

Seminario de Postgrado

Título: EL ESPACIO TRANSNEPTUNIANO

1 Estructura y clases dinámicas

La estructura de la región transneptuniana se aborda actualmente desde dos puntos de vista. Desde la observación se definen las clases dinámicas según lo que se ve. Y desde los modelos teóricos y simulaciones numéricas sobre la formación y evolución de los TNOs.

Vamos a ver algunos trabajos que definen la estructura de esta región. En primer lugar estudiaremos los surveys observacionales y luego los trabajos teóricos.

1.1 Trabajo de Elliot et al. 2005: The Deep Ecliptic Survey (DES)

El Deep Ecliptic Survey (DES) es un proyecto para la búsqueda optimizada de TNOs con el Telescopio Blanco y Mayall de 4 mts de Cerro Tololo y el Observatorio de Kitt Peak. Está diseñado para descubrir y determinar las órbitas de cientos de TNOs para comprender cómo se llena el espacio de fases en el sistema solar exterior.

Ha cubierto 550 *grados*² desde 1998 hasta finales del 2003. En el periodo 1998 - 2000 se descubrieron 62 TNOs. En este paper que cubre el segundo periodo desde marzo de 2000 hasta diciembre de 2003. se descubrieron 320 TNOs y Centauros. De los 382 objetos descubiertos por DES, 196 tienen órbitas lo suficientemente precisas como para su clasificación. De estos, 96 son Clásicos, 54 Resonantes, 24 Scattered Near, 9 scattered extended y 13 Centauros.

Descubrió el primer troyano de Neptuno y también el primero de los objetos de perihelio distante (2000CR₁₀₅).

Además de trabajar con sus objetos (los 382), trabajan con la base de datos del MPC. Definen clases en la región TN y determinana el plano del Cinturón y la distribución de inclinaciones a su alrededor.

1.1.1 Las observaciones

Hacia el final del periodo de este paper le asignaron al DES 88 noches con la cámara mosaico del telescopio Mayall y Blanco en el Observatorio de Kitt Peak y Cerro Tololo. De las 873 hs disponibles, se usaron 655 hs (75%), se perdió un 23% del tiempo por mal tiempo y un 2% por fallas del equipo. Casi todas las observaciones se hicieron con un filtro VR. La figura 1 muestra la parte del cielo que cubrió el survey.

La selección de los campos se hizo para maximizar la tasa de descubrimiento de TNOs. Los centros de los campos se tomaron dentro de $\pm 6.5^\circ$ de la eclíptica. Los campos con estrellas más brillantes que magnitud 9.5 se descartaron (las estrellas brillantes reducen el area de detección de objetos débiles por blooming (carga del CCD alrededor de la estrella por su brillo)). También se descartaron los campos con menos de 35 estandares (gran nro para compensar distorsiones geométricas del campo).

En la fig 2 se muestra una carta que muestra una distribución típica de campos.

La estrategia para la observación consistió en tomar tres exposiciones por campo (o frame o mozaico), dos en una noche con diferencia de $\sim 2hs$ y una la noche siguiente. Con esta estrategia se reduce el error en la extrapolación de las posiciones y un objeto puede ser confirmado y por tanto el MPC le da una designación provisoria permitiendo que otros observadores lo observen.

Desde el inicio del DES se ha muestreado aproximadamente el 12% del ángulo sólido dentro de los 6° de la eclíptica.

Los candidatos a TNOs en un campo se identifican debido a su movimiento propio respecto de las estrellas.

Se los identifica mediante software y luego mediante inspección directa del observador. Los criterios usados para la inspección final son:

- Las 2 imágenes están en más de 1 pixel
- La velocidad y dirección de movimiento del objeto es apropiada para un TNO o Centauro en esa sección de cielo

Figure 1: Cada punto representa un mosaico de 0.36 grado^2 y la línea punteada el ecuador galáctico. La falta de campos de búsqueda cerca de 270° en ascensión recta se debe a la dificultad para encontrar campos estelares cerca del centro galáctico

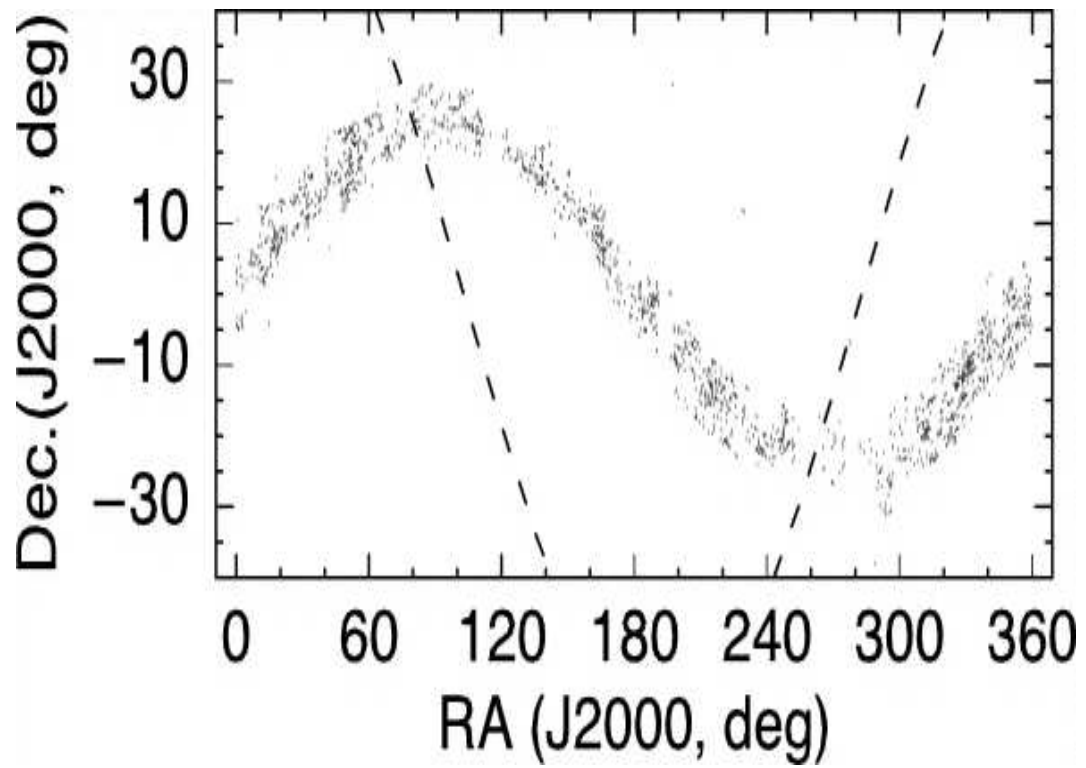
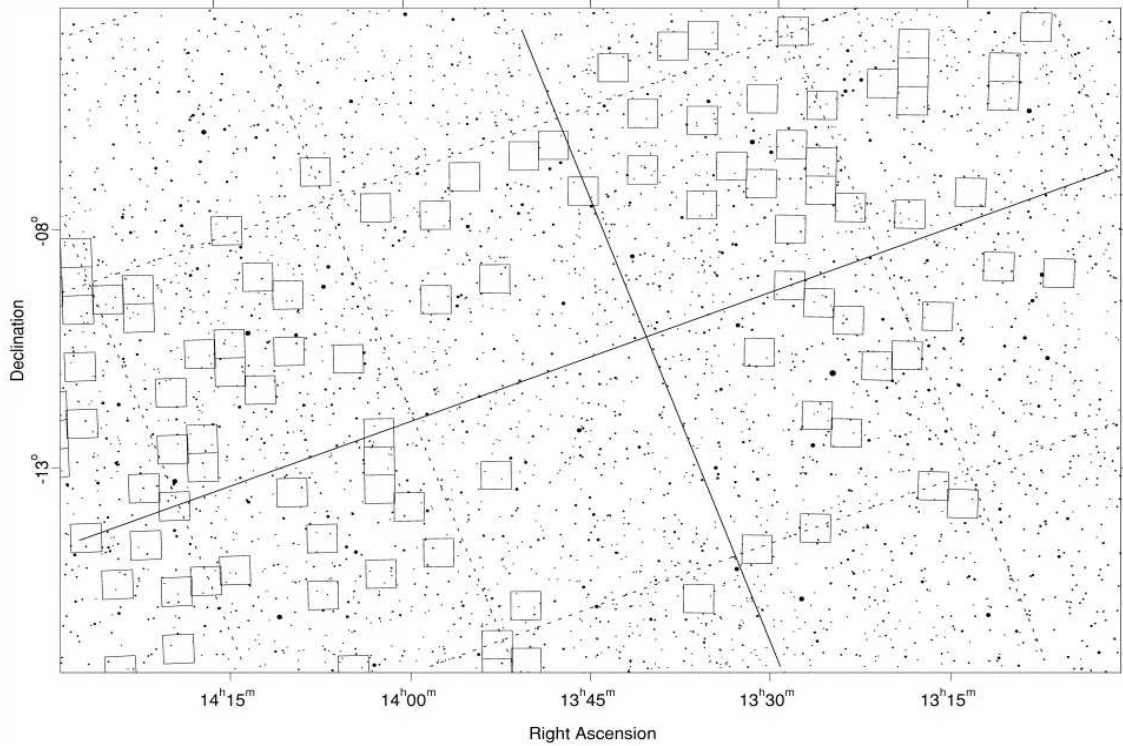


