

“La población del SD como fuente de cometas de la nube de Oort: evaluación de su rol actual y pasado en poblar la nube de Oort”

**Julio A. Fernández, Tabaré Gallardo y Adrián Brunini.
(Icarus 2004)**

- ❖ Introducción
- ❖ Modelo numérico
- ❖ Resultados
- ❖ Barrera de Neptuno
- ❖ Dependencia del estado final en la “q” inicial
- ❖ Tasa de transferencia de los SDOs a la nube de Oort
- ❖ Conclusiones.

❖ Introducción

- ❖ Modelo numérico
- ❖ Resultados
- ❖ Barrera de Neptuno
- ❖ Dependencia del estado final en la “q” inicial
- ❖ Tasa de transferencia de los SDOs a la nube de Oort
- ❖ Discusión y conclusiones.

Introducción

- ★ Los cometas son considerados como los “restos” de la formación planetaria. En particular la zona de Urano y Nep. ha sido sugerida como la fuente de la mayoría de los cometas de la N.O (Fernández 1980a; Fernández & Ip 1981)
- ★ Hay otras fuentes de cuerpos helados, por ejemplo, la región entre 4-6 AU, o los objetos del cinturón de Kuiper (40 - 50 UA). Esta última región ha sido propuesta como fuente de los JFCs (Fernández 1980b y Duncan et al. 1988)
- ★ El suministro de cometas de la región TN a la región planetaria interna, requiere la presencia de una población transitoria de cuerpos cuyas órbitas han sido removidas del cinturón TN (llamados Centauros)

Introducción

- ★ Levison & Duncan (1997) realizaron integraciones numéricas de objetos en encuentros con Nep. y estudiaron su evolución durante 1 Gyr. Pudieron estimar la eficiencia en la transferencia a órbitas de la JF (~30% de la muestra inicial).
- ★ Así como hay una población transitoria hacia la región planetaria, también se esperó encontrar cuerpos hacia órbitas más externas con altas “e” y “q” más allá de Nep., que son llamados SDOs ($q > 30$ UA y $a > 50$ UA)
- ★ Levison & Duncan (1997)) a partir de TNOs fuertemente perturbados por encuentros cercanos con Nep. fueron capaz de reproducir el SD
- ★ Como se han descubierto cada vez más objetos en la región TN, ha surgido una clasificación dinámica:
 - 1) Cinturón clásico
 - 2) Objetos resonantes
 - 3) SD
 - 4) ESD o detached ($q > 38$ UA)

Introducción

- ★ Trujillo et al. (2000) estimaron la población del SDOs con $R > 50$ km:
 - Consideraron una muestra de 4 SDOs con $q < 36$ UA
 - $N_{\text{SDO}} = 3.1 \times 10^4$ (con $R > 50$ km)
 - Si se consideran SDOs hasta $q = 40$ UA, la estimación debe ser multiplicada al menos un factor 2 $\rightarrow N_{\text{SDO}} = 6 \times 10^4$ (con $R > 50$ km)
- ★ Trujillo et al. (2001) encuentran que la distribución diferencial de tamaños de los TNOs clásicos sigue una ley de potencia de índice $s \sim 4$.
- ★ Los autores asumen que esta distribución de tamaños también se aplica a los SDOs con el mismo exponente “s” para cometas con radios $R=1$ km
$$N_{\text{SDO}}(R > 1\text{km}) = 6 \times 10^4 \times 50^{(s-1)}$$

Tomando como valor más probable $s = 4$, obtienen $N_{\text{SDO}} = 7.5 \times 10^9$, pero puede ir hasta $N_{\text{SDO}} = 7.8 \times 10^{10}$ o hasta $N_{\text{SDO}} = 1.1 \times 10^9$ para $s = 4.6$ y $s = 3.5$ respectivamente.

Existe incertezas de un orden de magnitud en la estimación de la población del SD

Introducción

- ★ Levison & Duncan (1997) estiman que $\sim 6 \times 10^8$ SDOs podrían suministrar todos los JFCs observados, aunque este resultado podría depender del modelo y representaría un límite inferior.
- ★ Los autores adoptan una población para el SD 7.5×10^9 objetos, pero teniendo en mente que todavía existe incertidumbre en la estimación de la población

El objetivo principal de este trabajo es estudiar la dinámica de los SDOs (incluyendo los ESD) y la probabilidad de que estos objetos alcancen la región planetaria, grandes distancias heliocéntricas o ser transferidos a la N.O

- ❖ Introducción
- ❖ Modelo numérico
- ❖ Resultados
- ❖ Barrera de Neptuno
- ❖ Dependencia del estado final en la “q” inicial
- ❖ Tasa de transferencia de los SDOs a la nube de Oort
- ❖ Discusión y conclusiones.

