[entry]nyt/global/

Observatorio Astronómico de Quito

Sistema Solar:
Formación, evolución y dinámica

Mario Llerena
mario.llerena01@epn.edu.ec

22 de septiembre 2018

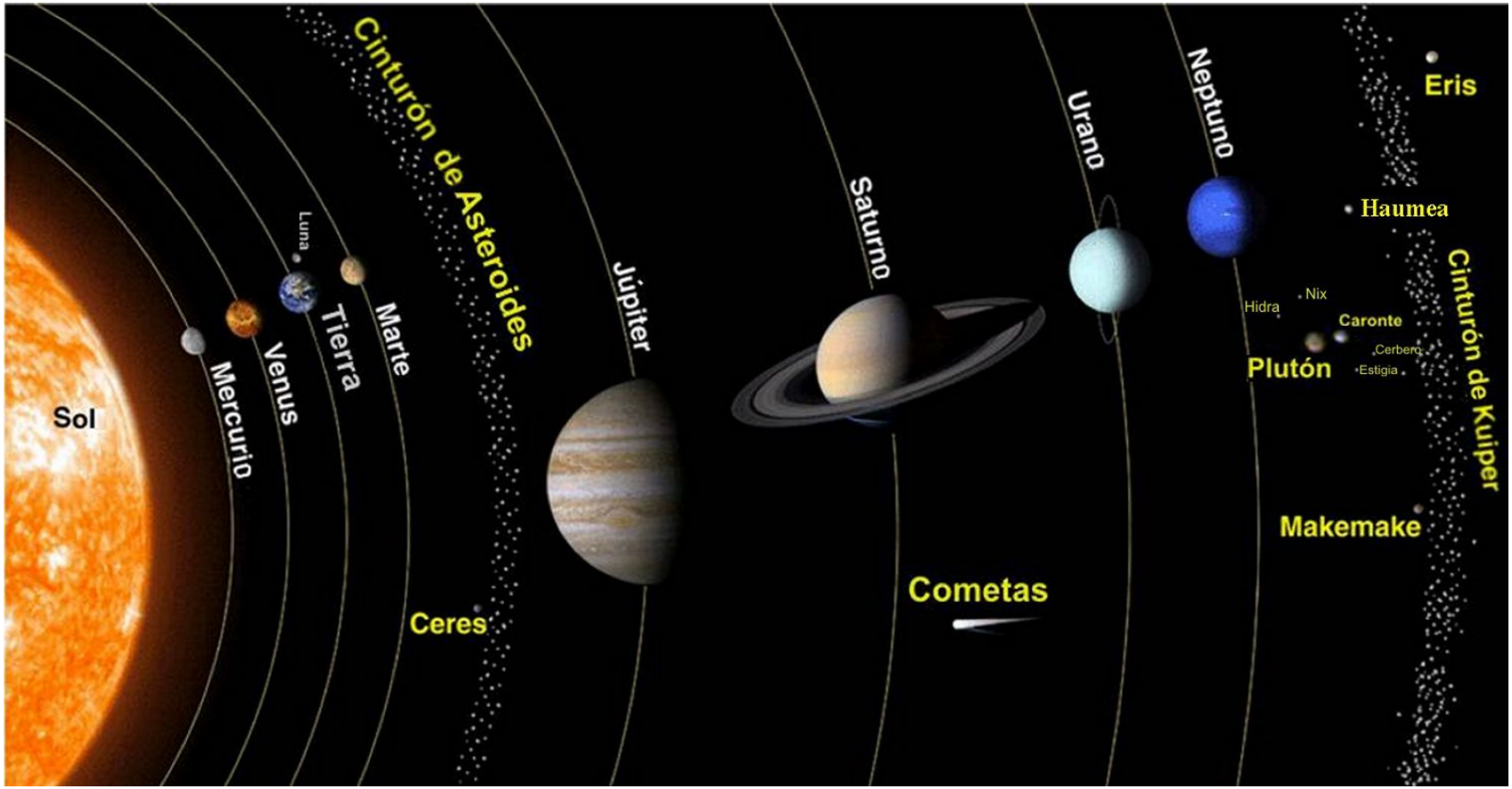
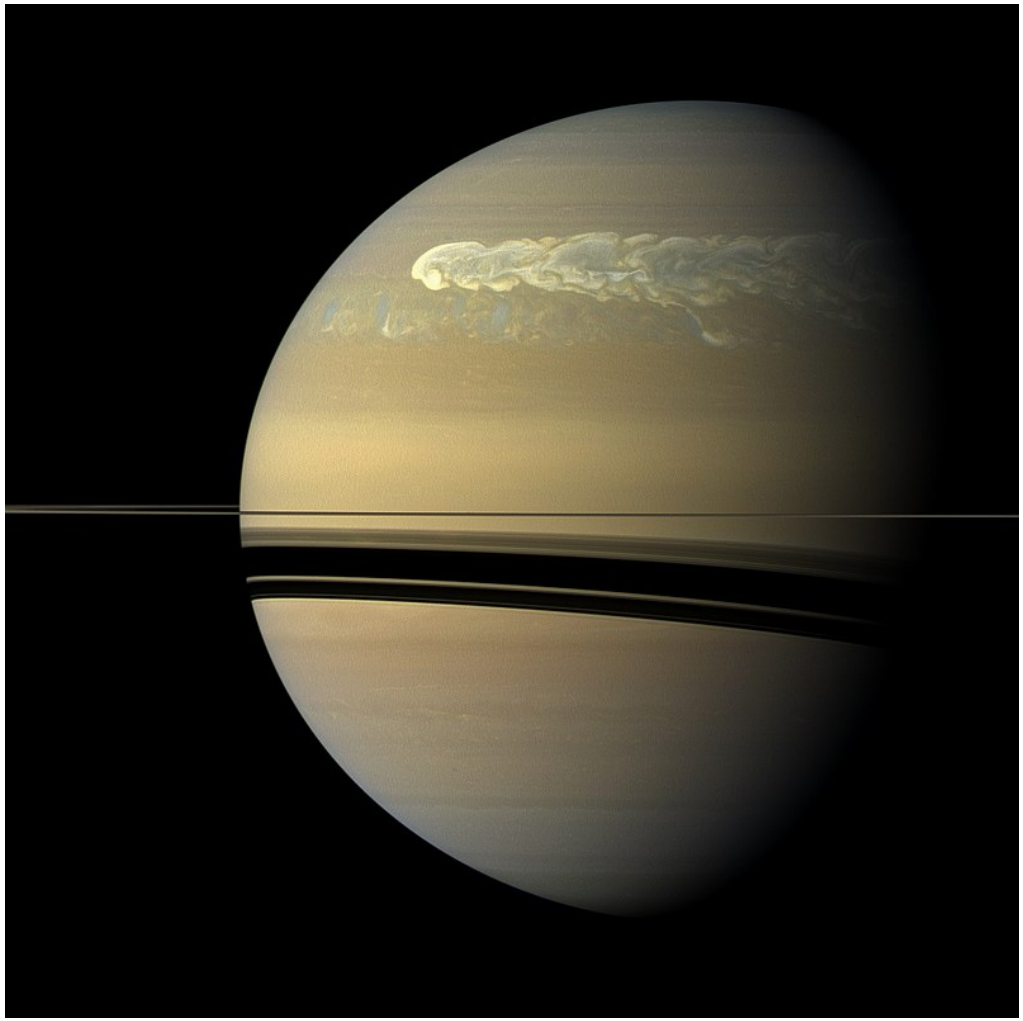
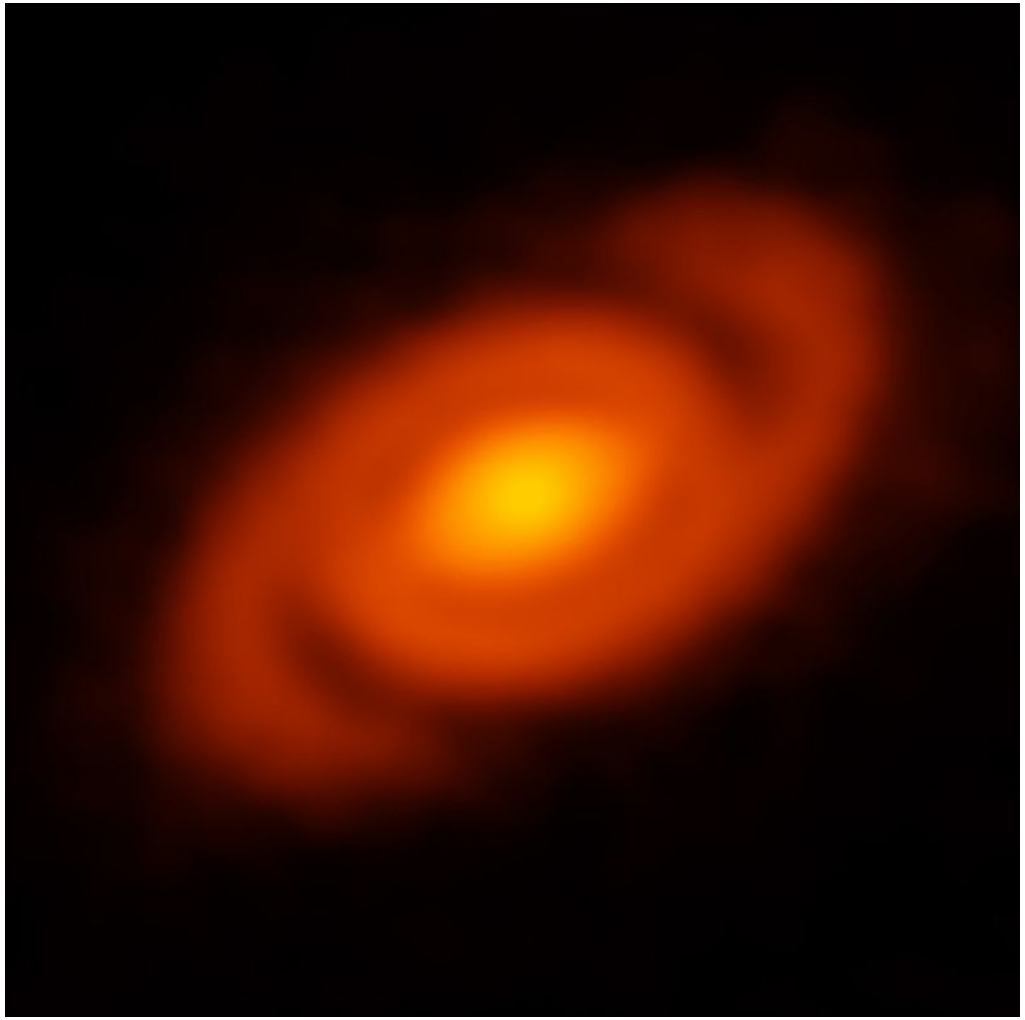
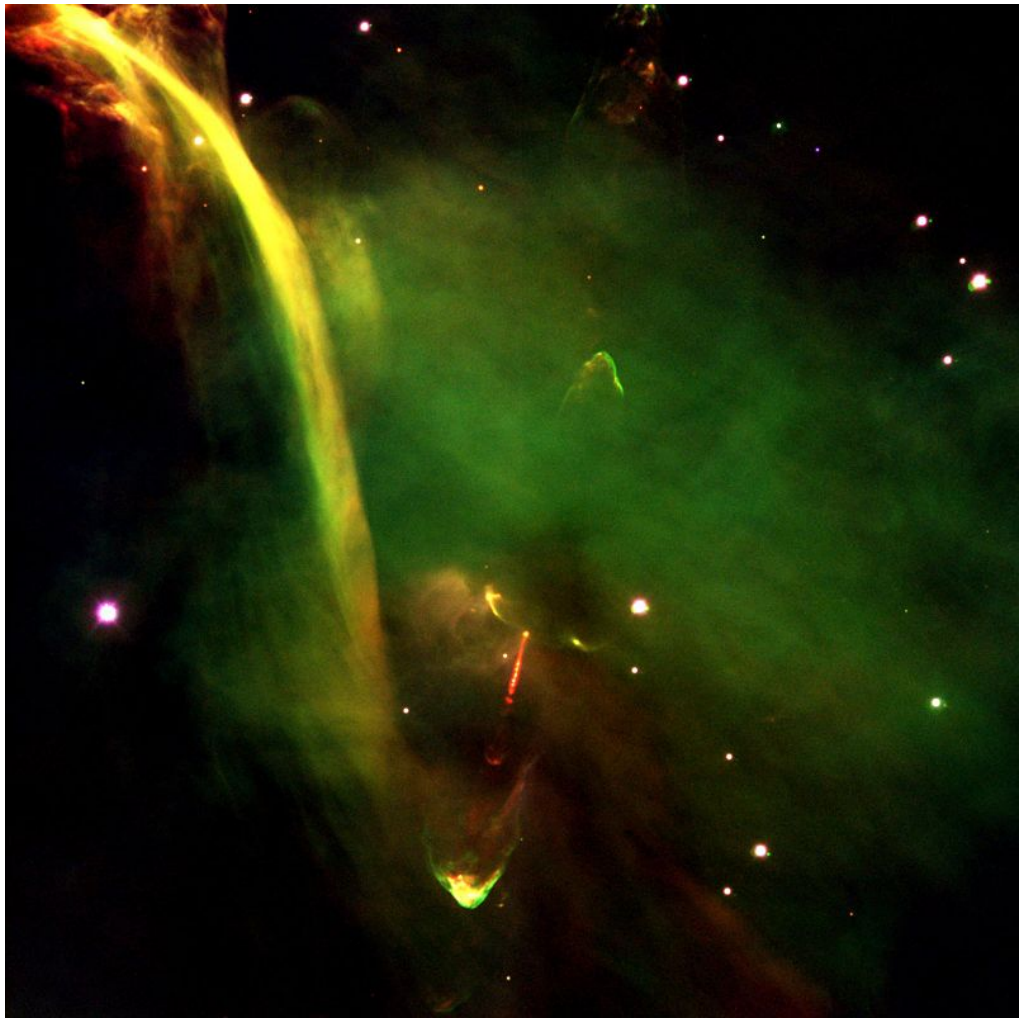