Figure 2:



- la magnitud del objeto es consistente en las dos exposiciones
- ninguna de las imágenes aparece elongada (que indicaría un objeto de movimiento rápido)
- el objeto aparece en la tercera exposición en la posición que se obtiene de extrapolar las posiciones de las primeras 2 imágenes.

Los objetos que cumplen con todo esto son enviados al MPC.

Las magnitudes asignadas a los objetos del DES se basan en reducciones fotométricas con respecto a las magnitudes rojas del catálogo USNO-A2.0 y desde octubre de 2003 del catálogo USNO-B1.0. Los errores en las magnitudes

de las estrellas de estos catálogos pueden llegar a 0.5 mag. pero las diferencias de los rms para todas las estrellas usadas en la reducción son de entre $\sim 0.1 - 0.3$ mag.

De los posibles TNOs enviados al MPC, algunos se observaron 2 o más noches mientras que otros necesitaron más observaciones para establecer su órbita. Ambos tipos de objetos necesitan más observaciones para establecer su órbita. Para esto se estableció un programa de recuperación con varios telescopios del mundo y se necesitó gran parte del tiempo del DES para esto.

Una vez que la órbita está establecida se hacen posibles más resuperaciones directamente buscando en los archivos de datos. Se encontraron 160 archivos de DES (campo con el par de exposiciones) donde los objetos deberían estar presentes pero no se encontraron. De estos, 66 fueron recuperados con éxito. 14 deberían haberse descubierto en la pasada inicial 52 requirieron información de donde buscar en la imagen, 40 se perdieron porque el objeto estaba en el límite de mag. del campo y 12 se perdieron por interferencia con estrellas o asteroides del campo. La posición de estos objetos se envió al MPC.

Como mencionamos, no todos los desubrimientos recibieron una designación del MPC debido a que no se pudieron observar en una 2da noche (por mal tiempo o acceso a telescopios apropiados).

Sin embargo los objetos no designados no pueden ser ignorados. Para entenderlos como un grupo, se compararon algunas propiedades respecto de los objetos designados. Se puede observar (ver Fig2 del paper) que los objetos no designados tienen distancias medias menores, debido al bias de recuperación respecto de los objetos que se mueven más rápido (ver?????). También tienen inclinaciones más grandes debido al mayor error en las inclinaciones de estos objetos.

De los 13 binarios conocidos hasta el momento, 7 se detectaron originalmente en el DES (el objeto solo). La naturaleza binaria de estos objetos se pudo notar en la recuperación de observaciones.

1.1.2 Clasificación dinámica

Se describe un método simple y cuantitativo para la clasificación de las órbitas. El método básico consiste en integrar hacia adelante la trayecto-

ria de cada objeto en el campo gravitatorio del Sol y los 4 planetas gigantes. Examinando el comportamiento a largo plazo del objeto, se clasifica al mismo en una de las 5 clases que se describen a continuación. Se listan las clases en orden de testeo de membresía. Los cálculos se hicieron en un sistema heliocéntrico J2000 y para todos los TNOs y Centauros de la base de datos del MPC.

TNOs Resonantes

Los TNOs resonantes son aquellos para los cuales uno o más argumentos resonantes libran. Las *Resonancias de Movimientos medios* con Neptuno se caracterizan por argumentos resonantes de la forma:

$$\phi = p\lambda - q\lambda_N - m\varpi - n\Omega - r\varpi_N - s\Omega_N \quad (1)$$

p,q,r,s,m,n: enteros

El orden de una resonancia es igual a $|p - q|$. Las resonancias de orden alto son más débiles que las de orden bajo.

Se testearon 107 argumentos resonantes diferentes. Se tomó $s = 0$ para despreciar las resonancias que dependan de la inclinación de Neptuno. Se incluyeron resonancias de orden ≤ 4 y de primer orden más lejanas que la 6:5, debido al overlap, aunque si se testeo la resonancia 1:1..

TNOs No Resonantes

Un objeto para el cual el argumento resonante circula es no resonante. Dentro de esta clase se distinguen 4 clases.

\hookrightarrow *Centauros*:

Son objetos no resonantes cuyo perihelio es menor que el semieje mayor de Neptuno durante toda la integración. Esta def. intenta ser sinónimo de “planet crossing”, sugiere tiempos de vida cortos y se acerca a la definición de Centauro como “un objeto que orbita el Sol entre Júpiter y Neptuno”.

