

# Mecánica Orbital y Vehículos Espaciales

## Tema 1: Introducción histórica. El sistema solar.

Rafael Vázquez Valenzuela

Departamento de Ingeniería Aeroespacial  
Escuela Superior de Ingenieros, Universidad de Sevilla [rvazquez1@us.es](mailto:rvazquez1@us.es)

29 de junio de 2023



## Definición de Astronáutica

De acuerdo a sus propiedades, la atmósfera se puede clasificar en las siguientes capas:

0-8/16 km	Troposfera
8/16-50 km	Estratosfera
50-80/85 km	Mesosfera
80/85-500 km	<b>Termosfera</b>
500- 10000 km	Exosfera

Aproximadamente a 100 km (en la Termosfera), **Von Karman** calculó que un vehículo necesitaría ir más rápido que la velocidad orbital para generar sustentación. En base a este cálculo, la **FAI** (Fédération Aéronautique Internationale) define en sus estatutos:

- **Aeronáutica:** cualquier actividad aérea (incluyendo deportes) a menos de 100 km de la superficie.
- **Astronáutica:** cualquier actividad a más de 100 km de la superficie.



## La era espacial



- Antes incluso de los desarrollos técnicos lo hagan posible, en el siglo XIX la imaginación del hombre ya había llegado al espacio.
- La era espacial comienza en el siglo XX, cuando los **desarrollos en cohetes** hacen posible acceder a grandes altitudes.
- Los primeros diseños nacen de proyectos individuales de pioneros y de asociaciones de aficionados a la cohetería y al espacio.
- Los países donde estos proyectos empiezan a tomar forma son:
  - Rusia/URSS
  - Alemania
  - Estados Unidos

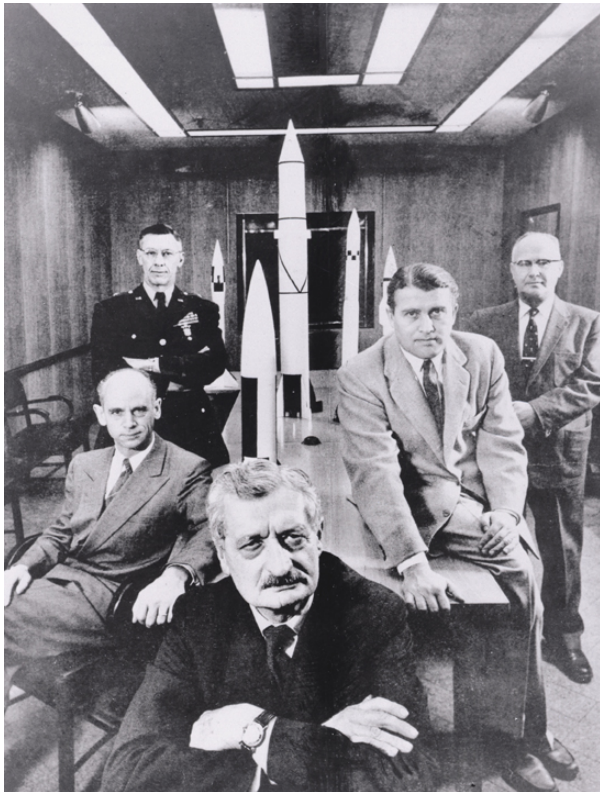
## Rusia/URSS: Konstatin E. Tsiolkovski (1857-1935)



- Considerado el “padre de la Astronáutica”
- Profesor de matemáticas de bachillerato.
- En sus ratos libres teorizó sobre la posibilidad de viajar al espacio mediante cohetes, calculando la velocidad mínima requerida para poner en órbita un objeto.
- Publicó unos 500 trabajos sobre el tema, entre ellos el primer tratado académico sobre propulsión de cohetes.
- Algunos conceptos innovadores planteados por Tsiolkovski fueron:
  - Vehículos multietapas.
  - Estaciones espaciales.
  - La posibilidad de un elevador espacial.



## Alemania: Herman Oberth(1894-1989)



- Físico teórico, profesor de bachillerato durante muchos años, luego de universidad.
  - Su tesis doctoral (1923) versó sobre el viaje al espacio mediante cohetes, y fue considerada “utópica” por la opinión científica de la época.
  - Gran divulgador y entusiasta.
  - Realizó experimentos con cohetes con sus estudiantes, entre los que destaca Von Braun.
  - Colaboró en el desarrollo del cohete V-2.
- 
- Más adelante fue reclutado por su antiguo estudiante Von Braun para colaborar en el proyecto espacial estadounidense.



## Estados Unidos: Robert H. Goddard(1882-1945)



- Profesor de física.
- Realizó importantes desarrollos en materia de cohetes de propulsante líquido y sólido.
- Trabajó también en sistemas de guiado giroscópicos.
- Sus ideas de emplear cohetes para alcanzar el espacio fueron tachadas de sensacionalistas y fue ridiculizado.
- Posteriormente trabajó aislado y no se tomaron en serio sus desarrollos.
- Irónicamente, muchas de sus ideas que no fueron entendidas por el ejército de EE.UU. sí fueron empleadas por los alemanes en el desarrollo del V-2.



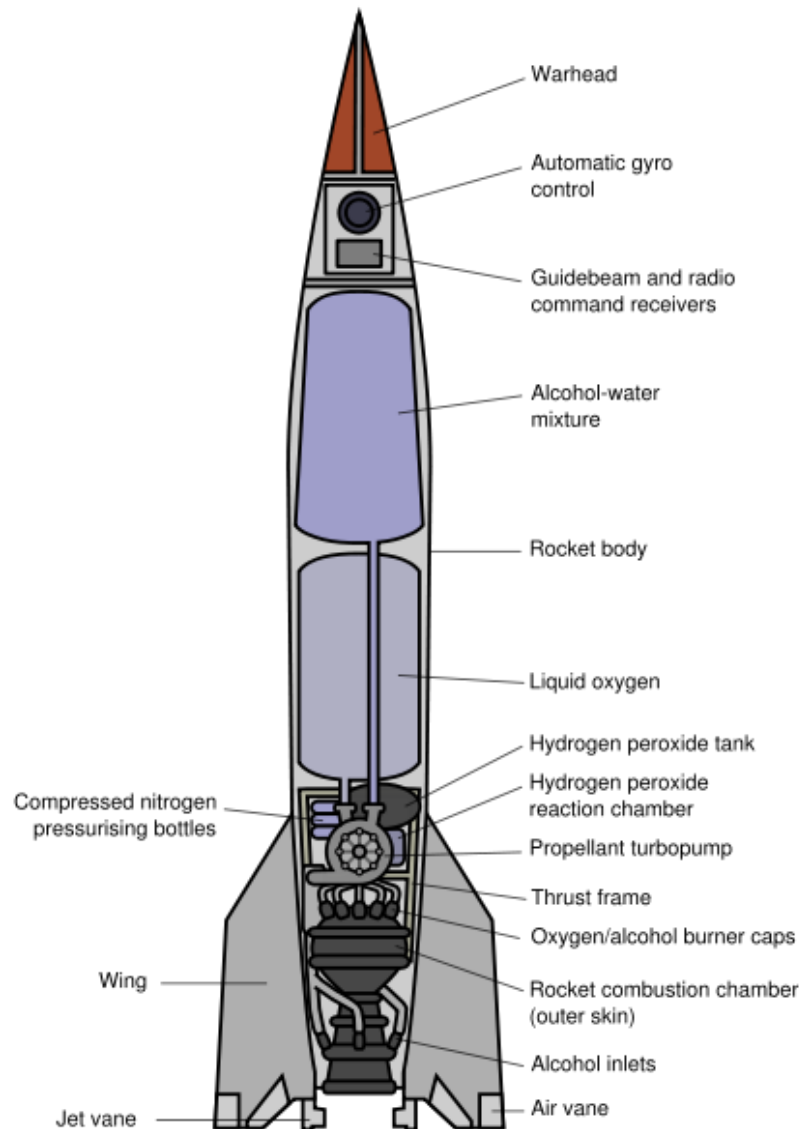
## Alemania/EE.UU.: Wernher Von Braun (1912-1977)



- Físico e ingeniero alemán.
- Desarrolló cohetes bélicos en la alemania nazi (el más famoso, el V-2), aunque siempre soñó con llegar al espacio.
- Tras la derrota en la II Guerra Mundial, se rindió al ejército estadounidense, donde trabajó en el programa de ICBMs.
- Ya naturalizado estadounidense, fue clave en el programa espacial y ocupó puestos directivos en la NASA, donde desarrolló el cohete Saturn V.
- Su papel como teórico y divulgador de la “conquista del espacio” fue también muy importante en Estados Unidos.
- Por todos estos méritos es considerado el padre del programa espacial estadounidense.



## El cohete V-2

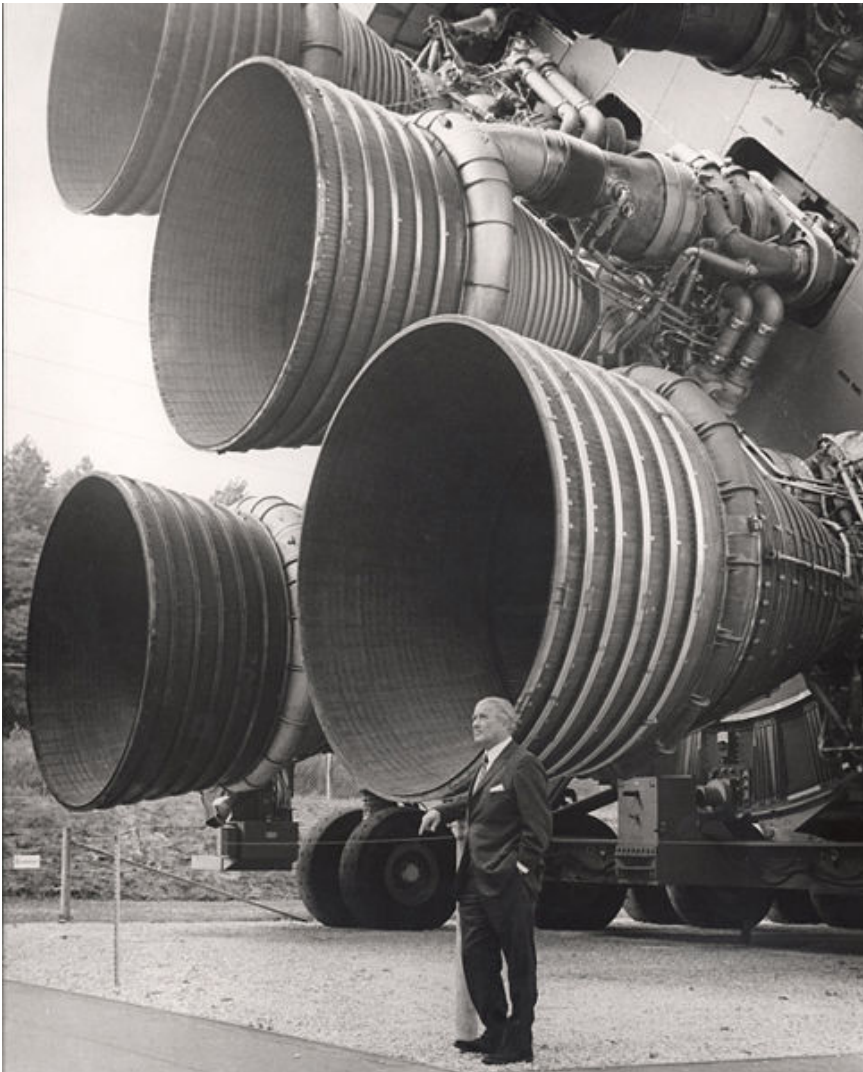


- Primer misil balístico (precursor de los ICBM), fue el primer objeto creado por el hombre lanzado al espacio sub-orbital.
- Características:
  - Altura 14 m.
  - Diámetro 1.65 m.
  - Velocidad máxima 1.6 km/s.
  - Altura máxima 88.5 km.
  - Alcance máximo 322 km.
- Guiado mediante giróscopos.
- Fue más efectivo como propaganda que como arma de guerra.





## El lanzador Saturn V



- Creado para el programa lunar estadounidense.
- Hasta el SLS (2022) ha sido el lanzador más grande y potente jamás creado.
- Algunas características:
  - Altura 110.6 m.
  - Diámetro 10.1 m.
  - Masa 3038.5 Tm.
  - Etapas 3.
  - Carga útil (órbita baja): 118 Tm.
  - Carga útil (Luna): 47 Tm.
  - Costo por lanzamiento  $\approx 3 \cdot 10^9$  \$.
- Tras 13 lanzamientos, el programa fue cancelado por su elevado coste.

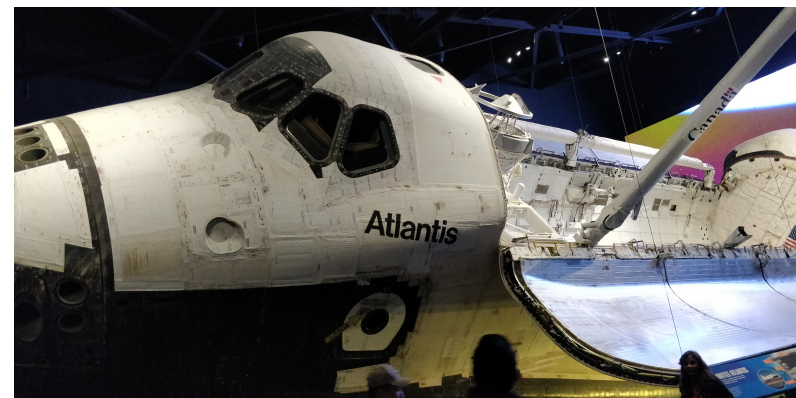
# El lanzador Saturn V



## El lanzador Saturn V



- En el museo de la NASA en Cabo Cañaveral se puede contemplar un Saturn V que nunca llegó a volar, al cancelarse el programa; así como un transbordador espacial y muchos otros vehículos.



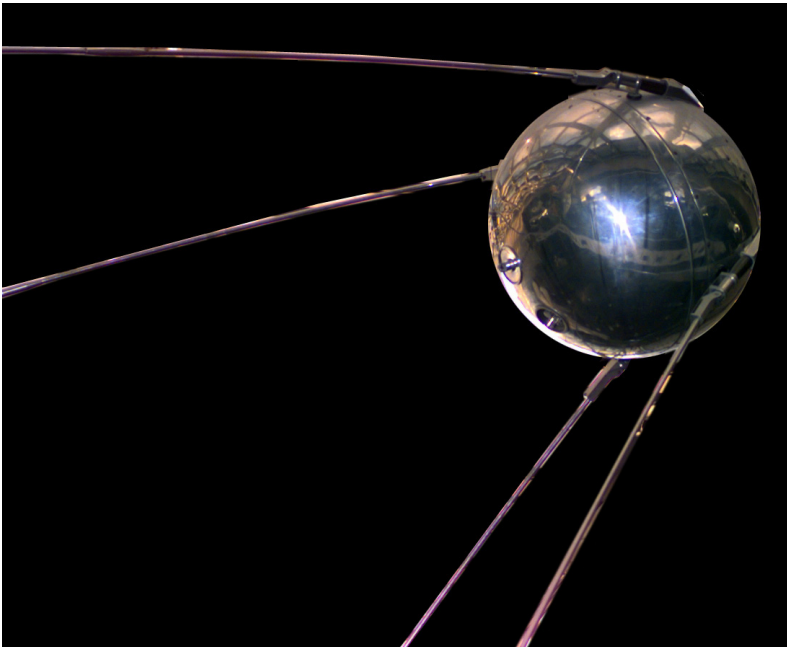
## URSS: Sergei Korolev (1907-1966)



- Ingeniero aeronáutico ruso.
- Pasó cierto tiempo en el Gulag, en Siberia.
- Copió el diseño del V-2 alemán para producir los primeros cohetes e ICBMs rusos.
- Padre “secreto” del programa espacial ruso, diseñó los satélites Sputnik.
- Su nombre real fue conocido muchos años después de su muerte; era conocido por sus iniciales o como el “Diseñador jefe”.
- Además de su trabajo como técnico y gestor, tuvo que competir políticamente con muchos rivales internos y enfrentarse a la escasez de medios (en comparación con EE.UU.).



## La carrera espacial comienza: el Sputnik



- Sputnik I (URSS) - lanzado el 4 de Octubre de 1957 desde Baikonur.
- Satélite esférico de 83.6 kg. de peso; contenía una batería de 51 kg. de peso que duró unos 20 días.
- Las características de la órbita fueron: altitud del perigeo 223 km, altitud del apogeo 950 km, inclinación 65,1°.
- Con un periodo orbital de 96.2 minutos, duró unos tres meses en órbita.
- Emitía pulsos de radio con una frecuencia fija, que pudieron captarse en todo el mundo.
- Conmocionó a la opinión pública mundial y en particular, en plena guerra fría, a la estadounidense.



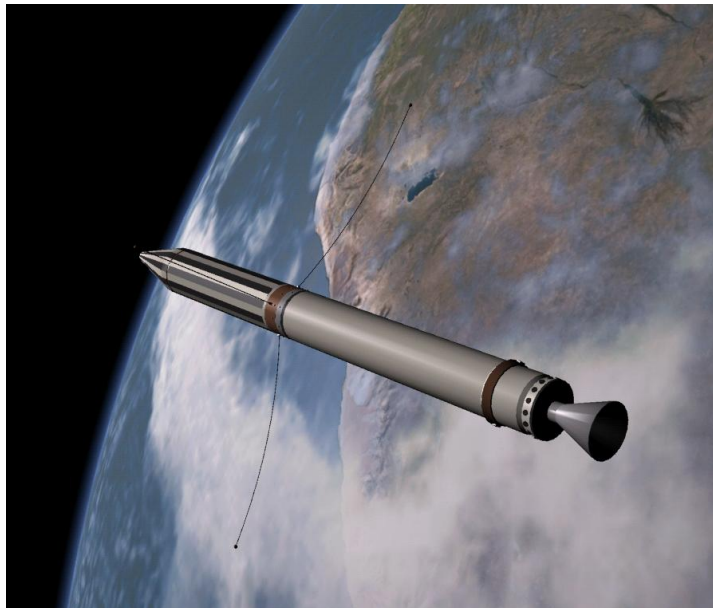
## Primeros hitos: el Sputnik 2



- Sputnik II (URSS) - lanzado el 3 de Noviembre de 1957 desde Baikonur.
- Satélite cónico de 508 kg. de peso
- Puso en órbita por primera vez a un ser vivo, la perra Laika.
- Contenía un sofisticado sistema de control térmico para permitir a Laika sobrevivir 10 días; no obstante falló y la temperatura alcanzó los 40 grados (Laika murió en pocas horas).
- Órbita: altitud del perigeo 212 km, altitud del apogeo 1660 km.



