

# TEMA 8: Cuerpos menores del sistema solar

- \* Meteoroides, meteoros y meteoritos.
- \* Clasificación de meteoritos.
- \* Asteroides: Propiedades dinámicas.
- \* Taxonomía.
- \* Fotometría, espectroscopía y polarimetría.
- \* Curvas de luz. Rotación.
- \* Cometas: Aspectos generales. propiedades dinámicas
- \* La nube de Oort.
- \* Fotometría y espectroscopía. Composición química.
- \* Mecanismos de *Outbursts* y *splittings*.
- \* Cometas de la familia de Júpiter.
- \* Objetos en transición cometa-asteroide.
- \* El cinturón trans-neptuniano: Transferencia de objetos a la región planetaria. Centauros.

# Meteoroides, meteoros y meteoritos



La luz zodiacal vista desde Paranal,  
Chile

El medio interplanetario está lleno de partículas de polvo y guijarros denominados *meteoroides*. El polvo está concentrado hacia el plano de la eclíptica. Este se puede observar como una extensión del brillo solar en la puesta del Sol o antes de la salida. Ese brillo se denomina *luz zodiacal* y es debido a la difusión de la luz solar por las partículas de polvo.

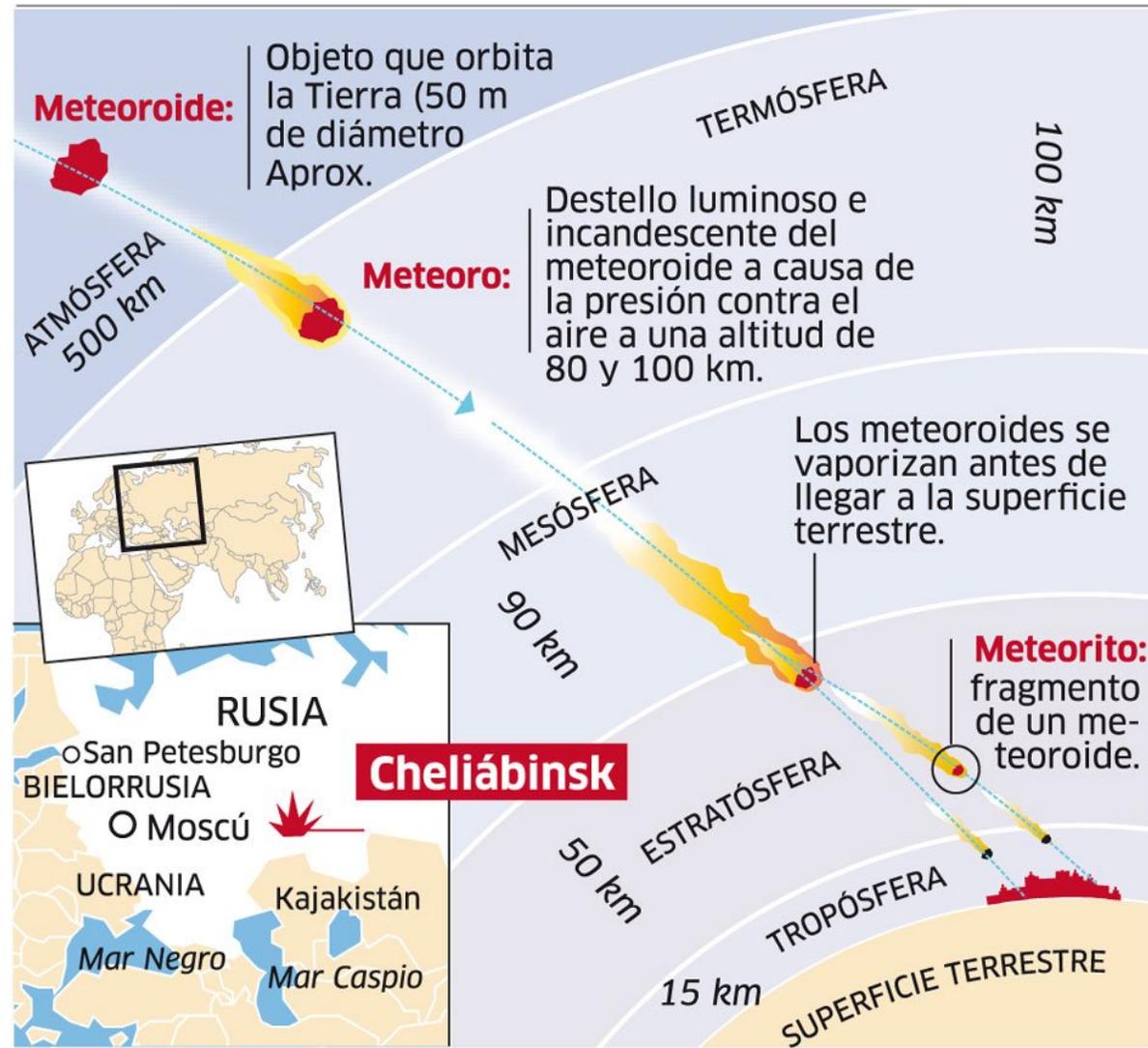
## El gegenschein



El gegenschein es luz solar difundida hacia atrás por partículas de polvo acumuladas en el punto lagrangeano  $L_2$  del sistema Sol-Tierra-partícula.

# Entrada en la atmósfera: El fenómeno de ablación

## El bólido de Cheliábinsk



Fuente: elpais.com.

LA REPÚBLICA

## Las “piedras que caen del cielo”



En 1794 el físico alemán Ernst Florens Chladni publicó por primera vez un ensayo científico argumentando que los meteoritos eran rocas provenientes del espacio. La explosión en el aire y la subsiguiente caída de miles de fragmentos ocurrida el 24 de abril de 1803 en L'Aigle, Francia confirmó la naturaleza cósmica de estos objetos. El informe de Jean-Baptiste Biot, apoyado por la Academia de Ciencias de Francia, dió un respaldo definitivo a esta teoría.

# Definiciones

**Meteoroide:** Fragmento pequeño en el espacio interplanetario, más grande que una partícula de polvo que difunde eficientemente la luz, pero lo suficientemente pequeño para no poder ser detectado telescópicamente.

**Meteoro:** Es el meteoroides cuando ingresa en la atmósfera y, por fricción irradia calor y luz.

**Bólido:** Son los meteoros más luminosos que penetran la atmósfera hasta cerca de la superficie finalizando su viaje con una explosión.

**Meteorito:** Son los fragmentos que se recogen en el suelo, si éstos están asociados a un meteoro se denominan **caídas (falls)**, cuando no están asociados a meteoros se denominan **hallazgos (finds)**.

# Meteoros: El caso de Chelyabinsk



El bólido de Chelyabinsk tenía un radio  $\sim 20$  m. Cayó en esa localidad rusa el 15 de febrero de 2013. Se estimó una velocidad de  $19.16 \pm 0.15$  km/s. Entró en la atmósfera en una trayectoria casi rasante que lo llevó a explotar a una altura estimada de 29.7 km

## Recolección de fragmentos del bólido de Chelyabinsk

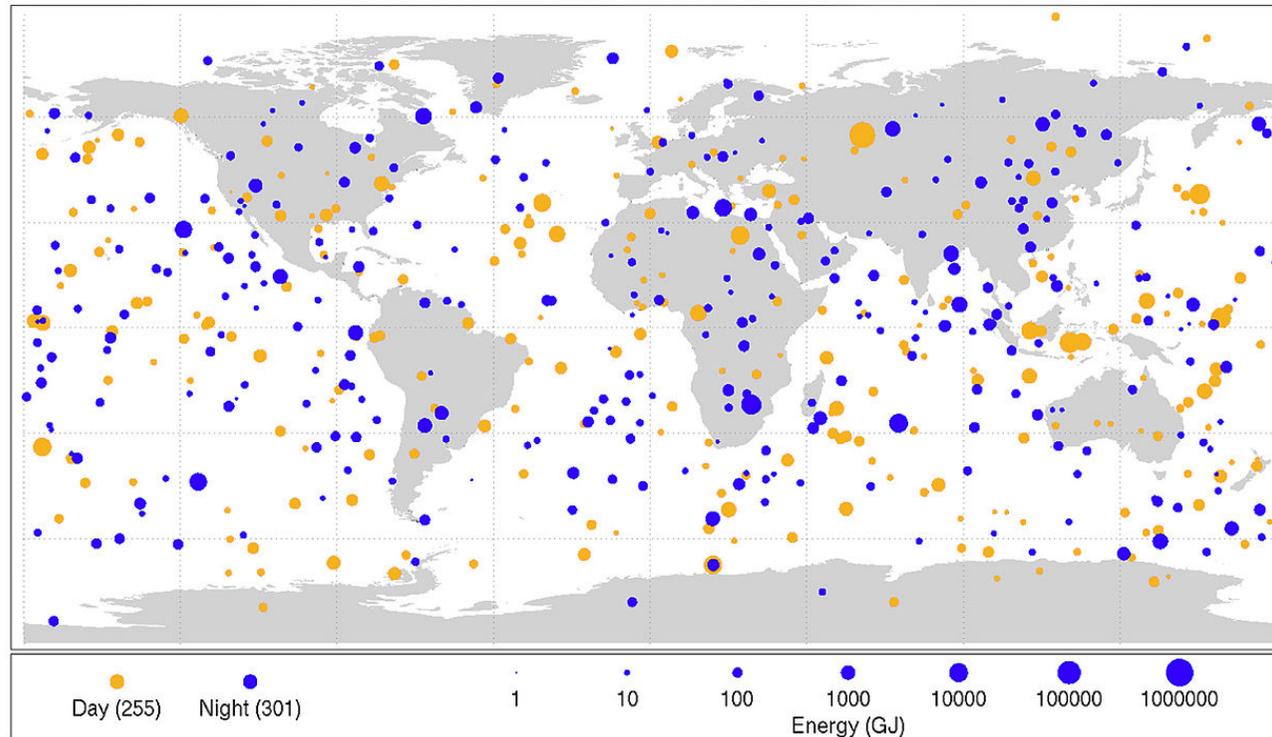


Los meteoritos recogidos corresponden a una condrita ordinaria de tipo LL (bajo contenido en Fe metálico).

# Frecuencia de bólidos

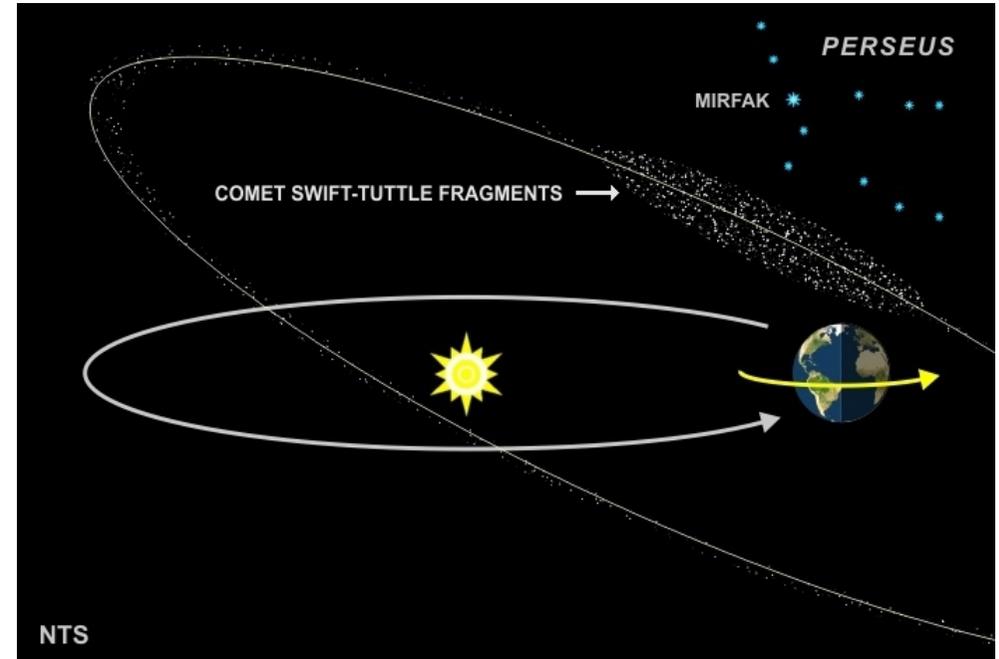
## Bolide events 1994-2013

(Small asteroids that disintegrated in the Earth's atmosphere)



La masa total de materia meteórica que impacta en la atmósfera terrestre es en promedio de aproximadamente  $10^7 - 10^8$  kg/año. La mayoría de este material llega en forma de micrometeoritos de  $\sim 100 \mu\text{m}$ .

# Lluvias meteóricas



Una lluvia meteórica es el resultado de la interacción entre la Tierra y una corriente de meteoroides provenientes de desechos cometarios (y en algunos casos asteroidales). Algunos ejemplos: Perseidas (mitad de agosto), Orionidas (fines de octubre, asociadas a 1P/Halley), Leonidas (mitad de noviembre, asociadas a 55P/Tempel-Tuttle).

## Búsqueda de meteoritos

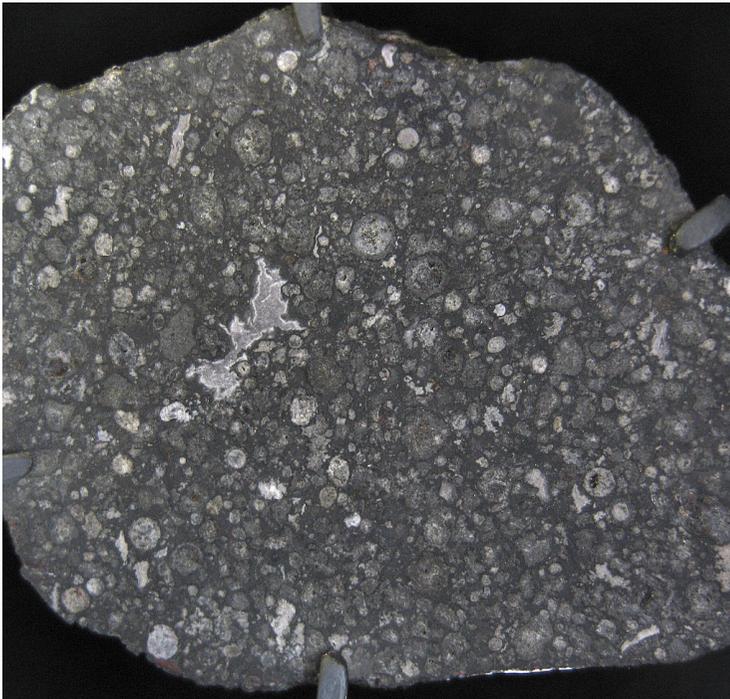


Hay lugares más favorables para encontrar meteoritos, como las zonas desérticas de la península arábiga, como vemos en el ejemplo de la figura, probablemente una condrita de cerca de medio kg.

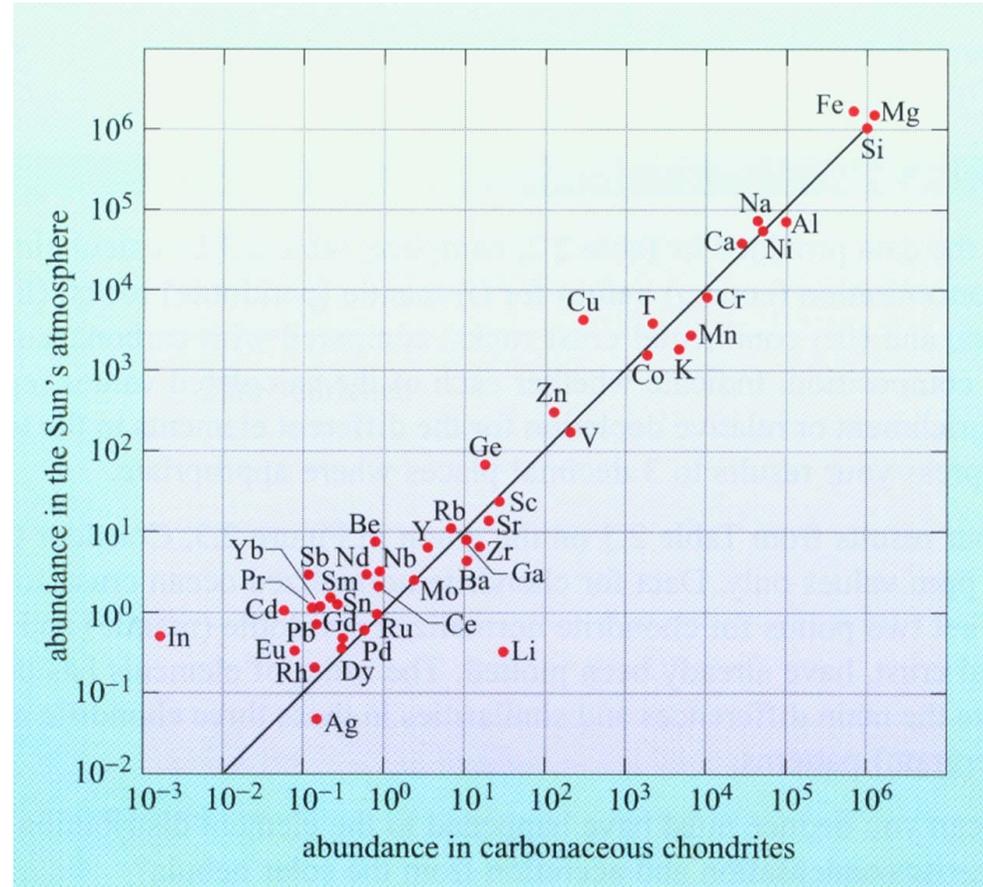
## Clases de meteoritos

Clase	Caídas	Frecuencia de caídas (%)	Hallazgos (fuera de la Antártida)	Hallazgos (Antártida)
Condritas	803	86.1	1700	8497
Condritas carbonosas	33	3.5	28	160
Acondritas	73	7.8	49	391
Meteoritos marcianos	4	0.4	2	6
Meteoritos lunares	0		2	11
Pétreo-metálicos	12	1.3	57	29
Metálicos	45	4.8	681	65

# El material más primitivo es el menos diferenciado en términos de las abundancias relativas de los elementos



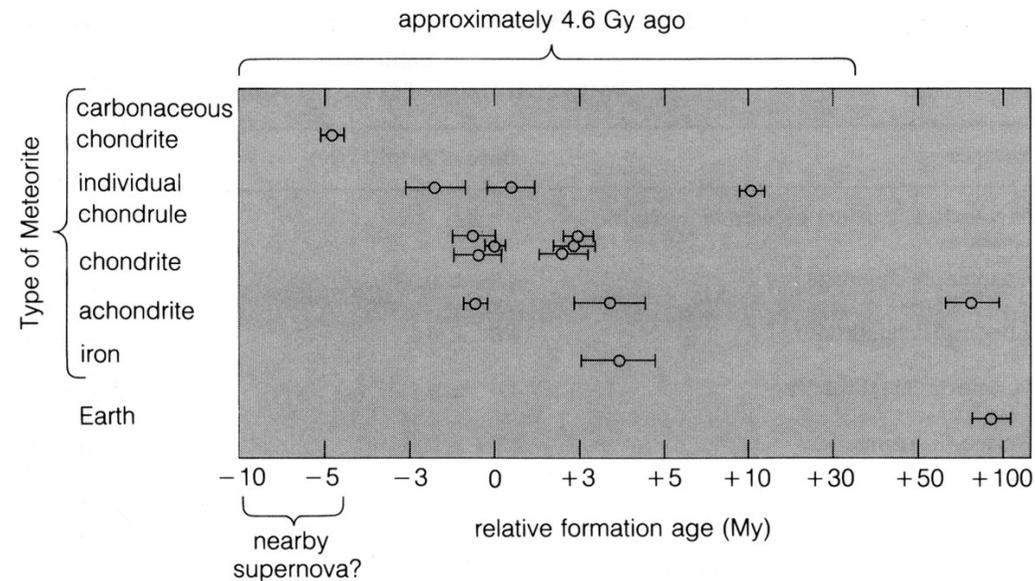
Ejemplo: Meteorito de Allende  
Condrita carbonosa



# Determinación de edades por decaimiento radioactivo

Vidas medias de isótopos seleccionados usados comúnmente en geocronología

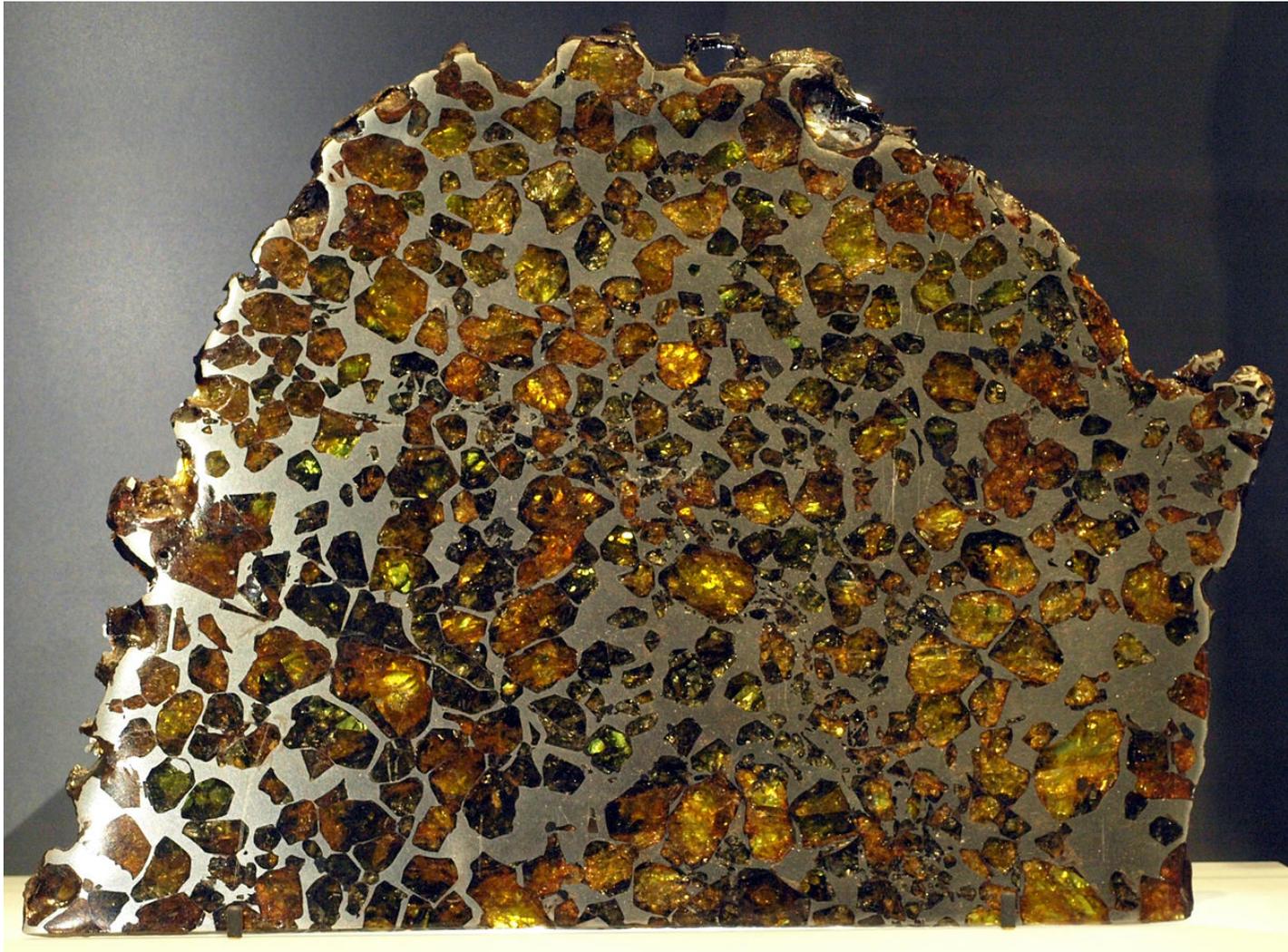
Padre	Stable Hijo(s) estable	Vida media $t_{1/2}$ ( $10^9$ años)
$^{40}\text{K}$	$^{40}\text{Ar}$ , $^{40}\text{Ca}$	1.25
$^{87}\text{Rb}$	$^{87}\text{Sr}$	48.8
$^{232}\text{Th}$	$^{208}\text{Pb}$ , $^4\text{He}$	14
$^{235}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}$ , $^4\text{He}$	0.704
$^{238}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}$ , $^4\text{He}$	4.47



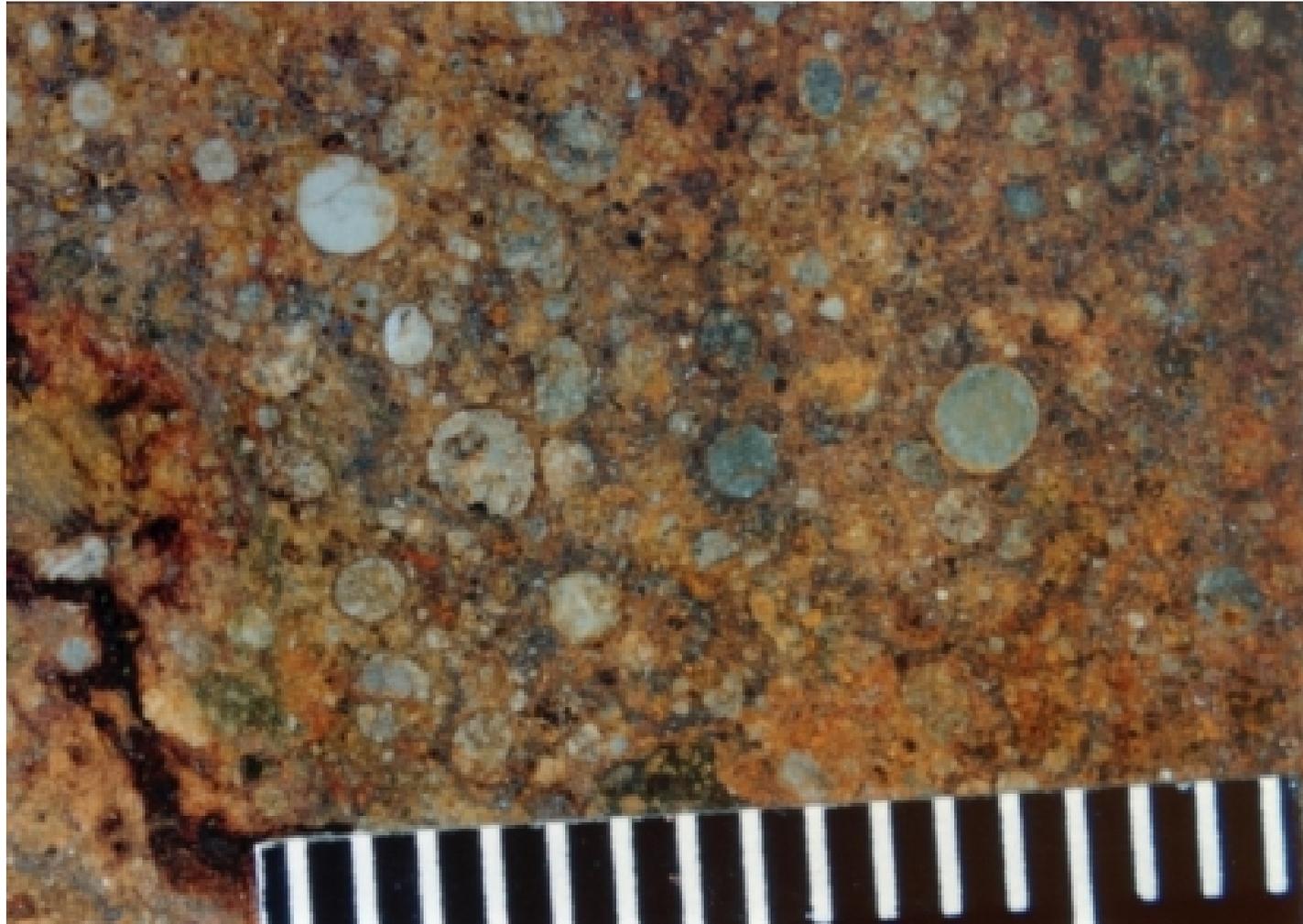
## Algunas muestras de meteoritos



Meteorito metálico.

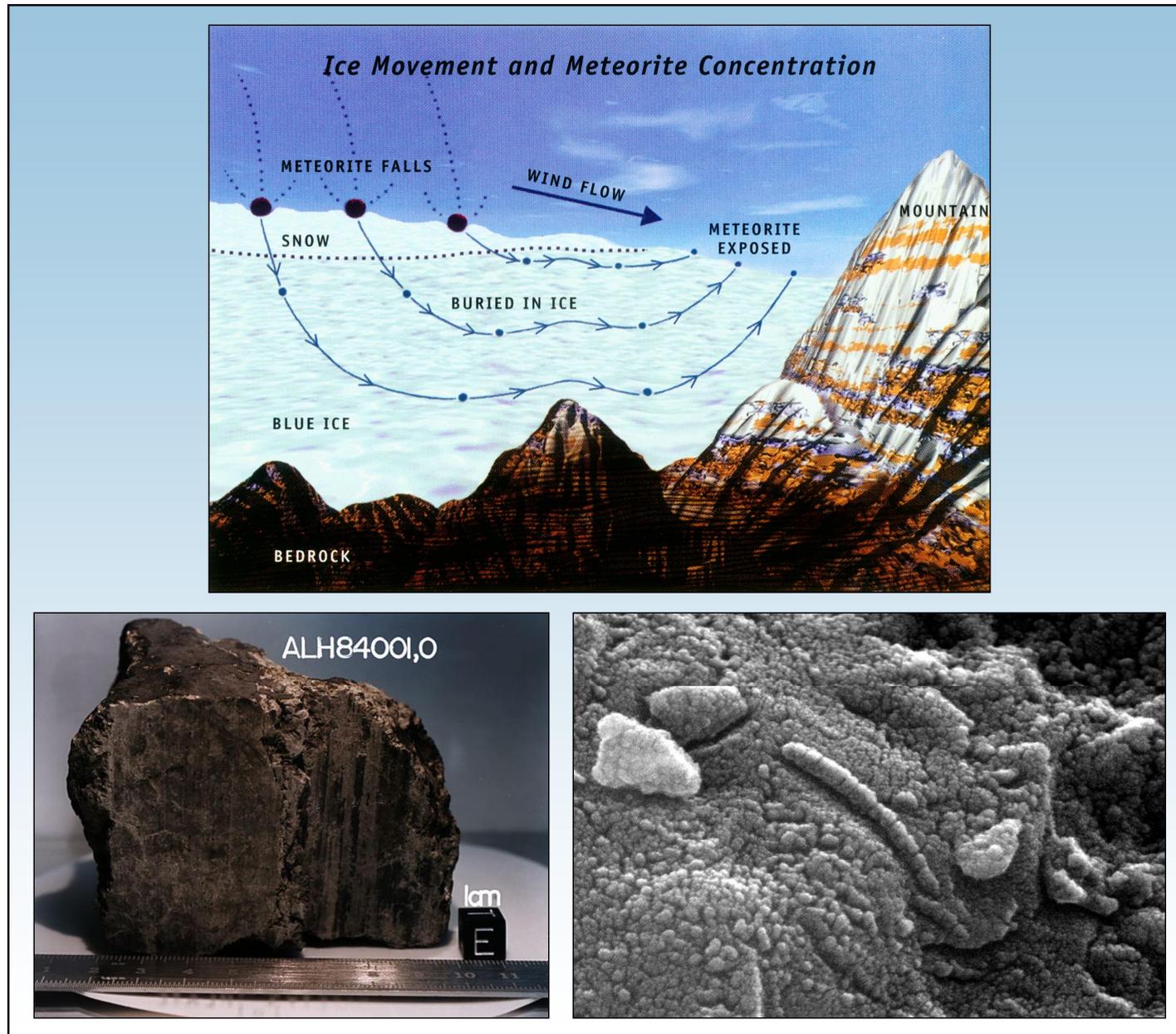


Meteorito pétreo-metálico.