Modelo numérico

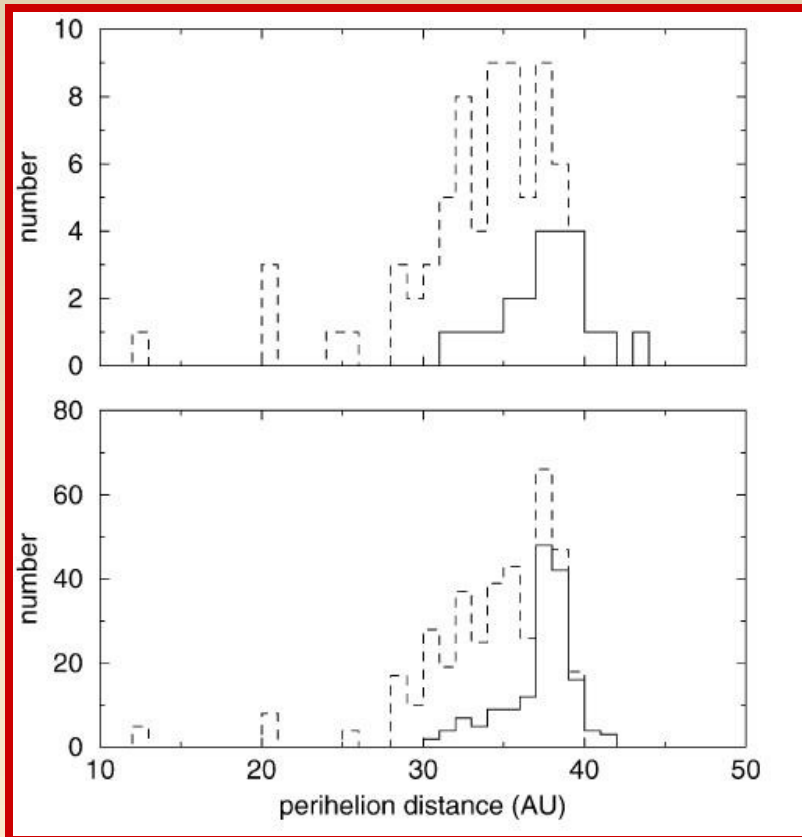
- Integran numéricamente, con el código EVORB, las órbitas de 76 SDOs tomados del MPC (datos hasta el 2002)
- Adicionan a sus integraciones 399 clones con la misma órbita que los objetos reales, pero con diferentes posiciones iniciales en su órbita (diferentes long. Medias)
- El modelo dinámico incluye:
 - * Sol y los 4 planetas gigantes (las masas de los planetas terrestres fueron agregadas al Sol)
 - * Utilizaron un paso de 0.25 años
 - * Integraron por 5×10^9 años, pero la integración finaliza si:
 - i) un SDO colisiona con un planeta
 - ii) llega a la región interior de la órbita de Júpiter **(en este caso, el objeto es eyectado o transferido a JFCs en una escala de tiempo muy corta)**
 - iii) alcanza una $d \sim 20000$ UA en una órbita elíptica **(en este caso se considera que el objeto se almacena en la N.O)**
 - iv) alcanza una $d \sim 20000$ UA en una órbita hiperbólica **(en este caso se considera que el objeto se fue eyectado al espacio interestelar)**

- ❖ Introducción
- ❖ Modelo numérico
- ❖ Resultados
- ❖ Barrera de Neptuno
- ❖ Dependencia del estado final en la “q” inicial
- ❖ Tasa de transferencia de los SDOs a la nube de Oort
- ❖ Discusión y conclusiones.

Resultados

Tiempo de vida dinámico de los SDOs

La supervivencia de los SDOs es una función que depende fuertemente de La “ q_{inicial} ”.



* Los SDOs con $q_{\text{inicial}} < 36$ UA se pierden al finalizar el tiempo de estudio

* Los SDOs con $q_{\text{inicial}} > 38$ UA permanecen después de 5×10^9 años (da la idea de que ellos forman el disco dispersado extendido, quizás con un origen diferente)

Resultados

Tiempo de vida dinámico de los SDOs

El resultado anterior puede verse mejor con la vida media dinámica, es el tiempo que le requiere la muestra inicial disminuir a la mitad.

