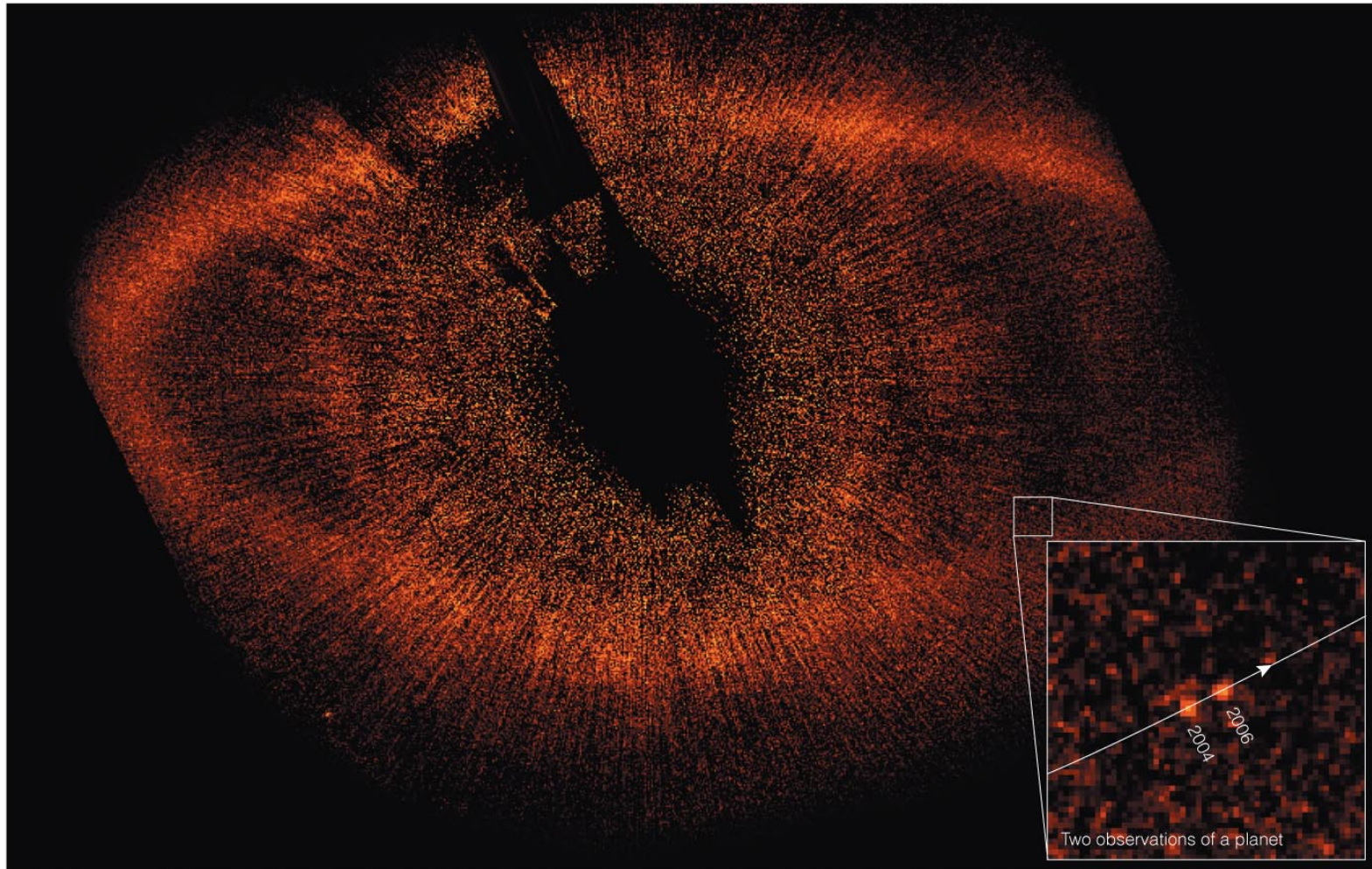


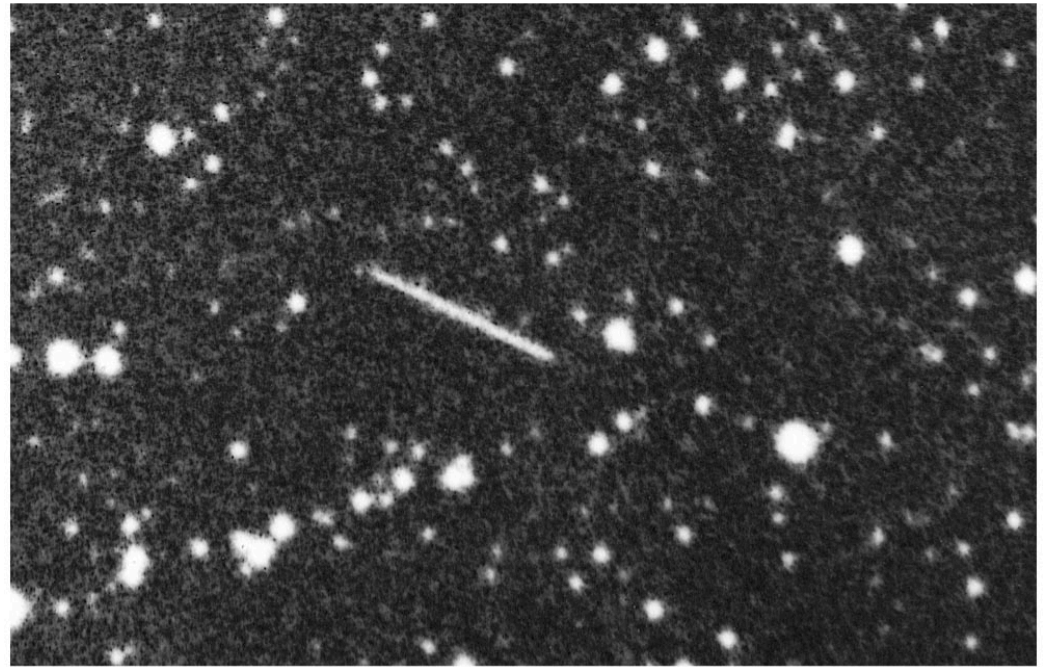
Otros sistemas planetarios: la nueva ciencia de los mundos distantes



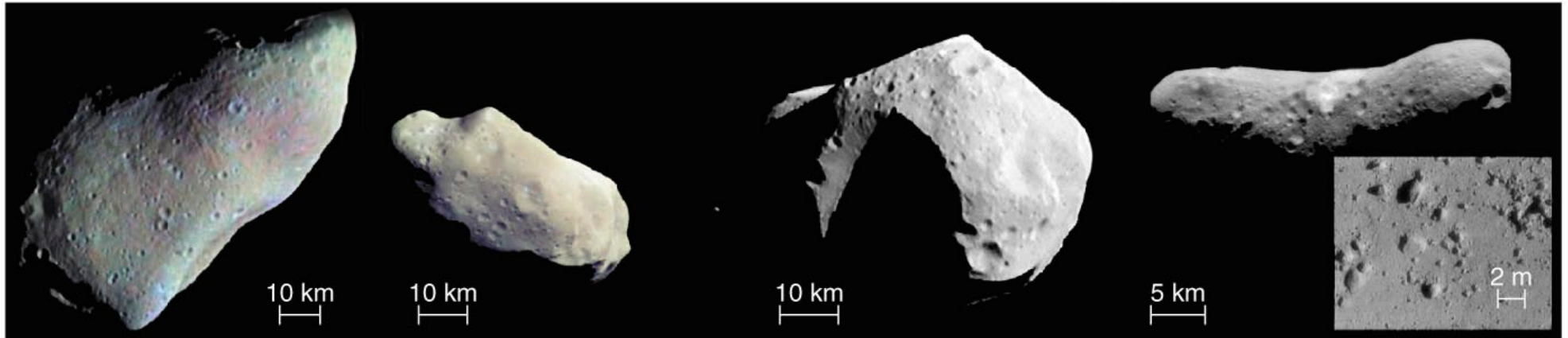
Asteroides, cometas y planetas enanos: su origen, órbitas e impactos



Asteroid Facts

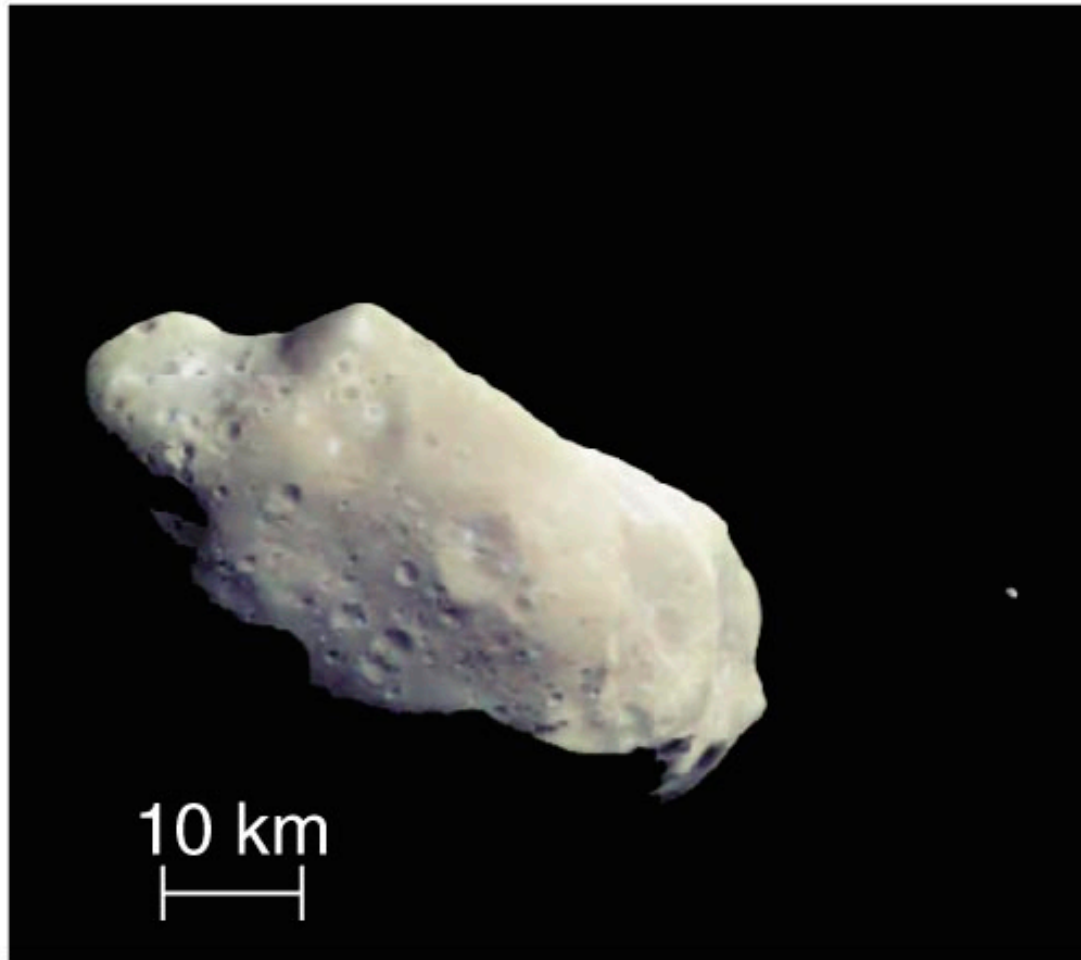


- Los asteroides son restos rocosos de la formación de planetas.
- El más grande es Ceres, diámetro \sim 1000 kilómetros.
- 150,000 en catálogos, y probablemente más de un millón con un diámetro $>$ 1 kilómetro.
- Los asteroides pequeños son más comunes que los asteroides grandes.
- Todos los asteroides en el sistema solar no se agregarían a un pequeño planeta terrestre.



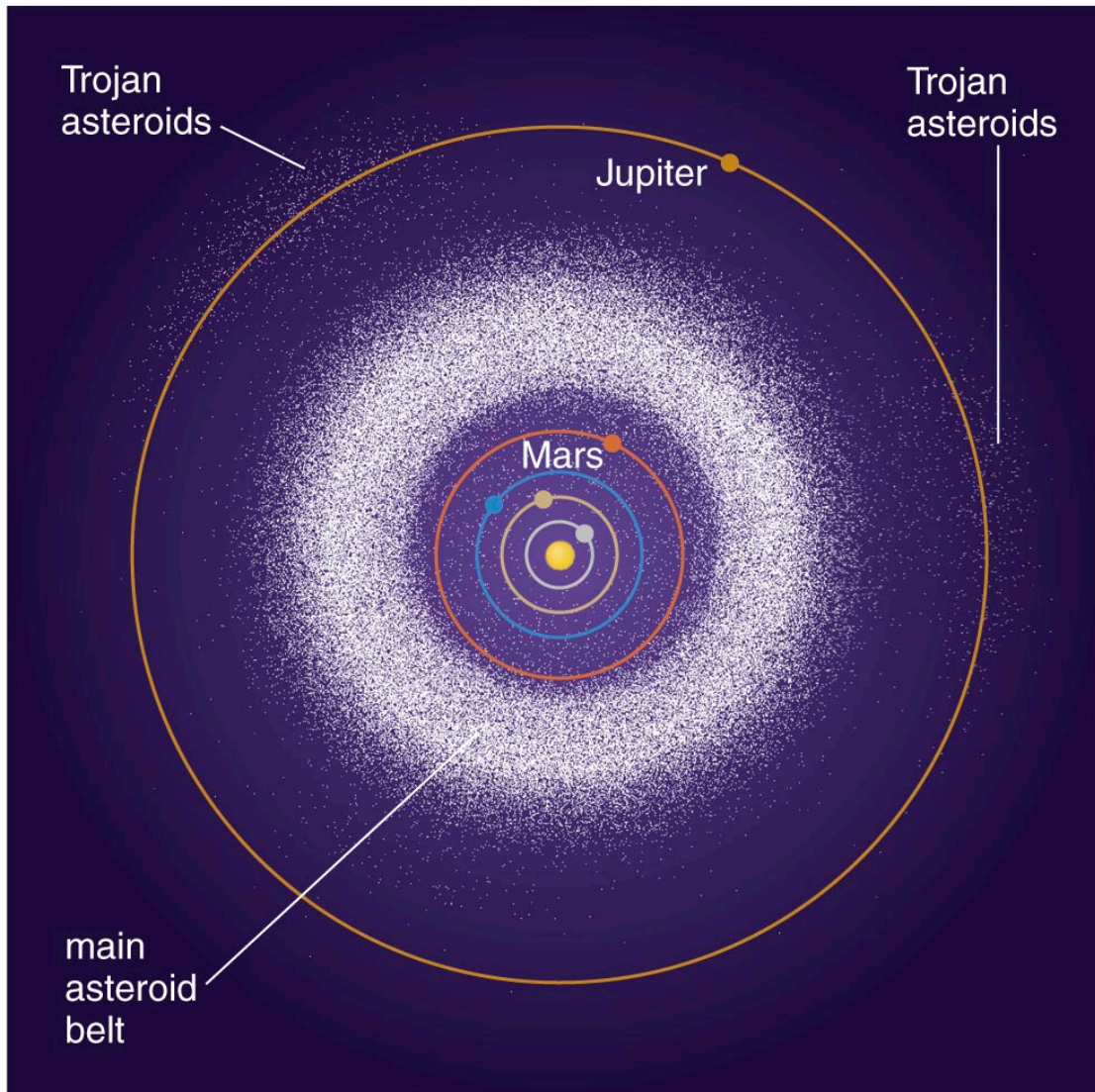
Los asteroides están craterizados y no redondos.

Asteroides con lunas



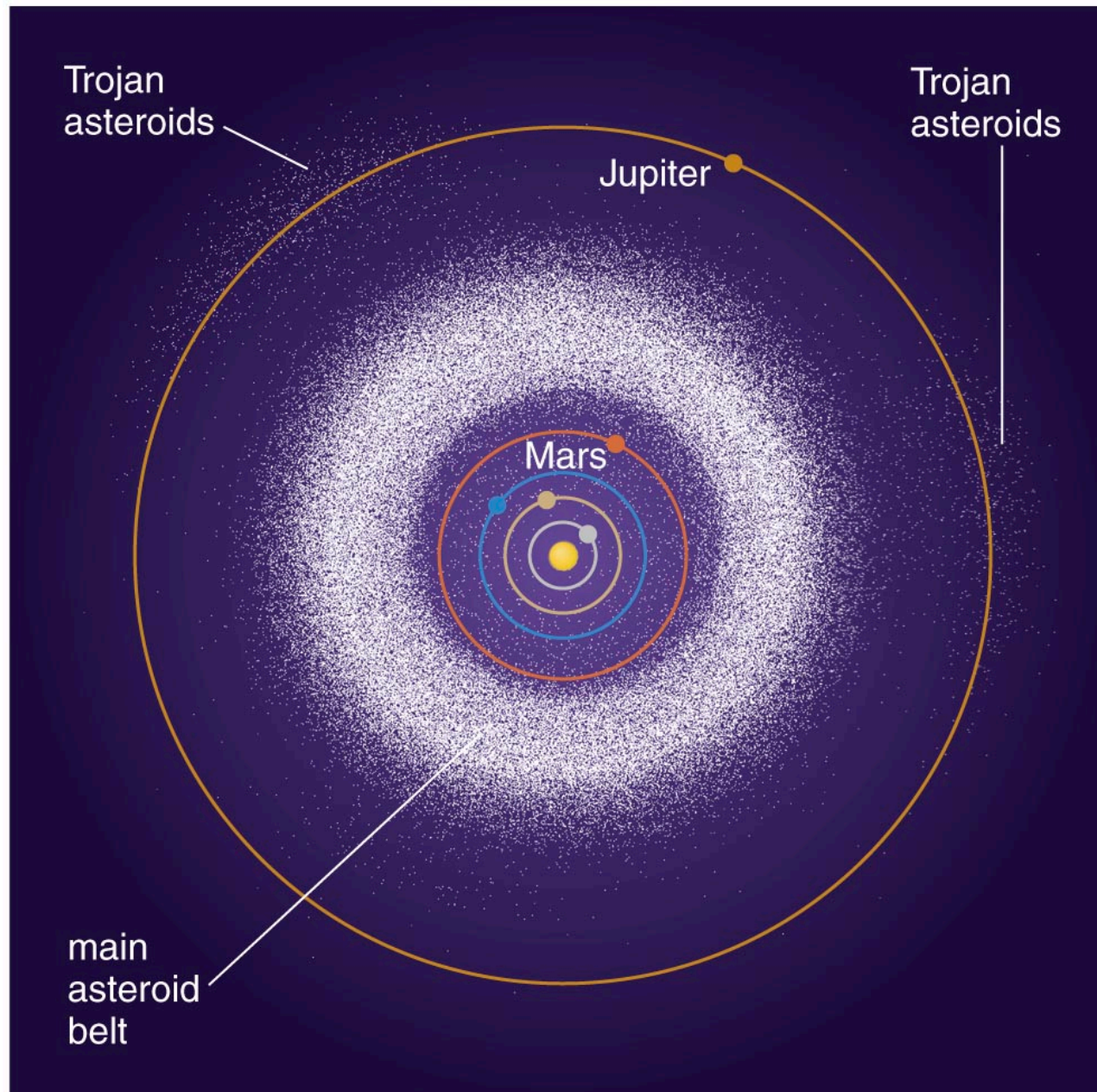
- Algunos asteroides grandes tienen su propia luna.
- El asteroide Ida tiene una pequeña luna llamada Dactyl.

Órbitas de los asteroides

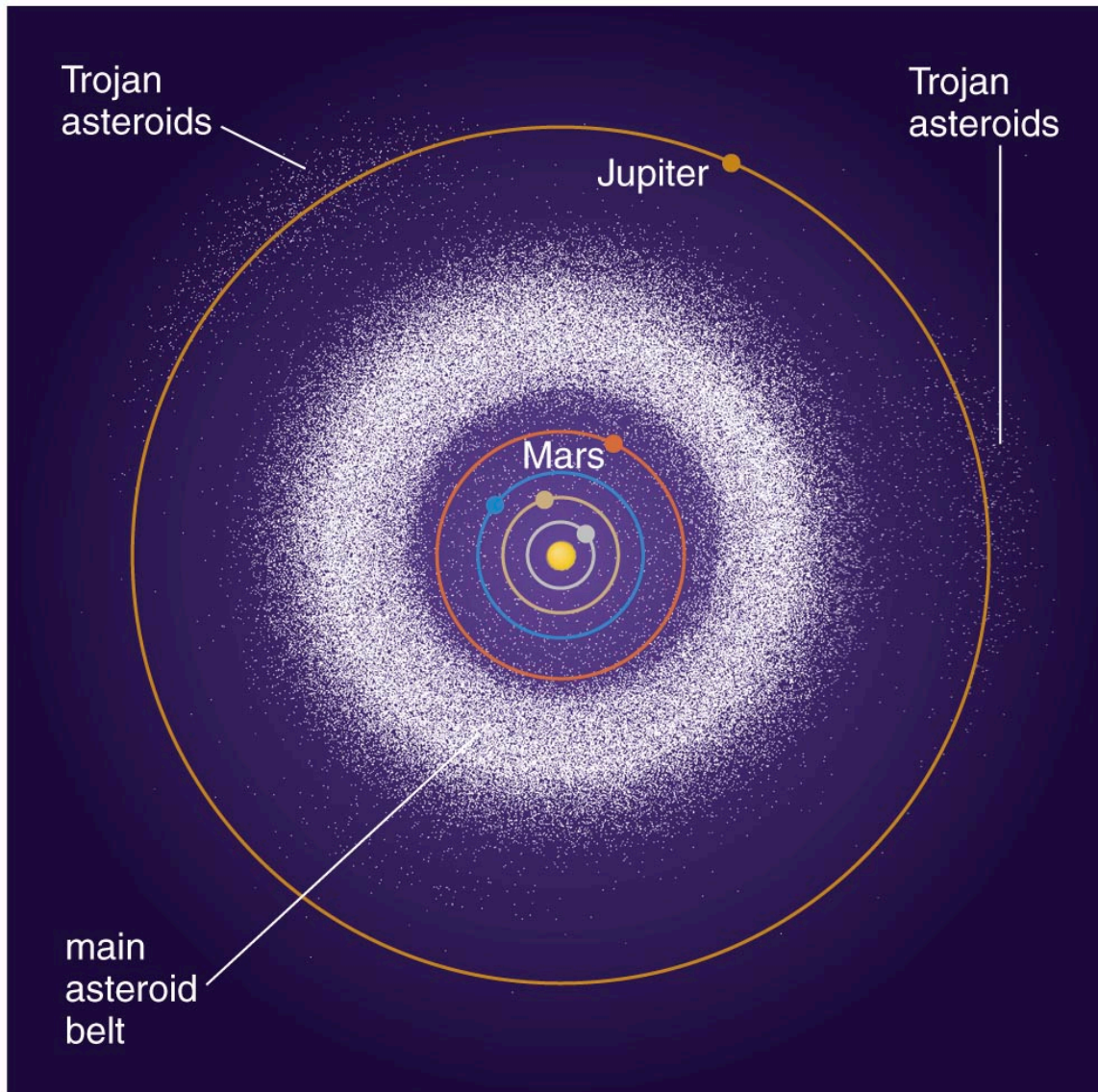


- La mayoría de los asteroides orbitan en el *cinturón de asteroides* entre Marte y Júpiter.
- Los asteroides *troyanos* siguen la órbita de Júpiter.
- Las órbitas de los *asteroides cercanos* a la Tierra cruzan la órbita de la Tierra.

