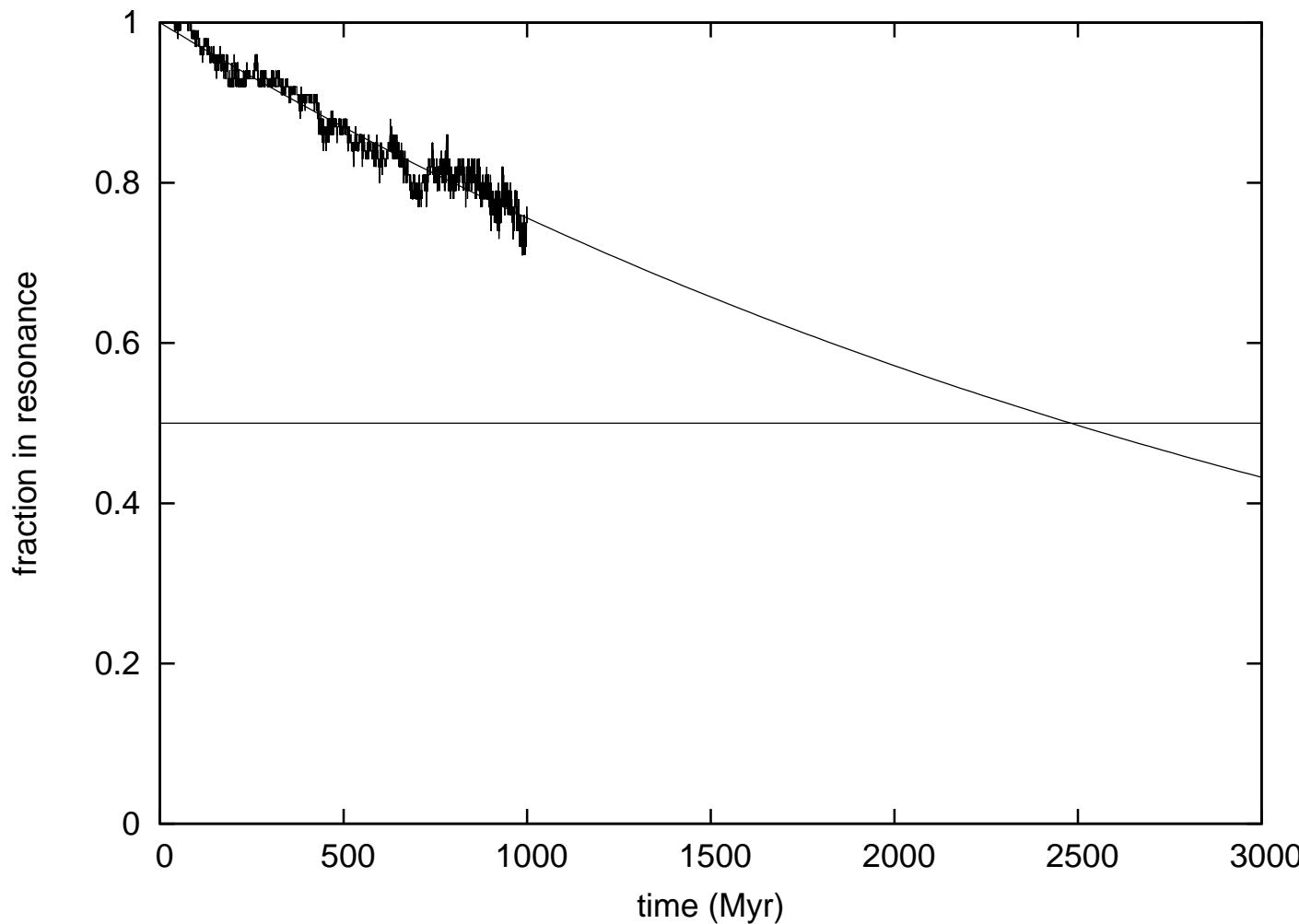


# Evolucion orbital a largo plazo



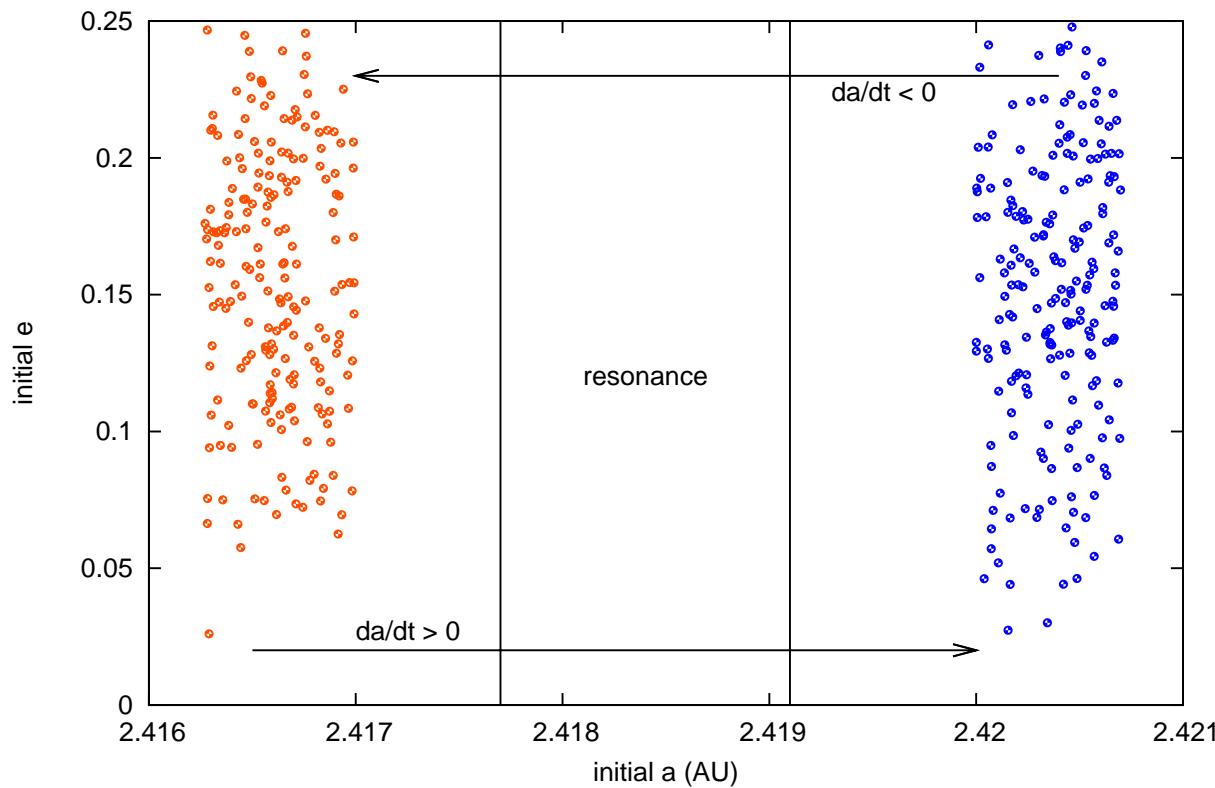
Evolucion de 100 asteroides resonantes a los largo de 1000 millones de años.  
(ver animacion)