Ajustan una relación lineal empírica entre la q_{inicial} y el tiempo de vida medio dinámico:

$$\log t_{\text{dyn}} = a + bq_i$$

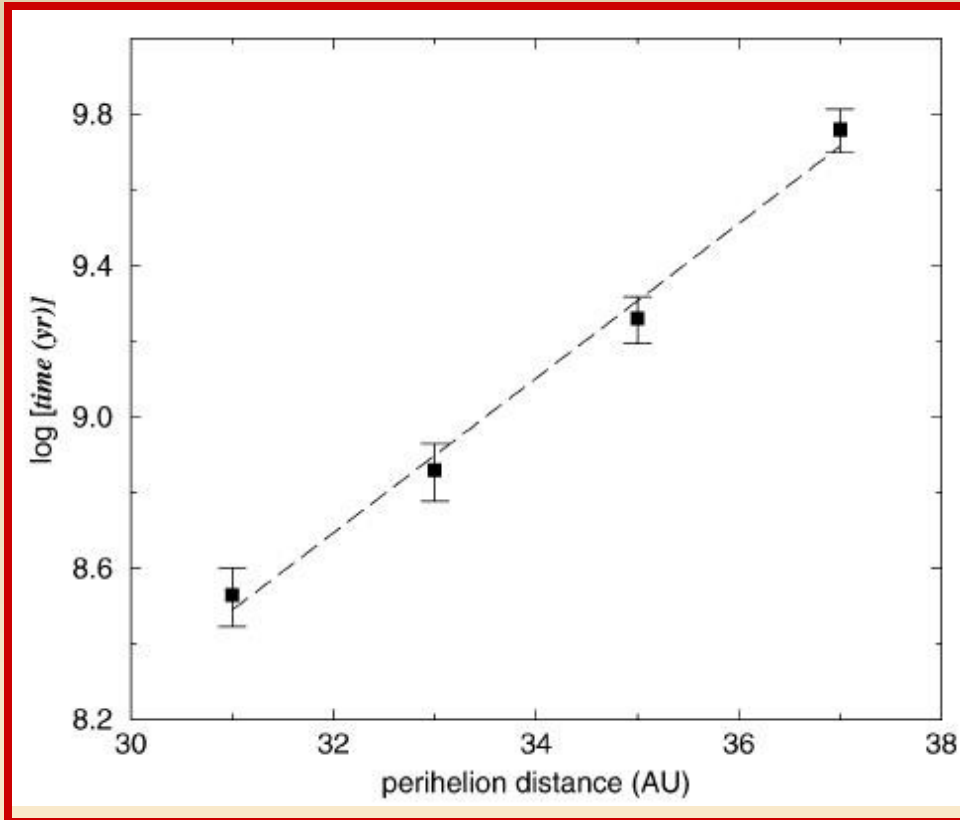
Donde $a=1.857$ y $b=0.213$.

$$t_{\text{dyn}} = 10^{\frac{(q_i - 33.5)}{4.7}} \text{ Gyr,}$$

Resultados

Tiempo de vida dinámico de los SDOs

Vida media dinámica de los SDOs y sus clones como función de sus q_{inicial}



Objetos con $q_{\text{inicial}} > 36.6$ UA tienen un tiempo de vida dinámico que excede la edad del sistema solar.

Para objetos más allá de la órbita de Neptuno, $31 < q_{\text{inicial}} < 36.6$ UA los autores, obtienen un tiempo de vida medio dinámico $t_{\text{din}} = 1.8 \times 10^9$ años.

Resultados

Diferentes estados finales

De los **76 SDOs reales**, 53 tuvieron los siguientes estados finales:

- 26 fueron ubicados en la N.O $\longrightarrow f_{\text{Oort}} = 26/53 = 0.49 \pm 0.10$
- 12 fueron eyectados al espacio interest. $\longrightarrow f_{\text{hip}} = 12/53 = 0.23 \pm 0.06$
- 15 alcanzaron la región de Júpiter $\longrightarrow f_{\text{júp}} = 15/53 = 0.28 \pm 0.07$

Resultados

Diferentes estados finales

De los **399 clones**, 239 tuvieron los siguientes estados finales:

- 110 fueron ubicados en la N.O $\longrightarrow f_{\text{Oort}} = 0.46 \pm 0.044$
- 62 fueron eyectados al espacio interest. $\longrightarrow f_{\text{hip}} = 0.26 \pm 0.033$
- 67 alcanzaron la región de Júpiter $\longrightarrow f_{\text{júp}} = 0.28 \pm 0.034$

Combinando ambas muestras:

$$\begin{aligned} f_{\text{Oort}} &= 0.47 \pm 0.04 \\ f_{\text{hip}} &= 0.25 \pm 0.029 \\ f_{\text{júp}} &= 0.28 \pm 0.031 \end{aligned}$$

Casi la mitad de los objetos se van a la N.O, mientras que la otra mitad se reparte Entre los que son eyectados y aquellos que alcanzan la órbita de Júpiter.

