

Seminario de Postgrado

Título: EL ESPACIO TRANSNEPTUNIANO

1 Introducción general.

1.1 Existencia de un cinturón de cometas más allá de Neptuno.

La idea de la existencia de un planeta masivo más allá de Neptuno data de más de 1 siglo atrás cuando se argumentaba que Neptuno solo no podía explicar las irregularidades del movimiento de Urano. En 1908 el Astrónomo norteamericano W. Pickering sugirió la existencia de un planeta transneptuniano con una masa de 2 veces la de la Tierra. Percival Lowell (aficionado a la astronomía muy adinerado) buscó de manera exhaustiva lo que él llamó el planeta "X" entre 1905 y 1916. Hacia finales de los noventa, el observatorio Lowell, Arizona, retomó la búsqueda del "Planeta X" iniciada algunas décadas antes por su fundador Percival Lowell. En 1929 el entonces director, Vesto Melvin Slipher decidió dedicar al proyecto un telescopio de trece pulgadas (33 cm) y contrató a Clyde Tombaugh, un joven de veintidos años, para fotografiar el cielo en búsqueda del "Planeta X". Placas fotográficas de una misma región del cielo tomadas en distintas noches debían ser comparadas con el propósito de encontrar algún "objeto errante" (o sea un planeta) que se moviera entre las estrellas. El 18 de febrero de 1930, Clyde Tombaugh notó que un objeto de magnitud 17 se había movido en placas tomadas de la región de Delta Geminorum en distintas épocas, justo como era de esperarse para un planeta transneptuniano. El 13 de marzo del mismo año, día del 149 aniversario del descubrimiento de Urano, el observatorio de Lowell anunció el descubrimiento del noveno planeta, llamado Plutón, como el dios romano de los infiernos y los muertos, hermano de Júpiter y de Neptuno. Las dos primeras letras de Plutón coinciden también con las iniciales de Percival Lowell.

Sin embargo, el Observatorio Lowell no daba información cuantitativa del descubrimiento, y la confirmación de que el nuevo objeto estaba más allá de Neptuno provino de los cálculos de órbita de Bower y Whipple, graduados de la Universidad de California en Berkeley y miembros delo que luego fue

la escuela para el cálculo de órbitas. Ellos mostraron que el nuevo objeto se encontraba a 41 UA de la Tierra en una órbita inclinada 17 grados, a partir de observaciones F.W.Meyer tomadas durante tres semanas en el Observatorio de Lick y medidas por Van Biesbroeck.

Tombaugh continuó la búsqueda de otros objetos transneptunianos 13 años más sin éxito. Inmediatamente luego del descubrimiento de Plutón, Leonard (1930) especuló que Plutón era el primero de un grupo de objetos aun no descubiertos que llamó planetas “ultra-Neptunianos” y “ultra-Plutonianos”.

. . . Now that a body of the evident dimensions and mass of Pluto has been revealed, is there any reason to suppose that there are not other, probably similarly constituted, members revolving around the Sun outside the orbit of Neptune? . . . As a matter of fact, astronomers have recognized for more than a century that this system is composed successively of the families of the terrestrial planets, the minor planets, and the giant planets. Is it not likely that in Pluto there has come to light the first of a series of ultra-Neptunian bodies, the remaining members of which still await discovery but which are destined eventually to be detected?

Unos años después el astrónomo irlandés Kenneth Essex Edgeworth (1880 - 1972), presentó el primer marco cuantitativo para un cinturón transneptuniano basado en principios cosmogónicos en un tratado que ha permanecido sin publicar (Edgeworth, 1938, *The Evolution of the Solar System*). Edgeworth tomó la idea desarrolló la idea (que data de al menos Kant (1755)) de que la formaón de los planetas podía entenderse como la consecuencia de la acumulación de numerosos cuerpos pequeños o condensaciones en un disco protoplanetario que se extendía más allá de las órbitas planetarias conocidas. Siguiendo la idea cosmogónica de Kant, Edgeworth notó que debido a la densidad decreciente de la nebulosa y a las menores velocidades de las condensaciones en la region más alla de Neptuno, la tasa de crecimiento de objetos individuales decrece rápidamente a medida que crece la distancia heliocéntrica. Entonces, mientras que en la región planetaria las inestabilidades gravitatorias permitieron la formación de los planetas gigantes, en la zona transneptuniana las densidades eran tan bajas que no permitían la formación planetaria. En las partes externas las partículas no se mueven más en sendas regulares y el movimiento se hace turbulento, apareciendo en el fluido