## Vida media muy larga



$$\frac{dn_{res}}{dt} = -\alpha n_{res} \implies n_{res}(t) = e^{-\alpha t}$$

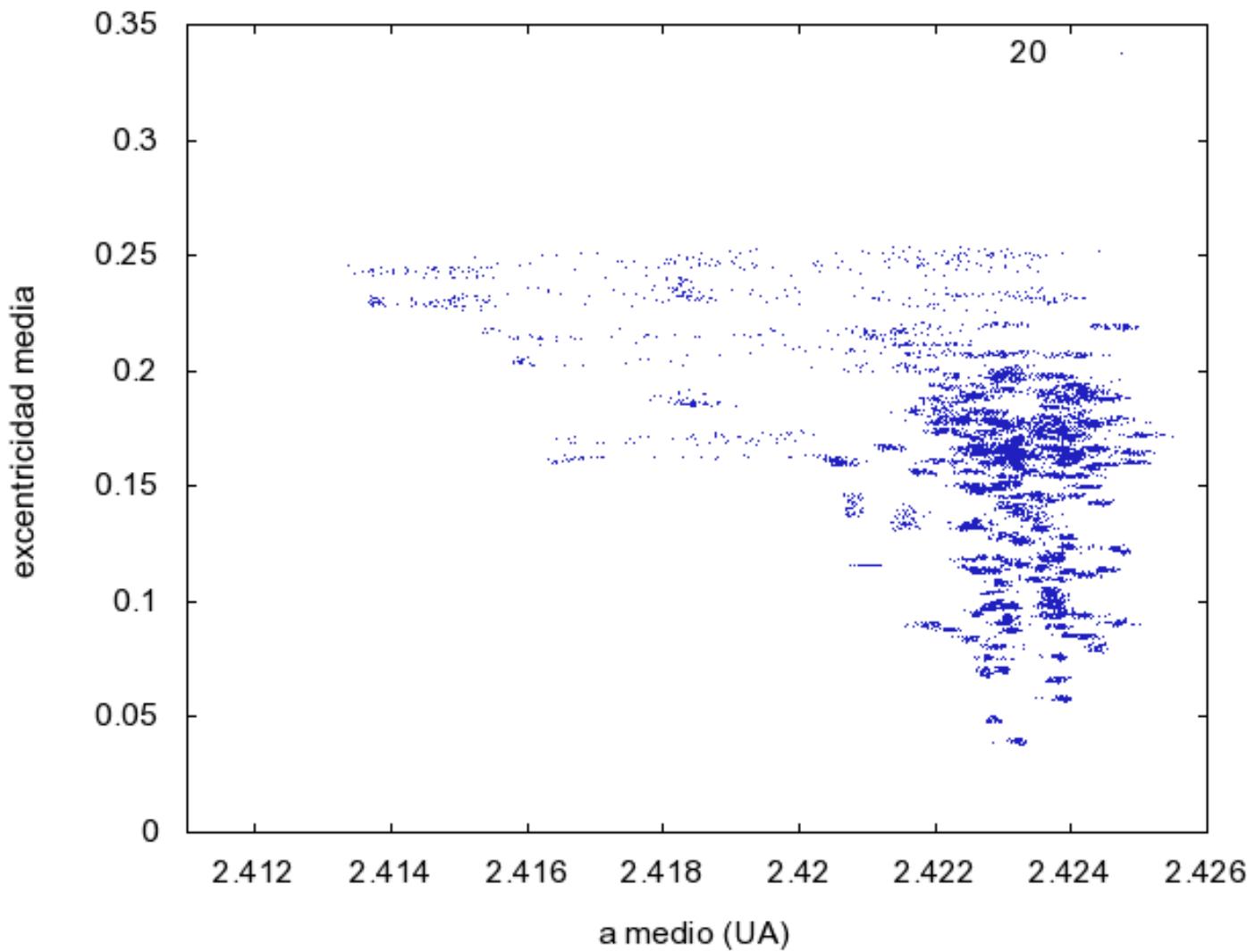
# Simulaciones con Yarko



Imponemos varios valores de migración orbital  $da/dt$ .

