

# Seminario de Postgrado

## EL ESPACIO TRANSNEPTUNIANO

Clase: Origen y distribución de inclinaciones del  
EKB

## Origen del SD:

- Levison y Duncan, (1997): encuentran, como subproducto de su simulación, una población de TNOs dispersados por Neptuno asociados al EKB: los SDOs. Encuentran que  $\frac{N_{EKBOs}}{N_{SDO}} \approx 1000$ .
- Duncan y Levison, (1997): muestran que, despreciando el flujo de objetos desde el EKB, el SD decae en nro debido a la inyección y eyección de objetos. Pero tal decaimiento es muy lento, alrededor del 1 % de la población sobrevive en el SD por la edad del sistema solar.



Es posible que el SD actual sea el remanente de una población 100 veces mayor formada cuando Neptuno estaba creciendo en masa.

- Trujillo et al. (2001): la tasa actual de descubrimiento, (contando el bias observacional, sugiere:  $\frac{N_{EKBOs}}{N_{SDO}} = 1$ . → se acepta el origen según DL97

Hay evidencias que muestran que el escenario de DL97 es simplista y que “algo más” tiene que haber pasado en el sistema solar primitivo. Por ej. Gomes 2003, muestra que la migración de Neptuno juega un rol importante en la formación de los plutinos y en la evolución orbital del SD y CEKB.



En este trabajo realizan comparaciones cuantitativas entre la distribución orbital observada del SD y la esperada del escenario de DL97. Es decir suponiendo que la población actual depende solo de la población original en el SD.

## Construcción de un modelo de SD correspondiente al escenario de DL97

Integran 6414 partículas de prueba con condiciones iniciales uniformemente distribuidas en:

- $34,3 < a < 50UA$
- $25 < q < 45UA$
- $0 < i < 60$
- $0 < (\omega, \text{Omega}, M) < 360$

A posteriori se pueden testear otras distribuciones iniciales pesando cada partícula por una función de existencia  $P_0(a, q, i)$  que representa la probabilidad de que la partícula exista en la nueva distribución inicial deseada.

- $T = 4,5Gy$
- paso temporal de 1 año
- 4 planetas gigantes actuales
- Se descartan si  $q < 20 \text{ UA}$  o  $a > 1000 \text{ UA}$
- Las partículas se consideran scattered si  $|a(t) - a(0)| > 1,5 \text{ UA}$
- Las partículas que  $|a(t) - a(0)| < 1,5$  para todo  $t$  son consideradas estables.
- El tiempo  $t$  al cual por primera vez  $|a(t) - a(0)| > 1,5 \text{ UA}$  se llama: “primer tiempo de scattering”.

Para calcular la distribución esperada de cuerpos del SD de vida larga, debemos considerar la evolución orbital de las partículas integradas empezando un  $\Delta t$  posterior a su primer tiempo de scattering.

Se adopta un compromiso de  $\Delta t = 2 \text{ Gy}$ .



Quedan 38 partículas que contribuyen a la construcción del modelo de distribución del SD habiendo evolucionado un total de 53 Gy. ????

Para construir el modelo de distribución orbital:

- Se divide el espacio  $(a,q,i)$  en celdas de  $1 \text{ UA} \times 1 \text{ UA} \times 2,5^\circ$
- Se calcula el tiempo acumulado que cada celda es ocupada por las partículas, cada una pesada por la función de existencia  $P_0(a, q, i)$ , durante el tiempo  $\Delta T + t_{1sc} < t < 4,5 \text{ Gy}$



Se obtiene la distribución de los tiempos de residencia:  $R(a, q, i) =$  a la función de probabilidad que describe estadísticamente la distribución orbital de los cuerpos que han pasado al menos 2 Gy en el SD.

Se restringe R a la región  $a > 50UA$  por dos razones:

- las ci tienen  $a < 50 UA$ .
- en la zona  $a < 50 UA$  no es clara la distinción entre SDOs y objetos en orbitas resonantes estables  $\rightarrow$  dificulta la comparación con la observación.

Se elige para la distribución de H:

$$N(H) = 10^{\alpha H}, \text{ con } 4 \leq H \leq 15 \text{ y } \alpha \text{ libre.}$$



En resumen: el modelo es representado por una función de probabilidad normalizada 4 - D:  $P(a, q, i, H) = R(a, e, i) \times N(H)$  que depende paramétricamente de la distribución inicial  $P_0(a, q, i)$  y del parámetro  $\alpha$ .



El modelo de distribución orbital anterior no puede ser directamente comparado con las observaciones debido a los varios bias que las afectan. Por lo tanto hay que modelar los bias.

- Trabajan con las observaciones del MPC y consideran cada objeto observado indicador de un survey.
- Para cada conjunto de parámetros  $(a, q, i, H)$  calculan la probabilidad  $B_k(a, q, i, H)$  de que un objeto con estos parámetros sea descubierto por un dado survey  $k$ .
- Se repite el procedimiento para todos los conjuntos  $(a, q, i, H)$  que cubre el modelo, de manera que  $B_k(a, q, i, H)$  es una función tabulada de  $(a, q, i, H)$ .  $B_k$  es la función de bias para el survey  $k$
- Se calcula:  $M_k(a, q, i, H) = P(a, q, i, H) \times B_k(a, q, i, H)$  que describe la distribución de elementos orbitales y magnitud que el survey  $k$  habría descubierto.

