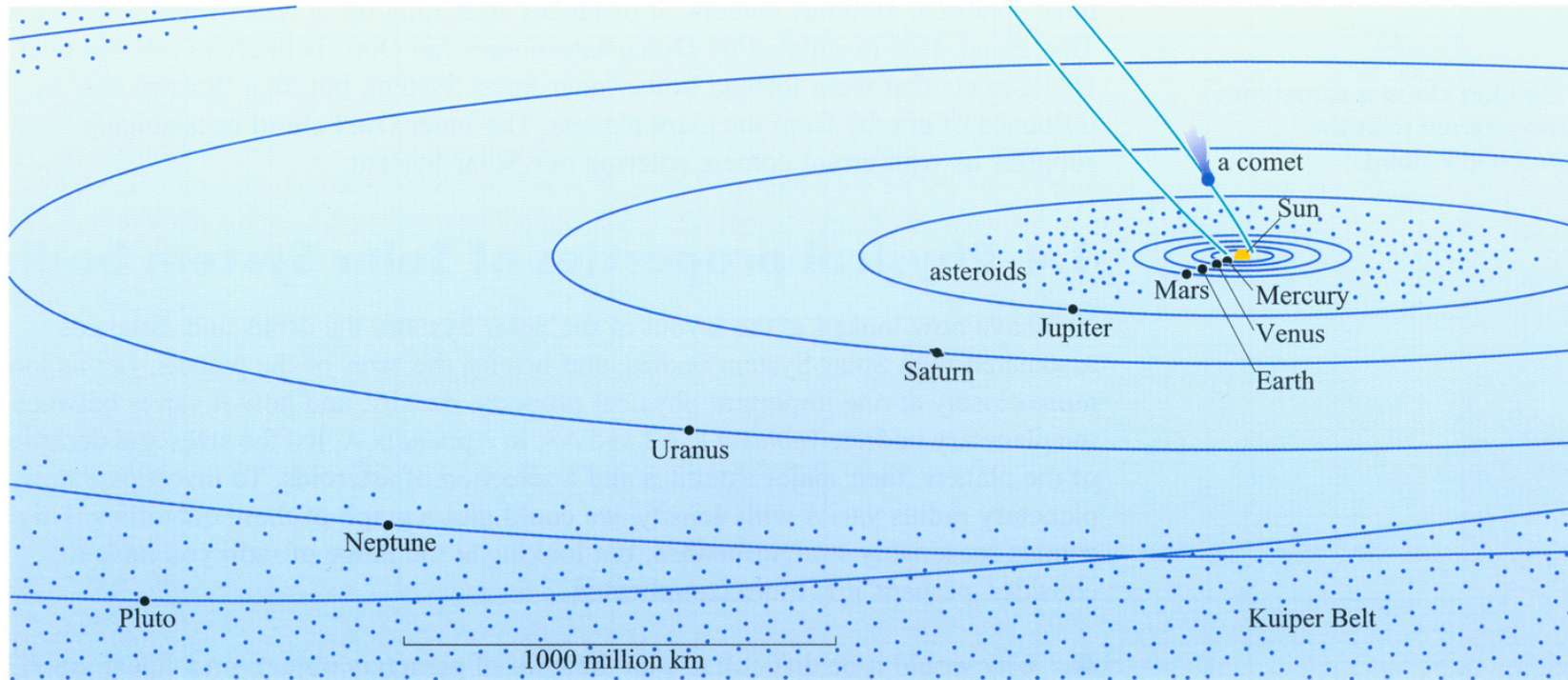


El sistema solar

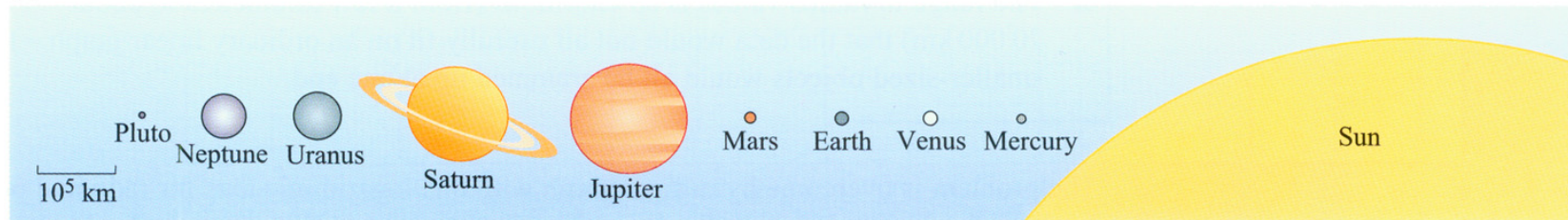


- * Inventario: planetas, satélites, cuerpos menores. Distribución de masa y momento angular.
- * Movimiento aparente de los planetas. Sistemas geocéntrico y heliocéntrico. Períodos sideral y sinódico. Leyes de Kepler. Ley de la gravitación universal de Newton.
- * Fases lunares y planetarias. Eclipses de Sol y de Luna.
- * Descubrimiento de Urano. Ley de Titius-Bode. Descubrimiento de Ceres. Definición de asteroide. Cometas. Anillos planetarios.
- * Descubrimiento de Neptuno. Búsqueda del planeta X y descubrimiento de Plutón.
- * Descubrimiento de otros objetos transneptunianos de tamaño similar a Plutón. Crisis en la definición de planeta.
- * Redefinición de planeta en la Asamblea General de la Unión Astronómica Internacional de 2006.

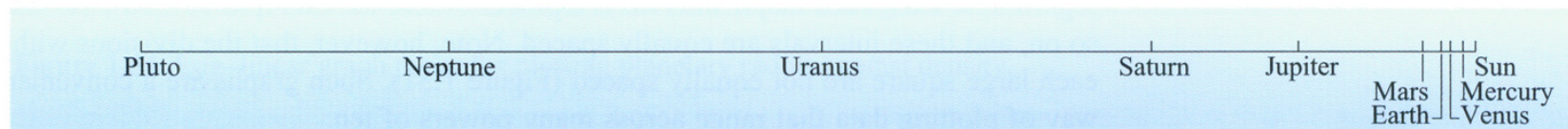
El sistema solar en perspectiva



(a)



(b)