Resultados

Captura en los estados de resonancia

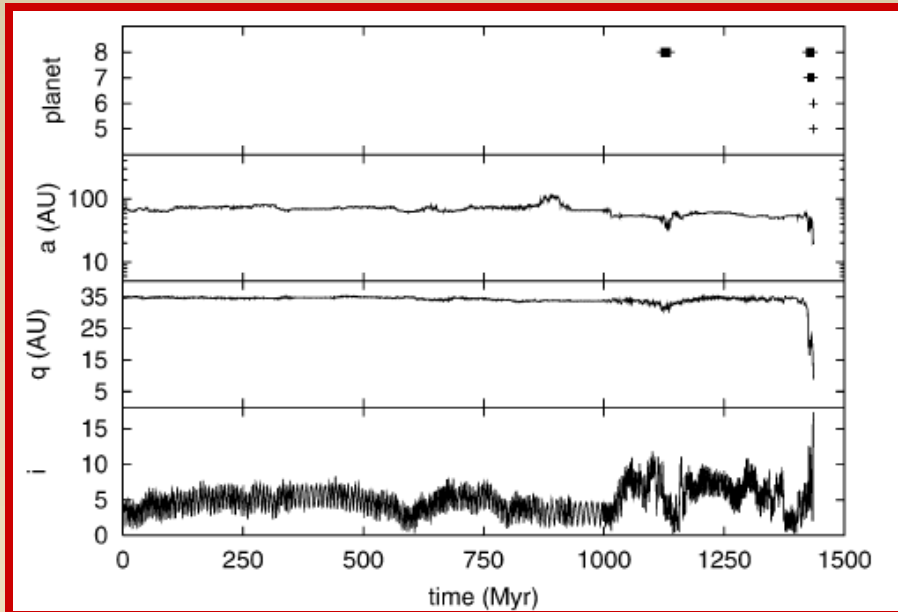
Desarrollaron un programa que detecta si los objetos permanecen o caen en resonancias de movimientos medios con Neptuno durante su evolución dinámica.

Encuentran que las resonancias de movimientos medios 2:5, 3:7 y 4:9 son estables, incluso para altas excentricidades (como lo son 2000 SR₃₃₁ y 2000 FE₈)

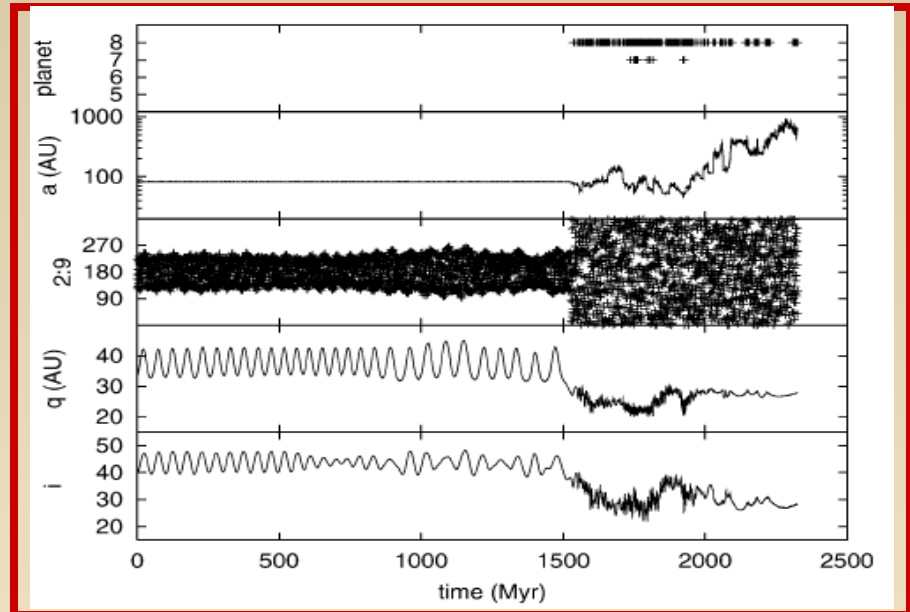
Object	Resonance	a (AU)	e	Time spent in the resonance (Gyr)
2002 CZ ₂₄₈	1:2	47.6	0.25	0.7
2000 SS ₃₃₁	1:3	62.4	0.51	At the beginning (0.08)
2001 KV ₇₆	1:3	62.4	0.41	At the beginning (2.0)
1999 RZ ₂₁₅	1:5	87.7	0.60	0.1
2002 GB ₃₂	1:6	99.1	0.61	At the beginning (0.5)
2001 FP ₁₈₅	1:13	166.3	0.74	1.0
2000 SR ₃₃₁	2:5	55.3	0.43	All
2000 FE ₈	2:5	55.3	0.40	All
2001 KC ₇₇	2:5	55.3	0.33	All
1999 DG ₈	2:9	81.8	0.51	At the beginning (1.5)
1999 HW ₁₁	3:7	52.8	0.30	All
1999 CV ₁₁₈	3:7	52.8	0.30	2.7
2001 KG ₇₆	4:9	51.5	0.34	All
2001 QW ₂₉₇	4:9	51.5	0.25	All