¿Por qué hay un cinturón de asteroides?

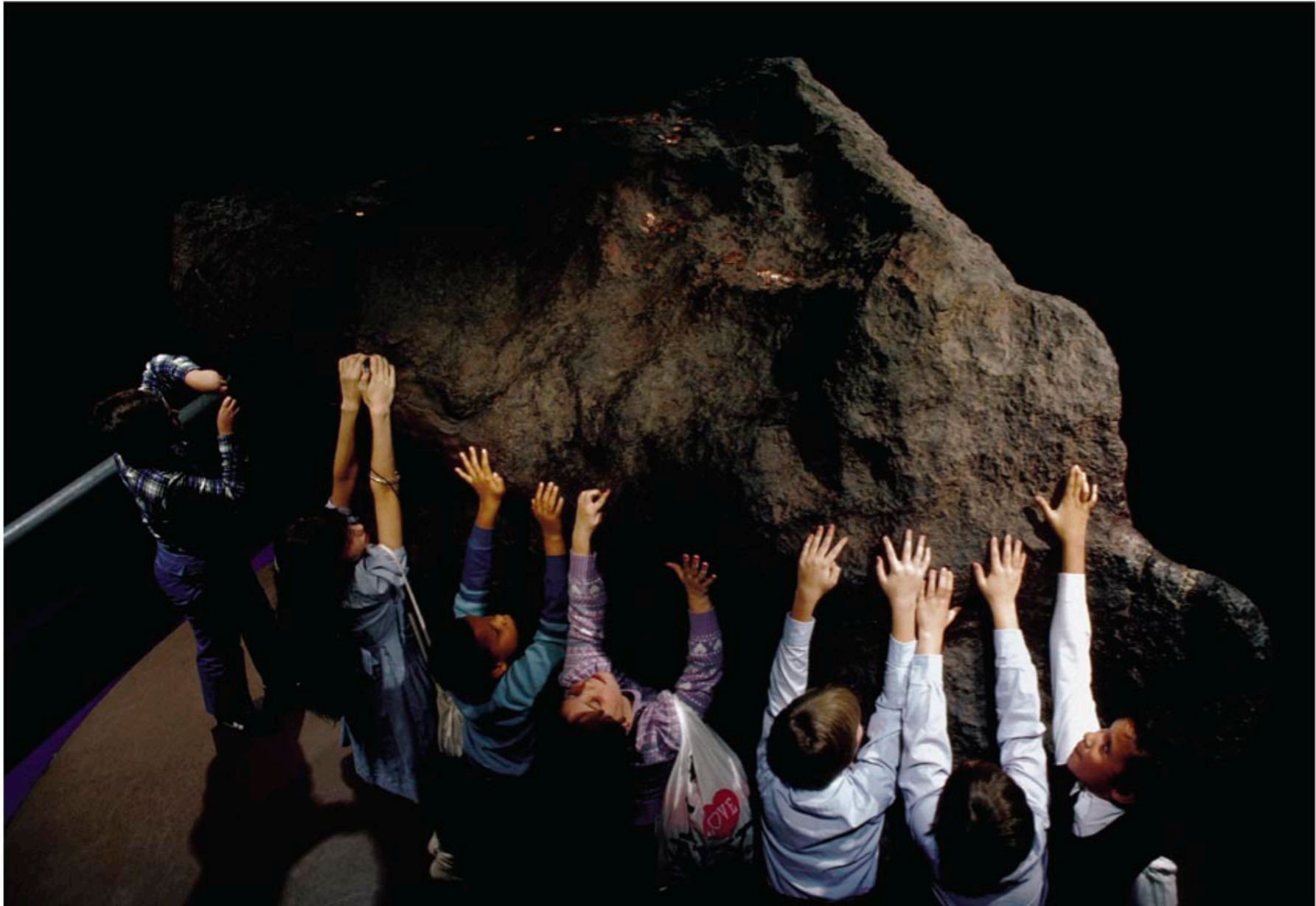


Origen del cinturón de asteroides



- Los planetesimales rocosos entre Marte y Júpiter no se acumularon en un planeta.
- La gravedad de Júpiter, a través de la influencia de las resonancias orbitales, agitó las órbitas de los asteroides e impidió su acumulación en un planeta.

¿De dónde vienen los meteoritos?



Tipos de meteoritos

- 1) Primitivo: sin cambios en la composición desde que se formaron por primera vez hace 4.600 millones de años.
- 2) Procesado: más joven; Han experimentado procesos como el volcanismo o la diferenciación.

Meteoritos de la luna y marte

- Unos pocos meteoritos llegan de la Luna y Marte.
- La composición difiere de los fragmentos de asteroides.
- Una forma barata (pero lenta) de adquirir rocas lunares y rocas de Marte.

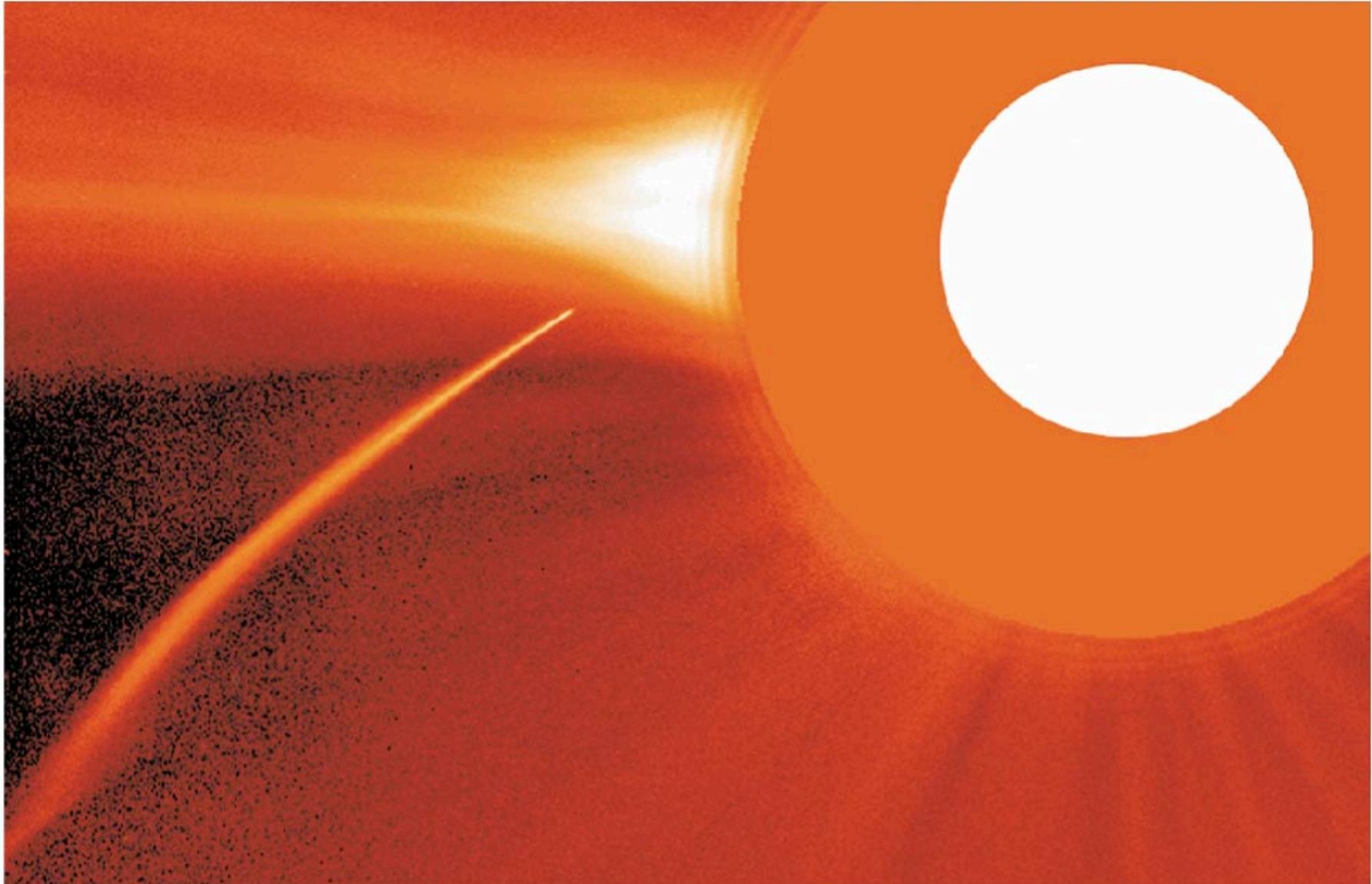
¿Cómo son los cometas?



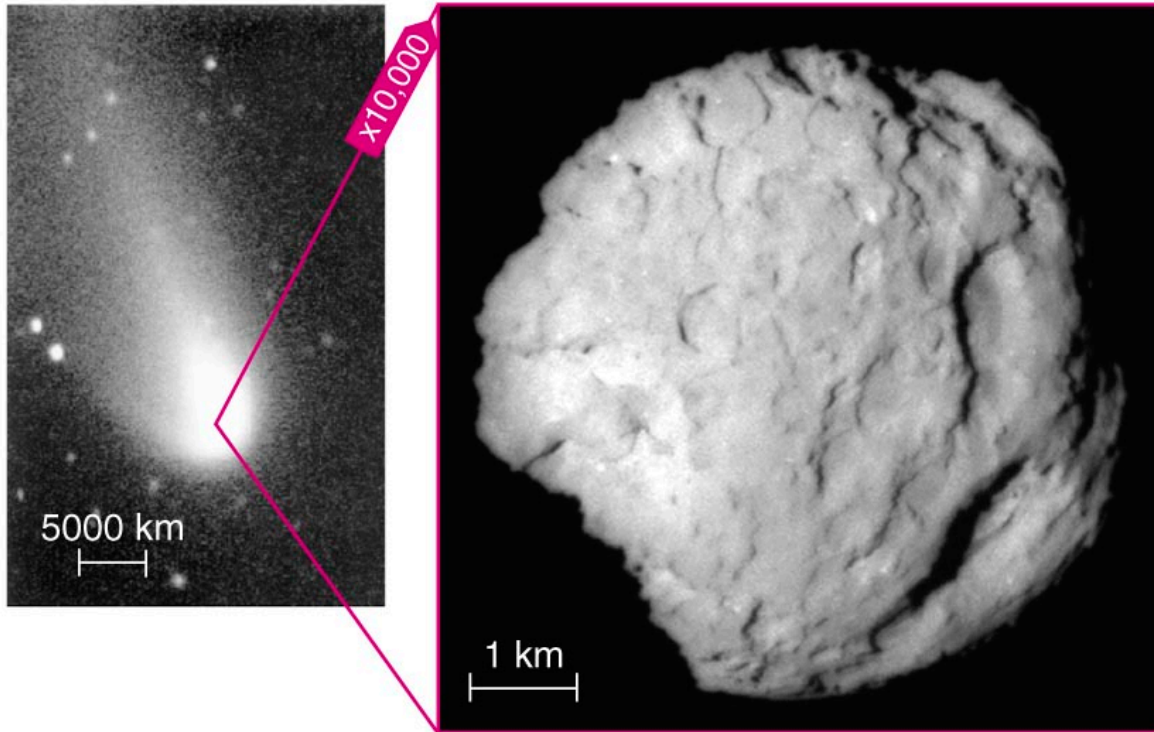
Cometas

- Formados más allá de la línea de escarcha, los cometas son contrapartes de hielo para los asteroides.
- El núcleo del cometa es una "bola de nieve sucia".
- La mayoría de los cometas no tienen colas.
- La mayoría de los cometas permanecen perpetuamente congelados en el sistema solar exterior.
- Sólo los cometas que entran en el sistema solar interior crecen colas.

Sun-Grazing Comet

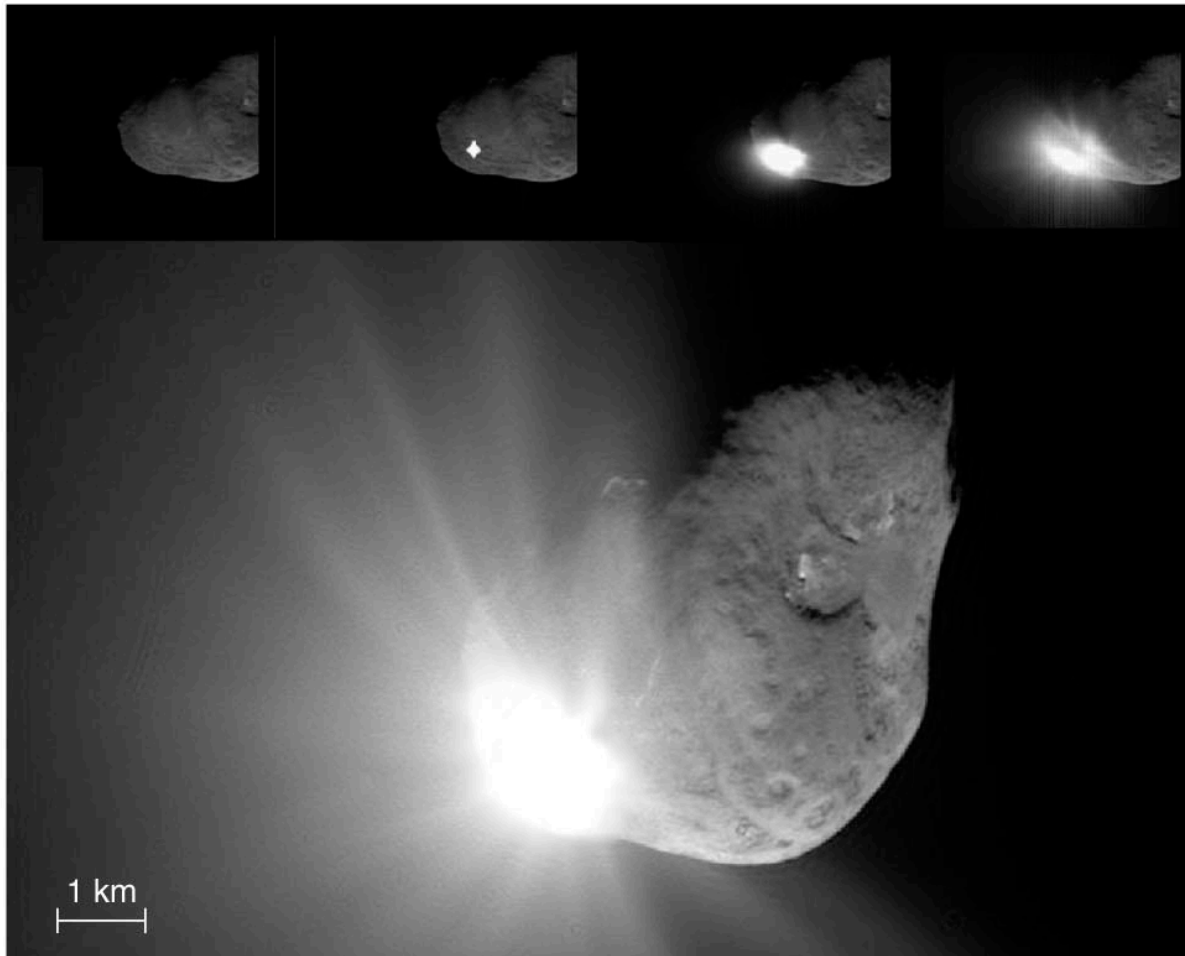


Núcleos de cometas



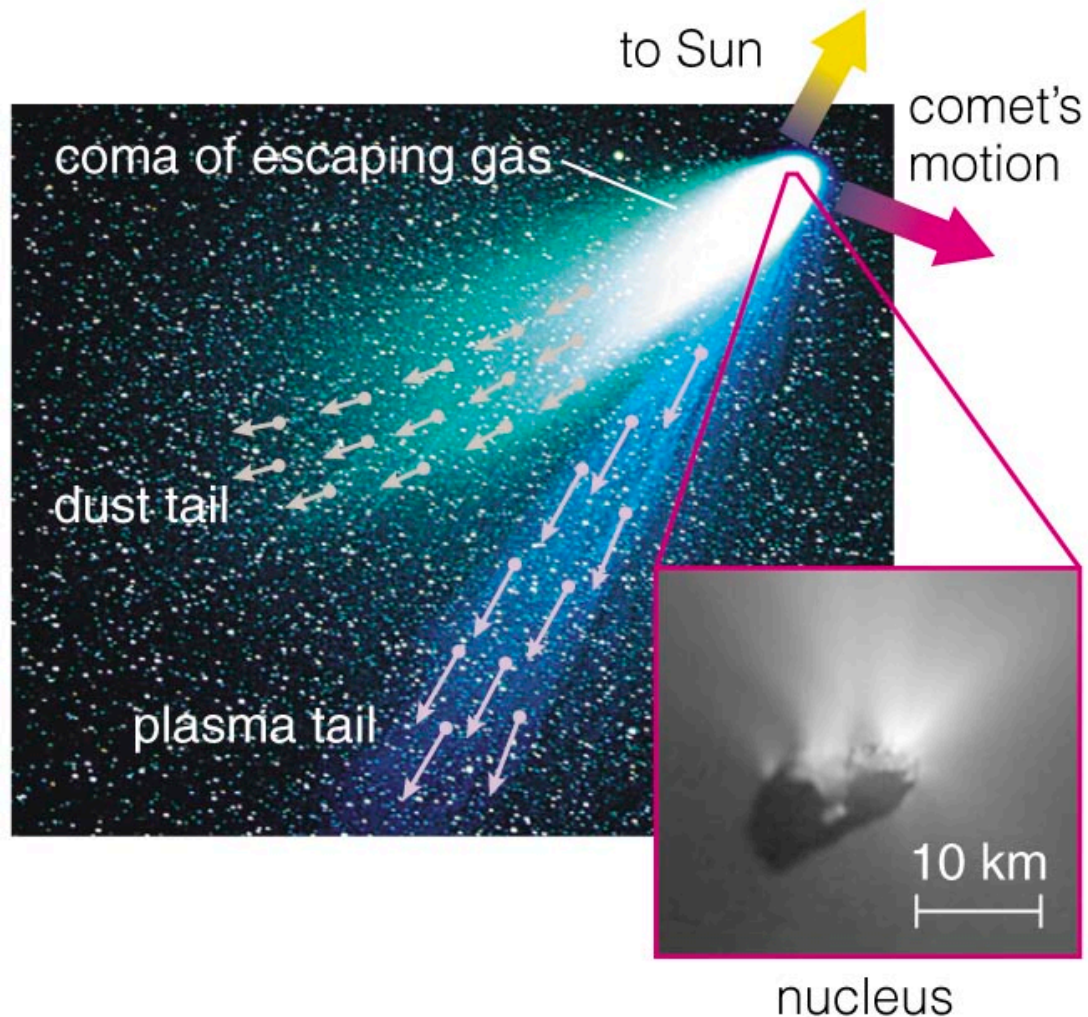
- Una "bola de nieve sucia"
- Fuente de material para la cola del cometa.