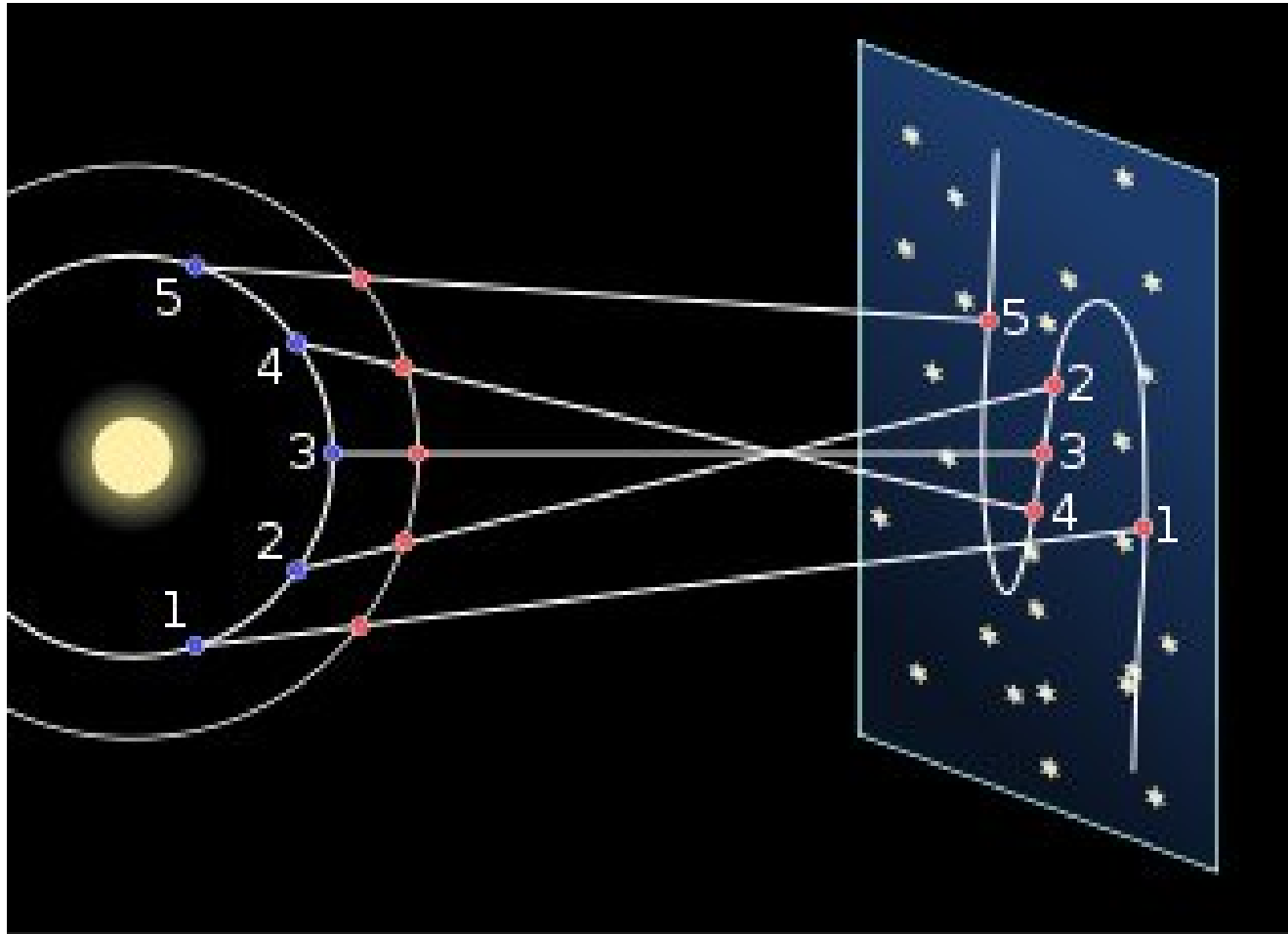
(c)

Propiedades básicas de los planetas

Planeta	a (ua)	T (años)	Radio (km)	Masa (kg)	ρ (g/cm ³)	Per. Rotación	No.sat.
Mercurio	0,387	0,241	2439	$3,30 \times 10^{23}$	5,4	58,6 d	0
Venus	0,723	0,615	6052	$4,87 \times 10^{24}$	5,2	243,0	0
Tierra	1,000	1,000	6378	$5,97 \times 10^{24}$	5,5	23 h 56 m 4,1 s	1
Marte	1,524	1,881	3397	$6,42 \times 10^{23}$	3,9	24 h 37 m 22.7 s	2
Júpiter	5,203	11,86	71398	$1,9 \times 10^{27}$	1,3	9 h 55 m 30 s	79
Saturno	9,530	29,42	60000	$5,69 \times 10^{26}$	0,7	10 h 30 m	82
Urano	19,24	84,36	26320	$8,70 \times 10^{25}$	1,1	17 h 14 m	27
Neptuno	30,14	165,5	24300	$1,03 \times 10^{26}$	1,7	16 h 07 m	14

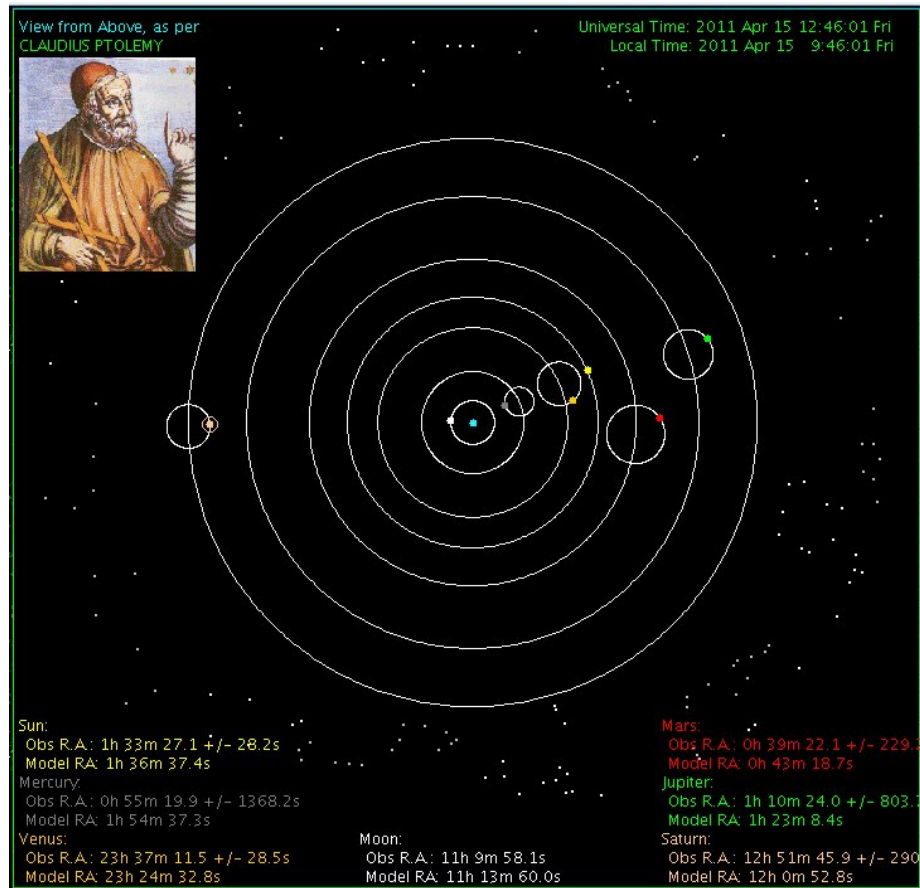
- * El Sol concentra el 99,9% de toda la masa del sistema solar.
- * Los 8 planetas se pueden clasificar en 2 grandes grupos: terrestres y jovianos o gigantes.
- * Tenemos además otras poblaciones de cuerpos menores: cometas, asteroides, objetos transneptunianos.

Movimiento aparente: directo y retrógrado

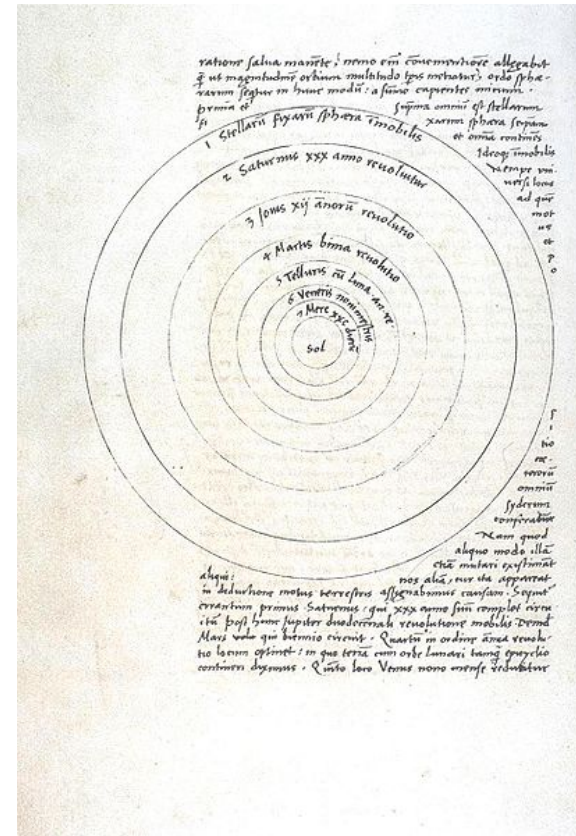


* El movimiento de los planetas aparece al observador como caprichoso: a veces se mueven en un sentido y después lo revierten. Esto se debe a que el observador no ocupa un lugar fijo, sino que a la vez se mueve en torno al Sol.

