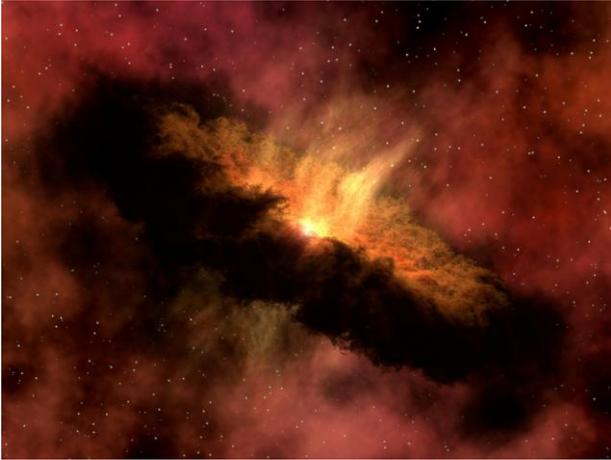


## El Sistema Solar



*Figura 1. Un sistema planetario en formación. Mientras al centro se acumula la mayor parte del material para formar la estrella, a su alrededor se forma un tenue disco de polvo y nieve. Crédito: NASA.*

### MODELO NEBULAR

El modelo nebular de la formación del Sistema Solar fue esbozado en 1796 por Pierre Simon Laplace y ha sido enriquecido por estudios, observaciones y descubrimientos posteriores (Safronov 1969, Lissaver 1993). Básicamente fue deducido a partir de las siguientes características:

- 1.- La masa total de todos los miembros menores (planetas, satélites, asteroides, cometas, polvo) es una fracción insignificante, apenas el 0,14 % de la masa del Sol, que acapara el 99,86 % de la masa total.
- 2.- Los planetas orbitan alrededor del Sol ordenados en un mismo plano, la "eclíptica", como si estuvieran apoyados en una misma superficie. Tienen pequeñas desviaciones de 3 grados en promedio.
- 3.- Este plano orbital, corresponde aproximadamente al plano del ecuador del Sol.
- 4.- Las órbitas de los planetas son casi circulares, lo que le da al conjunto el aspecto de disco.
- 5.- Todos los planetas giran alrededor del Sol en el mismo sentido, en el sentido del movimiento de las agujas del reloj si lo observamos desde el hemisferio Sur. Con las excepciones de Venus y Urano, los objetos mayores del sistema solar giran en sus ejes en la misma dirección.
- 6.- El Sol gira en torno a su eje en el mismo sentido en el que también se mueven los planetas.
- 7.- Los cráteres observados en la superficie de algunos planetas y satélites, como la Luna, Mercurio y Marte, son las huellas de la última etapa, terminada hace 3.800 millones de años, de acreción planetaria. En la Tierra, los cráteres se han borrado debido a la actividad tectónica de sus capas superficiales y de la erosión producida por el agua y el viento.
- 8.- El descubrimiento de discos de polvo, en torno a estrellas en formación o formadas recientemente.
- 9.- El Sol tiene sólo el 0,5 % del momento angular del Sistema Solar, el resto lo tienen los planetas, especialmente Júpiter.
- 10.- Los planetas orbitan alrededor del Sol en elipses con foco en el Sol.

### ORIGENES DEL SISTEMA SOLAR

Las observaciones de los fenómenos que ocurren en las nubes interestelares, en las estrellas jóvenes y en el Sistema Solar han permitido reconstruir el proceso de su formación.

El proceso comenzó hace unos 4.750 millones de años, en una inmensa nube de gases interestelares y polvo que giraba lentamente sobre sí misma en el Espolón de Orión, del Brazo de Carina-Sagitario de la Vía Láctea, a unos 30.000 años luz de su Núcleo Central

Estas inmensas y frías nubes de gases ( $-263^{\circ}\text{C}$ ), del tamaño de unos pocos años luz, ubicadas en los brazos de las galaxias espirales, mantienen su estructura debido a su lento movimiento y a los campos magnéticos que las cruzan. Están formadas por gases de hidrógeno (70%), helio (28%) y oxígeno (1%), carbono (0,3%). Su equilibrio fue roto por la explosión de una supernova en las cercanías, cuya onda de choque habría desencadenado su fragmentación en varias regiones de mayor densidad, que llamaremos “grumos”.

