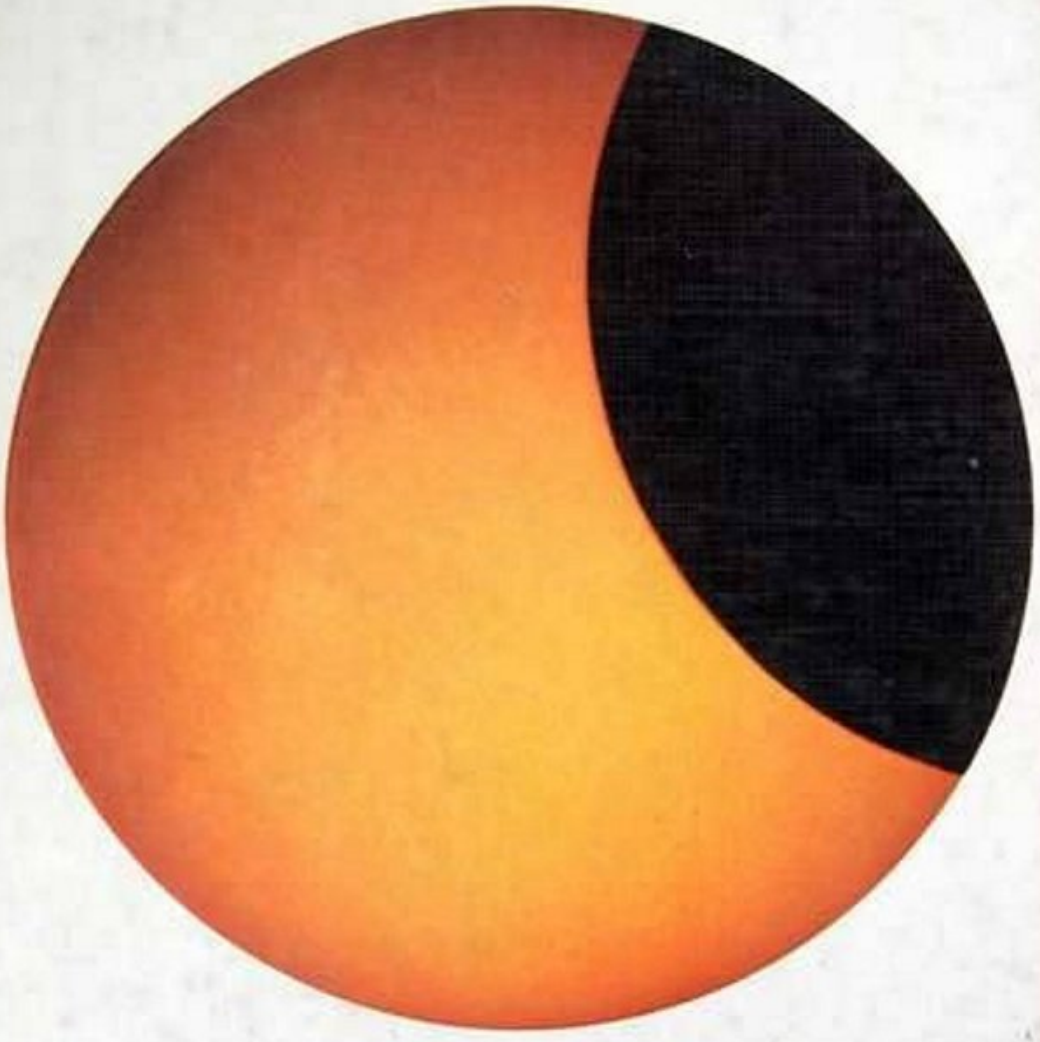
el sistema solar



BIBLIOTECA SALVAT gt DE GRANDES TEMAS

Entrevista a Harold C. Urey

Harold Clayton Urey nació en Walkeston, Indiana, Estados Unidos, el 29 de abril de 1893. Se graduó en 1917 en la Universidad de Montana, y se doctoró en 1923 en la Universidad de California, Berkeley. Es doctor honoris causa por las Universidades de Princeton, Oxford, Yale y Chicago. Entre 1940 y 1945 fue director de investigaciones militares en los laboratorios SAIVI, de 1945 a 1958 fue profesor de Química nuclear de la Universidad de Chicago, y desde esta última fecha es profesor de química en la Universidad de California, en San Diego. En 1934 le fue concedido el Premio Nobel de Química.

Harold C. Urey

Entre otras distinciones posee la Medalla al Mérito del Gobierno de Estados Unidos (1946), el Diploma de Honor de la Institución Estadounidense de Químicos (1954), y la Medalla Nacional de la Ciencia (1964). Es miembro de las sociedades americanas de Físicos, y de Astronomía, de la Unión Americana de Geofísica, de la

Academia Nacional de las Ciencias y de la Academia Americana de Artes y Ciencias, entre otras instituciones.

Es especialista en espectros de absorción y en estructuras atómicas y moleculares. Se ha dedicado básicamente al estudio de las condiciones y composición de la atmósfera primitiva de la Tierra; se interesa en la posible formación de compuestos orgánicos como consecuencia de descargas eléctricas ocurridas en las zonas más elevadas de la atmósfera. Forma parte del cuerpo de profesores de la Universidad de California, en San Diego, y reside en La Jolla, donde, además de a sus investigaciones, se dedica a su hobby preferido: el cultivo de orquídeas.

Eclipse total de Sol fotografiado unos instantes antes de que se alcance la fase de totalidad del fenómeno

En la era de los viajes espaciales y de los grandes avances científicos, el conocimiento del origen y características de los planetas ha dejado de ser un tema de especulación poética o seudocientífica para convertirse en un campo en el que se acumulan las aportaciones científicas y que presenta un interés práctico cada vez mayor para toda la humanidad. El profesor Urey, autor de un libro fundamental en

su momento, titulado *Los Planetas*, Premio Nobel y uno de los principales miembros del cuerpo consultivo del centro de vuelos tripulados, *Manned Space Ccnter*, de Houston de la NASA y del *Jet Propulsion Laboratory* de Pasadena, nos responde a nuestras preguntas sobre los planetas.

En la actualidad, ¿conocemos todos los planetas del Sistema Solar, o hay la posibilidad de existencia de planetas aun desconocidos en nuestro sistema?
Conocemos ciertamente los nueve planetas usuales. Recientemente se ha hablado mucho de otro objeto que se mueve en el espacio y se supone está próximo al Sistema Solar, pero no estoy seguro de que se trate de una hipótesis real, y personalmente creo que es mejor esperar antes de decidir si se trata o no de un planeta. Considero suficiente decir que existen Mercurio, Venus, Tierra, Marte, Júpiter, Saturno, Urano, Neptuno, Plutón y el cinturón asteroidal.

Al hablar de este objeto, ¿se está usted refiriendo al llamado planeta Biga?
Sí, a eso me refería, pero no estoy seguro de su existencia.

¿Cómo podríamos averiguarlo? ¿Cuál sería el procedimiento científico para demostrar su existencia?
Los astrónomos lo han observado con sus telescopios y lo han visto moverse. Así fue como descubrieron Plutón. Se trata de un objeto cuya órbita entra en la de Neptuno, volviendo a salir luego. En efecto, podría clasificarse como un planeta. Cuando lo descubrieron dijeron que era un planeta porque afectaba el movimiento de Neptuno, pero esta predicción era errónea, porque no tiene la masa suficiente para producir este efecto. De hecho, fue descubierto por casualidad. Pueden, sin embargo, existir muchos objetos como éste que tengan una masa inferior a la de la Luna; lo que no creo es en la posibilidad de descubrir un nuevo planeta de cierto tamaño e importancia.
El comportamiento anormal de Mercurio trató de explicarse mediante la suposición de la existencia de otro planeta que afectaba su órbita, hasta que se enunció la teoría de la relatividad generalizada, que explicaba este comportamiento debido a la proximidad de Mercurio al Sol.

¿Qué importancia tiene la teoría de la relatividad para explicar el comportamiento de los planetas o la posible existencia de planetas desconocidos?

Einstein calculó cómo la relatividad afectaba el movimiento de Mercurio y su desviación no explicable por la mecánica clásica, pero yo soy más químico que astrónomo y no querría dar una explicación que pudiera ser errónea. Por otra parte, este mismo corrimiento puede tener otras causas. Por ejemplo, Dicke lo atribuye a un achatamiento del Sol, debido a que su núcleo gira más deprisa que sus capas exteriores. Esto último es muy discutido. Dejando aparte el caso de Mercurio, la relatividad no tiene gran importancia en la explicación de los movimientos de los planetas y menos aún en la detección de éstos. La relatividad da la clave de los fenómenos donde intervienen grandes velocidades, campos gravitatorios intensos o muy grandes distancias. Mercurio está muy próximo al Sol, que crea un campo gravitatorio importante, lo que da lugar a un pequeño efecto relativista. Pero es un caso único en lo que se refiere a planetas.

Aspecto de la Luna en fase creciente. Cerca del centro de la fotografía puede observarse el Mar de las Crisis

¿Podría explicar cuáles son las características diferenciales de los planetas respecto a la Tierra, planeta que mejor conocemos?

Existen claramente diferenciados dos grupos de planetas: los menores o terrestres y los planetas mayores. Los planetas terrestres están bastante próximos al Sol, son esencialmente sólidos, no están recubiertos por atmósferas muy densas y sus densidades son elevadas, entre 4 y 5,5 (quizás algo superior para Mercurio). Este grupo incluye Mercurio, Venus, la Tierra y Marte. Los planetas mayores (Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno) son de tamaño mucho mayor que los planetas terrestres y presentan densidades menores, entre 0,7 y 2,9 debido a que en gran parte están constituidos por gases.

¿Y los asteroides?

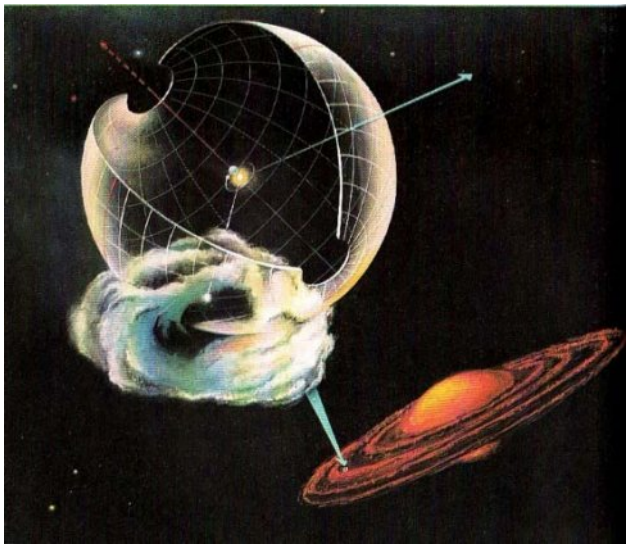
Son objetos rocosos y metálicos, de características idénticas a las de los meteoritos, los objetos que caen sobre la tierra.

¿De dónde cree usted que proceden los asteroides? Supongo que se produjeron por accidente durante el desarrollo del Sistema Solar.

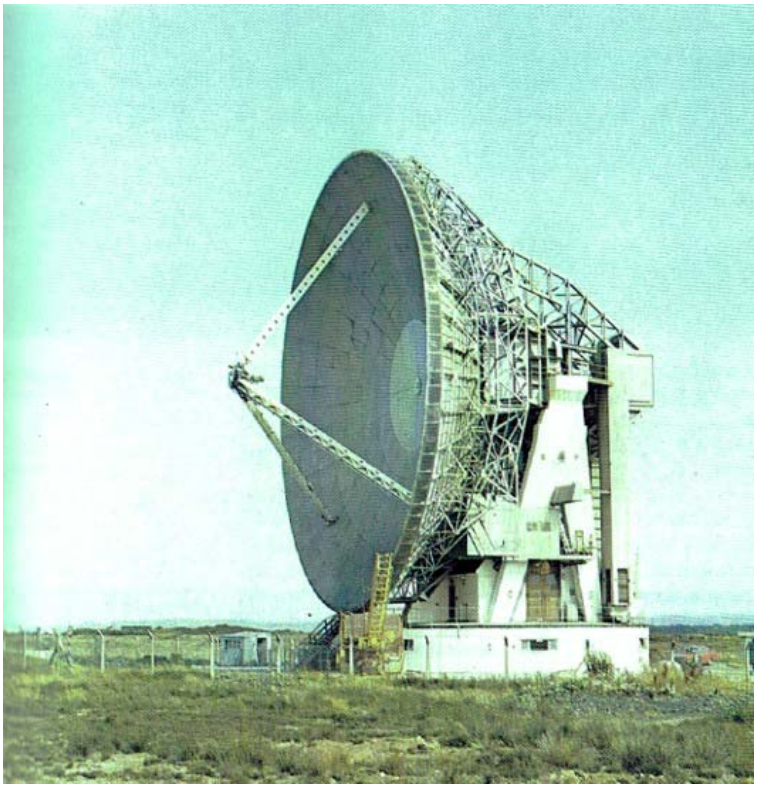
La Luna y el planeta Venus un conjunción, fotografía tomada el 15 de mayo de 1969.

Es decir, ¿como los planetas?

Sí, yo creo que son el resultado de un planeta que no se formó completamente. En el momento de la formación de los planetas, una gran parte del material fue llevado por un fuerte viento solar más allá de nuestro sistema; el material que existe ahora en el Sistema Solar no representa más que una pequeña fracción del que originalmente existía. Pienso, pues, que los asteroides fueron un accidente producido en la formación de los planetas: son el resultado de un planeta que no llegó a formarse completamente.



Representación de la teoría de Hayashi, según la cual una gran masa de gas en el espacio cae girando y contrayéndose formando una nebulosa de cuya condensación central sale el Sol y de su ruptura se forman los planetas.



Radiotelescopio de Goonhilly Down (Cornwall).

Nebulosa Norteamérica (NGC 7000) en la constelación del Cisne.

¿Cuál es su teoría acerca del origen de la Luna? ¿La considera usted como una hija de la Tierra, una hermana o como un ente independiente? Es decir,

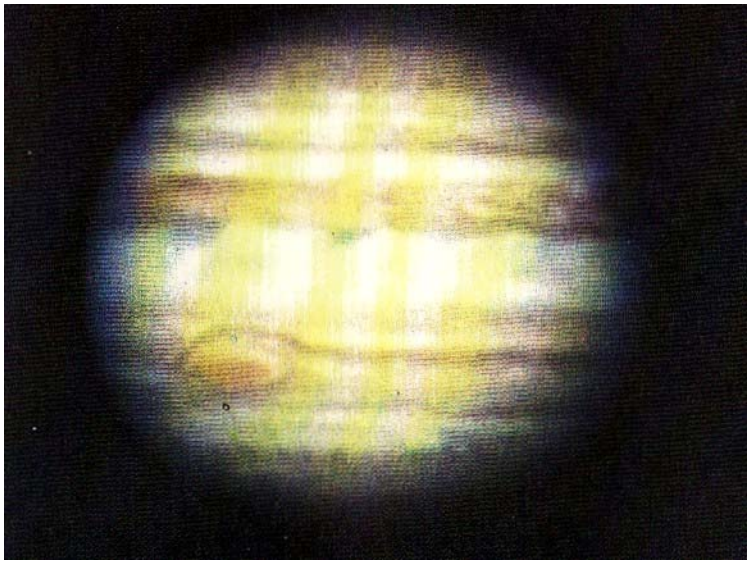
¿cree que se produjo después que la Tierra, a la vez que la Tierra o con completa independencia?

Creo que la mayoría de científicos están convencidos de que la Luna no es un producto de la Tierra; otros creen que se produjo en las vecindades de la Tierra, y otros que fue capturada por la Tierra. Es difícil decidir realmente cómo se formó la Luna. Tiene una densidad aproximada de 3,34. Ahora bien, la Tierra, en condiciones de baja presión y temperatura, tendría aria densidad aproximada de 4. Esto indica una composición completamente diferente de la Tierra y de la Luna, y esta diferencia hace muy difícil suponer que la Luna sea un producto de la Tierra. De todos' modos, su densidad la sitúa entre los planetas terrestres. Una posibilidad interesante es la de un origen común de la Luna, la Tierra y Marte. Un planeta primitivo, que al contraerse iba aumentando su velocidad de rotación, se parte en dos fragmentos desiguales, que se distancian manteniéndose unidos por un filamento de materia. Al separarse definitivamente, el "puente" da lugar a una especie de gota, que queda en órbita alrededor del fragmento mayor. Este último sería la Tierra; la "gota", la Luna, y el fragmento menor, Marte.

Las estrellas emiten radiaciones pero no los planetas. Sin embargo, parece ser que Júpiter sí emite radiaciones. ¿A qué se debe este fenómeno?

Todos los objetos emiten radiaciones, lo que ocurre es que lo hacen en distintas longitudes de onda.

Los objetos fríos emiten luz de onda larga o rayos infrarrojos, mientras que los objetos calientes emiten luz visible de alta frecuencia o rayos ultravioleta. Además, Júpiter emite ondas de radio, cuya longitud es mucho mayor que la de los rayos infrarrojos. Una de sus emisiones características tiene una longitud de onda del orden de los 10 metros. Estas radiaciones no son de tipo térmico, sino que se deben a los electrones atrapados en el campo magnético del planeta.



Fotografía del planeta Júpiter en la cual puede observarse la famosa Mancha Roja en el hemisferio sur del planeta. La fotografía fue obtenida el 23 de diciembre de 1966.

¿En qué consisten los anillos de Saturno?

Se supone que están formados de agua y granos de arena, que son partículas sólidas de algún tipo cubiertas de hielo. En las proximidades de un planeta no pueden formarse grandes objetos sólidos: al acercarse a Saturno, estas partículas sólidas se diseminaron y se quedaron girando en su órbita, formando los anillos, como la Luna gira en torno a la Tierra.

¿Significa, pues, que son un satélite destruido?

No, son un satélite que no llegó a formarse.

Acerca del origen de los planetas y otras cuestiones relacionadas con su práctica científica, le preguntamos al profesor Urey:

Existen diversas teorías sobre el origen de los dantas: La teoría catastrófica considera que os planetas se originaron a causa de una explosión solar. La teoría de Fred Hoyle, que cree que 4 Sistema Solar se originó por contracción de la primitiva nebulosa y que, según el tamaño y la distancia al Sol, los planetas giran más o menos rápidos. La teoría de Alfvén sostiene que el funcionamiento del Sistema Solar se debe fundamentalmente a las

líneas de fuerza de los campos magnéticos. ¿Qué teoría cree usted que se ajusta más a la realidad? ¿Se podría llegar a una teoría sincrética que explicase el Sistema Solar?

No acabo de creer ninguna de las tres teorías, ni estoy seguro de mis propias ideas. Dudo mucho de la teoría de Hoyle, pues presume que tenemos por una parte el Sol y por otra los átomos y moléculas del espacio, que se agrupan en distintos niveles formando los planetas. La teoría que yo me inclino a creer es la de Hayashi, que dice que existe una gran masa de gas en el espacio, que se contrae y cae girando cada vez a mayor velocidad, formando una nebulosa de cuya condensación central sale el Sol y de su ruptura se forman los planetas. Los campos magnéticos desempeñan aquí un papel importante en la distribución de las velocidades de rotación.

Figura 103a. Fotografía del sol rodeado por un halo. Este fenómeno viene producido por la difracción de la luz solar en los cristales de hielo que constituyen las nubes altas.

La nebulosa primitiva, de seguir girando uniformemente mientras se contrae, no podría dar lugar a una condensación central como el Sol. Los campos magnéticos transfieren el movimiento de rotación del material central al planetario, permitiendo así que siga la contracción.

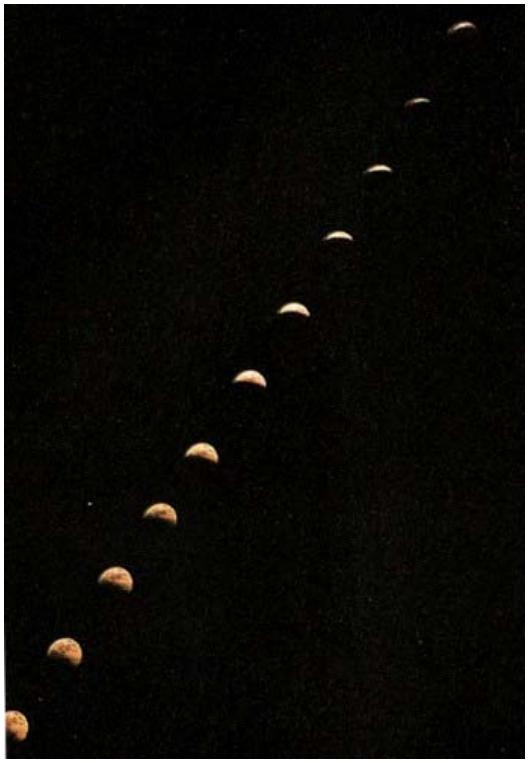


Figura 104a. Imágenes sucesivas de las distintas fases de un eclipse total de Luna (18 de diciembre de 1964)

En química y biología podemos hacer experimentos saber con certeza lo que es verdadero y lo que es falso, pero en el Universo no cabe la posibilidad de comprobar ninguna teoría experimentalmente, sólo disponemos de la observación pasiva.

¿Tiene usted alguna hipótesis sobre el origen de los cometas?

No. Son para mí una de tantas cosas desconocidas del Universo.

¿Cree que existe vida solamente en la Tierra? ¿Cuál es la importancia de los viajes interplanetarios para averiguarlo?

Nos hemos enterado de muchas cosas sobre la Luna, pero me gustaría que se hicieran muchos más viajes, pues hay mucho por averiguar.

Figura 105a. La gran nebulosa de Orión es una gran nube de gases y partículas, que brilla iluminada por la luz de cuatro estrellas que se encuentran en su interior.

Respecto al proyecto de viaje a Marte, lo que nos interesa más es saber si existe o ha existido vida en él. La mayoría de nosotros creemos que existe vida en muchas estrellas; de nuevo nos hallamos ante un problema que no admite comprobación. Yo creo que hay evidencia de la existencia de agua en Marte, y si hay agua y las temperaturas que suponemos, existen posibilidades de vida.

¿Se refiere a vida inteligente o a vida química?

No hay vida inteligente, pero podría haber vida bacterial y microorganismos; no creo que exista vida inteligente en nuestra galaxia.

Figura 107a. Fotografía de la galaxia de Andrómeda, que es una de las más cercanas a nuestro sistema estelar. Al igual que este último, está formada por millones de soles, muchos de los cuales pueden estar acompañados por sistemas planetarios análogos al nuestro.

La Tierra existe desde hace unos 4.500 millones de años, y la vida inteligente sólo se ha producido en los últimos dos millones de años, y esta vida inteligente hace sólo pocos años que está detectando objetos en el espacio. Si éste es el tiempo promedio para llegar a la vida inteligente, es difícil que exista en muchos lugares de nuestra galaxia.

¿Quiere decir que los otros planetas son más jóvenes que la Tierra?

No, pero no tienen las condiciones especiales para producir vida inteligente. Fuera de nuestro sistema quizás existen.

En caso de existir fuera de nuestra galaxia, ¿podría establecerse algún tipo de contacto con estos seres?

De momento no han podido captarse señales emitidas por posibles seres de otros sistemas galácticos. Ellos quizá reciban señales nuestras a través de radio-ondas, pero ignoramos el tipo de comunicación que pudiéramos recibir nosotros.

¿Es verosímil la existencia de vida orgánica en los meteoritos?

Es cierto que hay compuestos orgánicos del tipo cuya evolución originó la vida en nuestro planeta, pero no creo que existan estructuras vivas.

Figura 108a. Astrolabio de madera construido por Jean Lebrun en el año 1842. Actualmente pertenece a la colección el Conservatorio de Artes y Oficios de París.

¿Podría entonces suponerse que el origen de' los meteoritos es el mismo que el de la Tierra?

La composición de los meteoritos es similar a la de la Tierra hace 4 ó 5 mil millones de años.

¿Cómo se puede probar la existencia de otros sistemas solares?

Conocemos la existencia de una estrella relativamente próxima a nosotros, en la que, estudiando sus movimientos y su órbita, hemos podido observar que existe un objeto —diez veces mayor que Júpiter— que gira a su alrededor. En realidad, no tiene por qué tratarse de un solo planeta. Observamos las perturbaciones que provoca en el movimiento de la estrella, por el mismo método que cuando se trata de un sistema doble. Si pudiéramos hacer un análisis lo bastante riguroso, tal vez llegaríamos a desdoblar este objeto en varios. Si observáramos el movimiento del Sol desde una distancia semejante, también detectaríamos, aparentemente, la

existencia de un solo planeta, de masa algo mayor que la de Júpiter, al que atribuiríamos los efectos globales de todo el Sistema Solar. Es nuestra evidencia más directa de la existencia de sistemas planetarios. Hay probablemente 3 mil millones de sistemas planetarios en nuestra galaxia. Es una cantidad enormemente grande; por ejemplo, nuestros corazones, en 80 años, laten cerca de 3 mil millones de veces.

¿Cree que en un futuro se podrá viajar en el espacio más allá de nuestro Sistema Solar?

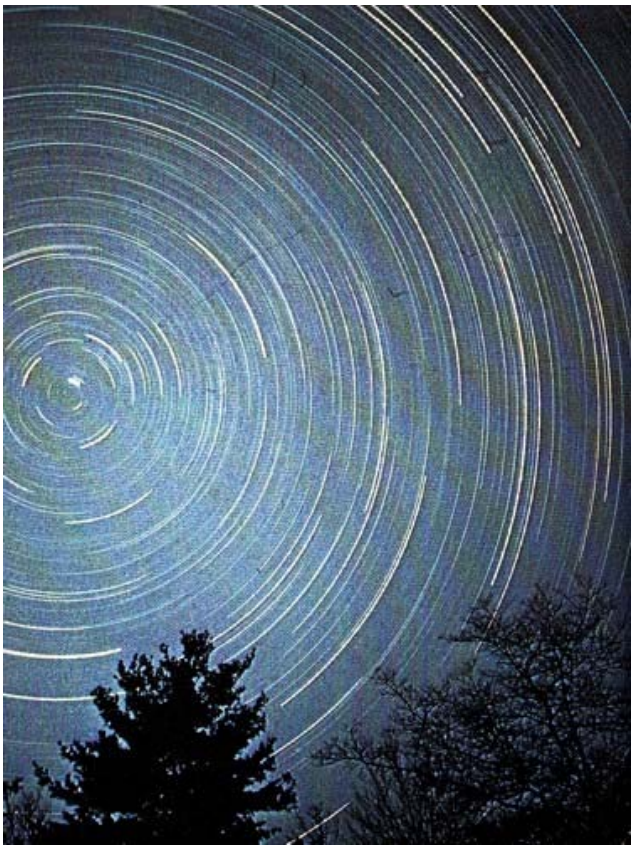
No, creo que es totalmente improbable; las distancias son enormes. El viaje a Marte que estamos planeando durará un año para recorrer 300 millones de kilómetros. Además, sobre la base de la física actual, parece bien establecido que la velocidad de la luz es el límite superior para la propagación de cualquier fenómeno material. Las estrellas más próximas a la Tierra están a una distancia de varios años luz de nosotros. Pero se ha de tener en cuenta que la velocidad de la luz es un límite muy difícilmente alcanzable. Dejando aparte los problemas técnicos que plantearía, la aceleración para pasar del reposo a una velocidad comparable con la de la luz debe mantenerse a un nivel que el cuerpo humano pueda soportar. Ello supone ya varios años más, y ¿cómo puede una persona pasar varios años dentro de una cápsula espacial?

Capítulo 1
¿Qué es el Sistema Solar

Contenido:

1. *Aspecto del firmamento*
2. *Movimientos aparentes de los planetas*
3. *Fases de los planetas*
4. *Planetas "antiguos" y planetas "nuevos"*
5. *Las distancias en el Sistema Solar*
6. *Otros componentes del Sistema Solar*
7. *¿Existen planetas posplutónicos?*

1. Aspecto del firmamento



Fotografía obtenida mediante exposición prolongada, y en la que puede observarse como el cielo estrellado parece girar alrededor del polo celeste. Debido a la larga exposición el movimiento aparente de cada estrella queda marcado sobre la placa fotográfica mediante un arco de circunferencia.

Es conveniente, antes de proceder a la exposición de los conocimientos que los astrónomos han recogido acerca del Sistema solar, comenzar por considerar lo que es posible saber del mismo sin ayuda de ningún artificio, en una primera aproximación.

El firmamento estrellado se nos aparece al telescopio como la aglomeración desordenada de puntos luminosos.

La multitud de puntitos luminosos que pueblan el firmamento son otros tantos astros situados en lejanas regiones del espacio.

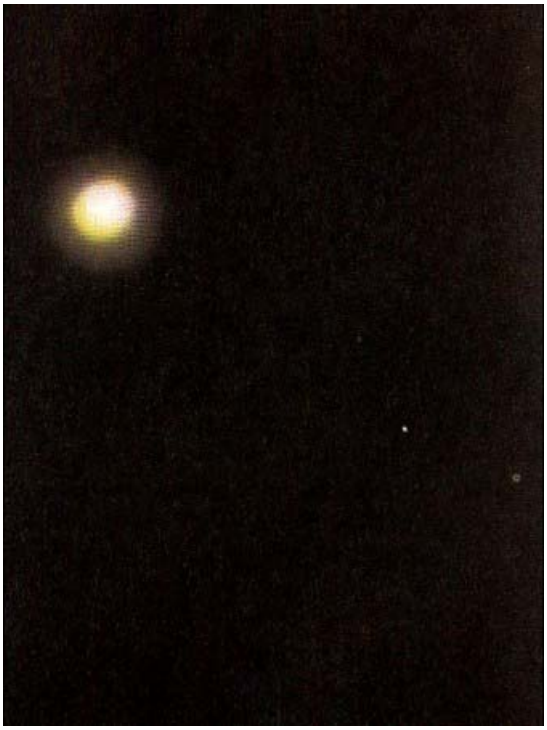
El planeta Venus (señalado en la fotografía con un círculo) sólo es observable, en los casos más favorables, en los crepúsculos.

Su luz, que vemos brillar ahora, proviene en algunos casos de épocas remotas, ya que la luz de algunas estrellas ha tenido que viajar durante muchos años en el espacio antes de llegar a nosotros.

Si se prolonga la contemplación del firmamento durante unas horas se observará que todos los astros (como el sol durante el día) parecen girar en el sentido este-oeste manteniéndose siempre constantes sus distancias relativas. Este movimiento de los astros no es real, sino que se trata de la rotación de la Tierra.

Si se prolonga todavía más la contemplación del cielo se observará que unos pocos astros, que también reclaman la atención por su luminosidad, no sólo tienen un movimiento de giro alrededor del eje del mundo, sino que también se desplazan respecto a las estrellas fijas.

Estos cuerpos celestes son los planetas del Sistema Solar; es decir, astros oscuros que no brillan con luz propia, sino con la luz que reflejan del Sol alrededor del cual giran. Su cambio de posición en el firmamento es un reflejo de su movimiento de traslación en torno al Sol.



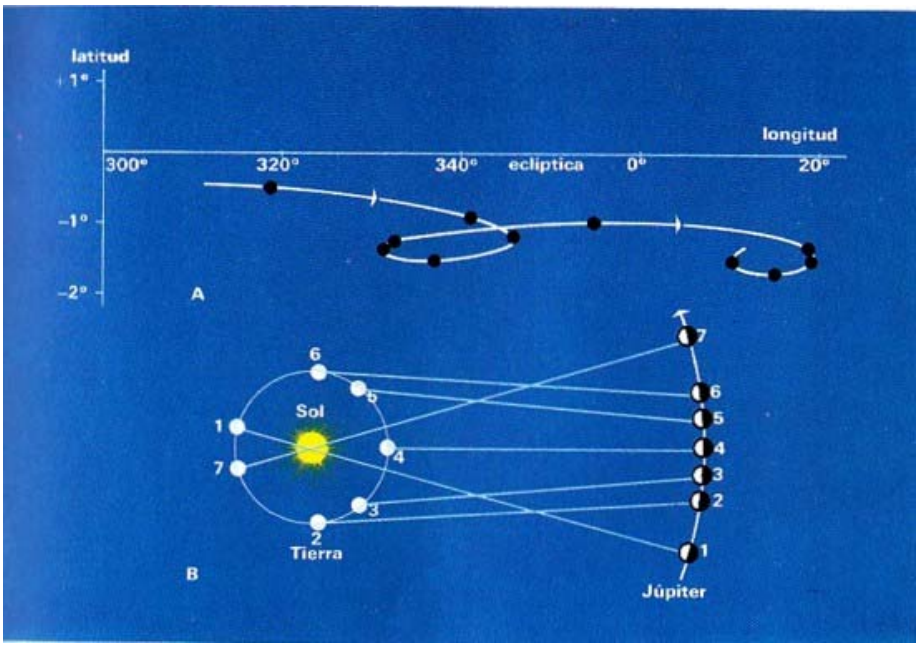
La Luna, satélite de la Tierra, y algunos de los planetas pueden ser identificados sin ayuda de ningún instrumento óptico.

Otra característica que permite reconocer a un planeta en el firmamento, aparte de las mencionadas hasta ahora, es que la luz no presenta el centelleo común a todas las estrellas. Este fenómeno se debe a que el centelleo es una característica de las fuentes de luz puntuales, es decir, de aquellos focos luminosos que se reducen a un punto sin dimensiones, y las estrellas, debido a su gran alejamiento, se comportan como tales, pero no así los planetas relativamente cercanos.

El planeta de más fácil identificación es sin duda Venus, puesto que después del Sol y de la Luna es el astro más luminoso del firmamento. Su brillo máximo es 15 veces superior al de Sirio, la más brillante de las estrellas. A consecuencia de su gran luminosidad, en condiciones muy favorables puede verse en pleno día, con tal de conocer la parte del firmamento en que se encuentra. Un atributo importante de Venus es que, a causa de las características de su movimiento en el espacio, nunca se aleja excesivamente del Sol, y en los casos más favorables sólo permanece visible durante 4 horas después de la puesta del Sol o 4 horas antes de su salida.

Otro planeta de fácil reconocimiento por su coloración rojiza, que le destaca de entre re los otros astros, es Marte. Su luminosidad presenta importantes cambios

debidos N las variaciones de su distancia a la Tierra, pero cuando alcanza su valor más elevado sobrepasa incluso al de todas las estrellas. A diferencia de Venus, no está forzado a seguir de cerca el camino diurno del Sol en el firmamento, pudiendo ser Mis períodos de visibilidad superiores a 4 horas.



A) Trayectoria aparente de un planeta superior, ejemplificada en el caso de Júpiter. B) Posiciones relativas de la Tierra y Júpiter en sus órbitas respectivas, las cuales explican el movimiento aparente de Júpiter descrito en la parte A de la figura.

La identificación de Júpiter es más problemática, puesto que la tonalidad blanquecina de su luz y el valor de su luminosidad relativamente elevado pueden, en ciertas circunstancias, producir una confusión con Venus. Este error no es posible tusando los dos astros son visibles, ya que en esas condiciones la luminosidad de Venus es generalmente superior, y sobre todo su situación en el firmamento permite su identificación y la de Júpiter por exclusión.

En el caso de Saturno, el planeta más lejano entre los visibles a simple vista, su luminosidad no facilita su identificación, puesto que aun siendo elevada es igualada por bastantes estrellas fijas. Tampoco se tienen mejores resultados si se observe su movimiento respecto a las constelaciones, ya que su gran distancia a la Tierra hace que este movimiento sólo se pueda detectar tras cuidadosas mediciones. De aquí que la única característica que puede servir para la localización rápida de Saturno,

aparte del conocimiento previo de su situación en el firmamento, sea la fijeza de su brillo, que le destaca de entre todos los astros próximos.

Caso aparte lo constituye Mercurio, el planeta que se encuentra más cerca del Sol en el espacio y uno de los más próximos a la Tierra. Las condiciones de visibilidad de este planeta son muy precarias: son pocas las personas que a simple vista han podido observarle al menos una vez en su vida. El motivo de ello es que la proximidad del planeta al Sol en el espacio también se traduce en una gran proximidad en el firmamento, y por tanto el brillo de Mercurio está casi siempre apagado por la fuerza de los rayos solares.