Sistema geocéntrico y heliocéntrico



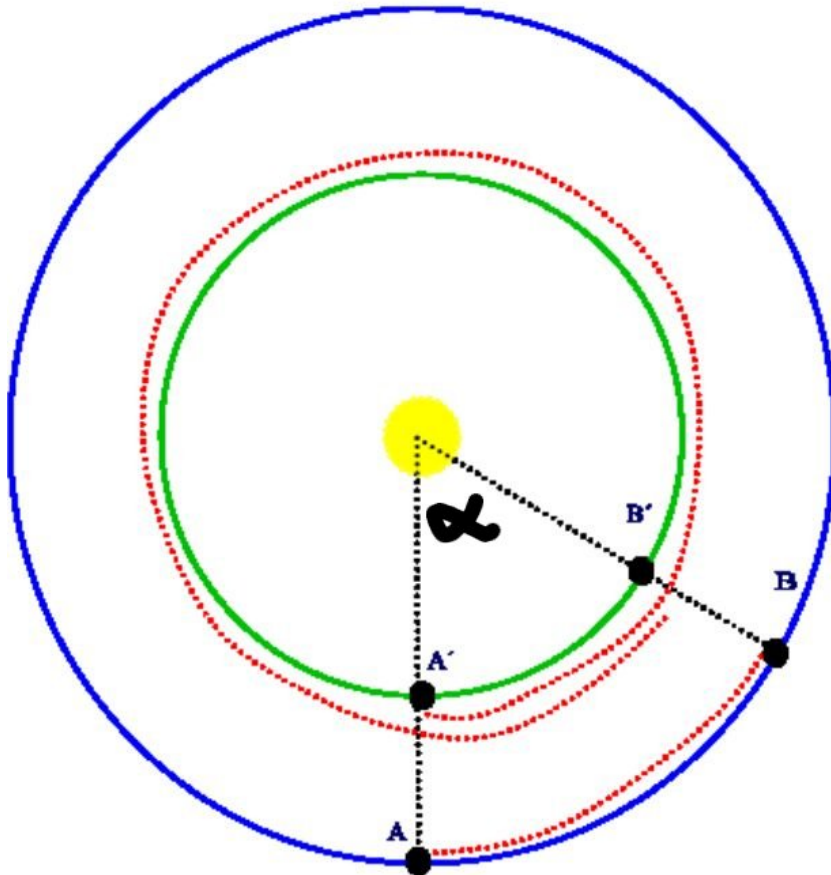
Sistema geocéntrico en la versión de Tolomeo (siglo II nuestra era) con epiciclos.



Sistema heliocéntrico como lo propuso Copérnico en su obra *De Revolutionibus* (1543).

Períodos sideral y sinódico

* El *período sideral* toma como referencia la posición del objeto con referencia a las estrellas; el *período sinódico* toma como referencia al Sol.



$$\text{Mov. medio Tierra : } n_T = \frac{2\pi}{P_T}$$

$$\text{Mov. medio planeta : } n_P = \frac{2\pi}{P_P}$$

P_T : Per. sideral Tierra

P_P : Per. sideral planeta

S : Per. Sinódico

$$\alpha = n_P S, \quad (2\pi + \alpha) = n_T S$$

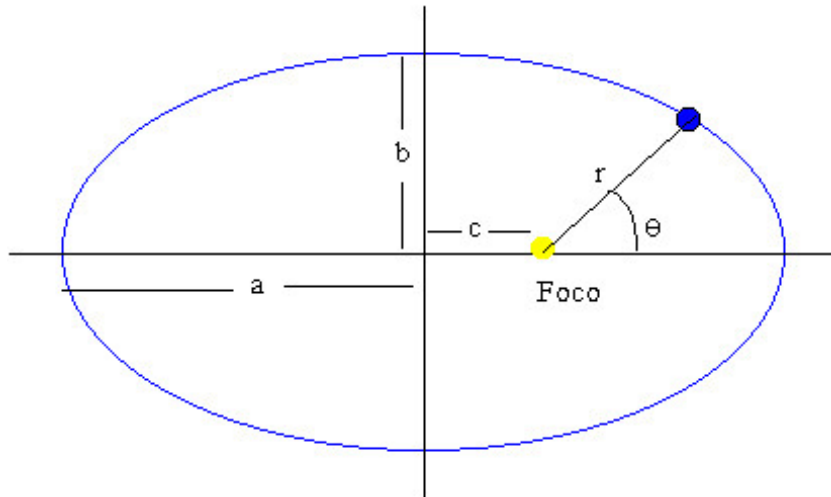
$$\frac{(2\pi + \alpha)}{\alpha} = \frac{n_T}{n_P}$$

$$\implies \alpha = n_P \left(\frac{2\pi}{n_T - n_P} \right)$$

$$\implies S = \frac{2\pi}{n_T - n_P}$$

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{P_T} - \frac{1}{P_P}$$

Leyes de Kepler



* 1ra Ley : El movimiento de los planetas es según elipses en las cuales el Sol ocupa uno de los focos:

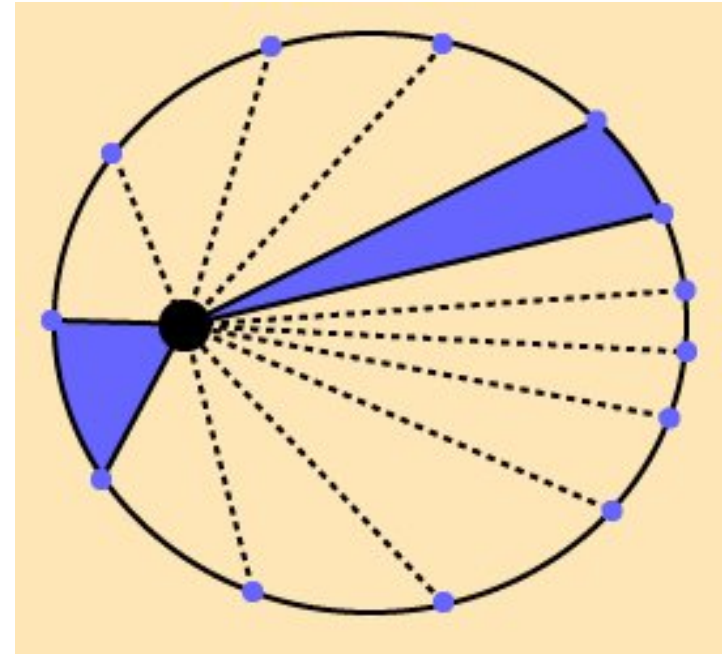
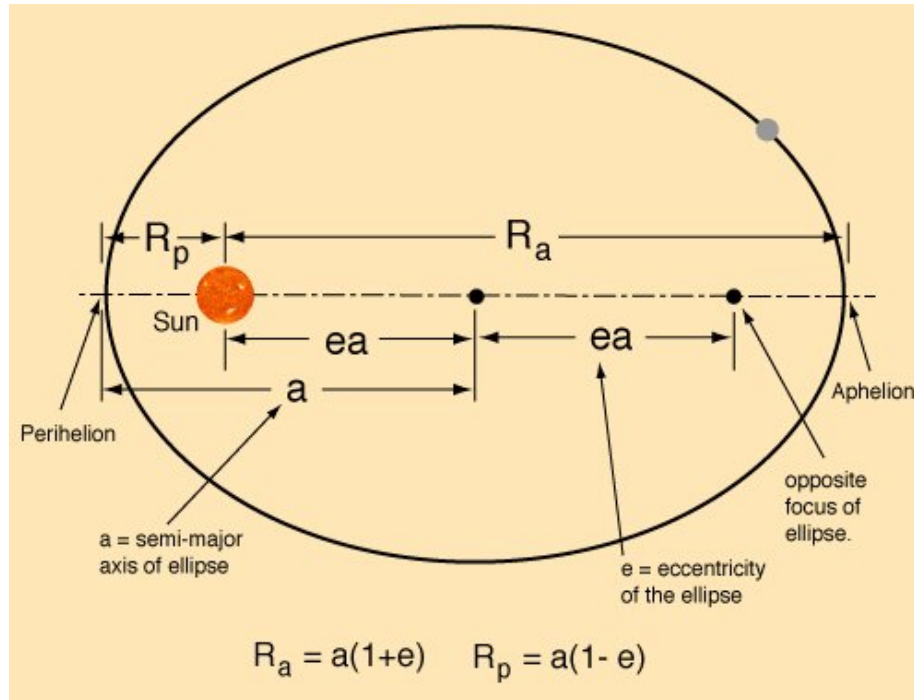
$$r = \frac{p}{1 + e \cos \theta}$$

donde $p = a(1 - e^2)$, a el semieje mayor, e la excentricidad, y θ la anomalía verdadera.