\hookrightarrow *Scattered Near*:

Son objetos no resonantes que no cruzan los planetas y se caracterizan por tener parámetros de Tisserand promediados temporalmente menores que 3, relativos a Neptuno. El parámetro de Tisserand T está dado por:

$$T = \frac{a_N}{a} + 2\cos(i_{KN})\sqrt{(a/a_N)(1 - e^2)} \quad (2)$$

Si consideramos el PR3C, Sol, Neptuno, TNO, se tiene que

$$v^2 = 2U - T \quad (3)$$

donde v es la velocidad del TNO, en unidades de la velocidad de Neptuno, y U es la función potencial dada por:

$$2U = x^2 + y^2 + \frac{2(1 - \mu)}{\rho_1} + \frac{2\mu}{\rho_2} \quad (4)$$

Entonces si consideramos $\mu \sim 0$ para un TNO que cruza la órbita de Neptuno, en ese instante se tiene:

$$x^2 + y^2 = 1$$

$$\rho_1 = 1$$

Entonces:

$$2U = 3$$

y

$$v = \sqrt{3 - T} \quad (5)$$

————— OJO esta no es la clasificación usual de SDO near. —————

↔ *Scattered Extended:*

Son objetos con valores promedios de $T > 3$ y valores promedios de $e > 0.2$. Esta clase está motivada por objetos de perihelio grande y gran excentricidad, difíciles de comprender con la configuración actual de los planetas. El límite en la excentricidad es arbitrario.

↔ *Clásicos:*

Los TNOs clásicos tienen $T > 3$ y valores promedios de $e < 0.2$. También el límite en la excentricidad es arbitrario.

Implementación

La clasificación orbital está condicionada por los errores en las posiciones y velocidades de los TNOs, que se traducen en incertezas en los elementos orbitales osculantes.

Un survey exhaustivo de todas las órbitas posibles en el espacio de fases de 6 dimensiones para cada TNO sería demasiado tiempo computacional. Entonces se procede de la siguiente manera. En el espacio de 6 dimensiones de órbitas posibles, se seleccionan tres órbitas para clasificar. La primera: solución 1, es la dada por el mejor ajuste. La segunda: solución 2, está dentro de 3σ en la superficie del espacio de fases de 6D y tiene un semieje mayor que es mayor que el de la solución 1. La tercera órbita (solución 3) también está a 3σ en la superficie en el espacio de fases de 6D pero el semieje mayor es menor que el de la solución 1. Se utiliza a para las sol 2 y 3 porque es el parámetro más sensible para testear la pertenencia a una resonancia. El otro parámetro importante es la e pero está correlacionado con a. Entonces las soluciones 2 y 3 son las órbitas que tienen a que difiere más del mejor ajuste en sentido positivo y negativo ver fig 3.

Entonces se integran numéricamente las 3 órbitas para cada TNO usando la base de datos astrométrica del Lowell Observatory con el integrador RMVS3 (Levison y Duncan, 1994) bajo la acción del Sol y los 4 planetas gigantes por 10 My con paso de 50 días. Se testea primero la pertenencia a una resonancia. Un objeto se lo considera con clasificación “segura” si para las 3 órbitas iniciales se llega a la misma clasificación y si las diferencias entre el a de las soluciones 2 y 3 son menores al 10% del mejor ajuste.

Los objetos para los cuales la posición nominal (mejor ajuste) no conduce a una clasificación se consideran “no clasificados”.

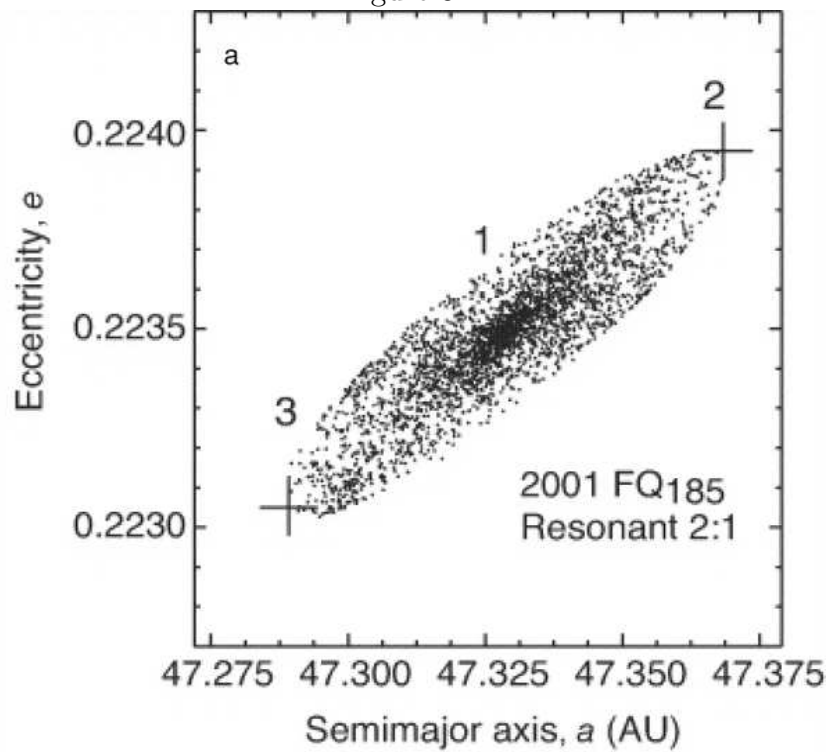
En cuanto a los objetos del DES se clasificaron: 96 Clásicos, 54 Resonantes, 24 Scattered Near, 9 scattered extended y 13 Centauros. Se encontraron 10 resonancias de MM pobladas: desde la 1:1 hasta la 5:2 (desde orden 0 hasta orden 4).

Ver fig. 4 y ver figs 6 y 7 del paper.

1.1.3 Remoción por Bias

Las propiedades de los objetos tomados como un conjunto están influenciadas por varios bias que hacen que algunos objetos tengan mayor probabilidad de ser descubiertos y recuperados que otros.

Figure 3:



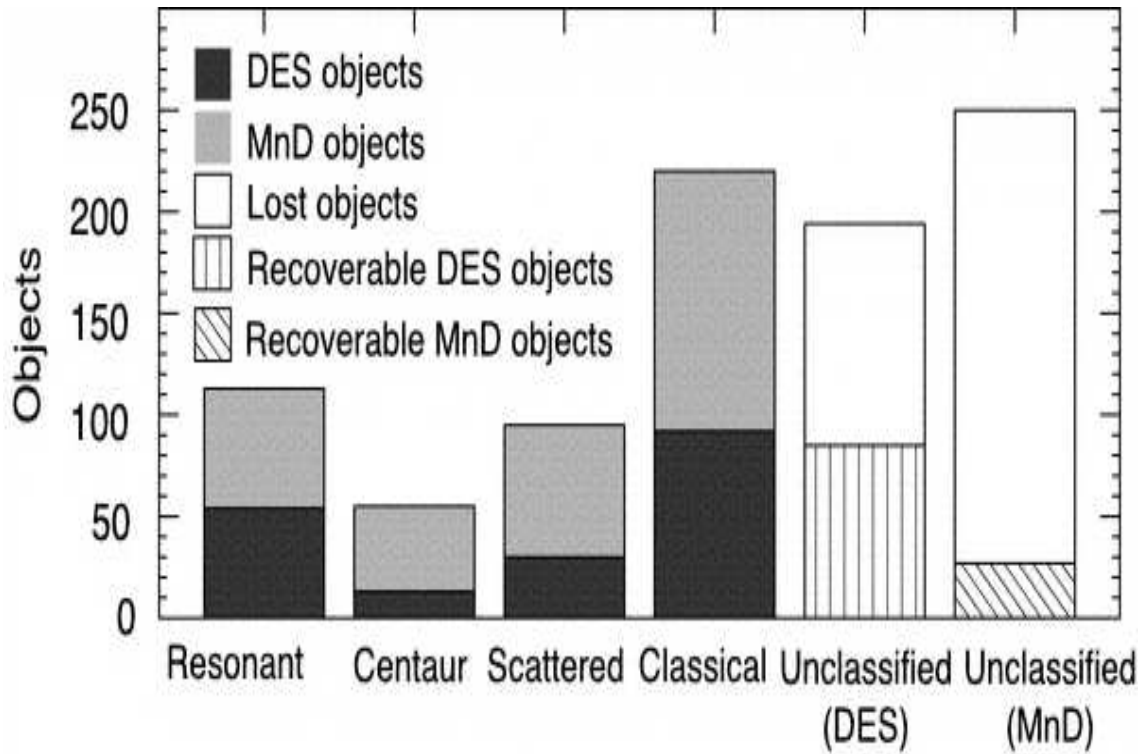
Los factores que pueden haber introducido bias en en las muestras de objetos se pueden dividir en las siguientes categorías:

1. Propiedades de los campos de búsqueda:

- latitud del plano del EKB
- longitud del plano del EKB
- densidad de estrellas y galaxias
- tiempo desde la última visita
- elongación solar

2. Características de la observación:

Figure 4:



- magnitud límite
- calidad de la imagen
- filtros
- desajuste en el registro del campo
- objetos saturados
- magnitud

3. Características de los objetos:

- color

- tasa de movimiento
- elementos orbitales
- distancia
- coordenadas del plano del EKB

4. Técnicas de reducción de datos

- eficiencia de detección
- algoritmo de detección

5. Características de la recuperación de las observaciones

- oportunidad para la recuperación
- número de intentos
- dificultad de la recuperación
- unicidad de la órbita

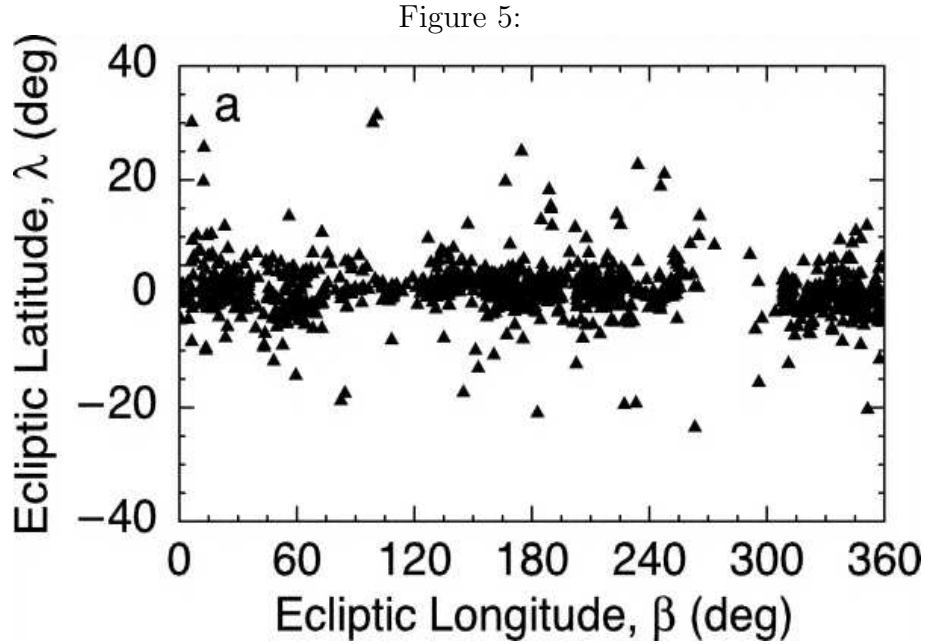
Los detalles de cómo se cuantifican los efectos de estos sesgos se verán cuando se necesite en lo que sigue.

1.1.4 Plano del EKB

Un sistema de referencia natural para las órbitas del EKB es el plano medio del propio cinturón. Se debería definir observacionalmente para un conjunto de EKBOs como el plano de simetría de sus posiciones. Sin embargo las posiciones de los TNOs no están lejos de sus posiciones de descubrimiento, las cuales tienen un sesgo de posición debido a los campos usados en los surveys. Brown y Pan, (2004) notaron que a pesar de que las posiciones de los TNOs tienen sesgo, se pueden usar las direcciones de las velocidades para determinar el plano del EKB: el promedio de las velocidades en el plano del cielo observados en cualquier parte del cielo debe ser paralelo al plano del EKB. Brown y Pan (2004) procedieron a encontrar el EKBP estableciendo el plano de simetría para las direcciones de las velocidades en el plano del cielo

en el momento de descubrimiento para los 728 TNOs listados por el MPC hasta junio de 2003. En este paper se adopta el mismo criterio y se exploran 5 métodos para implementarlo.

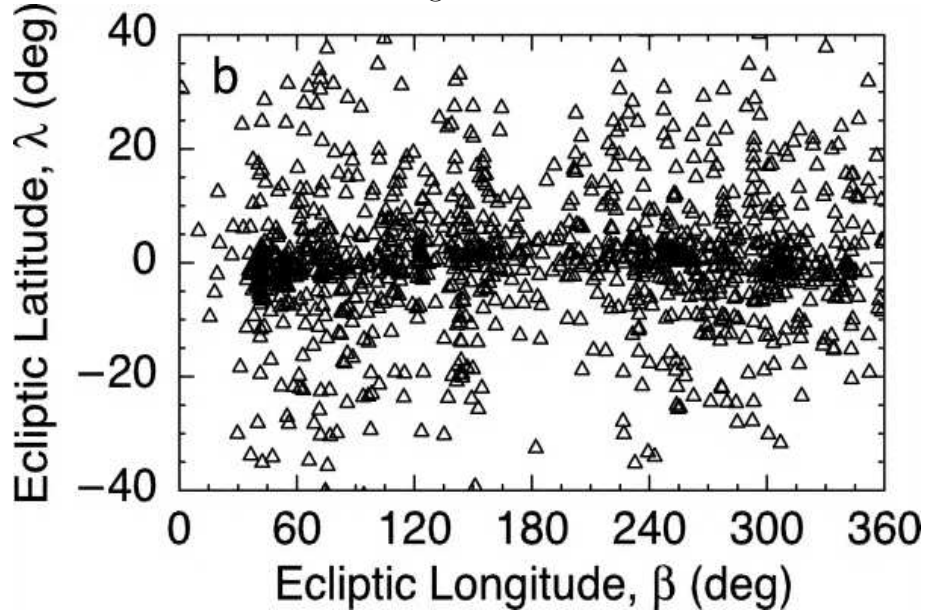
Métodos para determinar el EKB:



La figura 5 muestra las coordenadas eclipticales heliocéntricas de los 872 EKBOs usados en el análisis y la fig. 6 muestra la dirección de sus vectores velocidad, en el sistema ecliptical. Para establecer el plano del EKB a partir de estas velocidades debemos determinar el plano en el cielo alrededor del cual las direcciones de las velocidades son simétricas. Podemos escribir la latitud ecliptical, β_0 , como función de la longitud ecliptical, λ , para un plano que tiene una inclinación, i , y una longitud del nodo ascendente, Ω , con respecto al plano de la eclíptica.:

$$\beta_0(i, \Omega, \lambda) = \arcsen[\sen(i) \sen(\lambda - \Omega)] \quad (6)$$

Figure 6:



Para inclinaciones pequeñas esto se puede aproximar por:

$$\beta_0(i, \Omega, \lambda) \approx i \text{sen}(\lambda - \Omega) \quad (7)$$

El objetivo es determinar los parámetros i y Ω del plano del EKB a partir de las direcciones de los vectores velocidad de los EKBOs para lo que se usan 5 métodos.

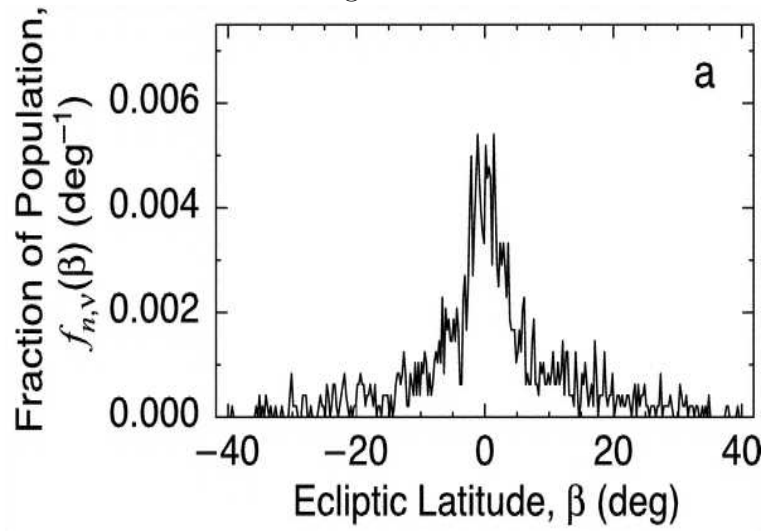
1. (= *queByP*, 2004) Establece los valores de i y Ω que minimizan la suma de los valores absolutos de las desviaciones de las direcciones de los vectores velocidad de la curva descrita por la ecuación anterior. Prefieren esto al método de cuadrados mínimos porque este método supone que las desviaciones de los datos del modelo siguen una distribución gaussiana. En este caso aunque los datos (direcc. de veloc) están acumulados alrededor de la eclíptica tienen demasiados valores grandes como para describir una gaussiana y más bien sugieren una ley de potencia (ver fig. 7).

2. Método de cuadrados mínimos para minimizar las desviaciones de las direcciones de los vectores velocidad de la curva descrita por la ecuación anterior.
3. Reconoce que las direcciones de las velocidades de los EKBOs están distribuidas alrededor de un plano promedio como resultado de las interacciones dinámicas entre ellos y con otros cuerpos. Se nota que aunque su promedio es una estimación sin bias del plano del EKB, la distribución en latitud de las velocidades no representa la distribución en latitud de los EKBOs. Esto se debe a la preferencia de las velocidades de los EKBOs observados en cualquier lugar del cielo a ser paralelas al plano del EKB, por tanto la distribución de la distribución de velocidades está sesgada hacia las cercanas al plano del EKB. En este modelo se ajustan por mínimos cuadrados simultáneamente el plano del EKB relativo a la eclíptica y una función de distribución de las direcciones de las latitudes de los EKBOs. Se tomaron bins en latitud y longitud ecliptical.
4. Se hace lo mismo que en el método 3 pero se encuentran un conjunto de parámetros que dan el mejor ajuste (máxima similitud) para la muestra de EKBOs observados.
5. Se usa también el método de máxima verosimilitud para el ajuste según el modelo 3 pero no se toman bins en la velocidad

La fig 8 muestra la tabla que (tabla 12 del paper) da los valores de todos los métodos.

En la fig. 9 se muestran la ascensión recta y declinación del polo del plano del EKB para cada método. También se muestran los polos de las órbitas de los planetas y la eclíptica. La diferencia con la solución de ByP, 2004 se atribuye a que ellos usan velocidades en la fecha de descubrimiento y en este paper se usan velocidades basadas en los elementos orbitales actuales. Los resultados de los 3 métodos que derivan conjuntamente el plano del EKB junto con la función distribución de la dirección de las velocidades tienen un buen acuerdo. El método de mínimos cuadrados no da un buen resultado, como se dijo antes. Se adopta el método de máxima verosimilitud para objetos individuales (método 5) (triángulo lleno) como el procedimiento standard para los análisis siguientes.

Figure 7:



Con lo anterior se definió el mejor método para determinar el plano del EKB. Para determinarlo en si, se usó la base de datos entera del MPC. Luego se toaron subconjuntos de esta base y se determinó el plano para cada uno. Se muestra en la figura 10.

Figure 8:

TABLE 12
COMPARISON OF METHODS FOR DETERMINING THE KUIPER BELT PLANE

FIT	ANALYSIS METHOD	SAMPLE ^a	FITTED PARAMETERS					DERIVED PARAMETERS		
			Inclination, i (deg)	Node, Ω (deg)	$\beta_{K,v}$, FWHM (deg)	Peak, $n_{K,v,0}$ (deg ⁻²)	c_2	c_1	R.A., α_p (J2000, deg)	Decl., δ_p (J2000, deg)
0.....	BP2004 ^b	2.1	1.86	81.6	...	...	...	...	274.57 ± 0.91	66.22 ± 0.37
1.....	MAVR ^b	2.1.1	1.86	98.80	...	...	...	...	274.67 ± 0.47	66.78 ± 0.19
2.....	LS 1D ^c	2.1.1	2.49 ± 0.62	104.0 ± 12.0	...	...	...	...	276.21 ± 1.60	67.04 ± 0.52
3.....	LS 2DB ^d	2.1.1.1	1.65 ± 0.17	97.4 ± 5.7	2.6 ± 0.5	3.0 ± 0.4	0.18 ± 0.08	0.91 ± 0.04	274.14 ± 0.42	66.72 ± 0.16
4.....	ML 2DB ^e	2.1.1.1	1.70 ± 0.18	100.0 ± 6.0	2.6 ± 0.2	3.0 ± 0.2	0.17	0.91	274.25 ± 0.45	66.80 ± 0.18
5 ^f	ML 2DU ^g	2.1.1	1.74 ± 0.23	99.2 ± 6.6	4.0 ± 0.5	...	0.44 ± 0.15	0.78 ± 0.08	274.36 ± 0.60	66.78 ± 0.20

^a See Table 4.^b Minimize sum of absolute values of the residuals (§ 5.2.1).^c Least-squares fit for the plane only (§ 5.2.2).^d Least-squares fit for the plane and velocity-direction distribution function (binned; § 5.2.3).^e Maximum likelihood fit for the plane and velocity-direction distribution function (binned; § 5.2.4).^f Adopted solution.^g Maximum likelihood fit for the plane and velocity-direction distribution function (unbinned; § 5.2.5).