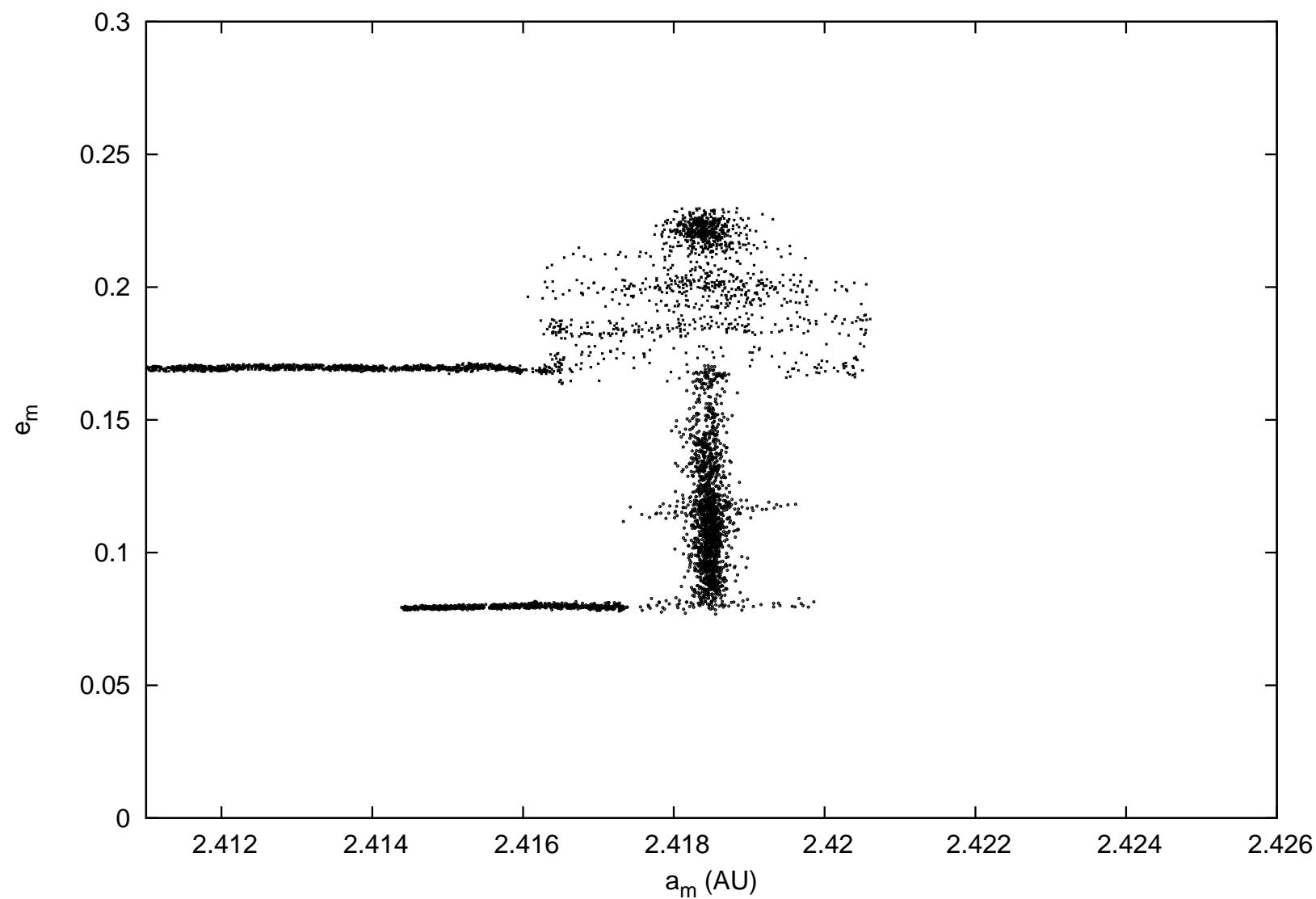
Simulacion	$\dot{a}$	$R$ (m)	$\Delta T$ (Myr)	$\Delta a$ (AU)	$t_{eyec}$ (Myr)
1	0.01	1	2	0.02	5 C
2	0.001	30	20	0.02	10 C
3	0.0001	600	200	0.02	90 C
4	0.00001	5000	1000	0.01	1000 E