* 2da Ley : El radio-vector Sol-planeta describe áreas iguales en tiempos iguales (ley de conservación del momento angular).

* 3ra Ley : Vincula el período sideral del planeta P con el semieje mayor de su órbita a , de acuerdo a la relación:

$$\frac{P_1^2}{a_1^3} = \frac{P_2^2}{a_2^3}$$



2da Ley de Kepler \implies Conservación del momento angular $H = mrv_T$.

v_T : componente transversa de la velocidad

Area de un sector : $\frac{1}{2}r_1^2\Delta\theta_1$, $\frac{1}{2}r_2^2\Delta\theta_2$

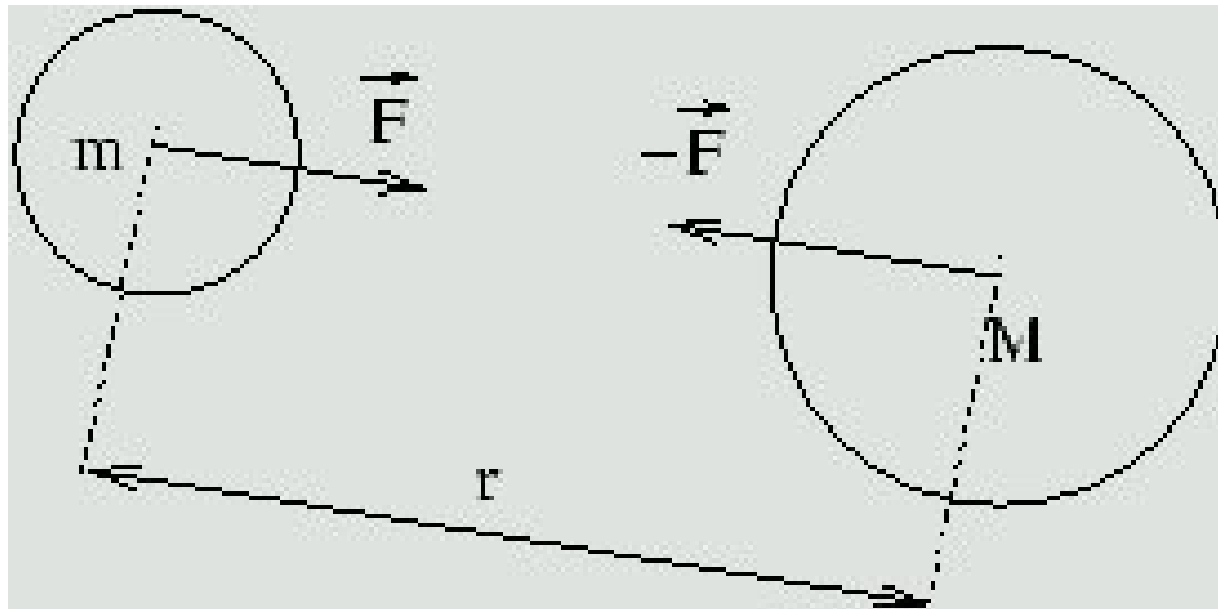
Area barrida en un tiempo Δt (velocidad areolar) : $\frac{1}{2}r_1^2\frac{\Delta\theta_1}{\Delta t} = \frac{1}{2}r_2^2\frac{\Delta\theta_2}{\Delta t}$

Ley de la gravitación universal de Newton

* Proporciona el sustento teórico a las leyes de Kepler. Describe que entre 2 masas M y m separadas por una distancia r existe una fuerza de atracción \vec{F} que se puede expresar como:

$$\vec{F} = -G \frac{Mm}{r^2} \left(\frac{\vec{r}}{r} \right)$$

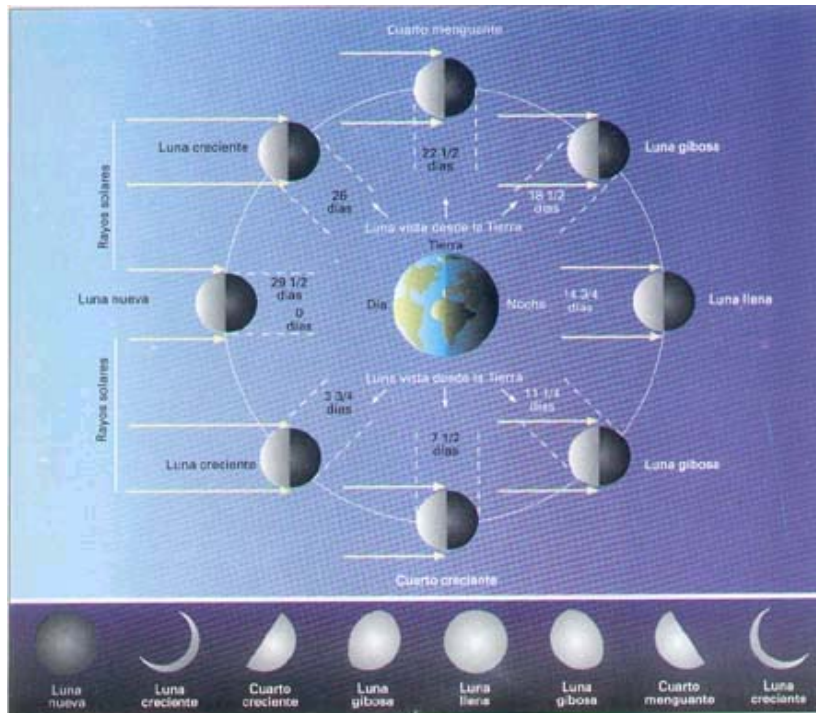
donde G es la constante de gravitación universal.



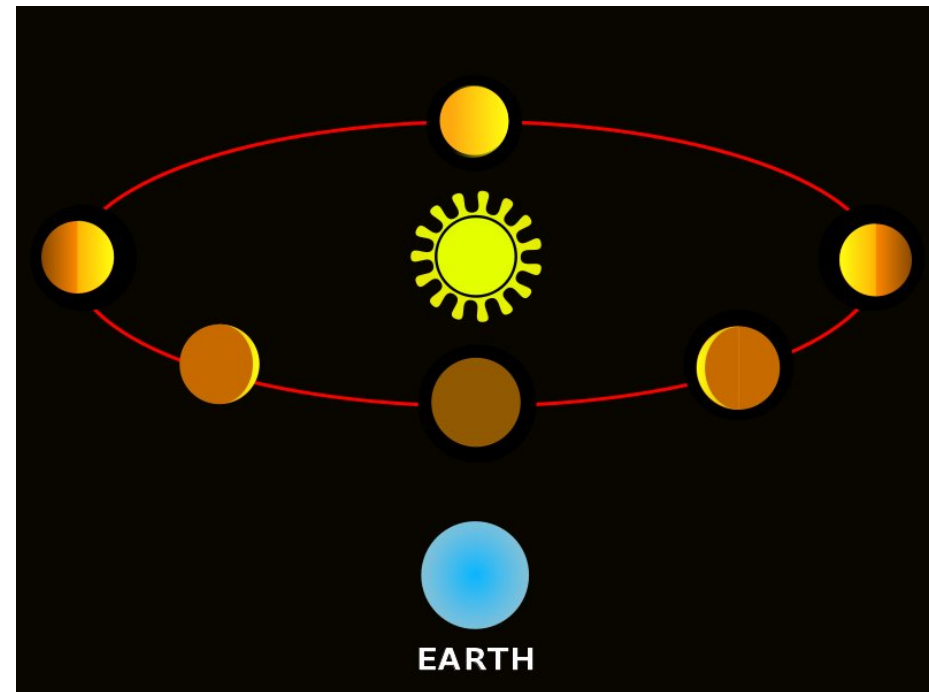
El movimiento de un cuerpo en torno a otro, sujetos a la gravedad mutua, puede ser cualquiera de la cónicas (elipse, parábola, hipérbola).