Resultados

Evolución dinámica de algunos SDOs particulares



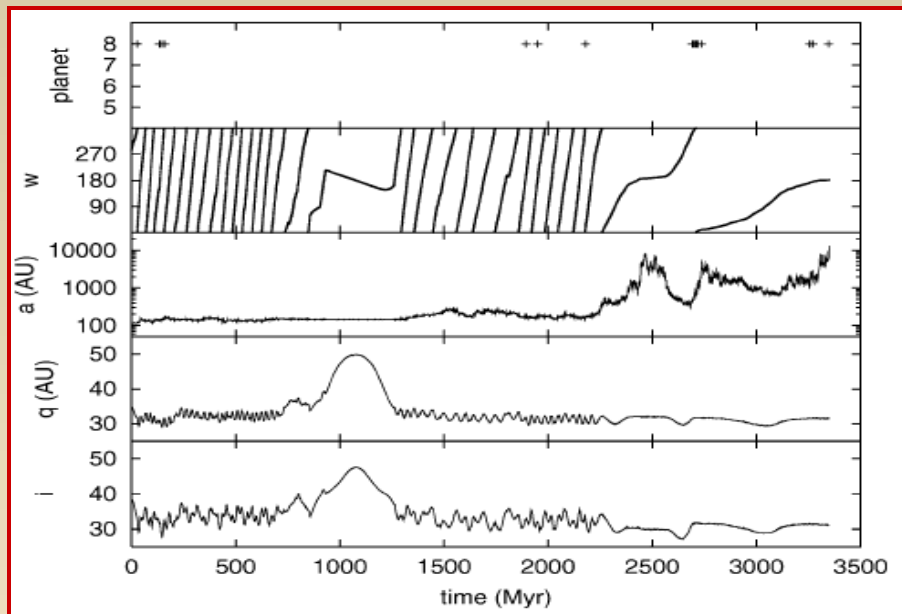
Objeto 2000 GY₃₂ termina en la región de Júp. Su evolución es suave ya que su “ q ” se encuentra más allá de Nep. Después de 1.4 Gyr cae su “ q ” y tiene un encuentro con Nep. En uno de esos encuentros el cuerpo es entregado a Ura., luego a Sat. y por último a Júp.



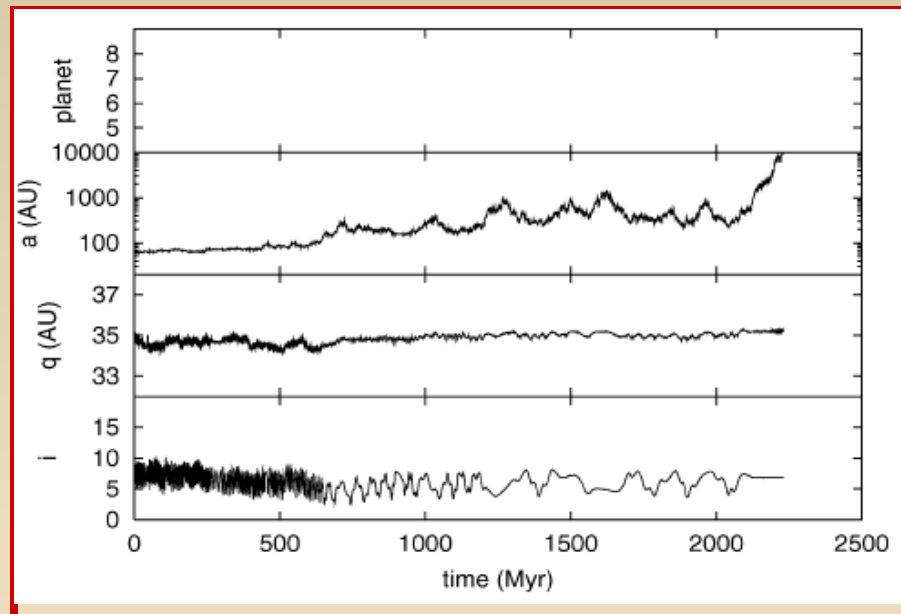
Objeto 1999 DG₈ termina siendo eyectado al espacio interestelar. Su “ q ” oscila entre 32 y 42 UA mientras su “ a ” permanece casi cte durante 1.5 Gyr porque está en res. 2:9 con Nep. Junto con la resonancia actúa Kozai forzando a oscilar “ q ” e “ i ”. La “ q ” del objeto entra a la region planetaria en donde sufre un encuentro con Ura. y una vez que deja la Res. 2:9 su “ a ” oscila hasta que es eyectado

