

A la memoria de JOHN RAE JEPPSON con cuya hija tuve la fortuna de casarme

# Capítulo 1

# El sistema solar original

### Contenido:

- 1. Los planetas
- 2. El planeta lento
- 3. El planeta distante
- 4. Distancia en kilómetros
- 5. La forma del sistema solar

# 1. Los planetas

Cuando los hombres comenzaron a observar el cielo con atención, se dieron cuenta de que en las noches claras lucía lleno de estrellas. Y éstas parecían hallarse en un esquema fijo que se repetía noche tras noche.

Daba la impresión de que el cielo entero, junto con las estrellas, cambiaba de posición lenta y regularmente al contemplarlo cada noche a la misma hora, por ejemplo, nada más ponerse el sol. Parecía que giraba toda la bóveda del cielo, y hacía falta un año entero para que diera una vuelta completa y regresara de nuevo a su posición original. Sin embargo, mientras el cielo giraba, las estrellas conservaban sus posiciones relativas.

En el cielo había siete objetos que sí cambiaban de posición en relación con el fondo de las «estrellas fijas».

Uno de ellos es el Sol, un círculo de luz resplandeciente que es, con mucha diferencia, el objeto más brillante del firmamento. Cuando está en el cielo, su luz hace que desaparezcan todas las estrellas. Y lo que es más, la dispersión de la luz solar da al cielo su color azul.

Poco antes de la salida del sol y poco después del ocaso es posible ver el conjunto de estrellas que están próximas a él. Teniendo en cuenta la forma en que cambia este conjunto, es claro que el Sol se mueve diariamente sobre ese fondo.

Luego está la Luna. Al igual que el Sol, es un círculo de luz, pero mucho más débil. Cuando brilla en el cielo, se siguen viendo las estrellas, por lo cual es fácil averiguar cómo va cambiando de posición, de noche en noche, en relación con el fondo estelar.

La Luna se desplaza por el cielo a una velocidad que es mucho mayor que la del sol, lo cual quiere decir que cambia de posición con relación a éste. En algunos casos está próxima al Sol, y a veces llega a vérsela brillar débilmente durante el día cuando la luz solar no la hace desaparecer del todo. Por el contrario, hay veces en que está lejos del Sol y brilla en lo alto del cielo después del ocaso. Entonces su brillo es muy intenso.

La Luna brilla únicamente porque refleja la luz que le llega del Sol. Sus distintas partes reciben la luz solar en distintos momentos, según cuál sea su distancia al Sol. Esa es la razón por la que parece que la Luna cambia de forma. Unas veces la vemos como un círculo luminoso perfectamente redondo, otras como un semicírculo, y otras en forma de uña.

Además del Sol y de la Luna, hay en el cielo otros cinco objetos que se mueven sobre el fondo de las estrellas fijas; cada uno de ellos lo hace a su propia velocidad y a su propia manera. Estos cinco astros parecen estrellas, pero brillan con más intensidad que éstas.

Entre estos objetos parecidos a estrellas hay dos que, al cambiar de posición, nunca se alejan demasiado del Sol, de forma que sólo los vemos en el cielo un cierto tiempo después del ocaso, si es al atardecer, o durante cierto período antes de la salida del Sol, si al amanecer. Estos objetos son Mercurio y Venus.

Como Mercurio v Venus están siempre cerca del Sol, nunca los vemos en el cielo a medianoche, cuando aquél brilla en el lado contrario de la Tierra. En ese momento Mercurio y Venus siguen estando cerca del Sol, como de costumbre, y por tanto brillan en la cara de la Tierra donde no se halla el observador.

Con esto, sólo quedan tres objetos brillantes que pueden aparecer a cualquier distancia del Sol y que por tanto pueden, a lo largo de sus desplazamientos, estar en el cielo en cualquier momento de la noche, incluso a medianoche. A estos objetos los llamamos Marte, Júpiter y Saturno.

Los antiguos griegos denominaban «planetes» a estos objetos que se movían, o erraban, sobre el fondo de las estrellas fijas. Es una palabra griega que significa «vagabundo, viajero», y de ella procede nuestro término «planeta».

Los hombres de la antigüedad contaban siete planetas: el Sol, la Luna, Mercurio, Venus, Marte, Júpiter y Saturno. Pensaban que todos estos planetas daban vueltas en torno a la Tierra, que para ellos constituía el centro del universo.

Sin embargo, en 1543, un astrónomo polaco, Nicolaus Copernicus (1473-1543), publicó un libro en el que demostraba que tenía más sentido suponer que los distintos planetas semejantes a estrellas —Mercurio, Venus, Marte, Júpiter y Saturno— daban vueltas alrededor del Sol, y que alrededor de la Tierra sólo giraba la Luna. Y lo que es más, la Tierra, seguida de cerca por la Luna, giraba también alrededor del Sol.

La nueva teoría fue aceptada poco a poco por los astrónomos, y de esta manera cambió su concepción de lo que podía ser un planeta, llegando a la conclusión de que un planeta era todo aquel cuerpo que daba vueltas en torno al Sol. El Sol, como es evidente, no daba vueltas alrededor de sí mismo, por lo cual dejó de considerársele como planeta. Y lo mismo la Luna, que daba vueltas alrededor de la Tierra, no alrededor del Sol.

Quedaban como planetas Mercurio, Venus, Marte, Júpiter y Saturno, a los que se añadió la Tierra misma.

El Sol y estos seis planetas, más la Luna, que acompañaba a la Tierra, recibieron el nombre de «sistema solar». En definitiva, el Sol es el centro y el que, según todas las apariencias, dirige a los planetas, por lo que parecía perfectamente lógico que él diera nombre al conjunto.

#### 2. El planeta lento

El sistema solar, tal como lo conocía Copérnico, estaba formado exactamente por ocho cuerpos, y nada más que ocho: el Sol, los seis planetas y la Luna. Podemos llamar a este conjunto el sistema solar original, pues, como veremos, en el sistema solar, tal como lo conocemos hoy en día, hay mucho más de ocho cuerpos.

El planeta que está más próximo al Sol es Mercurio. Después, yendo hacia afuera, tenemos sucesivamente a Venus, la Tierra (más la Luna), Marte, Júpiter y Saturno. ¿Cómo sabemos que están en ese orden?

Si miramos al cielo, no podemos decir si un objeto concreto está más lejos o más cerca que cualquier otro Pero, si miramos al cielo noche tras noche y observamos

cómo se mueven los planetas entre las estrellas, vemos que cada uno de ellos se desplaza a una velocidad diferente. Si señalamos la posición de cada uno en comparación con la del Sol, vemos que algunos planetas dan una vuelta completa alrededor del Sol más rápidamente que otros.

El tiempo empleado en dar una vuelta completa alrededor del Sol se llama «período de revolución». En la tabla 1 tenemos los períodos de revolución de los seis planetas del sistema solar original.

Parece lógico suponer que cuanto más tiempo tarda un planeta en dar la vuelta al Sol, tanto más largo es su recorrido y por tanto más lejos debe estar de aquél.

Como Saturno tarda treinta años en realizar su revolución alrededor del Sol, dos veces y media más que Júpiter y dieciséis veces más que Marte, parece natural suponer que es el más distante de los planetas.

Fue esta misma lentitud de Saturno la que le dio su nombre.

Los griegos designaban a los planetas con nombres de sus dioses, y trataron de elegir un dios adecuado para cada uno.

Tabla 1. Período de revolución de los seis planetas

	Período de revolución	
Planeta	Días	Años
Mercurio	88, 0	0,241
Venus	224,7	0,615
Tierra	365,25	1,000
Marte	687,0	1,881
Júpiter	4.332,5	11,862
Saturno	10.759,3	29,458

Por ejemplo, el planeta que atraviesa el Cielo con mayor rapidez fue denominado Hermes, que era el mensajero de los dioses y tenía alas en los pies. Sin embargo, los romanos no conservaron los nombres griegos, sino que utilizaron los nombres de sus propios dioses, tratando de elegir los que consideraban como equivalentes de las divinidades griegas. Los romanos tenían un dios llamado Mercurio, que era el dios del comercio, y pensaron que se correspondía con el Hermes griego, por lo que

dieron al más interior de los planetas el nombre de Mercurio. Nosotros hemos heredado los nombres romanos.

El segundo planeta es algunas veces más brillante que cualquiera del resto y hay ocasiones en que brilla en el Cielo del atardecer como una joya preciosa. Por eso los griegos lo llamaron Afrodita, que era su diosa del amor y de la belleza. Los romanos utilizaron el nombre de la diosa correspondiente, Venus.

El tercer planeta es la Tierra.

El cuarto tiene unos destellos claramente rojizos, y los griegos lo asociaron con la sangre y la guerra. Le pusieron el nombre de su dios de la guerra, Ares, y los romanos lo cambiaron por su equivalente, Marte.

El quinto planeta es el más brillante, si exceptuamos a Venus. En el cielo de medianoche siempre están ausentes el Sol y Venus. Si en ese momento se halla en lo alto del cielo el quinto planeta y no hay luna, este quinto planeta es el objeto más brillante de la bóveda celeste. Y lo que es más, aunque Venus cambia de brillo según su posición en relación al Sol, el quinto planeta tiene un brillo bastante fijo, sea cual sea su situación en el cielo durante la noche. Los griegos le pusieron el nombre de su dios supremo, Zeus, y los romanos el del suyo, Júpiter.

Llegamos así al sexto planeta. Este se desplazaba con tanta lentitud, con una lentitud tan superior a la de todos los demás, que los griegos creyeron oportuno darle el nombre de un dios muy anciano, a quien la avanzada edad no le permitía avanzar con rapidez.

Según la mitología griega, Zeus no había sido desde siempre el jefe de los dioses. Antes de que existiera Zeus, era su padre, Crono, quien gobernaba sobre los dioses y el universo. Con el tiempo, Zeus se enfrentó con su padre, lo destronó y ocupó su lugar. Crono siguió viviendo después, pero llevando una vida retirada, y los griegos lo representaron siempre con rasgos de anciano. En consecuencia eligieron el nombre de Crono para el sexto planeta, el que se mueve con mayor lentitud.

Los romanos no tenían un mito que se correspondiera con éste. Sin embargo, sí que tenían un dios llamado Saturno, que era su dios de la agricultura. Entre los griegos había quienes consideraban a Crono como dios de la agricultura. Por eso, los romanos identificaron a Saturno con Crono y dieron al sexto planeta el nombre de Saturno.

En la Antigüedad, los hombres contaban siete planetas y tenían conocimiento de siete metales: oro, plata, cobre, mercurio, hierro, estaño y plomo, por lo cual les pareció natural suponer que cada uno de los siete metales se correspondía con uno de los siete planetas. No había duda de que el oro debía representar al Sol, y la plata a la Luna. El cobre, que era el tercero por su escasez y belleza, sería Venus, el objeto más brillante después del Sol y de la Luna.

El mercurio, metal líquido de gran movilidad, se asoció con el planeta de movimiento rápido que lleva dicho nombre. Al hierro, metal utilizado para las armas de guerra, se le asoció con Marte, y el estaño, metal blanquecino, con Júpiter, que tiene destellos blancos.

De esta manera quedaba el plomo para Saturno, lo cual era una elección muy acertada. El plomo es pesado, apagado y gris. Parecía simbolizar la pesadez y monotonía de la ancianidad y por tanto corresponderse con el lento caminar del anciano Crono.

Hoy en día seguimos asociando el plomo con Saturno. Una combinación de plomo y oxígeno, por ejemplo, es de color rojo intenso, y hay un nombre tradicional que a veces se le aplica: «rojo saturnino». El «cólico saturnino» es también un antiguo término médico para designar la intoxicación con plomo (saturnismo). Por otro lado, a las personas de carácter triste y lúgubre se les da a veces el apelativo de «Saturnino», porque antiguamente se pensaba que estaban bajo la influencia plúmbea del planeta Saturno.

Otro grupo de siete unidades es el formado por los días de la semana, y en la antigüedad cada uno de ellos estaba asociado con uno de los planetas. El séptimo día estaba asociado con Saturno y en inglés ese día recibe todavía el nombre de «Saturday».

## 3. El planeta distante

Los antiguos pensaban que los planetas daban vueltas en torno a la tierra describiendo círculos perfectos. Copérnico se dio cuenta de que los planetas daban vueltas alrededor del Sol y no de la Tierra, pero se mantuvo fiel a la idea de los círculos perfectos. En la actualidad seguimos dando al recorrido de cualquier cuerpo

astronómico alrededor de otro el nombre de «órbita», procedente de la palabra latina que significa «círculo».

Sin embargo, el recorrido que siguen realmente los planetas en el cielo no se acomodaba a lo que podía esperarse en el caso de un círculo. Los astrónomos griegos elaboraron complicados sistemas para buscar una explicación.

Las complicaciones terminaron por fin en 1609, cuando el astrónomo alemán Johannes Kepler (1571-1630) logró demostrar que las órbitas de los planetas no tenían forma de círculos sino de elipses.

Una elipse parece un círculo achatado cuyos extremos son exactamente iguales. En un círculo, toda recta que pase por el centro es un diámetro, y todos los diámetros de un círculo dado tienen la misma longitud. En una elipse, los diámetros tienen distintas longitudes (véase figura 1).

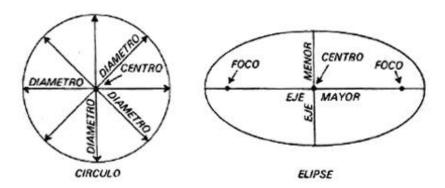


Figura 1. El círculo y la elipse

El diámetro más largo de una elipse va desde uno de los extremos mas curvados al otro, y se llama «eje mayor». El diámetro más corto es el «eje menor». Los dos ejes se cruzan en ángulo recto (es decir, si uno de ellos va en sentido horizontal, el otro lo hace en sentido vertical). El punto donde se cruzan los ejes es el centro de la elipse. En el eje mayor de la elipse están situados dos puntos llamados «focos».

Los focos están en lados opuestos del centro y a la misma distancia de él. Están situados de tal manera que si se traza una línea recta desde un foco hasta cualquier punto de la elipse y desde ese punto hasta el otro foco, la suma de las longitudes de las dos líneas rectas es siempre igual a la longitud del eje mayor.

Cuanto más achatada sea una elipse, tanto más alejados están los focos del centro y más próximos a los extremos (véase figura 2).

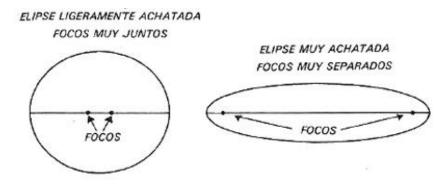


Figura 2. Diferentes elipses

La distancia de los focos al centro es la medida de la «excentricidad» de la elipse. Este término procede de las palabras griegas que significan «lejos del centro».

Si los focos están sólo a 1/100 parte de la distancia que hay del centro al extremo de la elipse, la excentricidad es de 0,01. Con una excentricidad tan pequeña, no se puede apreciar el achatamiento. Dicha elipse se parece tanto a un círculo, que es imposible notar la diferencia sin hacer mediciones muy precisas. (En el caso de un círculo, los focos están exactamente en el centro y la excentricidad es 0.)

Si los focos están a mitad de camino entre el centro y los extremos, la excentricidad es de 0,5 y la elipse parece un huevo con la misma curva en ambos extremos. Si los focos están a nueve décimos de la distancia entre el centro y el extremo, la excentricidad es de 0,9 y la elipse tiene forma parecida a la de un cigarro.

Cuando los astrónomos se dieron cuenta de que las órbitas planetarias eran elipses, pudieron calcular sus formas atendiendo a los cambios en las posiciones de cada planeta en el cielo y averiguar la excentricidad de cada una. Pueden verse los resultados en la tabla 2.

Tabla 2. Excentricidad orbital de los seis planetas

Planeta	Excentricidad orbital
Mercurio	0,2056
Venus	0,0068

Isaac Asimov

Tierra	0,0167
Marte	0,0934
Júpiter	0,0485
Saturno	0,0556

Ninguna de estas excentricidades es pronunciada. La órbita de Mercurio, si la dibujáramos en una hoja de papel, podría parecer un poco achatada, pero todas las demás darían la impresión de ser círculos. Fue precisamente su gran parecido con los círculos lo que hizo que los astrónomos de la antigüedad pensaran que lo eran. Si las órbitas elípticas hubieran tenido excentricidades realmente altas, los astrónomos habrían visto de inmediato que no tenía sentido hablar de círculos para describir las órbitas.

Cuando Kepler descubrió las órbitas elípticas de los planetas, no estaba en condiciones de decir cuál era su tamaño en las unidades que sirven para medir las distancias terrestres. En otras palabras, no pudo determinar su «tamaño absoluto». Sin embargo, sí que logró determinar que una órbita era 2 veces mayor que otra, ó 3,4 veces mayor. Lo que estableció fue su «tamaño relativo».

Supongamos, por ejemplo, que convenimos que la distancia de la Tierra al Sol es igual a 1 y que llamamos a dicha distancia «1 unidad astronómica» o, en abreviatura, «1 U. A.». Las demás distancias se pueden comparar con la de la Tierra y luego expresarse en U. A. Es lo que hacemos en la tabla 3, donde se observa que Saturno está casi diez veces más lejos del Sol que la Tierra.

Tabla 3. Distancia relativa de los seis planetas al sol.

Planeta	Distancia al sol (UA)
Mercurio	0,387
Venus	0,723
Tierra	1,000
Marte	1,524
Júpiter	5,203
Saturno	9,539

De Saturno a Pluton

Si las órbitas planetarias fueran círculos y si el Sol estuviera situado en el centro, la distancia del planeta al Sol permanecería idéntica en todos los puntos de la órbita. Sin embargo, las órbitas son elipses y Kepler demostró que el Sol no estaba en el centro de la elipse sino en uno de los focos.

Que el Sol está en un foco de la elipse quiere decir que está más cerca de un extremo de la elipse que del otro (véase figura 3). Cuando el planeta, al moverse en su órbita, pasa por el extremo del eje mayor que cae al mismo lado del foco donde se halla el Sol, está más cerca de éste que en cualquier otro punto de la órbita. Este punto de máximo acercamiento es el «perihelio», de las palabras griegas que significan «cerca del sol».

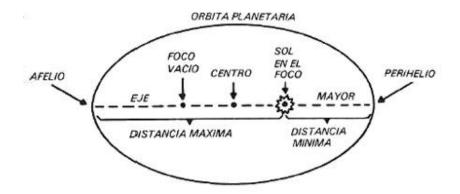


Figura 3. Perihelio y afelio

Al abandonar el perihelio, el planeta se va alejando cada vez más del Sol, hasta llegar hasta el orco extremo del eje mayor, momento en que está más lejos del Sol que en cualquier otro punto de la órbita. Dicho punto se llama «afelio», de las palabras griegas que significan «lejos del Sol».

Cuanto mayor es la excentricidad de una órbita planetaria, mayor es la diferencia de distancias entre el planeta y el Sol en el perihelio y en el afelio. Como las excentricidades de las elipses planetarias son tan pequeñas, la diferencia de dichas distancias no es muy grande en los seis planetas, exceptuando a Mercurio (véase tabla 4).

Tabla 4. Perihelios y afelios de los seis planetas.

Planeta	Distancia en el	Distancia en el	Diferencia entre las dos
	perihelio (UA)	afelio (UA)	distancias (porcentaje)
Mercurio	0,308	0,467	51,6
Venus	0,719	0,729	1,4
Tierra	0,984	1,017	3,4
Marte	1,381	1,666	20,6
Júpiter	4,951	5,455	10,2
Saturno	9,008	10,069	11,8

Como se ve, cuando Saturno está en el perihelio y la Tierra en el afelio, aquél está 8,86 veces más lejos del Sol que ésta. Cuando Saturno está en el afelio y la Tierra en el perihelio, aquél está 10,24 veces más lejos del Sol que ésta.

### 4. Distancia en kilómetros

Peco ¿cuál es la distancia entre Saturno y el Sol expresada en las unidades que se utilizan en la Tierra?

De Saturno a Plutón

Si supiéramos cuál es, en unidades terrestres, la distancia entre la Tierra y el Sol, seríamos capaces de calcular todas las demás distancias planetarias. Y si supiéramos cuál es la distancia entre uno y otro planeta en un momento concreto, podríamos calcular las posiciones de los demás planetas.

En la época de Kepler, la única forma de apreciar la distancia de un cuerpo celeste era por medio de la «paralaje» (de las palabras griegas que significan «cambio de posición»).

Para hacernos una idea de cómo funciona esto alarguemos el brazo y fijémonos en uno de los dedos. Si cerramos un ojo, veremos el dedo sobre el fondo de algún otro objeto. Si mantenemos inmóviles el dedo y la cabeza y cerramos el otro ojo, veremos un cambio en la posición aparente del dedo en relación con el fondo. El cambio de posición es la paralaje.

Si acercamos el dedo hacia el ojo veremos que el cambio de posición apreciado al utilizar uno u otro ojo es cada vez mayor. Midiendo la paralaje se puede determinar la distancia que hay entre el dedo y el ojo.

Utilizando sólo los ojos, no podemos medir distancias muy grandes. La paralaje resulta demasiado pequeña para medir con precisión los objetos que hay al otro lado de la calle. Por fortuna, el cambio depende no sólo de la distancia sino de la separación entre los dos puntos desde los que se observa el objeto. Nuestros ojos están separados una distancia muy pequeña que no puede ser de mucha utilidad. Pero es posible utilizar otra mayor.

Una posibilidad es clavar dos estacas a un centenar de metros una de otra. Si primero miramos un objeto desde una estaca y luego desde la otra, se aumenta la magnitud de la paralaje para una distancia determinada, y en ese caso el objeto tendría que estar mucho más lejos para que la paralaje resultara demasiado pequeña como base de medición. Y la separación entre ambos puntos se puede hacer todavía mayor, mucho mayor.

Supongamos que observamos la Luna en un determinado momento y desde una posición determinada de la superficie terrestre. Al mismo tiempo, otra persona puede estar observándola desde otro país. El primer observador la vería a una distancia determinada de una estrella próxima; el segundo observador la vería a una distancia algo diferente de la misma estrella. Teniendo en cuenta el cambio de posición y la distancia existente entre los dos puntos de observación se puede calcular la distancia de la Luna.

Esto es una tarea factible. Ya en tiempo de Kepler se sabía a qué distancia estaba la Luna. La cifra más precisa en estos momentos para la distancia media entre la Luna y la Tierra es de 384.390 kilómetros. Como la Luna describe una órbita elíptica alrededor de la Tierra, estando ésta situada en uno de los focos, en algunos momentos la distancia es un poco mayor de la mencionada y en otros un poco menor.

El ecuador de la Tierra tiene una longitud total de 40.070 kilómetros. Esto quiere decir que la distancia de la Tierra a la Luna es sólo 9,6 veces mayor que un viaje alrededor del ecuador. La cifra no es excesiva, y hoy en día muchas personas recorren a lo largo de su vida distancias mucho mayores que la que nos separa de la Luna.

Sin embargo, la Luna es el cuerpo astronómico más próximo a la Tierra. Los otros planetas están mucho más alejados. ¿Cuánto más?

Por desgracia, la paralaje de la Luna no nos sirve aquí, pues la Luna no está incluida en la escala relativa del sistema solar elaborada por Kepler. Necesitamos la paralaje de un planeta; pero los planetas están tan lejos que sus paralajes son demasiado pequeñas para hacer una medición ocular, por muy grande que sea la separación entre los puntos de observación terrestres.

Sin embargo, en 1609, el científico italiano Galileo (1564-1642) fabricó un telescopio rudimentario y lo dirigió hacia los cielos. El instrumento aumentaba los objetos y hacía posible medir pequeños movimientos que el ojo humano nunca podría medir por sí solo. Con los años, los telescopios se fueron perfeccionando.

En 1670, el astrónomo Ítalo-francés Giovanni Domenico Cassini (1625-1712) observó la posición de Marte desde su observatorio en París. Al mismo tiempo otro astrónomo francés, Jean Richer (1630-1696), observó la posición del mismo planeta desde la Guayana francesa, a miles de kilómetros de distancia. El cambio de posición de Marte en relación con las estrellas más próximas era diminuto, pero con el telescopio se pudo medir.

Cassini consiguió calcular la distancia entre Marte y la Tierra en un momento concreto, y a partir de ahí pudo calcular todas las demás distancias planetarias del sistema solar, en particular la distancia de la Tierra al Sol.

Los valores de Cassini resultaron un poco bajos, pero a partir de entonces se han ido precisando y ahora sabemos que la distancia media entre la Tierra y el Sol, la Unidad Astronómica es de 149.597.870 kilómetros.

Cuando se comienza a hablar de distancias de millones de kilómetros es fácil perderse. Pero supongamos que hablamos de la luz.

La luz se mueve en el vacío a una velocidad de 299.792,4562 kilómetros por segundo. Es la velocidad mayor a que puede desplazarse algo dentro de este universo, y los científicos están totalmente convencidos de que es imposible que los objetos normales se muevan a más velocidad que la luz.

Si se pudiera hacer que un rayo de luz diera la vuelta a la Tierra por el ecuador, realizaría una vuelta completa en algo menos de un séptimo de segundo, y llegaría de la Tierra a la Luna en sólo 1,28 segundos. Esto nos indica lo increíblemente rápida que es la luz.

Así pues, si conocemos la longitud exacta de la Unidad Astronómica, podemos calcular la distancia de cada planeta al Sol en kilómetros, o en unidades del tiempo que tardaría la luz en recorrer esa distancia. Así lo hacemos en la tabla 5.

Ahora tenemos ya cierta idea de la inmensidad del sistema solar y de lo lejos que está Saturno. De los seis planetas conocidos en tiempos de Galileo y Cassini, Saturno, el más lejano, estaba a casi 1.400 millones de kilómetros del Sol. Tan enorme es la distancia de Saturno, que la luz procedente del Sol, a pesar de su increíble velocidad, tarda bastante más de una hora en llegar a Saturno. Si Saturno desapareciera de su posición en el cielo mientras nosotros estuviéramos mirándolo, no nos percataríamos de su desaparición hasta pasados 79,3 minutos, pues ése es el tiempo que tardaría en llegar a nosotros la última emanación luminosa procedente del planeta.

Tabla 5. Distancia de cada planeta al sol

Planeta	Distancia media al	Tiempo empleado por la luz para
	Sol en kilómetros	llegar del Sol al planeta (minutos)
Mercurio	57.900.000	3,2
Venus	108.200.000	6,0
Tierra	149.600.000	8,3
Marte	227.900.000	12,7
Júpiter	778.300.000	43,2
Saturno	1.427.000.000	79.3

Mercurio, Venus, la Tierra y Marte están todos ellos a menos de 250 millones de kilómetros del Sol. Constituyen un «sistema solar interior». Fuera, en cambio, están Júpiter, navegando por el espacio 550 millones de kilómetros más allá de Marte, y Saturno, que está 650 millones de kilómetros más allá de Júpiter.

Puestos a dibujar un mapa a escala de las órbitas planetarias, el sistema solar interior estaría amontonado junto al Sol, y Júpiter y Saturno aparecerían en solitario y a gran distancia (véase figura 4).

Como es natural, Saturno no está siempre a su distancia media del Sol. Está mucho más cerca en el perihelio y bastante más lejos en el afelio (véase tabla 6).

En el afelio, Saturno está 160.000.000 kilómetros más lejos del Sol que en el perihelio. Se trata de una gran diferencia, igual a la distancia que hay entre la Tierra y el Sol. Sin embargo, tan enorme es la distancia de Saturno al Sol, que una diferencia de distancia que sólo equivalga a la que hay entre la Tierra y el Sol resulta prácticamente inapreciable.

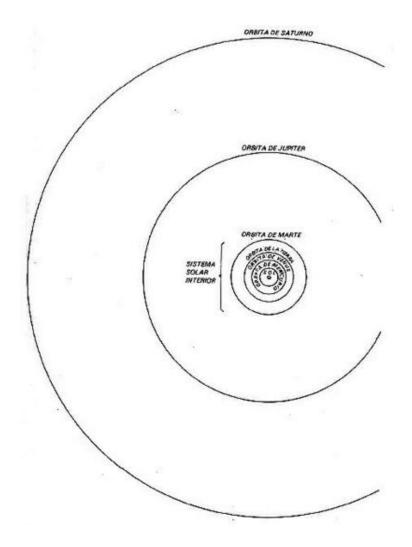


Figura 4. El sistema solar original.

¿Qué distancia hay entre Saturno y la Tierra?

Cuando se da el caso de que la Tierra y Saturno están en el mismo lado del Sol mientras describen su órbita, Saturno está más cerca de la Tierra que del Sol. Si los

16

dos planetas están en lados opuestos del Sol, Saturno se encuentra más lejos de la Tierra que del Sol.

Supongamos que Saturno está en el perihelio y que la Tierra está en el mismo lado del Sol que Saturno. Es en ese momento cuando más cerca se encuentran Saturno y la Tierra. La distancia es de sólo 1.200.000.000 kilómetros. Si Saturno está en el afelio y la Tierra en la cara opuesta del Sol, se produce la distancia máxima entre la Tierra y Saturno, que alcanza los 1.658.000.000 kilómetros.

Tabla 6. Saturno en el perihelio y el afelio.

Saturno	Distancia del Sol en	Tiempo empleado por la luz para llegar
	kilómetros	desde el Sol a Saturno (minutos)
En el perihelio	1.348.000.000	74,9
En el afelio	1.508.000.000	83,8

Saturno, al realizar una revolución en torno al Sol recorre una órbita de casi 9.000.000.000 kilómetros de longitud. Esto equivale casi a diez veces el recorrido realizado por la Tierra en su revolución alrededor del Sol.

Como el recorrido de Saturno es casi diez veces mayor que el de la Tierra, no sería de extrañar que Saturno tardara casi diez veces más en realizar una revolución en torno al Sol. De hecho, tarda casi treinta veces más que la Tierra en recorrer su órbita. ¿A qué se debe esto?

En 1687, el científico inglés Isaac Newton (1642-1727) concibió la teoría de la gravitación universal y demostró que los planetas daban vueltas alrededor del Sol porque estaban bajo la influencia de la atracción gravitatoria de éste.

Newton demostró que la influencia gravitatoria de cualquier cuerpo se reduce con la distancia. Por consiguiente, un planeta alejado, sometido a una influencia más débil, giraría alrededor del Sol más lentamente que un planeta más próximo. Y, de hecho, cuando se calcula la velocidad orbital de un planeta (partiendo de su movimiento aparente por el cielo y su distancia) resulta que cuanto más lejos está del Sol más lento es su movimiento orbital (véase tabla 7).

Tabla 7. Velocidad orbital media de los seis planetas

Velocidad orbital media en kilómetros

Planeta	por segundo
Mercurio	47,89
Venus	35,03
Tierra	29,79
Marte	24,13
Júpiter	13,06
Saturno	9,64

El recorrido de Saturno alrededor del Sol es casi diez veces más largo que el de la Tierra; pero es que además Saturno se mueve sólo a un tercio de la velocidad de la Tierra. No es de extrañar que tarde treinta veces más que ésta en dar la vuelta al Sol.

### 5. La forma del sistema solar

Imaginemos un trozo de papel, totalmente liso y muy, muy fino. Sería algo parecido a lo que los matemáticos llaman un «plano».

Imaginemos un plano que atraviesa el sistema solar pasando por el centro del Sol y por la elipse que representa la órbita de la Tierra. La Tierra, al desplazarse en torno al Sol, se mantendría en todo momento dentro de ese plano.

El plano de la órbita de la Tierra se llama «eclíptica». La razón de este nombre es que los eclipses de sol o de luna sólo se producen cuando ésta atraviesa, en su órbita, la eclíptica, pues sólo entonces puede pasar entre la Tierra y el Sol y eclipsar a este último, o directamente por detrás de la Tierra de forma que quede dentro de la sombra de ésta y siendo por tanto eclipsada.

Extendamos mentalmente el plano de la eclíptica por todo el sistema solar, llegando tan cerca del Sol como Mercurio y tan lejos de él como Saturno. ¿Estarían en la eclíptica las orbitas de todos los demás planetas?

La respuesta es: no. La órbita de cada planeta tiene su propio plano independiente, que no se parece en nada al de la órbita de ningún otro. Cada plano corta la eclíptica según un cierto ángulo, que es distinto en cada caso.

Pero, ¿cómo medimos los ángulos?

Los antiguos babilonios elaboraron el sistema que todavía seguimos empleando. Dividieron el círculo en 360 partes iguales, cada una de las cuales recibe el nombre de «grado».

Imaginemos que un ángulo se forma separando dos segmentos que permanecen unidos en un extremo. Si separamos las líneas hasta que una de ellas haya recorrido un círculo completo, volviendo a unirse a la otra, habrá recorrido 360 grados (ó 360°). Si la línea que se mueve sólo describe medio círculo, son 180°; un cuarto de círculo, equivale a 90°; y así sucesivamente (véase figura 5).

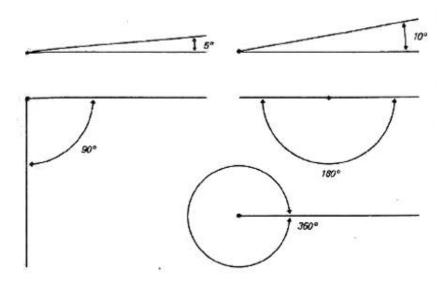


Figura 5. Ángulos

Como se puede ver, un ángulo de menos de diez grados es un ángulo más bien pequeño. Los planos orbitales de los otros planetas cortan al plano de la órbita de la Tierra (es lo que se llama «inclinación con relación a la eclíptica») según ángulos muy pequeños (véase tabla 8).

Esto demuestra que aunque el sistema solar no sea un objeto perfectamente plano, está muy cerca de serlo. Los planetas se mueven casi en el mismo plano.

Imaginemos un planeta que sigue una órbita cuya inclinación con respecto a la eclíptica es un ángulo pequeño. Durante la mitad de su órbita se está moviendo por encima de la eclíptica. Luego, en un punto de la órbita, atraviesa la eclíptica para

situarse por debajo de ella durante la otra mitad de la órbita, volviendo luego a situarse por encima, y así sucesivamente.

Tabla 8. Inclinación de los seis planetas respecto a la eclíptica

Planeta	Inclinación respecto a la eclíptica (grados)	
Mercurio	7,00	
Venus	3,39	
Tierra	0,00	
Marte	1,85	
Júpiter	1,30	
Saturno	2,49	

Los dos lugares donde la órbita del planeta atraviesa la eclíptica se llaman «nodos», y están situados en puntos opuestos de la órbita. Al desplazarse de un nodo a otro, el planeta se eleva cada vez más por encima de la eclíptica hasta llegar a una altura máxima y luego va descendiendo hasta el otro nodo. La distancia máxima a la eclíptica, tanto por arriba como por debajo, se produce a mitad de camino entre los nodos.

La distancia máxima por arriba o por debajo de la eclíptica es tanto mayor cuanto mayor es la inclinación. Es también tanto mayor cuanto más distancia hay entre el Sol y el planeta. Aunque un ángulo sea muy pequeño, si prolongamos las líneas irá aumentando la distancia que las separa.

En la tabla 9 hemos calculado la distancia entre cada planeta y la eclíptica a mitad de camino entre los nodos (véase tabla 9).

Tabla 9. Distancia de la eclíptica para los seis planetas

Planeta	Distancia a la eclíptica en kilómetros
Mercurio	8.520.000
Venus	6.450.000
Tierra	-
Marte	8.050.000
Júpiter	18.500.000

Saturno 65.400.000

Así pues, debido a la gran distancia de Saturno, hay lugares de su órbita en que se aleja de la eclíptica una distancia semejante a la que hay entre Mercurio y el Sol. Puede alejarse de la eclíptica cuatro veces más que Júpiter y ocho veces más que cualquiera de los planetas interiores.

Esta distancia por arriba y por abajo, aunque grande, no es gran cosa si la comparamos con la distancia de Saturno al Sol. Si nos imaginamos una reproducción del sistema solar de sólo 50 centímetros de un extremo a otro, Saturno sólo subiría y bajaría 2,3 centímetros. Dicha reproducción del sistema solar cabría perfectamente en una caja de las utilizadas para las *pizzas*, lo cual demuestra a las claras cómo el sistema solar es esencialmente plano.

# Capítulo 2 Saturno

#### Contenido:

- 1. El brillo del sol
- 2. La rotación de los planetas
- 3. La inclinación del eje de los planetas

#### 1. Brillo del Sol

Para tener un mejor conocimiento de Saturno y de sus peculiaridades, debemos seguir ocupándonos de los seis planetas para hacer comparaciones entre ellos. Por ejemplo, cuanto más lejos del Sol está un planeta, más pequeño parece el Sol en el cielo de éste.

El Sol, tal como se nos presenta a nosotros en el cielo de la Tierra (si lo\_ observamos con las debidas precauciones para evitar los peligros de la radiación), es una bola luminosa de tamaño considerable. Podemos medir su tamaño calculando el ángulo que forma en el ojo. Si imaginamos una línea recta que vaya desde un lado del Sol hasta el ojo, y otra línea recta que vaya desde el otro lado del Sol hasta el ojo, las dos líneas se unen formando un ángulo de, aproximadamente, medio grado.

Dicho de otro modo, si imaginamos una serie de círculos, todos ellos del tamaño del Sol, colocados uno al lado del otro sobre el fondo del cielo, harían falta 720 para dar la vuelta completa al horizonte. La razón es que en un círculo hay 360 grados y cada curva solar ocuparía medio grado, lo que equivale a dos de tales curvas por cada grado. Entre los antiguos babilonios era costumbre dividir cada grado en sesenta partes iguales, que nosotros llamamos «minutos de arco». Según esto, el diámetro del Sol, visto desde la Tierra, es de unos treinta minutos de arco, lo que generalmente se transcribe como 30'.

