

# **“Nube de Oort y formación del SD durante la inestabilidad dinámica tardía en el Sistema Solar”**

Brasser, R. y Morbidelli, A.  
Icarus 2013

# **Introducción y antecedentes**

# Introducción y antecedentes

La formación y evolución de la N.O ha sido un tema de estudio desde su descubrimiento en 1950 por Oort.

Las principales incertezas son:

- Su población
- Como se formó
- Y como su existencia se vincula con lo que sabemos sobre la evolución del resto del sistema solar exterior.

Este trabajo analiza cada una de estas incertezas y compara sus resultados con trabajos previos.

# Introducción y antecedentes

## 1. Población total de la N.O

El único método con el que se puede inferir el número de cometas de la N.O es mediante la determinación del flujo de los cometas de largo período (LPCs) a través del sistema solar interior (Wiegert & Tremaine, 1999). Estos cometas se pueden dividir en cometas nuevos (NC) y en cometas que retornan (RC).

Existen 2 agentes externos que perturban a los cometas y los hacen entrar a la región planetaria, ellos son, **los pasajes estelares** (Weissman, 1980; Hills, 1981) **y la marea galáctica** (Heisler & Tremaine 1986; Levison et al., 2001).

Estos dos perturbadores producen un flujo casi constante de cometas al sistema solar interior.

# Introducción y antecedentes

## 1. Población total de la N.O

A pesar de que hoy en día las perturbaciones sobre la N.O son bien entendidas, sigue habiendo grandes incertidumbres en el número de cometas en la N.O ( $N_{N.O}$ ) y ha habido muchos intentos de restringirla (por ejemplo, de Oort, 1950; Hills, 1981; Weigert y Tremaine, 1999; Francis, 2005). El consenso gral es de  $10^{11}$  a  $10^{12}$  cometas.

La mejor estimación del  $N_{N.O}$  proviene del estudio dinámico realizado por Kaib y Quinn (2009), donde encuentran que la N.O contiene  $(2 - 3) \times 10^{11}$  cometas. Las simulaciones más recientes y observaciones indican que la N.O contiene  $(1 - 5) \times 10^{11}$  cometas, más que  $10^{12}$ .

# Introducción y antecedentes

## 2. Formación y evolución

Duncan et al. (1987) fueron los primeros en intentar formar la N.O mediante integraciones numéricas. Sin embargo algunos de sus resultados, en particular, su alta eficiencia de formación son cuestionables ya que las condiciones iniciales que usaron no son representativas de la realidad.

Dones et al. (2004) realizaron un estudio similar al de Duncan et al. (1987) pero con condiciones más realistas. Al final de su simulación obtuvieron Una eficiencia del 5%.

### Motivación del trabajo

**Las simulaciones de formación de la N.O tienen el problema de que no son capaces de reproducir la relación inferida entre la población del SD y la N.O. Es decir, subestiman la razón de la población observada al menos en un orden de magnitud.**

# Introducción y antecedentes

## 2. Formación y evolución

Se han propuesto 2 soluciones a el problema de la discrepancia poblacional

Una de ellas es la formación de la N.O mientras el Sol todavía estaba en el cúmulo en donde nació (Fernández y Brunini 2000)

La otra solución es la formación de la N.O mediante la captura de cometas de otras estrellas (Levison et al. 2010)

Ambos escenarios parecen ser capaces de resolver la discrepancia en la población del SD y N.O, pero podrían sufrir la dificultad de dispersar pequeños cometas a grandes distancias en presencia de la fricción del gas

# Introducción y antecedentes

## 3. Aproximación

La dispersión de pequeños cometas a grandes distancias en presencia de gas es muy difícil. Por lo tanto, los autores de este trabajo, sugieren que el SD y la N.O se formaron juntos después de la remoción de gas en el disco protoplanetario.

El modelo de Niza establece un marco de trabajo para la formación de estos dos reservorios. Este modelo argumenta que durante la fase gaseosa del disco, los planetas tenían sus órbitas más circulares y estaban en una configuración más comprimida.

Las órbitas planetarias actuales se lograron durante una fase de inestabilidad dinámica de los planetas que ocurrió después de la eliminación del gas (Tsiganis et al, 2005).



# Introducción y antecedentes

## 3. Aproximación

Durante esta inestabilidad planetaria, se dispersó un disco TN primordial de planetesimales, con sólo algunos de sus objetos que hoy sobreviven en el Cinturón de Kuiper, en el SD, en la N.O y en las poblaciones de Troyanos de Júpiter y Neptuno (Levison et al 2008a,b)

Las simulaciones anteriores que abordan la relación N.O / SD supone que los planetas estaban en sus órbitas actuales, que es un escenario poco probable.