- Se normaliza  $M_k$  a 1 de manera sea una distribución de probabilidades
- Se repite el proceso para todos los surveys ficticios  $k$
- Como cada survey ficticio descubre un objeto, la distribución orbital y de magnitudes total de los objetos descubiertos por todos los surveys es simplemente:

$$M(a, q, i, H) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K M_k(a, q, i, H) \quad (1)$$

donde  $M$  describe nuestro modelo de distribución de SDOs con bias.

- Obtienen de  $M$  funciones distribuciones unidimensionales y acumulativas:  $M_a(a)$ ,  $M_q(q)$ ,  $M_i(i)$ ,  $M_H(H)$ , para comparar con las observaciones.

Hay que tener en cuenta lo siguiente:

- el modelo es artificialmente deficiente en objetos de  $q$  bajo (por el corte en  $q = 20$  UA)
- Se adopta un índice  $\alpha$  de la distribución de H de 0.6.
- Para la función de existencia  $P_0(a, q, i)$  se considera una distribución uniforme en  $a$  y  $q$ .
- Para la distribución de  $i$  se adopta la característica de la población hot del EKB de Brown, 2001:

$$P_0(i)di = \sin(i) \exp\left[\frac{-i^2}{2\sigma_i^2}\right] di \quad (2)$$

con  $\sigma = 12^\circ$  de Gomes (2003).

## Comparación del $a$ :

- Por un lado el modelo tiene un alto grado de incerteza, ya que está construido de la evolución dinámica de solo 38 partículas.
- El salto en  $\sim 80UA$  que no aparece en la distribución observada, se debe a una sola partícula que se queda fija en 80 UA por mucho tiempo.
- Las curvas grises dan una representación visual de las regiones del modelo con una incerteza de  $1 - \sigma$ .

## Comparación del $q$ :

Las distribuciones ajustan muy bien hasta  $q = 36$  UA. Pero si sacan de la muestra observada los ESDOs ajusta muy bien.

## Comparación de la $i$ :

- Predice bien el valor medio de las  $i$ .
- La distribución es diferente de la observada y además la observada cae fuera de la región de  $1 - \sigma$  de incerteza, en el rango  $5^\circ < i < 10^\circ$ .
- Se piensa que las diferencias se deben a la forma simple de la distribución de  $i$  inicial. El exceso de cuerpos observados con  $i$  entre 5 y 10 muestra una distribución bimodal en el SD y es posible que en la región original también hubiera una distribución de este tipo.

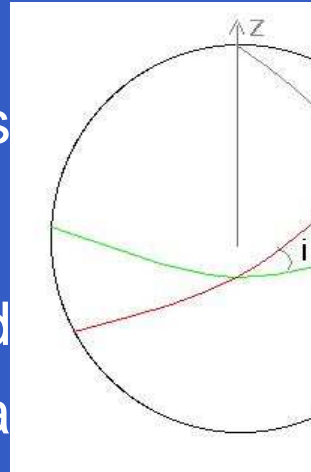
## Comparación de H:

El ajuste es muy bueno. Cambiando  $\alpha$  se obtiene más o menos lo mismo.

- El ajuste es en general bueno.
- Según los ajustes de  $q$ , parece haber una población extendida que no puede explicarse en el marco del modelo de DL97.
- Hacen un análisis de si los SDOs se formaron en la región planetaria (hasta 35 UA, donde las órbitas son inestables) luego fueron transferidas a la región entre 35 y 50 UA y luego hacia la región más allá de 50 UA.  
O si existió algún evento que excitó la mayoría de los objetos del EKB primordiales hacia excentricidades altas. Pero....

## Figura 1:

- las observaciones cerca de la eclíptica tienen un fuerte bias hacia el descubrimiento de objetos de baja inclinación.
- Las observaciones fuera de la eclíptica tienen probabilidad nula de detectar objetos con inclinaciones más bajas que la latitud ecliptical observada.



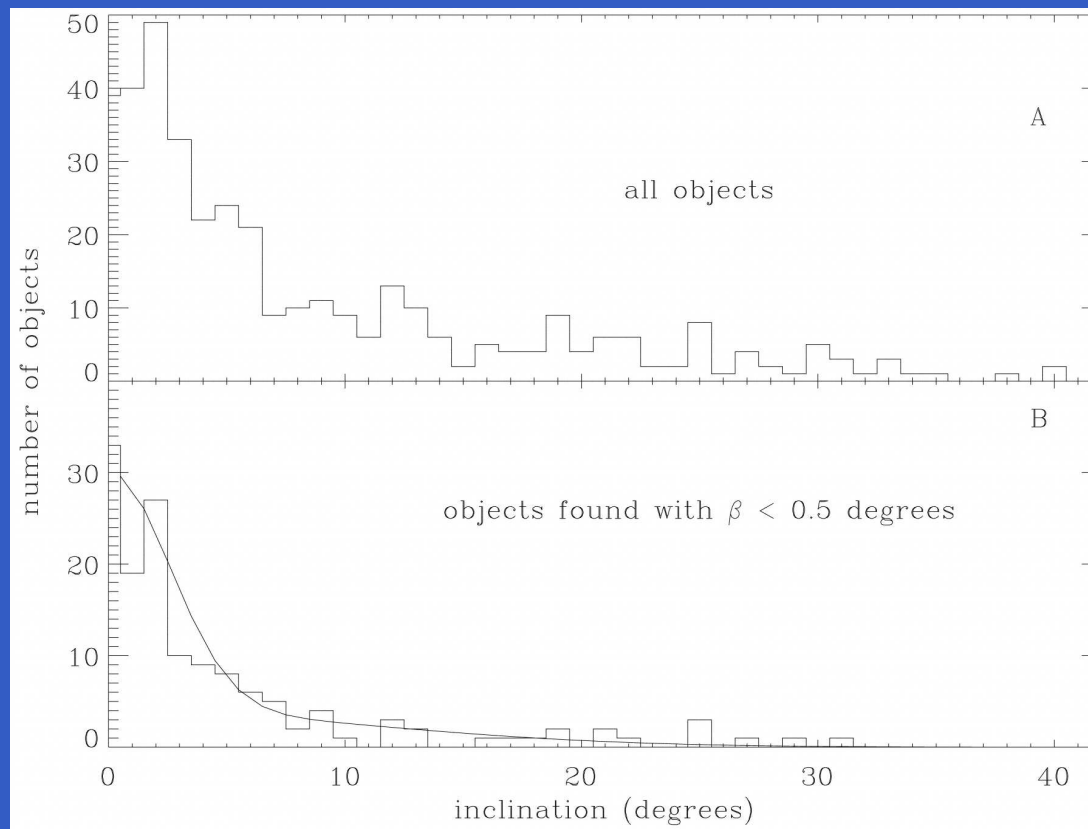
La distribución de inclinaciones de los EKBO observados no es representativa de la distribución total de los EKBOs.