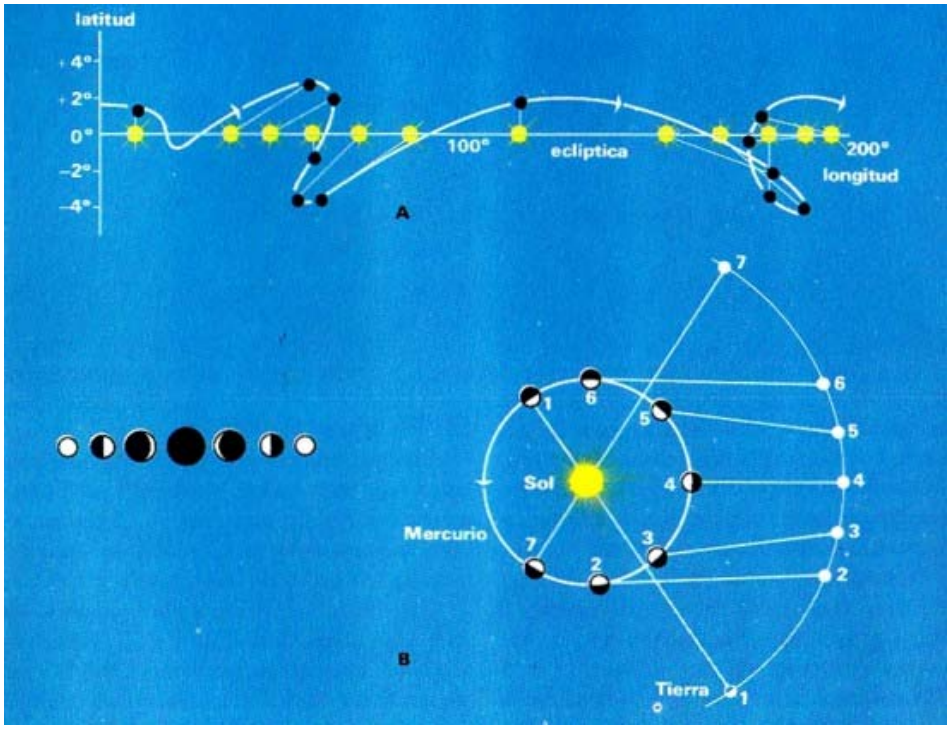
Traducido al lenguaje práctico, esto significa que el planeta en cuestión sólo es visible durante los cortos períodos en que su separación del Sol en el firmamento es máxima, e incluso entonces sólo se le puede encontrar en el ocaso o al alba, siguiendo al So] o precediéndole en su camino. En ambas circunstancias no muy alto en el firmamento, y se le puede observar durante un intervalo de tiempo no superior a 2 horas.

2. Movimientos aparentes de los planetas

Si en un mapa celeste se dibujasen detalladamente todas las posiciones por las que pasa un planeta en su desplazamiento, se observaría que este movimiento tiene efecto normalmente en el sentido oeste-este a través de las constelaciones. Tal movimiento recibe el nombre de directo.

En algunas ocasiones, a lo largo de unas pocas semanas, se constataría que el camino del planeta en cuestión sobre el fondo de las estrellas fijas parece invertirse, moviéndose entonces en el sentido este-oeste, que recibe el nombre de retrógrado. Se observaría asimismo que cuando cambia de sentido el planeta pasa por una posición en la cual parece detenerse durante cierto tiempo respecto a las constelaciones, posición que recibe el nombre de estación.

Estos cambios de sentido en el movimiento de un planeta no tienen lugar sobre una misma línea recta, que primero sería descrita en un sentido y después en el opuesto; por el contrario, la trayectoria del planeta es una línea curva que presenta tantas sinuosidades como cambios de sentido. En algunos casos estas sinuosidades se cierran sobre sí mismas y dan lugar a bucles en la trayectoria del planeta.



A) Trayectoria aparente de un planeta inferior, ejemplificada en el caso de Mercurio. B) Posiciones relativas de la Tierra y Mercurio en sus órbitas respectivas, las cuales explican el movimiento aparente de Mercurio descrito en la parte A de la figura.

En realidad, la Tierra y los demás planetas se mueven siempre en un mismo sentido describiendo elipses, respecto a las cuales el Sol ocupa una posición central. Los bucles, o simplemente los cambios de sentido que observamos, son aparentes, y sus causas han de buscarse en los cambios en la posición y velocidad relativa del planeta respecto a la Tierra, y también en el hecho de que las dos trayectorias no están en un mismo plano.

Conviene añadir aquí que el movimiento aparente de los planetas tiene siempre lugar en las proximidades de una línea imaginaria a la que se da el nombre de eclíptica. Esta línea es la trayectoria aparente que sigue el Sol a lo largo de un año en el firmamento de las estrellas fijas, y no es otra cosa que la intersección del plano de la órbita de la Tierra con la esfera celeste.

3. Fases de los planetas

Cuando se observan los planetas por primera vez con un telescopio el fenómeno que tal vez sorprende más a un observador no advertido es la visión de las fases que presentan los mismos.

Este hecho, no perceptible a simple vista más que como variaciones en la luminosidad de los astros correspondientes, fue descubierto por Galileo en 1610 para el caso de Venus. En su tiempo, este hallazgo resultó de gran importancia, puesto que cooperó a desterrar la imagen de la Tierra como centro de un Cosmos perfecto e inalterable.

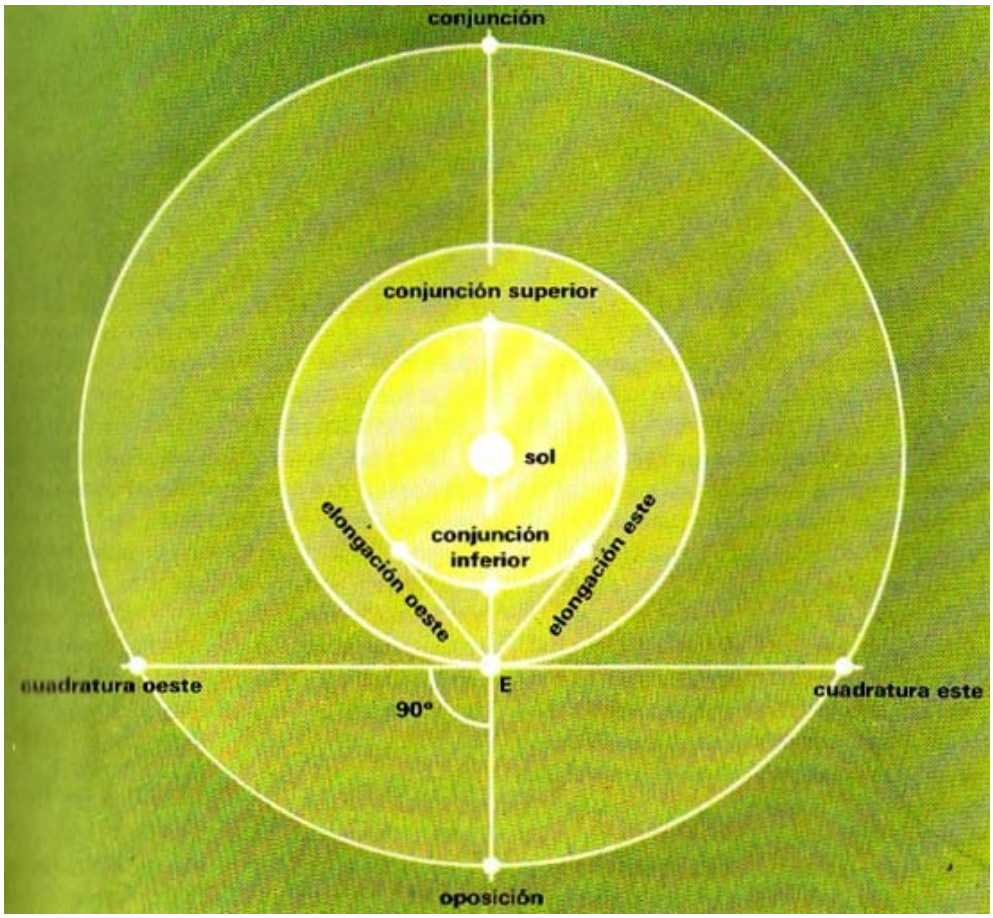
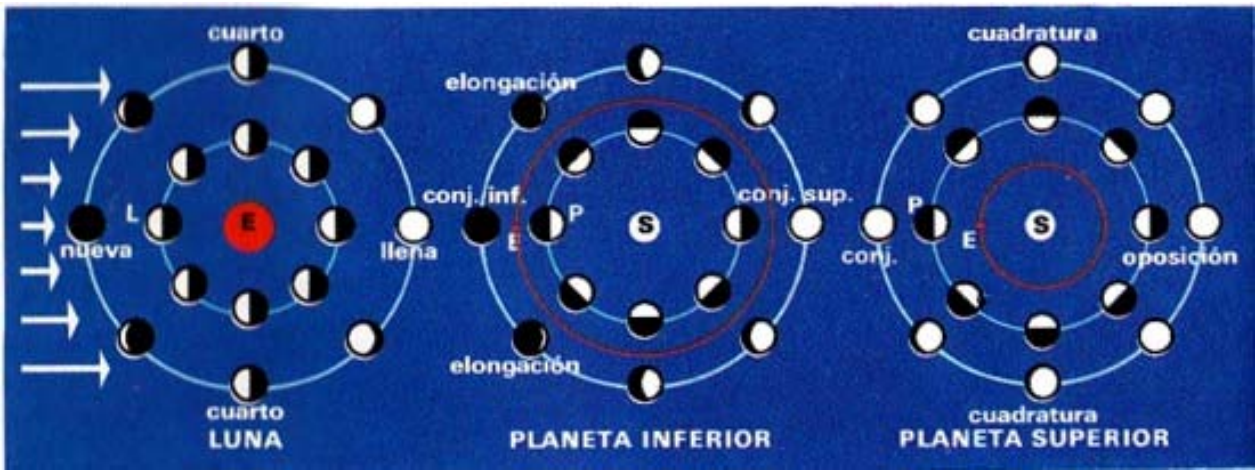


Gráfico que muestra las posibles configuraciones planetarias, o sea las posiciones relativas del Sol, la Tierra y los planetas que tienen interés astronómico. La órbita interior es la de un planeta inferior, la central es la trayectoria de la Tierra y la exterior corresponde a un planeta superior

Hasta la época de Galileo se había aceptado que el mundo de los astros no sufría ningún cambio, estando la mutabilidad relegada a los orbes imperfectos de la Tierra

y la Luna. Por ello, el descubrimiento de que Venus presentaba fases como la Luna, las cuales además modificaban el aspecto circular de su disco visible, constituyó un rudo golpe para las teorías aceptadas durante la Edad Media, fundamentadas en prejuicios ideológicos antes que en la observación.

Las fases de Venus observadas con un telescopio son completamente similares a las de la Luna, y lo mismo puede decirse para el planeta Mercurio. Los discos de estos tres cuerpos pueden verse totalmente iluminados por el Sol, no verse en absoluto, o bien presentarse con el aspecto de una delgada hoz. Ello depende de la porción de la superficie planetaria iluminada que se observa desde la Tierra, y por tanto de la posición relativa del Sol, la Tierra y el astro correspondiente.



Mecanismo de las fosas de la Luna y de los planetas. En cada figura aparecen las posiciones relativas de la Tierra (E), el Sol (S) y la Luna (L) o el planeta (P); las fases de los astros respectivos, tal como pueden observarse desde la Tierra, han sido dibujadas en los círculos exteriores. A la izquierda fases da la Luna (las flechas horizontales representan la dirección de los rayos solares). En el centro y a le derecha fases de un planeta inferior y superior, respectivamente

El ciclo de las fases de los planetas presenta una diferencia importante con el de la Luna: mientras ésta alcanza su mayor brillo cuando se encuentra en su fase llena, no ocurre lo mismo para el caso de aquéllos. La causa es que, cuando los discos de Venus y de Mercurio se observan en su plenitud, esos planetas se encuentran a su mayor distancia de la Tierra.

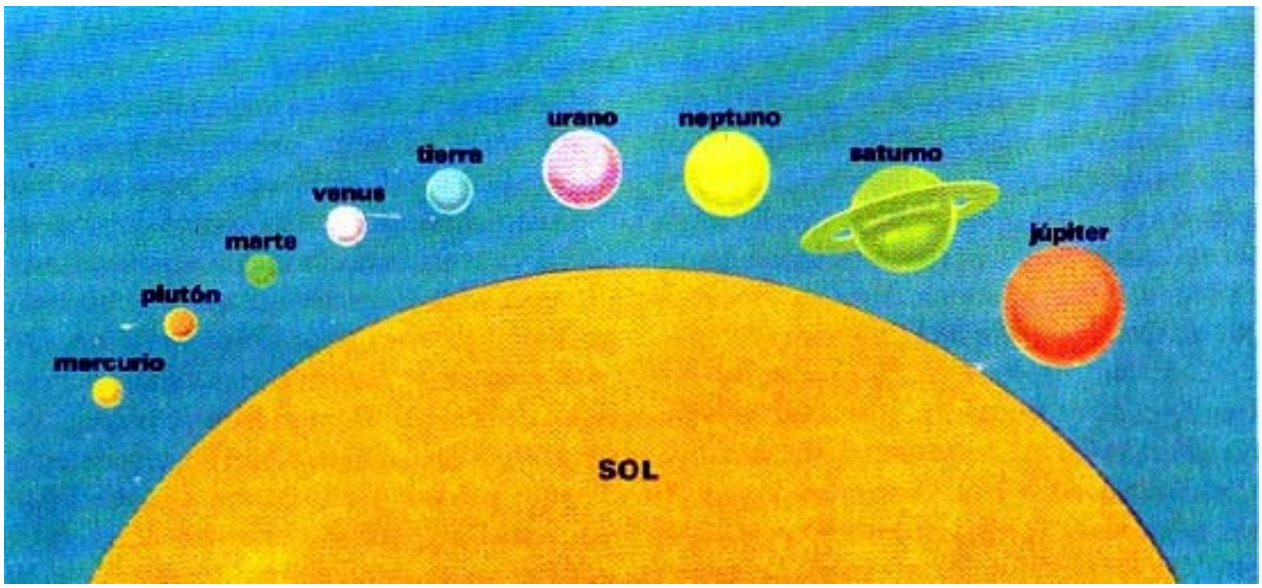
Lo expuesto hasta aquí sólo se aplica a los planetas que están más cerca del Sol que de la Tierra, llamados interiores, pero no a los planetas exteriores, que son los que giran más allá de la órbita terrestre.

Los planetas exteriores también presentan fases, pero sus posiciones relativas respecto al Sol y la Tierra son tales que nunca se observa, desde ésta, menos de la mitad de sus discos iluminados. En el caso de los planetas más lejanos, la región del disco que permanece en sombras vista desde la Tierra es despreciable, por lo que no puede hablarse propiamente de fases.

4. Planetas "antiguos" y planetas "nuevos"

Hasta aquí sólo se ha hablado de los planetas Mercurio, Venus, Tierra, Marte, Júpiter y Saturno, cuando es sabido que existen otros tres: Urano, Neptuno y Plutón. El motivo de esta separación es que natos tres planetas sólo pueden ser vistos con ayuda de un telescopio; más concretamente, en el caso de Plutón ha de emplearme un potente telescopio.

Por consiguiente, no es de extrañar que los 6 primeros planetas fueran familiares u los observadores de los cielos desde la In hl remota Antigüedad, aunque la Tierra ►n► siempre fue considerada un planeta, y que constituyeran, junto con el Sol y la Luna, los únicos componentes del sistema planetario conocido en la época.

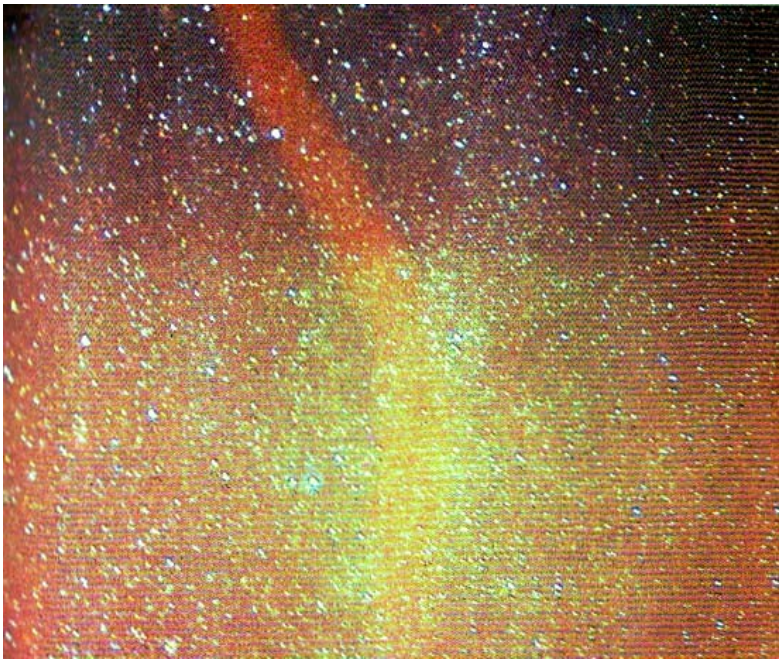


Planetas del Sistema Solar ordenados de acuerdo con sus dimensiones. En el gráfico se han respetado las relaciones numéricas entre los diámetros de los planetas.

Durante siglos el número de los planetas conocidos permaneció inalterado, pero mi 1781 William Herschell, estudiando un pequeño grupo de estrellas descubrió en alta proximidades un astro que no podía atar catalogado como tal. Reacio a considerarlo un nuevo planeta, llegó a la conclusión de que se trataba de un cometa, dándolo a conocer como tal. Sin embargo, el estudio detallado de su órbita, la observación de su disco y la falta de envoltura gaaeosa, obligaron a considerarlo como un Muevo componente del Sistema Solar, al llar He dio el nombre de Urano.

El descubrimiento del siguiente planeta, Neptuno, tuvo lugar por vías muy diferencia, El estudio del movimiento del astro recién descubierto, Urano, demostró que no 0 acomodaba a las predicciones que la Mecánica celeste permitía realizar acerca de sus características. Para explicar estas anomalías, Adams en Gran Bretaña y Le Verrier en Francia llegaron inmediatamente a la conclusión de que debía existir algún cuerpo celeste desconocido, cuya acción sobre Urano fuera responsable de las perturbaciones observadas en su movimiento.

En función de esta hipótesis y con los métodos de la mecánica celeste se calcularon la masa y las características de la órbita del planeta perturbador, con lo cual se podía proceder a su localización en el firmamento. Este último logro fue obra del astrónomo Gall, del observatorio de Berlín, quien a instancias de Le Verrier comenzó la búsqueda del nuevo planeta, localizándolo en la noche del 25 de septiembre de 1846 muy cerca de la posición predicha por el astrónomo francés.

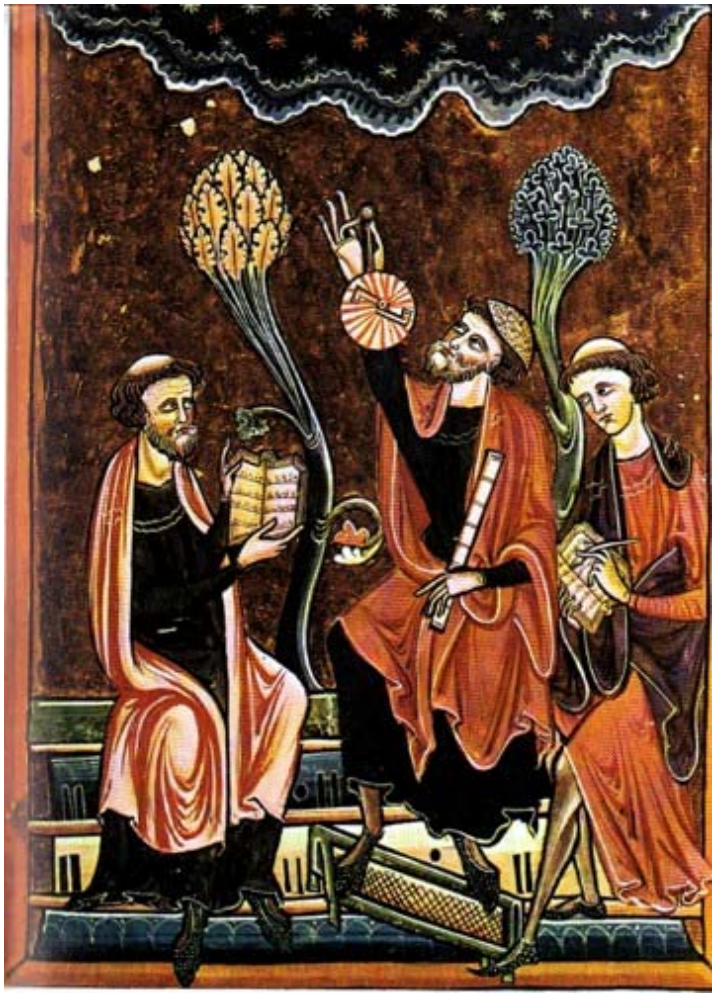


Traza gaseosa de un meteorito de regular tamaño fija sobre el fondo de las estrellas.

Ciertas observaciones metódicas demostraron más adelante que la presencia de Neptuno no era suficiente para explicar las anomalías en el movimiento de Urano. Como consecuencia de ello, a principios del presente siglo, el astrónomo norteamericano Percival Lowell supuso la existencia de otro planeta perturbador más allá de Neptuno, y dedujo los parámetros necesarios para su localización. El gran alejamiento de este planeta y su relativa pequeñez hacían de él un astro de muy débil luminosidad y, consecuentemente, su localización resultó muy laboriosa. Fueron precisas numerosas observaciones hasta que, en enero de 1930, exactamente 14 años después de la muerte de Lowell, el astrónomo C. W. Tombaugh consiguió fotografiar el nuevo planeta, al que llamó Plutón.

5. Las distancias en el Sistema Solar

Decir que Júpiter tiene un diámetro medio de 138.000 km, o que Saturno se encuentra a una distancia media del Sol de 1.427.700.000 km, no es aclarar gran cosa, ya que la experiencia cotidiana no trata con números tan elevados, y por tanto éstos carecen de toda referencia intuitiva para nosotros.



Miniatura del siglo mil conservada en la Biblioteca Nacional de París, en la que se halla representado un astrónomo medieval elevando un astrolabio hacia el firmamento.

Para intentar proporcionar una imagen familiar de estas grandes cifras que intervienen en los dominios del Sistema Solar, reduciremos arbitrariamente todas sus dimensiones, pero conservando las relaciones mutuas. Concretamente se supondrá que el diámetro de la Tierra, en realidad de 12.760 km, se reduce a 1 dm y que todas las demás dimensiones del Sistema Solar se reducen en la misma relación.

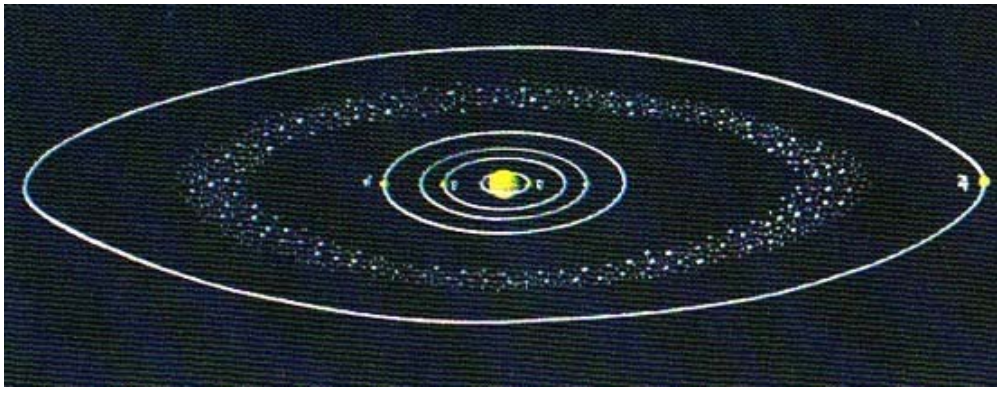
Si tal ocurriera, el Sol se concentraría en una esfera de 11 m de diámetro (la altura de un edificio de 4 plantas) y el primer planeta, Mercurio, giraría a una distancia de 449 m, siendo su diámetro de sólo 3 cm. Venus giraría a 841,6 m y tendría 9,5 cm de diámetro. La Tierra estaría a una distancia apenas superior a 1 km, con diámetro

de 1 dm. El siguiente astro, Marte, giraría u 1.785 m y su diámetro sería 5,3 cm. Júpiter se encontraría nada menos que a 6 km y constituiría una esfera de 1 m de diámetro. Dimensiones escasamente menores tendrían Saturno (94 cm de diámetro), que giraría a 11.192 m del Sol, mientras que Urano, con su diámetro de 4 dm, se moverla a 15 km de aquél. Finalmente, Neptuno, situado a 36 km del astro central, sería fina esfera de 4 dm de diámetro, y Plutón, a •16,4 km de distancia, sería algo mayor que Marte. (En la práctica astronómica se acostumbra medir las distancias que intervienen en los dominios del Sistema Solar tomando la distancia de la Tierra al Sol como unidad. A esta magnitud se le llama unidad astronómica, abreviadamente u.a., y las mediciones más precisas le asignan un valor de 149.598.000 km.)

De este esquema reducido del Sistema Solar deriva una conclusión inmediata: en El, casi todo es espacio vacío, y los planetas se mueven separados por distancias Die son enormes comparadas con sus dimensiones. El Sol es el único astro, cuyo diámetro está de acuerdo con tales distancias, pero aun así, visto desde Plutón, sólo sería un pequeño puntito luminoso.

6. Otros componentes del Sistema Solar

Junto con el Sol y los planetas existen una serie de astros que también forman parte del Sistema Solar.



Los asteroides se mueven en órbitas de tipo planetario en la región del espacio comprendida entre las órbitas de Marte y Júpiter.

En primer lugar están los satélites de los planetas, cuerpos rocosos, como éstos, que giran alrededor de los mismos sometidos a su atracción gravitatoria. En cierto modo se puede afirmar que las características del conjunto constituido por un planeta y un cortejo de satélites, recuerda, en menor escala, al conjunto del Sistema Solar.

Otros cuerpos celestes importantes son los asteroides, que se mueven, en su mayoría siguiendo órbitas de tipo planetario, en la región del espacio comprendida entre las trayectorias de Marte y de Júpiter. Su número se calcula en 50.000, aunque sólo se conocen unos 1.600, y sus dimensiones son variables, predominando los diámetros de 1 a 80 km.

Los astros más espectaculares del Sistema Solar son los cometas, que al acercarse al Sol aparecen rodeados de una enorme envoltura de gases de la que brota una cola también gaseosa, que puede extenderse varios millones de kilómetros por el espacio.

Finalmente, cabe citar los meteoritos, cuerpos rocosos, en general pequeños, que penetran en la atmósfera terrestre y se volatilizan dejando un trazo luminoso. Estos cuerpos celestes están relacionados con los asteroides, y muy especialmente con los cometas.

7. ¿Existen planetas posplutónicos?

Se ha especulado mucho acerca de la existencia de un nuevo planeta en el Sistema Solar, que estaría situado más allá de Plutón; incluso se le bautizó periodísticamente con el nombre de Riga. Se trata de una cuestión discutible, aunque existe un fundamento legítimo que puede haber servido de base para la noticia.

La historia del planeta posplutónico data de bastantes años: muy poco tiempo después de descubierto Plutón, se observó que todavía existían algunas anomalías en el movimiento de Urano, no explicadas por el descubrimiento del nuevo planeta. Por ello, C. W. Tombaugh, descubridor de Plutón, postuló la existencia de un décimo planeta del Sistema Solar. Sin embargo, una búsqueda exhaustiva llevada a cabo entre 1930 y 1945 no condujo a ningún resultado positivo, por lo que la hipótesis fue abandonada.

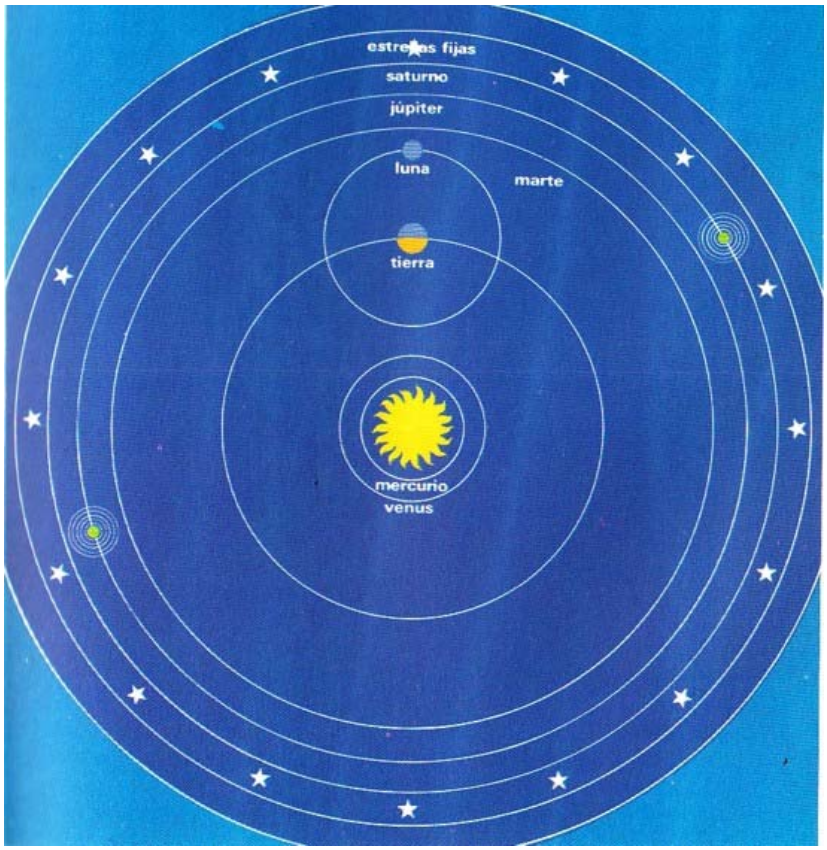
De cualquier modo, es indiscutible que la existencia de un planeta más allá de Plutón es un hecho no solamente posible, sino incluso probable, al menos hasta que se puedan explicar satisfactoriamente las causas de las perturbaciones de Urano y las observadas recientemente en el cometa Halley.

El que no se tenga ninguna prueba fotográfica de su existencia no es de extrañar, puesto que un décimo planeta estaría tan lejos de la Tierra que su brillo sería extremadamente débil y su movimiento aparente imperceptible. Un planeta de estas características se confundiría fácilmente con los millones de estrellas que se observan con un potente telescopio, y el único método seguro para identificarlo sería mediante el conocimiento teórico de su situación exacta en el firmamento y su posterior hallazgo en la situación prevista

Capítulo 2
La mecánica celeste

Contenido:

1. *Las leyes de Kepler de los movimientos planetarios*
2. *Movimientos planetarios*
3. *Ley de Bode-Titius sobre las distancias planetarias*
4. *Ley de la gravitación universal*
5. *Perturbaciones planetarias*
6. *El perihelio de Mercurio y la teoría de la relatividad de Einstein*
7. *Efecto de las mareas*



Esquema del Sistema Solar según el modelo de Copérnico

1. Las leyes de Kepler de los movimientos planetarios

El filósofo griego Aristarco de Samos (siglo III a.C.) creía que todos los cuerpos celestes, incluidas las estrellas, giraban alrededor del Sol (sistema heliocéntricos).

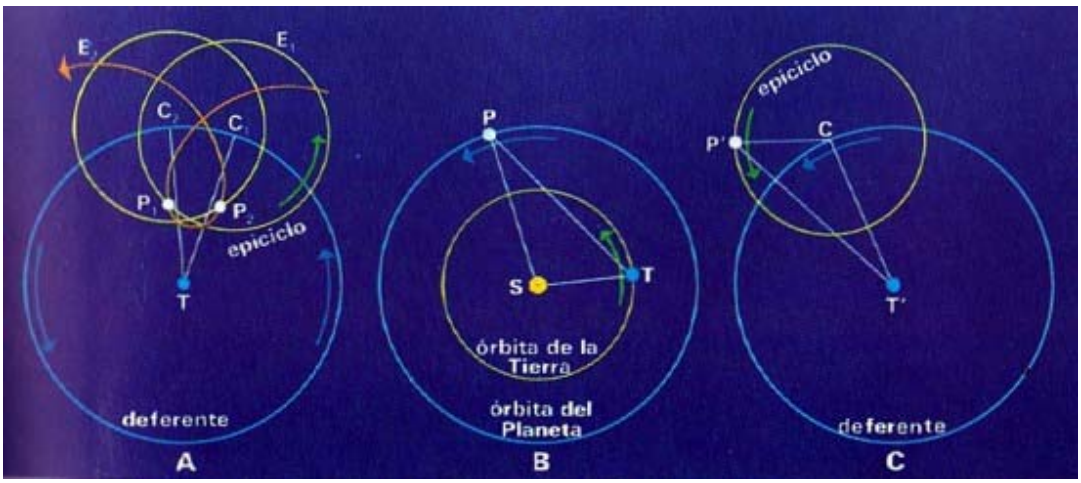
Esta doctrina no fue aceptada debido a que el pensamiento griego tenía profundamente arraigada la idea de que la Tierra era el centro inmóvil del Universo, en torno a la cual giraban los planetas, la Luna, el Sol y todo el firmamento estrellado.

El desarrollo riguroso de la teoría del Universo geocéntrico se debe al astrónomo Claudio Ptolomeo, que realizó sus trabajos durante el siglo II en la ciudad de Alejandría. El modelo elaborado por Ptolomeo pretendía explicar el movimiento de todos los cuerpos celestes en el firmamento, suponiendo que los movimientos reales tenían lugar sobre unas circunferencias, los epiciclos, cuyos centros giraban a la vez sobre otras circunferencias centradas en la Tierra, los llamados círculos deferentes.

Estas teorías estuvieron en vigor durante unos 14 siglos, hasta que en 1543 Nicolás Copérnico propuso un nuevo modelo en función de considerar que el Sol era el verdadero centro de los movimientos planetarios, los cuales, además, tendrían lugar sobre circunferencias. Al principio este modelo no tuvo aceptación, al no mejorar las explicaciones de Ptolomeo acerca de los movimientos observados, y también por el prejuicio todavía vigente de que la Tierra era el centro de todo el Universo sensible.

Mapa celeste trazado de acuerdo con el modelo de Tycho Brahe, que se encuentra en el libro "Harmonía microcósmicas" de Andrés Cellari, publicado en Amsterdam en 1661.

Uno de los astrónomos que se interesó por la teoría de Copérnico, aunque no creyera en su veracidad, fue el danés Tycho Brahe. Durante su vida acumuló gran cantidad de datos, obtenidos mediante ingenios fabricados por él mismo, algunos de los cuales eran de su invención. La precisión de sus observaciones resulta notable para aquella época, puesto que Tycho vivió antes de que se inventaran los anteojos astronómicos, y por tanto ninguno de sus aparatos disponía de mecanismos ópticos.



Movimiento de un planeta superior según el sistema de Ptolomeo. A) Posiciones aparentes de un planeta en el firmamento explicados por el sistema de Ptolomeo. B) Movimiento real del planeta alrededor del Sol y su posición relativa a la Tierra en movimiento. C) El mismo movimiento, o sea, las mismas posiciones relativas Tierra planeta, explicadas por el sistema de Ptolomeo.

Principales características físicas del Sistema Solar

Nombre	Diámetro ecuatorial		Masa		Período de rotación sobre sí mismos (duración del día)	Albedo
	En km	En diámetros terrestres	En función de la masa terrestre	En función de la masa solar		
Mercurio	4.666	0,366	0,0543	1/6.120.000	55^{d}	0,06
Venus	12.075	0,947	0,813	1/408.645	243^{d}	0,66
Tierra	12.757	1	1	1/332.484	$23^{h}56^{m}4^{s}$	0,39
Marte	6.792	0,582	0,107	1/3.110.000	$24^{h}37^{m}23^{s}$	0,16
Júpiter	142.880	11,2	317,4	1/1.047,4	$9^{h}50^{m}$	0,42
Saturno	120.960	9,48	95	1/3.501,6	$10^{h}14^{m}$	0,45
Urano	47.170	3,7	14,5	1/22.869	$10^{h}42^{m}$	0,55
Neptuno	44.990	3,53	17,6	1/88.889	$15^{h}48^{m}$	0,66
Plutón	5.800	0,45	?		$6^{d},4(?)$	–
Sol	1.392.000	109,2	332.484	1	25^{d}	–

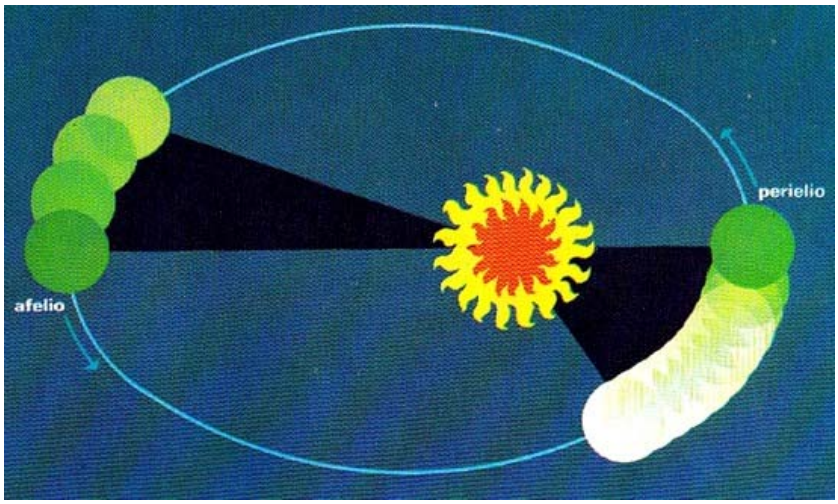
Principales características orbitales de los planetas

Nombre	Símbolo	Período de revolución alrededor del Sol (duración del año)		Distancia máxima del Sol		Inclinación de la órbita respecto al plano de la eclíptica
		Años	Días	En u.a.	En millones de km	
Mercurio	☿		88	0,387099	57,94	7° 0'2
Venus	♀		224,7	0,723332	108,26	3°23'7
Tierra	♁	1	0	1,0000002	149,68	–
Marte	♂	1	321,7	1,523688	228,06	1°51'
Asteroides				2,7	40	
Júpiter	♃	11	314,8	5,202561	778,69	1°18'3
Saturno	♄	29	167	9,554747	1.430,10	2°29'4
Urano	♅	84	7,4	19,21814	2.876,5	0°46'7
Neptuno	♆	164	280,3	30,10957	4.506,6	1°46'4
Plutón	♇	248	157,1	39,51774	5.914,8	17° 8'8

A partir de sus observaciones, Tycho Brahe llegó a la conclusión de que tanto el modelo de Ptolomeo como el de Copérnico no se adecuaban a la observación, y en consecuencia propuso un tercer modelo que combinaba distintos elementos de cada uno de ellos. Según su modelo, el Sol y la Luna giraban alrededor de la Tierra, mientras que los planetas se movían alrededor del Sol.