Ilustración del Sistema Solar

Antes de empezar







Formación del Sistema Solar

Formación del Sistema Solar

Debe explicar:

- El Sol gira lentamente y sólo tiene 1 % del momento angular, pero tiene el 99.9 % de su masa.
- Los planetas tienen el 99 % del momento angular y sólo un 0.1 % de la masa.
- La formación de los planetas terrestres con núcleos sólidos.
- La formación de los planetas gaseosos gigantes.
- La formación de los satélites planetarios.

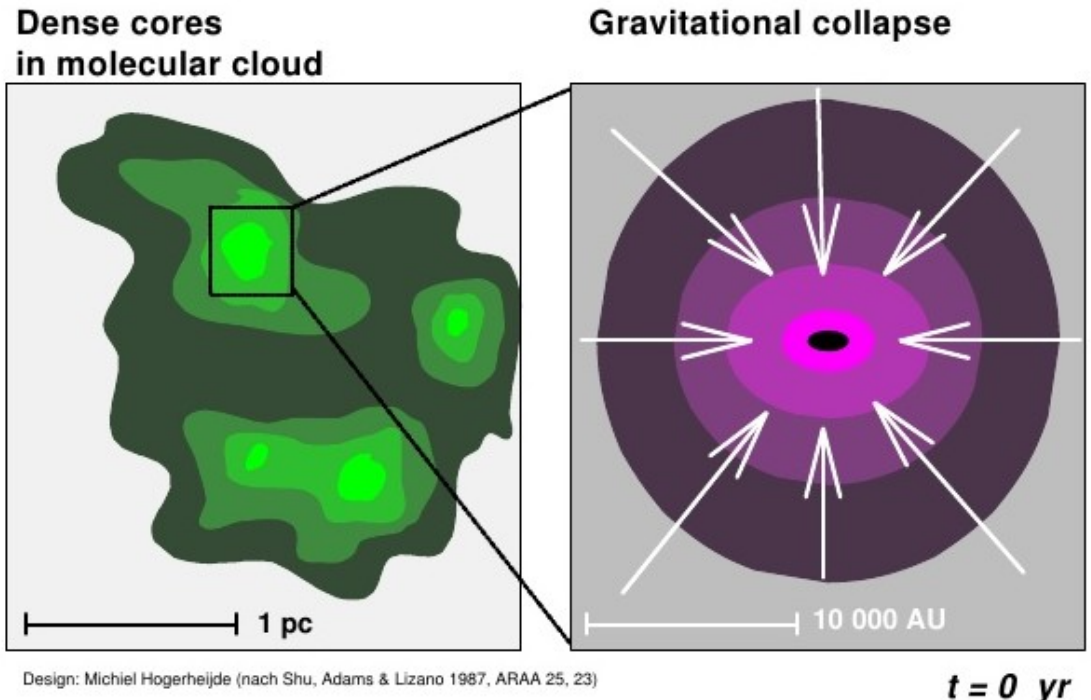
Hipótesis nebular

- Inicio: nebulosa solar.
- Hidrógeno y helio, pero además con átomos y granos de polvo de materiales más pesados.

Pilares de la Creación. Créditos: NASA,ESA,The Hubble Heritage Team(STScI/AURA)

Hipótesis nebular

- **Comienzo de la formación**: debido a alguna perturbación hace unos 4570 millones de años
- **Contracción**: La nube empieza a colapsar por su propia gravedad. Durante más de 100000 años, se reduce a 100 UA, se calienta (energía térmica) y se comprime en el centro.



Hipótesis nebular

- **Disco de acreción**: el resto de la materia se acumuló y acható en un disco que giraba a su alrededor.
- **Proto-estrella**: se forma en el centro. El resto del material se convirtió en algo a lo que llamamos disco protoplanetario.

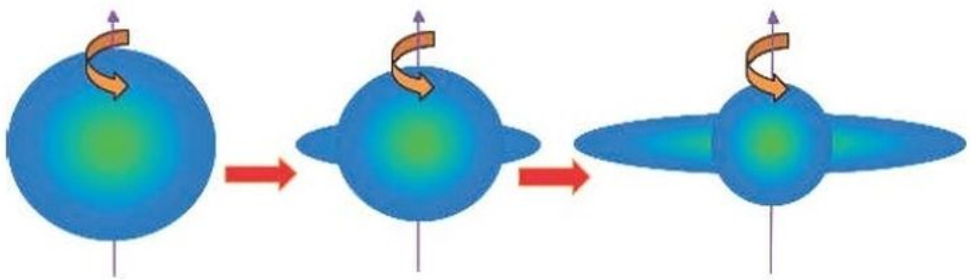
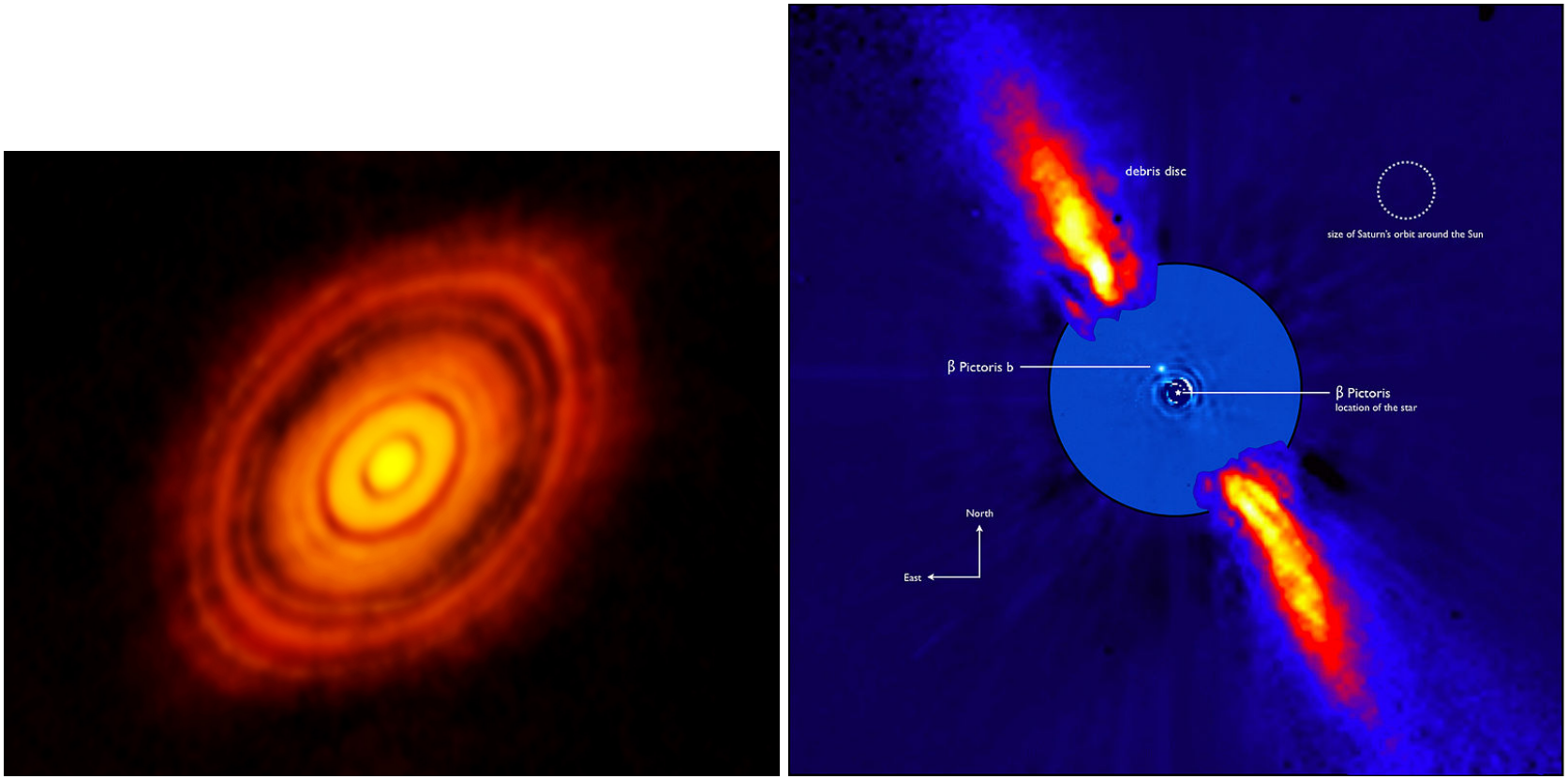


Ilustración de la formación del disco en una nebulosa rotante. Créditos:

astronomy.swin.edu.au/sao/downloads/HET620-M09A01.pdf

Hipótesis nebular

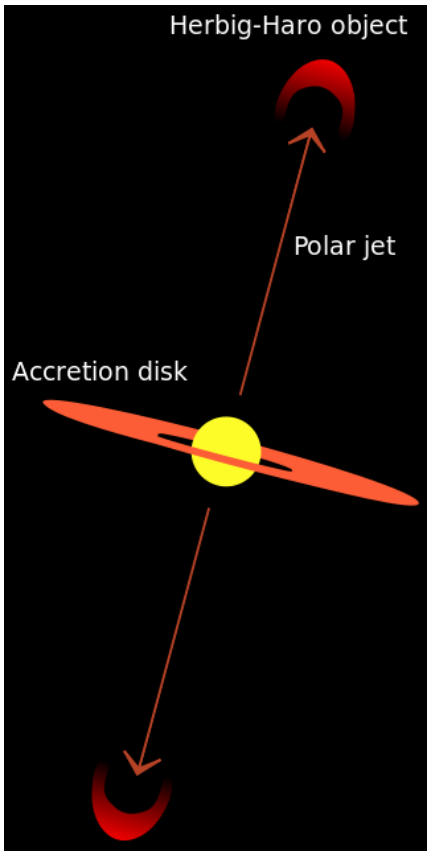
Se han observado discos protoplanetarios en otras estrellas.



A la izquierda: Disco protoplanetario en la estrella HL Tauri. Créditos: ALMA/ESO. A la derecha: Disco de escombros en β-Pictoris con la presencia de un posible planeta β-Pictoris b. Créditos: ESO/A.-M. Lagrange et al.