Se desarrolla un método para determinar la distribución de inclinaciones sin bias del EKB usando solo la inclinación y la latitud ecliptical en la fecha de descubrimiento de los EKBO conocidos.

- $f_t(i)$  = **distribución total de inclinaciones**: a la distribución total de inclinaciones de todos los objetos en el cinturón,
- $f_e(i)$  = **distribución ecliptical de inclinaciones**: a la distribución de  $i$  de los EKBO cuando cruzan la eclíptica en cualquier momento
- $L(\beta)$  = **distribución de latitudes**: es la distribución del número de EKBOs como función de la latitud ecliptical





Como la mayoría de los surveys son cerca de la eclíptica la distribución observada de los EKBOs conocidos es similar a la  $f_e(i)$ .

Una mejor aproximación de la distribución ecliptical de inclinaciones es la distribución de inclinaciones de los EKBOs descubiertos con baja latitud ecliptical

Para un objeto en órbita circular, con inclinación  $i$ , la fracción de su órbita en la que se encuentra con una latitud ecliptical menor o igual que  $\beta$  es:

$$F(\beta) = \frac{2}{\pi} \text{sen}^{-1} \left[ \min \left( \frac{\text{sen} \beta}{\text{sen} i}, 1 \right) \right] \quad (3)$$

Esto representa una distribución acumulada de latitudes.

La distribución diferencial de latitudes para un objeto con inclinación  $i$  será

$$L_i(\beta) = \frac{F(\beta)}{d\beta} = \frac{\cos \beta}{(\text{sen}^2 i - \text{sen}^2 \beta)^{1/2}} \quad (4)$$

En la eclíptica,  $L_i = 1/\text{sen} i$ .

Si un conjunto de objetos se encuentra en la eclíptica con una distribución de inclinaciones eclíptica de  $f_e(i)$ , la distribución total de inclinaciones puede calcularse pesando cada detección por la inversa de la probabilidad de encontrar un objeto en la eclíptica.

Entonces encontramos que:

$$f_t(i) = \operatorname{sen} i f_e(i) \quad (5)$$

Notar que cualquier distribución total de inclinaciones debe aproximarse a cero para inclinaciones igual a cero.

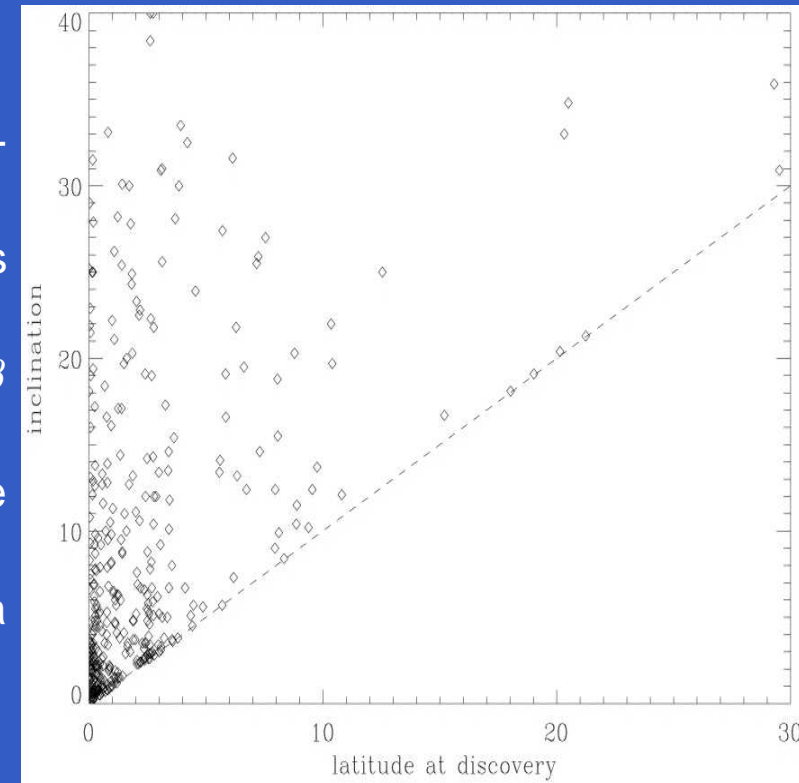
La distribución de latitudes para todas las inclinaciones se obtiene integrando  $L_i(\beta)$  sobre la distribución total de inclinaciones:

$$L(\beta) = \int_{\beta}^{\pi/2} f_t(i) \frac{\cos \beta}{(\operatorname{sen}^2 i - \operatorname{sen}^2 \beta)^{1/2}} di \quad (6)$$

## Los datos

Se toman del MPC los elementos orbitales y fechas de descubrimiento de todos los EKBOs conocidos. La latitud ecliptical se determina de los elementos orbitales, calculando las posiciones en la fecha de descubrimiento.