Resultados

Evolución dinámica de algunos SDOs particulares



Objeto 1998 DP₈ termina en la N.O en $\sim 3.35 \times 10^9$ años. El mecanismo de Kozai actúa por un tiempo en el cual su “q” alcanza 50 UA y su “i” aumenta. Una vez que Kozai deja de actuar sobre el cuerpo, su “q” vuelve a su nivel anterior. Su “a” aumenta hasta alcanzar la N.O



Objeto 2001 FN₁₉₄ termina en la N.O en $\sim 2.21 \times 10^9$ años. Su “q” no decrece más que 34 UA. No tiene encuentros con Nep. durante su evolución. Sin embargo, las perturb. de los planetas gigantes son importantes como para difundir su “a” hasta alcanzar la N.O.

- ❖ Introducción
- ❖ Modelo numérico
- ❖ Resultados
- ❖ Barrera de Neptuno
- ❖ Dependencia del estado final en la “q” inicial
- ❖ Tasa de transferencia de los SDOs a la nube de Oort
- ❖ Discusión y conclusiones.

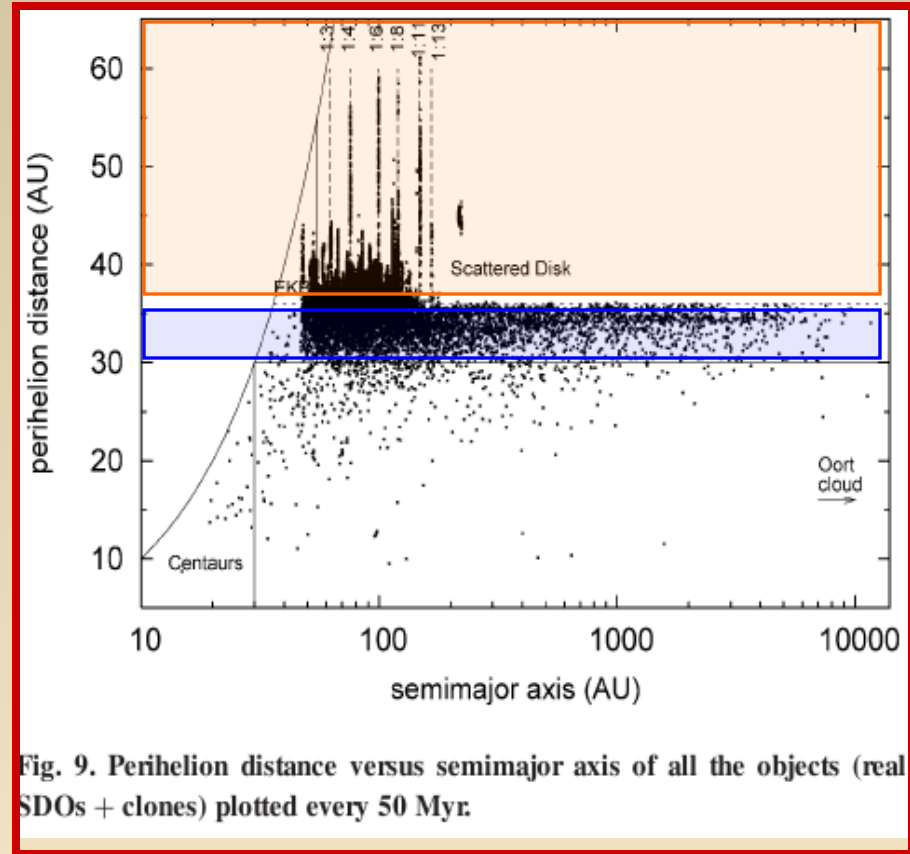
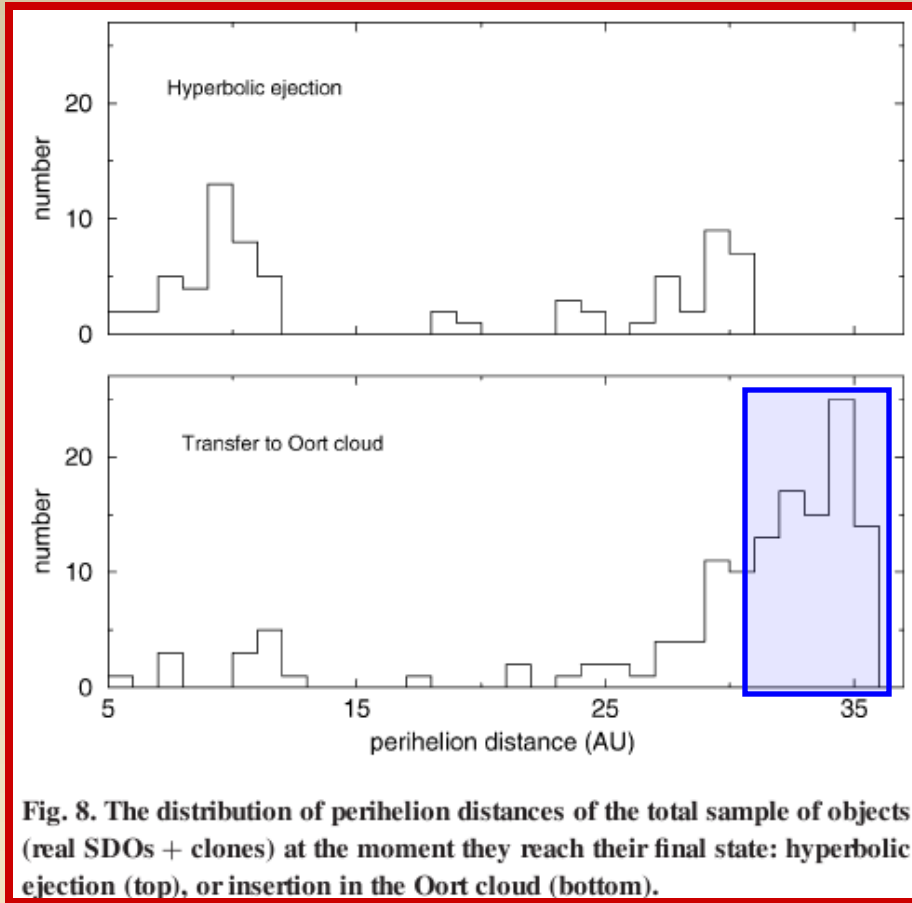
Barrera de Neptuno