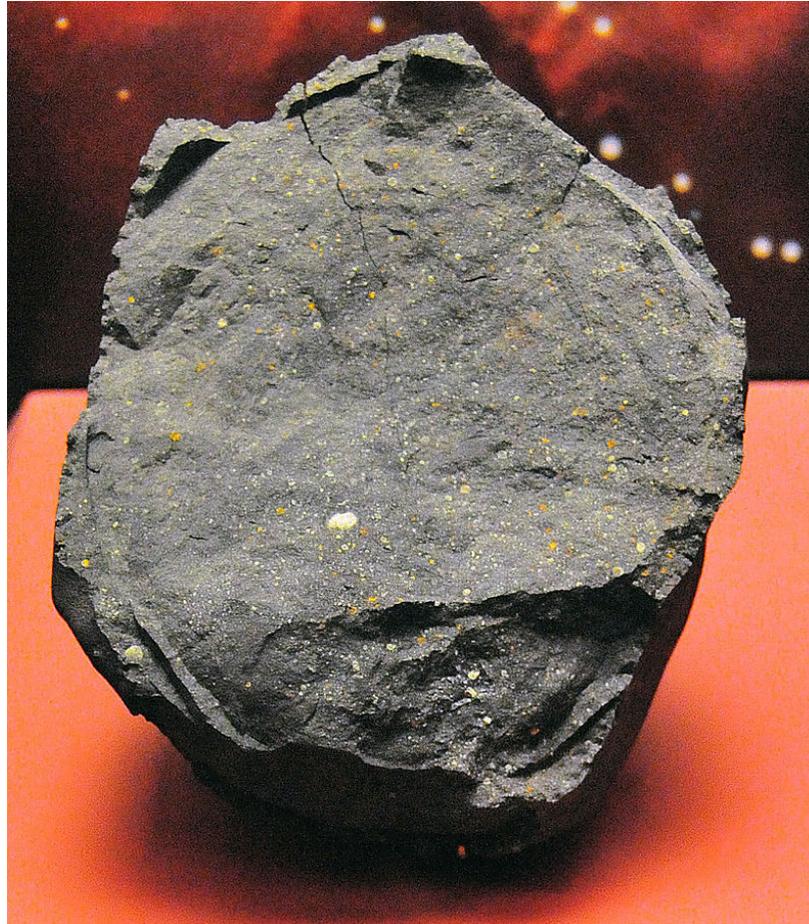


Meteorito condritico con cóndrulos. Los cóndrulos son granos esferoidales que se formaron a partir del rápido enfriamiento y solidificación de pequeñas gotas de mineral fundido en la nebulosa solar primitiva.

# Recolección de meteoritos en la Antártida

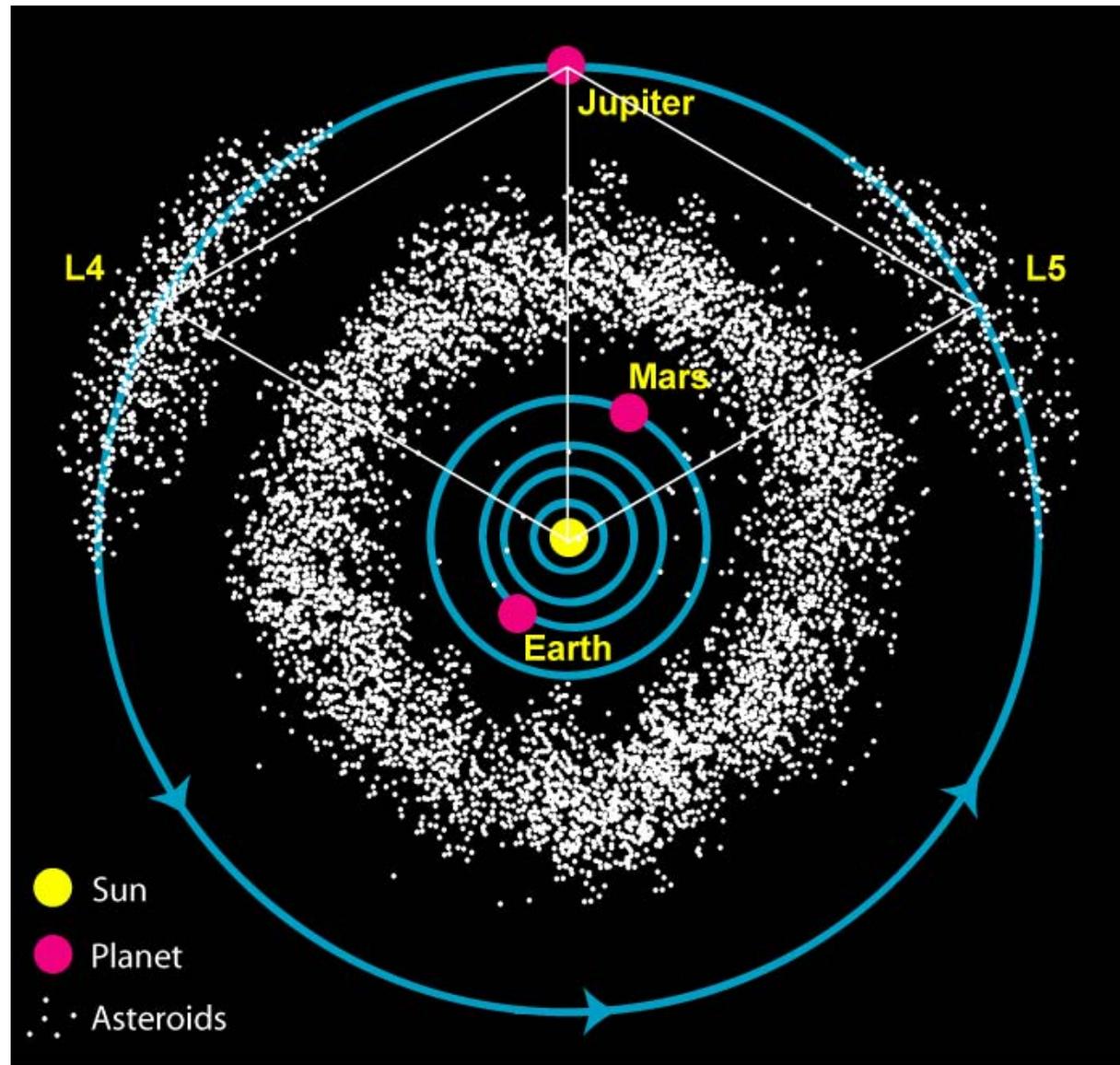


## Materia orgánica en meteoritos



El meteorito es una condrita del grupo CM que quiere decir que ha experimentado alteración acuosa en su cuerpo padre. Contiene inclusiones de calcio y aluminio. Se han identificado más de 15 aminoácidos en el meteorito, que son los bloques fundamentales de la vida.

# Asteroides



## La ley de Titius-Bode y el descubrimiento de Ceres

Fue formulada por primera vez en 1772 y es una ley empírica que describe la secuencia de distancias de los planetas al Sol. Se puede expresar como:

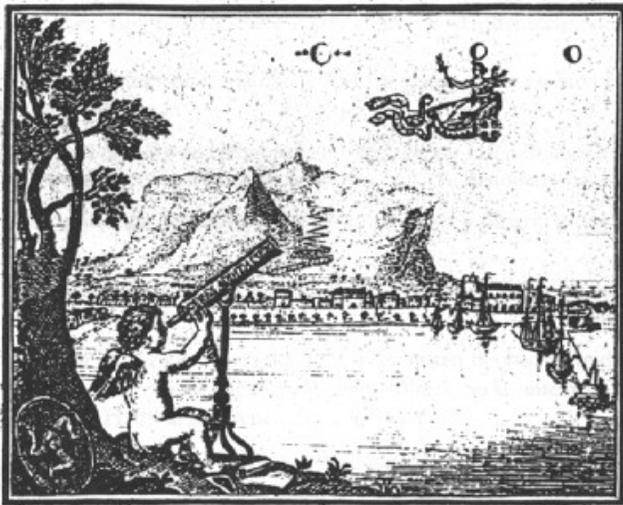
$$a = 0.4 + 0.3 \times 2^m \text{ ua}$$

donde  $m = -\infty, 0, 1, 2, \dots$ , dando las distancias de Mercurio a Urano: 0.4, 0.7, 1.0, 1.6, **2.8**, 5.2, 10., **19.6**

En 1781 William Herschel descubrió Urano llenando uno de los huecos en la ley. Faltaba llenar el otro hueco ...

DELLA SCOPERTA  
DEL NUOVO PIANETA  
CERERE FERDINANDEA

OTTAVO TRA I PRIMARJ DEL NOSTRO SISTEMA  
SOLARE.



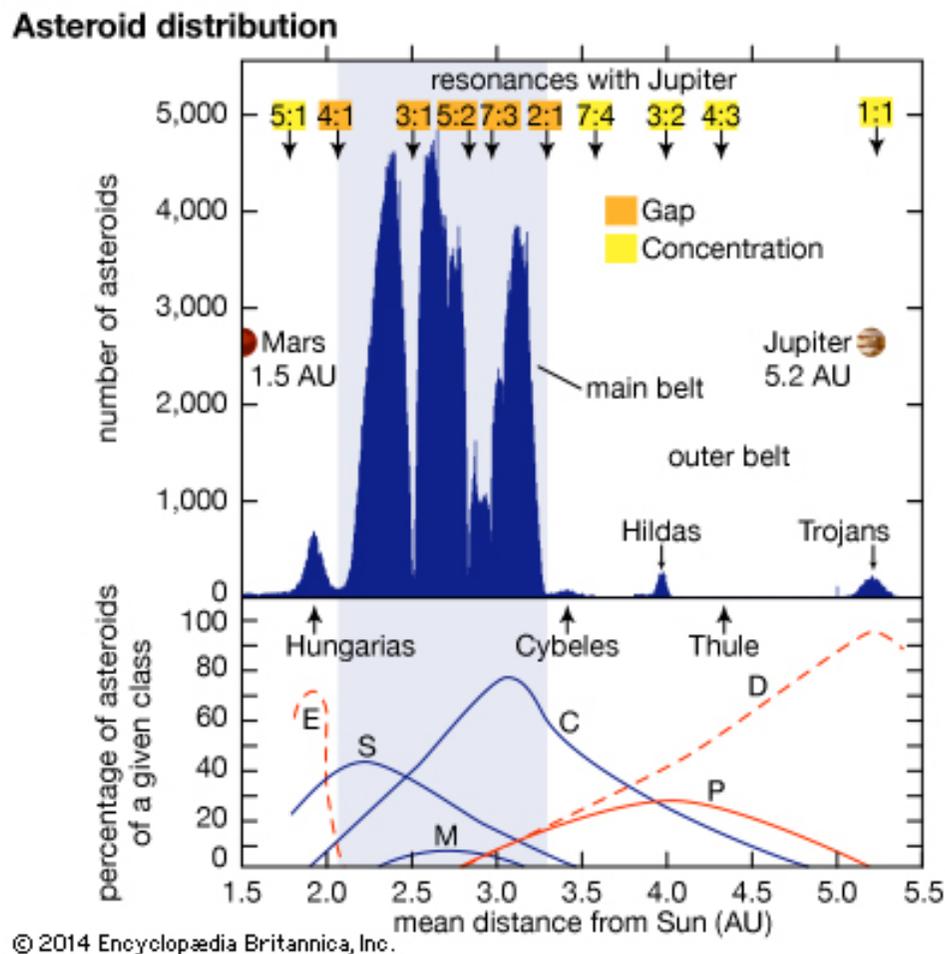
P A L E R M O  
1802

NELLA STAMPERIA REALE.

A fines del siglo XVIII se inició la búsqueda del planeta entre Marte y Júpiter, entre otros por el cura Giuseppe Piazzi del Observatorio de Palermo quien lo descubrió el 1 de enero de 1801. Piazzi sugirió el nombre de *Cerere Ferdinanda* en honor a la diosa romana de la agricultura y al rey Fernando de Sicilia. Sin embargo este segundo nombre no fue aceptado por otras naciones quedando sólo Ceres.

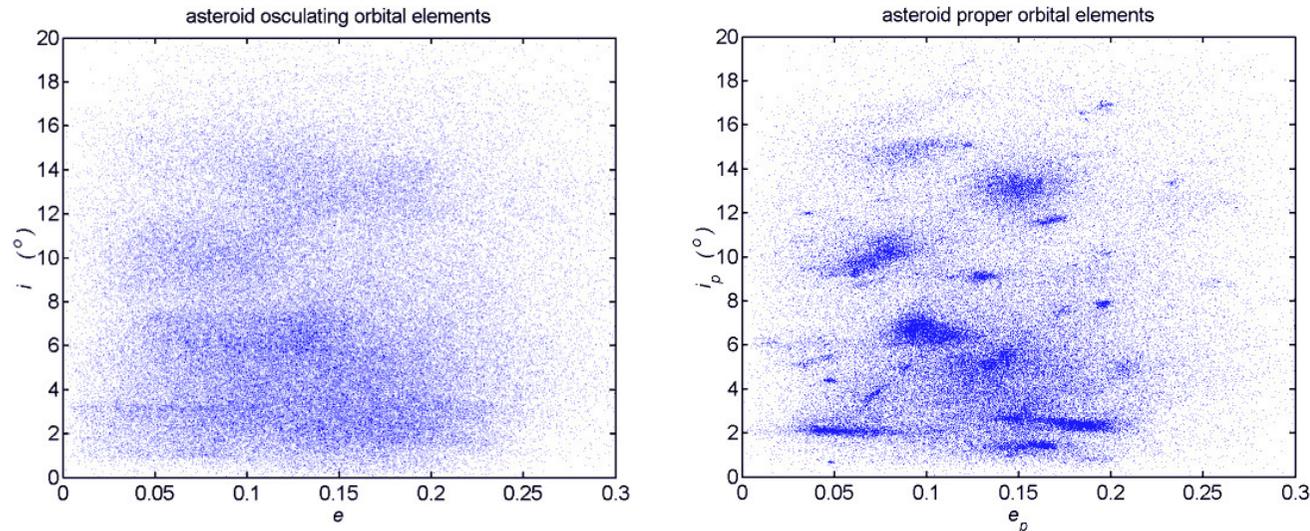
En 1802, con el descubrimiento de 2 Pallas, William Herschel acuñó el nombre *asteroide* que significa de apariencia estelar para definir a estos objetos. La controversia acerca la naturaleza de Ceres se mantuvo por varias décadas. Desde 2006 se clasifica como *planeta enano*.

# Estructura dinámica



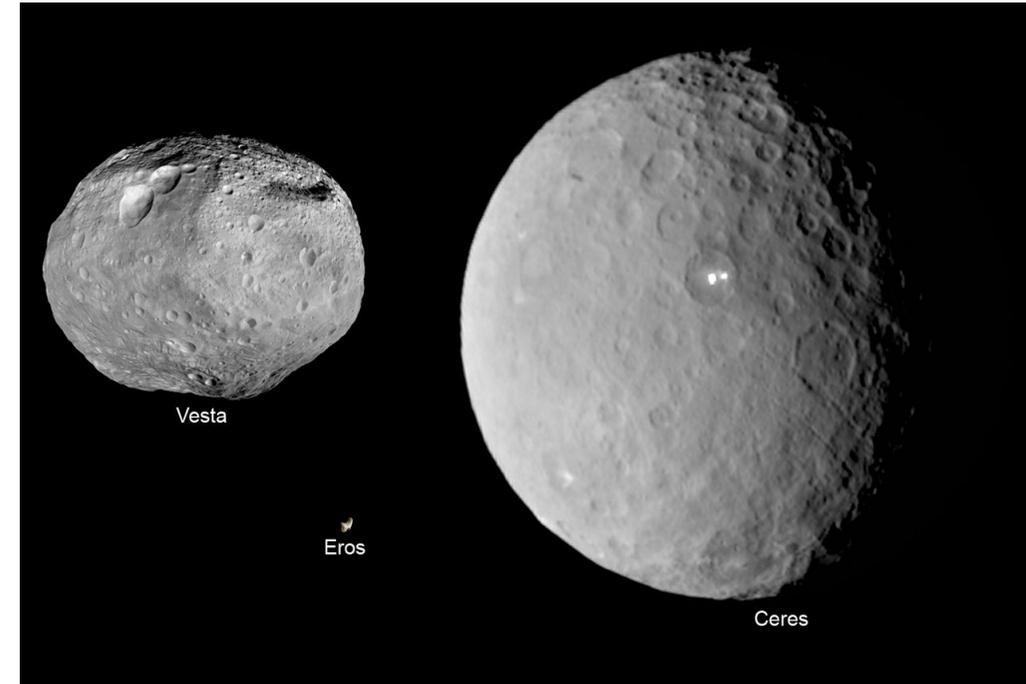
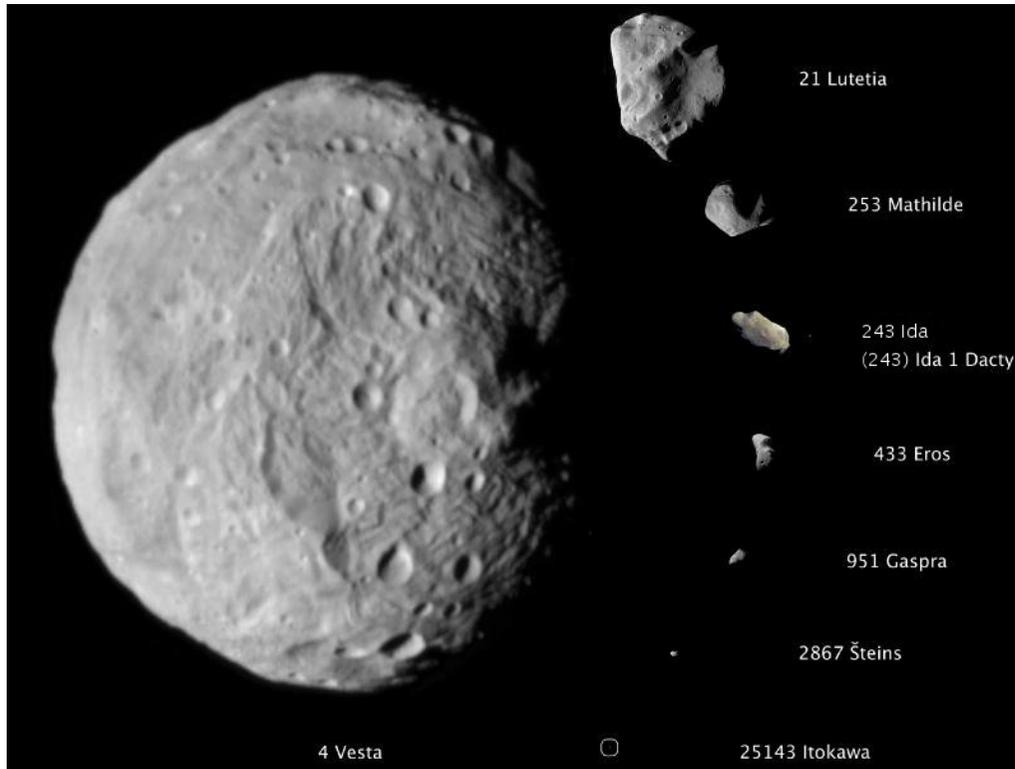
En 1867 Daniel Kirkwood notó la existencia de vacíos en la distribución de los semiejes mayores de los asteroides descubiertos hasta ese entonces. Esas brechas (*Kirkwood gaps*) corresponden a las principales resonancias de movimiento medio con Júpiter.

# Familias de asteroides



Cuando se plotan las inclinaciones osculantes versus los semiejes mayores o excentricidades osculantes no aparece ninguna aglomeración en el diagrama. Los *elementos propios* se utilizan por su cuasi-constancia en el tiempo, al contrario de los elementos osculantes que varían con  $t$  en escalas de tiempo de decenas de miles de años. Las primeras familias fueron identificadas por el astrónomo japonés Hirayama en 1918.

## Asteroides observados desde sondas espaciales



Areas brillantes en Ceres: son consistentes con depósitos de carbonato de sodio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), que indica actividad geológica reciente.

# Taxonomía

A los asteroides se les asigna un tipo espectral según su espectro, color y algunas veces su albedo. Los tipos más comunes son: C correspondiente a objetos carbonosos oscuros, S por objetos pétreos (silicáceos) y U por aquellos no clasificables en los tipos anteriores. La *clasificación de Tholen* (1984) está basada en 8 colores y consiste de los siguientes tipos:

## Grupo C

Tipo B

Tipo F

Tipo G

Tipo C

## Tipo S

## Grupo X

**Tipo M:** Son objetos mayormente metálicos de albedos moderados (0.1-0.2). Asociados a este tipo se encuentran los siguientes 2 tipos:

Tipo E : Son de albedos altos ( $> 0.3\%$ ), sus espectros son de neutros a tojizos. Se considera que sus superficies son acondritas ricas en enstatita ( $\text{MgSiO}_3$ ).

Tipo P : Son asteroides de muy bajo albedo, quizá ricos en materia orgánica son algo más rojizos que los asteroides tipo S.

Además tenemos las siguientes clases pequeñas:

Tipo A (246 Asporina)

Tipo D (624 Hektor) : Muy bajo albedo; espectro rojizo sin bandas; composición de silicatos anhidros, posiblemente con hielo en su interior.

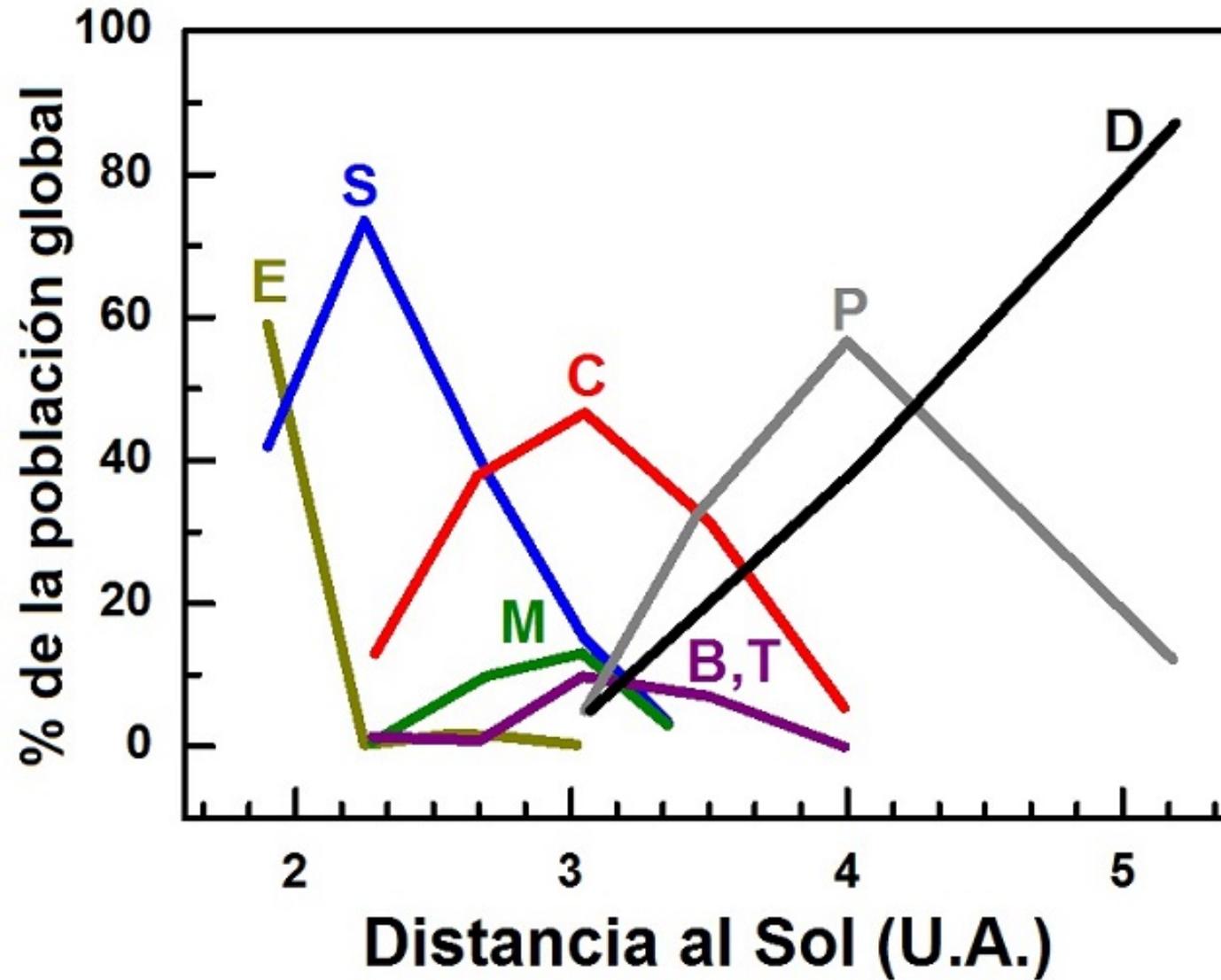
Tipo T (96 Aegle)

Tipo Q (1862 Apollo)

Tipo R (249 Dembowska)

Tipo V (4 Vesta) : O Vestoides presentan espectros similares a 4 Vesta. Pudieron originarse con fragmentos de la corteza de Vesta.

## Distribución espacial de los distintos tipos espectrales



# Espectros de reflexión de distintos tipos

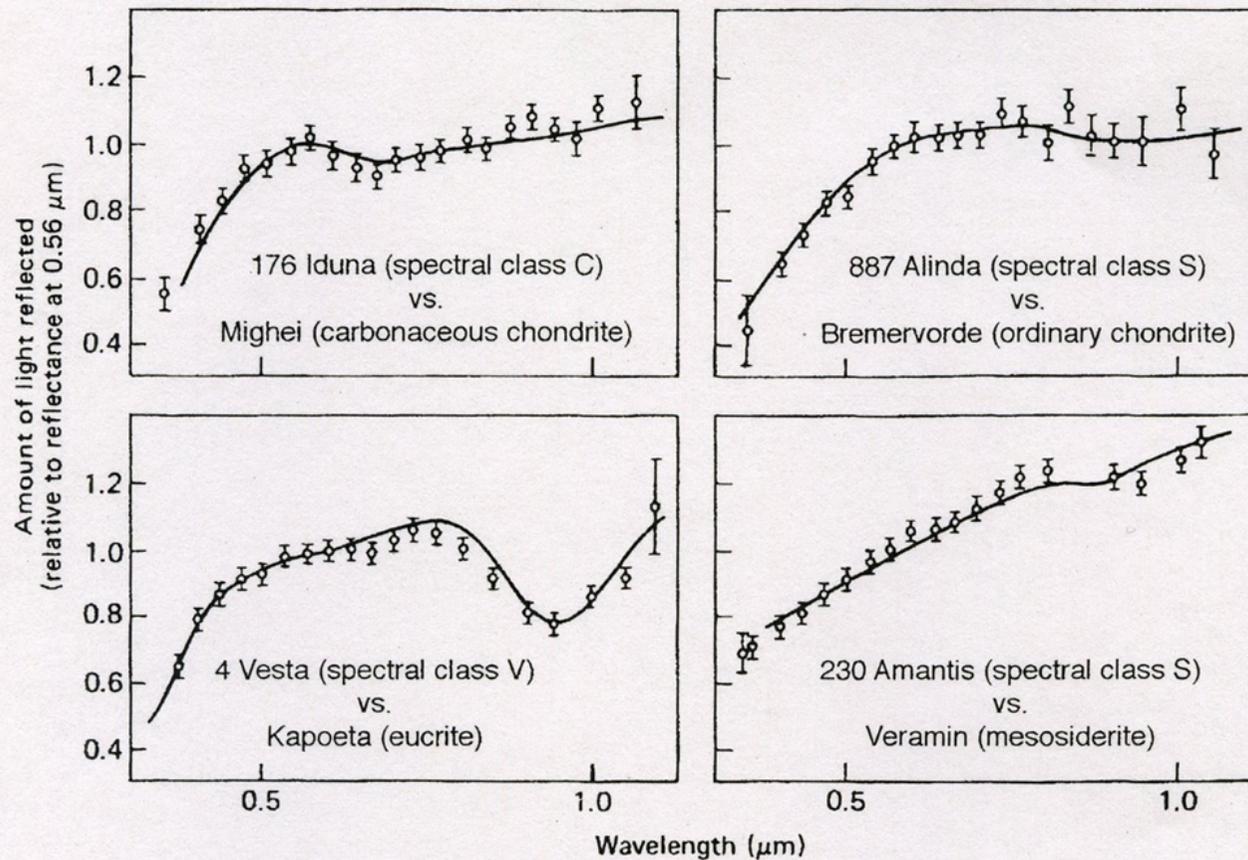
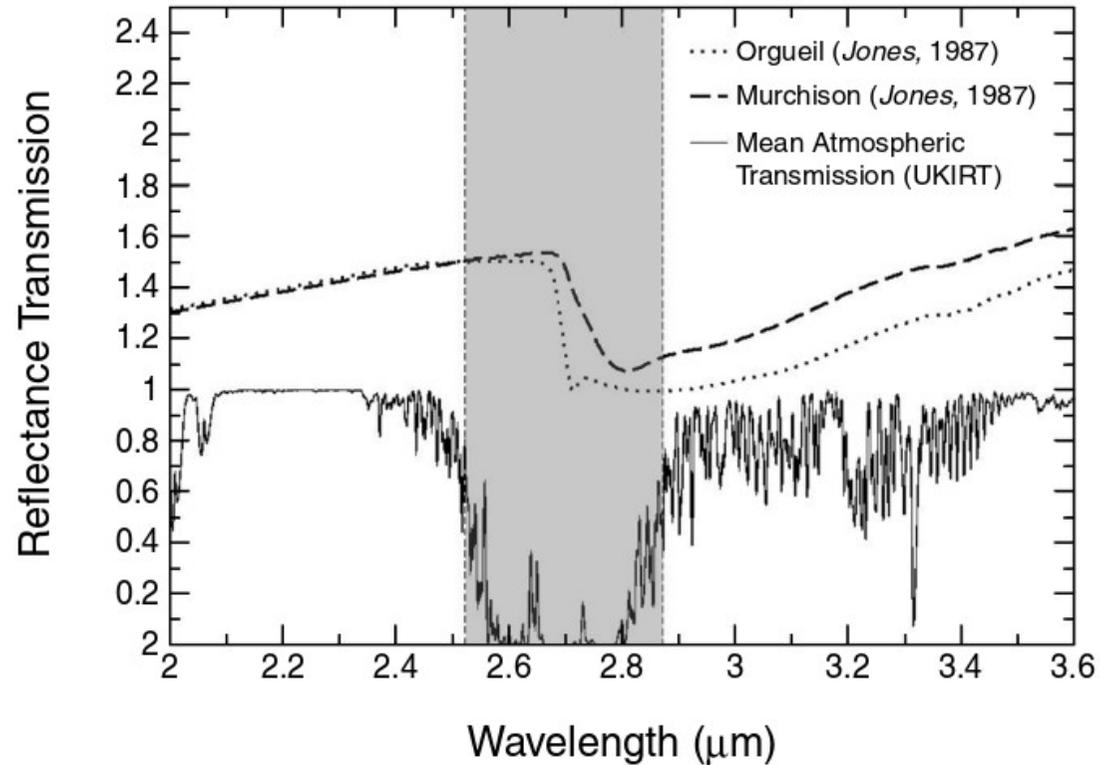


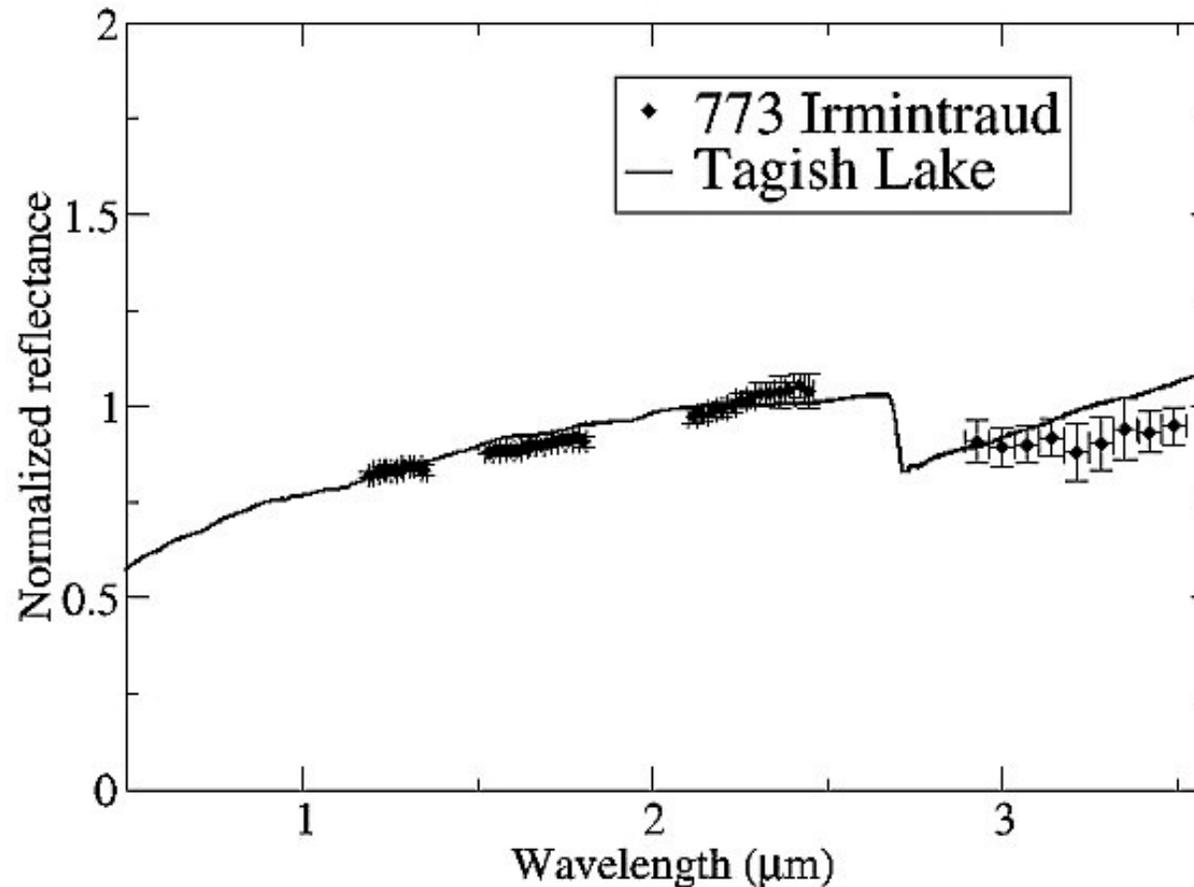
Figure 6.6 Comparison of reflection spectra of four asteroids (points with error bars; measured with ground-based telescopes) with spectra of powdered samples of four meteorites (solid curves). (After C. R. Chapman, 1976. Reprinted from *Geochim. Cosmochim. Acta*, Volume 40, C. R. Chapman, "Asteroids as meteorite parent bodies: The astronomical perspective," pp. 701–719. Copyright 1976, with permission from Elsevier Science.)