**Figura 2:** latitud ecliptical en el momento de descubrimiento versus la inclinación de los 344 EKBOs descubiertos hasta octubre de 2000. Se puede observar el bias: para una  $\beta$  no se han descubierto objetos con  $i < \beta$ . También se ve que las observaciones a una latitud ecliptical  $\beta$  son propensas a encontrar objetos con  $i \sim \beta$ .



## Aproximación de la distribución de inclinaciones eclíptica y total

Podemos aproximar  $f_e(i)$  determinando la distribución de inclinaciones de todos los objetos que fueron detectados con  $\beta < 0,5^\circ$ , estos son 143. Esta aproximación de  $f_e(i)$  se ajusta bien por dos Gaussianas,

$$f_e(i) = a \exp\left(\frac{-i^2}{2\sigma_1^2}\right) + (1 - a) \exp\left(\frac{-i^2}{2\sigma_2^2}\right) \quad (7)$$

donde  $a = 0,89$ ,  $\sigma_1 = 2,7^\circ$  y  $\sigma_2 = 13,2^\circ$

La distribución total de inclinaciones, se obtiene de la ec. 5:

$$f_t(i) = \text{sen } i \left[ a \exp\left(\frac{-i^2}{2\sigma_1^2}\right) + (1 - a) \exp\left(\frac{-i^2}{2\sigma_2^2}\right) \right] \quad (8)$$

Esto es una estimación inicial de la  $f_t(i)$ .

- Se realizan una serie de simulaciones de multiples perturbaciones en un disco de inclinaciones iniciales igual a cero y encuentran  $f_e(i)$  es muy bien ajustada por la distribución de la ec 6.
- La distribución de inclinaciones de los asteroides también es ajustada por una Gaussiana.
- El hecho de que la distribución de inclinaciones de los EKBOs se ajuste por dos gaussianas en vez de una sugiere la existencia de al menos dos clases de objetos con diferentes historias dinámicas.
- Pero, aunque la  $f_t(i)$  determinada antes es útil, no es ideal ya que usa solo 143 objetos de los 379 conocidos. Entonces se desarrolla un método más general para determinar la distribución de  $i$  que nos permite usar todos los datos disponibles.

## Cálculo de la distribución total de inclinaciones.

No existe un método obvio para obtener  $f_t(i)$  directamente de los datos. Por tanto se resuelve el siguiente problema.

Se toman una serie de distribuciones hipotéticas y se determina la probabilidad de que los objetos observados puedan derivarse de tales distribuciones. De estas probabilidades se puede determinar el mejor ajuste de las distribuciones hipotéticas, dentro de rangos aceptables.

### Figura 3: Plutinos en resonancia 3:2 con

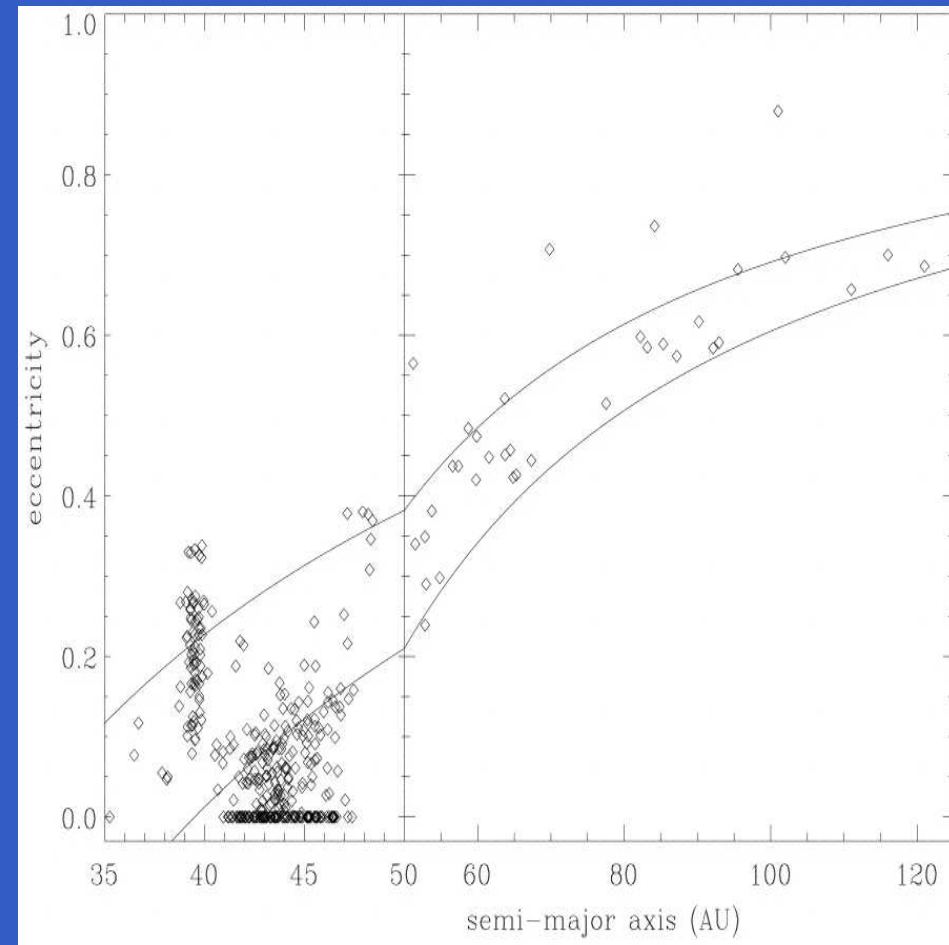
Neptuno en  $\sim 39$  UA.