## Primeros hitos: el Explorer I

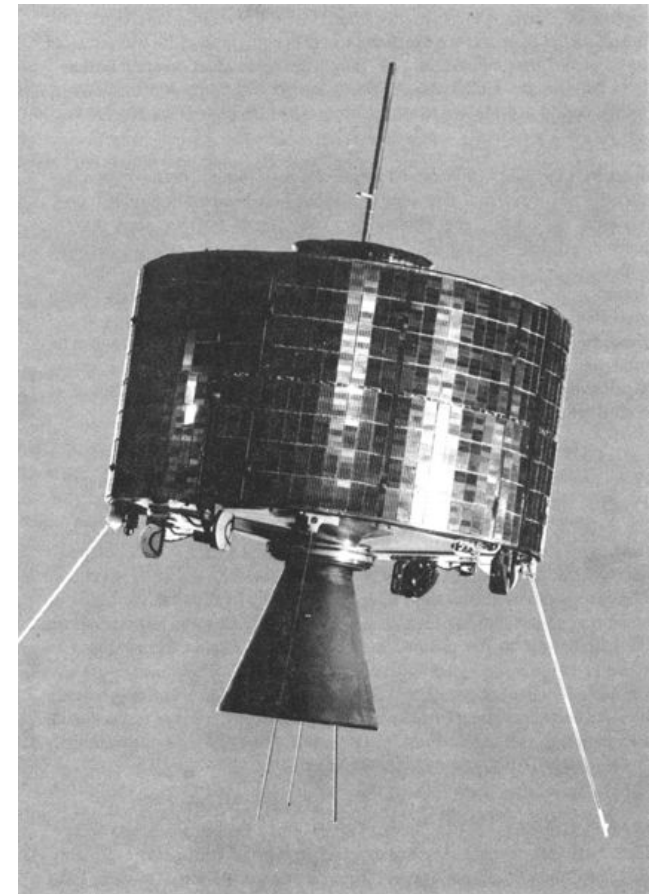


- Explorer I (EEUU) - lanzado el 1 de Febrero de 1958 desde Cabo Cañaveral.
- Satélite fuselado de 14 kg. de peso, de los cuales 8 kg. eran de instrumentación científica.
- Descubrió los cinturones de Van Allen, una zona de intensa radiación que rodea la Tierra.
- Su sistema de control de actitud estaba mal diseñado, provocando un giro caótico, no deseado, del satélite.
- Órbita: altitud del perigeo 358 km, altitud del apogeo 2,550 km.



## Primeros satélites de comunicaciones

- Project Score (EEUU), 1958: fue el primer satélite de comunicaciones (en órbita baja). Sus baterías duraron 12 días.
- Syncom 2 (EEUU), 1963: fue el primer satélite en órbita geosíncrona, ya que el Syncom 1 (1963) falló.
- El Syncom 3 (1964) fue el primer satélite en órbita geoestacionaria y se usó para retransmitir en EEUU (en directo, por primera vez a través del Pacífico) las Olimpiadas de 1964 de Tokyo.





## Primeros hombres en órbita



- Yuri Gagarin (URSS) 12/4/1961

- John Glenn (EEUU) 20/2/1962  
(Alan Shepard fue el primero en el espacio, John Glenn el primero en orbitar la Tierra)



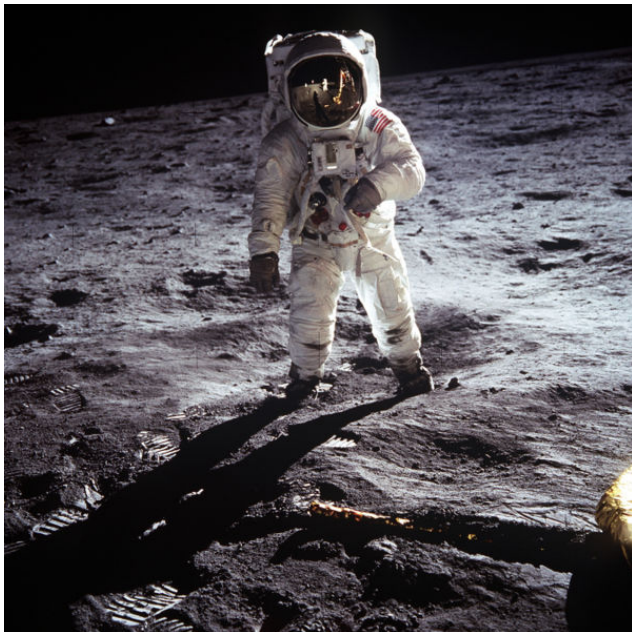
## Objetivo: La Luna

- Una vez explorado el espacio próximo a la Tierra, el siguiente objetivo por proximidad y viabilidad era la Luna.
- Procedimiento:
  - Exploración y cartografía desde órbita.
  - Aproximación, sobrevuelo, colisión.
  - “Alunizaje” no tripulado, exploración robótica, toma de muestras.
  - Expedición tripulada.
- Programas de exploración:
  - URSS: Luna
  - USA: Pioneer, Ranger, Lunar Orbiter, Surveyor... Apollo



# El Apollo 11

- Lanzado el 16/7/1969 (con un Saturn V).
- El módulo lunar aluniza el 20/7/1969.
- El Apollo 11 retorna a la Tierra el 24/7/1969.



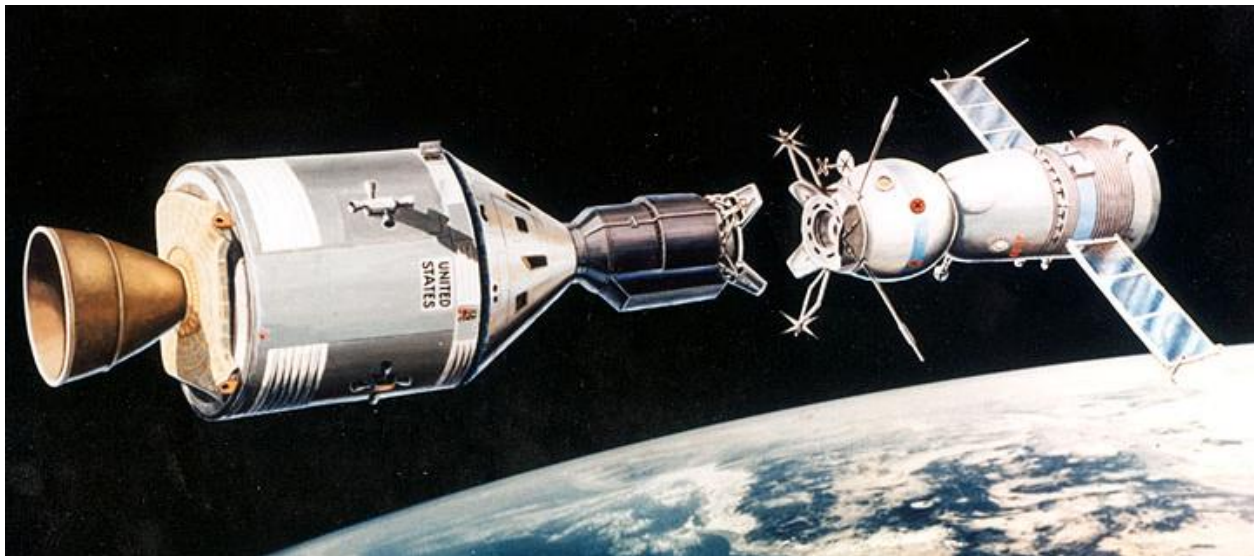
La tripulación del Apollo 11:

- Neil Armstrong
- Michael Collins
- Edwin "Buzz" Aldrin



## El fin de la carrera espacial

- En la práctica la carrera espacial la “gana” EE.UU. en 1969 con la llegada a la Luna.
- Algunos otros hitos posteriores:
  - URSS: Primera estación espacial (Salyut 1, 1971)
  - URSS: Primer aterrizaje en Venus (Venera 7, 1970)
  - EEUU: Primer objeto en trayectoria de escape del Sistema Solar (Pioneer 10, 1972)
- El encuentro Apollo-Soyuz en 1975, la primera misión espacial internacional, simboliza el fin de la carrera espacial.



## Tras la carrera espacial: El Space Shuttle



- Vehículo para misiones tripuladas en órbita baja, con una carga útil de 24.4 Tm.
- Primer vehículo espacial diseñado para ser parcialmente reutilizado.
- Muchas misiones (135) con gran éxito.
- Dos accidentes muy graves (Challenger en el lanzamiento y Columbia en la reentrada) pusieron en entredicho su seguridad.
- El último vuelo fue el 8 de Julio de 2011; el 14 de Septiembre de 2011 se anunció el programa SLS (Space Launch System) para sucederlos.

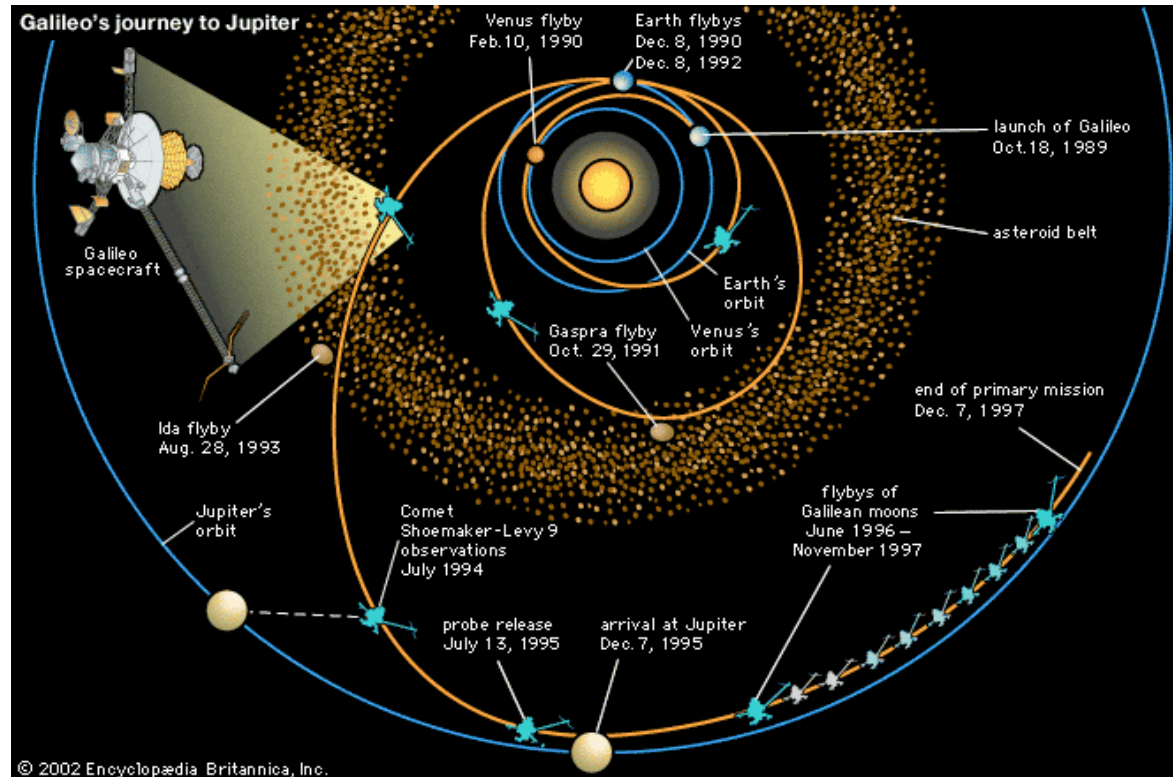


## La estación espacial MIR

- El módulo base fue lanzado el 19/2/1986
- La MIR tuvo presencia humana continua durante 10 años
- Fue escenario de numerosas cooperaciones internacionales, que sirvieron para preparar el camino para la ISS
- El último módulo adicional fue añadido en 1996 gracias a la cooperación de EE.UU.
- La MIR reentró en la atmósfera el 23/3/2001



# Galileo



- Misión de la NASA a Júpiter; la trayectoria realizó varias maniobras asistidas por gravedad en la Tierra y Venus.
- Fue lanzada el 18/10/1989 y llegó a su destino el 7/12/1995.
- Contenía una sonda atmosférica que estudió la composición de la atmósfera joviana.



## Los satélites NAVSTAR (GPS)



- Constelación de 24 satélites (nominal) en órbita media (aproximadamente 24000 km.), en la práctica unos 32.
- Proyecto del ejército de EE.UU. para uso civil y militar.
- Permite determinar posición y velocidad con gran precisión (5 metros), para lo cual es necesario conocer las órbitas de los satélites con mucha exactitud.





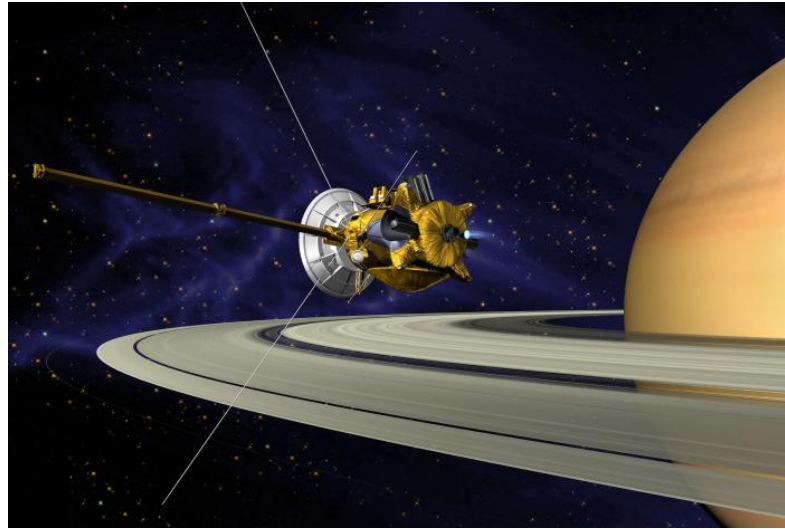
## El telescopio espacial Hubble



- Se sitúa en la órbita baja.
- Tuvieron que realizarse varias misiones tripuladas para puesta a punto y reparaciones, especialmente de la óptica y de los giróscopos usados para estimar la actitud.
- Posee un sistema de control de actitud (orientación) muy sofisticado y de gran precisión, para apuntar el telescopio principal.



## Misión Cassini/Huygens



- Misión a Saturno (Cassini) y a su luna Titán (la sonda Huygens).
- Lanzada el 15/10/1997, llegó a Saturno el 1/7/2004.
- En su trayectoria realizó maniobras asistidas por gravedad en Venus, la Tierra, y Júpiter.
- Orbitó en torno a Titán y las otras lunas de Saturno siguiendo trayectorias muy complejas.



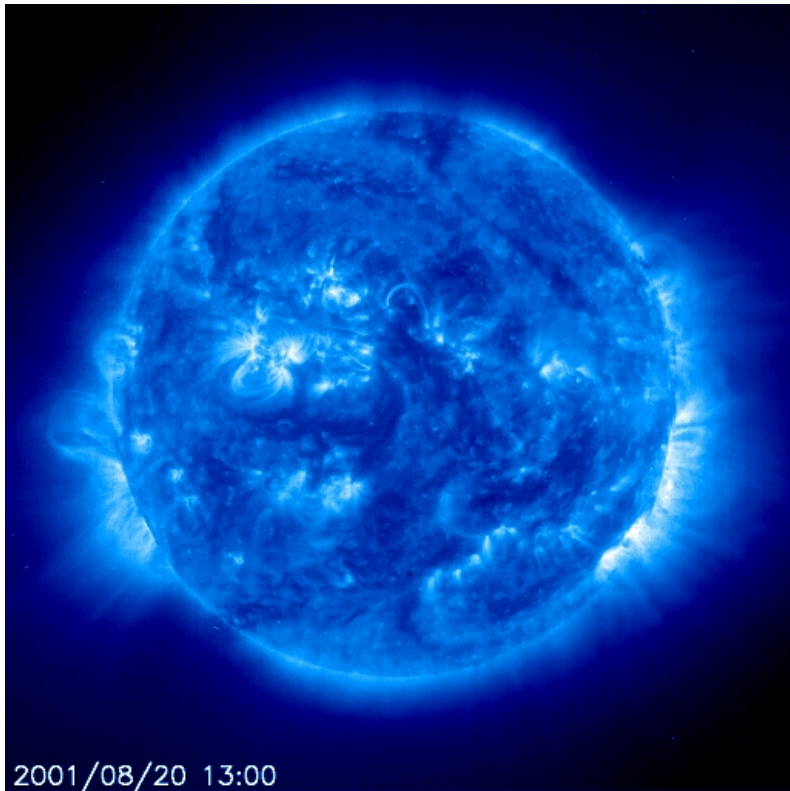
## La estación espacial internacional



- Situada en una altitud de unos 350 km., su ensamblaje comenzó en 1998.
- Su masa actual es de unas 420 Tm.
- Es el objeto más brillante en el cielo tras la Luna.



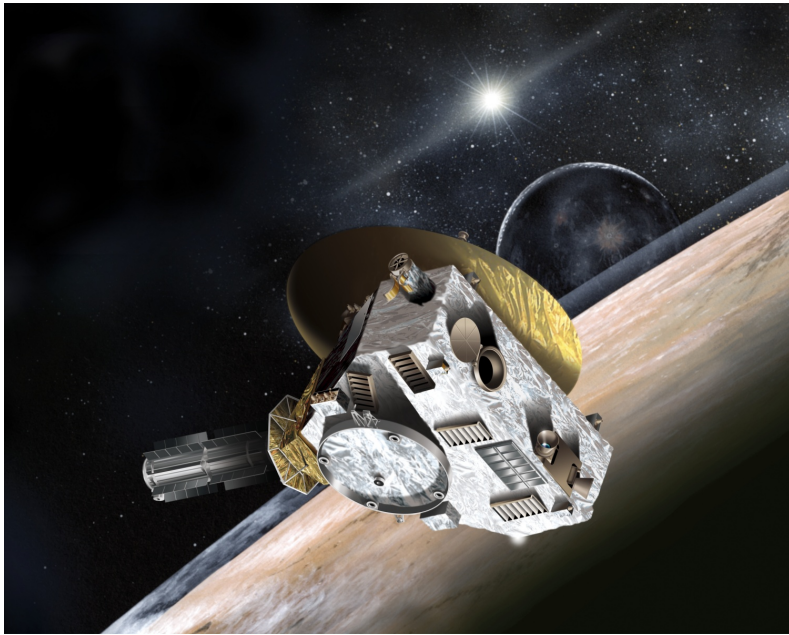
## Misión SOHO



- El Solar and Heliospheric Observatory (SOHO) fue lanzado en 1995 y es una misión conjunta de la NASA y la ESA para estudiar el Sol.
- Actualmente operativo, es la principal fuente de información sobre el estado del Sol y consecuentemente del “tiempo en el espacio” .
- Se encuentra en una órbita de tipo “halo” en torno al punto L1 (un punto de equilibrio del problema de los 3 cuerpos) Tierra-Sol.