# Espectros de reflexión en el IR cercano



Comparación de la transmisión atmosférica y espectros de los meteoritos Murchison, que es una condrita carbonosa que ha experimentado extensiva alteración acuosa en su cuerpo padre, y Orgueil que es otra condrita muy primitiva (Rivkin et al. 2003).

## Presencia de hielo o silicatos hidratados en superficies



Espectro de reflexión del asteroide tipo D 773 Irmintraud. Se observa una brecha hacia  $\mu = 3 \mu\text{m}$  sugestiva de minerales hidratados que sufrieron alteración acuosa en el sistema solar primitivo. La curva continua corresponde al espectro del meteorito Tagish Lake, una condrita carbonosa que ha experimentado alteración acuosa (Kano et al. 2003).

# Distribución color-albedo

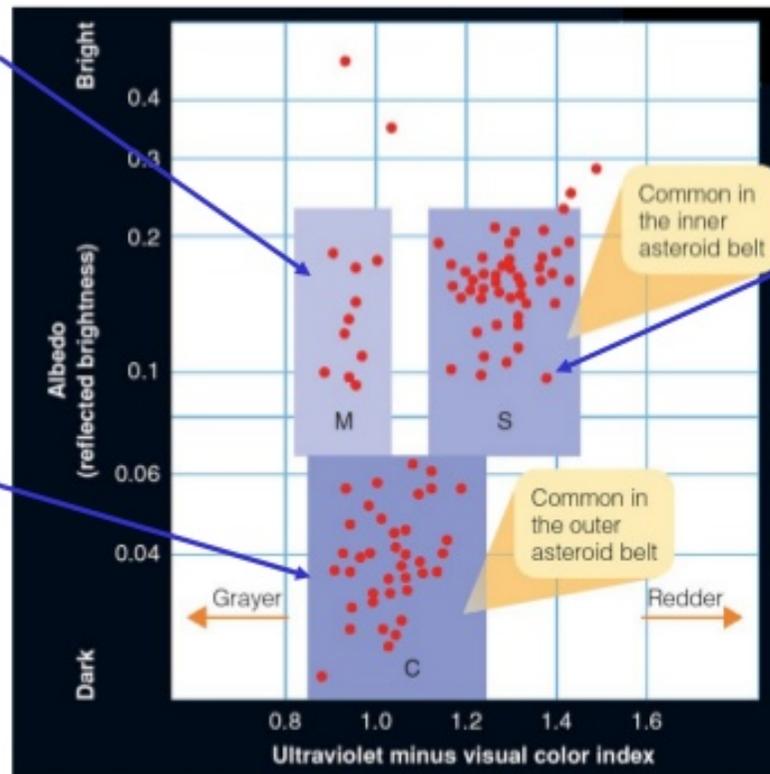
## Colors of Asteroids



“Colors” to be interpreted as albedo (reflectivity) at different wavelengths.

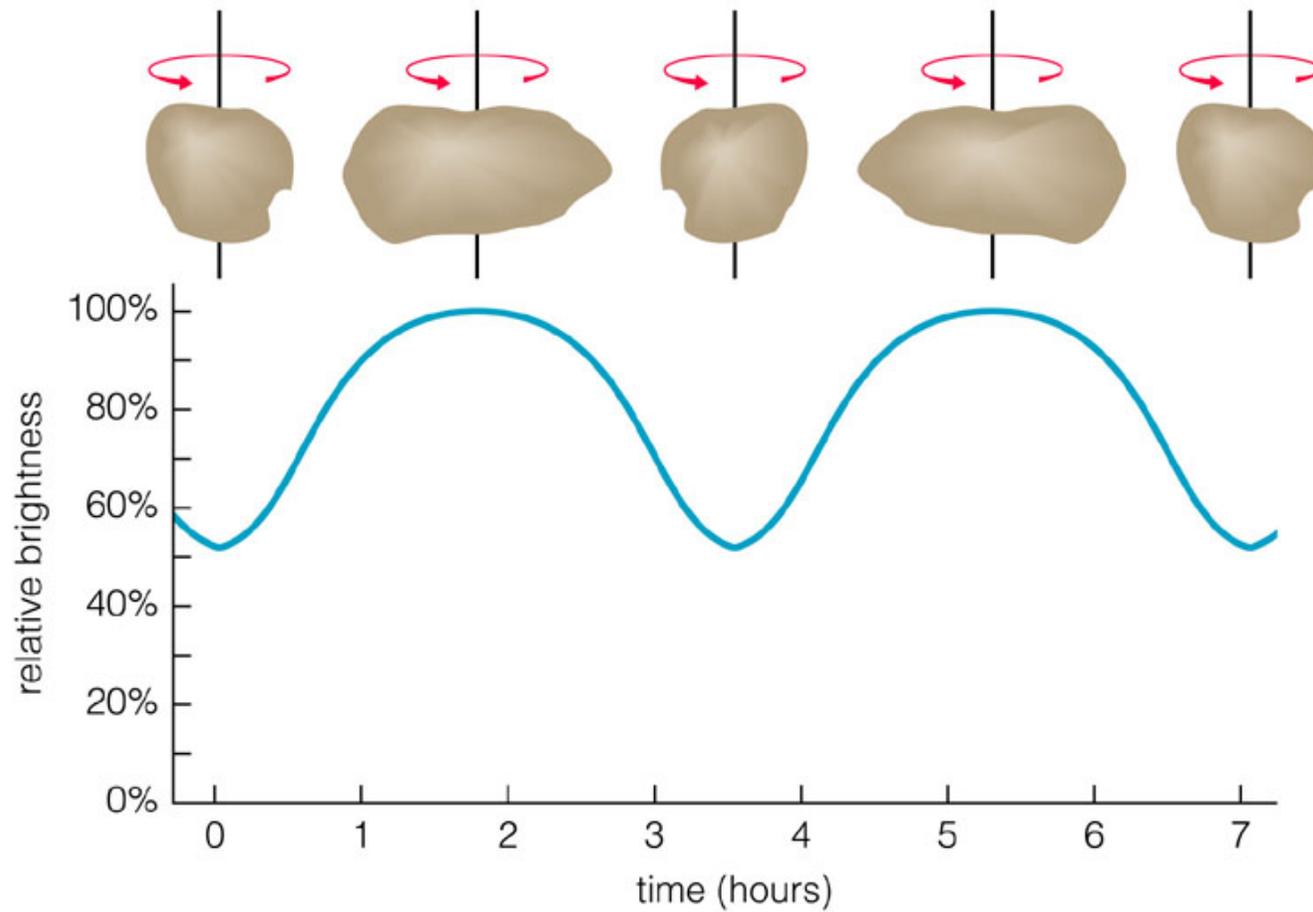
M-type: Brighter, less reddish asteroids, probably made out of metal-rich materials; probably iron cores of fragmented asteroids

C-type: Dark asteroids, probably made out of carbon-rich materials (carbonaceous chondrites); common in the outer asteroid belt



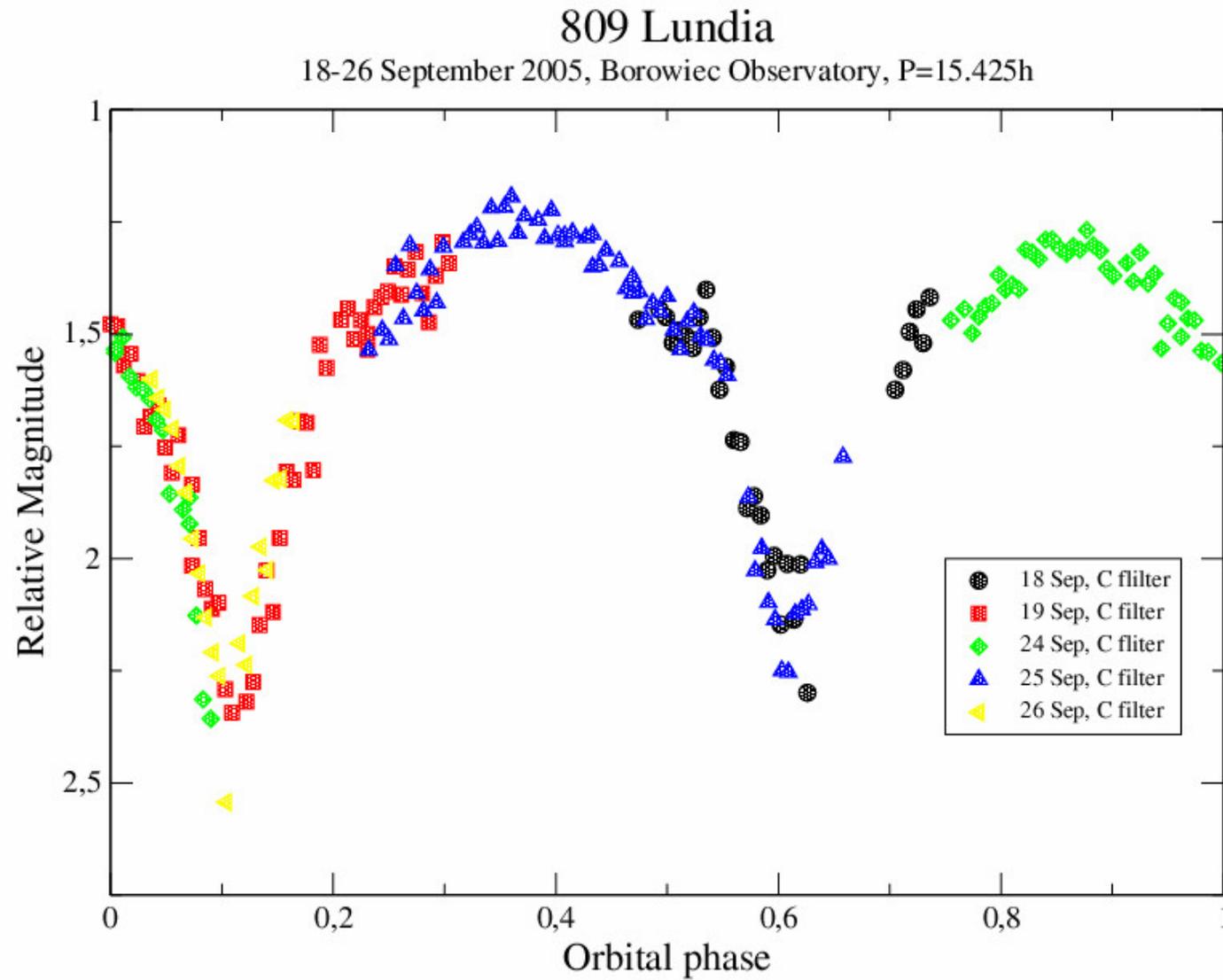
S-type: Brighter, redder asteroids, probably made out of rocky materials; very common in the inner asteroid belt

# Curvas de luz - Períodos de rotación

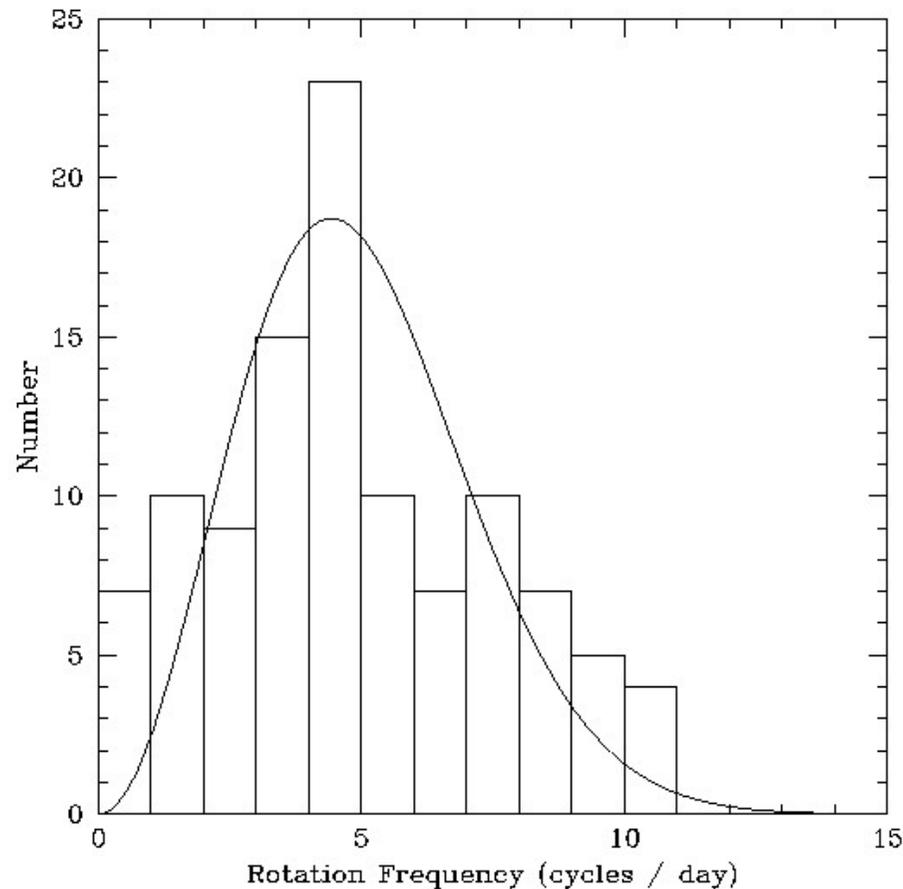


Copyright © 2004 Pearson Education, publishing as Addison Wesley.

# Ejemplo de curva de luz

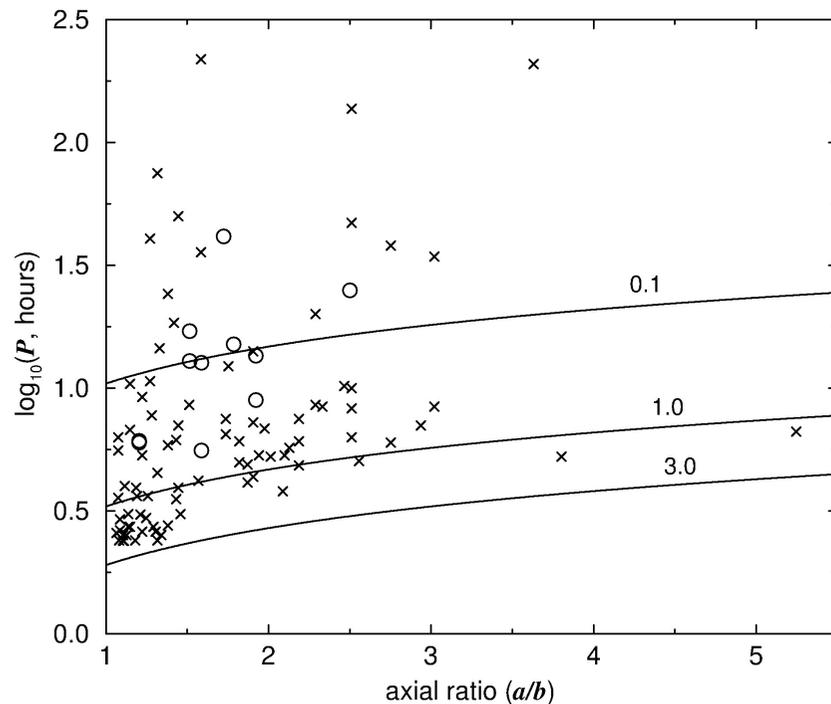


# Distribución de períodos de rotación



Histograma que muestra la distribución de 107 asteroides con diámetros  $< 10$  km. La línea es un ajuste maxwelliano para un período cuadrático medio de 5.54 ciclos/día ( $P = 4.33$  hs). La distribución se trunca a  $P = 2.27$  hs donde asteroides “pila de escombros” (“rubble piles”) se disgregarían (Bottke 1998).

# Inestabilidad rotacional



x: NEAs, o : JFCs

Podemos asimilar las formas de asteroides a elipsoides prolato de semiejes  $a$ ,  $b = c$ . La aceleración de la gravedad en la punta del eje mayor  $a$  decrecerá con respecto a la de una esfera en un factor  $b/a$ , de modo que la condición de velocidad angular crítica  $\omega_c$  para inestabilidad gravitacional es:

$$\frac{Gmb}{a^3} = \omega_c^2 a$$

que conduce a un período crítico:

$$P_c \approx \frac{3.3 \text{ h}}{\sqrt{\rho}} \sqrt{a/b}$$

donde  $m = 4/3\pi a^3 \rho$

## Distribución de tamaños

Podemos determinar por observaciones las magnitudes aparentes de asteroides y de ahí sus magnitudes absolutas  $H$ . La distribución cumulativa de luminosidad  $\phi(H)$  da el número de asteroides más brillantes que  $H$ . De aquí podemos pasar a la distribución cumulativa de radios  $R$  a través de la relación:

$$\Phi(R) = \phi(H) \frac{dH}{dR}$$

Podemos establecer la siguiente relación funcional:

$$H = 14.11 - 5 \log R - 2.5 \log p_v$$

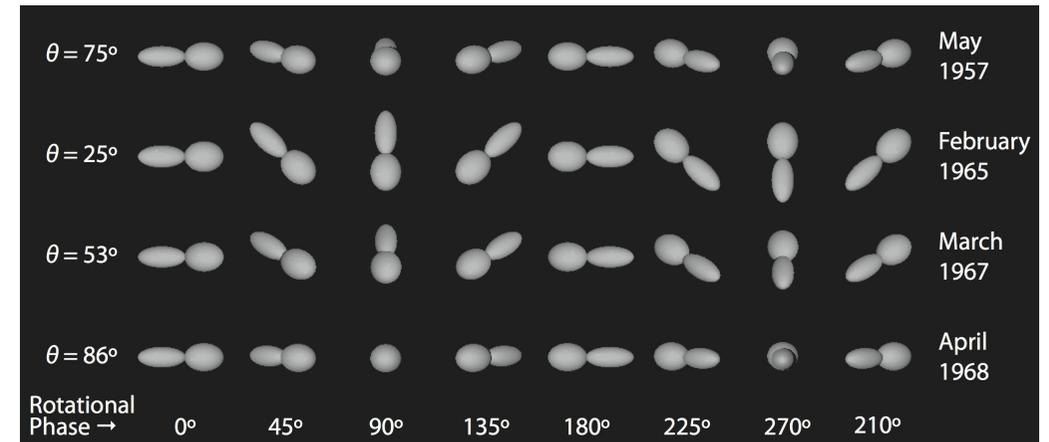
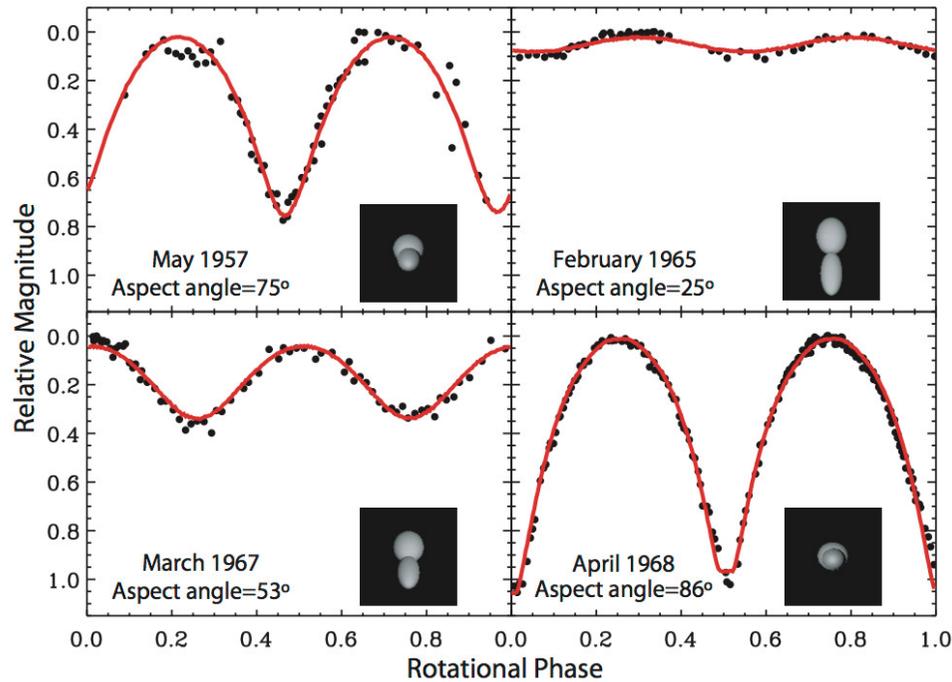
De aquí podemos obtener la distribución de tamaños que en forma diferencial es:

$$n(R)dR = N_o \left( \frac{R}{R_o} \right)^{-\alpha}$$

donde  $n(R)dR$  es el número de asteroides con radios entre  $R$  y  $R + dR$ . La distribución de tamaños también puede expresarse en forma cumulativa:

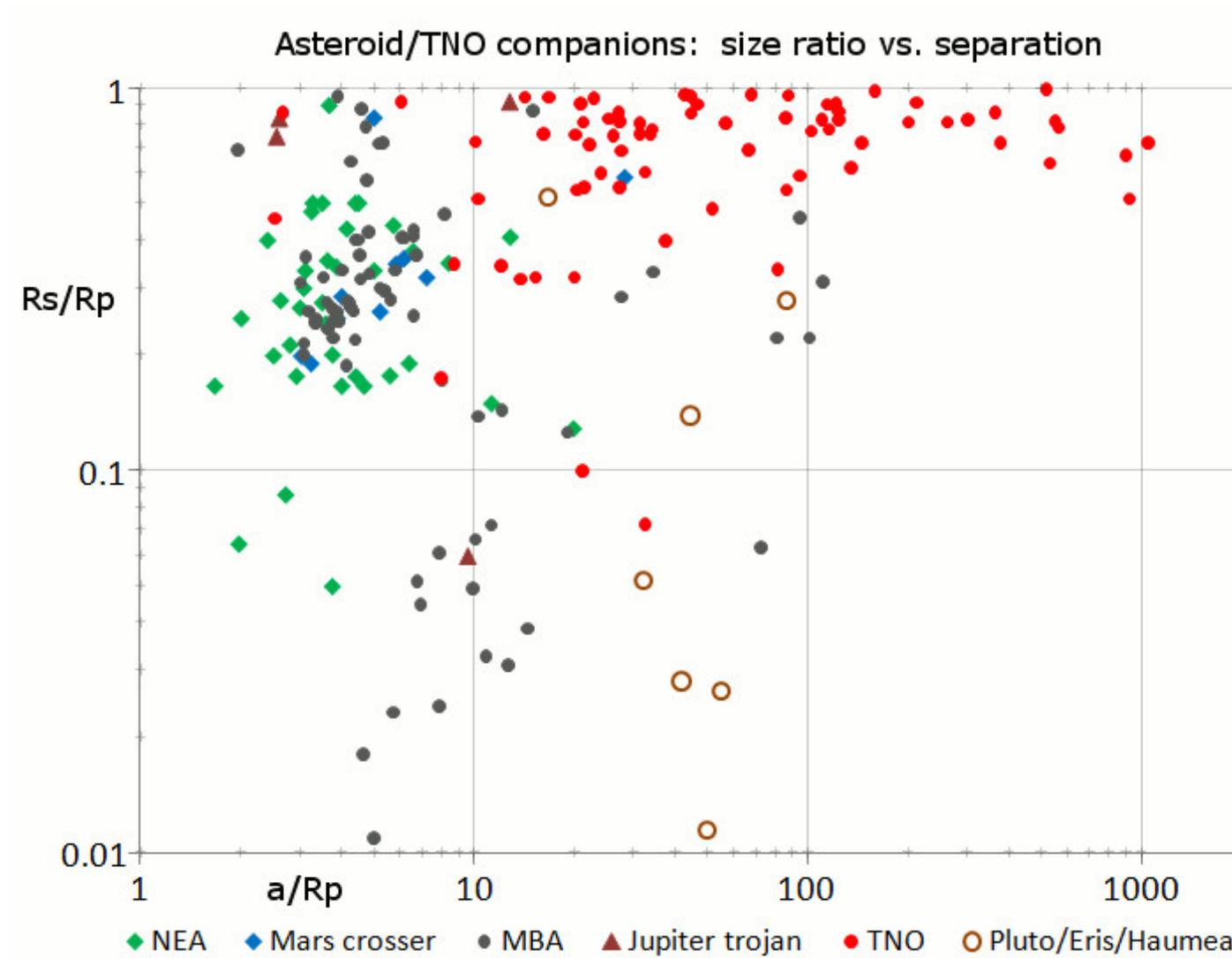
$$N(> R) = \int_R^{\infty} n(R')dR' = \frac{N_o}{\alpha - 1} \left( \frac{R}{R_o} \right)^{1-\alpha}$$

# Asteroides binarios



El asteroide Troyano (624) Hektor es el más famoso binario de contacto en el sistema solar. Según el *ángulo de aspecto* (el ángulo que forma la visual con el eje de rotación del binario), la amplitud puede variar entre  $\Delta m \sim 0.1$  mag y  $\sim 1.1$  mag.

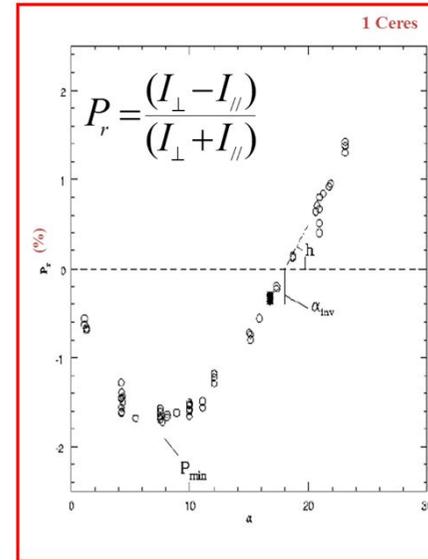
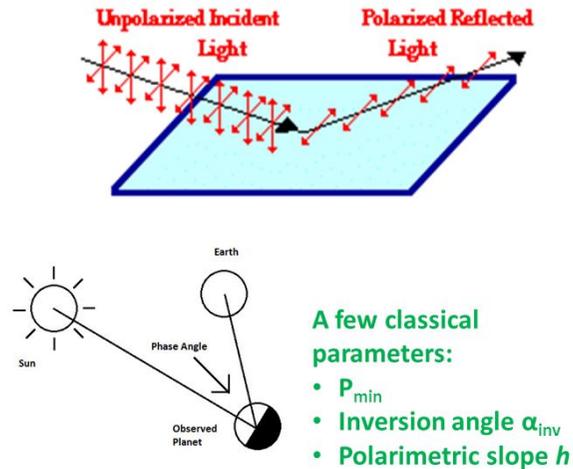
# Separación versus relación de tamaños



# Polarización



## General properties of asteroid linear polarization.



La relación empírica para albedos geométricos  $p > 0.06$  puede representarse como:

$$\log p = -C_1 \log h + C_2$$

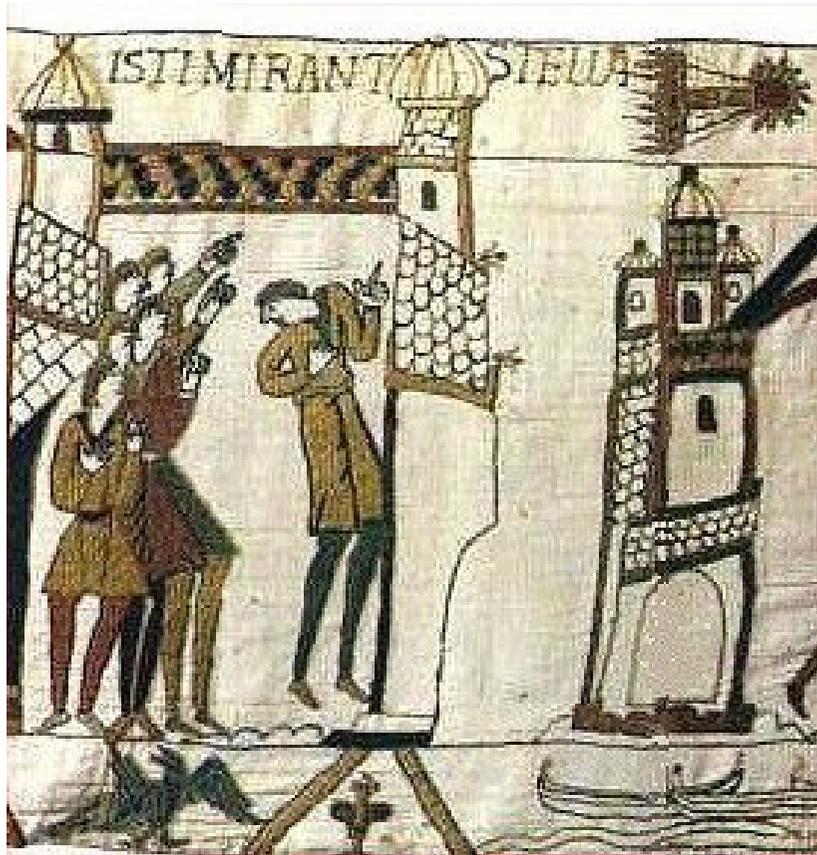
donde  $h$  es la pendiente de la curva, medida en porcentaje de polarización por grado de ángulo de fase. Para las constantes tenemos:  $C_1 = 0.93$ ,  $C_2 = -1.78$ .