Objetos con  $q$  menor que 30: Centauros.

Los SDOs agrega objetos entre 40 y 50 UA.

Los objetos restantes entre 40 y 48 UA en órbitas de

baja e son los CEKBOs



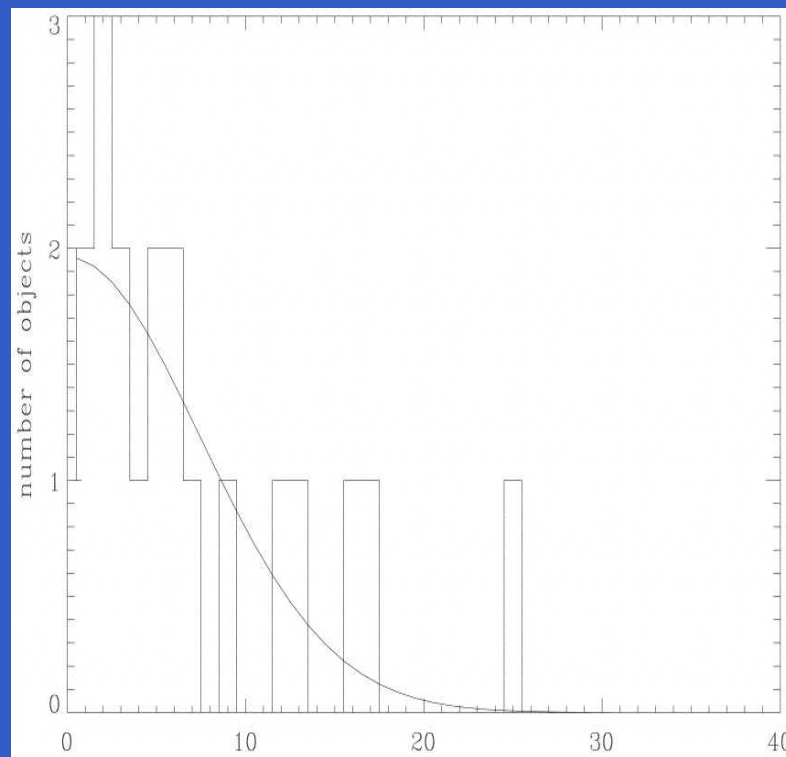
Diferentes clases dinámicas tienen diferentes (se ve en un gráfico  $a$  vs  $i$ ) distribuciones de inclinación. Entonces se analiza cada clase separadamente



## Objetos resonantes:

- Para obtener una primera aproximación de la distribución de inclinaciones eclíptica, se calcula la distribución de los 20 plutinos encontrados con  $\beta < 0,5^\circ$ .

Figura 4:



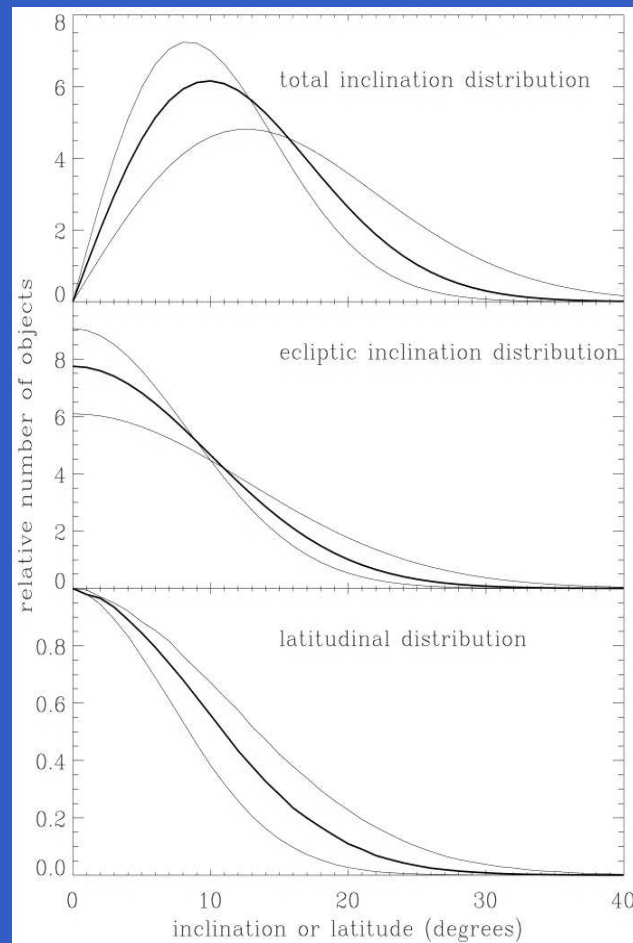
- Ajusta bien con una Gaussiana simple con  $\sigma = 7,4^\circ$ .