Los astrónomos han medido con precisión la anchura angular del Sol y la sitúan por término medio en 31,99°. Esta anchura cambia al recorrer la Tierra su órbita y cambiar su distancia respecto al Sol. Cuando la Tierra está en el perihelio (el 2 de enero) y más cerca del Sol, es cuando mayor parece éste, alcanzando entonces una

anchura de 32,50'. Cuando la Tierra está en el afelio (el 2 de julio) y más lejos del Sol, es cuando más pequeño parece éste, siendo su anchura de 31,47'.

Este cambio del tamaño aparente del Sol a lo largo del año puede ser medido por los astrónomos, pero es tan pequeño que normalmente no se percibe. El Sol parece tener prácticamente el mismo tamaño todos los días del año.

Parecería mucho mayor, por supuesto, si lo viéramos desde Venus, que está mucho más cerca del Sol que la Tierra. Y todavía parecería mayor visto desde Mercurio. Pero su tamaño aparente sería más pequeño si lo contempláramos desde los planetas exteriores, más alejados (véase tabla 10).

Desde cualquier planeta, cuando mayor parece el Sol es en el perihelio y cuando más pequeño en el afelio. Si la excentricidad de la órbita de un planeta es muy pequeña, esa diferencia también lo es. En Venus, por ejemplo, el cambio de tamaño aparente del Sol entre el perihelio y el afelio es sólo la mitad de la diferencia, de por sí pequeña, que apreciamos en la Tierra. En Mercurio, sin embargo, que tiene la órbita más excéntrica de los seis planetas, la diferencia es muy considerable. En el afelio, la anchura aparente del Sol es de 66,6', lo que equivale aproximadamente a 2,1 veces la anchura del Sol tal como lo vemos nosotros. En el perihelio, la anchura del Sol en Mercurio es nada menos que de 104,2' ó 3,26 mayor que la anchura con que lo vemos nosotros.

Tabla 10. Anchura aparente del Sol visto desde los seis planetas

Anchura aparente media

Planeta	Minutos de arco	Desde la tierra=1
Mercurio	82,6	2,58
Venus	44,2	1,38
Tierra	32,0	1,00
Marte	21,0	0,66
Júpiter	6,0	0,19
Saturno	3,3	0,10

En Saturno, la diferencia entre perihelio y afelio no repercute mucho en la diferencia del tamaño aparente del sol. En el afelio, la anchura aparente se reduce a 3,0'; en el perihelio aumenta hasta 3,5'.

En la práctica, si un círculo de luz en el cielo tiene un diámetro de menos de 6', no puede verse claramente como círculo. Parece, en el mejor de los casos, un gran punto luminoso. Desde Júpiter, el Sol no es más que un pequeño círculo luminoso apenas perceptible. Desde Saturno parece un punto de luz —una estrella muy brillante y resplandeciente. En el perihelio parece un poco más brillante que en el afelio, pero en todo momento conserva una forma parecida a la de una de nuestras estrellas.

Naturalmente, cuanto más pequeño parezca el sol, visto desde un planeta determinado, menos luz y calor llega a dicho planeta en un momento concreto. La anchura varía según la superficie del Sol, que es proporcional al cuadrado del diámetro. Si el Sol llegara a tener una anchura tres veces superior a la normal, su superficie aparente y la cantidad de radiación que emitiría sería 3 X 3, o nueve veces superior a la normal. Si el sol se redujera a la cuarta parte de su anchura normal, su superficie aparente y la cantidad de radiación emitida sería 1/4 X 1/4, ó 1/16 inferior a la normal. En la tabla 11 aparecen la superficie aparente del Sol visto desde cada uno de los planetas y la cantidad de radiación recibida.

Tabla 11. Superficie y radiación solar desde los seis planetas

Planeta	Superficie aparente del Sol	Radiación recibida del Sol
	(minutos cuadrados de arco)	(Tierra = 1)
Mercurio	5.360	6,66
Venus	1.535	1,91
Tierra	805	1,00
Marte	350	0,43
Júpiter	28	0,035
Saturno	8,5	0,011

La cantidad de radiación recibida llega al máximo en el perihelio y al mínimo en el afelio, pero, excepto en el caso de Mercurio, este cambio no supone mucho. En

Mercurio, la superficie del Sol es de 3.480 minutos cuadrados de arco en el afelio, y la cantidad de radiación recibida en ese momento es 4,3 veces menos que la recibida por la Tierra. Sin embargo, en el perihelio el Sol de Mercurio llega a una superficie de 8.530 minutos cuadrados de arco, momento en que recibe 10,6 veces más radiación que la Tierra.

En cuanto a Saturno, la cantidad de radiación que recibe oscila entre 0,012 en el perihelio y 0,009 en el afelio. Podríamos decir que en cualquiera de los puntos de su órbita Saturno recibe del Sol una cantidad de luz y calor que es sólo 1/ 100 de la cantidad recibida por la Tierra. Esto quiere decir que Saturno, al menos en su superficie visible, es el más gélido de los seis planetas conocidos en la Antigüedad. Sin embargo, no debemos considerarlo como un planeta oscuro y lóbrego, sin nada de luz. Aunque sólo reciba una centésima parte de la luz que recibimos nosotros, ya es bastante. El Sol, visto desde Saturno, brilla con una luz que es 4.700 veces más brillante que la de la Luna llena vista desde la Tierra. El Sol envía a Saturno luz suficiente para que brille claramente en nuestros telescopios y para que sea visible a simple vista.

## Brillo de los planetas

La razón por la que vemos los distintos planetas en el cielo es que cada uno de ellos refleja parte de la luz que le llega del Sol, y es esa luz la que vemos nosotros.

Naturalmente, cuanto más lejos esté del Sol un planeta, menos luz recibe; y cuanto más lejos esté de nosotros, menos nos llega de la luz que refleja. Por eso hay que contar con que un planeta distante parezca menos brillante que un planeta próximo. El brillo de los objetos celestes suele medirse en «magnitudes». Este sistema fue utilizado por primera vez por un astrónomo de la antigua Grecia, Hiparco (190 a. de C.-120 a. de C.).

Hiparco dividió las estrellas en seis grupos. Las más brillantes constituían la primera magnitud, y las que apenas se percibían a simple vista eran la sexta magnitud. Entre una y otra estaban la segunda, tercera, cuarta y quinta magnitudes.

Los actuales astrónomos miden con precisión el brillo y hacen que cada magnitud sea exactamente 2,512 veces más brillante que la inferior. También pueden medir las magnitudes con una y hasta dos cifras decimales. Una estrella de magnitud 3,1

es 1,097 veces más brillante que una estrella de magnitud 3,2, y una estrella de magnitud 3,11 es 1,009 veces más brillante que una estrella de magnitud 3,12.

Las estrellas más brillantes tienen magnitudes un poco superiores o inferiores a 1,0. Una de las estrellas de primera magnitud menos brillantes puede tener una magnitud de 1,3; otra más brillante puede tener una magnitud de 0, 7. Hay unas cuantas estrellas tan brillantes que llegan a pasar de la magnitud 0,0 para entrar en magnitudes negativas. La estrella Sirio, que es la más brillante del cielo, tiene una magnitud de -1,42.

El brillo de los planetas varía atendiendo a un número de factores. Naturalmente, cuanto más lejos estén, menor será su brillo. Por otra parte, si sólo refleja la luz solar una parte de la cara del planeta, éste será más oscuro que si brillara toda ella. Como Marte, Júpiter y Saturno están más lejos del Sol que la Tierra, éste brilla siempre sobre ellos por encima de nuestros hombros, como si dijésemos, y los vemos siempre «redondos» con toda la cara llena de luz. (Algunas veces Marte parece un poco deformado, pues está tan cerca de nosotros que, cuando su posición forma un determinado ángulo con la Tierra, podemos ver una pequeña parte de la cara oscura.)

Como Venus y Mercurio están más próximos al Sol que nosotros, algunas veces nos presentan parte o la totalidad de su cara no iluminada, y podemos ver cómo atraviesan las mismas fases que la Luna. Cuando están cerca de nosotros, solemos verlos como si fueran medias lunas, y cuanto más cerca están más se reduce la parte brillante. Por eso Venus y Mercurio no nos parecen todo lo brillantes que podrían serlo.

Cada planeta tiene una posición dentro de su órbita (en relación con la posición de la Tierra en dicha órbita) en que su brillo es más intenso. En la tabla 12 se indica el brillo en ese momento.

Como puede verse, los planetas son tan brillantes como las más brillantes de las estrellas. Saturno, en su punto más brillante, lo es sólo la mitad que Sirio; en cambio Júpiter es 2,8 veces más brillante que Sirio. Venus es el más brillante de todos los planetas y, en su momento álgido, su brillo es trece veces superior al de Sirio. Pero incluso Venus palidece en el cielo de la Tierra en comparación con la luna llena, que en su momento de más brillo tiene una magnitud de -12,73 y es 2.540

veces más brillante que Venus. En cuanto al Sol, su magnitud es de 26,91 y es 470.000 veces más brillante que la luna llena. Fue este brillo de los planetas lo que hizo que los primeros observadores apreciaran tan pronto su cambio de posición en relación a las estrellas.

Tabla 12. Brillo aparente de los seis planetas. Brillo máximo

Planeta	Magnitud	Saturno = 1
Mercurio	0,2	0,6
Venus	4,22	24,5
Tierra	-	-
Marte	-2,02	3,2
Júpiter	-2,55	5,3
Saturno	-0,75	1

(NOTA: Es obvio que la Tierra no brilla en nuestro cielo y por tanto no se indican cifras; pero si pudiera verse desde Venus brillaría, en el momento de máximo brillo, con una magnitud de -5,16 y sería 2,4 veces más brillante que Venus para nosotros y casi 60 veces más brillante de lo que nos parece Saturno.)

La tabla 12 resulta chocante por la siguiente razón. Marte está bastante más cerca de Júpiter. Marte puede llegar a estar a sólo 56.000.000 kilómetros de la Tierra, lo cual es menos de una décima parte de la distancia de Júpiter. Un rayo de luz que fuera desde el Sol hasta Júpiter y volviera a la Tierra recorrería una distancia cinco veces mayor que otro que fuera del Sol a Marte y luego a la Tierra. Por eso podríamos esperar que Marte pareciera veinticinco veces más brillante que Júpiter en el cielo, y, haciendo un cálculo semejante, que pareciera en el cielo unas ochenta veces más brillante que Saturno. Por el contrario, Marte sólo es 3/5 veces más brillante que Júpiter cuando los dos están en su momento de máximo brillo, y sólo es un poco más de tres veces más brillante que Saturno. ¿Dónde está el error? La explicación es que los planetas tienen distintos tamaños. Un planeta grande recibe y refleja más luz del Sol que uno pequeño. Curiosamente, un planeta

De Saturno a Pluton

pequeño podría parecer poco brillante aun cuando estuviera próximo a nosotros, y un planeta de gran tamaño podría parecer muy brillante aun cuando estuviera lejos. ¿Cómo averiguar el tamaño de un planeta? A simple vista, todos ellos parecen meros puntos luminosos. Sin embargo, si los observamos con un telescopio, sus imágenes se amplían y parecen como pequeños círculos luminosos (o mitades de círculos o en forma de creciente, en el caso de Venus y Mercurio). La anchura de estos círculos se puede medir, y si sabemos cuál es el aumento del telescopio es posible determinar la anchura del planeta para el ojo humano.

Cualquier planeta, incluso cuando está más próximo, tiene una anchura de 1' o menos. La anchura aparente de cada planeta en su momento de máximo acercamiento a nosotros se indica en segundos de arco en la tabla 13.

Tabla 13. Anchura aparente de los seis planetas

Planeta	Anchura aparente máxima (segundos de arco)
Mercurio	12,7
Venus	64,5
Tierra	-
Marte	25,1
Júpiter	50,0
Saturno	20,6

(NOTA: No se incluye la Tierra, pero, vista desde Venus, tendría una anchura aparente máxima de 71,5 segundos de arco.)

Aun cuando Júpiter está diez veces más lejos de la Tierra que Marte, cuando ambos están en su punto más próximo, Júpiter parece el mayor de los dos. Saturno está veintidós veces más lejos de nosotros que Marte, pero cuando ambos están más próximos a nosotros, Saturno parece sólo ligeramente más pequeño que Marte.

La explicación ha de ser que Júpiter y Saturno son mucho mayores que Marte. De hecho, conociendo la anchura aparente de cada planeta y su distancia, los astrónomos pueden calcular el diámetro real de cada planeta (véase Tabla 14).

Tabla 14. Diámetro de los seis planetas

Planeta	Diámetro	Tierra=1
Mercurio	4.850	0,380
Venus	12.140	0,951
Tierra	12.756	1,000
Marte	6.790	0,532
Júpiter	143.200	11,230
Saturno	120.000	9,410

Como indican las cifras, Júpiter y Saturno son gigantes en comparación con los planetas del sistema solar interior (véase figura 6).

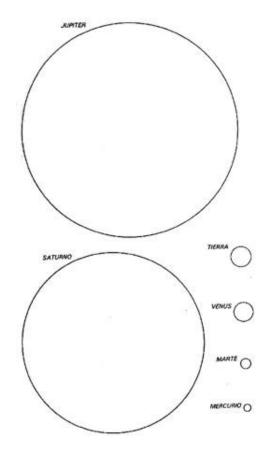


Figura 6. Tamaño relativo de los seis planetas

La superficie de Saturno es más de 85 veces superior a la de la Tierra, y su volumen es más de 800 veces mayor que el de ésta. Si imagináramos una bola hueca del

tamaño de Saturno, y dejáramos caer en su interior otras bolas del tamaño del de la Tierra, habría espacio para más de ochocientas de estas bolas.

Es cierto que Júpiter es todavía mayor, pero no mucho más. Tiene un volumen que es 1,7 veces mayor que el de Saturno, y 1.400 veces mayor que el de la Tierra.

Ahora que sabemos cuál es el tamaño de los planetas, podemos calcular cuál es su brillo, teniendo en cuenta el tamaño y la distancia. Pero resulta que todavía no basta con esto. Seguimos recibiendo de Marte menos luz de la que sería de esperar, teniendo en cuenta la que recibimos de Júpiter y Saturno.

Una posibilidad es que los distintos planetas reflejen distintas cantidades de luz. Si la superficie de un planeta está formada por rocas claras, reflejará una mayor proporción de la luz solar que incide sobre él que otro planeta que tuviera una superficie de rocas de color oscuro. Y la superficie de un planeta cubierto de alguna sustancia helada o por una atmosfera con nubes reflejaría una proporción todavía mayor de la luz solar que recibe.

Conociendo la distancia de un planeta al Sol y a nosotros, y conociendo su tamaño, los astrónomos pueden calcular cuanta luz debería llegarnos si el planeta reflejara toda la luz que llega hasta él. Por la luz que nos llega realmente podemos saber cuál es la proporción de luz que se refleja. Esa fracción es el «albedo», palabra derivada del término latino que significa «blanco». En la tabla 15 se mencionan los albedos de los distintos planetas.

Tabla 15. Albedos de los seis planetas

Planeta	Albedo
Mercurio	0,07
Venus	0,76
Tierra	0,40
Marte	0,15
Júpiter	0,44
Saturno	0,42

Mercurio no tiene atmósfera y la roca desnuda de su superficie refleja aproximadamente 1/14 de la luz que llega hasta él. (Lo mismo ocurre en nuestra

Luna.) Marte posee una atmósfera muy tenue y refleja 117 de la luz que incide sobre él. La Tierra tiene una atmósfera más espesa, con muchas nubes, y por eso refleja 2/5; Venus tiene una atmósfera todavía más densa y nubosa y refleja 3/4. Teniendo en cuenta sólo el albedo, podemos deducir que Júpiter y Saturno, o tienen atmósferas con nubes, o de lo contrario, considerando su distancia del Sol, quizá tengan la superficie cubierta de hielo.

## 2. La rotación de los planetas

Hasta la invención del telescopio, los planetas sólo se veían como puntos luminosos. Nadie sabía realmente qué eran.

Cuando Galileo dirigió hacia ellos su telescopio, vio que eran pequeños orbes. Júpiter y Saturno parecían lunas en pequeño. Lo mismo ocurría con Marte, aunque algunas veces parecía un poco achatado por un lado cuando el observador alcanzaba a ver parte del hemisferio en que no daba el sol. Mercurio y Venus atravesaban fases como las de la luna y en algunos momentos parecían pequeñas medias lunas o cuartos crecientes y menguantes.

Eran realmente mundos, que parecían meros puntos luminosos debido a su gran distancia. (Cuando Galileo observó con su telescopio la Luna, mucho más cercana, logró incluso distinguir cráteres, montañas y zonas oscuras con aspecto de mares.) Los planetas estaban tan alejados que ni los telescopios (al menos, los primeros telescopios rudimentarios) reflejaban detalle alguno. Pero al menos hicieron ver una cosa. Los perfiles de Júpiter y de Saturno no eran circulares sino elípticos. Esto era algo totalmente nuevo. El Sol y la Luna tenían formas que eran círculos perfectos, o casi. Lo mismo ocurría con Mercurio, Venus y Marte. Todos ellos eran esferas perfectas, o casi perfectas, en tres dimensiones. De la misma Tierra se sabía también que era una esfera, por lo que, vista desde el espacio, tendría forma circular.

En cambio Júpiter era claramente elíptico, y Saturno todavía más. En una visión tridimensional, tendrían aspecto de elipsoides —esferas achatadas por los extremos. Las formas elipsoidales de Júpiter y Saturno parecieron especialmente interesantes una vez que Newton anunciara su ley de la gravitación universal en 1687. Si llegaba a juntarse una gran cantidad de material, su propia atracción gravitatoria la haría

integrarse en forma de esfera, pues en una esfera toda panícula de materia estaba lo más cerca posible del centro.

Si Júpiter y Saturno eran de forma elipsoidal, significaba que en ellos había algo que se oponía a la atracción de la gravedad, cosa que no ocurría en otros planetas. ¿Qué podría ser?

El propio Newton encontró la respuesta. Cuando un objeto gira en torno a un centro, tiende a moverse en línea recta, y si continúa girando es únicamente porque hay una atracción que lo mantiene sujeto al centro. Cuanto mayor es la rapidez con que gira el objeto, más fuerte debe ser la atracción para hacer que siga dando vueltas e impedir que se desprenda.

Esta tendencia a desprenderse se llama efecto «centrífugo», de las palabras latinas que significan «huir del centro».

Cuando gira un planeta, es la atracción gravitatoria la que hace que giren todas sus partes e impide que se desprendan. Cuanto más aprisa gira el planeta, menos capaz es la atracción gravitatoria de mantener todas las partes en su sitio y se produce una ligera tendencia a la expansión del planeta, como si sus panículas estuvieran intentando librarse de la opresión.

Un planeta gira en torno a una línea recta que pasa por su centro y que se llama «eje». Las diferentes partes del planeta giran a distintas velocidades, según cuál sea su distancia al eje.

El eje corta la superficie de un planeta en el polo norte y en el polo sur, de manera que en los polos la superficie no se mueve realmente y en ellos no se produce ningún efecto centrífugo. Al alejarnos de los polos, la superficie describe al principio un pequeño círculo alrededor del eje y luego, cuanto más nos alejamos del polo, el círculo descrito por la superficie es cada vez mayor. En el ecuador, que está exactamente a mitad de camino entre los dos polos, los puntos de su superficie describen el círculo más amplio de todos los del planeta.

Sin embargo, todo el planeta gira solidariamente, por lo que tanto si el círculo realizado por un punto de la superficie es grande como si es pequeño, el tiempo empleado en completar dicho círculo es el mismo para todos los del planeta.

Así, cuando la Tierra gira una vez, un punto situado en 40° N (la latitud de Filadelfia) describe un círculo que es de 30.700 kilómetros de longitud, mientras que

un punto situado en el ecuador describe un círculo de 40.070 kilómetros de longitud. En ambos casos, sin embargo, el círculo se realiza exactamente en veinticuatro horas. Eso significa que un punto de Filadelfia gira a una velocidad de 1280 kilómetros por hora mientras que un punto del ecuador gira a una velocidad de 1.670 kilómetros por hora.

En general, los materiales que constituyen la Tierra en profundidades situadas por debajo del ecuador se mueven más rápidamente que los materiales situados por debajo de otras zonas de latitud superior. El efecto centrífugo es nulo en los polos y va aumentando cada vez más hacia el ecuador, donde es máximo.

Por esta razón, la Tierra se va hinchando a partir de los polos, siendo el ecuador el lugar de máxima protuberancia; y es este tipo de hinchazón lo que transforma una esfera en elipsoide.

Un planeta que gira adquiere, por fuerza, forma elipsoidal, y el diámetro más largo será el que vaya desde cualquier punto del ecuador al punto opuesto del mismo, pasando por el centro. Es lo que se llama el «diámetro ecuatorial» y se dice que el planeta tiene una «protuberancia ecuatorial». El diámetro más cono es el que va del polo norte al polo sur. Es el «diámetro polar» y se dice que el planeta está «achatado en los polos».

El primer método utilizado por los astrónomos para determinar el período de rotación de un planeta distinto de la Tierra fue localizar alguna marca en el planeta y seguirla mientras giraba, contando el tiempo que tardaba en reaparecer. Ya en la década 1660-70 se consiguió hacer esto con Marte y Júpiter.

Saturno planteaba un problema más difícil. Estaba tan lejos que era difícil localizar en su superficie ninguna marca o punto que se pudiera seguir. Hubo que esperar hasta 1794, fecha en que el astrónomo anglo-germano William Herschel (1738-1822) consiguió realizar un cálculo.

Los casos de Mercurio y Venus resultaron todavía más difíciles y sus períodos de rotación no se pudieron determinar hasta los '60 de nuestro siglo. Se hizo estudiando cómo rebotaban en su superficie las ondas de radio. En la tabla 16 se indican los períodos de rotación de los planetas.

Tabla 16. Períodos de rotación de los seis planetas

33

Planeta	Horas	Días
Mercurio	1409	58,7
Venus	5.843	243,1
Tierra	24	1,00
Marte	24,62	1,03
Júpiter	9,83	0,41
Saturno	10,23	0,43

A pesar del hecho de que Júpiter y Saturno son tan inmensos, parece que giran sobre su eje a mayor velocidad que los planetas más pequeños. Podemos comprobarlo calculando cuál es la velocidad con que se mueve un punto del ecuador en cada uno de estos planetas (tabla 17).

Tabla 17. Velocidades ecuatoriales de los seis planetas

Planeta	Velocidad ecuatorial km/h
Mercurio	10,8
Venus	6,5
Tierra	1.670
Marte	867
Júpiter	45.765
Saturno	36.850

Observando las cifras de la tabla 17, podemos comprender por qué Júpiter y Saturno son claramente elipsoidales mientras que los demás planetas parecen ser esféricos. Excepto en estos dos, en todos los demás planetas de la tabla la velocidad de rotación es tan lenta que el efecto centrífugo no tiene fuerza suficiente para contrarrestar de forma apreciable la atracción gravitatoria.

Los diámetros de los planetas, tal como aparecen en la tabla 14, son los diámetros ecuatoriales, los más largos. En la tabla 18 se indican los diámetros polares, los más cortos, junto con la diferencia en longitud entre los dos diámetros.

Tabla 18. Diámetros polares de los seis planetas.

Diámetros polares	Diferencia en diámetro
kilómetros	kilómetros
4.850	0
12.140	0
12.713	43
6.729	61
134.000	9.200
107.900	13.100
	kilómetros 4.850 12.140 12.713 6.729 134.000

La diferencia de diámetros está distribuida uniformemente a uno y otro lado del eje del planeta, de forma que la Tierra, por ejemplo, tiene a ambos lados (en realidad, en todas las regiones medias del planeta) un saliente ecuatorial de 21,5 kilómetros. El de Marte es ligeramente superior, a pesar de que gira a una velocidad algo inferior, pues la velocidad de rotación no es el único factor a tener en cuenta. Júpiter y Saturno, y sobre todo este último, tienen protuberancias ecuatoriales gigantescas. La de Saturno, en cualquier punto de sus regiones ecuatoriales, es casi la mitad de la Tierra entera, y sustancialmente mayor que el diámetro de Mercurio. Otra forma de demostrar esto es medir el «achatamiento» de cada planeta. Se calcula dividiendo la diferencia en diámetros entre la longitud del diámetro ecuatorial (véase tabla 19). Es una forma de medir lo que un planeta dista de la forma esférica.

Tabla 19. Achatamiento de los seis planetas

Planeta	Achatamiento	Tierra = 1
Mercurio	0,0	0,0
Venus	0,0	0,0
Tierra	0,00.335	1,0
Marte	0,0052	1,55
Júpiter	0,064	19,1
Saturno	0,102	30,4

Como se puede ver, Saturno es el más achatado de los planetas enumerados, treinta veces más achatado que la Tierra.

# 3. La inclinación del eje de los planetas

Cuando un planeta es muy achatado es fácil ver dónde se encuentra el ecuador. Tiene que estar situado sobre el eje mayor del perfil elíptico. También se puede situar el ecuador teniendo en cuenta la línea que es paralela a la dirección en que se mueven los puntos de la superficie del planeta al girar, y está a mitad de camino entre los puntos extremos del planeta.

Si el eje de rotación fuera perfectamente vertical, formando un ángulo recto con el plano de revolución en torno al sol, en ese caso una mitad del planeta que fuera del polo norte al polo sur estaría con luz y la otra mitad en tinieblas. Al girar el planeta, todos los puntos de la superficie experimentarían una alternancia de días y noches que serían de la misma duración.

Sin embargo, los planetas no giran así. En todos los casos el eje está inclinado, de manera que no forma un ángulo recto con el plano de revolución del planeta. Su alejamiento de la línea vertical en algunos casos es muy ligero, y en otros notable.

El eje puede estar inclinado de manera que el polo norte apunte ligeramente hacia el Sol y el polo sur en dirección contraria. Si es ése el caso, el polo norte y las regiones que lo rodean (la mayor o menor extensión de éstas depende del grado de inclinación del polo) reciben siempre luz a medida que gira el planeta, mientras que el polo sur y las regiones próximas están en noche perpetua.

Las regiones situadas en las proximidades del ecuador experimentan una alternancia de días y noches, pero las regiones al norte del ecuador tienen días que son más largos que las noches, y las regiones al sur del ecuador tienen noches que son más largas que los días.

No siempre las cosas son así, pues mientras el planeta gira alrededor del Sol, su eje de rotación no cambia su ángulo de inclinación. Por consiguiente, cuando el planeta ha llegado al punto contrario de la órbita, es el polo norte el que está inclinado en dirección contraria a la del Sol y el polo sur el que mira hacia él. La situación es entonces la contraria de la anterior. El polo sur tiene siempre luz, el polo norte una noche perpetua, etc.

Cuando el planeta está exactamente entre ambos extremos, hay un momento (dos momentos, en lados contrarios, a lo largo de cada revolución) en que todo el globo tiene un día y una noche de la misma duración (véase figura 7).

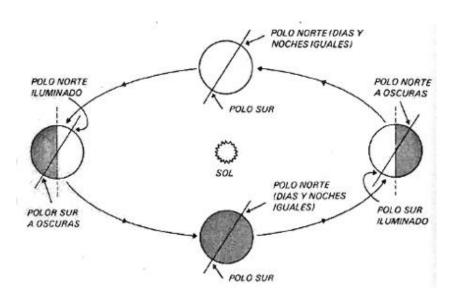


Figura 7. Revolución e inclinación del eje.

El eje de la Tierra tiene una inclinación de 23,45° respecto a la línea vertical, pero las cifras son distintas en los diferentes planetas (véase tabla 20).

De los seis planetas considerados, el que tiene mayor inclinación axial es Saturno. Si el eje de la Tierra estuviera tan inclinado como el de Saturno, el sol de mediodía estaría más alto en el cielo que ahora, y se hundiría más en invierno, y esto ocurriría en todos los puntos de la Tierra. La diferencia entre las estaciones estaría más marcada.

Tabla 20. Inclinación del eje de los seis planetas

Planeta	Inclinación del eje (grados)
Mercurio	7
Venus	3,4
Tierra	23,45
Marte	23,98
Júpiter	3,08
Saturno	26,73

En cuanto a Saturno mismo, la diferencia, lógicamente, es menos importante de lo que sería en la Tierra. Después de todo, el Sol está tan lejos de Saturno y le llega tan poco calor en comparación con el que recibe la Tierra que casi no importa, en lo que a temperaturas de Saturno se refiere, que el Sol se eleve un poco más o no.

# Capítulo 3 Los anillos de Saturno

#### Contenido:

- 1. El descubrimiento de los anillos
- 2. El tamaño de los anillos
- 3. La estructura de los anillos
- 4. El origen de los anillos

#### 1. El descubrimiento de los anillos

Cuando los astrónomos observaron los planetas con los rudimentarios telescopios de comienzos del siglo XVII, les inquietó el aspecto de Saturno. Era algo completamente diferente de todas las demás cosas que se veían en el cielo.

El primer astrónomo que se dio cuenta de esto fue el mismo Galileo. En 1610 dirigió su pequeño telescopio hacia Saturno, lo observó intrigado, y lo volvió a observar una y otra vez. No vio el sencillo círculo luminoso que esperaba ver.

A uno y otro lado de Saturno se observaba un poco de luz adicional. Parecía como si Saturno estuviera compuesto de tres esferas, una grande en el centro y dos más pequeñas, una a cada lado.

Galileo había descubierto ya que Júpiter tenía cuatro cuerpos pequeños que lo acompañaban dando vueltas a su alrededor, como nuestra Luna se mueve alrededor de la Tierra. Por eso, lo primero que se le ocurrió fue que eran dos cuerpos que seguían a Saturno. Pero, de ser así, las dos pequeñas esferas deberían girar en torno a Saturno. Cada una de ellas debería pasar por detrás de él, para luego volver a pasar por delante, lo mismo que los cuerpos de Júpiter pasan por delante y detrás de su planeta, y que la Luna (vista desde el espacio) pasaría por delante y por detrás de la Tierra.

Pero en el caso de Saturno no ocurría eso. Siempre que miraba a Saturno, Galileo se encontraba con las dos pequeñas esferas, una a cada lado del planeta, como si estuvieran fijas en el espacio. No sabía qué hacer con ellas.

Tampoco se atrevía a informar de lo que veía, pues muchos de los astrónomos de su tiempo, que creían en las antiguas teorías de la estructura de los cielos, se mofaban de los informes de Galileo sobre sus descubrimientos con el telescopio. Insistían en que lo que veía con el telescopio eran ilusiones ópticas. Los dos globos de los lados de Saturno le parecían a Galileo tan chocantes que no pudo por menos de preguntarse si, al menos en este caso, estaba realmente ante una ilusión óptica. Hablar de ellos, pensaba, podría dar nuevas armas a sus enemigos, por lo que decidió callar hasta que encontrara una explicación.

Por otra parte, no quería renunciar al mérito de ser el primero en ver aquellas extrañas estructuras, si es que existían realmente. Lo que hizo entonces fue enviar una carta a su amigo Johannes Kepler. Dentro de la carta había un revoltijo de letras que no tenían ningún sentido.

Sin embargo, ordenando aquellas letras de una manera determinada, formaban una frase latina que significaba: «He visto el planeta exterior triple».

Galileo volvió a observar Saturno de cuando en cuando, y cada vez le resultaba más difícil ver los pequeños globos. Finalmente, en los últimos días del año 1612, los perdió totalmente de vista, lo cual le intrigó todavía más. « ¿Es que Saturno ha devorado a sus propios hijos?», gruñó. Después de todo, eso era lo que había hecho Saturno (Crono) en los antiguos mitos griegos.

Más tarde volvieron a aparecer, pero Galileo siguió desconcertado por este enigma hasta el final de su vida.

Otros astrónomos que también examinaron el planeta Saturno en aquellos momentos iniciales del telescopio vieron igualmente aquellos extraños objetos a uno y otro lado del planeta. Al astrónomo alemán Christoph Scheiner (1575-1650) no le parecieron globos pequeños. En 1614 los describió como pequeños cuerpos luminosos en forma de luna creciente, con las puntas dirigidas hacia Saturno. En realidad, parecían las asas de una taza a ambos lados de Saturno (una descripción mejor que la de Galileo, sin duda).

Si eran realmente asas sujetas al planeta, girarían con él y desaparecerían cuando una de ellas pasara a colocarse detrás de Saturno y la otra delante de él. Aun cuando fueran visibles, una a cada lado, darían la impresión de cambiar de forma al ir girando. Sin embargo, las asas parecían exactamente iguales una noche tras otra. ¿Sería quizá que Saturno no giraba?

La primera persona que comprendió lo que había hecho que los astrónomos se rompieran la cabeza durante más de cuarenta años fue el astrónomo holandés Christian Huygens (1629-1695). Huygens había construido un telescopio mejor que todos los anteriores, por lo que consiguió ver Saturno con más claridad y aumento que ninguno de sus predecesores.

En 1656, utilizando dicho telescopio, examinó las «asas» de Saturno y llegó a la conclusión de que lo que tenía ante sí era un anillo que daba la vuelta a Saturno. Aunque ese anillo girara alrededor del planeta, siempre habría una parte de él que sobresaldría a uno y otro lado del mismo, por lo que daría la impresión de unas asas fijas.

Huygens no estaba del todo seguro de que las cosas fueran así, por lo que en un informe que publicó en 1659 incluyó una sarta de letras sin significado, lo mismo que había hecho Galileo. Dichas letras, ordenadas debidamente, formaban una oración latina que significaba: «Rodeado por un anillo, delgado y plano, que no toca en ningún punto, inclinado hacia la eclíptica».

En definitiva, Huygens había descubierto que Saturno tenía un anillo que le daba la vuelta. Era el único planeta con un anillo parecido a su alrededor. De hecho, no había en el cielo nada que se pareciera a Saturno, el cual, gracias a su anillo, suele ofrecer el más bello espectáculo que puede contemplarse con un telescopio.

El anillo está en el plano del ecuador de Saturno. Si el eje de Saturno fuera perfectamente vertical, sin ninguna inclinación, veríamos a los anillos discurrir exactamente por el centro del disco, en la forma de un fino borde —como si miráramos un naipe situado horizontalmente a la altura de nuestra vista y colocado de canto. Los anillos son tan estrechos que, dada la gran distancia que nos separa de Saturno, nos sería totalmente imposible verlos. En ese caso Saturno nos parecería un globo sin más, lo mismo que Júpiter y Marte.

Pero el eje de Saturno está inclinado, formando un ángulo de casi 27 grados. Eso quiere decir que los anillos también están inclinados y forman un ángulo de 27 grados con el plano de la órbita de Saturno alrededor del Sol. Como la órbita de Saturno está casi en el mismo plano que la órbita de la Tierra, los anillos de Saturno tienen aproximadamente esa misma inclinación en relación con la órbita de la Tierra

(la eclíptica). Esta era una de las observaciones que Huygens había registrado en su revoltijo de letras.

Los anillos mantienen su posición mientras Saturno va dando vueltas alrededor del Sol, lo cual quiere decir que los astrónomos de la Tierra tienen ocasión de ver los anillos desde distintos ángulos.

Cuando Saturno está en un extremo de su órbita, vemos la parte del anillo que está delante de Saturno. Parece como si el anillo se cayera hacia abajo, mientras el globo de Saturno se mantiene fijo en su sitio. Cuando Saturno está en el extremo contrario de su órbita vemos el lado opuesto del anillo. Entonces parece como si el anillo se hubiera desplazado hacia arriba, mientras el globo de Saturno se mantenía inmóvil abajo.

Dado que Saturno tarda veintinueve años y medio en dar la vuelta al Sol, hacen falta casi quince años para que Saturno pase de un extremo de su órbita al otro. Por consiguiente, si en un momento determinado vemos que el anillo cuelga hacia abajo, lo veremos girar hacia arriba quince años más tarde, para luego bajar al cabo de otros quince años, y así sucesivamente.

Mientras Saturno pasa de un extremo de su órbita al otro, la magnitud de la inclinación que nosotros vemos en el anillo va cambiando constantemente. Partiendo del punto de la máxima inclinación hacia abajo, va subiendo lentamente hasta llegar al momento de la máxima inclinación hacia arriba. A mitad de camino entre uno y otro punto lo vemos exactamente de canto. Al volver del extremo superior al extremo inferior, va girando lentamente hacia abajo y en el punto medio lo volvemos a ver de canto.

A lo largo de la revolución de Saturno en torno al Sol vemos el anillo de canto dos veces, lo que significa que lo vemos así a intervalos de poco menos de quince años (véase figura 8).

Cuando el anillo se aproxima a la posición en que lo vemos de canto, cada vez resulta más difícil verlo, y durante el período de tiempo en que está situado de canto resulta totalmente invisible. Esa es la razón por la que Galileo, tras ver el anillo en 1610 y 1611, no consiguió verlo en 1612.

Huygens comprendió este comportamiento del anillo porque lo había visto desaparecer y luego reaparecer en 1656. Predijo las tres ocasiones siguientes en

que volvería a desaparecer —en julio de 1671, en marzo de 1685 y en diciembre de 1700. El anillo se comportó exactamente en la forma prevista y con ello quedó zanjado el problema.

Otros astrónomos de la época comenzaron entonces a observar el anillo con detenimiento. En 1675, Cassini (quien, cinco años antes, había medido la paralaje de Marte) observó que el anillo de Saturno no era solamente una superficie curva luminosa. Había una línea oscura todo alrededor del anillo, que lo dividía en una sección interior y otra exterior. La sección exterior era más fina y menos brillante que la interior.