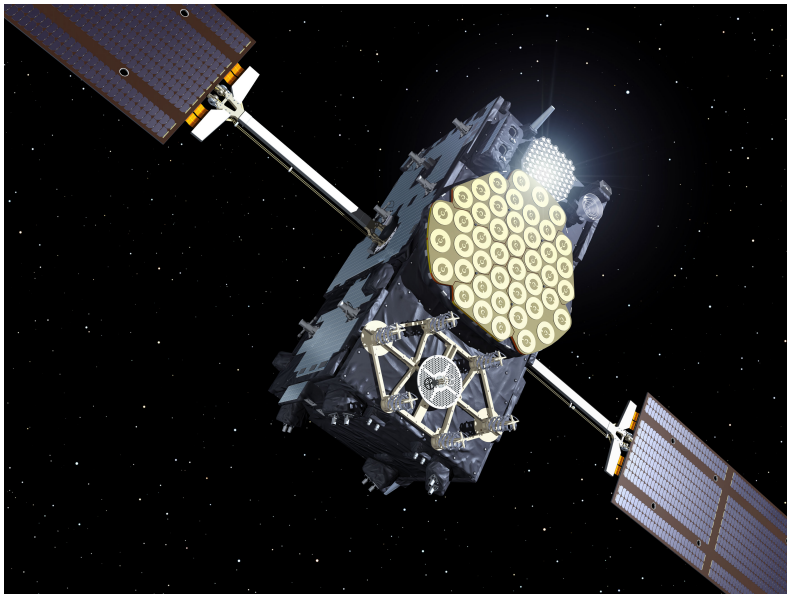
## Misión New Horizons



- Única misión que ha llegado a Plutón y sus lunas.
- Fue lanzado el 19 de Enero de 2006 y realizó una maniobra asistida por gravedad en Júpiter el 28 de Febrero de 2007, alcanzando la suficiente velocidad para llegar a Plutón.
- Alcanzó Plutón en julio de 2015 y ahora está en el cinturón de Kuiper.
- Se obtuvieron imágenes de Plutón y su satélite Caronte, así como Nix e Hidra, los dos mayores satélites tras Caronte.
- Es el vehículo más rápido jamás lanzado desde la Tierra (58 km/s heliocéntricos) aunque no el record de velocidad (la sonda solar Parker alcanzó 163 km/s o 586.000 km/h).



# Galileo



- Sistema de navegación por satélite europeo. Alternativa a Glonass (Rusia), Beidou (China) y GPS (EEUU), con servicios de alta precisión (1 metro) y capacidad de recibir señales de emergencia de usuarios.
- Validado en 2012 con cuatro satélites.
- El 22 de Agosto de 2014 se lanzaron los dos primeros satélites operativos (de un total de 30), pero la inserción en la órbita final fracasó.
- Funcional, pero se espera alcanzar FOC (Full Operational Capability) a finales de 2022.



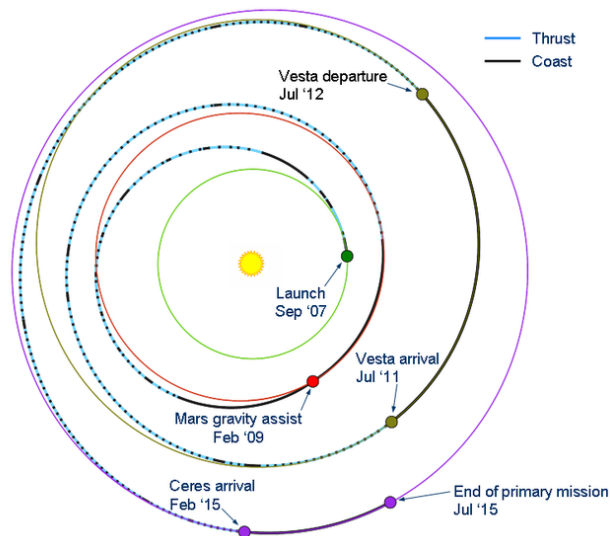
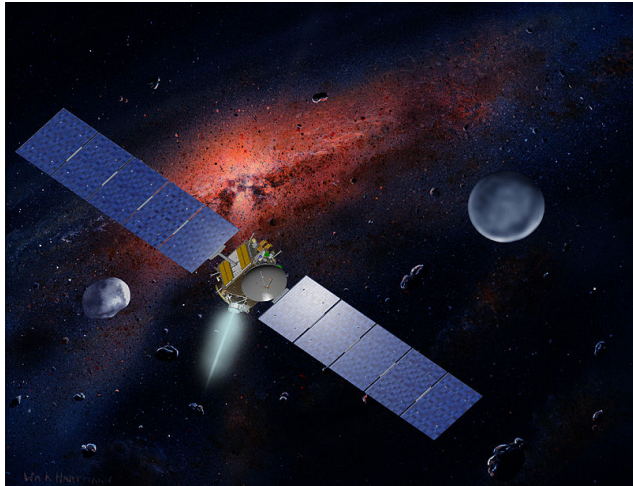
## Misión Rosetta



- Misión de la ESA para el estudio de cometas.
- Fue lanzado el 2 de Marzo de 2004 y el 6 de Agosto de 2014 realizó un encuentro (rendezvous) con el cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko para su estudio.
- Tiene una sonda (Philae) que “aterrizó” en el cometa en Noviembre de 2014.



# Misión Dawn

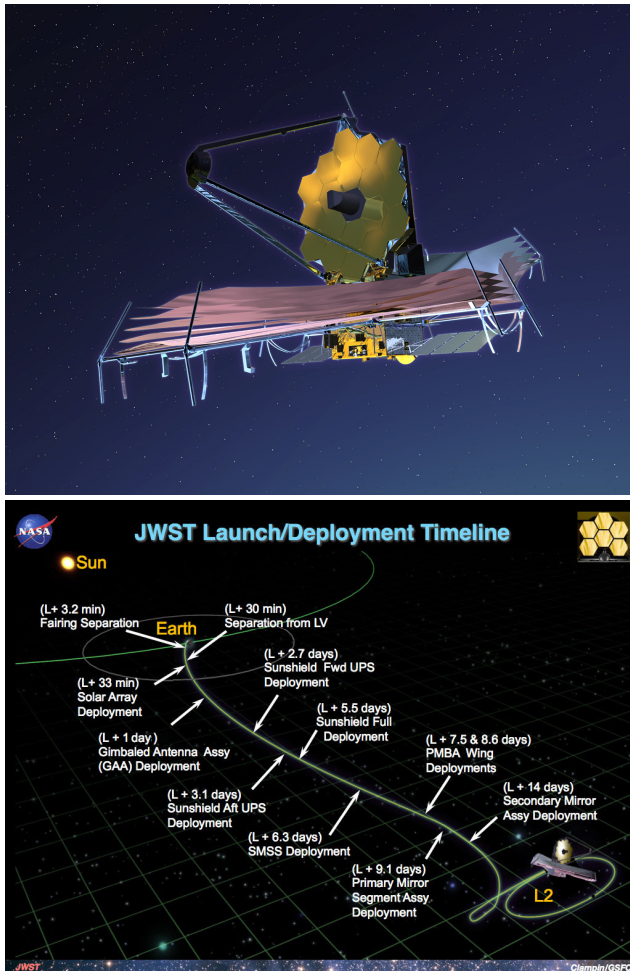


- Misión de la NASA al cinturón de asteroides.
- Visitó el asteroide Vesta (2011) y posteriormente (2015) visitó el planeta enano Ceres.
- Lanzado el 27 de Septiembre de 2007.
- Es la primera misión exploratoria de la NASA que emplea propulsión iónica en grandes tramos de su trayectoria para modificar la órbita.





# El telescopio espacial James Webb



- Misión de la NASA/ESA y otras agencias, de observación del Universo, situada en una órbita Halo en el punto L2 Sol-Tierra.
- A diferencia del Hubble explora en el infrarrojo, lo que permite ver objetos más remotos/antiguos, para lo cual requiere temperaturas próximas al cero absoluto en los instrumentos.
- Lanzado el 25 de diciembre de 2021, la primera imagen llegó en julio de 2022.



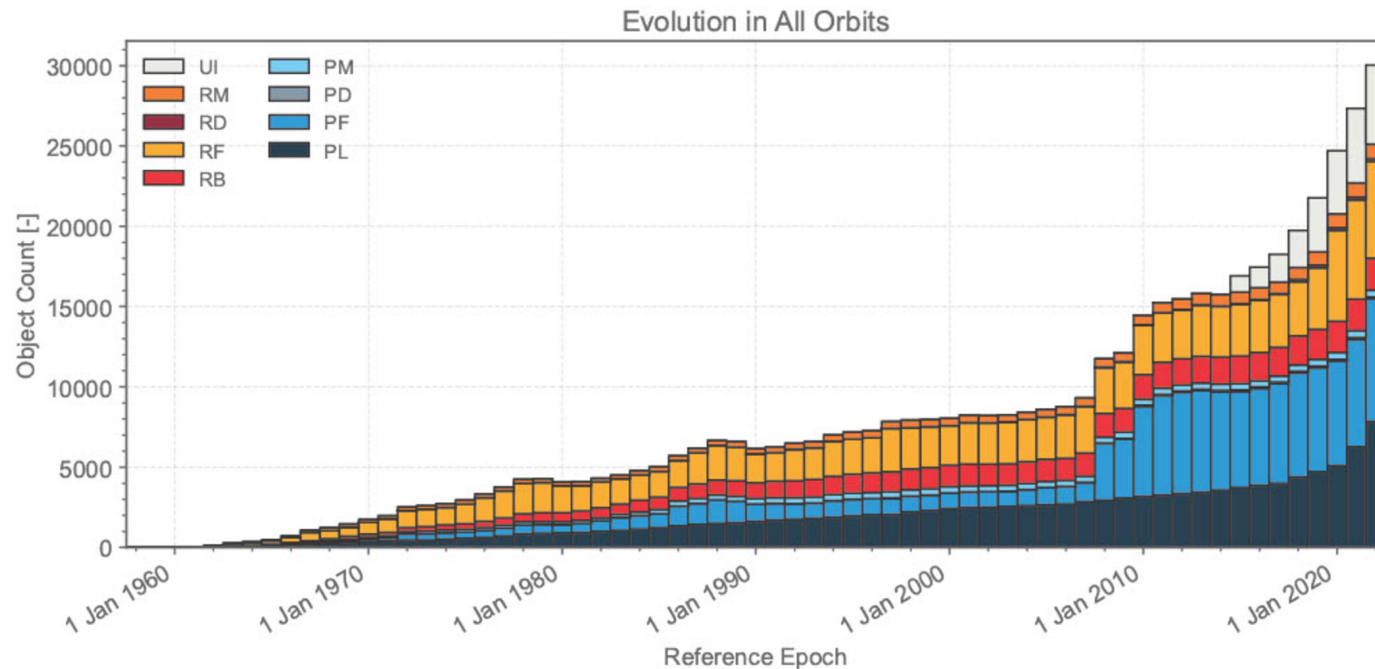
# Megaconstelaciones



- Con la idea de proporcionar internet y otros servicios de comunicaciones de forma global, se han desplegado recientemente constelaciones con muy alto número de satélites en órbita baja por parte de compañías privadas.
- Los ejemplos más notables son los siguientes. Starlink de SpaceX: sobre 3000 ya en órbita, se planea superar los 10.000; OneWeb (participada por UK): tiene 428 de 648 planeados ya en órbita; Project Kuiper de Amazon, planea tener más de 3000 satélites en órbita.
- Las constelaciones plantean grandes retos relativos a basura espacial, y de regulación, relativos a la ocupación del espectro de radiofrecuencia y visual (astronomía).



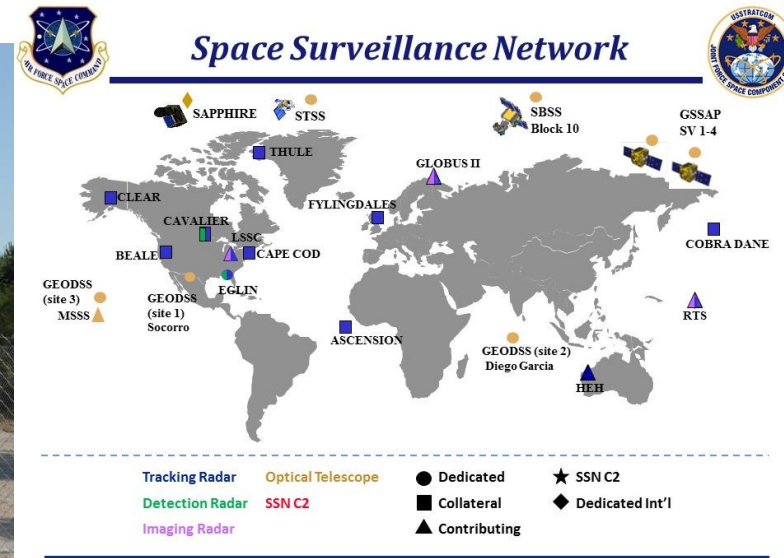
# Basura espacial



- Un problema creciente:  $\approx 10^6$  objetos  $> 1\text{cm}$  en órbita.
- En la figura (extraída de la ESA), objetos que se rastrean desde Tierra: PL = Payload; PF = Payload Fragmentation Debris; PD = Payload Debris; PM = Payload Mission Related Object; RB = Rocket Body; RF = Rocket Fragmentation Debris; RD = Rocket Debris; RM = Rocket Mission Related Object; UI = Unidentified. (<https://sdup.esoc.esa.int/discosweb/statistics/>)



# Vigilancia espacial



- Imagen: radar de vigilancia espacial de la base de Morón (Fuente: El País [https://elpais.com/politica/2018/08/15/actualidad/1534358276\\_285238.html](https://elpais.com/politica/2018/08/15/actualidad/1534358276_285238.html)).
- La vigilancia espacial tiene como objeto descubrir, identificar y rastrear objetos en órbita, observar comportamientos anómalos, y avisar de potenciales colisiones.
- Muchos países (incluido España) están construyendo capacidades de vigilancia espacial (la red más antigua -SSN- es de EEUU). El centro español está en Torrejón de Ardoz.



## Misiones planeadas para el futuro



- Otros países como China, India, o Japón tienen programas espaciales ambiciosos.
- EE.UU. quiere volver a la Luna (programa Artemis) y establecer una base en órbita (Gateway). Además planea una misión tripulada a Marte, tras el éxito de los programas de exploración marcianos y el descubrimiento de hielo.
- Viaje a la luna Europa de Júpiter (submarino bajo el hielo?).
- Turismo espacial: viajes proporcionados por la agencia espacial Rusa (~20 millones de dólares) y el SpaceShip One. Presente: Virgin Galactic (800 tickets vendidos para vuelo suborbital, al módico precio de 450,000\$ cada uno).



## Misiones Espaciales: Clasificación

- El criterio más adecuado para clasificar un satélite o vehículo espacial es la definición de su misión.
- Las misiones se pueden clasificar atendiendo a dos criterios:
  - Propósito de la misión.
  - Localización espacial de la misión.
- Las misiones se pueden clasificar por su propósito en tres grandes grupos (que pueden solaparse): Misiones Comerciales, Misiones Científicas y Misiones Militares.
- Las misiones se pueden clasificar por su localización en varias categorías: Misiones en órbita terrestre baja (LEO), Misiones en órbita terrestre de altitud media/alta y Misiones lunares y en el espacio profundo (“deep space”).



## Misiones Científicas

- Su objeto es aumentar el conocimiento humano, ya sea obteniendo datos de medidas, realizando experimentos, o comprobando teorías.
- Ejemplos:
  - Estudio de la Tierra y su entorno. Estudios de la alta atmósfera, la ionosfera, estudios de geomagnetismo, geodesia, oceanografía. Uno de los primeros hitos fue el descubrimiento de los cinturones de Van Allen por el Explorer-I.
  - Astronomía. Las observaciones espaciales se libran de las limitaciones en resolución y ancho de banda electromagnético que impone la atmósfera. El telescopio espacial Hubble proporciona resoluciones 10 veces superiores a las de telescopios terrestres.
  - Sistema Solar. Recopilación de datos sobre planetas, cometas, satélites de planetas, el propio sol o el medio interplanetario/interestelar.



## Misiones Comerciales

- Su objeto es una aplicación inmediata de interés económico.
- Ejemplos:
  - Meteorología. Primer campo de aplicación de los satélites. Órbitas heliosíncronas (regional) y geostacionarias (clima global).
  - Comunicaciones. Telefonía fija y móvil (Iridium, Globalstar), retransmisiones de televisión, internet. Repetidores típicamente activos. Suelen encontrarse en órbitas geoestacionarias, especiales (Molniya, Tundra), o constelaciones de satélites.
  - Recursos terrestres. Agricultura, prospección, cartografía marina y terrestre, hidrología, control ambiental, detección de catástrofes. Típicamente en órbitas heliosíncronas.
  - Navegación. Red GPS (USA), Glonass (Rusia), Beidou (China), IRSS (India). Futura Galileo (ESA). Son constelaciones de satélites.





## Misiones Militares

- Su objeto es una aplicación bélica o defensiva; se incluyen las misiones de investigación tecnológica.
- Ejemplos:
  - Reconocimiento (satélites espía). Capaces de distinguir objetos pequeños (centímetros) tanto de día como de noche (mediante sistemas infrarrojos).
  - Alerta temprana. Detección de ICBMs.
  - Inteligencia electrónica. Capturan señales electrónicas y de radar y las emiten a estaciones de control para su análisis.
  - Sistemas de Satélite Antisatélites (ASAT). Antiguamente conocido como “Star Wars”. Investigación prohibida por tratados internacionales.



## Misiones en órbita terrestre baja (LEO)

- Comprenden la mayor parte de las misiones llevadas a cabo. Aproximadamente se consideran LEO (Low Earth Orbit) órbitas de altitud menor que 2000km, aunque en la práctica se suelen usar órbitas bajo 1000 km (por debajo de los cinturones Van Allen excepto la Anomalía del Atlántico Sur).
- Ejemplos:
  - Pruebas de vuelo. Comportamiento de la propulsión, etapas, reentrada. Carga de pago simulada.
  - Observación de la Tierra. Típicamente en órbitas bajas para minimizar la distancia. En ocasiones se busca un periodo que sea una fracción entera del día terrestre. La inclinación orbital se elige según las latitudes a cubrir. En muchos casos se eligen órbitas heliosíncronas (p. ej. Satélites meteorológicos).
  - Observación del espacio, aunque en LEO puede haber limitaciones de ancho de banda por efectos atmosféricos.
  - Procesos Industriales (actualmente en etapa experimental). Procesos de manufactura únicamente posibles en el espacio (cristales, aleaciones).



## Misiones en órbita terrestre de altitud media/alta

- Incluye las órbitas geosíncronas, semi-geosíncronas y otras órbitas especiales.
- Siempre por encima del cinturón de radiación interno, ocasionalmente pueden cruzar el cinturón externo.
- Ejemplos:
  - Órbita geosíncrona. Incluye la órbita geoestacionaria (GEO, sólo posible sin inclinación, es decir sobre el Ecuador, y circular). Las órbitas geosíncronas no ecuatoriales no permanecen siempre sobre el mismo punto, sino que viajan periódicamente al Sur y al Norte del punto; usualmente la huella del satélite tiene forma de 8.
  - Otras órbitas de interés tienen periodos en relación simple al periodo de la Tierra. P.ej. los satélites Molniya que cubren zonas de elevada latitud en Rusia.
  - Aplicaciones: satélites de comunicaciones, meteorológicos, de navegación. observaciones del espacio. Aplicación futura: ODSRS (Orbiting Deep Space Relay Satellite).



## Misiones lunares y en el espacio profundo

- En general poco frecuentes debido a los elevados costes, tiempos de vuelo y escasez de oportunidades (ventanas de lanzamiento).
- Ejemplos:
  - Misiones en los planetas interiores. Desde Mercurio al cinturón de asteroides. Es posible el uso de energía solar. Tiempos de vuelo típicos en meses. En general los asteroides permanecen inexplorados.
  - Misiones en los planetas exteriores. Todos los planetas han sido ya visitados (incluso el planeta enano Plutón). Misiones muy costosas, tiempos de vuelo típicamente años. Uso de maniobras asistidas por gravedad. No es posible depender exclusivamente de energía solar.
  - Misiones solares.
  - Otros cuerpos pequeños. Cometas, asteroides.