- Se usa una Gaussiana simple multiplicada por el  $\sin i$  para la distribución total de inclinaciones.
- El mejor ajuste da una Gaussiana de ancho  $\sigma = 10,2^\circ \pm_{1,8}^{2,5}$ .

Dada la distribución total de inclinaciones podemos calcular las distribuciones de inclinación ecliptical y de latitudes para el modelo.

Figura 5:

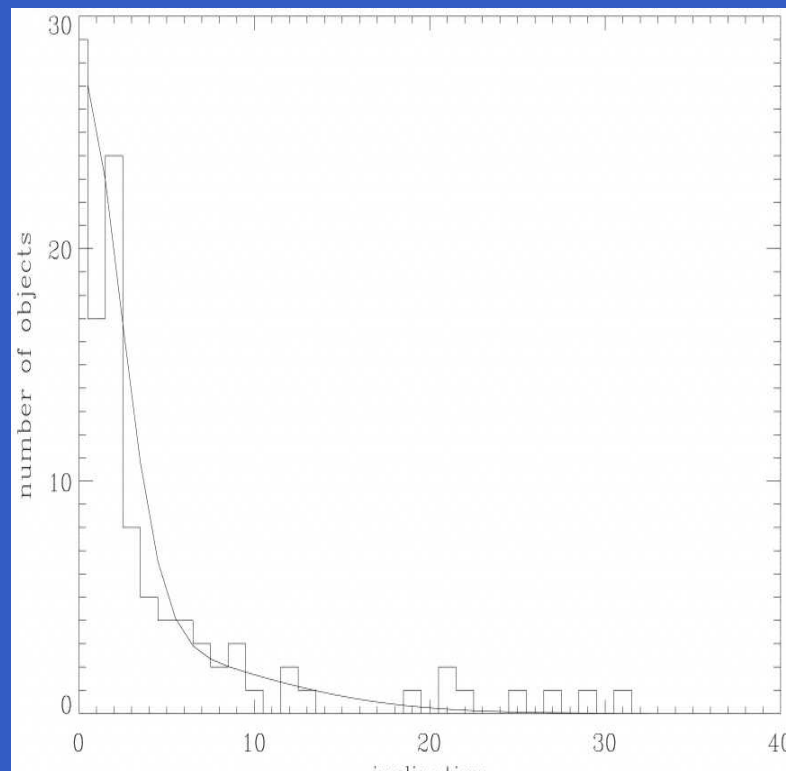


## Objetos clásicos.

Estiman la distribución ecliptical de inclinaciones de los 111 CEKBOs con  $\beta < 0,5^\circ$ . Una Gaussiana simple ajusta pobremente a los datos.

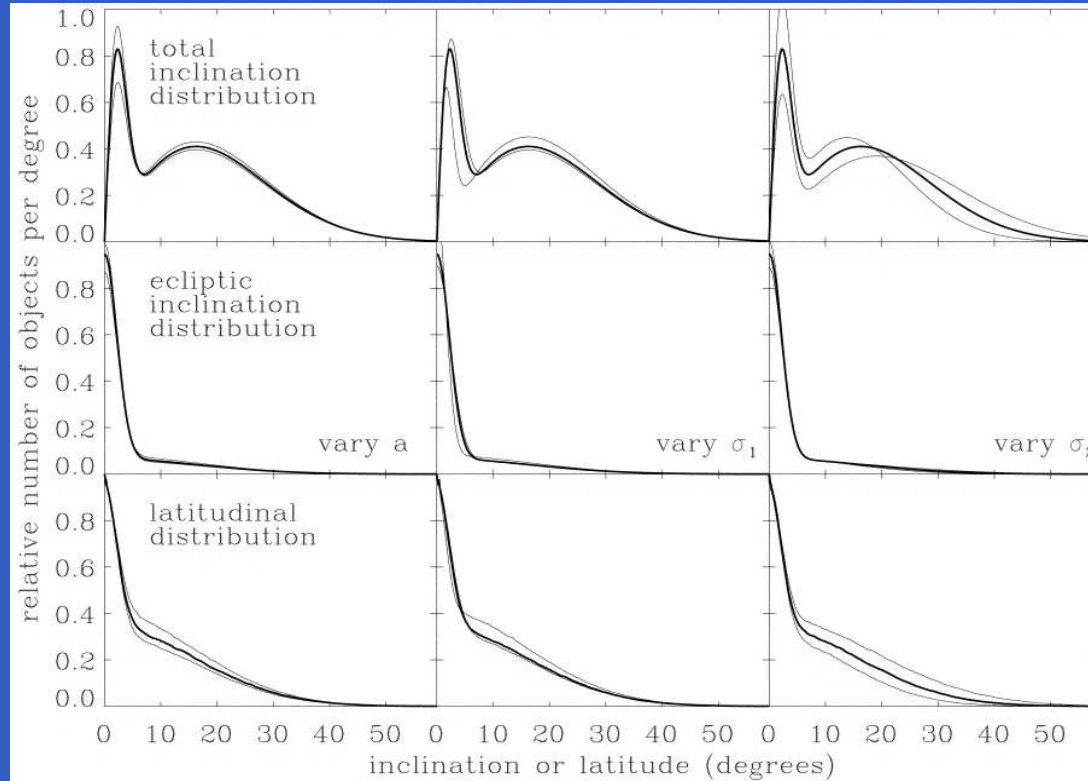
Un mejor ajuste se tiene de la suma de dos Gaussianas con  $\mu = 0,9$ ,  $\sigma_1 = 2,2^\circ$  y  $\sigma_2 = 8,8^\circ$ .