Parecía como si Saturno estuviera rodeado no por un anillo sino por dos, uno dentro del otro, y a partir de entonces se ha hablado de los anillos de Saturno, en plural. El astrónomo germano-ruso Friedrich B. W. von Struve (1793-1864) puso nombres a los anillos en 1826, pero no demostró demasiada imaginación. Al exterior lo llamó anillo A y al interior anillo B. La divisoria entre los dos se llama «división de Cassini».

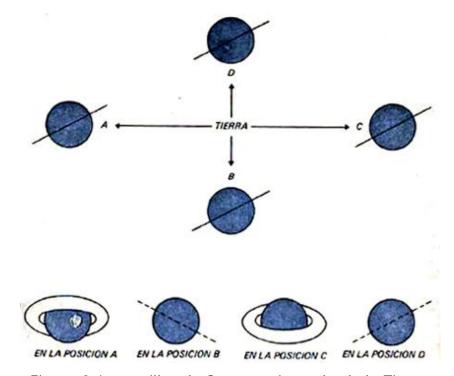


Figura 8. Los anillos de Saturno vistos desde la Tierra.

En 1850 el astrónomo americano William Cranch Bond (1789-1859) informó de un anillo pálido todavía más próximo a Saturno que el anillo B. Este anillo interior se llama a veces «anillo crespón» y algunas veces anillo C. No se observa ningún espacio divisorio entre los anillos B y C.

#### 2. El tamaño de los anillos

Si observáramos Saturno desde el espacio exterior, situados a un millón de kilómetros por encima de uno de sus polos, lo veríamos como un círculo parcialmente iluminado rodeado de sus anillos, la mitad de los cuales estarían, por supuesto, dentro de la sombra de Saturno. En la figura 9 se indica cuál sería su aspecto sin tener en cuenta los efectos de la luz solar, del día y de la noche.

La distancia entre la superficie de Saturno y su centro sería su radio ecuatorial. (Como es bien sabido, el radio de un círculo o de una esfera tiene la mitad de la longitud del diámetro.) La distancia de los bordes interior y exterior de los tres anillos puede darse por tanto en kilómetros o en función del radio ecuatorial, como hacemos en la tabla 21.

Tabla 21. Sistema de anillos de Saturno (Distancia al centro)

	Kilómetros	Radios ecuatoriales
Superficie de Saturno	60.100	1,00
Anillo C, borde interior	76.800	1,28
Anillo C, borde exterior y Anillo B,	92.000	1,53
borde interior		
Anillo B, borde exterior (División	117.800	1,96
de Cassini)		
Anillo A, borde interior	120.400	2,00
Anillo A, borde exterior	136.450	2,27

Para representarnos la anchura de cada anillo podemos hacer como en la tabla 22: tomar como medida el diámetro de la Tierra. Como se puede ver, en cada uno de los anillos podría caber la Tierra entera, y todavía sobraría espacio. Es más, en el anillo B podrían caber dos Tierras sin que llegaran a cubrir toda su anchura. Harían

falta cinco Tierras una al lado de otra para cubrir toda la anchura de los tres anillos, contando la división de Cassini, cuya anchura no es lo suficientemente amplia como para que pudiera pasar por ella un globo terráqueo.

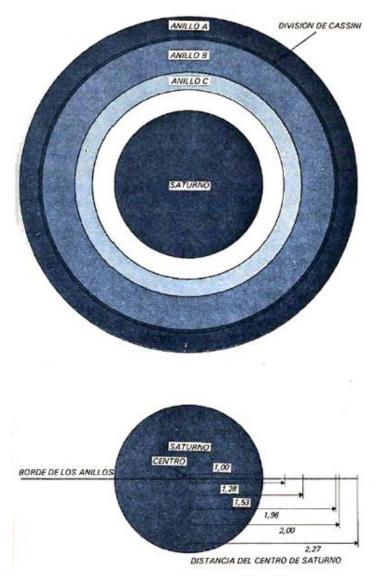


Figura 9. Saturno y sus anillos.

Tabla 22. Anchura de los anillos de Saturno

	Kilómetros	Diámetro de la Tierra = 1
Anillo C	15.200	1,20
Anillo B	25.800	2,03

División de Cassini	2.600	0,20
Anillo A	16.050	1,27
Total	59.650	4,70

Dada la anchura de los anillos podemos calcular la superficie de cada uno de ellos (parte superior e inferior) y compararla con la superficie de la Tierra (tabla 23).

Tabla 23. Superficie de los anillos de Saturno

	Superficie (Tierra = 1)
Anillo C	31,8
Anillo B	67,1
Anillo A	53,3
Total	151,2

El sistema de anillos tiene, en su totalidad, una superficie 1,7 veces mayor que la superficie del propio Saturno y 1,2 veces mayor que la de Júpiter.

Ahora bien, los anillos son muy delgados. Aún no conocemos exactamente su espesor, pero los cálculos recientes más razonables hablan de 2,5 kilómetros.

Si nos imaginamos los anillos como estructuras sólidas, su volumen total sería equivalente al de una esfera de unos 5.700 metros de diámetro, algo mayor que el de Mercurio.

#### 3. La estructura de los anillos

Huygens, el descubridor de los anillos, pensaba que eran macizos, pues así lo parecían. De hecho, durante los cien años siguientes a su descubrimiento hubo astrónomos que pensaron que se trataba de objetos macizos. Algunos llegaron incluso a pensar que la división de Cassini era una marca oscura dentro de un anillo luminoso y que en realidad no había más que un anillo. (Pasado el tiempo, se llegó a ver una estrella a través de la división de Cassini, lo cual fue una prueba definitiva de que había realmente un hueco.)

46

Sin embargo, si los anillos fueran objetos macizos, surgirían problemas con la ley de la gravitación.

Imaginemos dos cuerpos, por ejemplo la Tierra y la Luna, cada uno de los cuales ejerce cierta atracción gravitatoria sobre el otro. Esta atracción no es invariable, pues la intensidad de la misma disminuye con la distancia.

Esto quiere decir que la atracción de la Luna sobre la cara de la Tierra que mira hacia ella es mayor que la atracción ejercida sobre la cara de la Tierra que mira en sentido contrario. Esta diferencia en la atracción de la Luna sobre la Tierra contribuye a estirar la Tierra en dirección a la Luna y en ambos sentidos, hacia ella y en el sentido contrario. Como consecuencia, se produce una elevación del agua de los océanos terrestres tanto en la cara que mira a la Luna como en la cara contraria. Al girar la Tierra, las distintas partes de sus costas van entrando y saliendo de dicha zona, por lo que parece que el agua sube y baja en la costa dos veces al día. Son las mareas. Por esta razón, el efecto de una diferencia de atracción gravitatoria entre un cuerpo y otro se llama «efecto de marea».

La atracción gravitatoria de la Tierra produce un «efecto de marea» sobre la Luna. Esta no tiene agua, pero su sustancia rocosa se alarga en dirección a la Tierra. Al girar la Luna, este efecto de marea ralentiza su rotación, hasta que la Luna gua una sola vez sobre su eje cada vez que da una vuelta a la Tierra. Cuando ocurre esto, las protuberancias de roca quedan mirando exactamente a la Tierra y exactamente en el sentido contrario, y la situación se estabiliza. La rotación de la Luna ha quedado fijada por la acción de las mareas.

También la rotación de la Tierra se ralentiza como consecuencia del efecto de marea de la Luna. La Luna es un cuerpo mucho más pequeño, por lo que su campo gravitatorio es mucho más débil que el de la Tierra. Además, es mucho más difícil retardar el movimiento de ésta, porque es un cuerpo mayor. Por eso tendrán que pasar muchos miles de millones de años antes de que la rotación de la Tierra pierda velocidad hasta el punto de que una de sus caras quede siempre mirando a la Luna mientras gira y de que el día de la Tierra dure exactamente un mes. (Cuando esto ocurra el mes será más largo, pues la Luna estará más lejos y hará falta más tiempo para que ésta dé una vuelta a la Tierra.)

Los cuerpos pequeños se ven menos afectados por los efectos de marea que los grandes. Así, aunque la Tierra sea 81 veces mayor que la Luna, el efecto de marea que experimenta la Luna no es 81 veces mayor que el que experimenta la Tierra. El efecto es mayor, pero no 81 veces mayor. Dado que la Luna es más pequeña que la Tierra, la diferencia de atracción gravitatoria con la distancia en las distintas partes de su cuerpo es menor que en las de la Tierra.

Además, cuanto más próximos estén dos cuerpos, mayores son los efectos de mareas. El efecto aumenta con el inverso del cubo de la distancia. Si la distancia entre la Luna y la Tierra fuera la mitad de lo que es, el efecto de marea sería 2 x 2 x 2, u 8 veces mayor. Si la distancia fuera un tercio de lo que es, el efecto sería 3 X 3 X 3, ó 27 veces mayor. De la misma manera, si la distancia entre la Luna y la Tierra fuera tres veces mayor de lo que es, el efecto sería 1/3 X 1/3 X 1/3, ó 1/27 veces mayor.

En otras palabras, cuando dos cuerpos se acercan, el efecto de marea se incrementa muy rápidamente.

La primera persona que pensó en los efectos de marea con relación a los anillos de Saturno fue el astrónomo francés Pierre Símon de Laplace (1749-1827).

En 1785 Laplace señaló que los objetos que giraban en torno a un planeta lo hacían mucho más lentamente cuanto más lejos de él se encontraran. Por ejemplo, la parte más interior de los anillos, sometidos a la fuerte atracción gravitatoria de Saturno, daría una vuelta en 2/5 del tiempo utilizado por la parte más exterior, pues ésta estaría sometida a la atracción más débil de un Saturno bastante más distante.

Sí el anillo fuera macizo, todo el conjunto giraría solidariamente y cada una de sus partes debería dar la vuelta en el mismo período de tiempo. Podríamos suponer que todo el conjunto gira a una velocidad media. Sin embargo, bajo el impulso de la gravedad, las partes más interiores tirarían hacia adelante para alcanzar su velocidad natural, es decir, una velocidad mayor, y las partes exteriores tirarían hacía atrás para ponerse a su velocidad natural, más lenta. De esta manera el efecto de marea haría saltar el anillo en pedazos, por muy fuerte que fuera la sustancia de que estuviese compuesto.

Laplace sugirió que lo que rodeaba a Saturno era en realidad un conjunto de muchos anillos muy estrechos, dispuestos concéntricamente. Cada uno de ellos

De Saturno a Pluton

sería tan estrecho que los efectos de marea originados en su interior serían demasiado pequeños para que importaran. En su opinión, la división de Cassini era sólo una de las muchas

En los setenta años posteriores, los astrónomos trataron de encontrar en los anillos otras líneas divisorias; pero dada la enorme distancia de Saturno era muy difícil verlas, suponiendo que las hubiera. Circularon informes donde se hablaba de ciertas divisiones que se habían podido localizar, pero no había acuerdo general al respecto.

En 1855 el matemático escocés James Clerk Maxwell (1831-1879) demostró que el análisis de Laplace no era del todo completo. Los problemas no se solucionaban recurriendo a los anillos estrechos. La única forma de que los anillos de Saturno pudieran resistir a los efectos de marea sería que estuvieran compuestos de un gran número de cuerpos pequeños, cada uno de los cuales sería demasiado pequeño para que dichos efectos pudieran tener importancia.

Según Maxwell, los anillos de Saturno eran en realidad una nube de pequeños cuerpos, cada uno de los cuales no tendría más que unos centímetros de ancho, y todos ellos girarían en torno a Saturno.

Son tantos los fragmentos de la nube, que desde una distancia tan grande como la de Saturno parecen estar fundidos en un anillo macizo, lo mismo que los granos sueltos de la arena parecen fundirse para formar una extensión sólida cuando se observa desde cierta distancia.

El razonamiento de Maxwell era irrefutable, y se ha seguido aceptando hasta nuestros días. El descubrimiento del anillo C fue un fuerte argumento en su favor. Si Maxwell estaba en lo cierto, el anillo C era muy pálido porque tenía menos fragmentos que los anillos A y B. Y así era, pues algunas veces se alcanzaba a ver estrellas a través del anillo C.

## 4. El origen de los anillos

En 1850, el astrónomo francés Edouard Roche (1820-1883) trató de averiguar lo que ocurriría en el caso de que la Luna se acercara cada vez más a la Tierra en sus revoluciones en torno a ella.

Si fuera ése el caso, los mutuos efectos de marea de la Luna y de la Tierra serían cada vez más fuertes. Como la Tierra es mayor, produciría sobre la Luna un efecto mayor que el producido por ésta sobre la Tierra. Además la Tierra, al tener una gravitación más intensa, podría resistir una determinada tensión mejor que la Luna. Por consiguiente, en un acercamiento semejante la que más sufriría sería la Luna.

Con el tiempo, si la Luna se acercara lo suficiente, su estructura no podría resistir el efecto de marea y comenzaría a fragmentarse y seguiría dividiéndose en trozos cada vez más pequeños hasta que éstos fueran demasiado reducidos para verse afectados por los efectos de marea... al menos en cuanto a su desintegración.

El efecto de marea podría alterar entonces la órbita de los fragmentos lunares. En un primer momento quizá giraran en torno a la Tierra en diversos planos, según cuál fuera la fuerza ejercida por la división concreta que los produjo. Pero, poco a poco, los efectos de marea los obligarían a dar vueltas a la Tierra en el plano del ecuador de la misma. Los fragmentos vendrían a disponerse en una formación ancha y delgada, parecida a los anillos de Saturno.

Esta podía ser una explicación de los anillos de Saturno. Quizá un cuerpo externo, como nuestra Luna, se acercó demasiado a Saturno y fue desmembrado por los efectos de marea. O quizá fuese que la materia que rodeaba al planeta —y que en otras circunstancias se hubiese aglutinado en satélites— estaba demasiado cerca de aquél, con lo cual los efectos de marea impidieron que se agregara en un solo cuerpo de grandes dimensiones, manteniéndose en forma de fragmentos.

Roche calculó que, haciendo ciertas suposiciones simplificadoras, los cuerpos grandes se fragmentarían al acercarse al planeta central a menos de 2,44 veces el radio de dicho planeta. Si los fragmentos estaban de entrada más próximos de lo indicado, no podrían unirse.

Por esa razón, se dice que el «límite de Roche» de un planeta es una distancia correspondiente a 2,44 veces el radio ecuatorial del mismo (véase tabla 24). De hecho, los anillos de Saturno están, en su borde más interior, a una distancia de 1,28 veces el radio ecuatorial de Saturno, y de 2,27 veces el radio ecuatorial en su borde más exterior. Todo el sistema anular queda dentro del límite de Roche.

Como los anillos de Saturno están compuestos de pequeñas panículas, puede que en su mayor parte sean espacio vacío, aunque desde lejos parezcan un cuerpo

sólido. Las partículas de los anillos ocupan aproximadamente la tercera parte del volumen de los anillos, y el resto sería espacio vacío.

Tabla 24. Radio y límite de Roche de los seis planetas

Planeta	Radio ecuatorial (en km)	Límite de Roche (en km)
Mercurio	2.425	5.917
Venus	6.070	14.810
Tierra	6.378	15.562
Marte	3.395	8.284
Júpiter	71.600	174.700
Saturno	60.000	146.400

Si se acumulara en una esfera todo el material de los anillos, el tamaño de dicha esfera sería menor que el que hemos calculado partiendo de la suposición de que eran macizos. El diámetro de la esfera sería sólo de unos 4.000 kilómetros, parecido al de nuestra Luna.

De Saturno a Pluton

## Capítulo 4

#### Titán

#### Contenido:

- 1. Masa y densidad
- 2. La estructura de los planetas
- 3. Gravedad superficial
- 4. El tamaño de los satélites
- 5. La atmósfera de Titán

## 1. Masa y densidad

Antes de que entrara en uso el telescopio, se conocían exactamente ocho miembros del sistema solar, todos ellos observados desde los primeros tiempos de la historia escrita y, en muchos casos, desde muchos siglos antes. Eran el Sol, los seis planetas que giraban a su alrededor y finalmente la Luna, que daba vueltas alrededor de la Tierra.

La Luna es más pequeña que cualquiera de los planetas, pero no mucho más. Mientras Mercurio, por ejemplo, tiene un diámetro de 4.850 kilómetros, la Luna tiene un diámetro de 3.476 kilómetros.

¿Podría haber otros planetas, además de la Tierra, que tuvieran cuerpos que giraran a su alrededor? Ciertamente. Pero si eran demasiado pequeños, serían mucho menos brillantes que los planetas mismos. Quizá fueran demasiado pálidos para que pudiéramos verlos, o, si eran visibles, quizá estuvieran demasiado cerca del planeta y quedasen borrados por el resplandor de este otro cuerpo, de mayor brillo y tamaño.

Así pues, antes del descubrimiento del telescopio, no había ninguna posibilidad de ver esos cuerpos (y, en realidad, los astrónomos nunca pensaron que pudieran existir).

En cuanto entró en uso el telescopio, se produjo casi inmediatamente el descubrimiento de otros cuerpos. En enero de 1610 dirigió Galileo su pequeño telescopio hacia Júpiter y encontró cuatro acompañantes. Recibieron el nombre de lo, Europa, Ganímedes y Calisto, en orden de proximidad a Júpiter. Estos nombres

eran los de las tres ninfas de que estuvo enamorado Júpiter (Zeus) y el de un príncipe (Ganímedes), que en la mitología griega era su copero.

Todos ellos eran lo suficientemente luminosos para poder verlos sin telescopio, si no fuese porque los enmascara la luz de Júpiter. En presencia de Júpiter era necesario recurrir al telescopio.

Cuando Kepler tuvo noticia del descubrimiento de aquellos cuerpos los denominó «Satélites», derivación de una palabra latina que significa «acompañante, concomitante». Los objetos descubiertos por Galileo eran por tanto cuatro satélites de Júpiter (algunas veces agrupados con el nombre de «Satélites de Galileo»). Utilizando este término, podemos hablar de la Luna como satélite de la Tierra.

El descubrimiento de los satélites de Júpiter elevó el número de componentes conocidos del sistema solar, que pasaron de 8 a 12, un incremento del 50 por ciento. Además, estos satélites eran los primeros elementos del sistema solar cuyo descubrimiento podía situarse en un año concreto y atribuirse a una persona determinada.

Durante casi medio siglo los satélites de Galileo fueron los únicos conocidos, exceptuando nuestra Luna.

Luego, en 1655, Huygens (quien al mismo tiempo estaba estudiando la verdadera naturaleza de los «globos» o «asas» a ambos lados de Saturno) descubrió un pequeño resplandor junto a Saturno. Lo siguió noche tras noche y comprobó que se movía alrededor de aquél.

Huygens anunció en 1656 que Saturno, como Júpiter y la Tierra, poseía un satélite. No le puso ningún nombre propio, llamándolo simplemente «luna de Saturno». Quien lo bautizó, dos siglos más tarde, en 1858, fue el astrónomo inglés John Herschel (1792-1871).

En la mitología griega los dioses de la fertilidad, encabezados por Crono (Saturno), que precedió a Zeus (Júpiter), eran llamados los Titanes. Por eso Herschel llamó al satélite Titán. El nombre no estaba muy bien elegido, pues no representaba a un individuo mítico, sino más bien a todo un grupo de individuos. Sin embargo, el nombre hizo fortuna.

El descubrimiento de Titán fue importante, pues una vez que se sabe que un planeta tiene un satélite es posible determinar la masa de aquél (o cantidad de materia que contiene).

En primer lugar, Titán da una vuelta a Saturno cada 15,95 días. Por otro lado, una vez conocida la distancia de Saturno, también se podía determinar la distancia de Titán a su planeta, partiendo de la distancia aparente vista en el telescopio. Resultó que la distancia de Titán al centro de Saturno era de 1.222.000 kilómetros.

Nuestra Luna da la vuelta a la Tierra en 27,32 días, pero su distancia del centro de la Tierra es de sólo 384.390 kilómetros. Teniendo en cuenta la ley de la gravitación podemos calcular que si la Luna estuviera tan lejos de la Tierra como Titán lo está de Saturno, la Luna daría la vuelta a la Tierra cada 154,5 días.

En otras palabras, a la Luna le costaría dar la vuelta a la Tierra unas diez veces más de lo que a Titán le cuesta dar una vuelta a Saturno, en el caso de que ambos estuvieran a la misma distancia de su planeta. Según la teoría de la gravitación, si Saturno lleva a su satélite a una velocidad diez veces superior a la velocidad con que la Tierra lleva al suyo, el campo gravitatorio de Saturno (y por lo tanto su masa) es aproximadamente 10 X 10, ó 100 veces más fuerte que el de la Tierra.

También es posible establecer la masa de los demás planetas en comparación con la masa de la Tierra, con tal de que posean satélites. En los casos de los planetas que no tienen satélites hay que calcular su masa por otros procedimientos menos convincentes. En la tabla 25 se ofrecen los resultados.

Tabla 25. Masas de los seis planetas

Planeta	Masa (Tierra = 1)	
Mercurio	0,0558	
Venus	0,8150	
Tierra	1,0000	
Marte	0,1074	
Júpiter	317,9	
Saturno	95,1	

Saturno es el segundo por su masa, pero un segundo no muy aventajado. Sólo es la tercera parte de Júpiter. Este, por sí solo, tiene el 76,6 por 100 de la masa de los seis planetas, y Saturno sólo el 22,9 por 100. Los cuatro planetas restantes, incluyendo a la Tierra, sólo tienen el 0,5 por 100 de la masa.

Sin embargo, aun cuando la masa de Júpiter y Saturno sea tan enorme, en cierto sentido es sorprendentemente escasa. Saturno, por ejemplo, tiene un volumen que es 800 veces superior al de la Tierra, Podría pensarse que iba a contener 800 veces más materia que la Tierra, pero no es así. Contiene menos de 100 veces más materia que la Tierra.

Esto quiere decir que la materia es menos compacta en Saturno que en la Tierra. Para expresar esta circunstancia se habla de «densidad». Cuanta más materia hay en un volumen de unas determinadas dimensiones, más densa es esa materia.

Podemos medir la masa en kilogramos, y el volumen en metros cúbicos, y decir entonces que un determinado trozo de materia tiene una densidad de tantos kilogramos por metro cúbico.

El agua, por ejemplo, tiene una densidad de 1.000 kilogramos por metro cúbico.

Las diferentes rocas de la corteza terrestre tienen distintas densidades, pero la densidad media de la corteza de la Tierra es considerablemente mayor que la del agua. Viene a ser de aproximadamente 2.800 kilogramos por metro cúbico.

El interior de la Tierra es notablemente más denso que la corteza, y se calcula que la densidad media del globo terráqueo en su conjunto es de 5.518 kilogramos por metro cúbico. La densidad media de los seis planetas es la indicada en la tabla 26.

Tabla 26. Densidades de los seis planetas

Planeta	kg/m³	Tierra = 1	Agua = 1
Mercurio	5.600	1,015	5,6
Venus	5.200	0,943	5,2
Tierra	5.518	1,000	5,5
Marte	3.950	0,716	4,0
Júpiter	1.314	0,238	1,3
Saturno	704	0,128	0,7

55

Los científicos tienen la certeza total de que el núcleo de la Tierra es una enorme bola de hierro fundido (junto con cierta cantidad de un metal semejante, el níquel). A su alrededor hay un enorme «manto» de rocas que es más denso que las rocas de la superficie. Esta estructura de la Tierra explica, entre otras cosas, la densidad media señalada.

Venus y Mercurio poseen, muy probablemente, la misma estructura de metal y roca que la Tierra, y los tres tienen una densidad media muy semejante.

Marte tiene una densidad bastante inferior (7/10) a la de los tres planetas más próximos al Sol; parece que ello se debe a que dista mucho de tener un núcleo metálico y, en su mayor parte, es una esfera de rocas. (Lo mismo ocurre, al parecer, con la Luna.)

Júpiter tiene una densidad media que es sólo una cuarta parte de la de la Tierra. Esto significa que sólo una pequeña parte de su estructura puede ser metálica o rocosa. Debe estar formado en su mayor parte por un material todavía menos denso. Lo mismo tiene que ocurrir en Saturno, sólo que en medida aún mayor, pues es la mitad de denso que Júpiter y ocho veces menos denso que la Tierra.

De hecho, Saturno es el único de los seis planetas —y el único gran cuerpo conocido de cualquier clasificación del sistema solar— que es menos denso que el agua. Si hubiera un inmenso océano de agua y si pudiéramos colocar los planetas en dicho océano sin que se les fuera nada de su materia, sólo flotaría Saturno. Los demás se hundirían.

#### 2. La estructura de los planetas

Para entender el significado de la bajísima densidad de Saturno, revelada por primera vez en la distancia y movimiento de Titán, veamos cómo se originó el sistema solar. Hoy se cree que comenzó en forma de inmenso remolino de polvo y gas, que se fue juntando y condensando progresivamente bajo la fuerza de atracción de su propia gravedad.

La mayor parte del mismo se unió en una densa esfera central cuya masa era tan enorme que los átomos del centro se vieron aplastados por las presiones inducidas por la atracción gravitatoria hacia adentro. Los núcleos atómicos en el centro de los átomos, no protegidos ya por las capas atómicas exteriores, comenzaron a

entrechocarse y a combinarse, liberando energía en el proceso. Toda la esfera central comenzó a encenderse y a irradiar luz y calor. En pocas palabras: se convirtió en el Sol.

Mientras se producían estos hechos, el polvo y el gas situados en las proximidades del Sol en formación se unieron en cuerpos planetarios situados a distintas distancias de aquél y de tamaño muy pequeño comparado con el del Sol central. (El mismo Júpiter tiene sólo 111.000 de la masa del Sol.)

La nube de la que se formó el sistema solar estaría formada, como es natural, por las mismas sustancias de que se compone el universo en general. Los astrónomos disponen de medios para determinar la estructura química del Sol y de otras estrellas, así como del polvo y el gas que hay entre las estrellas. De esta manera han podido establecerse algunas conclusiones sobre su composición. En la tabla 27 se enumeran los elementos químicos del universo (cada uno de ellos con un tipo de átomo distintivo) en orden de cantidad decreciente.

Tabla 27. Abundancia de los elementos

Elemento	Número de átomos (Silicio = 10.000)	
Hidrógeno	400.000.000	
Helio	31.000.000	
Oxígeno	215.000	
Neón	86.000	
Nitrógeno	66.000	
Carbono	35.000	
Silicio	10.000	
Magnesio	9.100	
Hierro	6.000	
Azufre	3.750	
Argón	1.500	
Aluminio	950	
(todos los demás elementos)	(aprox. 1.400)	

Como se puede ver, el universo es esencialmente hidrógeno y helio, los dos elementos con los átomos más sencillos. Entre los dos constituyen el 99,9 por 100 de todos los átomos del universo. Sólo uno de cada mil átomos es de alguna otra cosa.

Tanto el hidrógeno como el helio son gases y, junto con el neón y el argón, sólo adquieren forma líquida cuando se alcanzan temperaturas muy bajas. Aun a grandes distancias del Sol, el hidrógeno y el helio se mantienen en forma gaseosa. Por eso podemos clasificar juntos estos elementos dentro del grupo de «gases».

Los átomos de helio, neón y argón no se combinan ni entre sí ni con los átomos de los demás elementos. Sin embargo los átomos de hidrógeno se combinan entre sí por pares formando moléculas de hidrógeno o formando otras moléculas con los átomos de los otros elementos.

El oxígeno, el nitrógeno, el carbono y el azufre están compuestos de átomos que tienen todas las probabilidades de combinarse con átomos de hidrógeno cuando estos últimos están en cantidades abrumadoras. Un átomo de oxígeno se combina con dos átomos de hidrógeno para formar una molécula de agua. Un átomo de nitrógeno se combina con tres átomos de hidrógeno para formar una molécula de amoniaco. Un átomo de carbón se combina con cuatro átomos de hidrógeno para formar una molécula de metano. Un átomo de azufre se combina con dos átomos de hidrógeno para formar el sulfuro de hidrógeno.

Estas sustancias —agua, amoniaco, metano y sulfuro de hidrógeno— son gases a temperaturas medias y altas, pero se vuelven líquidos y hasta sólidos a bajas temperaturas, sin necesidad de llegar a las que hacen falta para que el hidrógeno o el helio se vuelvan líquidos o sólidos.

De estas sustancias, la que antes se congela es el agua. Incluso en la Tierra las temperaturas pueden bajar lo suficiente para que se congele. Las otras sustancias no se congelan mientras no se alcancen temperaturas más bajas, pero una vez congeladas, su apariencia es semejante a la del hielo. Podemos referirnos a todas estas sustancias con el nombre de hielos. (Si queremos hacer referencia a la sustancia que nosotros denominamos generalmente hielo, podemos llamarlo hielo de agua.)

El silicio se combina mucho más fácilmente con el oxígeno que con el hidrógeno. El magnesio y el aluminio se combinan fácilmente con la combinación silicio-oxígeno, y estos cuatro elementos constituyen la base principal de los materiales rocosos (silicatos) que conocemos.

Finalmente, el hierro es el más común de los metales, y en algunos planetas, como la Tierra, tenemos grandes núcleos metálicos que son sobre todo de hierro.

Podemos agrupar los elementos más comunes de esta manera. En la tabla 28 están enumerados por clases.

Tabla 28. Sustancias de que se compone el sistema solar

Sustancia	Número de átomos	Masa relativa
	(Silicio = 10.000)	(Total = 100)
Gases	431.000.000	98,6
Hielos	300.000	1,0
Rocas	40.000	0,3
Metales	7.000	0,1

Los átomos de los metales y rocas se mantienen unidos por fuerzas químicas que son más poderosas que la gravedad —al menos en cuerpos pequeños cuya masa no sea superior a la de la Tierra. Y eso es cierto a cualquier temperatura hasta llegar a la incandescencia.

Por el contrario, los gases sólo están unidos a los cuerpos planetarios por la fuerza de la gravitación y por consiguiente su unión con el planeta es mucho menos firme. Si se calientan los hielos, se convierten en gases y también quedan unidos al planeta por la fuerza gravitatoria exclusivamente. Y lo que es más, cuanto más caliente es la superficie de un planeta, tanto más rápidamente se mueven los átomos y las combinaciones de átomos, y tanto más fácilmente salen del planeta hacia el espacio exterior, a pesar de la atracción gravitatoria.

Cuando se forman planetas en las proximidades del sol, la roca y el metal se mantienen unidos sin problemas. Un planeta compuesto de roca y metal puede llegar a formarse aun cuando su proximidad al sol sea tal que esté siempre a una temperatura incandescente. Pero en tal caso no puede ser muy grande, pues la

masa de roca y metal no pasa, en el mejor de los casos, de 1/250 de la masa de la nube original de la que se formó el sistema solar.

Estos cuerpos tan pequeños no llegan a tener un campo gravitatorio que sea suficiente para retener los gases y los hielos vaporizados, sobre todo si se tiene en cuenta que la proximidad del Sol los calienta y los hace más difíciles de retener. De Mercurio no se puede decir que lo tenga; Marte, un poco; la Tierra y Venus, un poco más.

En cambio, lejos del Sol los hielos son sólidos y glaciales y sus átomos y moléculas se mantienen unidos también por fuerzas químicas. Con los hielos, la masa de los planetas puede llegar a ser dos o tres veces mayor que la de los planetas compuestos únicamente de roca y metal. Con ello tendrían la atracción gravitatoria suficiente para captar con mayor eficiencia la materia que los rodea y seguir aumentando a expensas de los planetas más pequeños y cálidos, que en ese caso no llegan a ser todo lo grandes que podrían de no ser por la capacidad de crecimiento de los planetas mayores y más fríos.

Los grandes planetas podrían incluso captar la riquísima provisión de gases y retenerlos por la fuerza de la gravedad... lo cual los haría todavía mayores y les daría campos gravitatorios todavía más intensos... lo cual les permitiría retener los gases con una eficiencia aún mayor... lo cual los haría todavía mayores...

De esta manera, los planetas lejanos llegaron a convertirse en gigantes enormes, pero terminaron siendo en su mayor parte gases y hielos, cuya densidad es inferior a la de la roca y el metal. De hecho, Júpiter y Saturno son en gran parte hidrógeno, que es el de más baja densidad. Por esta razón, Júpiter y Saturno reciben en ocasiones el nombre de «gigantes gaseosos» y ésa es también la razón por la que su densidad es mucho más baja que la de los mundos de roca y metal del sistema solar interior.

La densidad de los gigantes gaseosos sería todavía menor si no fuera porque, al haberse convertido en planetas tan grandes y de tanta masa, su atracción gravitatoria comprimió y redujo los gases de que estaban compuestos mucho más fuertemente que si hubieran estado en la Tierra, haciéndolos así más densos. Sin embargo, incluso con la atracción de sus enormes gravedades, Júpiter y Saturno siguieron siendo bastante menos densos que la Tierra.

Así pues, es muy cierto que lo que nos parece ser la superficie de Júpiter o Saturno no es en absoluto el tipo de superficie sólida en que pensamos al hablar de los planetas interiores. Lo que vemos como una superficie no es más que la parte superior de una capa de nubes bajo la cual se extiende una atmósfera densa y espesa. Por razones de comodidad, en algunos casos nos referiremos a la «superficie» de Júpiter o de Saturno como si fuera sólida, igual que la superficie de la Tierra, en vez de la parte superior de una capa de nubes. Son estas nubes las que dan a Júpiter y Saturno sus altos albedos (véase tabla 15).

No es posible conocer los detalles de lo que hay por debajo de la capa de nubes si nos limitamos a examinar los gigantes gaseosos con un telescopio.

Un procedimiento más adecuado es estudiar la luz que irradian. La luz se compone de ondas diminutas de distintas longitudes. Estas ondas se pueden clasificar con un instrumento llamado espectroscopio. Como Júpiter y Saturno reflejan la luz del sol, en la luz de Júpiter y Saturno deben estar también presentes todas las longitudes de onda que se dan en la luz solar. Si falta alguna de ellas es porque ha sido absorbida por los materiales de las atmósferas de los planetas. Cada sustancia química absorbe unas longitudes de onda especiales y no otras, por lo que las longitudes que faltan son como «huellas dactilares» que indican la presencia de tales sustancias.

En 1932, el astrónomo alemán Rupert Wildt (1905-1976) detectó de esta manera la presencia de amoniaco y metano en las atmósferas de Júpiter y Saturno. Indudablemente estaban también presentes otros hielos, en forma gaseosa, líquida o sólida (o, lo más probable, en las tres). Por desgracia, el hidrógeno y el helio no absorben con fuerza la luz visible, por lo que no pudieron ser detectados; pero los astrónomos llegaron a la convicción, por otras razones, de que dichos gases estaban presentes.

El 3 de diciembre de 1973 el cohete-sonda Pioneer 10 pasó a sólo 135.000 kilómetros de la superficie de Júpiter, y el 2 de diciembre de 1974 el Pioneer 11 pasó a 42.000 kilómetros de la misma.

Por los datos recibidos, parece bastante seguro que Júpiter es una esfera de hidrógeno combinado con algo de helio. La superficie de nubes de Júpiter es muy fría, con una temperatura muy inferior al punto de congelación del agua; pero al ir

descendiendo por debajo de esa superficie la temperatura llega a ser muy elevada. En las capas superiores de Júpiter, donde las temperaturas son moderadas y hasta frías, hay agua, amoniaco, metano, sulfuro de hidrógeno y algunos compuestos más complejos de carbono, oxígeno, azufre, nitrógeno e hidrógeno, en pequeñas cantidades.

Las citadas sondas se dirigen ahora hacia Saturno y dentro de no mucho tiempo es posible que recibamos información sobre ese planeta. Pero mientras no llegue ese momento parece razonable suponer que la estructura de Saturno es parecida a la de Júpiter.

También Saturno es en su mayor parte hidrógeno, más un poco de helio. También debe tener hielos en sus capas superiores. Ambos planetas pueden tener núcleos de roca y metal en su mismo centro, pero, en ese caso, el de Saturno ha de ser mucho más pequeño y menos compacto que el de Júpiter, razón por la que Saturno tiene una densidad que es sólo la mitad de la de Júpiter.

## 3. Gravedad superficial

Como Saturno tiene un campo gravitatorio que es 95 veces más intenso que el de la Tierra, podrí amos esperar que Saturno atrajera a un objeto situado a cierta distancia con una fuerza 95 veces superior a la que ejerce la Tierra sobre ese mismo objeto situado a la misma distancia.

Pero un objeto situado en la «superficie» de Saturno no está a la misma distancia del centro del planeta que si estuviera apoyado en la superficie de la Tierra. La superficie de Saturno está mucho más alejada de su centro que la superficie de la Tierra del suyo.

Por esta razón, la «gravedad superficial» de Saturno no es 95 veces mayor que la de la Tierra. De hecho, el efecto debilitador de la mayor distancia reduce la gravedad superficial de Saturno a poco más que la gravedad de la Tierra (véase tabla 29).

Tabla 29. Gravedad superficial de los seis planetas

Planeta Gravedad superficial (Tierra = 1)

Mercurio 0,38

Venus	0,90
Tierra	1,00
Marte	0,38
Júpiter	2,68
Saturno	1,15

A pesar de esto, la gran masa de Saturno no se debe menospreciar ni siquiera en su superficie.

La fuerza de la gravedad es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia. En otras palabras, si se duplica la distancia a la Tierra, la atracción terrestre es sólo 1/2 X 1/2, ó 1/4 de su fuerza original. Si la distancia se multiplica por tres, la atracción de la Tierra será sólo 1/3 x 1/3, ó 1/9 de lo que era.