Estos grumos comenzaron a atraer material de la nube circundante. Al menos en uno de éstos, que se caracterizaba por estar rodeado de una mayor cantidad de material, la densidad y la temperatura aumentaron hasta millones de grados en su parte central donde comenzaron a desencadenarse procesos termonucleares dando forma a una estrella de gran tamaño.

Cuando, al cabo de algunos millones de años, esta agotó su combustible y estalló como supernova, su onda de choque disolvió algunos grumos de la nube matriz y empujó el proceso de contracción en otros. Nuevos materiales moleculares y elementos, como el agua,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$  y metano, (0,2%), además de polvo formado por silicatos y metales, como el hierro, aluminio, níquel y otros (1,5%) enriquecieron la nébula. En un grumo enriquecido comenzó a formarse el Sistema Solar.

A medida que el grumo del “protosol” se contraía por la gravedad, aumentaba su velocidad de rotación mientras se aplanaba por la velocidad centrífuga, adquiriendo la forma de un disco.

Al centro del disco densidad y temperatura aumentarían hasta que se formó la estrella que llamamos Sol (Ver apuntes Estrellas). En el disco de gas y polvo, que giraba en su plano ecuatorial, se formarían simultáneamente los planetas, asteroides y cometas. En un proceso que demoró alrededor de un millón de años.

El Sol actualmente emite su energía principalmente como **radiación electromagnética** (52% IR, 41% visible, 7% UV cercano, 0,1% radio); partículas en el **Viento Solar** y campos magnéticos.

En la mayoría de los casos este proceso conduce a la formación de una u más estrellas compañeras, pero la nébula pre-solar reunía apenas la materia como para formar una estrella pequeña como el Sol y un disco con una fracción de su masa.

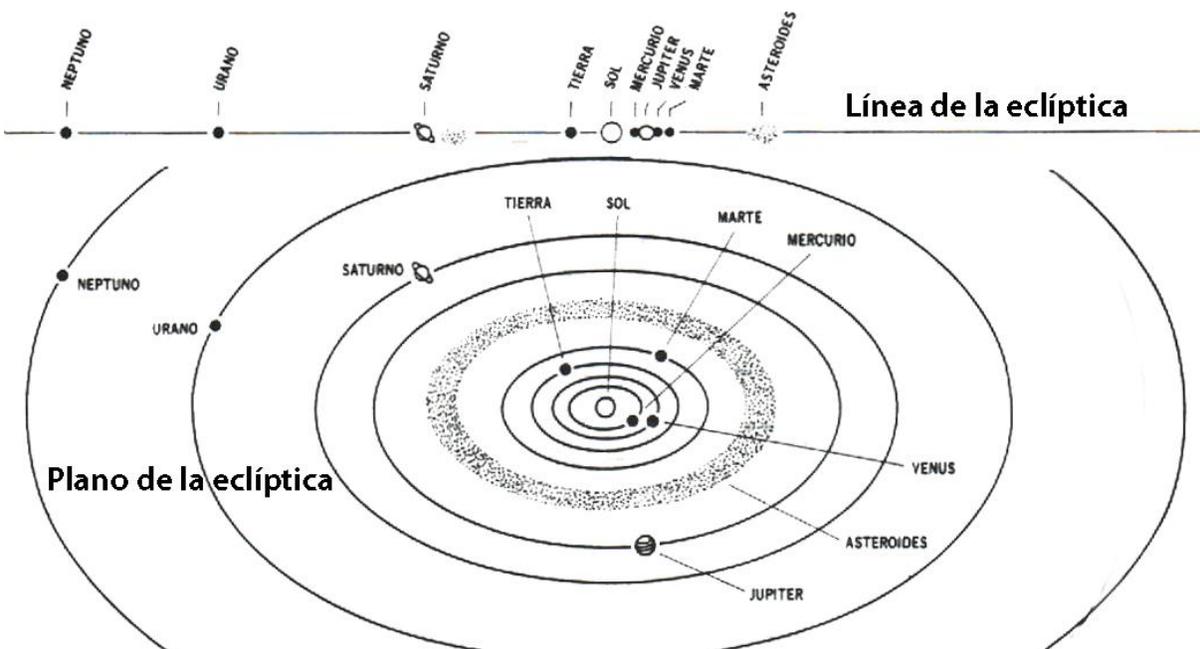


Figura 2. Posiciones de los planetas en el plano de la Eclíptica. Tamaños y distancias no están a escala entre sí. Crédito: Jorge Ianiszewski Rojas.