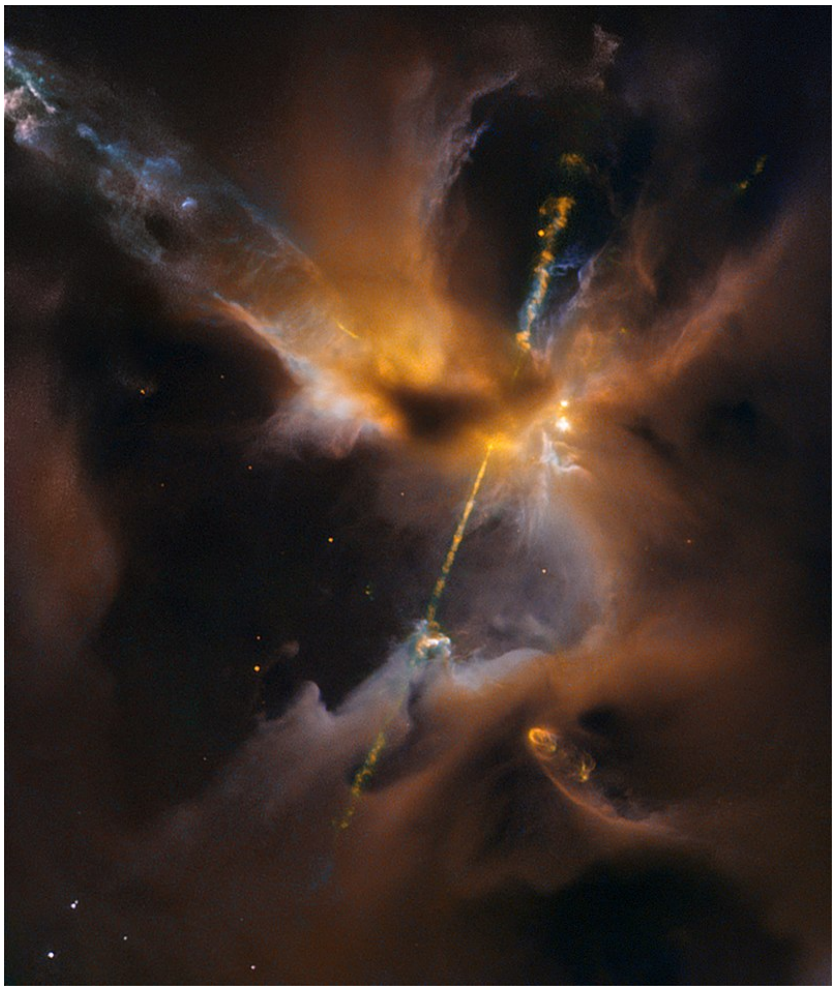
Hipótesis nebular

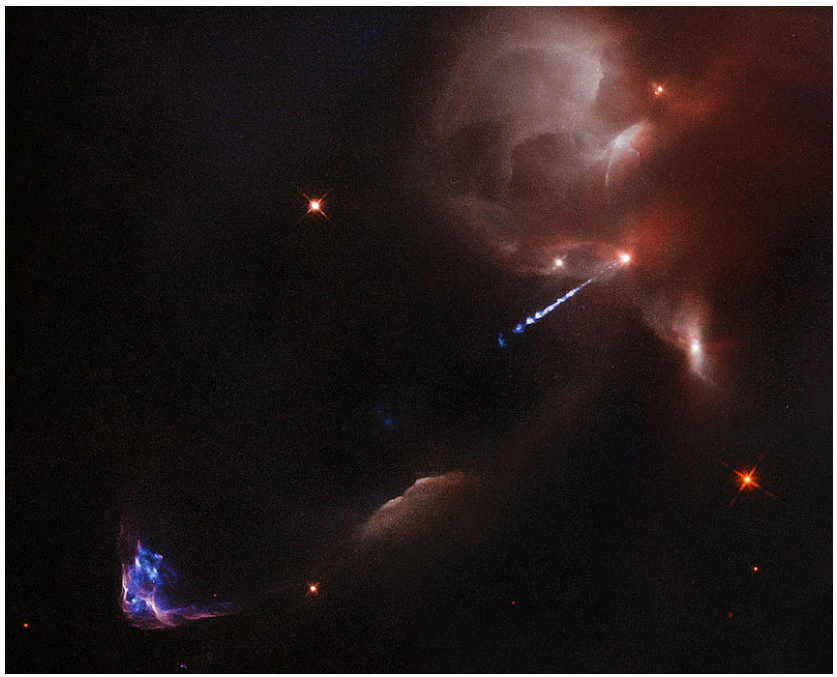
Objeto Herbig-Haro: evidencia de la hipótesis



A la izquierda: Diagrama de la formación de objetos HH. A la derecha: Telescopio en el Observatorio Astrofísico Nacional de Tonantzintla

Hipótesis nebular





A la izquierda: Objeto Herbig–Haro 24. A la derecha: Objeto Herbig–Haro 34. Créditos: ESA/Hubble

Hipótesis nebular

- **Planetesimales:** los granos de polvo se pegan unos a otros (el hielo ayuda) formando partículas más grandes (tamaño de rocas o pequeños asteroides).
- **Protoplanetas:** el crecimiento de las partículas más grandes se acelera, y acumulan toda la materia sólida cerca de su propia órbita (100 000 a 20 000 000 años).
- **Viento solar:** barre el gas y polvo sobrante.

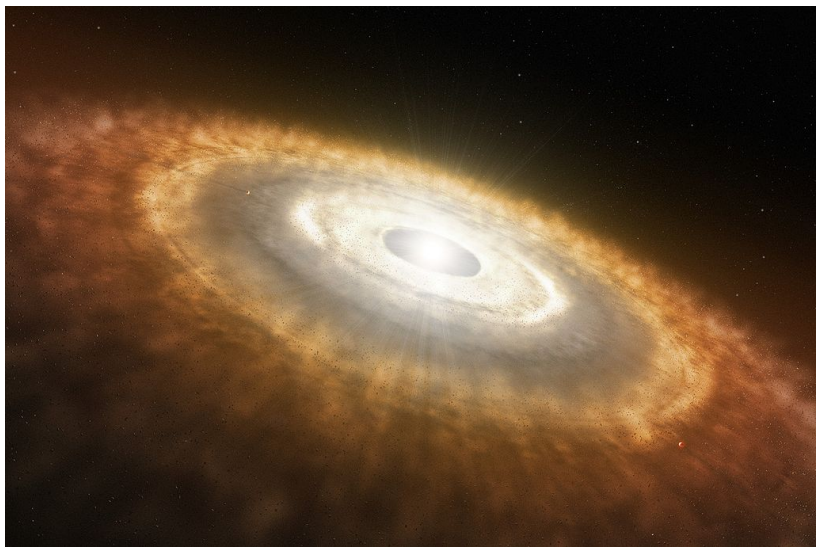


Ilustración de un disco protoplanetario. Créditos: ESO/L. Calçada - ESO.

Hipótesis nebular

A modo de resumen:

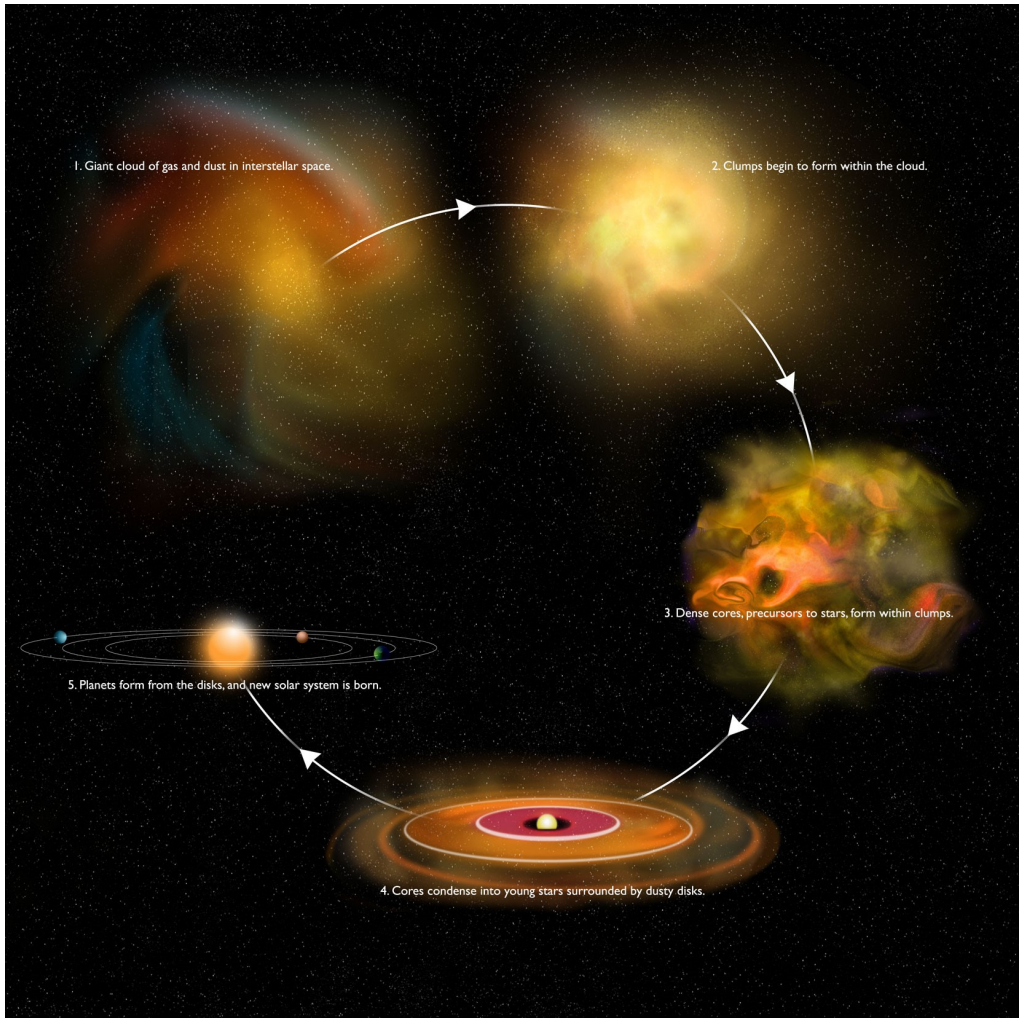


Ilustración del ciclo de formación de una estrella y el sistema estelar. Créditos: Bill Saxton, NRAO/AUI/NSF

Inconsistencias

- Los planetas interiores y los planetas exteriores tienen una inclinación axial completamente diferente.
- Existencia de *Júpiteres calientes* que orbitan muy cerca de sus estrellas, tardando sólo unos días en dar una vuelta a su alrededor (SOLUCIÓN: partículas de polvo del disco original crearon fricción).
- Urano y Neptuno están ubicados en una región donde su formación es muy poco probable (SOLUCIÓN: migraciones planetarias).

Teorías alternativas

Teoría de los Proto-planetas

Densa nube interestelar que formó un cúmulo. Las estrellas resultantes capturaron planetas formados en la misma nube.

Teoría de Captura

El Sol interactuó con una protoestrella cercana, extrayendo materia de ésta. Los planetas terrestres se explican por medio de colisiones entre los proto-planetas cercanos al Sol. Y los planetas gigantes y sus satélites, se explican como condensaciones en el filamento extraído.

Teoría de Acreción

El Sol pasó a través de una densa nube interestelar, y emergió rodeado de un envoltorio de polvo y gas.

Dinámica de los cuerpos del Sistema Solar

Gravitación Universal

El Sol ejerce sobre los planetas una gran fuerza atractiva.

$$F = -G\frac{mM}{r^2}, \qquad G = 6{,}67 \times 10^{-11}\text{N m}^2\ /\text{kg}^2 \tag{1}$$

Órbita

Es la trayectoria que describe un objeto físico alrededor de otro mientras está bajo la influencia de una fuerza central, como la fuerza gravitatoria. Dentro de un sistema planetario, los planetas, planetas enanos, asteroides y cometas orbitan alrededor de la estrella central, el Sol, con órbitas elípticas.

Leyes de Kepler

Primera Ley de Kepler - Ley de la órbita

Todos los planetas se mueven en órbitas elípticas, con el Sol en uno de los focos.

Segunda Ley de Kepler - Ley de las áreas

La línea que une un planeta al Sol, barre áreas iguales en tiempos iguales.