Un objeto situado en la superficie de Saturno está a 60.000 kilómetros de su centro. Si se colocara 6.370 kilómetros por encima de la superficie, no se habría doblado la distancia existente desde el centro, sólo habría aumentado un 10 por 100. La atracción gravitatoria de Saturno seguiría siendo 5/6 de la que había en la superficie.

Dicho de otro modo, la gravedad superficial de Saturno quizá no sea mucho mayor que la de la Tierra, pero la atracción gravitatoria disminuye mucho más lentamente al alejarse del planeta.

Si desde la superficie de un planeta arrojamos un objeto hacia arriba, éste asciende al principio a una determinada velocidad. Esta velocidad disminuye de forma constante como consecuencia de la atracción gravitatoria del planeta. Finalmente, la velocidad de ascenso se reduce a cero, y pasa a convertirse en velocidad de descenso. El objeto cae cada vez con mayor rapidez hasta volver de nuevo a la superficie del planeta.

Cuanto mayor sea la velocidad con que se arroje el objeto hacia arriba, más tiempo hará falta para que la velocidad de ascenso se reduzca a cero, y mayor será la altura alcanzada por el objeto antes de comenzar a caer.

Si la atracción gravitatoria del planeta fuera constante durante todo el trayecto de subida, por mucha velocidad acabaría siempre por reducirse a cero, y el objeto descendería, más tarde o más temprano.

Sin embargo, la atracción gravitatoria del planeta disminuye con la distancia al mismo. Si pudiéramos arrojar un objeto con la velocidad suficiente, la atracción gravitatoria del planeta, que disminuiría de forma constante a medida que el objeto se elevara, no conseguiría nunca reducir su velocidad a cero. De esta manera el objeto se iría alejando del planeta de forma ininterrumpida hasta lograr escapar. La velocidad inicial mínima para que esto sea posible es la «velocidad de escape», que desempeña un papel muy importante en el estudio y uso de los cohetes.

Si desde la superficie de Saturno disparáramos un cohete con una velocidad suficiente para que escapara de la Tierra, eso no bastaría para que pudiera escapar de Saturno. La atracción gravitatoria de Saturno disminuye con la distancia, pero disminuye mucho más lentamente que la de la Tierra. Por eso el cohete ha de tener mayor velocidad y debe alcanzar mayores alturas para aprovecharse del debilitamiento de la atracción de Saturno. La velocidad de escape de Saturno tiene que ser considerablemente superior a la de la Tierra (véase tabla 30).

Tabla 30. Velocidad de escape de los seis planetas

Planeta	km/s	Tierra = 1
Mercurio	4,3	0,38
Venus	10,3	0,92
Tierra	11,2	1,00
Marte	5,0	0,45
Júpiter	59,5	5,31
Saturno	35,6	3,18

## 4. El tamaño de los satélites

Cuando Huygens descubrió Titán, era éste el miembro más oscuro del sistema solar descubierto hasta la fecha. Era bastante más apagado que los satélites de Galileo (véase tabla 31), pero tampoco demasiado si uno tenía en cuenta su gran distancia. Mientras que los planetas parecían tener dimensiones radicalmente diferentes (compárese Júpiter y Mercurio), daba la impresión de que los primeros satélites descubiertos tenían un tamaño bastante parecido, por lo cual no causó sorpresa que

el tamaño de Titán no fuera demasiado diferente del de los demás satélites conocidos. Habría sido más sorprendente lo contrario.

Tabla 31. Brillo aparente de los seis satélites

Satélite	Magnitud (máxima)	Brillo aparente (Titán = 1)
Luna	-12,6	230.000.000,0
Ganímedes	4,9	22,9
lo	5,3	15,9
Europa	5,7	11,0
Calisto	6,1	7,6
Titán	8,3	1,0

Sin embargo, no fue fácil averiguar el tamaño de Titán. Ya había sido difícil determinar el tamaño de los satélites de Galileo, debido a su gran distancia y a la dificultad de medir su anchura, pues con aquellas distancias parecían diminutos hasta en los mejores telescopios. Y Titán estaba dos veces más lejos, por lo cual el diámetro de su imagen en cualquier telescopio sería sólo la mitad de los anteriores. Con el tiempo se lograron hacer cálculos estimativos del diámetro, que luego sufrirían correcciones. El 29 de marzo de 1974 la Luna pasó por delante de Saturno. Al hacerlo, interceptó también la luz de Titán. Los instrumentos modernos pudieron determinar con precisión cuándo comenzó a desaparecer la luz (el momento en que la Luna tocaba el lado próximo de Titán) y en qué momento la luz quedó reducida a cero (el momento en que la Luna tocó el lado opuesto de Titán y lo tapó por completo). Se sabía a qué velocidad se desplazaba la Luna, por lo cual se pudo determinar el tamaño aparente de Titán. Con este dato y con el de su distancia se pudo averiguar el tamaño real, que resultó ser unos 800 kilómetros mayor de lo que se pensaba.

En la tabla 32 se enumeran los diámetros de los seis satélites.

Tabla 32. Diámetros de los seis satélites.

Satélite	Kilómetros	Luna = 1

Titán	5.800	1,67
Ganímedes	5.520	1,50
Calisto	4.890	1,41
lo	3.636	1,05
Luna	3.476	1,00
Europa	3.060	0,88

Los resultados de las observaciones realizadas en 1974 dejaron en claro que Titán era el mayor de los seis satélites, lo cual daba a su nombre una precisión inesperada. La palabra «Titán» no es sólo el nombre del grupo de dioses presididos por Crono (Saturno), sino que ha llegado a significar también algo gigantesco, pues se suponía que los Titanes eran auténticos gigantes. Por eso resulta muy apropiado que el mayor de los satélites se llame Titán.

Esto lo apreciaremos mejor si en vez del diámetro de los satélites consideramos su volumen. El volumen de una esfera es proporcional al cubo del diámetro. Si una esfera tiene un diámetro que es doble del de otra, la primera tiene 2 x 2 x 2, u 8 veces el volumen de la segunda. Los volúmenes nos dan una imagen más exacta de las diferencias de tamaño que la basada sólo en los diámetros (véase tabla 33).

Como indican las cifras de la tabla 33, el volumen de Titán es 13/8 el de Ganímedes, el segundo en volumen.

Un dato curioso es que Mercurio, el menor de los planetas, tiene un diámetro de 4.890 kilómetros y tiene la misma anchura, y el mismo volumen, que el satélite Calisto. Lo cual quiere decir que hay dos satélites, Titán y Ganímedes, que son mayores que el planeta más pequeño. Titán tiene un diámetro 1,19 veces mayor que el de Mercurio, y un volumen 1,67 veces mayor.

Tabla 33. Volúmenes de los seis satélites

Satélite	Volumen, Luna = 1	Volumen, Mercurio = 1
Titán	4,65	1,67
Ganímedes	3,39	1,22
Calisto	2,78	1,00
lo	1,14	0,41

De Saturno a Pluton

Luna	1,00	0,36
Europa	0,68	0,24

Otro punto que conviene recordar es que, de los seis satélites, cuatro pertenecen a un mismo planeta, Júpiter. Titán es mayor que cualquiera de los satélites de Galileo; pero si sumamos los volúmenes de estos cuatro, comprobamos que el volumen total de los satélites de Júpiter es 1,7 veces mayor que el de Titán, y ocho veces mayor que el de la Luna.

Es justo señalar, sin embargo, que Júpiter es el mayor de los planetas, y que en el momento de su formación tuvo que haber en sus proximidades mayor cantidad de material con el que formar satélites. Quizá habría que considerar el volumen de cada satélite en relación con el planeta en torno al cual gira (véase tabla 34).

Se ve en seguida que, en comparación con su planeta, Titán es mucho más voluminoso que cualquiera de los satélites de Galileo, y hasta un poco mayor que todos ellos juntos. Pero Titán no puede vanagloriarse de su posición, pues se ve (quizá inesperadamente) empequeñecido por la Luna. En comparación con su planeta, la Luna es, con mucho, el mayor de los seis satélites.

Tabla 34. Volúmenes de los seis satélites en relación con sus planetas

Satélite	Volumen en millonésimas del volumen	
	del planeta al que pertenece	
Luna	20.435,0	
Titán	131,1	
Ganímedes	53,6	
Calisto	44,0	
lo	18,0	
Europa	10,6	

Podríamos preguntarnos cómo es que un planeta tan pequeño como la Tierra consiguió formar un satélite casi tan grande como cualquiera de los producidos durante la formación de gigantes como Júpiter y Saturno. De momento no hay

respuesta a la pregunta, y ésta es una de las varias razones por las que el origen de la Luna constituye un problema tan interesante, e intrigante, para los astrónomos.

Es cierto que el volumen puede prestarse a engaño en varios sentidos. Una pequeña cantidad de materia puede ensancharse y llegar a formar un gran volumen, y viceversa. En algunos aspectos, es más importante la masa.

Pero no es fácil medir la masa de un satélite. Es posible determinar la masa de un planeta partiendo de la distancia y movimiento de los satélites que lo rodean. En principio, se puede hacer lo mismo pero al revés, pues el planeta se mueve en respuesta al campo gravitatorio del satélite. Sin embargo, un planeta suele tener una masa tan superior a la de un satélite que es imposible detectar y medir los movimientos planetarios de esta naturaleza, ya que son insignificantes.

Por esta razón, la masa de un satélite debe medirse con otros métodos: por ejemplo, por la atracción que ejerce un satélite sobre otro. El balance es que, en la mayoría de los casos, la determinación de masas por este camino ha sido poco segura, menos en el caso de la Luna. En los últimos años, sin embargo, se ha mejorado en este campo. Por ejemplo, el paso del Pioneer 10 y del Pioneer 11 cerca de Júpiter ha suministrado cifras más fiables sobre la masa de los satélites de Galileo (véase tabla 35).

Tabla 35. Masas de los seis satélites

Satélite	Masa: Luna = 1	Masa: Mercurio = 1
Ganímedes	2,027	0,47
Titán	1,905	0,42
Calisto	1,448	0,32
lo	1,213	0,27
Luna	1,000	0,22
Europa	0,663	0,15

En lo que a masa se refiere, Titán pierde el primer puesto, Ganímedes tiene una masa mayor, a pesar de que su diámetro es ligeramente inferior. Obsérvese cómo Ganímedes y Titán son, por su masa, aproximadamente el doble que nuestra Luna.

Sin embargo, desde el punto de vista de la masa, Mercurio no queda por debajo de ninguno. Quizá haya tres satélites que se aproximen a su volumen o lo superen, pero ninguno de ellos tiene una masa tan considerable. La masa de Mercurio es 2,2 veces mayor que la de Ganímedes y 2,4 veces mayor que la de Titán.

La razón está en que Mercurio es un mundo de roca y metal, por lo cual es especialmente denso. De hecho, sólo hay en el sistema solar tres grandes mundos de roca y metal, que son Mercurio, Venus y la Tierra. Según nuestros conocimientos, ninguno de los satélites tiene núcleo metálico y por esta razón sus densidades son considerablemente inferiores a las de los tres planetas más densos (véase tabla 36).

Tabla 36. Densidades de los seis satélites

Satélite	Densidad: Tierra = 1	Densidad: Luna = 1
lo	0,642	1,06
Luna	0,605	1,00
Europa	0,585	0,97
Ganímedes	0,362	0,60
Calisto	0,315	0,52
Titán	0,253	0,42

Los satélites de Galileo van descendiendo en densidad según se van alejando de Júpiter. Io es un poco más denso que la Luna, Europa un poco menos. La densidad de Ganímedes es tres quimos la de la Luna, y la de Calisto sólo la mitad.

Es posible que Júpiter, durante su formación, tuviera una temperatura muy alta, de manera que los hielos situados a la distancia de los satélites de Galileo más próximos estuvieran en forma gaseosa y no pudieran ser atraídos por el material rocoso que estaba formando lo y Europa. Ganímedes y Calisto estaban a suficiente distancia de Júpiter como para que su temperatura fuera más baja y permitiera atraer los hielos. Como los hielos constituyen una parte más importante de la nube original que formó los cuerpos del sistema solar, Ganímedes y Calisto son mayores que los otros satélites más interiores.

La distancia entre Titán y Saturno es algo mayor que la de Ganímedes a Júpiter, y Saturno debió tener menos calor que Júpiter. Titán debió ser lo suficientemente frío como para captar una cantidad poco común de hielos, llegando a ser mayor y menos denso que cualquiera de los satélites de Galileo.

Conociendo la masa y el volumen de los satélites, podemos calcular la gravedad superficial de cada uno de ellos (véase tabla 37) y su velocidad de escape (véase tabla 38).

Tabla 37. Gravedad superficial de los seis satélites

Satélite	Tierra = 1	Luna = 1
lo	0,184	1,11
Luna	0,166	1,00
Europa	0,149	0,90
Ganímedes	0,146	0,88
Calisto	0,117	0,70
Titán	0,111	0,67

Tabla 38. Velocidad de escape de los seis satélites

Satélite	km/s	Tierra = 1
Ganímedes	2,75	0,25
lo	2,56	0,23
Calisto	2,38	0,21
Luna	2,38	0,21
Titán	2,25	0,20
Europa	2,09	0,19

La baja densidad de Titán explica que tenga la gravedad superficial más baja de los seis satélites. Su gravedad superficial es tal que una persona que en la Tierra pesara 72 kilogramos, en la Luna sólo pesaría 12 kilogramos y en Titán nada más que 8 kilogramos.

Como el diámetro influye en los cálculos de las velocidades de escape, Titán consigue no figurar en el lugar más bajo de la lista y supera a Europa, el más pequeño de los satélites de Galileo.

El tamaño de los seis satélites puede contemplarse desde otro ángulo diferente. ¿Cómo se vería de grande cada uno de ellos desde la superficie de su planeta (si consideramos la parte superior de la cubierta de nubes de Júpiter y Saturno como superficie en el sentido que tiene en la Tierra)? La respuesta está en la tabla 39.

Tabla 39. Tamaño de los seis satélites vistos desde sus planetas

Satélite	Diámetro aparente	Superficie aparente
	(minutos de arco)	(Luna = 1)
Luna	31,1	1,00
lo	29,4	0,90
Ganímedes	17,0	0,30
Titán	16,5	0,28
Europa	15,9	0,25
Calisto	8,6	0,076

Ninguno de los otros satélites parece tan grande en el cielo de su planeta como nuestra Luna, aunque lo se le aproxima. Y lo que es más, ninguno puede competir con ella en cuanto a brillo; como los otros satélites están mucho más lejos del Sol de lo que lo está la Luna, es mucho menos la luz que reciben y que pueden reflejar. Es posible, por ejemplo, que Titán tenga un albedo igual al de Calisto y, por tanto, dos veces mayor que el de la Luna. A pesar de esta doble capacidad de reflejar la luz en comparación con la Luna, si tenemos en cuenta que dista más del Sol y que parece más pequeño en el cielo de Saturno, resulta que Titán brillaría en el cielo de Saturno únicamente con 1/160 del brillo de la Luna en el nuestro. La magnitud de Titán en su momento de mayor brillo, tal como se ve en el cielo de Saturno, sería de -7,1, o unas 14,2 veces más brillante que Venus en nuestro cielo.

## 5. La atmósfera de Titán

Varios cuerpos del sistema solar tienen atmósfera, es decir, capas de gases adheridos a su superficie. Júpiter y Saturno tienen, como es natural, atmósferas enormes, pues están compuestos casi en su totalidad de materiales gaseosos, o de materiales que serían gaseosos si no estuvieran comprimidos por sus fuertes campos gravitatorios.

La Tierra también tiene atmósfera, como es bien sabido: está compuesta por un 78 por 100 de nitrógeno, 21 por 100 de oxígeno y 1 por 100 de argón. La cantidad de estos gases, y la compresión ejercida por el campo gravitatorio de la Tierra, son suficientes para producir una presión de 10.333 kilogramos por metro cuadrado de superficie.

Venus tiene también atmósfera: en su mayor parte es anhídrido carbónico y su densidad es unas noventa veces mayor que la de la Tierra.

Los cuerpos que tienen un cuerpo gravitatorio menor que los de la Tierra y Venus, o que son más calientes, o ambas cosas a la vez, tienen menos posibilidades de retener los gases, y por tanto poseen atmósferas más tenues.

Marte, por ejemplo, con una gravedad superficial de sólo 2/5 la de la Tierra, no tiene más que una atmósfera muy fina, con una presión de sólo 0,006 veces la de la Tierra y, al igual que la de Venus, compuesta en su mayor parte de anhídrido carbónico.

Mercurio tiene la misma gravedad superficial que Marte, pero es mucho más caliente. Como es más difícil retener los gases calientes, Mercurio no tiene una atmósfera apreciable. Tampoco la Luna, que es más fría que Mercurio, pero también más pequeña.

Los objetos rocosos o metálicos mucho más pequeños que la Luna no tendrían atmósfera a ninguna temperatura. Un cuerpo pequeño y frío formado por hielos podría ver cómo esos hielos se vaporizan si llegaran a calentarse de alguna manera. Entonces conseguiría tener atmósfera, pero no sería capaz de retenerla. Ningún cuerpo considerablemente menor que la Luna podría sujetar una atmósfera de forma permanente, suponiendo que se formara.

Pero ¿qué ocurre con los objetos tan grandes como la Luna o algo mayores, que están más lejos del Sol y por tanto son más fríos? ¿Qué decir de los grandes satélites de Júpiter y Saturno?

Los satélites galileanos de Júpiter no tienen atmósferas apreciables; pero el caso de Titán es distinto.

En 1944 el astrónomo holandés-americano Gerard Peter Kuiper (1905-1973) logró detectar una atmósfera innegable en torno a Titán y comprobó que estaba compuesta de metano. Y, lo que es más, la atmósfera parece ser importante, siendo muchas las posibilidades de que sea más densa que la de Marte.

Titán es el único de los satélites conocidos hasta ahora que tiene atmósfera; es el más pequeño de los cuerpos del sistema solar conocidos hasta ahora que la posee; y es el único cuerpo del sistema solar conocido hasta ahora que tiene una atmósfera compuesta en gran parte de metano. Esto hace que Titán sea singular en tres aspectos.

No hay todavía ninguna prueba clara de que en la atmósfera de Titán haya algo que no sea metano, pero es probable que haya un poco de hidrógeno así como algunas sustancias más complejas que el metano.

La molécula de metano consta de un átomo de carbono y cuatro átomos de hidrógeno y se representa normalmente con la fórmula  $CH_4$ . Los átomos de carbono pueden combinarse fácilmente entre sí, por lo que pueden formarse moléculas con dos o más átomos de carbono a los que se unen cantidades diversas de átomos de hidrógeno. Hay ciertos indicios de que en la atmósfera de Titán puedan estar presentes, en pequeñas cantidades, los gases etano  $(C_2H_6)$  y etileno  $(C_2H_4)$ .

Otros hidrocarburos más complicados (moléculas compuestas de átomos de carbono y de hidrógeno) pueden ser los responsables del hecho de que Titán parezca de color naranja. Es posible que toda su superficie sólida esté oculta por una nube de hidrocarburos de color naranja.

Los hidrocarburos con varios átomos de carbón se licúan con más facilidad que el metano, y podemos imaginar a Titán con un gran océano de hidrocarburo en su superficie. Podríamos llamarlo océano de gasolina, pues la gasolina se compone de hidrocarburos líquidos.

De momento no tenemos pruebas de ello, pero es una especulación interesante. Quizá las sondas que van ahora camino de Saturno puedan ofrecernos información que nos ayude a comprender a Titán algo mejor y nos permita entender el sentido de este mundo tan excepcional.

De hecho, cabe la posibilidad de que con el tiempo se envíe una sonda con destino a Titán. Debido a la existencia de atmósfera y a que la gravedad es escasa, se trata del mundo del sistema solar en que más fácil es aterrizar. Y si sus complicados hidrocarburos se han combinado con otros átomos, por ejemplo de nitrógeno, oxígeno, azufre y fósforo, es posible que existan en él formas de vida. Por supuesto que la probabilidad no es muy alta, pero sería interesante hacer una comprobación.

# Capítulo 5 Los satélites de Saturno

#### Contenido:

- 1. El descubrimiento de los satélites de Saturno
- 2. Las órbitas de los satélites de Saturno
- 3. El cielo de los satélites de Saturno
- 4. Dimensiones de los satélites de Saturno

#### 1. El descubrimiento de los satélites de Saturno

Cuando Huygens descubrió Titán en 1655, no pudo por menos de advertir que había seis planetas conocidos (Mercurio, Venus, la Tierra, Marte, Júpiter y Saturno) y seis satélites (la Luna, Io, Europa, Ganímedes, Calisto y Titán).

Aquello le pareció una circunstancia muy agradable, como se lo habría parecido a todo el que tuviera buen conocimiento de la Biblia. El Sol, con doce cuerpos más pequeños a su alrededor, podría parecerse a Jacob con sus doce hijos o a Jesús con los doce apóstoles. En cualquier caso, Huygens formuló en 1659 la opinión de que no se descubrirían ya más cuerpos celestes en el sistema solar.

Pero los científicos no deben conceder mucha importancia a la belleza de los números si no tienen otras pruebas que confirmen sus teorías. Aunque el propio Huygens no encontró nuevos cuerpos, Cassini (el astrónomo que había descubierto la separación entre los anillos de Saturno) localizó nada menos que otros cuatro satélites de Saturno antes de la muerte de Huygens. Cassini no les puso nombre, pero John Herschel, que había bautizado a Titán, dio también nombre a los satélites de Cassini.

El 25 de octubre de 1671 descubrió Cassini el primero de sus cuatro satélites. Estaba más lejos de Saturno que Titán, y recibió el nombre de Japeto que, en la mitología griega, era hermano de Crono (Saturno) y por tanto uno de los Titanes. Japeto era el padre de Prometeo, quien, según una leyenda, había hecho los primeros seres humanos.

El 23 de diciembre de 1672 Cassini encontró otro satélite, que estaba situado más cerca de Saturno que Titán y que fue denominado Rea. Rea era una de las Titánides, hermana y esposa de Crono y madre de Zeus (Júpiter).

El 21 de marzo de 1684 descubrió Cassini dos satélites más, que estaban todavía más cerca de Saturno que Rea. El más exterior de estos dos fue Dione, Titánide que, según la mitología griega, fue la madre de Afrodita (Venus). El más interior fue llamado Tetis, otra de las Titánides, y antigua diosa del mar.

Como consecuencia de los descubrimientos de Cassini, los satélites conocidos de Saturno eran cinco, mientras que los de Júpiter seguían siendo los cuatro descubiertos por Galileo tres cuartos de siglo antes. El margen de superioridad de Saturno se amplió en agosto y septiembre de 1789 cuando William Herschel (padre de John Herschel) descubrió otros dos satélites, más próximos a Saturno que cualquiera de los otros, llegándose así a un total de siete.

Estos nuevos satélites no recibieron nombre de Titanes o Titánides, sino de otros enemigos de Zeus. Tras la derrota de Crono (Saturno) y sus Titanes, la mitología griega habla de una nueva generación de seres gigantescos que lucharon contra Zeus (Júpiter). También ellos fueron derrotados. Entre los jefes de estos gigantes estaban Mimas y Encélado, cuyos nombres se pusieron a los dos nuevos satélites.

Más adelante, el 16 de octubre de 1848, W. C. Bond (el descubridor del anillo C) detectó otro satélite de Saturno, éste situado entre Titán y Japeto. Recibió el nombre de Hiperión, nombre de otro de los Titanes —el padre de Helios, el dios-sol. Eso significaba que había no menos de ocho satélites conocidos de Saturno, el doble de los que giraban alrededor de Júpiter, que seguía con sólo cuatro.

En 1877, año en que se descubrieron dos diminutos satélites que daban vueltas alrededor de Marte, se volvió a producir otra situación interesante, en lo que a los números se refiere.

Mercurio y Venus no tenían satélites; la Tierra tenía uno; Marte dos; Júpiter cuatro; Saturno ocho. La cosa estaba clara. Partiendo de la Tierra hacia afuera, cada planeta tenía el doble de satélites que el anterior.

Esta distribución tan pulcra quedó estropeada el 9 de septiembre de 1892, cuando el astrónomo americano Edward Emerson Barnard (1857-1923) descubrió un quinto satélite de Júpiter, más cerca del planeta que los de Galileo, y bastante más

pequeño que cualquiera de éstos (razón por la que había costado tanto tiempo descubrirlo, sobre todo si se tiene en cuenta que estaba muy cerca del brillo cegador de Júpiter).

El 16 de agosto de 1898 el astrónomo americano William Henry Pickering (1858-1938) descubrió un noveno satélite de Saturno, más lejano que cualquiera de los anteriores. Lo llamó Febe, otra de las Titánides, hermanas de Crono (Saturno).

Febe fue el primer satélite descubierto por métodos fotográficos, y el quinto de Júpiter fue el último que se descubrió ocularmente.

El tanteo de satélites era ahora de nueve para Saturno y cinco para Júpiter.

El uso de telescopios cada vez más perfectos y de técnicas fotográficas cada vez más avanzadas permitió detectar satélites muy pequeños que giraban en torno a Júpiter a distancias mucho mayores que las de los satélites de Galileo. Para el año 1914 se habían descubierto ya cuatro de estos pequeños satélites exteriores de Júpiter, y el tanteo de satélites era de empate a nueve entre Júpiter y Saturno.

En Saturno no se descubrió ningún nuevo satélite. Aun suponiendo que existieran, Saturno está dos veces más lejos de nosotros que Júpiter, y por tanto es mucho más difícil detectar cuerpos pequeños próximos a Saturno que si estuvieran cerca de Júpiter.

En 1938 se descubrieron dos nuevos satélites de Júpiter, y en 1951 otro más, con lo que Júpiter se ponía en cabeza, con un 12 a 9.

En diciembre de 1967 el astrónomo francés Audouin Dollfus localizó un décimo satélite de Saturno. Estaba todavía más cerca de Saturno que Mimas, y giraba alrededor de Saturno muy cerca del borde exterior de los anillos. De hecho, la razón por la que no se había visto durante los casi dos siglos que llevaba descubierto Mimas había sido que el brillo de los anillos lo había enmascarado. La oportunidad de detectar este satélite sólo se presentaba una vez cada quince años, cuando los anillos se veían de canto y desaparecían. Uno de los períodos de desaparición del anillo fue el mes de diciembre de 1967, y Dollfus consiguió localizar el satélite en esas fechas.

Dio al nuevo satélite el nombre de Jano, que según la mitología no era ni Titán ni Titánide. Es más, no era ninguno de los dioses griegos; era un dios romano que no tenía equivalente griego. Jano era el dios romano de las puertas de las casas y

ciudades. Por eso se le considera dios de las entradas y salidas, de los comienzos y de los finales, y el primer mes del año, que significa su comienzo y punto de entrada, recibe el nombre de «Ianuarius» o enero.

Dollfus explicó que el nuevo satélite era el primero de los diez en orden de distancia a Saturno y el último de los diez en cuanto a la fecha de su descubrimiento, por lo que parecía oportuno darle el nombre del dios de los comienzos y finales.

Desde 1967 hasta ahora (1979) no se han descubierto nuevos satélites de Saturno. En cambio se ha descubierto uno, y quizá dos, de Júpiter. El tanteo favorece a Júpiter por trece (o quizá catorce) a diez<sup>1</sup>.

En la tabla 40 se indican los diez satélites de Saturno. Están en orden de menor a mayor distancia con relación a Saturno, y se señala el año de su descubrimiento y el nombre del descubridor.

Tabla 40. Satélites de Saturno

Satélite	Año de descubrimiento	Descubridor
Jano	1967	Dollfus
Mimas	1789	Herschel
Encélado	1789	Herschel
Tetis	1684	Cassini
Dione	1684	Cassini
Rea	1672	Cassini
Titán	1655	Huygens
Hiperión	1848	Bond
Japeto	1671	Cassini
Febe	1898	Pickering

#### 2. Las órbitas de los satélites de Saturno

Como conocemos la distancia que nos separa de Saturno, es fácil calcular la distancia real que existe entre cada satélite y aquél, partiendo de la distancia aparente del satélite al planeta. En las cifras de la tabla 41 se incluyen los anillos.

\_

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> En 1983 eran ya 15 los satélites de Júpiter descubiertos, y 23 los de Saturno, aunque varios de ellos aún no están confirmados. (N. del E.)

En los satélites que van de los anillos a Rea se observa una distancia cada vez mayor pero sin grandes saltos. En cambio hay una distancia desproporcionada entre Rea y Titán, así como entre Hiperión y Japeto, y entre Japeto y Febe. Por eso es muy difícil presentar en un solo diagrama a escala todo el sistema de satélites de Saturno. Si el diagrama es lo suficientemente reducido como para que quepan los satélites más exteriores, es difícil dibujar con claridad los satélites más interiores junto con sus órbitas. De ahí que hayamos representado el sistema en tres diagramas distintos (figuras 10, 11 y 12).

Tabla 41. Distancia de los satélites de Saturno

Satélite	Al centro de	Radio de
	Saturno km	Saturno = 1
Anillo (borde interior)	76.800	1,28
Anillo (borde exterior)	136.450	2,00
Jano	159.000	2,65
Mimas	186.000	3,09
Encélado	238.000	3,96
Tetis	295.000	4,91
Dione	377.000	6,27
Rea	527.000	8,77
Titán	1.222.000	20,33
Hiperión	1.483.000	24,68
Japeto	3.550.000	59,06
Febe	12.950.000	215,50

Febe gira en torno a Saturno a una distancia gigantesca, treinta y cuatro veces mayor que la distancia entre la Luna y la Tierra, pero a pesar de ello no ostenta el récord dentro del sistema solar.

Uno de los satélites de Júpiter, el descubierto en noveno lugar y por tanto conocido como J-IX, es el más alejado del planeta al que rodea: 23.600.000. J-IX está 1,8 veces más lejos de Júpiter que Febe lo está de Saturno.

Naturalmente, cuanto más lejos está un satélite de su planeta, más largo es el período de revolución (véase tabla 42).

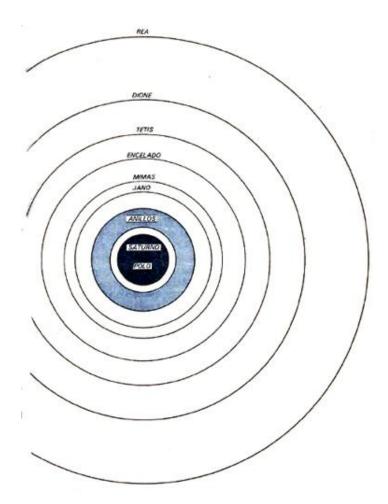


Figura 10. Orbitas de los satélites interiores de Saturno.

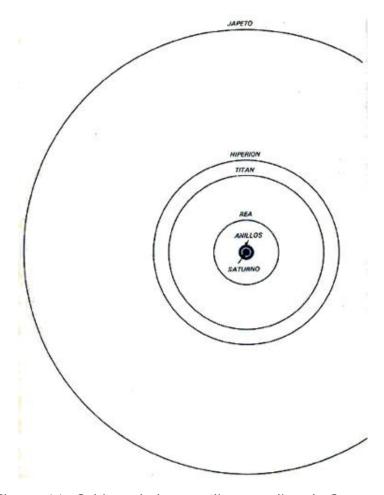


Figura 11. Orbitas de los satélites medios de Saturno.

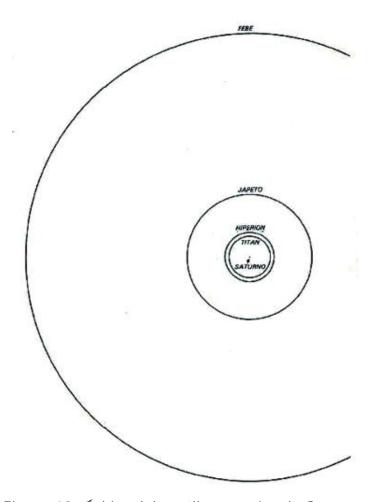


Figura 12. Órbita del satélite exterior de Saturno.

Tabla 42. Período de revolución de los satélites de Saturno.

Satélite	Período de	revolución	Velocidad orbital
	Horas	Días	km/s
Anillo (borde interior)	6,05	0,252	22,2
Anillo (borde exterior)	14,26	0,594	16,7
Jano	17,98	0,749	15,5
Mimas	22,61	0,942	14,4
Encélado	32,88	1,370	12,6
Tetis	45,31	1,880	11,3
Dione	65,69	2,737	10,0
Rea	106,00	4,418	8,7
Titán		15,945	5,6
Hiperión		21,277	5,1
Japeto		79,331	3,3
Febe		550,330	1,7

Si nos fijamos en el más interior de los satélites de Saturno, Jano, vemos que da la vuelta al planeta en sólo unas 18 horas. Se trata de un período de revolución extraordinariamente breve. Mercurio, el planeta más próximo al Sol, tarda 88 días en realizar su revolución, y la Luna necesita 27,3 días para dar su vuelta a la Tierra. Pero no es Jano el que ostenta el récord. El satélite más próximo a Júpiter, Amaltea, descubierto por Barnard, termina su revolución en 10 horas; y Fobos, que es el satélite interior de Marte, lo hace en 7 2/3 horas.

Sin embargo, las partículas de los anillos de Saturno giran individualmente en torno a éste, y cuanto más cerca están más corta es su órbita y menos tardan en dar la vuelta al planeta. En el borde más interior de los anillos, las partículas tardan unas 6 horas en realizar su revolución. Este es el período de revolución más rápido de los conocidos en el sistema solar.

Los ocho satélites interiores de Saturno tienen un período de revolución más breve que el de nuestra Luna. Japeto, sin embargo, tarda casi tres veces más en dar la

vuelta a Saturno que la Luna en hacerlo a la Tierra. Febe tarda veinte veces más, dando un giro completo en torno a. Saturno cada 1,5 años.

Tampoco esto es un récord. Los cuatro satélites más exteriores de Júpiter tardan todos ellos un tiempo mayor en dar la vuelta a éste. El récord de los satélites de Júpiter (y de todos los satélites conocidos por el momento) lo vuelve a tener J-IX que da una vuelta a Júpiter cada 2,08 años.

La velocidad orbital de los satélites es índice del enorme campo gravitatorio de Saturno. Hasta el distante Febe se ve lanzado alrededor de Saturno a una velocidad mayor de la que la Tierra es capaz de imprimir a la Luna. La velocidad orbital de la Luna es, por término medio, de sólo 1,02 kilómetros por segundo.

Cuando se forma un planeta y el material de los alrededores del mismo se integra para formar satélites, éstos tienen tendencias a formarse en el plano del ecuador del planeta, y a girar en torno a él casi en círculos.

Si, por alguna razón, un satélite comienza a girar con cierto desvío, con su órbita algo alejada del ecuador del planeta o con una órbita que no sea enteramente circular, las fuerzas de marea tienden a enderezarlo. Cuanto más cerca está un satélite de su planeta, más eficaces resultan las fuerzas de marea para hacer que su órbita sea ecuatorial y circular.

Los anillos de Saturno, por ejemplo, están exactamente en el plano del ecuador de Saturno y son perfectamente circulares. En cuanto a las órbitas de los satélites mismos, su excentricidad indica la medida en que son más elípticos que circulares (véase tabla 43).

Los satélites más interiores tienen órbitas que son casi perfectamente circulares. Sólo Hiperión y Febe tienen órbitas que son más elípticas que la de la Luna, y la de Febe es la más elíptica, lo que no es de extrañar dado que es la más exterior.

Tabla 43. Excentricidad orbital de los satélites de Saturno

Satélite	Excentricidad
Jano	0,000
Mimas	0,020
Encélado	0,004

Tetis	0,000
Dione	0,002
Rea	0,001
Titán	0,029
Hiperión	0,104
Japeto	0,028
Febe	0,163

Debido a la excentricidad de su órbita, Febe llega a aproximarse a Saturno hasta 10.830.000 kilómetros en un extremo de su órbita, para alejarse en el extremo contrario hasta los 15.060.000 kilómetros (véase figura 13).

Febe no consigue establecer un récord ni siquiera cuando está en su punto más distante. Ni aun entonces llega a la distancia media entre Júpiter y cualquiera de los satélites exteriores de ese planeta gigante.

Tenemos, por ejemplo, J-VIII, cuya distancia media de Júpiter es sólo un poco menor que la de J-IX, pero que en cambio tiene una gran excentricidad de 0,40. Esto significa que, en un extremo de su órbita, J-VIII se aproxima a Júpiter, llegando a sólo 14.100.000 kilómetros. Sin embargo, en el extremo contrario de la órbita se sitúa a una distancia de 32.900.000 kilómetros, más del doble de la distancia máxima de Febe a Saturno. Ningún otro satélite del sistema solar se aleja tanto de su planeta como J-VIII.

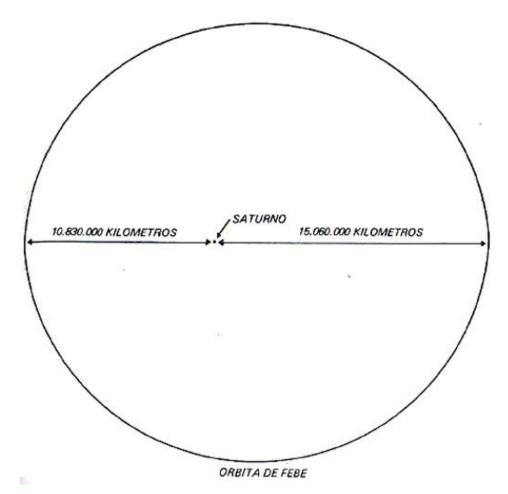


Figura 13. Saturno y Febe.