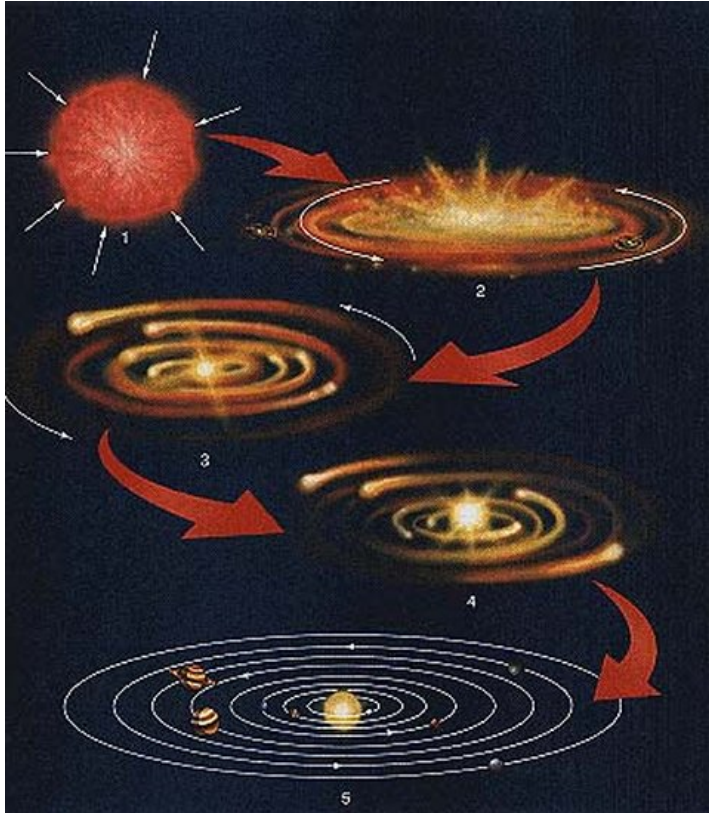


## Conceptos avanzados

- Grandes estructuras espaciales: p.ej. Antenas gigantes o “centrales” eléctricas solares. Aprovechando la ingravidez.
- Estaciones espaciales: típicamente modulares. Otros conceptos: rotatorias (como en “2001, una odisea del espacio”).
- Colonias espaciales: Hábitats “auto-suficientes” con habitantes permanentes. Grandes dificultades de ingeniería.
- Minería espacial: en la Luna o los asteroides. En estudio.
- Manufactura de combustible: p.ej. en Marte. Reducción de costes.
- Cementerios nucleares: peligro de contaminación en caso de accidente en el lanzamiento.



## El Sistema Solar



- Se cree que el origen del Sistema Solar fue una nube de polvo estelar y gas que fue alterada, tal vez por la explosión de alguna supernova cercana, hace 4600 millones de años.
- Dicha perturbación provocó el colapso gravitacional de la nube en un disco, y su giro (en el sentido opuesto a las agujas del reloj).
- El centro, cada vez más caliente, se transformó en una estrella.
- El disco se fue haciendo más delgado y en algunas zonas, las partículas se amalgamaron formando planetas y lunas.
- El giro explica el sentido de translación y rotación de los planetas.

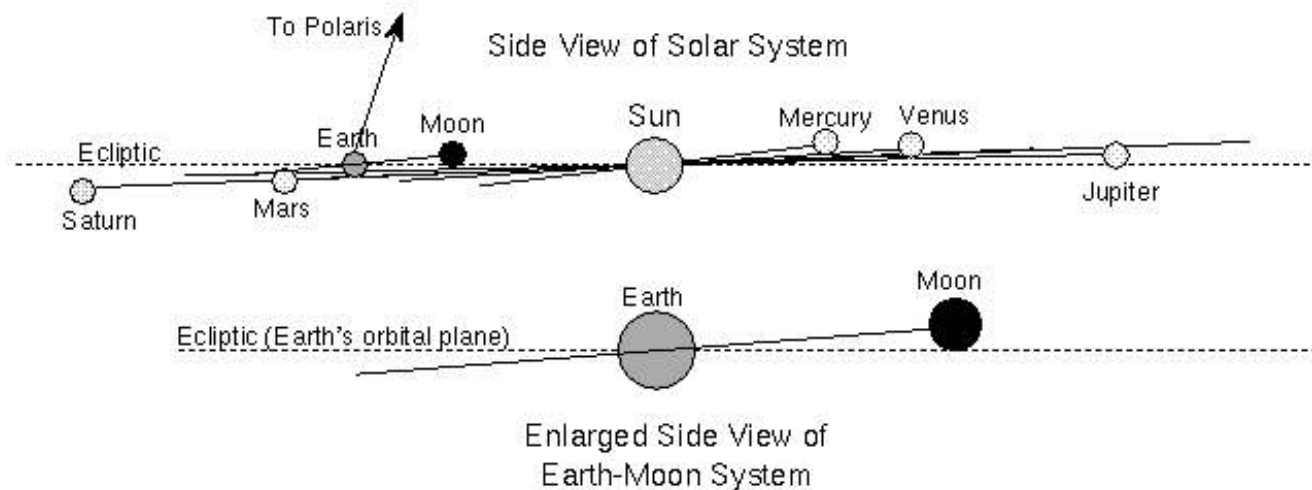
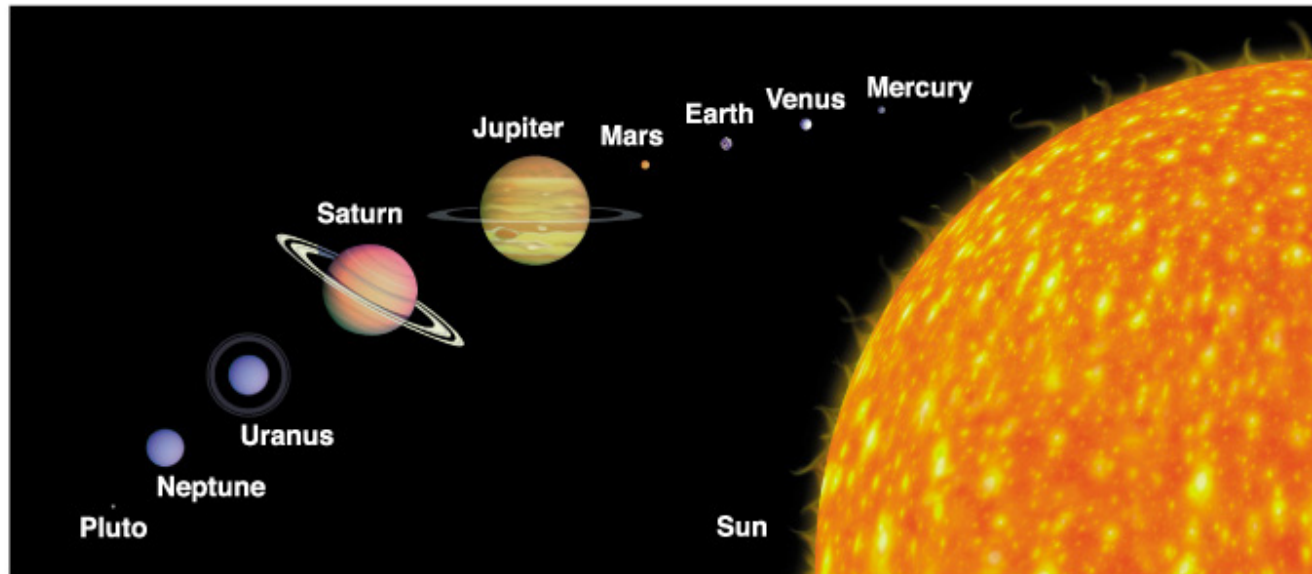


## Los planetas y el plano de la eclíptica

- Todos los planetas, sus satélites y los asteroides, orbitan el sol aproximadamente en el mismo plano, llamado plano de la eclíptica.
- La definición formal de la eclíptica es el plano en el que la Tierra orbita en torno al Sol. Se llama eclíptica porque los cruces de la Luna por dicho plano determinan los eclipses.
- Las órbitas de los planetas son aproximadamente circulares.
- La única excepción es el planeta enano Plutón que tiene una órbita más elíptica y de una inclinación apreciable (17 grados).
- Los planetas rotan con un eje casi perpendicular al de la eclíptica en el sentido contrario de las agujas del reloj.
- Las únicas excepciones son: Urano que rota “de lado” y Venus cuya rotación es en el sentido de las agujas de un reloj. Se presupone que ambos casos se deben a grandes colisiones en el pasado remoto.

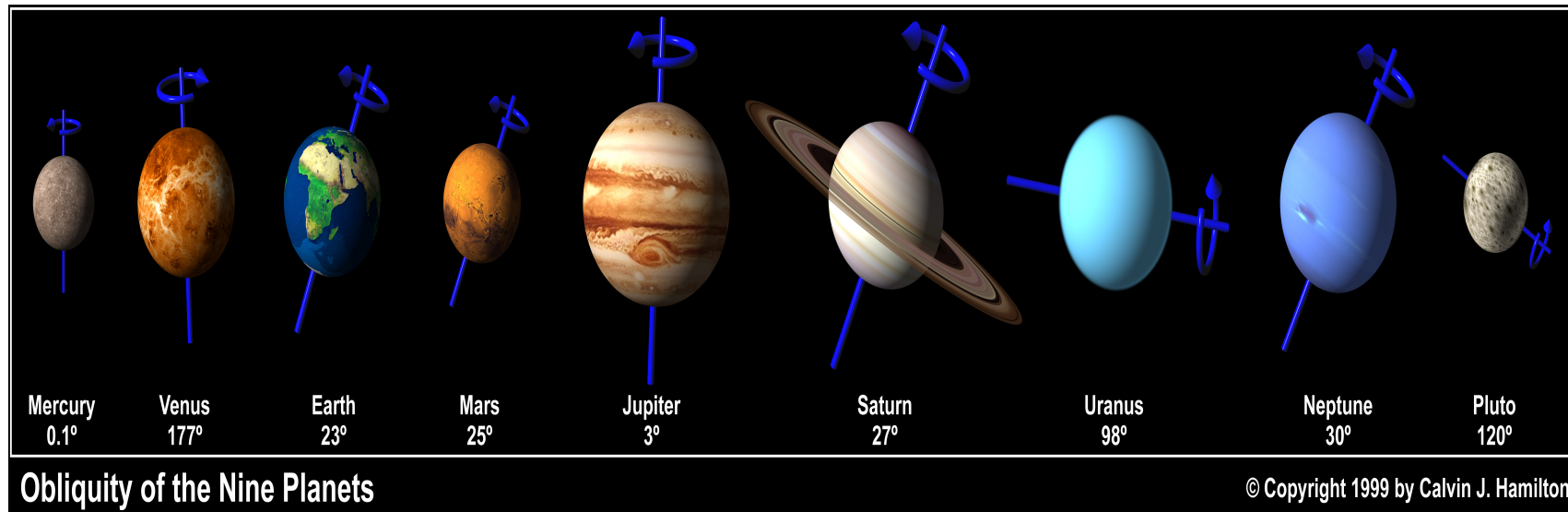


# Los planetas y el plano de la eclíptica





## La oblicuidad de los planetas



- Nota: Al ser una figura antigua Plutón aún está incluido como planeta (ver más adelante).

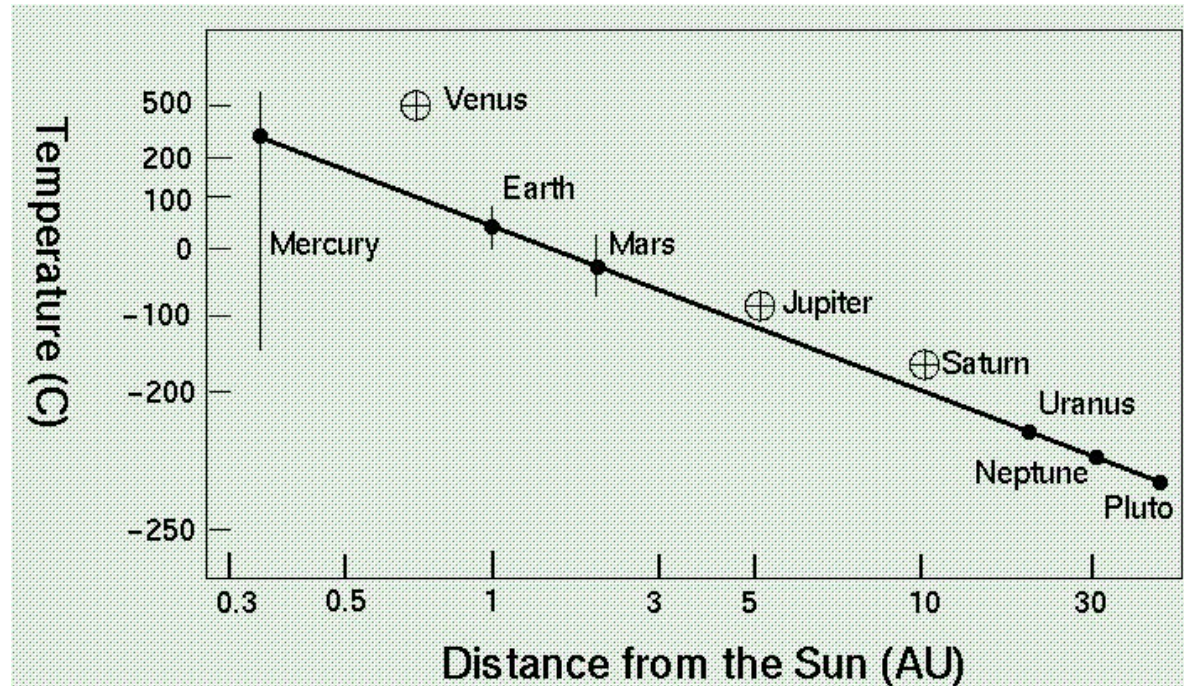


## Unidades de distancia

- Unidad Astronómica (AU):  $1 \text{ AU} = \text{Distancia media Tierra-Sol} = \text{aprox. } 149.600.000 \text{ km}$
- 1 segundo luz = distancia recorrida por la luz en 1s = aprox. 299.800 km
- 1 año luz = aprox. 9.461.000.000.000 km = aprox. 63.000 AU
- La estrella más cercana (Proxima Centauri) se encuentra a 4.2 años-luz (se tardaría 76.000 años en llegar con nuestros cohetes más potentes).
- Otra unidad: pársec = 3.261630751 años-luz.



## Temperaturas en el sistema solar



- En general la temperatura de los planetas es inversamente proporcional a la distancia al Sol.
- La única excepción es Venus, cuya densa atmósfera de CO<sub>2</sub> eleva mucho su temperatura por efecto invernadero.



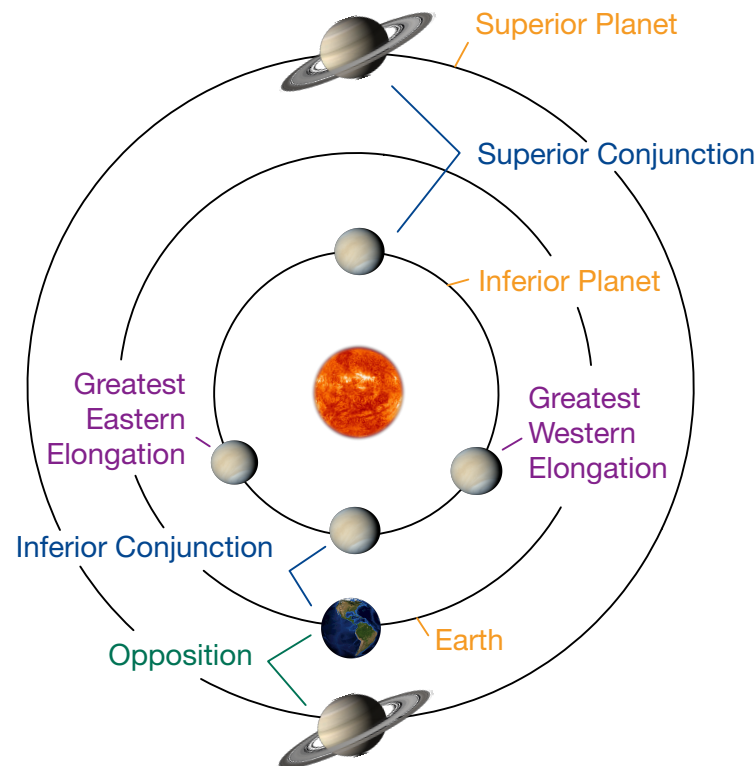
## Nomenclatura y eventos celestes

- Mercurio y Venus se denominan Planetas Inferiores porque sus órbitas están más cercanas al Sol que la Tierra. Por tanto siempre aparecen cerca del sol, al amanecer o al atardecer. Experimentan “fases” similares a las de la Luna.
- Marte, Júpiter, Saturno, Urano, Neptuno se denominan Planetas Superiores. Puesto que sus órbitas son más lejanas del Sol que la de la Tierra, apenas se visualizan “fases”.
- Eventos celestes (desde la Tierra):
  - Cuando dos cuerpos parecen alinearse en el cielo, se dice que se produce una conjunción.
  - Una conjunción con el Sol puede ser inferior (si un planeta se alinea entre el Sol y la Tierra), también llamada tránsito, o superior (si el Sol se alinea entre la Tierra y un planeta), también llamado ocultación.
  - Si la Tierra se alinea entre un planeta y el sol, se produce una oposición.



## Nomenclatura y eventos celestes

- Cuando un objeto celeste se encuentra en oposición es el mejor momento para observarlo (fase “llena”).
- Los eventos celestes son significativos para los vehículos espaciales (oportunidades científicas, problemas de comunicación y de potencia...).