# ¿Qué son los cometas?



Cometa C/1995 O1 (Hale-Bopp)

## Los cometas en la historia



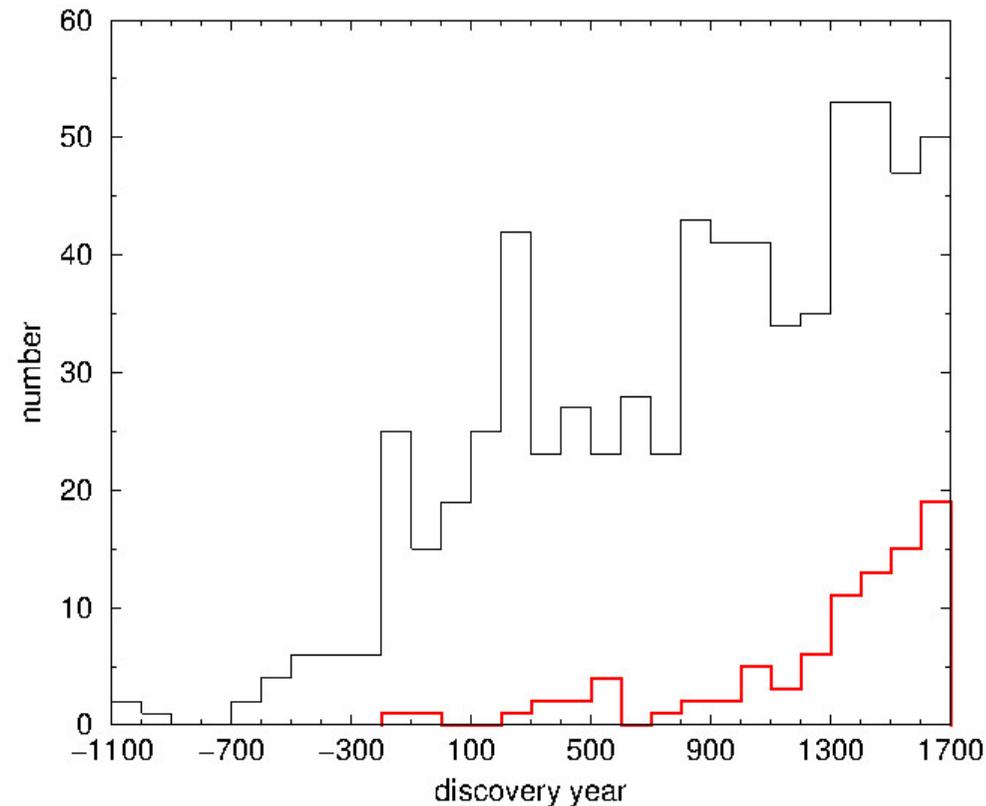
Cometa observado en 1066 luego identificado con el cometa Halley



El Gran Cometa de 1577 observado en toda Europa.

Los cometas causaron admiración, asombro y miedo a través de la historia por su apariciones espectaculares que violaban la supuesta regularidad de los cielos.

# Apariciones cometarias a través de la historia: Algunas estadísticas



Registro de apariciones cometarias antes de 1700 (Kronk 1999) mostrando el número de cometas descubiertos por siglo. El histograma rojo representa aquellos cometas cuyas órbitas fueron computadas con la suficiente precisión como para incluirse en el *Catalogue of Cometary Orbits* de Marsden & Williams.

# La primera determinación de una órbita cometaria: El nacimiento de la mecánica celeste

[ 7 ]

*The Astronomical Elements of the Motions in a Parabolick Orb of all the Comets that have been hitherto duly observ'd.*

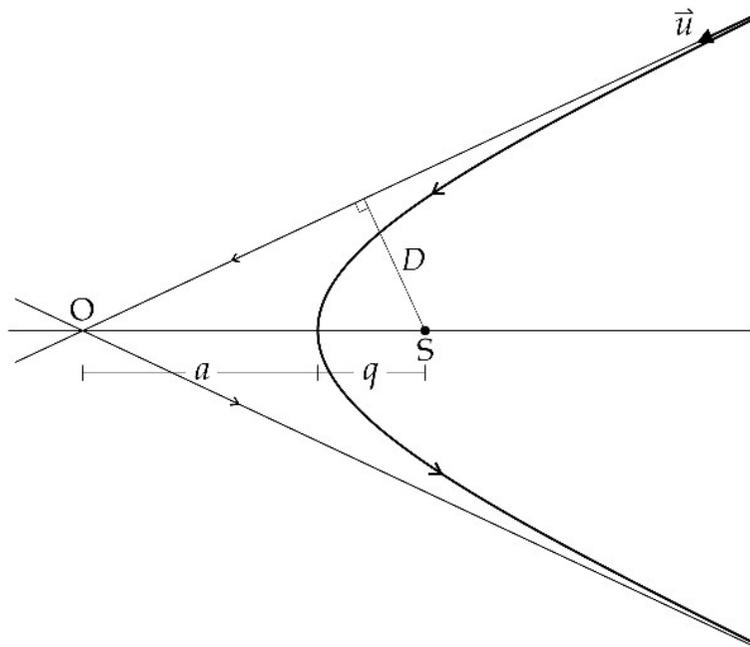
Com. An	Nodus Ascend.	Inclin. Orbitae.	Peribetion.	Distan. Peribetia à Sole.	Log. Dist. à Sole.	Temp equat. Peribetia.]	Peribetion à Nudo.	
	gr. "	gr. "	gr. "			d. h. '	gr. "	
1337	♄ 24.21. c	32.11. c	♄ 7.59. 0	40666	9.609236	June 2. 6.25	46.22. 0	Retrog.
1472	♃ 11.46.2c	5.20. c	♄ 15.33.3c	54273	9.734584	Feb. 28 22.23	123.47.10	Retrog.
1531	♄ 19.25. c	17.56. c	♄ 1.39. 0	56700	9.753583	Aug. 24.21.18½	107.46. 0	Re rog
1532	♄ 20.27. c	32.36. c	♄ 21. 7. 0	50910	9.706803	Oct. 19 22.12	30.40. 0	Direct.
1556	♃ 25.42. c	32. 6.3c	♃ 8.50. 0	46350	9.666424	Apr. 21.20. 3	103. 8. 0	Direct
1577	♃ 25.52. c	74.32.45	♄ 9.22. 0	18342	9.263447	Oct. 26 18.45	103.30. 0	Retrog
1580	♃ 18.57.2c	64.40. 0	♄ 19. 5.50	59628	9.775450	Nov 28 15.00	90. 8.30	Direct.
1585	♄ 7.42.3c	6. 4. c	♃ 8.51. 0	109358	9.038850	Sept. 27 19.20	28.51.30	Direct
1590	♃ 15.30.4c	29.40.4c	♄ 6.54.30	57661	9.700882	Jan. 29. 3.45	51.23.50	Retrog
1596	♄ 12.12.3c	55.12. c	♄ 18.16. 0	51293	9.710058	July 31.19.55	83.56.30	Retrog
1607	♄ 20.21. c	17. 2. c	♄ 2.16. 0	58680	9.768490	Oct. 16. 3.50	108.05. 0	Retrog
1618	♄ 16. 1. c	37.34. 0	♃ 2.14. 0	37975	9.579498	Oct. 29.12.23	73.47. 0	Direct.
165	♄ 28.10. c	79.28. 0	♃ 28.18.40	84750	9.928140	Nov. 2.15.40	59.51.20	Direct.
1661	♄ 22.30.3c	32.35.5c	♄ 25.58.40	44851	9.651772	Jan. 16.23.41	33.28.10	Direct.
1664	♄ 21.14. c	21.18.30	♄ 10.41.25	102575½	9.011044	Nov. 24.11.52	49.27.25	Retrog
1665	♄ 18.02. 0	76.05. c	♄ 11.54.30	10649	9.027309	Apr. 14. 5.15½	156. 7.30	Retrog
1672	♃ 27.30.3c	83.22.10	♃ 16.59.30	69739	9.843476	Feb. 20. 8.37	109.29. 0	Direct.
1677	♄ 26.49.10	79.03.15	♄ 17.37. 5	28059	9.448072	Apr. 26.00.37½	99.12. 5	Retrog.
1680	♃ 2. 2. c	60.56. 0	♄ 22.39.30	00612½	7.787106	Dec. 8.00. 6	9.22.30	Direct.
1682	♄ 21.16.2c	17.56. 0	♄ 2.52.45	58228	9.765877	Sept. 4.07.39	108.23.45	Retrog.
1683	♃ 23.23. c	83.11. 0	♄ 25.29.30	56020	9.748343	July 3. 2.50	87.53.30	Retrog.
1684	♄ 28.15. c	55.48.4c	♄ 28.52. 0	96015	9.982339	Mai 29.10.16	29.23.00	Direct.
1686	♄ 20.34.4c	31.21.4c	♄ 17.00.30	32500	9.511883	Sept. 6.14.33	86.25.50	Direct.
1698	♄ 27.44.1c	11.46. c	♃ 00.51.15	69129	9.830660	Oct. 8.16.57	3. 7. 0	Retrog.

This Table needs little Explication, since 'tis plain enough from the Titles, what the Numbers mean. Only it may be observ'd, that the *Peribetium* Distances, are estimated in such Parts, as the Middle Distance of the Earth from the Sun, contains 100000.

La aparición de un cometa espectacular en 1682 le permitió a Edmond Halley aplicar la teoría de la gravitación universal de Newton. Pudo ajustar una órbita cuasi-parabólica y probar que era similar a las de los cometas observados en 1456, 1531 y 1607. **Halley infirió correctamente que esas apariciones podrían corresponder a un mismo cometa de período orbital  $\sim 76$  años.** Si esta suposición fuera correcta, el cometa debería retornar en 1758. La predicción se cumplió y el cometa pasó a llamarse Halley en su honor.

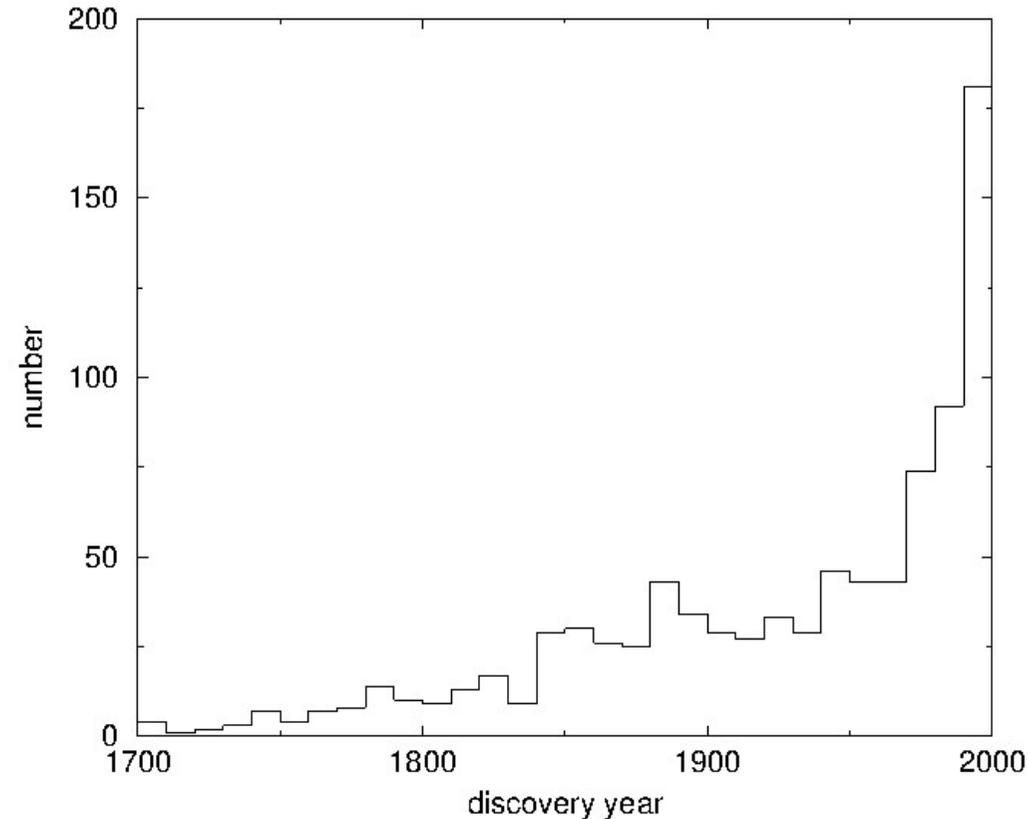
# ¿Objetos interestelares o miembros del sistema solar? : Teoría de Laplace

Los cometas podrían ser atraídos del espacio interestelar por la gravedad solar. Una simplificación importante en su modelo es que supuso que el Sol está en reposo en el campo interestelar. Si la velocidad relativa  $u$  del cometa fuera pequeña, su trayectoria heliocéntrica sería muy próxima a una parábola.



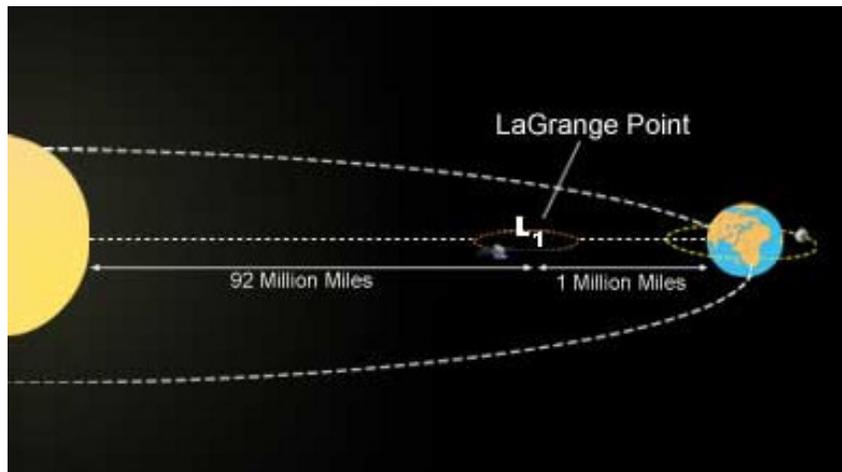
Sin embargo, Giovanni Schiaparelli (1835-1910) observó la necesidad de incluir el movimiento propio del Sol con respecto a los objetos interestelares de su vecindad (lo que ahora llamamos el movimiento del Sol hacia el *Apex* de alrededor  $20 \text{ km s}^{-1}$ ), lo que hace que velocidades de encuentro muy bajas ( $< \text{un pocos km/s}$ ) sean extremadamente improbables.

# Cometas en el presente: El incremento en la tasa de descubrimiento

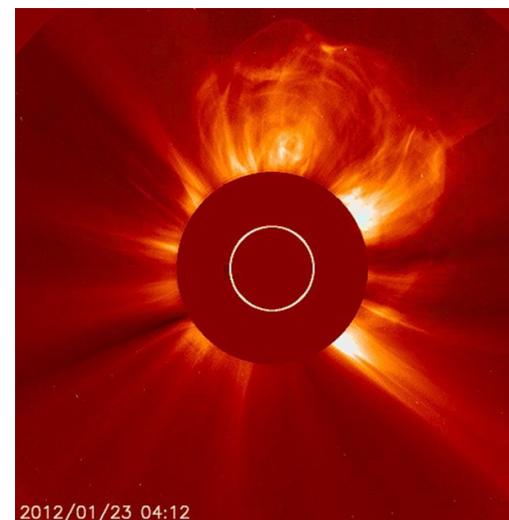
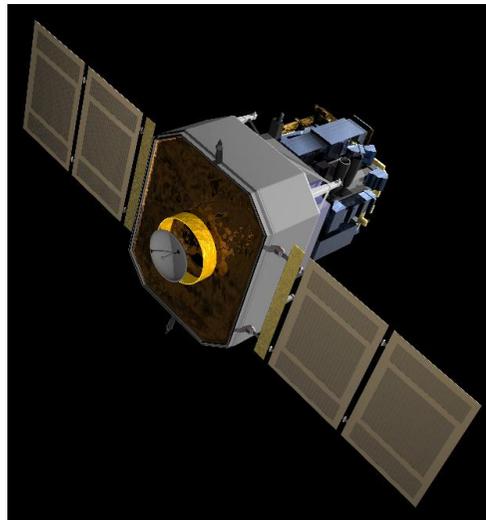


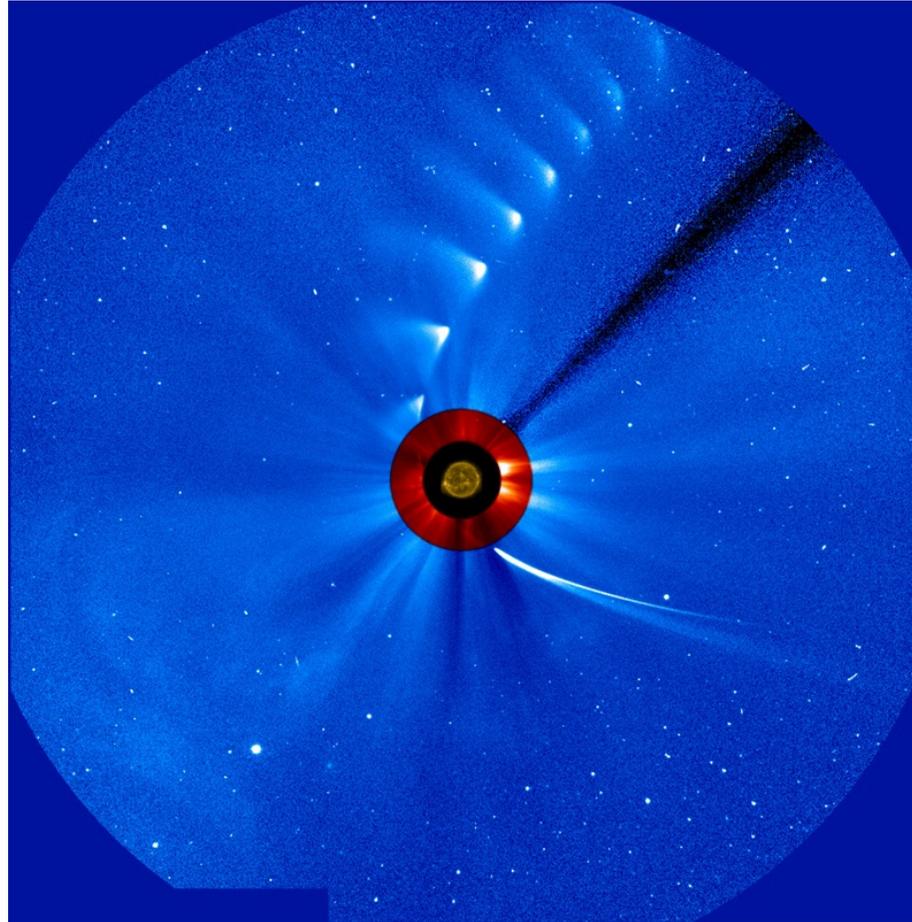
En épocas recientes la tasa de descubrimiento se ha incrementado notoriamente gracias a la implementación de programas de búsqueda de NEOs tales como LINEAR, NEAT, LONEOS, Catalina, Siding Spring, WISE, NEOWISE, PanSTARRS.

# El descubrimiento de *sungrazers* con el satélite *Solar and Heliospheric Observatory (SOHO)*



SOHO está localizado entre el Sol y la Tierra en el punto Lagrangeano  $L_1$  (punto de equilibrio). El satélite monitorea la corona solar y objetos que se aproximan al Sol como los cometas. Contiene un disco pequeño para bloquear la intensa luz del Sol.

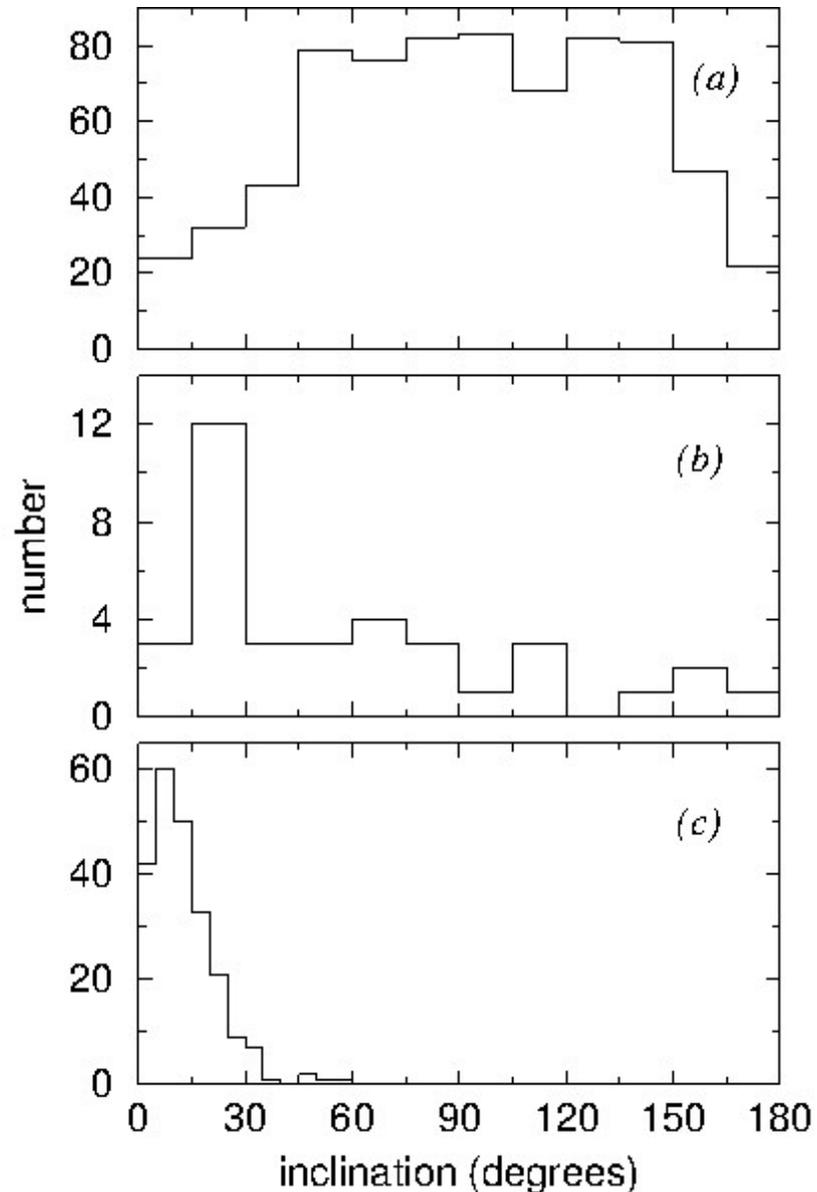




El cometa C/2012 S1 (ISON) se aproxima al sol por el lado inferior derecho y emerge por el lado superior derecho ya en proceso de disrupción y disipación. Fecha: 28 noviembre 2013 (Crédito: ESA/NASA/SOHO/SDO/GSFC).

**SOHO ha descubierto alrededor de 3000 sungrazers!**

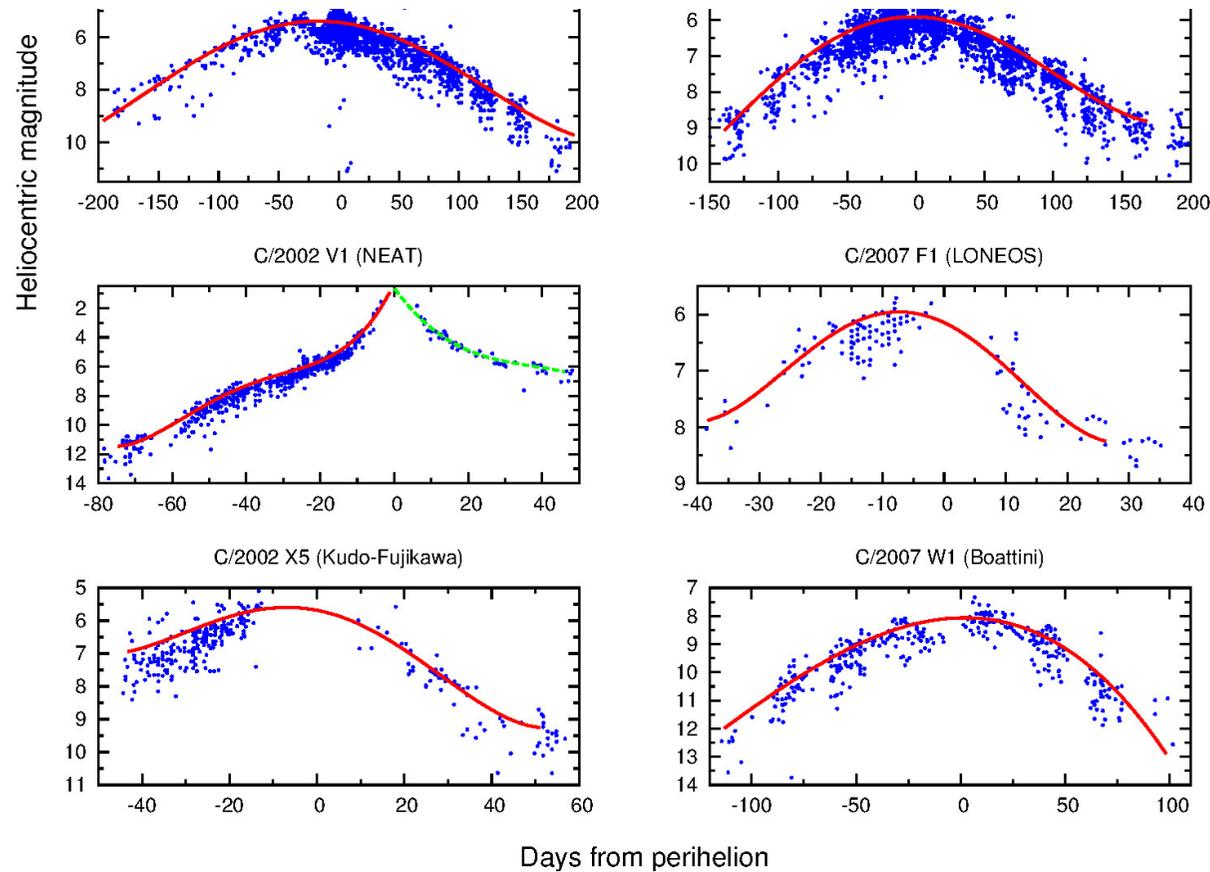
# Cometas de largo período y periódicos



Por convención, cometas de largo período (LPCs) son aquellos con períodos orbitales  $P > 200$  años. Estos muestran una distribución aleatoria de sus planos orbitales. Los cometas con  $P < 200$  años son periódicos (*Halley-type comets* (HTCs) aquellos con parámetros de Tisserand  $T < 2$  y *Jupiter family comets* (JFCs) aquellos con  $2 < T < 3$ ). En estos la distribución de inclinaciones no es aleatoria.

# Curvas de luz de cometas

Podemos definir la **magnitud total heliocéntrica** :  $m_h = H_T + 2.5n \log r$  (o sea, la magnitud aparente si el cometa fuera observado a  $\Delta = 1$  ua).

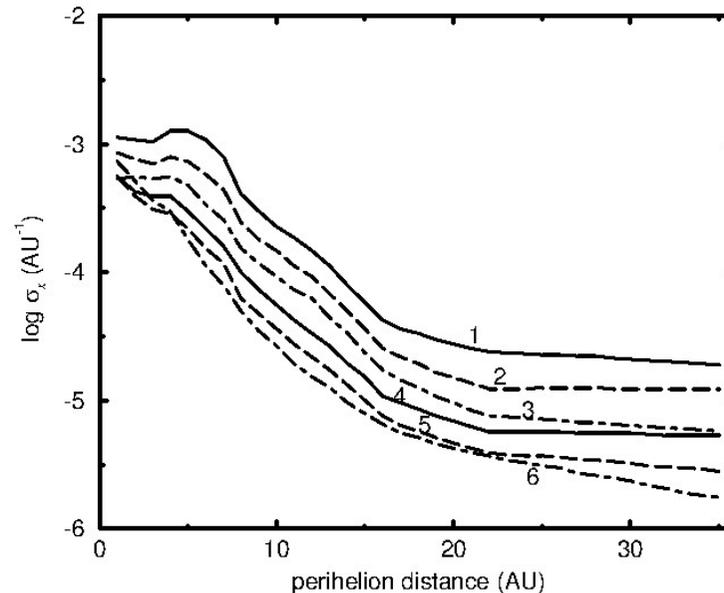


(Fernández & Sosa 2012)

# Evolución dinámica de LPCs a través de múltiples pasajes perihélicos

Lo que importa realmente es la evolución de la energía orbital. Integraciones numéricas de cometas ficticios (p. ej. Kerr 1961) muestran que la distribución de cambios en la energía  $\epsilon = \Delta x$  por revolución orbital se pueden aproximar por una distribución Gaussiana:

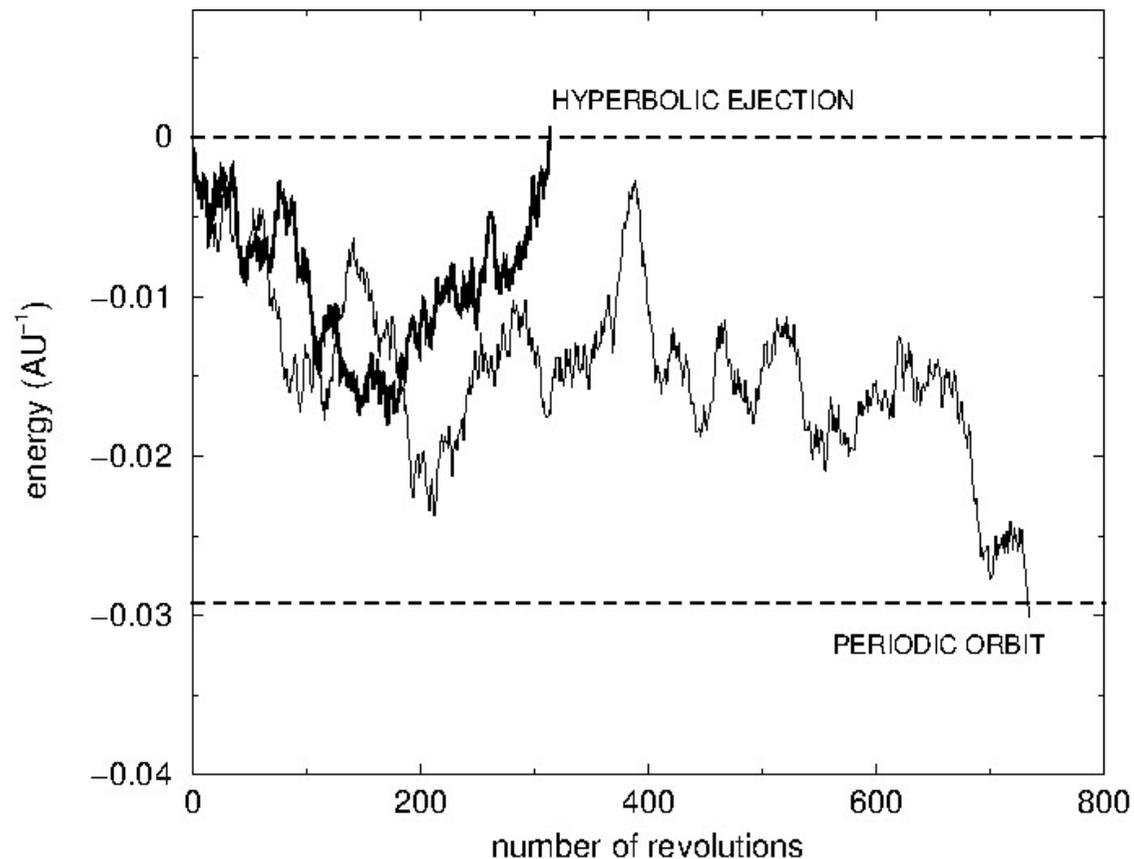
$$\Psi(\epsilon) = \frac{1}{\sigma_\epsilon \sqrt{2\pi}} \exp(-\epsilon^2 / 2\sigma_\epsilon^2)$$



(Fernández & Brunini 2000)

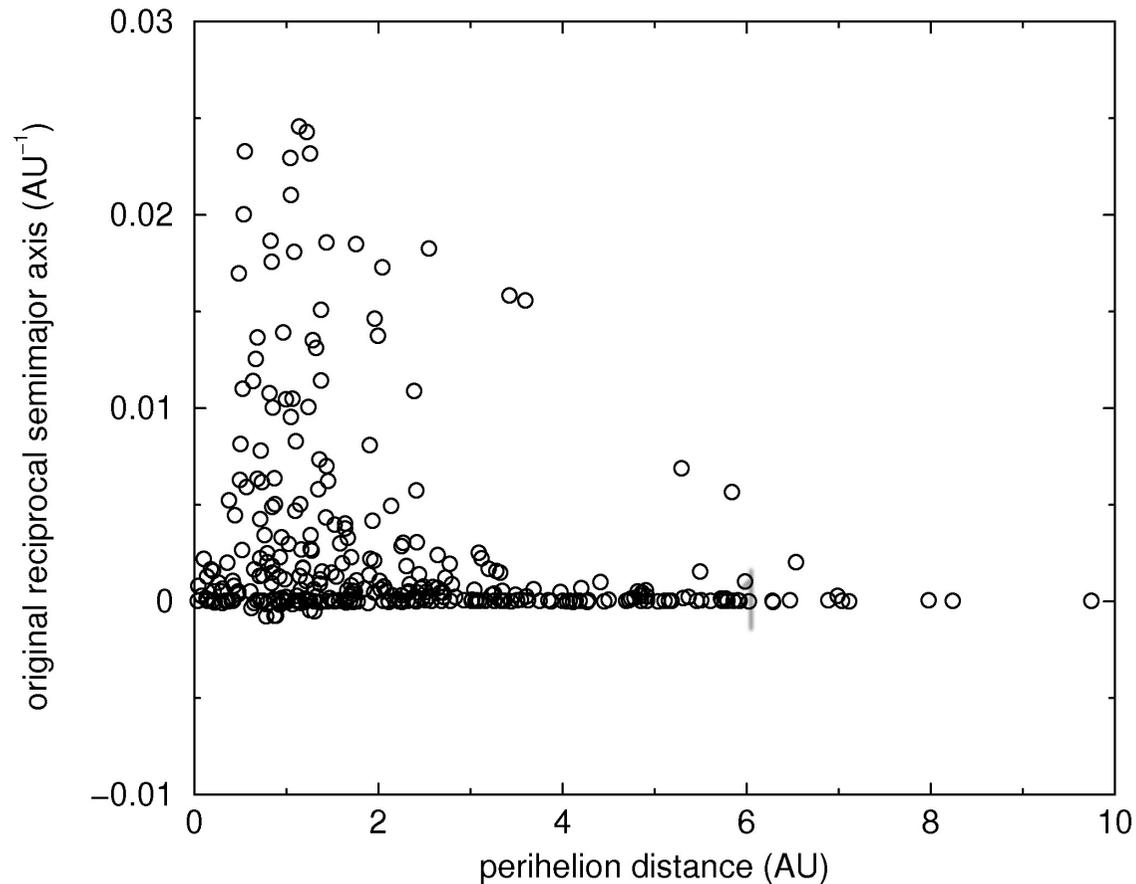
Los cambios de energía típicos  $\sigma_\epsilon$  son una función de la distancia perihélica y la inclinación.