de materia particular un gran número de remolinos independientes que se contraerían en cometas. Estas cometas estarían distribuidos en una región entre 70 y 200 a 300 UA. Para una masa total de un tercio de la masa terrestre estimó que alrededor de 200 millones de cometas de masas promedio de 2×10^{-9} masas terrestres se formaron de esta manera, y si la masa total fue de 0.1 masa terrestre el resultado sería de 2000 millones de cometas de masas promedio de 5×10^{-11} masas terrestres. Luego en dos publicaciones Edgeworth conjeturó la idea que este reservorio más allá de Neptuno era la fuente de los cometas observados (Edgeworth 1943, 1949).

Además concluye que Neptuno representa el caso límite para la formación de un planeta simple en el sistema solar exterior. Aunque hay una masa considerable en la región transneptuniana, sería imposible formar un planeta simple grande ahí. El estatus de Plutón parece alternar entre un planeta y un satélite escapado de Neptuno. Sobre Plutón él escribió:

Pluto, the latest addition to our list of members of the solar system, is too small to be classed as a major planet, in spite of its position; it has been suggested that it is an escaped satellite of Neptunes and we shall find in due course that there are good reasons for placing it in that category (Edgeworth, 1938). Luego en su libro de 1961, lo rankea a veces entre los planetas.

En el paper del 49 Edgeworth analiza y relee las ideas y teorías existentes sobre la formación y evolución del sistema solar. Estudia el tema de la nebulosa solar, cómo era el material. Toma la idea de Laplace de que el material que ahora formó los planetas y los satélites existió en forma de un fluido inmenso. Y el único mecanismo capaz de crear la regularidad es la fricción fluida. El término fluido incluye una nube de pequeñas partículas sólidas tanto como gaseosas. La teoría nebular, asociada con el nombre de postulados de Laplace, dice que el Sol y los planetas se condensaron a partir de la misma nube de gas rotante. Analiza el tema del momento angular. Además, dice que parece no razonable que el disco rotante original tenga un corte abrupto más allá de la órbita de Neptuno y que debe haber un decrecimiento paulatino. No hay evidencia de la opacidad del material, excepto que fue insuficiente para formar planetas. Es razonable suponer que esta región esté ahora ocupada por un número grande de pequeños cúmulos, es decir un vasto reservorio de potenciales cometas. Cuando uno de estos cúmulos es desplazado de su lugar entra en las regiones interiores del sistema solar y se hace un cometa visible.

Independientemente el astrónomo Germano-Americano Gerard P. Kuiper (1905-1973), argumentó que planetesimales de hielo que se formaron más allá de Neptuno no podrían crecer hasta ser cuerpos masivos debido a las grandes escalas de tiempo colisional a esas distancias. Consecuentemente, los planetesimales transneptunianos habrían permanecido sin acretarse en un anillo entre 38 y 50 UA (Kuiper, 1951). Luego Plutón que recorre la zona entre 30 y 50 UA, comienza el scattering de los cometas por el Sistema Solar. Hace que las órbitas inicialmente circulares se hagan elípticas y entonces luego las perturbaciones más fuertes por Neptuno y los otros planetas gigantes los dispersen aún más. Una cierta fracción de los cometas es dispersada hacia la región de valores muy pequeños de a^{-1} hacia las regiones externas de la “esfera de acción del Sol” (ahora conocida como Nube de Oort). Luego, las perturbaciones estelares redistribuyen los elementos orbitales ahí haciendo el movimiento alrededor del Sol con orientaciones al azar. Esto difiere de la idea de Oort solo en la región de origen de los cometas. Oort supone que se formaron en la región del Cinturón de Asteroides. Además dice que la composición de los cometas indica que son condensaciones a muy baja temperatura, alrededor de 10° K, consistente con la región de origen propuesta (TNR). En el review de Davies et al (2008), dicen que El trabajo de Kuiper, resuena a la idea de Whipple (Whipple, 1950 a y b) sobre los núcleos cometarios como conglomerados de hielo, aunque fue desarrollado aparentemente en forma independiente.