**Este trabajo vuelve a evaluar esta relación en el marco del modelo de Niza, donde la diferente evolución orbital de los planetas podría, en principio, llevar a un resultado diferente.**

# Método numérico

# Método numérico

## Evolución Planetaria

Para este estudio se ha utilizado una de las vías evolutivas del modelo de Niza presentada en Levison et al. (2008b). Esta vía evolutiva muestra que, al final de la fase de encuentros cercanos entre los planetas, el semieje de Neptuno  $a_N=27.5$  UA, su  $e_N=0.3$  y el semieje de Urano  $a_U=17.5$  UA,  $e_U=0.2$ . La evolución de los planetas después de los encuentros mutuos se puede ver en la Fig.

$a_J=5$  UA y  $a_S=9.5$  UA, mientras que Urano migró de 17 a 19 UA y Neptuno migró hasta 31 UA.

La evolución de la corrida (Levison 2008) conduce a órbitas muy similares a las actuales y muestra una alta compatibilidad con la estructura orbital del KB.

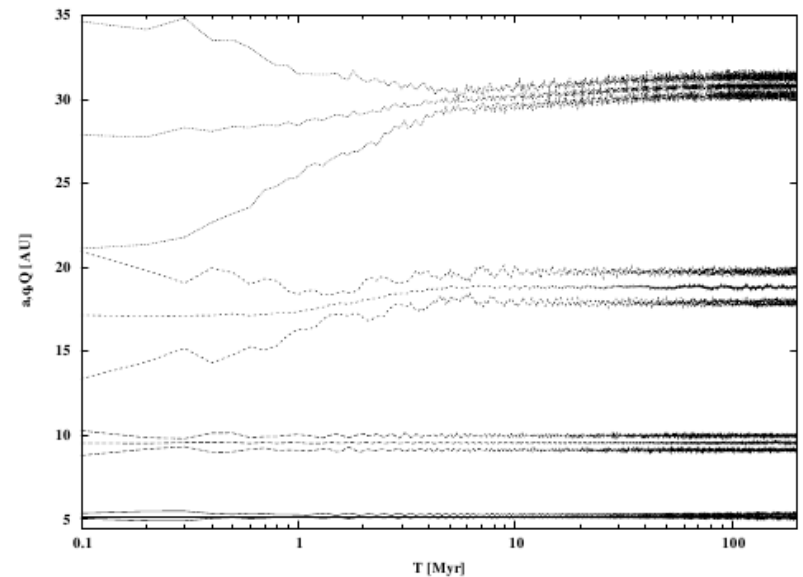


Figure 1: Evolution of the planets. The curves correspond to semi-major axis, pericentre and apocentre of the planets. Jupiter stays close to 5 AU, Saturn close to 9 AU, Uranus ends up close to 19 AU and Neptune settles at 31 AU.

# Método numérico

El método numérico consta de 2 series de simulaciones:

- i. Para la formación de la N.O**
- ii. Para la formación y evolución del SD**

La razón por la que realizan por separado ambas simulaciones es porque para determinar la proporción de JFCs y SDOs se necesita una alta resolución, es decir, una gran cantidad de cometas que se logran mediante clonación. Además para la evolución de los SDOs hacia JFCs no se necesita la influencia de los pasajes estelares ni la marea galáctica.

# Método numérico

## **i. Nube de Oort**

Las simulaciones consisten en 2 etapas:

Primera etapa:

- La evolución planetaria es representada con una duración de 200 Myr.
- Adicionan 6000 partículas de prueba sin masa.
- Sus condiciones iniciales fueron tomadas de Levison (2008b), en donde sus “a” estaban entre 29 y 34 UA, sus  $e \sim 0.15$  y órbitas coplanares.
- El paso de integración  $\sim 0.4$  años
- Las perturbaciones de la marea galáctica fueron incluídas usando el método de Levison (2001), donde incorpora ambas componentes, tanto radial como vertical.
- Los pasajes estelares fueron incluídos según el método de Rickman (2008) donde la esfera de influencia del Sol es  $\sim 1$  pc
- Realizaron 5 corridas y las diferencias entre las simulaciones se debe a las diferentes condiciones iniciales de las partículas de prueba.

# Método numérico

## **i. Nube de Oort**

Una vez completada la primera etapa ...