Deep Impact



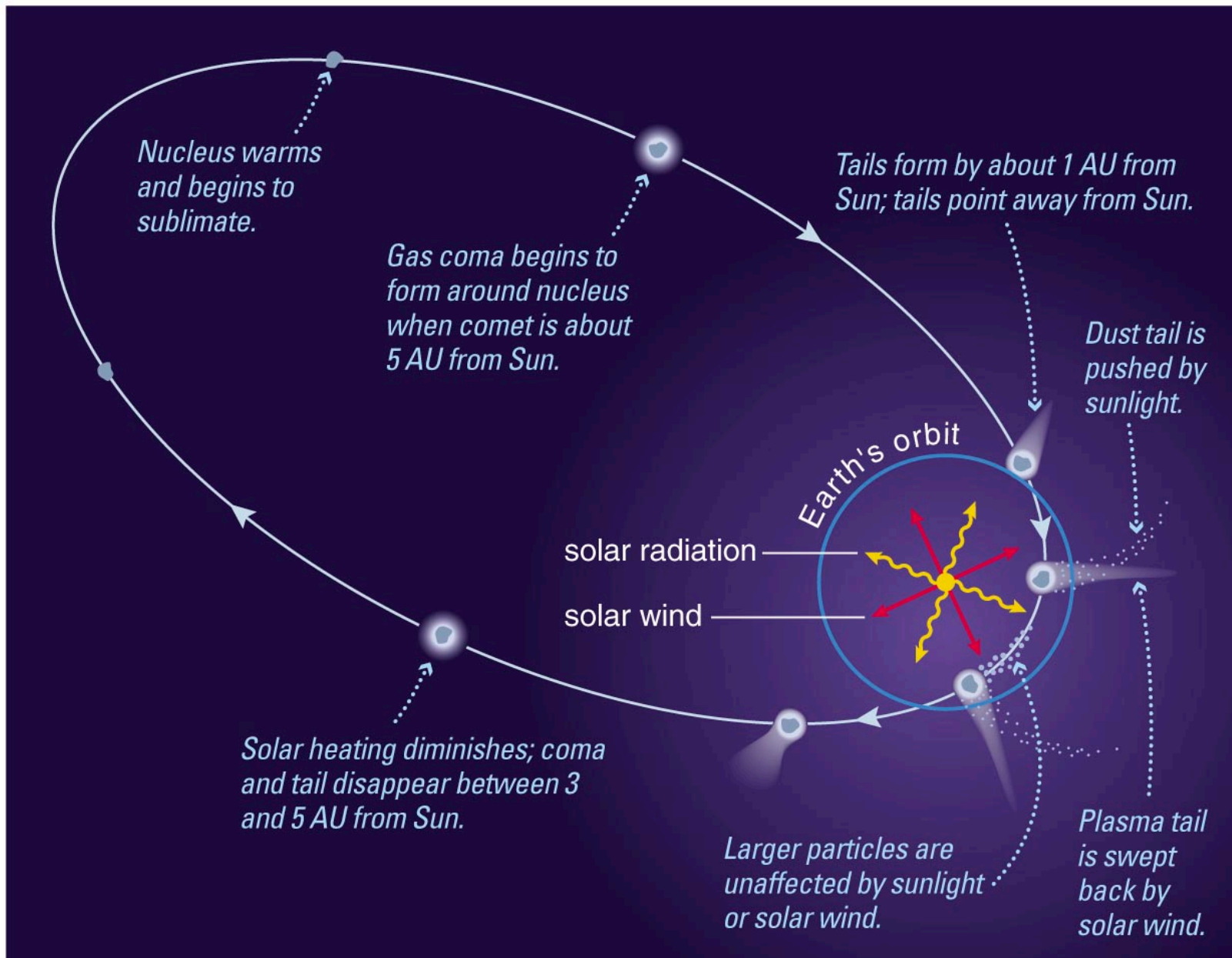
- Misión de estudio del núcleo del cometa Tempel 1.
- Proyectil golpeó la superficie el 4 de julio de 2005.
- Muchos telescopios estudiaron las consecuencias del impacto.

Anatomía de un cometa



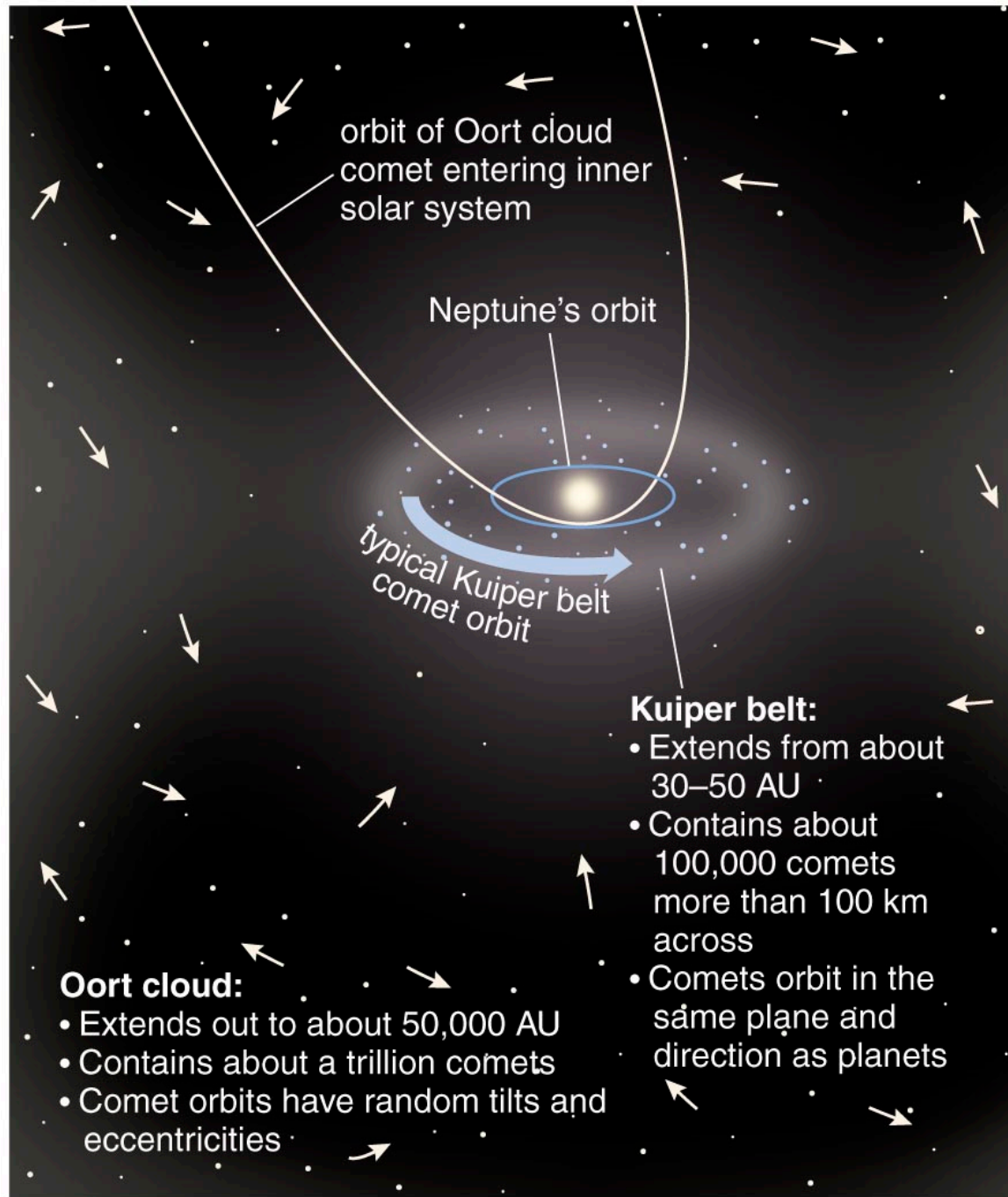
- *coma* es la atmósfera que proviene del núcleo calentado de un cometa.
- *cola de plasma* es un gas que se escapa del coma, empujado por el viento solar.
- *cola de polvo* es empujada por los fotones.

Crecimiento de la cola



¿De dónde vienen las cometas?





Solo un pequeño número de cometas entran al sistema solar interior. La mayoría se queda lejos del sol.

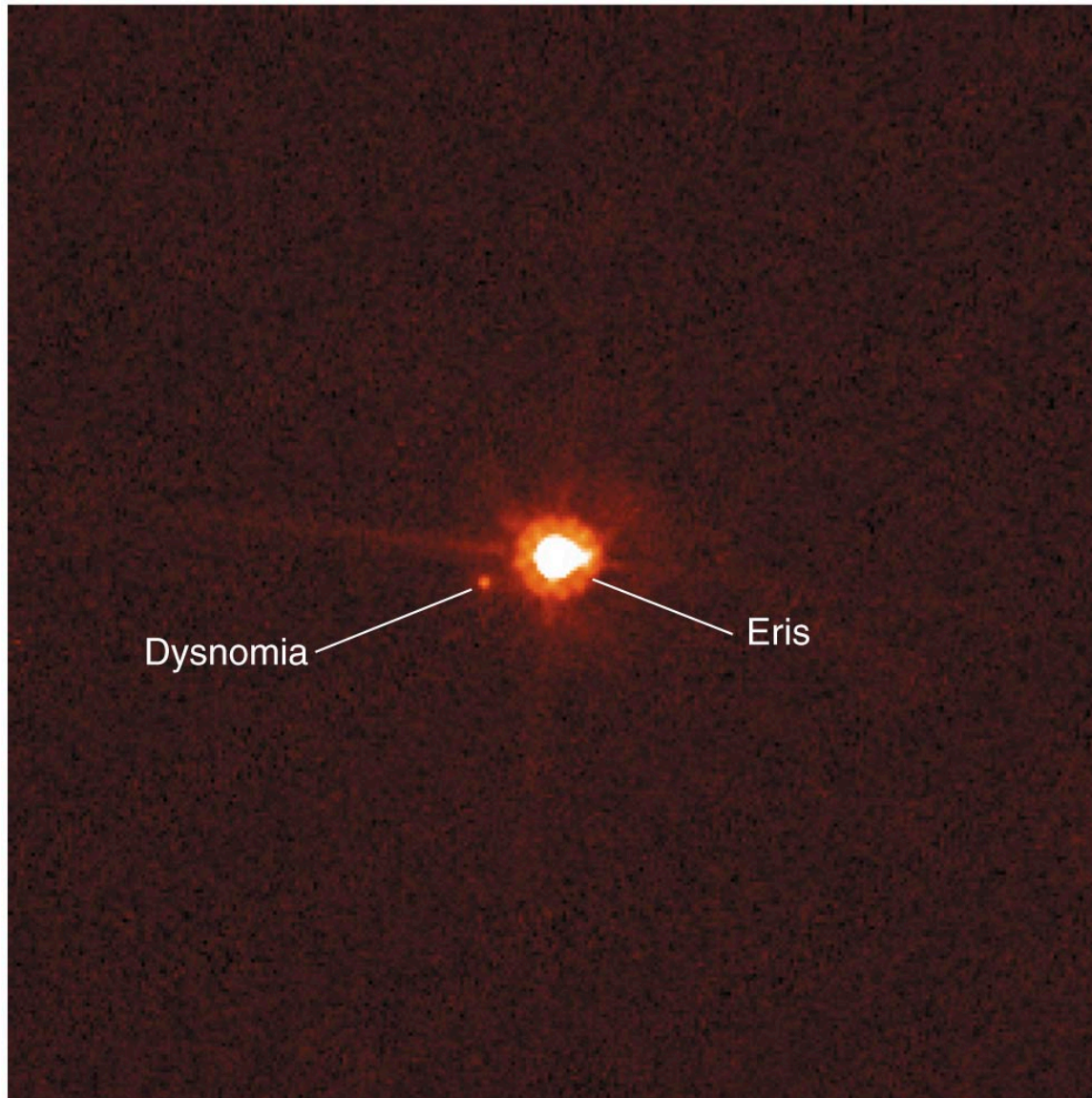
Nube de Oort:
 en órbitas aleatorias que se extienden a aproximadamente 50,000 AU

Cinturón de Kuiper:
 en órbitas ordenadas de 30 a 100 UA en el disco del sistema solar

¿Como llegaron ahi?

- Cometas del cinturón de Kuiper formadas en el cinturón de Kuiper: plano, alineado con el plano de las órbitas planetarias, que orbitan en la misma dirección que los planetas.
- Los cometas de la nube de Oort estuvieron una vez más cerca del Sol, pero fueron expulsados por interacciones gravitacionales con planetas jovianos: distribución esférica, órbitas en cualquier dirección

Objetos del cinturón de Kuiper



- Estos objetos grandes y helados tienen órbitas similares a los objetos más pequeños en el cinturón de Kuiper que se convierten en cometas de corto período.
- Entonces, ¿son cometas muy grandes o planetas muy pequeños?

Impactos

- Asteroides y cometas han golpeado la Tierra.
- Un impacto importante es solo cuestión de tiempo: no SI, sino CUANDO.
- Los impactos mayores son muy raros.
- Los eventos de nivel de extinción ocurren con millones de años de diferencia.
- El daño mayor ocurre a decenas de cientos de años de diferencia.



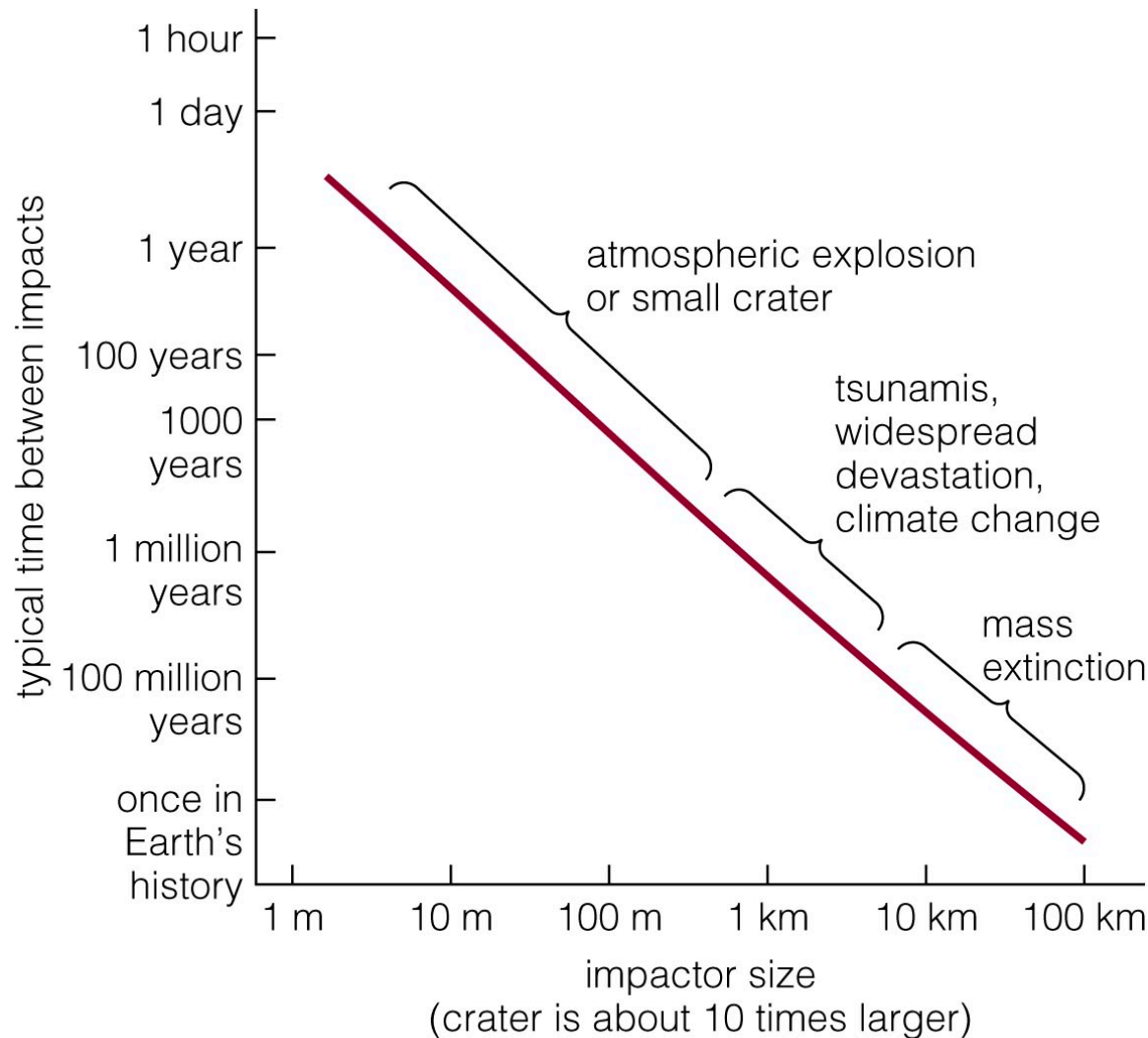
Tunguska, Siberia: 30 de junio de 1908

Un objeto de ~ 40 metros se desintegró y explotó en la atmósfera.



Meteor Crater, Arizona: hace 50,000 años (objeto de 50 metros)

Frecuencia de Impactos



- Pequeños impactos ocurren casi a diario.
- Los impactos lo suficientemente grandes como para causar extinciones masivas ocurren con muchos millones de años de diferencia.

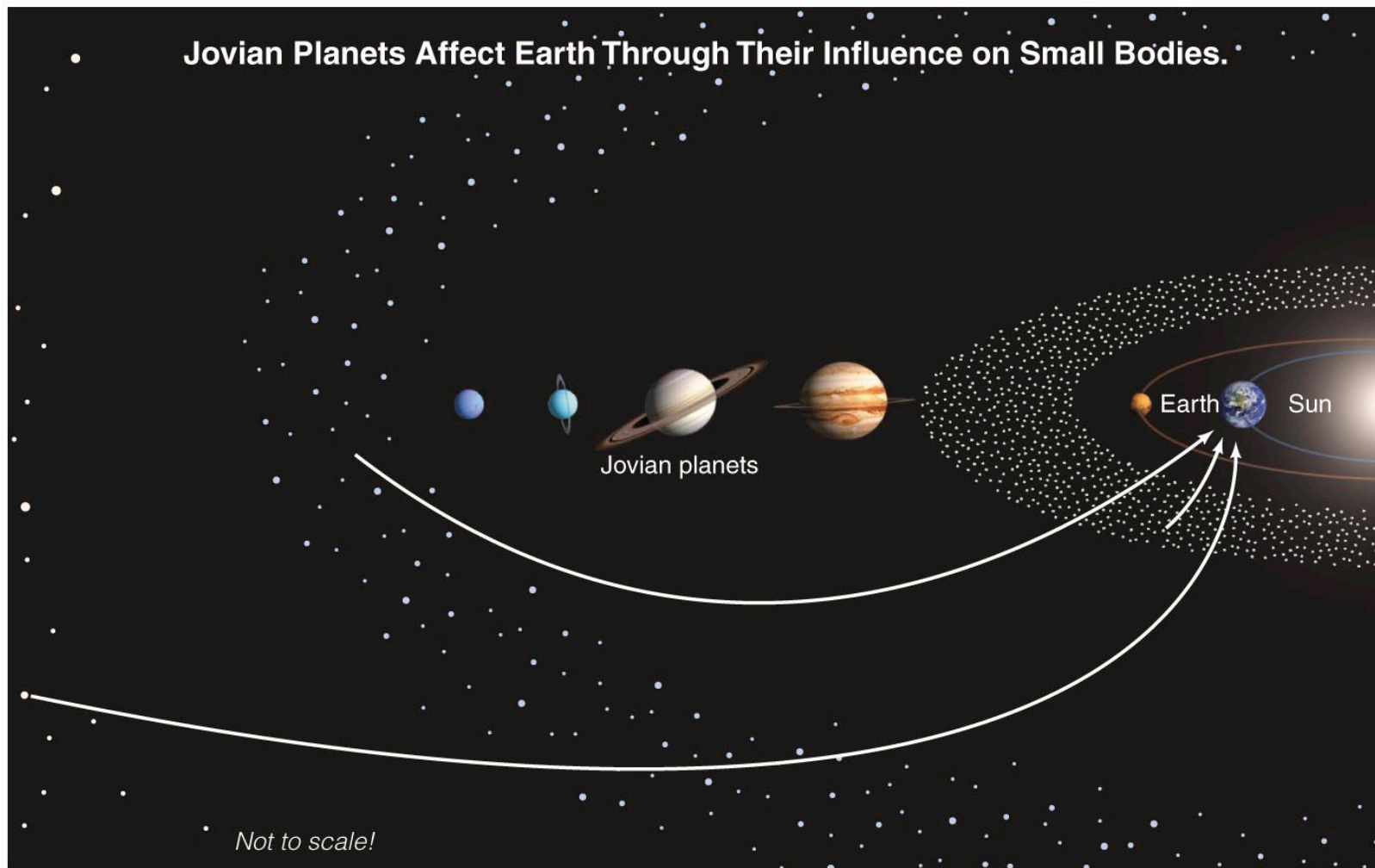
El asteroide que podría destruirnos

- No lo hemos visto todavía.
- La deflexión es más probable con años de advertencia anticipada.
- El control es crítico: es poco probable que la división de un gran asteroide en un montón de pequeños asteroides ayude.
- Recibimos menos advertencias anticipadas de un cometa asesino ...

¿Cómo afectan los planetas jovianos las tasas de impacto y la vida en la Tierra?

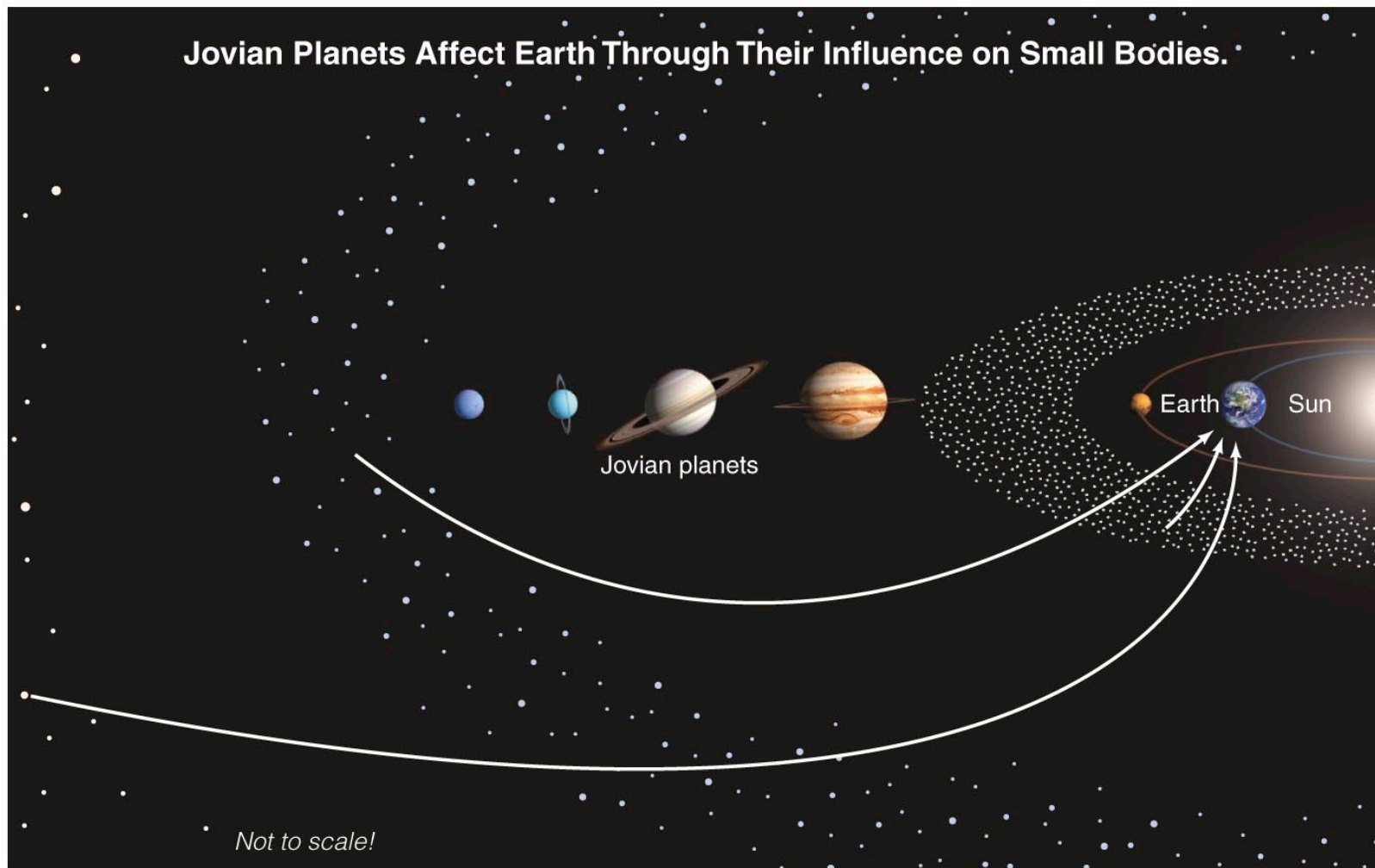


Influencia de los planetas jovianos.