Whipple (1964), trató de estimar la masa del cinturón transneptuniano suponiendo que este era la causa de las aparentes irregularidades de Neptuno, y encontró que un anillo de material de 10 a 20 M_T a una distancia de 40 a 50 UA era una solución posible. Calculó que aun con una masa de 100 M_T , el brillo superficial de este disco sería indetectable con respecto a la luz zodiacal. También remarcó que con una magnitud aparente de 22, un cuerpo individual, de 100 km, sería indetectable con el instrumental de la época.

Más tarde Standish (1993) demostró que tales irregularidades no eran reales, por lo que los resultados de Whipple eran espurios. Se trató de determinar la masa por otros caminos, como por ej. analizando el movimiento del Halley cuyo afelio yace cerca de Neptuno. Pero, los cálculos caban un cinturón de unas 0.5 M_T a 40 UA o de 1.3 M_T a 50 UA.

Luego tratando de medir la radiación IR producida por una distribución de cometas y luego producida por el polvo producido por las colisiones de los cometas en el cinturón. Pero no se pudo medir, la radiación térmica

del polvo transneptuniano queda por debajo del nivel de ruido de la luz zodiacal. Incluso el IRAS (Infrared Astronomical Satellite) no pudo detectar el disco transneptuniano, pero sí detectó discos de polvo circumstelares en algunas estrellas cercanas. Como tales discos son inestables en escalas de tiempo comparadas con las edades de las estrellas centrales, Weissman (1984) propuso que deben estar mantenidos por las colisiones de cuerpos del tamaño de cometas.

La idea de Edgeworth y Kuiper permaneció sin explorar y se consideraba que los JFC eran capturados por Júpiter de la Nube de Oort. Hasta que en 1980, Fernández da la primera explicación sobre la región transneptuniana como fuente de los JFC. A continuación se resume el trabajo de Fernández, 1980.

1.1.1 Paper, Fernández (1980): On the existence of a comet belt beyond Neptune.

Este trabajo surgió para explicar el origen de los cometas de corto período o JFCs. Durante mucho tiempo (100 años o más) el origen de los JFCs fue considerado y estudiado teóricamente sobre la base de la captura de cometas a partir de un flujo casi parabólico (Everhard, 1972, Joss, 1973, etc).

En 1980, Fernández analiza el hecho de que el origen de los JFC como un proceso de captura por Júpiter y los otros planetas gigantes de una población de cometas casi parabólicos en la Nube de Oort, implicaría la pérdida de 300 cometas casi parabólicos por cada uno capturado en órbita de JFC. Entonces el número total de cometas eyectados durante la edad del sistema Solar sería 1.35×10^{12} , alrededor de 1 orden de magnitud más grande que los cometas de la Nube de Oort estimado por Oort (1950). Este cálculo llevó a Fernández a proponer al cinturón transneptuniano entre ~ 35 y 50 UA (sugerido por Edgeworth y Kuiper) como una fuente alternativa más eficiente de JFC.

Formación de cometesimales en la Nebulosa Solar temprana más allá de Neptuno

La distribución de material en la nebulosa solar temprana puede obtenerse suponiendo que la materia sólida que contenía está actualmente en los planetas. Entonces dispersando el material sólido de los planetas en un disco ecuatorial, se puede obtener la densidad superficial a la distancia de cada planeta. Seguramente los valores reales sean mayores, debido a la eyección

de material durante la formación planetaria. Los valores de la densidad superficial de la nebulosa solar se ajustan bien por la relación:

$$\sigma = \sigma_0/r^2 \quad (1)$$

donde $\sigma_0 = 4M_{\oplus}$ y r es la distancia al Sol.