## LOS PLANETAS

En el disco protoplanetario, debido a que la fuente de calor estaba al centro, la temperatura disminuía hacia fuera, desde los centenares de grados en las cercanías del Sol hasta los  $-220^{\circ}\text{C}$  a 10 unidades astronómicas – UA, de distancia del Sol (1 UA = distancia entre la Tierra y el Sol = 150.000.000 kilómetros).

El disco protoplanetario que giraba alrededor de la estrella en formación se estabilizó en un tamaño de unas 55 UA. De aspecto muy opaco, en él se había establecido una diferenciación horizontal y vertical, generada por el calor del Sol que se formaba en el centro. Los gases del disco se fueron condensando a diferentes distancias del Sol de acuerdo a la temperatura reinante en cada lugar. También llovían sobre el disco elementos que eran expulsados desde el Sol en formación.

También las partículas de polvo del disco fueron afectadas por el calor del joven Sol, evaporándose el agua y los hielos que pudiesen haber en la zona cercana al Sol.

Cerca del Sol, entre 0 y 5 UA, se condensaron partículas de roca y metal. Más lejos, desde las 5 UA hacia afuera, donde la temperatura era menor de  $-150^{\circ}\text{C}$ , además de las partículas de roca y metal se condensaron en copos de nieve, el vapor de agua, amoníaco, dióxido de carbono y metano. También los gases de H y He eran empujados hacia afuera por la energía del Sol que nacía. En las 5 UA se acumuló una gran cantidad de material volátil que actuaba como una barrera para los gases que eran empujados desde el interior del naciente sistema planetario. Allí se formaría el gigantesco Júpiter.

Todo estos materiales: polvo y copos de nieve de diferentes elementos; que giraban alrededor del Sol en formación, sería la materia prima con la que se formarían los planetas del Sistema Solar, en un proceso progresivo llamado “acreción” y que tiene las siguientes etapas:

- De polvo a las “pelusas”.
- De “pelusas” a “planetesimales”.
- De “planetesimales” a “protoplanetas”.
- De “protoplanetas” a planetas.

A partir de los granos de polvo y los copos de nieve formados en el disco protoplanetario, afectados por campos magnéticos y cargados de electricidad estática, se irán aglutinando progresivamente en “pelusas”, aglomerados laxos semejantes a los que encontramos bajo los muebles en nuestros hogares. Estas pelusas irán creciendo hasta adquirir kilómetros de extensión.

Las pelusas de gran tamaño comienzan a colapsar en objetos más consistentes llamados “planetesimales”, la composición de estos dependía de dónde se habían formado. Cerca del Sol serían de silicatos y metales. Vestigios de esta etapa se encuentra en los meteoritos originados en el Cinturón de Asteroides.

Más allá de las 5 UA, las pelusas se formarían con silicatos y metales, además de elementos volátiles, como el agua, metano,  $\text{CO}_2$ , CO y amoníaco. Formando billones de bloques de nieve y hielo que serían atraídos, junto con el gas, por los planetesimales de roca y llegarían a formar los grandes planetas exteriores, Júpiter, Saturno, Urano, Neptuno, y los planetas menores como Plutón, sus satélites y los núcleos de cometas. Una gran cantidad de estos planetesimales fueron despedidos de sus lugares de origen por las resonancias gravitacionales, unos caerían hacia el interior del sistema y finalmente al Sol, mientras que otros fueron lanzados hacia afuera, millones quedaron orbitando al Sol en la llamada Nube de Oort mientras que otros tantos fueron lanzados hacia el espacio interestelar.

Los planetesimales comenzarían a chocar entre ellos para formar objetos mayores, llamados protoplanetas. Algunos de estos comenzaron a dominar las regiones de sus órbitas atrayendo sobre ellos todo el material disperso además del que pueda pasar cerca.

Una vez que los planetesimales hubieron llegado a tener diámetros sobre los 100 kilómetros, en sus interiores se iniciaron procesos de calentamiento producto de la radioactividad natural, que fundió sus núcleos y permitió que metales como el hierro se hundieran hasta sus núcleos, mientras elementos más livianos, como los silicatos, o rocas, flotaran hasta la superficie. Produciendo la **diferenciación** en la estructura de planetoides y planetas, de un núcleo metálico rodeado de rocas.