1.2 Otros surveys observacionales

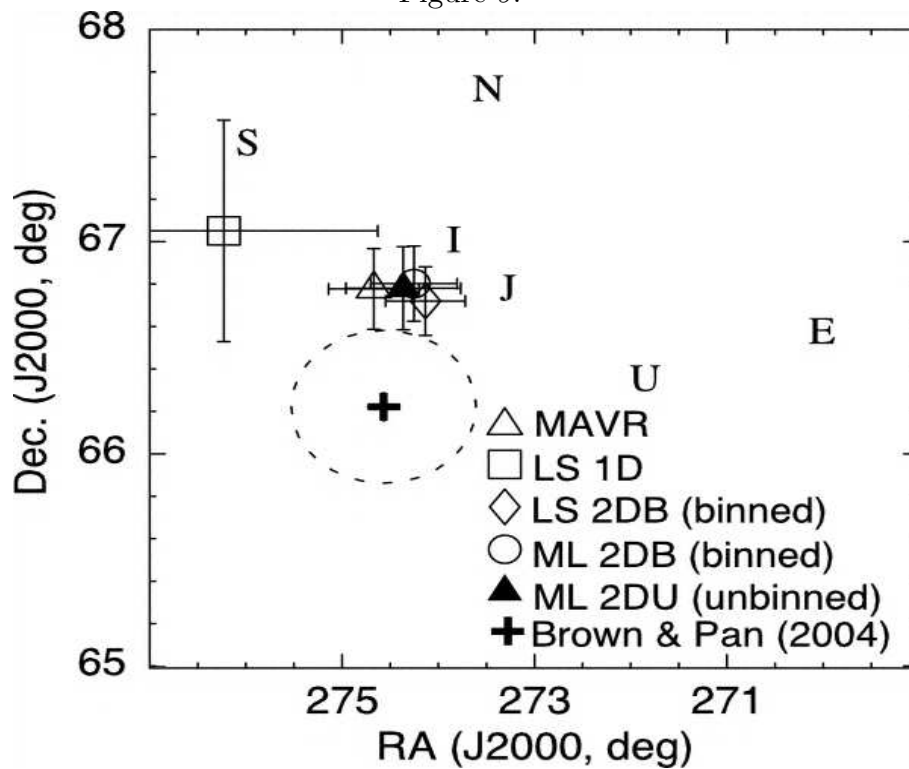
1.2.1 Paper: Bernstein et al., 2004

Buscan TNOs pequeños con la cámara: Advaced Camera for Surveywys (ACS) del HTS. El Hubble es el telescopio que permite detectar objetos más débiles. Este survey cubre 6 campos que se superponen, el mosaico completo cubre una area de 0.019grado^2 muy cerca del plano invariante. Descubren tres objetos nuevos hasta magnitud $m = 28.3$ ($D \sim 25$) km mostrados en la fig.11.

1.2.2 Paper: Gladman et al., 2001

Usan el telescopio de 3.6 mts de Canada - Francia - Hawaii y el de 8 mts de la ESO (VLT). El survey se concentra cada campo cada noche de forma de obtener un máximo de profundidad en lugar de máximo de area cubierta. Obtienen las magnitudes R de dos campos eclipticales. Descubren 17 TNOs, que se muestran en la tabla siguiente (tabla 2 del paper) o fig. 12

Figure 9:



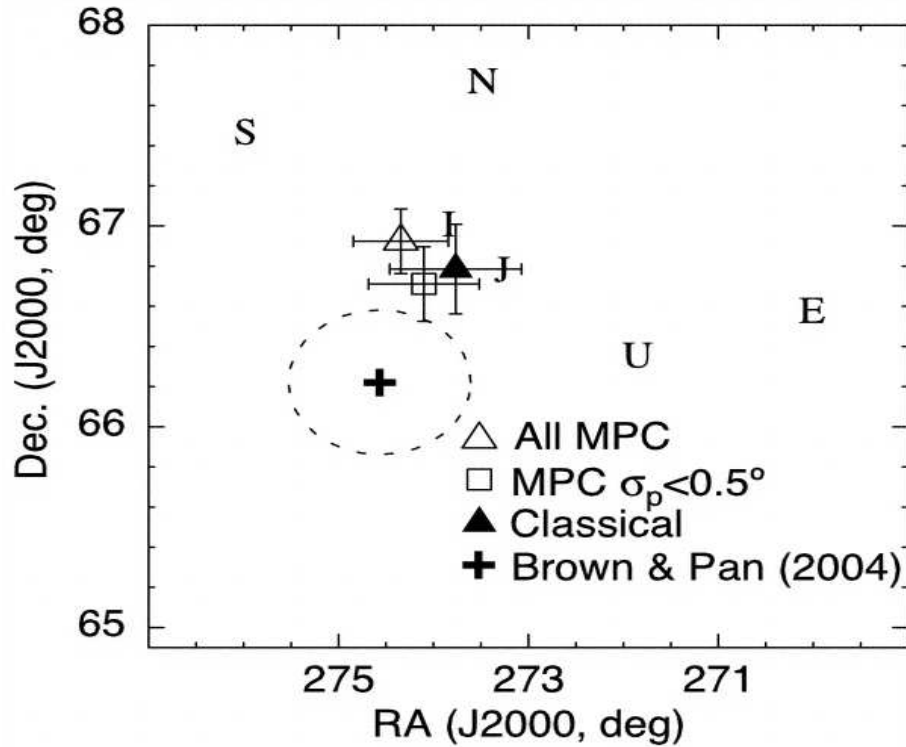
1.2.3 Paper: Larsen et al., 2001

Cubren un area grande para buscar TNOs y Centauros brillantes. Reprocesan archivos del telescopio de Kitt Peak de 0.9 mts. El survey incluye 331 registros tomados desde 1995 a 1999. Cubre un area del cielo de 1483.8 grados^2 . Descubren 5 TNOs y 5 Centauros usando un código de detección automática. La fig 13 muestra el area cubierta por el survey

1.2.4 Paper: Sheppard et al., 2001

Usan un telescopio de 0.5 mts de diámetro en Australia. Se cubren 238 campos independientes cubriendo un area total de 1428 grados^2 , a $+10^{\text{circ}}$ y -30° de la eclíptica. Se detectan muchos asteroides de mov. rápido y un

Figure 10:



Centauro (Chariklo), ya descubierto. La fig 14 muestra el area cubierta por el survey.