Segunda etapa:

- Se toman las posiciones y velocidades de los planetas y de las partículas de prueba.
- Realizan la integración por 4 Gyr usando SCATR (Kaib 2011) (es un código similar al Mercury, pero mucho más veloz)
- Los cometas fueron removidos una vez que alcanzaron una distancia 1 pc, colisionan con el Sol o con un planeta.

# Método numérico

## **ii. Disco Dispersado**

Llevaron a los planetas y cometas al final de la fase de migración planetaria y quitaron todos los cometas que fueron más allá de 3000 UA del Sol. A diferencia del caso anterior de la N.O, para simular correctamente el decaimiento del SD, los planetas deben estar en sus órbitas actuales.

Una vez que finalizó la primera etapa de la migración planetaria, se realizó una segunda etapa donde se migró artificialmente a Urano (0.25 UA hacia afuera) hasta su órbita actual. Mantuvieron el semieje de Neptuno a su posición final de 30.7 UA, porque al bajarlo a 30.1 UA (su valor actual) causaría que los objetos resonantes en el SD escaparan de sus resonancias. También se amortiguaron las excentricidades de los planetas.

Durante esta corta simulación los cometas fueron removidos una vez que chocaron con el Sol o fueron más allá de 3000 UA.

Tanto los pasajes estelares como la marea galáctica no se han tenido en cuenta.

# Método numérico

## **ii. Disco Dispersado**

Después de que Urano migró artificialmente se integró por 3.8 Gyr  
Las simulaciones se pararon en 1 Gyr y 3.5 Gyr para clonar los cometas  
Esta clonación repetida permite asegurar que los cometas permanecieron durante los últimos 500 Myr y así realizar una buena estadística sobre la producción de JFCs.

Utilizaremos la producción de JFCs visibles como una aproximación al número de cometas en el SD (Duncan&Levison 1997)  
Llamaremos JFCs visibles a aquellos JFC con  $q < 2,5$  AU.

Estas últimas simulaciones se realizaron para determinar con precisión la fracción de los SDOs que se convierten en JFCs visibles,  $f_{\text{vJFC}}$ .



# Resultados

# Resultados

## 1. Formación de la N.O y el SD y la predicción de la proporción NO/SD

Existen diversos trabajos que intentan estudiar la formación de la N.O en el entorno galáctico actual (Dones et al. 2004, Kaib&Quinn 2008, Brasser et al.2010)

Los autores de este trabajo encuentran:

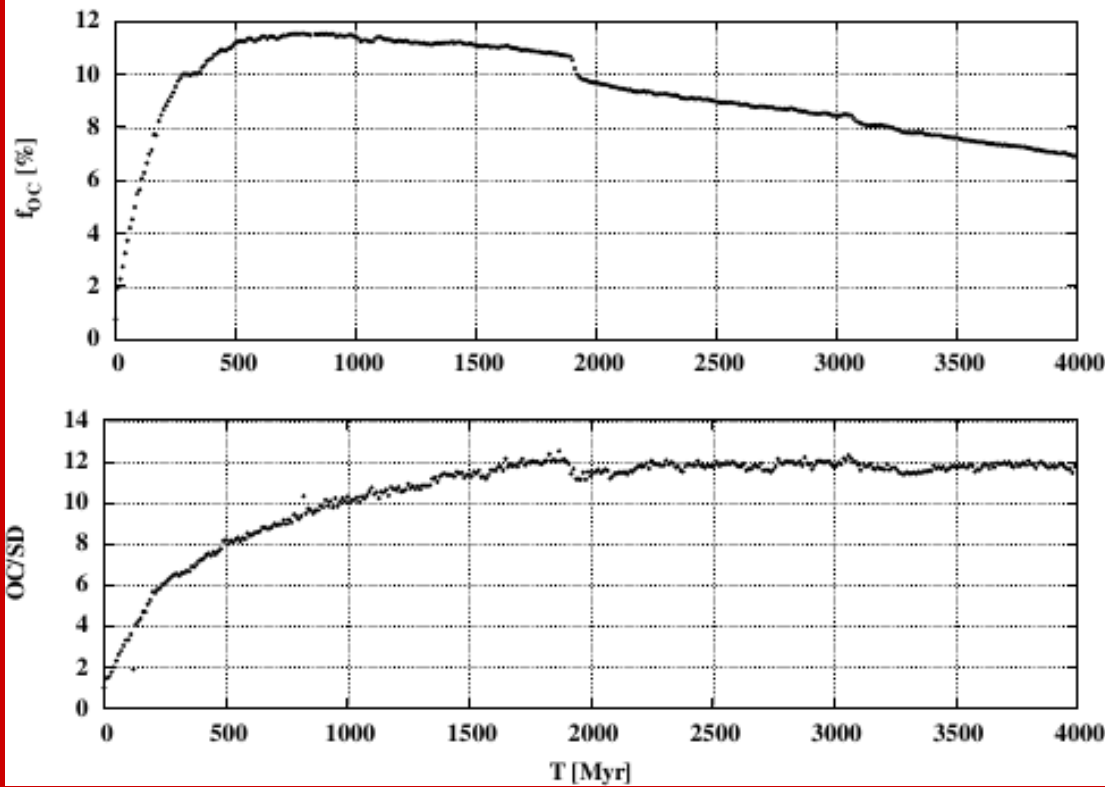
- Una eficiencia media en la formación de la N.O a 4 Gyr  $\sim 7\%$ . Este valor es más alto a los reportados por otros autores (Dones et al. 2004; Kaib y Quinn 2008; Brasser et al., 2010).