Fases lunares y planetarias

* Son debidas a las distintas configuraciones Sol-Tierra-Luna (planeta).



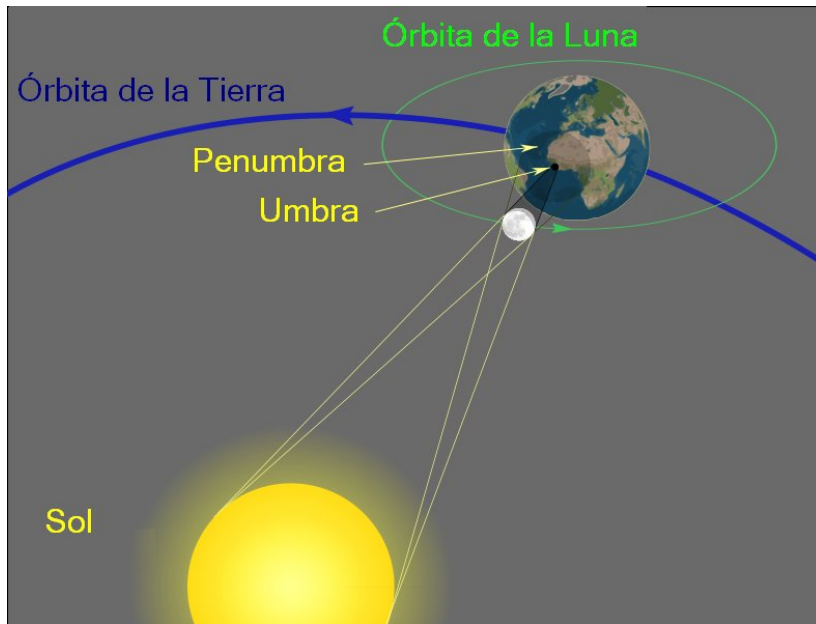
Fases de la Luna



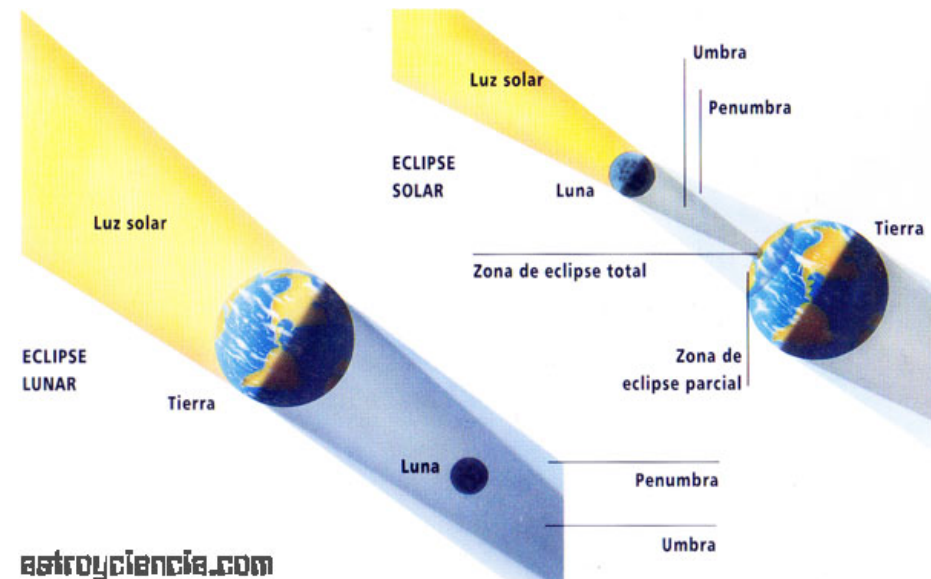
Fases de Venus

Eclipses de Sol y de Luna

* Se tienen que dar 2 condiciones: 1) La Luna en conjunción (oposición) con respecto al Sol, y 2) cerca de la intersección del plano de la órbita lunar con la de la Tierra (eclíptica).

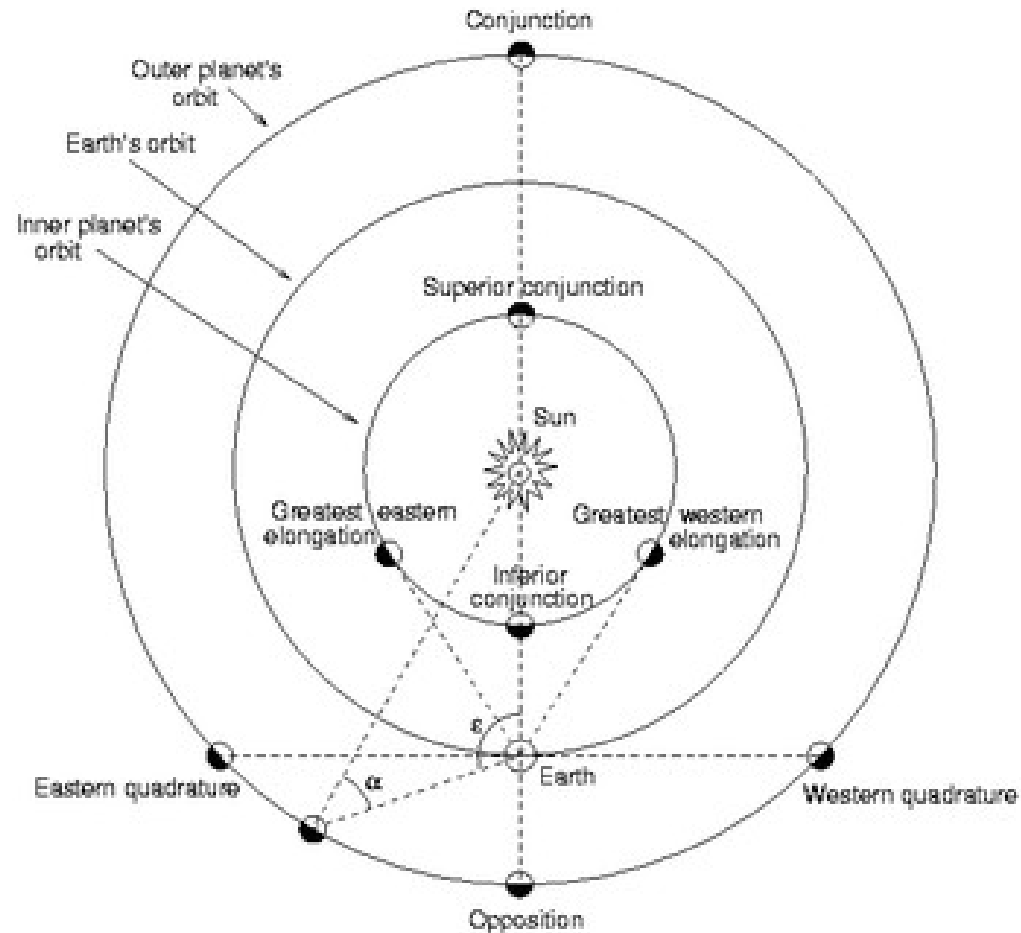


Esquema de un eclipse de Sol



Eclipses de Sol y de Luna

Elongación - Ángulo de fase



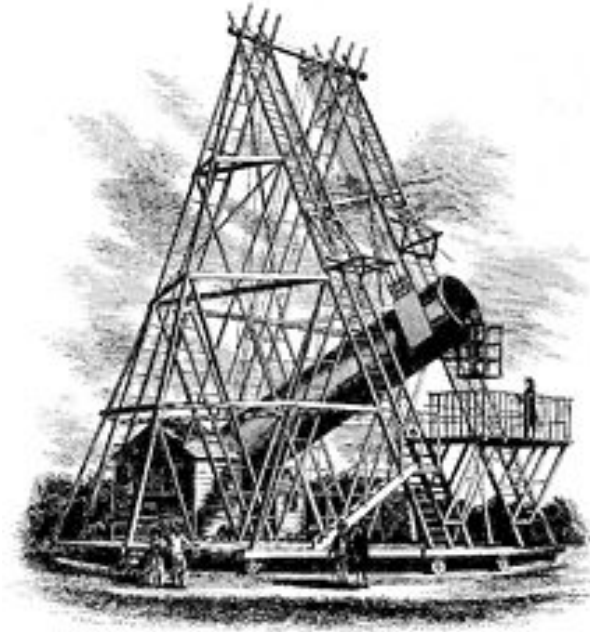
Elongación (ϵ) : ángulo Sol-Tierra-objeto