La gravedad de un planeta joviano (especialmente Júpiter) puede redirigir un cometa

Influencia de los planetas jovianos.



Júpiter ha dirigido algunos cometas hacia la Tierra, pero ha expulsado muchas más en la nube de Oort.



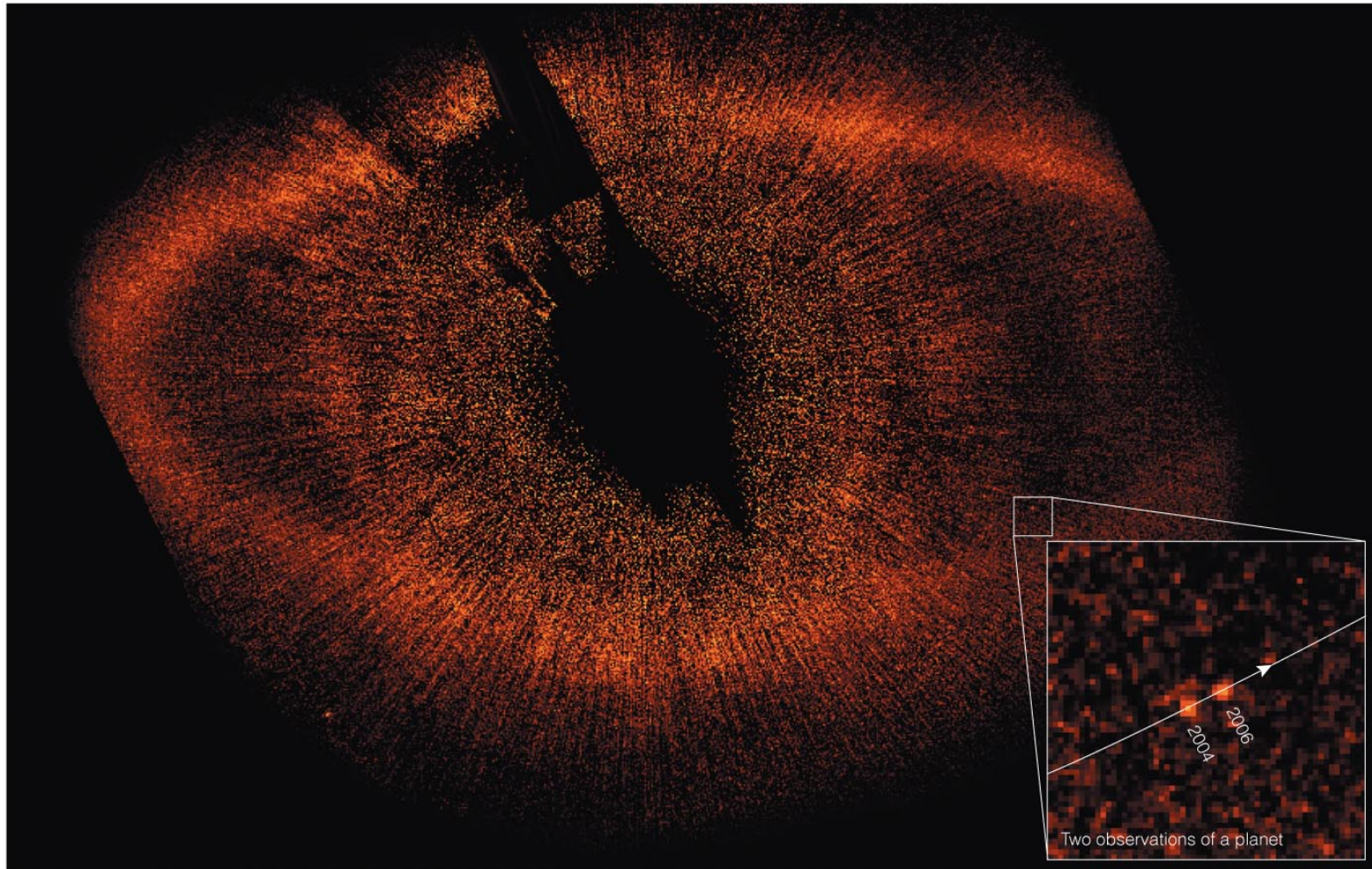
¿Era necesario Júpiter para la vida en la Tierra?



Los impactos pueden extinguir la vida.

¿Pero eran necesarios para la "vida como la conocemos"?

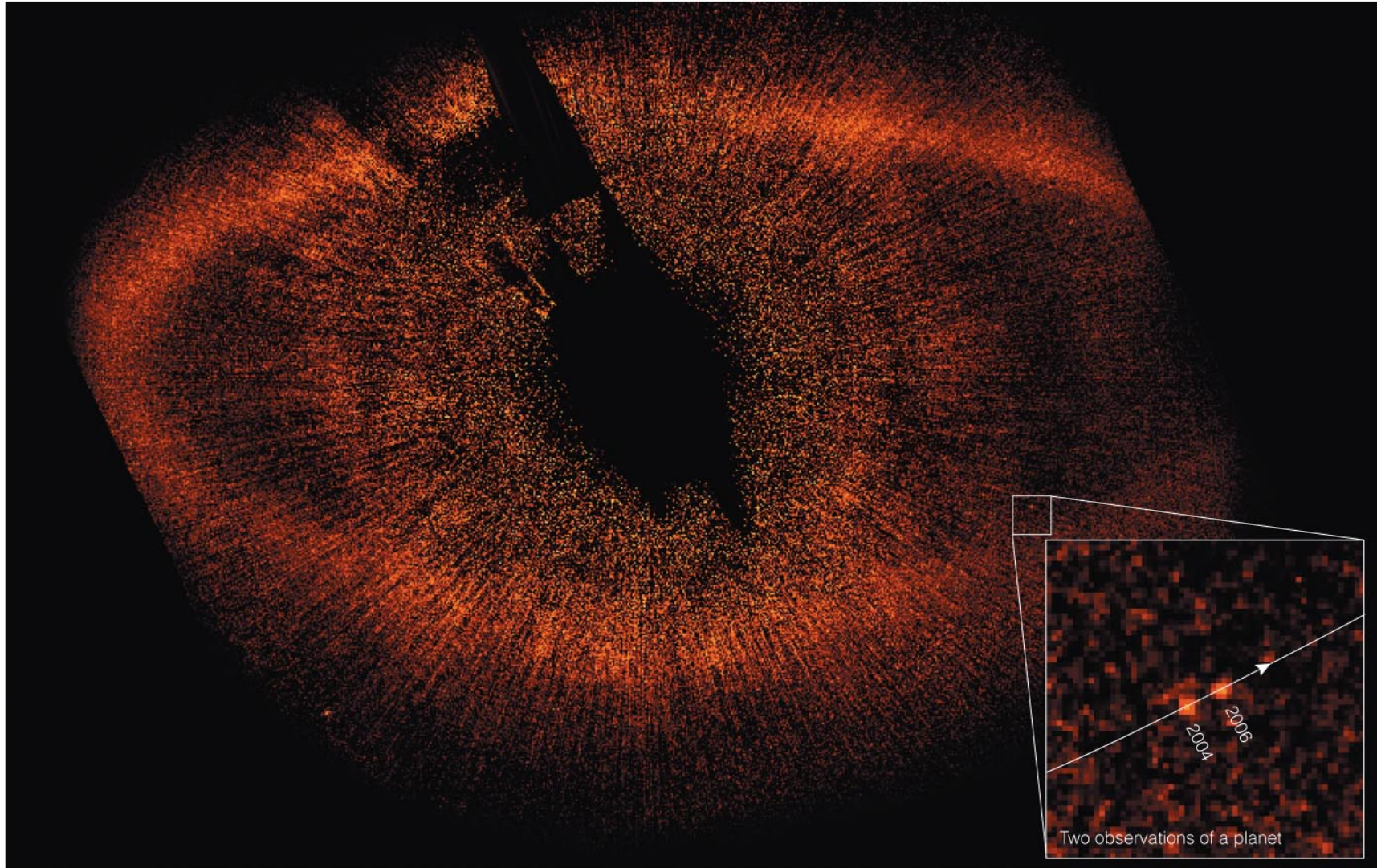
Otros sistemas planetarios: la nueva ciencia de los mundos distantes



Detección de planetas extrasolares

- ¿Por qué es tan difícil detectar planetas alrededor de otras estrellas?
- ¿Cómo detectamos planetas alrededor de otras estrellas?

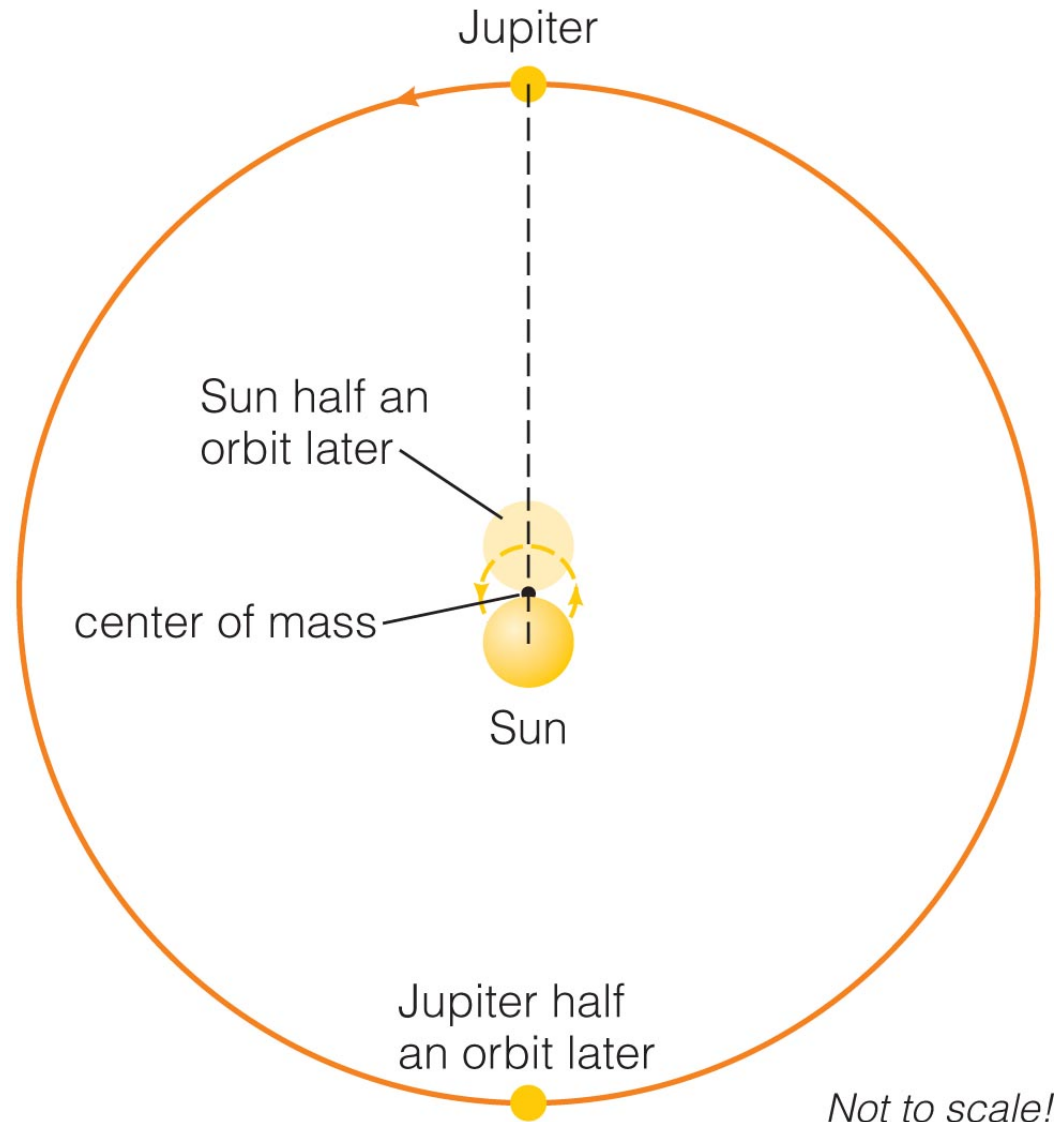
¿Por qué es tan difícil detectar planetas alrededor de otras estrellas?



Diferencia de brillo

- Una estrella similar al Sol es aproximadamente mil millones de veces más brillante que la luz reflejada desde sus planetas.
- Esto es como estar en Punta Arenas y tratar de ver una cabeza de alfiler a 15 metros de una toronja en Arica.

¿Cómo detectamos planetas alrededor de otras estrellas?

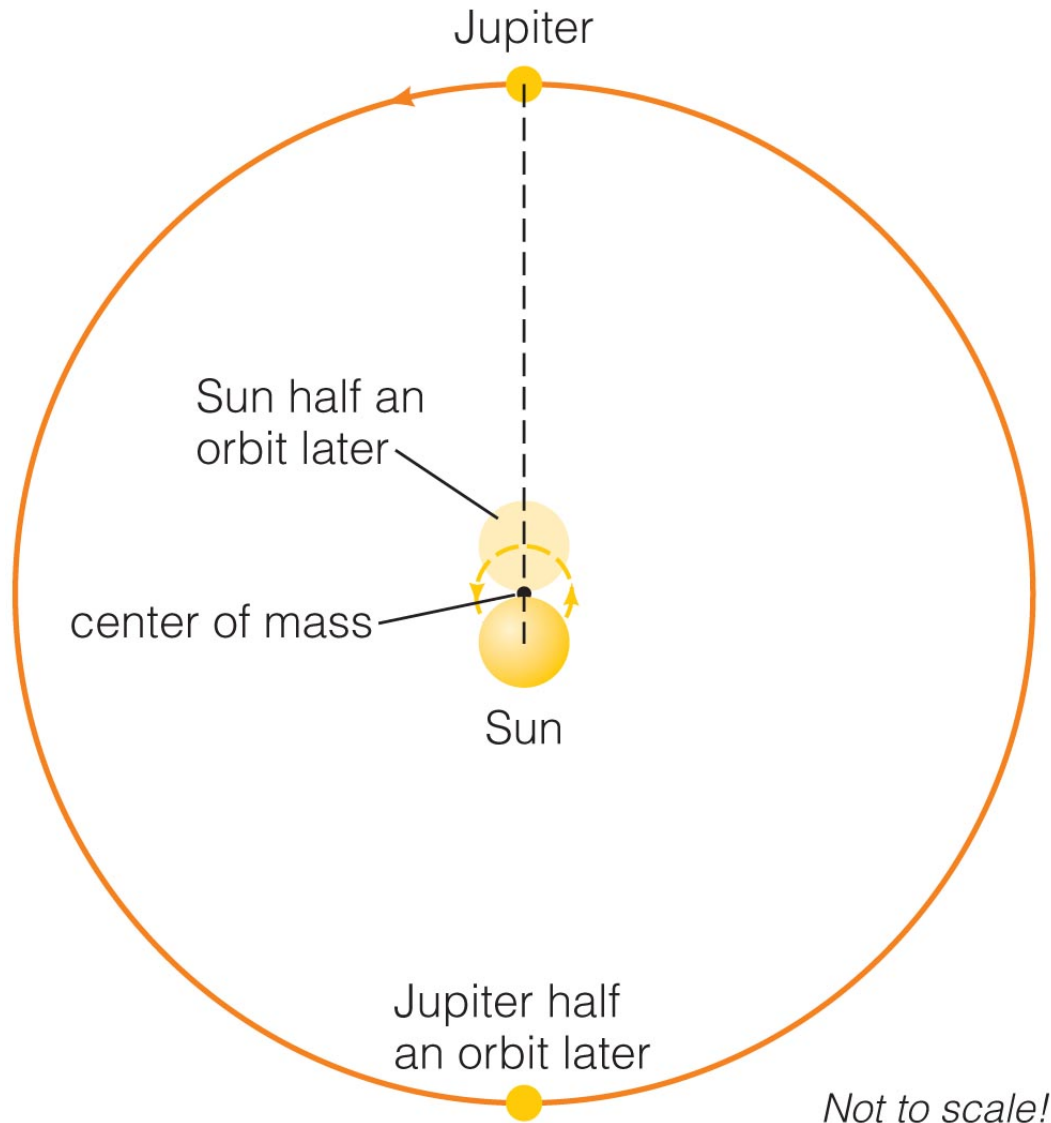


Not to scale!

Detección de planetas

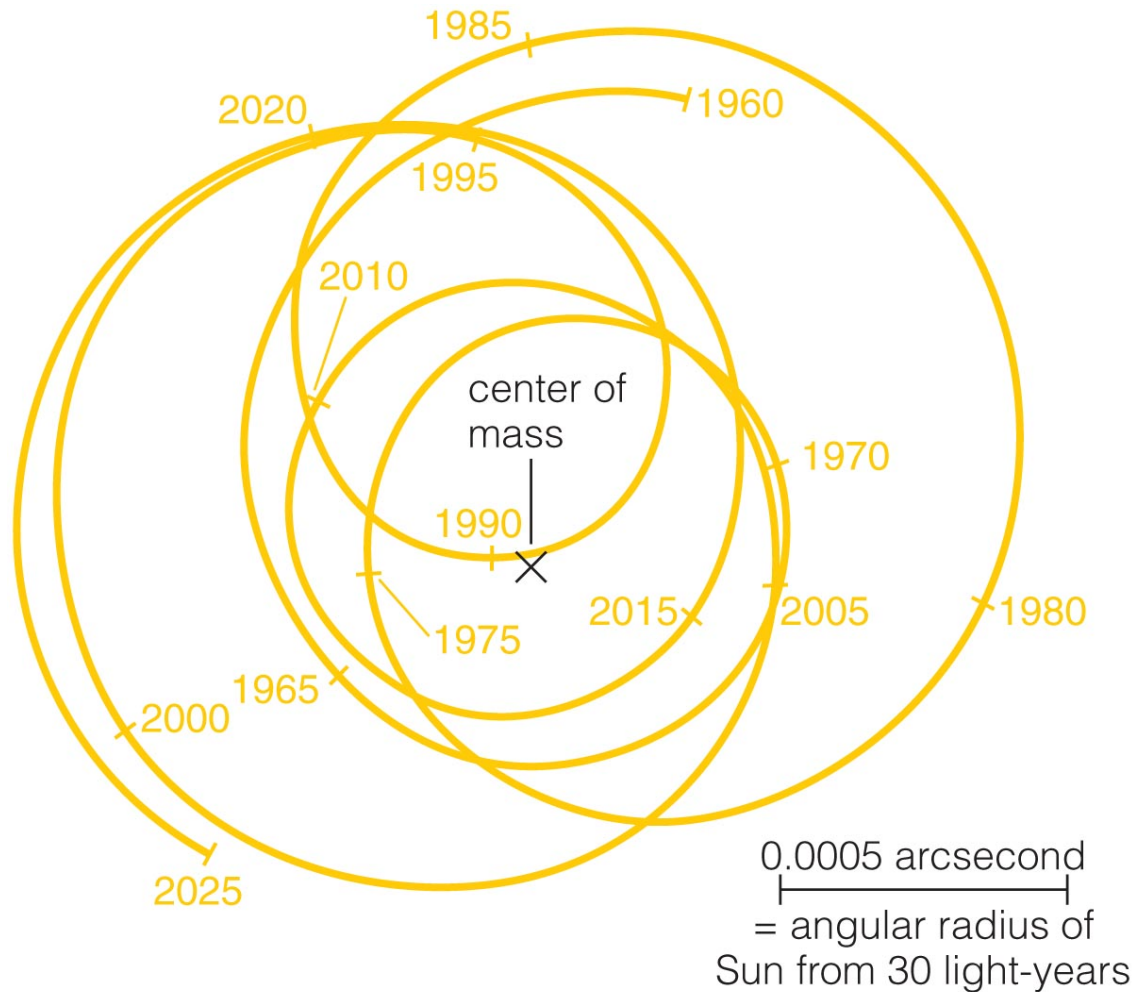
- **Directa:** imágenes o espectros de los propios planetas.
- **Indirecta:** Mediciones de las propiedades estelares que revelan los efectos de los planetas en órbita.