Se puede suponer que esta ecuación es válida hasta distancias entre 35 y 50 UA. Entonces la masa sólida primordial de esta región será:

$$M_{TNR} = \int_{r_1}^{r_2} \sigma_0/r^2 \times 2\pi r dr = 2\pi\sigma_0 \ln(r_2/r_1) \quad (2)$$

Entonces si $r_1 = 35$ UA y $r_2 = 50$ UA se obtiene: $M_{TNR} \sim 9M_{\oplus}$.

La cuestión es si de esta materia se pueden formar conglomerados sólidos del tamaño de cometas (cometesimales). Según los pasos de formación planetaria propuestos por Goldreich y Ward (1973) y las condiciones anteriores de la nebulosa solar, el tamaño límite mayor para un conglomerado de masa está definido por la marea solar. Entonces la masa mayor de un conglomerado será: $m \simeq \sigma R_T^2$, donde $R_T \simeq r(m/M_{Sol})^{1/3}$ es el radio de marea (ver Murray pg. 159). Así,

$$m \simeq \sigma r^2 (m/M_{Sol})^{2/3} = \sigma_0^3 / M_{Sol}^2 = 3 \times 10^{18} gr \quad (3)$$

Este resultado es del mismo orden que los cometas más grandes. Además es solo un valor inicial, ya que los cometesimales estuvieron sujetos a procesos de acreción - fragmentación permitiendo la formación de planetesimales más grandes.

Evolución dinámica del cinturón de cometas: el modelo

La cuestión es como los cometas del cinturón evolucionan para alcanzar órbitas como los SPC. Kuiper (1951) dice que Plutón dispersa primero las órbitas hasta que entran bajo influencia de Neptuno que los dispersa más. Sin embargo, Plutón tiene muy poca masa y por otro lado tiene una inclinación algo grande y su $w = 90$ o sea que cuando está en el afelio está lejos de la eclíptica.

Entonces queda considerar las interacciones gravitatorias entre los cometas como causa posible de la evolución. Se simularon un gran número de encuentros cercanos entre cometas por medio del Método Monte Carlo.

- Los perihelios y afelios de los cometas interactuantes se tomaron al azar, dentro de un anillo de distancias al Sol r_1 y r_2 .
- Se encuentran en la intersección de las órbitas.
- Se asignó una inclinación de cada par al azar entre 0 y 10 grados.
- Se adoptó una distribución diferencial de masa con una ley de potencia correspondientes a asteroides dada por:

$$n(m)dm = Am^{-\alpha}dm, \quad (4)$$

donde A es cte y $1.5 < \alpha < 2$ (Harris, 1978).

En la simulación se tiene en cuenta la dependencia del número de encuentros cercanos por unidad de tiempo n_c con las masas m_i y m_j de los cometas interactuantes:

$$n_c(m_i, m_j)dm_idm_j = U/V \times n(m_i)n(m_j)S_E(m_i, m_j)dm_idm_j, \quad (5)$$

donde:

U es la velocidad del encuentro

V es el volumen del cinturón que se ha aproximado por un toro centrado en el Sol de radios r_1 y r_2 : $V = \pi^2/4(r_2 - r_1)^2(r_2 + r_1)$.

$S_E(m_i, m_j) = \pi R_E^2$ es la sección de cruce de los encuentros cercanos entre las masas m_i y m_j .

$R_E = KR_c$, donde R_c es el radio de colisión agrandado por enfocamiento gravitatorio dado por:

$$R_c = \eta(m_i^{1/3} + m_j^{1/3})\left(1 + \frac{2G}{U^2\eta^2} \frac{m_i + m_j}{m_i^{1/3} + m_j^{1/3}}\right)^{1/2}, \quad (6)$$

donde $\eta = (4/3\pi\rho)^{-1/3}$ y ρ es la densidad del nucleo cometario que se

adopta igual a $1\text{gr}/\text{cm}^{-3}$.