1.2.5 Paper: Chen et al., 2007

Es el Taiwan-America Occultation Survey (TAOS) pretende determinar el nro de cuerpos pequeños en el Sistema Solar exterior mediante ocultaciones estelares. Trabaja con un conjunto de 4 telescopios robóticos pequeños ($D = 0.5m$) instalados en Taiwan monitoreando estrellas para buscar posibles ocultaciones. En gral los surveys detectan objetos grandes y la función de distribución de tamaños para objetos pequeños no se conoce bien. El TAOS podría detectar TNOs hasta de 1 - 2 km. Las ocultaciones son un fenómeno muy rápido, es decir que se necesita fotometría rápida.

Figure 11:

TABLE 1

PROPERTIES AND BARYCENTRIC ELEMENTS OF DETECTED OBJECTS

Name	d^a (AU)	a (AU)	e	i (deg)	Mean F606W Magnitude	Diameter ^b (km)
2000 FV ₅₃ ^c	32.92 ± 0.00	39.02 ± 0.02	0.156 ± 0.001	17.35 ± 0.00	23.41 ± 0.01	166
2003 BG ₉₁	40.26 ± 0.00	43.29 ± 0.06	0.071 ± 0.004	2.46 ± 0.00	26.95 ± 0.02	44
2003 BF ₉₁	42.14 ± 0.01	50 ± 20	0.4 ± 0.4	1.49 ± 0.01	28.15 ± 0.04	28
2003 BH ₉₁	42.55 ± 0.02	45 ± 13	0.2 ± 0.7	1.97 ± 0.02	28.38 ± 0.05	25

^a Heliocentric distance at discovery.

^b Assuming a spherical body with geometric albedo of 0.04.

^c Previously known TNO targeted for this study. Elements reported here are from ACS data alone.

Desde el 2005 funcionan 3 telescopios pero los datos preliminares muestran una baja tasa de detección.

En la Fig. 15 muestra la ocultación de una estrella por un asteroide del cinturón ppal, como ejemplo.

Figure 12:
TABLE 2

TNOs DISCOVERED IN 1999 FROM THIS PENCIL-BEAM WORK (ORDERED BY INCREASING DISTANCE)

Name	m_R (error)	D (km)	Motion (arcsec hr ⁻¹)	r (AU)	i (deg)	$a?$ (AU)	$e?$	Arc (days)
1999 DA ₈	26.3 (0.5)	25	4.5	27.1	40	39?	0.3	1
1999 DD ₈	25.8 (0.3)	55	3.5	37.8	5	39?	0.2	1
1999 DB ₈	25.3 (0.3)	75	3.5	38.2	22	42.5	0.10	35
1999 DO ₈	25.8 (0.3)	70	3.2	41.8	3	41.8	0.00	1
1999 DL ₈	25.5 (0.2)	85	3.1	42.5	6	42.5	0.00	35
1999 DH ₈	24.5 (0.2)	135	3.1	42.8	4.5	44.3	0.07	3 yr
1999 DM ₈	25.6 (0.2)	80	3.1	42.9	4	42.9	0.00	1
1999 DF ₈	26.5 (0.5)	55	3.0	44.2	3	44.2	0.00	1
1999 DN ₈	25.8 (0.3)	80	3.0	44.3	3	44.3	0.00	1
1999 DQ ₈	25.9 (0.3)	80	2.9	45.3	14	45.3	0.00	1
1999 DE ₈	25.6 (0.2)	90	2.9	45.6	4	45.6	0.00	1
1999 DC ₈	26.2 (0.4)	70	2.9	45.9	5	45.9	0.00	1
1999 DA	24.0 (0.1)	200	2.8	46.3	2.8	43.4	0.07	3 yr
1999 DZ ₇	25.6 (0.3)	110	2.7	49.9	14	39?	0.3	1
1999 DR ₈	25.3 (0.2)	130	2.7	50.6	8	46?	0.1	1
1999 DP ₈	25.8 (0.3)	115	2.6	53.0	38	116?	0.70	1
1999 DG ₈	25.6 (0.3)	165	2.3	61.0	40	82?	0.6	1

NOTE.—All objects were discovered on 1999 February 16 and reobserved on 1999 February 17. Diameters are computed assuming albedos of 0.04, have been rounded to the nearest multiple of 5 km, and are uncertain to factors of 2–3. The heliocentric distances r and inclinations i are much more reliable than the semimajor axes a and eccentricities e , since the latter quantities are assumption dependent for short arcs; especially uncertain a - e combinations are noted with a question mark. Orbits with $e = 0.00$ were forced to preliminary circular fits. Arc is the length of the observed arc, in days or years.

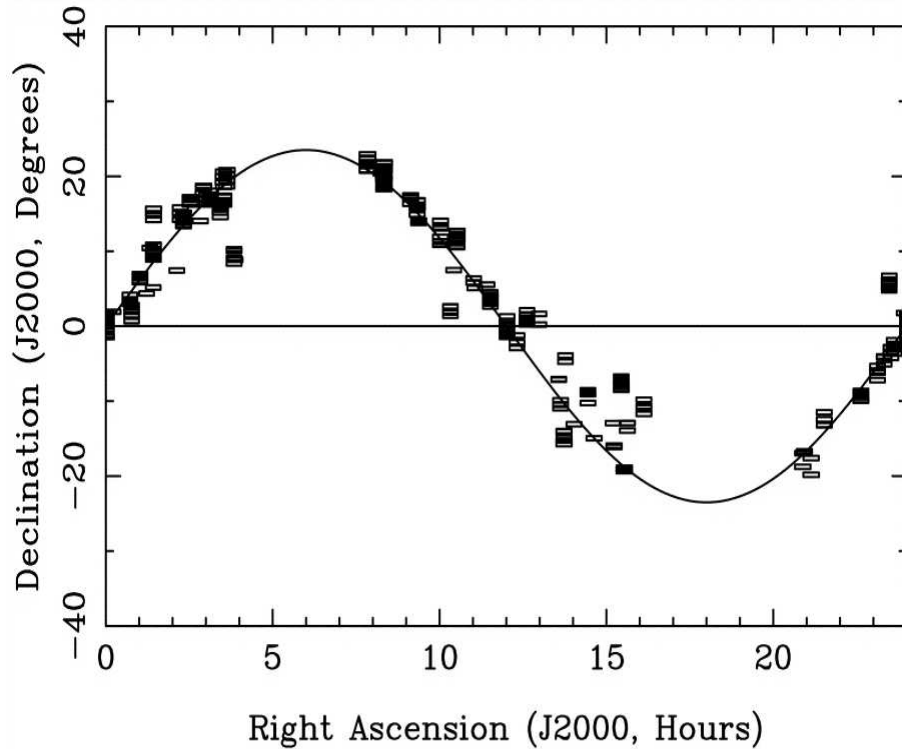
Bibliografía:

Bernstein, G. M., D.E. Trilling, R.L. Allen, M. E. Brown, M. Holman, R. Malhotra. 2004. The size distribution of trans-neptunian bodies. *The Astronomical Journal* **128**, 1364-1390.

Elliot, J. L., S.D. Kern, K.B. Clancy, A.A.S. Gulbis, R.L. Millis, M.W. Buie, L.H. Wasserman, E.I. Chiang, A.B. Jordan, D.E. Trilling and K.J. Meech, 2005, The deep ecliptic survey: a search for Kuiper Belt objects and Centaurs II. Dynamical classification, the Kuiper Belt plane, and the core population. *The Astronomical Journal* **129**, 1117-1162.