## Migracion, captura y escape

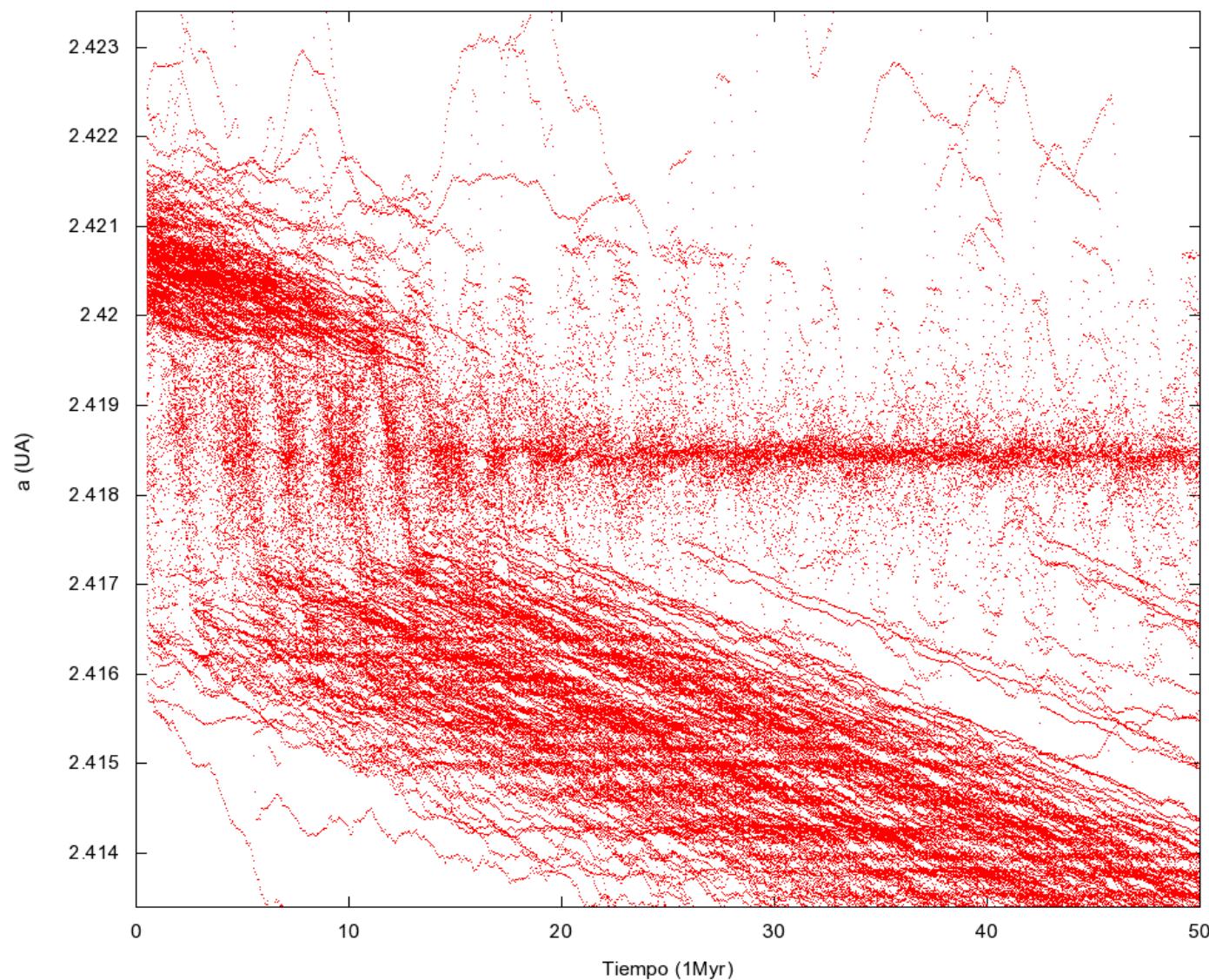


(ver animacion)