Efectos gravitacional



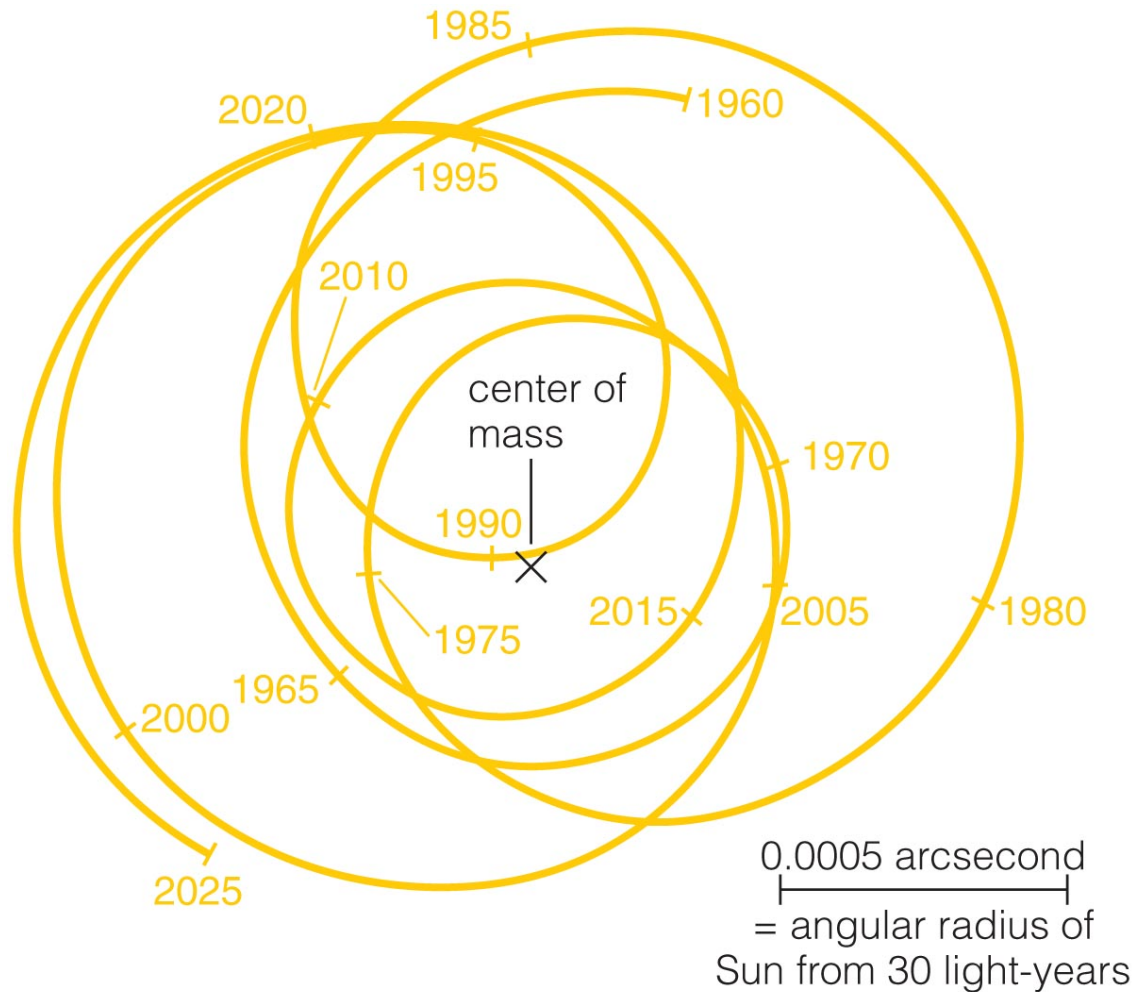
- El Sol y Júpiter orbitan alrededor de su centro de masa común.
- Por lo tanto, el Sol se tambalea alrededor de ese centro de masa con el mismo período que Júpiter.

Efectos gravitacional



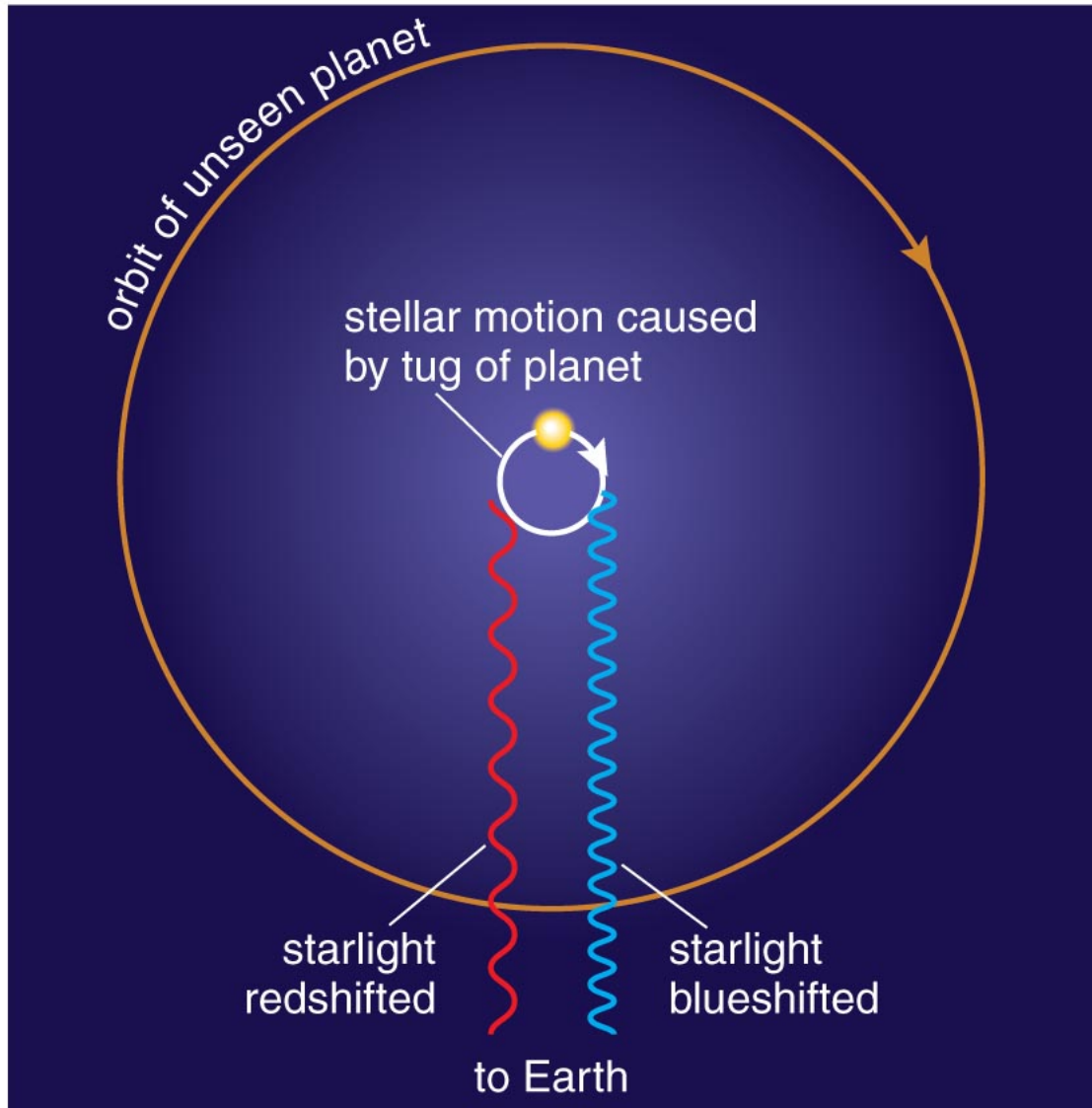
- El movimiento del Sol alrededor del centro de masa del sistema solar depende de los tirones de todos los planetas.
- Los astrónomos alrededor de otras estrellas que midieron este movimiento podrían determinar las masas y las órbitas de todos los planetas.

Técnicas astrométrica



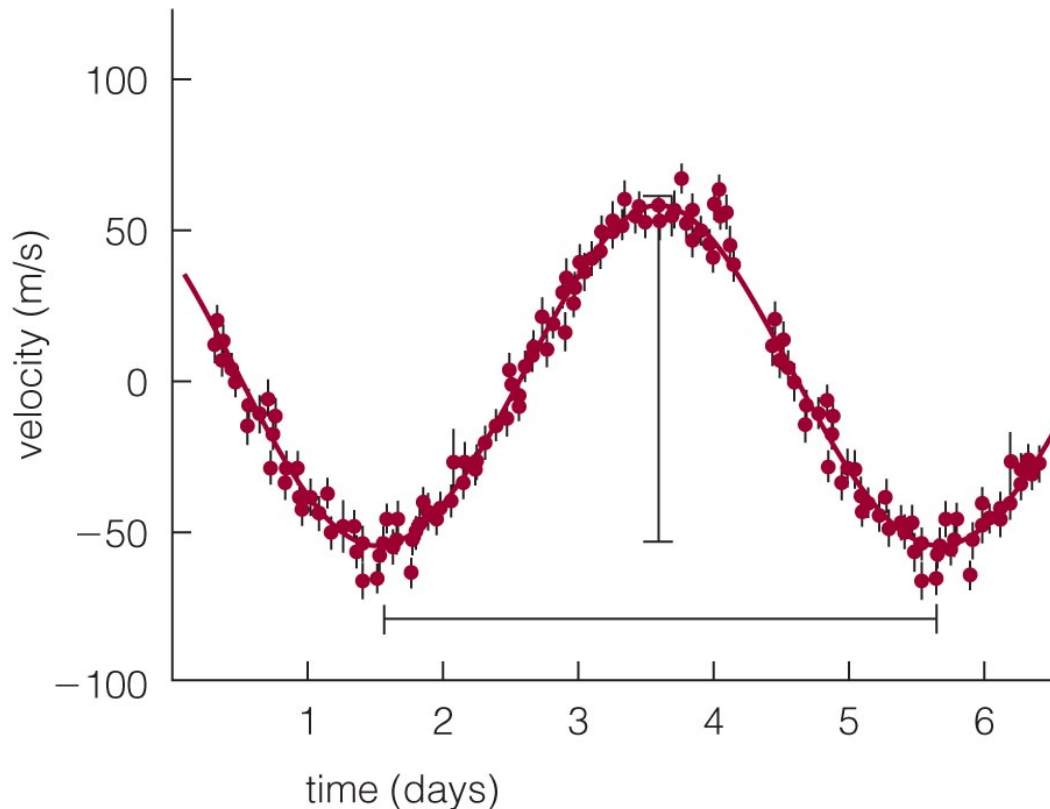
- Podemos detectar planetas midiendo el cambio en la posición de una estrella en el cielo.
- Sin embargo, estos pequeños movimientos son muy difíciles de medir (~ 0.001 arcosegundos).

Tecnica Doppler



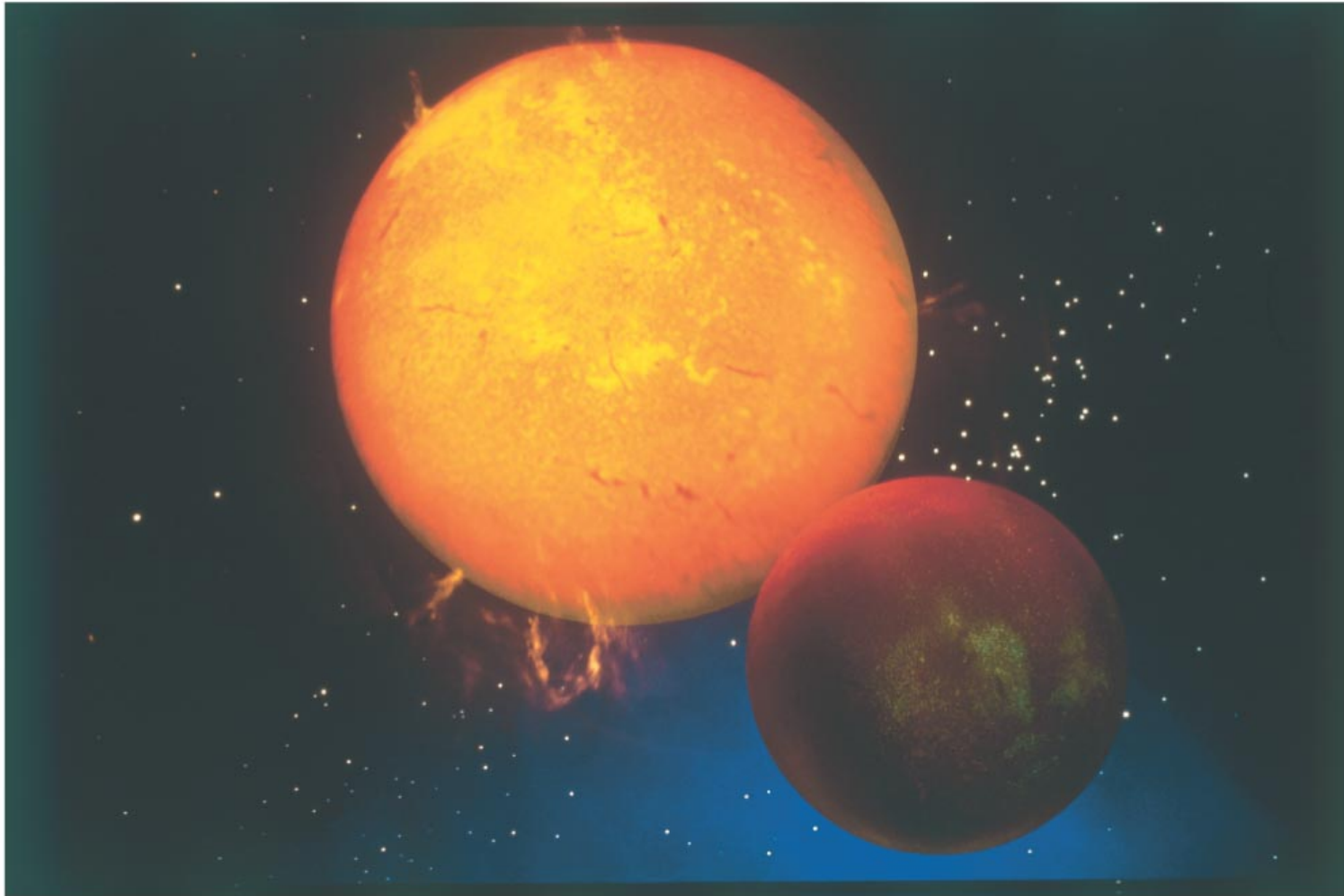
- Medir el cambio Doppler de una estrella puede indicarnos su movimiento hacia y desde nosotros.
- Las técnicas actuales pueden medir movimientos tan pequeños como 1 m / s (¡velocidad de marcha!).

Primer planeta extrasolar



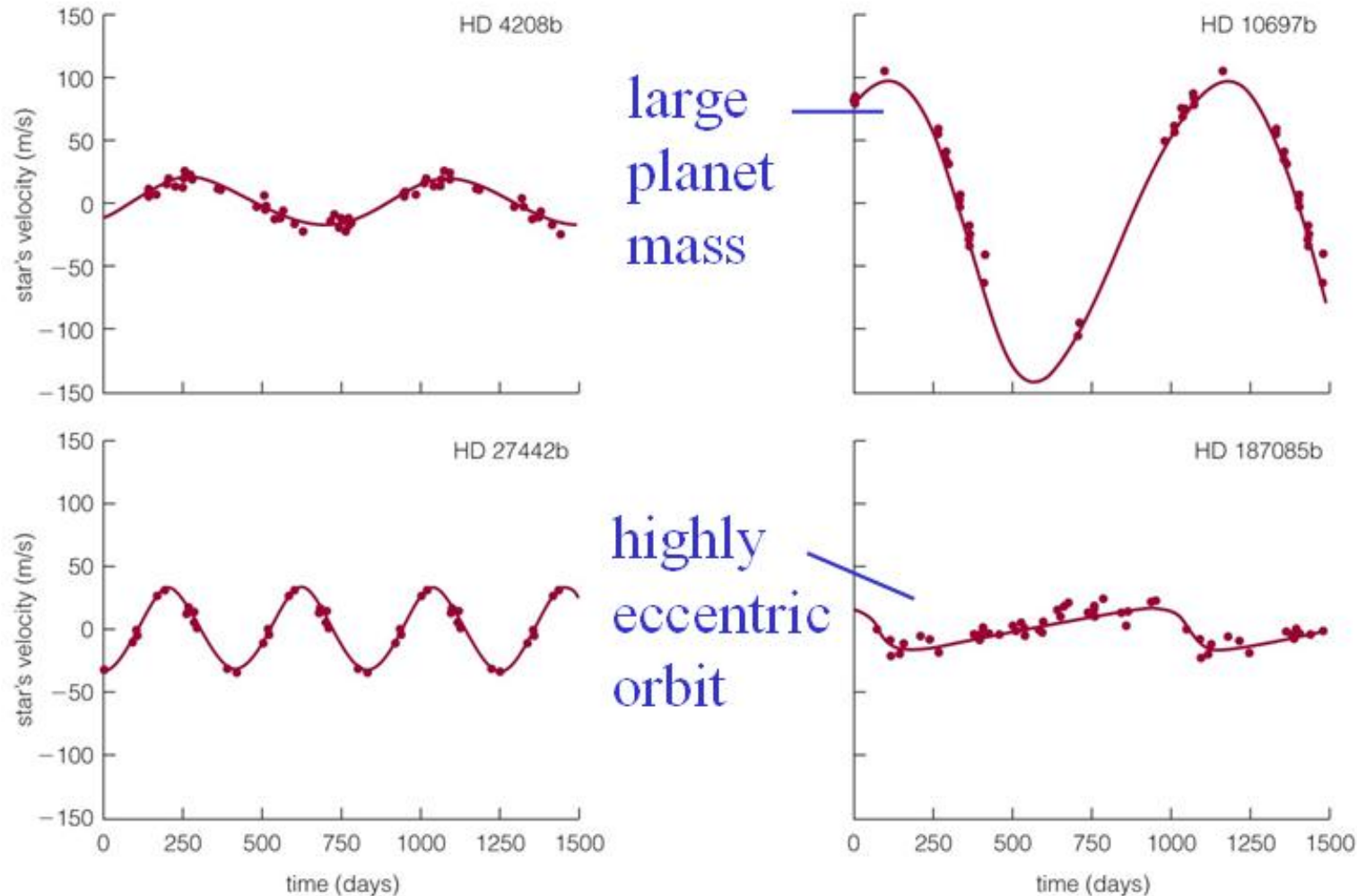
- Los cambios Doppler de la estrella 51 Pegasi revelaron indirectamente un planeta con un período orbital de 4 días.
- Este corto período significa que el planeta tiene una pequeña distancia orbital.
- Este fue el primer planeta extrasolar descubierto (1995).

Primer planeta extrasolar



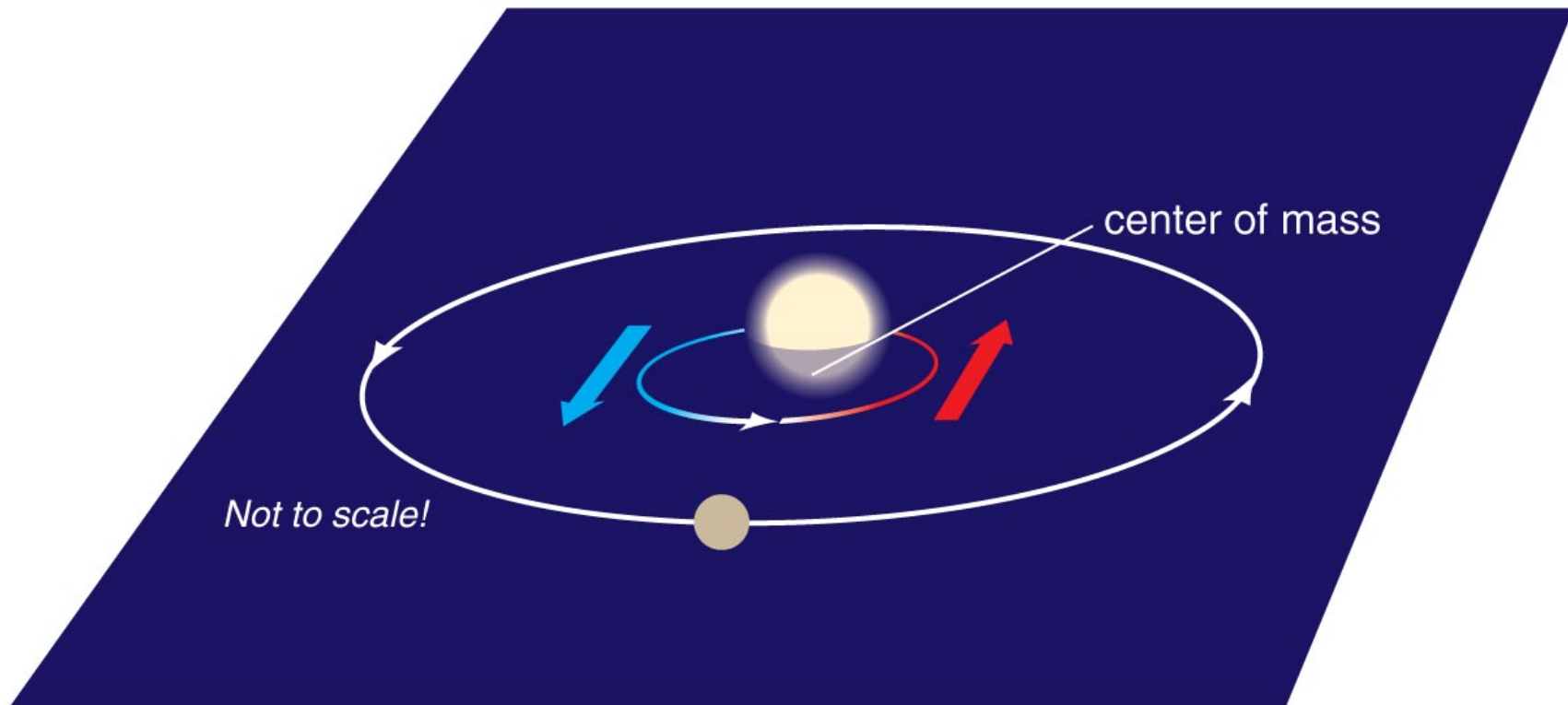
- El planeta alrededor de 51 Pegasi tiene una masa similar a la de Júpiter, a pesar de su pequeña distancia orbital.