Poco antes de la muerte de Tycho Brahe comenzó a trabajar como ayudante suyo Johannes Kepler, que en consecuencia pudo disponer del inmenso caudal de información que en el largo plazo le permitieron enunciar sus tres famosas leyes.

1. *Todos los planetas se desplazan alrededor del Sol siguiendo órbitas elípticas. El Sol está en uno de los focos de la elipse*
2. *el radio vector que es la línea que une el centro del planeta con el Sol, barre áreas iguales en tiempos iguales*
3. *El cuadrado del período de revolución de un planeta en su órbita es proporcional al cubo del semieje mayor de dicha órbita.*



Según resulta de la segunda ley de Kepler, un planeta se mueve más rápidamente en el perihelio que en el afelio.

La primera ley describe simplemente la forma de la trayectoria de un planeta. Dadas las características de la misma, la distancia de un cuerpo celeste al Sol varía de un lugar a otro de la órbita. Se llama afelio al punto para el cual la distancia es máxima, y perihelio para el que es mínima.

Sistema geocéntrico de Ptolomeo en el que el Sol, la Luna, todos los planetas y el firmamento de las estrellas fijas giran alrededor de la Tierra situada en el centro del Universo.

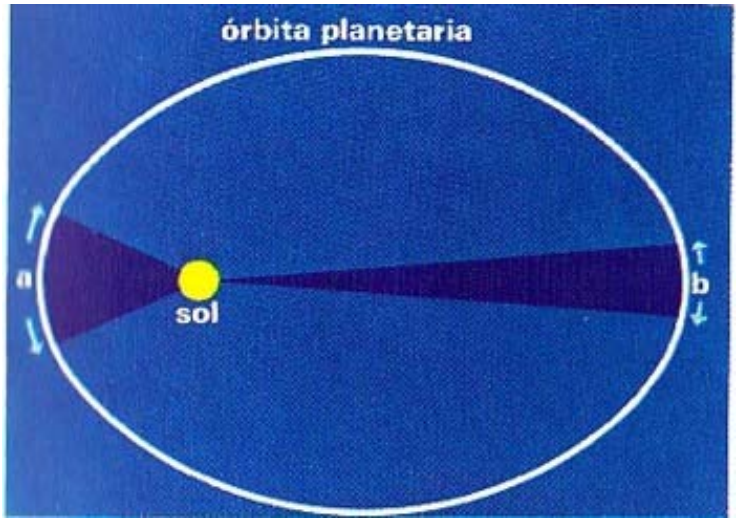
La segunda ley pone de manifiesto que la velocidad de un planeta será distinta para las diversas regiones de su trayectoria. Ello es consecuencia de la circunstancia de que el radio vector de un planeta no tiene una longitud constante, sino que es más largo cuando está más cerca del afelio que cuando está en las proximidades del perihelio. Por tanto, para que este radio vector se desplace sobre una misma área para intervalos de tiempo iguales, el planeta habrá de moverse más rápidamente en el perihelio que en el afelio.

Finalmente, la tercera ley proporciona una relación entre las dimensiones de la órbita y el tiempo de revolución.

2. Movimientos planetarios

Establecidas las leyes de Kepler, conviene describir las características de los movimientos planetarios que no figuran en las mismas.

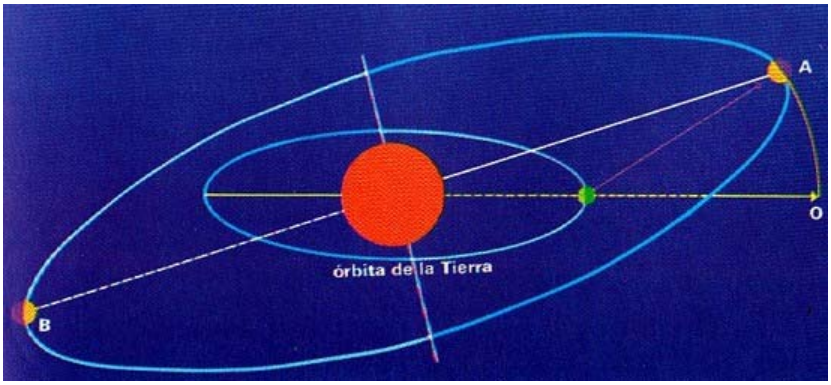
Todas las trayectorias de los planetas, salvo la de Mercurio y sobre todo la de Plutón, son elipses de forma muy aproximada a la circunferencia. Este hecho se expresa matemáticamente diciendo que son elipses de pequeña excentricidad.



De acuerdo a la segunda ley de Kepler, un planeta recorre en tiempos iguales los fragmentos de órbita a y b, de tal manera que las áreas sombreadas tienen igual superficie.

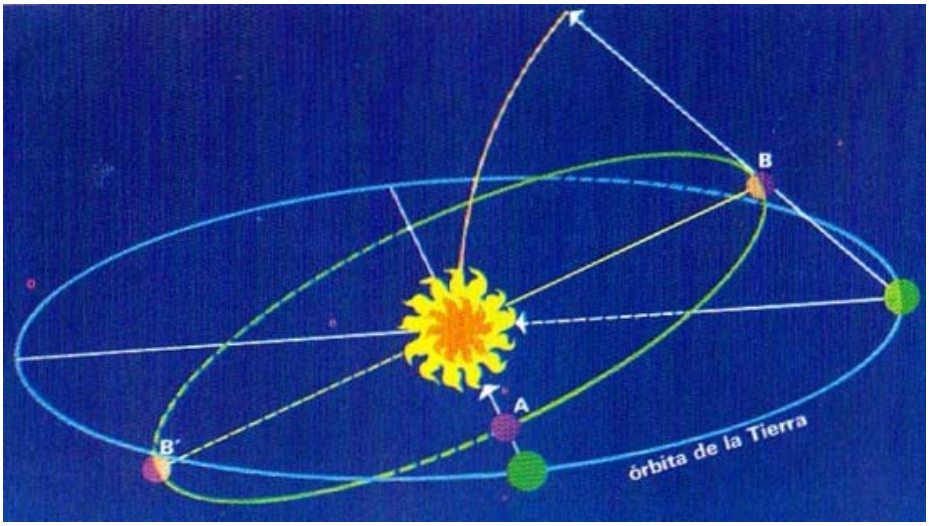
Los planos que contiene cada órbita planetaria determinan un ángulo muy pequeño con el plano del ecuador solar y también con el de la órbita terrestre, es decir, la eclíptica. Excepción a esta regla son de nuevo Mercurio, cuya órbita presenta una inclinación de 7° con el plano de la eclíptica, y Plutón, que determina un ángulo del 17° 19' con la misma.

Otra cualidad importante del movimiento planetario es que si se imaginara el Sistema Solar visto desde su cara norte, definida como aquella que contiene el polo norte terrestre, se observaría que todos los planetas se mueven en el sentido contrario al de las agujas de un reloj.



Cuando un planeta superior se halla en el punto A se encuentra en oposición, y se observa en el punto de la esfera celeste diametralmente opuesto al Sol. Cuando un planeta exterior se halla en el punto B se dice que se encuentra en conjunción, y se observa alineado con el Sol, pero del lado opuesto al mismo.

Además de su movimiento de traslación alrededor del Sol, todos los planetas presentan un movimiento de rotación sobre sí mismos al igual que la Tierra. Es decir, su superficie está sometida a la sucesión de los días y de las noches, aunque estos conceptos no impliquen exactamente los mismos fenómenos a los que estamos acostumbrados en la Tierra.



Se dice que un planeta inferior se encuentra en conjunción inferior con el Sol respecto a la Tierra, cuando los tres astros están alineados y el planeta se encuentra entre la Tierra y el Sol. Debido a la inclinación de la órbita de los planetas inferiores respecto a la de la Tierra, el aspecto del planeta no es el mismo si la conjunción tiene lugar en los puntos A, B y B'. En el primer caso el planeta se verá pasar por delante del Sol, en el segundo caso pasará por encima y en el tercero, por debajo

El caso extremo es el de los planetas más alejados, desde los cuales el Sol se ve como una estrella más entre los millones de astros que pueblan el espacio, y por tanto la presencia o ausencia del Sol en sus firmamentos no entraña ningún fenómeno apreciable.

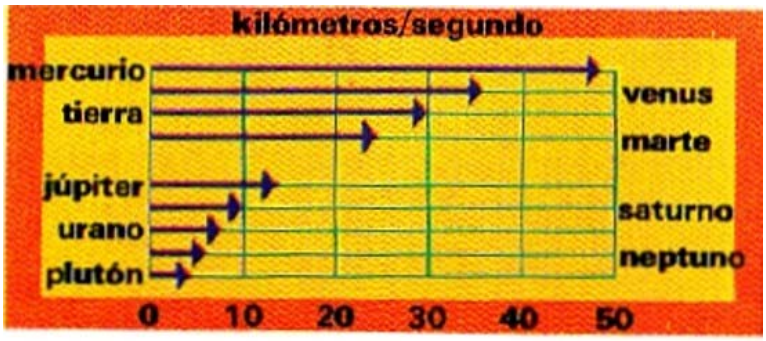


Gráfico de las velocidades medias de cada planeta en su órbita, expresadas en kilómetros por segundo.

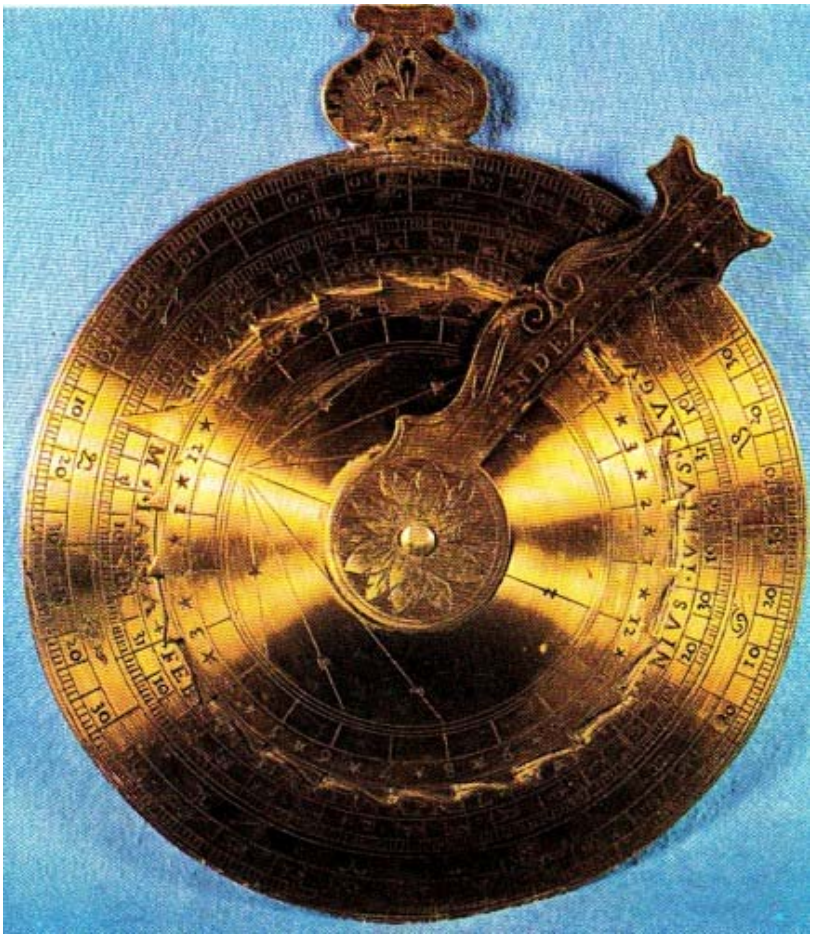
En un principio debería ser relativamente fácil la determinación del período de rotación de un planeta a partir de la observación telescópica de la superficie.

Comparación de las distancias de los planetas al Sol con las predichas por la ley de Bode

Nombre del cuerpo celeste	Distancia al Sol (u.a.)	Distancia al Sol predicha por la ley de Bode
Mercurio	0,39	0,4
Venus	0,72	0,7
Tierra	1	1
Marte	1,52	1,6
Asteroides	2,65 (promedio)	2,8
Júpiter	5,2	5,2
Saturno	9,54	10
Urano	19,19	19,6
Neptuno	30,07	38,8
Plutón	39,52	77,2

El procedimiento más sencillo consistiría en seguir el movimiento de algún detalle permanente de las superficies planetarias para deducir del mismo el período de

rotación. Desgraciadamente, este procedimiento tan fácil no es aplicable en la mayoría de los casos, puesto que en general las superficies no son observables con suficiente claridad para poder fijar ningún detalle superficial. En la actualidad los astrónomos han puesto a punto procedimientos más complejos, mediante los cuales han determinado el período de rotación de los planetas además de conseguir mayor precisión respecto a los períodos susceptibles de determinación visual.



Cuadrante y astrolabio de Rajas construido en el siglo XVIII, perteneciente a la colección del Conservatorio de Artes y Oficios de París.

Hoy se sabe que todos los planetas giran sobre sí en el mismo sentido en que tiene lugar su movimiento de traslación, es decir, de oeste a este, salvo Urano y Venus, que giran en sentido contrario. La rotación de Venus, además de ser retrógrada, presenta la particularidad de ser más lenta que su traslación alrededor del Sol, y así

mientras en realizar esta última tarda 224,7 días, el planeta gira alrededor de su eje una vez cada 243 días terrestres.

3. Ley de Bode-Titius sobre las distancias planetarias

Si se escribe la sucesión numérica de las distancias que separan a los planetas del Sol se observa que los términos de esta sucesión presentan entre sí una relación análoga a la existente entre los términos de una sucesión geométrica. Esta relación fue enunciada por Titius, pero pasó desapercibida para el mundo científico; fue el astrónomo alemán J. E. Bode quien la difundió, dándola a conocer de nuevo en 1772.

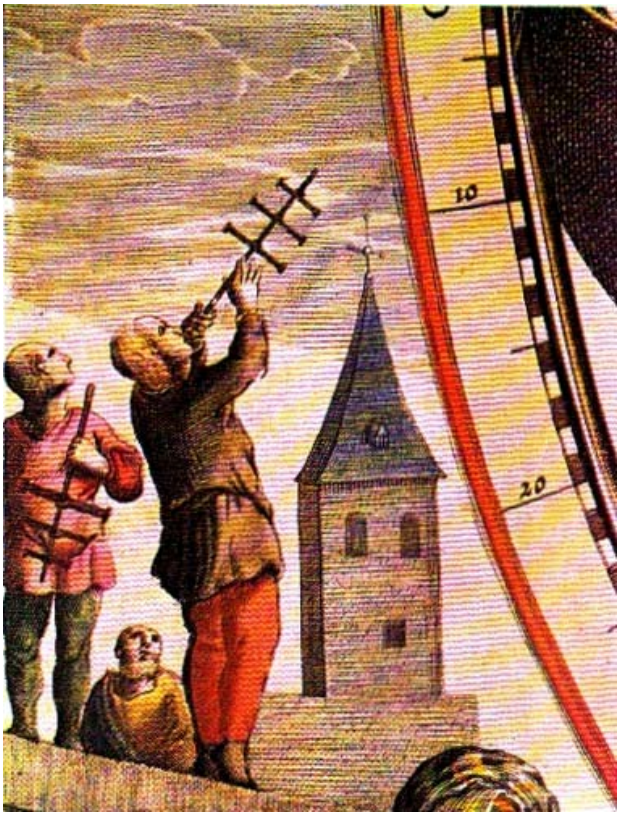
Cuadrante ecuatorial de bolsillo de principios del siglo XVIII, perteneciente a la colección del Conservatorio de Artes y Oficios de París

Esta relación suele enunciarse generalmente del siguiente modo: escríbase la serie numérica 0, 3, 6, 12, 24,..., súmese 4 a cada uno de sus términos y divídase por

10; la sucesión que se obtiene, o sea 0,4; 11,7; 1,0; 1,6; 2,8;..., coincide con la de los valores de las distancias de los planetas al Sol medidas en unidades astronómicas.

El descubrimiento de Urano con posterioridad al enunciado de la relación de Bode y la comprobación de que su distancia era la que le correspondía según la misma, fue uno de sus éxitos.

Todavía más espectacular fue la predicción de la existencia de algún cuerpo celeste entre Marte y Júpiter basada en la relación de Bode y confirmada por el descubrimiento de los asteroides. Según dicha relación el planeta que ocupa el quinto lugar en el Sistema Solar debe encontrarse a una distancia del Sol de 2,8 u.a., mientras que Júpiter, el planeta que ocupaba dicho lugar oficialmente en tiempo de Bode, se encuentra a una distancia de 5,2 u.a.



Astrónomo realizando observaciones con una flecha astronómica, según un dibujo perteneciente al libro "Harmonía microcósmica" de Andrés Cellari (Amsterdam, 1661).

Este hecho indujo a los astrónomos a suponer la existencia de un planeta desconocido entre Marte y Júpiter, y para localizarlo se esbozó un plan de investigación sistemática de todas las regiones cercanas a la eclíptica. En 1801, antes de que estos proyectos dieran sus frutos, el abate Piazzi, mientras escudriñaba el cielo en busca de cometas, descubrió accidentalmente el asteroide Ceres, que creyó era el quinto planeta. Más tarde se constató que en realidad había muchos cuerpos celestes moviéndose entre Marte y Júpiter, aunque los cálculos pertinentes demostraron que su distancia media al Sol coincidía con las 2,8 u.a. preestablecidas por la relación de Bode-Titius.

Los últimos planetas descubiertos, Neptuno y Plutón, ya no cumplen esta relación: el segundo se encuentra a la distancia que correspondería al primero, mientras que éste se encuentra a una distancia que no aparece en la sucesión de Bode.

Esta relación no ha podido establecerse de forma coherente dentro de la mecánica celeste, o dicho de otro modo: no ha podido ser deducida a partir de leyes más sencillas. Debido a ello, algunos autores opinan que la relación entre las distancias planetarias por ella postulada es fruto simplemente de la casualidad, mientras que otros piensan que su justificación ha de buscarse en las condiciones particulares en que tuvo lugar la formación del Sistema Solar.

4. Ley de la gravitación universal

La idea de que el movimiento planetario estaba regido por una fuerza ejercida por el Sol sobre los planetas surgió de un modo informal con anterioridad a que Isaac Newton en 1687, la desarrollase de modo riguroso.

En realidad Newton había trabajado en ello desde mucho antes, pero mantuvo durante años sus resultados fuera del conocimiento público por considerarlos sólo parciales. Cuando creyó que todas sus teorías se correlacionaban de modo coherente, y que además explicaban las características de los movimientos observados en el mundo físico, las dio a conocer en una obra llamada *Philosophiae Naturalís Principia Mathematica*.

En esta obra Newton exponía la que después se ha llamado ley de la gravitación universal, en la cual se afirma que toda partícula de materia del Universo atrae a cualquier otra partícula con una fuerza que es directamente proporcional al producto

de las masas de ambas partículas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa.

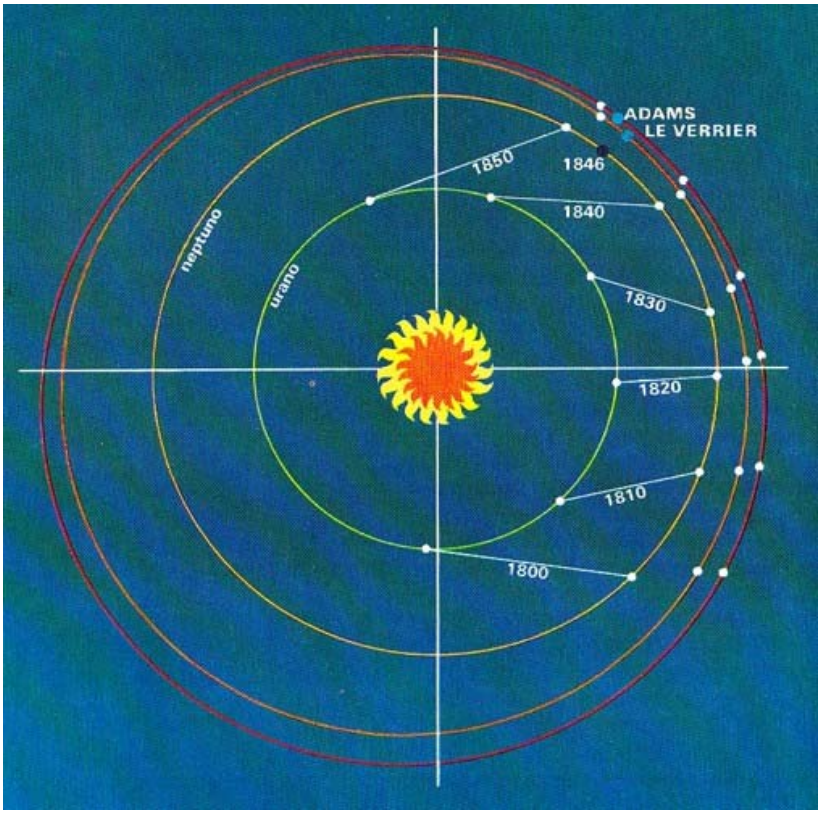
Esta proporcionalidad puede transformarse en una ecuación introduciendo la constante G, llamada constante de la gravitación. La ecuación es:

$$F = G\frac{m \cdot m'}{r^2}$$

El valor exacto de la constante fue determinado por primera vez empíricamente por Cavendish a finales del siglo XVIII, casi cien años después de que Newton enunciara la ley en cuestión.

La dirección en que actúa la fuerza de atracción está determinada por la recta que une los dos cuerpos.

La ley de la gravitación no es la única contribución de Newton a la ciencia. También estableció las bases de una rama de la física a la que generalmente se conoce con el nombre de mecánica racional, que permite calcular las posiciones y velocidades que tomará en cualquier momento un cuerpo del que se conozcan su posición y su velocidad actuales, y lo que se llama su ecuación del movimiento. Es decir, conociendo el estado de movimiento presente de un móvil, la mecánica newtoniana permite predecir con exactitud dicho estado de movimiento para cualquier instante de su evolución.



Comparación de las órbitas predichas teóricamente por Adams y Le Verrier Dura el planeta Neptuno, con su trayectoria real.

Naturalmente, la mecánica racional puede aplicarse a cualquier tipo de móvil, y en particular cuando se aplica a los cuerpos celestes recibe el nombre de mecánica celeste.

5. Perturbaciones planetarias

Las leyes de Kepler son una consecuencia inmediata de las leyes más generales de la mecánica cuando se aplican a los movimientos planetarios.

La deducción de las leyes de Kepler a Partir de las leyes más generales de la mecánica se realiza considerando que únicamente existen dos cuerpos: el planeta que tic mueve y el Sol que está en reposo en uno de los focos de las órbitas. Si se pretenden tomar en cuenta todas las condiciones que se dan en la realidad, es preciso concluir que la atracción gravitatoria no se ejerce solamente entre el Sol y los planetas, sino también entre los mismos planetas, lo que da a las leyes de Kepler un carácter aproximativo.

El mismo Kepler tuvo conciencia de la limitación de sus leyes, aunque no supo explicarla. Sabía que las mismas no se cumplían rigurosamente en los casos de Júpiter y Saturno. Actualmente se conoce que la causa de ello estriba en que la gran masa de ambos planetas y su relativa cercanía son factores que hacen que la fuerza de atracción mutua no sea despreciable. Por el contrario, en los demás casos las influencias mutuas son menores, y en una primera aproximación se puede aceptar que siguen Ian leyes elaboradas por Kepler, aunque mediciones muy precisas siempre encontrarán pequeñas diferencias entre las posiciones observadas y las preestablecidas.

De un modo más general se puede afirmar que la resolución rigurosa del problema del movimiento planetario, es decir, la predicción de las posiciones y velocidades futuras a partir de las actuales, resulta imposible a nivel de los conocimientos presentes, puesto que las ecuaciones matemáticas que aparecen cuando intervienen más de dos cuerpos no tienen solución exacta.

El procedimiento que se emplea para la resolución de este problema consiste en tomar una aproximación del movimiento real, considerando para ello intervalos muy cortos de tiempo, durante los cuales cabe aceptar que el planeta se mueve de acuerdo con las leyes de Kepler. Para cada intervalo de tiempo el resultado será distinto según las perturbaciones que ejercen en cada instante los demás planetas en el movimiento del astro de que se trate, y el movimiento real se obtiene entonces como yuxtaposición de todos estos resultados Parciales.

Con este método se puede calcular la posición de un planeta en el futuro, siempre y cuando se conozcan con suficiente exactitud las masas y órbitas de los planetas perturbadores, o sea, de los más cercanos. A la inversa, si se conocen las perturbaciones que sufre un planeta a lo largo de su trayectoria durante un tiempo suficientemente largo, se pueden calcular las masas y posiciones de los planetas perturbadores. Ya se ha dicho que el estudio de las perturbaciones del movimiento de Urano permitió, primero sobre el papel y después en el firmamento, descubrir la existencia de los planetas Neptuno y Plutón.

6. El perihelio de Mercurio y la teoría cíe la relatividad de Einstein

Las mediciones cada vez más precisas, llevadas a cabo durante el siglo pasado, de las características de la órbita de Mercurio, pusieron de manifiesto la existencia de perturbaciones en su movimiento que no podían atribuirse a la mera presencia de los planetas ya conocidos. Concretamente, se observó que el perihelio de Mercurio se desplazaba mucho más rápido de lo que preveía la teoría de las perturbaciones.

La primera hipótesis para explicar esta anomalía consistió en suponer que existía un planeta más cercano al Sol que Mercurio, al que se llamó Vulcano, responsable de las perturbaciones. De acuerdo con ello se hicieron los cálculos pertinentes para determinar los elementos de su órbita y se comenzó su búsqueda en el firmamento. Sin embargo, todos los intentos fracasaron y Vulcano no apareció, con lo cual quedó sin explicación el avance observado en el movimiento del perihelio de Mercurio.

Esta situación se mantuvo hasta que en 1917 Einstein desarrolló su teoría general de la relatividad, en la cual la mecánica de Newton aparece como un caso particular válido para aquellos problemas en que intervienen pequeñas masas y bajas velocidades, es decir, para las condiciones reinantes en nuestro mundo cotidiano.

Se pensó entonces que para el estudio del movimiento del planeta Mercurio, el astro más cercano a la gran masa solar, deberían aplicarse las teorías de Einstein en lugar de las fórmulas clásicas de la mecánica celeste. Realizados los cálculos pertinentes, se obtuvo con gran aproximación el valor observado empíricamente para el desplazamiento del perihelio de Mercurio.

Este resultado constituyó una importante confirmación experimental de la teoría general de la relatividad de Einstein, y es todavía uno de los más firmes soportes de esta teoría contra sus detractores.

7. Efecto de las mareas

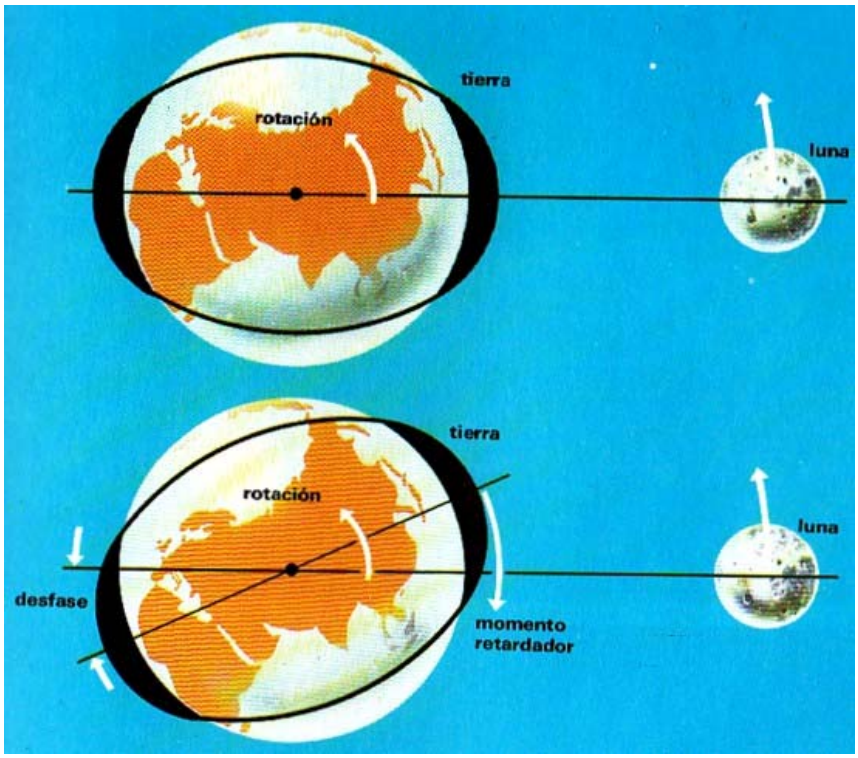
Algunos satélites muestran siempre la misma cara al astro principal. En este caso se dice que el satélite tiene una rotación sincrónica.

La causa de ello reside en el fenómeno de las mareas, que en la superficie terrestre se manifiesta mediante un aumento en el nivel de las aguas de los océanos, seguido por un descenso del mismo, acontecimientos ambos que tienen lugar dos veces cada 24 horas por influjo de la atracción gravitatoria lunar.

A continuación se analizará la relación de las mareas con los períodos de rotación de los satélites, considerando para ello el caso particular de la Tierra y la Luna.

En primer lugar cabe estudiar de qué manera las mareas influyen actualmente en el período de rotación de la Tierra, para comprender de qué forma en el pasado pudieron influir en el de la Luna hasta sincronizarlo con su período de traslación respecto a la Tierra.

Si las partes líquidas de la Tierra tuviesen una perfecta fluidez y sus partes sólidas una elasticidad también perfecta, los movimientos producidos por las mareas habrían de tener lugar sin rozamientos y los dos abombamientos opuestos de las aguas del océano habrían de estar situados exactamente sobre la línea en que une los centros de la Tierra y de la Luna. Sin embargo, la situación real es otra, puesto que existen fuerzas de rozamiento entre las partes sólidas y líquidas de la Tierra, por lo que los abombamientos no pueden seguir instantáneamente los movimientos de la Luna, retrasándose respecto a la posición de la misma.



La formación de mareas a causa de la atracción gravitatoria de la Luna (arriba) es perturbada por los rozamientos entre las partes liquidas y sólidas de nuestro planeta (abajo). Debido a ello se produce un sistema de fuerzas que frena el

movimiento de rotación de la Tierra y como consecuencia se acelera el movimiento orbital de la Luna.

Como consecuencia de estos rozamientos las mareas disipan energía, igual que cuando se frotan entre sí dos cuerpos sólidos produciendo calor, disipación que se efectúa a expensas de la energía del movimiento de rotación de la Tierra, el cual, en consecuencia, se hace más lento. Por otra parte, los principios de la mecánica implican que si la Tierra gira más despacio sobre sí misma, la Luna deberá moverse sobre su trayectoria más aprisa, así como también a mayor distancia de la Tierra.

Es decir, el efecto actual de las mareas es alargar la duración del día de la Tierra y alejar la Luna de ésta. Naturalmente, ambos efectos son muy pequeños y sólo se ponen de manifiesto al cabo de muchos miles de años.

Considerando el caso inverso, es decir, los efectos de la atracción gravitatoria de la Tierra sobre la Luna, se comprobará que son mucho mayores que los ejercidos por esta última sobre la primera.

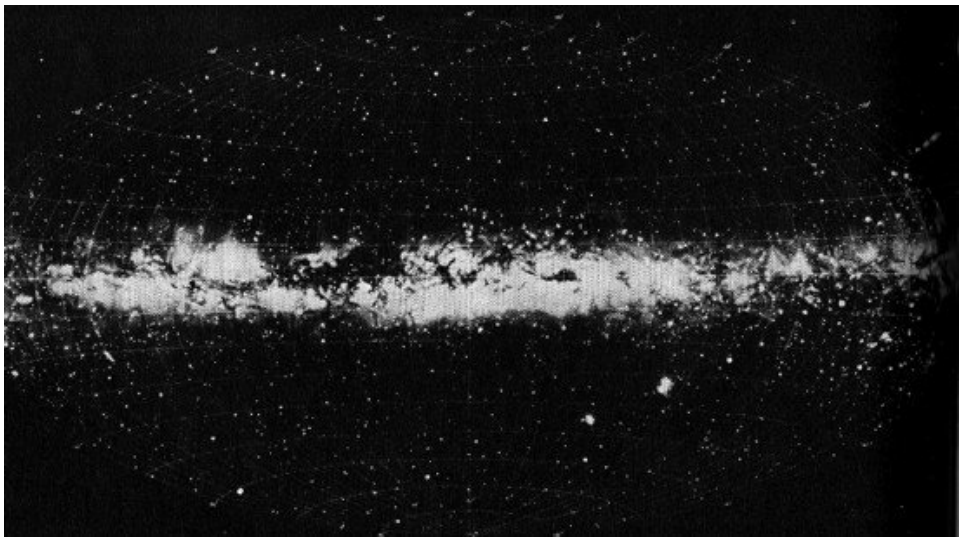
Imagínese en el pasado remoto, cuando la Luna giraba mucho más rápidamente sobre sí misma y la fuerte atracción originaba en su superficie mareas sólidas, es decir, aumentos y disminuciones en el nivel del Huelo lunar, movimientos que eran menos acusados que los de los océanos terrestres, puro que producían rozamientos mucho mayores y por tanto una gran disipación de energía, resultado de lo cual fue que el giro de la Luna se hizo progresivamente lento con bastante rapidez, hasta quedar con la misma cara mirando siempre hacia la Tierra. Una vez establecida esta situación cesaron las mareas, y el único efecto de la atracción gravitatoria terrestre consistió en producir una deformación permanente en las regiones de la Luna que estaban sobre la línea que une los centros de ambos astros. Como consecuencia se estabilizó el período de rotación lunar, puesto que al ser permanente la deformación producida por la atracción terrestre no existen movimientos internos capaces de disipar energía mediante rozamientos.

Lo dicho hasta aquí se puede generalizar y permite explicar todos los fenómenos de rotación sincrónica que se observan en el Sistema Solar.

Capítulo 3
Los astros del Sistema Solar

Contenido:

1. *El Sol*
2. *Planetas gigantes y planetas terrestres*
3. *El enigma de la rotación de Mercurio*
4. *La superficie inobservable de Venus*
5. *Marte, el falso gemelo de la Tierra*
6. *Júpiter, el gigante de los planetas*
7. *Los anillos de Saturno*
8. *Los confines del Sistema Solar: Urano, Neptuno y Plutón*
9. *Los satélites de los planetas*
10. *La Luna: el satélite natural de la Tierra*
11. *Asteroides*
12. *Cometas*



Proyección plana del firmamento realizada por dos astrónomos suecos mediante un montaje fotográfico. En la parte central de la fotografía se observa la faja brillante de la Vía Láctea

1. El Sol

El conjunto de estrellas que vemos brillar por la noche, junto con otros muchos millones de ellas que no distinguimos, o que sólo vemos como una nebulosidad a la que se ha bautizado con el nombre de Vía Láctea, constituye la galaxia de que forman parte el Sol y su cortejo de planetas.

Para observar el Sol es necesario utilizar dispositivos especiales, puesto que la gran luminosidad de su superficie imposibilita la observación directa.