# Simulaciones de un camino aleatorio (*random walk*) en el espacio de energías



Durante la evolución dinámica el cometa puede alcanzar una órbita periódica. Desde un punto de vista dinámico, este es un estado “viejo”. Si  $q \lesssim 2 - 3$  ua es posible que al llegar a ese estado el cometa ya esté desintegrado.

## Descubrimiento de LPCs con energías orbitales diferentes (diferentes edades dinámicas) en función de $q$



Se descubren pocos LPCs dinámicamente viejos con  $q \gtrsim 2$  ua (muestra de LPCs descubiertos entre 1850-2002 tomados del catálogo de Marsden & Williams 2003).  
Esto se puede entender como un problema de *debilitamiento (fading)*.

## La ecuación de difusión

$\nu(x, t)dx$  : número de LPCs que llegan al perihelio con energías en el rango  $(x, x + dx)$  en un cierto tiempo  $t$ .

Comenzando con una población inicial de cometas en órbitas parabólicas, van Woerkom (1948) derivó la distribución  $\nu(x, t)$ . El número de cometas en el rango de energías  $(x, x + dx)$  es

$$N(x, t)dx = a^{3/2}\nu(x, t)dx$$

donde  $a^{3/2}$  es el período orbital del cometa en años, y  $a$  está expresado en ua.

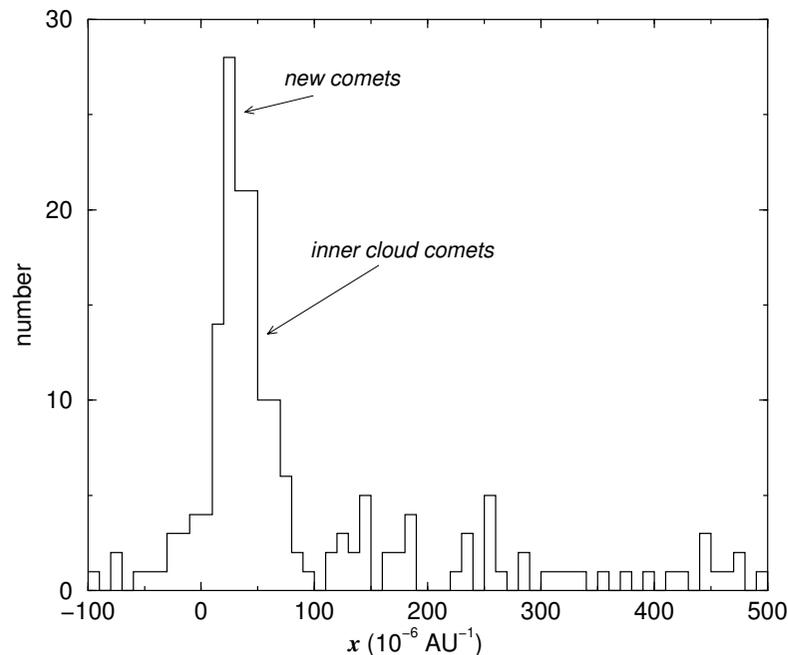
El incremento en el número de cometas con una cierta energía  $x$  que llegan al perihelio por año está dado por  $\partial N(x, t)/\partial t$ . La ecuación de difusión es

$$\frac{\partial N(x, t)}{\partial t} = \int_{-\infty}^{+\infty} \nu(x - \epsilon, t)\Psi(\epsilon)d\epsilon - \nu(x, t)$$

donde el primer término del lado de la derecha representa el número de cometas que adquieren una energía  $x$  por año, mientras que el segundo término es para aquellos que dejan el rango de energías  $(x, x + dx)$  debido a perturbaciones.

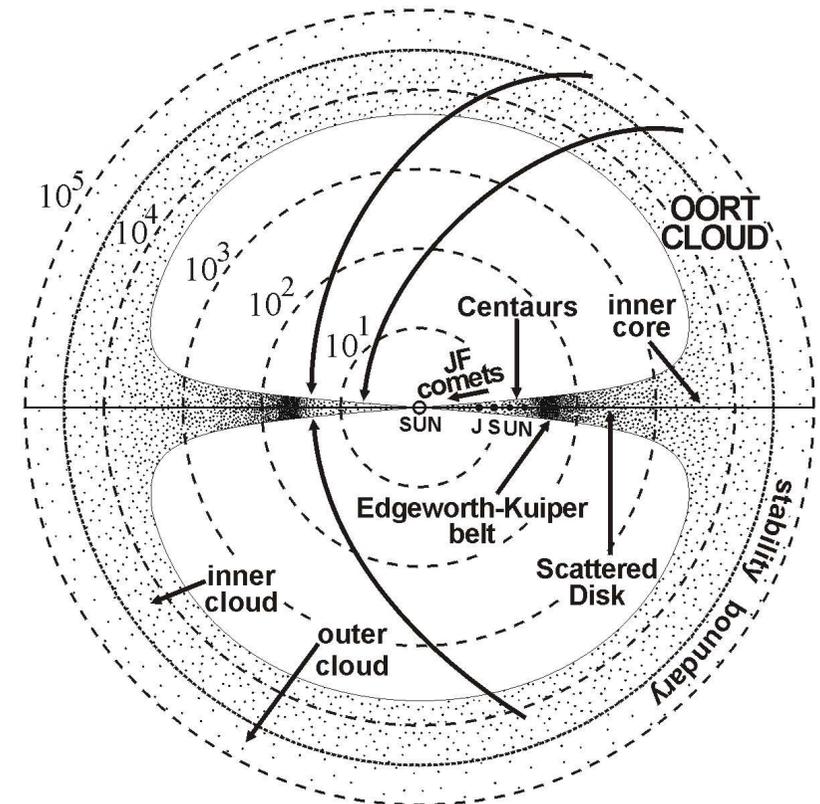
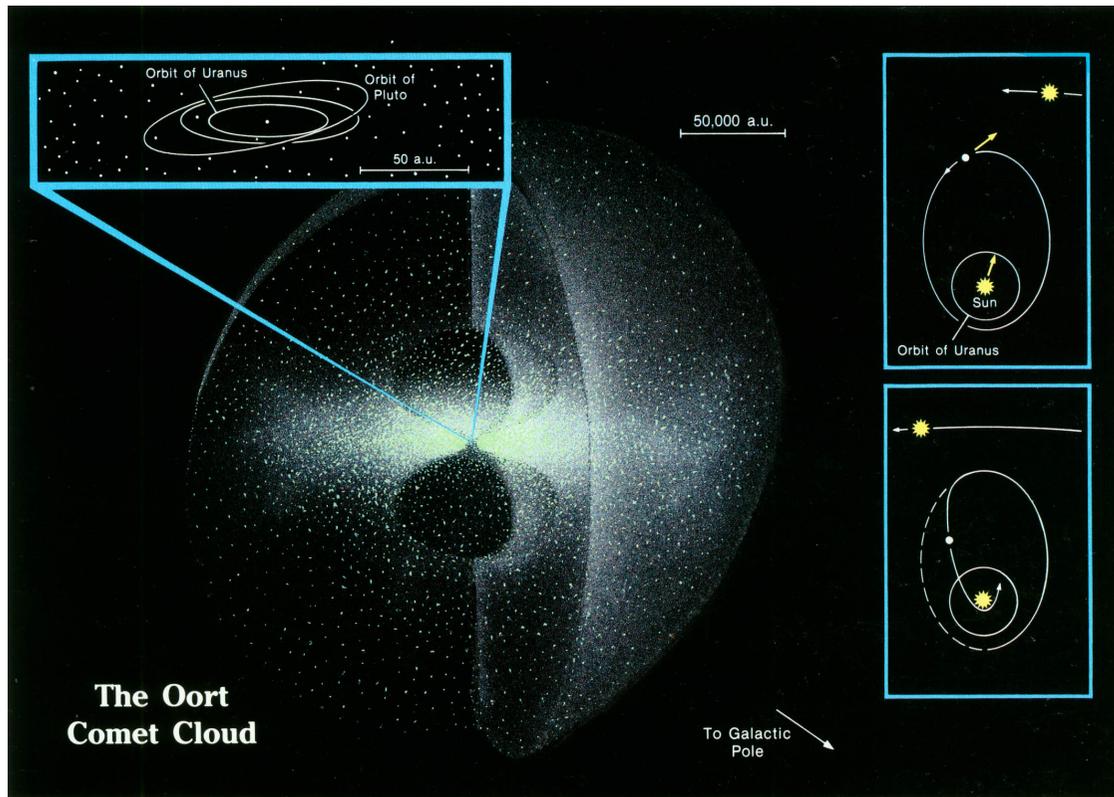
\* La resolución de la ecuación de difusión  $\nu(x, t) \Rightarrow C$  para  $t \Rightarrow \infty \implies$  la distribución de energía es uniforme.

\* Sin embargo se observa una gran concentración de cometas en el estrecho rango de energías  $0 < x < 10^{-4} \text{ ua}^{-1}$  (Oort 1950). Se llaman *nuevos* a los cometas que llegan a la región planetaria con energías dentro de este rango ya que se asume que es su primer pasaje por la región planetaria. Notamos que algunos cometas tienen energías  $x < 0$ , lo cual no sería posible si ellos fueran miembros del sistema solar.



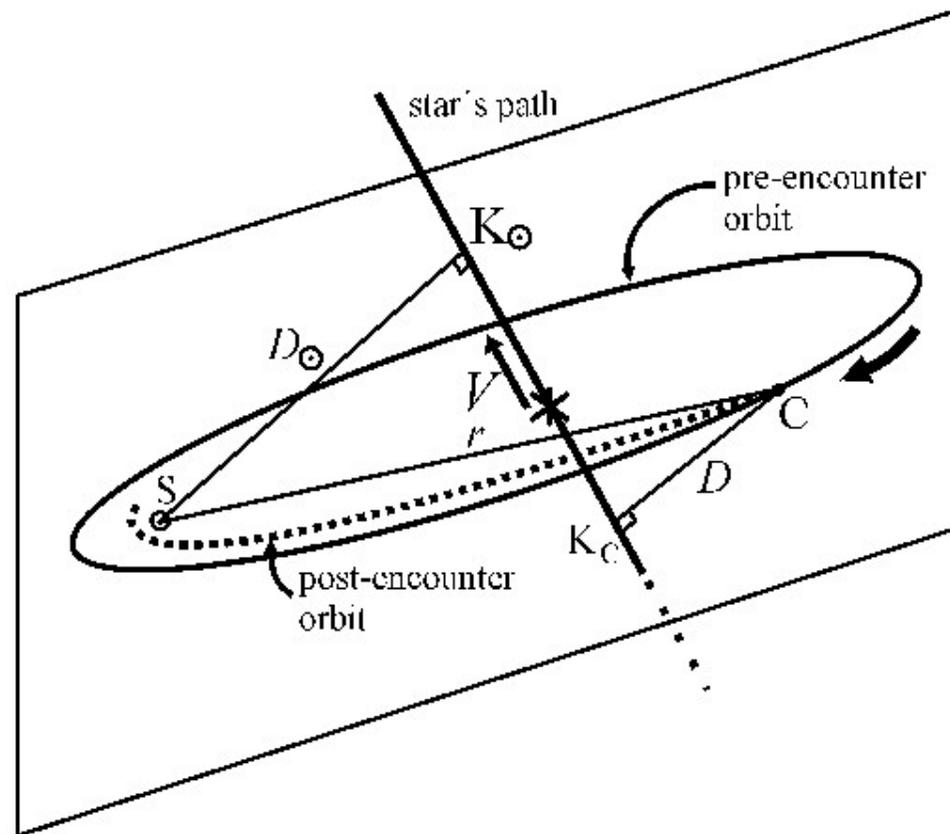
LPCs con energías originales  $(1/a)_{orig} < 5 \times 10^{-3} \text{ au}^{-1}$  y  $q < 2 \text{ ua}$ .

# ¿De donde provienen los cometas de largo período?: the Oort cloud



\* LPCs provienen de un gran reservorio que rodea el sistema solar a distancias  $\gtrsim 10^4$  ua, teoría que fue propuesta por Oort (1950). A tales distancias los cometas están sujetos a perturbaciones por estrella cercanas y fuerzas de marea galáctica que los pueden direccionar hacia la región planetaria interior.

# Perturbaciones por estrellas cercanas



## Geometría de un encuentro estelar

Consideramos una estrella de masa  $M$  que pasa a una velocidad relativa  $V$  del Sol, tal que  $V \gg v_c$  donde  $v_c$  es la velocidad orbital del cometa.

El cambio impulsivo en la velocidad del cometa con respecto al Sol es:

$$\Delta \vec{v} = \Delta \vec{v}_c - \Delta \vec{v}_{\odot} = \frac{2GM \vec{D}}{VD D} - \frac{2GM \vec{D}_{\odot}}{VD_{\odot} D_{\odot}}$$

Durante una revolución orbital  $P$  el cometa será perturbado por muchas estrellas. Para saber cuántas estrellas perturbarán en promedio al cometa en  $P$  debemos conocer la densidad de estrellas  $n_*$  en la vecindad solar. Del estudio de la población de estrellas vecinas se obtiene  $n_* = 0.073 \text{ pc}^{-3}$  y una densidad de masa  $\rho_* = 0.036 M_{\odot} \text{ pc}^{-3}$ , que da una masa promedio por estrella:  $\sim 0.5 M_{\odot}$ .

## Fuerza de marea galáctica

Se puede modelar aproximadamente el disco galáctico como un disco homogéneo de densidad  $\rho_{disc}$  en el plano medio de la Galaxia, tal que el potencial se puede expresar como (Heisler & Tremaine 1986, Morris & Muller 1986, Torbett 1986)

$$U = U_o + 2\pi G \rho_{disk} z^2$$

donde  $U_o$  es una constante y  $z$  es la distancia al plano medio galáctico. Para la densidad de masa en el plano medio galáctico en la vecindad del Sol tenemos:  $\rho_{disc} = 0.10 M_{\odot} \text{pc}^{-3}$ .

A partir del potencial  $U$ , obtenemos la fuerza de marea del disco galáctico actuando sobre un cometa a la latitud galáctica  $\phi$

$$\vec{F}_{disk} = [(dU/dz)_c - (dU/dz)_{\odot}] \hat{z} = 4\pi G \rho_{disk} r \sin \phi \hat{z}$$

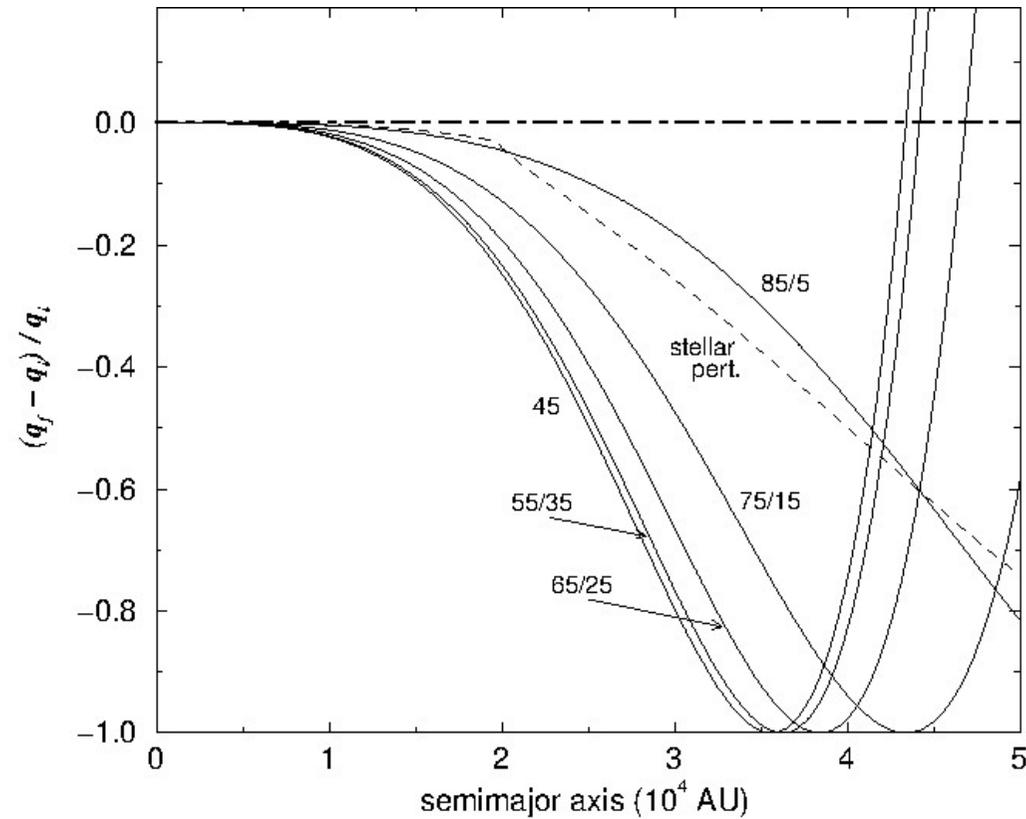
$r$ : distancia Sol-cometa,  $r \sin \phi = z_c - z_\odot$  es la diferencia entre las distancias del cometa y el Sol al plano medio galáctico y  $\hat{z}$  es un vector unitario perpendicular al plano galáctico.

La fuerza de marea del disco galáctico actúa cambiando la distancia perihélica del cometa en la cantidad (por revolución):

$$q_f^{1/2} = q_i^{1/2} + 4.5\sqrt{2}\pi^2 M_\odot^{-1} \rho_{disk} a^{7/2} \cos \alpha \sin 2\phi$$

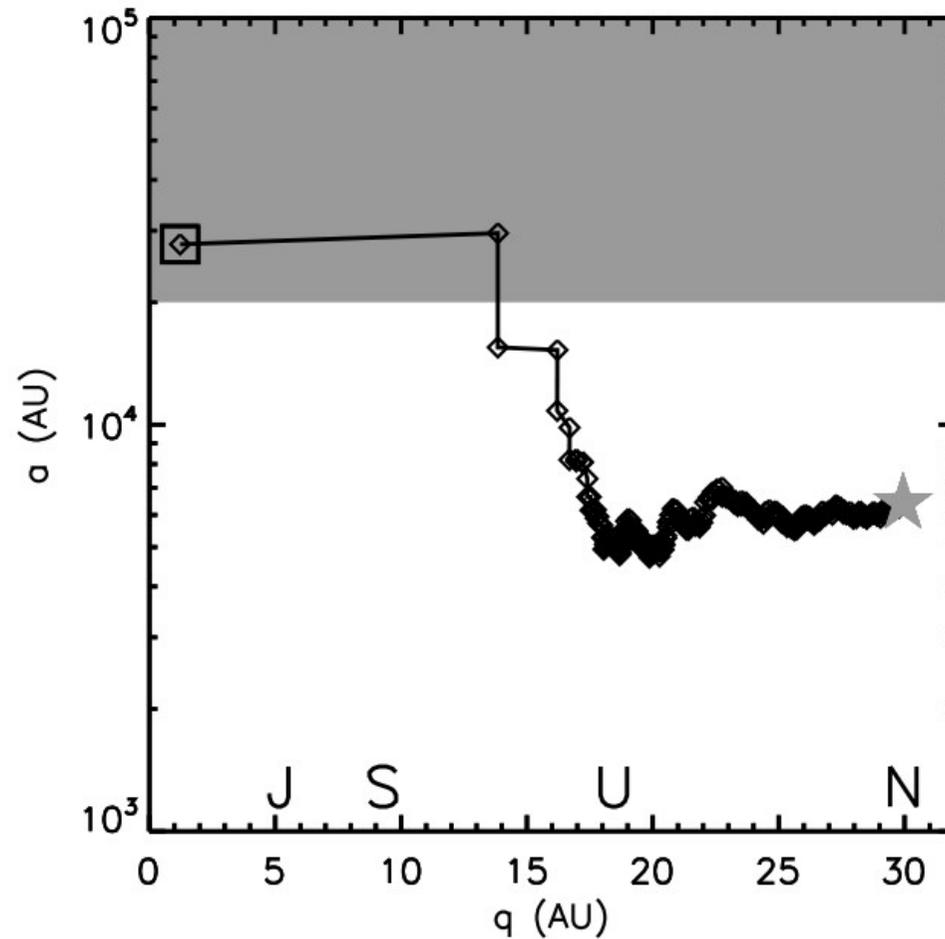
$q_i$ ,  $q_f$ : son las distancias perihélicas inicial y final,  $\alpha$  es el ángulo entre el plano de la órbita y el plano perpendicular al disco galáctico que contiene el radio vector Sol-cometa.

# Cambio en la distancia perihélica por perturbadores externos



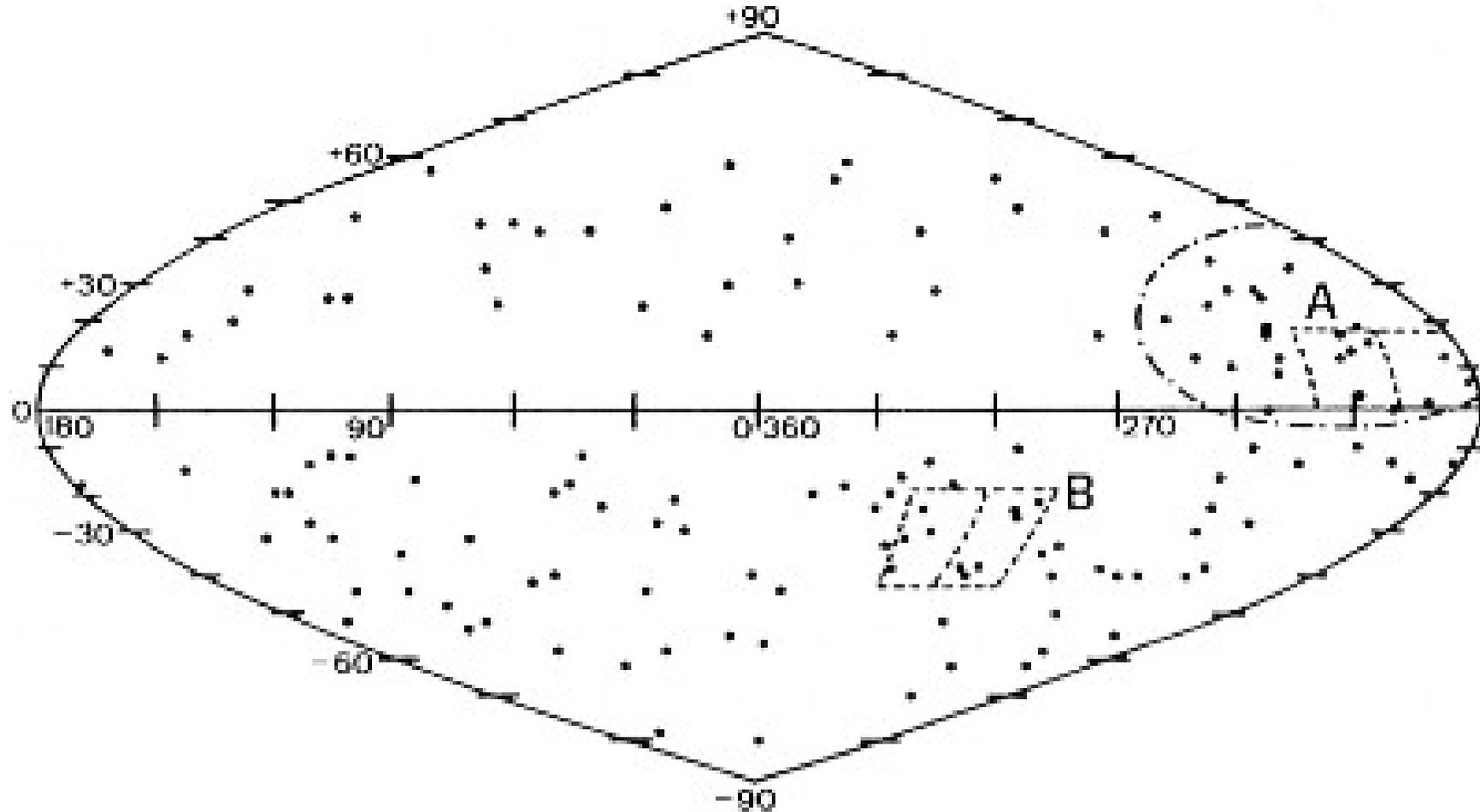
\* Se observa que los efectos de perturbadores externos (estrellas vecinas, fuerza de marea galáctica) comienza a ser significativo para semiejes mayores  $a \gtrsim 10^4$  ua.

## Desde la nube de Oort a la región planetaria interior



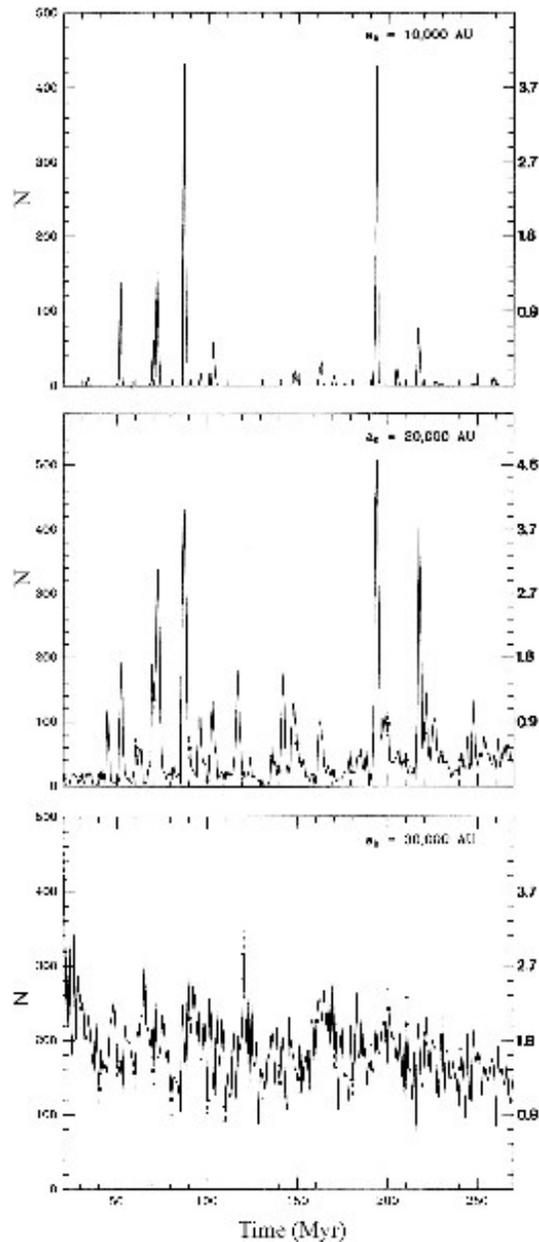
El cometa ficticio comienza en la estrella y finaliza en el cuadrado (Kaib & Quinn 2009).

## Anomalías en la distribución de afelios cometarios



Los agrupamientos de afelios anómalos que se muestran en el mapa podrían revelar pasajes muy próximos de estrellas en el pasado reciente (Fernández & Ip 1991).

# “Lluvias cometarias”



Un pasaje estelar muy cercano puede perturbar la nube de Oort de tal manera de provocar un aumento importante en la tasa de inyección de cometas en la región planetaria, lo que denominamos una “lluvia cometaria” (*comet shower*).