Otros planetas extrasolares



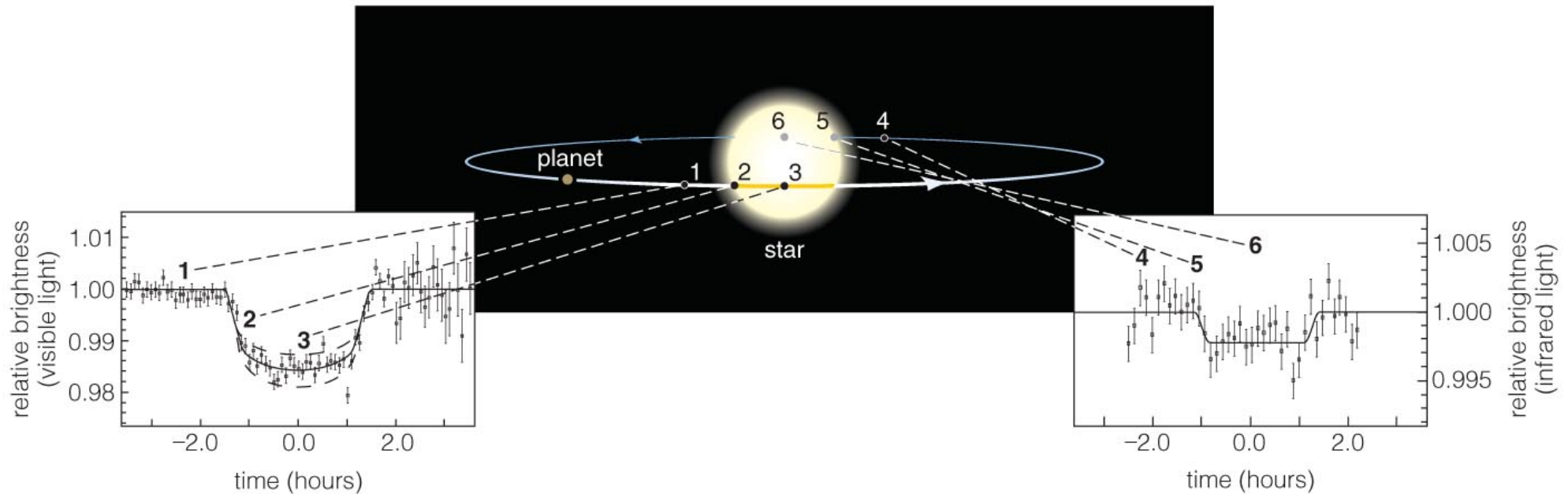
- Los datos del cambio Doppler nos hablan sobre la masa de un planeta y la forma de su órbita.

Masa planetaria y inclinación de la órbita



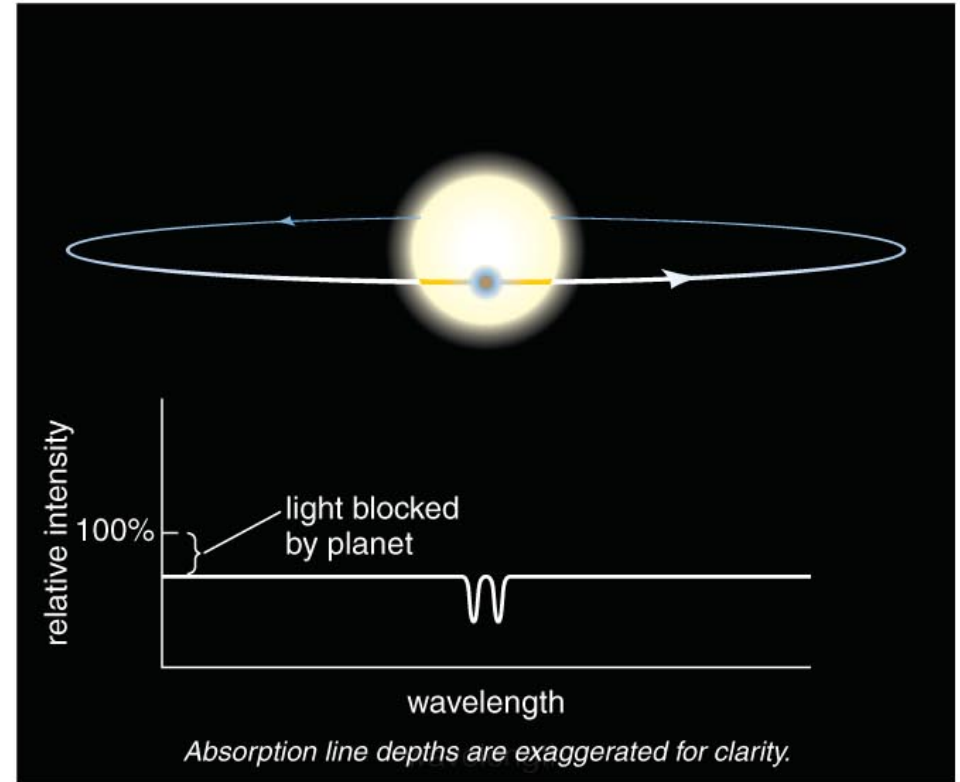
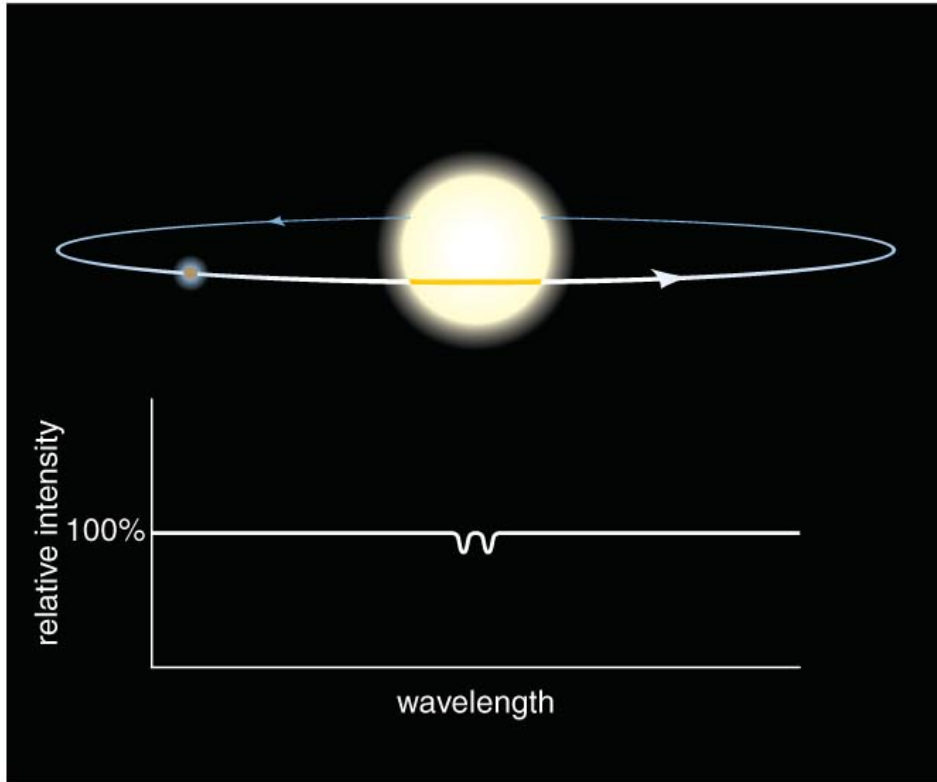
- No podemos medir una masa exacta para un planeta sin conocer la inclinación de su órbita, porque el Cambio Doppler nos dice solo la velocidad hacia o desde nosotros.
- Los datos Doppler nos dan límites más bajos en las masas.

Tránsitos y eclipses



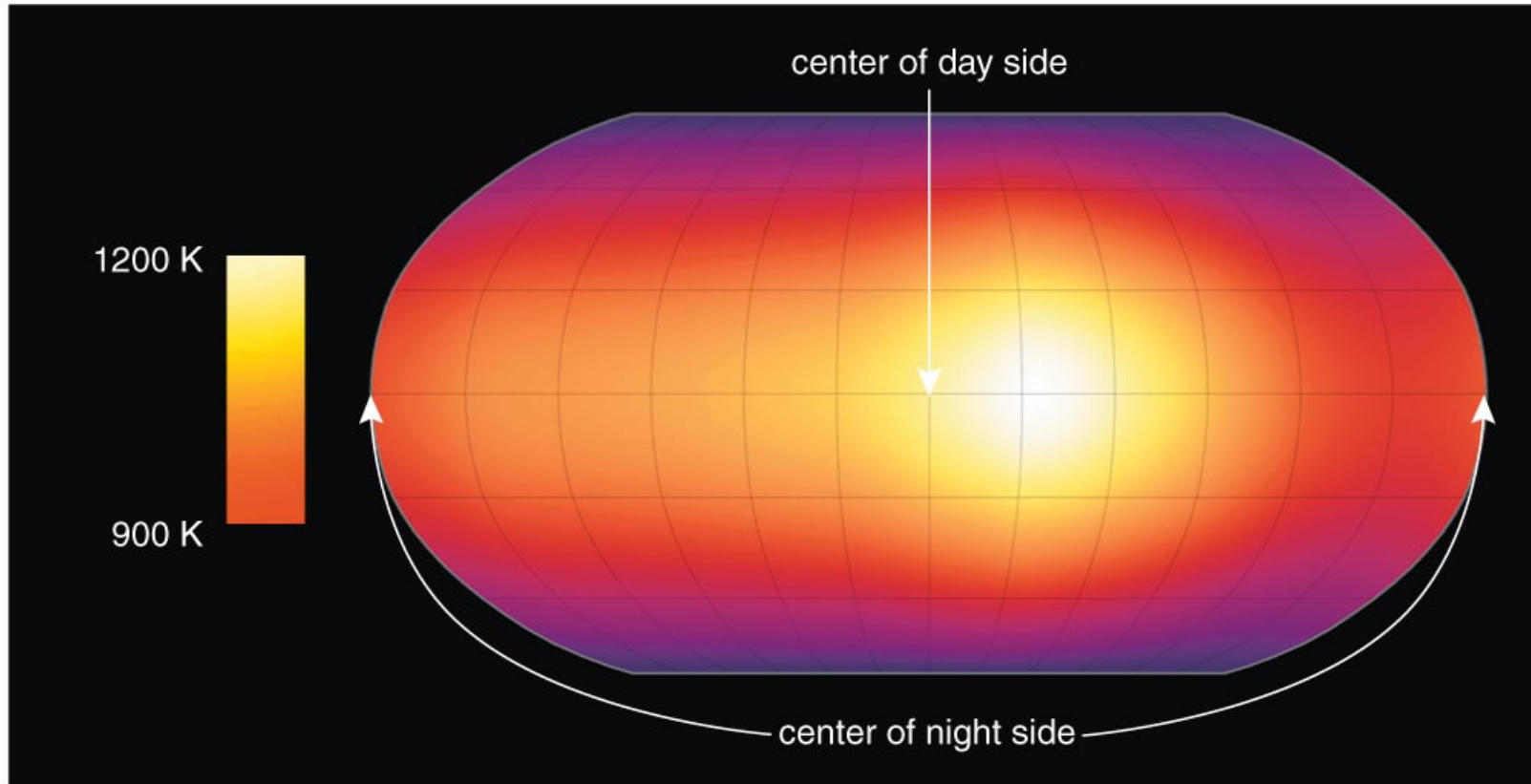
- Un **tránsito** es cuando un planeta se cruza frente a una estrella.
- El eclipse resultante reduce el brillo aparente de la estrella y nos dice el radio del planeta.
- Sin inclinación orbital: medición precisa de la masa planetaria

Espectro durante el tránsito



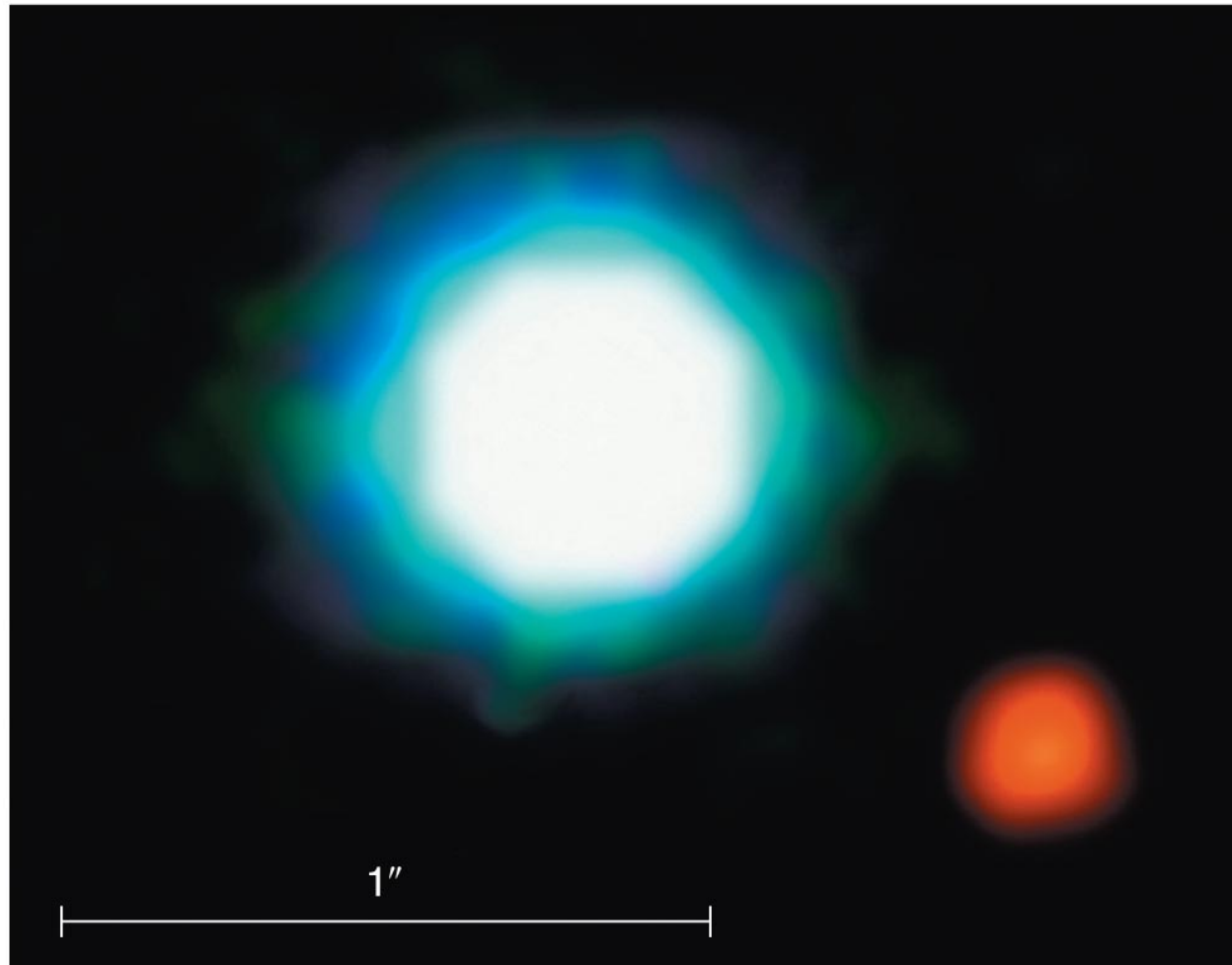
- El cambio en el espectro durante un tránsito nos informa sobre la composición de la atmósfera del planeta

Mapa de temperatura de la superficie



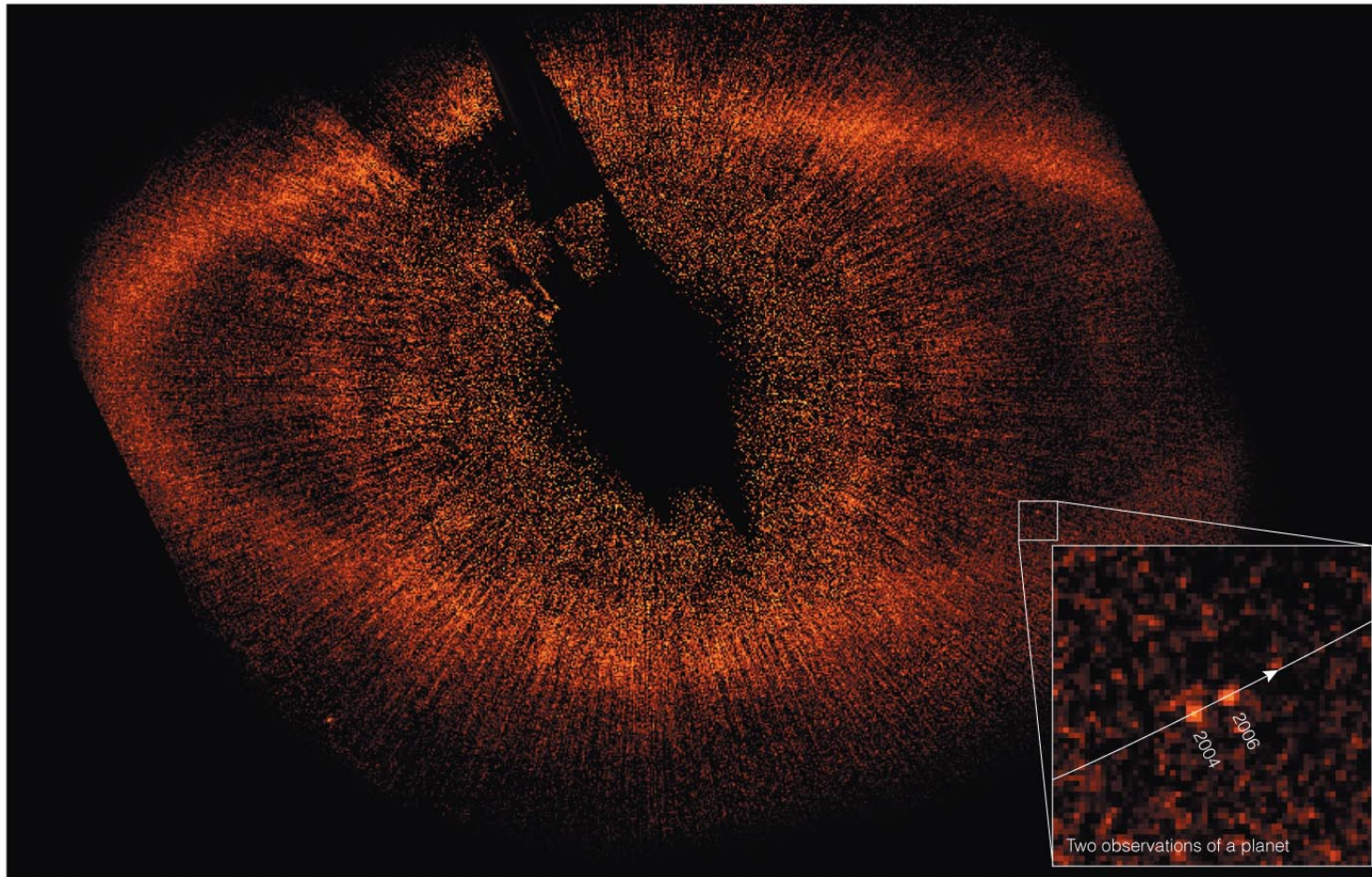
- Medir el cambio en el brillo infrarrojo durante un eclipse nos permite mapear la temperatura de la superficie de un planeta.

Detección directa



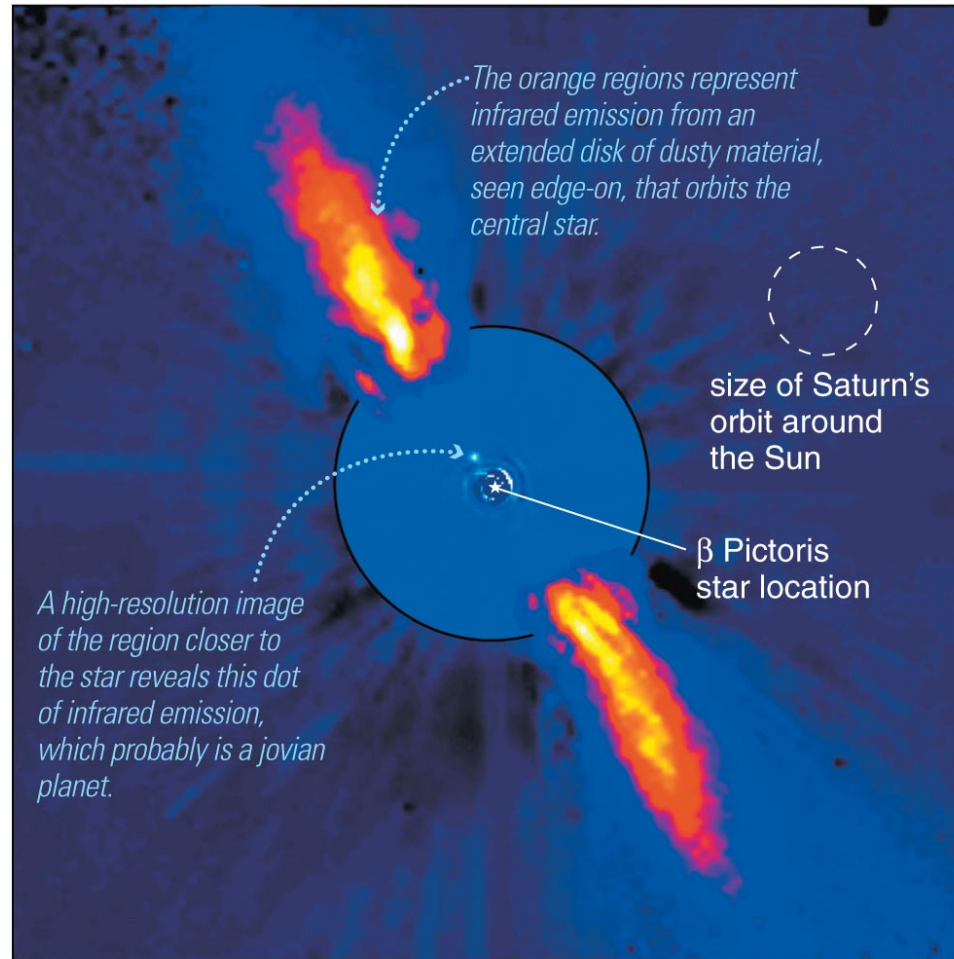
- Técnicas especiales como la óptica adaptativa están ayudando a habilitar la detección directa de planetas.

Detección directa



- Las técnicas que ayudan a bloquear la luz brillante de las estrellas también nos ayudan a encontrar planetas a su alrededor.

Detección directa



- Las técnicas que ayudan a bloquear la luz brillante de las estrellas también nos ayudan a encontrar planetas a su alrededor.