Este inmenso sistema estelar visto de frente presentaría un aspecto análogo al de una espiral, en la cual el Sol es una estrella situada hacia el exterior de la misma, puesto que aun cuando se encuentra casi sobre el plano de simetría del sistema, su distancia al centro es de 27.000 años luz.

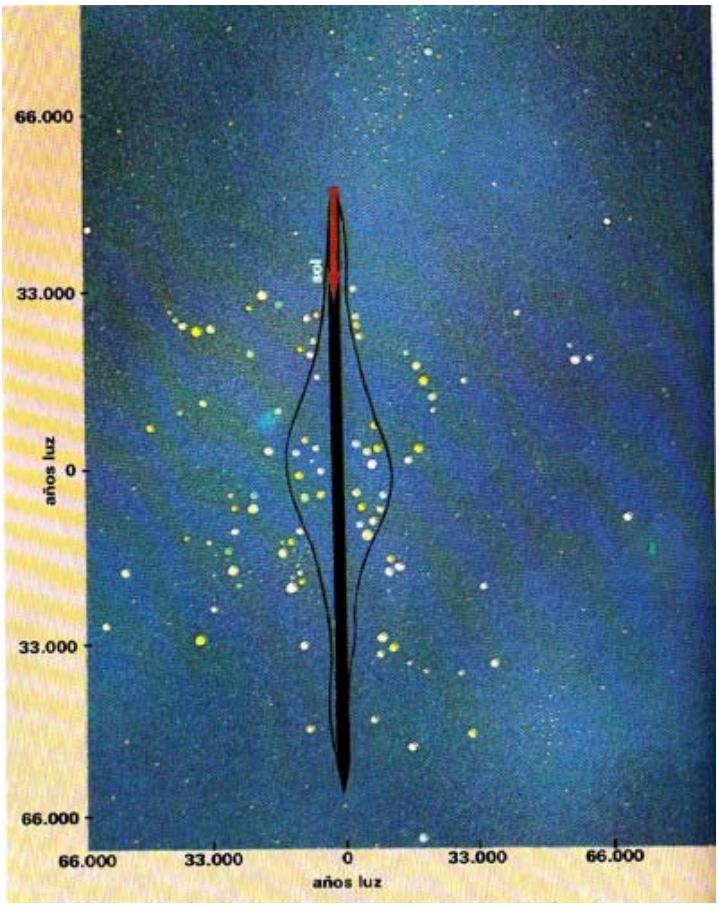
El sol es una esfera de gases: 70 % de hidrógeno, 27 % de helio y el 3 % restante constituido por pequeñas cantidades de otros elementos simples e incluso compuestos. Su masa es 332.300 veces mayor que la masa de la Tierra; su radio, de 696.000 km, es 109,3 veces mayor que el radio terrestre medio, y su temperatura superficial es del orden de los 6.000 °C.

Estos valores del radio, la masa y la temperatura superficial del Sol indican que puede catalogarse como una estrella de tipo medio, y por tanto tiene iguales características físicas que muchas de las estrellas que pueblan nuestro firmamento.

"Si llegáramos a ser capaces de describir por medio de una teoría general el modo como el Sistema Solar ha alcanzado su forma actual, podríamos abordar más fácilmente la cuestión de la existencia de otros sistemas análogos en el Universo, y tal vez la de otras formas de vida aparte de la nuestra."

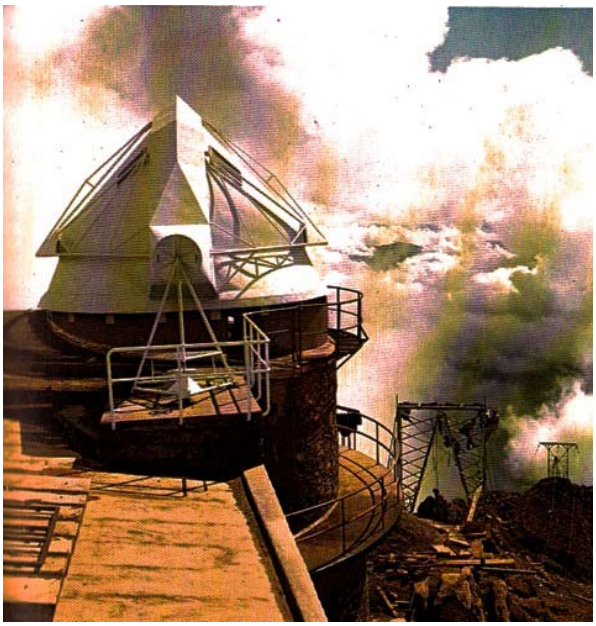
HANNES ALFVÉN

El Sol gira sobre sí mismo, pero no lo hace como un cuerpo sólido, sino que su velocidad de rotación es distinta para las diversas zonas. Así, el período de giro del Sol varía entre un valor mínimo de 25 días para las regiones ecuatoriales y un valor máximo de 30 días en las cercanas a los polos.



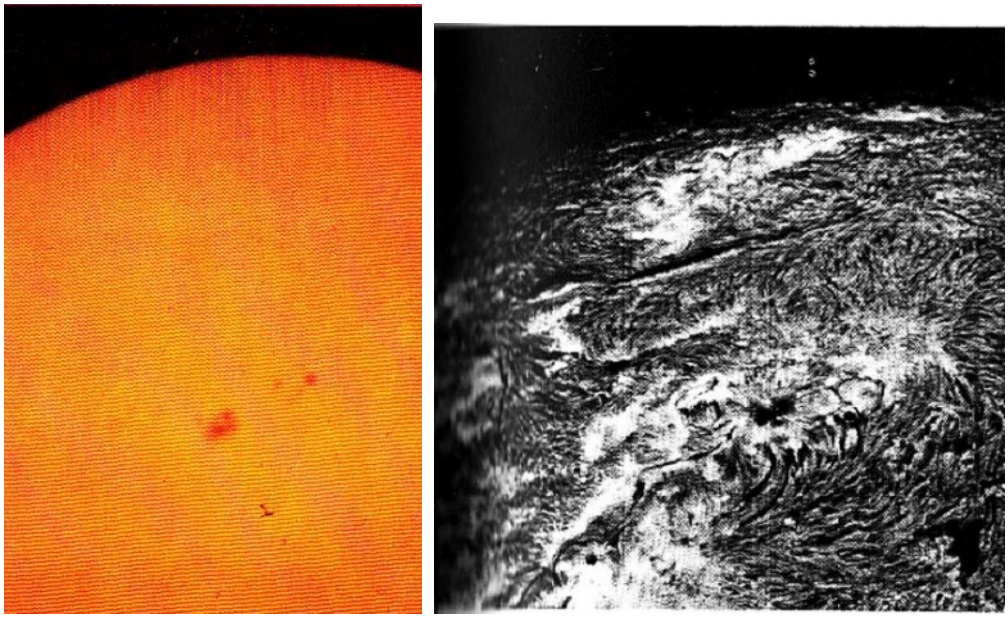
Esquema del perfil de la galaxia en espiral a lo que pertenece el Sol, donde se indica su posición excéntrica. Los pequeños círculos de colores claros representan cúmulos globulares de estrellas pertenecientes a la galaxia, pero situados fuera de su cuerpo central.

Al igual que la mayoría de las estrellas, el Sol posee un movimiento propio en relación al conjunto de la galaxia de que forma parte, que lo desplaza hacia un punto del espacio situado en la constelación de Hércules y en las proximidades de la estrella Vega. Este movimiento lineal tiene lugar a una velocidad de 20 km/s.

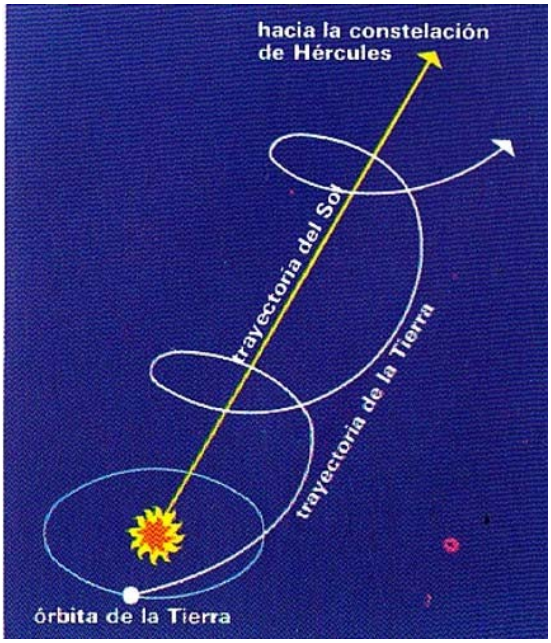


Observatorio solar del "Pie du Midi", en los Pirineos. El emplazamiento de los instrumentos para la observación solar suele hacerse en lugares elevados, para reducir la absorción atmosférica.

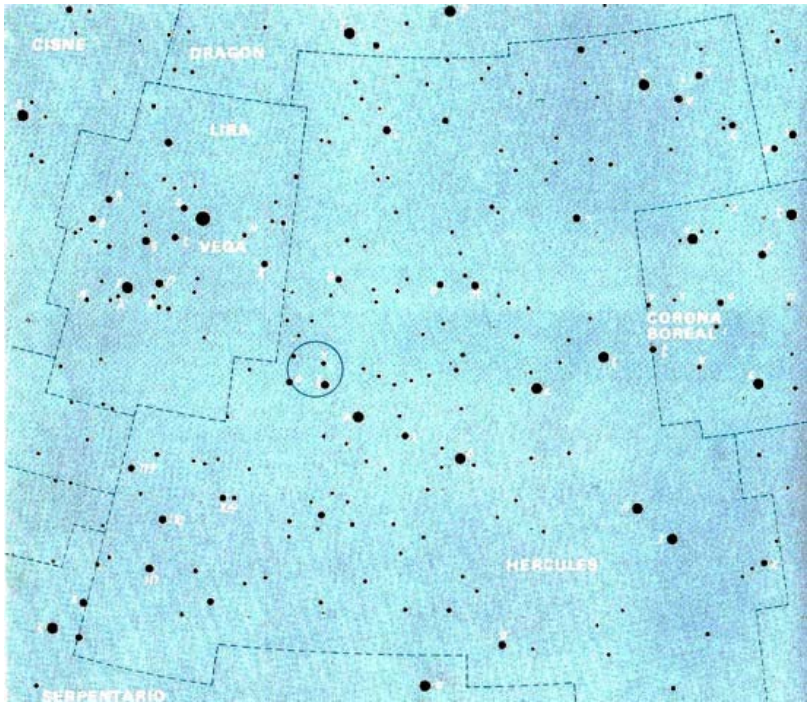
Se saben pocas cosas con certeza acerca de las condiciones reinantes en el interior del Sol y especialmente sobre las estructuras de sus regiones centrales.



Las manchas solares aparecen como regiones de color oscuro (a la izquierda), que destacan sobre la superficie brillante del Sol. A la derecha, fotografía de la superficie solar, en la región roja del espectro



Movimiento conjunto de la Tierra y el Sol hacia la constelación de Hércules.



El círculo indica el lugar del firmamento hacia el que se dirige el Sol, acompañado por el cortejo de los planetas y de sus satélites.

Se supone que la temperatura en el centro del Sol, a 695.000 km de la superficie, es del orden de 15 millones de grados centígrados, y que la densidad de la materia en el centro debe ser 100 veces superior a la del agua.

Toda la energía que emite el Sol se origina mediante reacciones termonucleares y por medio de procesos de diversa índole se transmite a sus capas externas, desde las cuales se difunde al espacio exterior.

Los eclipses totales de Sol ocultan exactamente su disco y proporcionan una ocasión única para estudiar la corona luminosa que lo rodea

La mayor parte de la energía luminosa y calorífica que recibimos del Sol proviene de una capa superficial del mismo, cuya profundidad es de 400 km, capa que constituye el disco visible del Sol y que recibe el nombre de fotosfera.

> *"¿Qué se entiende exactamente por Sistema Solar? En su acepción más amplia, es la región del espacio en la cual el Sol ejerce su influencia. En este sentido, el sistema comprende el Sol, los nueve planetas conocidos actualmente, los cometas y los asteroides."*
>
> HANNES ALFVÉN

En esta región se distinguen unas inmensas zonas oscuras, llamadas manchas solares, que son perturbaciones de la superficie solar, posiblemente asociadas a campos magnéticos.

A continuación de la fotosfera se encuentra otra capa casi completamente transparente y de muy poca densidad, que tiene un espesor de 10.000-16.000 km, según las zonas. Esta capa se llama cromosfera, debido a que durante los eclipses

totales de Sol se observa como una circunferencia muy delgada de color rojizo que rodea al cuerpo solar. A causa de su poco brillo, esta región es totalmente inobservable fuera de los eclipses solares, si no se utilizan aparatos especiales.

Finalmente, más allá de la cromosfera se extiende la corona, la cual aparece como un halo blancuzco situado alrededor del disco solar durante los eclipses totales. El espesor de esta región es aproximadamente ele 1.000.000 km; la cantidad de materia contenida en ella es pequeña, ya que la densidad es extremadamente baja.

La intensidad de la radiación proveniente de esta zona a la superficie terrestre es todavía menor que en el caso de la cromosfera, y por tanto su observación fuera de los eclipses totales sólo es posible con ayuda de aparatos especiales.

2. Planetas gigantes y planetas terrestres

Los datos correspondientes a las principales características físicas de los planetas permiten clasificarlos en dos grandes grupos.

El primer grupo está constituido por los planetas de tipo terrestre, llamados así por su semejanza con la Tierra, y en el mismo se incluyen, además de nuestro planeta, a Mercurio, Venus y Marte. El segundo grupo comprende los planetas gigantes, que son Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno, cuya denominación genérica proviene de que sus dimensiones son muy superiores a las de los planetas de tipo terrestre.

"Los modelos de formación del Sistema Solar son muy numerosos, pero ninguno ha logrado hasta el presente destacarse de los demás. De hecho, nuestra falta de conocimientos de los fenómenos físicos de base concernientes a la formación de los cuerpos celestes nos sitúa en cierto modo en la posición análoga a la de un astrofísico antes de los progresos de la física nuclear. En este estadio de los trabajos, es más importante poner de manifiesto los caracteres generales que deberá poseer una teoría de la formación del Sistema Solar antes que discutir, generalmente sobre bases imprecisas, acerca de mecanismos concretos."

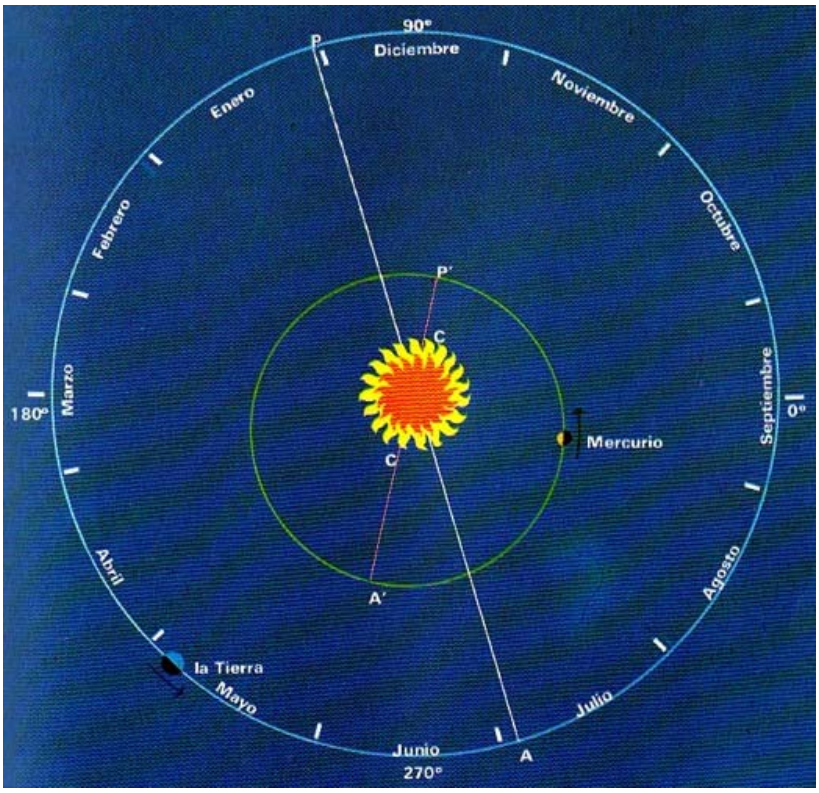
HANNES ALFVÉN

Los planetas terrestres están constituidos por esferas sólidas cuyo diámetro en ningún caso supera al de la Tierra. Su densidad es netamente superior a la del agua y los elementos químicos componentes presentan elevado peso atómico.

Las atmósferas de estos planetas son poco extensas en comparación con las dimensiones de su globo planetario, y la densidad suele ser pequeña. Finalmente,

cabe destacar que los planetas terrestres giran con bastante lentitud sobre sí mismos y que poseen pocos satélites o ninguno.

Los planetas gigantes tienen diámetros netamente superiores a los diámetros de los planetas terrestres. Su densidad es pequeña, siendo su valor apenas superior al de la densidad del agua.



El planeta Mercurio da una vuelta alrededor del Sol en 88 días, recorriendo una órbita de acusada excentricidad.

Los materiales que constituyen esos planetas, generalmente de bajo peso atómico, no dan lugar a un globo sólido, sino que se encuentran casi totalmente en estado líquido y gaseoso. Únicamente existe evidencia de un pequeño núcleo central sólido, cuyas dimensiones son poco importantes en correlación con las dimensiones totales del planeta.

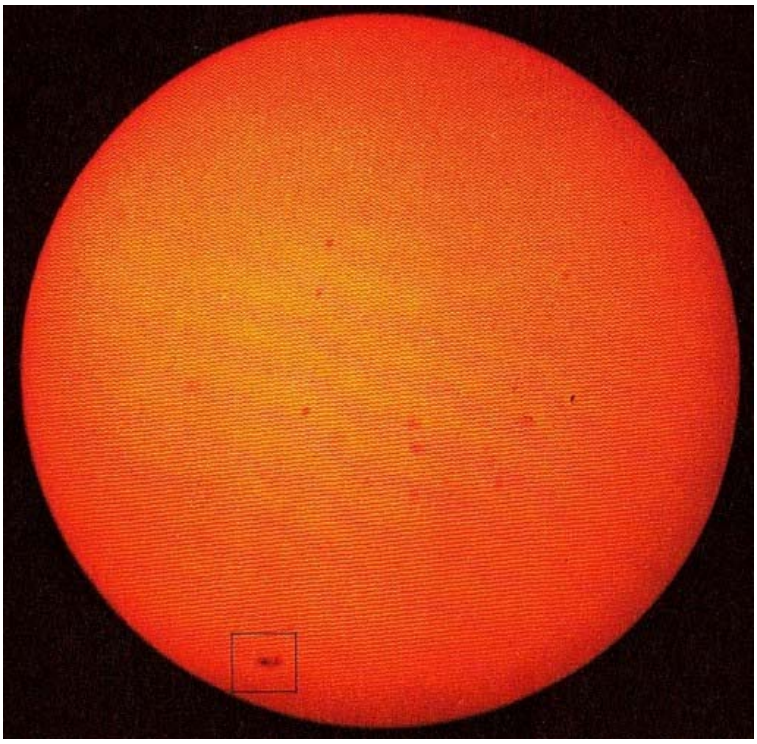
Sus atmósferas son muy extensas en comparación con las partes sólida y líquida, abundando los elementos ligeros hidrógeno y helio, y también algunos compuestos, como amoníaco y metano.

Otras características de estos planetas es que poseen una velocidad de rotación muy elevada, y a su alrededor se mueven nutridos grupos de satélites, salvo en el caso de Neptuno, que sólo tiene dos.

El planeta más externo del Sistema Solar, Plutón, no encaja en esta clasificación ya que por su situación habría de tener las características de un planeta gigante, y sin embargo todos los datos que se han podido obtener sobre sus propiedades físicas lo incluyen entre los planetas terrestres.

3. El enigma de la rotación de Mercurio

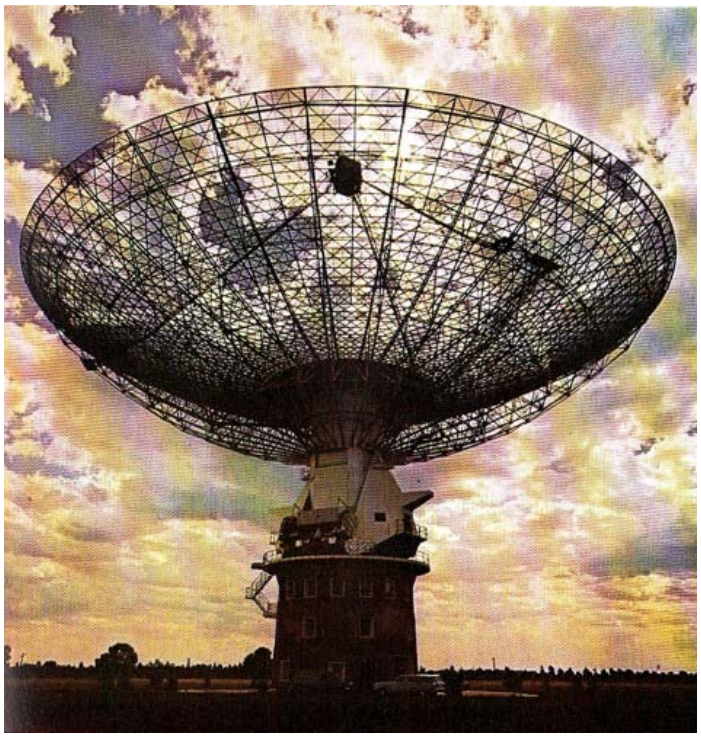
Las características físicas de Mercurio parecen demostrar que el planeta posee una gran semejanza con la Luna.



El planeta Mercurio pasa por delante del disco solar. Ello constituye un fenómeno de excepcional importancia para las observaciones astronómicas.

Su diámetro es aproximadamente 1,5 veces superior al de la Luna y la fuerza de la gravedad en la superficie de ambos astros es la misma. El albedo de Mercurio tiene igual valor que el albedo lunar, y ambos astros presentan una misma coloración vistos al telescopio. Además, las variaciones del poder reflector según el ángulo de

incidencia de la luz son en Mercurio análogas a las que se observan en el caso de la Luna, lo cual indica que la naturaleza de las superficies de ambos astros es áspera.
Sin embargo, estas afirmaciones han le tomarse con reserva, puesto que Mercurio es un planeta de difícil observación, que en más de una ocasión ha inducido a error a sus observadores.
Un error fue la suposición de que el período de rotación de Mercurio coincidía con su período de traslación alrededor del Sol. Esta afirmación fue hecha por Schiaparelli en 1880, y las miles de observaciones realizadas desde aquel entonces parecían confirmar totalmente dicha hipótesis.



Radiotelescopio de Parkes, en Nueva Gales del Sur (Australia). Con ayuda de los radiotelescopios, los astrónomos han podido estudiar fenómenos que estaban vedados a los medios de observación óptica.

El hecho de que Mercurio tuviera rotación sincrónica implica que la temperatura en el hemisferio iluminado debía ser muy elevada, mientras que en el lado de la noche perpetua sería extremadamente baja, puesto que la tenue atmósfera del planeta no podía permitir el transporte de calor de una parte a otra. Aceptando este hecho se calculó teóricamente la temperatura de las dos caras de Mercurio y se llegó a la

conclusión de que la cara iluminada tendría una temperatura de unos 350 °C, mientras que las regiones de la noche eterna presentarían temperaturas tan bajas como -243 °C, lo cual está muy cerca del cero absoluto de la escala de temperaturas.

Sin embargo, las mediciones experimentales efectuadas con los precisos métodos de la radioastronomía condujeron a un resultado totalmente inesperado. Aunque las mediciones confirmaron con bastante aproximación el valor de la temperatura de la cara iluminada, en el caso de la cara oscura dieron una temperatura muy superior a la predicha y totalmente inexplicable a partir de las hipótesis planteadas.

Fotografía del planeta Venus tomada por el telescopio seguidor de 500 pulgadas, instalado en la Base Patrik de las Fuerzas Aéreas de los Estados Unidos.

Todo ello constituyó uno de los misterios de la astronomía planetaria, hasta que en 1965 los ecos de radar reflejados en el planeta demostraron que el período de giro era de 55 días y, por tanto, inferior al período de traslación alrededor del Sol.

De ello se sigue que la noche de Mercurio es larga, pero no eterna, y en consecuencia, la temperatura relativamente elevada del lado oscuro puede explicarse como derivada del calor almacenado por la superficie del planeta en sus largas exposiciones a la luz solar. Los errores de deducción de las observaciones ópticas se debían al hecho de que los días favorables para la observación de Mercurio (aquellos en que el planeta se encuentra más alejado del Sol) estaban separados por un periodo de tiempo igual al doble del día mercuriano. Por

consiguiente los observadores creyeron que Mercurio presentaba siempre la misma cara al, Sol; observaciones más minuciosas han permitido comprobar, ópticamente los resultados logrados por radar.

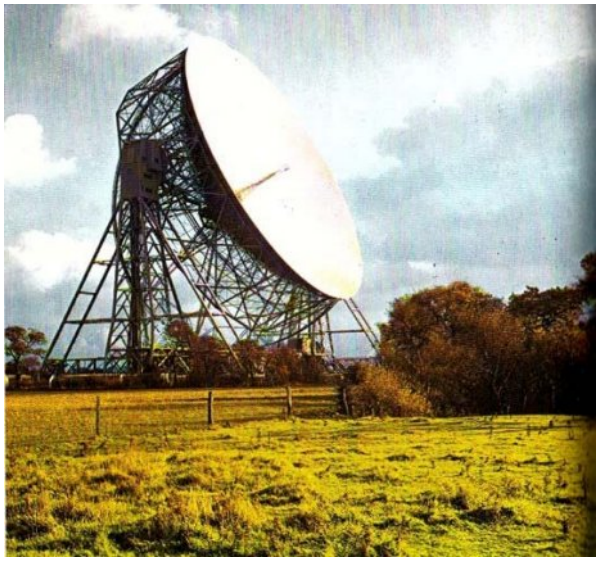
Las exploraciones llevadas a cabo por el Mariner X en 1974 permitieron disponer de un mayor número de datos acerca de las características de Mercurio. En primer lugar cabe señalar que su campo magnético es muy extenso, más de lo que se imaginaba anteriormente. En cuanto a su superficie, como Marte y la Luna, la mitad (le ella se halla cubierta de cráteres, mientras el resto está formado por llanuras más suaves. Mercurio presenta una única cualidad distintiva al respecto: la existencia en su superficie de formaciones rocosas de uno a varios kilómetros de altura y, cientos de kilómetros de longitud.

4. La superficie inobservable de Venus

Del mismo modo que Mercurio se considera un astro gemelo de la Luna, se puede afirmar que el planeta Venus es muy parecido a la Tierra en lo que a características físicas de los globos planetarios se refiere.

> *"Si queremos aproximarnos a la verdad y establecer alguna correspondencia en las proporciones entre las distancias y velocidades de los planetas habrémos de elegir entre dos supuestos: o las almas que mueven a los planetas son menos activas cuanto más se distancia el planeta del Sol, o sólo existe un alma motora en el centro de todas las órbitas, es decir, el Sol, que mueve a los planetas más vigorosamente cuanto más cerca se hallan, pero cuya fuerza casi se extingue al actuar sobre los planetas alejados a causa de la gran distancia y la debilitación de fuerza que esto ocasiona."*
>
> KEPLER

En primer lugar destaca la igualdad entre sus dimensiones, puesto que los diámetros de ambos planetas difieren en 650 km. La masa de Venus es algo menor que la de la Tierra, pero equivale a un 82 % de la misma, mientras que sus densidades son casi iguales.

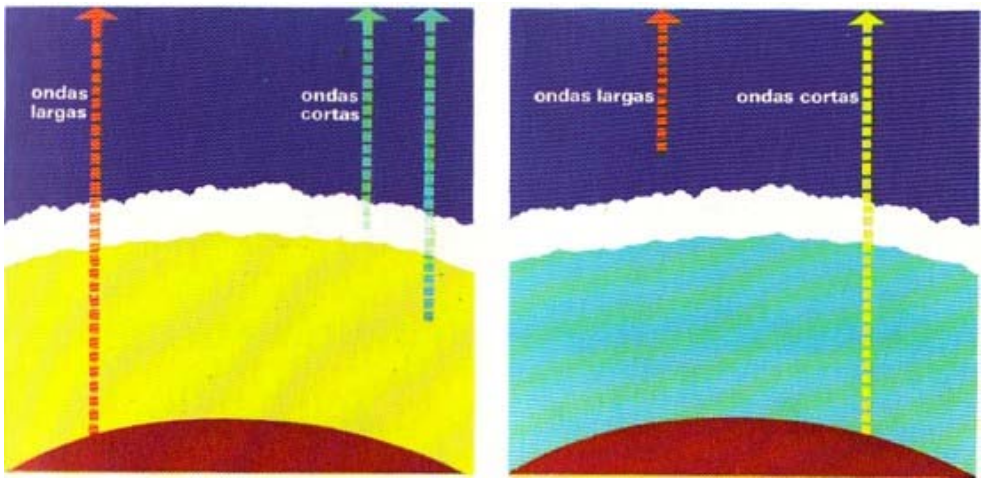


Radiotelescopio de Jodrell Bank, instalado en Cheshire, Inglaterra. Este instrumento de recepción de señales radioeléctricas alcanzó gran renombre en la época de lanzamiento de los primeros satélites artificiales.

Sin embargo las semejanzas entre ambos planetas concluyen probablemente aquí, porque las pocas características que se conocen de la superficie de Venus parecen indicar que difieren bastante de las de la superficie terrestre.

Tal vez pueda parecer raro, siendo Venus el planeta más cercano a la Tierra, que los detalles de su suelo sean casi totalmente desconocidos. La explicación de esta paradoja la proporciona la existencia de grandes masas nubosas en la atmósfera del planeta, que en todo instante ocultan completamente su superficie.

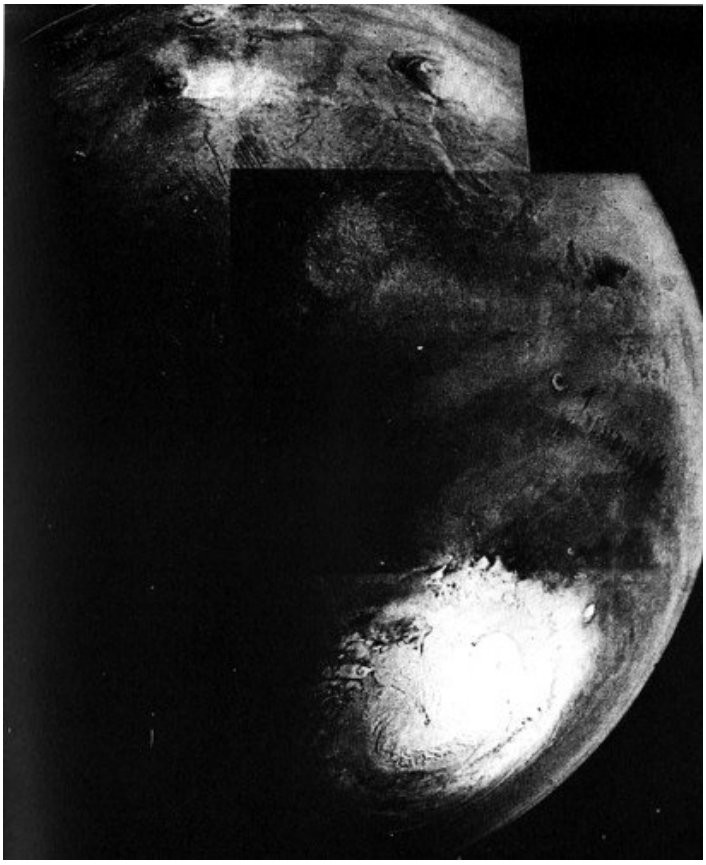
Hasta la observación in situ de Venus mediante sondas interplanetarias (a partir de 1961), las hipótesis acerca de sus características debieron hacerse a partir de observaciones indirectas (espectrografía, radar, etc.). Las imágenes televisivas emitidas por el Mariner X en 1974 y las investigaciones posteriores permiten afirmar que es el único de los planetas interiores del Sistema Solar que presenta su superficie totalmente obscurecida, cubierta de una fina atmósfera nubosa compuesta principalmente de dióxido de carbono.



Se han postulado dos modelos para explicar las radioemisiones detectadas procedentes de Venus. Según el primer modelo, las ondas cortas tendrían su origen en la superficie de Venus y las ondas largas, en las regiones ionosféricas, lo cual concordaría con la hipótesis de una superficie de Venus relativamente fría (90° C). Sin embargo, los datos enviados a la Tierra por el Mariner II (1962) demostraron qué la ionosfera venusiana no es suficientemente densa para producir ondas largas, por lo que éstas deben originarse en la superficie del planeta y, por tanto, ésta debe encontrarse a una temperatura del orden de los 425° C.

Así, el hecho de que en la atmósfera de Venus se encuentre gran cantidad de dióxido de carbono hizo que algunos autores creyeran que debía haber algo que la impidiera combinarse con los materiales silicados de la superficie venusiana, tal como ocurre en nuestro planeta. La búsqueda de una explicación a este hecho llevó a algunos científicos a suponer que todo el planeta estaba cubierto de agua, o más bien agua carbónica, ya que una parte de dióxido de carbono se disolvería en el agua.

A partir de 1956 comenzaron a desecharse estas teorías y las nuevas observaciones permitieron concluir que la superficie de Venus no se encuentra cubierta ni por agua ni por líquido alguno. Se detectó también, mediante el empleo del radar, la existencia de lo que parecían ser unas cadenas montañosas, y dadas las características de la atmósfera venusiana se supuso que la erosión continuada durante millones de años producida por vientos cargados de arenas, habría esculpido extrañas formas en los accidentes geográficos que sobresalgan en la superficie de Venus.



Imágenes de Marte tomadas por la sonda espacial Mariner IX y enviadas telemétricamente a la Tierra. Abajo, dos vistas del Polo Sur marciano. A la derecha, el hemisferio norte de Marte tal como aparece reuniendo tres imágenes distintas.

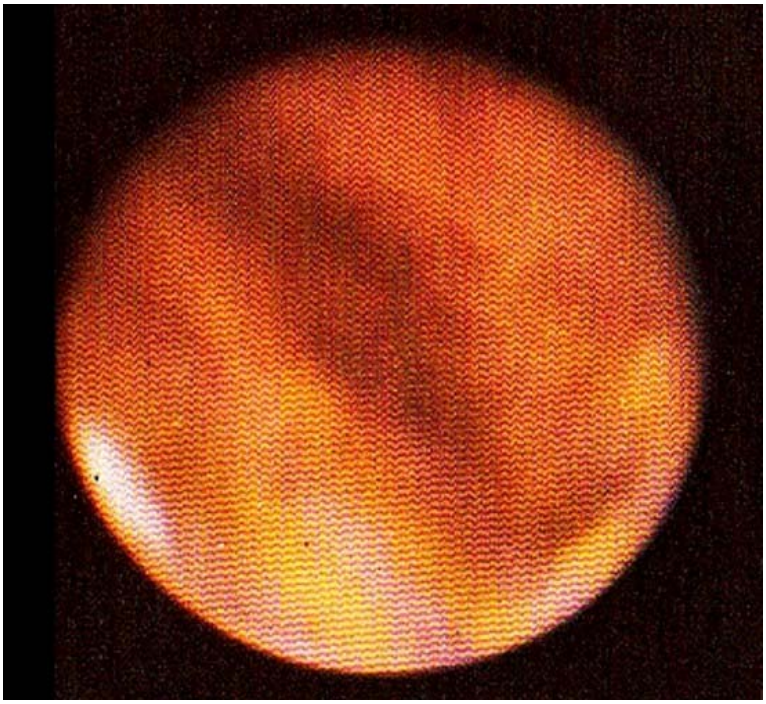
De gran interés para el conocimiento de las características físicas de Venus ha sido la determinación de la temperatura reinante en la superficie. Los primeros resultados concluyentes, obtenidos en 1956, indicaban que esa temperatura debía de ser por lo menos de 300° C. Este valor fue impugnado poco tiempo después, al medirse la temperatura en las capas inferiores de la atmósfera venusiana, o sea, las que están en contacto con la superficie del planeta, obteniéndose valores del orden de los 75° C.

La duda entre ambos resultados ha persistido hasta que las mediciones más recientes efectuadas mediante las sondas planetarias enviadas a Venus parecen decantarse por el primer resultado, es decir, por las altas temperaturas. Concretamente, parece ser que en el punto subsolar, la temperatura puede ser de hasta 700° C o más, es decir, que la superficie del planeta debe refulgir con un

color rojo más o menos claro, al igual que cuando se trabaja el hierro en una fragua.