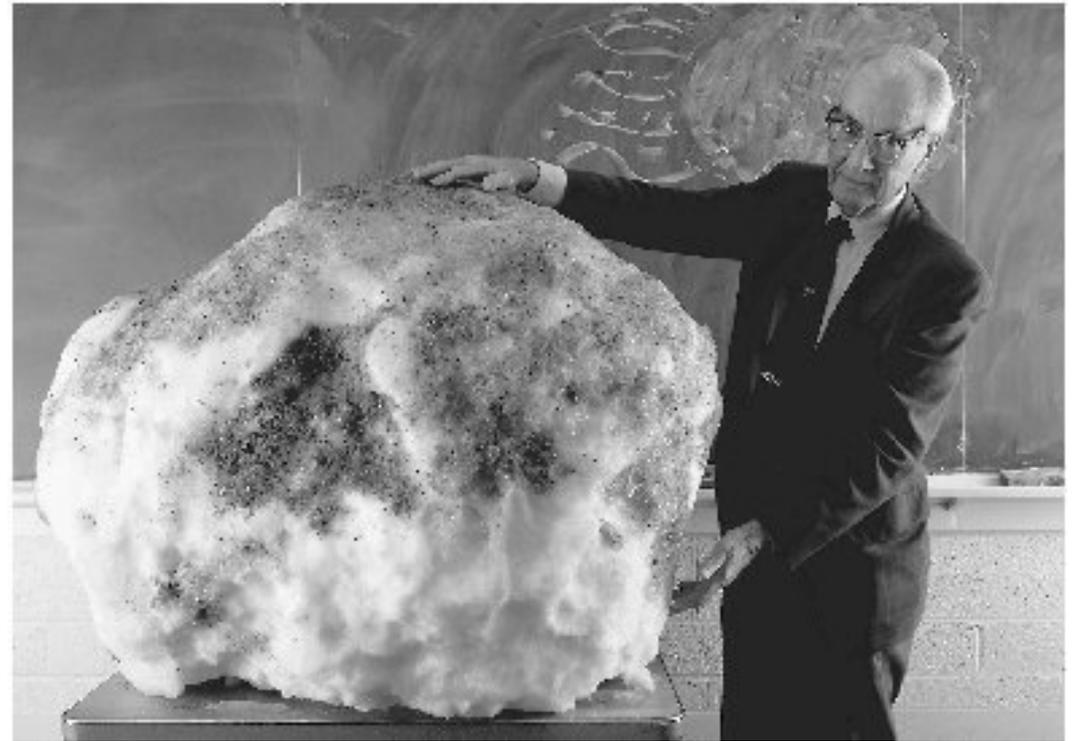
¿Pudo la Tierra haber sufrido estas lluvias cometarias provocando alguna de las extinciones masivas que conocemos en la historia de la Tierra?



# El modelo de Fred Whipple de la “bola de nieve sucia” (*“dirty snowball model”*)

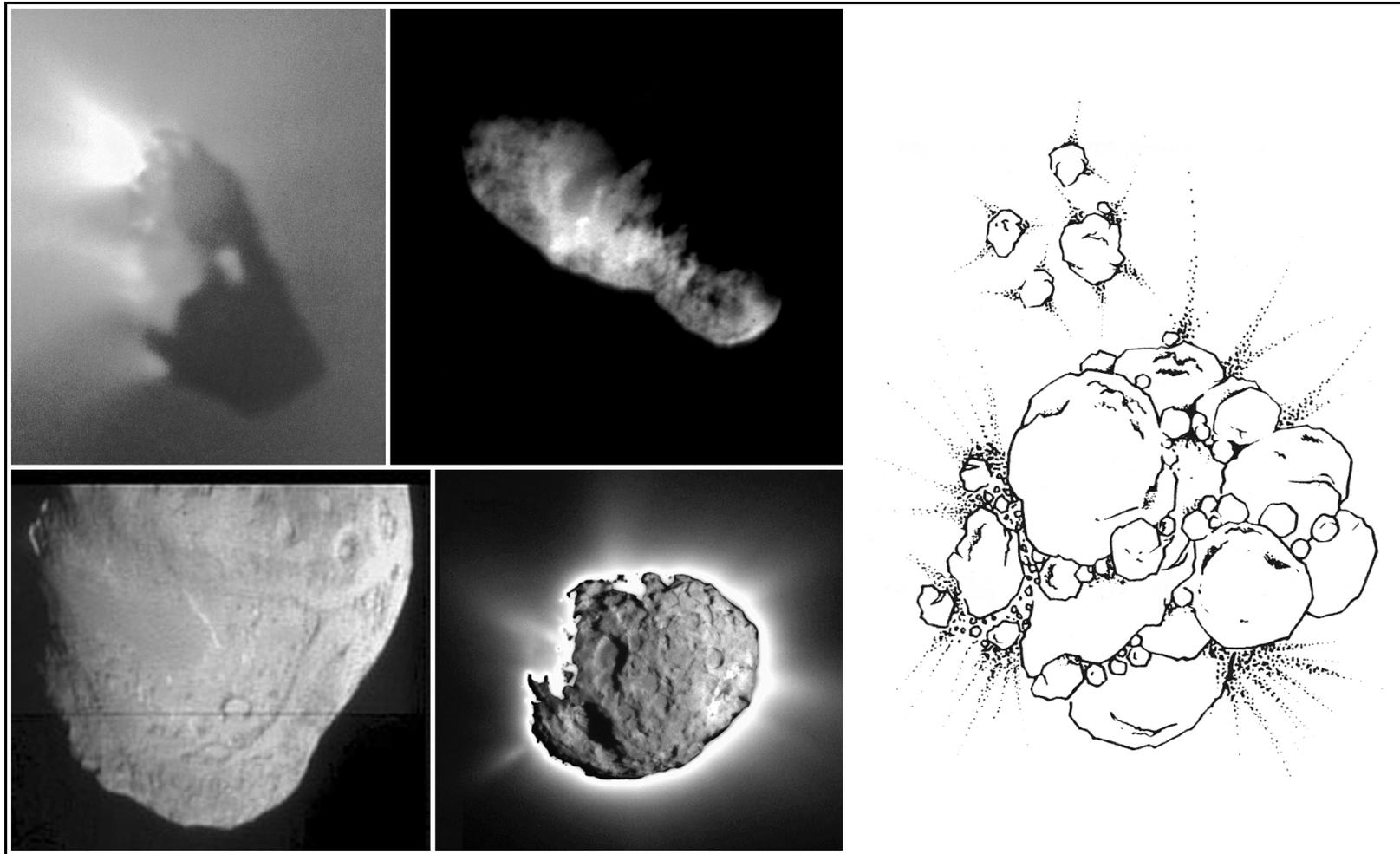


Concepción artística del núcleo cometario según el modelo de Whipple en boga en los años 1970.



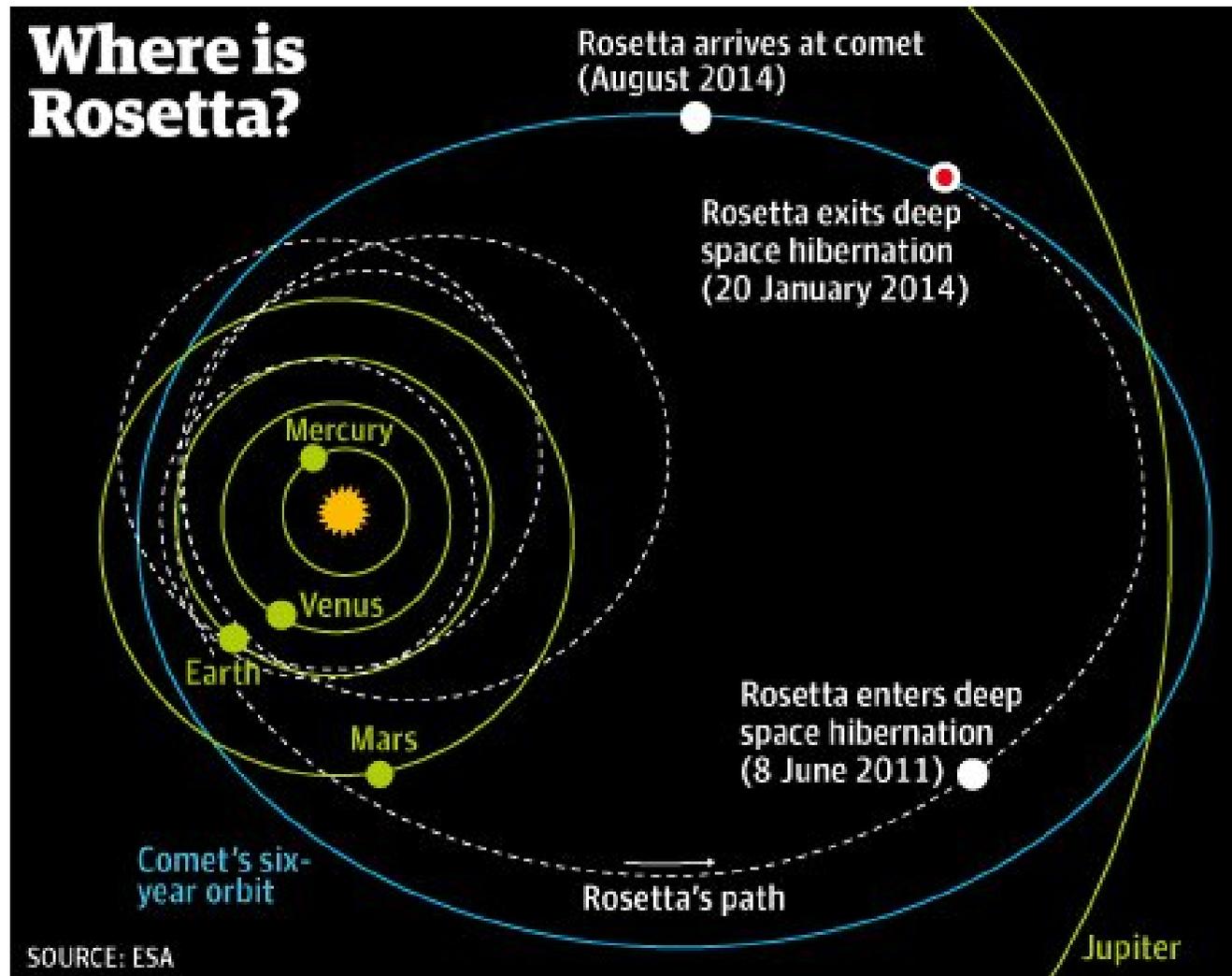
Fred Whipple muestra su modelo de bola de nieve sucia consistente en una bola de nieve de 250 kg cubierta con suciedad.

# Núcleos cometarios observados desde sondas espaciales



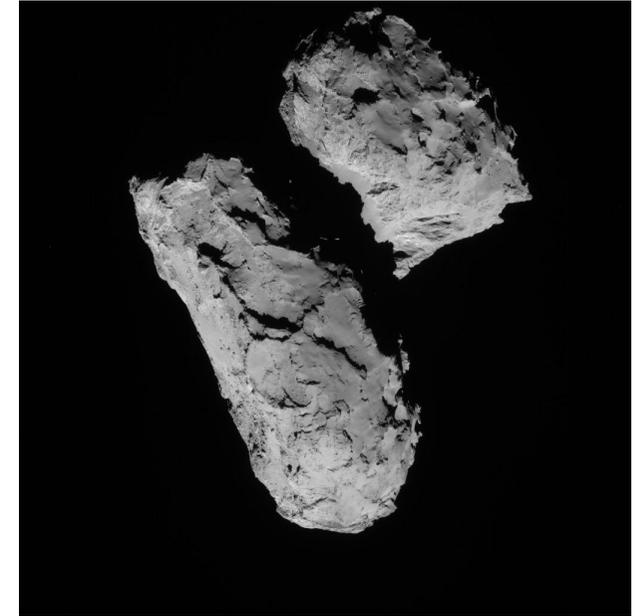
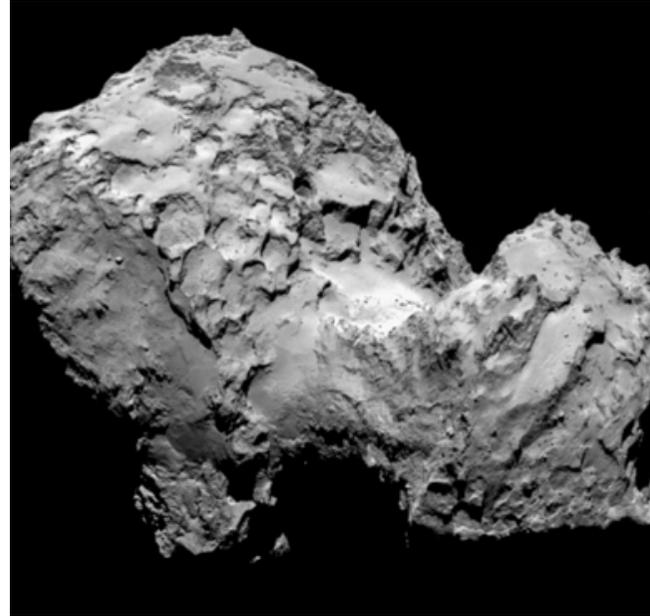
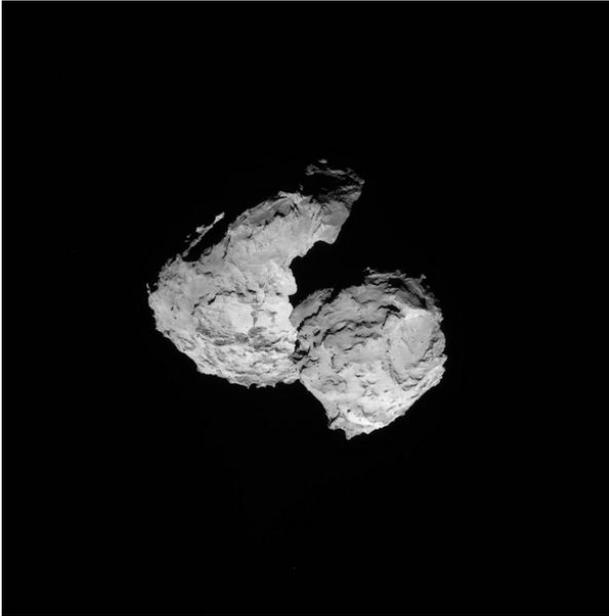
Imágenes de los cometas Halley, Borrelly, Tempel 1 y Wild 2 tomadas desde sondas espaciales a corta distancia (izquierda). El “modelo de pila de escombros” (*“rubble-pile”*) (Weissman 1986) (derecha).

# La misión Rosetta



La misión *Rosetta* de ESA fue lanzada en 2004 al cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko en un viaje de 10 años.

## Imágenes del cometa Churyumov-Gerasimenko

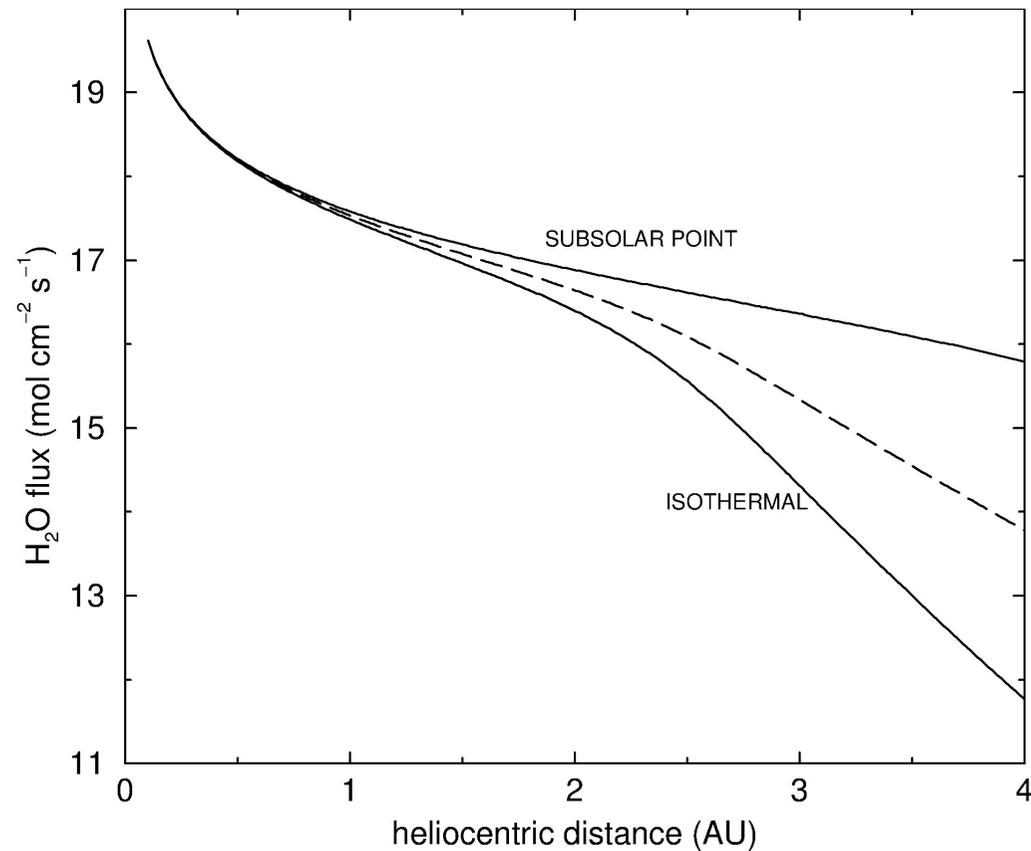


Las imágenes muestran que el núcleo consiste de 2 lóbulos unidos en un cuello. El cometa tiene aproximadamente 4 km de longitud. Presumiblemente se fragmentó en una colisión y luego los fragmentos más grandes se reacumularon.

# Aspectos físicos

\* La ecuación de equilibrio térmico:

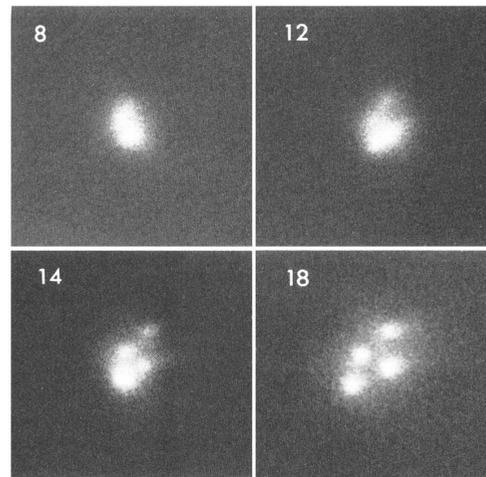
$$(1 - A_v) \frac{F_{\odot} e^{-\tau}}{r_{AU}^2} \pi R_N^2 = 4\pi R_N^2 (1 - A_{IR}) \sigma T^4 + \frac{QLS}{N_A} + 4\pi R_N^2 \kappa(T) \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0}$$



## *Outbursts y splittings* de núcleos cometarios



Incremento de brillo espectacular ( $\sim 14$  magnitudes) del JFC 17P/Holmes (octubre 2007).



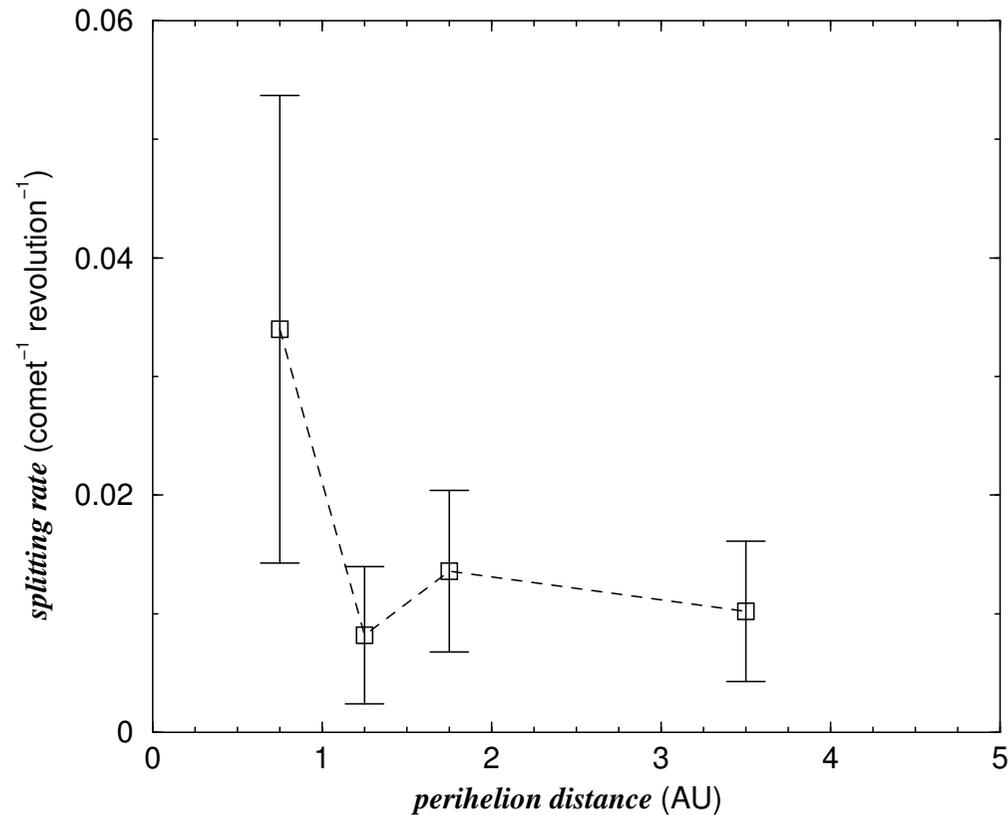
Proceso de fragmentación del cometa C/1975 V1 (West) en 4 pedazos principales entre 8-18/marzo/1976 (New Mexico State University, Las Cruces).

## Frecuencia de *splittings*

JFCs  $\sim 1$  *splitting* / cometa cada  $\sim 77$  revoluciones

LPCs  $\sim 1$  *splitting* / cometa cada  $\sim 25$  revoluciones (Fernández 2005)

¿Hay alguna correlación con la distancia heliocéntrica?

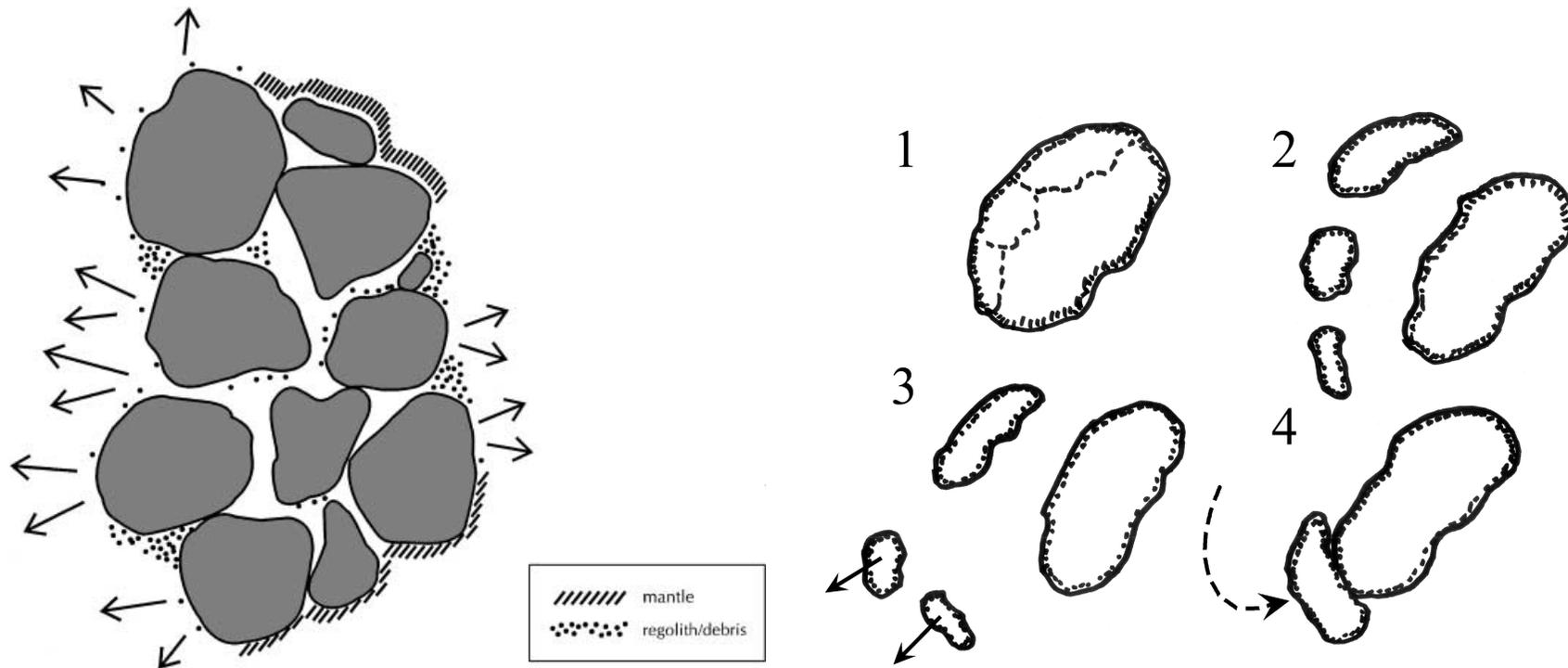


Número de *splittings* observados en función de la distancia heliocéntrica.

## Posibles causas de *splittings* y *outbursts*

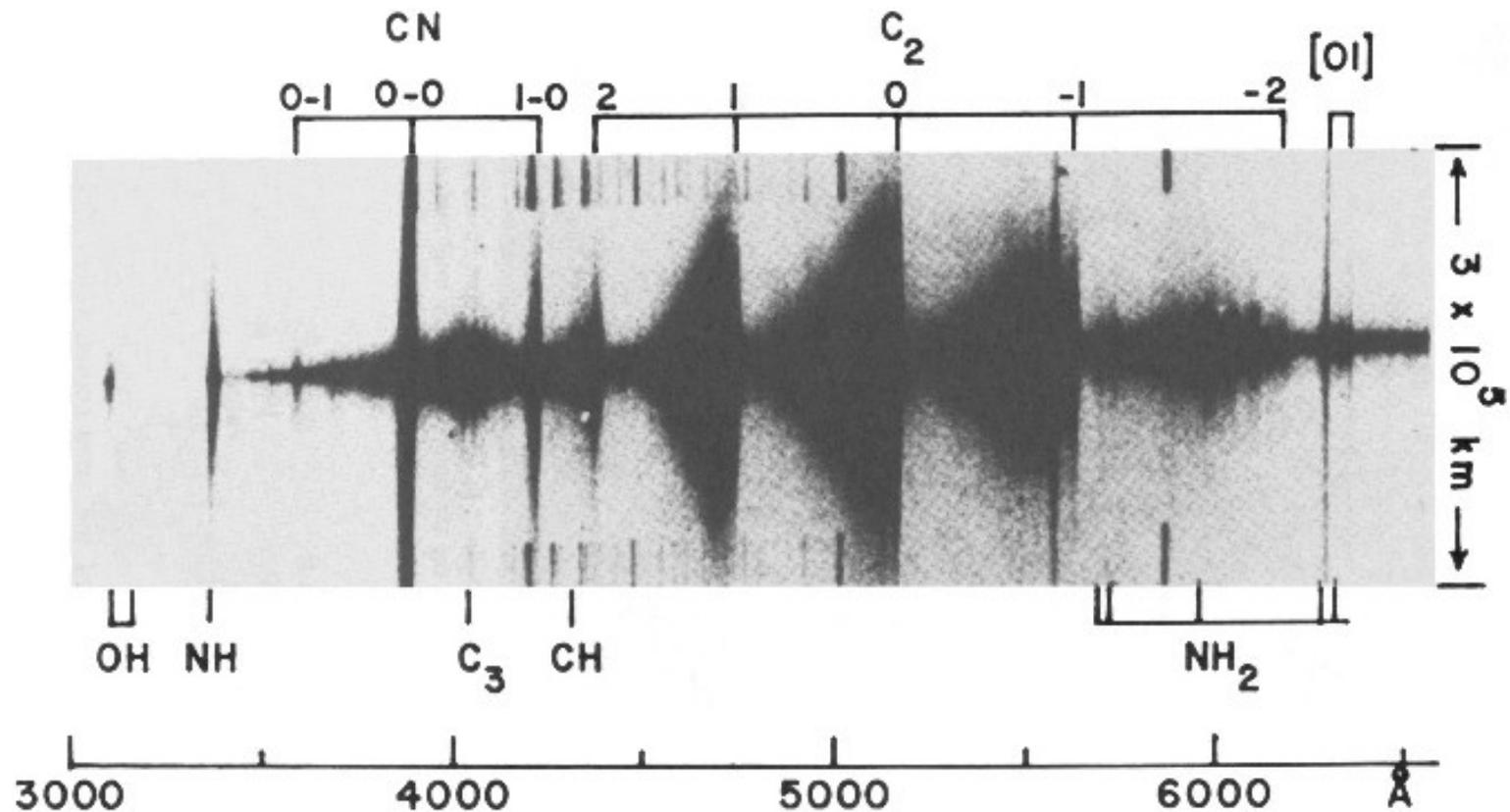
- \* Fuerza de marea del Sol, Júpiter o un planeta terrestre.
- \* Transición de fase de hielo amorfo a cristalino.
- \* Sublimación de bolsillos de un material muy volátil (p. ej. CO, CO<sub>2</sub>).
- \* Tensiones térmicas que causan fracturas.
- \* Alta velocidad de rotación del núcleo cometario conduciendo a inestabilidad rotacional.
- \* Actividad solar.
- \* Colisiones con meteoroides.
- \* Colisiones con fragmentos del propio núcleo.

## Generación de presión interna y fragmentación



Fragmentación de un núcleo “rubble pile” debido al incremento de la presión de gases que no pueden escapar libremente a través del manto de regolito (lado derecho). Si no hubiera manto de regolito, los gases escaparían previniendo el aumento de presión (lado izquierdo) (Samarasinha 2001).

# Espectros cometarios



Espectrograma del cometa C/1975 N1 (Kobayashi-Berger-Milon) que muestra las bandas moleculares principales en el visible y UV cercano. La banda angosta en el medio del espectro a lo largo del eje  $\lambda$  es el continuo producido por la difusión de luz solar por las partículas de polvo en la coma interior (radio  $\sim 10^4$  km) (Wyckoff 1982).