Ángulo de fase (α): ángulo Sol-objeto-Tierra

El descubrimiento de Urano - Ley de titius-Bode



William Herschel



Telescopio utilizado para el descubrimiento en 1781

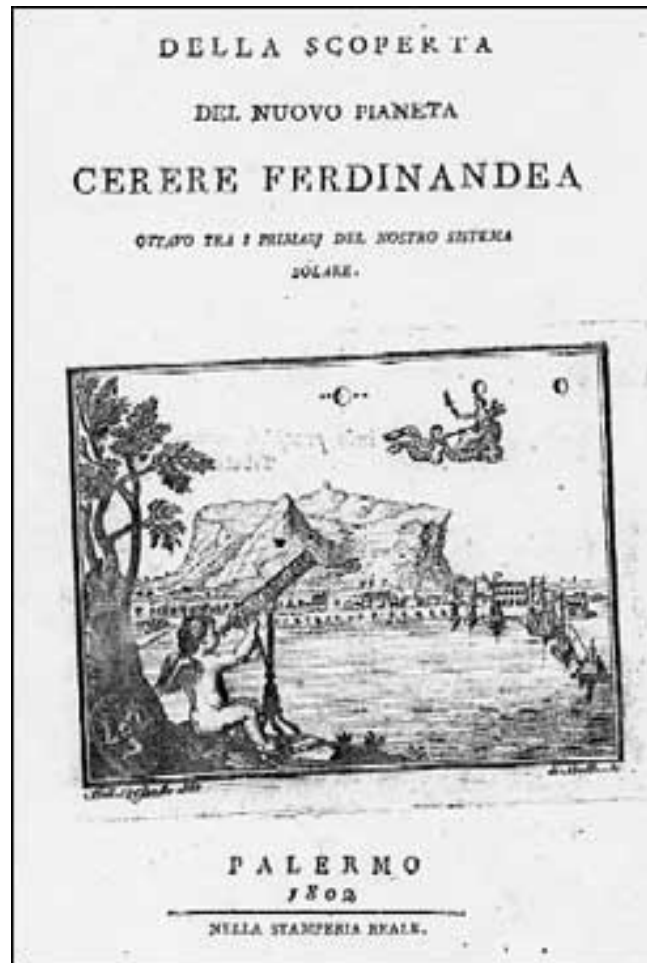
* Las distancias planetarias seguían una ley empírica, que se puede expresar mediante la ley de Titius-Bode:

$$a = 0,4 + 0,3 \times 2^n$$

donde n adopta los valores: $-\infty, 0, 1, 2, \dots$

* PROBLEMA: No había un planeta conocido para $n=3$! (entre Marte y Júpiter)

La búsqueda del planeta desconocido - El descubrimiento de Ceres



* Ceres resultó ser mucho más pequeño que los planetas conocidos (incluso que la Luna). Además a los pocos años se descubrieron otros objetos pequeños en la misma zona.

La primera gran crisis en la definición de planeta - Definición de asteroide

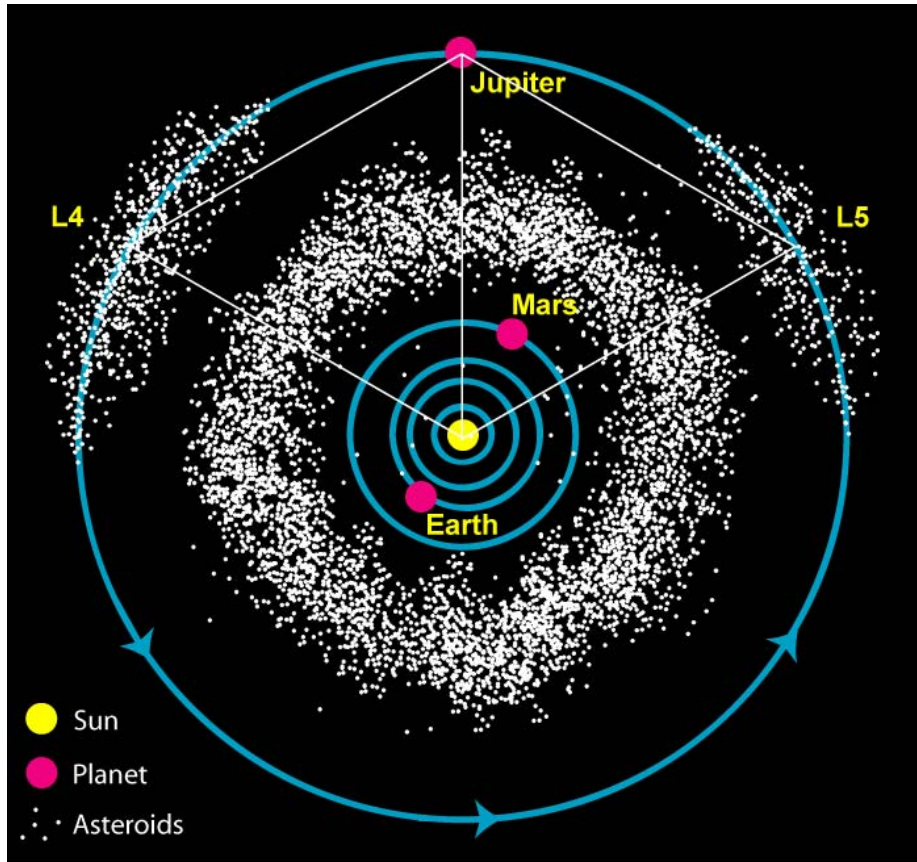


Comparación del tamaño de Ceres con los de la Tierra y la Luna



Ceres y Vesta
(Telescopio Espacial Hubble)

Cuerpos pequeños del sistema solar: asteroides

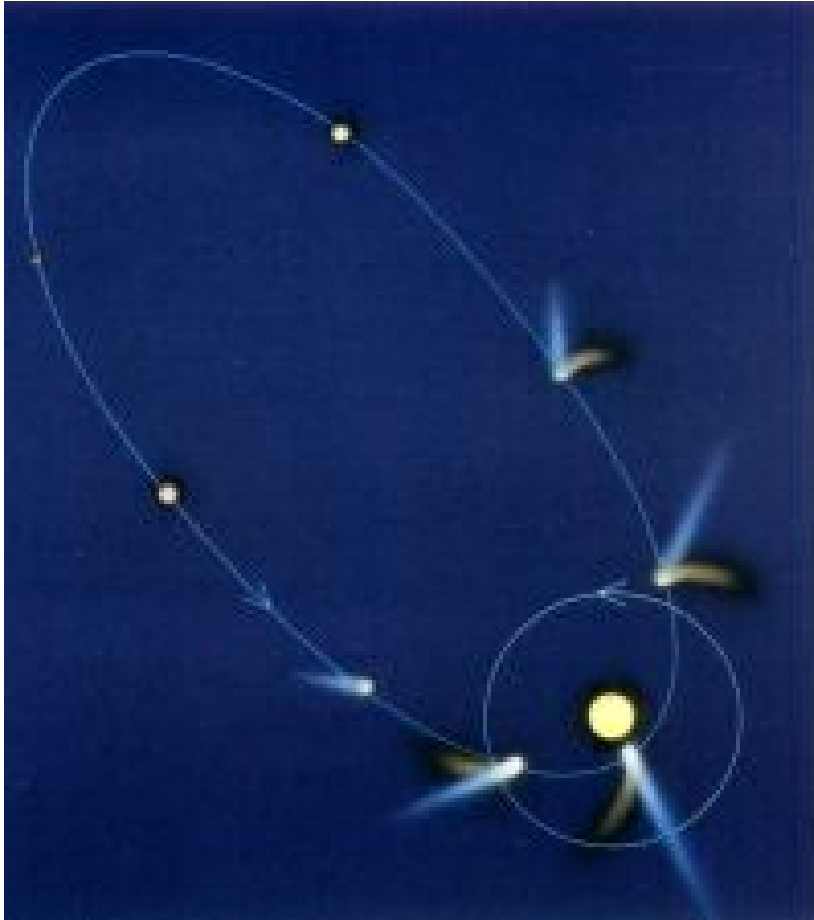


Localización espacial de los asteroides. Troyanos: se agrupan alrededor de los puntos de equilibrio dinámico L4 y L5



Muestra de asteroides: amplia gama de colores, formas y tamaños. Sólo Ceres es aproximadamente esférico.