Entonces el número total de encuentros cercanos por unidad de tiempo se obtiene integrando la ecuación 5:

$$n_{tot} = \frac{U}{V} \int_{M_{min}}^{M_{max}} n(m_i) dm_i \int_{M_{min}}^{m_i} n(m_j) S_E(m_i, m_j) dm_j \quad (7)$$

donde M_{max} y M_{min} son las masas máxima y mínima dentro de la distribución de masa del cinturón.

Finalmente, la probabilidad $p_c(m_i, m_j) dm_i dm_j$ de que los cometas participantes en un encuentro cercano tengan masas en el rango: $(m_i, m_i + dm_i)$ y $(m_j, m_j + dm_j)$ estará dada por:

$$p_c(m_i, m_j) dm_i dm_j = \frac{n_c(m_i, m_j)}{n_{tot}} dm_i dm_j \quad (8)$$

Entonces, dado un par de órbitas, se calcula la velocidad del encuentro:

$U = V_j - V_i$, donde V_i y V_j son las velocidades orbitales en el punto de encuentro. Luego se les asigna a los cometas masas al azar m_i y m_j según la ley de probabilidad dada por (8).

Si V_G es la velocidad del centro de masa de m_i y m_j en un sistema heliocéntrico, las velocidades orbitales después del encuentro estarán dadas por: $V_G + u_i$ y $V_G + u_j$, donde u_i y u_j son las velocidades relativas al centro de masa. Debido al encuentro cercano, las velocidades respecto al CM no modifican su magnitud pero sí se deflecan según un ángulo dado por (Woolfson, 1978)

$$\tan(\gamma/2) = \frac{G(m_i + m_j)}{DU^2} \quad (9)$$

donde D es el parámetro de encuentro, es la mínima distancia del cometa respecto de la trayectoria no perturbada del otro. Se tomó D al azar para cada encuentro, pero tal que $D < R_E$ y según la función de distribución de probabilidad: $p(D)dD = DdD/R_E^2$. Cuando $D < R_E$ ocurre una colisión y el resultado se elimina del cálculo.

Las velocidades heliocéntricas después del encuentro se calcularon como $V'_i = V_G + u'_i$ y $V'_j = V_G + u'_j$, donde u'_i y u'_j son las velocidades relativas deflectadas. Entonces los nuevos elementos orbitales se calculan de V'_i y V'_j .

Se adoptaron $r_1 = 35$ UA y $r_2 = 50$ UA, una masa total del cinturón de $1 M_\oplus$, $M_{min} = 10^{15}$ gr y M_{max} entre $10^{21} - 10^{26}$ gr. Se usó α entre 1.5 y 1.9 y $K = 20y50$.

Resultados

La fig.1 muestra el número de órbitas cometarias cuyo perihelio o afelio está fuera de los límites del cinturón, debido a los encuentros. Se consideró un periodo de 400 años, calculando el número total de encuentros por la ec. (7) tomando para U el valor medio según el conjunto de encuentros ($\langle U \rangle \simeq 5 \times 10^4 \text{ cms}^{-1}$).

Como puede verse la difusión orbital para $M_{max} = 10^{26}$ gr es notable. El nro de cometas cuyo perihelio cruza el límite inferior de 35 UA es 713, lo que da una taza de difusión interna de ~ 1.8 cometas por año. Para masas maximas menores se obtienen valores menores: 0.8, 0.6 y 0.2 para $M_{max} = 10^{25}, 10^{24}$ y 10^{23} gr. Para el afelio se obtienen valores algo mayores.

Si suponemos que entre 30 y 35 UA hay una región de transición en estado estacionario, o sea para cada cometa que entra ahí otro es removido debido a las perturbaciones de Neptuno, el nro de cometas que sale del cinturón y cae bajo el control gravitatorio de Neptuno será del mismo orden que las tasas de difusión anteriores. Todos estos resultados corresponden a $K = 50$, para 20 se obtiene resultados cualitativamente similares y cuantitativamente menores en un factor 4 (debido a que quedan fuera del cálculo encuentros más distantes).