Cerca del Sol se formaron así los planetas rocosos, Mercurio, Venus, La Tierra, Marte y los asteroides, debido a que la radiación y el potente viento solar impedía la presencia de elementos volátiles, que eran empujados hacia fuera.

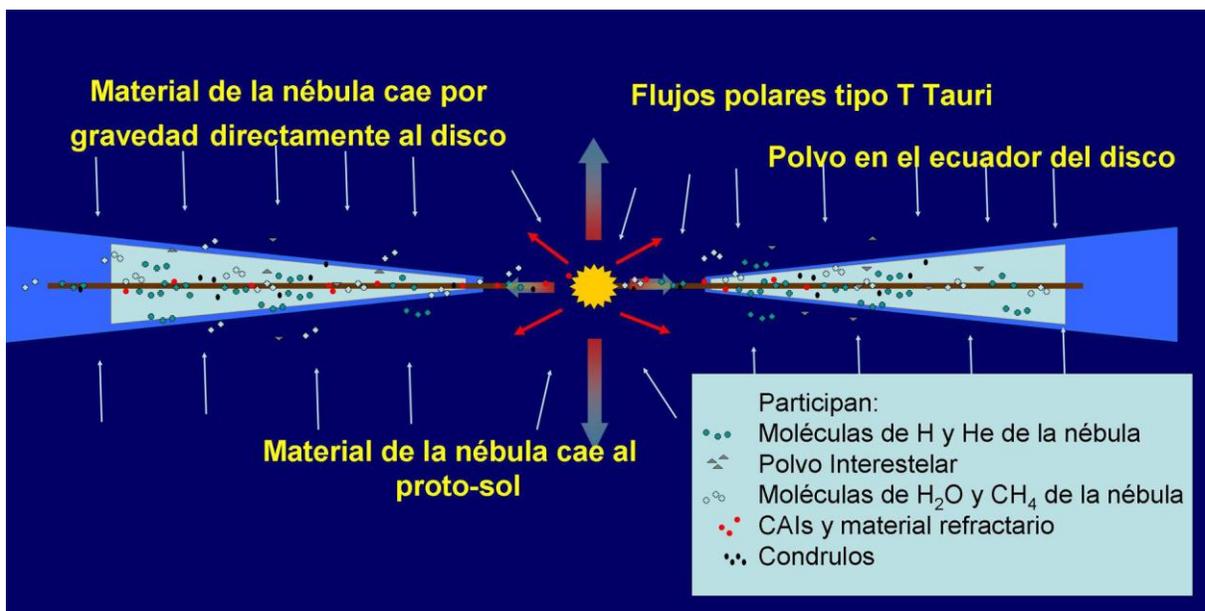
Un recuerdo de esta agitada época aun se pueden observar en la superficie de la Luna, Mercurio, Marte y en algunos satélites de los planetas exteriores. Choques cataclísmicos con planetesimales errantes explican la actual composición y densidad de los planetas, de sus satélites y las peculiares inclinaciones de sus órbitas y de sus ejes de rotación. Estos planetesimales de hielo trajeron al seco interior del sistema solar, el agua, los gases y los elementos orgánicos que en la Tierra darán lugar a la vida. Es posible que los metales que se encuentran en la superficie de la Tierra, hayan sido también traídos por asteroides rocosos.

Hace 3.800 millones de años, el proceso de acreción planetaria estaba casi terminado. Subsistiendo unos pocos cuerpos vagabundos que no fueron absorbidos y que ocasionalmente caen sobre los planetas o el Sol.

El Sistema Solar quedó formado por una estrella que capturó el 99,987% de la materia existente y por un conjunto de planetas grandes y pequeños, satélites, asteroides, gases y partículas interplanetarias, meteoritos, y cometas, que se reparten el 0,0015% restante. De esa materia estelar, que escapó de la atracción del Sol y que se congregó en el tercer planeta, estamos hechos todos los seres vivos, los objetos y toda la materia existente en la Tierra.