Cuando el satélite J-VIII está en el punto de máxima lejanía de Júpiter, se está moviendo en su órbita a una velocidad de sólo 1,91 kilómetros por segundo. Pero ninguno de los dos se mueve tan despacio como nuestra propia Luna, ni siquiera cuando más lejos están del planeta y su velocidad se reduce al mínimo.

Pero ¿qué ocurre con la inclinación orbital? Para estudiarla, debemos tener en cuenta la dirección en que un satélite gira en torno a su planeta.

Imaginémonos que estamos situados muy por encima del polo norte de un planeta, por ejemplo la Tierra. Si desde esta posición bajamos la vista hacia la Tierra, ésta gira en sentido contrario a las manecillas del reloj. La Luna gira alrededor de la Tierra en la misma dirección. La rotación de la Tierra y la revolución de la Luna alrededor de la Tierra son ejemplos de «movimiento directo».

Si desde esa misma posición, elevada por encima del polo de la Tierra, observáramos que un planeta gira sobre su eje en el mismo sentido que las manecillas del reloj, o que un satélite da vueltas al planeta en el mismo sentido, estaríamos ante un ejemplo de «movimiento retrógrado» (de las palabras latinas que significan «pasos hacia atrás»).

Casi todos los movimientos del sistema solar son casos de movimiento directo, lo cual tiene sentido. Cuando se estaba formando el sistema solar, la nube original de polvo y gas debió girar de esta manera, y por eso todas las partes siguen girando igual.

Imaginemos ahora un satélite que gira en torno a su planeta con un movimiento directo, pero con su plano de revolución cada vez más inclinado en relación con el ecuador del planeta. Con el tiempo, cuando su inclinación llegue a los 90 grados, se mueve en un plano que está en ángulo recto con el plano del ecuador. Cuando la inclinación llega a formar un ángulo de 180 grados, el plano de revolución está otra vez en el plano ecuatorial, pero ahora el satélite está moviéndose en dirección retrógrada (véase figura 14).

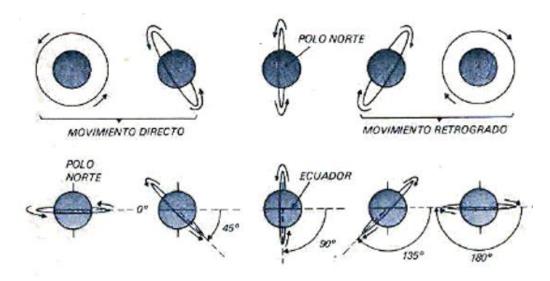


Figura 14. Inclinaciones de las órbitas.

Esto significa que cualquier satélite cuyo plano orbital esté inclinado menos de 90 grados respecto al plano ecuatorial de su planeta puede decirse que realiza un

movimiento directo. Si el plano orbital tiene una inclinación de 90 a 180 grados respecto al plano ecuatorial, puede decirse que realiza un movimiento retrógrado.

Tabla 44. Inclinación orbital de los satélites de Saturno

Satélite	Inclinación orbital (grados)
Anillos	0,00
Jano	0,00
Mimas	1,52
Encélado	0,02
Tetis	1,09
Dione	0,02
Rea	0,35
Titán	0,33
Hiperión	0,50
Japeto	15,00
Febe	150,00

Veamos ahora la inclinación orbital de los satélites de Saturno (véase tabla 44). Como indican las cifras, los anillos y los siete satélites más interiores casi no presentan inclinación ninguna respecto al plano ecuatorial de Saturno ni al plano de los anillos. No ocurre lo mismo con los dos satélites exteriores. Japeto tiene una órbita cuyo plano está inclinado 15 grados respecto al plano de Saturno, mientras que la inclinación orbital de Febe es de nada menos que 150 grados (véase figura 15). El movimiento de Febe alrededor de Saturno es retrógrado, siendo el único de sus satélites en que ocurre esto.

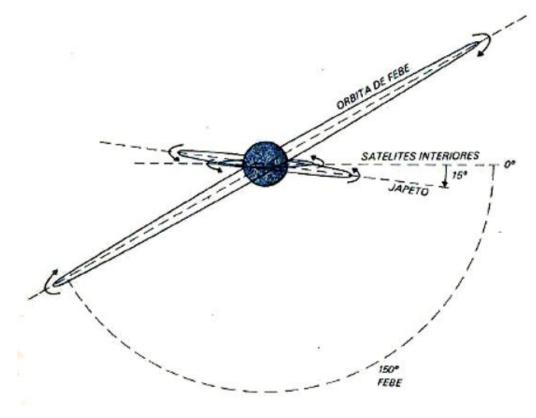


Figura 15. Febe, el satélite retrógrado.

Pero Febe no es una excepción. Los cuatro satélites exteriores de Júpiter realizan su revolución en torno a Júpiter con movimientos retrógrados. La inclinación orbital de dos de ellos es todavía mayor que la de Febe: la del J-IX es de 156 grados y la del J-XI de 163.

¿Por qué Febe y los satélites exteriores de Júpiter giran de forma retrógrada? ¿No formaron parte de las nubes originales de polvo y gas que se aglutinaron para formar los planetas y sus satélites? Y si dicha nube giraba con movimiento directo, razón por la cual el planeta y todos los satélites interiores se mueven en ese sentido, ¿por qué estos satélites exteriores circulan en sentido contrario en una calle de dirección única?

Los astrónomos sospechan que Febe no formó parte de la nube original de polvo y gas que se integró para formar Saturno y sus otros satélites. Quizá fuese Febe un cuerpo pequeño que realizaba una órbita independiente alrededor del Sol. En algún momento, esta órbita lo aproximó demasiado a Saturno, mucho después de que estuvieran formados el planeta y sus satélites. Quizá se aproximara en unas

condiciones que hicieron que quedara atrapado en el campo gravitatorio de Saturno y que pasara a una nueva órbita en torno a él.

Los astrónomos han calculado la probabilidad de esta captura (no muy alta, en realidad) y se ha visto que es tanto mayor si el objeto puede emprender una órbita retrógrada. Así pues, es muy probable que Febe y todos los satélites pequeños y alejados de Júpiter sean objetos capturados.

#### 3. El cielo de los satélites de Saturno

Visto desde cualquiera de sus satélites, Saturno debe ofrecer un panorama impresionante. En la tabla 45 se indica el tamaño de Saturno visto desde cada uno de sus satélites.

Desde cualquiera de los satélites, el gigantesco Saturno es el objeto más grande del ciclo, mucho mayor que el Sol. Desde el distante Febe, el más alejado de los satélites, Saturno parece a simple vista exactamente del mismo tamaño que la Luna vista desde la Tierra. Desde los satélites interiores, lógicamente, Saturno se ve mayor que nuestra Luna. Desde Jano, su abrumadora presencia ocupa 41,4 grados del ciclo. Si el extremo inferior de Saturno, visto desde Jano, estuviera tocando el horizonte, el extremo superior estaría casi a mitad de camino hacia el cénit, y su círculo tendría una superficie 6.390 veces superior a la de la Luna tal como la vemos desde la Tierra.

Dado que Saturno está 9,5 veces más lejos del Sol que la Luna, recibe sólo 1/90 de la luz por unidad de área. Por otra parte, Saturno refleja una proporción de la luz recibida que es siete veces superior a la de la Luna. Combinando estos dos datos, resulta que una superficie determinada del disco de Saturno, visto desde un satélite, tiene un resplandor que es sólo 1/13 de la luz de una superficie igual de la Luna vista desde la Tierra. En consecuencia, cuando está totalmente iluminado, Saturno envía a Jano sólo 492 veces más luz que la Luna a la Tierra.

No es éste el récord entre los satélites. Desde el satélite más interior de Júpiter, Amaltea, el planeta tiene una anchura aparente de 46 grados y brilla con una luz que puede equivaler, en algunos momentos, a 1.200 veces la de la Luna llena. Desde el satélite interior de Marte, éste parece ligeramente más pequeño que Saturno visto desde Jano, pero Marte está mucho más cerca del Sol, y tiene una luz

más intensa que Júpiter o Saturno, pudiendo enviar a su satélite interior 5.700 veces más luz que la Luna a nosotros.

Tabla 45. Tamaño de Saturno visto desde sus satélites

Satélite	Anchura	Superficie	Brillo
	(grados)	(nuestra Luna=1)	(nuestra Luna=1)
Jano	41,4	6.390	492
Mimas	35,8	4.780	368
Encelado	28,3	2.990	230
Tetis	23,0	1.970	152
Dione	18,1	1.220	94
Rea	13,0	630	48,5
Titán	5,64	118	9,1
Hiperión	4,63	80	6,2
Japeto	1,93	13,9	1,1
Febe	0,52	1,00	0,08

Supongamos que estuviéramos situados en una partícula del borde interior de los anillos de Saturno, dando una vuelta al planeta cada seis horas. Desde este punto de observación Saturno tendría una anchura de 76,1 grados, y ocuparía una sexta parte de todo el cielo. Tendría una superficie 21.600 veces mayor que la de la Luna, tal como la vemos nosotros, y brillaría con una luz 1700 veces mayor que la de nuestra Luna llena. Así pues, aventajaría a Júpiter visto desde Amaltea, tanto en tamaño como en brillo; y a Marte visto desde Fobos en cuanto a tamaño, pero no en brillo.

Como, según todas las probabilidades, los satélites de Saturno (con la posible excepción de Febe) presentan siempre la misma cara al planeta al girar a su alrededor (lo mismo que hace la Luna con respecto a nosotros), Saturno aparece fijo en la posición que tiene en su cielo. Desde un hemisferio del satélite, Saturno está siempre en el cielo, dependiendo su posición exacta del punto del hemisferio en que se esté. Desde el otro hemisferio, Saturno no aparece nunca en el cielo, lo mismo que la Tierra no se ve nunca desde el lado opuesto de la Luna.

Desde cada uno de los satélites, el Sol parece dar la vuelta al cielo una vez por cada revolución alrededor de Saturno, por lo que el período de revolución es también el del día del satélite. En Jano, el Sol va de la aurora al crepúsculo en sólo siete horas y media, y en Japeto parece quedarse 1 tranquilamente en el cielo, tardando unos cuarenta días terrestres en pasar del amanecer al ocaso.

Aunque el Sol queda tan empequeñecido por la distancia que desde Saturno no parece realmente un disco, sigue brillando con una luz que es 5.200 veces más intensa que la de nuestra Luna llena. Eso significa que incluso desde las partículas más interiores de los anillos la luz recibida del Sol es tres veces mayor que la recibida de Saturno, a quien la proximidad hace parecer inmenso.

Naturalmente, si estamos en el hemisferio de un satélite desde el que no se ve nunca a Saturno, el Sol no tiene rival en el momento en que atraviesa el cielo. Si estamos en el hemisferio desde el que se ve Saturno, el planeta está en su fase llena cuando el Sol está en la otra cara del satélite y en ese momento Saturno tampoco tiene rival.

Cuando sale el Sol, Saturno sólo está iluminado a medias, y cuanto más sube el Sol en el cielo, menos iluminado está Saturno.

Desde los satélites más próximos —Jano, Mimas y Encélado— el Sol queda eclipsado por Saturno tantas veces cuantas atraviesa el cielo. Durante el eclipse es la cara contraria de Saturno la que recibe el Sol, por lo que desde el satélite vemos a Saturno como un círculo oscuro en el cielo únicamente visible porque oscurece a las estrellas que hay tras él. La luz solar, difundida por la atmósfera superior por todos los lados de Saturno, producirá una iluminación pálida, un anillo de luz en el cielo que señalará también la posición de Saturno.

Como el eje de Saturno (y las órbitas de los satélites interiores) tiene una inclinación de 26 grados en relación con su plano de revolución alrededor del Sol, éste cruza el cielo del satélite a alturas diferentes, según cuál sea la posición de Saturno en su órbita. Cuando el Sol pasa por detrás de Saturno de manera que atraviese el máximo de su anchura el eclipse es más largo y el anillo de luz es igualmente brillante a todo su alrededor en la mitad del eclipse. Cuando el Sol pasa por detrás de Saturno, por encima o por debajo de su centro, el eclipse es de menor duración y el cerco de luz siempre es desigual.

De Tetis hacia afuera, Saturno parece lo suficientemente pequeño como para que el Sol cruce a veces el cielo sin llegar a coincidir con el planeta, con lo cual no se produciría eclipse. En Titán, por ejemplo, el Sol cruza el cielo veintitrés veces cada año terrestre, y sólo se produce eclipse en cuatro o cinco de estas ocasiones.

Desde cualquiera de los satélites se ven en el cielo uno o varios de los demás satélites, y de todos ellos el más visible es Titán, pues sigue siendo el mayor y más brillante de los satélites de Saturno. Hiperión es el satélite que más se aproxima a Titán, y cuando ambos están en línea recta con Saturno su distancia es de sólo 261.000 kilómetros. En ese momento, Titán visto desde Hiperión, tiene un diámetro de 1,27 grados y una superficie seis veces mayor que la de la Luna Ilena vista desde la Tierra.

Con la débil luz del sistema saturnino, Titán sólo enviaría a Hiperión la mitad de la luz que nos envía a nosotros la Luna, pero a pesar de todo seguiría brillando con una maravillosa luz de color naranja.

Si estuviéramos situados en el hemisferio de Hiperión que mira hacia Saturno, Titán parecería mayor en el momento en que se situara entre Hiperión y Saturno. Esto ocurriría cada 63,7 días. Entonces la anchura aparente de Titán sería casi un tercio de la de Saturno vista desde Hiperión. Al pasar Titán ante Saturno, ambos cuerpos estarían siempre en la misma fase y sería posible ver el paso en distintas formas — los dos en fase Ilena, o en cuarto, o en fase nueva, o algo intermedio.

No habría ninguna combinación más impresionante satélite-Saturno desde ningún otro punto de observación del sistema de Saturno, y si pudiéramos imaginarnos los satélites como lugares de turismo, Titán sería el mayor gancho turístico de Hiperión, lo mismo que Saturno lo sería de Jano.

Sin embargo la principal atracción de todas sería invisible desde ocho de los satélites. De Jano a Hiperión los satélites giran en un plano que no se diferencia mucho del de los anillos. Eso significa que desde dichos satélites los anillos aparecerán siempre de canto. Lo único que se verá de ellos, en el mejor de los casos, es una estrecha línea brillante que cruza Saturno y se extiende hacia afuera a ambos lados. Y esto mismo sería algo excepcional.

Ahora bien, Japeto gira en un plano que tiene una inclinación de 15 grados en relación con el de los anillos. Esto quiere decir que si observáramos Saturno durante

una sola revolución de Japeto, primero veríamos los anillos, por ejemplo, en la fase invisible cuando Japeto cruza el plano ecuatorial de Saturno. Al tiempo que Japeto fuera elevándose sobre el plano de Saturno iríamos viendo una parte cada vez mayor de la superficie de los anillos. El observador situado en Japeto tendría la impresión de que Saturno y sus anillos se iban inclinando poco a poco hacia abajo. Se llegaría finalmente a un máximo en esa inclinación descendente. Saturno y sus anillos comenzarían a levantarse de nuevo hasta la desaparición de los anillos. Reaparecerían luego, pero esta vez los veríamos por el lado inferior. Se vuelve a llegar a un máximo y entonces Saturno se endereza por segunda vez, una vez terminada la revolución de Japeto. El proceso se repite una y otra vez.

Esto es exactamente lo que ocurre cuando se ven desde la Tierra Saturno y sus anillos. En la Tierra el ciclo completo tarda treinta años, pero en Japeto transcurre en sólo ocho días. Además, desde la Tierra es un espectáculo que se ve sólo con un buen telescopio, mientras que en Japeto sería visible sin necesidad de ningún aparato, pues Saturno sería tan brillante como la Luna vista desde la Tierra, con la diferencia de que sería catorce veces mayor por su tamaño.

Dado que los anillos reflejan más luz que el mismo Saturno, éste brillaría más en el cielo al irse inclinando y su máximo brillo coincidiría con su máxima inclinación. Naturalmente, según cuál sea la posición del Sol en el cielo, unas zonas del sistema anular estarían recibiendo la luz del Sol y otras dentro de la sombra nocturna de Saturno. Tiene que resultar sumamente espectacular la visión de Saturno creciente, con los anillos penetrando algo en la parte oscura de la esfera antes de ser cortados por la sombra nocturna. No cabe duda de que Japeto explotaría los anillos como atracción turística.

El único sentido en que la visión desde Japeto es inferior a la que se tiene desde la Tierra es que, visto desde nuestro planeta, Saturno se inclina el doble hacia abajo y hacia arriba, en su momento de mayor inclinación, que cuando se ve desde Japeto. Desde Febe la inclinación de Saturno y sus anillos es mayor que desde Japeto e incluso un poco mayor que desde la Tierra. Sin embargo, desde Febe, Saturno y sus anillos son bastante más pequeños que vistos desde Japeto —no mayores que la Luna para nosotros. Además, la velocidad del movimiento de inclinación hacia adelante y hacia atrás es más lenta, por lo que la inclinación máxima en Febe (que

coincidiría, probablemente, con la temporada alta de turismo) se produce cada 270 días, mientras que en Japeto se da cada 40 días.

El hablar de los satélites de Saturno como atracciones turísticas es, evidentemente, ciencia-ficción y no debe tomarse al pie de la letra (al menos por ahora). Sin embargo, en relación con el turismo es más fácil hablar de los satélites de Saturno que de los de Júpiter.

Saturno está dos veces más lejos de nosotros que Júpiter, pero es posible que sea menos peligroso. Sabemos que Júpiter tiene un campo magnético enorme que atrae a las partículas cargadas. Los grandes satélites de Júpiter giran por este campo magnético y es posible que las naves espaciales tripuladas por hombres no puedan acercarse a ellos debido al peligro de la radiación.

Por ahora no conocemos la naturaleza del campo magnético de Saturno. Es muy probable que lo tenga, pero debe ser menos intenso que el de Júpiter, pues la masa de Saturno es menor y gira un poco más lentamente. Además Saturno está el doble de lejos del Sol que Júpiter y es precisamente el Sol la fuente de partículas cargadas.

Por eso es posible que la proximidad de Saturno ofrezca menos peligros, desde el punto de vista de la radiación, que la de Júpiter. Además, el campo gravitatorio de Saturno es menos intenso y por tanto menos peligroso que el de Júpiter. Por ambas razones es de suponer que los seres humanos puedan acercarse a los principales satélites de Saturno antes de intentarlo con los de Júpiter.

#### 4. Dimensiones de los satélites de Saturno

El orden en que se descubrieron los satélites de Saturno se corresponde más o menos con el de su brillo aparente. Como es lógico, cuanto más brillantes son más fácil es verlos y, por tanto, descubrirlos. El otro punto a tener en cuenta es que si dos satélites tienen el mismo brillo, es probable que se descubra antes el que esté más lejos de Saturno, pues es menos probable que su luz quede oscurecida por el brillo mayor de Saturno (véase tabla 46).

Tan pronto como Cassini descubrió el segundo de los satélites de Saturno, Japeto, quedó claro que se había descubierto algo nuevo. Hasta ese momento se conocían seis satélites y los seis tenían entre tres y seis mil kilómetros de diámetro. Alguien

pudo pensar que aquél era el tamaño natural de los satélites y que todos los demás debían tener dimensiones parecidas.

Tabla 46. Brillo de los satélites de Saturno

Satélite	Orden de descubrimiento	Máximo brillo (magnitud)
Jano	10	14,0
Mimas	7	12,2
Encélado	6	11,8
Tetis	5	10,5
Dione	4	10,6
Rea	3	9,9
Titán	1	8,3
Hiperión	8	14,0
Japeto	2	10,7
Febe	9	15,0

Sería un error, por supuesto. Los satélites grandes reciben y reflejan más luz y tienden a ser los primeros en ser descubiertos. Naturalmente, la Luna la habríamos visto antes que nada aun cuando fuera muy pequeña, dada su proximidad con nosotros. Es pura casualidad que sea un satélite grande y que la Tierra no tenga un satélite pequeño. Una vez descubiertos todos ellos, los satélites encontrados más tarde, al perfeccionarse los telescopios, tendrían que ser más pequeños (excepto los que tenían muy poco brillo debido a su enorme distancia).

Sin embargo Japeto era mucho más oscuro que Titán, hasta el punto de que, pese a que ambos objetos estaban aproximadamente a la misma distancia de la Tierra, parecía claro que Japeto debía ser bastante más pequeño. En realidad tenía menos de dos mil kilómetros de diámetro, y lo mismo ocurría con todos los demás satélites de Saturno descubiertos más tarde.

En la tabla 47 se indican los diámetros de los distintos satélites de Saturno, pero con la advertencia de que, excepto en el caso de Titán, las cifras son algo inciertas y es muy probable que haya que modificarlas cuando recibamos la debida información de las sondas enviadas a Saturno.

Tabla 47. Diámetros de los satélites de Saturno

Satélite	Kilómetros
Jano	300
Mimas	400 [390]
Encélado	600 [510]
Tetis	1.000 [1.050]
Dione	800 [1.120]
Rea	1.600 [1.530]
Titán	5.800 [5.150]
Hiperión	440 [410 X 220]
Japeto	1.600 [1.440]
Febe	240 [200]

Cuando, en 1671, se descubrió Japeto, era el cuerpo astronómico más pequeño descubierto hasta la fecha, batiendo el récord establecido por Europa en 1610. Dione volvió a batir el récord en 1684; luego serían Encélado y, en 1789, Mimas.

El enorme tamaño de Titán no se aprecia suficientemente si sólo consideramos los diámetros. El volumen varía con el cubo del diámetro. Así pues, si el diámetro de Titán es 3 5/8 veces mayor que el de Rea o Japeto, que le siguen en tamaño, su volumen es 3 5/8 X 3 5/8 X 3 5/8, ó 47,6 veces mayor que el de cualquiera de ellos. En realidad, el volumen de Titán es veinte veces mayor que el de los otros nueve satélites juntos.

Destaca así más claramente el hecho de que de todos los satélites de Saturno sólo uno, Titán, tiene un tamaño considerable, por lo cual, cuando se ven los diez satélites desde la «superficie» de Saturno, su aspecto no es tan imponente como cabría esperar (véase tabla 48).

Tabla 48. Diámetros aparentes de los satélites de Saturno

Satélite	Minutos de arco	La Luna vista desde la Tierra = 1
Jano	6,3	0,20
Mimas	7,1	0,23

Encélado	8,4	0,27
Tetis	12,0	0,39
Dione	7,0	0,22
Rea	11,1	0,36
Titán	16.5	0,53
Hiperión	1,0	0,03
Japeto	1,5	0,05
Febe	0,06	0,002

Hiperión y Japeto aparecerían simplemente como estrellas bastante luminosas del cielo de Saturno, mientras que Febe no sería visible a simple vista. El resto, Jano, Mimas, Encélado y Dione sólo parecerían canicas diminutas. Únicamente Tetis, Rea y Titán parecerían orbes distintos con fases claras, aunque todos ellos parecerían bastante más pequeños que nuestra Luna.

La superficie aparente de los diez satélites, vistos desde la «superficie» de Saturno, es sólo unas tres cuartas partes de la superficie de nuestra Luna vista desde la superficie de la Tierra. El brillo de los diez satélites vistos desde Saturno sería menos de la tercera parte del brillo de nuestra Luna llena. Es cierto que la forma cambiante de los satélites en el cielo de Saturno sería sumamente interesante aunque ninguno de ellos resulte demasiado impresionante por separado.

Pero tampoco conviene exagerar la pequeñez de los satélites de Saturno. De los conocidos, el más pequeño es Febe, con un diámetro de 240 kilómetros. Pero de los satélites de Júpiter sólo los cuatro mayores, con diámetros que van de los 3.060 a los 5.220 kilómetros (véase tabla 32), son claramente más grandes, y Amaltea quizá sea del mismo tamaño que Febe. Todos los demás satélites de Júpiter son bastante más pequeños que Febe o que Amaltea.

Supongamos que tomáramos la decisión arbitraria de considerar únicamente los satélites que tuvieran cuando menos 200 kilómetros de diámetro, y que los cuerpos más pequeños los calificáramos de fragmentos sin importancia. En ese caso resultaría que Mercurio, Venus y Marte no tendrían ningún satélite, la Tierra tendría uno y Júpiter tendría cinco. En cambio Saturno tendría diez, estando claramente a la cabeza.

En realidad, quizá deberíamos decir que Saturno tenía once, pues si juntara toda la materia de los anillos se formaría un satélite mayor que cualquiera de los demás, si exceptuamos a Titán.

Las masas de los satélites (véase tabla 49) son, excepto en el caso de Titán, todavía menos seguras que los diámetros, y podrían cambiar considerablemente cuando las sondas nos envíen los datos adecuados.

Cada satélite, como tiene masa, tiene también un pequeño campo gravitatorio que se puede manifestar en forma de gravedad superficial (véase tabla 50).

Tabla 49. Masas de los satélites de Saturno

Satélite	Masa (Luna=1)
Anillos	0,33
Jano	0,0002
Mimas	0,0005
Encélado	0,0010
Tetis	0,0085
Dione	0,0158
Rea	0,025
Titán	1,905
Hiperión	0,0015
Japeto	0,020
Febe	0,0001

Tabla 50. Gravedad superficial de los satélites de Saturno

Satélite	Tierra = 1	Luna = 1
Jano	0,0044	0,026
Mimas	0,0062	0,037
Encélado	0,0054	0,033
Tetis	0,016	0,10
Dione	0,048	0,29
Rea	0,019	0,12
Titán	0,111	0,67

Hiperión	0,015	0,092
Japeto	0,015	0,092
Febe	0.0034	0.020

Un ser humano que pesara 70 kilogramos en la Tierra y, por tanto, 11,7 kilogramos en la Luna, pesaría 7,8 kilogramos en Titán y sólo 0,24 kilogramos en Febe.

No parece que la atracción gravitatoria de los satélites más pequeños de Saturno tenga muchas repercusiones, pero en esta atracción hay algo que sí es visible desde la Tierra.

Volvamos a la división de Cassini.

Si en ese espacio hubiera fragmentos de los anillos, darían la vuelta a Saturno en 11,4 u 11,8 horas, según el lugar de la brecha donde se encontraran. Comparemos esto con los períodos de revolución de los satélites interiores indicados en la tabla 51.

Tabla 51. División de Cassini

	Período de revolución	
Satélites	Horas	Espacio de Cassini = 1
División de Cassini	11,50	1,00
Jano	17,98	1,56
Mimas	22,61	1,97

Imaginemos ahora una partícula en la división de Cassini, con Jano y Mimas formando línea con Saturno. La partícula de la división de Cassini, que se movería con más rapidez que los dos satélites, tendería a adelantarse, mientras que la atracción gravitatoria de estos satélites la frenaría. Las otras partículas que se aproximaran a ese punto serían atraídas hacia adelante por los satélites.

Por cada dos veces que la partícula girara en torno a Saturno, Mimas lo habría hecho una sola y volvería a tirar de la partícula hacia adelante o hacia atrás, igual que antes. Por cada tres veces que la partícula diera la vuelta a Saturno, Jano lo haría dos veces y volvería a colocarse en su sitio y a ejercer su atracción. Por cada

seis veces que las partículas dieran la vuelta a Saturno, Jano lo habría hecho cuatro veces y Mimas tres, y ambos volverían a renovar su atracción.

Una y otra vez se ejercería la misma atracción, siempre hacia adelante para algunas partículas, o siempre hacia atrás para otras. Al final, algunas de ellas se verían impulsadas hacia adelante, hacia una órbita más amplia en torno a Saturno, y las otras serían atraídas hacia atrás, hacia una órbita más ceñida. Se alejarían de Saturno o se vendrían más hacia él; pero no se quedarían en la división de Cassini. Las partículas situadas en otras partes de los anillos no girarían en fracciones tan exactas de los períodos de revolución de los satélites próximos, por lo cual no se producirían cambios importantes. Esa es la razón por la que el espacio libre de Cassini se despeja con tanta eficacia, manteniéndose como la única división amplia de los anillos.

Conociendo la masa y volumen de cada uno de los satélites de Saturno podemos calcular su densidad. Como ninguna de las dos magnitudes son nada seguras en la mayoría de ellos, el valor de la densidad es todavía más incierto, por lo que la tabla 52 debe aceptarse con grandes reservas.

Sin embargo, si aceptamos dichas cifras como las más fiables en el momento presente, daría la impresión de que Dione es un satélite rocoso, como la Luna o Io. Hiperión es una mezcla de rocas y hielos, mientras que el resto parece ser mezcla de diversos hielos. Los anillos de Saturno dado su brillo, parecen estar constituidos sobre todo por hielo; por hielo de agua, según todas las probabilidades.

Tabla 52. Densidades de los satélites de Saturno

Satélite	Densidad (Hielo de agua=1)
Jano	1,2
Mimas	1,2
Encélado	0,8
Tetis	1,3
Dione	4,8
Rea	1,0
Titán	1,5
Hiperión	2,7

101

Japeto	0,8
Febe	1,1

De Saturno a Pluton

En este sentido, Japeto tiene un interés especial. Cuando Cassini lo descubrió en 1671, observó que era unas cinco veces más brillante cuando estaba al oeste de Saturno que cuando estaba al Este. Como es probable que Japeto tenga siempre orientada hacia Saturno la misma cara, vemos un hemisferio cuando está a un lado de Saturno y el otro cuando está al otro lado.

Parece ser que uno de los hemisferios de Japeto refleja la luz solar con una eficiencia cinco veces mayor que la del otro. Quizá la superficie de una cara esté cubierta de hielo y la otra de rocas desnudas. En este caso es más fácil suponer que Japeto se componga esencialmente de rocas cubiertas por una fina capa de hielo en la superficie de un hemisferio, y no que esté formado en esencia por hielos cubiertos por una delgada capa de roca. Pero entonces la densidad de Japeto citada en la tabla tiene que ser errónea. Es posible que las sondas enviadas a Saturno nos proporcionen información al respecto.

# Capítulo 6 Cometas y asteroides

#### Contenido:

- 1. El cometa Halley y otros
- 2. De Ícaro a Hidalgo
- 3. Quirón

### 1. El cometa Halley y otros

Los antiguos griegos pensaban que Saturno era el planeta más lejano. Así lo creían también Copérnico y Galileo. Hasta el año 1700 se daba por descontado que la órbita de Saturno era el límite del sistema solar y que nada traspasaba esa frontera. El primer objeto que atravesó dicha frontera y liberó a los astrónomos de la idea del límite de Saturno como confín del sistema solar fue un cometa.

Los cometas se conocen desde tiempos prehistóricos, pues los que son brillantes se notan muy bien en el cielo. Además son muy chocantes, pues no se parecen a ninguno de los objetos celestes. Son manchas de luz, borrosas y vagas, con formas irregulares. Suelen tener chorros de luz que a algunos les parecen cabellos. La misma palabra «cometa» procede de la palabra latina «coma», que significa «cabellera». Además, los cometas aparecen y desaparecen de forma imprevisible, sin seguir esos movimientos regulares que tienen los demás objetos astronómicos.

El filósofo griego Aristóteles (384 a. de C.-322 a. de C.) sugirió la posibilidad de aclarar estos misterios suponiendo que los cometas no eran cuerpos astronómicos sino más bien regiones de vapor incandescente de la atmósfera superior.

Antiguamente, la mayor parte de la humanidad, incluyendo a los astrónomos, estaba convencida de que los cometas eran objetos de mal agüero, enviados para anunciar catástrofes. Por eso dedicaron mucho tiempo a averiguar qué catástrofes podían ser ésas, sin tomarse la molestia de observar con detención el cometa.

El primer astrónomo que se esforzó en observar atentamente un cometa, anotando su posición en el cielo y los cambios de posición de una noche a otra, fue el astrónomo alemán Regiomontanus (1436-1476). Lo hizo con un cometa brillante que apareció en 1472.

En 1531 el observador italiano Girolamo Fracastoro (1483-1553) estudió un cometa aparecido en ese año, y en 1538 señaló que los destellos de un cometa (llamados generalmente «cola») apuntaban siempre en dirección contraria a la del Sol. Esto parecía contradecir la teoría de Aristóteles y demostrar cierta conexión entre los cometas y el Sol.

El astrónomo danés Tycho Brahe (1546-1601) trató de medir la paralaje de un cometa aparecido en 1577. No lo consiguió, pues resultó que la paralaje era más pequeña que la de la Luna y demasiado pequeña para medirla sin un telescopio (que todavía no se había inventado). Esto quería decir que el cometa estaba más lejos que la Luna y era, por tanto, un cuerpo astronómico y no un fenómeno atmosférico.

Después de que Kepler estableciera las órbitas elípticas de los planetas, se planteó la cuestión de si las órbitas de los cometas serían también elipses. El astrónomo italiano Giovanni Alfonso Borelli (1608-1679) estudió un cometa aparecido en el cielo en 1664, y señaló que su recorrido alrededor del Sol tenía la forma de una elipse tan larga que nunca se cerraba por el otro extremo. Esta curva larga y no cerrada se llama parábola. Si los cometas tenían órbitas parabólicas cada una de ellas entraría en el sistema solar procedente de un confín alejado del universo, sería visible al acercarse lo suficiente al Sol, se movería en torno a él, y se alejaría para siempre.

El astrónomo inglés Edmund Halley (1656-1742) estudió cuidadosamente un cometa aparecido en 1682. Siguió su paso por el cielo y observó que seguía el mismo recorrido que el cometa de Fracastoro en 1531. En 1456 y 1607 se habían visto cometas en las mismas partes del Cielo. Podía ser que los cometas regresaran y que todos ellos fueran el mismo, que regresaba cada 75 ó 76 años.

Utilizando estos datos, y la ley de la gravitación que acababa de establecer Isaac Newton, Halley trazó una órbita elíptica correspondiente al cometa, y en 1705 predijo que regresaría en 1758. No vivió para verlo, pero el cometa regresó, y a partir de entonces se conoce con el nombre de cometa Halley.

Por primera vez se había establecido la órbita de un cometa y se había demostrado que era parte integrante del sistema solar.

La órbita era una elipse larga y muy excéntrica.

En el perihelio (en su momento de mayor aproximación al Sol), el cometa Halley está a 87.800.000 kilómetros (54.600.000 millas) del Sol. En ese momento está entre las órbitas de Venus y de Mercurio.

Sin embargo, dado que su excentricidad es de 0,967, el cometa Halley queda muy lejos del Sol en el afelio (punto de su órbita en que más alejado está del Sol). Su distancia al Sol es de 5.240.000.000 kilómetros, nada menos que 3,67 veces más lejos que Saturno. Con esto se viene abajo la idea de un límite del sistema solar situado en Saturno. El cometa Halley hace que Saturno parezca muy próximo al Sol (véase figura 16).

Desde tiempos de Halley se han calculado las orbitas de otros cuarenta y cinco cometas, casi todas ellas con períodos inferiores al de Halley. El cometa con un período más breve es el cometa Encke, llamado así en honor del astrónomo alemán Johann Franz Encke (1791-1865). Su período es de 3,30 años. En el perihelio está a sólo 51.600.000 kilómetros del Sol y en ese momento está más cerca del Sol que Mercurio. En el afelio está a 611.000.000 kilómetros del Sol.

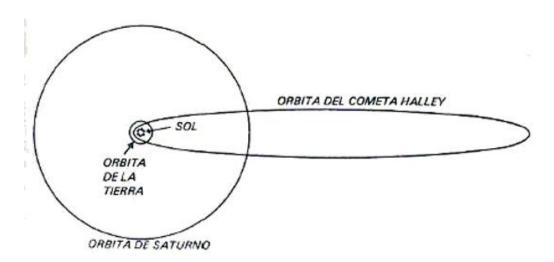


Figura 16. El cometa Halley.

Ni en su punto más alejado llega el cometa Encke a estar tan lejos del Sol como la órbita de Júpiter. Es el único cometa conocido cuya órbita queda dentro de la de Júpiter.

El cometa con un período conocido más largo es el cometa Rigollet, que en el perihelio está a 112.000.000 kilómetros del Sol. Entonces está poco más lejos que

Venus. Sin embargo, su órbita tiene una excentricidad de 0,974, por lo que en el afelio se sitúa a 8.500.000.000 kilómetros del Sol, es decir, seis veces más lejos que Saturno y 1,6 veces más lejos que el cometa Halley en su punto de mayor alejamiento. El cometa Rigollet vuelve sólo cada 156 años.

Los cometas se componen en gran parte de materiales helados, como insinuó en 1949 el astrónomo americano Fred Lawrence Whipple (1906-). Cuando están lejos del Sol y más allá de la órbita de Júpiter, los hielos se enfrían y endurecen, logrando una unión más compacta.

En cambio cuando el cometa se acerca hacia el Sol, el calor del sol vaporiza los materiales helados y libera pequeños granos de sustancias rocosas y metálicas que a veces los acompañan. El «núcleo» todavía congelado del cometa queda rodeado por una neblina de polvo y vapor que es la «cabellera».

El Sol emite un flujo constante de partículas subatómicas que salen a gran velocidad en todas las direcciones. El científico americano Eugene Newman Parker (1927-) les dio en 1958 el nombre de «viento solar». El viento solar arrastra el polvo y gas de la cabellera disponiéndolo en líneas que apuntan en dirección contraria a la del Sol, formando así la cola del cometa.

Debido al viento solar, cada vez que el cometa pasa por el perihelio pierde parte de su materia. En cada nueva aparición el cometa es menos brillante y espectacular. Al final, todo o casi todo el hielo desaparece y sólo queda un pequeño núcleo de roca y metal, o de lo contrario sólo una nube de polvo rocoso y metálico que se extiende por toda la órbita del cometa.