Figura 6:



- Usan dos Gaussianas por el  $\sin(i)$  para ajustar la distribución total. El mejor ajuste da:  $a = 0,93$ ,  $\sigma_1 = 2,2^\circ$  y  $\sigma_2 = 17^\circ$ .
- Dada la distribución total de inclinaciones podemos calcular las distribuciones de inclinación ecliptical y de latitudes para el modelo.

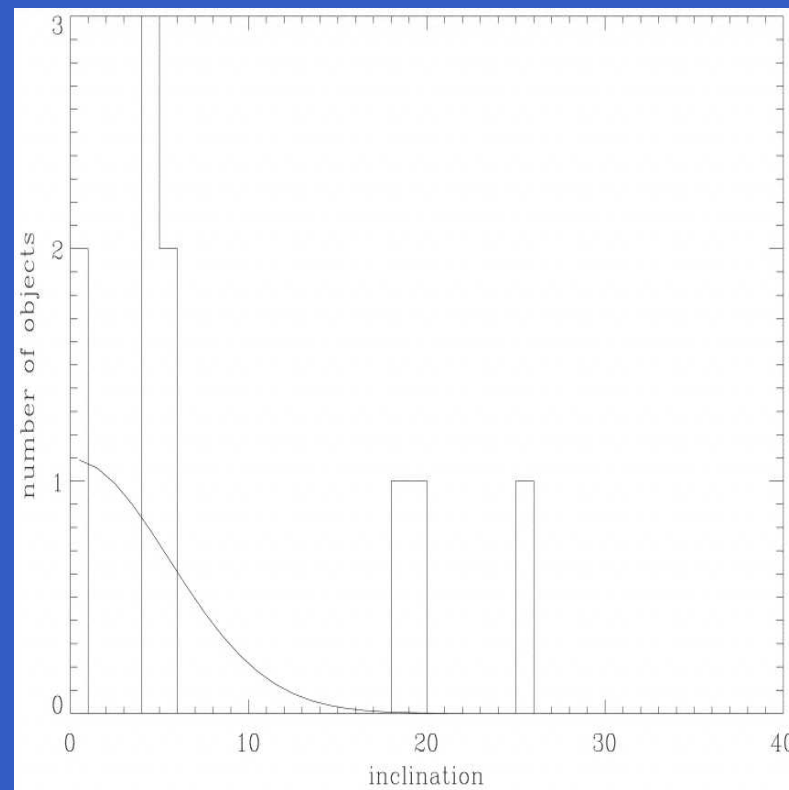
Figura 7:



## SDOs

Se conocen pocos SDOs entonces la determinación de la distribución es menos precisa. Solo 10 SDOs se han encontrado con  $\beta < 0,5^\circ$

Figura 8:

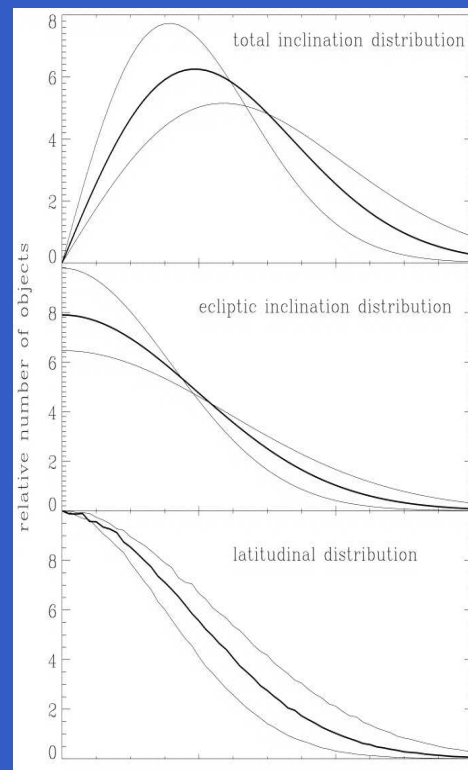


## SDOs

Prueban con una Gaussiana simple por el  $\sin(i)$  para encontrar el ajuste a la distribución total. El mejor ajuste da  $\sigma = 20^\circ \pm 4^\circ$ .

Se cree que el ajuste tan pobre se puede deber al hecho de suponer órbitas circulares, lo cual no es válido para SDOs.