## Planetas terrestres

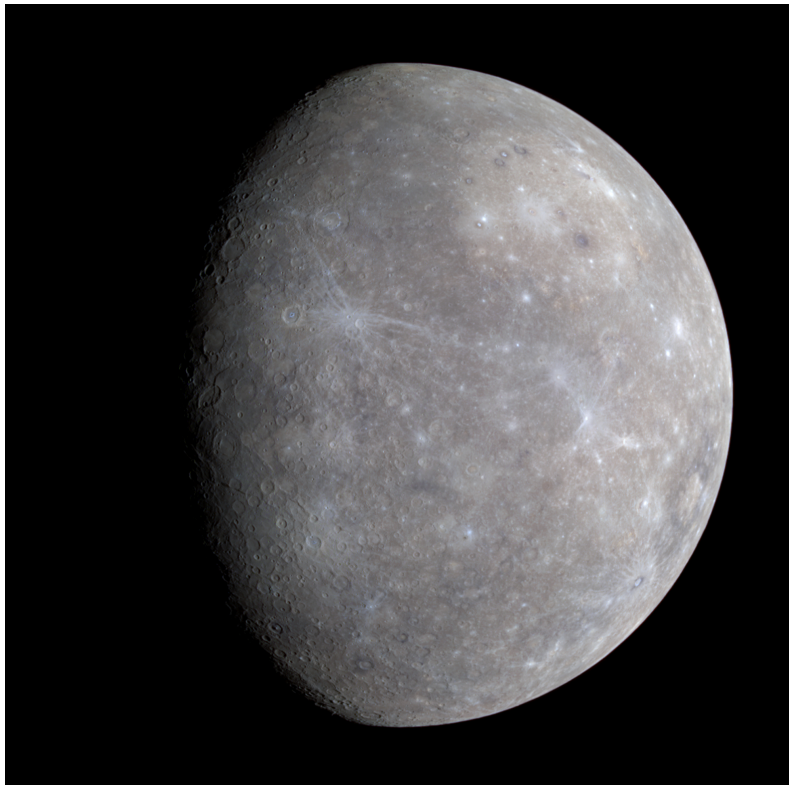
	Mercury	Venus	Earth	Mars
Mean distance from sun (AU)	0.387	0.723	1	1.524
Light minutes from sun	3.2	6.0	8.3	12.7
Mass (x Earth)	0.0553	0.815	1	0.107
Equatorial radius (x Earth)	0.383	0.949	1	0.533
Rotation period (Earth days)	175.942	- 116.75 (retrograde)	1	1.027
Orbit period (Earth years)	0.241	0.615	1	1.881
Mean orbital velocity (km/s)	47.87	35.02	29.78	24.13
Natural satellites	0	0	1	2
Surface atmospheric pressure (bars)	Near 0	92	1	.0069 to .009
Global Magnetic field	Faint	None	Yes	None



- Planetas de tipo terrestres (rocosos): Mercurio, Venus, la Tierra y Marte. De ellos, sólo la Tierra posee campo magnético significativo y cinturones de radiación.
- Todos son observables a simple vista, por lo que su existencia es conocida desde la Antigüedad.



# Mercurio

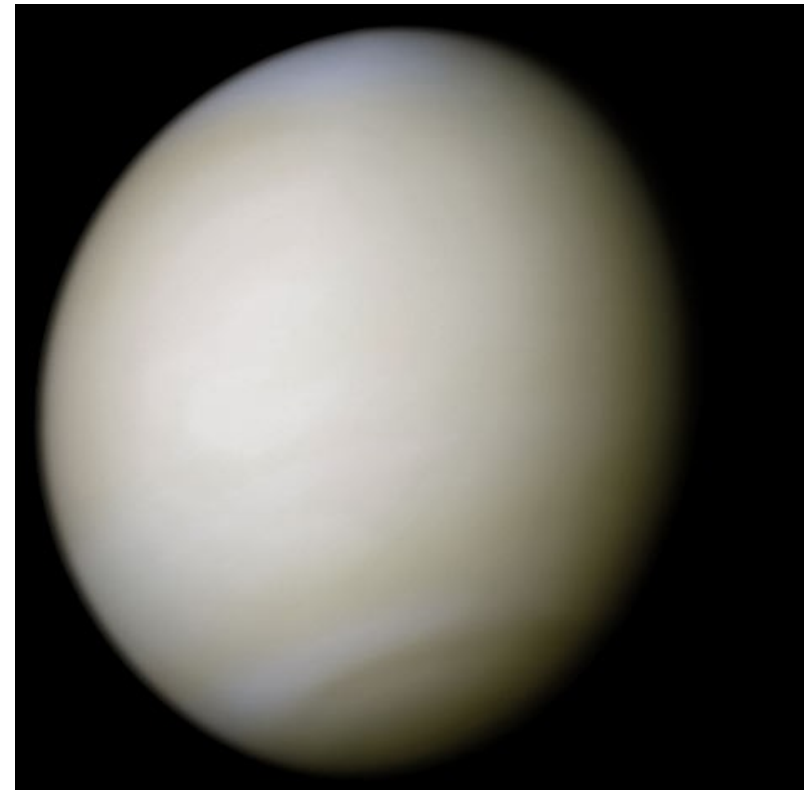


- No posee atmósfera.
- Es el planeta más pequeño.
- Existen grandes diferencias de temperatura entre el día y la noche (90–700 K).
- Posibilidad de hielo (en el fondo de cráteres cerca de los polos).
- Visitado por el Mariner 10 (1974) y el Messenger (2008).
- Sólo observable en el crepúsculo o amanecer.
- Tiene un débil campo magnético (1 % del terrestre).



# Venus

- Posee una densa atmósfera de  $\text{CO}_2$  que impide ver la superficie. Vida en la atmósfera?
- Rota de forma retrógrada (se cree que por un impacto).
- Ha sido visitado, inicialmente por las misiones Venera (URSS) y luego por la NASA y la ESA (en órbita).
- Es el objeto más brillante en el cielo tras el Sol, la Luna y la ISS; se puede observar poco antes del amanecer y poco después del anochecer.
- La sonda Magallanes permitió crear un mapa de su superficie.





# Marte



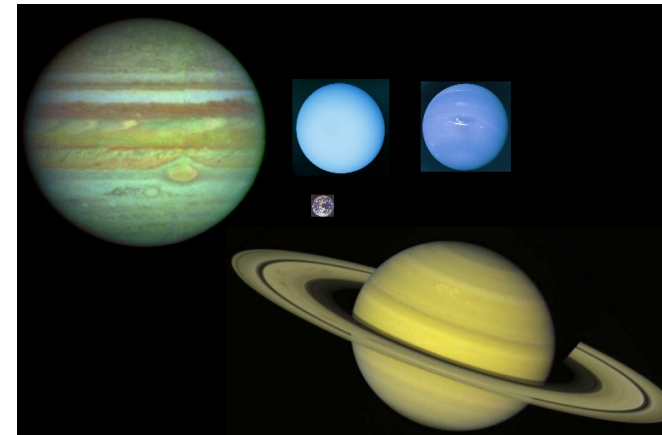
- Atmósfera tenue de CO<sub>2</sub>.
- Contiene hielo en los polos.
- Evidencia de canales de agua en su pasado remoto.
- Posee dos lunas, Deimos y Fobos.
- Ha sido el más explorado tras la Tierra y la Luna.
- La NASA planea una misión tripulada (2020).
- ¿Posibilidad de vida?



# Planetas jovianos

Jovian Planetary Data (Approximate)

	Jupiter	Saturn	Uranus	Neptune
Mean distance from sun (AU)	5.20 AU	9.58 AU	19.20 AU	30.05 AU
Light hours from sun	0.72	1.3	2.7	4.2
Mass (x Earth)	317.8	95.2	14.5	17.1
Radius (x Earth)	11.21	9.45	4.01	3.88
Rotation period (hours)	9.9	10.7	17.2	16.1
Orbit period (Earth years)	11.9	29.4	83.7	163.7
Mean orbital velocity (km/s)	13.07	9.69	6.81	5.43
Known natural satellites (as of January 2007)	63	56	27	13
Rings	Dust	Extensive system	Thin, dark	Broken ring arcs



- Planetas de tipo joviano: Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno.
- Joviano = tipo Júpiter, es decir, gigantes gaseosos (hidrógeno, helio) con (posiblemente) un núcleo sólido.
- Todos poseen campos magnéticos significativos, anillos y multitud de satélites.



# Júpiter

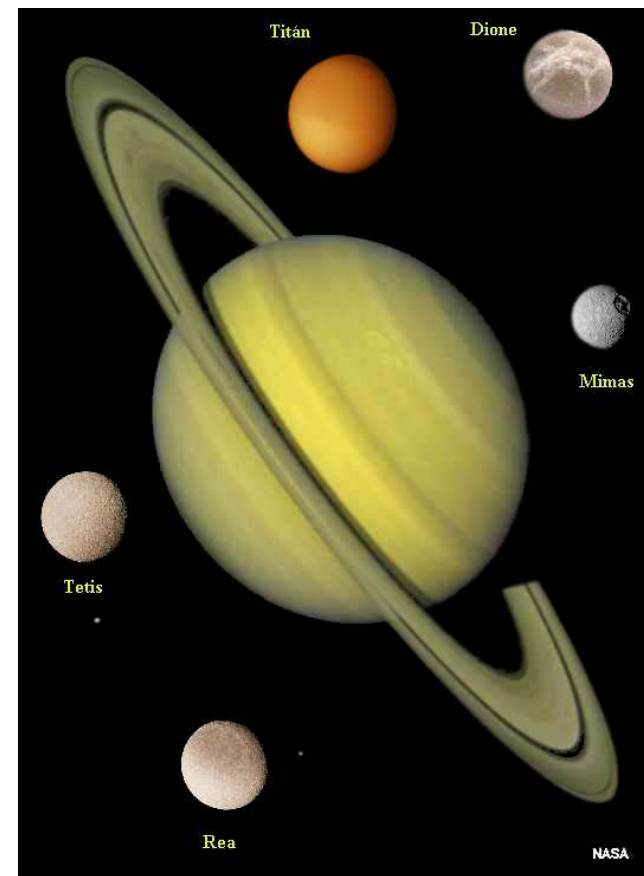


- Tan masivo como el resto de planetas combinados.
- Muy fuerte campo magnético.
- Cinturones de intensa radiación.
- La Galileo orbitó Júpiter.
- Algunas lunas: Io (volcánico), Europa (cubierto de hielo), Ganímedes (luna más grande del sistema solar), Calisto (rotación síncrona como la luna terrestre).
- Frecuentemente visitado en misiones que realizan maniobras asistidas por gravedad (sobrevuelos).

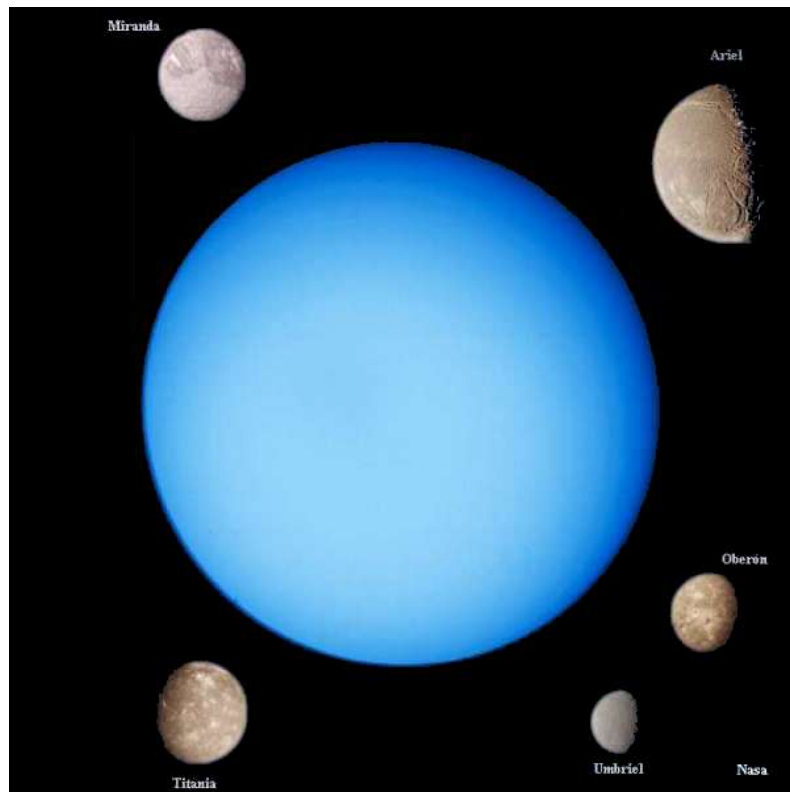


# Saturno

- Planeta más lejano visible al ojo desnudo.
- Sistema complejo de anillos (interesante para la investigación en dinámica orbital).
- Los anillos se extienden de 6 630 km hasta 120 700 km sobre el ecuador de Saturno, con 20 metros de grosor. Su composición es 93 % hielo y 7 % carbono.
- Lunas muy interesantes (Titán-más grande que la Luna y con atmósfera propia, Japeto-helado...).
- La Cassini orbita Saturno.

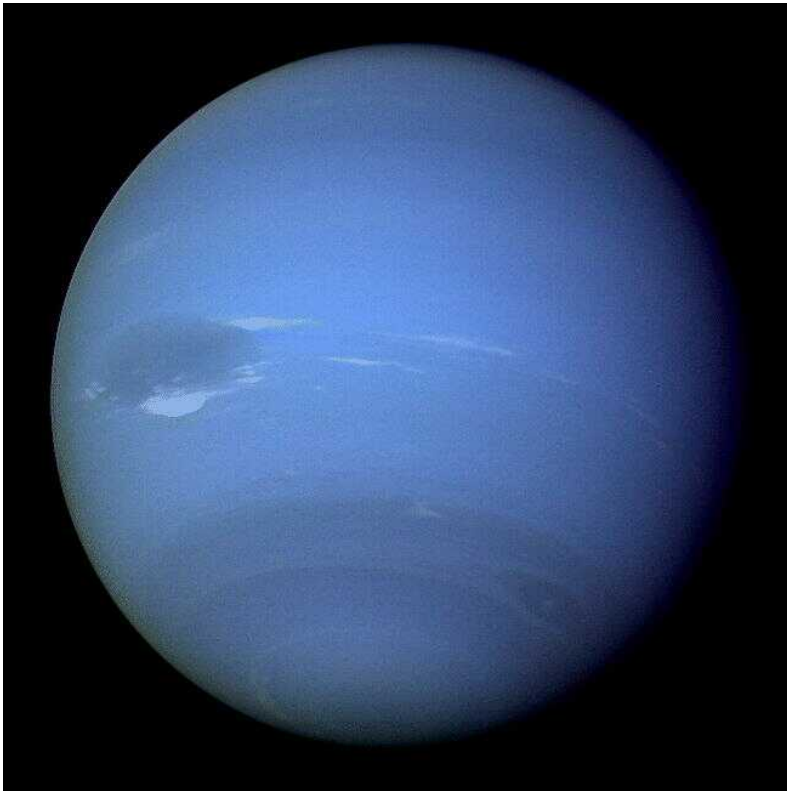


# Urano



- Descubierta en 1781 por Sir William Herschel, que lo nombró “Georgium Sidus” en honor del rey Jorge III de Inglaterra.
- Sólo visitado por la Voyager 2.
- Posee la atmósfera planetaria más fría del sistema solar, con una temperatura mínima de 49 K (-224 °C).
- Su interior se compone de roca e hielo.
- Su eje de rotación está inclinado 97.77 grados respecto a la eclíptica.
- Su “año” dura 84 años terrestres; cada polo recibe 42 años de “día eterno” y 42 años de “noche eterna”.

# Neptuno



- Fue descubierto el 23/9/1846, mediante predicción matemática, simultáneamente por el francés Le Verrier y el británico Adams.
- La base de su descubrimiento fue la perturbación gravitatoria que ejerce sobre Urano.
- Sólo visitado por la Voyager 2.
- Como Urano, está compuesto de roca e hielo bajo la capa de gases.
- Tiene los vientos más fuertes del sistema solar (hasta 2100 km/h).



## La definición de planeta

### El texto de la Unión Astronómica Internacional

La UAI [...] resuelve que los planetas y otros cuerpos del Sistema Solar se definan en tres categorías distintas de la siguiente manera:

- 1** Un planeta es un cuerpo celeste que (a) está en órbita alrededor del Sol, (b) tiene suficiente masa para que su propia gravedad supere las fuerzas de cuerpo rígido de manera que adquiera un equilibrio hidrostático (forma prácticamente redonda), (c) ha limpiado la vecindad de su órbita
- 2** Un planeta enano es un cuerpo celeste que (a) está en órbita alrededor del Sol, (b) tiene suficiente masa para que su propia gravedad supere las fuerzas de cuerpo rígido de manera que adquiera un equilibrio hidrostático (forma casi redonda) , (c) no ha limpiado la vecindad de su órbita y (d) no es un satélite.
- 3** Todos los otros objetos que orbitan al Sol se deben denominar colectivamente “Cuerpos Pequeños del Sistema Solar”.



## El planeta enano Plutón

- Fue descubierto en 1930 y considerado como el noveno planeta hasta 2006.
- Es muy excéntrico (0.25) por lo que en ocasiones está más cerca que Neptuno del Sol.
- Su órbita está muy inclinada respecto a la eclíptica ( $17^\circ$ ).
- Posee dos lunas, una de ellas, Caronte, tiene la mitad de radio que Plutón, por lo que a veces se habla del sistema Plutón-Caronte.
- Visitado por la misión New Horizons en 2015.

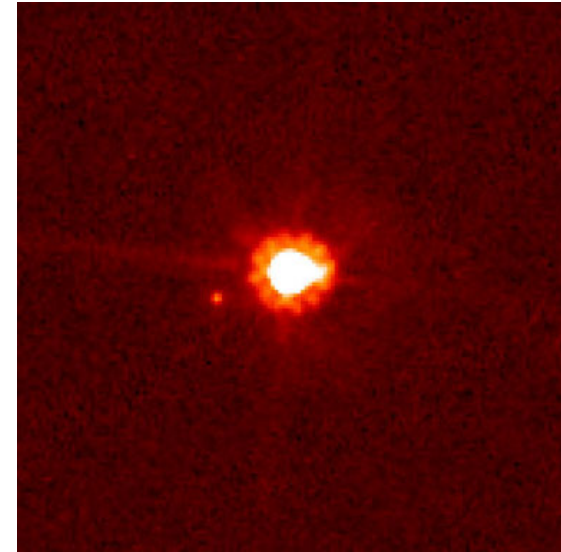




## Otros planetas enanos

- Ceres: el objeto más masivo del cinturón de asteroides.
- La misión Dawn lo ha visitado en 2015.
- Podría tener una atmósfera tenue; tiene agua.

Comparación Tierra/Luna/Ceres:



- Eris (identificado en 2005) es un 27 % más masivo que Plutón.
- Al principio fue considerado el “décimo planeta”, y motivó el debate de la UAI
- Su periodo es 557 años, su excentricidad 0.44, su inclinación  $44,1^\circ$  y tiene 67.7 UA de distancia media al Sol.