Cuerpos pequeños del sistema solar: cometas



Orbita de un cometa



Cometa Hale-Bopp

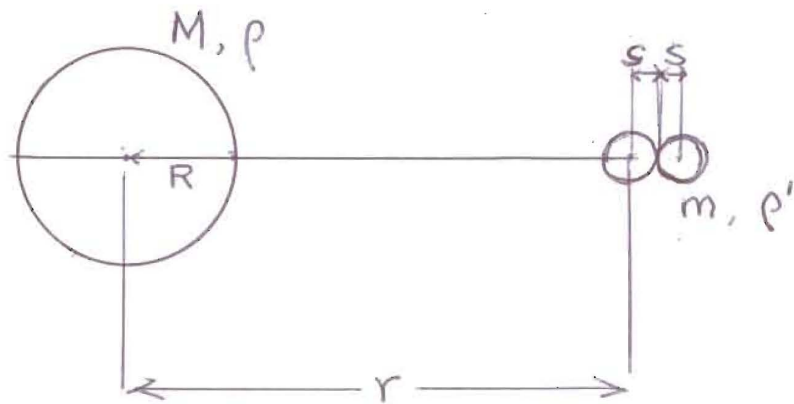
* Los cometas son objetos ricos en agua y otros volátiles que se mueven en órbitas muy excéntricas (una parte en órbitas cuasi-parabólicas). Al acercarse al Sol los volátiles congelados se subliman formando la coma y las colas.

Anillos planetarios

* Se han descubierto anillos alrededor de los 4 planetas gigantes. Estos anillos están constituidos por infinidad de pequeñas partículas (satélites) girando alrededor del planeta en forma ordenada. Se puede demostrar que si las partículas se encuentran a menos de una cierta distancia del planeta (límite de Roche), la fuerza de marea del planeta será superior a la fuerza de atracción mutua entre 2 partículas en contacto separándolas.

Masa del planeta: $M = \frac{4}{3}\pi R^3 \rho$

Masas de las partículas: $m = \frac{4}{3}\pi s^3 \rho'$



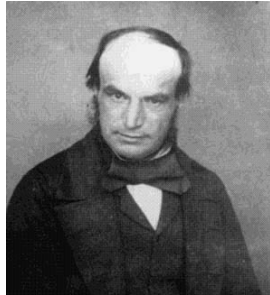
$$\frac{GMm}{r^2} - \frac{GMm}{(r+2s)^2} > \frac{Gmm}{(2s)^2}$$

Se cumple que $s \ll r$.

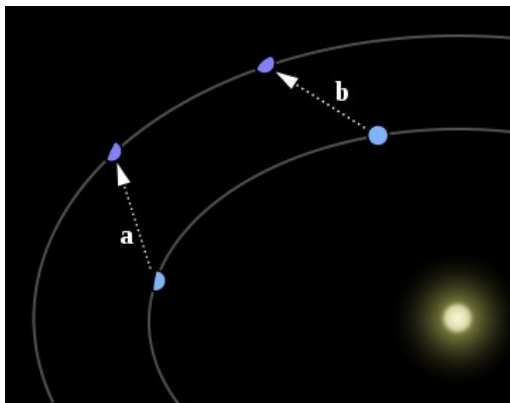
$$\implies \frac{4rs}{r^4} M > \frac{m}{4s^2}$$

$$r < 16^{1/3} \left(\frac{\rho}{\rho'} \right)^{1/3} R$$

La predicción teórica de más planetas distantes por anomalías en el movimiento de Urano: Descubrimiento de Neptuno



John Couch Adams



Perturbaciones gravitacionales de un planeta por otro más externo. En el caso de Urano, las perturbaciones fueron calculadas por Le Verrier e, independientemente, por Adams.



Urbain Le Verrier



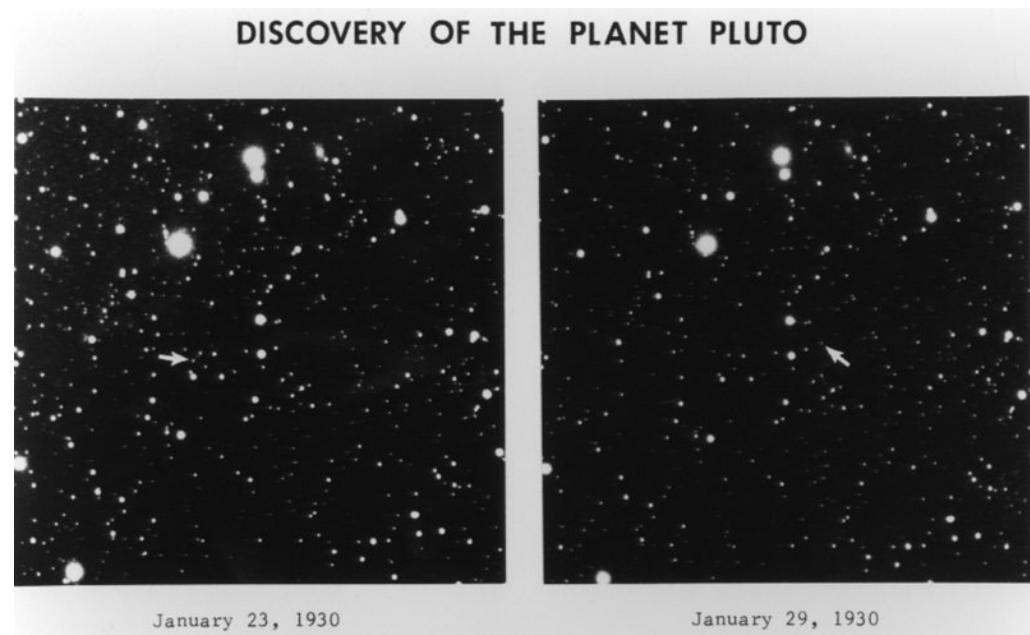
Observatorio de Berlin desde donde se descubrió Neptuno por Johann Galle en 1846 en base a las predicciones teóricas de Le Verrier.

La búsqueda del planeta X - Descubrimiento de Plutón

A comienzos del siglo XX Percival Lowell se abocó a la búsqueda de un planeta aun más distante que Neptuno que, según él, era responsable de perturbaciones en la órbita de Neptuno.