Vimos que el S.D es una ruta muy eficiente para alcanzar la N.O.

Estos autores encuentran:

- a) Una gran fracción de SDOs que alcanzan la N.O tienen su perihelio más allá de la órbita de Nep. y la mayoría de ellos nunca cruzan la órbita del planeta.
- b) Nep. actúa como una **barrera dinámica** que dispersa a los objetos próximos (aumentándoles su “a”) antes de que su perihelio pueda entrar a la órbita del planeta.
- c) De los 137 objetos que terminan en la N.O, 85 tienen $31 < q < 36$ UA

Barrera de Neptuno



- * Los SDOs con $31 < q < 36$ UA evolucionan a la N.O (recuadro azul)
- * Los SDOs con $q > 36$ UA no llegan a la N.O

- ❖ Introducción
- ❖ Modelo numérico
- ❖ Resultados
- ❖ Barrera de Neptuno
- ❖ Dependencia del estado final en la “q” inicial
- ❖ Tasa de transferencia de los SDOs a la nube de Oort
- ❖ Discusión y conclusiones.

Dependencia del estado final en la “q” inicial

Hay dos posibles fuentes para el SD:

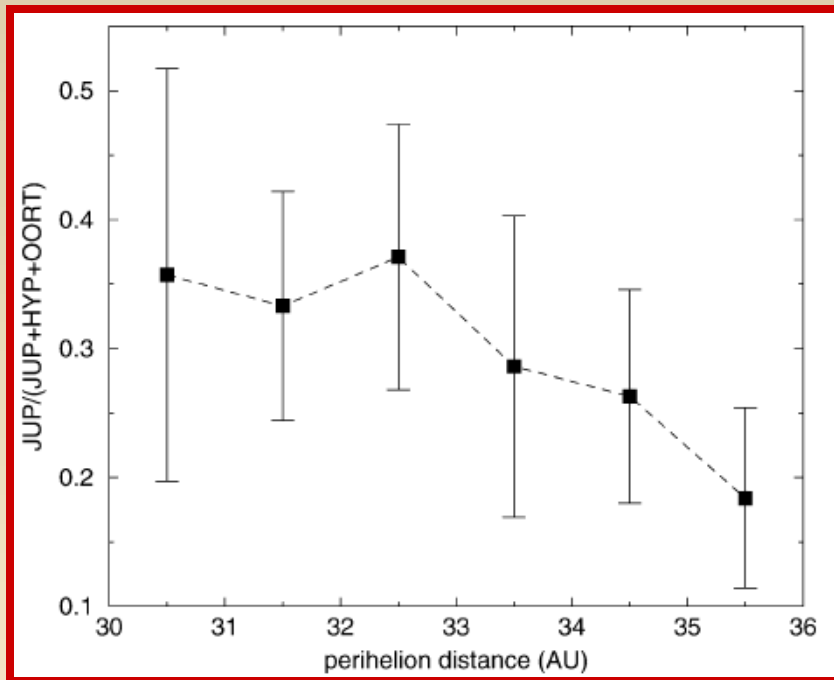
- 1) un origen primordial, en donde el SD actual es un registro fósil de la dispersión de planetesimales por la acreción de Nep. (Duncan&Levison1997)
- 2) el cinturón TN alimenta el SD vía difusión caótica (Morbidelli 1997). Las fuentes más probables son **los plutinos** (39.5 UA) y **los clásicos** (40 – 42 UA)