5. Marte, el falso gemelo de la Tierra

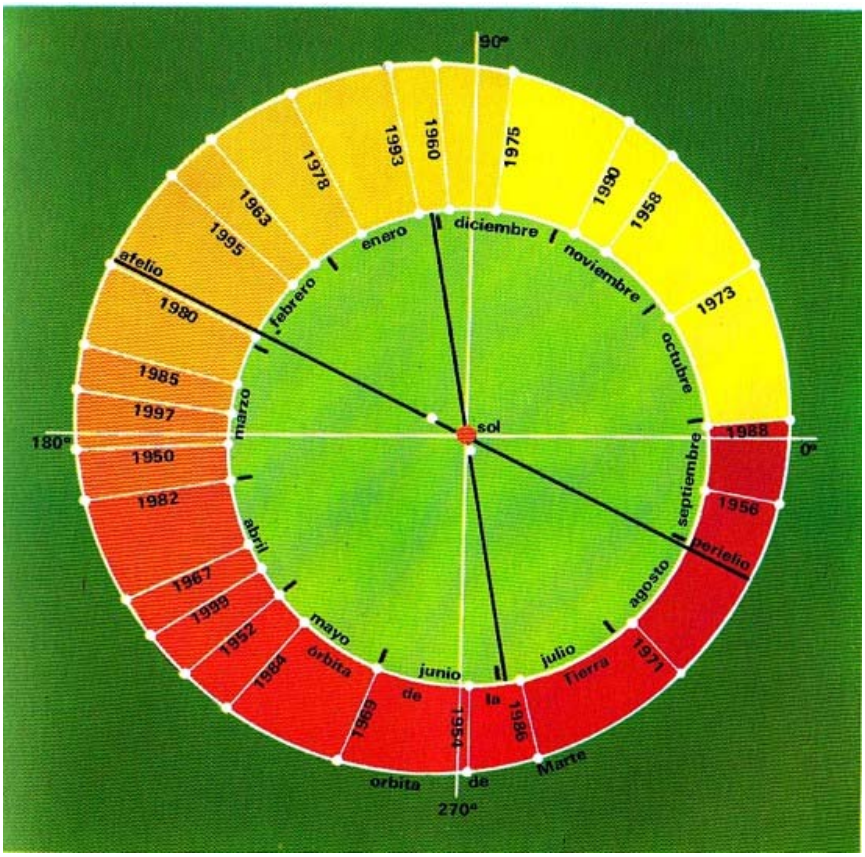
Hasta hace pocas décadas se consideraba a Marte como un planeta gemelo de la Tierra, y no por las dimensiones de su globo, cuyo radio sólo es la mitad del terrestre, sino por otras analogías más sutiles.



Fotografía del planeta Marte en la que se observa el casquete polar austral

Entre las semejanzas más importantes destaca el hecho de que Marte gira sobre sí mismo en un período de 24,6 horas, y por tanto su día es apenas 1/2 hora más largo que el terrestre. Por otra parte, el eje de rotación marciano presenta casi la misma inclinación respecto al plano eclíptico del planeta que en el caso de la Tierra. De aquí que sobre la superficie de Marte se den estaciones como en la Tierra, pero con una duración dos veces mayor, debido a que el "año" de Marte tiene una duración que equivale al doble del terrestre.

Se sabe también que Marte posee una atmósfera; las primeras determinaciones de su densidad parecían demostrar que a nivel del suelo era 1/10 de la correspondiente a la atmósfera terrestre en las mismas condiciones.



Órbita de Marte alrededor del Sol. Aparecen indicadas las fechas, entre 1954 y 1999, en las que el planeta se halla en oposición respecto de la Tierra.

Otra analogía clara la constituye el hecho de que en las regiones polares de Marte se observan dos zonas blancas bien definidas, a las que se ha dado el nombre de casquetes polares, y que en cada hemisferio presentan una máxima extensión durante el invierno, para disminuir seguidamente a lo largo de la primavera y el verano subsiguientes. Las primeras observaciones parecían demostrar que estas zonas podían estar constituidas, como en la Tierra, por agua en estado sólido, pero ya desde el primer momento se creyó que no podía tratarse de grandes depósitos de hielo como los terrestres, sino más bien de finas capas de escarcha, puesto que el casquete polar austral desaparece completamente durante el verano de ese hemisferio.

En la superficie de Marte se observan unas regiones oscuras de bajo albedo a las que se da el nombre de mares, aunque, al igual que los mares de la Luna, no se trata de grandes masas de agua, sino de terrenos cuya superficie es mala reflectora de la luz solar.

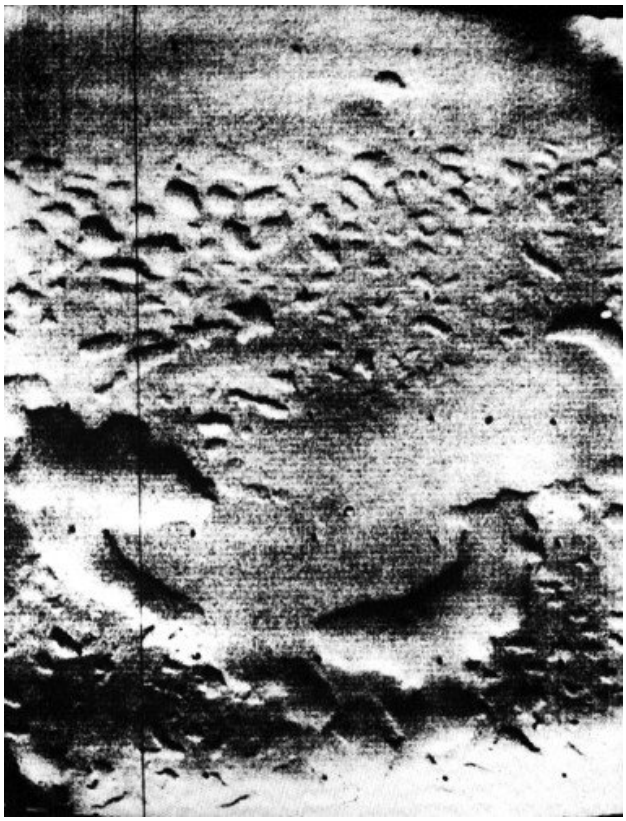


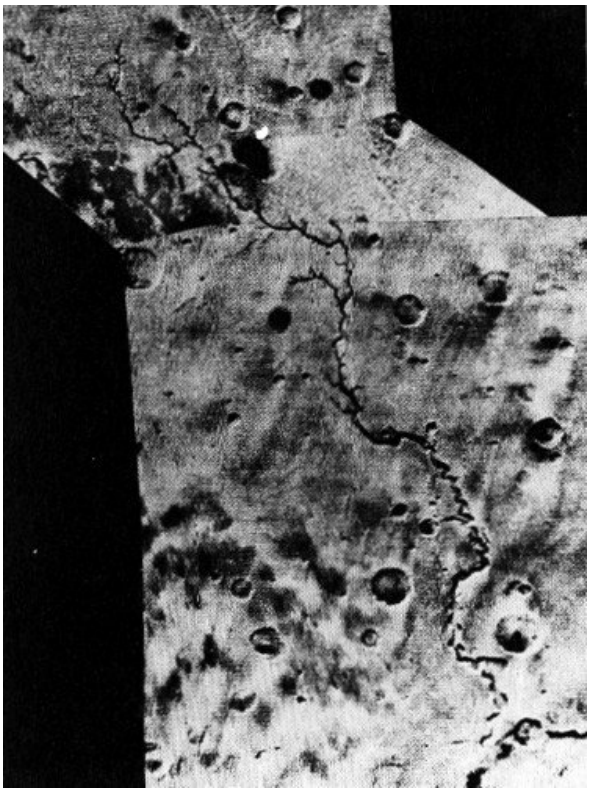
Imagen de Marte en la que una perturbación llamada "tormenta de polvo" impide la observación nítida de los detalles superficiales.

Una característica importante de estas regiones es que en ellas se producen cambios de color estacionales. Durante el invierno marciano estas regiones presentan un color gris azulado, pero al llegar la primavera se produce en ellas un oscurecimiento que comienza junto a los casquetes polares del hemisferio correspondiente y se propaga hacia el ecuador a medida que el casquete desaparece.

Dada la relación evidente entre los cambios de color y la desaparición de los casquetes polares, muchos autores creyeron que estaban observando el crecimiento

primaveral de la vegetación marciana, gracias al masivo aporte de agua que se licuaba o se evaporaba en los casquetes.

Finalmente, cabe considerar el rasgo más pintoresco relacionado con las analogías establecidas entre Marte y la Tierra. Casi desde el principio, las observaciones telescópicas habían mostrado que en la superficie de Marte se encontraban grandes regiones brillantes de color amarillento, en ocasiones anaranjado, a las que se llamó desiertos y que cubrían las 3/4 partes de la superficie del planeta. En 1877 el astrónomo italiano Schiaparelli observó que sobre estas regiones se veían formaciones rectilíneas de color oscuro, a las que dio el nombre de canales.



Montaje fotográfico de una región de la superficie del mismo planeta que contiene el curso de una grieta superficial ramificada.

En 1908 el astrónomo norteamericano Percival Lowell, investigador de gran prestigio en el mundo de la ciencia, llegó a la conclusión de que los canales habían sido construidos por seres inteligentes para llevar el agua, que escaseaba en la superficie marciana, desde los casquetes polares hasta las regiones desérticas.

Esta imagen de Marte a principios de siglo no podía ser más parecida a la de la Tierra, pero nuevas y más precisas observaciones demostraron que se trataba de una ilusión. La realidad se fue abriendo camino hasta culminar en el conocimiento de la verdadera faz del planeta.

Los primeros en desaparecer fueron los canales rectilíneos y regulares que cruzaban los desiertos de Marte. Las observaciones realizadas mediante los cada vez más potentes telescopios construidos en el presente siglo demuestran que realmente existían ciertos accidentes geográficos de trazado más o menos lineal en la superficie marciana, que correspondían a los canales de Lowell, pero que en ningún modo poseían las notables características descritas por dicho autor. Los "canales artificiales" del astrónomo norteamericano parecían más bien tener su origen en un efecto óptico producido por las imperfecciones inevitables de las lentes de los telescopios, y sobre todo en la imaginación del observador, que interpretaba libremente lo que veían sus ojos.

El mismo camino que los canales siguió la atmósfera marciana, puesto que las sondas enviadas a Marte han demostrado que es tan tenue que la presión en la superficie resulta tan sólo 1/100 de la presión atmosférica terrestre al nivel del mar, o sea que equivale a la presión de la atmósfera terrestre a la altura de 16 km.

El estudio de la composición de la atmósfera marciana ha puesto de manifiesto la ausencia de cantidades relevantes de vapor de agua y la abundancia en ella de dióxido de carbono. Como consecuencia, en la actualidad se acepta que los casquetes polares han de estar constituidos por este último compuesto en estado sólido, al que se conoce comúnmente con el nombre de hielo seco, lo cual es compatible con los —130 °C medidos en tales casquetes.

Todo esto, junto con el hecho de que la temperatura en la superficie de Marte, aun siendo alta durante el día (22° C), desciende unos 100° C durante la noche (hasta —70° C), demuestra que las condiciones en la superficie del planeta para el desarrollo de la vida son altamente precarias. Por ello, los cambios de coloración en los mares de Marte, que primeramente se habían explicado como manifestación de la vegetación marciana, ahora se intentan justificar mediante reacciones químicas producidas en su superficie por el dióxido de carbono que se evapora de los casquetes polares. También se ha pensado que podían ser debidos a vientos

estacionales, como los monzones de la Tierra, que transportaran grandes cantidades de polvo de una región a otra, cambiando la coloración de las mismas.

De todos modos, todavía no se ha dicho la última palabra en esta cuestión, puesto que ni siquiera las sondas planetarias han podido aportar pruebas definitivas en favor de la hipótesis de que en Marte exista vida, aunque sólo sea vegetal, ni de la hipótesis contraria, es decir, de que se trata de un planeta completamente estéril.

En cuanto al aspecto de la superficie de Marte, ya las primeras fotografías tomadas por la sonda Mariner IV revelan la existencia de cierto número de cráteres de origen meteórico, parecidos a los de la Luna, cuyos diámetros son de 5-120 km.

El primer satélite artificial de Marte, el Mariner IX, demostró que en este planeta también se encuentran cráteres de origen volcánico. Se trata de formaciones parecidas a las calderas volcánicas de la Tierra, pero de gigantescas dimensiones. En particular, se ha visto que la región bautizada como *Nix Olimpia* es un promontorio circular de 500 km de diámetro, en cuyo centro existe una caldera de 65 km de diámetro y 25 km de altura.

Formaciones similares a éstas se han encontrado en algunas regiones del planeta, pero dado que son muy pocas, muchos astrónomos consideran que Marte es un planeta joven, cuya actividad volcánica está todavía en sus comienzos.

A partir de las misiones Viking, que llegaron al planeta en 1976 y se prolongaron durante 18 meses, se ha recibido una elevada cantidad de datos, especialmente en lo referente a la existencia de grandes cantidades de agua en estado líquido, las características del suelo y la naturaleza de los satélites de Marte.

Los canales observados en su superficie, que plantean el dilema de la existencia de agua líquida y, en consecuencia, la posibilidad de vida en el planeta, podrían haber sido excavados al parecer por el agua de fuertes lluvias, en una atmósfera seguramente mucho más densa que la actual, o producidos tal vez al desplomarse un terreno por la súbita fusión de una masa de hielo subyacente al ser calentada por un fenómeno de vulcanismo.

Con respecto a los "casquetes polares", la capa helada que desaparece en el verano está formada por dióxido de carbono, lo que llamamos "hielo seco", mientras que la que permanece sería de hielo verdadero.

Se ha llegado a la conclusión de que las condiciones climáticas de Marte no han variado en los últimos millones de años.

La atmósfera del planeta alcanza una extensión de 100 a 200 km. aproximadamente, y está compuesta en un 90 % de dióxido de carbono, proporción que aumenta en sus capas interiores, llegando hasta un 96 %. Presenta numerosas nubes, parecidas a los cirros terrestres. La temperatura experimenta una oscilación entre —86° C (a la salida del sol) y —31° C (en las primeras horas de la tarde).

La presión media diaria, a lo largo del periodo de observación, fue disminuyendo de forma continua, de 7,7 a 7,45 milibares.

La composición del suelo es parecida a la de la Luna (20 % silicio, 14 % hierro, 6 % magnesio, 3 % aluminio y azufre, 0,5 % cloro y titanio) y presenta propiedades magnéticas, con un 3 % de material fuertemente magnético, posiblemente magnetita. La tonalidad predominante es la rojiza, que se debe seguramente a una fina capa de limonita.

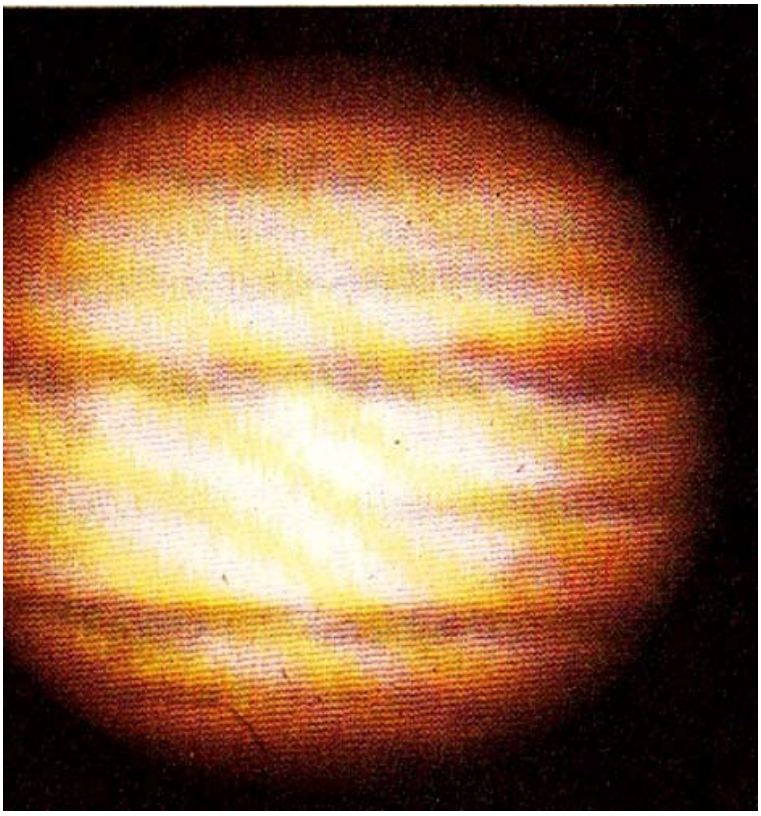
La superficie de Marte presenta en principio una aparente contradicción, todavía no aclarada: los fuertes vientos y al mismo tiempo la ausencia de erosión.

Se ha revelado la existencia de cierto número de cráteres de origen meteórico, parecidos a los de la Luna. También hay en la superficie marciana cráteres de origen volcánico; se trata de formaciones parecidas a las calderas volcánicas de la Tierra, pero de enormes dimensiones. Dado que este tipo de formaciones es escaso, se cree que Marte es un planeta joven, cuya actividad volcánica está todavía en sus comienzos. Con respecto a los satélites del planeta, cabe decir que se han obtenido, gracias a las misiones Viking 1 y Viking 2 (1976-1977), buenas fotografías, incluso de formaciones de 10 m de diámetro, de formas irregulares y diferentes dimensiones. En concreto, en la observación del satélite Fobos se ha descubierto la existencia en su superficie de surcos paralelos, lo que indica la posibilidad de una estratificación en su seno.

6. Júpiter, el gigante de los planetas

Júpiter es el planeta gigante más cercano a la Tierra y el más grande de todos.

Fotografía de Júpiter en la que se observa la estructura de bandas de su atmósfera y la gran Mancha Roja en el hemisferio austral del planeta.



Fotografía de Júpiter en la que se observa la estructura de bandas de su atmósfera y la gran Mancha Roja en el hemisferio austral del planeta

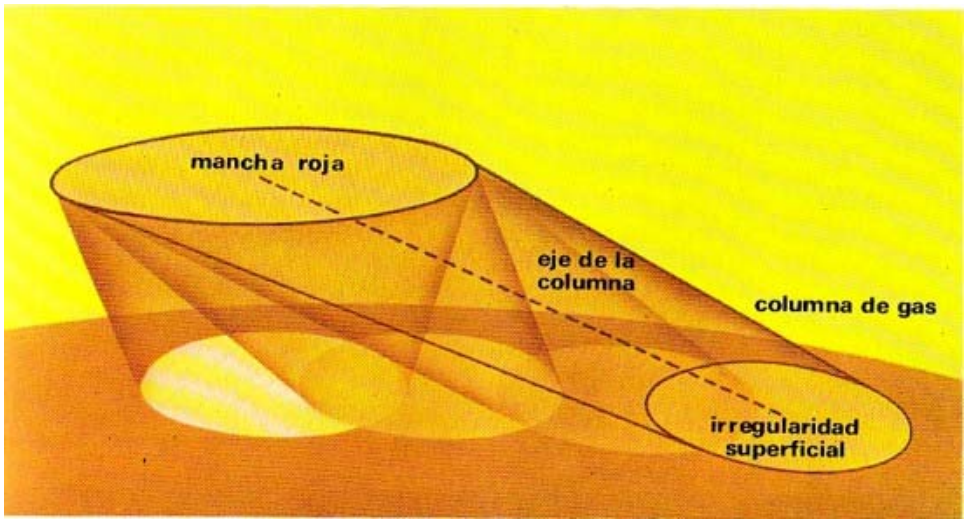
Su calificativo de "gigante" está perfectamente justificado, ya que su masa es superior al doble de la suma de la masa del resto de planetas, y su diámetro es más de 11 veces superior al de la Tierra.

Se sabe que Júpiter está cubierto por una extensa capa atmosférica, en la cual se observan, con la ayuda de un telescopio, cierto número de bandas nubosas de coloración alternativamente clara y oscura, dispuestas de modo paralelo al ecuador.

El detalle más interesante que se observa en Júpiter es la llamada "Gran Mancha Roja": formación que aparece bajo el aspecto de una superficie de forma oval de 30.000 km de longitud por unos 10.000 km de anchura. La primera vez que los astrónomos se ocuparon de ella fue en 1831, pero parece ser que ya se había observado en 1664. Su color presenta variaciones irregulares: algunas veces es rojo fuerte, otras rosado, y aún otras, toma coloraciones grisáceas.

Al principio se creyó que la llamada Gran Mancha Roja era un cuerpo sólido de gran tamaño que flotaba en el seno de la atmósfera de Júpiter. Sin embargo, dado que

los elementos que componen dicha atmósfera son de muy baja densidad, es difícil imaginar algún cuerpo sólido cuya densidad sea todavía menor para que pueda flotar en ella.



Para explicar el fenómeno de la Mancha Roja de Júpiter se ha supuesto que es la región superior de una columna gaseosa relativamente estable, formada en el seno de la atmósfera del planeta como consecuencia de la existencia de una importante discontinuidad en la superficie del mismo.

En 1961, el científico británico R. Hide propuso una teoría basada en consideraciones hidrodinámicas que está logrando gran difusión. Según dicha teoría, si sobre la superficie de Júpiter se encontrara una discontinuidad topográfica importante, cuyas dimensiones superficiales fueran del mismo orden que las de la mancha y cuya altura fuera de unos pocos kilómetros, la circulación de los vientos atmosféricos del planeta tendría lugar sorteando dicha discontinuidad y sobre la misma se establecería una columna de gas relativamente estancado. Esta columna se extendería hacia arriba a través de las nubes que rodean al planeta, y su cima, observada desde la Tierra, tendría precisamente las características de la Mancha Roja. A partir de 1974, gracias a las observaciones efectuadas por las misiones Pioneer 10 y 11 se ha aventurado que la Mancha Roja parece ser el vórtice de una gigantesca "tormenta" que pone de manifiesto las corrientes conectivas en ebullición por toda la atmósfera del planeta.

Se ha confirmado además que Júpiter emite 2,5 veces la gran cantidad de energía que recibe del sol, utilizando una fuente interna de calor.

La hipótesis se basa en que el flujo calorífico real emitido por el planeta de acuerdo con su temperatura es netamente superior al flujo que debería emitir si se tuviera en cuenta nada más que la energía que recibe del Sol.

Para explicar este hecho se supone que el origen del exceso de energía es gravitacional. Es decir, que se trata de energía liberada como consecuencia de la contracción del planeta, al ser atraídos todos los materiales hacia el centro del mismo por efecto de la fuerza de la gravedad.

Este modelo es el mismo que se emplea para explicar el origen del Sol. La diferencia entre ambos casos estriba en que la masa de gases que dio origen al Sol era muchísimo mayor que la que dio origen a Júpiter, y en consecuencia, la energía desprendida en su contracción gravitatoria fue también mucho más elevada, hasta el punto que la temperatura resultante superó el nivel necesario para que se produjeran aquellas reacciones nucleares que son fuente de toda la energía radiada por el Sol. En Función de esto, Júpiter puede considerarse en cierto modo como una estrella fallida, a la que le ha faltado masa para que en su interior se alcanzaran las condiciones mínimas necesarias para que pudiera sustentar algún tipo de reacción nuclear.

7. Los anillos de Saturno

Las características de Saturno son similares a las de Júpiter. Su radio es casi 10 veces mayor que el terrestre, y su masa, 95 veces superior a la masa de la Tierra. Otra característica común es que Saturno aparece circundado por una extensa atmósfera, en la cual con el telescopio se observan una serie de franjas de distinto color dispuestas paralelamente al ecuador del planeta, aunque menos marcadas que en el caso de Júpiter.

En las partes altas de la atmósfera se observan ocasionalmente algunas manchas más o menos duraderas, pero en ningún caso se ha detectado una formación persistente análoga a la Gran Mancha Roja de Júpiter. Recientes determinaciones de la temperatura del planeta han puesto de manifiesto que su valor es algo más alto de lo que se esperaba teóricamente, y al igual que en el caso de Júpiter se ha

supuesto que el exceso de energía que esto supone tiene su origen en la condensación gravitacional.

Una característica muy importante de Saturno, no compartida con Júpiter ni con ningún otro astro del Sistema Solar, son las formaciones anulares que le rodean y que, en razón de su aspecto han recibido el nombre de anillos de Saturno.

La primera observación de estos anillos fue realizada por Galileo, aunque no supo reconocerlos como tales debido a la poca potencia de su telescopio; los describió como una especie de asas que sobresalían del cuerpo principal del planeta. Su identificación como sistema de anillos que rodean a Saturno corresponde al astrónomo y matemático holandés Christian Huygens, quien los estudió en 1659.

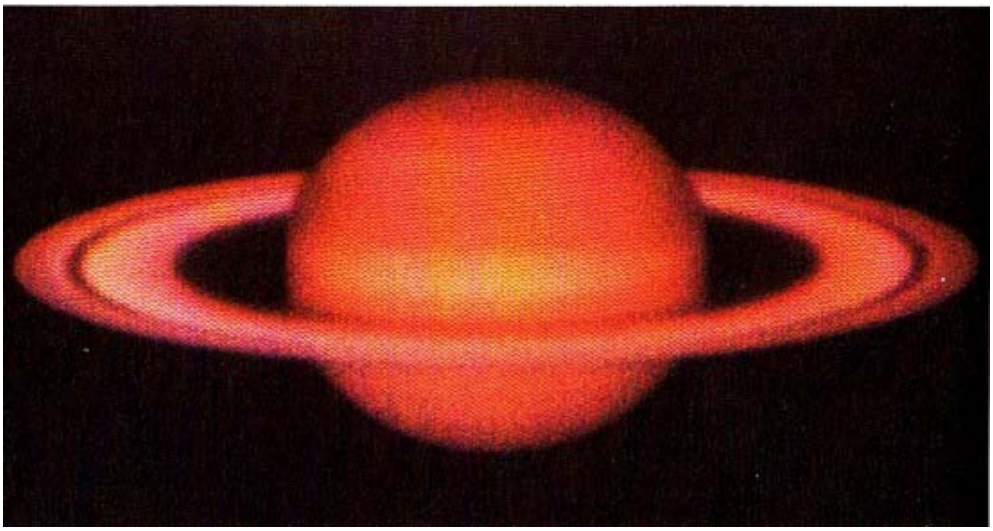
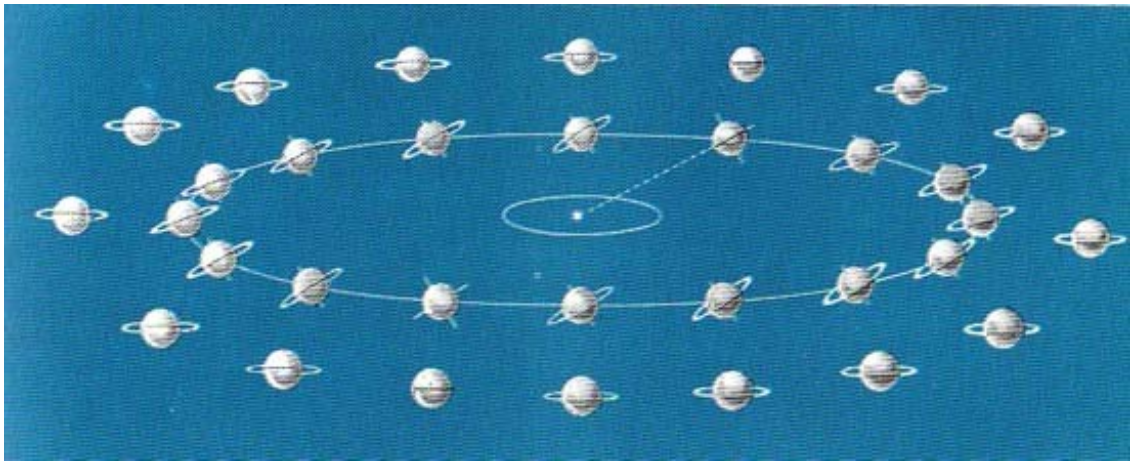


Imagen del planeta Saturno obtenida con ayuda de un telescopio de 61 pulgadas de abertura, e en la que aparece nítidamente la estructura de sus famosos anillos.

En los anillos de Saturno se distinguen claramente tres zonas independientes separadas por regiones oscuras, que corresponden a regiones de muy baja densidad de materia.

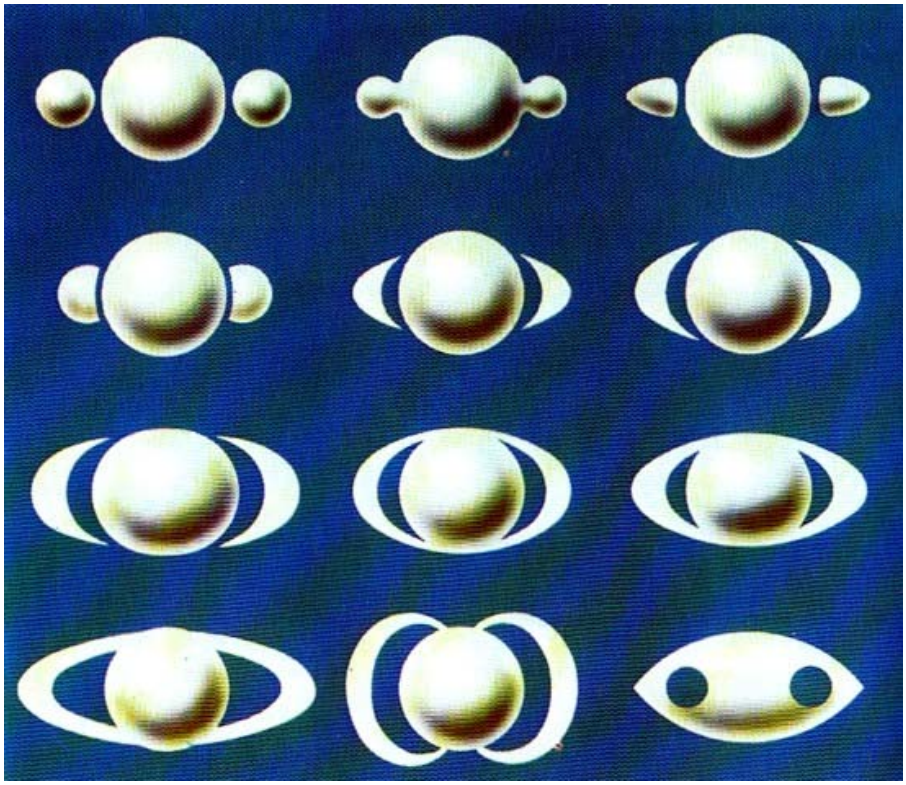


Posiciones del planeta Saturno relativas a la Tierra. Se han representado también los aspectos que en cada caso presentan los anillos vistos desde la Tierra.

Recientemente se ha descubierto un cuarto anillo más cercano al planeta que los otros tres. Se sabe que tales formaciones están constituidas por un elevado número de pequeños corpúsculos que giran independientemente alrededor del astro principal, como si se tratara de minúsculos satélites.

Poco se conoce acerca de la naturaleza de esas partículas. En cuanto a tamaño, se sabe que son similares a granos de arena, y es posible que estén recubiertas por una sutil capa de amoníaco congelado. No se conoce la masa total de los anillos, pero se ha podido determinar que en todo caso es inferior a la masa de la Luna.

La anchura total del sistema anular es del orden de los 70.000 km. En contraposición, se sabe que el espesor en ningún modo supera los 16 km, llegando incluso algunos astrónomos a afirmar que apenas alcanza unos pocos centímetros. Como consecuencia de ello, cuando los anillos se encuentran de perfil con respecto a la Tierra, a lo sumo se observan como una raya oscura que atraviesa el disco de Saturno.



En la época del descubrimiento del telescopio, la poca potencia de los primeros instrumentos hizo que los observadores atribuyeran las fantásticas formas de la izquierda a lo que hoy conocemos como los anillos de Saturno.

No se sabe con certeza cuál ha sido el origen de estos anillos, pero se han establecido dos hipótesis: o bien son los restos de un satélite muy cercano al planeta, que se desintegró por efecto de mareas demasiado poderosas, o bien son los restos de la nebulosa primitiva que originó el Sistema Solar y que no han podido condensarse en un cuerpo rocoso por no tener suficiente densidad (o porque las perturbaciones del planeta, demasiado cercano, no lo permitieron).

8. Los confines del Sistema Solar: Urano, Neptuno y Plutón

Visto al telescopio, Urano aparece como un pequeño disco ligeramente achatado y de tintes verdosos. Se ha determinado aproximadamente su albedo y ha resultado tener un valor bastante elevado, 0,5, lo cual parece indicar que el planeta está cubierto de nubes, al igual que Júpiter y Saturno.

Debido a la gran inclinación del eje de rotación con respecto a la órbita, que es casi de 90°, la duración del día y la noche varía a lo largo de un año de Urano. En ocasiones, casi toda la superficie planetaria pasa regularmente por las fases del día

y de la noche cada 10,8 horas, mientras que en otras épocas uno de los dos hemisferios permanece iluminado por un largo período y el otro queda completamente a oscuras. El 10 de marzo de 1977 un grupo de astrónomos de la Universidad de Cornell, destacando entre ellos James L. Elliott, detectaron la presencia de anillos alrededor de Urano, descubrimiento confirmado después por otros científicos de diferentes países. A partir de la observación de una estrella se advirtió la existencia de cinco estrechos anillos de unos 100 km de anchura, a distancias del centro de 42.200 a 54.300 km aproximadamente.

El descubridor de Urano, en 1787, predijo ya la existencia de dos anillos, que fue desmentida posteriormente dada la imposibilidad de observarlos incluso con los más potentes telescopios de la época.

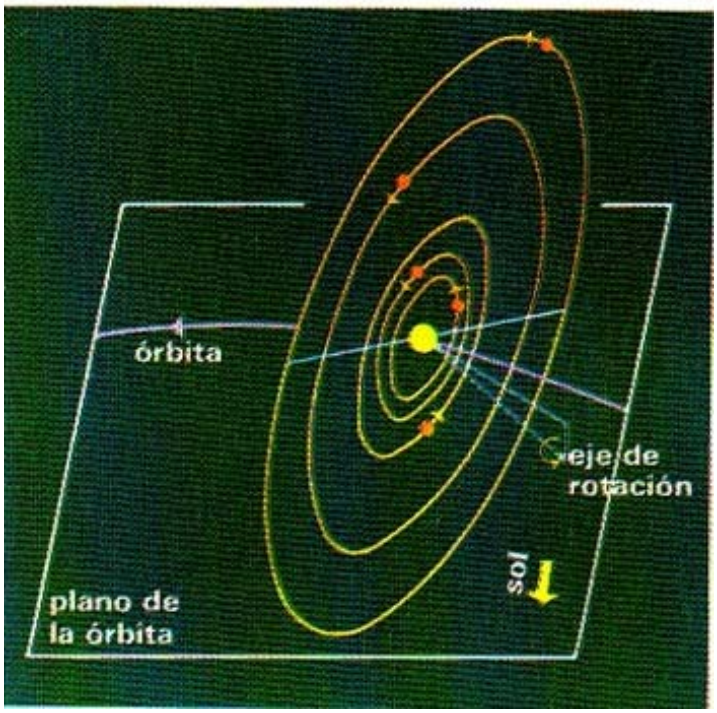
En cuanto a Neptuno, poca cosa se sabe en la actualidad, debido a que su gran alejamiento de la Tierra dificulta todo tipo de observación. Al telescopio presenta la misma coloración que Urano y parece ser que su albedo es también muy elevado, lo que demostraría la existencia de una cubierta de nubes sobre todo el planeta.

Su densidad es relativamente elevada: la mayor de todos los planetas gigantes. Por ello, en su interior debe existir una concentración bastante elevada de materiales pesados, análogos a los que constituyen la Tierra. Por lo demás, es muy posible que el globo del planeta esté constituido por grandes cantidades de hidrógeno metálico y amoníaco en estado sólido.

Plutón es una entidad física completamente desconocida para los observadores terrestres. Uno de los grandes enigmas que plantea el planeta es que, de acuerdo con su masa, calculada a partir de las perturbaciones que crea en Urano y Neptuno, y con sus dimensiones, obtenidas experimentalmente, se deduce que su densidad es unas 50 veces superior a la del agua, valor que)arece increíble. Sin embargo, hasta el momento no se ha podido demostrar de un nodo convincente que las mediciones que han concluido con este resultado sean erróneas y, por tanto, subsiste la incógnita, aunque casi nadie esté dispuesto a aceptar una densidad tan elevada.

9. Los satélites de los planetas

Los planetas llamados terrestres, con excepción de la Tierra, no tienen satélites. A ellos hay que añadir Plutón, que, según se ha descubierto en junio de 1977, tiene un satélite, observado por los astrónomos del Observatorio Naval de Washington mediante placas fotográficas. A este satélite, el n° 34 del Sistema Solar, se le ha denominado Caronte. Este descubrimiento replantea las informaciones anteriores sobre las características de Plutón, que, de confirmarse las estimaciones, tendría un diámetro de 2.400-2.900 km., en lugar de los 5.700 que se le atribuían antes.