Tercera Ley de Kepler - Ley de los periodos

El cuadrado del periodo de cualquier planeta, es proporcional al cubo del semieje mayor de su órbita

Órbitas

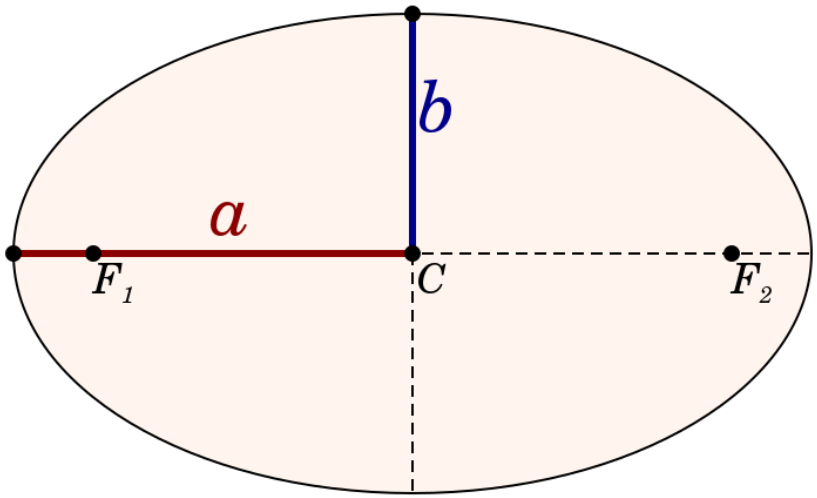


Ilustración de una elipse. Créditos: M. W. Toews

A partir de la periapsis y apoapsis se puede calcular la excentricidad:

$$\frac{r_p}{r_a} = \frac{1-e}{1+e} \tag{2}$$

Órbitas

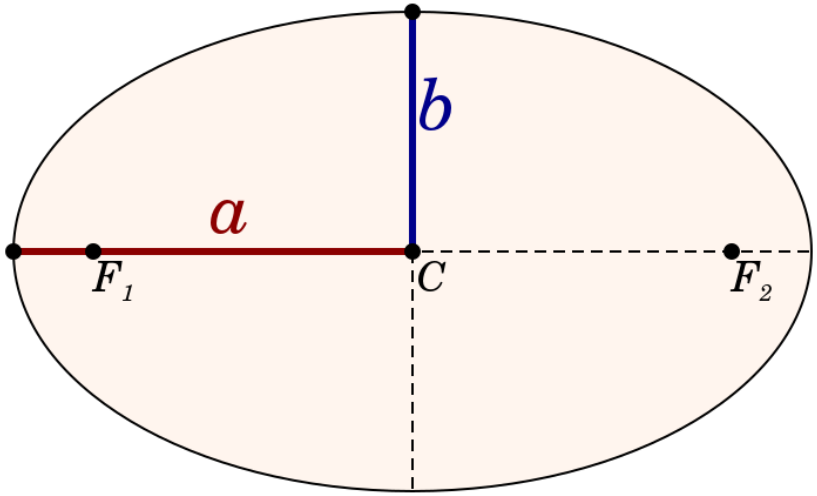


Ilustración de una elipse. Créditos: M. W. Toews

El periodo orbital es el tiempo que tarda un planeta u otro objeto en realizar una órbita completa y viene dada por:

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\mu}} a^{3/2} \tag{3}$$

donde $\mu = GM$ es el parámetro estándar gravitacional

Órbitas

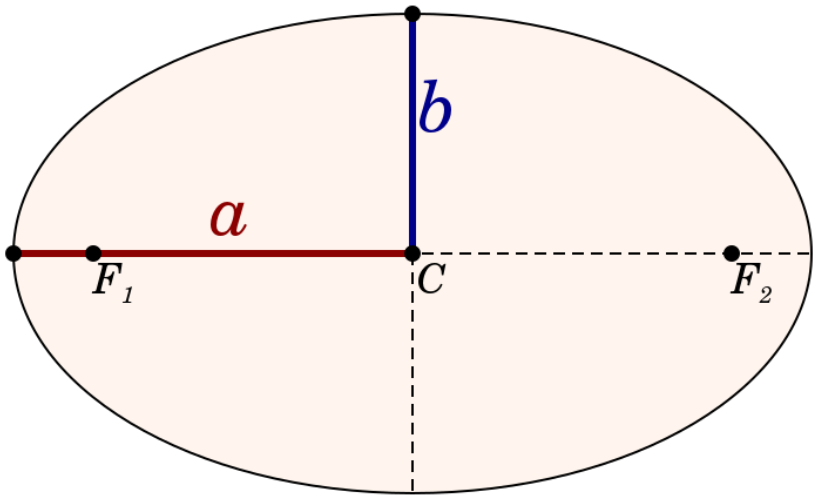


Ilustración de una elipse. Créditos: M. W. Toews

Así también, la velocidad orbital vendrá dada por:

$$v = \sqrt{2\mu\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{2a}\right)} \tag{4}$$

El Sol

- Es una enorme esfera de plasma, constituída sobre todo por hidrógeno (73.46 %) y, en menor cantidad, por helio (24.85 %).

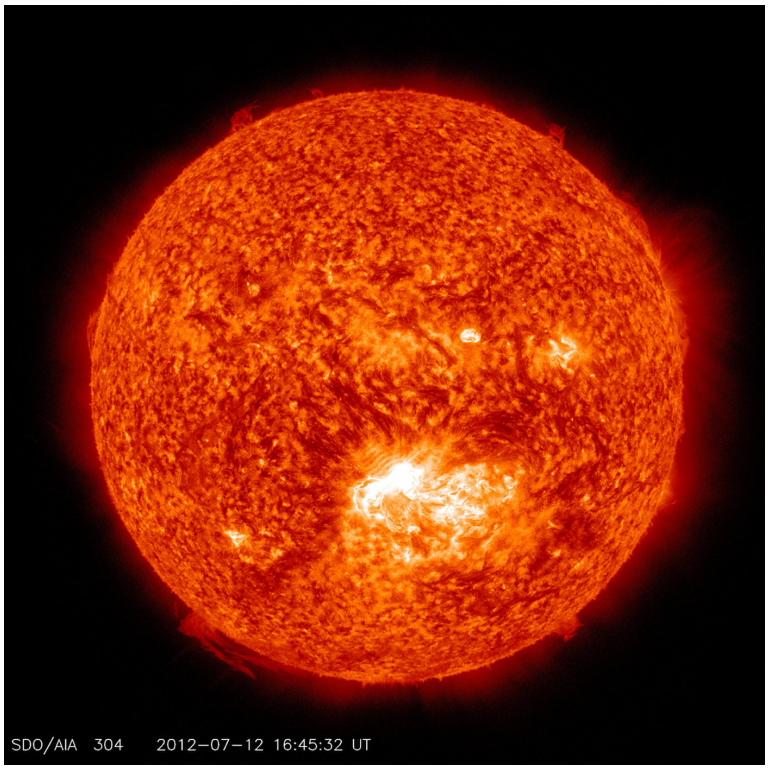


Imagen del Sol tomada por el Observatorio de Dinámica Solar a 30.4nm (ultravioleta). Créditos: NASA/SDO/AIA

El Sol

- $R_\odot$: 695700 km (109 veces el de la Tierra).
- $M_\odot$: 1.98×10^{30}kg (333 mil veces la de la Tierra).
- Densidad promedio: 1.408 g/cm^3 (0.255 veces la densidad de la Tierra).
- Gravedad ecuatorial: $274 m/s^2$.
- Velocidad de escape: 617.7km/s.
- Tiene una oblicuidad de 7.25°.
- Emite energía al espacio en forma de radiación electromagnética.
- Todos los demás cuerpos del Sistema Solar reflejan en parte la luz emitida por el Sol, y en parte la absorben.
- Temperatura superficial: 5772 K.
- $L_\odot$: 3.846×10^{26} W.

Mercurio

- Mercurio es el planeta más cercano al Sol.
- Es el más pequeño de todos los planetas.
- Afelio: 69 816 900 km. Perihelio: 46 001 200 km.
- Calcular la excentricidad.

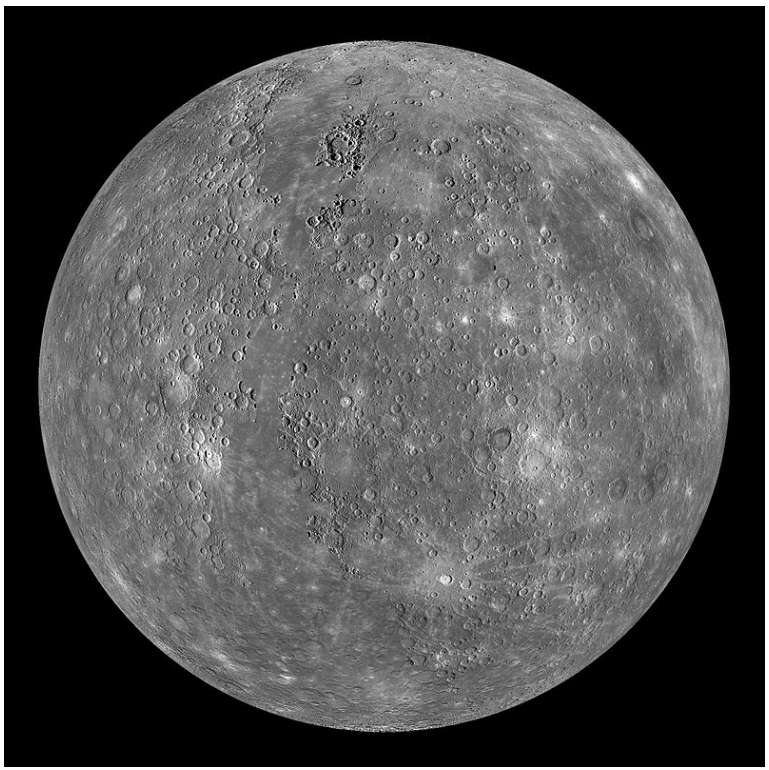


Imagen compuesta de Mercurio tomada por la sonda espacial MESSENGER. Créditos: NASA-APL - NASA

Venus

- Es el planeta que más se acerca a nosotros.
- Su órbita es casi circular (excentricidad de 0.006772).
- Afelio: 108 939 000 km. Perihelio: 107 477 000 km.
- Calcular el periodo.
- Tiene una oblicuidad de 177.36°.

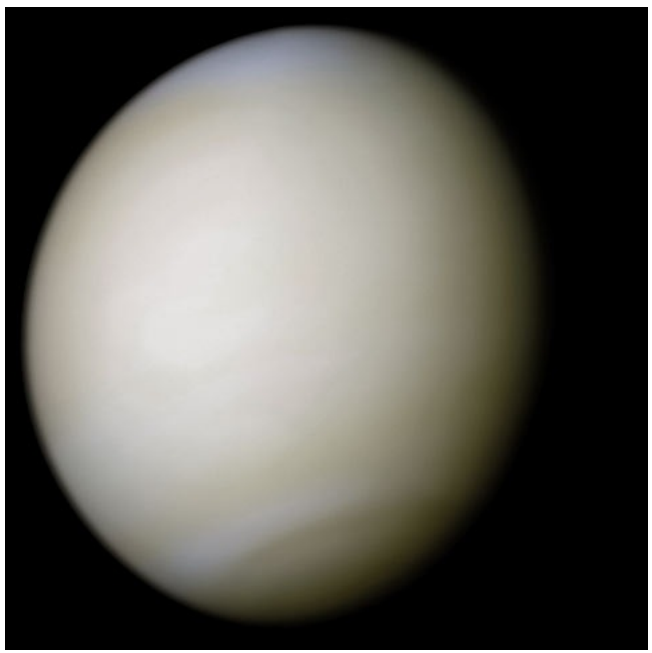


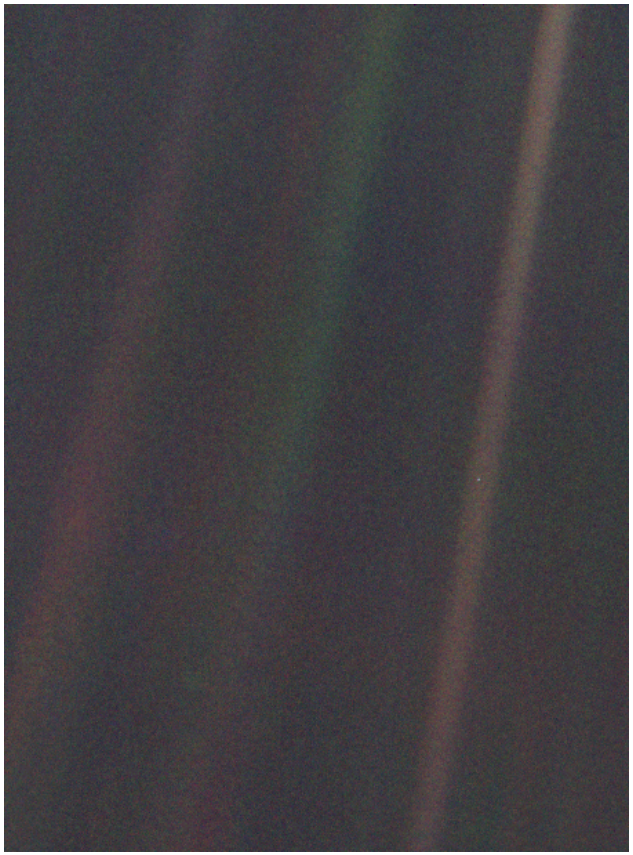
Imagen de Venus tomada por la sonda Mariner 10. Créditos: NASA

Tierra

- Su órbita elíptica tiene una excentricidad de 0.016
- Afelio:152100000 km. Perihelio: 147095000 km.
- Tarda 365.25 días en completar una vuelta.
- Oblicuidad: 23.45°.
- Tiene un satélite natural: la Luna.
- Radio medio: 6371.0km
- Masa: 5.97237×10^{24} kg
- Gravedad superficial: $9.807 \mathrm{m/s^2}$, con una velocidad de escape de 11.186km/s
- Período de rotación 23 horas 56 minutos.
- La atmósfera está compuesta en su mayoría por nitrógeno (un 78.08 %).