Por esta razón, los cometas periódicos no suelen ser espectaculares. El cometa Encke, por ejemplo, sólo puede localizarse con un buen telescopio y sólo tiene una mínima neblina que lo define como cometa. No es prácticamente más que el núcleo sólido.

El cometa Halley es todavía brillante porque sólo se acerca al Sol una vez cada setenta y seis años, por lo cual no ha perdido tanto material helado como si su período hubiera sido más breve. Aun así, su última aparición en 1910 no fue muy espectacular y su próximo regreso en 1986 probablemente no lo sea en absoluto.

Hay cometas con períodos mucho más largos incluso que los de la cometa Rigollet, cometas con órbitas tan alargadas que no se pueden calcular con exactitud. Lo

único que pueden decir los astrónomos es que tales cometas siguen elipses tan enormes que no vuelven a pasar junto al Sol sino al cabo de cientos de miles o incluso millones de años. No han perdido prácticamente nada de su materia helada y cuando aparezcan pueden ser realmente espectaculares. Hubo varios de estos cometas en el siglo XIX, pero el azar ha querido que en nuestro siglo no se haya visto ninguno verdaderamente resplandeciente.

Son unos 500 los cometas de período largo conocidos a 1 lo largo de la historia. El astrónomo holandés Jan Hendrik Oort (1900-) sugirió en 1950 la existencia de un cinturón de cometas que giran muy lentamente alrededor del Sol, a una distancia de varios billones de kilómetros. Podría haber miles de millones de pequeños conjuntos de material helado, de varios kilómetros de anchura; restos quizá de cuando la nube original de polvo y gas se contrajo para formar el Sol y los planetas.

De vez en cuando la influencia gravitatoria de una estrella próxima podría atraer a uno de estos lejanos cometas, introducirlo en su órbita y hacer que se aleje más del Sol. Quizá se perdiera totalmente para el sistema solar y empezara a vagar independientemente en los enormes espacios interestelares.

También sería posible que la influencia gravitatoria de una estrella próxima detuviera a un cometa y lo hiciera aproximarse al Sol, comenzando así un proceso que terminará en su muerte. La influencia gravitatoria de los planetas puede alterar su órbita y reducirla de manera que se aproxime al Sol una vez cada siglo, o con frecuencia todavía mayor, y de esta manera se precipitaría considerablemente el proceso de desintegración y muerte.

Recientemente, los cometas que están lo bastante lejos del Sol como para mantener su dureza sin presentar signos del polvo o vapor que rodea a otros han sido denominados «cometoides». Así pues, lo que sugiere Oort es la existencia de un cinturón de cometoides, y todo cometa que brilla vagamente al acercarse al Sol se convierte en un cometoide duro y sólido cuando se aleja de él.

Aunque los cometas son objetos muy llamativos cuando están cerca del Sol, son tan pequeños que como cometoides son indetectables una vez que llegan a los ámbitos más apartados de sus órbitas.

En 1973, por ejemplo, el astrónomo checo Lubos Kohoutek detectó un cometa situado a una distancia de 778.000.000 kilómetros del Sol. Esta distancia equivale

aproximadamente a la de la órbita de Júpiter, y es muy poco frecuente ver un cometa a esa distancia. Por esta razón se supuso que el «cometa Kohoutek» era un gran cometa que no había estado muchas veces en las proximidades del Sol, o que quizá se estuviera acercando a él por primera vez. Se esperaba que constituyera un gran espectáculo. Por desgracia, el cometa no podía estar muy helado, sino que debía ser bastante rocoso, por lo que, a pesar de su utilidad para los científicos, no resultó llamativo a simple vista.

Todos los cometas vistos por los astrónomos han tenido su perihelio muy próximo al Sol. El cometa con el perihelio más alejado del Sol ha sido el Schwassman-Wachmann, que lo tiene a 826.000.000 kilómetros. Es un poco más allá de la órbita de Júpiter, pero su órbita no es muy elíptica, siendo su excentricidad de sólo 0,136. Por eso, en el afelio está a sólo 1.086.000.000 kilómetros, menos que la órbita de Saturno. En resumen, el cometa Schwassman-Wachmann tiene una órbita que queda en todo momento entre las de Júpiter y Saturno.

Así pues, podríamos resumir lo dicho diciendo que todos los cometas detectados han tenido la parte visible de su órbita dentro de la órbita de Saturno. Aunque es muy probable que haya gran número de cometas cuyas órbitas queden mucho más afuera que las de Saturno en todo momento, nunca los hemos visto.

En lo que a cometas se refiere, Saturno sigue siendo el límite visible del sistema solar.

## 2. De Ícaro a Hidalgo

Los cometas no son los únicos cuerpos pequeños del sistema solar.

Cuando el año 1800 tocaba a su fin, el astrónomo italiano Giuseppe Piazzi estaba entregado a la tarea de corregir un cierto mapa de estrellas.

Pasada la medianoche del día de Nochevieja, es decir, el día 1 de enero de 1801, la primera noche del siglo XIX, observo en la constelación Taurus una estrella que no figuraba en ningún lugar del mapa. Comprobó su posición la noche siguiente y vio que se había movido. Volvió a observar la noche siguiente, y también se había movido. No era una estrella, sino un objeto que se movía alrededor del Sol.

Al principio Piazzi pensó que era un cometa, a pesar de que no presentaba neblina ninguna y de que su aspecto era un punto bien claro, como una estrella. Cuando el

matemático alemán Johann Karl Fridrich Gauss (1777-1855) calculo su órbita, resulto ser ligerísimamente elíptica e incluida en su totalidad entre las órbitas de Marte y la de Júpiter. Su distancia media del Sol era de 413.800.000 kilómetros.

Piazzi dio a este nuevo objeto el nombre de Ceres, por la diosa romana de la agricultura, que estaba estrechamente asociada a su isla natal de Sicilia.

Los movimientos de Ceres eran exactamente iguales que los que cabría esperar de un planeta, pero era sorprendentemente pálido, sin el brillo necesario para que se pudiera ver sin telescopio. Para ser tan poco brillante estando a menos de mitad de distancia de la Tierra que Júpiter, debía ser muy pequeño —y lo era. El diámetro de Ceres es de 1.070 kilómetros. Sólo tiene 1/280 de la masa de Mercurio, el planeta más pequeño conocido hasta aquel momento, y sólo 1/62 de la masa de nuestra Luna.

Pocos años antes algunos astrónomos habían llegado a la conclusión de que podría haber un pequeño planeta entre las orbitas de Marte y Júpiter. Explicaré más adelante las razones que les llevaron a pensarlo. Acababan de iniciar un programa para descubrirlo cuando les llegó la noticia del descubrimiento de Ceres. A pesar de todo continuaron con el programa, pensando que Ceres era tan pequeño que quizá no representara codo el material planetario de aquella zona del sistema solar.

Tenían razón. Ya en 1897 se habían descubierto tres planetas más, todos ellos más pequeños que Ceres, y todos ellos con órbitas que estaban entre las de Marte y Júpiter.

Estos planetas eran tan pequeños que incluso vistos a través de los telescopios no llegaban a convertirse en círculos y seguían viéndose como puntos de luz parecidos a las estrellas. De ahí vino la costumbre de llamarlos «asteroides», de las palabras griegas que significan «parecido a una estrella».

A lo largo del siglo XIX se fueron descubriendo numerosos asteroides, sobre todo después de empezar a utilizar la fotografía para su localización, y para el año 1900 se conocían más de cuatrocientos asteroides con órbitas situadas entre las de Marte y Júpiter. Esta región recibió el nombre de «cinturón de asteroides».

¿Existen asteroides fuera de este «cinturón»? La respuesta es «sí».

El 13 de agosto de 1898 el astrónomo alemán Gustav Witt descubrió el asteroide número 433. Cuando se calculó su órbita resultó que durante parte de su recorrido

alrededor del Sol penetraba hasta quedar fuera del cinturón de asteroides y pasar la órbita de Marte. En el perihelio, el asteroide 433 está a sólo 170.000.000 kilómetros del Sol. Se acerca a éste casi tanto como la Tierra.

Hasta entonces todos los asteroides habían recibido nombres femeninos, en conformidad con el precedente establecido al utilizar el nombre de Ceres. Sin embargo, Witt dio al 433 el nombre de Eros, dios griego del amor. A partir de entonces, los asteroides cuya órbita rebasa el cinturón de asteroides al menos durante parte de su recorrido alrededor del Sol han recibido nombres masculinos.

Después del descubrimiento de Eros se han encontrado otros asteroides que se atrevían a entrar en la órbita de Marte. En 1948 el astrónomo alemán-americano Walter Baade (1893-1960) descubrió el asteroide número 1566. Resultó que se acercaba al Sol más que ningún otro asteroide. En el perihelio está a sólo 28.500.000 kilómetros del Sol, por lo que se acerca a éste bastante más que el mismo Mercurio. Sin embargo su excentricidad orbital es de 0,83, por lo que en el afelio está a 307.000.000 kilómetros del Sol y en ese momento queda perfectamente dentro del cinturón de asteroides.

Baade dio a este asteroide el nombre de Ícaro, joven de la mitología griega que voló por los aires con alas artificiales cuyas plumas iban sujetas a la estructura con cera. En su vuelo se acercó demasiado al Sol, la cera se derritió y el pobre cayó al suelo, donde encontró b muerte.

Todos aquellos asteroides que salen del cinturón de asteroides y que en el perihelio están más cerca del Sol que Marte, tienen afelios situados dentro del cinturón. Pero es posible que estos asteroides que penetran más pudieran acercarse a un planeta lo suficiente para ser capturados y quedar convertidos en satélites suyos. Se piensa que los pequeños satélites de Marte son asteroides capturados.

¿Qué ocurre con los asteroides que se salen del cinturón en la dirección contraria, más allá de la órbita de Júpiter?

Si existen, sería más difícil descubrirlos. La frontera exterior del cinturón de asteroides está unas ocho veces más lejos de la Tierra que su frontera interior. Los pequeños asteroides, fácilmente visibles en la frontera interior, serían muy difíciles de ver en su extremo exterior. Algunos de los asteroides que llegan hasta la órbita de Marte sólo tienen un par de kilómetros de ancho, y aún así se pueden detectar.

Para descubrir claramente un asteroide en el límite exterior del cinturón de asteroides debería tener al menos 50 kilómetros de anchura.

En 1906 el astrónomo alemán Max Wolf descubrió el asteroide número 588. Era algo extraño, pues se movía a una velocidad sorprendentemente lenta y por tanto tenía que estar más lejos del Sol de lo normal. Era, en aquel momento, el asteroide más lejano de todos los descubiertos.

Su órbita era lo suficientemente extraña como para que Wolf decidiera darle un nombre masculino. Lo llamó Aquiles, por el héroe griego de la guerra de Troya.

Una vez establecida la órbita de Aquiles, se comprobó que se movía dentro de la órbita de Júpiter, en una posición de unos 60 grados por delante del mismo, y que se mantenía en esa posición mientras los dos giraban alrededor del Sol. El Sol, Júpiter y Aquiles estaban colocados de tal manera que si se trazaran unas líneas imaginarias del Sol a Júpiter, de éste a Aquiles y de aquí al Sol, se formaría un triángulo equilátero.

Y a en 1772 el astrónomo franco-italiano Joseph Louis Lagrange (1736-1813) había demostrado que, según la teoría gravitatoria, esta forma del triángulo equilátero era estable y que en ella los tres cuerpos conservarían sus posiciones, con tal de que el cuerpo más grande tuviera al menos veinticinco veces más masa que el segundo en tamaño, y que el cuerpo menor fuera realmente muy pequeño.

Pero podemos trazar otro triángulo equilátero con uno de los ángulos en la órbita de Júpiter y situado 60 grados detrás de éste. Todavía no había pasado un año del descubrimiento de Aquiles cuando se detectó otro asteroide en esa posición. Era el Asteroide número 617 y se le puso el nombre de Patroclo, el amigo de Aquiles en el relato de Homero sobre la guerra de Troya (véase figura 17).

Debido a sus nombres, los asteroides localizados en estas posiciones triangulares se conocen como «asteroides troyanos». Y están situados en lo que se llaman las «posiciones troyanas».

Los astrónomos se dieron cuenta en seguida de que era muy probable que en cada una de las posiciones-troyanas hubiera más de un asteroide y, efectivamente, así fue.

Se han detectado unos quince asteroides en las proximidades de Aquiles y cinco en las de Patroclo, y a todos ellos se les han puesto nombres de guerreros que

intervinieron en la guerra de Troya. Algunos astrónomos calculan que, en total, los asteroides troyanos son setecientos o más, pero, como es natural, nosotros sólo vemos los mayores.

Los asteroides troyanos no permanecen exactamente en las posiciones troyanas. Lo harían si los únicos cuerpos existentes fueran el Sol, Júpiter y ellos mismos. Sin embargo, los otros planetas, Saturno sobre todo, ejercen una influencia gravitatoria y esto hace que los asteroides troyanos oscilen en su posición troyana al ir desplazándose alrededor del Sol.

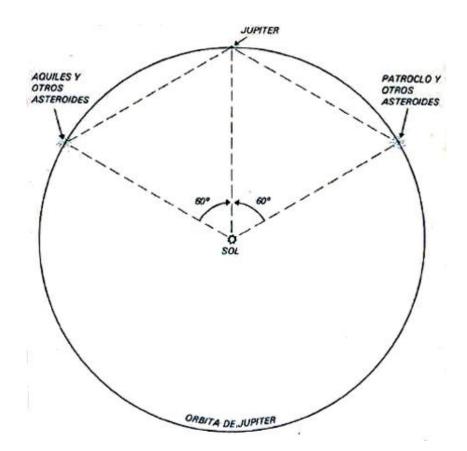


Figura 17. Los asteroides troyanos.

Las oscilaciones pueden ser considerables y es posible que un asteroide troyano se aleje de la posición troyana decenas de millones de kilómetros. No es imposible que una combinación de atracciones gravitatorias dé lugar a que alguno se aleje tanto que ya no vuelva y deje de ser un asteroide troyano. También puede ocurrir que otros asteroides se acerquen lo suficiente a la posición troyana como para quedar

atrapados allí, por lo que es probable que a lo largo de la historia del sistema solar siempre haya habido en ambas posiciones un número importante de asteroides, aunque quizá la permanencia de un asteroide en cualquiera de ellas no dure demasiado.

Es posible que un asteroide perdido de una de las posiciones troyanas llegue con el tiempo a acercarse tanto al mismo Júpiter que quede atrapado en la órbita de este planeta gigante. De hecho, los ocho o nueve pequeños satélites que dan vueltas alrededor de Júpiter más allá de la órbita de Calisto deben ser todos ellos asteroides capturados —posiblemente troyanos, aunque no necesariamente.

Otra posibilidad es que un asteroide troyano, al perder su posición, se mueva en dirección hacia afuera y se vea arrojado, por así decirlo, más allá de Júpiter.

En 1920 Walter Baade (que un cuarto de siglo después descubriría Ícaro) descubrió el asteroide número 944, al que llamó Hidalgo. No se trata de un nombre mitológico sino de la palabra castellana utilizada para designar a un noble de rango inferior. Cuando se calculó su órbita se comprobó que Hidalgo se movía hacia afuera mucho más allá de Júpiter y tenía un período orbital de 13,7 años; tres veces más que el del asteroide medio, y más largo incluso que el de Júpiter. Podía ser un asteroide troyano expulsado, pero sería difícil probarlo.

Hidalgo tiene una gran excentricidad orbital de 0,66, la más alta de todos los asteroides conocidos, exceptuando a ſcaro. En el perihelio está sólo a unos 300.000.000 kilómetros del Sol, por lo que en este punto de su órbita está claramente dentro del cinturón de asteroides. Sin embargo, en el afelio está a 1.450.000.000 kilómetros del Sol, o aproximadamente a la misma distancia que Saturno (véase figura 18).

Viendo la figura 18 podría parecer que Hidalgo se acerca tanto a Saturno que está en peligro de ser capturado, pero se trata de una figura únicamente bidimensional. La inclinación orbital de Hidalgo es de 54 grados, por lo que se mueve oblicuamente en relación con Saturno. En el afelio está tan por debajo de Saturno que no está más cerca de dicho planeta que la Tierra.

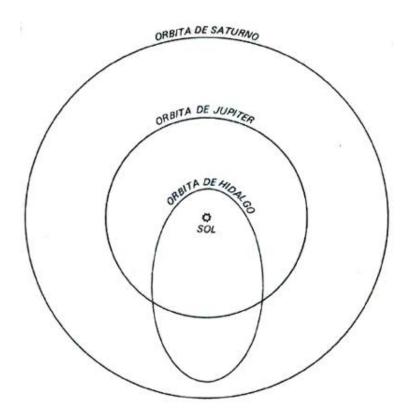


Figura 18. Hidalgo.

## 3. Quirón

Hasta la década de 1970-80 todos los asteroides descubiertos, por muy extrañas que fueran sus órbitas, seguían siendo miembros del cinturón de asteroides al menos durante cierto tiempo. Asteroides como Eros e Ícaro, que quedaban fuera del cinturón de asteroides en el perihelio, quedaban dentro del mismo en el afelio. Asteroides como Hidalgo, que quedaban fuera del cinturón de asteroides en el afelio, quedaban dentro de él en el perihelio.

Pero ¿existen asteroides que permanezcan en todo momento dentro de la órbita de Marte?

En 1977 el astrónomo americano Charles Kowall descubrió un pequeño asteroide cuya órbita está en todo momento más cerca del Sol que Marte, pero que está siempre más lejos del Sol que la órbita de Venus. Su distancia media al Sol no es muy diferente de la de la Tierra.

Pero en este libro nos interesan más las regiones distantes del sistema solar que las próximas. ¿Hay asteroides cuya órbita esté en todo momento fuera de la órbita de

Júpiter? Si los hubiera, sería difícil descubrirlos. En primer lugar, aun cuando se tratara de un asteroide de gran tamaño, parecería poco brillante en posiciones situadas más allá de Júpiter. En segundo lugar, se movería con velocidades bajas (cuanto más lejos del Sol, más lentamente se mueve un objeto que sigue una órbita) y quizá pasara desapercibido su cambio de posición.

A lo largo de 1977 Kowall estudió el cielo prestando especial atención a los objetos de movimiento muy lento que pudieran estar más allá de Júpiter. Buscaba sobre todo cometas lejanos. Mientras realizaba esta búsqueda, localizo algunos cometas que no estaban demasiado alejados, y también el asteroide que se mantenía en todo momento dentro de la órbita de Marte.

Pero el 1 de noviembre de 1977 se produjo un descubrimiento más interesante.

Kowall detectó un punto de luz que era muy pálido, con una magnitud de sólo 18, y que se movía a una velocidad que era sólo un tercio de la de Júpiter. Por consiguiente, debía de estar muy alejado de la órbita de Júpiter, claramente fuera de ella.

Kowall siguió el objeto durante varios días, elaborando una órbita aproximada, y luego comenzó a buscarlo en placas fotográficas tomadas en diversos observatorios varios meses y años antes, y que cubrían las regiones donde debería haber estado. Lo localizó en treinta placas, una de las cuales se remontaba a 1895, y con el tiempo dispuso de las posiciones suficientes para trazar una órbita precisa.

Por su brillo y distancia, era claro que el nuevo objeto era pequeño, con no más de un par de cientos de kilómetros de tamaño. Considerando su tamaño era un asteroide, pero su órbita estaba muy fuera del cinturón de asteroides en todo momento, siendo el primer asteroide descubierto con tal órbita.

Kowall bautizó al nuevo asteroide con el nombre de Quirón, el más famoso de los centauros (seres representados con cabeza y torso de hombre y cuerpo de caballo) en la mitología griega.

Quirón tiene una excentricidad orbital de 0,379. En el perihelio está a 1.273.000.000 kilómetros del Sol, o nueve décimas partes de la distancia que hay entre Saturno y el Sol. Sin embargo en el afelio se aleja a una distancia de 2.826.000.000 kilómetros del Sol. En ese momento su distancia es aproximadamente el doble que la de Saturno al Sol.

Quirón es hijo de Crono (Saturno) en la mitología griega y esto hace que su nombre resulte sumamente apropiado. Está cerca de la órbita de Saturno en el perihelio pero galopa hacia afuera, al estilo centauro por así decirlo, en el resto de su órbita. Si su órbita se traza bidimensionalmente, como en la figura 19, parece que Quirón atraviesa la órbita de Saturno, lo mismo que parece que Hidalgo atraviesa la órbita de Júpiter. Pero sólo es una ilusión, pues en realidad las órbitas están inclinadas entre sí. La inclinación orbital de Quirón es de 6,9 grados en comparación con los 2,5 grados de Saturno, por lo que la órbita de Quirón está a unos centenares de millones de kilómetros de la órbita de Saturno (una por encima de la otra) en los puntos donde parecen cruzarse.

El período de revolución de Quirón es de 50,6818 años y fue detectado cuando hacía poco que acababa de pasar por su afelio y estaba casi en el momento de menos brillo. Pasó por el afelio en noviembre de 1970. La última vez que estuvo en el perihelio fue en agosto de 1945 y volverá a estarlo en febrero de 1996. En el perihelio es unas veinticinco veces más brillante que en el afelio y alcanza una magnitud de 14,5, pero aun entonces sigue pareciendo un punto como el de una estrella, sin rastro de neblina como la de los cometas —al menos en las fotografías existentes en los archivos—. El examen atento que se podrá hacer en 1996 quizá nos suministre más información.

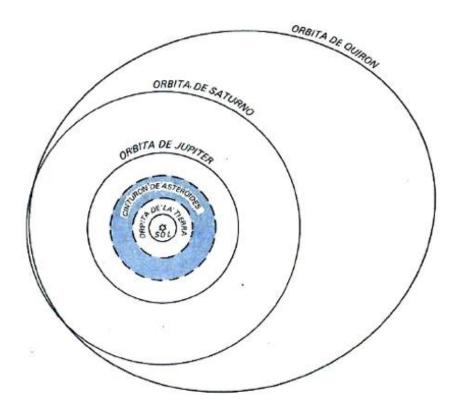


Figura 19. Quirón.

Parece ser o bien un verdadero asteroide que está excepcionalmente lejos, o un cometoide que es sorprendentemente grande y que nunca se acerca lo suficiente para que se forme la neblina. En cualquier caso es un objeto singular en estos momentos.

¿Puede haber muchos asteroides mucho más allá del cinturón de asteroides? ¿Existen otros cinturones de asteroides, o el cinturón que nosotros conocemos se extiende sin más hacia afuera, hasta los límites del sistema solar? ¿Es Quirón simplemente el mayor o el más próximo (o ambas cosas) de un grupo numeroso de objetos semejantes, y se descubrirán otros mediante una búsqueda intensa de otros objetos pequeños y de movimientos lentos?

Una prueba parcial en favor de que Quirón no es único es que hace ochenta años se descubrió un objeto en cierto sentido semejante.

El satélite más exterior de Saturno, Febe, tiene un tamaño parecido al de Quirón, y debido a su órbita peculiar los astrónomos han pensado siempre que era un asteroide capturado. Antes de que fuera capturado pudo seguir alrededor del Sol

una órbita parecida a la de Quirón. En ese caso ya serían dos, y sí hay dos es probable que sean muchos.

# Capítulo 7 Urano

#### Contenido:

- 1. El descubrimiento de Urano
- 2. Propiedades de Urano
- 3. Los satélites de Urano
- 4. Los anillos de Urano

## 1. El descubrimiento de Urano

En cierto sentido, nada de lo que hemos dicho hasta ahora elimina por completo la idea de que Saturno es el límite del sistema solar. Un asteroide y numerosos cometas tienen órbitas que los llevan más allá de Saturno. En el caso de todos los asteroides y cometas que hemos visto hasta ahora, al menos parte de su órbita queda situada dentro de la de Saturno.

Es muy posible que haya cometoides o asteroides que se mantengan todo el tiempo más allá de la órbita de Saturno, pero al menos hasta ahora no hemos conseguido ver ninguno de ellos.

Por eso, en las páginas precedentes no hemos descrito ningún cuerpo *visible* cuya órbita esté en *todo* momento más allá de Saturno.

Por «visible» entendemos algo que puede ser detectado por el telescopio, o por cualquier otro instrumento, o bien por el ojo humano sin ayuda de aparatos. Las cosas no han sido siempre así. Antes de 1600 se daba por supuesto de alguna manera que todo objeto existente en el cielo podía ser detectado a simple vista; que lo que no se podía ver no existía.

Una vez que se comenzó a utilizar el telescopio, se vio inmediatamente que en el cielo había muchos objetos que tenían existencia real pero que no eran lo suficientemente luminosos como para que los pudiéramos localizar a simple vista. Galileo descubrió que en todas partes había numerosas estrellas que no se podían ver sin el telescopio. Cuando miró la Vía Láctea, aquella banda de luz difusa resultó estar compuesta de miríadas de estrellas muy poco brillantes.

Incluso en el sistema solar había cuerpos que existían realmente y sin embargo no podían verse sin telescopio. Galileo descubrió casi de inmediato los cuatro grandes

satélites de Júpiter, por ejemplo, mientras que Huygens y Cassini descubrieron los anillos de Saturno y cinco de sus satélites.

Pero estos nuevos cuerpos del sistema solar pertenecían claramente a un sistema de Júpiter o a un sistema de Saturno. No se había descubierto ningún *planeta* nuevo y nadie esperaba que ocurriera tal cosa.

Entonces apareció William Herschel, el mismo que en 1789 descubriría dos de los satélites de Saturno.

Herschel era un genio autodidacta de la astronomía. Se hizo sus propios telescopios porque no tenía dinero para comprarse uno bueno, y terminó construyendo el mejor de su tiempo. Con sus telescopios comenzó rápidamente a hacer descubrimientos. Fue el primero, por ejemplo, que observó que el eje de Marte está inclinado casi igual que el de la Tierra.

El 13 de marzo de 1781 (ocho antes de descubrir los satélites de Saturno, Mimas y Encélado), Herschel estaba plenamente entregado a la tarea de medir con todo cuidado las posiciones de las estrellas. Tenía la esperanza de llegar a estudiar todos los objetos que podía ver en el cielo.

Mientras observaba una de las estrellas menos brillantes de la constelación Géminis (los Gemelos), de repente se dio cuenta de que estaba observando un objeto que no era un punto de luz como las estrellas, sino que tenía la forma de un pequeño disco. Herschel utilizó más aumentos en su telescopio y el disco se agrandó.

Herschel supuso que había descubierto un cometa, pero tuvo que admitir, observándolo noche tras noche, que no tenía aspecto de cometa. Carecía de neblina. Al contrario, el disco presentaba unos límites muy bien definidos. Y lo que es más, se movía muy despacio, tan despacio que debía estar mucho más allá de la órbita de Saturno, y hasta entonces no se había conocido nunca un cometa tan alejado del Sol.

Cuando se hicieron las observaciones necesarias para calcular su órbita, quedó claro que dicha órbita era casi circular, y no sumamente elíptica como las de los cometas. Es más, la órbita estaba en todo momento mucho más allá que la de Saturno. Era el primer cuerpo del sistema solar que podía verse y que estaba más allá del límite saturnino del sistema solar en *todo* momento.

Aun así Herschel no se atrevía a decir lo impensable. Finalmente, en julio de 1781, el astrónomo ruso Anders Jean Lexell (1740-1784) se atrevió a hacerlo. Herschel, dijo, había descubierto un nuevo planeta, un planeta que estaba mucho más lejos del Sol que Saturno. Era la primera vez, en la historia conocida, que se descubría un nuevo planeta.

Herschel tenía derecho, en cuanto descubridor, a dar nombre al planeta. Le puso el nombre del rey inglés, Jorge III, y lo llamó «Georgium Sidus», o «estrella de Jorge».

Este nombre fue muy mal recibido por los astrónomos de fuera de Gran Bretaña. No veían ninguna razón para bautizar a un planeta con el nombre de un monarca inglés. Algunos astrónomos ingleses propusieron el nombre de «Herschel», pero tampoco esta sugerencia fue aprobada fuera de Gran Bretaña.

Hasta entonces todos los planetas habían recibido nombres de dioses y diosas griegos y romanos, y se pensaba que el nombre del nuevo planeta debía mantenerse dentro de esa tradición. Además, con ello se evitaría la tentación de que las distintas naciones intentaran llamar a los objetos celestes con nombres inspirados en un nacionalismo localista.

El astrónomo alemán Johann Elert Bode (1747-1826) propuso una solución lógica. En la mitología griega, Zeus (Júpiter) era el padre de Ares (Marte), Afrodita (Venus) y Hermes (Mercurio), de manera que el planeta Júpiter tenía el nombre del padre de los dioses que daban nombre a los planetas interiores (excluyendo a la Tierra). Desplazándose hacia afuera de Júpiter, Crono (Saturno) era el padre de Zeus (Júpiter) y abuelo de los dioses de los planetas interiores. ¿Por qué no seguir con esta progresión y buscar dioses cada vez más antiguos al alejarse del Sol?

En la mitología griega el padre de Crono (Saturno) era Urano, el dios del cielo. ¿Por qué no darle ese nombre al planeta?

Se aceptó la propuesta y a partir de entonces el nuevo planeta, descubierto por Herschel, ha sido Urano.

## 2. Propiedades de Urano

121

El planeta recién descubierto resultó ser un objeto fácilmente visible con el telescopio y que incluso podía llegar a verse (a duras penas) a simple vista. ¿Por qué no se había descubierto mucho antes de 1781?

En primer lugar, había un factor psicológico. Los astrónomos se habían acostumbrado a la idea de que los planetas no sólo eran visibles a simple vista, sino que eran objetos muy brillantes. En la tabla 53 se compara el brillo de Urano con el de Saturno y con el de todos los objetos del cielo que son más brillantes que Saturno.

Saturno, el menos brillante de los planetas conocidos en la antigüedad, es, con todo, el noveno objeto más brillante del cielo. Los únicos objetos más brillantes son el Sol, la Luna, los otros cuatro planetas conocidos desde siempre, y las dos estrellas más brillantes.

Tabla 53. Brillo de Urano			
Magnitud en el momento	Brillo (Saturno=1)		
de máximo brillo			
-26,9	40.000.000.000		
-12,6	76.000		
- 4,3	36		
- 2,8	13,2		
- 2,5	10,0		
- 1,4	2,5		
- 1,2	2,1		
- 0,7	1,3		
- 0,4	1,0		
+ 5,7	0,0036		
	Magnitud en el momento de máximo brillo -26,9 -12,6 - 4,3 - 2,8 - 2,5 - 1,4 - 1,2 - 0,7 - 0,4		

Por el contrario, Urano sólo tiene 1/244 del brillo de Saturno y, lo que es peor, hay unas cinco mil estrellas tan brillantes como Urano, o más, por lo que éste se pierde entre ellas a simple vista.

Por supuesto, el orillo no es la única característica importante de los planetas. Sirio y Canopus son estrellas con el mismo orden de brillo que los planetas y sin embargo

nunca se han confundido con ellos. La razón es que los planetas se mueven sobre el fondo de las estrellas, mientras que Sirio y Canopus no lo hacen, pues ellas mismas son estrellas. Si una estrella poco brillante se moviera sobre el fondo de las estrellas, a pesar de su poco brillo se la reconocería como planeta.

Ahora bien, cuanto más lejos está un planeta del Sol, más lento parece el movimiento con que cruza el cielo de la Tierra (véase tabla 54). Por tanto, Urano no tiene sólo 1/244 del brillo de Saturno en el cielo de la Tierra, sino que su velocidad es tres veces menos. Su lentitud es tal que es fácil no captar su movimiento, especialmente por tratarse de un objeto poco brillante que no llama la atención.

Tabla 54. Movimiento aparente de Urano

Desplazamiento aparente en el cielo de la Tierra

Despiazamiento aparente en el cielo de la merra		
Planeta	Minutos de arco	Días para recorrer la anchura de
	por día	la Luna
Marte	31,44	0,989
Júpiter	4,99	6,23
Saturno	2,01	15,40
Urano	0,70	44,40

Una última característica de un planeta comparado con una estrella es que un planeta se presenta en forma de disco cuando se ve a través del telescopio, cosa que no ocurre con una estrella. Por supuesto, esto sólo es cierto en el caso de que el planeta no sea demasiado pequeño o no esté demasiado lejos (véase tabla 55). Para ver Urano en forma de disco hace falta una ampliación casi cinco veces mayor que en el caso de Saturno y casi veinte veces mayor que para Júpiter.

Tabla 55. Tamaño aparente de Urano

Planeta	Tamaño aparente máximo	Aumento necesario para
	(segundos de arco)	producir un disco visible
Marte	25,1	14,3
Júpiter	50,0	7,2
Saturno	20,6	17,5

Urano 4,2 85,7

Por su aspecto, Urano es sólo una pálida estrella perdida entre millares. Incluso con un telescopio perfectamente capaz de presentarnos a Saturno en forma de disco, Urano seguiría pareciendo una estrella. No habría ninguna razón para volver a ocuparse de él una vez anotada su posición, pues no presentaría nada que mereciera especial interés. E incluso si se volviese a él algo más tarde, por una u otra razón, se habría movido tan poco que lo único que pensaría el astrónomo es que había cometido un pequeño error en el cálculo de su posición inicial.

Por eso fue posible que se viera y registrara en varias ocasiones la existencia de Urano sin que nadie sospechara que se trataba de un planeta. En 1690 el astrónomo inglés John Flamsteed (1646-1719) observó a Urano, lo consideró una estrella, registró su posición y hasta le puso nombre. Lo llamó «34 Tauri» porque en aquel momento estaba en la constelación de Taurus, el Toro.

A mediados del siglo XVIII el astrónomo francés Pierre Charles Lemonnier (1715-1799) vio y registró la presencia de Urano en trece ocasiones diferentes y tuvo la impresión de haber visto trece estrellas distintas.

El poco brillo de Urano, que hizo posibles todos estos errores, era consecuencia, en primer lugar, de que estaba a la enorme distancia de 2.869.000.000 kilómetros del Sol. Es decir, casi exactamente doce veces la distancia de Saturno. Urano tarda 84,0139 años en realizar una revolución alrededor del Sol a esa distancia tan enorme, y esto significa un período de revolución 2,85 veces mayor que el de Saturno.

Tanto Saturno como Urano se mueven en órbitas elípticas de escasa excentricidad, 0,0566 en el caso de Saturno y 0,0472 en el de Urano. En el afelio Saturno está a 1.509.000.000 kilómetros del Sol, y en el perihelio Urano está a 2.734.000.000 kilómetros del Sol. Así pues, incluso en su momento de mayor aproximación al Sol, Urano está 1,8 veces más lejos que Saturno en el momento de máximo alejamiento.

Con su descubrimiento Herschel había doblado el diámetro conocido del sistema planetario.

Quirón, el asteroide recientemente descubierto, con su afelio a 2.826.000.000 kilómetros del Sol, se sitúa a una distancia ligeramente inferior a la distancia media de Urano al Sol. Puede ocurrir que Quirón esté más lejos del Sol que Urano, si resulta que Urano está en su perihelio mientras Quirón está en el afelio. En ese caso, Quirón puede estar 92.000.000 kilómetros más lejos del Sol que Urano. Sin embargo, la órbita de Quirón no lleva al asteroide a su afelio en aquella parte de la órbita de Urano en que se sitúa el perihelio del planeta. Por eso la órbita de Quirón no se cruza con la de Urano (véase figura 20).

En un diagrama bidimensional, parece como si Quirón se pudiera acercar mucho a Urano si ambos estuvieran en las partes adecuadas de sus órbitas. Sin embargo, gracias a su inclinación orbital Quirón nunca llega a estar a menos de 290.000.000 kilómetros de Urano.

Por supuesto, el cometa Halley, y muchísimos otros cometas, van mucho más allá de la órbita de Urano, pero nunca se ha visto un cometa a esta distancia del Sol. En realidad, en el momento en que se produjo el descubrimiento de Urano, no se había visto todavía ningún objeto del sistema solar a tanta distancia del Sol.

Una vez conocida la distancia de Urano y medida la anchura de su disco, visto en un telescopio de aumento conocido, era posible calcular su diámetro. La cifra más fiable de que disponemos es de 51.800 kilómetros.

Urano es un planeta gigante comparado con la Tierra, pues tiene 4,1 veces el radio y 67 veces el volumen de la Tierra. Urano es pequeño en comparación con Júpiter y Saturno. Si Urano fuera tan grande como Júpiter, tendría una magnitud de + 3,5, habría sido un astro de brillo medio y es seguro que se habría descubierto mucho antes, quizá incluso en la antigüedad y ciertamente antes de la utilización del telescopio.

Durante mucho tiempo se pensó que Urano se parecía a Júpiter y a Saturno en su período de rotación. El de Urano se había establecido en 10,82 horas, comparables a las 10,23 horas de Saturno y a las 9,83 de Júpiter. Sin embargo, una nueva medición del período de rotación de Urano, efectuada en febrero de 1977, dio como resultado un período de unas 25 horas, que está próximo al de Marte y la Tierra.

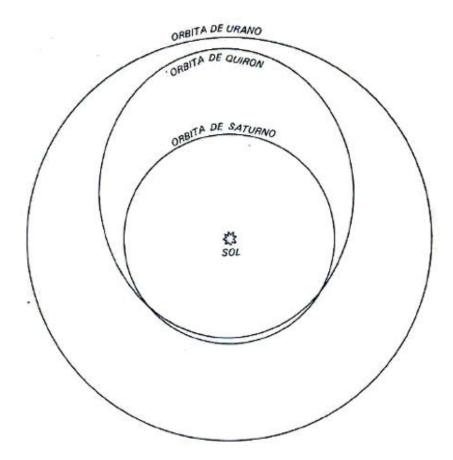


Figura 20. La órbita de Urano.