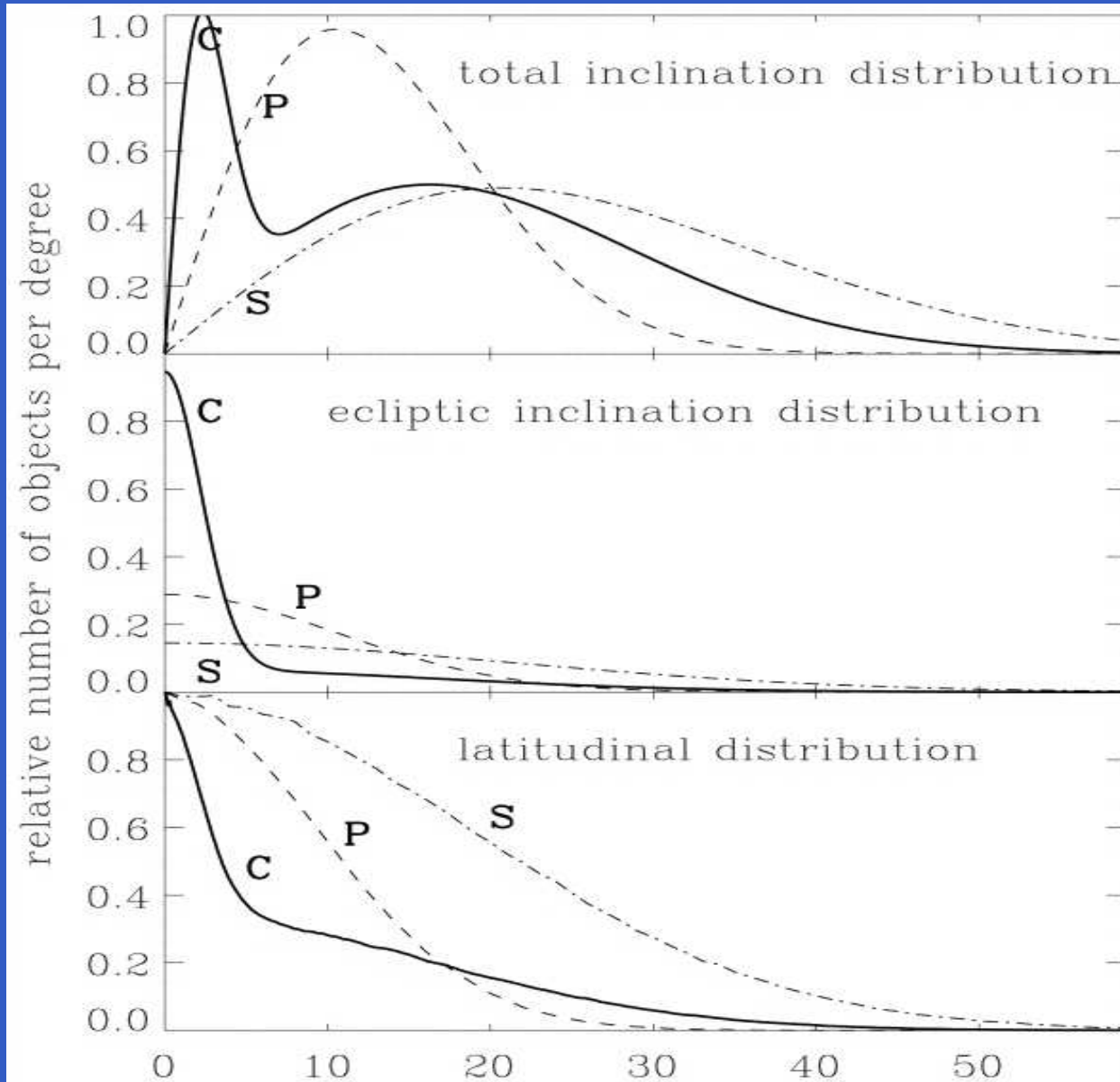
Figura 9:



- Suposición de órbitas circulares. Eso no es correcto para los plutinos y SDOs.
- Se exploran los errores causados por esta suposición y se llega a la conclusión que el método es robusto para los Plutinos
- Para los SDOs también es robusto y da resultados físicamente significativos. El ajuste relativamente pobre que se obtuvo puede ser consecuencia del amplio rango de excentricidades en el SD.
- Posibles errores en los parámetros orbitales de los EKBOs. Los objetos con órbitas pobremente determinadas pueden estar mal clasificados dinámicamente. En particular, la inclinación es muy pobremente determinada. Sin embargo se rehizo todo para los objetos con órbitas determinadas de oposiciones múltiples y se ve que los resultados no cambian en general.



Figura 10:



## Plutinos:

Malhotra (1995) encuentra que las inclinaciones y excentricidades de los EKBOs pueden crecer por la captura en resonancia producida por la migración hacia afuera de Neptuno. Sin embargo en la simulación de Malhotra, no se alcanzan inclinaciones tan altas como las observadas. En contraste, en este modelo se encuentra que la mitad de los objetos tienen  $i < 10$  y el 15 % tienen  $i > 20$ . Sin embargo puede ser posible que la migración y captura sea el mecanismo principal responsable de las altas  $i$  de los plutinos.

## Clásicos:

Se piensa usualmente que los objetos clásicos están en los lugares no perturbados donde se formaron. Pero, existe una fracción significativa de ellos que han sido altamente perturbados. Se han propuesto varios mecanismos para excitar los CEKBO.

- Migración planetaria (pero  $i < 10^\circ$ ).
- Planetesimales grandes moviéndose en el EKB (pero remueven la resonancia 3:2 y además no se observan actualmente).
- Encuentro estelar temprano, no habría afectado a los plutinos pero si a la resonancia 1:2 (pero el nro de objetos con alta  $i$  es aun pequeño. Se cree que este escenario es bastante promisorio.

Tegler y Romanishin (2000) encuentran evidencias de que el CEKB puede dividirse en al menos 2 poblaciones una con colores rojos y bajas  $i$  y otra con colores neutros y alta  $i$ .

Levison y Stern (2001) sugieren que el CEKB, se puede dividir en una población más debil de baja  $i$  y otra más brillante de alta  $i$ .

Ambos efectos pueden estar relacionados con la distribución de  $i$ .

## SDO:

Las distribuciones de inclinación y de latitud anchas de los SDOs son consistentes con la formación por scattering por Neptuno. También parece que existe algún mecanismo que aumenta las  $i$  más allá de lo esperado, aunque en esta región la estadística es pobre.