Las órbitas de los cinco satélites de Urano se hallan prácticamente en el plano del ecuador del planeta, el cual forma un elevado ángulo con el plano de la órbita del mismo.

Así, Plutón sería el planeta más pequeño del Sistema Solar, y su masa sería mucho menor de lo que supuso Lowell a principios de siglo. Esto representa una analogía entre Plutón y los planetas de tipo terrestre. La relación entre el diámetro de Plutón y el de su satélite es de 1/3, y el conjunto de los dos astros podría considerarse como un planeta doble, como el sistema formado por la Tierra y la Luna, hasta ahora único con estas características. Queda por resolver todavía el problema de explicar su localización en las regiones ocupadas por los planetas gigantes del tipo de Júpiter, en lugar de estar en las cercanías del Sol como los demás planetas de su

tipo. El satélite tiene un diámetro aproximado de 800-900 km. y se mueve a una distancia de 20.000 km. del centro de la Tierra (periodo de revolución: seis días). Marte tiene 2, pero se supone que, dadas sus características físicas y orbitales, se trata de 2 asteroides capturados. En cambio, los planetas gigantes poseen gran número de satélites. El mayor número corresponde a Júpiter, con 13 satélites, seguido por Saturno, con 10. Urano tiene 5, Neptuno sólo posee 2.

Principales características físicas y orbitales de los satélites

Nombre	Período de revolución alrededor del planeta	Distancia máxima al planeta (miles km)	Diámetro		Masa	Dens.	Descubrimiento
			En km	En función del diámetro del planeta			
De la TIERRA							
Luna	27d 7h	384,4	3.473	1/3,67	1/81,4	3,36	
De MARTE							
Fobos	0d 7h 39m	9,40	15(?)	1/450			A. Hall, 1877
Deimos	1d 6h 18m	23,50	8(?)	1/850			A. Hall, 1877
de JUPITER							
V-Amaltea	0d 11h 57m	181,5	190(?)	1/750			Barnard, 1892
I-Io	1d 18h 27m	422	3.340	1/42,8	1/22.240	4,6	Galileo, 1610
II-Europa	3d 13h 14m	671	3.010	1/47,5	1/39.430		Galileo, 1610
III-Ganímedes	7d 3h 42m	1.071	4.750	1/30	1/12.520	2,9	Galileo, 1610
IV-Calixto	16d 16h 32m	1.833	4.460	1/32	1/22.200	2,	Galileo, 1610
XIII-Leda	239d 5h 45m	11.000	–	–	–	–	Kowal, 1974
VI-Himalia	250d 15h	11.430	140	1/1.000			Perrine, 1904
VII-Elara	260d	11.710					Perrine, 1905
X-Lysithea	260d	11.790					Nicholson, 1938
XII-Ananke	600d	20.930	(entre 20 y 250 km. probablemente)	(menor que 1/3.000 según nuestros datos)			Nicholson, 1951
XI-Carme	692d	22.600					Nicholson, 1938
VIII-Pasiphae	739d	23.500					Melotte, 1908
IX-Sinope	745d	24.150					Nicholson, 1914
De SATURNO							
XI-Jano	0d 19h 12m	155,	300(?)	1/400	–	–	A. Dollfus, 1966
I-Mimas	0d 22h 37m	185,6	600(?)	1/200	1/16.340.000	0,4	W. Herschel, 1789
II-Encelado	1d 8h 53m	238,3	600(?)	1/200	1/4.000.000	1,4	W. Herschel, 1789
III-Tetis	1d 21h 18m	295,1	1.200(?)	1/100	1/921.500	0,8	Cassini, 1684
IV-Dione	2d 17h 41m	377,4	1.200(?)	1/100	1/536.000	1,3	Cassini, 1684
V-Rhea	4d 12h 25m	527,4	1.400(?)	1/86	1/250.000	1,8	Cassini, 1672
VI-Titán	15d 22h 41m	1.223	4.900(?)	1/24,7	1/4.700	2,2	Huyghens, 1655
X-Temis	20d 20h	1.462	?	–	–	–	W. Pickering, 1900
VII-Hiperión	21d 6h 38m	1.481	500(?)	1/240			Bond, 1848
VIII-Japeto	79d 7h 55m	3.563	1.800(?)	1/67			Cassini, 1671
IX-Foebe	550d 11h	12.951	200(?)	1/600			W. Pickering, 1898
De URANO							
V-Miranda	1d 9h 56m	133,	200(?)	1/236			Kuiper, 1948
I-Ariel	2d 12h 29m	191,9	900(?)	1/52			Lasell, 1851
II-Umbriel	4d 3h 28m	267,2	700(?)	1/67			Lasell, 1851
III-Titania	8d 16h 56m	438,7	1.700(?)	1/28			W. Herschel, 1787
IV-Oberón	13d 11h, 7m	586,5	1.600(?)	1/29			W. Herschel, 1787
De NEPTUNO							
I-Tritón	55d 21h 2m	353,6	5.000(?)	1/9			Lasell, 1846
II-Nereida	359d 21h 7m	5.565	300(?)	1/150			Kuiper, 1949
De PLUTON	6 días						
I-Caronte		–	800(?)	1/3	–	–	Observatorio Naval de Washington

Desde el punto de vista de su movimiento, los satélites se pueden clasificar en dos grupos: los llamados regulares y los irregulares.

Al primer grupo pertenecen aquellos satélites que se mueven alrededor de su astro principal en sentido directo (de oeste a este), sobre órbitas casi circulares y que, además, están poco inclinados respecto al ecuador del planeta. Se ha visto también que estos astros giran sobre sí mismos en el sentido directo, por lo menos en todos aquellos casos en que dicho movimiento ha podido ser determinado.

Al segundo grupo pertenecen aquellos satélites que se trasladan alrededor del planeta principal siguiendo trayectorias elípticas alargadas, las cuales suelen estar muy inclinadas respecto al ecuador del planeta. El movimiento de traslación de los satélites irregulares sobre estas órbitas suele ser en el sentido retrógrado.

La mayoría de los satélites presentan diámetros reducidos del orden de pocos centenares de kilómetros, pero dos de ellos, Ganimedes (de Júpiter) y Titán (de Saturno), superan en tamaño al planeta Mercurio y a Plutón, que según los más recientes descubrimientos sería el planeta más pequeño del sistema solar. Los satélites de menor tamaño son los 2 de Marte, cuyo diámetro no supera los 20 km, y los 6 más alejados de Júpiter, cuyos diámetros son de 20-50 km. En todos los casos, salvo para el conjunto Tierra-Luna, las dimensiones y masas de los satélites representan tina pequeña fracción de la dimensión y masa del planeta principal.

Como consecuencia de su reducido tamaño se sabe muy poco sobre la constitución física de los satélites. Los acompañantes de Marte han podido ser fotografiados por el Mariner IX y han resultado ser pequeños cuerpos rocosos de forma irregular en cuya superficie se observa la clara impronta de impactos meteóricos.

Los satélites mayores de Júpiter y de Saturno, que son también los mejor conocidos, aparte la Luna, presentan claramente una forma más o menos esférica, al igual que los planetas. Sus superficies parecen estar cubiertas totalmente por una inmensa capa de escarcha, ya sea de hielo o de amoníaco solidificado.

En 1944, G. P. Kuiper detectó las rayas del metano gaseoso en el espectro de la luz reflejada por Titán, un satélite de Saturno, el único satélite acerca del cual se posee una prueba empírica de la existencia de su atmósfera. Es muy probable que Ganimedes y Calixto, de Júpiter, también posean una envoltura gaseosa, puesto que su atracción gravitatoria es lo suficientemente elevada para impedir la fuga de

los gases a las bajas temperaturas que reinan en la superficie. Sin embargo, todos los esfuerzos realizados hasta el momento para ponerlas de manifiesto han resultado vanos.

En lo referente a los restantes satélites del Sistema Solar no se cree que sus pequeñas masas sean capaces de retener atmósfera alguna.

10. La Luna: el satélite natural de la Tierra

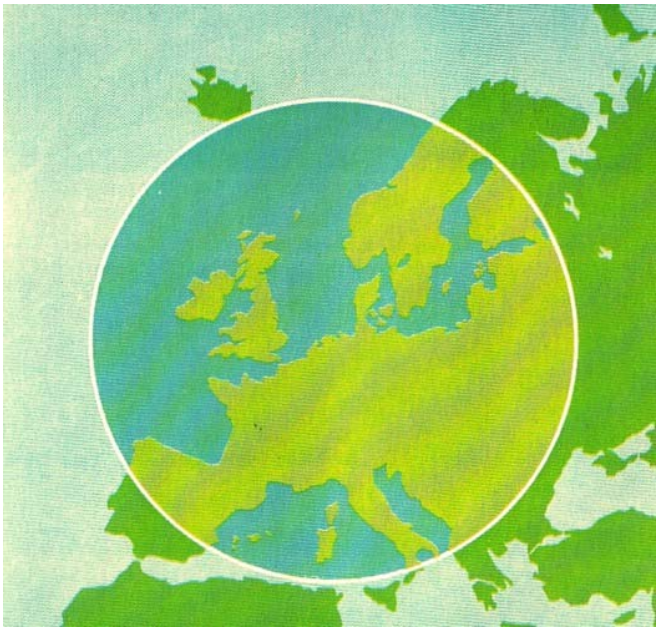
La Luna es una esfera sólida de un radio de 3.476 km, cuya masa vale 1/80 de la masa terrestre, y que está compuesta principalmente por elementos químicos pesados.

Imagen de la Luna obtenida poco tiempo después de su orto.

Estos valores, aun siendo poco frecuentes, no resultan excepcionales en el mundo de los satélites.

Imagen telescópica de la Luna llena, en la que aparecen los detalles más importantes de su superficie.

Sin embargo, si se comparan la masa y dimensiones de la Luna con las de su astro principal, la Tierra, se constatan, unas relaciones muy superiores a las que se dan en cualquier otro caso. Es decir, la Luna es el satélite con diámetro y masa de mayor importancia en comparación con las mismas magnitudes del astro principal.



Comparación del tamaño del disco lunar con la extensión del continente europeo.

En función de este hecho algunos científicos consideran que el sistema Tierra-Luna constituye un planeta doble mejor que un planeta y su satélite. De hecho, desde los cuerpos celestes vecinos, el sistema debe verse como dos planetas girando alrededor de un centro común.

En la superficie de la Luna se distinguen claramente tres tipos de accidentes: unas extensas regiones oscuras de superficie lisa, las cuales han recibido el nombre de mares debido a que su aspecto recuerda el de las grandes masas de agua vistas a distancia; unas regiones elevadas y muy abruptas, que se llaman cordilleras, por su semejanza con las formaciones montañosas de la superficie terrestre, y finalmente los cráteres, recintos circulares de paredes escarpadas en cuyo interior hay una depresión del terreno y, en ocasiones, un pequeño picacho central.

Mediante un potente telescopio se pueden ver en la superficie de la Luna unos 300.000 cráteres de todos los tamaños, observándose mayor abundancia de los mismos en las llamadas tierras altas, que son las situadas en las proximidades del polo austral. El cráter mayor, Clavius, tiene un diámetro de 227 km, y existen algunos cuyo diámetro es de 200 km.

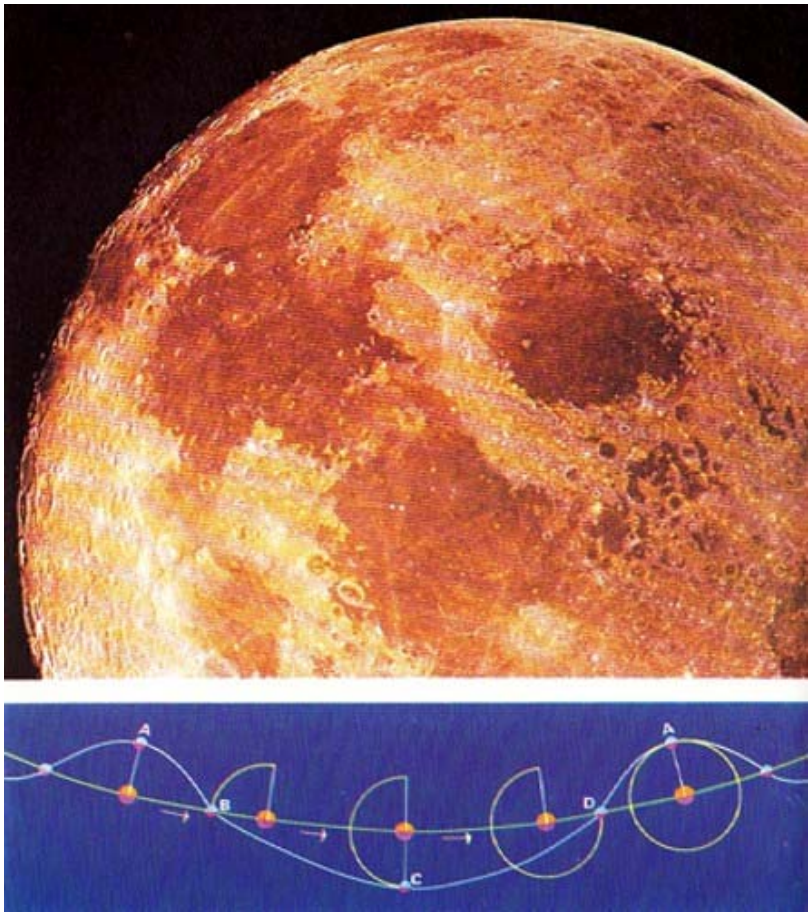


Imagen de la Luna obtenida durante la misión del Apolo XVII. Abajo, movimiento aproximado de la Luna alrededor del Sol. Se obtiene como resultado de superponer su movimiento alrededor de la Tierra con el de ésta alrededor del Sol.

La altura de las paredes de un cráter puede alcanzar 5 km si se mide a partir del interior del mismo, pero sólo es de unos pocos centenares de metros si se tiene en cuenta el nivel del terreno exterior circundante. La altura del pico central de un cráter, en los casos en que existe, raramente supera los 2,5 km, observándose casi siempre una pequeña abertura en su cima.

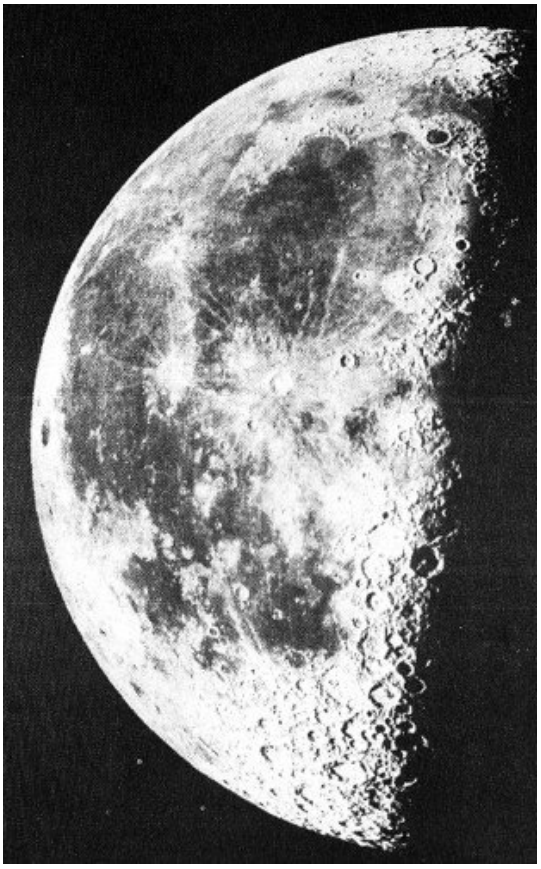


Imagen telescópica parcial de la Luna, en la que puede apreciarse claramente el relieve lunar, gracias al contraste entre la zona iluminada por el Sol y la que se encuentra en sombra.

Existe una variedad de cráteres muy interesante, los llamados cráteres de rayos, los cuales se caracterizan por presentar una serie de estrías luminosas que parecen irradiar del centro de la formación extendiéndose a lo largo de varios kilómetros.

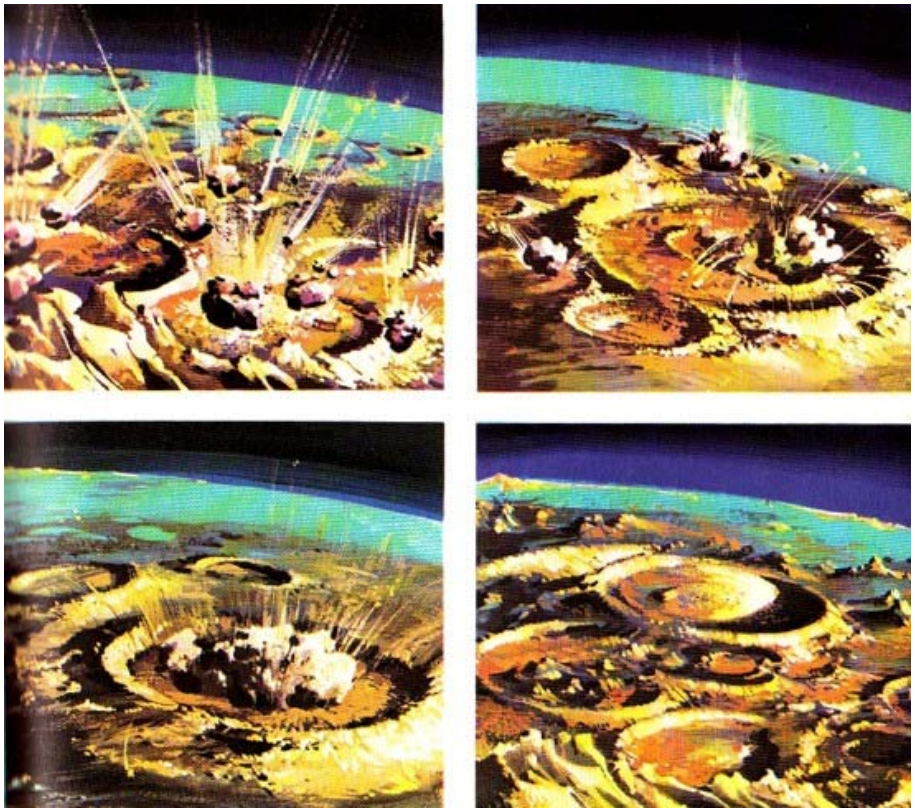
Los cráteres: ¿teoría volcánica o teoría meteorítica?

Las primeras teorías elaboradas para dar una explicación del origen de los cráteres lunares suponían que éstos derivaban de fenómenos de tipo volcánico análogos a los que tienen lugar en la Tierra.

La base de esta explicación la proporcionó la existencia de cierta analogía entre el aspecto físico de los cráteres lunares y el de las formaciones volcánicas terrestres. Un mayor conocimiento de la superficie lunar puso pronto de manifiesto que, junto a las analogías, en muchos casos existen también importantes diferencias,

especialmente en lo que respecta al tamaño, y como consecuencia de ello el modelo fue rechazado.

Los trabajos de G.K. Gilbert y el americano Baldwin han desarrollado la teoría meteorítica, ampliamente admitida, que supone que la mayoría de los cráteres lunares son huellas de los impactos de los meteoritos caídos en la superficie de la Luna.



Proceso de formación de los cráteres lunares por impacto meteorítico. En los dibujos se observa la formación de pequeños cráteres en el interior de otros más grandes, así como la génesis de cráteres con bordes superpuestos.

Se ha demostrado teóricamente que un cuerpo cualquiera que llegara a la Luna a gran velocidad proveniente del espacio exterior podría atravesar las regiones más externas de la capa superficial de la Luna antes de quedar detenido. La mayor parte de la energía de movimiento de dicho cuerpo se transformaría en calor, lo que produciría la evaporación de los materiales cercanos a la región del impacto; luego, la expansión rápida del gas generado tendría los efectos de una verdadera explosión, que serviría de agente determinante de la forma simétrica y de las

grandes dimensiones del cráter, cualquiera que fuera la dirección del meteorito incidente.

La aceptación de este modelo comporta el planteamiento de la siguiente cuestión: ¿por qué la superficie de la Tierra no aparece cubierta de impactos meteóricos como la de la Luna? A primera vista, puede parecer extraño el que, .estando tan cercanos los dos astros en el espacio, sólo uno haya sido objeto de bombardeo meteórico.

Para explicar este hecho existen dos circunstancias que se dan en el caso de la Tierra y no en el de la Luna. La primera es la presencia de la atmósfera terrestre, que disgrega o frena los meteoritos de pequeño tamaño que la atraviesan; la segunda es la erosión, que con el paso del tiempo borra y destruye las cicatrices producidas por el impacto de los meteoritos de gran tamaño que consiguen atravesar la atmósfera. En cambio, sobre la Luna, carente de atmósfera y agua, todas las formaciones que se originan en la misma permanecen durante millones de años sin apenas sufrir variaciones.

Reproducción en el planetario de Munich de las trayectorias aparentes de los planetas Marte, Venus, Mercurio, Júpiter y Saturno durante un período de 17 años.

Aunque en la actualidad la teoría meteórica se acepta en líneas generales, ello no implica que la misma pueda explicar de modo exhaustivo el origen de todos los

cráteres lunares. En realidad, algunos autores consideran que una parte de dichos cráteres tiene un origen claramente volcánico. En tal caso el dilema entre las dos teorías no se resolvería a favor de ninguna de ellas, sino que ambas serían necesarias para explicar el fenómeno de los cráteres lunares.

A favor del volcanismo lunar existe una sola observación, muy discutida por algunos autores, realizada por el astrofísico soviético Kozyrev en la noche del 3 de noviembre de 1958. Kozyrev estaba estudiando el cráter Alfonso cuando observó un brillo anormal en el pico central del mismo. El fenómeno duró media hora, durante la cual pudo obtenerse el espectro de la zona brillante; en él aparecieron las rayas correspondientes al carbono gaseoso, resultado que indujo al astrofísico soviético a afirmar que había sido espectador de una erupción volcánica lunar. Sin embargo, ningún dato posterior ha permitido reforzar la afirmación de Kozyrev.

Los mares de la Luna.

El estudio de las características físicas de los mares lunares ha permitido clasificarlos en dos tipos completamente distintos, para cada uno de los cuales existiría un origen también diferente.

Por una parte, se encuentran los mares de contornos marcadamente circulares, rodeados casi por completo de cadenas montañosas, y en cuyo interior no se observa ningún cráter. Estas formaciones se suponen derivadas del impacto en la superficie lunar de algún cuerpo de elevadas' dimensiones, tal como un asteroide de tamaño regular o el núcleo de un gran cometa.

El impacto de uno de estos cuerpos celestes explicaría el aspecto de tales formaciones lunares, y los sistemas montañosos que las rodean habrían sido originados por el mismo material lunar empujado hacia el exterior por el impacto.

El segundo tipo incluye los mares de contornos irregulares, los cuales no están rodeados por ninguna formación montañosa y en cuyo interior se observan cráteres fantasmas, es decir, cráteres con los bordes parcialmente hundidos en el suelo del mar. El origen de estas formaciones se supone debido a la inundación de las zonas bajas de la Luna por grandes cantidades de materia proveniente de otras regiones o, tal vez, por la acumulación de lava desplazada desde el interior.

La otra cara de la Luna.

Debido a que el período de rotación de la Luna sobre sí misma coincide con su período de traslación alrededor de la Tierra, desde esta última siempre se observarán las mismas regiones lunares. Por ello, resultaron de gran interés las primeras observaciones de las zonas ocultas realizadas por la nave espacial soviética Lunik III, lanzada el 6 de octubre de 1959.

Este ingenio espacial transmitió a la Tierra una serie de fotografías de la cara oculta que pusieron de manifiesto la existencia de diferencias importantes respecto a la cara conocida de la Luna, las cuales han sido confirmadas por posteriores observaciones.

Entre las diferencias más destacables cabe señalar una ausencia casi total de mares: sólo se ha identificado uno con toda seguridad, detectándose además un número de cráteres netamente inferior al que se observa en su cara visible.

Ambos hechos no han encontrado ninguna explicación satisfactoria, aunque algunos autores pretenden que podría explicarse suponiendo que la Luna lleva millones de años dirigiendo la misma cara a la Tierra, y que la mayoría de los cuerpos que cayeron en su superficie tenían su órbita comprendida entre la Tierra y la Luna. De aquí que la mayoría de los impactos se produjeran en la cara que mira hacia nosotros.

11. Asteroides

Son cuerpos celestes de reducidas dimensiones que se mueven en órbitas de tipo planetario, la mayoría de las cuales se encuentran en la región del espacio comprendida entre Marte y Júpiter.

Principales características concernientes a 11 asteroides importantes

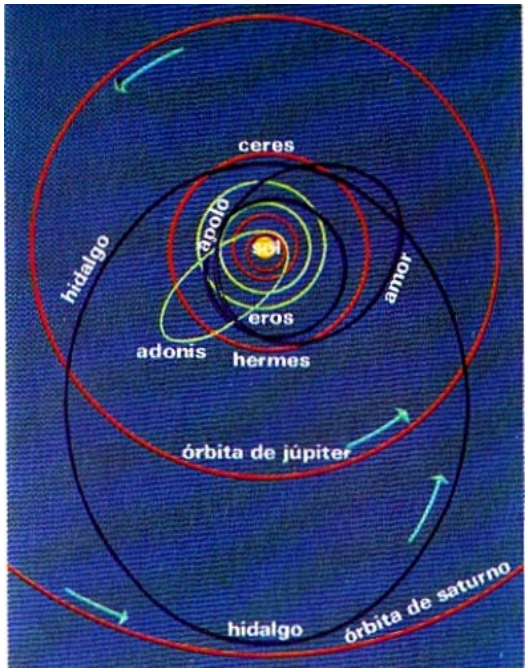
Número en el Catálogo general de los asteroides	Nombre	Descubrimiento	Distancia máxima del Sol (u.a.)	Período de rotación alrededor del Sol (días)	Diámetro (km)
1	Ceres	Piazzi (Palermo), 1801	2,767	1.681	650
2	Palas	Olbers (Bremen), 1802	2,733	1.684	520
3	Juno	Harding (Lilienthal), 1804	2,672	1.593	330
4	Vesta	Olbers (Bremen), 1807	2,361	1.326	650
8	Flora	Hind (Londres), 1847	2,201	1.193	–
11	Parténope	De Gasparis (Nápoles), 1850	2,452	1.403	–
24	Temis	De Gasparis (Nápoles), 1853	3,134	2.019	–
25	Foceo	Charconac (Marsella), 1853	2,402	1.358	–
158	Coronis	Knorre (Berlín), 1876	2,868	1.774	–
170	María	Perrotin (Toulouse), 1877	2,554	1.491	–
221	Eos	Palisa (Viena), 1882	3,011	1.913	–

Actualmente se conocen con detalle las órbitas de unos 1.600 asteroides, aunque se han fotografiado, al menos una vez, otros 30.000, sin poder seguirlos el tiempo suficiente para determinar su trayectoria. Se supone que el número total de asteroides debe oscilar alrededor de 50.000.

La mayor parte de los asteroides se mueven a una distancia del Sol de 2,1-3,5 ua. Su valor medio ponderado coincide exactamente con el valor 2,8 ua predicho por la ley de Bode.

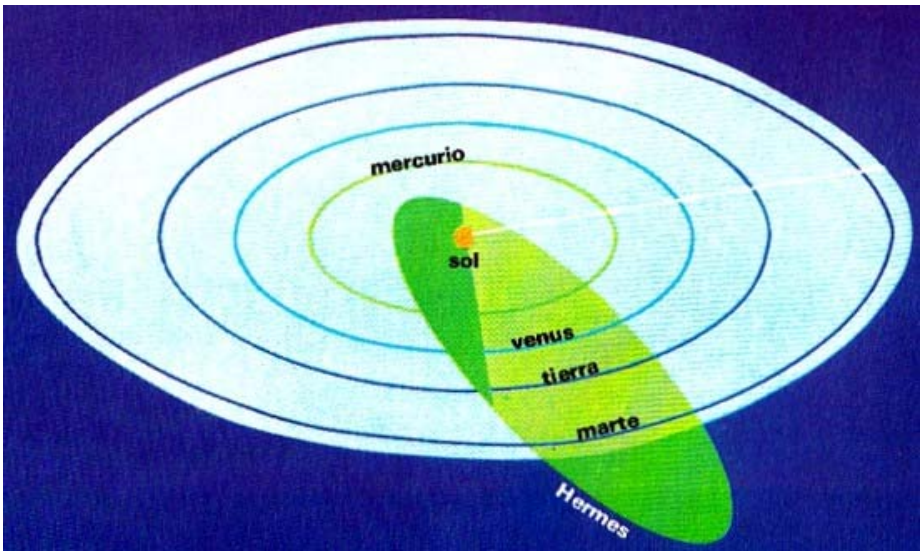
Sus órbitas elípticas son más alargadas que en el caso de los planetas, pero en general su forma se aproxima bastante a la circular. También su inclinación respecto al plano de la eclíptica es superior que para las órbitas planetarias, pero sin llegar a valores extremos.

Existen algunos asteroides cuyas órbitas tienen unas características totalmente fuera de lo común. Entre ellos sobresale Ícaro, la trayectoria del cual es la más alargada de todas, y que en el perihelio está más cerca del Sol que el propio Mercurio. Otro asteroide de características atípicas es Hidalgo, cuya órbita es bastante alargada y presenta la mayor inclinación conocida respecto a la eclíptica; cuando se encuentra en el afelio, está a la misma distancia del Sol que Saturno.



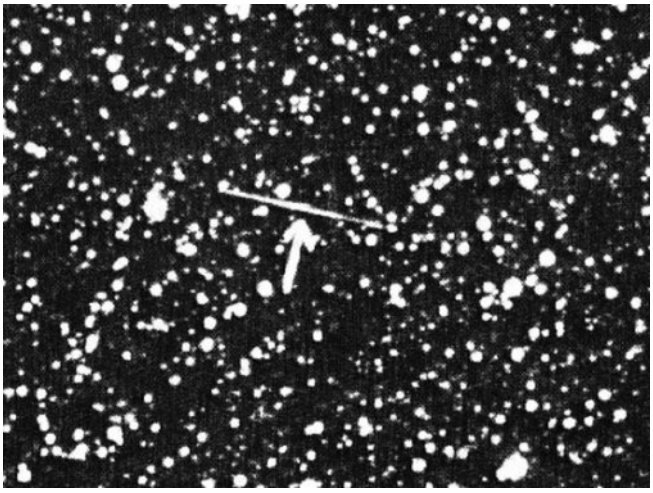
Órbitas de algunos asteroides importantes.

Algunos asteroides atraviesan la órbita de la Tierra, siendo el máximo acercamiento registrado entre nuestro planeta y uno de estos cuerpos celestes el que tuvo lugar en octubre de 1937 al situarse el asteroide Hermes a una distancia de sólo 800.000 km, lo que equivale a dos veces la distancia entre la Tierra y la Luna.



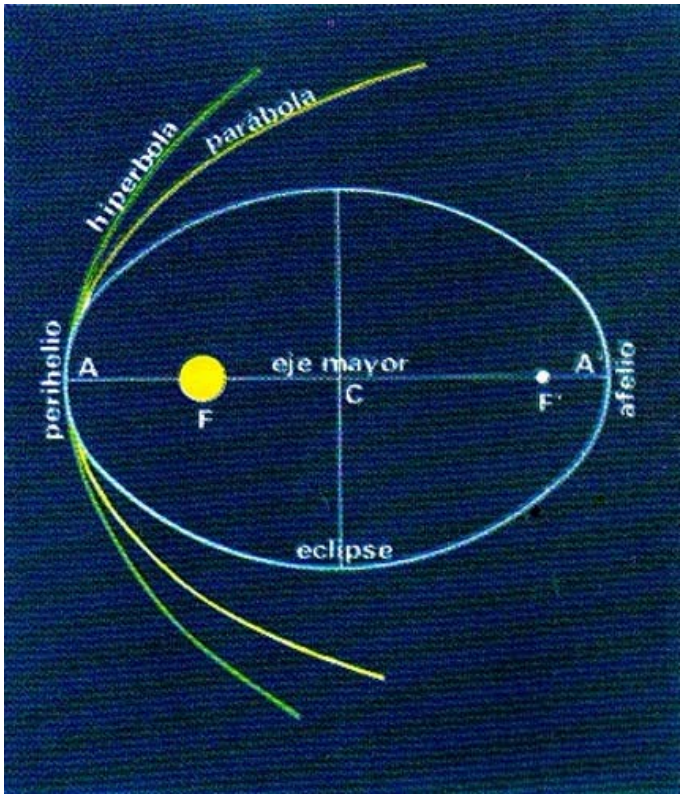
Abajo, órbita del asteroide Hermes, la cual, por estar muy inclinada respecto a la terrestre, da lugar a que este asteroide pueda acercarse marcadamente a nuestro planeta.

Respecto a sus dimensiones, sólo una cantidad inferior al 10 % posee un diámetro superior a los 80 km, mientras que todos los demás tienen dimensiones inferiores, que en muchos casos son de 1 km. Se sabe también que únicamente la forma de los dos mayores, Ceres y Palas, es netamente esférica, en tanto que en los demás casos el aspecto es más o menos irregular.



Trazo luminoso dejado por el asteroide Ícaro en su desplazamiento respecto al firmamento de las estrellas fijas.

La masa de cualquiera de los asteroides, incluidos los mayores, es demasiado pequeña para que pueda determinarse con ayuda de los métodos que se emplean normalmente para calcular la masa de los planetas.



Tipos de órbita que un cuerpo celeste puede recorrer bajo la influencia gravitatoria del Sol.

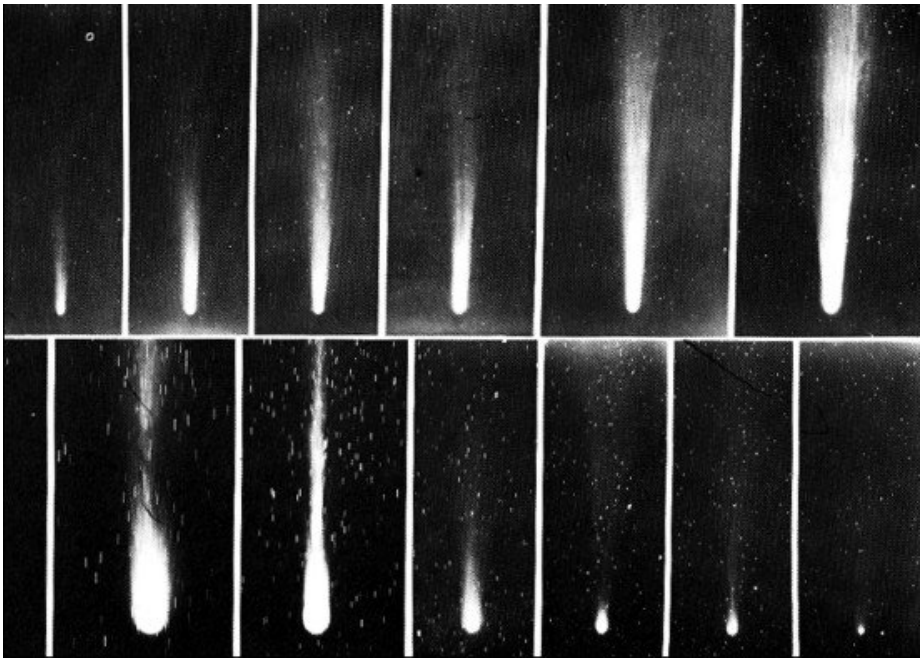
Por ello, en ningún caso se han podido obtener mediciones directas de las mismas, sino tan sólo cálculos indirectos. Lo único que se sabe con exactitud es que la masa total del conjunto de los asteroides no supera a 1/3.000 de la masa de la Tierra.

12. Cometas

Hace mucho tiempo la aparición de un cometa era motivo de supersticioso temor. A partir de los trabajos de Halley (1705) se sabe que los cometas son cuerpos celestes cuyos movimientos están sometidos a las leyes de la mecánica, al igual que los demás astros que brillan en el firmamento.

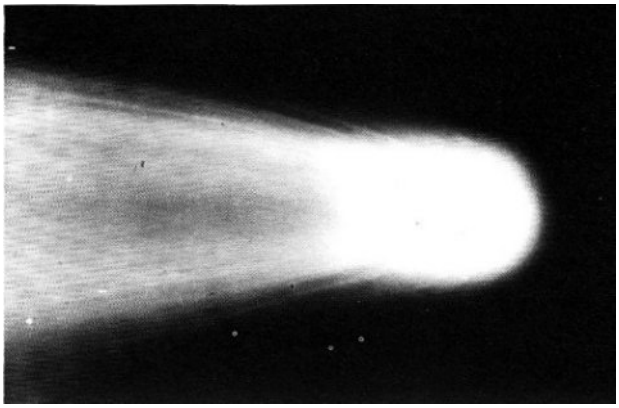
Las órbitas de los cometas son siempre elipses muy alargadas, hasta el punto de que en algunos casos pueden confundirse con una parábola o con una rama hipérbola, ambas curvas abiertas. De hecho, ciertos autores creyeron que las trayectorias de algunos de los cometas observados coincidían realmente con una de tales curvas.