A favor del período de rotación más prolongado está el hecho de que Urano es mucho menos achatado que Júpiter o que Saturno. El achatamiento de Urano es de sólo 0,01 lo que equivale al doble del de Marte pero sólo a una décima parte del de Saturno. El diámetro polar de Urano es de 51.300 kilómetros.

El que el período de rotación de Urano sea parecido al de la Tierra o al de Saturno tiene menos interés que la forma de inclinación de su eje de rotación. La inclinación es de 97,92 grados, de manera que el eje está casi en el plano de revolución alrededor del Sol (véase figura 21). Dicho en otras palabras, parece que Urano va rodando de lado al girar alrededor del Sol.

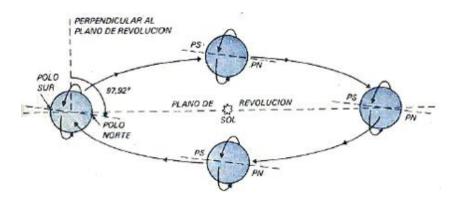


Figura 21. Inclinación del eje de Urano.

Si nos imagináramos situados en la superficie de Urano, con una visión clara de los cielos, el movimiento aparente del Sol nos resultaría sumamente sorprendente.

Si estuviéramos colocados en el polo norte de Urano, por ejemplo, veríamos el Sol casi encima de nosotros si Urano estuviera en aquella parte de su órbita en que el extremo norte de su eje de rotación está dirigido hacia el Sol.

Como el eje no estaría dirigido exactamente hacia el Sol (lo estaría si la inclinación axial fuera de 90 grados en vez de 97,92 grados), el Sol parecería estar a ocho grados del cénit y daría una vuelta a éste cada veinticinco horas.

Al moverse Urano en su órbita alrededor del Sol, la dirección del eje de rotación se iría alejando continuamente del Sol. Este se movería alrededor del cénit no en círculo sino en forma de una espiral que iría ensanchándose muy poco a poco.

La espiral se ensancharía cuatro grados cada año, y al cabo de dieciocho años pasaría rozando el horizonte con un extremo de su círculo. Durante los siete años siguientes se hundiría un poco por debajo del horizonte en un extremo del círculo y se levantaría un poco por encima de él en el otro extremo. Cada día que pasara se hundiría un poco más y se levantaría un poco menos, hasta que al final del período de siete años sólo rozaría el horizonte unos minutos al mediodía y luego desaparecería.

Durante cuarenta años el Sol sería invisible desde el polo norte, y luego reaparecería por el otro extremo del horizonte. Cada día aparecería un intervalo algo mayor, mientras iba subiendo muy lentamente en el cielo, hasta levantarse por encima del horizonte en todos los puntos de su recorrido.

Seguiría subiendo todavía más hasta describir un pequeño círculo de 16 grados de diámetro alrededor del cénit, tras lo cual comenzaría a caer de nuevo, iniciándose otra vez todo el ciclo. Un ciclo entero duraría cuarenta y ocho años.

Desde un lugar situado en el ecuador de Urano, parecerá que el Sol se movía lentamente en espiral, yendo del horizonte norte al horizonte sur y viceversa en cuarenta y cuatro años.

Visto desde Urano, el Sol tiene una anchura aparente de sólo 1,6 minutos de arco. Harían falta veinte objetos del tamaño del Sol tal como se ve desde Urano, colocados uno al lado de otro y tocándose, para cubrir el diámetro aparente del Sol tal y como se ve desde la Tierra.

Visto desde Urano, el Sol sólo sería un punto de luz, algo parecido a Venus visto desde la Tierra —pero mucho más brillante, por supuesto.

Dada la enorme distancia de Urano al Sol, la luz y calor que le llega es sólo 1/368 de la luz y calor que llegan a la Tierra. Aun así, este Sol reducido a un punto es unas 1250 veces más brillante que la Luna llena para la Tierra. Su magnitud sería - 20,5 y sería 40.000.000 veces más brillante que Sirio, la estrella más brillante.

Si alguien, sin ningún conocimiento de astronomía, observara el cielo desde Urano, se daría perfecta cuenta de que el Sol es muy diferente de todas las demás estrellas.

El Sol, tan lejano, no es muy eficaz como fuente de calor para Urano, que tiene una temperatura superficial media de -216° C o de sólo 57° por encima del cero absoluto. Sin embargo, cuando uno de los polos, en el curso de la revolución de Urano, apunta hacia Urano, su hemisferio está un 20 por 100 más caliente que el otro.

Debido a la forma peculiar en que gira Urano, los polos reciben a lo largo del año uraniano más luz solar que el ecuador. Por eso los polos son la zona más cálida de Urano; aunque quizá la forma más correcta de decirlo sería afirmar que los polos son la zona menos increíblemente glacial.

### 3. Los satélites de Urano

En el cielo de Urano no hay planetas brillantes. Saturno es su vecino más próximo y cuando más brillante aparece en el cielo de Urano su magnitud es de sólo 4,5, por lo que tendría aspecto de una estrella bastante pálida.

Sin embargo, además del Sol, hay cinco objetos más brillantes que Saturno y más llamativos que cualquiera de las estrellas del cielo de Urano, pues Urano tiene satélites.

Tras descubrir Urano, Herschel lo vigiló atentamente, y en 1787 percibió dos satélites que giraban a su alrededor. Con el tiempo el interior recibiría el nombre de Titania y el exterior el de Oberón.

Fueron los dos primeros mundos del sistema solar cuyos nombres no estaban tomados de los mitos griegos y romanos. Tirania y Oberón eran la reina y el rey de las hadas en el *Sueño de una noche de Verano* de Shakespeare.

Pero los nombres no eran invención de Shakespeare. Tiranía aparece en el poeta romano Ovidio como segundo nombre de Diana, diosa de la luna. Oberón es una versión francesa de Alberich, rey de los duendes en las leyendas alemanas y escandinavas de la Edad Media, que aparece como gnomo deforme y malicioso en las óperas de Wagner sobre el *Anillo de los Nibelungos*.

En 1851, el astrónomo inglés William Lassell (1799-1880) descubrió dos satélites más, más próximos a Urano que los de Herschel. Recibieron los nombres de Ariel y Umbriel.

Ariel sigue haciendo alusión a Shakespeare, pues representa otra hada de sus obras; en este caso es un espíritu del aire en *La tempestad*. Umbriel es también un espíritu, pero no mencionado por Shakespeare. Aparece en la obra épica bufa de Alexander Pope, *The Rape of the Lock*, y es un espíritu tristón y quejumbroso. Pope inventó el nombre basándose en la palabra latina *umbra*, que significa «sombra».

Finalmente, en 1948, Kuiper (que descubrió la atmósfera de Titán) detectó un quinto satélite, más cerca de Urano que todos los demás, y lo llamó Miranda. Es el único de los cinco satélites que no lleva nombre de espíritu, pero sigue dentro de la tradición shakesperiana, pues Miranda es la heroína de *La tempestad*.

No es extraño que el orden de descubrimiento de estos satélites coincida con el de mayor a menor brillo. Titania y Oberón, los dos descubiertos en primer lugar, en su momento de más brillo son de la decimocuarta magnitud. Ariel y Umbriel, la

segunda pareja descubierta, son de la decimoquinta magnitud. Miranda, de la decimoséptima.

Todos los satélites de Urano giran en círculos casi perfectos alrededor del planeta, y se mueven exactamente en el plano del ecuador del mismo. Esto quiere decir que el plano de revolución de los satélites es más o menos perpendicular al plano de revolución de Urano alrededor del Sol. Fue este extraño movimiento vertical de los satélites lo que dio a los astrónomos la primera pista de que el eje de Urano estaba tan inclinado.

El sistema de satélites de Urano es bastante compacto (véase tabla 56 y figura 22). Incluso Oberón, el más lejano de los satélites de Urano, está más cerca de Urano que Europa de Júpiter, y casi tan cerca como lo está Rea de Saturno. Si Urano tiene satélites que son asteroides atrapados, como ocurre en el caso de Júpiter y Saturno, son demasiado pequeños para que los veamos a la distancia a que se encuentra Urano —al menos por ahora.

Tabla 56. Período de revolución y distancia de los satélites de Urano

Satélite	Período de	Distancia desde Urano	
	revolución		
	(días)	km	Radio de Urano=1
Miranda	1,414	130.000	5,02
Ariel	2,520	192.000	7,41
Umbriel	4,144	267.000	10,3
Titania	8,706	438.000	16,9
Oberón	13,463	586.000	22,6

Por la distancia y período de revolución de un satélite se puede calcular la masa del planeta al que da vueltas. Así, sabemos que la masa de Urano es 14,54 veces mayor que la de la Tierra. Pero eso no es ni 1/6 de la masa de Saturno y ni 1/20 de la de Júpiter.

Dado su volumen y masa, la densidad de Urano es 1,21 veces superior a la densidad del agua. Es una densidad bastante mayor que la de Saturno y muy parecida a la de Júpiter.

Pero esto no significa que Urano tenga necesariamente la misma estructura de Júpiter. Este es un planeta mucho mayor y con mucha más masa, y su intenso campo gravitatorio lo comprime mucho más de lo que pueda estar comprimido Urano. Si Urano tiene la mima densidad que Júpiter cuando su compresión es mucho menor, se deduce que Urano debe contener un porcentaje de hidrógeno y helio inferior al de Júpiter y Saturno y un porcentaje superior de las moléculas más masivas que integran los hielos.

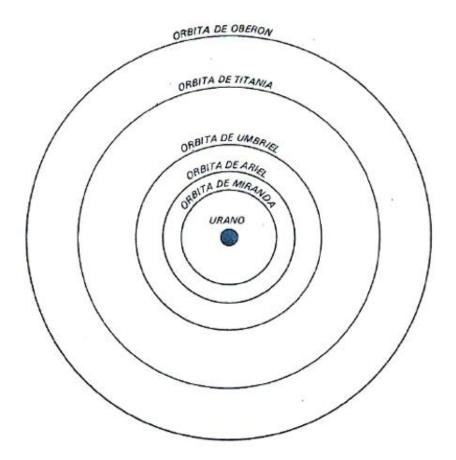


Figura 22. Satélites de Urano.

Teniendo en cuenta la composición de Urano, podríamos imaginar que está constituido de materia de cometas, que es fundamentalmente hielo, es decir, como si fuera un cometoide gigante, lo mismo que la Tierra y los otros planetas interiores

son asteroides gigantescos. Júpiter y Saturno no son ni una cosa ni otra, y se componen de materiales como los que forman el Sol; son estrellas diminutas que no son lo suficientemente grandes como para entrar en ignición nuclear.

Basándose en el espectro de luz reflejada por Urano, Rupert Wildt sugirió en 1932 la existencia de metano en su atmósfera. Urano aparece con un color azul verdoso, probablemente porque su atmósfera contiene grandes cantidades de metano.

Las cifras disponibles sobre las dimensiones y masa de los satélites de Urano son muy poco seguras, pero, por si pueden servir de algo, se indican en la tabla 57.

Tabla 57. Diámetro y masa de los satélites de Urano

Satélite	Diámetro (km)	Masa (Luna=1)
Miranda	240	0,001
Ariel	700	0,018
Umbriel	500	0,007
Titania	1.000	0,059
Oberón	900	0,034

A diferencia de Júpiter y Saturno (y de la Tierra), Urano no tiene ningún satélite de gran tamaño. El mayor de todos, Titania, no pasa de discreto. La masa total de los cinco satélites de Urano es sólo 1/8 de la de nuestra Luna.

Tabla 58. Diámetro aparente de los satélites de Urano vistos en el cielo de Urano

Diámetro aparente (minutos de arco)
6,2
12,8
6,2
7,6
7,1

En la tabla 58 vemos el diámetro aparente de los cinco satélites de Urano tal como se ven desde la «superficie» del planeta. De los cinco, cuatro apenas lograrían

De Saturno a Pluton

distinguirse como orbes diminutos. Sólo Ariel tendría claramente forma de disco, con un diámetro aparente que sería un tercio del de la Luna. Sin embargo, estarían iluminados por el lejano Sol, aunque muy débilmente, y si pudiéramos imaginarnos a los astrónomos de Urano observando el cielo, los cinco satélites llamarían la atención no tanto por su tamaño o brillo como por su rápido movimiento por el cielo sobre el fondo de las estrellas fijas.

En el cielo, visto desde cualquiera de los satélites, estaría Urano, al menos si se mirara desde el hemisferio adecuado, pues es muy probable que todos estos satélites, al girar alrededor de Urano, tengan siempre vuelta hacia el planeta la misma cara.

Desde cualquiera de los satélites, el verdoso Urano parecería enorme en comparación con el tamaño de la Luna vista desde la Tierra (véase tabla 59). Sin embargo, al estar iluminado por la luz de un sol distante y pálido, Urano sólo tendría un resplandor suave y no emitiría tanta luz como podríamos pensar a la vista de su tamaño aparente.

Vistas desde los satélites, las fases de Urano serían francamente complicadas.

Tabla 59. Tamaño de Urano visto desde sus satélites

Satélite	Diámetro de Urano	Área de Urano	Brillo de Urano
	(grados)	(Luna=1)	(Luna=1)
Miranda	22,5	1.870	30,5
Ariel	15,4	890	14,5
Umbriel	11,1	460	7,4
Titania	6,8	170	2,8
Oberón	5,1	100	1,6

Durante un largo período, mientras uno de los polos de Urano estuviera orientado hacia el Sol, Urano estaría en la fase media. Ni esto ni la posición del Sol parecería cambiar.

En realidad, Urano no estaría exactamente en la fase media, y al girar el satélite alrededor de Urano lo vería iluminado algo más de la mitad por un lado y algo

menos por el otro. El límite entre fases oscilaría con un período igual al de la revolución del satélite.

La oscilación aumenta lentamente, y después de veinte años el Sol se sitúa en un punto donde es eclipsado por Urano en cada una de sus revoluciones. Pero luego Urano inicia todo el ciclo de las fases con cada una de las revoluciones del satélite.

Cuando el Sol comienza a salir de más allá de Urano para dirigirse en dirección opuesta, la oscilación del límite entre fases comienza a descender de nuevo, por lo que tras otros veinte años, más o menos, Urano vuelve a situarse casi en la fase media, pero ahora iluminado desde la otra dirección.

El cambio comienza entonces a producirse en dirección contraria, hasta que vuelve a la situación original. El ciclo completo dura cuarenta y ocho años. Desde Urano el único satélite que es lo suficientemente grande como para tener fases más o menos claras, Ariel, sigue un esquema parecido pero en miniatura.

#### 4. Los anillos de Urano

En 1973, el astrónomo inglés Gordon Taylor calculó que Urano se iba a colocar delante de una estrella de magnitud nueve, SAO 158.687. No es frecuente que un planeta se coloque delante de una estrella brillante, aun cuando sólo sea de magnitud nueve (demasiado débil para detectarla a simple vista), y la noticia resultaba de gran interés.

Inmediatamente los astrónomos hicieron preparativos para observar esta «ocultación» que se había previsto para cuatro años más tarde, el 10 de marzo de 1977. Al acercarse Urano a la estrella y pasar por delante de ella, la luz de la estrella atravesaría los límites superiores de la atmósfera de Urano. Al principio la luz de la estrella atravesaría una región de un gas tan tenue que apenas se vería afectada. Sin embargo, al avanzar Urano la luz iría atravesando regiones de la atmósfera cada vez más densas e iría perdiendo brillo hasta quedar totalmente oscura. Al ir pasando Urano, iría apareciendo la estrella, adquiriendo cada vez más brillo hasta recuperar todo el brillo original.

La forma en que la luz estelar fuera apagándose progresivamente en un lado y aumentando en el contrario podría decir a los astrónomos algo sobre la temperatura, presión y composición de la atmósfera de Urano.

El 10 de marzo de 1977, James L. Elliot, de Cornell University, y varios colaboradores subieron a un avión que los llevó por encima de la baja atmósfera, evitando así sus efectos deformadores y oscurecedores. Y allí se prepararon para observar la ocultación.

Antes de que Urano llegara a la estrella, la luz de ésta se redujo durante unos siete segundos y luego volvió a brillar. La intensidad de la luz se midió con un instrumental muy sensible y no había posibilidad de error.

Evidentemente, algo invisible se había situado delante de la estrella y había bloqueado momentáneamente la luz. Podía ser un pequeño satélite, tan pequeño que no se pudiese detectar y que estaba más cerca de Urano que Miranda. En ese caso, era mucha coincidencia que el satélite hubiera seguido su órbita de manera que quedara situado exactamente entre la estrella y la Tierra.

Pero luego, mientras Urano seguía aproximándose a la estrella hubo otros cuatro breves episodios de oscurecimiento cada uno de un segundo. ¿Eran otros cuatros satélites, todavía más pequeños, que habían conseguido situarse en medio de la luz de la estrella? Tal coincidencia era increíble.

Urano pasó finalmente por delante de la estrella, y mientras el planeta se alejaba por el otro lado se produjo el mismo oscurecimiento de la luz pero al revés: cuatro veces cada una de un segundo y luego una quinta que duró siete segundos. (Otros astrónomos que estudiaron a Urano al mismo tiempo también observaron el oscurecimiento.)

La única forma de explicar lo que había ocurrido era hablar, no de satélites, sino de anillos. Urano tenía anillos, como Saturno, sin que nadie hubiera logrado verlos antes. Parecían ser cinco anillos, pero el examen más detenido de otra estrella, todavía menos brillante, delante de la cual pasó Urano el 10 de abril de 1978, reveló un total de nueve. El más interior está a 42.000 kilómetros del centro de Urano, y el más exterior a 50.800 kilómetros.

En comparación con el radio de Urano, el sistema de anillos estaba situado entre 1,62 y 1,96 veces dicho radio, quedando claramente dentro del límite de Roche, como era de esperar (véase figura 23).

135

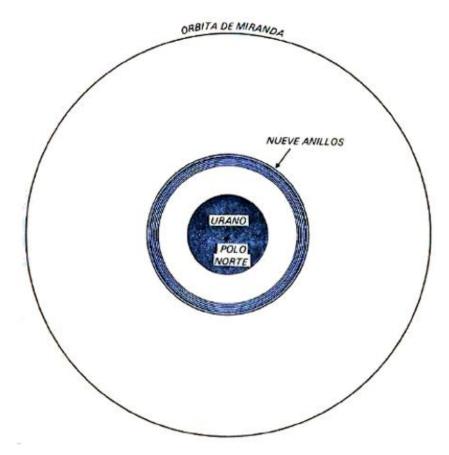


Figura 23. Los anillos de Urano.

¿Por qué se había tardado tanto tiempo en descubrir los anillos de Urano?

Primero, porque Urano está muy lejos. La distancia total que ha de atravesar la luz para ir del Sol a Urano y volver a la Tierra es cuatro veces mayor que la distancia que debe recorrer para ir del Sol a Saturno y volver a la Tierra. En igualdad de condiciones, el sistema de anillos de Urano sólo tendría 1/16 del brillo del de Saturno.

Segundo, porque no se daba esa igualdad de condiciones. Los anillos de Urano eran muy estrechos. Los más finos, que oscurecieron la estrella sólo un segundo cada uno, eran de unos 12 kilómetros de ancho o menos, y el más ancho, el que la oscureció durante 7 segundos, tenía unos 85 kilómetros de anchura. En total, la anchura de los anillos de Urano es de unos 170 kilómetros, en comparación con los 57.000 kilómetros de anchura que tienen en total los anillos de Saturno.

Tercero, porque el material de los anillos de Urano no está tan apretado como el que hay dentro de los anillos de Saturno. Al pasar detrás de los anillos de Urano, la estrella no quedaba totalmente oculta, simplemente se oscurecía.

Cuatro, porque los anillos de Urano no tienen la misma composición que los de Saturno. Estos últimos reflejan más de la mitad de la luz que llega a ellos, y están compuestos, probablemente, de partículas heladas. Los anillos de Urano reflejan menos de una vigésima parte de la luz que llega hasta ellos y deben estar formados por partículas de roca oscura.

Acumulando todas estas diferencias —distancia, anchura, densidad y albedo—podríamos calcular que el total de luz que nos llega desde los anillos de Urano es sólo 1/3.000.000.000 de la luz que nos llega desde los anillos de Saturno.

No es de extrañar que los astrónomos tardaran tanto tiempo en localizar los anillos de Urano. Si no hubiera sido por la afortunada coincidencia de que Urano se pusiera delante de una estrella no demasiado oscura, quizá seguiríamos sin tener conocimiento de su existencia.

# Capítulo 8 Neptuno

### Contenido:

- 1. Descubrimiento de Neptuno
- 2. Los planetas exteriores
- 3. Tritón
- 4. Nereida

# 1. Descubrimiento de Neptuno

Después del descubrimiento de Urano, los astrónomos siguieron con gran interés su posición en el cielo. Si dependiera únicamente de Urano y del Sol, Urano se movería a lo largo de una elipse perfecta que se podría calcular fácil mente. Sin embargo, tanto Saturno como Júpiter ejercían sobre él una pequeña atracción. Cuando, en su desplazamiento alrededor del Sol, alguno de estos planetas se situaba detrás de Urano, la atracción se ejercía hacia atrás y tendía a ralentizar el movimiento de Urano. Cuando uno de estos planetas se colocaba delante de Urano, la atracción se ejercía hacia adelante y tendía a acelerarlo.

Como Saturno y Júpiter se movían cada uno dentro de su propia órbita, la distribución de las atracciones sobre Urano cambiaba de forma constante, y por eso era bastante complicado calcular la posición cambiante de Urano.

En 1821 el astrónomo francés Alexis Bouvard (1767-1843) calculó muy minuciosamente la órbita de Urano. Consideró todas las observaciones realizadas desde el descubrimiento del planeta y a éstas sumó las observaciones que se habían hecho antes del mismo, cuando diversos astrónomos pensaban que estaban determinando la posición de una estrella. Luego volvió a calcular las influencias gravitatorias de Júpiter y Saturno sobre Urano.

Al terminar con todo ello, observó que la órbita que tenía en sus resultados no representaba el movimiento real de Urano. Este era tal que en algunas ocasiones estaba nada menos que 2 minutos de arco alejado de la posición que se le calculaba. Esta discrepancia en su posición sólo correspondía a 1/15 del diámetro

aparente de la Luna, pero era lo suficiente para inquietar a los astrónomos. Sus cálculos debían ser mucho más exactos.

La forma más fácil de explicar esta discrepancia en la posición era suponer que había una fuerza de atracción sobre Urano, además de las de Júpiter y Saturno.

Existía, ciertamente, la atracción de los demás planetas: Marte, la Tierra, Venus y Mercurio. Pero eran demasiado pequeños o estaban demasiado lejos para tenerlos en cuenta. Para explicar el distanciamiento de Urano respecto a su posición debida, tenía que haber un gran planeta que ejerciera la supuesta atracción. Y si dicho planeta estuviera más cerca del Sol que Urano, haría tiempo que se habría visto — indudablemente incluso antes del descubrimiento de Urano.

La conclusión es que tenía que haber un planeta más allá de Urano, que algunas veces lo aceleraba y otras lo ralentizaba, un planeta que todavía no se había descubierto y cuya atracción, por eso mismo, no se había tenido en cuenta.

Ahora sólo hacía falta buscar el planeta hasta encontrarlo. Pero era más fácil decirlo que hacerlo. Urano era apenas perceptible a simple vista, y quedaba tan lejos que hacía falta un buen telescopio para verlo en forma de disco, siendo necesario un detenido estudio día a día para captar su lento desplazamiento sobre el fondo de las estrellas. Un planeta todavía más lejano, a no ser que fuera un gigante increíblemente grande, sería todavía menos brillante, totalmente invisible para el ojo humano, con un disco todavía más pequeño y con una velocidad menor en su movimiento a través del cielo. Todos los signos de un planeta iban a ser muy débiles.

Y lo que es más, cuanto menos brillante es un planeta, más son las estrellas que tienen un brillo parecido al suyo. Un planeta se debe descubrir entre las estrellas que se amontonan a su alrededor, y cuanto menos brillante sea el planeta, mayor es el número de estrellas reveladas por la ampliación del telescopio.

Evidentemente, el descubrimiento de un planeta más distante que Urano iba a ser una tarea muy difícil. Los astrónomos podrían pasarse años rastreando el cielo sin descubrirlo, y pocos eran los que estaban dispuestos a emprender una tarea tan ardua cuando cabía la posibilidad de que no llegaran a encontrar nada.

Pero quizá había alguna manera de saber por adelantado dónde podría estar el planeta. Había indicios de que eso era posible.

En 1766 el astrónomo alemán Johann Daniel Titius (1729-1796) había señalado una interesante relación matemática en las distancias de los planetas. Supongamos, por ejemplo, que comenzamos escribiendo una serie numérica que empieza por 0 y 3 y a partir de ahí vamos doblándolos: 0, 3, 6, 12, 24, 48, 96, 192, 384...

Supongamos luego que sumamos 4 a cada uno de los números: 4, 7, 10, 16, 28, 52, 100, 196, 388... Finalmente, supongamos que tenemos una lista con las distancias medias de los planetas al Sol, contando la distancia de la Tierra al Sol como si fuera de 10. Si comparamos las dos series de números, tendríamos los resultados que se indican en la tabla 60.

Los números de Titius suscitaron poco interés, pero en 1772 Bode (que luego pondría el nombre a Urano) les dio cierta publicidad. A partir de entonces se llamó «ley de Bode», pero en estos últimos años se habla, con mayor precisión, de la «ley de Titius-Bode».

A los astrónomos los números de Titius les parecían interesantes pero inútiles — hasta que se descubrió Urano en 1781. La distancia de Urano al Sol, tomando como unidad la Tierra=10, resultó ser de 191,82, muy próxima al número de Titius, 196. Con esto los números ganaron de repente gran importancia; parecían representar un mapa del sistema solar.

Tabla 60. La ley de Titius-Bode

Planeta	Distancia del Sol	Números de Titius
	(Tierra=10)	
Mercurio	3,87	4
Venus	7,23	7
Tierra	10,00	10
Marte	15,23	16
		28
Júpiter	52,03	52
Saturno	95,39	100
		196
		388

El interés se centró en seguida en el número 28 de Titius, que no estaba representado por ningún planeta. Los astrónomos comenzaron a hablar del «hueco» entre Marte y Júpiter, y a hacer planes para explorar el cielo a la búsqueda de un planeta situado a una distancia equivalente al número 28 de Titius. Poco antes de que comenzara la búsqueda, se descubrió Ceres de forma totalmente accidental (véase *De Ícaro a Hidalgo*) pero la búsqueda siguió adelante y se descubrieron tres asteroides más.

La distancia de Ceres al Sol resultó ser 27,7 tomando como base Tierra=10, es decir, muy próximo a 28. Se descubrieron otros asteroides, es cierto, pero el número 28 representaba, con bastante exactitud, la distancia media de los asteroides al Sol.

Cuando Bouvard señaló la discrepancia en el movimiento orbital de Urano, los astrónomos ya daban por descontado que si había un planeta más allá de Urano, su distancia del Sol debería corresponder más o menos al número 388 de Titius. Esto significaba que estaría dos veces más lejos del Sol que Urano.

Supongamos, pues, que hay un planeta a dicha distancia, y supongamos que su tamaño es parecido al de Urano y que se mueve en una órbita circular alrededor del Sol dentro del mismo plano que la órbita de Urano. Tendría que ejercer sobre Urano una atracción gravitatoria determinada que se podría calcular.

Imaginemos que existiese una atracción gravitatoria sobre Urano que explicara la discrepancia entre su posición y la teoría. Dada esta atracción, quizá se podría ir hacia atrás y determinar la órbita del planeta desconocido y su posición en el momento del cálculo.

En 1841, un estudiante de matemáticas de veintidós años, alumno de la universidad de Cambridge (Inglaterra), abordó el problema y trabajó en él en sus ratos libres. Se llamaba John Couch Adams (1819-1892) y lo terminó para septiembre de 1845. El planeta desconocido —concluyó— debía de estar en un lugar determinado de la constelación de Aquarius el día 1 de octubre de 1845.

Naturalmente, era demasiado esperar que estuviera exactamente en el lugar indicado. El planeta podía ser un poco mayor o un poco más pequeño que Urano, un poco más o un poco menos distante que el número 388 de Titius, su órbita podía ser un poco más excéntrica o tener una mayor inclinación respecto a la eclíptica de

la esperada. Todas estas cosas harían que estuviera en una posición ligeramente diferente —pero quizá no demasiado lejana. Un astrónomo debería examinar con su telescopio una zona en torno a la posición calculada. Sería aburrido, pero mucho mejor que buscar el planeta sin ninguna pista.

Adams dio el resultado de sus cálculos a James Challis (1803-1882), director del Observatorio de Cambridge. Además esperaba que Challis examinara la parte del cielo que él indicaba, pero Challis pensó que tenía cosas más importantes que hacer y se quitó el muerto de encima dando a Adams una carta de recomendación para el Astrónomo Real, George Biddell Airy (1801-1892).

Adams fue dos veces a casa de Airy, y las dos estaba fuera. En una tercera ocasión, Airy estaba cenando y no quiso que le molestaran. Adams dejó allí sus cálculos y cuando Airy los hojeó no le impresionaron demasiado, por lo que el asunto no prosperó.

Mientras tanto, un joven astrónomo francés, Urbain Jean Joseph Leverrier (1811-1877) estaba trabajando también en el problema, de forma totalmente independiente. Terminó su trabajo medio año después que Adams y recibió prácticamente la misma respuesta. También él envió sus cálculos a Airy.

Airy, al recibir dos veces el mismo material procedente de dos personas distintas, se interesó en el tema. Escribió a Challis en julio de 1846 y le pidió que estudiara el cielo en las proximidades de la posición indicada para ver si podía encontrar un planeta.

Challis se resistió a realizar la tarea, pues pensaba que no iba a servir para nada. Tras recibir la petición de Airy pasaron tres semanas antes de que se pusiera a trabajar, y cuando comenzó lo hizo con gran lentitud. Tan poco era su interés que ni siquiera comparó las estrellas observadas un día con las mismas estrellas observadas otro día para ver si alguna de ellas se había movido con relación a las demás —lo cual sería signo seguro de que era un planeta.

Mientras tanto, Leverrier, que no tenía noticia ninguna de Cambridge, decidió probar en otra parte. El 18 de septiembre escribió al Observatorio de Berlín y su director, Encke (el del cometa Encke), pidió a uno de sus astrónomos, Johann Gottfried Galle (1812-1910), que hiciera la comprobación.

Galle estaba de suerte. El Observatorio de Berlín había preparado cuidadosamente una serie de cartas estelares y Galle tenía una muy buena, preparada sólo medio año antes, de la región del cielo donde podía estar el nuevo planeta. Eso significaba que no tenía que observar todas las estrellas día tras día para ver si se había movido alguna de ellas. Lo único que tenía que hacer era observar las estrellas y compararlas con su posición en la carta. Cualquier estrella que estuviera fuera de su posición sería, probablemente, el planeta buscado.

La noche del 23 de septiembre de 1846, Galle se puso a trabajar con su ayudante, Heinrich Ludwig D'Arrest (1822-1875). Galle miraba por el telescopio, moviendo metódicamente su objetivo por el campo de observación, cantando en voz alta las posiciones de las estrellas una por una, mientras D'Arrest comprobaba en la carta esas posiciones. Apenas llevaban una hora de trabajo cuando Galle señaló la posición de una estrella de octava magnitud y D'Arrest contestó con gran emoción: «No está en la carta».

¡Era el planeta! Estaba a menos de un grado del lugar calculado.

Una vez anunciada la noticia, Challis revisó rápidamente sus propias observaciones y comprobó que había visto Neptuno en cuatro ocasiones distintas, pero nunca había comparado las posiciones y por tanto no sabía lo que había visto.

Hubo ciertas discusiones sobre quién era el que merecía el título de descubridor, pero hoy día se suele admitir que lo merecen a partes iguales Adams y Leverrier.

Luego se comprobó que el planeta había sido observado mucho antes de que se pensara que había un planeta más allá de Urano. El 8 de mayo de 1795, cuando sólo habían pasado catorce años del descubrimiento de Urano, el astrónomo francés Joseph Jérôme de Lalande (1732-1807) observó una estrella cuya posición anotó. Dos días más tarde la observó de nuevo y se molestó al ver que había cometido un error al señalar la posición. Registró la nueva posición y se olvidó del asunto. En realidad no había cometido ningún error. La «estrella» se había movido en aquellos días, pues Lalande, sin saberlo, había estado mirando el planeta que estaba más allá de Urano.

¿Cómo se debía llamar el nuevo planeta? Algunos astrónomos franceses propusieron el nombre de «Leverrier», en honor de su descubridor, pero los astrónomos no franceses mostraron unánimemente su desaprobación.

El propio Leverrier, observando que el nuevo planeta era todavía más verde que Urano, propuso el nombre de Neptuno, dios romano del mar verde (equivalente del dios griego Poseidón). Se aceptó la propuesta y con Neptuno se quedó.

# 2. Los planetas exteriores

Cuando se estableció la órbita de Neptuno, se comprobó que era casi circular, con una excentricidad de 0,0086, cifra inferior a la de los demás planetas, con excepción de Venus. La inclinación orbital de Neptuno es de 1,77° en comparación con 0,77° de Urano. En ambos aspectos, la órbita de Neptuno se aproximaba a lo que habían supuesto Adams y Leverrier para simplificar sus cálculos, y esto les había ayudado a dar con una respuesta que estaba muy próxima a los hechos.

Pero en un aspecto Neptuno constituyó una enorme sorpresa. Destruyó la ley de Titius-Bode. Neptuno estaba ciertamente a una enorme distancia del Sol —una distancia de 4.496.600.000 kilómetros. Era una distancia 1,5 veces mayor que la de Urano, pero con eso no bastaba. Si la ley de Titius-Bode se cumpliera a rajatabla, Neptuno debería haber estado a unos 5.800.000.000 kilómetros del Sol (véase tabla 61 y figura 24).

Dada su gran distancia del Sol, Neptuno se movía por su órbita a una velocidad que era menor que la de cualquiera de los planetas anteriormente conocidos y le costaba más tiempo dar una vuelta alrededor del Sol (véase tabla 62). Desde la fecha en que se produjo su descubrimiento, Neptuno no ha tenido todavía tiempo de terminar una vuelta completa a su órbita. Hasta el año 2010 no volverá al lugar de Aquarius donde fue descubierto.

Tabla 61. Distancia de los planetas exteriores

Planeta	Distancia km	Tierra=10	Número de Titius
Júpiter	778.300.000	52,03	52
Saturno	1.427.000.000	95,39	100
Urano	2.869.600.000	191,82	196
Neptuno	4.496.600.000	300,58	388

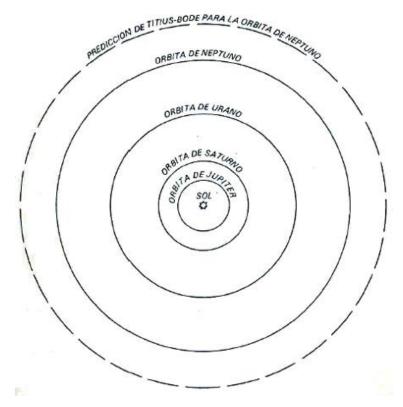


Figura 24. Orbita de Neptuno.

La gran distancia de Neptuno explica la dificultad de su descubrimiento. Las razones son varias. Mientras que, en su momento de máximo brillo, Urano tiene una magnitud de 5,52, la de Neptuno no pasa nunca de 7,84. Por eso el brillo de Neptuno es sólo 1/9 del brillo de Urano, y nunca se puede apreciar a simple vista.

El movimiento aparente de Neptuno par el cielo sólo equivale, por término medio, a 21,5 segundos de arco. Es sólo la mitad del movimiento aparente de Urano. Harían falta 86,5 días para que Neptuno recorriera una distancia igual al diámetro de la Luna, mientras que Urano sólo necesitaría 42,9 días.

Finalmente, el diámetro aparente de Neptuno tiene, como máximo, 2,4 segundos, en comparación con los 4,2 segundos de arco que tiene Urano. Con ampliaciones iguales, Neptuno parece tener sólo tres quintos del diámetro y la tercera parte de la superficie de Urano.

Considerando el menor brillo de Neptuno, su movimiento más lento y su figura más pequeña, eran pocas las probabilidades de que llegara a descubrirse accidentalmente, como Urano. Los cálculos de Adams-Leverrier eran una necesidad.

Conociendo el tamaño aparente de Neptuno y su distancia, se pudo calcular su diámetro, que resultó aproximadamente de la misma magnitud que el de Urano (véase tabla 63). Resultó ser el cuarto planeta que superaba en tamaño a la Tierra. Hasta ahora, los cuatro planetas exteriores, Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno, siguen siendo los únicos cuerpos del sistema solar (sin contar al Sol) que son mayores que la Tierra (véase figura 25). Por esta razón, algunas veces se conocen con el nombre de los cuatro planetas gigantes.

Tabla 63. Diámetros de los planetas exteriores

Planeta	Diámetro (km)	Tierra = 1
Júpiter	143.200	11,23
Saturno	120.000	9,41
Urano	51.800	4,06
Neptuno	49.500	3,88

El período de rotación de Neptuno es tan difícil de determinar como el de Urano. Las mediciones más recientes, tomadas a comienzos de 1977, dan la impresión de que Neptuno, como Urano, gira más lentamente de lo que se había esperado (véase tabla 64).