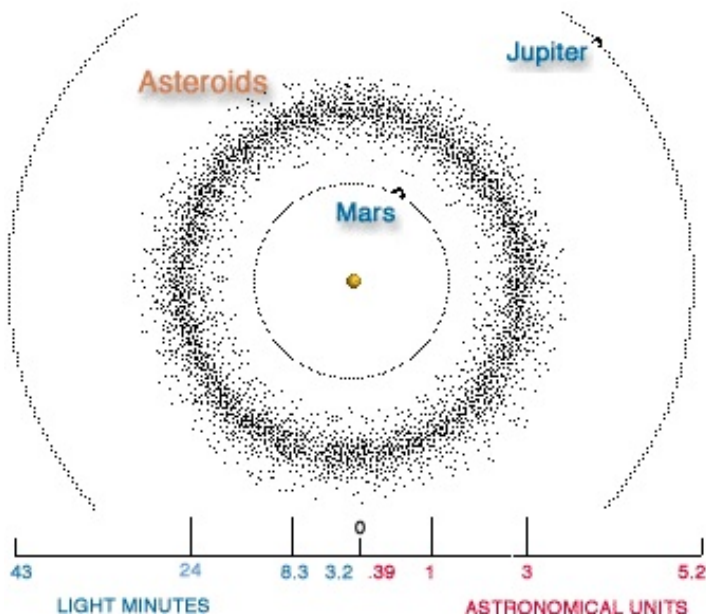
# Principales lunas del Sistema Solar



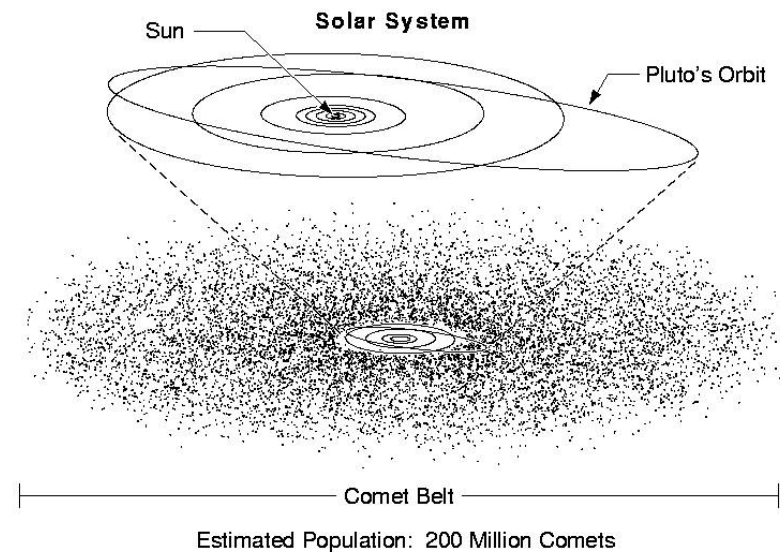
## Otros cuerpos pequeños del Sistema Solar

Cinturón principal de asteroides:

- Entre Marte y Júpiter, poco explorado.
- Multitud de objetos, desde Ceres (1000 km de diámetro) hasta pequeñas piedras.
- Algunos son Fe y Ni puros.



Location of the Kuiper Belt of Comets



### Cometas:

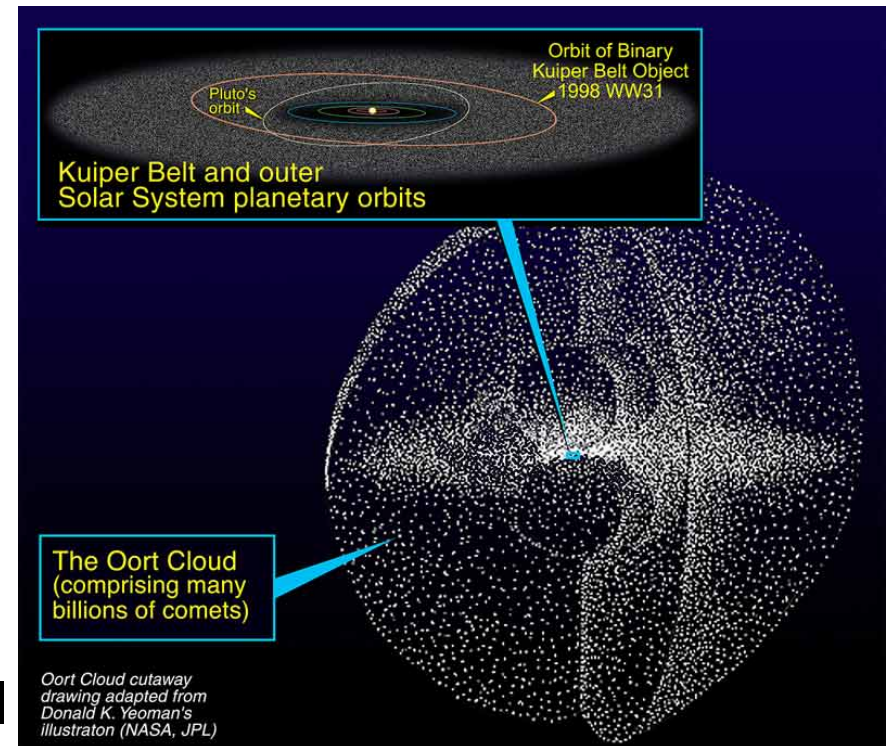
- Objetos formados de roca, polvo, hielo.
- Órbitas altamente elípticas (casi parabólicas), provienen de la nube de Oort o el cinturón de Kuiper donde sus órbitas son perturbadas y capturadas por el Sistema Solar.



## Otros cuerpos pequeños del Sistema Solar



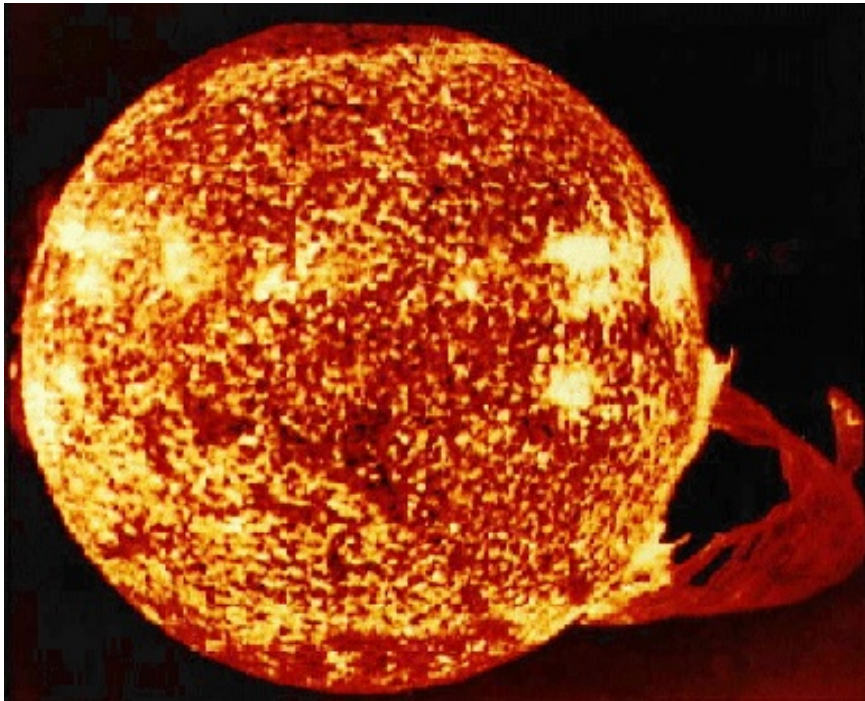
- **Meteoroides:** son pequeñas partículas sólidas orbitando el sol.
- La trayectoria visible de un meteoroide al penetrar la atmósfera de la Tierra se denomina **meteoros** (coloquialmente, estrella fugaz). Típicamente se volatilizan.
- Si alguna fracción sobrevive y cae en la superficie se denomina **meteorito**.



La nube de Oort



# El Sol

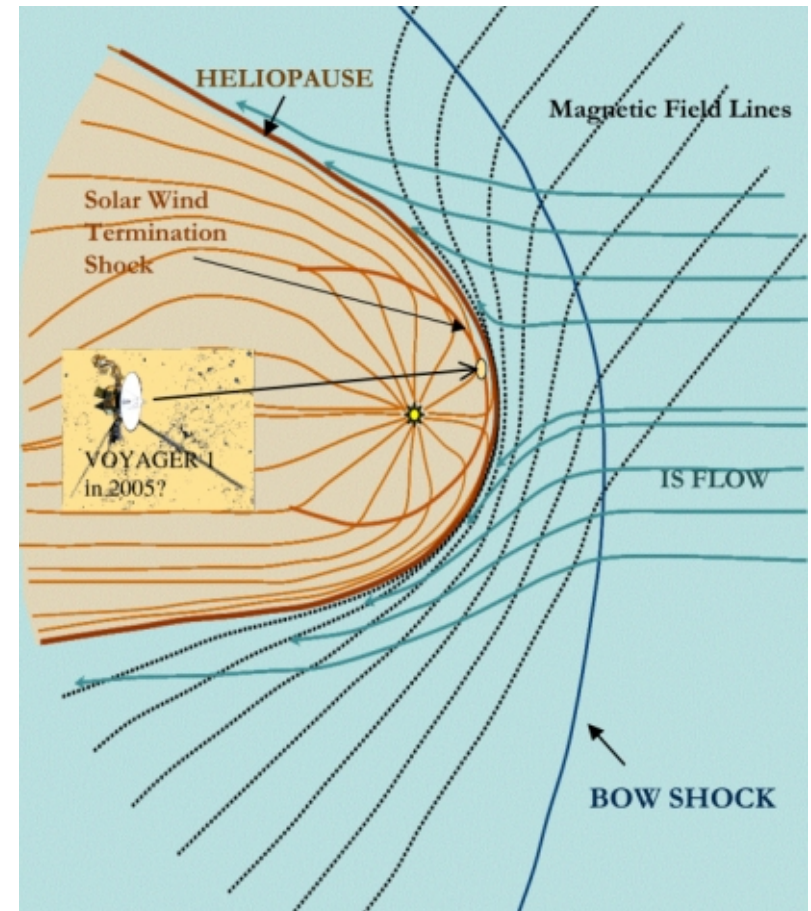


- El Sol es una estrella de tipo G2 V. Es la “fuente de energía” principal en el Sistema Solar (un inmenso reactor de fusión).
- Su peso es aproximadamente  $2 \cdot 10^{30}$  kg., o 333.000 veces la masa de la Tierra, lo que equivale al 99 % de la masa del Sistema Solar.
- Rotación con un periodo de 25.4 días sobre un eje girado 7.25 grados respecto a la eclíptica terrestre.
- Su composición es sobre todo H y He.
- Su temperatura es de 5778 K en la fotosfera y de 15.7 millones de K en el núcleo.



# El Sol

- Posee un intenso campo magnético.
- Las manchas solares (en la fotosfera) ocurren en líneas del campo magnético de muy alta intensidad (ciclos de 11 años).
- El sol expulsa material ocasionalmente, causando fluctuaciones en el campo magnético de los planetas.
- El viento solar fluye continuamente en todas direcciones. El límite de influencia del viento solar define la heliosfera, una burbuja en el seno del medio interestelar.



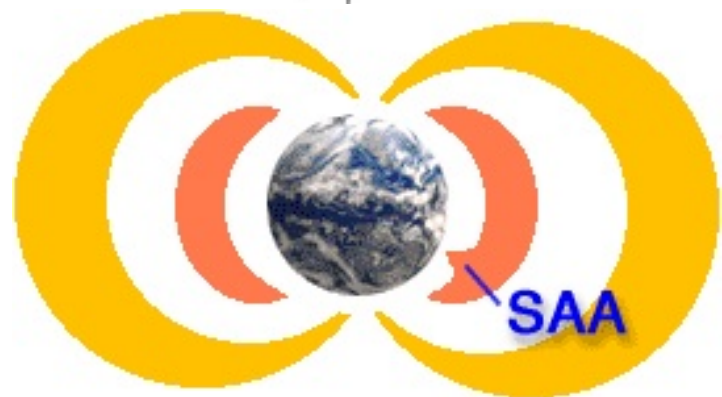
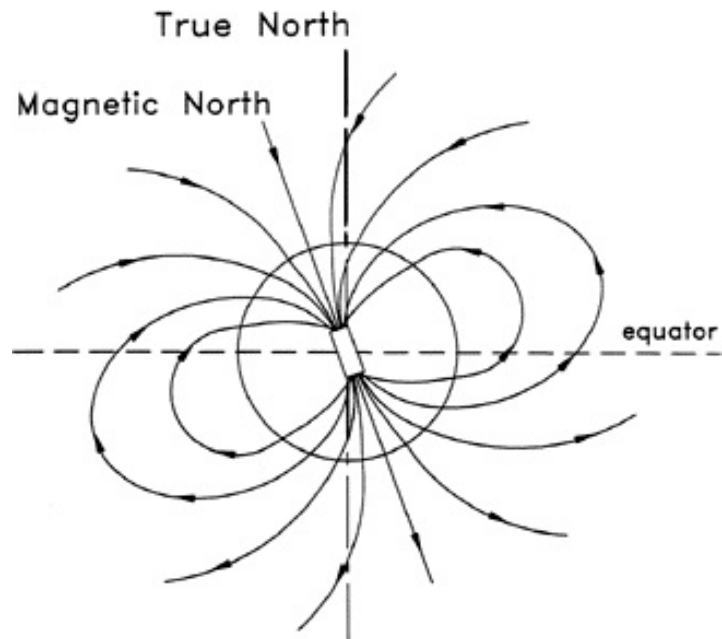
## La Tierra: Datos básicos



- La Tierra se mueve alrededor del sol con un periodo de 365.256 días.
  - Su masa es de  $5,9736 \times 10^{24}$  kg.
  - El radio terrestre(medio) es de 6378.14 km.
  - Periodo de rotación= 23.9345 horas.
  - Perihelio=  $147,09 \times 10^6$  km. Afelio=  $152,10 \times 10^6$  km.
  - Su velocidad orbital media es de 29.78 km/s.
  - Inclinação del eje de rotación respecto a la eclíptica: 23.45 grados.
- Su forma real es la de un esferoide achatado en los polos.



## El campo magnético terrestre



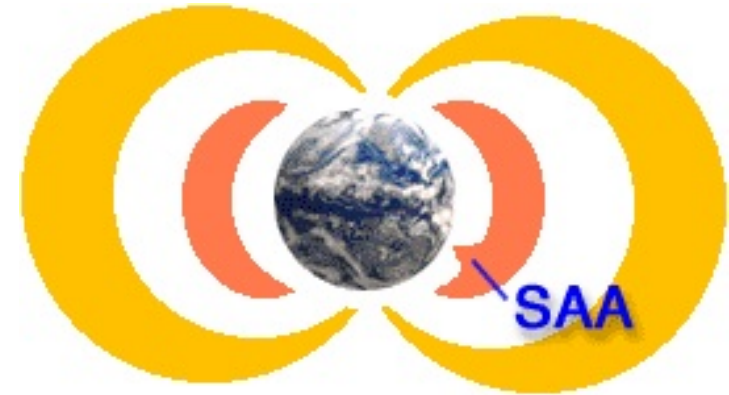
- La Tierra posee un intenso campo magnético, se cree que debido a la rotación del núcleo terrestre.
- Los polos magnéticos no coinciden con los polos geográficos.
- Dicho campo magnético interacciona con las partículas cargadas (plasma) procedentes del Sol (viento solar) de acuerdo a las leyes de la magnetohidrodinámica.
- El resultado final es que las partículas quedan atrapadas en unos volúmenes toroidales, llamados cinturones de Van Allen.



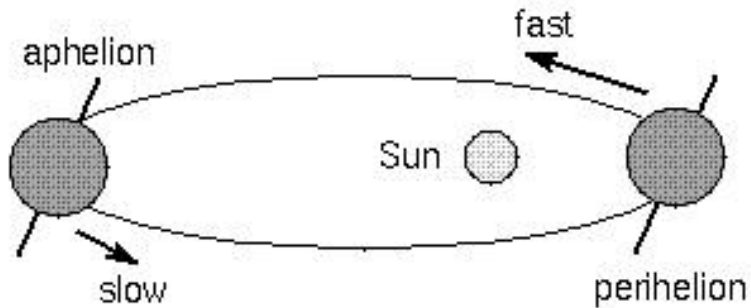


## Los cinturones de Van Allen

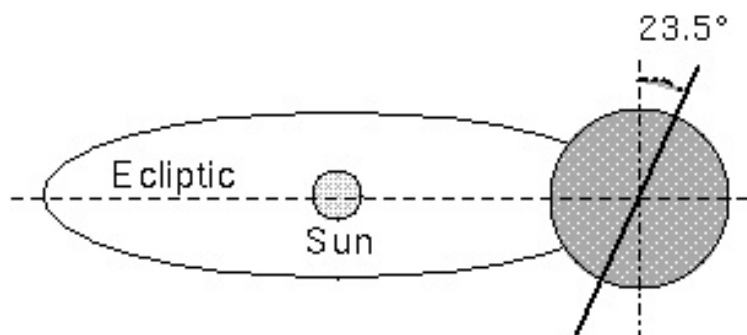
- Los cinturones son muy importantes, ya que son zonas de intensa radiación.
- Cualquier vehículo que los atraviese puede verse afectado.
- Localización espacial:
  - Existe un cinturón interno, entre unos 1000 a 6500 km de altitud, y un cinturón externo, entre 10000 y 65000 km (maxima intensidad por debajo de 19000 km).
  - La zona de máxima intensidad es en torno al plano del Ecuador.
  - Las fronteras de los cinturones son difusas y variables.
  - Una región del cinturón interior, conocida como la anomalía del Atlántico Sur (SAA) se extiende a órbitas bajas y es peligrosa.



## La órbita de la Tierra



Earth's orbital speed depends on its distance from the Sun. The change in the orbital speed produces variations in the length of the solar day. (Orbit shape is greatly exaggerated here.)

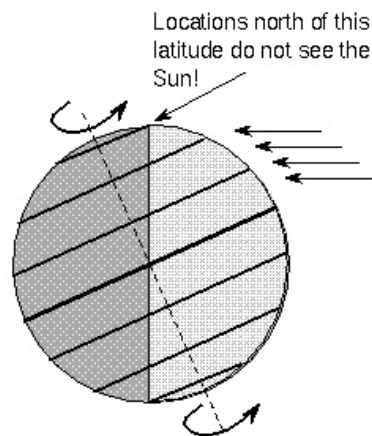
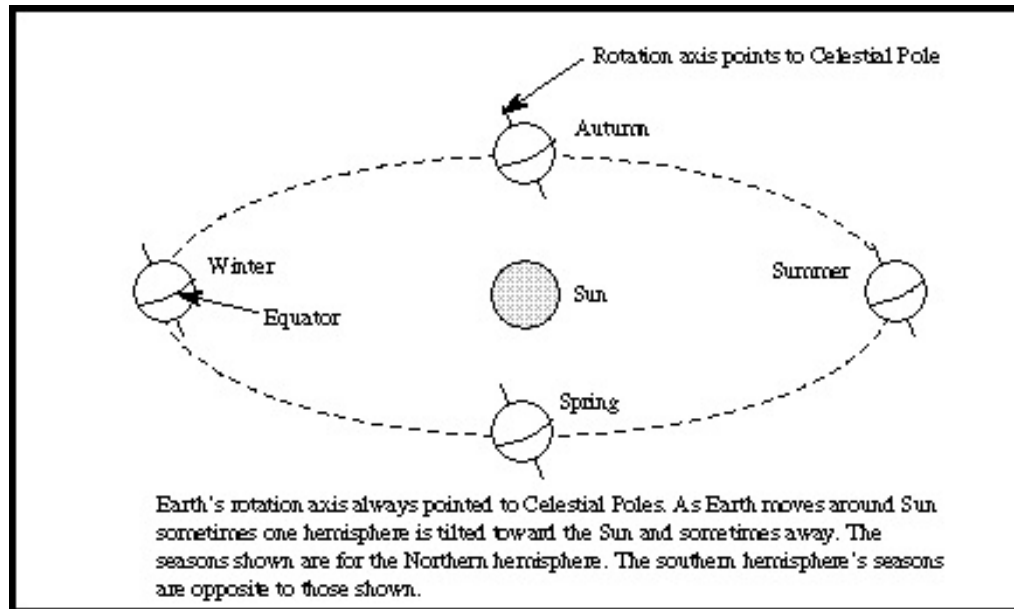


Earth's rotation axis is tilted by  $23.5^\circ$  with respect to the ecliptic (its orbital plane).