Tierra

- Distancia media del Sol: 150 millones de kilómetros. Esta distancia, que recibe el nombre convencional de Unidad Astronómica (UA ó AU).



Fotografía tomada a una distancia de 6000 millones de kilómetros de la Tierra en 1990. Créditos: Voyager 1

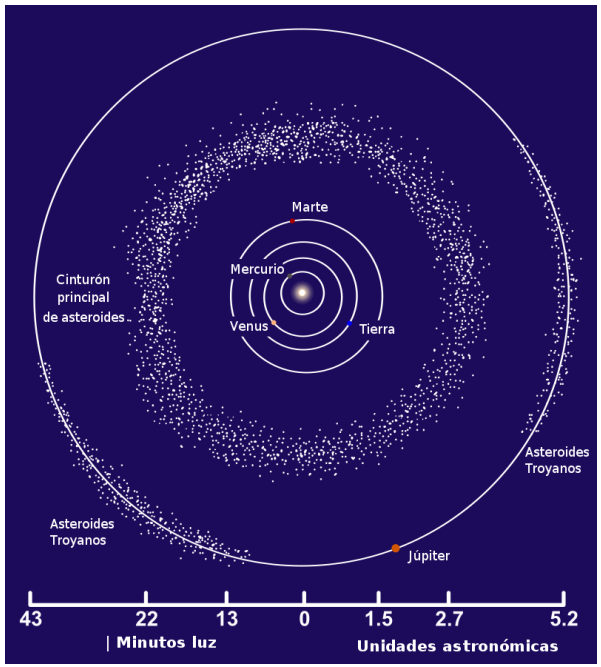
Marte

- Su órbita elíptica tiene una excentricidad de 0.0934.
- Afelio: 1.666 AU. Perihelio: 1.382 AU.
- Tarda 1.88082 años en completar una vuelta.
- Tiene un radio medio de 3389.5 km (0.53 veces la Tierra)

Fobos (arriba) y Deimos (abajo), lunas de Marte, a escala. Créditos: NASA/JPL/USGS

Cinturón de Asteroides

- Aproximadamente entre las órbitas de Marte y Júpiter.
- Alberga multitud de objetos astronómicos de formas irregulares, denominados asteroides, y al planeta enano Ceres (diámetro de 950 km).
- Apenas un 4 % de la masa de la Luna.



Cinturón de Asteroides. Créditos: Diogo Sergio

Júpiter

- Su órbita elíptica tiene una excentricidad de 0.0489.
- Afelio: 5.4588 AU. Perihelio: 4.9501 AU.
- Tarda 11.862 años en completar una vuelta.
- Tiene 69 satélites naturales conocidos hasta el 2017.
- Tiene un radio medio de 69911 km (10.96 veces la Tierra)
- Tiene una masa de 1.8982×10^{27} kg (317.8 la de la Tierra)
- La gravedad superficial es de $24.79 \mathrm{m/s^2}$, con una velocidad de escape de 59.5km/s
- Período de rotación 9.925 horas
- La atmósfera está compuesta en su mayoría por hidrógeno (un 89 %) y helio (10 %)

Júpiter

Fotografía tomada por la misión Juno

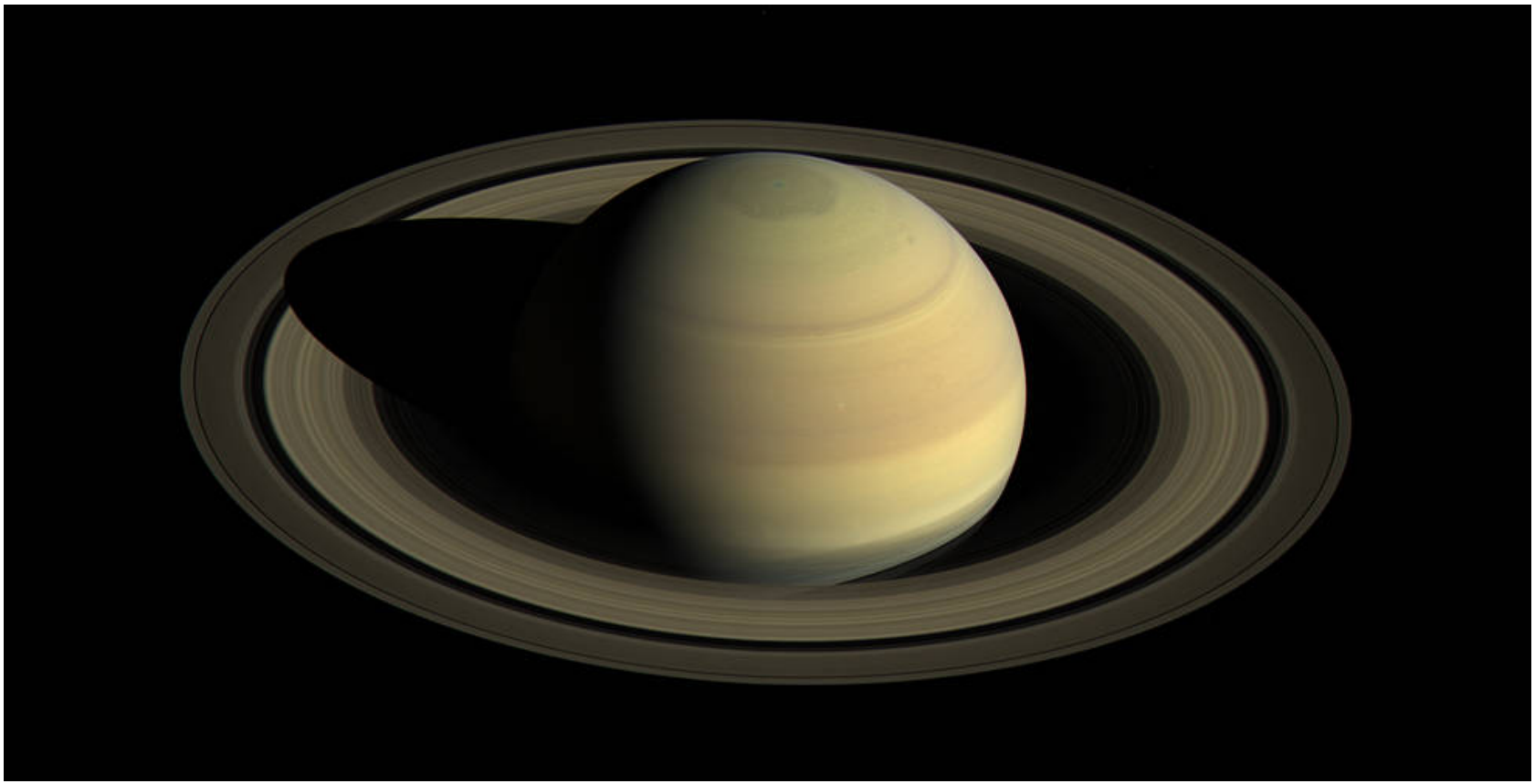
Fotografía de Júpiter. Créditos: NASA

Saturno

- Su órbita elíptica tiene una excentricidad de 0.0565.
- Afelio: 10.1238 AU. Perihelio: 9.0412 AU.
- Tarda 29.4571 años en completar una vuelta.
- Tiene 62 satélites naturales con órbitas confirmadas.
- Radio medio de 58232 km (9.12 veces la Tierra)
- Masa de 5.6834×10^{26} kg (95.159 la de la Tierra)
- La gravedad superficial es de $10.44 m/s^2$, con una velocidad de escape de 35.5km/s
- Período de rotación 10.55 horas
- Los anillos de Saturno se extienden en el plano ecuatorial del planeta desde los 6630 km a los 120 700 km por encima del ecuador de Saturno y están compuestos de partículas con abundante agua helada.

Saturno

Fotografía tomada por la misión Cassini



Fotografía de Saturno. Créditos: NASA/JPL-Caltech/Space Science Institute

Urano

- Su órbita elíptica tiene una excentricidad de 0.046381.
- Afelio: 20.11 AU. Perihelio: 18.33 AU.
- Tarda 84.0205 años en completar una vuelta.
- Tiene una oblicuidad de 97.77°.
- Tiene 27 satélites naturales conocidos.
- Radio medio de 25362 km (3.97 veces la Tierra)
- Masa de 8.6810×10^{25} kg (14.536 la de la Tierra)
- Período de rotación 0.71833 días (retrógrado).

Urano

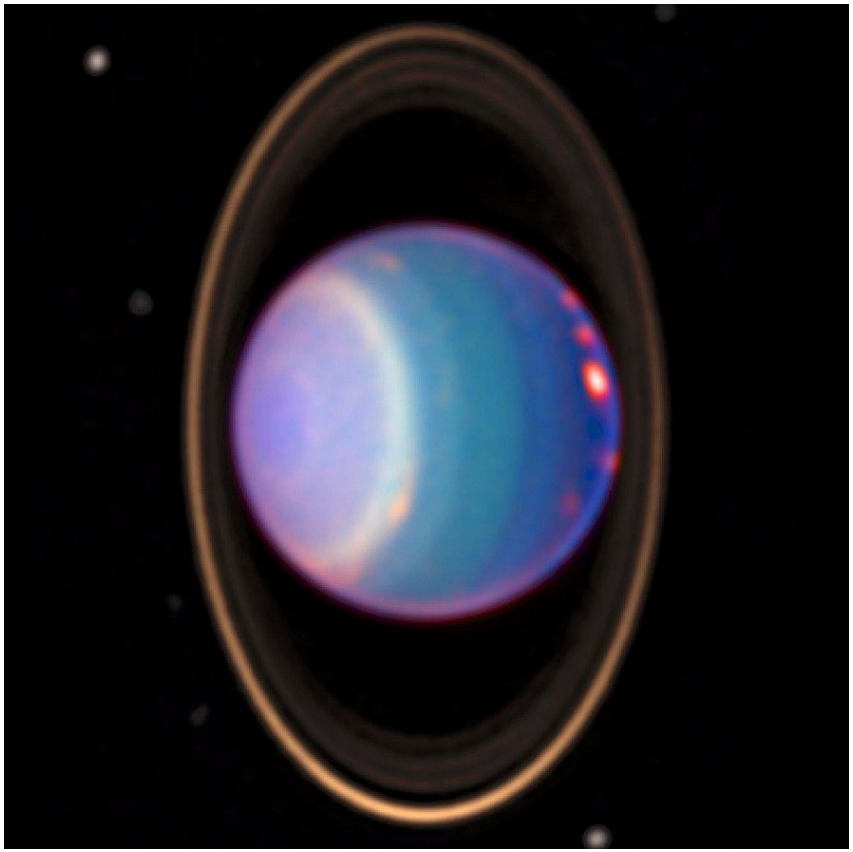


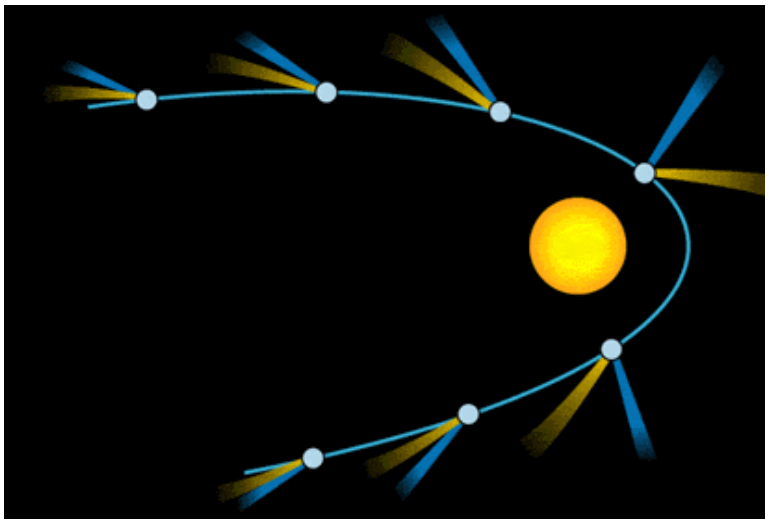
Imagen de falso color de Urano en la banda del infrarrojo cercano. Créditos: Hubble Space Telescope - NASA Marshall Space Flight Center