## Composición química

### Abundancias relativas de especies moleculares en cometas

Molécula	Fracción de masa
H <sub>2</sub> O	~ 100
CO	~ 7-8
CO <sub>2</sub>	~ 3
H <sub>2</sub> CO	~ 0-5 (formaldehído)
NH <sub>3</sub>	~ 1-2
HCN	~ < 0.02-0.1
CH <sub>3</sub> OH	~ 1-5 (metanol)

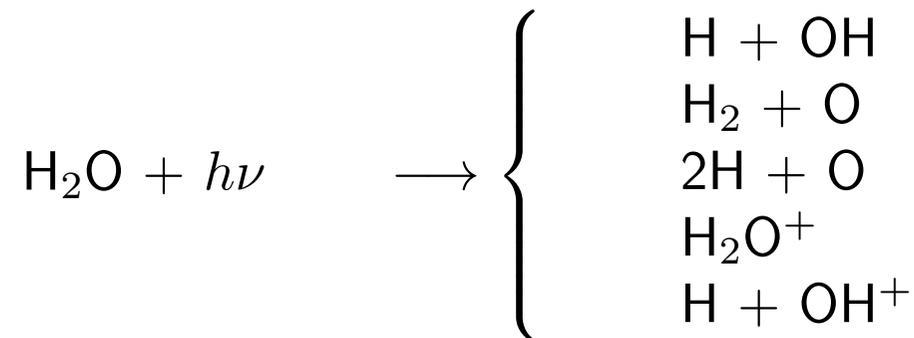
Otras moléculas detectadas de interés biológico :

HNCO, HC<sub>3</sub>N, OCS, H<sub>2</sub>CS, NH<sub>2</sub>CHO, HCOOH,  
HCOOCH<sub>3</sub>, CH<sub>3</sub>CHO, HNC, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>

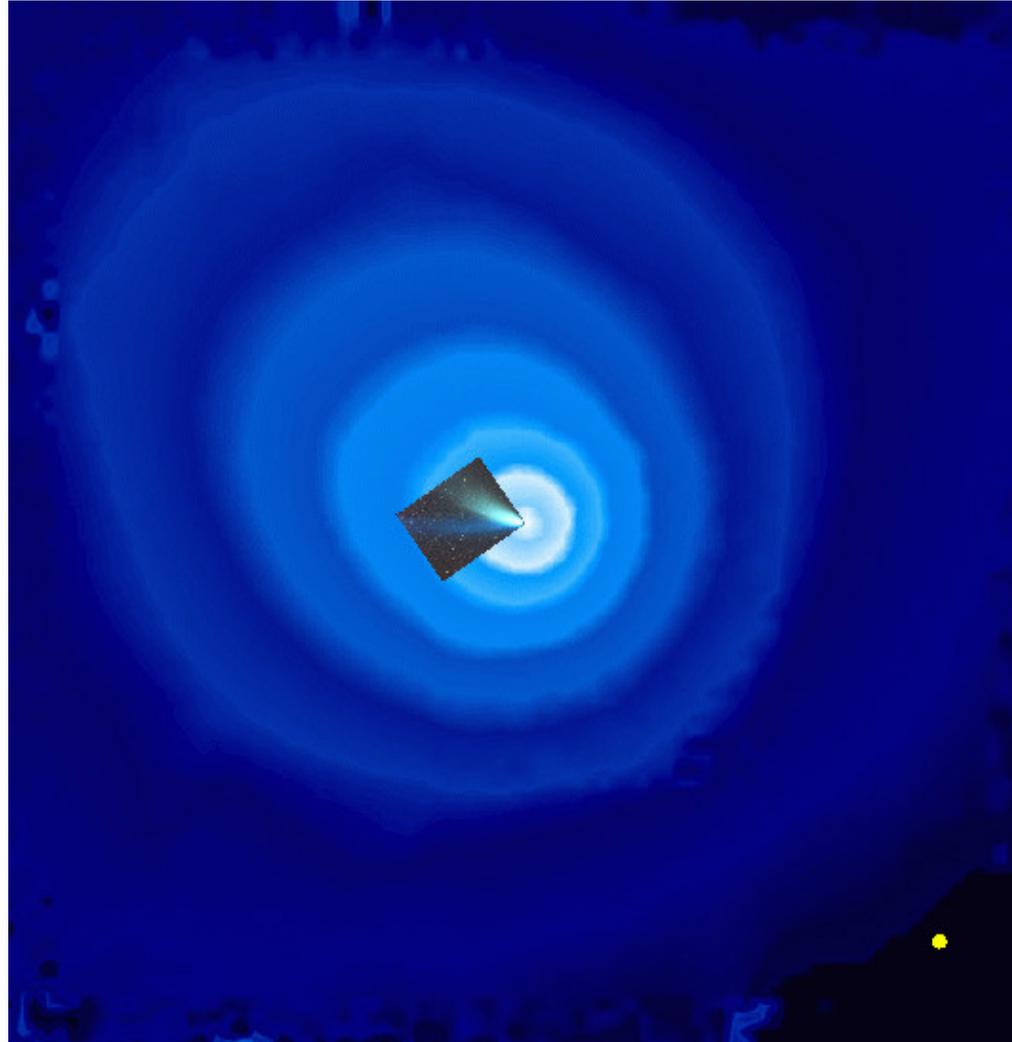
## La distribución de moléculas madres y radicales en la coma

Los radicales observados en el espectro cometario no pueden existir en estado libre. Ellos se producen cuando las moléculas madres sublimadas son fotodisociadas e ionizadas bajo la acción de la radiación UV del Sol.

Tomemos el ejemplo de la molécula madre más importante: H<sub>2</sub>O. Su fotodisociación conduce a los siguientes productos:

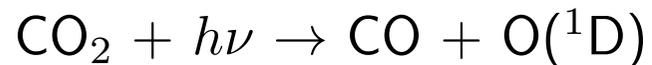


donde  $h\nu$  representa la energía del fotón. Un porcentaje del 85.5% de las moléculas de agua son disociadas en H y OH. La conclusión es que un cometa debe estar rodeado de una inmensa corona de átomos de hidrógeno.



Corona de hidrógeno alrededor del cometa Hale-Bopp cuando se aproximó al Sol en 1997. La imagen en UV fue obtenida por el instrumento SWAN a bordo de la sonda SOHO. La corona ocupa una extensión de alrededor  $10^8$  km.

Otro ejemplo interesante es:



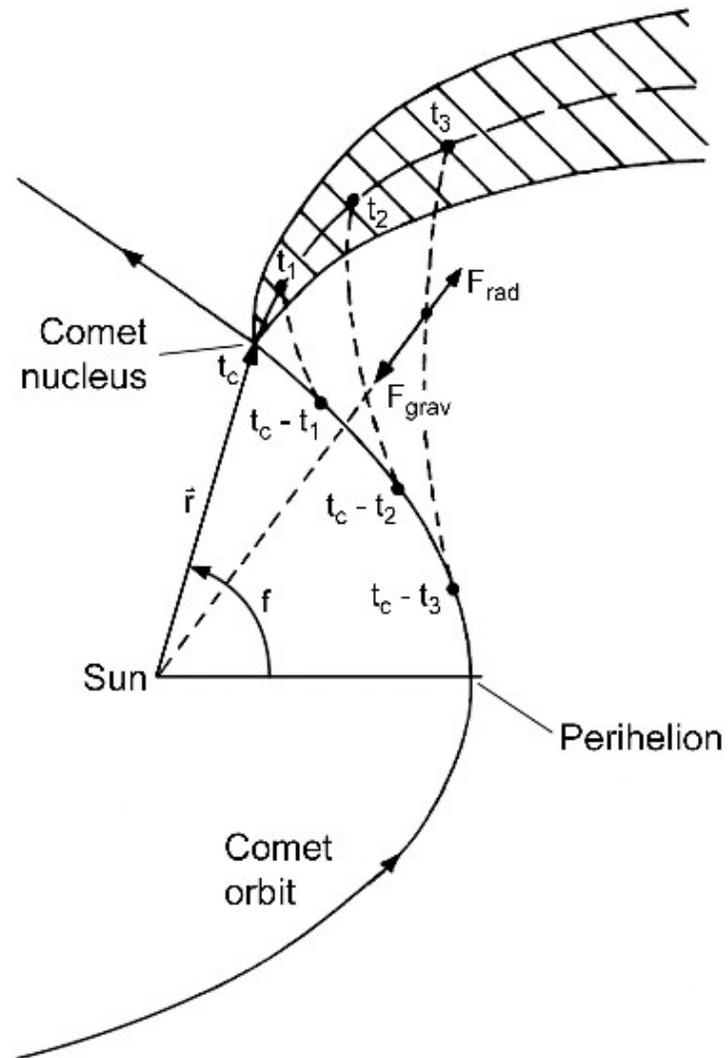
donde el oxígeno queda en el estado excitado  $^1\text{D}$  desde el cual es desexcitado emitiendo radiación fluorescente en la línea roja a 6300 Å.

## Formación de la cola de iones



La descomposición de las moléculas madres y la fotoionización lleva a la producción de muchos iones diferentes, en particular  $\text{CO}^+$ ,  $\text{N}_2^+$ ,  $\text{CH}^+$ ,  $\text{CO}_2^+$ , y  $\text{H}_2\text{O}^+$ . Los iones producidos son atrapados por las líneas de fuerza de los campos magnéticos asociados al viento solar y arrastrados en la dirección opuesta al Sol formando la cola de iones. El color azul es debido a la radiación fluorescente emitida por el ion  $\text{CO}^+$ .

# La cola de polvo



# Cometas de la familia de Júpiter (JFC)

## Definición:

Primer criterio: Período orbital  $P < 20$  años.

El criterio del período no es suficiente, es necesario otro criterio asociado a la fuente (la región trans-neptuniana). Con este fin vamos a requerir también que **el parámetro de Tisserand con respecto a Júpiter  $T_J$  esté en el rango:  $2 < T_J < 3$** . El parámetro de Tisserand es un cuasi-invariante en el problema restringido de 3 cuerpos (Sol-Júpiter-cometa) dado por

$$T_J = \frac{a_J}{a} + 2 \cos i \left[ \frac{q}{a_J} \left( 2 - \frac{q}{a} \right) \right]^{1/2}$$

donde  $q$ ,  $a$ ,  $i$  son la distancia perihélica, semieje mayor e inclinación del objeto, y  $a_J$  es el radio de la órbita de Júpiter asumiendo que es circular.

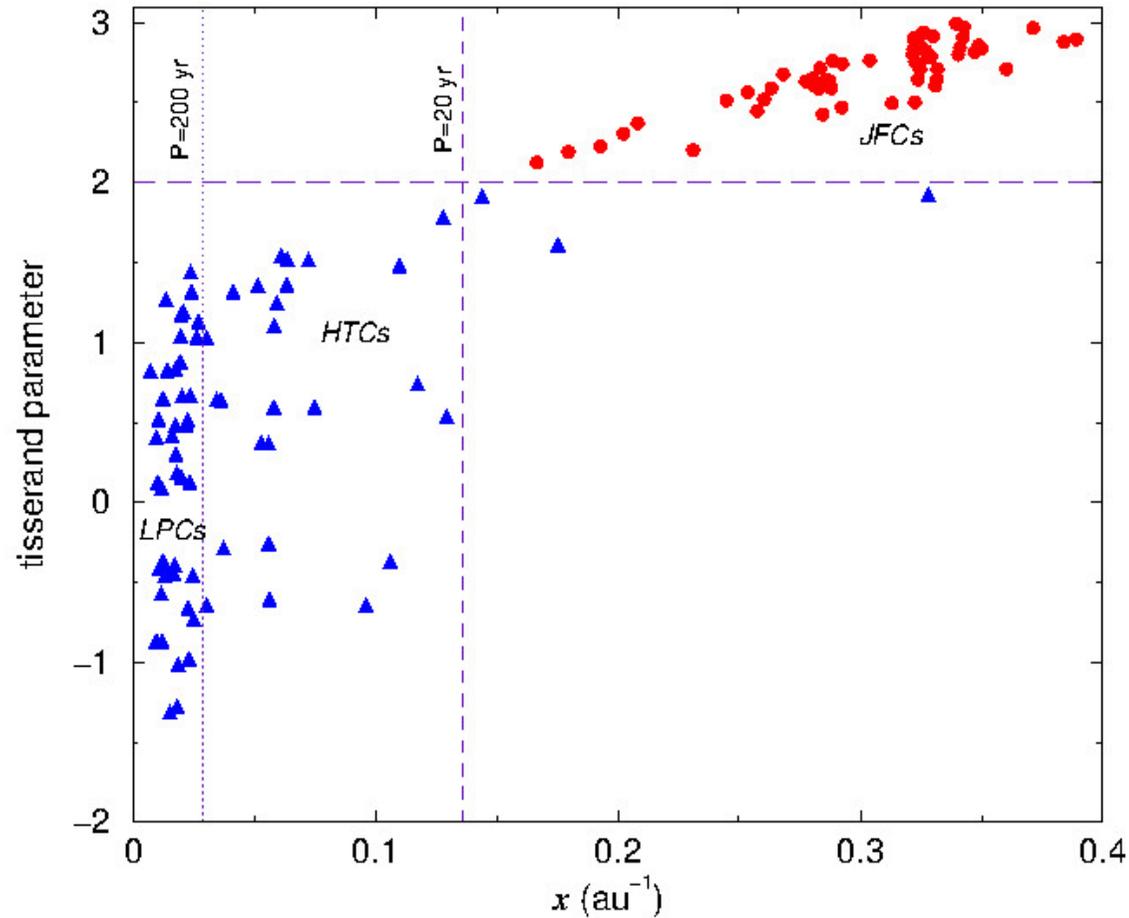
La velocidad de encuentro  $U$  de un objeto con respecto a Júpiter se puede expresar como

$$U = (3 - T_J)^{1/2}$$

donde  $U$  se expresa en unidades de la velocidad orbital de Júpiter. Encuentros con Júpiter son posibles sólo si  $T_J < 3$ .

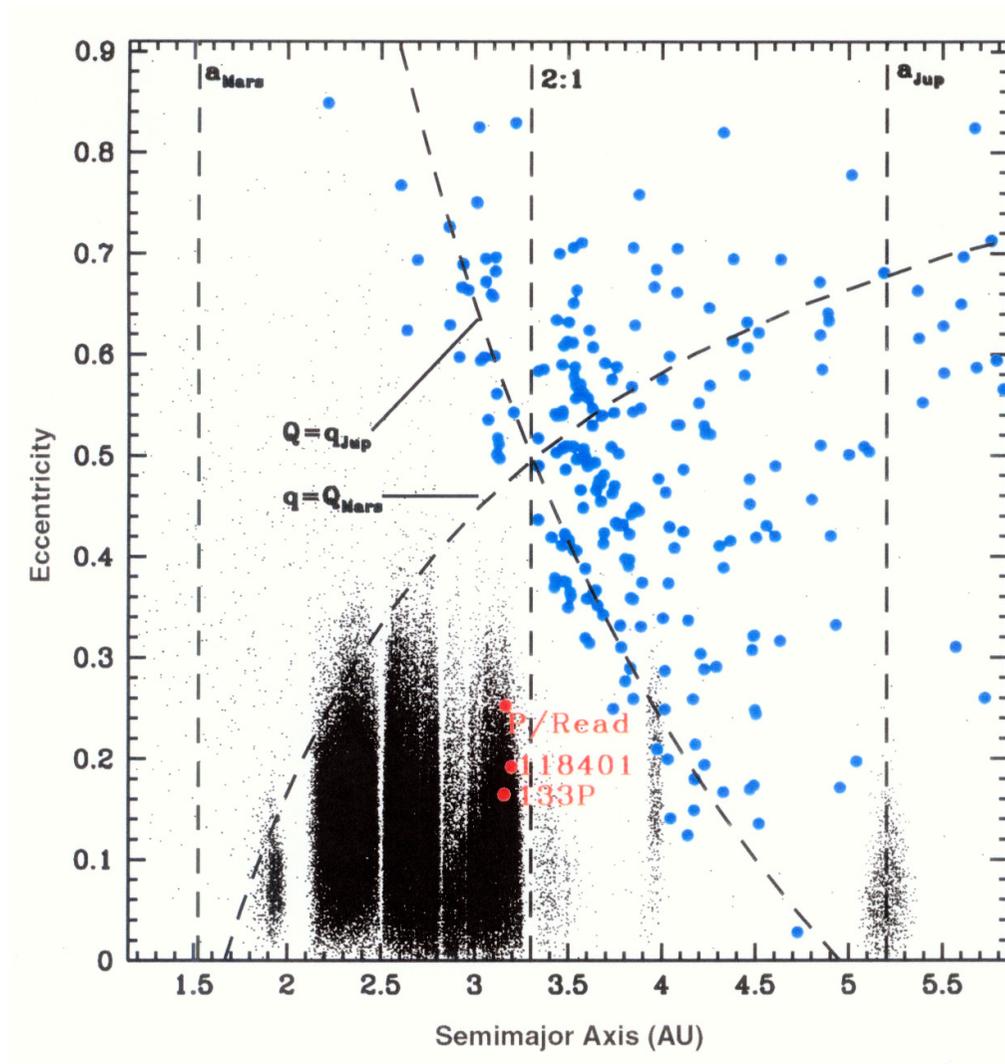
- \* La gran mayoría de asteroides tienen  $T_J > 3$ .
- \* LPCs y HTCAs tienen  $T_J < 2$ .

# Localización de LPCs, HTCs y JFCs en el plano de energías y parámetros de Tisserand



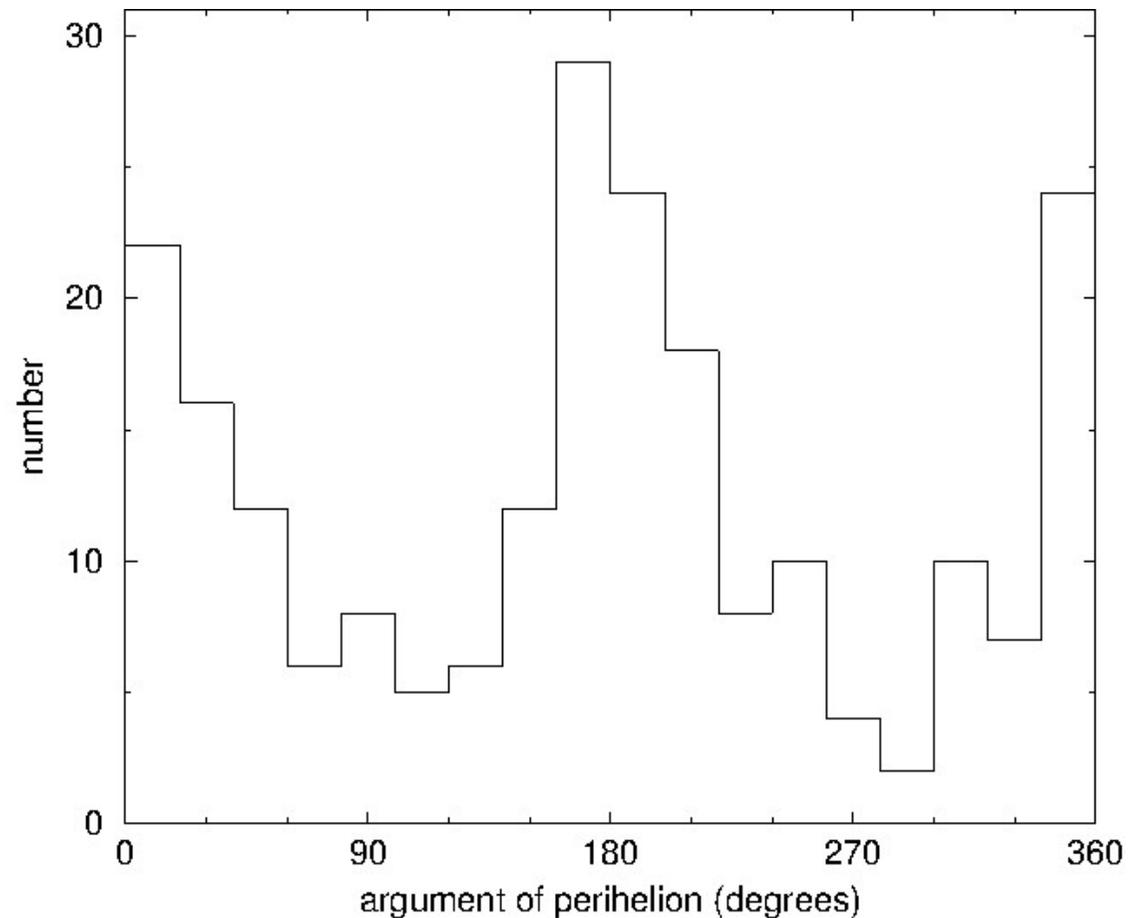
Cometas que alcanzan la vecindad de la Tierra (distancias perihélicas  $q < 1.3$  ua)

# Localización de asteroides y JFCs en el plano $(a, e)$



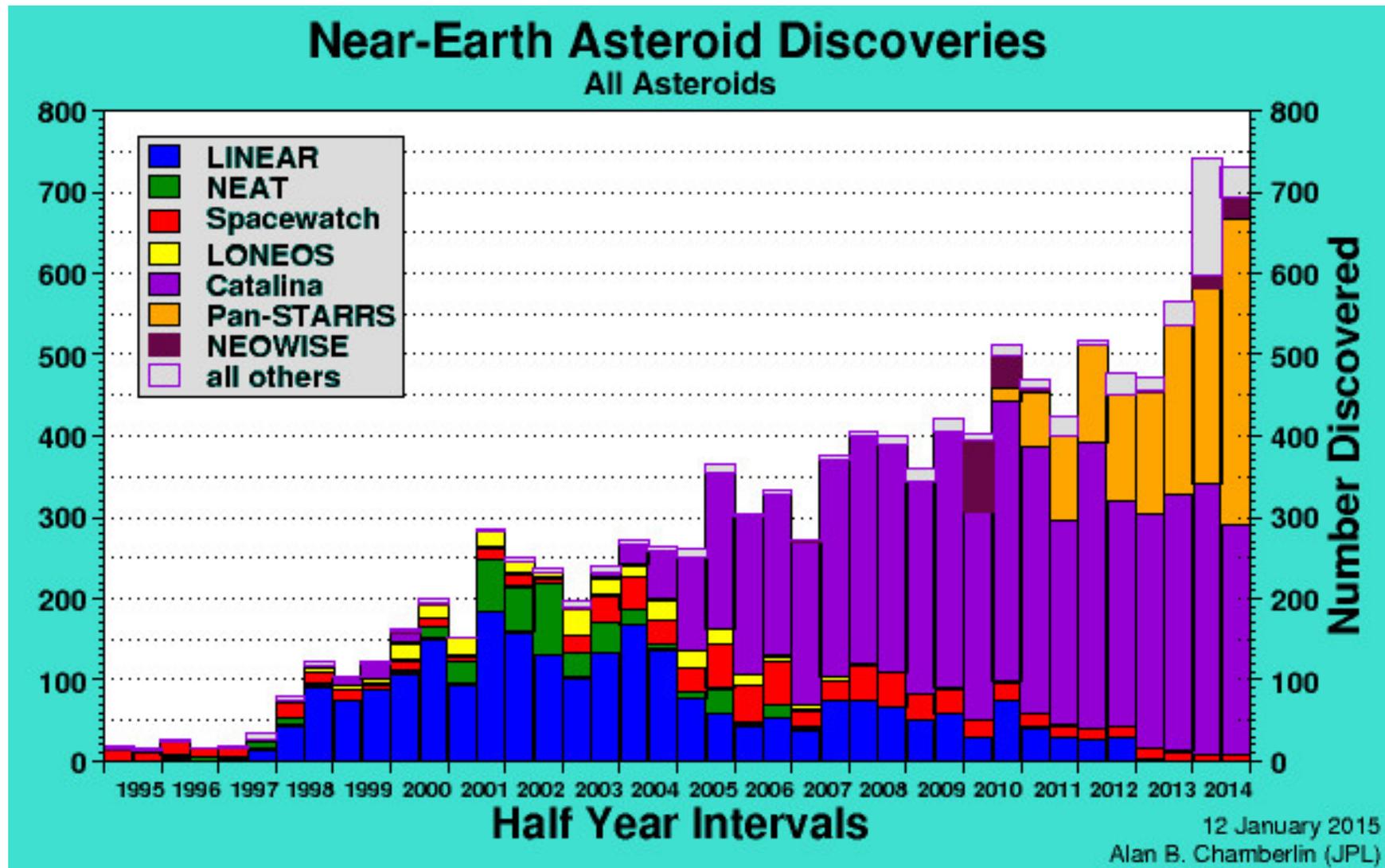
Hsieh & Jewitt (2006)

# Distribución de los argumentos del perihelio de los JFCs



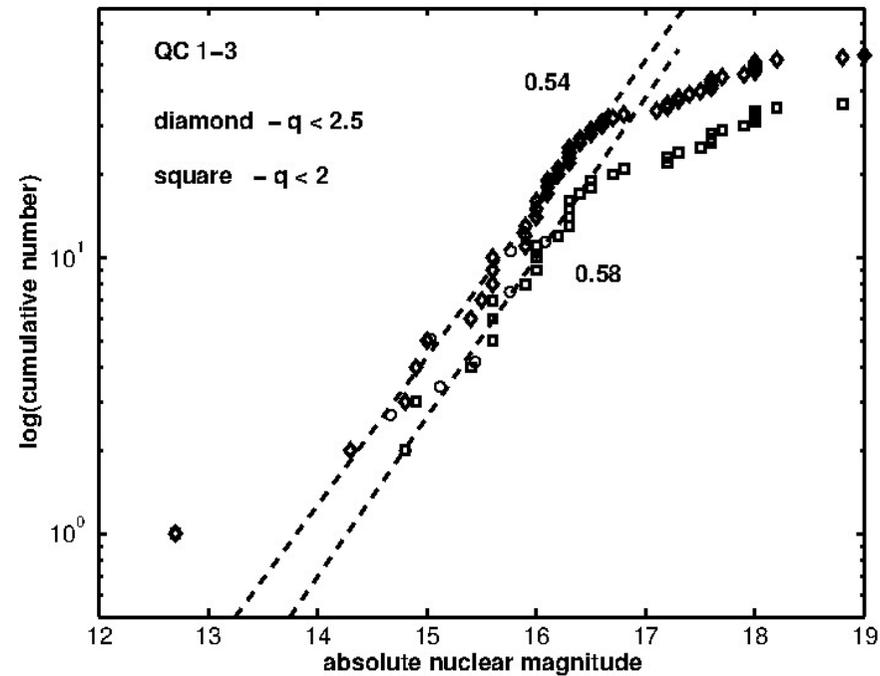
Se observan aglomeraciones alrededor de  $\omega = 0^\circ$  y  $\omega = 180^\circ$ , lo que permite la ocurrencia de frecuentes encuentros próximos con Júpiter.

# Contribución de los diferentes programas de búsqueda de NEOs



(Alan B. Chamberlain, JPL)

# Distribución de tamaños



La función cumulativa de luminosidad sigue una relación lineal del tipo (Tancredi et al. 2006)

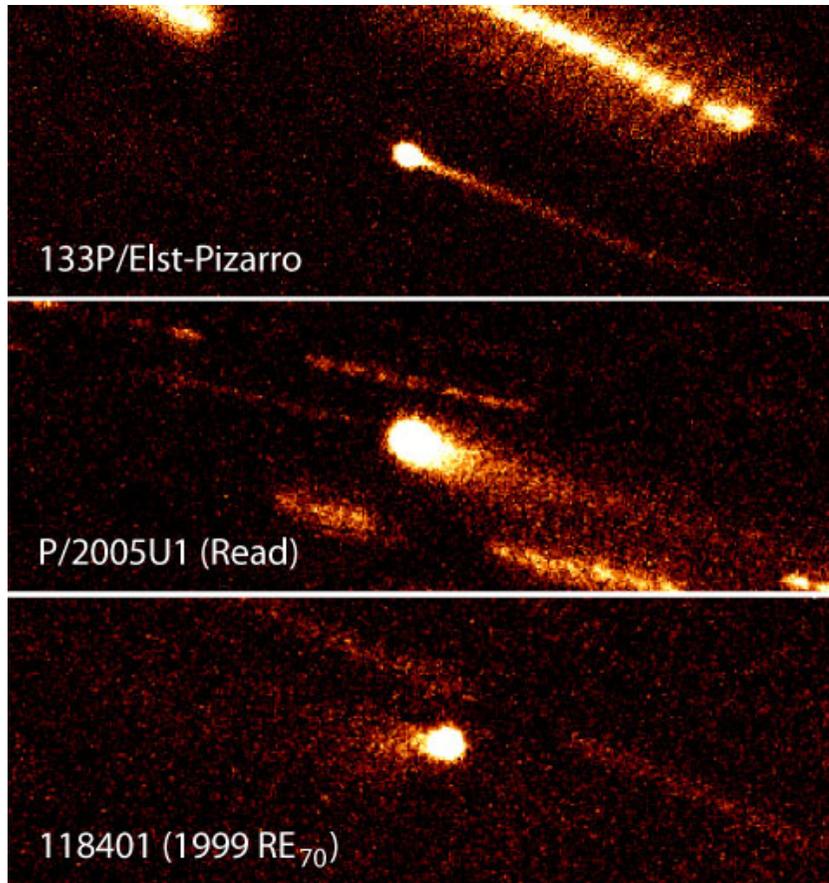
$$\log N_c(H_N) = C + \gamma H_N$$

Tomando en cuenta que  $H_N = k - 2.5 \log B_N$ ,  $B_N \propto R_N^2$  y  $\gamma \simeq 0.56$ , nos queda

$$N(> R_N) \propto R_N^{-2.8}$$

## Cometas del cinturón principal *Main Belt Comets*

Antes se suponía que los asteroides del cinturón principal eran inactivos ya que algún volátil sobre su superficie se hubiera sublimado hace mucho tiempo. Fue una sorpresa encontrar asteroides activos!



Imágenes de los 3 primeros MBCs: 133P/Elst-Pizarro, P/2005 U1 (Read), y 118401 (1999 RE70) (imágenes de Henry Hsieh & David Jewitt, University of Hawaii).