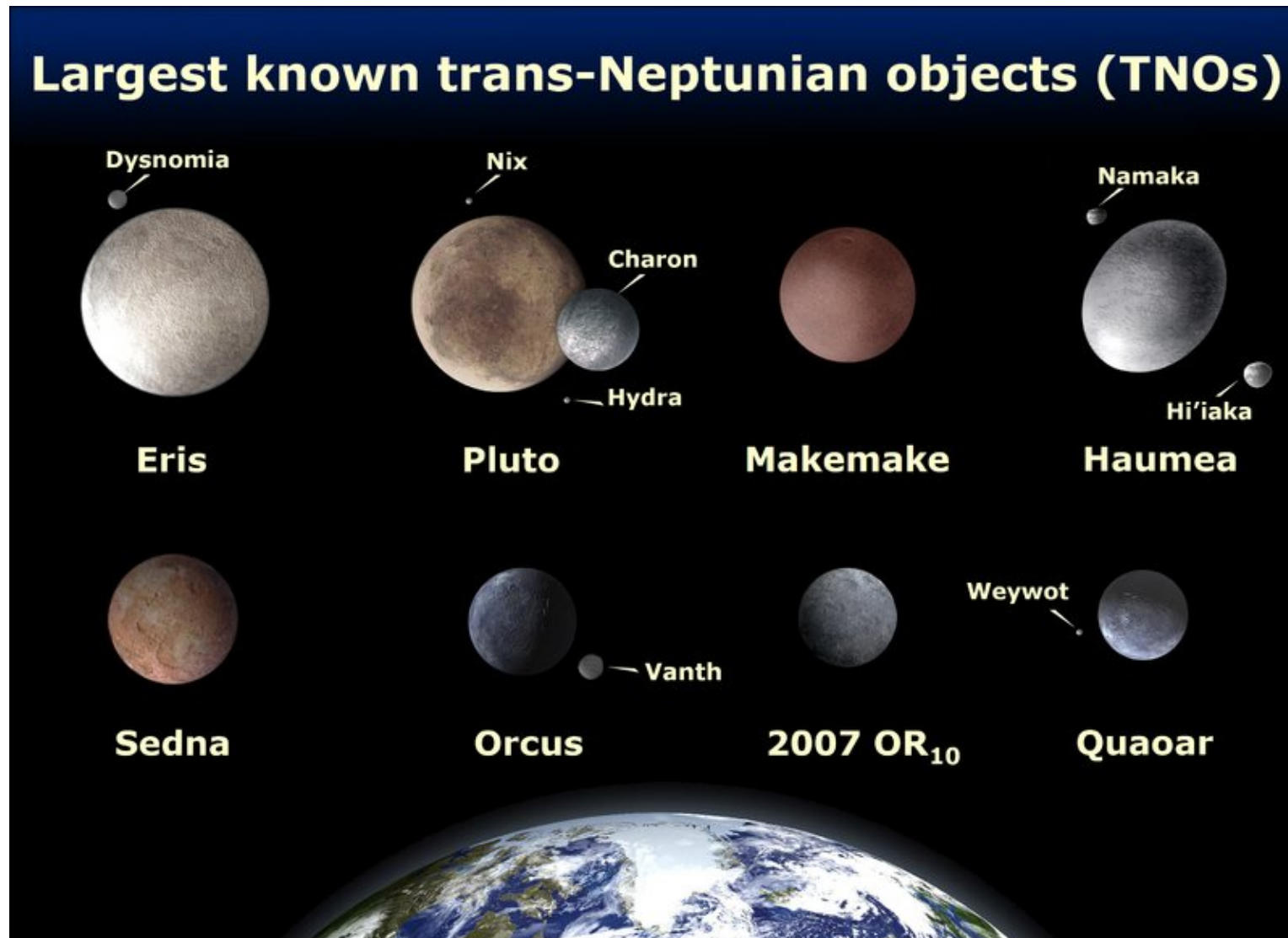


Clyde Tombaugh: Descubridor de Plutón en 1930.

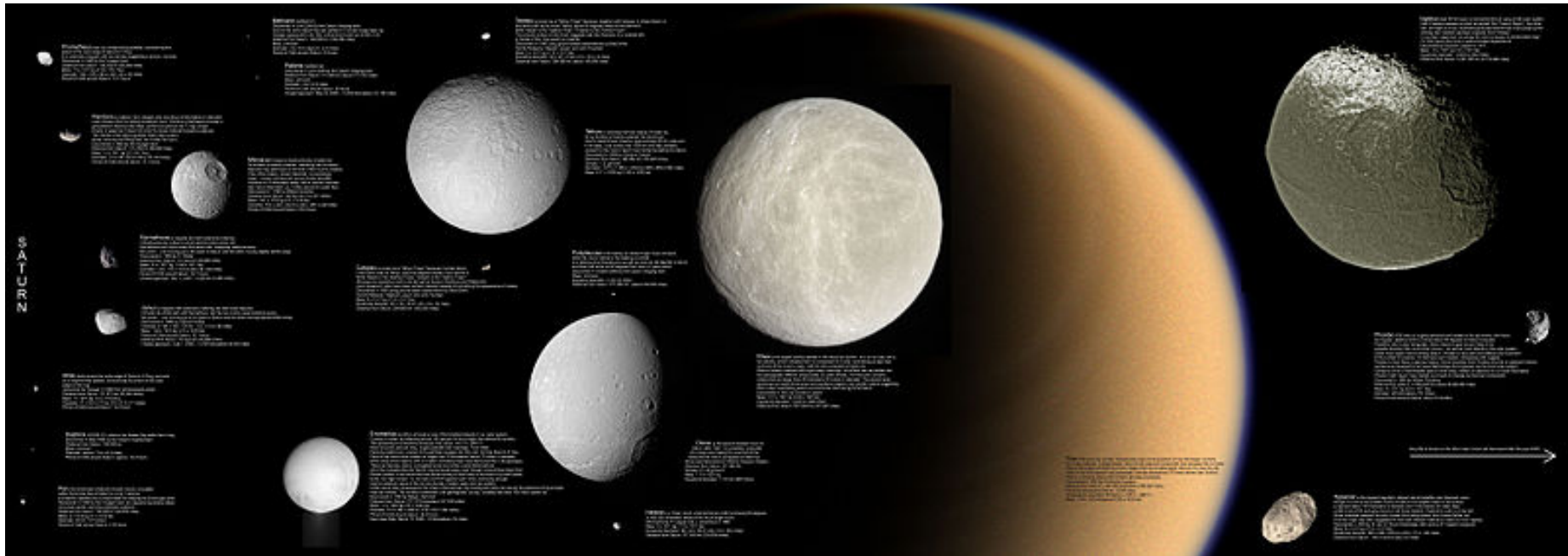


Placas fotográficas donde aparece Plutón.

Descubrimiento de otros objetos transneptunianos de tamaño similar a Plutón - Nueva crisis en la definición de planeta



Jerarquización de los objetos planetarios: desde pedazos de roca hasta objetos redondos



Cuando un objeto adquiere la suficiente masa la gravedad del material vence la resistencia interna del mismo y lo moldea en una forma esférica debido a que la fuerza de gravedad es una fuerza central.

Nueva definición de planeta

* En 2006 la Asamblea General de la Unión Astronómica Internacional, reunida en Praga, redefinió un planeta como:

1. Un “planeta” es un cuerpo celeste que (a) está en órbita alrededor del Sol, (b) tiene suficiente masa como para que su auto-gravedad se imponga a las fuerzas del cuerpo rígido de modo que asume una forma en equilibrio hidrostático (cuasi esférica), y (c) ha limpiado su vecindad a lo largo de la órbita de otros objetos.
2. Un “planeta enano” es un cuerpo celeste que (a) está en órbita alrededor del Sol, (b) tiene suficiente masa como para que su auto-gravedad se imponga a las fuerzas del cuerpo rígido de modo que asume una forma en equilibrio hidrostático (cuasi esférica), y (c) no ha limpiado su vecindad a lo largo de la órbita de otros objetos, y (d) no es un satélite.
3. Todos los otros objetos, excepto satélites, que orbitan el Sol serán referidos colectivamente como “Cuerpos Menores del Sistema Solar” .

De acuerdo a esta definición, Plutón (así como Ceres, Eris, Makemake y Haumea) pasan a la categoría de “planetas enanos” .

EJERCICIO 10

La última oposición de Marte ocurrió en 27 de julio de 2018. Calcule cuando ocurrirá la próxima oposición y a qué distancia se encontrará de la Tierra en ese momento. Asuma que las órbitas de la Tierra y Marte son circulares.

Dato: radio de la órbita de Marte $a_M = 1,52$ ua

EJERCICIO 11

(a) Calcule cuál es la máxima elongación y el máximo ángulo de fase con que se puede observar Venus. Asuma que las órbitas de la Tierra y Venus son circulares.

Dato : radio de la órbita de Venus $a_V = 0,72$ ua

(b) Calcule cuál es la máxima elongación y el máximo ángulo de fase con que se puede observar Júpiter. Asuma que las órbitas de la Tierra y Júpiter son circulares.

Dato : radio de la órbita de Júpiter $a_J = 5,2$ ua