Neptuno

- Su órbita elíptica tiene una excentricidad de 0.009456.
- Afelio: 30.33 AU. Perihelio: 29.81 AU.
- Tarda 164.8 años en completar una vuelta.
- Tiene 14 satélites naturales conocidos.
- Tiene un radio medio de 24622 km (3.8 veces la Tierra)
- Tiene una masa de 1.0243×10^{26} kg (17.147 la de la Tierra)
- La gravedad superficial es de $11.15 \mathrm{m/s^2}$, con una velocidad de escape de 23.5km/s
- Período de rotación 0.6713 días

Cinturón de Kuiper

- Es un disco circunestelar que orbita alrededor del Sol a una distancia de entre 30 y 55 UA
- Se cree que este cinturón es la fuente de los cometas de corto periodo.
- Los cometas son los cuerpos celestes constituidos por hielo, polvo y rocas que orbitan alrededor del Sol siguiendo diferentes trayectorias elípticas, parabólicas o hiperbólicas.



Cola de gas (azul en el esquema) y cola de polvo (amarillo) de un cometa.

Plutón y planetas enanos

- Más de 800 objetos del cinturón de Kuiper han sido observados.
- Planetas enanos transneptunianos: Plutón, Eris, Makemake, Haumea

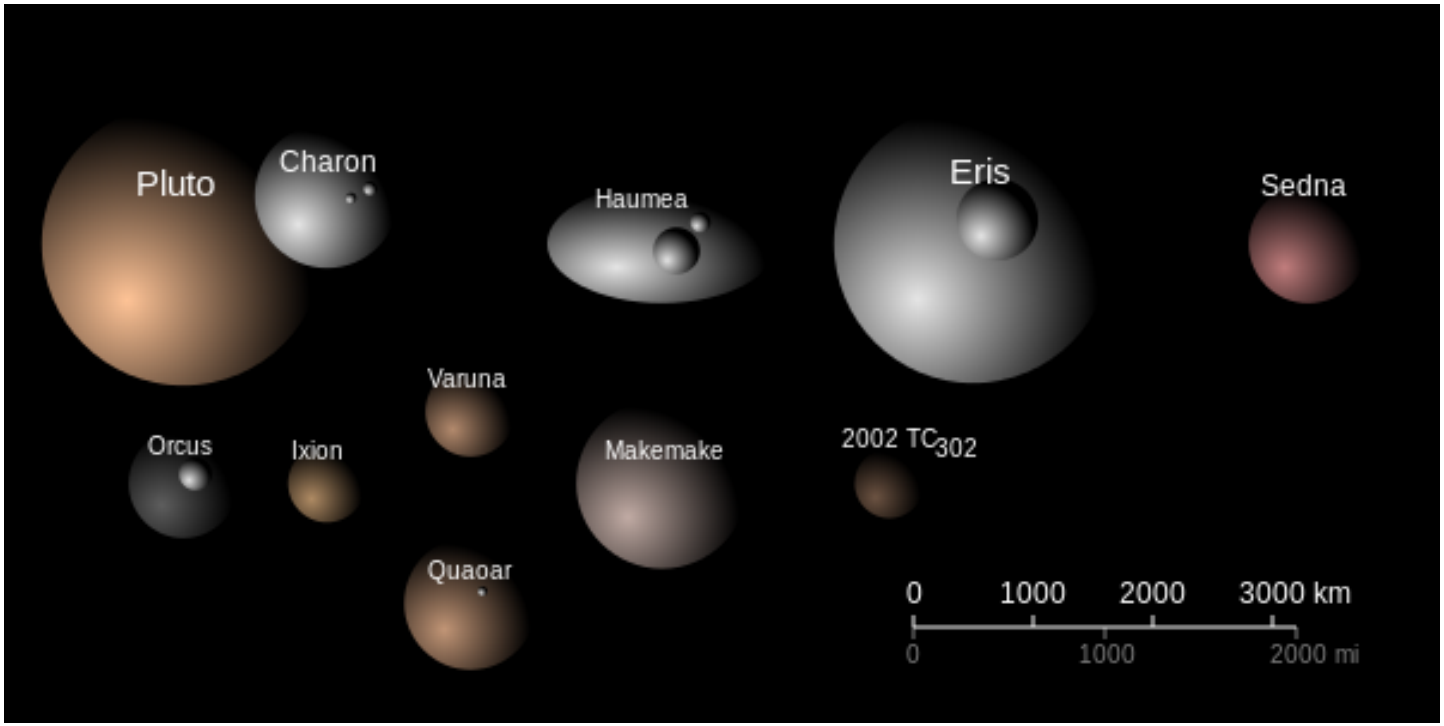
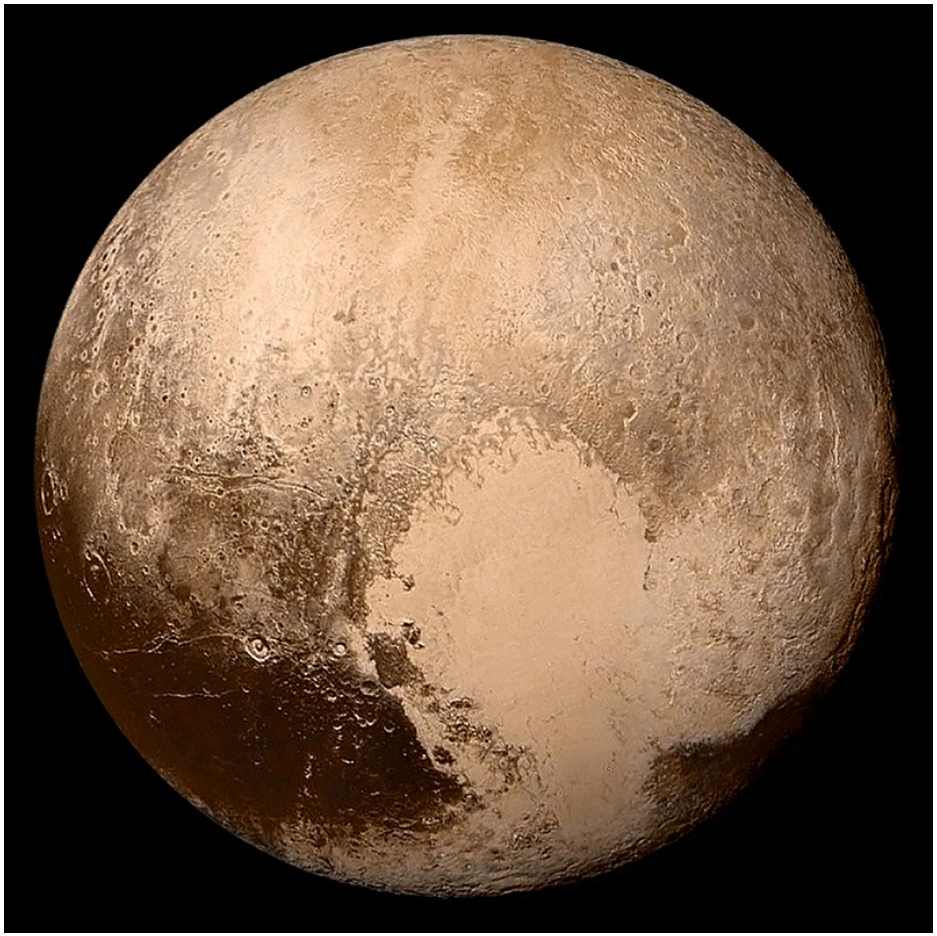


Ilustración de la medida de los mayores objetos transneptunianos. El afelio de Sedna es de 937 UA.

Plutón

Fotografía tomada por la misión New Horizons

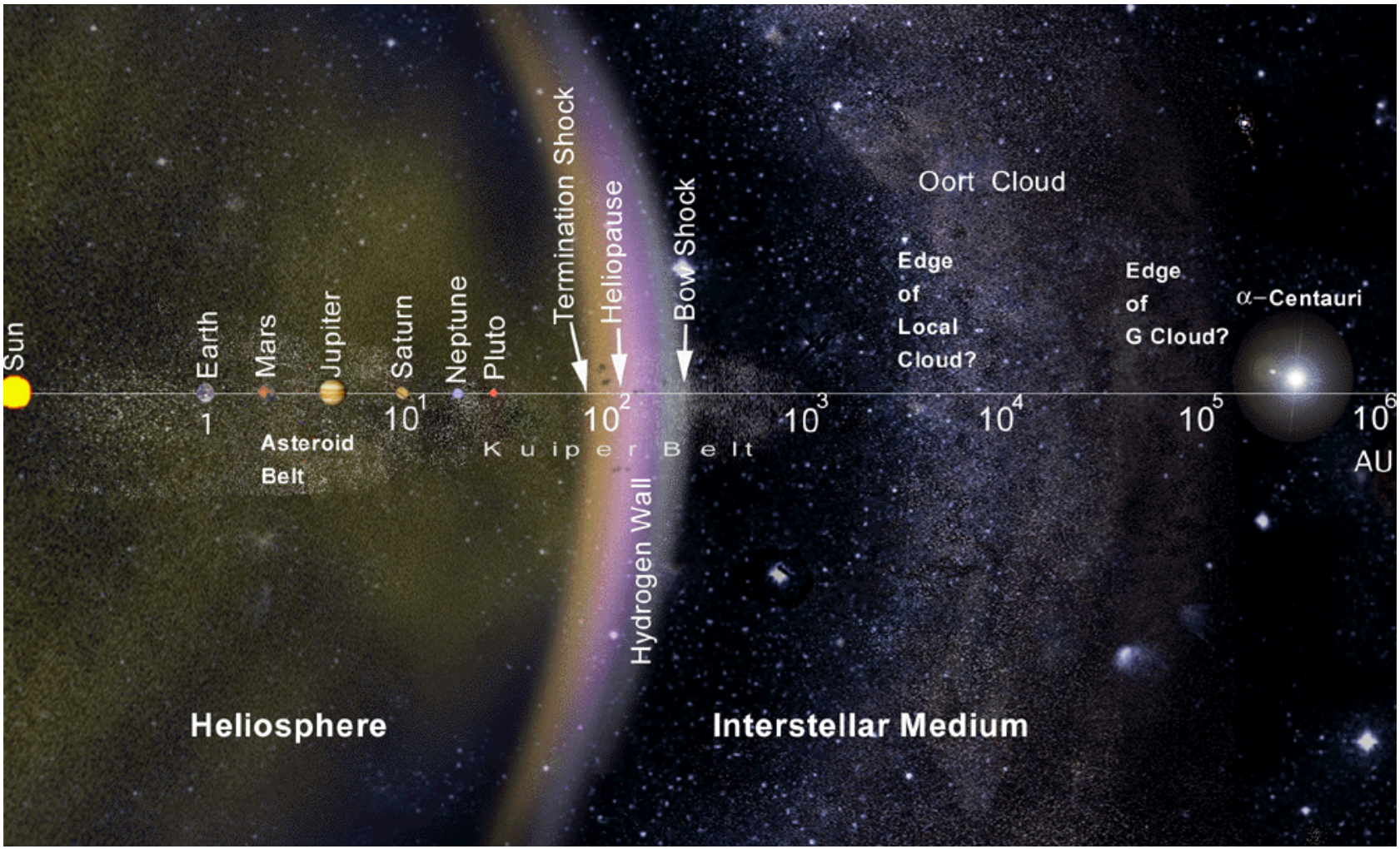


Fotografía de Plutón. Créditos: NASA / Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory / Southwest Research Institute

Nube de Oort

- Es una nube esférica de objetos transneptunianos hipotética que se encuentra en los límites del Sistema Solar (casi a un año luz del Sol).
- Según algunas estimaciones estadísticas, la nube podría albergar entre 10^{12} - 10^{14}) de objetos, siendo su masa unas cinco veces la de la Tierra
- La nube de Oort exterior (entre 20 000 UA y 50 000 UA), de forma esférica, y la nube de Oort interior (entre 2000 UA y 20 000 UA), que tiene forma toroidal.
- Algunas fuentes sitúan su límite entre 100 000 UA y 200 000 UA
- Se cree que es la fuente de todos los cometas de período largo.