Procesos semejantes se repiten en la Galaxia y son seguidos atentamente por los astrónomos, de ellos pueden surgir diversos tipos de estructuras estelares, tales como sistemas de estrellas binarias o múltiples, y eventualmente sistemas planetarios como el nuestro. La existencia de planetas alrededor del Sol se debería a la dinámica y la composición particular de nuestra nube madre, que determinó la forma y el futuro del sistema planetario y especialmente de la Tierra, donde evolucionó la vida y el hombre.

En el 80 % de los casos semejantes la dinámica del proceso conduce a la formación de una estrella compañera, pero la nébula solar reunía apenas la materia como para formar una estrella pequeña como el Sol y un disco con una fracción de su masa.



*Figura 3. Esquema de la forma que adquirió el disco donde se formaron los planetas en el Sistema Solar.  
Crédito: Jorge Ianiszewski Rojas.*

## COMPONENTES DEL SISTEMA SOLAR

- **Una estrella central Tipo G2:** El Sol
- **4 Planetas Rocosos:** Mercurio, Venus, La Tierra y Marte.
- **Cinturón de Asteroides:** Cientos de miles de planetoides rocosos y metálicos entre 0,5 y 933 km. Suman sólo el 5% de la masa de la Luna
- **2 Planetas Gigantes de Gas:** Júpiter y Saturno.
- **2 Planetas Gigantes de Hielo:** Urano y Neptuno.
- **Planetoides de roca y hielo:** Plutón y Caronte, Eris, Sedna, Makemake, Haumea y otros objetos del Cinturón de Kuiper.
- **Satélites planetarios, de roca y hielo.**
- **Partículas y polvo interplanetario:** Producto de colisiones y desgaste de cometas.
- **Disco de Kuiper:** Región más allá de Neptuno, donde existen millones de planetoides y cometas orbitando al Sol en una zona cercana al plano de la Eclíptica.
- **Nube de Oort:** Zona que rodea el conjunto del Sistema Solar, entre las 2 mil y 100 mil UA, donde orbitan millones de planetoides y cometas de hielo y roca, reliquias de las épocas de la formación del Sistema Solar.

## MASAS Y DENSIDADES EN EL SIST. SOLAR

MASAS	Tierra= 1 Luna =1		DENSIDADES	
			g/cm <sup>3</sup>	
Mercurio	0,056			5,420
Venus	0,815			5,250
Tierra	1,000			5,520
Luna	0,012	1,000		3,330
Marte	0,107			3,940
Júpiter	317,890			1,310
Otros Satélites	0,065	5,320	Io	3,550
			Europa	3,040
			Ganímedes	1,930
			Calisto	1,790
Saturno	95,147			0,680
Titán y Otros	0,024	1,920	Titán	1,880
Urano	14,540			1,190
			Satélites	1,400
Neptuno	17,230			1,660
			Tritón	2,070
Plutón	0,002			2,060
Todos los Planetas	446,888			
SOL (toneladas)	1,989	x10 <sup>27</sup>	99,987	%
Planetas (toneladas)	2,681	x10 <sup>23</sup>	0,013	%
Total	1,989	x10 <sup>27</sup>	100,000	