Ambas poblaciones (plutinos y clásicos) tienden a aumentar sus “e”, mientras que sus “a” permanecen casi constantes hasta que se acercan a Nep. Existe una relación dinámica entre SDOs y plutinos y TNOs clásicos

Estos autores asumen que la población del SD está siendo alimentada por plutinos y TNOs clásicos y la población primordial forma sólo una fracción desconocida del total.

Dependencia del estado final en la “q” inicial

Los estados finales de los SDOs, dependerían de la distancia (desde Nep.) a la cual fueron desacoplados de sus resonancias y comenzaron a difundir su “a” hasta convertirse en SDOs cuando $a > 50$ UA.



- * Un tercio de los SDOs con $30 < q_{\text{inicial}} < 32$ UA terminan en la **zona de influencia de Júp.** (esta fracción está en acuerdo con los resultados de Levison 1997)
- * Para SDOs con q_{inicial} más grandes la fracción transferida a la zona de Júp. baja a expensas del aumento en la fracción de SDOs que alcanzan la N.O.

Esto puede deberse a que, como tales objetos están inicialmente más alejados de Nep. no logran penetrar la barrera dinámica de Nep. lo que es indispensable para llegar a la región planetaria.

- ❖ Introducción
- ❖ Modelo numérico
- ❖ Resultados
- ❖ Barrera de Neptuno
- ❖ Dependencia del estado final en la “q” inicial
- ❖ Tasa de transferencia de los SDOs a la nube de Oort
- ❖ Discusión y conclusiones.

Tasa de transferencia de los SDOs a la N.O

A partir de sus resultados estiman la tasa de inyección de los SDOs a la N.O de la población actual del SD: $N_{\text{SDO}} = 7.5 \times 10^9$ para $R > 1 \text{ km}$.

Encuentran que $\sim 60\%$ de los SDOs se pierden después de los 5 Gyr.

Si, suponen que esta fracción del N_{SDO} con $R > 1 \text{ km}$ se pierden, y que $f \sim 0,5$ de ellos terminan en la N.O en una escala de tiempo promedio de $t_{\text{din}} \sim 1.8 \times 10^9$ años. La tasa de inyección está dada por:

$$v = \frac{N_{\text{SDO}} \times 0.6 \times f}{\bar{t}_{\text{dyn}}} = 1.2 \text{ yr}^{-1}.$$

Obtienen el mismo valor mediante una ley empírica que describe como varía con el tiempo (t) la razón N.O/SD, donde N_{Oort} es el número acumulado de SDOs transferidos a la N.O al tiempo “ t ” y N_{SDO} es la población remanente de los SDOs

Tasa de transferencia de los SDOs a la N.O

Podemos suponer que la población transneptuniana fue mucho más masiva a principios de lo que es actualmente, tal vez en un factor de 100.

Si tomamos la población original SD como 100 veces el actual, se encuentra que el $N_{\text{SDO}} = 4.6 \times 10^{10}$, esto es, 6 veces más grande que el número actual.

Lo que podemos decir de esta discusión es que la población del SD hace 1.8 Gyr atrás, probablemente era varias veces mayor que en la actualidad, por ejemplo ~ 4 con una incertidumbre de 50%.

Por lo tanto, una población del SD con $\sim N_{\text{SDO}} = 7.5 \times 10^9 \times 4 = 3 \times 10^{10}$ da una tasa de inyección actual de los SDOs en la nube de Oort de 5 por año

- ❖ Introducción
- ❖ Modelo numérico
- ❖ Resultados
- ❖ Barrera de Neptuno
- ❖ Dependencia del estado final en la “q” inicial
- ❖ Tasa de transferencia de los SDOs a la nube de Oort
- ❖ Conclusiones.

Conclusiones

- Cerca del 50% de los SDOs terminan en la N.O, el resto son eyectados al espacio interestelar o alcanzan la zona de influencia de Júpiter.
- Neptuno actúa como una barrera dinámica para los SDOs cuyos perihelios son próximos a la órbita de Nep. Encuentran que $\sim 60\%$ de los cuerpos insertados en la N.O tienen $31 < q < 36$ UA
- No encuentran SDOs con $q > 36$ UA que evolucionen hacia la N.O
- Encuentran que la tasa actual de los SDOs inyectados en la N.O es ~ 5 por año. De este modo, el SD podría ser una fuente importante de cometas en la N.O incluso en la actualidad.