Resumen



Sistema Solar a escala logarítmica hasta la estrella más próxima

¿En dónde está el Sistema Solar?

El Sol es una estrella de la Vía Láctea.

- 100-400 miles de millones de estrellas
- 9000 millones de unidades astronómicas de diámetro

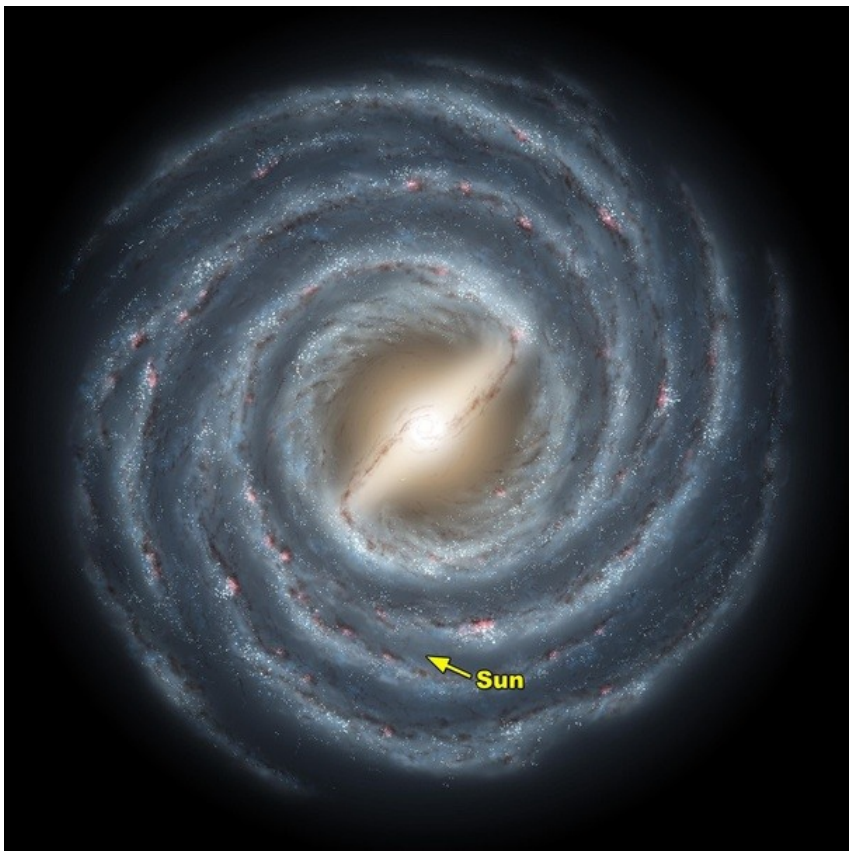
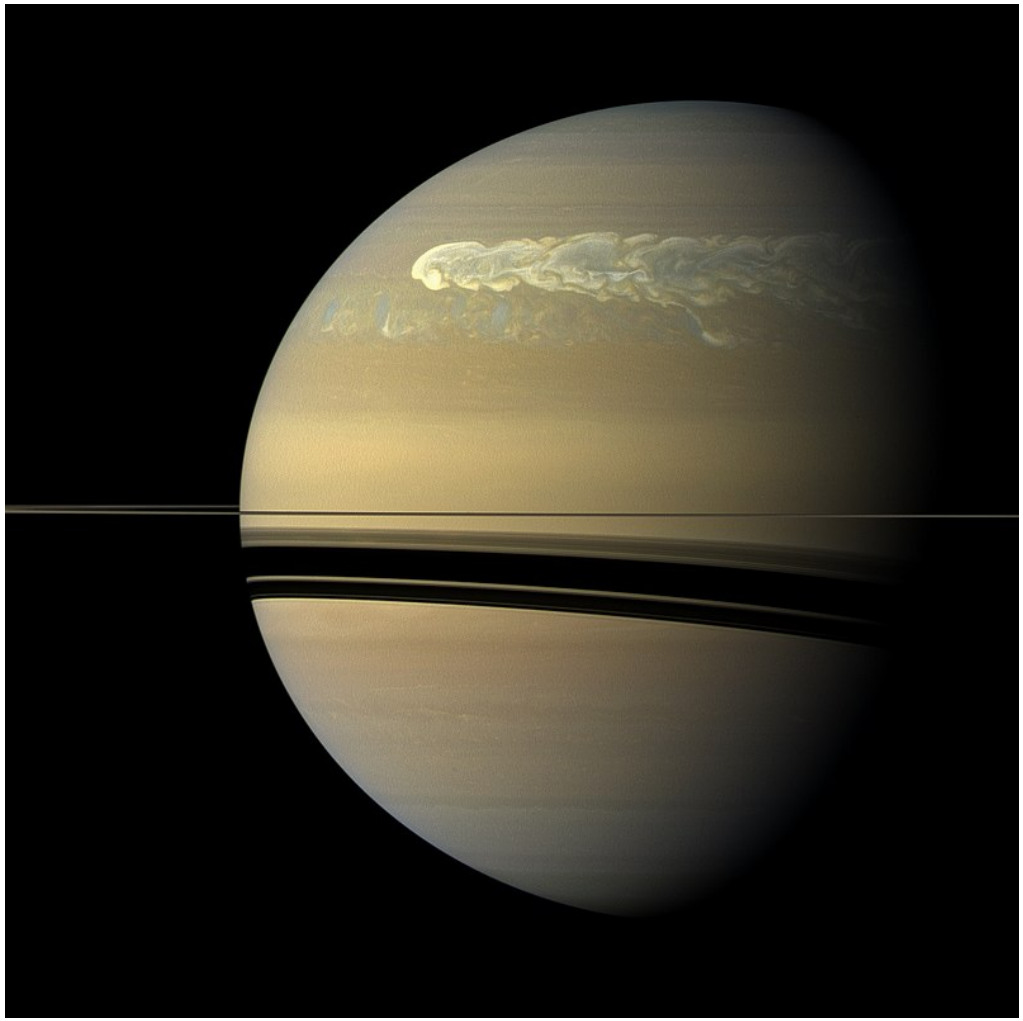
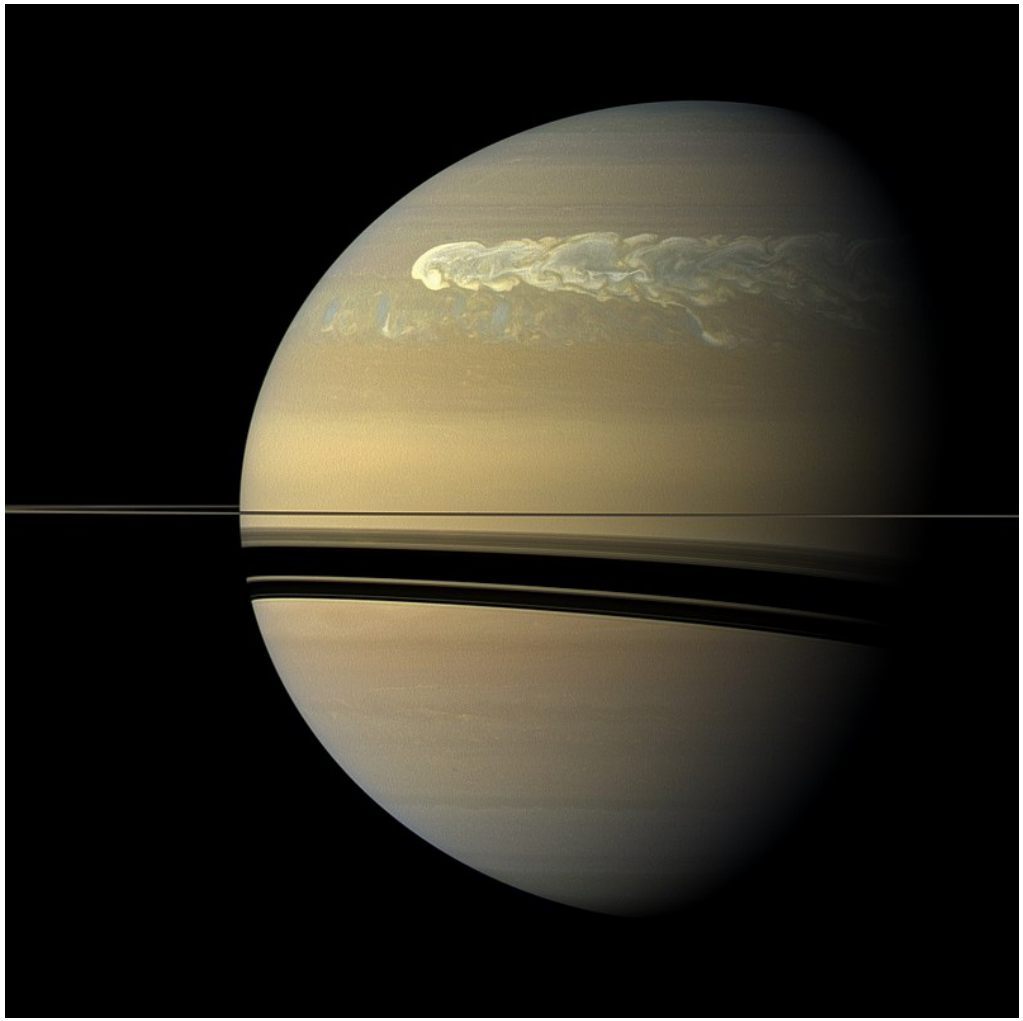