## Distancias y Tamaños en el Sistema Solar

	<b>Kilómetros</b>
<b>Diámetro Plutón</b>	<b>2.320</b>
<b>Diámetro N Tritón</b>	<b>2.720</b>
<b>Diámetro J Europa</b>	<b>3.140</b>
<b>Diámetro U Titania</b>	<b>3.470</b>
<b>Diámetro Luna</b>	<b>3.476</b>
<b>Diámetro J Io</b>	<b>3.660</b>
<b>Diámetro J Calixto</b>	<b>4.800</b>
<b>Diámetro Mercurio</b>	<b>4.878</b>
<b>Diámetro S Titán</b>	<b>5.150</b>
<b>Diámetro J Ganímede</b>	<b>5.280</b>
<b>Diámetro Marte</b>	<b>6.794</b>
<b>Diámetro Venus</b>	<b>12.100</b>
<b>Diámetro Tierra</b>	<b>12.742</b>
<b>Diámetro Neptuno</b>	<b>49.528</b>
<b>Diámetro Urano</b>	<b>51.120</b>
<b>Diámetro Saturno</b>	<b>120.540</b>
<b>Diámetro Júpiter</b>	<b>142.980</b>
<b>Tierra-Luna media</b>	<b>384.400</b>
<b>Diámetro Sol</b>	<b>1.391.980</b>
<b>Mercurio-Sol Media</b>	<b>57.909.000</b>
<b>Venus-Sol Media</b>	<b>108.209.000</b>
<b>Tierra-Sol Media</b>	<b>149.597.870</b>
<b>Marte-Sol Media</b>	<b>227.940.000</b>
<b>Asteroides Interior - Sol</b>	<b>329.115.000</b>
<b>Asteroides Exterior – Sol</b>	<b>478.713.186</b>
<b>Júpiter-Sol Media</b>	<b>778.333.000</b>
<b>Saturno-Sol Media</b>	<b>1.426.978.000</b>
<b>Asteroide Quirón - Sol</b>	<b>2.053.500.000</b>
<b>Urano-Sol Media</b>	<b>2.884.247.000</b>
<b>Plutón-Sol Mínima</b>	<b>4.450.000.000</b>
<b>Neptuno-Sol Media</b>	<b>4.497.071.000</b>
<b>Disco Cometario de Kuiper - Sol</b>	<b>4.700.000.000</b>
<b>Plutón-Sol Media</b>	<b>5.913.514.000</b>
<b>Plutón-Sol Máxima</b>	<b>7.350.000.000</b>
<b>Límite Heliósfera</b>	<b>45.000.000.000</b>
<b>1 Año Luz</b>	<b>9.460.471.000.000</b>
<b>Próxima Centauro - Sol</b>	<b>39.733.980.100.000</b>
<b>Rigel, Alfa Centauro - Sol</b>	<b>41.626.074.000.000</b>

## PLANETARIO A ESCALA

Una buena manera de visualizar las dimensiones del Sistema Solar, es traer estas enormes distancias y tamaños a una escala comprensible y cotidiana. Dividámoslas por diez mil millones, aproximemos y las expresamos en metros, (corremos la coma diez espacios a la izquierda), reduciendo la escala:

<b>Escala 1/10.000.000.000</b>	<b>Metros</b>	
<b>Diámetro Tierra</b>	<b>0,0013</b>	<b>(1,3 milímetros)</b>
<b>Diámetro Júpiter</b>	<b>0,014</b>	<b>(1,4 centímetros)</b>
<b>Diámetro Sol</b>	<b>0,139</b>	<b>(13,9 centímetros)</b>
<b>Distancia Tierra-Sol</b>	<b>14,96</b>	<b>(Casi quince metros)</b>
<b>Distancia Júpiter-Sol</b>	<b>77,80</b>	<b>(Setentaisiete metros ochenta)</b>
<b>Distancia Neptuno-Sol</b>	<b>450,44</b>	<b>(Cuatrocientos cincuenta metros)</b>
<b>Distancia Plutón-Sol</b>	<b>591,58</b>	<b>(Casi seiscientos metros)</b>
<b>Dist. Alfa Cen-Sol</b>	<b>4.162.607,40</b>	<b>(Cuatro mil ciento sesenta y dos km)</b>

En esta escala comprensiva, el Sol tendría 13,9 centímetros de ancho, como un melón pequeño, la Tierra sería del tamaño de un grano de arena de 1,3 milímetros, girando a 15 metros de distancia. Júpiter tendría el tamaño de una bolita, de 1,4 centímetros, girando a 77,8 metros del Sol. Mientras Neptuno orbitaría a 450 metros y medio de distancia. Finalmente, la estrella más cercana, Alfa Centauro, sería un pelotita similar al Sol, distante unos 4 mil ciento sesenta y dos kilómetros. Más o menos la distancia entre la frontera entre Chile y Perú, y el Cabo de Hornos.

## Voyagers

Voyager 1, lanzado el 5 de Septiembre, 1977, está a unos

VOYAGER 1 and 2: The two Voyager spacecraft are continuing their interstellar mission, currently taking data on magnetic fields and charged particles as well as ultraviolet data.

is currently 8.25 billion kilometers (5.13 billion miles) from Earth after flying by Jupiter and Saturn in 1979 and 1980. Voyager 2, launched August 20, 1977, flew by Jupiter (1979), Saturn (1981), Uranus (1986) and Neptune (1989), and is now 6.41 billion kilometers (3.98 billion miles) from Earth.