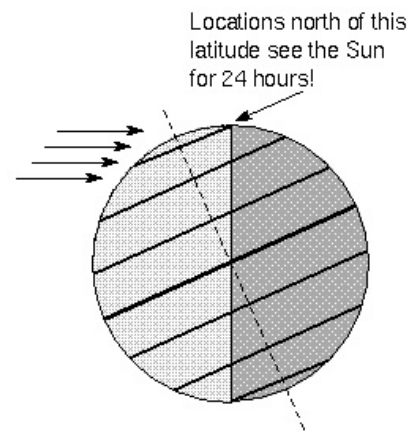
- La órbita de la Tierra es elíptica con una cierta excentricidad (0.0167), por lo que el punto de máxima distancia del Sol (afelio) y de mínima distancia (perihelio) no coinciden. El afelio se produce en el verano del hemisferio norte.
- Ello también provoca que la velocidad de traslación de la Tierra no sea uniforme.
- La velocidad es máxima en el perihelio y mínima en el afelio (la diferencia es pequeña).
- Además, el eje de rotación está inclinado respecto a la eclíptica  $23,45^\circ$ .
- Estos efectos causan la diferente duración del día según la latitud y día del año.



# Las estaciones



**Winter:** Sun's energy is more spread out and Sun is above horizon for less time.

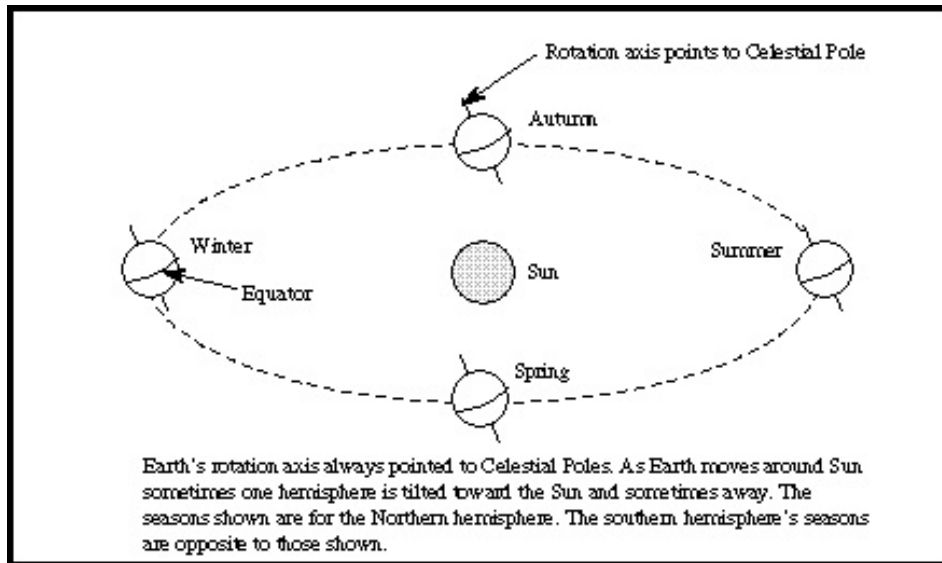


**Summer:** Sun's energy is concentrated and Sun is above horizon for more time.

- La inclinación del eje de rotación respecto a la eclíptica provoca las estaciones.
- Los rayos de Sol llegan más “perpendiculares” según la orientación del eje, que cambia con periodo 1 año.



## Solsticios y equinoccios



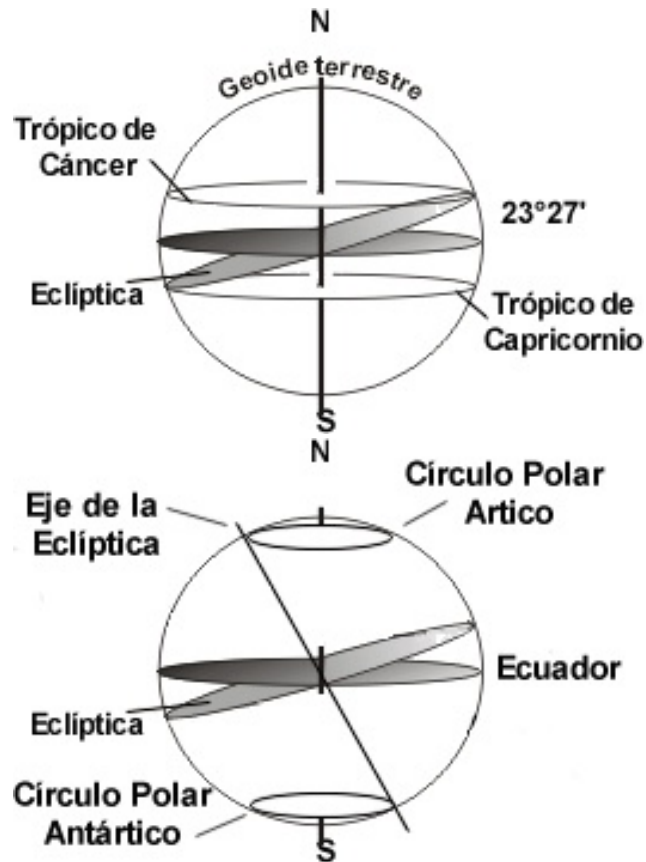
- Los solsticios y equinoccios son instantes de tiempo que marcan aproximadamente el principio y fin de las estaciones.
- Los equinoccios vienen definidos porque el Sol está en la intersección entre el Ecuador y la Eclíptica.

- Los solsticios se definen porque el Sol se encuentra lo más separado posible de dicha línea de intersección.
- Se producen en una fecha y hora que cambia con el año. Al final del tema hay datos para los años 2000-2020.  
(<http://aa.usno.navy.mil/data/docs/EarthSeasons.php>)
- Observación: las estaciones están cambiadas en el hemisferio sur. P.ej. el solsticio de “verano” se produce en invierno del hemisferio sur.



## Círculos notables

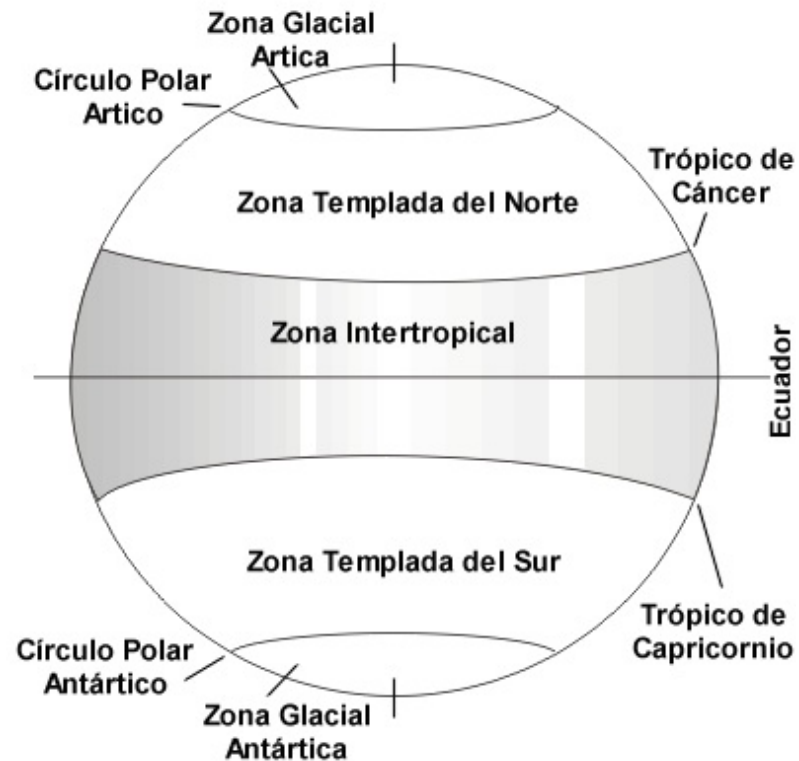
Se definen las siguientes líneas imaginarias:



- Trópico de Cáncer: el paralelo de máxima latitud donde el Sol puede cruzar el cenit (es decir, la vertical) al mediodía.
- Trópico de Capricornio: el paralelo de mínima latitud donde el Sol puede cruzar el cenit al mediodía.
- Círculo Polar Ártico: el paralelo de menor latitud en el hemisferio Norte donde el Sol puede permanecer 24 horas consecutivas encima o debajo del horizonte.
- Círculo Polar Antártico: el paralelo de mayor latitud en el hemisferio Sur donde el Sol puede permanecer 24 horas consecutivas encima o debajo del horizonte.



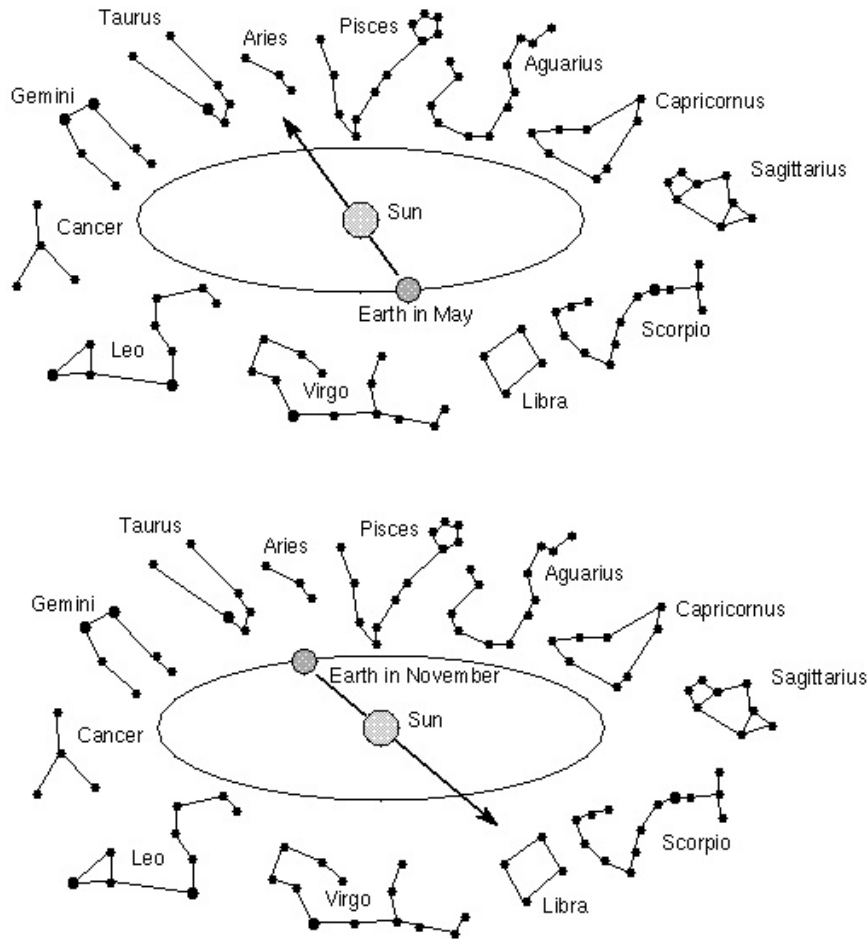
## Zonas de la Tierra



- Los trópicos y círculos polares permiten dividir la Tierra en áreas: intertropicales, templadas y glaciales.
- Dichas áreas difieren enormemente en clima e iluminación de las otras áreas.



# El zodiaco

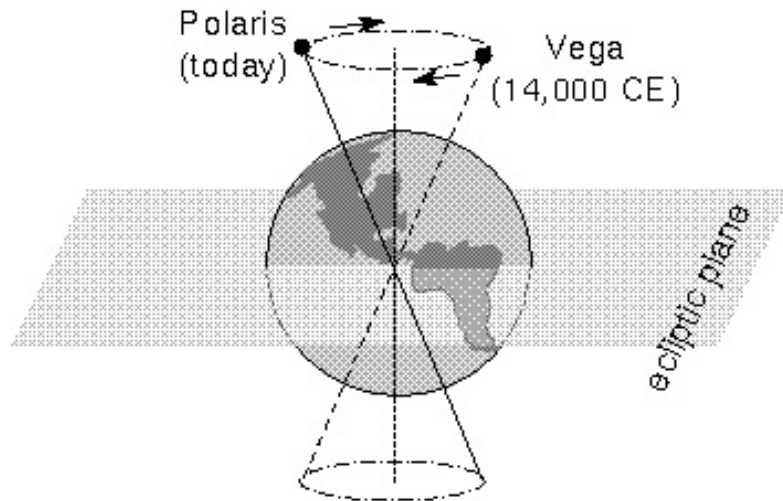


As the Earth moves around the Sun, the Sun **appears** to drift among the zodiac constellations along the path called the **ecliptic**. The ecliptic is the projection of the Earth's orbit onto the sky.

- Si se traza una flecha imaginaria desde la Tierra en dirección al Sol y se prolonga hacia las estrellas, la punta de la flecha se encontrará en una determinada constelación.
- Los astrólogos se basan en este concepto para determinar el horóscopo.
- Se esperaría que la misma fecha de cada año, la constelación a la que fuera la fecha fuese exactamente la misma; no obstante esto no es cierto.



## La precesión del eje de la Tierra



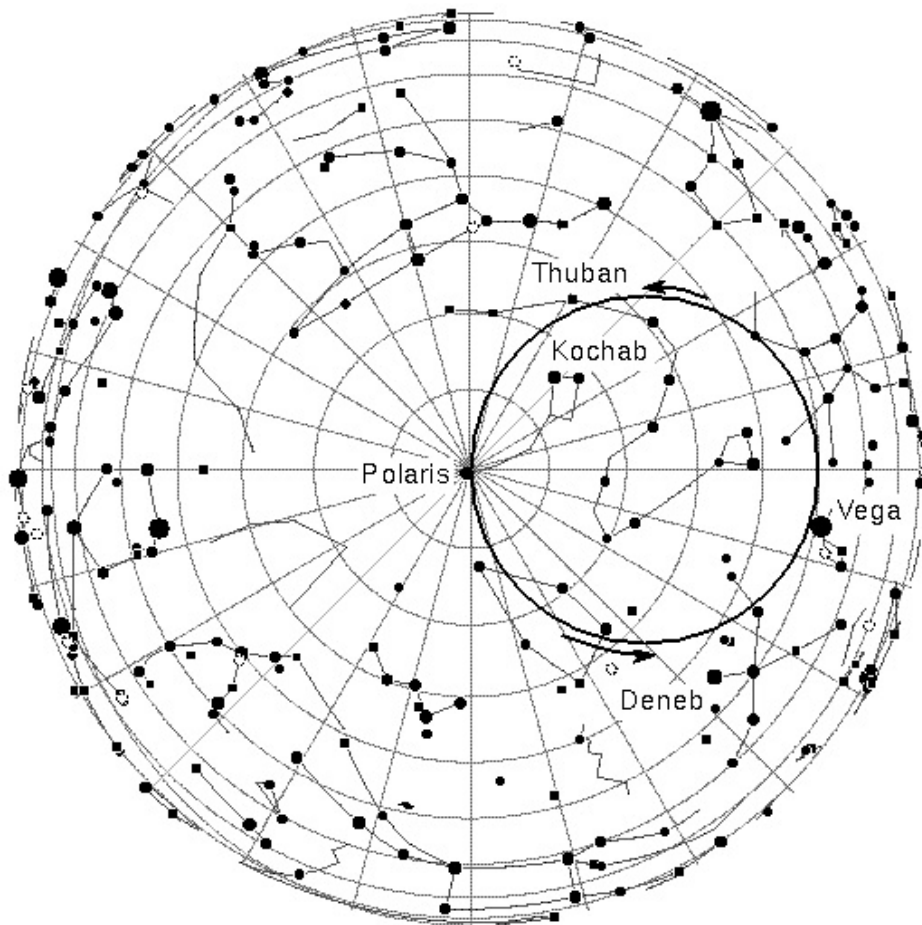
The Earth's rotation axis precesses (wobbles) with a period of 26,000 years.

- Debido al mismo efecto por el que el eje de giro de una peonza rota en torno a la vertical (precesión), el eje de rotación de la Tierra tiene una posición variable respecto a la eclíptica y las estrellas.
- La variación es enormemente pequeña, del orden de 50" al año y en el sentido de las agujas del reloj.
- Este efecto, conocido como la precesión de los equinoccios, fue descubierto por Hiparco en torno al año 130 antes de Cristo.
- El nombre se debe a que el Equinoccio vernal (Primavera), un punto de referencia que se suponía fijo en el espacio, se desplaza debido a este efecto.





## La precesión del eje de la Tierra

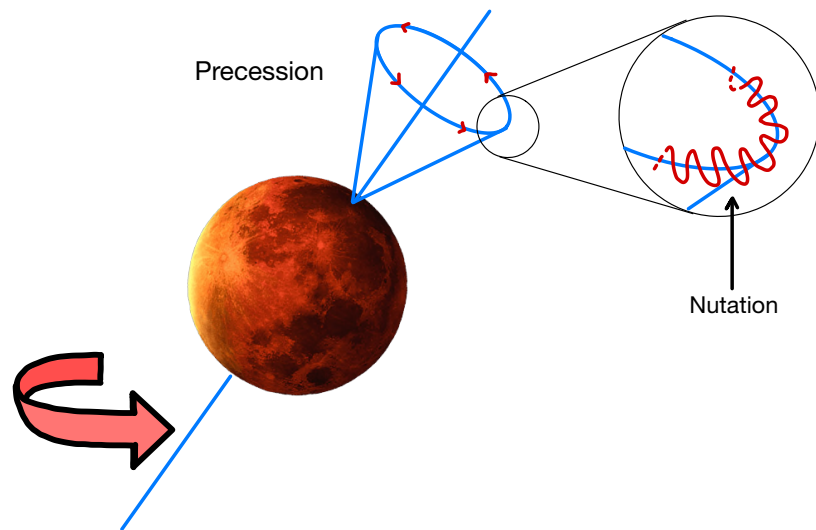


The path of the precession of the Earth's rotation axis.  
It takes 26,000 years to complete a full 360° wobble.

- El fenómeno de precesión de los equinoccios tiene un periodo de aproximadamente 26000 años.
- La precesión provoca que el eje de rotación de la Tierra (el Norte geográfico) cambie lentamente de dirección.
- En nuestra era, el eje apunta aproximadamente a la estrella Polar, lo que ayudó mucho a los navegantes de tiempos antiguos.