Chen, W. P., y 26 coautores. 2007. Search for small Trans-Neptunian Objects by the TAOS Project. Proceedings if IAU Symposium 236. Eds: G.B.

Figure 13:



Valsecchi and D. Vokrouhlick. Cambridge University Press, 2007., pp.65-68

Gladman, B., J. Kavelaars, J-M Petit, A. Morbidelli, M.J. Holman, and T. Lored. 2001. *The structure of the Kuiper Belt: size distribution and radial extent. The Astronomical Journal* **122**, 1051-1066.

Larsen, J.A., Gleason, A.E., Danzi, N.M., Descour, A.S., McMillan, R.S., Gehrels, T., Jedicke, R., Montani, J.L. and Scotti, J.V. 2001. The spacewatch wide-area survey for bright Centaurs and Trans-Neptunian objects. *The Astronomical Journal* **121** 562-579

Sheppard, S.S., D. C. Jewitt, C. A. Trujillo, M. J. I. Brown, M.C.B. Ashley. 2000. A wide-field CCD survey for Centaurs and Kuiper Belt Objects. *The Astronomical Journal* **120**, 2687 - 2694.

Figure 14:

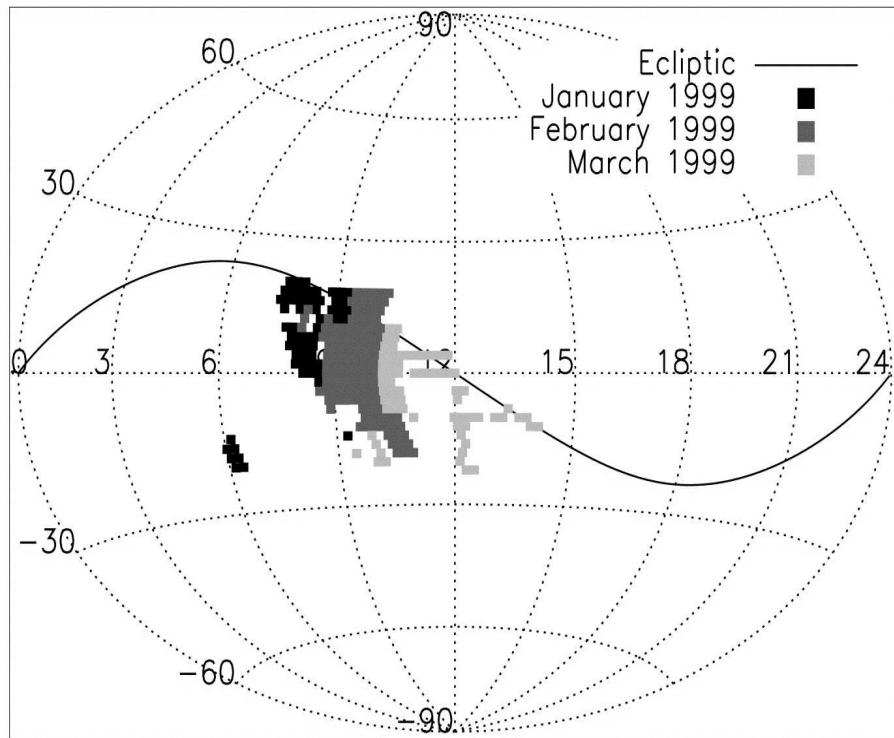


Figure 15:

TNOs by Stellar Occultation

3

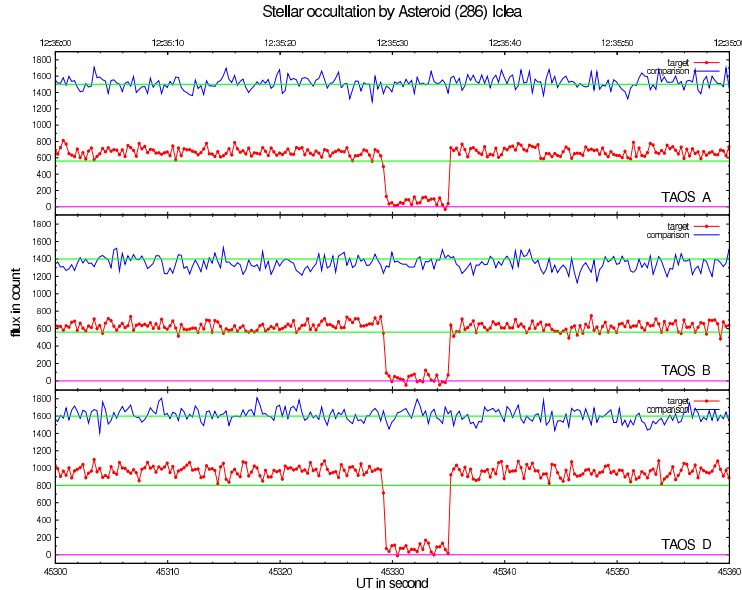


Figure 2. A showcase data of the star TYC 076200961 ($m_V \sim 11.83$ mag) occulted by (286) Iolea ($m_V \sim 14.0$ mag at the time) on 6 February 2006 observed by 3 TAOS telescopes. Data were taken at 4 Hz, and the duration of the event was estimated to be ≈ 5.75 s.

telescopes. Iolea is known to have a diameter of 97 km, and the TAOS system detected the event readily.

For short events, e.g., within one data point, we employ a nonparametric approach to identify simultaneous flux drops in stellar light curves. The flux at a given time is ranked among all data points. The rank statistic is then the product of the ranking orders of all telescopes. For example, if there are N data points from one telescope, the lowest flux has the rank $R = 1$ and the highest $R = N$. The rank statistic for data point i is then

$$Z_i = -\log\left(\prod_{k=1}^{N_{\text{tel}}} \frac{R_i^k}{N}\right) = \sum_{k=1}^{N_{\text{tel}}} \left(-\log \frac{R_i^k}{N}\right), \quad (2.1)$$

where N_{tel} is the total number of telescopes, and both the multiplication \prod and summation \sum are over N_{tel} . The quantity Z approximates to a Gamma distribution, if the noise between telescopes is independent. A probable occultation event would stand out as an “outlier” against an otherwise random distribution.

2.3. ²³Expected Event Rate

The detected rate of TNO occultation events depends on the actual occurrence rate and the detectability. Relevant parameters include: (1) The surface number density (our goal) and angular size distribution of TNOs. (2) The surface number density and angular size distribution of background stars. Both these depend on the Galactic line of sight. With our current instrument setup, the 5 Hz observations reach about $R=14$ mag, which gives within the 3 deg^2 field of view typically several hundred to a few thousand stars in a target field. A dense field would be favorable for occultation but would create images too crowded for analysis. The angular size of a star can be estimated, for example, by its optical and infrared colors (van Belle 1999). Most stars have an angular size less than 0.1 milliarcsecond (mas). For reference, a TNO at 50 AU with an angular size of 0.1 mas has