Viajando a unos 55.000 km/h tardarán 20.000 años en llegar a la mitad de la Nube de Oort, en 40.000 años habrán salido completamente del sistema solar

## Modelos

Si la distancia entre el Sol y la Tierra fuera de 10 cm. la estrella más próxima estaría a 27,3 km de distancia.

> UPDATED: 5/1/95

>

> Pioneer 10

>

> \* Distance from Earth: 9.42 billion kilometers (5.85 billion miles) \*

> Roundtrip Light Time: 17 hours, 27 minutes

> \* Active Instruments:

> o Plasma Analyzer

> o Charged Particle Instrument

> o Cosmic Ray Telescope

> o Geiger Tube Telescope

> o Ultraviolet Photometer

>

> The spacecraft is healthy and continues to make observations of the interplanetary environment at the outer regions of our Solar System.

>

> As the spacecraft electrical power continues to decline, the instruments are operated according to a power-sharing schedule. Individual instruments, or groups of instruments, are turned on at a time such that the total power consumption is within the available power range.

>

> Pioneer 11

>

> \* Distance from Earth: 6.35 billion kilometers (4.94 billion miles) \* Roundtrip Light Time: 11 hours, 46 minutes

Anillos de Saturno son tan delgados con respecto a su ancho de 170.000 km que si quisieramos hacer un modelo del ancho de un disco fonografico de acetato este mediría 6 km de ancho.

#### NOTAS:

todos los planetas, y demás objetos más pequeños que orbitan alrededor de él, son una mínima parte de la masa del Sol, apenas el 1,2% de ésta. El Sol acumula para sí el 98,8 de toda la materia del sistema solar.

Desde 1938, luego que Bethe y Critchfield explicaran el origen de su energía, se sabe que la energía del Sol proviene de los procesos de fusion nuclear que tienen lugar en su interior.

Los antiguos filósofos griegos, que mucho reflexionaron sobre el universo hace más de dos mil cuatrocientos años, pensaban que el Sol era una roca de carbon ardiente de 50 centímetros que giraba alrededor de la Tierra. Anaxágoras, un gran astrónomo de aquel tiempo, fue acusado de herejía y desterrado de Atenas, luego que afirmó que el Sol era más grande que el mar Peloponeso, que rodea Grecia.

Gracias a los trabajos de Copérnico, Galileo y Kepler, se pudo calcular finalmente el tamaño del Sol, y hoy se ha establecido que su diámetro medio es de 1.392.000 kilómetros. Esto es unas 109 veces mayor que el diámetro medio de la Tierra que es de 12.742 kilómetros.

Los descubrimientos de estos tres científicos fueron tan revolucionarios en su tiempo, que sus consecuencias aun se dejan sentir, y desgraciadamente aun en la era espacial hay millones de personas, en otros continentes, que sostienen que el Sol gira alrededor de la Tierra, según el modelo desarrollado por el alejandrino Ptolomeo, fundador de la astrología, hace 2 mil años.

Mediante la fórmulas de la Gravitación Universal, desarrolladas por Isaac Newton hace más de 300 años, se ha podido medir la masa del Sol, estableciéndose que era 333.000 veces mayor que la masa de nuestro planeta. Ocupando un volumen que podría contener 1.300.000 planetas como la Tierra.

- MASA DEL SOL ES EL 99,96% DEL TOTAL DEL SISTEMA SOLAR
- PLANETAS ORBITAN EL SOL EN UN MISMO PLANO (ECLIPTICA)
- ESTE PLANO CORRESPONDE AL ECUADOR DEL SOL
- ORBITAS CASI CIRCULARES, PLANO CON ASPECTO DE DISCO
- LOS PLANETAS Y EL SOL GIRAN EN EL MISMO SENTIDO
- CON POCAS EXCEPCIONES LOS PLANETAS Y EL SOL ROTAN EN SUS EJES EN EL MISMO SENTIDO
- LOS CRATERES OBSERVADOS EN LOS PLANETAS Y SATELITES CORRESPONDEN A

UNA MISMA EPOCA

- OBSERVACION DE ESTRELLAS EN FORMACION Y CON EXTENSOS DISCOS DE POLVO Y GAS

- NEBULAS INTERGALACTICAS
- SUPERNOVA
- ESTRELLA T-TAURI
- DISCO DE MATERIA
- MATERIA DEL DISCO ORDENADA SEGUN TEMPERATURAS