Para cometas de masa menor que 10^{20} gr, se calcularon los cambios en perihelio ($\Delta q_i = q_i(\text{final}) - q_i(\text{inicial})$) y afelio luego de cada encuentro cercano. Luego se calcularon los valores medios de los cambios ($\overline{\Delta q}$, $\overline{\Delta Q}$) y las desviaciones standard medias ($\sigma_{\Delta q}$, $\sigma_{\Delta Q}$), para diferentes valores de M_{max} .

Luego se estimó el cambio medio y desviación standard en perihelio y afelio de un cometa con masa menor que 10^{20} gr. durante la edad del sistema

siolar, T mediante $\overline{\Delta q_T} = N_T \overline{\Delta q}$, $\sigma_{\Delta q_T}^2 = N_T \sigma_{\Delta q}^2$ (idem para afelio).

N_T es el número medio de encuentros cercanos de un cometa de masa m durante la edad del sistema solar dado por:

$$N_T(m) = \frac{UT}{V} \int_{M_{min}}^{M_{max}} n(M) S_E(M, m) dM \quad (10)$$

Como el número de encuentros cercanos depende de m , se tomó un promedio de N_T en el rango $10^{15} < m < 10^{20}$ gr. En la fig. 2 se muestran los cambios medios y desviaciones standard como función de M_{max} .

Para $M_{max} = 10^{26}$ se observan valores grandes de los cambio en valores medio y desviaciones, lo que implica una gran dispersión orbital como en la fig. 1. Para $M_{max} = 10^{25}$ la difusión orbital es todavía remarcable. Entonces suponiendo una distribución gaussiana de Δq_T , la fracción de cometas que alcanza $\Delta q_T < -5$ UA luego de 4.5×10^9 años es 0.13 del total. Para masas menores la fracción decrece mucho: 2.5×10^{-3} y 2.5×10^{-6} para $M_{max} = 10^{24}$ y 10^{23} gr. respectivamente.

En la Fig.3 se muestra el número medio de órbitas cometarias N_q que alcanzan perihelios $q < 35$ UA por año como función del exponente α y para cada M_{max} . N_q es fuertemente dependiente de α . Para valores pequeños de α casi toda la masa está concentrada en los miembros grandes, hay pocos pequeños y por tanto N_q es también pequeño. Cuanto mayor es el α , mayor el nro de masas pequeñas y entonces N_q crece.

En las fig 1 y 2 se adoptó un valor medio de $\alpha = 1.75$. Pero podría ser más grande si la población estuviera sujeta sólo a procesos de fragmentación por colisiones (11/6 de Dohnanyi, 1969). Entonces las tasas de difusión calculadas serían mayores.

Se hicieron también simulaciones con mayores inclinaciones con resultados similares.

EN RESUMEN: en un cinturón con las características descritas antes, podemos esperar una tasa de difusión de algunos cometas por año si contiene masas mayores comparables a la luna o de varias decenas si contiene masas comparables con Ceres.

Evolución de los cometas que dejan el cinturón

El proceso dinámico se puede describir como sigue. Una vez que los cometas alcanzan la zona de influencia de Neptuno, puede ser eyectado o inyectado hacia el control del siguiente planeta (Urano). Si las probabilidades

de eyección e inyección hacia el siguiente planeta se dividen en mitad cada una, entonces la probabilidad de un TNO de alcanzar la zona de Neptuno y llegar a ser SP comet es de $(1/2)^4 = 1/16$. Si la tasa de SPC nuevos es de 0.05 por año, entonces la fracción de cometas que entra por año desde el cinturón es de $0.05 \times 16 = 0.8$, suponiendo que es la única fuente de cometas. Esto representa una gran economía de masa, comparado con los 300 cometas por año requeridos en la teoría de captura de la nube de Oort. La nube de Oort recibe nuevos miembros de cometas por perturbaciones de Urano y Neptuno.