La alta eficiencia en la formación por un lado puede deberse a que los cometas se colocaron inicialmente cerca de Nep. Por otro lado, como Urano y Nep. estaban en órbitas más excéntricas, dominaban dinámicamente a más objetos. Es sabido que Urano y Nep. Colocan objetos en la N.O, mientras que Saturno y Júp. tienden a expulsarlos (Duncan et al.1987).

- A partir de sus simulaciones deducen que la proporción de la población entre la N.O y SD es  $\sim 12 \pm 1$ . Sin embargo, las observaciones indican que la relación es  $\sim 100$  y  $1000$ .

# Resultados

## 1. Formación de la N.O y el SD y la predicción de la proporción NO/SD



Porcentaje de cometas que forman la N.O

Proporción de la población entre N.O y SD durante una simulación

# Resultados

## 2. Vinculación entre las poblaciones del SD y JFC

Estos autores tienen un modelo de trabajo que une la población de SD con la población JFCs visible. Además obtienen una estimación confiable de la vida física de los cometas. Utilizan esta información para calcular la proporción de los SDOs y los JFCs.

La expresión que relaciona el número de SDOs ( $N_{\text{SDO}}$ ) con el número de objetos activos en la región de los JFC visibles ( $N_{\text{vJFC}}$ ) es la siguiente:

$$N_{\text{SDO}} = \frac{N_{\text{vJFC}}}{\tau_{\text{vJFC}} r_{\text{SD}} f_{\text{vJFC}}},$$

$r_{\text{SD}}$  es la tasa de decaimiento fraccional del SD actual

$f_{\text{vJFC}}$  es la fracción de cometas que escapan del SD hacia la región visible.

$\tau_{\text{vJFC}}$  es el tiempo de vida medio gastado por estos cometas en la región visible como JFCs activos.

# Resultados

## 2. Vinculación entre las poblaciones del SD y JFC

### i) Tasa de decaimiento fraccional del SD ( $r_{SD}$ )

Consideran que un objeto deja el SD si fue removido de la simulación (ya sea por eyección o colisión) o si ha pasado algún tiempo como Centauro ( $q < 30$  UA)

Definen a  $r_{SD}$  como la tasa de decaimiento de la población del SD.

En los últimos 0.5 Gyr encuentran que la tasa  $r_{SD} \sim -1.63 \times 10^{-10}$  por año.

Levison y Duncan (1997) encuentran que la tasa  $r_{SD} \sim -2.7 \times 10^{-10}$  por año.

Esto es un factor 2 más grande, que puede deberse a que la fracción del SD que se encuentran en estado fosilizado (objetos resonantes o detached) es mayor que la encontrada en Duncan y Levison (1997).

De hecho, Gomes (2011) muestra que la migración de Nep. puede crear un disco dispersado fosilizado, el cual está formado por planetesimales que están o no interactuando con el planeta.

# Resultados

## 2. Vinculación entre las poblaciones del SD y JFC

### ii) Evaluación de la fracción de los JFCs ( $f_{\text{VJFC}}$ )

Encuentran que de los cometas que dejan el SD, el  $f_{\text{VJFC}} \sim 16.5\%$  penetran a la región de los JFCs visibles, mientras que Levison y Duncan (1997) obtuvieron  $\sim 30\%$ .

El valor obtenido por Brassier y Morbidelli (2013) es la mitad que aquel estimado por Levison y Duncan (1997).