Aceptar la existencia de estas órbitas abiertas significa aceptar que no todos los cometas pertenecen al Sistema Solar, sino que algunos de ellos son cuerpos celestes que vagan entre las estrellas, y a los que la influencia gravitatoria del Sol desvía provisionalmente de su trayectoria. Incluso se podría pensar que los cometas que giran en torno al Sol en órbitas elípticas eran también primitivamente cuerpos celestes que vagaban libres por el espacio, hasta que el Sol pasó por sus cercanías y los capturó.



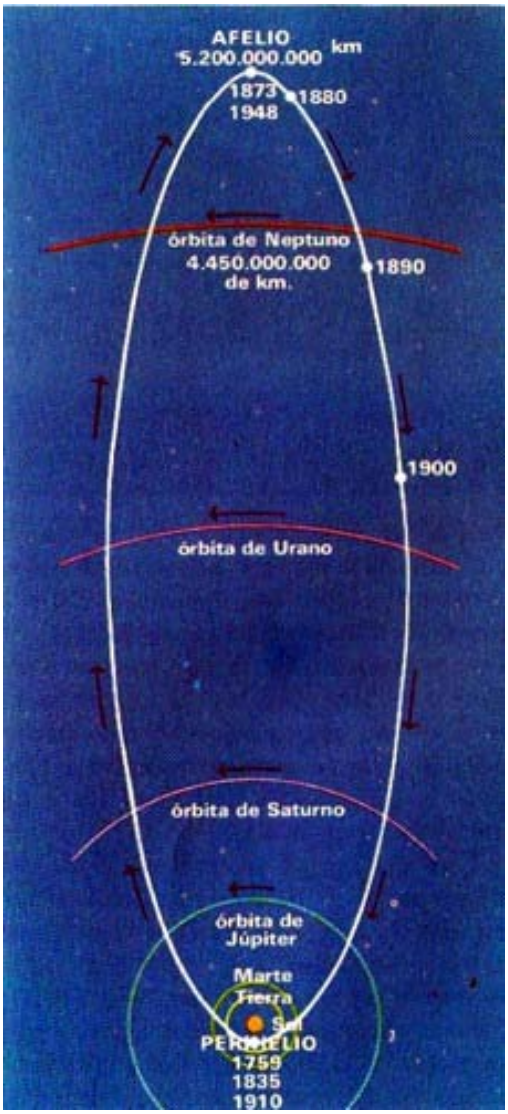
Imágenes sucesivas del cometa Halley, rimadas durante su aparición en 1910.

Actualmente estas teorías están desvirtuadas, y los hechos se ven desde una óptica completamente distinta.



Aspecto que presentaba la "cabeza" del cometa Halley el día 8 de mayo de 1910.

Según las nuevas ideas, se cree que las pocas órbitas abiertas, de las cuales se tiene constancia cierta, son debidas a las perturbaciones ejercidas por los astros del Sistema Solar en las órbitas primitivamente elípticas de algunos cometas, es decir, que todos los cometas pertenecen al Sistema Solar, pero algunos son expulsados del mismo por perturbaciones gravitatorias.



Orbita recorrida por el cometa Halley en su movimiento alrededor del Sol, comparada con las órbitas de los planetas.

Cuando un cometa se encuentra muy alejado del Sol, en las proximidades de Plutón o todavía más lejos, está constituido simplemente por una agregación de cuerpos rocosos, el llamado núcleo, la estructura del cual no se conoce aún con certeza.

Al aproximarse este núcleo cometario al Sol, la energía radiante solar hace que del mismo se desprendan gases y pequeñas partículas sólidas, los cuales quedan gravitando a su alrededor y dan lugar a la cabellera del cometa. Al llegar el cometa a la distancia de Júpiter la cabellera se desarrolla ampliamente, y en algunas ocasiones alcanza una longitud superior a 150.000 km.

A una distancia del Sol de 2 u.a. a partir de la cabellera del cometa se comienza a desarrollar una estrecha cola, también a expensas de la materia del núcleo, la cual se extiende en dirección opuesta al Sol a lo Largo de varios millones de kilómetros. Esta orientación de la cola, que se mantiene a lo largo de toda su existencia, es el resultado del empuje que la radiación del Sol y de las partículas cargadas emitidas por él mismo ejercen en los gases que constituyen la cola.

Una vez que el cometa ha pasado por el perihelio y comienza el alejamiento del Sol, la cola y la cabellera se debilitan hasta desaparecer a la misma distancia en que se las vio por primera vez. Toda la materia que constituye dichas formaciones se pierde en el espacio, y sólo permanecen agregados los materiales que forman el núcleo. Es decir, un cometa no puede pasar un número indeterminado de veces alrededor del Sol conservando su aspecto típico. En la etapa final de los cometas el núcleo se desintegra en una corriente de pequeñas partículas que se mueven agrupadas en la misma órbita del cometa y que provocan las llamadas "lluvias de estrellas" cuando la Tierra se encuentra con ellas en su camino.

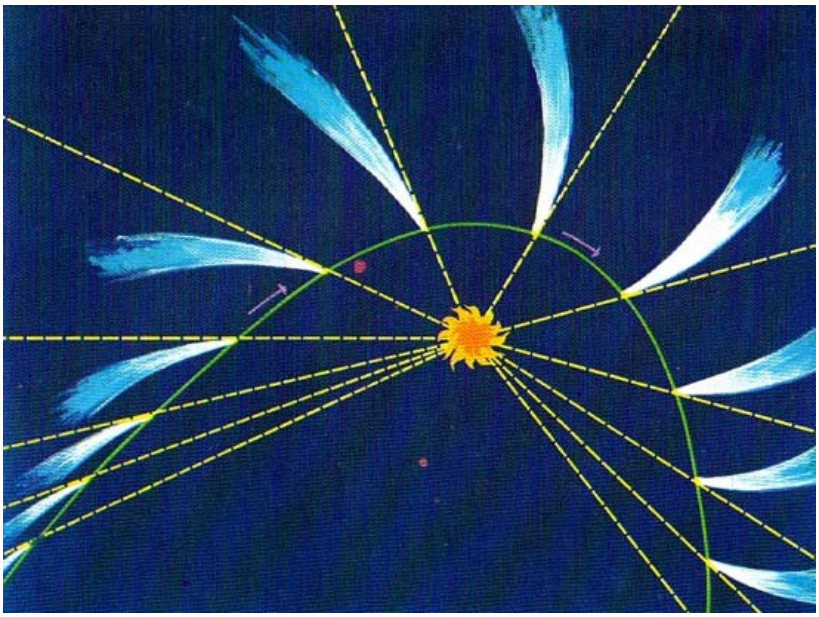


Figura 100a. Posiciones sucesivas de la cola de un cometa en su movimiento alrededor del Sol, debido al efecto conjunto sobre las mismas de la presión de radiación solar y del viento solar.

Con el tiempo estas agrupaciones de partículas se difunden hasta formar una corriente que ocupa toda la órbita del antiguo cometa, y las "lluvias de estrellas"

pierden intensidad rápidamente, aunque durante mucho tiempo es posible detectar sus manifestaciones cada vez que la Tierra cruza una de tales corrientes.

Capítulo 4
El Origen de los planetas

Contenido:

1. *Problemas planteados en Cosmogonía*
2. *Principio de conservación del momento angular*
3. *Teoría de la nebulosa primitiva*
4. *Teorías catastróficas*
5. *Nuevas teorías nebulares*
6. *La teoría del campo magnético*
7. *Origen de Plutón*

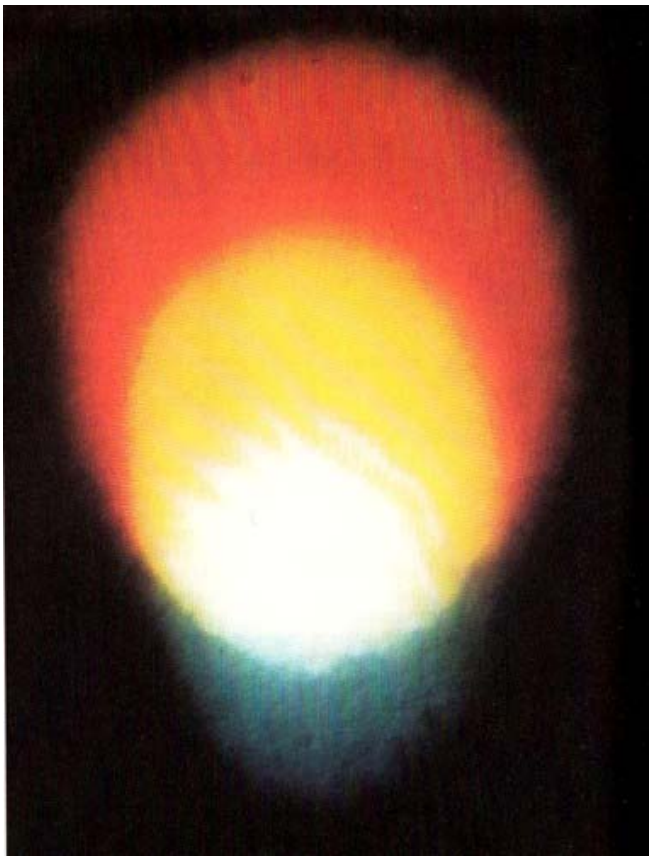


Imagen telescópica del planeta Venus tal como aparece en el crepúsculo.

1. Problemas planteados por la Cosmología

El origen y evolución del Sistema Solar se han intentado explicar por el simple método de aplicar las leyes físicas a la materia que le dio origen tal como se supone que existía en un principio, y observando su evolución subsiguiente hasta llegar a la situación conocida actualmente.

Poner de manifiesto teóricamente la evolución de esta materia primitiva sometida al dominio de las leyes de la física es tarea que entraña grandes dificultades, hasta tal punto que los procesos evolutivos no pueden seguirse paso a paso, sino únicamente en líneas generales. Por otra parte, no se tiene cono cimiento cierto de las condiciones reinantes en el origen del Sistema Solar y ninguno de los modelos propuestos conduce inexorablemente hasta la situación observada en la actualidad. Así, cada una de las teorías elaboradas explica correctamente algunos de los hechos observados, pero también llega a conclusiones contrarias a la experiencia, no existiendo ninguna teoría que sea completamente satisfactoria.

Uno de los hechos que ha de explicar cualquier teoría sobre el Sistema Solar es la circunstancia de que todos los planetas giran en un mismo sentido en torno al Sol, siguiendo órbitas de débil excentricidad y situadas prácticamente en un mismo plano. Por otra parte, también el Sol gira sobre sí mismo y su plano ecuatorial determina un ángulo muy pequeño con el plano de las órbitas de los planetas.

"Hace más de cien años Laplace expuso una teoría sobre la formación de los planetas... Sostenía que una estrella naciente podía desarrollar un disco de gas en torno a ella... y que los planetas se podrían formar a partir de la materia de ese disco. Pero esta teoría no fue aceptada universalmente por los astrónomos, sobre todo a principios del siglo actual, por una razón importante: decir sencillamente que una estrella puede arrojar un disco de gas no explica por qué esto hace más lenta su rotación... Para explicar la disminución de la rotación hay que demostrar que existe alguna relación entre la estrella y el disco."

FRED HOYLE

Por otra parte, las circunstancias de estos movimientos son tales que actualmente se observa una neta desigualdad en la distribución del momento angular total del

sistema, puesto que a los planetas corresponde un 98 % de esta magnitud, mientras que al Sol corresponde solo un 2 %.

Otro hecho que debe encontrar su explicación en los procesos que dieron origen al Sistema Solar es la separación de los planetas en dos grandes grupos de características bien diferenciadas: los ya citados planetas terrestres y los planetas gigantes. La relación de Bode también puede intentar justificarse a partir de las particulares condiciones en que se originaron los planetas, aunque su justificación no es esencial, pues algunos autores no creen que se trate de una verdadera ley, sino una simple coincidencia.

2. Principio de conservación del momento angular

Cuando un patinador que gira sobre el hielo extiende sus brazos su velocidad giro disminuye, en tanto que si teniéndolos extendidos los recoge su velocidad aumenta. Análogamente, si se hace girar una piedra atada al extremo una cuerda y se acorta la distancia entre la piedra y la mano, que sirve de soporte, se observa un aumento en la velocidad de rotación. Ambos hechos responden al llamado principio de conservación del momento angular.

Esta magnitud es una entidad física abstracta que ha sido definida para dar cuenta del estado de movimiento de un cuerpo que gira alrededor de un eje. Así, se puede hablar del momento angular correspondiente al movimiento de rotación de los planetas sobre sí mismos, o del momento angular de su movimiento de giro alrededor del Sol.

Aunque esa magnitud tiene una definición rigurosa, aquí basta con saber que es directamente proporcional a la masa del cuerpo que gira, a su velocidad y a su distancia al eje de rotación. Una característica muy importante del momento angular es que se conserva para un sistema aislado, es decir, que se mantiene constante para un cuerpo o sistema de cuerpos que giran alrededor de un eje, completamente aislados de acciones exteriores. Este hecho se conoce como principio de conservación del momento angular.

Así, en el caso de la piedra, al acortar la cuerda disminuye la distancia al eje de giro, el cual pasa por la mano que sostiene la cuerda, y, por tanto, como la masa es

siempre la misma, aumentará la velocidad de rotación para que el valor del momento angular no varíe.

Por otra parte, cuando un sistema aislado de dos o más cuerpos unidos o no gira alrededor de un mismo eje, estando cada cuerpo a distancia diferente de éste, se mantiene constante el momento angular del conjunto, el cual se puede calcular sumando convenientemente los momentos angulares de cada cuerpo; es decir, de no existir acciones exteriores el momento angular de un cuerpo del conjunto sólo puede aumentar o disminuir a expensas de una disminución o aumento correspondientes en el momento angular de los demás cuerpos.

3. Teoría de la nebulosa primitiva

Uno de los primeros modelos sobre el origen del Sistema Solar fue elaborado independientemente por el filósofo alemán Kant (1775) y por el astrónomo y matemático francés Laplace (1796).

Según dichos autores, en un principio existía una inmensa nube de gas cuyas dimensiones eran superiores a las del Sistema Solar actual, y que estaba animada por un lento movimiento de rotación. Poco a poco esta nebulosa fue condensándose por efecto de la fuerza de la gravitación, que impulsaba todas las partículas hacia el centro, por lo que sus dimensiones disminuyeron, fenómeno que a su vez significó un aumento de su velocidad de rotación de acuerdo con el principio de conservación del momento angular.

Hipótesis de Kant-Laplace. De una nebulosa de gas (1) salieron despedidos unos anillos de materia gaseosa (2) a partir de los cuales se formaron los planetas (3), dando lugar a nuestro Sistema Solar actual (4).

Como consecuencia de los efectos opuestos de la fuerza centrífuga y de la atracción gravitatoria, la nebulosa primitiva se condensó fuertemente según el eje de giro y mucho menos en el plano perpendicular al mismo, lo cual condujo a que la nube tomara forma de lenteja.

La atracción gravitatoria hacia el centro fue en aumento a medida que el núcleo central adquiría mayor masa. A este núcleo se le llamó protosol porque se supone que dio origen al Sol. Como consecuencia aumentó el grado de concentración de la nebulosa y, por tanto, su velocidad de rotación, hasta cristalizar una situación en que la fuerza centrífuga en las regiones más externas de la nebulosa superaba a la atracción gravitatoria, provocando que desde las mismas se segregara un anillo gaseoso. Una vez desprendido, este anillo continuó girando independientemente mientras el protosol permanecía girando con mayor lentitud.

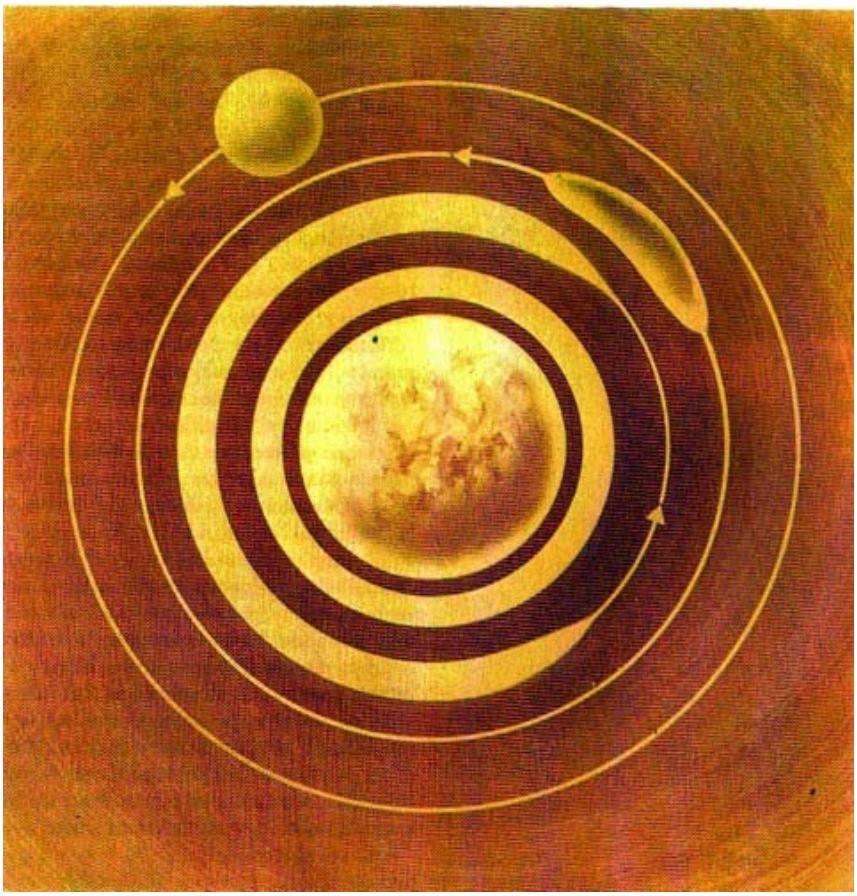
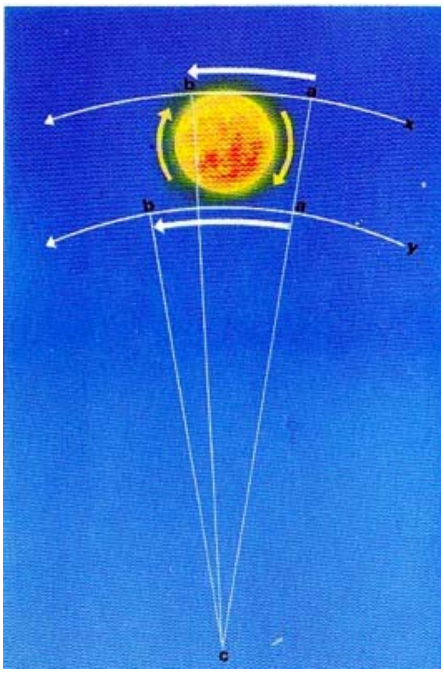


Diagrama en el que se representan el núcleo central de la nebulosa primitiva, según la teoría de Kant-Laplace, y cuatro planetas en distintas fases de formación.

Este fenómeno no impidió que continuara desarrollándose la contracción gravitatoria y, por consiguiente, que volviera a aumentar la velocidad de rotación del núcleo central hasta que se encontró en condiciones de emitir otro anillo. De ese modo el protosol fue dejando tras sí una serie de anillos gaseosos cuyas partículas, con el transcurso del tiempo, llegaron a unirse ?ara generar los planetas. Asimismo se supone que aquellas masas gaseosas que eran suficientemente importantes, es decir, las que dieron lugar a los planetas gigantes, fueron también capaces de engendrar unos cuerpos celestes menores, los satélites, a través de un proceso análogo al seguido por el protosol que los había engendrado a ellos.

Estas ideas fueron expuestas en líneas generales por Kant y Laplace. Su éxito fue tal que a lo largo de los siguientes cien años numerosos científicos se dedicaron a estudiarlas en profundidad, dándoles forma matemática y deduciendo todas sus consecuencias. Se observó que este modelo explicaba muchas regularidades del

Sistema Solar, pero se comprobó también que en algunos casos llegaba a conclusiones que estaban en abierta contradicción con los hechos observados.



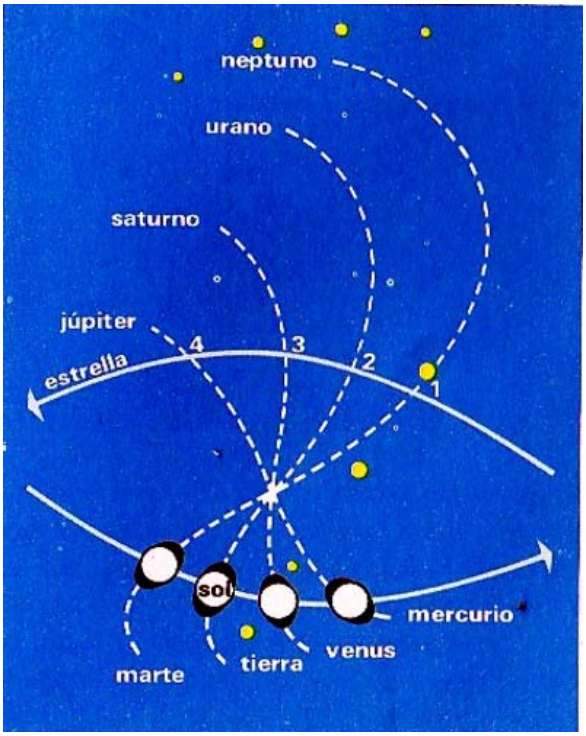
En la hipótesis de Kant-Laplace, el hecho de que las partículas que se mueven según el arco ***xab*** *lo hacen más lentamente que aquellas que se mueven según* ***yab*** *implica que los planetas deberían girar sobre sí mismos en sentido contrario al de su traslación, lo cual no está de acuerdo con lo que se observa en la realidad.*

Entre las características del Sistema Solar explicadas por la hipótesis nebular se cuenta la circunstancia de que todos los planetas se trasladan en un mismo sentido, en órbitas casi circulares y situadas en planos próximos.

En el capítulo de los fracasos cabe apuntar que, en función del modelo descrito, se deduce que la rotación de los planetas debería tener lugar en sentido contrario al de su traslación, o sea en el sentido retrógrado, lo cual no está de acuerdo con lo que se observa en la realidad. También se ha demostrado teóricamente que una masa de gases girando de modo anular no se condensará en un solo cuerpo sólido de grandes dimensiones, sino en infinidad de cuerpos de pequeñas dimensiones.

Sin embargo, la dificultad más importante que presenta la teoría nebular se relaciona con la cuestión del momento angular del Sistema Solar. El cálculo teórico de la velocidad necesaria para que el protosol emitiera los anillos gaseosos que dieron lugar a los planetas demostró que el momento angular tenía que haber sido

200 veces superior al observado en la actualidad, y además debería encontrarse en su mayor parte concentrado en el Sol. En la realidad se observa un momento angular mucho más pequeño y concentrado casi todo él en los planetas.



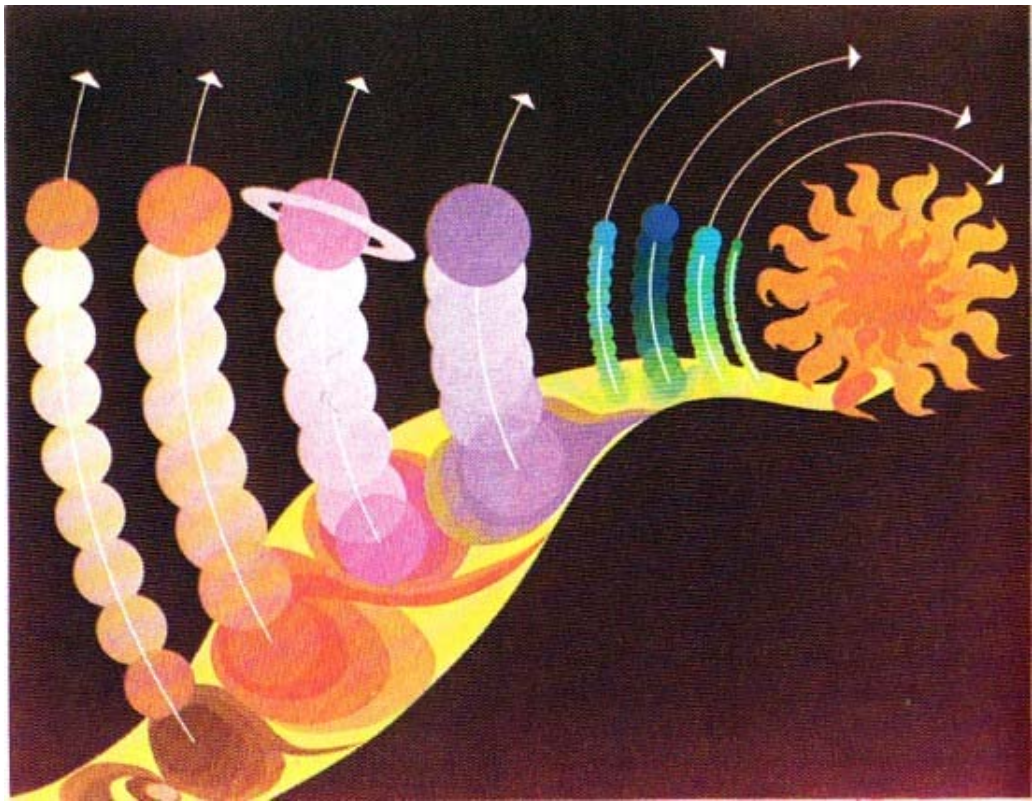
Esquema de la perturbación "mareal" del Sol, debida al paso de una estrella a corta distancia de éste, que dio origen al Sistema Solar según las teorías catastróficas. De acuerdo con los modelos primitivos, la perturbación dio origen a varios chorros de gas, que después se condensaron en los distintos planetas.

El principio de conservación citado en el apartado anterior obliga entonces a buscar algún proceso que justifique la desaparición de la mayor parte del momento angular original del Sistema Solar y la transferencia del resto desde el Sol a los planetas. Como tal proceso no se encontró, la teoría nebular cayó en descrédito y los astrónomos empezaron a buscar otros modelos para sustituirla, de los cuales se tratará a continuación.

4. Teorías catastróficas

Explican el origen del Sistema Solar a partir de consideraciones basadas en catástrofes cósmicas.

La primera teoría de este tipo fue propuesta por Chamberlain y Moulton a principios del siglo actual. Según estos autores, hace miles de millones de años una estrella debió de pasar a muy poca distancia del Sol, produciéndose en la superficie de ambos astros importantes movimientos de materia debido a la atracción gravitatoria que cada uno de ellos ejercía en el otro. Estas gigantescas mareas provocaron enormes "flechas" o chorros de gas a elevadísimas temperaturas, similares a las protuberancias que se observan actualmente en el Sol, pero de dimensiones muy superiores.

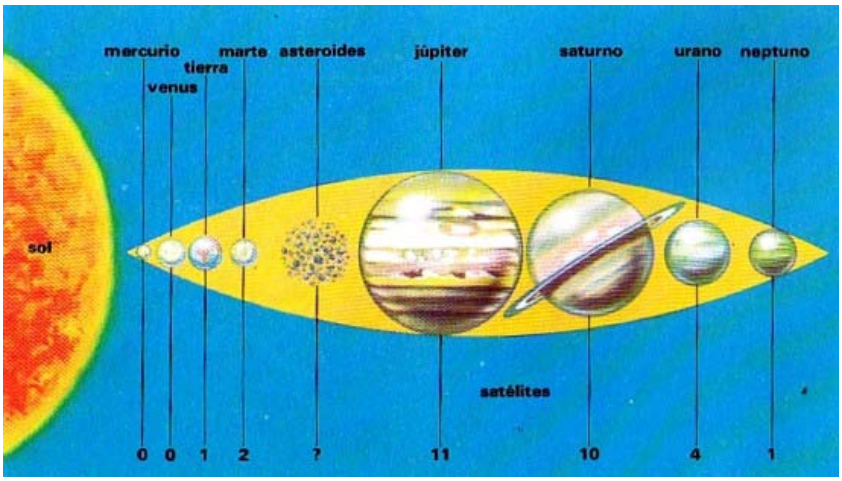


Según la hipótesis de Jeans, cuando se produjo el acercamiento de una estrella hacia el Sol, las protuberancias "mareales" no estallaron en flechas separadas, sino que se elevaron en un chorro continuo de gases que llegó a alcanzar la posición del planeta más exterior

Algunas de estas flechas pudieron escapar del Sol en pos de la estrella perturbadora. Cuando la estrella se alejó en el espacio quedaron libres de su influencia y volvieron hacia el Sol, pero no cayeron en su superficie, sino que empezaron a moverse a su alrededor según órbitas elípticas de gran excentricidad.

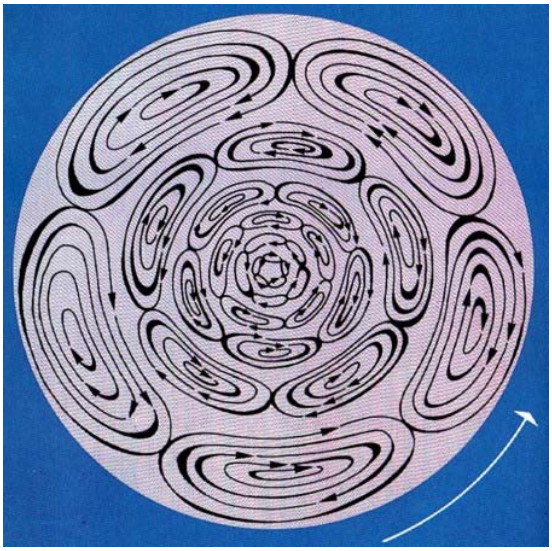
Al enfriarse estas flechas el gas se fue condensando y dio lugar a diminutas partículas sólidas, que han recibido el nombre de planetésimos. Algunas flechas produjeron enjambres de planetésimos suficientemente importantes para que la atracción gravitatoria mutua posibilitara su unión en un único cuerpo sólido, constituyéndose de este modo los núcleos primitivos de cada planeta.

Los cuerpos formados de ese modo continuaron girando alrededor del Sol y fueron recogiendo los planetésimos de las regiones cercanas a su órbita que no se habían podido unir en un núcleo planetario. De esta manera aumentaron de tamaño hasta alcanzar las dimensiones actuales de cada planeta.



La hipótesis de un único filamento como origen de los planetas, concuerda con la repartición de los tamaños de los distintos cuerpos del Sistema Solar.

Las órbitas de estos planetas deberían ser muy alargadas, como las de las flechas que los originaron, pero se supone que alrededor del Sol debió de existir una inmensa nube de gas, tal vez originada por una flecha que no pudo condensarse y se dispersó, la cual se comportó como un medio resistente que frenó el movimiento de los planetas, transformando las características originales de sus órbitas en las actuales.



Teoría de Weizsäcker y Ter Haar según la cual se originaron grandes torbellinos de turbulencia en un disco de gas rotativo acumulado alrededor del Sol, según esta teoría los planetas se habrían condensado en las regiones limitadas por los torbellinos contiguos.

Una variante de esta teoría, propuesta por sir James Jeans y por sir Harold Jeffreys, supone que el paso de la estrella perturbadora no produjo una serie de flechas gaseosas, sino una sola erupción de materia que adoptó el aspecto de un huso, es decir, más estrecha en los extremos que en el centro, y cuyas dimensiones eran las del Sistema Solar actual. Este filamento gaseoso era sin duda inestable, y al enfriarse la materia constituyente fue separándose en varias regiones constituyentes independientes, cada una de las cuales dio lugar a un planeta. La forma del filamento emitido justificaría entonces el que los planetas centrales Júpiter y Saturno sean de mayores dimensiones que los demás.

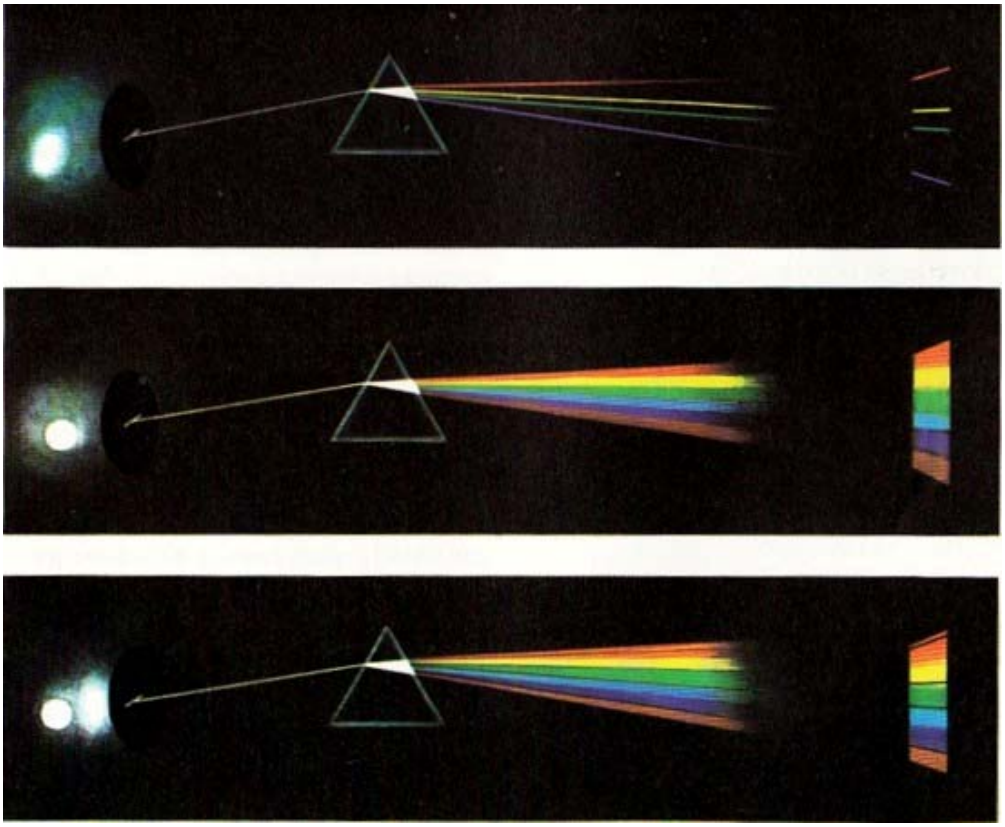
Esta teoría, al igual que las nebulares, permite explicar las características del Sistema Solar y además soslaya la dificultad que supone la distribución del momento angular en el Sistema al considerar que el movimiento de traslación de los planetas no guarda relación alguna con la rotación del Sol, sino con la acción del astro perturbador. O sea que el momento angular no ha sido transferido del Sol a los planetas, sino de la estrella visitante a los mismos y, por tanto, no tiene sentido buscar relación alguna entre el movimiento de giro del Sol sobre sí mismo y el movimiento de traslación de los planetas a su alrededor.

Sin embargo, las teorías catastróficas presentan tres dificultades aparentemente insuperables. En primer lugar, el momento angular de Júpiter representa casi el 60 % del momento angular de todos los planetas, y no hay nada en los procesos descritos anteriormente que permita justificar este trato de favor recibido por dicho astro. En segundo lugar, algunos autores afirman que para que fuera arrancada realmente materia de la superficie solar, la estrella perturbadora debería haber pasado a una distancia del orden de un radio solar, y en consecuencia todos los planetas se habrían originado a distancias inferiores a la misma, lo cual evidentemente no ha ocurrido así. Finalmente, se han efectuado cálculos que demuestran que la materia en estado gaseoso y a elevada temperatura que emergiera del Sol no podría condensarse dando origen a cuerpos sólidos, sino que, por el contrario, se produciría su disipación rápida en forma explosiva por el espacio.

5. Nuevas teorías nebulares

Hacia el año 1940 tuvo lugar el abandono casi definitivo de las teorías catastróficas, produciéndose simultáneamente una vuelta a las teorías nebulares de Kant y Laplace, pero reformadas. Estas nuevas versiones se caracterizan por eludir el problema planteado por la distribución del momento angular del Sistema Solar considerando simplemente un origen distinto para el Sol y para su cortejo de planetas.

El primer modelo de este tipo fue propuesto por Weizsäcker y Ter Haar. Suponían que alrededor del Sol, que se encontraba en un estado casi idéntico al estado actual, se fue acumulando una nube de materia interestelar que por motivos no bien especificados comenzó a girar hasta convertirse en un disco que se extendía hasta la órbita de Plutón.



El estudio de los espectros de la luz emitida por los cuerpos celestes, y en particular los planetas, ha permitido obtener una cantidad incalculable de datos sobre las características físicas de los mismos. En el grabado tres clases típicas de espectros obtenidos dispersando la luz por medio de un prisma. Arriba espectro de rayas, de misión; en el centro espectro continuo de emisión; abajo espectro con lías negras de absorción obtenido interponiendo una sustancia entre la fuente emisora y el prisma.