Conclusión

- La región de la nebulosa solar entre 35 y 50 UA pudo haber tenido inicialmente una masa sólida inicial de alrededor de $10 M_{\oplus}$.
- Allí se formaron cometesimales de alrededor de 10^{18} gr. por inestabilidad gravitacional.
- La evolución subsecuente de estos cometesimales fue a través de procesos de acreción - fragmentación lo cual determinó una distribución de masa como ley de potencia.
- Si las masas máximas son del orden de la masa de Ceres, la difusión orbital se da lo suficientemente rápido como para proveer la cantidad necesaria de SPC.
- Los cometas cruzarían la región planetaria desde el cinturón hasta la zona interior a Júpiter a través de las perturbaciones planetarias.
- Especulando, es posible suponer que el cinturón experimentó una fuerte reducción desde el principio hasta la actualidad.

Luego de este trabajo pionero, Fernández comenzó una serie de trabajos con W.H. Ip sobre la evolución orbital de planetesimales en la zona de acreción planetaria exterior.

Exploraron la inyección de tales planetesimales de hielo en la nube de Oort y su subsecuente retorno al sistema solar interior como cometas casi parabólicos.

Un resultado de sus modelos numéricos fue la migración hacia afuera de Saturno, Urano y Neptuno, acompañado de la migración hacia adentro de

Júpiter durante la acreción de Urano y Neptuno (Fernandez e Ip, 1984). Este proceso se da por el intercambio de energía orbital y momento angular de los planetesimales dispersados con los planetas.

Figure 1:

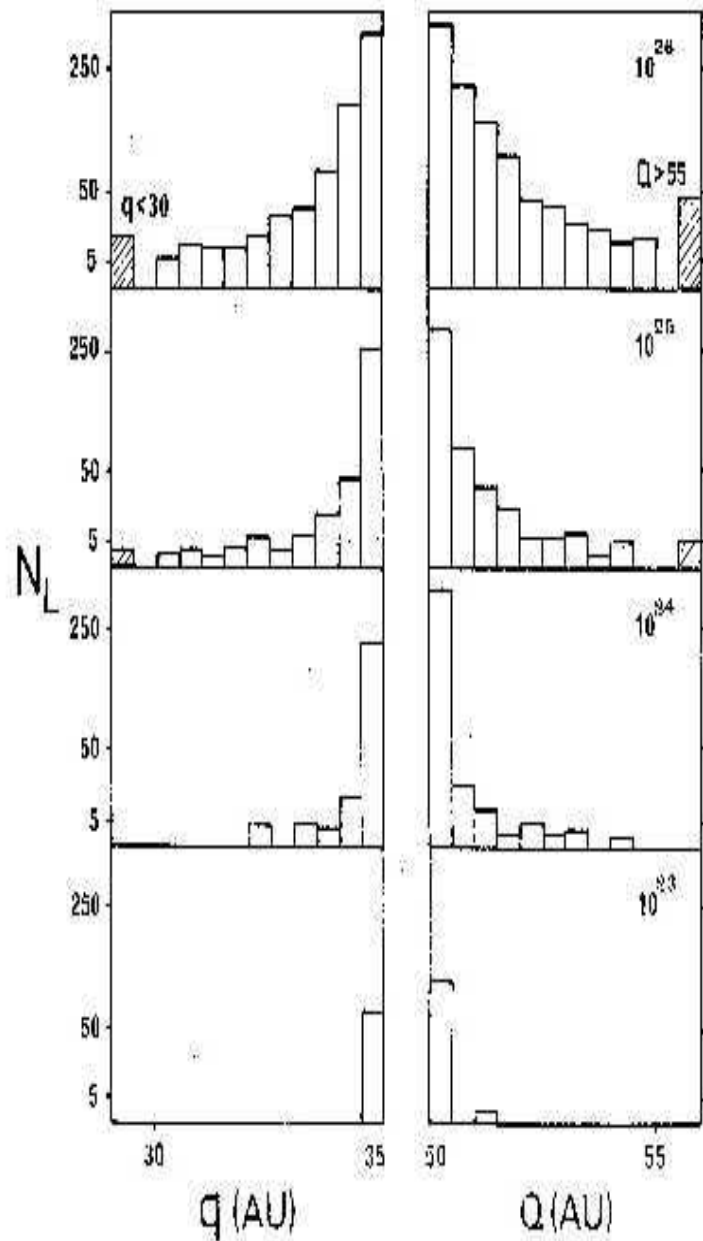


Figure 1. Histograms showing the number of comets N_L whose perihelia or aphelia lie outside the limits assigned to the hell (35–50 AU) because of close encounters. The comets have been grouped into intervals of 0.5 AU. The time period considered is 400 yr. The four cases correspond to values of maximum masses M_{\max} (g) appearing at the upper right of each picture. The other parameters have values $K = 50$ and $\alpha = 1.75$.

Figure 2:

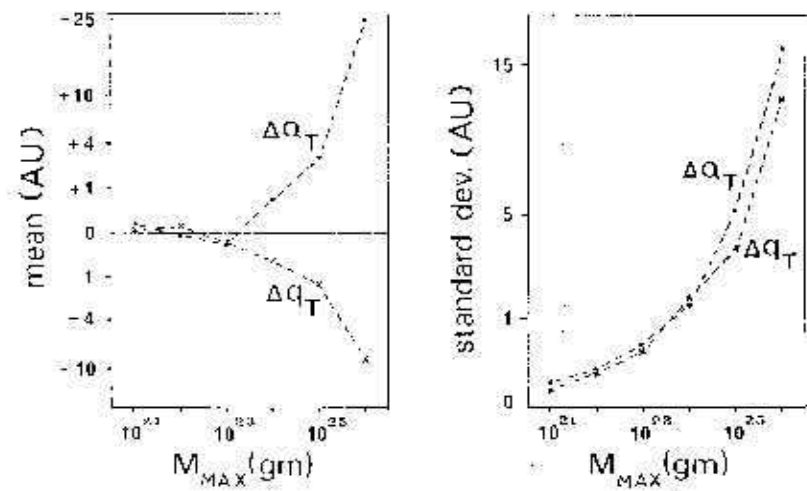


Figure 2. Mean and standard deviation of the perihelion and aphelion changes Δq_T and ΔQ_T of a belt comet, due to close encounters through all the solar system life, as a function of the maximum mass M_{MAX} .

Figure 3:

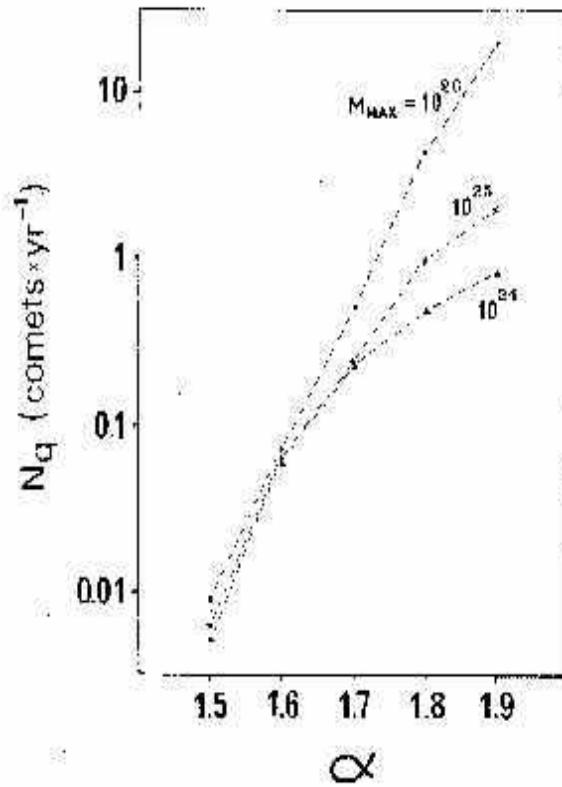


Figure 3. Mean number of comets per year N_q whose orbits attain perihelia $q < 35$ AU as a function of the exponent α of the mass distribution.