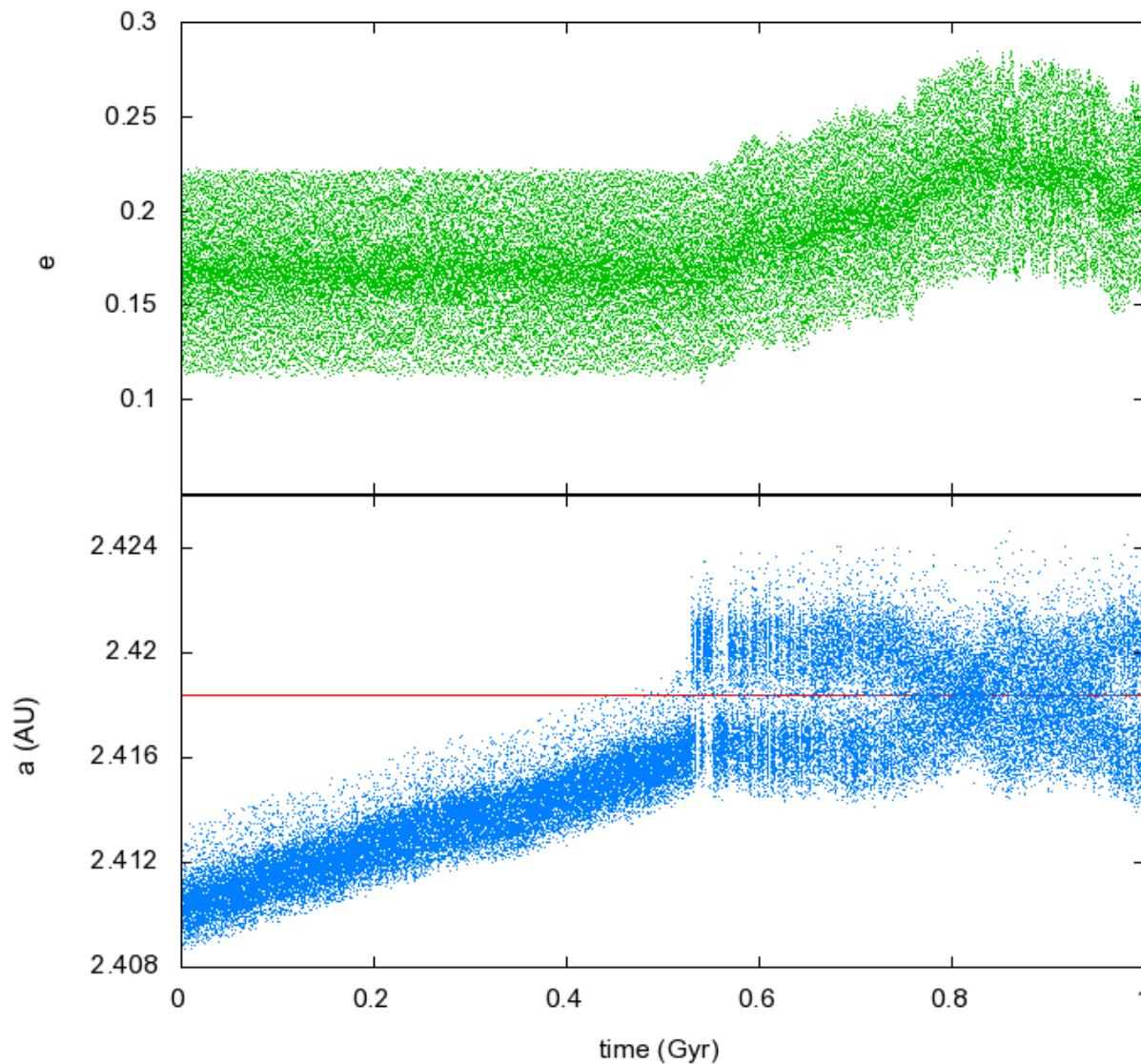
# Difusión en excentricidad



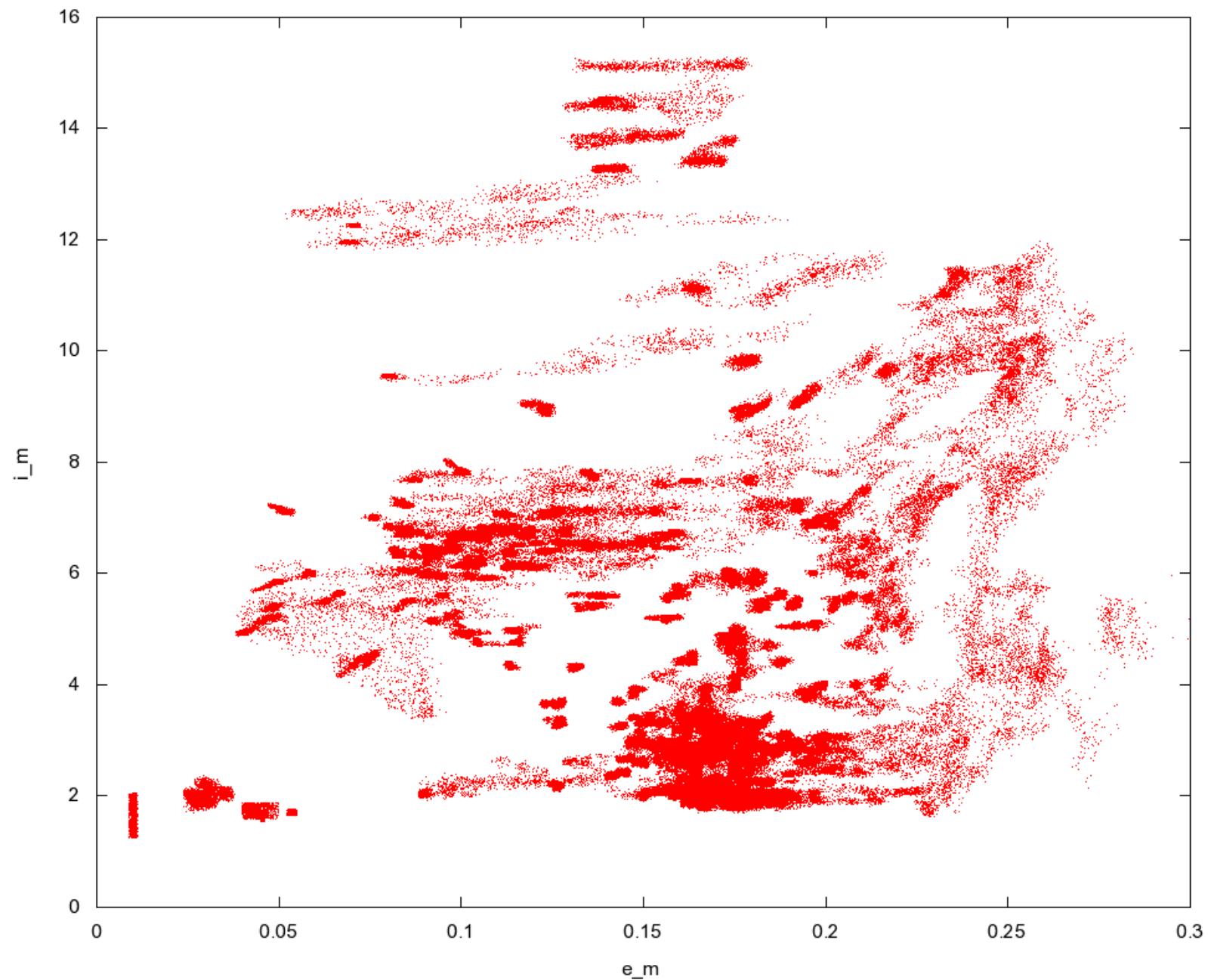
# Otra simulación



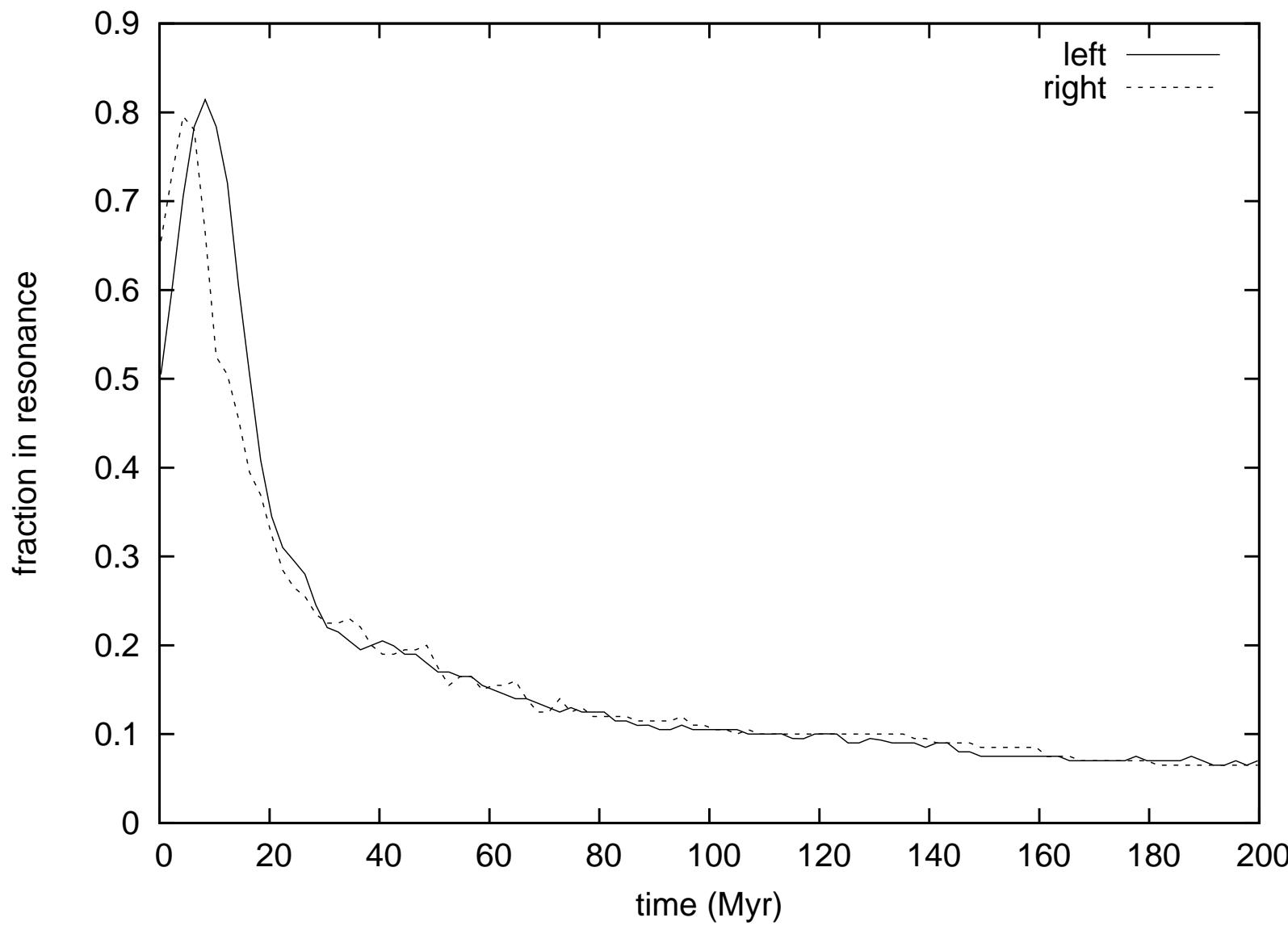
# Migracion y captura en sticking



# Difusion en excentricidad e inclinacion



## Captura, escape y colas de sobrevivientes



## Resonantes en estado estacionario

$$\dot{N}_{\text{entran}} = \dot{n}_{\text{salen}} = n/\tau$$

entonces

$$n = \dot{N}_{\text{entran}} \tau$$

pero a su vez

$$\dot{N}_{\text{entran}} = \frac{dN}{dt} = \frac{dN}{da} \dot{a}_{\text{yarko}}$$

entonces, en equilibrio el numero de asteroides en resonancia  $n$  es:

$$n = \frac{dN}{da} \dot{a} \tau$$

El ancho total de la resonancia es  $\Delta a \simeq 0.005$  UA por lo que la densidad de asteroides en la resonancia queda:

$$\frac{n}{\Delta a} = \frac{dN}{da} \frac{\dot{a} \tau}{0.005}$$

y nuestras simulaciones indican que

$$\frac{\dot{a} \tau}{0.005} > 1 \implies \frac{n}{\Delta a} > \frac{dN}{da}$$

por lo cual DEBE existir un exceso de asteroides en la resonancia.

## chicos / grandes

Calculemos ahora la relacion asteroides chicos / asteroides grandes dentro de la resonancia:

$$\frac{n_{chicos}}{n_{grandes}} = \frac{dN_{ch}}{dN_{gr}} \frac{\dot{a}_{ch}}{\dot{a}_{gr}} \frac{\tau_{ch}}{\tau_{gr}}$$

Pero en todas nuestras simulaciones encontramos que

$$\frac{\dot{a}_{ch}}{\dot{a}_{gr}} \frac{\tau_{ch}}{\tau_{gr}} > 1$$

entonces deberia cumplirse

$$\frac{n_{chicos}}{n_{grandes}} > \frac{dN_{ch}}{dN_{gr}}$$

que es justamente lo que observamos: **hay exceso de asteroides chicos en la resonancia.**

## Resumiendo

- la dinamica Yarko + gravitacion hace que la densidad de asteroides en la resonancia sea mayor que afuera
- el efecto Yarkovsky favorece a los asteroides chicos respecto a los grandes, generando una tasa chicos/grandes mayor dentro de la resonancia (efectos puramente gravitacionales no distinguen tamaños)
- existe difusion en excentricidad e inclinacion: dispersion de familias
- para grandes asteroides la vida media es de 1000 millones de años
- captura en resonancia por derecha igual que por izquierda, contradiciendo los modelos simplificados
- ¿como llego Polana a la resonancia?
- enviado a Icarus: Gallardo, Venturini, Roig y Gil-Hutton (2011)
- $\sim 2$  años de tiempo de cpu
- $\sim 200$  millones de lineas de datos crudos
- gracias a Proyecto ANII FCE 2007 318, a PEDECIBA, al cluster y Cesar