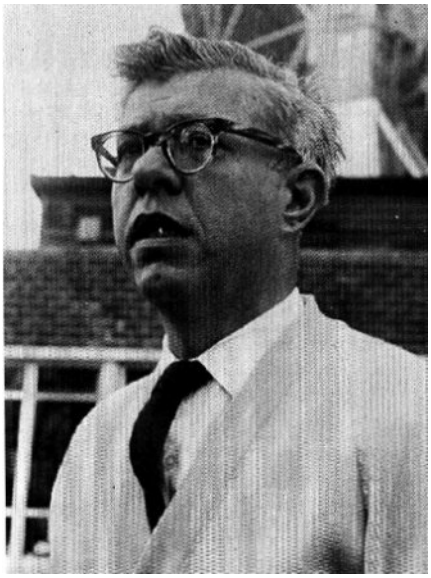
En el interior de esta nebulosa las partículas giraban alrededor del Sol, según órbitas elípticas que cumplían las leyes de Kepler, moviéndose más rápidamente las partículas más cercanas al Sol que las más alejadas. Como consecuencia de ello existía una diferencia de velocidad entre dos capas de partículas adyacentes, origen de grandes torbellinos en el seno de la masa de gas; estos torbellinos se comenzaron a mover alrededor del Sol en órbitas concéntricas; el cálculo demuestra que debían tener una rotación retrógrada, y que en las zonas intermedias entre dos de ellos se debieron originar unos contra remolinos que giraban en el sentido directo.

Si se postula que la condensación de la materia dio comienzo en estos contra remolinos, los cuales acapararon todo el material del espacio circundante hasta originar los distintos planetas, se justifica la uniformidad en el sentido de rotación de los mismos.

"He intentado explicar los fenómenos celestes y los de las mareas por la fuerza de la gravitación, pero en ninguna parte he dado a conocer la causa de la gravitación. Ello es debido a que todavía no he podido deducir de los fenómenos la razón de las propiedades de la gravedad y no imagino aún ninguna hipótesis, puesto que todo lo que no se deduce de los fenómenos es una hipótesis, y las hipótesis, ya sean metafísicas, físicas, mecánicas o acerca de las cualidades ocultas, no deben ser permitidas en la filosofía experimental."

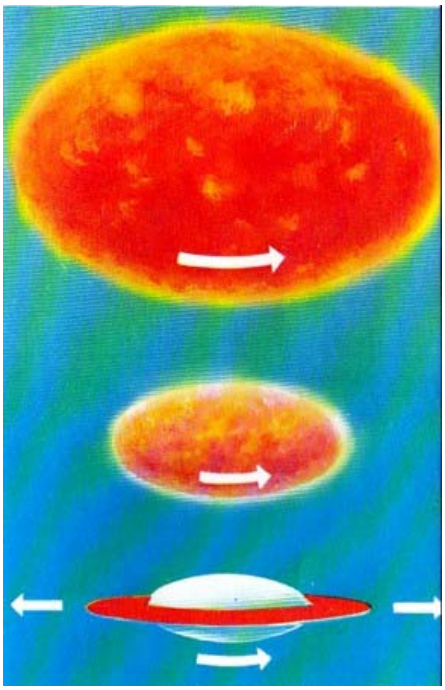
NEWTON

Por otra parte, si se tiene en cuenta que la teoría indica que las dimensiones de los torbellinos están en progresión geométrica, comenzando por el torbellino más cercano al Sol, la suposición de que los planetas se originaron en la región situada entre dos torbellinos consecutivos justifica también la ley de Bode-Titius.



Fotografía del profesor Fred Hoyle, tutor de la teoría que presupone la existencia de un campo magnético en el interior de la nebulosa primitiva.

A pesar de los éxitos explicativos de esta última suposición, no existe ningún motivo para creer que la formación de los planetas tuviese lugar precisamente en la región de los contra-remolinos, y lo que es peor, algunos autores rechazan la posibilidad de que estos últimos tengan que aparecer necesariamente en un sistema turbulento como el descrito.



Según las teorías de Alfvén y Hoyle, la contracción de la nebulosa primitiva pasó por estas tres fases sucesivas, al igual que se supone en el modelo de Kant-Laplace.

La existencia del Sol previa a la formación de la nebulosa primitiva que dio origen a los planetas proporciona una explicación verosímil al problema de la separación de los planetas en dos grandes grupos. En efecto, la acción del Sol en la masa de gases que se iba reuniendo a su alrededor hizo que únicamente materiales pesados, como hierro, silicatos, níquel, se pudieran condensar en sus cercanías, mientras que los materiales más ligeros, como hidrógeno, helio, oxígeno y nitrógeno, sólo pudieron condensarse en las regiones más alejadas del Sol, quedando en estado gaseoso en las más próximas.

En consecuencia, en las proximidades del Sol se formaron los planetas rocosos, constituidos principalmente por hierro y silicatos, los cuales no alcanzaron en ningún caso gran tamaño debido a la relativamente poca abundancia de dichos materiales

en la nebulosa primitiva, cuya formación se supone igual que la de la materia interestelar actual, y también debido a la perturbación de las fuerzas de marea ejercidas por el Sol.

En cuanto a los elementos ligeros que quedaron en forma gaseosa alrededor de estos planetas; se admite que en gran parte escaparon al espacio en una época temprana de la historia de estos cuerpos celestes.

Por otro lado, en las regiones alejadas del Sol se pudieron formar planetas no sólo por agregación de materiales sólidos pesados, sino también mediante el concurso de hidrógeno y helio, los cuales serían los elementos más abundantes en la nebulosa primitiva. Este hecho, junto con la poca importancia de las fuerzas de marea ejercidas por el Sol en esas regiones, justifican las elevadas dimensiones de los planetas gigantes y su constitución química.

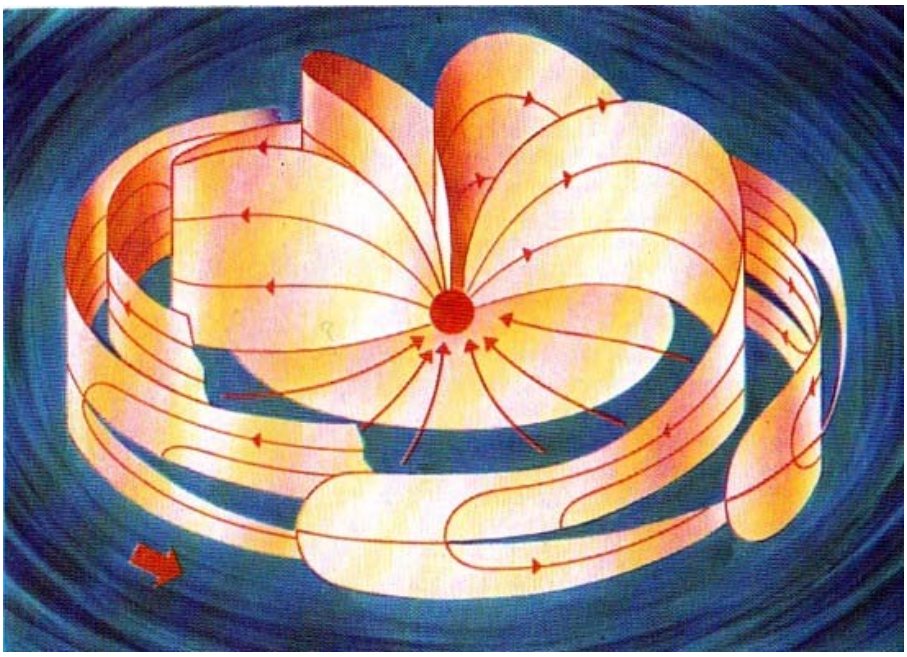
Por lo que se refiere a los procesos concretos que pudieron dar origen a un planeta sólido a partir de las partículas le gas de la nebulosa primitiva, cabe destacar la teoría elaborada por el astrónomo soviético O. Schmidt. Según este autor, las moléculas de gas interestelar se unieron para dar origen a pequeñas partículas sólidas o gotitas líquidas, por efecto de las fuerzas de atracción química existentes entre ellas. Los choques mutuos hicieron que disminuyeran las velocidades relativas de dichas partículas, con lo que la nube de materia fue achatándose, es decir, sus dimensiones se hicieron menores y aumentaron con ello los choques de las partículas constituyentes. Mediante este proceso se demuestra teóricamente que es posible la formación de cuerpos de dimensiones análogas a las de un asteroide, los cuales a su vez debieron continuar sufriendo choques mutuos hasta que acabaron fusionándose en unos pocos cuerpos de grandes dimensiones, los actuales planetas.

6. La teoría del campo magnético

Finalmente, cabe citar, aunque sea de modo breve, una teoría que, a pesar de haber sido dada a conocer hace pocos años por Fred Hoyle y Hannes Alfvén, se ha extendido ampliamente en el mundo científico. Este modelo posee el gran atractivo de resucitar las teorías de Kant y Laplace con todas sus premisas, es decir, suponiendo un origen simultáneo para el Sol y los planetas.

La teoría propuesta por Hoyle y Alfvén supone la existencia de un importante campo magnético en el interior de la nebulosa primitiva. Un efecto muy general estudiado precisamente por Alfvén considera que si existe un campo magnético en el interior de una masa gaseosa parcialmente ionizada, y ésta se pone en movimiento de giro, las líneas de fuerza se comportan, en lo que respecta a su interacción con la materia parcialmente ionizada, como si se tratara de cuerdas elásticas.

Aceptando este fenómeno, se supone que cuando la nebulosa primitiva, en la cual se encontrarían muchos átomos y moléculas parcialmente ionizados, expulsó un anillo de materia por efecto de la fuerza centrífuga, las líneas de fuerza magnética sirvieron de nexo de unión entre la materia del núcleo y el anillo expulsado. Es más, al quedar girando las regiones centrales con mayor rapidez que las eyectadas, el efecto de las líneas de fuerza consistió en frenar el movimiento del protosol acelerando el del anillo separado a la par que lo impulsaba cada vez más lejos del centro.



Las teorías de Alfvén y Hoyle recurren a procesos magneto hidrodinámicos muy complejos para explicar las actuales características de magneto hidrodinámicos cuerpos del Sistema Solar.

Esta teoría permite mantener la tesis de un origen conjunto del Sol y de su cortejo de planetas, explicando a la vez el proceso de transferencia del momento angular

de las regiones centrales a las periféricas, así como el hecho de que los anillos desprendidos del núcleo central pudieran llegar a distancias tan alejadas del centro como Neptuno.

Por lo demás, esta teoría acepta los mismos procesos que los expuestos al explicar el origen de los planetas a partir del gas primitivo y para justificar su división en planetas terrestres y planetas gigantes. Este último proceso no pudo comenzar a regir desde un principio, pues el Sol no comenzó a brillar hasta un estadio posterior en la formación del sistema planetario. Mas una vez el Sol comenzó a irradiar energía en el espacio, los procesos de selección de materiales se pudieron producir del modo descrito en el apartado anterior.

7. Origen de Plutón

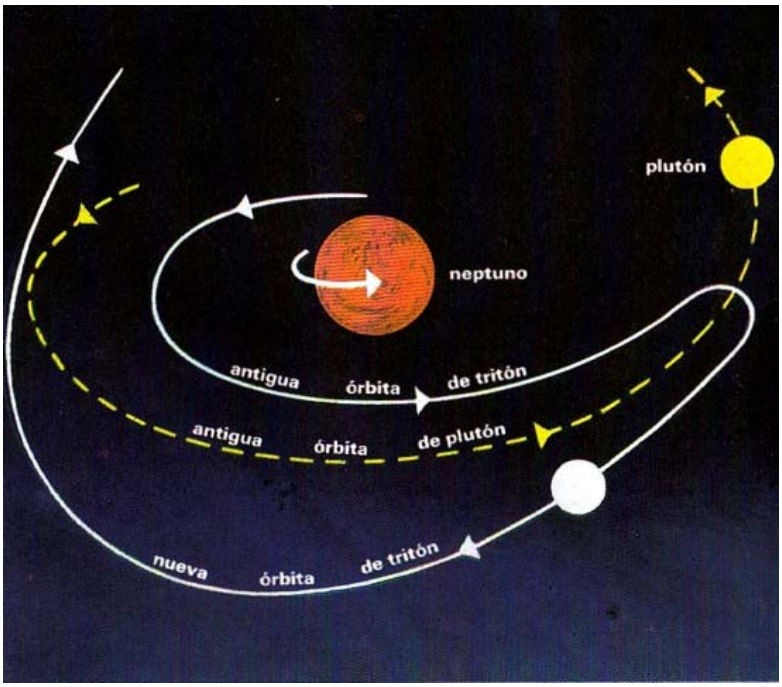
El hecho de que Plutón tenga propiedades excepcionales en comparación con las de los demás planetas hace que su origen no pueda ser explicado de modo similar.

Para resolver este enigma Lyttleton propuso una teoría explicativa del origen de Plutón que actualmente tiene una aceptación casi general.

Según dicho autor, el planeta era en un principio un satélite de Neptuno y describía una órbita regular a su alrededor.

Imagen de la llamada nebulosa Trífida en la constelación de Sagitario (NGC 6514)

En algún instante del remoto pasado su movimiento orbital normal le habría llevado a pasar a muy corta distancia de otro satélite, Tritón, el cual también se movía en una órbita regular. Como consecuencia de esta aproximación se produjeron fortísimas perturbaciones mutuas y Plutón pudo escapar de la zona de atracción gravitatoria de Neptuno pasando a girar alrededor del Sol como un planeta más. Paralelamente, el movimiento de Tritón habría sufrido modificaciones considerables, hasta el punto de transformarse en un satélite con movimiento retrógrado cuya órbita presenta un ángulo de inclinación muy fuerte respecto al plano del ecuador del planeta.



Cada día parece más aceptable la hipótesis de que Plutón era originariamente un satélite de Neptuno, que fue eyectado en su primitiva órbita debido a un acercamiento muy pronunciado al también satélite Tritón.

Capítulo 5
Origen de los astros menores

Contenido:

1. *Origen de los satélites*
2. *Formación de la Luna*
3. *Origen de los asteroides*
4. *Origen de los cometas*

1. Origen de los satélites

Desde el punto de vista de su origen, debe considerarse separadamente cada uno de los grandes grupos en que pueden clasificarse los satélites, es decir, el conjunto de los satélites llamados regulares y el de los irregulares.

El origen de los satélites regulares se supone debido a un proceso análogo al que engendró el sistema planetario, admitiéndose que ambos fenómenos tuvieron lugar simultáneamente.

El origen de los satélites irregulares es muy distinto. Concretamente se supone que no son otra cosa que asteroides capturados por el planeta en torno al cual giran, en épocas muy posteriores a la formación del mismo, es decir, asteroides que pasaron demasiado cerca de un planeta, por lo que su órbita resultó fuertemente perturbada, hasta el punto de escapar de la atracción solar para pasar a gravitar alrededor del planeta perturbador.

Las nuevas órbitas de estos asteroides-satélites son inestables y pueden sufrir modificaciones con el tiempo. Por ello, ciertos autores creen posible que algún satélite irregular pueda escapar a la influencia de su astro central, para convertirse nuevamente en asteroide. Este proceso de captura de un asteroide y fuga subsiguiente tendría lugar en un intervalo de tiempo de muchos miles de años, o incluso de millones de años. Como consecuencia del mismo, la población de satélites irregulares de un planeta no sería fija, sino que podría sufrir fluctuaciones en el número de sus componentes, siempre y cuando se consideren períodos de tiempo suficientemente grandes.

2. Formación de la Luna

Algunos científicos consideran que, a pesar de sus peculiaridades, el sistema Tierra-Luna se ha originado como los demás sistemas de satélites regulares, es decir, que ambos astros han nacido simultáneamente como planeta principal y satélite a causa de condensaciones en la nebulosa primigenia.

Sin embargo, esta teoría no está exenta de inconvenientes. En primer lugar, es preciso hallar una explicación para justificar la diferencia de densidades entre la Tierra y la Luna, formadas a partir del material situado en una misma región del espacio y que se supone, por tanto, de constitución homogénea.

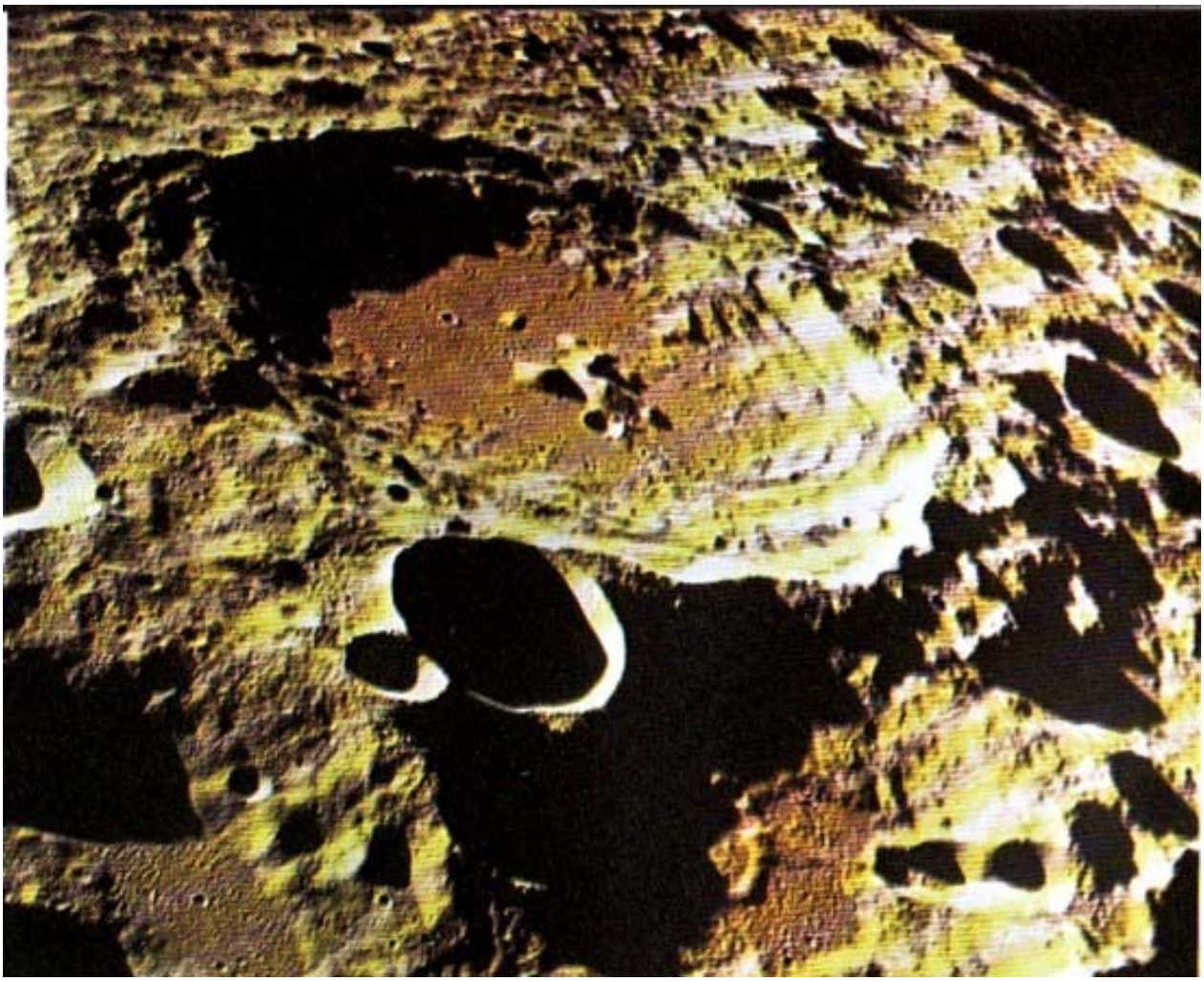


Imagen en la que aparece la superficie lunar tal como puede ser observada desde una cápsula espacial orbitando alrededor de la Luna.

En segundo lugar, al ir creciendo las masas de la Tierra y de la Luna, por acreción de los materiales que se encontraban a lo largo de sus órbitas, lo más probable hubiese sido que la Luna acabara precipitándose contra la Tierra para formar un solo cuerpo, o que escapara de la atracción terrestre transformándose en un planeta independiente.

Como consecuencia de estas dificultades y de las características peculiares del sistema Tierra-Luna, muchos autores creen que el origen de nuestro satélite ha de explicarse mediante un modelo particular. Actualmente existen dos teorías al respecto, sin que se haya conseguido obtener ningún elemento concluyente en favor de ninguna.

La más antigua de estas teorías fue elaborada en 1880 por Georges H. Darwin, hijo del famoso naturalista Charles Darwin, y en la misma se supone que, en un principio, la Tierra existía sola en el espacio.

En algún momento de su historia las oscilaciones producidas por las mareas en el globo terrestre entraron en resonancia con la frecuencia de oscilación natural del mismo, y como derivación se desprendió una parte importante que permaneció girando alrededor de la Tierra dando origen a la Luna. La fragmentación de esta gran masa rocosa debió de producir en el planeta una enorme cicatriz, que se supone actualmente ocupada por las aguas del océano Pacífico.

En apoyo de esta teoría se han encontrado argumentos importantes. Por una parte, está el hecho de que la densidad media de la Luna es la misma que la densidad media de las capas superficiales del globo terrestre. Por otra parte, las observaciones demuestran que la Luna se está alejando de la Tierra en el transcurso del tiempo, por lo que invirtiendo el proceso se llega a la conclusión de que hace 4.500 millones de años la Luna estaría a muy poca distancia de la superficie terrestre.

Sin embargo, esta teoría presenta también inconvenientes importantes. Uno de ellos lo plantea el llamado "límite de Roche", que es la menor distancia a la cual puede encontrarse un satélite de su astro principal sin que las mareas produzcan su desintegración. En el caso de la Tierra, esa distancia es de 2,9 radios terrestres, por lo que no parece posible que la Luna haya estado nunca más cerca de este planeta que dicha distancia. Otra razón de peso son los cálculos realizados a principios de

siglo por Moulton y más tarde por Jeffreys y Lyttleton, en los cuales se pone de manifiesto que una gran masa arrancada de la Tierra por fuerzas de marea, debería volver a caer sobre la misma o, en caso contrario, acabaría escapando de la atracción terrestre para siempre.

Una segunda teoría sobre el origen de la Luna supone que ésta y la Tierra se formaron como dos planetas independiente: en lugares distintos del Sistema Solar, y que debido a circunstancias no bien explicadas, la Luna fue capturada por la Tierra en algún momento del pasado, convirtiéndose en su satélite.

Este modelo, perfectamente compatible con la diferencia entre las densidades medias de la Tierra y de la Luna observada en la realidad, presenta a la vez una importante dificultad: la densidad media de la Luna no coincide tampoco con la de ninguno de los demás planetas de tipo terrestre. Consecuencia inmediata de ello es que la formación de la Luna como planeta independiente debería haber tenido lugar en alguna región del espacio distinta de la que sirvió de cuna a los planetas terrestres. Si esto fuera cierto, las dificultades para un proceso de captura de la Luna por la Tierra serían todavía mayores, casi insuperables, que en el caso de suponer que ambos cuerpos celestes hubieran nacido relativamente próximos en el espacio.

Estas son las tesis de mayor interés para la explicación del origen de la Luna; aunque ninguno de ellos sea completamente satisfactorio, la mayoría de autores, no buscan por ahora nuevos caminos, sino que intentan introducir modificaciones en alguno de los modelos citados para adecuarlos al máximo a las propiedades observadas del sistema Tierra-Luna. En este sentido han realizado ya algunos trabajos, pero no se ha obtenido aún ningún resultado definitivo.

3. Origen de los asteroides

El hecho de que los asteroides ocupen el lugar de un planeta en la sucesión numérica deducida en la relación de Bode hizo que algunos científicos imaginaran que podían haberse originado por desintegración de un solo planeta primitivo. Aunque no pudieron exponer de manera convincente los motivos de desintegración de dicho planeta, sugirieron que podía haber sido destruido por las perturbaciones

de los planetas cercanos, especialmente por las de Júpiter, en una época bastante temprana del desarrollo del Sistema Solar.

Actualmente se supone que lo ocurrido en la realidad fue que la influencia perturbadora de los planetas vecinos impidió la segregación de la materia de las regiones situadas entre Marte y Júpiter en un solo cuerpo celeste. De este modo la materia existente en dichas regiones sólo pudo generar una serie de planetoides de tamaño relativamente pequeño que no consiguieron continuar agregándose hasta reunirse un solo cuerpo.

Estos primitivos planetoides no permanecieron inalterados, sino que se fueron deshaciendo, por choques mutuos o por las perturbaciones ejercidas por Júpiter, originando los actuales asteroides. Parece que Ceres y Palas son los dos únicos ejemplares que restan de estos cuerpos celestes primitivos, habiendo desaparecido los demás.

En favor de esta teoría aparece el hecho de que, en función de las características de sus órbitas, los asteroides pueden clasificarse en unos pocos grupos. Los componentes de cada uno de estos grupos se caracterizan por tener órbitas muy parecidas, mientras que dos asteroides pertenecientes a dos grupos distintos poseen trayectorias señaladamente diferentes. Este hecho parece sugerir que cada grupo se ha originado por disgregación de un solo planetoide primitivo y, por tanto, constituye una prueba indirecta de su existencia.

4. Origen de los cometas

La teoría más verosímil de las existentes en la actualidad referente al origen de los cometas fue la propuesta por Van Woerkom y Oort. Según ellos, girando alrededor del Sol en órbitas circulares y a una distancia media que es del orden de la mitad de la distancia media que separa al Sol de la estrella más cercana, se encuentra una nube de cometas, más exactamente de núcleos cometarios, ya que, como se ha dicho antes, la cabellera y la cola se desarrollan por influjo del Sol, cuando estos cuerpos celestes alcanzan sus proximidades.

El número de componentes de esa nube se calcula en unos 200.000 millones, pero por ser sus dimensiones pequeñísimas (la mayoría apenas alcanza a tener 1 km de diámetro, y sólo unos pocos superan ampliamente este tope, sin llegar a los 100

km) resulta que su masa total no debe de ser mayor que 100 veces la masa de la Tierra.

A causa de las perturbaciones provocadas por las estrellas próximas alguno de estos núcleos cometarios, tal vez uno de cada 100.000, abandona esas regiones interestelares y se acerca al Sol, produciéndole las transformaciones físicas descritas en el apartado relativo a los cometas. A partir de entonces el cometa se mueve en una órbita elíptica de gran excentricidad y agota poco a poco su materia a lo largo de sucesivos pasos por el perihelio, hasta descomponerse en multitud de fragmentos, los cuales, si la Tierra se cruza en su órbita, producen las llamadas "lluvias de estrellas".

En algunos casos, cuando el cometa pasa demasiado cerca del Sol, la órbita puede resultar muy perturbada y transformarse en una curva abierta, y en consecuencia el cometa escapa para siempre de los dominios del Sistema Solar.

Capitulo 6
Posible existencia de otros sistemas solares

La llamada nebulosa Lagoon en la constelación de Sagitario

Para conocer con seguridad la existencia de otros sistemas solares habría que poder detectar telescópicamente las posibles agrupaciones de astros oscuros de una estrella. Esta condición no se puede cumplir, ni aun para las estrellas más cercanas, debido a las pequeñas dimensiones de los planetas y a la poca intensidad de la luz que reflejan.

Un procedimiento indirecto para la detección de planetas consistiría en poner de manifiesto las perturbaciones que los mismos pueden producir en el movimiento de una estrella. Cuidadosas mediciones efectuadas entre los astros más cercanos han

demostrado que en algunos casos están acompañados por cuerpos oscuros de grandes dimensiones. Sin embargo, el procedimiento no permite distinguir si se trata de un verdadero planeta o de una estrella muerta que constituyera un sistema doble con la que vemos en el presente.

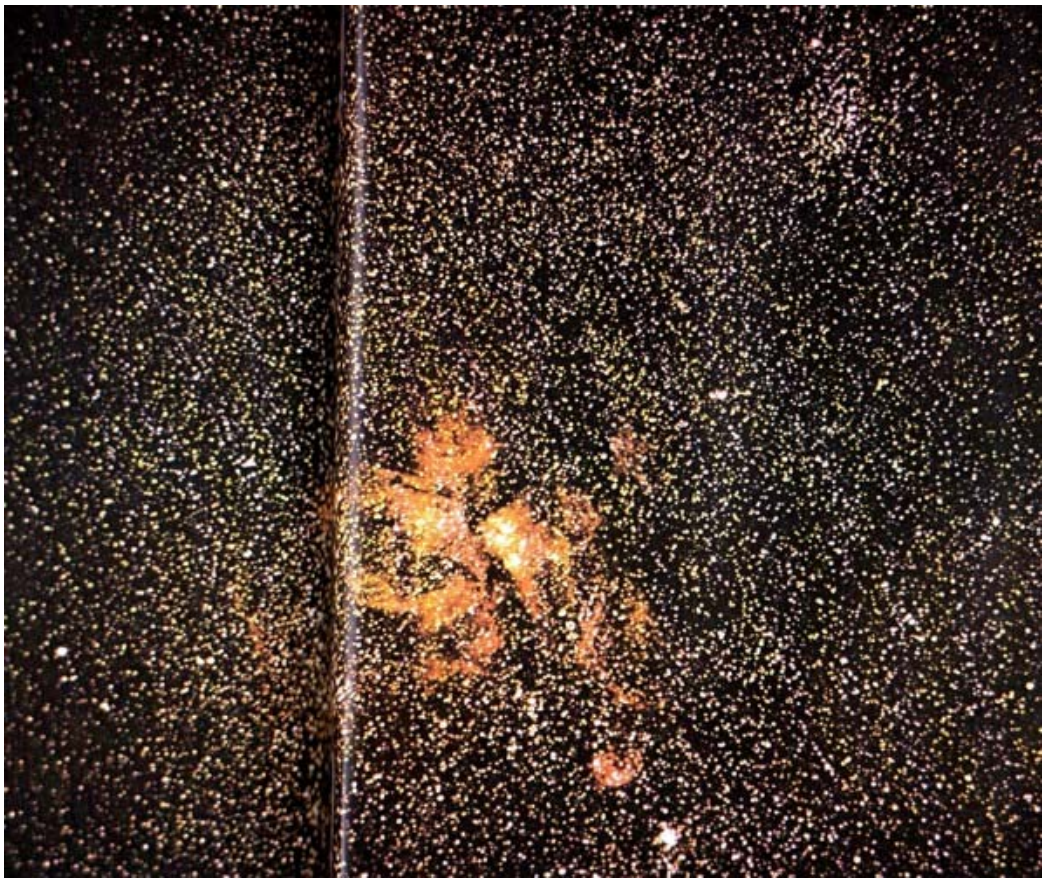
La galaxia de Andrómeda, una de las más estudiadas y perfectamente visible sin ayuda de instrumentos ópticos.

Los métodos disponibles en la actualidad no pueden proporcionar pruebas directas o indirectas de la existencia de otros sistemas planetarios semejantes al nuestro. ¿Significa ello que nunca podrá detectarse su presencia a menos que se descubran nuevos métodos de observación?

En realidad, la situación puede considerarse optimista; existen razones fundamentadas para creer que las propias teorías cosmogónicas proporcionarán unas vías válidas para la búsqueda de nuevos sistemas solares.

En efecto, si una teoría catastrófica resultara ser la única explicación válida para la génesis del Sistema Solar, la existencia de otros sistemas análogos dependería del número de aproximaciones entre estrellas que hayan tenido lugar en nuestra

galaxia. Este número se ha podido calcular a partir de la distribución actual de las estrellas y teniendo en cuenta sus movimientos medios, resultando que desde los orígenes de la Galaxia hasta nuestros días sólo han tenido lugar unas 10 colisiones capaces de arrancar materia de los astros que intervienen en ellas.



Campo de estrellas densamente poblado, algunos de cuyos elementos pueden estar acompañados por sistemas planetarios que eventualmente pueden ser sede de procesos vitales.

Es decir, las teorías catastróficas conducen ineluctablemente a suponer que en nuestra galaxia existe un número muy reducido de sistemas solares y, por tanto, serían de muy difícil localización entre los millones de estrellas.

En cambio, todas las teorías nebulares que imaginan un mismo origen para el Sol su cortejo planetario presuponen que la formación de los planetas es una etapa por que pasa cualquier estrella durante su evolución normal. En consecuencia, todas s estrellas que se encuentran en fase avanzada de desarrollo deberían poseer un sistema planetario.

Por otra parte, si se acepta la hipótesis de Hoyle y Alfvén, según la cual la formación de un sistema planetario comporta la transferencia del momento angular desde la estrella a los planetas, se llega a la conclusión de que aquellas estrellas que han pasado por tal fase han de girar lentamente como el Sol, en tanto que las estrellas sin planetas han de moverse rápidamente.

Una entre los millones de estrellas que, como nuestro Sol, brillan en el espacio y pueden estar acompañadas por sistemas planetarios, sin que hasta ahora se conozca ningún procedimiento para detectarlos. Abajo, nebulosa llamada de Dumbbell

Las primeras comprobaciones realizadas parecen demostrar lo acertado de esa hipótesis, puesto que la gran mayoría de las estrellas muy jóvenes giran sobre sí mismas a gran velocidad, mientras que las estrellas de desarrollo más avanzado lo hacen con lentitud. Se ha visto, además, que no existen velocidades de transición, es decir, que todo ocurre como si en algún momento del desarrollo de la estrella se produjera un cambio relativamente brusco en la velocidad de rotación.

Grupo de estrellas pertenecientes al cúmulo de las Pléyades, cuyo tono azul es característico de las estrellas jóvenes

Fotografía de un sector de la Vía Láctea.

En conclusión, se puede afirmar que el camino que se sigue actualmente para la búsqueda de otros sistemas planetarios es el de determinar en las teorías cosmogónicas alguna característica que permita distinguir fácilmente y sin dudas una estrella que haya desarrollado un sistema planetario de otra que no lo haya hecho. De esta manera, dado que un conocimiento detallado de las propiedades físicas de las estrellas encaja perfectamente en el campo de las actuales posibilidades experimentales, se podría resolver de modo favorable el problema de la localización de otros sistemas planetarios y, eventualmente, el de cualquier manifestación de vida inteligente, en caso de que existiera.

Vocabulario

Albedo Fracción de la energía, y en particular de la luz, que incide sobre la superficie de un cuerpo celeste y que es reflejada por éste

Año luz Distancia recorrida por la luz en un año, que equivale aproximadamente a 9,46 billones de kilómetros

Caldera Depresión de forma más o menos circular, en general de grandes dimensiones y con paredes escarpadas, originada por hundimiento o explosión de un cráter volcánico

Campo magnético Si por campo se entiende la región del espacio afectada por la perturbación creada por uña distribución de masas, cargas eléctricas u otros agentes físicos, campo magnético será el creado por imanes y cargas eléctricas en movimiento

Centelleo Oscilación que se observa en la intensidad y coloración de la luz proveniente de las estrellas debido a la heterogeneidad de la atmósfera terrestre

Disco Figura circular y plana con que se presentan a nuestra vista las superficies del Sol, de la Luna y de los planetas

Eje del mundo Eje al- rededor del cual gira la Tierra y que, prolongado hasta la esfera celeste, determina en ella dos puntos que se denominan polos

Esfera celeste Esfera ideal concéntrica con el globo terráqueo y en la cual están situados y aparentemente se mueven los astros

Excentricidad Razón constante entre la distancia de un punto cualquiera de una elipse a su foco y la distancia al semieje mayor que contiene dicho foco; constituye una medida de la forma más o menos circular (excentricidad pequeña) o alargada (gran excentricidad) que puede presentar la elipse

Fuerza centrífuga Fuerza aparente que se observa en un movimiento de rotación alrededor de un centro y que tiende a alejar el cuerpo en rotación de dicho centro

Geocéntrico Aplicase al modelo de sistema planetario elaborado por Ptolomeo, y en general a toda teoría que supone la Tierra como centro del Universo

Heliocéntrico Que tiene el Sol como centro. Dícese de los modelos de sistemas planetarios que consideran el Sol como centro

Hidrodinámica Parte de la mecánica que estudia el movimiento de los fluidos y de los cuerpos en ellos sumergidos

Línea de fuerza En un cuerpo cualquiera, dirección en la cual se manifiesta la acción de las fuerzas del mismo

Mapa celeste	Conjunto de fotografías o diseños del firmamento que reproducen sus regiones y permiten la localización de los cuerpos ce- lestes visibles desde la Tierra
Órbita	Curva descrita por un cuerpo celeste en su movimiento en el espacio
Protuberancia solar	Chorro de gas de gran variedad de forma que asciende a alturas de varios millares de kilómetros en la corona solar y que proviene de la cromosfera
Punto subsolar	Lugar de la superficie de un planeta sobre el cual la luz del Sol incide verticalmente
Reacción termonuclear	Interacción entre diversos núcleos atómicos con formación de otros nuevos. Suele ir acompañada del desprendimiento de gran cantidad de energía