Atribuyen esta diferencia a que su población de origen tiene una distribución orbital diferente a la de Levison y Duncan (1997).

# Resultados

## 2. Vinculación entre las poblaciones del SD y JFC

### iii) Evaluación del tiempo de vida activo y visible.

Encuentran que un cometa JFC con  $q < 2.5$  UA se remueve una vez que alcanza un tiempo de vida físico de  $\sim 2600$  años, esto es un poco más corto que el inferido por Di Sisto et al. (2009), cuyo valor es  $\sim 3600$  años.

### iv) Razón del SD frente a la población de los JFC visible

Encuentran que  $N_{\text{SDO}} \sim 1.5 \times 10^7 N_{\text{vJFC}}$ , mientras que Duncan y Levison (1997) obtienen  $N_{\text{SDO}} = 6 \times 10^6 N_{\text{vJFC}}$  (factor 2)

**Usamos esta nueva proporción de SDO a JFC para inferir la relación N.O/SD a partir de la observación de las poblaciones de LPCs y JFCs**

# **Nuevo exámen de la N.O respecto a la población del SD**



## Un nuevo exámen de la N.O respecto a la población del SD

Se quiere obtener un valor para el número de objetos de la N.O ( $N_{oc}$ ) y el número de SDOs ( $N_{sdo}$ ) para cometas de un mismo tamaño.

Utilizan el flujo de los LPCs como indicador del  $N_{oc}$  (Wiegert 1999) y el núm. de JFCs visibles como indicador de la cantidad de SDOs (Duncan 1997).

El resultado final depende del flujo de los JFC que entran en el sistema solar interior y de las magnitudes absolutas de LPC y JFC del mismo tamaño.

# Un nuevo exámen de la N.O respecto a la población del SD

## 1) Flujo de cometas nuevos que entran al sistema Solar interior

El flujo de cometas nuevos que entran en el sistema Solar interior es poco conocido.

Las fuentes más citadas son Everhart (1967), Hughes (2001) y Francis (2005), en donde los cometas nuevos tienen magnitudes absolutas  $H_T < 10.9$

Sin embargo, los 3 autores encuentran un quiebre en la distribución de mag. absolutas en  $\sim 6.5$ . Fernández & Sosa (2012) argumentan que este quiebre en la distribución de mag. se debe a un cambio en la pendiente de la distribución de tamaños más que a una incompletitud en la observación.

**Por lo tanto, el trabajo se focalizará sólo en los LPCs con  $H_T < 6.5$ .**

# Un nuevo exámen de la N.O respecto a la población del SD

## 1) Flujo de cometas nuevos que entran al sistema solar interior

Para obtener el flujo de cometas nuevos, Brassier & Morbidelli toman un promedio de los flujos calculados por Everhart (1967) (1.1 por año), Hughes (2001) (0.44 por año) y Francis (2005) (0.73 por año).

Obtienen que el flujo de LPCs  $\sim (0.76 \pm 0.33)$  por año, con  $q < 2.5$  UA y  $H_T < 6.5$ .

Usan este flujo para determinar el  $N_{OC}$ , pero antes hay que determinar el tamaño de los LPCs con  $H_T < 6.5$  ...

# Un nuevo exámen de la N.O respecto a la población del SD

## 2) Magnitud absoluta nuclear de los LPCs con $H_T = 6.5$

Para la mayoría de los JFCs, la fracción activa, que es la fracción de la superficie del núcleo que debe estar activo para explicar la tasa de producción de agua del cometa, es sólo unos pocos por ciento (Fernández et al. 1999).

Sin embargo, para los LPCs, la fracción activa es muy grande y puede exceder el 100 % (Sosa & Fernández 2011).

**Por lo tanto, los LPCs son más brillantes que los JFCs para tamaños comparables a la misma distancia heliocéntrica.**

Por ejemplo: si se tienen un JFC y LPC con brillos comparables y el diámetro del JFC es  $\sim 2\text{km}$ , se encuentra que el tamaño del núcleo del LPC es sub-kilométrico.