Ilustración de la Vía Láctea

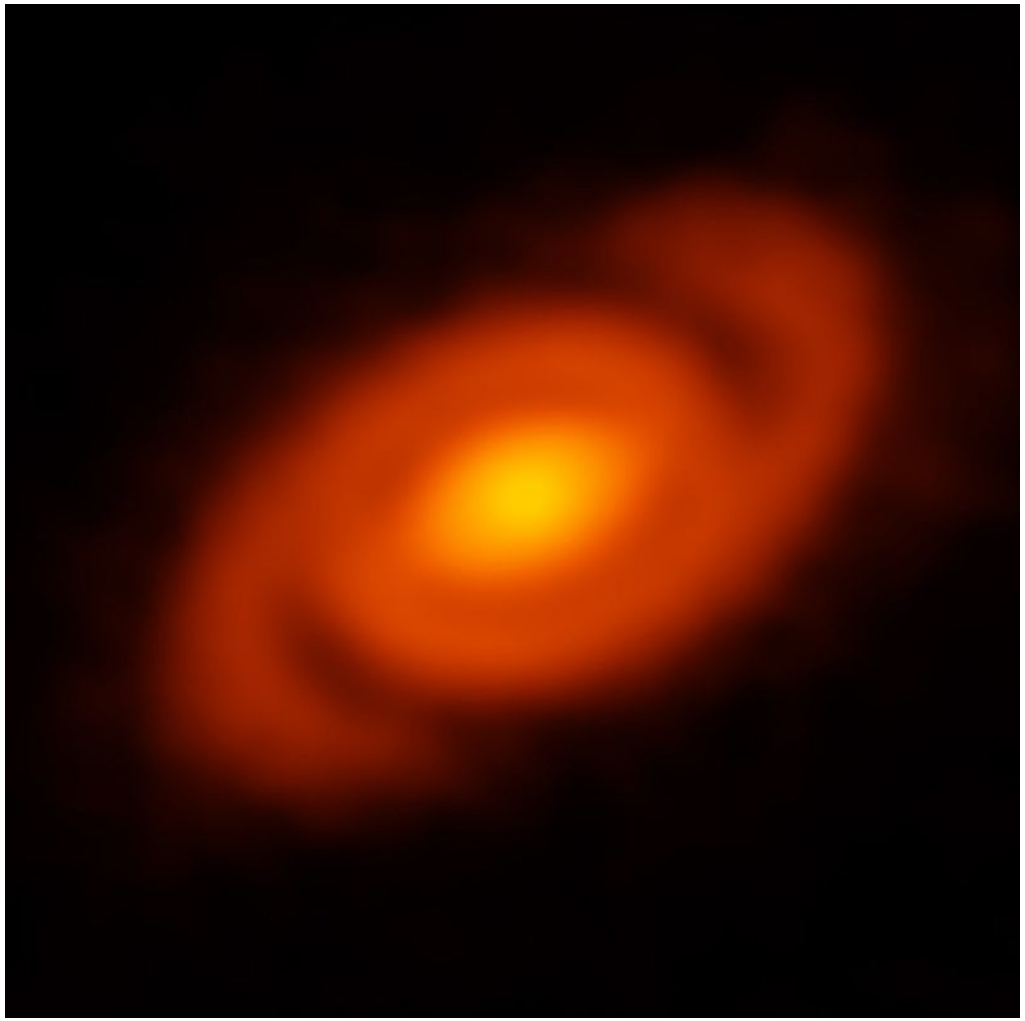
Antes de concluir

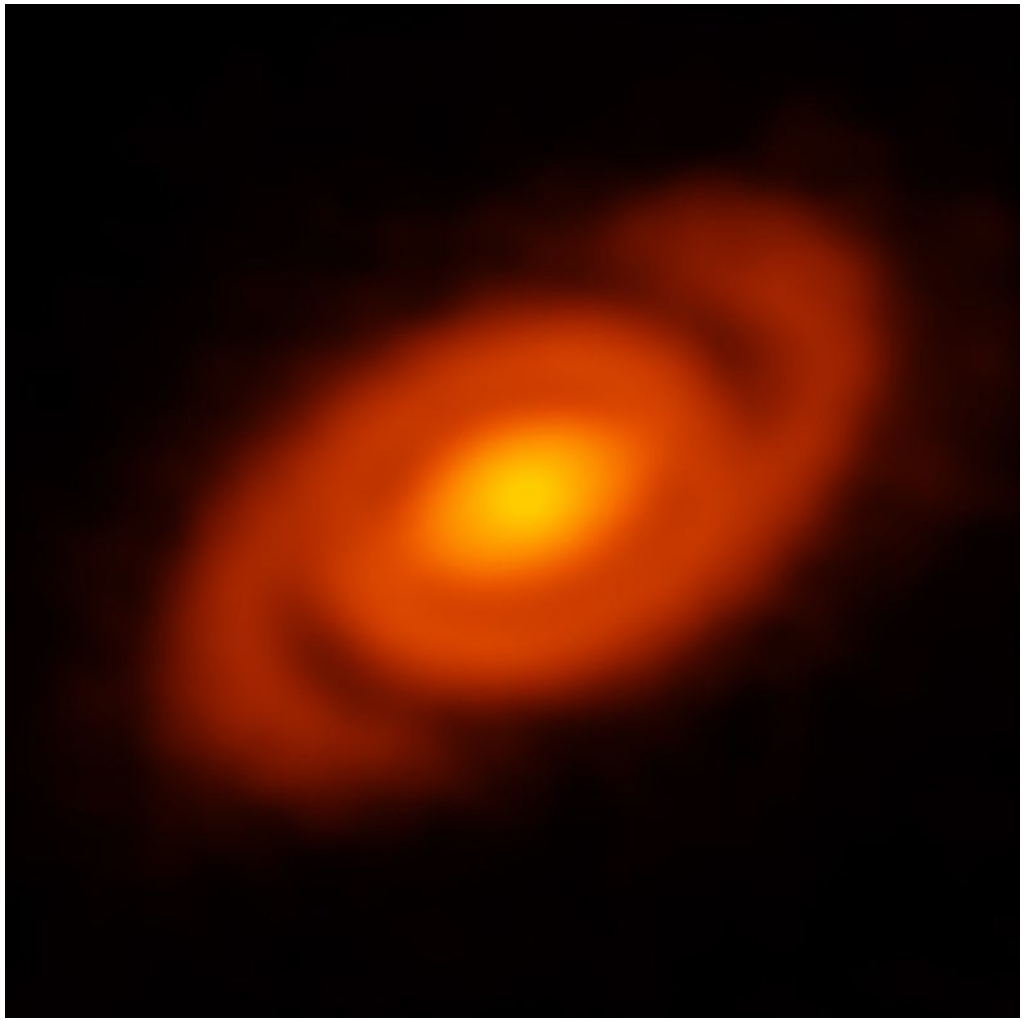
Un nube molecular que se ha separado de la Nebulosa de Carina. Créditos: Hubble Heritage Team (STScI/AURA), N. Walborn (STScI) & R. Barb (La Plata Obs.), NASA.





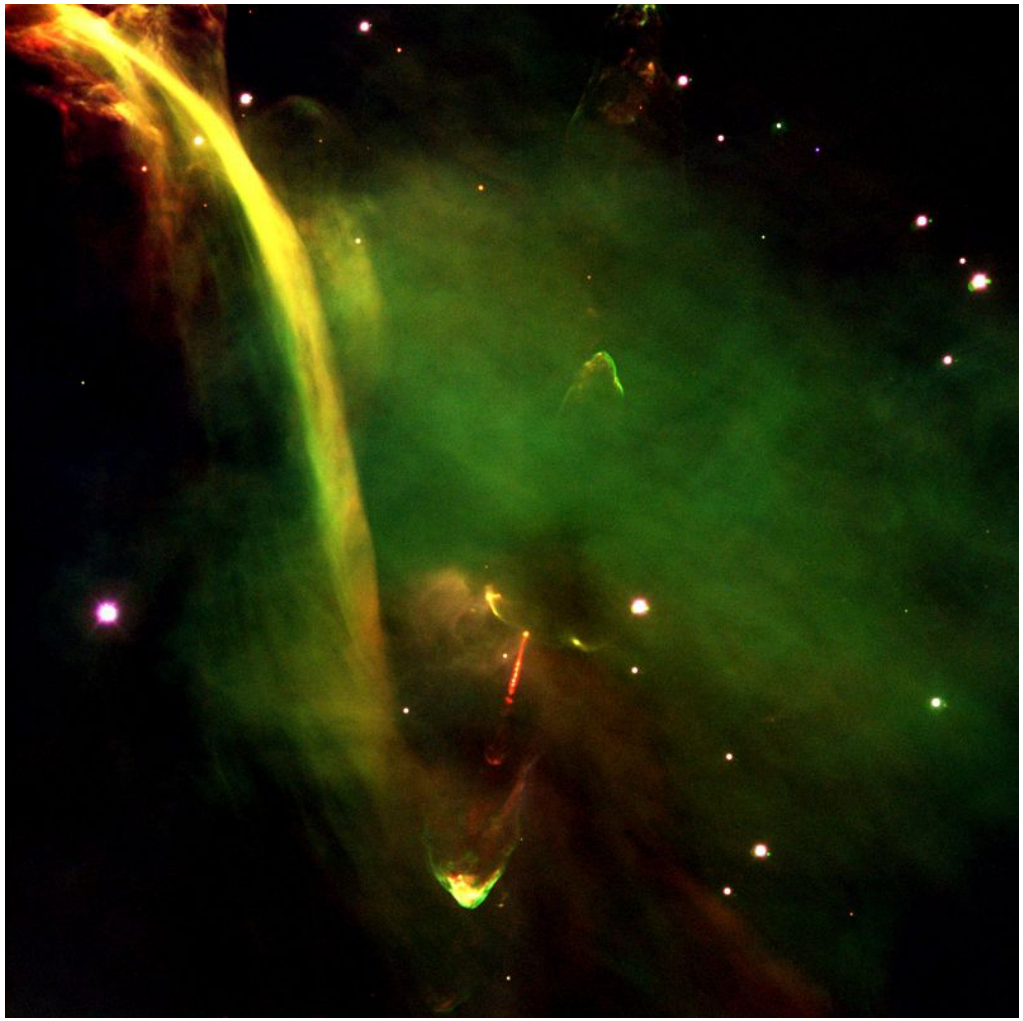
Saturno. Créditos: NASA/JPL-Caltech/SSI

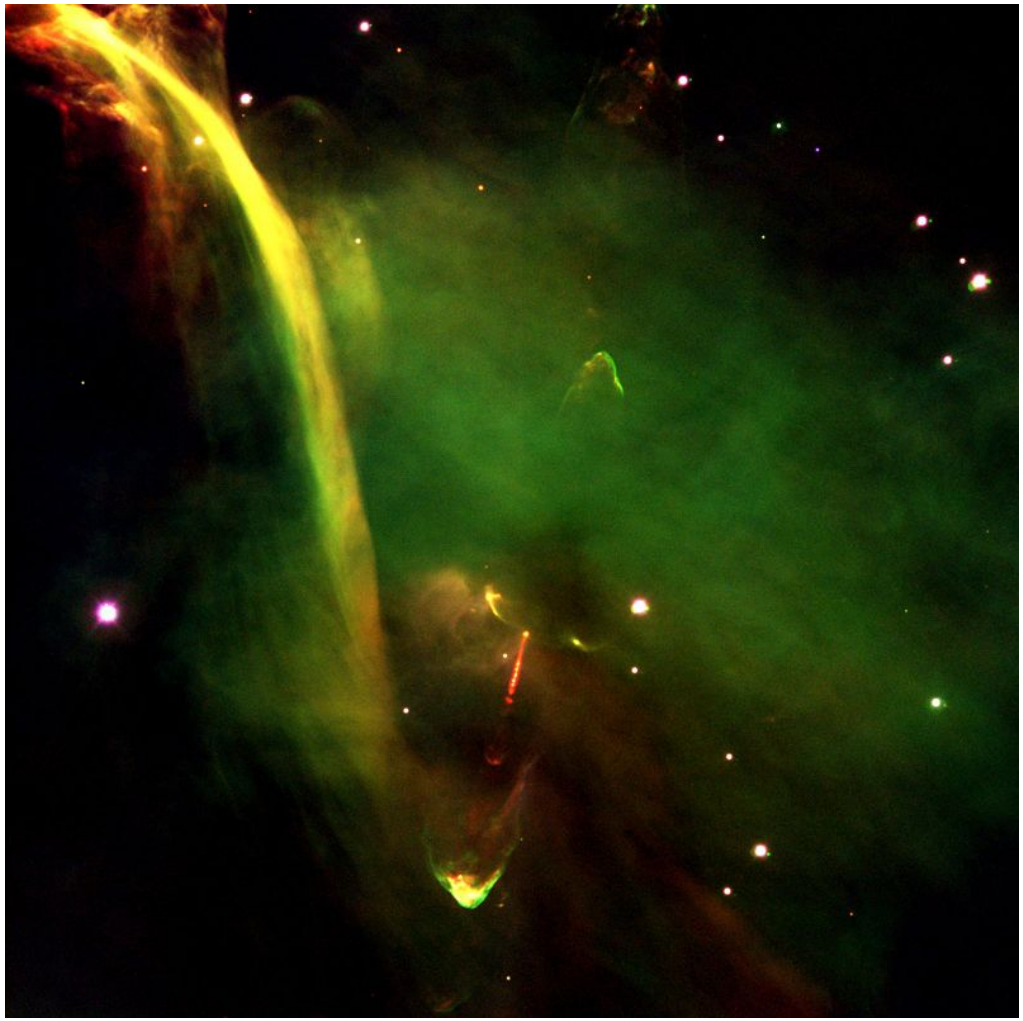




Disco protoplanetario alrededor de Elias 2-27. Créditos: B. Saxton (NRAO/AUI/NSF); ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)

Plutón visto por la New Horizons el 14 de julio de 2015 . Créditos: (NASA/JHUAPL/SwRI)





Herbig-Haro 34. Créditos: ESO