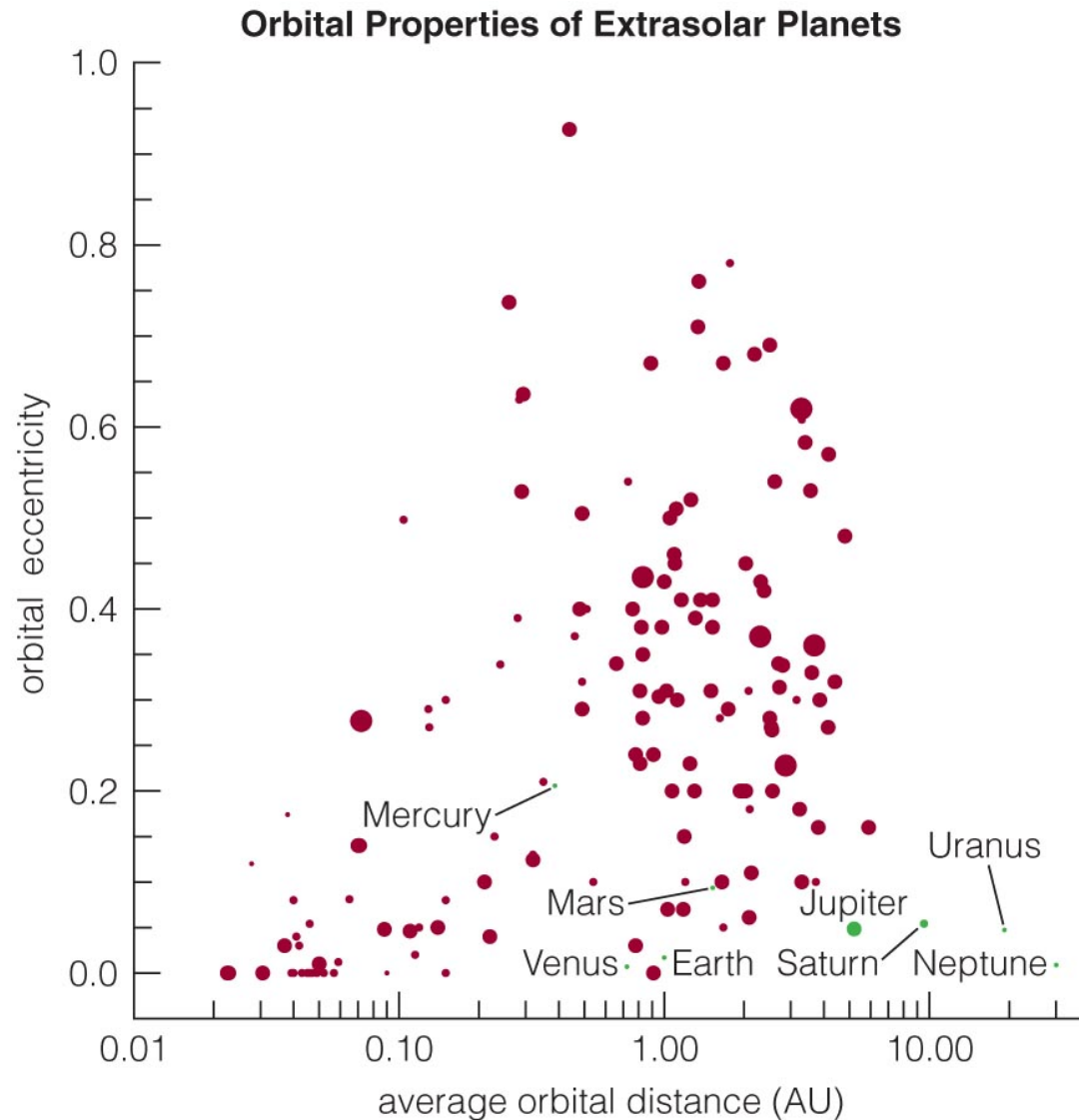
Otras estrategias de caza al planeta

- **Lentes gravitacionales:** la masa dobla la luz de una manera especial cuando una estrella con planetas pasa frente a otra estrella.
- **Características de los discos de polvo:** los huecos, las ondas o las ondulaciones en los discos de gas polvoriento alrededor de las estrellas pueden indicar la presencia de planetas.

La naturaleza de los planetas extrasolares

- ¿Qué hemos aprendido sobre los planetas extrasolares?
- ¿Cómo se comparan los planetas extrasolares con los planetas de nuestro sistema solar?

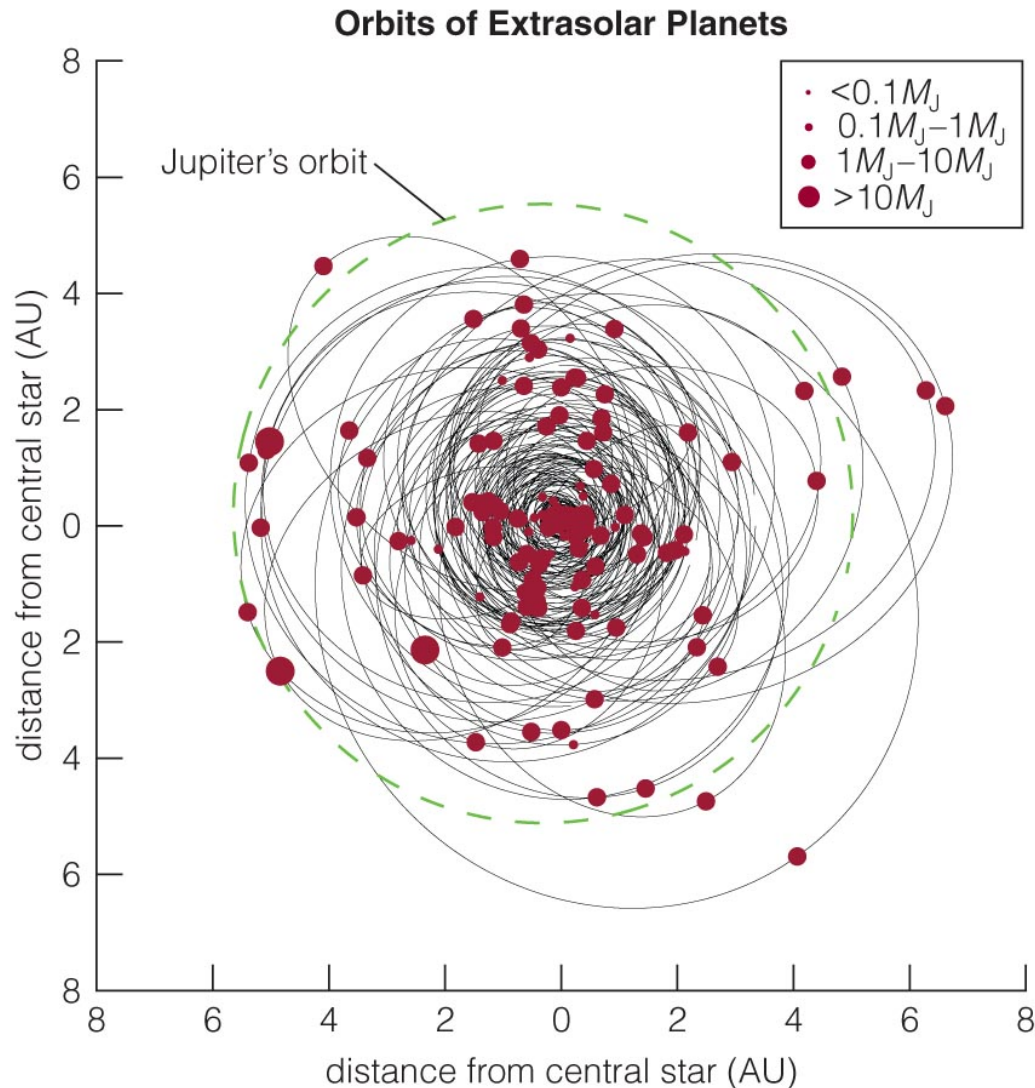
¿Qué hemos aprendido sobre los planetas extrasolares?



Propiedades medibles

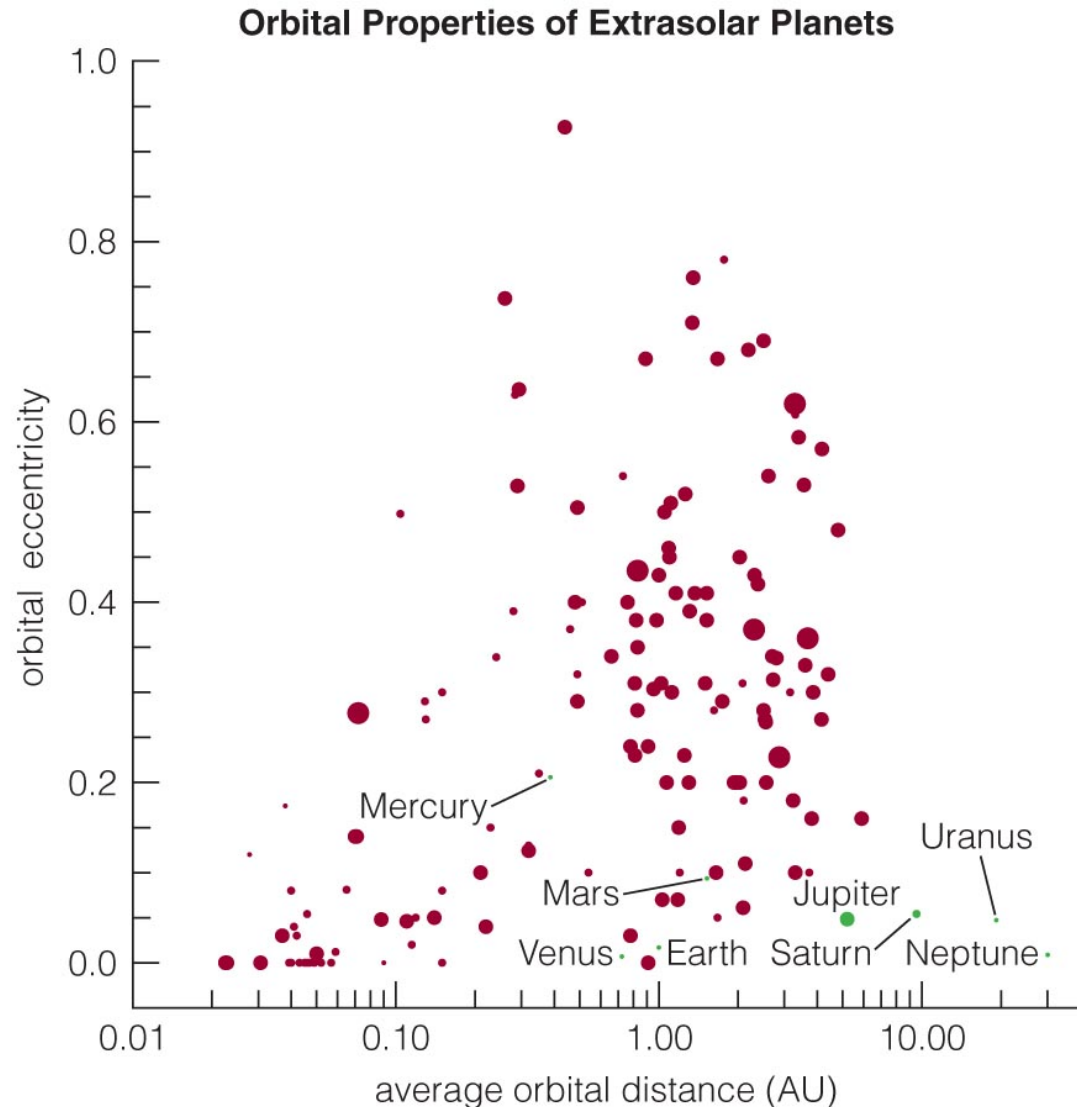
- Período orbital, distancia y forma
- Masa, tamaño y densidad del planeta.
- Composición

Órbitas de planetas extrasolares



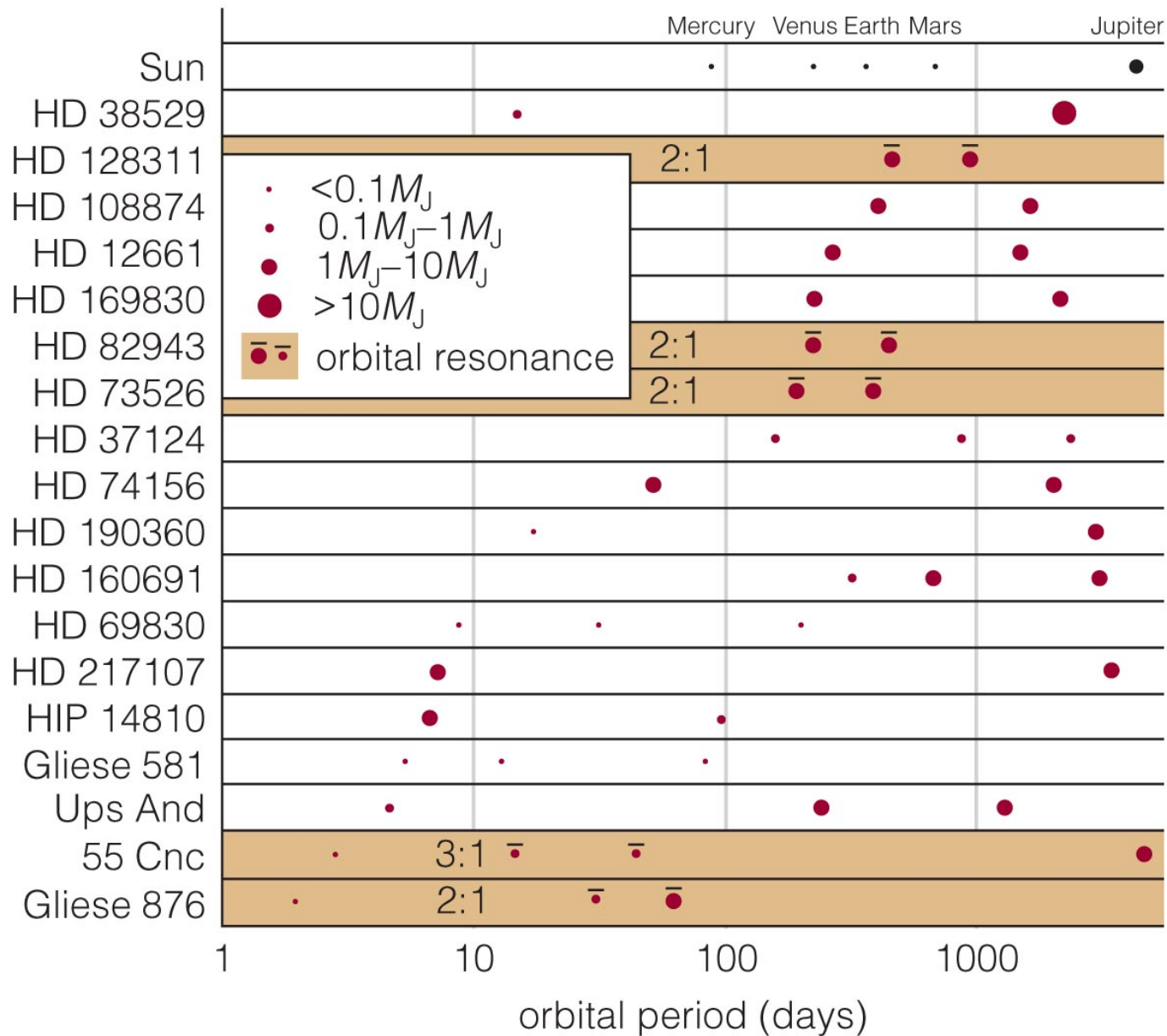
- La mayoría de los planetas detectados tienen órbitas más pequeñas que las de Júpiter.
- Los planetas a distancias mayores son más difíciles de detectar con la técnica Doppler.

Órbitas de planetas extrasolares



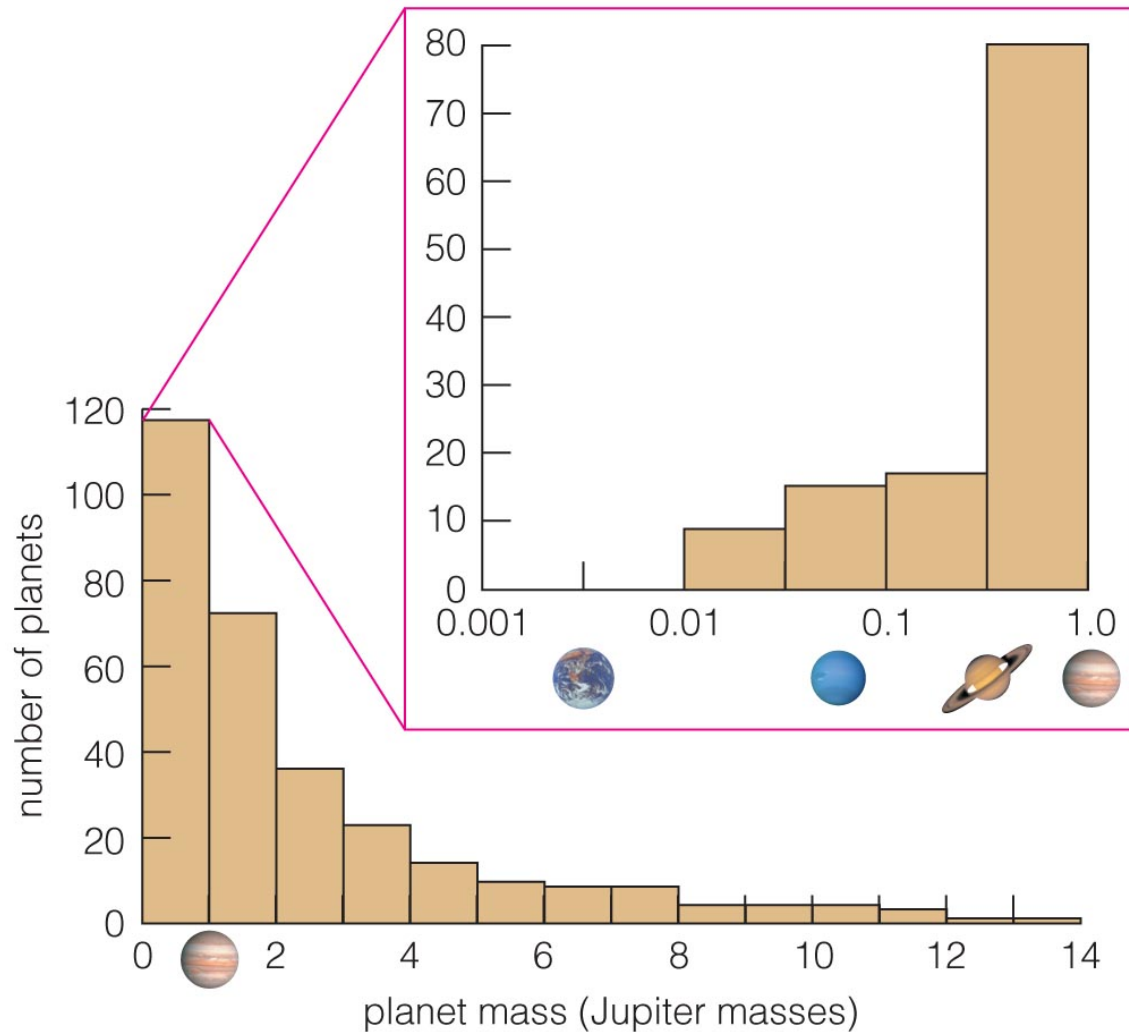
- Las órbitas de algunos planetas extrasolares son mucho más alargadas (tienen una mayor excentricidad) que las de nuestro sistema solar.

Sistemas de múltiples planetas



- Algunas estrellas tienen más de un planeta detectado.

Órbitas de planetas extrasolares



- La mayoría de los planetas detectados tienen mayor masa que Júpiter.
- Los planetas con masas más pequeñas son más difíciles de detectar con la técnica Doppler.

¿Cómo se comparan los planetas extrasolares con los planetas de nuestro sistema solar?



Características Sorprendentes

- Algunos planetas extrasolares tienen órbitas altamente elípticas.
- Algunos planetas masivos, llamados *Júpiter calientes*, orbitan muy cerca de sus estrellas.