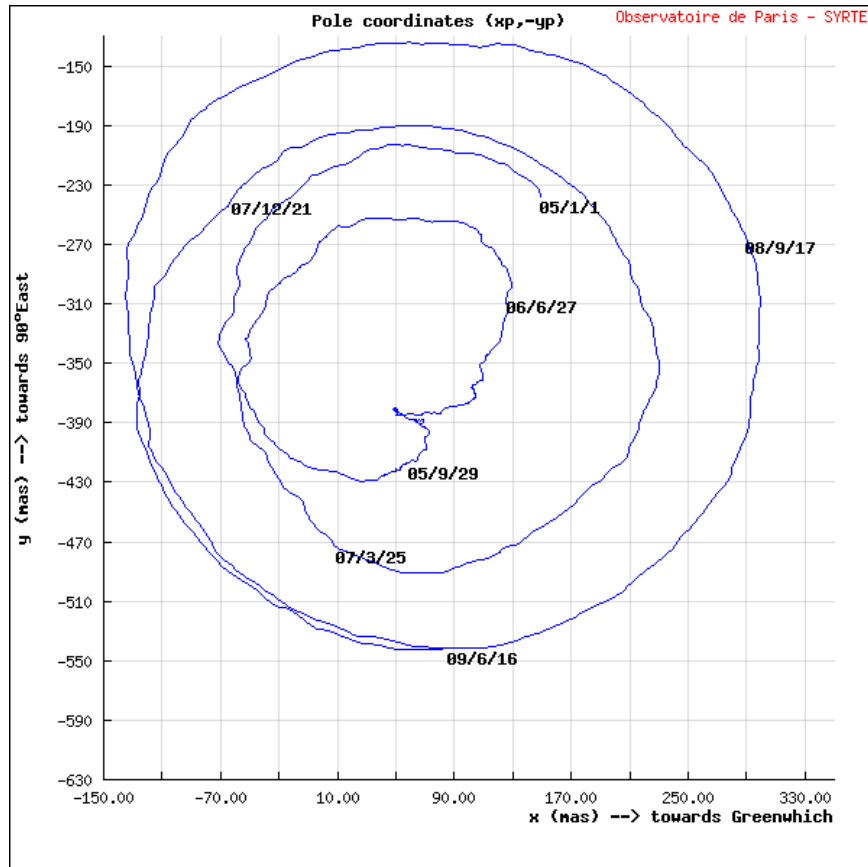
## Precesión y nutación



- El efecto de la precesión se debe a la fuerza gravitatoria solar, la inclinación de la eclíptica y la forma no perfectamente esférica de la Tierra.
- La fuerza gravitatoria de la Luna también produce un movimiento del eje de rotación, de menor magnitud, que se manifiesta como una nutación, de periodo 18.6 años. Afecta levemente la inclinación de la eclíptica.
- Los efectos de precesión y nutación son muy importantes si se quiere gran precisión en cálculos astronómicos y astronáuticos.
- Una de las consecuencias de estos efectos es que el plano del Ecuador no permanece completamente fijo en el espacio; por ello se define un “Ecuador medio”.



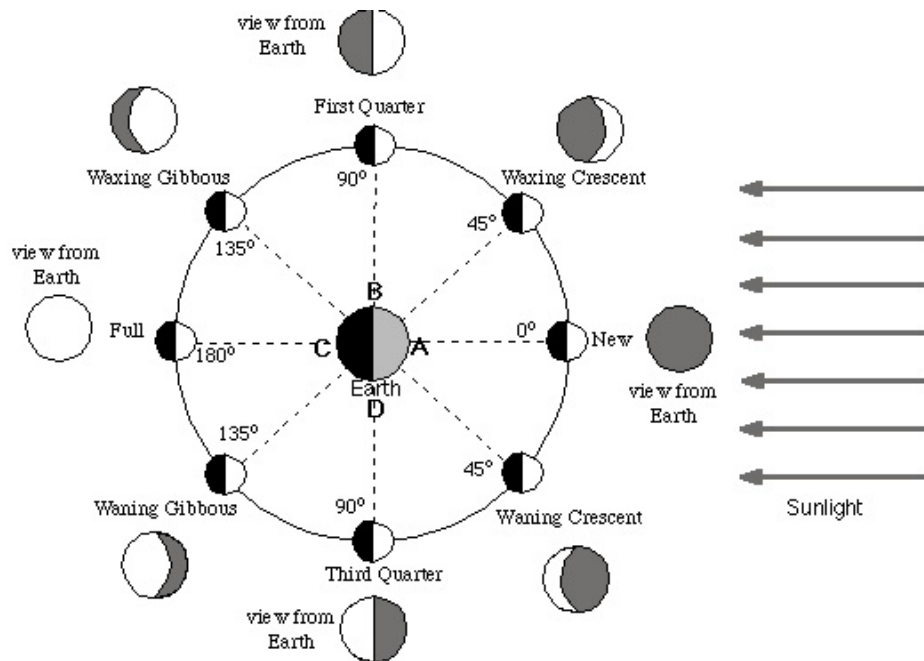
## Movimiento polar



- Otro efecto importante, a tener en cuenta en las aplicaciones de alta precisión, es el desplazamiento de los polos (“polar wander”).
- Este desplazamiento, ilustrado en la figura entre 2005 y 2009, es sólo de unos pocos metros (mas=milisegundos de arco).
- Se mide por convención con respecto al polo norte medio de 1900, llamado CIO (Conventional International Origin).
- Sus causas fundamentales son movimientos en el manto y la corteza de la Tierra y redistribución de las masas de agua de la superficie.



# La Luna



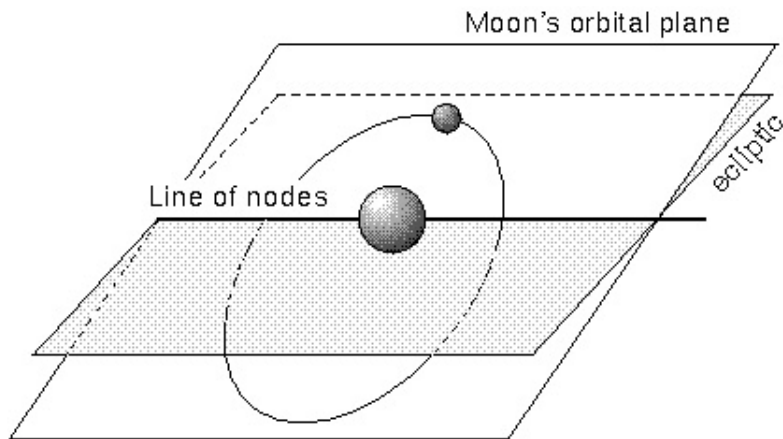
The Sun-Moon angle is the angle defined by Sun->Earth->Moon with Earth (where *square*) as the angle vertex. As the Sun-Moon angle increases we see more of the sunlit part of the Moon. Note that if this drawing were to scale, then the Moon would be half this size and its orbit would be about 22 **times** larger in diameter and the Sun would be about 389 **times** farther away than the Moon!

- La Luna rota en torno a la Tierra con un periodo sideral (respecto a las estrellas) de 27.323 días.
- Gira alrededor de su eje de rotación con ese mismo periodo. Por ello sólo se ve una cara de la Luna, aunque en realidad ciertas oscilaciones (libraciones) permiten ver algo más.
- Este efecto se debe a la fuerza de atracción de la Tierra y a la forma no perfectamente esférica de la Luna.

- Las fases de la Luna dependen de su posición relativa al sol; el periodo de repetición de las fases es el mes lunar.
- El mes lunar dura 29.53 días.



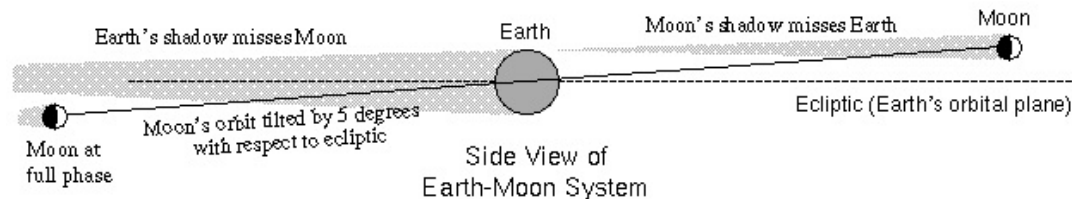
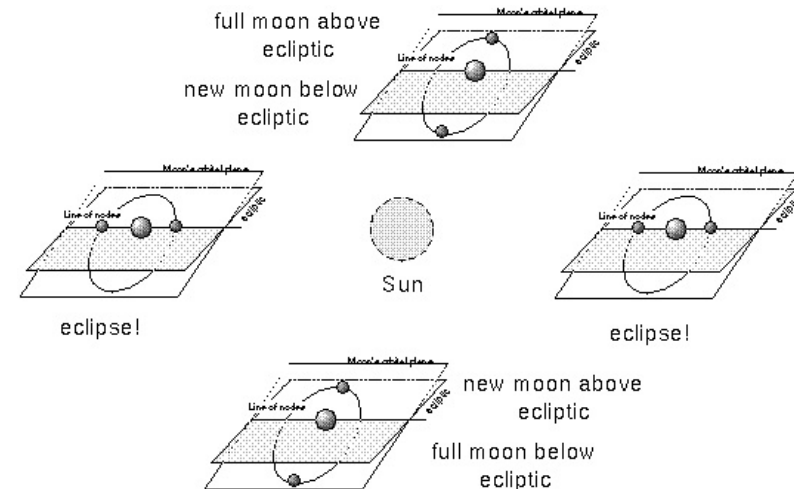
# El plano lunar y los eclipses



The Moon's orbit is tilted by 5° with respect to the ecliptic (the Earth's orbital plane). The **line of nodes** is the intersection of the two planes.

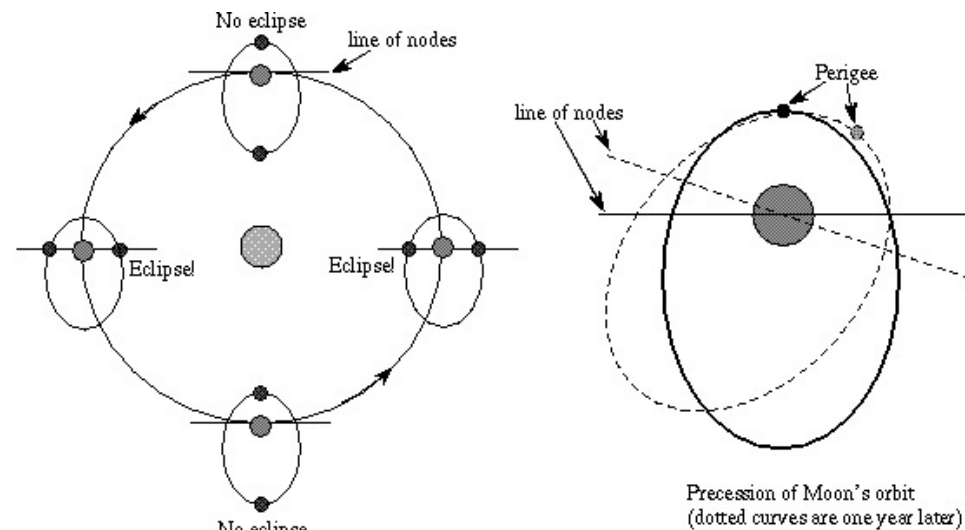
- La línea de nodos de la Luna se define como la intersección entre su plano orbital y el de la eclíptica.

- Para que se produzca eclipse, es necesario que: la línea de nodos coincida con la línea que une la Tierra con el Sol, y que la Luna se encuentre en dicha línea.



## La órbita de la Luna

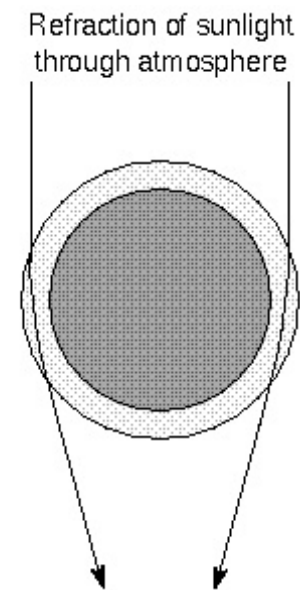
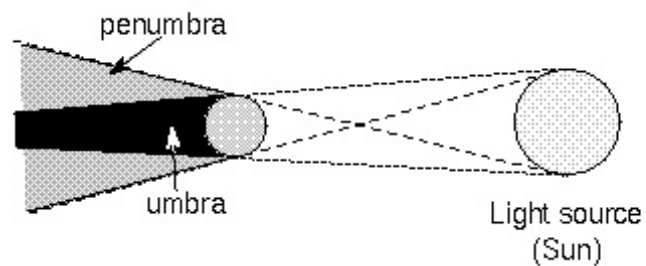
- La Luna se encuentra a una distancia media de 384.748 km de la Tierra, y tiene una excentricidad de 0.055.
- Su inclinación es de 5.1 grados respecto a la eclíptica.
- Está sometida a fuertes perturbaciones, que hacen que su órbita no sea regular. El efecto más importante es la precesión del plano lunar, con un periodo de 18.6 años.
- La inclinación del plano lunar respecto a la eclíptica explica que no se produzca un eclipse cada mes; la precesión, que la frecuencia de eclipses no sea totalmente regular.



# Eclipses



- Eclipses lunares: siempre se producen en Luna llena.
- El color de la Luna cambia en los eclipses totales de Luna, debido a la refracción.



# Eclipses

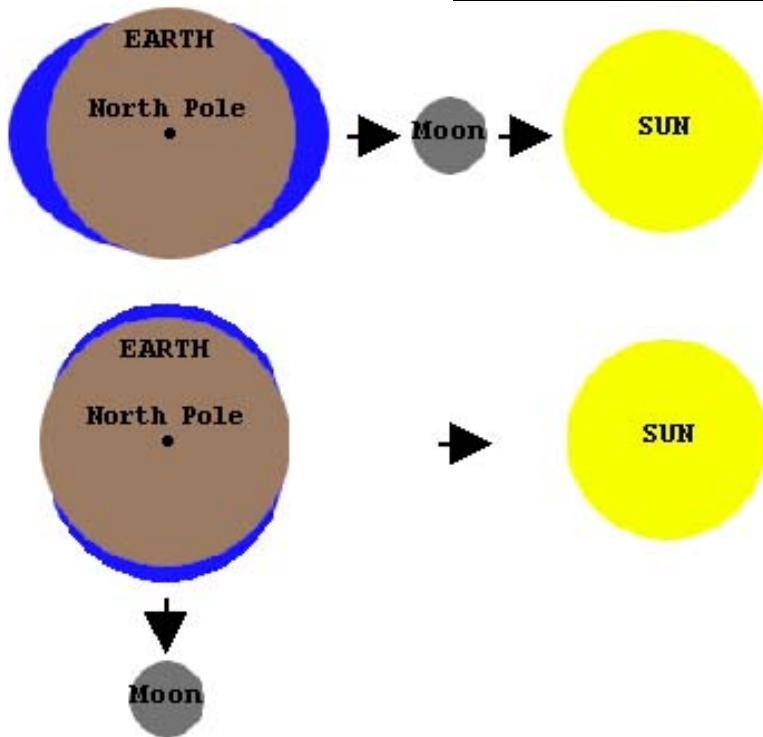
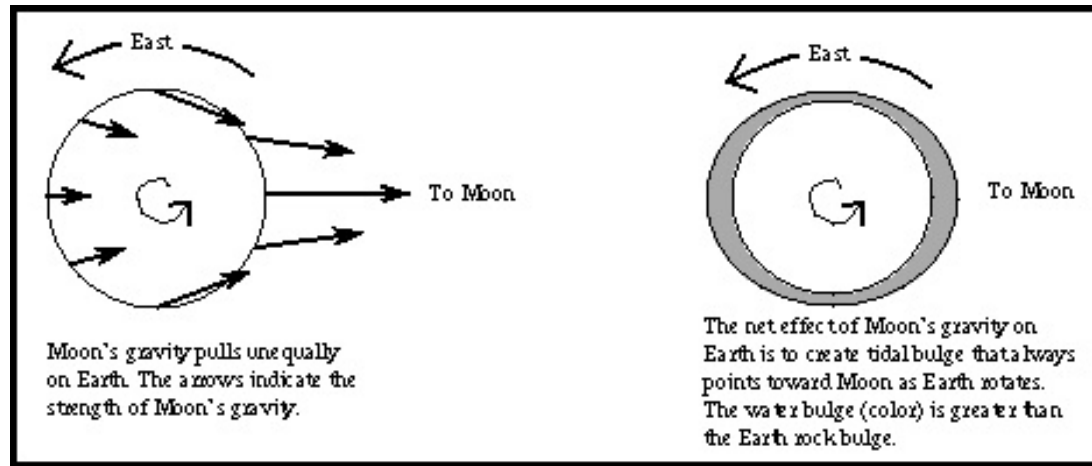


- Eclipses solares: siempre se producen en Luna nueva.
- Muy rápidos y localizados debido a que la sombra de la Luna es pequeña.





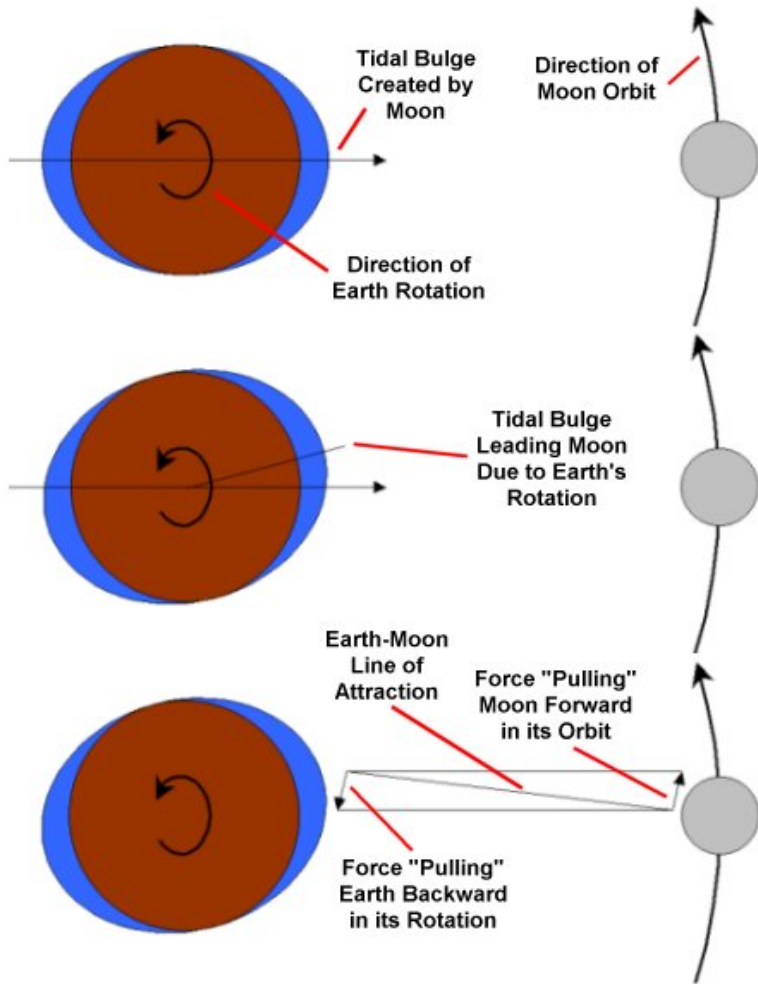
## Las mareas



- Las mareas son generadas por las fuerzas gravitatorias de la Luna y el Sol, y el hecho de que la superficie terrestre (roca y sobre todo mar) es deformable.
- Las mareas muertas (pequeñas) suceden cuando el efecto del Sol y la Luna se opone.
- En el caso opuesto se producen las mareas vivas.



## Las mareas



- Las mareas se pueden ver como un proceso dinámico de intercambio de momento cinético.
- Dicho proceso no sólo produce mareas, sino que frena la rotación de la Tierra y eleva la órbita lunar, aunque muy lentamente: 4 cm. por año.
- El equilibrio se produciría cuando el mes lunar y el día tuvieran la misma duración.
- El mismo proceso causó que el periodo orbital y rotacional de la Luna sea el mismo.
- Este fenómeno se repite en otras lunas del Sistema Solar.