La idea es poder comparar la magnitud absoluta ( $H_T$ ) del cometa con la magnitud absoluta del núcleo ( $H$ )

# Un nuevo examen de la N.O respecto a la población del SD

## 2) Magnitud absoluta nuclear de los LPCs con $H_T = 6.5$

Sosa & Fernández (2011) derivaron una relación entre el diámetro del núcleo de un LPC y su mag. total absoluta dada por la siguiente expresión:

$$\log D = 1.2 - 0.13H_T,$$

Donde: D es el diámetro del núcleo en km y  $H_T$  es la mag. absoluta

El diámetro del núcleo de un cometa con  $H_T = 6.5$  es  $\sim 2.3$  km que corresponde a una mag. absoluta nuclear  $H = 17.3$  (Fernández 2001)

Esta relación no se puede aplicar a los JFCs porque tienen un nivel de actividad mucha más bajo, entonces se necesita conocer el valor de  $H_T$  para un JFC con  $H = 17.3$

# Un nuevo exámen de la N.O respecto a la población del SD

## 3) Magnitud absoluta de los JFCs con $H = 17.3$

Fernández et al. (1999) graficaron el valor de  $H - H_T$  como función de su “q” y la fracción activa para JFCs con radios entre 1 km y 5 km. A partir de sus resultados, Brassler y Morbidelli (2013) encuentran que para JFCs con  $q < 2.5$  UA una  $H_T \sim 9.3$  cuando  $H \sim 17.3$ .

**Por lo tanto, para obtener la relación entre las poblaciones de la N.O y el SD no se puede usar poblaciones con la misma magnitud absoluta total, sino que debe ser determinada a partir de los LPCs y JFCs con  $H_T < 6,5$  y  $H_T < 9,3$  respectivamente**

# Un nuevo examen de la N.O respecto a la población del SD

## 4) Proporción de la población de la N.O y el SD

Para obtener el cociente entre las poblaciones N.O y SD primero se deben conocer el número de SDOs con  $H_T < 9.3$  y el número de cometas en la N.O con  $H_T < 6,5$  (esto es para que tengan el mismo tamaño)

Pasamos de la distribución acumulada de mag. absoluta a una distribución acumulada de tamaños

$$N(> H) \propto 10^{-\alpha H}$$



$$N(> D) \propto D^{-\gamma}$$

Donde:  $\gamma \sim 2$   
para JFCs con  
diámetros entre 2 km  
y 10 km.

Di Sisto et al. (2009) encontraron que hay 117 JFCs activos con  $q < 2.5$  UA y  $D > 2$  km. Entonces, el número total de objetos en el SD con  $D > 2.3$  km

$$N_{\text{SDO}} \sim 1.7 \times 10^9$$

# Un nuevo exámen de la N.O respecto a la población del SD

## 4) Proporción de la población de la N.O y el SD

Por otra parte, los autores habían calculado el flujo de LPCs con  $H < 17.3$  y  $q < 2.5$  UA cuyo valor era  $\sim 0.76$  por año. Kaib y Quinn (2009) obtuvieron la fracción promedio de objetos de la N.O sobre órbitas con  $q < 3$  UA cuyo valor es  $\sim 10^{-11}$  por año.

Entonces, el número total de objetos en la N.O ( $H < 17.3$ ) es  $N_{NO} \sim 7.6 \times 10^{10}$

Por lo tanto, la relación entre ambas poblaciones  $N_{NO}/N_{SDO} \sim 44^{+54}_{-34}$

**Este es un factor 4 más alto que el resultado presentado en las simulaciones ( $12 \pm 1$ )**



# Conclusiones

# Conclusiones

Brasser y Morbidelli han realizado simulaciones de la formación y evolución de la N.O y del SD en el marco del modelo de Niza.

- ❖ Encontraron que la eficiencia para formar la N.O es  $\sim 7\%$  y que la proporción simulada entre la N.O y SD es aproximadamente  $12 \pm 1$
- ❖ Muestran que el SD producido en sus simulaciones genera una población de JFCs consistente con las observaciones. Esta es la primera vez que un SD dinámicamente caliente muestra ser consistente con la población de JFCs (modelos previos de JFCs comenzaban con un SD dinámicamente frío Duncan y Levison, 1997)
- ❖ Han establecido un vínculo entre las poblaciones del SD y JFCs, como así también el vínculo entre la N.O y los LPCs. Obtuvieron la proporción entre las poblaciones N.O/SD a partir del flujo observado de los LPCs y JFCs.

# Conclusiones

- ❖ Encontraron una razón de población  $N_{\text{rat}} \sim 44^{+54}_{-34}$ , que es aproximadamente un factor 4 más alto que el valor simulado de  $12 \pm 1$ .
- ❖ La barra de error en la razón observada se superpone con el valor obtenido en su simulación. Por lo tanto, concluyen que su escenario para la formación de la N.O y del SD en el marco del modelo de Niza no es inconsistente con las observaciones.