## Mecanismos de activación de MBCs

Se han propuesto varios mecanismos para explicar la repentina activación de asteroides. Ya que ellos han estado presumiblemente en el cinturón principal por toda la vida del sistema solar (4.6 Ga), tales mecanismos deben actuar sólo esporádicamente a fin de explicar su supervivencia por períodos de tiempo tan largos mechanisms. Hay 2 mecanismos favorecidos:

### (a) Inestabilidad rotacional

### (a) Colisión con un meteoroide: experimento con la sonda *Deep Impact*



Impactor :  $M = 370$  kg

Velocidad de impacto :  $V = 10.3$  km/s

Energía ciética :  $\frac{1}{2}MV^2 = 2 \times 10^{17}$  erg

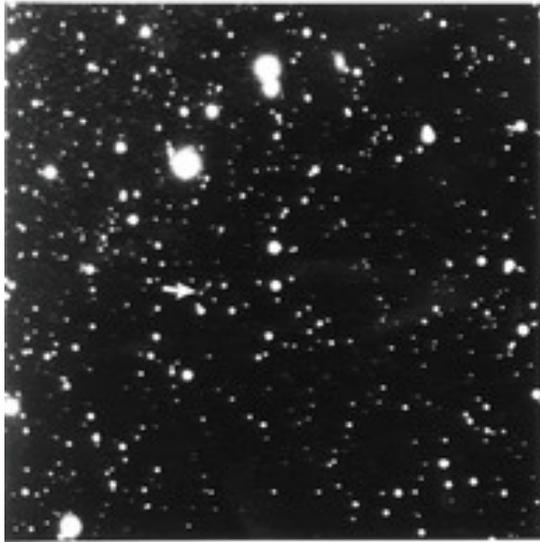
Masa de polvo eyectada :  $\sim 10^{5-6}$  kg (Harker et al. 2005; A'Hearn 2007)

Velocidad media de la masa eyectada :  $\sim 0.25$  km/s

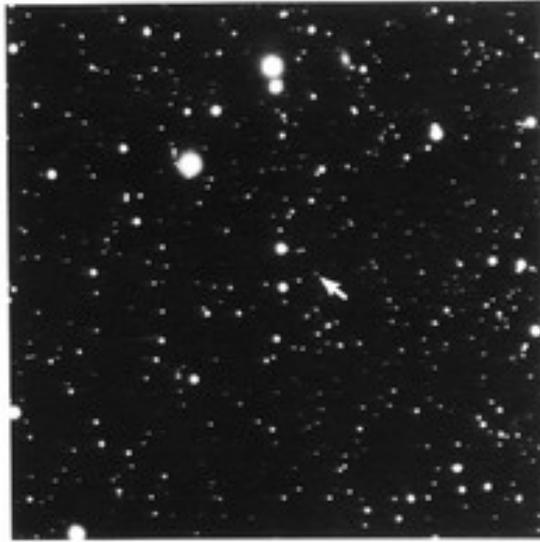
Outburst generado :  $\Delta m_R \simeq 1.5$  mag

# El descubrimiento de Plutón

## DISCOVERY OF THE PLANET PLUTO



January 23, 1930



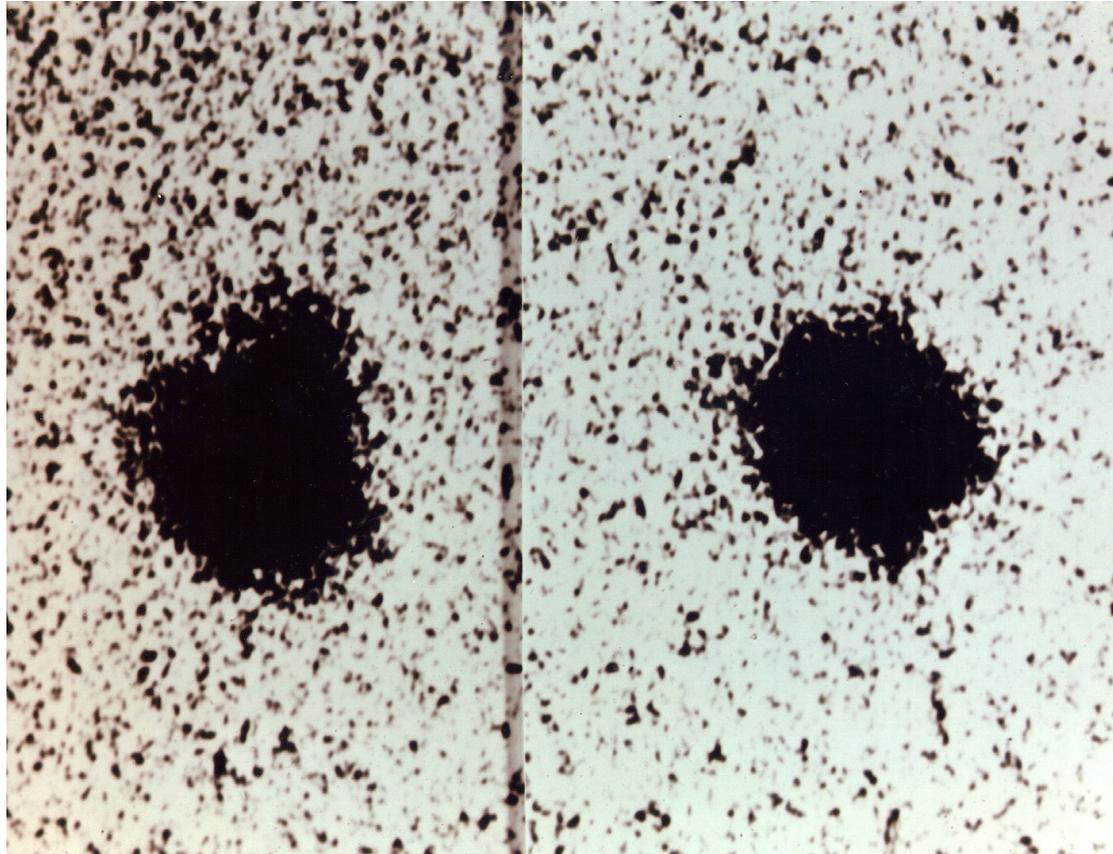
January 29, 1930

Placas del descubrimiento de Plutón



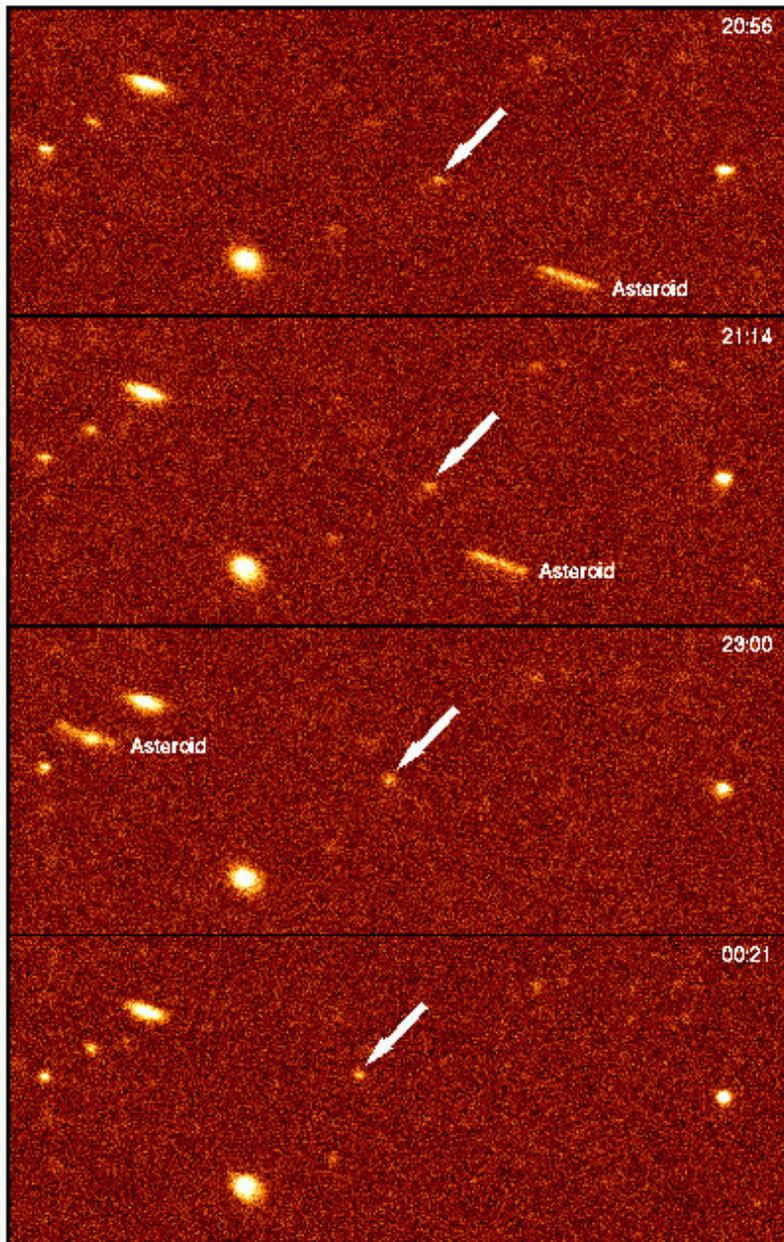
Clyde Tombaugh

## El descubrimiento de Caronte



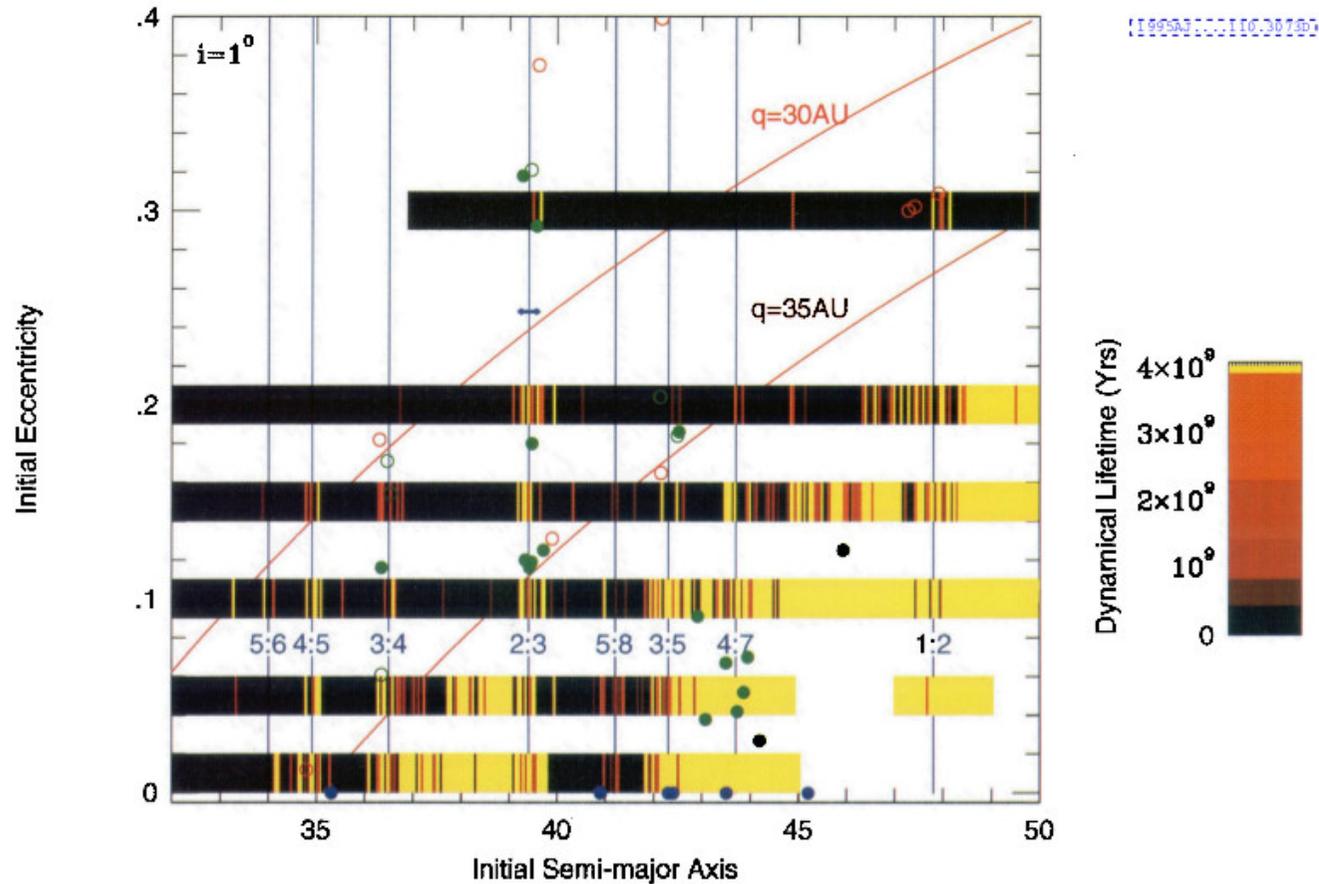
El descubrimiento de Caronte por James Christy (Naval Observatory, Flagstaff Station) como una joroba girando en torno a Plutón (visible en la parte superior de la imagen de la izquierda, ausente en la imagen de la derecha).

# El descubrimiento de los objetos trans-neptunianos (TNOs)



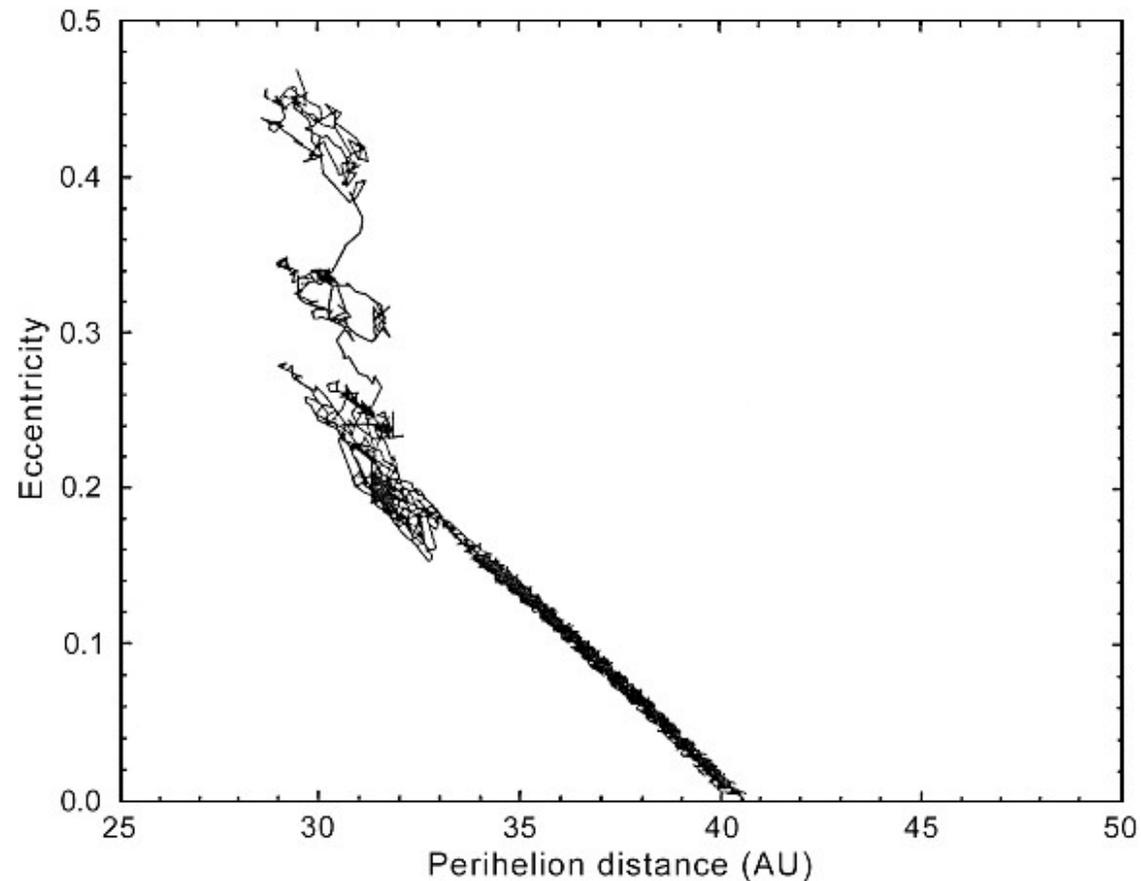
Luego de varios intentos fallidos, el primer TNO (aparte del sistema Plutón-Caronte) fue descubierto por David Jewitt y Jane Luu con el telescopio de 2.2-m de Mauna Kea, Hawaii. Fue designado como 1992 QB<sub>1</sub>.

# Regiones dinámicamente estables e inestables en la región TN



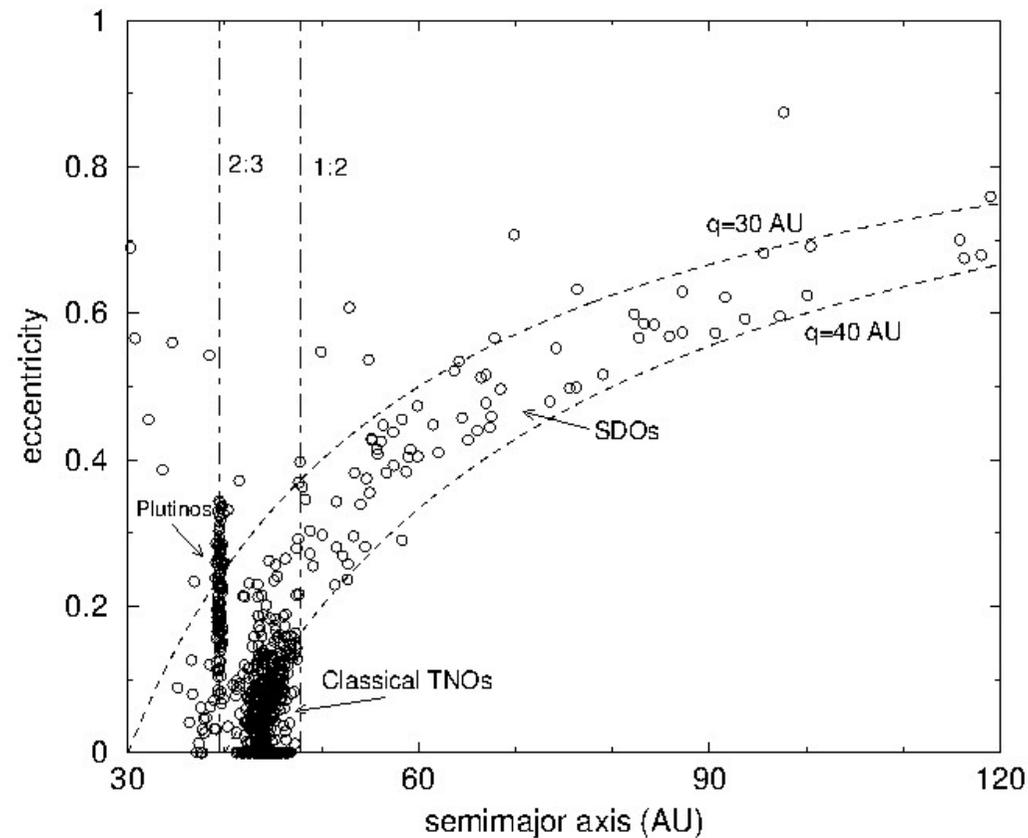
Tiempos de vida dinámicos de partículas ficticias que comienzan con un cierto semieje mayor  $a$  y excentricidad  $e$ , con una inclinación de  $i = 1^\circ$ . Se indican los diferentes tiempos de vida dinámicos con colores diferentes (Duncan, Levison & Budd 1995).

## Transferencia desde la región TN a la región planetaria



Evolución dinámica de un hipotético TNO inicialmente en una órbita casi-circular de radio  $\sim 40$  ua. La resonancia secular  $\nu_8$  (la tasa de precesión del perihelio del objeto iguala la de Neptuno) fuerza un incremento en  $e$  manteniendo constante  $a$  hasta que el objeto cruza la órbita de Neptuno. En ese punto las perturbaciones de Neptuno cambiarán tanto  $e$  como  $a$  (Holman & Wisdom 1993).

## Las diferentes clases dinámicas



Distribución de los TNOs observados en un mapa  $(e, a)$ . Se muestra la localización de las resonancias 2:3 y 1:2, así como las curvas correspondientes a objetos con  $q = 30$  au y  $q = 40$  ua. El mapa permite distinguir las diferentes clases dinámicas de TNOs: cinturón clásico (“frío” y “caliente”), Plutinos y Scattered Disc Objects (SDOs) (Fernández, Gallardo & Brunini 2004).

## ¿Cuánta masa contiene la región trans-neptuniana?

La función acumulativa de luminosidad es (Trujillo et al. 2001)

$$\log \Sigma(m_R) = C + \beta m_R$$

donde  $\Sigma(m_R)$  es la densidad de TNOs por grado cuadrado cerca de la eclíptica más brillantes que  $m_R$ , y  $C$ ,  $\beta$  son constantes. A partir de esto podemos obtener la distribución acumulativa de tamaños

$$N_R(R) \propto R^{-s}$$

donde  $N_R(R)$  es el número de objetos con radios  $> R$ .

Trujillo et al. obtienen los siguientes valores:  $\beta = 0.63 \pm 0.06$ , y  $s = 3.15 \pm 0.3$ .

## Tamaño de las diferentes poblaciones

\* TNOs clásicos:  $N_{CTNO}(D > 100km) = 3.8_{-1.5}^{+2.0} \times 10^4$

\* Plutinos:  $N_{Plutino}(D > 100km) \approx 1400$ .

\* 1:2 Resonancia:  $N_{1:2} \approx N_{Plutino}$

\* Proporciones relativas entre las diferentes clases dinámicas:

Clásicos : Scattered : Plutinos : Resonancia 1:2  $\Rightarrow$  1.0:0.8:0.04:0.07

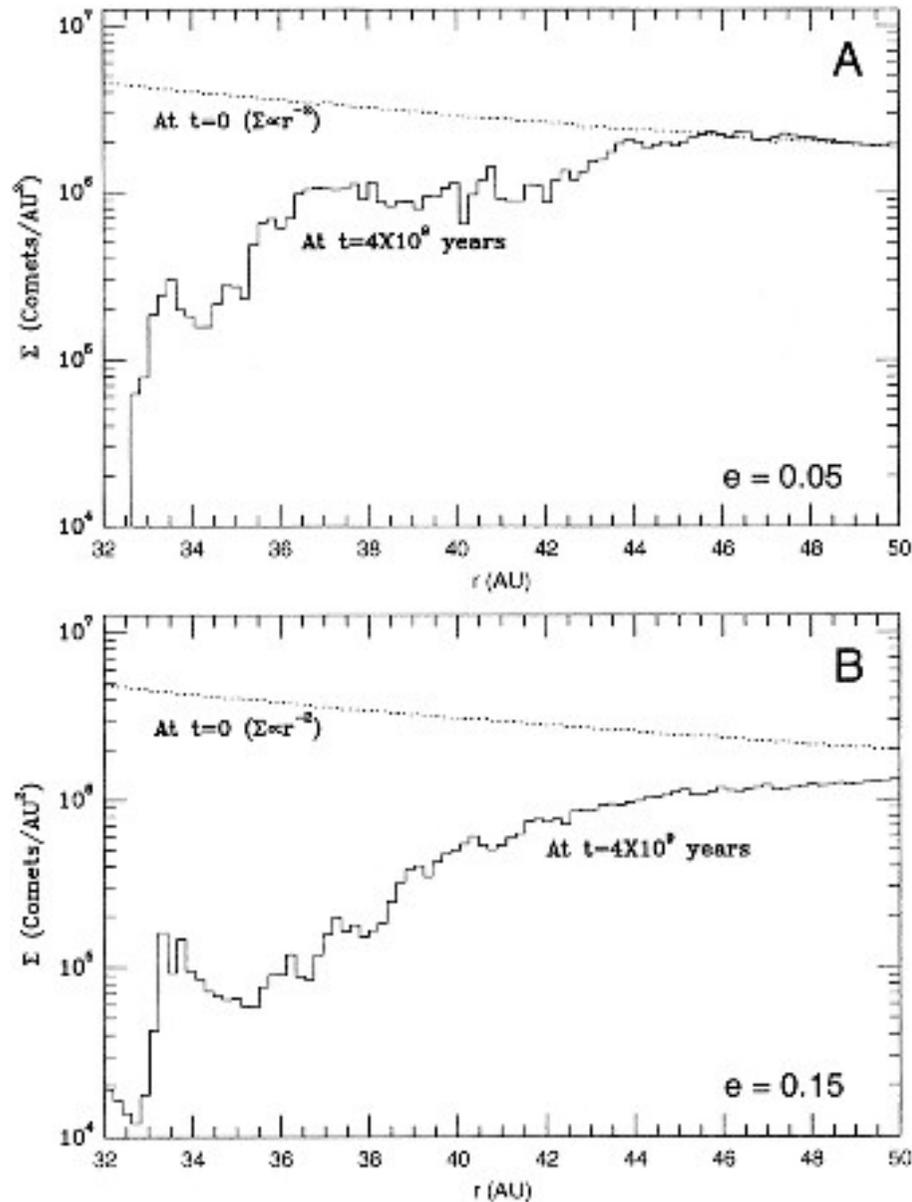
Masa total de TNOs en el cinturón clásico con diámetros  $100 < D < 2000$  km:

$$M_{TNO}(D > 100km) \approx 0.03M_{\oplus} \left( \frac{\rho_{TNO}}{1 \text{ g cm}^{-3}} \right) \left( \frac{0.04}{p_R} \right)^{1.5}$$

donde  $\rho_{TNO}$  es la densidad de masa de TNOs y  $p_R$  es el albedo (rojo) geométrico.

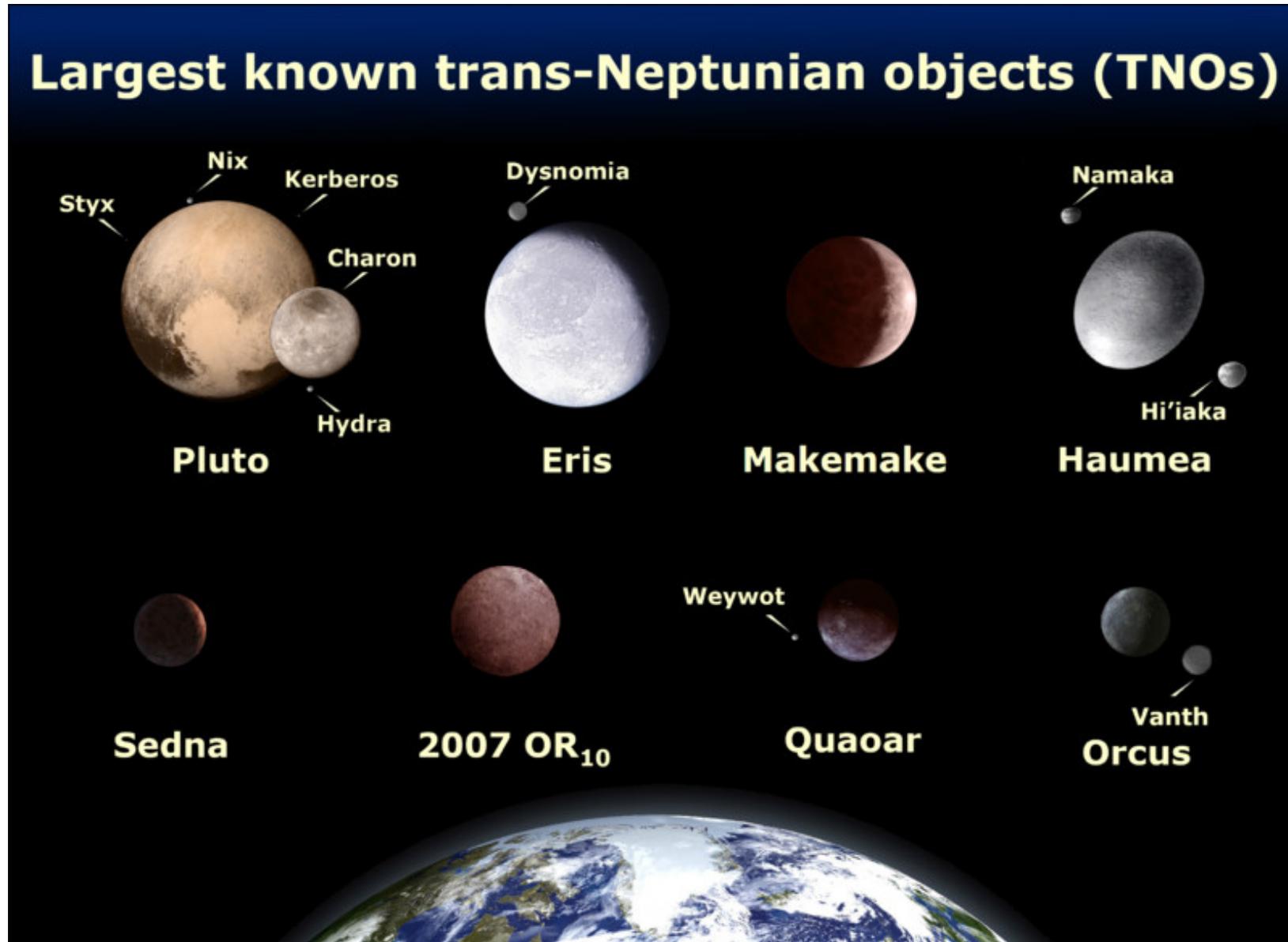
Si extrapolamos la ley potencial de distribución de tamaños hasta un radio  $\sim 1$  km, la masa total del cinturón TN se incrementaría a  $\sim 0.1 M_{\oplus}$  (Jewitt et al. 1998).

## ¿Cuál fue la masa original de la región TN?

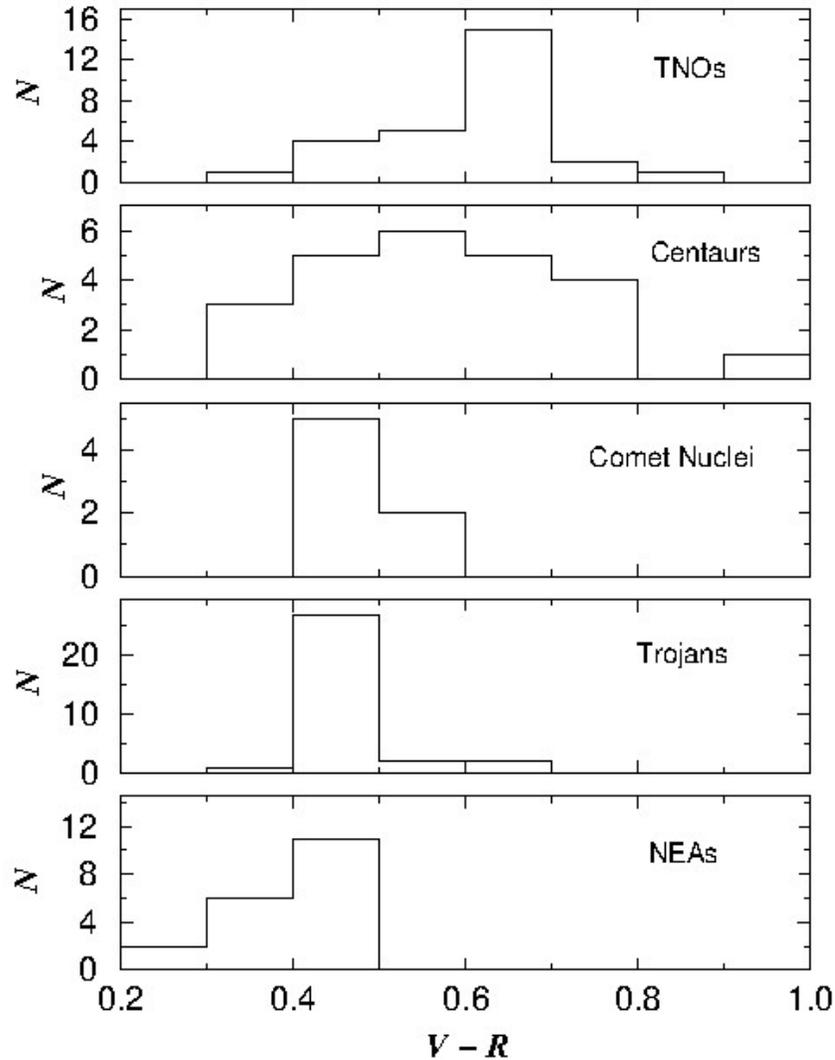


Erosión de la masa primordial asumiendo una ley de densidad  $r^{-2}$ , inclinaciones iniciales =  $1^\circ$ , y 2 opciones para la excentricidad inicial:  $e = 0.05$  (A), y  $e = 0.15$  (B) (Duncan, Levison & Budd 1995).

# Los más grandes TNOs conocidos (planetas enanos o plutoides)

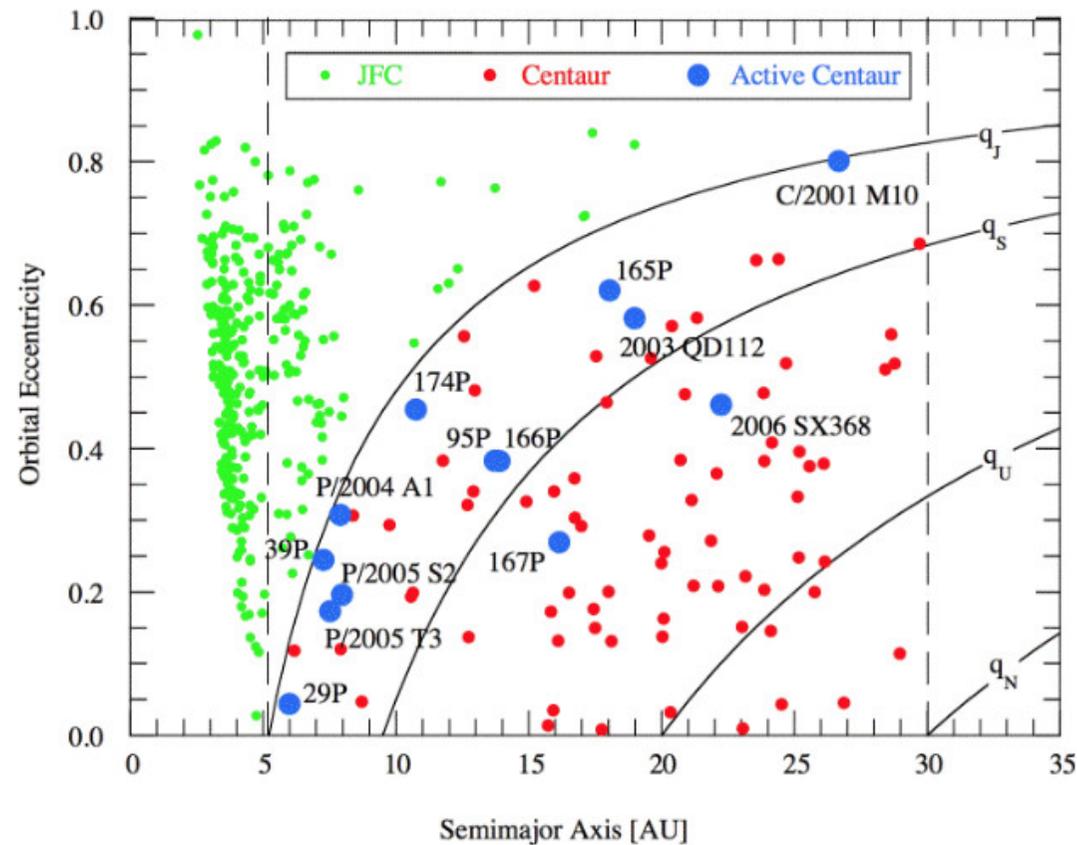


## Centaurus y TNOs: propiedades físicas



Centaurus y TNOs son más rojizos que NEAs, núcleos cometarios y Troyanos (Luu & Jewitt 2002). La transición de colores rojizos a más neutros puede ser debida a la exposición del material de la superficie a la más intensa radiación UV solar y el calor, que podría alterar su composición química por la remoción del hidrógeno de las moléculas.

# ¿Porqué algunos Centauros son activos y otros no?



(Jewitt 2009)

¿Proviene de la misma región?, ¿han estado los Centauros inactivos cerca de la región cercana a Júpiter por tiempos más extensos?, ¿está la actividad relacionada a la distancia perihélica?