Jupiters Calientes



Jupiter

Composed primarily of hydrogen and helium
5 AU from the Sun
Orbit takes 12 Earth years
Cloudtop temperatures ≈ 130 K
Clouds of various hydrogen compounds
Radius = 1 Jupiter radius
Mass = 1 Jupiter mass
Average density = 1.33 g/cm^3
Moons, rings, magnetosphere



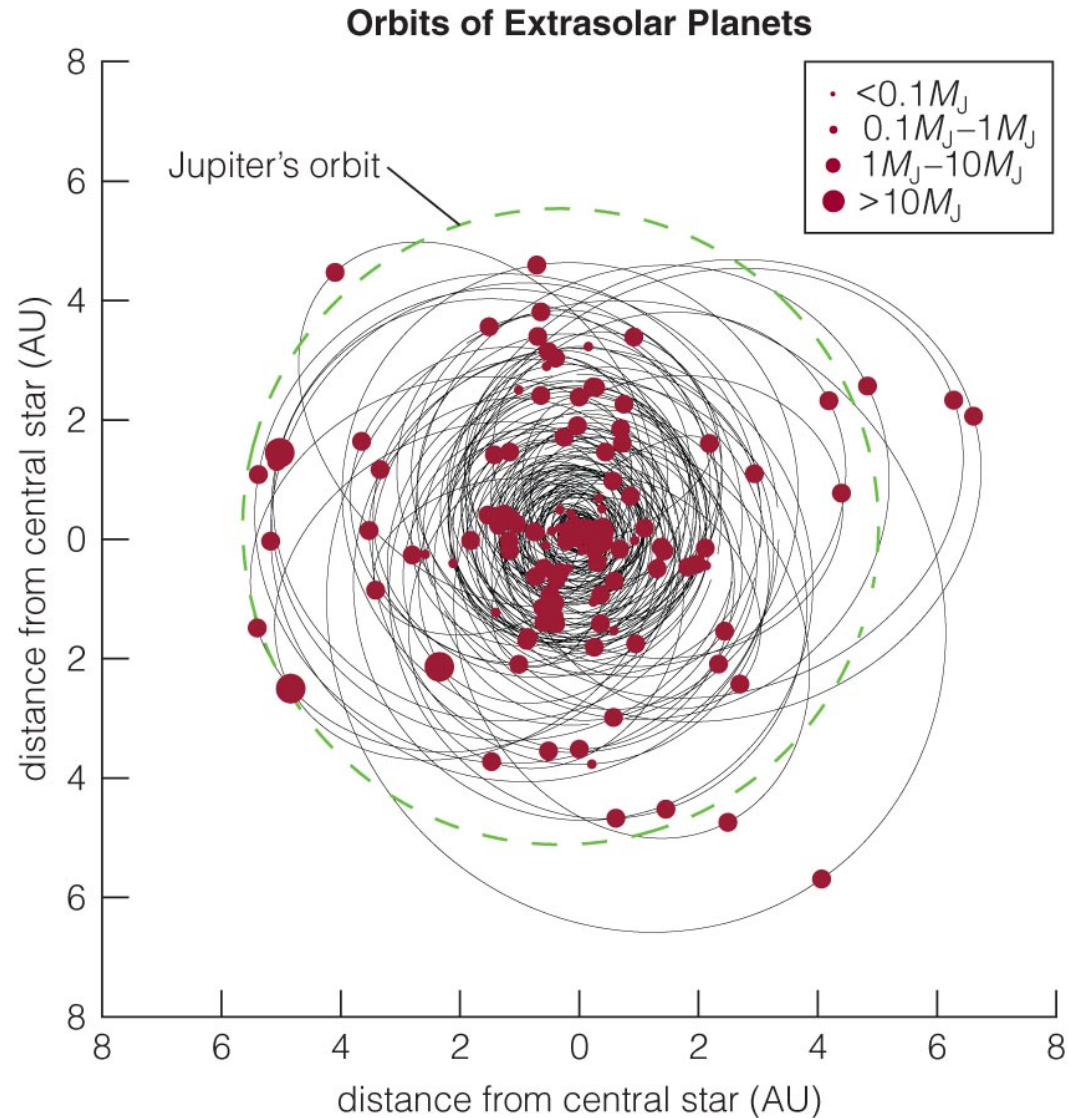
Hot Jupiters orbiting other stars

Composed primarily of hydrogen and helium
As close as 0.03 AU to their stars
Orbit as short as 1.2 Earth days
Cloudtop temperatures up to 1300 K
Clouds of "rock dust"
Radius up to 1.3 Jupiter radii
Mass from 0.2 to 2 Jupiter masses
Average density as low as 0.2 g/cm^3
Moons, rings, magnetospheres: unknown

La formación de otros sistemas solares

- ¿Podemos explicar las sorprendentes órbitas de muchos planetas extrasolares?
- ¿Necesitamos modificar nuestra teoría de la formación del sistema solar?

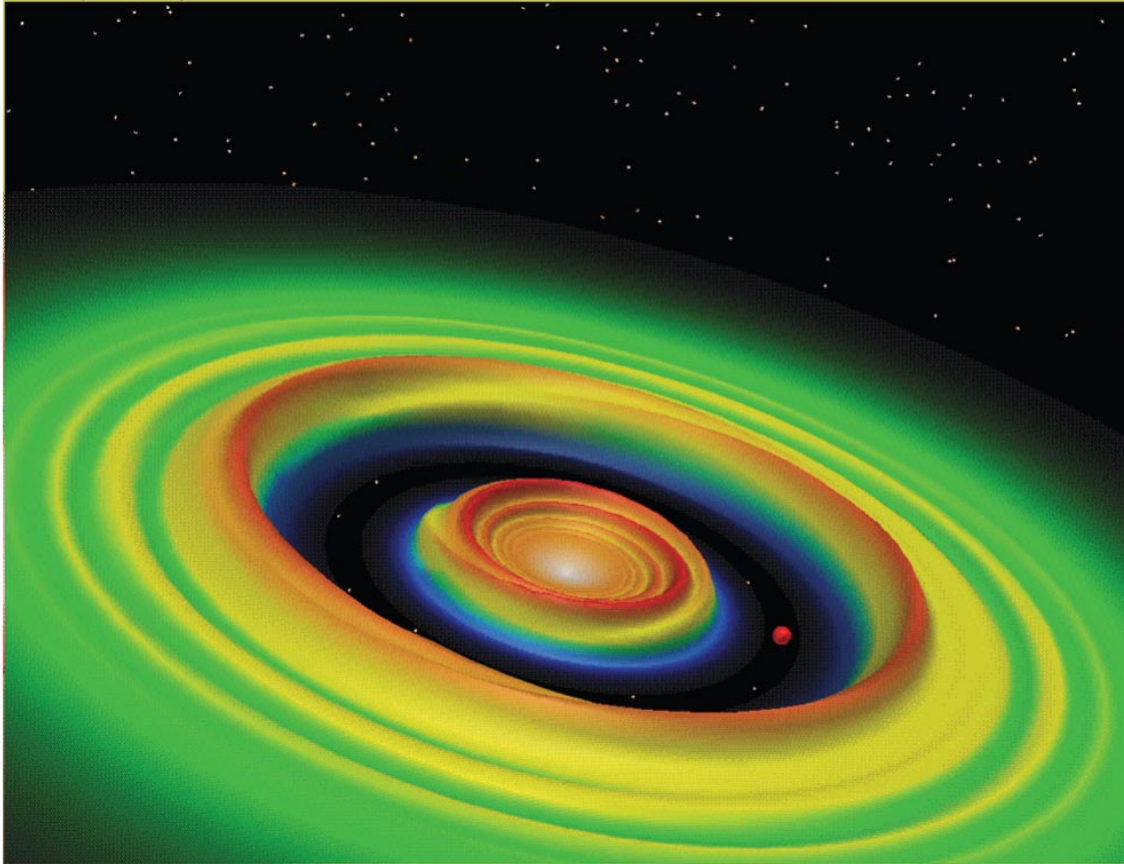
¿Podemos explicar las sorprendentes órbitas de muchos planetas extrasolares?



Revisitando la teoría nebular

- La teoría nebular predice que no deberían formarse masivos planetas similares a Júpiter dentro de la línea de escarcha (en $\ll 5$ UA).
- El descubrimiento de los Júpiter calientes ha forzado la reexaminación de la teoría nebular.
- La *migración planetaria* o los encuentros gravitacionales pueden explicar los Júpiter calientes.

Migración Planetaria

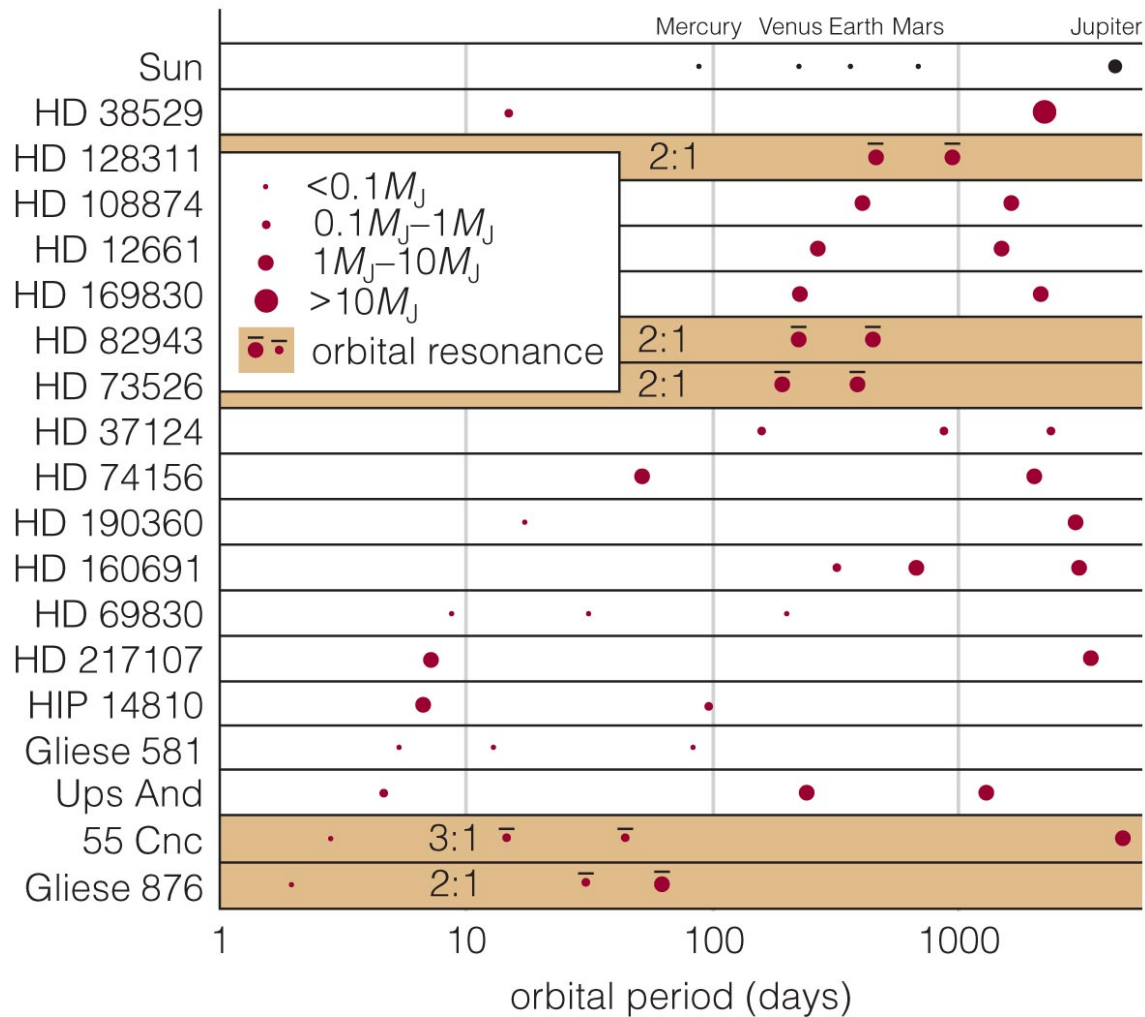


- El movimiento de un planeta joven puede crear ondas en un disco que forma un planeta.
- Los modelos muestran que la materia en estas ondas puede tirar de un planeta, haciendo que su órbita migre hacia adentro.

Encuentros gravitacionales

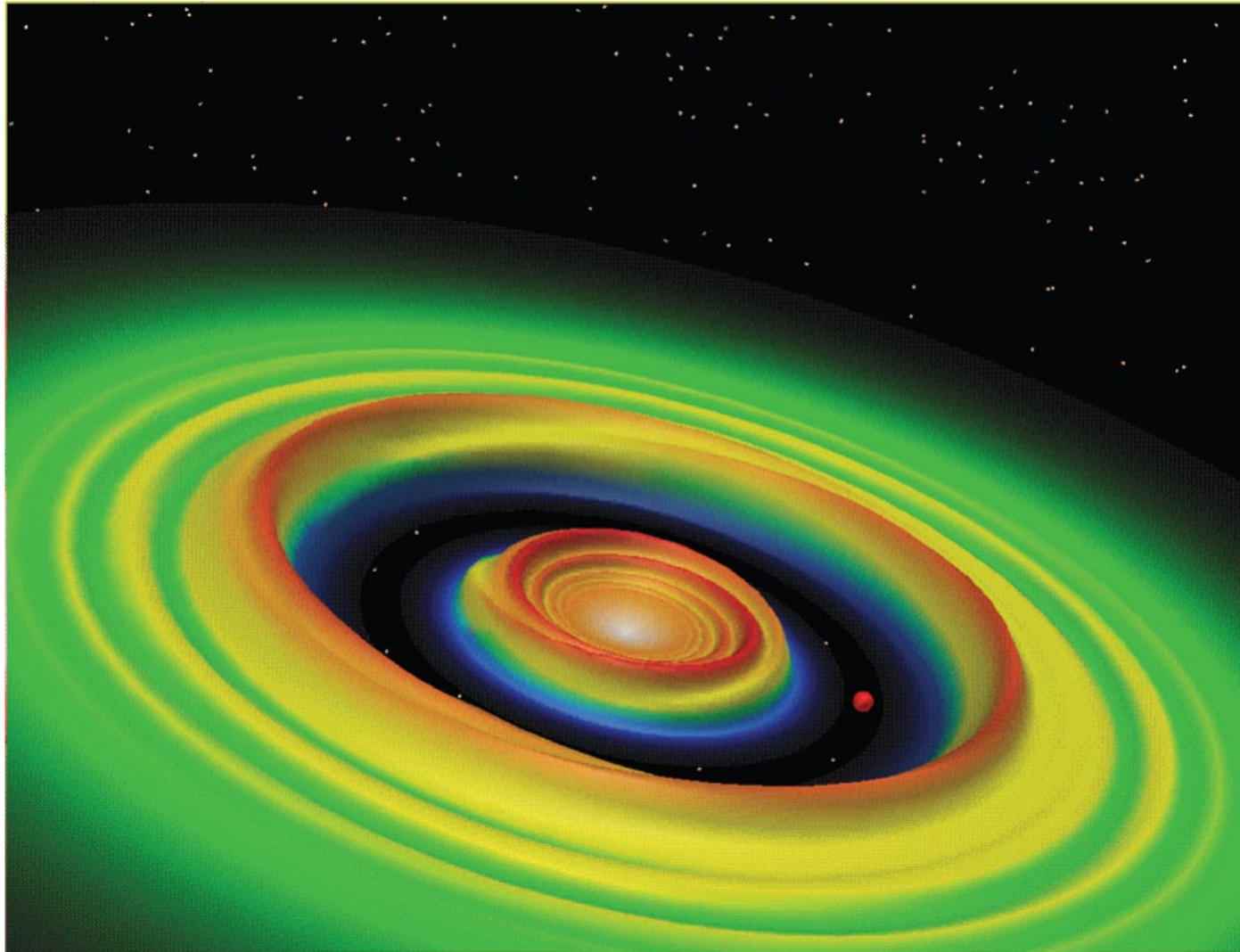
- Los encuentros gravitacionales cercanos entre dos planetas masivos pueden expulsar un planeta mientras lanzan al otro a una órbita altamente elíptica.
- Múltiples encuentros cercanos con planetesimales más pequeños también pueden causar una migración interna.

Resonancias Orbitales



- Las resonancias entre planetas también pueden hacer que sus órbitas se vuelvan más elípticas.

¿Necesitamos modificar nuestra teoría de la formación del sistema solar?



Modificando la teoría nebular

- Las observaciones de planetas extrasolares han demostrado que la teoría nebular era incompleta.
- Efectos como la migración planetaria y los encuentros gravitacionales pueden ser más importantes de lo que se pensaba anteriormente.

Planetas: comunes o raros?

- Una de cada diez estrellas examinadas hasta ahora ha resultado tener planetas.
- Los otros pueden tener planetas más pequeños (del tamaño de la Tierra) que las técnicas actuales no pueden detectar.

Encontrar más mundos nuevos

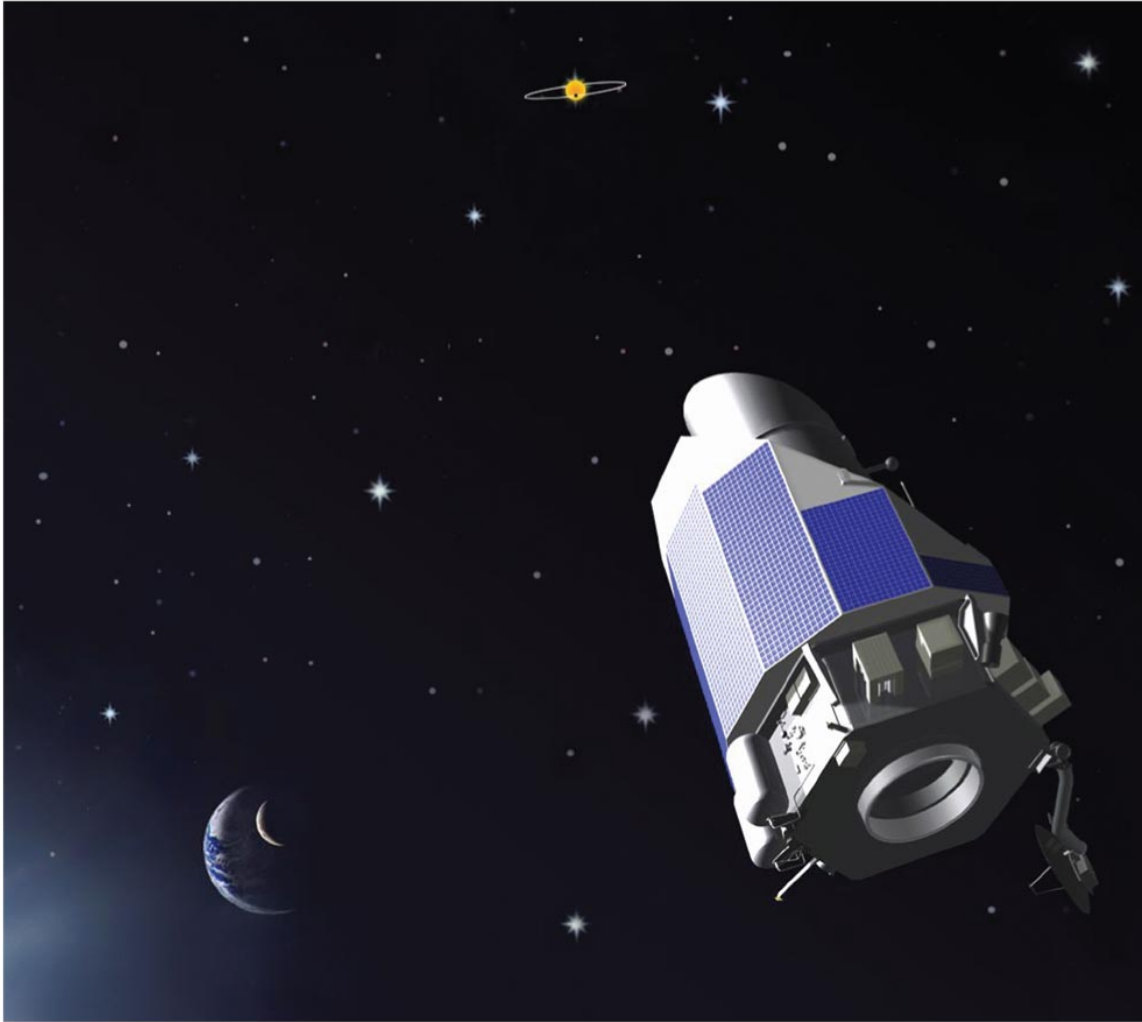
- ¿Cómo buscaremos planetas similares a la Tierra?

¿Cómo buscaremos planetas similares a la Tierra?



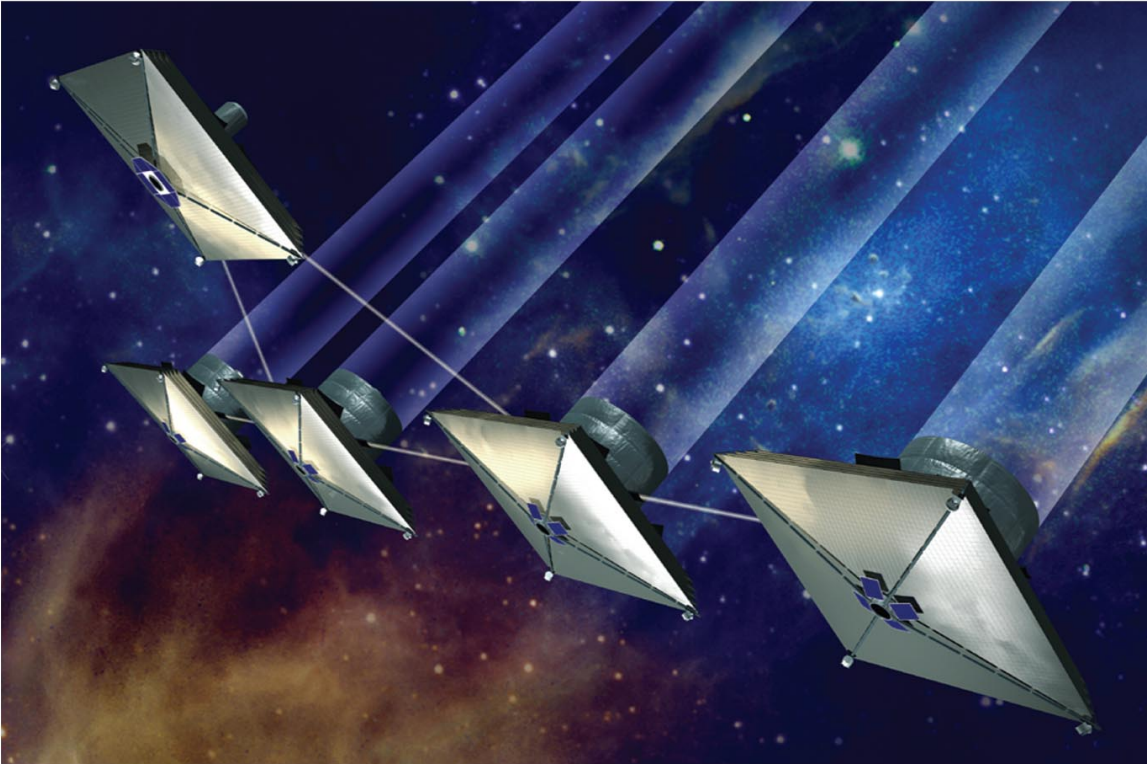
Insert TCP 6e Figure 13.18

Misiones de transito



- La misión Kepler de la NASA se lanzó en 2008 para comenzar a buscar planetas en tránsito.
- Está diseñado para medir la disminución de 0.008% en el brillo cuando un planeta de masa terrestre eclipsa a una estrella similar al Sol.

Detección directa



Mission concept for NASA's Terrestrial Planet Finder (TPF)

- Determinar si los planetas de masa de la Tierra son realmente como la Tierra requiere detección directa.
- Se están planeando misiones capaces de bloquear suficiente luz estelar para medir el espectro de un planeta similar a la Tierra.