Tabla 64. Rotación de los planetas exteriores

Planeta	<u>Distancia</u>		Velocidad ecuatorial	Achatamiento
	Horas	Días	de rotación km/s	
Júpiter	9,83	0,41	12,71	0,064
Saturno	10,23	0,43	10,24	0,102
Urano	25	1,05	1,81	0,010
Neptuno	22	0,92	1,96	0,024

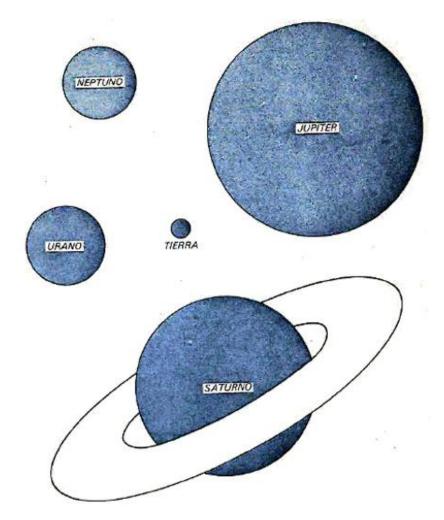


Figura 25. Tamaño relativo de los planetas exteriores.

Aunque Neptuno se parece mucho a Urano por su tamaño, color y período de rotación, hay una diferencia que vamos a mencionar a continuación. El eje de rotación de Neptuno está inclinado 28,8° con relación a la perpendicular al plano de revolución. Es sólo un poco más que la inclinación de los ejes de la Tierra, Marte y Saturno. A diferencia de Urano, Neptuno no va rodando de lado al desplazarse alrededor del Sol.

## 3. Tritón

Neptuno está todavía más aislado que Urano. Desde Neptuno, el Sol tiene un diámetro aparente de sólo 1 minuto de arco, pero este punto parecido a una estrella sigue brillando todavía con una luz que equivale a 515 veces la de la Luna llena vista desde la Tierra. El débil calor del lejano Sol mantiene la «Superficie» de

Neptuno a una temperatura de -228° C o de sólo 45° C por encima del cero absoluto.

Desde Neptuno, Júpiter no se ve nunca a una distancia mayor de 10 grados con relación al Sol, Saturno nunca se aleja más de 18,5 grados, y Urano nunca más de 32,5 grados. Los tres están justo en el límite de la visibilidad natural. En general se puede decir que si el ojo humano estuviera en el nivel superior de la capa de nubes de Neptuno, lo único que vería serían las estrellas fijas, el punto brillante del Sol —y una cosa más.

El 10 de octubre de 1846, menos de tres semanas después del descubrimiento de Neptuno, el astrónomo inglés William Lassell descubrió un satélite del mismo.

El satélite recibió el nombre de Tritón, que era hijo de Poseidón (Neptuno) en la mitología griega. En cierto sentido, el nombre no es muy afortunado. Nos encontramos ahora con que el primero y mayor de los satélites de Saturno es Titán, el primero y mayor de los satélites de Urano es Titania, y el primero y mayor de los satélites de Neptuno es Tritón. No hace falta insistir en la facilidad con que se pueden producir confusiones.

Lo más interesante de Tritón es su magnitud, que en el momento de más brillo es de 13,6. No es mucho, ciertamente, pero Tritón es más brillante que cualquiera de los dos satélites de Urano conocidos por entonces, Titania y Oberón, que tienen magnitudes de 13,9 y 14,1 respectivamente. Teniendo en cuenta que Tritón está 1,5 veces más lejos de la Tierra que Titania y Oberón, y que Tritón está iluminado por una luz solar cuya intensidad no llega a la mitad de la que reciben Titania y Oberón, era evidente que Tritón tenía que ser bastante grande.

Y lo era. El diámetro de Tritón tiene 3.800 kilómetros, lo que equivale a 1,1 veces el diámetro de la Luna. Tritón es mayor que los dos satélites menores de Galileo en Júpiter, pero es más pequeño que Titán, Ganímedes y Calisto.

Fue el primer gran satélite descubierto después de Titán, casi doscientos años antes, y en total era el séptimo. Entre los grandes ocupa una posición superior a la media en cuanto a masa (véase tabla 65). Los siete satélites grandes tienen una masa total que es sólo diez veces mayor que la de la Luna o dos veces mayor que la de Mercurio.

Tabla 65. Masas de los grandes satélites

Satélite	Masa (Luna=1)
Ganímedes	2,027
Titán	1,905
Tritón	1,800
Calisto	1,448
lo	1,213
Luna	1,000
Europa	0,663

Tritón da la vuelta a Neptuno siguiendo una órbita que es casi un círculo perfecto, y su distancia del centro de Neptuno es de 355.000 kilómetros. Está sólo un poco más cerca de Neptuno que la Luna de h Tierra.

A pesar de que Tritón tiene que recorrer aproximadamente la misma longitud de órbita que la Luna, Tritón tarda 5,87.654 días, o aproximadamente una quinta parte menos que la Luna. Esto constituye una clara indicación de que Neptuno tiene una masa bastante superior a la de la Tierra. En realidad, la masa de Neptuno es notablemente mayor que la de Urano (véase tabla 66) a pesar de que Neptuno tiene un tamaño menor.

Tabla 66. Masas de los planetas exteriores

Planeta	Masa (Tierra=1)
Júpiter	317,9
Saturno	95,1
Urano	14,5
Neptuno	17,2

Esta discrepancia se refleja con mayor claridad cuando se considera la densidad de los planetas exteriores (véase tabla 67). Neptuno, que es el más pequeño de los cuatro planetas exteriores, es también el más denso. Aunque en sus regiones exteriores es gaseoso, y aunque en gran parte está compuesto de hielos como

Urano, Neptuno debe tener un núcleo rocoso que, en comparación con su volumen total, es mayor que en el caso de los demás planetas exteriores.

La poco común densidad de Neptuno se refleja también en su gravedad superficial (véase tabla 68).

Tabla 67. Densidades de los planetas exteriores

Planeta	Densidad: Tierra=1	Densidad: Agua=1
Júpiter	0,238	1,31
Saturno	0,128	0,71
Urano	0,219	1,21
Neptuno	0,303	1,67

Tabla 68. Atracción gravitatoria de los planetas exteriores

Planeta	Gravedad superficial	Velocidad de escape
	(Tierra=1)	km/s
Júpiter	2,34	59,5
Saturno	0,93	35,6
Urano	0,79	21,2
Neptuno	1,12	23,6

Cuanto mayor sea la masa de un planeta, mayor será la intensidad de su gravitación. Sin embargo, si se trata de un planeta grande, la superficie está muy alejada del centro y esto disminuye la atracción de la gravedad superficial. Si el planeta tiene una densidad especialmente baja, la superficie estará bastante alejada del centro para la masa encerrada, y la gravedad superficial será sorprendentemente pequeña.

Esa es la razón por la que Saturno, con su densidad extraordinariamente baja, consigue tener una gravedad superficial que es sólo un poco inferior a la de la Tierra, a pesar de tener una masa mucho mayor que la de ésta. Urano, a pesar de ser uno de los mayores planetas, tiene una gravedad superficial que es sólo 4/5 de la de la Tierra.

Sin embargo, Neptuno tiene la densidad suficiente para contar con una gravedad superficial mayor que la de la Tierra. En realidad, de todos los cuerpos del sistema solar sólo el Sol, Júpiter y Neptuno tienen gravedades superficiales mayores que la de la Tierra.

La velocidad de escape es un índice algo más preciso de la masa total. Todos los grandes planetas exteriores tienen velocidades de escape que son mayores que la de la Tierra (que es de unos 11,2 kilómetros por segundo). Incluso Urano, el de menor masa de los planetas exteriores, tiene una velocidad de escape casi el doble de la de la Tierra.

Por otro lado, si consideramos la masa de los planetas exteriores, la masa de Júpiter es 2,5 veces mayor que la de los otros tres planetas exteriores juncos. Los cuatro planetas juntos constituyen el 99 por 100 de toda la materia del sistema solar, descontando al Sol. Los demás planetas (incluyendo a la Tierra), los satélites, asteroides y cometas constituyen entre todos el 1 por 100 restante. Casi se podría decir que el sistema solar se compone de una estrella, dos grandes planetas, dos planetas de tamaño medio y detritos.

Los grandes satélites de Júpiter y Saturno giran todos ellos en el plano del ecuador de su planeta. Tritón, como nuestra Luna, rompe con la norma. La órbita de Tritón parece tener una inclinación de 20 grados con relación al plano del ecuador de Neptuno.

Sin embargo, Tritón sigue su órbita en dirección retrógrada, moviéndose en dirección contraria a la que sigue Neptuno en su rotación. Por eso los astrónomos prefieren decir que la órbita de Tritón tiene una inclinación de 160 grados con relación al plano del ecuador de Neptuno (véase figura 26). Las razones de este hecho permanecen en el misterio.

Si pudiéramos imaginarnos a nosotros mismos en la superficie de Neptuno, veríamos Tritón con una anchura aparente de 37 minutos de arco, o un poquito más ancho que la Luna vista desde la Tierra. La superficie total de Tritón, visto desde Neptuno, es 1,42 veces la superficie de la Luna, vista desde la Tierra. Sin embargo, como la luz del lejano Sol es muy débil, Tritón sólo está iluminado con 1/150 del brillo de nuestra Luna, aun admitiendo el hecho de que estará probablemente helado y reflejará una mayor proporción de la luz recibida que la Luna.

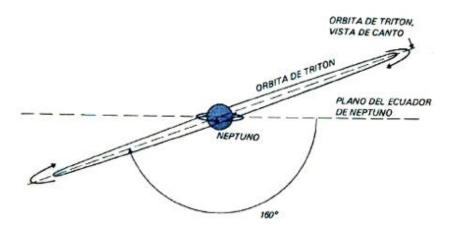


Figura 26. Tritón.

Tritón es el único satélite del sistema solar que, visto desde su planeta, parece mayor que la Luna vista desde el nuestro.

Tritón es también excepcionalmente grande en comparación con el planeta al que da vueltas. La masa de Tritón es 0,0013 veces la de Neptuno, o aproximadamente 1/750. Compárese esto con la masa de Titán, que es sólo 1/4.000 la de Saturno, o con la de Ganímedes, que es sólo 1/12.000 la de Júpiter. Pero en este aspecto Tritón debe ceder el primer lugar a nuestra Luna, cuya masa es 1/81 de la masa de la Tierra.

Desde Tritón, Neptuno brilla en el cielo con una anchura de 8 grados. Así pues, Neptuno tiene una superficie 235 veces mayor que la de la Luna tal y como se nos aparece a nosotros. A pasar de esto, y a pesar de que Neptuno refleja la mitad de la luz que le llega, la que le llega desde el puntito del Sol es tan poca que cuando Tritón ve a Neptuno en su fase llena, recibe de su enorme globo sólo la mitad de la luz que nosotros recibimos de nuestra Luna, mucho más pequeña.

#### 4. Nereida

Durante el siglo que siguió al descubrimiento de Neptuno parecía que Tritón, como nuestra Luna, era un satélite solitario. Ahora bien, dada la enorme distancia de Neptuno era difícil ver algo que no fuera un gran satélite, y no se excluía que hubiera un número de pequeños objetos dando vueltas a Neptuno, aunque demasiado oscuros para que pudiéramos verlos.

En 1949 Kuiper (que había descubierto Miranda, el satélite más interior de Urano, el año anterior) detectó en las proximidades de Neptuno un pequeño objeto cuya magnitud era sólo 19. Un examen detenido demostró que daba vueltas a Neptuno y que era un segundo satélite. Kuiper lo llamó Nereida. Las nereidas eran un grupo de ninfas que, según la mitología griega, estaban al servicio de Poseidón (Neptuno). Como Titán, Nereida hace mención a un grupo de individuos de la mitología, y no a un personaje concreto.

Nereida tiene un diámetro de unos 240 kilómetros (150 millas) y su órbita tiene una inclinación de 28 grados con relación al plano del ecuador de Neptuno. Da vueltas alrededor de él en sentido directo, y sin embargo su órbita no tiene nada de corriente. La órbita de Nereida tiene una excentricidad de 0,75. Es la órbita más excéntrica de todos los satélites del sistema solar.

La distancia media entre Nereida y Neptuno es de 5.562.000 kilómetros. En uno de los extremos de su alargada órbita, Nereida se aproxima a 1.390.000 kilómetros de Neptuno. En el otro extremo se precipita hacia el espacio y llega a una distancia de 9.374.000 kilómetros de Neptuno, es decir, siete veces más lejos (véase figura 27).



Figura 27. Nereida

Para realizar una vuelta completa alrededor de Neptuno, recorriendo esta enorme elipse, Nereida necesita 359,88 días, o 0,985 años. En su punto de mayor distancia a Neptuno, Nereida se mueve a una velocidad orbital de sólo 0,84 kilómetros por segundo. Esto equivale a sólo 4/5 de la velocidad orbital de nuestra Luna. Nereida es, por el momento, el único satélite conocido del sistema solar que se mueve en algún momento con una velocidad orbital inferior a la de nuestra Luna.

Desde Neptuno, Nereida podría aparecer en el cielo como una estrella más; y además no excesivamente brillante. En su momento de máxima aproximación, sería una de las estrellas de magnitud 2, aproximadamente tan brillante como la Estrella Polar. Luego se iría borrando de la vista al ir alejándose, hasta que, en su punto de mayor distanciamiento, sería de sexta magnitud, estando en los límites de la visibilidad para una persona con buena visión.

Desde Nereida, Neptuno cambia espectacularmente de tamaño a lo largo de la revolución anual del satélite. Cuando Nereida está más cerca de Neptuno, el planeta aparecería en su cielo con un diámetro de 2 grados, y con una superficie aparente unas quince veces superior a la de nuestra Luna, pero con una irradiación total de sólo 1/8.

Luego, el globo de Neptuno se iría reduciendo lentamente con el paso de los días hasta que, medio año más tarde, cuando Nereida estuviera en su punto más distante, Neptuno sólo tendría 0,3 grados de anchura, con una superficie de 1/3 la de la Luna y un brillo de sólo 1/350 el de la misma.

Nereida, como Febe y los pequeños satélites de Marte y Júpiter, parecería un asteroide capturado. Su tamaño reducido, su órbita sumamente alargada y su considerable inclinación orbital lo confirmarían.

Sin embargo, si Nereida es un asteroide capturado, ¿cómo es que pudo llegar tan lejos, hasta las proximidades de Neptuno? El hecho de que llegara parece confirmar la noción de que los confines más exteriores del sistema solar pueden contener un gran número de asteroides que, si son invisibles para nosotros, es debido únicamente a su distancia.

De estos asteroides, el primero en descubrirse fue Febe, el segundo Nereida y el tercero Quirón. Este último es el único de los tres que no es, todavía, un satélite.

No es extraño que Febe y Nereida fueran descubiertos antes que Quirón, pues los alrededores de un planeta se estudian con mayor detención que los espacios vacíos. Si pudiéramos estudiar todas las partes del zodiaco con el mismo interés con que estudiamos las proximidades de los planetas, puede ser que descubriésemos docenas de Quirones.

# Capítulo 9 Plutón

#### Contenido:

- 1. El descubrimiento de Plutón
- 2. La órbita de Plutón
- 3. El tamaño de Plutón

#### 1. El descubrimiento de Plutón

Tras descubrir que más allá de Saturno estaba Urano, y que más allá de Urano estaba Neptuno, era inevitable que los astrónomos se preguntaran si no había algo más. ¿Habría otro planeta más allá de Neptuno?

En caso de que lo hubiera, sería muy difícil encontrarlo. Sería mucho más pálido que Neptuno, su movimiento sería todavía más lento, tendría una superficie aparente aún más pequeña, y quedaría difuminado por un número mayor de estrellas tan brillantes como él o más.

Aunque existiera, no había muchas esperanzas de descubrirlo, a menos que se tuviera cierta idea de dónde podría estar.

Algo así había dado buenos resultados con Neptuno, que había sido detectado en el lugar donde le correspondía estar para explicar las discrepancias en el movimiento de Urano. ¿Había ahora discrepancias en el movimiento de Neptuno que pudieran servir de pista para localizar otro planeta?

La pega es que cuanto más lejos está del Sol un planeta, tanto más tiempo necesita para dar una vuelta a su alrededor. La precisión con que los astrónomos pueden detectar imperfecciones en el movimiento orbital depende de la fracción de la vuelta que ha realizado el planeta.

Urano rodea al Sol en ochenta y cuatro años, y en 1846, cuando se descubrió Neptuno, Urano venía siendo observado desde hacía sesenta y cinco años, es decir, durante 0,77 de su período de revolución. Además, antes de su verdadero descubrimiento, Urano había sido detectado en varias ocasiones.

Sin embargo Neptuno tarda 165 años en dar la vuelta al Sol, y al llegar el año 1900 sólo hacía cincuenta y tres años que se venía observando sin interrupción, y sólo había realizado 0,32 de su revolución. Así pues, al inaugurarse el siglo XX, la órbita

de Neptuno no era conocida con la precisión suficiente como para que pudiera ser de utilidad en la localización de un planeta todavía más distante.

¿Y qué pasaba con Urano? Al comenzar el siglo, había sido observado durante 1,4 de sus revoluciones. Una vez tenida en cuenta la atracción de Neptuno, quedaba explicado algo así como el 98 por 100 de la discrepancia de su órbita, pero todavía quedaba un 2 por 100 sin explicar.

Algunos astrónomos intentaron tomar esta discrepancia residual como guía, aunque era demasiado pequeña para dar resultados muy fiables. Los dos cálculos más detallados fueron los de los astrónomos americanos Percival Lowell (1855-1916) y William Henry Pickering (1858-1938).

En sus cálculos Lowell llegó a concluir que había un planeta situado más allá de Neptuno que debía tener una órbita muy inclinada y elíptica. Calculó que su distancia del Sol variaría desde 5.100.000.000 kilómetros en el perihelio hasta 7.700.000.000 kilómetros en el afelio. Por el contrario, Pickering calculó la existencia de un planeta con una órbita menos inclinada o elíptica, pero mucho más alejado del Sol de lo que estaría el planeta imaginado por Lowell.

Dadas las órbitas, cada uno de ellos podía predecir la posición aproximada de su propio planeta en un momento determinado. En teoría, lo único que haría falta sería rastrear el cielo en la zona indicada y tropezar con alguna estrella que, según los mapas estelares, no debiera encontrarse allí; pero la cosa no era tan fácil como parece.

Neptuno era de magnitud ocho y el número de estrellas de magnitud equivalente o superior, no era excesivo, por lo cual era posible controlarlas todas, una por una, en un tiempo razonable. Un planeta más distante sería más oscuro y debería buscarse entre un número de estrellas mucho mayor. Ciertamente, los astrónomos de 1900 tenían la fotografía para registrar un campo de estrellas de forma permanente, ventaja de la que no gozaban los astrónomos de 1846; pero aún así la tarea habría sido pesada y difícil.

Pickering, tras hacer su predicción, no se esforzó demasiado en confirmarla, mientras que Lowell se entregó a ello con un entusiasmo arrollador. Trabajó en el Lowell Observatory, que él mismo había construido en la diáfana atmósfera del desierto de Flagstaff (Arizona). Su procedimiento de trabajo consistía en tomar una

fotografía de una parte del cielo en la región donde pensaba que podía estar el planeta, luego otra fotografía de la misma región tres días más tarde. Incluso un movimiento tan lento como el de un planeta situado más allá de Neptuno produciría en tres días un cambio perceptible de posición.

Con las dos fotografías, Lowell iba comparando las numerosas estrellas de la una con las de la otra, en un intento lento y minucioso de comprobar si alguna había cambiado de posición. Y así siguió durante unos once años, inclinado incansablemente sobre sus placas, examinándolas detenidamente con una lupa y estudiando y comparando aquellos puntos insignificantes.

En muchas ocasiones encontró un cambio, pero siempre se trataba de una variación demasiado grande que correspondía a un asteroide. Cuando tenía que ausentarse del laboratorio, sus ayudantes continuaban la búsqueda, mientras que él les escribía frecuentemente para pedir información y revisaba todas las placas al regresar, haciendo una segunda comprobación.

El esfuerzo lo fue agotando, le hizo perder peso y la paz interior, y murió repentinamente el 12 de noviembre de 1916, contando sólo sesenta y un años de edad. No había conseguido encontrar ningún nuevo planeta.

Tras la muerte de Lowell, el astrónomo americano Milton La Salle Humason (1891-1972) prosiguió la búsqueda. Utilizó las cifras de Pickering, y tampoco consiguió nada.

El siguiente astrónomo que continuó la tarea iniciada fue otro americano, Clyde William Tombaugh (1906-), que trabajó en el Lowell Observatory, donde proseguía la búsqueda del planeta «trans-neptuniano».

Tombaugh comenzó en 1929 y tuvo la ventaja de contar con un nuevo telescopio que poseía un campo muy amplio y podía fotografiar con precisión todas las estrellas situadas en una zona del cielo mucho más ancha que los telescopios anteriores. Utilizando una exposición de una hora, se podían registrar hasta las estrellas de magnitud diecisiete, y era seguro que el planeta «trans-neptuniano», si existía, tendría brillo de sobra para ser detectado.

Tombaugh empezó por tomar fotografías del campo de estrellas situado en la región donde, según los cálculos de Lowell, podía estar el planeta. En cada placa había muchos millares de estrellas.

La tarea habría seguido siendo prácticamente imposible de no ser por otro avance técnico. Tombaugh tenía el «comparador de destellos», que Lowell no llegó a utilizar.

Este aparato proyecta luz a través de una placa tomada un día determinado y luego a través de otra placa de la misma región tomada unos días más tarde, haciéndolo en rápida alternancia. Las placas se ajustan de forma que las estrellas de ambas queden localizadas en el mismo lugar. Las verdaderas estrellas del campo fotografiado estarían exactamente en la misma posición relativa y producen una proyección idéntica. La alternancia es tan rápida que el ojo no detecta las intermitencias y sólo aprecia una imagen fija y constante.

Sin embargo, si hubiese algún planeta, se habría movido entre una fotografía y la siguiente, y con el procedimiento indicado se vería cómo alternaba rápidamente entre una y otra posición. El planeta parpadearía con gran rapidez, mientras que los demás objetos parecerían puntos inmóviles.

No hacía falta comparar cada una de las innumerables estrellas de una placa con cada una de las de la otra. Bastaba con estudiar cada parte de la placa para observar aquel ligero parpadeo y cerciorarse de que el movimiento era demasiado pequeño para estar causado por un asteroide.

En febrero de 1930 Tombaugh estaba trabajando en la región limítrofe entre Taurus y Géminis. Allí las estrellas formaban una red especialmente densa y había que manejar placas que incluían hasta 400.000 estrellas. Tombaugh decidió tomarse un respiro y pasar al otro extremo de Géminis, donde no había tal acumulación de estrellas y las placas sólo contenían unas 50.000.

A las 4 de la tarde del 18 de febrero de 1930 detectó un parpadeo. Era un objeto con una magnitud de 14,90 y el cambio era pequeño, sólo de 3,5 milímetros. Con un cambio tan pequeño tenía que ser un planeta situado más allá de Neptuno. Buscó fotografías anteriores de la zona para ver si podía localizar una «estrella» que pareciera haberse movido de forma constante. Como sabía dónde fijarse, no tuvo problemas para encontrarla y seguir su trayectoria de planeta.

El descubrimiento del planeta «trans-neptuniano» fue comunicado oficialmente el 13 de marzo de 1930, que era el 149 aniversario del descubrimiento de Urano y el setenta y cinco aniversario del nacimiento de Percival Lowell.

Algunos propusieron el nombre de «Lowell» para el nuevo planeta, pero la propuesta no cuajó. Hacía falta un nombre mitológico, y se eligió el de Plutón.

La denominación era adecuada, porque el nuevo planeta, más alejado del Sol que todos los anteriores, estaba tan inmerso en las tinieblas del espacio como para llamarse igual que el dios mítico del oscuro mundo inferior. Además, las dos primeras letras del nombre eran las iniciales de Percival Lowell.

Tras el anuncio del descubrimiento, Humason revisó las placas de aquella misma región del cielo que había tomado unos años antes para ver si en alguna de ellas aparecía Plutón. Estaba en dos de ellas, pero no podía verse en ninguna de las dos. En una ocasión había quedado borrado por una estrella cercana, más brillante que el planeta. La segunda vez su imagen coincidió casualmente con un pequeño defecto de la placa.

## 2. La órbita de Plutón

Luego hubo sorpresas. Plutón no era el planeta que habían estado buscando Lowell y Pickering, pues su órbita resultó bastante diferente de la que ellos habían calculado. El que Plutón estuviera precisamente en un lugar próximo al que habían señalado sus cálculos debió ser coincidencia más que otra cosa. Dio la casualidad de que estaba en una parte de su órbita real que rozaba la órbita calculada por Lowell. Si hubiera estado en otra parte cualquiera de su órbita, habría estado lo suficientemente lejos de la órbita calculada como para no haber quedado en la zona que Tombaugh se había propuesto examinar.

En primer lugar, Plutón no estaba tan lejos como habían pensado Pickering y Lowell. Pickering había supuesto que su distancia media del Sol sería de 7.800.000.000 kilómetros y que tendría un período de revolución de 373 años. Según Lowell, la distancia media sería sólo de 6.400.000.000 kilómetros y tendría un período de revolución de 282 años.

En realidad, la distancia media de Plutón al Sol es sólo 5.900.000.000 kilómetros y su período de revolución de 247,7 años únicamente.

Aun así, Plutón es el planeta más lejano conocido hasta ahora. Su distancia media del Sol es casi un tercio mayor que la de Neptuno, y más de cuatro veces mayor

que la de Saturno, que, sólo siglo y medio antes del descubrimiento de Plutón, pasaba por ser el límite del sistema solar visible.

El período de revolución de Plutón es 1,5 veces más largo que el de Neptuno y 8,4 el de Saturno.

Y ahí no acabaron las sorpresas. Resultó que el plano de la órbita de Plutón tiene una inclinación de 17,2 grados, que es, con mucha diferencia, la mayor inclinación conocida en un planeta. (Hasta entonces, había ostentado el récord Mercurio, que tiene una inclinación de 7,0 grados.) Además, la excentricidad de la órbita de Plutón es también un récord planetario, pues es de 0,250. (El récord anterior lo tenía también Mercurio, con 0,2056.)

Debido a esta excentricidad, en el perihelio Plutón está sólo a 4.400.000.000 kilómetros del Sol. En el extremo opuesto de su órbita, en el afelio, está a 7.400.000.000 kilómetros del mismo.

Al aproximarse al perihelio, Plutón está más cerca del Sol que Neptuno en cualquier punto de su recorrido, y está unos 100.000.000 kilómetros más cerca del Sol que aquél. El resultado es que cuando se traza un diagrama del sistema solar exterior visto desde arriba (véase figura 28), la órbita de Plutón parece cruzar la de Neptuno en uno de los extremos.

Pero esto no significa que Neptuno y Plutón puedan llegar a chocar entre sí al acercarse ambos al punto de intersección al mismo tiempo. En realidad no hay tal intersección. La inclinación de la órbita de Plutón es tal que cuando parecen cruzarse las dos órbitas, un planeta está muy por encima del otro (véase figura 29). Cuando se cruzan las dos órbitas, están separadas por una distancia de 1.400.000.000 kilómetros. Y lo que es más, los movimientos reales de Neptuno y Plutón se producen de tal manera que nunca están al mismo tiempo en el punto de «intersección» ni en sus proximidades. La distancia menor entre los dos planetas es de unos 2.500.000.000 kilómetros. De hecho, Plutón puede llegar a acercarse a Urano más que a Neptuno. Plutón puede acercarse a Urano hasta quedar separados únicamente por 1.600.000.000 kilómetros.

Así pues, durante un período de unos veinte años, en las proximidades de su perihelio, Plutón estará más cerca del Sol que Neptuno, por lo que este último sigue siendo todavía el planeta más lejano durante el 10 por 100 del tiempo. Plutón

estará en el perihelio en 1989, por lo que en lo que queda del siglo XX verá brillar el Sol con tanta intensidad como Neptuno.

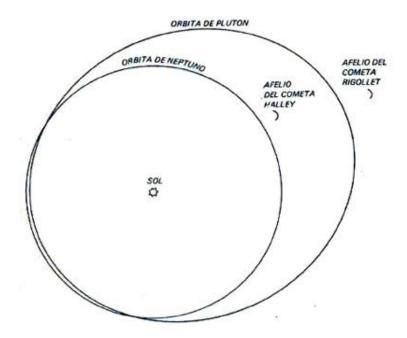


Figura 28. Orbita de Plutón.

Pero luego se irá alejando hacia el afelio, a donde llegará en el año 2113. Para Plutón, cuando está en el afelio, el Sol tiene sólo 1/2.450 del brillo que tiene para nosotros. Aun entonces, el Sol envía a Plutón 190 veces más luz que la Luna llena a la Tierra.

El cometa Halley llega en el afelio a una distancia de sólo 5.240.000.000 kilómetros del Sol. Esto queda mucho más allá que la órbita de Neptuno y más allá que Plutón en su perihelio. Sin embargo, la distancia del cometa Halley en el afelio es sólo siete décimas partes de la distancia de Plutón en el afelio.



Figura 29. Neptuno y Plutón.

El cometa Rigollet, el que tiene la órbita conocida más larga, está, en el afelio, a 8.500.000.000 kilómetros del Sol, y está 1,15 veces más lejos que Plutón en su punto de mayor distanciamiento. En el afelio, un observador que estuviera en el cometa Rigollet vería el Sol con un brillo equivalente a sólo 140 veces el de nuestra Luna llena.

Otros cometas cuyas órbitas no se han podido precisar con exactitud llegan sin duda ninguna a distancias todavía mayores, y es posible que haya gran número de ellos que permanecen siempre a distancias enormes, por lo que nunca los vemos. Un cometa situado a una distancia de 100.000.000.000 kilómetros del Sol —doce veces la distancia del cometa Rigollet en el afelio— no recibiría del Sol más luz que la que a nosotros nos llega de la Luna llena, y a mayores distancias todavía menos. Para los cometas muy distantes es muy posible que el Sol sólo parezca una estrella brillante, sólo algo más brillante que Sirio.

### 3. El tamaño de Plutón

En el momento del descubrimiento de Plutón, cuando se supo que su magnitud era de 14,90, surgió una sospecha inquietante. Aquello era demasiado poco. Si Neptuno estuviera en la posición del afelio de Plutón, su magnitud sería todavía 10, aproximadamente. El que Plutón fuera tan poco brillante debía significar que era considerablemente más pequeño que Neptuno.

Al principio se pensó que Plutón podría ser cuando menos del tamaño de la Tierra, pero en 1950 Kuiper consiguió ver Plutón como un disco diminuto y, midiendo su tamaño aparente, calculó su diámetro en 5.800 kilómetros. Es decir, menos que el diámetro de Marte.

Los astrónomos se resistían a creerlo y algunos trataron de descubrir dónde estaba el error de Kuiper. Sin embargo, el 28 de abril de 1965 Plutón pasó muy cerca de una estrella muy débil, y allí acabaron todas las dudas. El centro de Plutón estaba pasando tan cerca de la estrella que si su diámetro hubiera sido mayor que el de Marte, el perfil de Plutón se habría colocado delante de la estrella y la habría tapado. Sin embargo la estrella seguía brillando, por lo que, definitivamente, Plutón era más pequeño que Marte.

En realidad, lo único que puede pasar es que su tamaño sea todavía menor que el indicado. En 1976, los análisis de la luz reflejada en él hicieron pensar que tiene una superficie cubierta de metano congelado. Pero cuando se forma un objeto como Plutón, se calienta durante ese proceso, y si fuera del tamaño de la Tierra, o incluso de Marte, se habría calentado lo suficiente como para vaporizar el metano, y su pequeña gravedad no habría sido capaz de retenerlo. Cuanto menor es un cuerpo menos se calienta en el periodo de su formación, y para retener el metano Plutón debería ser bastante más pequeño que nuestra Luna —en pocas palabras, tendría tamaño de satélite, y no de planeta. En la actualidad la temperatura superficial de Plutón quizá sea de -233° e o sólo 40° e por encima del cero absoluto.

Es claro que un objeto del tamaño de Plutón, que nunca llega a aproximarse a Urano a menos de 1.600.000.000 kilómetros, no podría explicar las pequeñas discrepancias que se aprecian en la órbita de Urano. Sea lo que sea, Plutón no es el planeta cuya presencia calcularon Lowell y Pickering a partir de aquellas discrepancias.

¿Significa esto que existe allá lejos un «auténtico» planeta «trans-neptuniano» y que es la causa de las discrepancias orbitales que siguen existiendo en el movimiento de Urano? En ese caso, lo probable es que esté más alejado que Plutón y que su masa sea considerablemente mayor que la de éste.

A pesar de su mayor distancia, este planeta trans-neptuniano sería más brillante que Plutón y manifestaría una superficie aparente mayor, pero se movería más lentamente que Plutón y eso haría más difícil su detección. En el caso de los planetas muy distantes, lo que los pone de manifiesto es el movimiento, y no el brillo o apariencia.

En 1955 se observó que la magnitud de Plutón variaba ligeramente de forma regular. El período de variación es de 6,3874 días, y en general se piensa que esa cifra representa su período de rotación. Es posible que su superficie esté cubierta de metano de forma irregular, por lo que el brillo sube cuando aparece a la vista el hemisferio más helado y luego baja cuando aparece el más rocoso.

Es un período de rotación sorprendentemente lento. Desde luego, no tanto como el de Mercurio y Venus, pero estos dos últimos cuerpos están próximos al Sol y los

efectos de marea han ralentizado su rotación. ¿Qué efecto de marea podría haber ralentizado la rotación de Plutón?

El astrónomo inglés Raymond Arthur Lyttleton insinuó que el culpable podía ser Neptuno. Quizá Plutón, que no es mayor que Tritón, fue algún tiempo satélite de Neptuno, como Tritón, y los efectos de marea de Neptuno habrían ralentizado la rotación de Plutón hasta hacer que diera siempre a Neptuno la misma cara. En ese caso, su período de rotación sería igual a su período de revolución alrededor de Neptuno.

Pero en ese caso Neptuno habría tenido la gran singularidad de poseer dos grandes satélites situados a distancias casi iguales. Tritón, a una distancia de 355.000 kilómetros da la vuelta a Neptuno en 5,88 días. Para que Plutón diera la vuelta en 6,39 días, tendría que estar a una distancia de 375.000 kilómetros.

El tener dos grandes satélites muy próximos podría haber suscitado cierta inestabilidad. Algo ocurrió que hizo que Plutón saliera despedido hacia afuera hasta su órbita actual, mientras que la órbita de Tritón se inclinaba de forma tan pronunciada que lo obligó a continuar su revolución de forma retrógrada.

Esta sugerencia, aunque interesante, plantea muchos problemas. ¿Qué fue exactamente lo que causó aquella catástrofe? ¿Cómo pudo hacer entrar a Plutón en una órbita que lo mantenía tan alejado de Neptuno en todo momento? ¿Cómo pudo sufrir tanto la órbita de Tritón y a pesar de todo seguir siendo casi perfectamente circular?

Después, el 22 de junio de 1978, se hizo un descubrimiento que parecía explicarlo todo. Ese indicado, el astrónomo americano James W. Christy, examinando fotografías de Plutón, observó una protuberancia en uno de los lados. Examinó otras fotografías y finalmente llegó a la conclusión de que Plutón tenía un satélite. Estaba muy cerca de Plutón, con no más de 20.000 kilómetros de distancia de un centro a otro. Dada la distancia de Plutón, la separación es pequeña, lo que explica el retraso en su descubrimiento.

Christy puso al satélite el nombre de Caronte, el barquero que llevaba a los muertos hasta el Hades atravesando el río Estigia. (Es un nombre poco afortunado, pues hacía poco que se había descubierto Quirón y los dos nombres se prestan a confusión [sobre todo en inglés: Charon/Chiron].)

164

Caronte da la vuelta a Plutón en 6,39 días, que es precisamente el tiempo que tarda Plutón en girar sobre su eje. No se trata de una coincidencia. Lo que debió de ocurrir es que los dos cuerpos, Plutón y Caronte, se han ralentizado mutuamente por la fuerza de marea hasta hacer que cada uno de ellos mire siempre al otro con la misma cara. Ahora giran alrededor de un centro común de gravedad como las dos mitades de unas pesas unidas por la atracción gravitatoria.

Conociendo la separación y el tiempo de revolución, es posible establecer la masa total de ambos cuerpos; resulta ser sólo 1/8 de la masa de la Luna, aproximadamente.

Plutón es mucho más pequeño de lo que nadie había imaginado. De hecho, Plutón debe tener unos 3.000 kilómetros de diámetro y Caronte unos 1.200 kilómetros.

Caronte quizá tenga hasta un 10 por 100 de la masa de Plutón, lo que hace que los dos cuerpos sean prácticamente un doble planeta —mucho más de lo que puedan serlo la Tierra y la Luna, pues esta última sólo tiene aproximadamente 1,2 por 100 de la masa de la Tierra.

Nos resulta difícil pensar en Plutón como planeta. Quizá sea uno más de los cuerpos parecidos a Quitón que pueden inundar el sistema solar exterior. En ese caso, ya conocemos cinco de ellos: Quitón mismo, Febe, Nereida, Plutón y Caronte.

Los descubrimientos recientes de los anillos de Urano, de Quirón y de Caronte deberían convencernos de que allá lejos hay sorpresas y es probable que se descubran muchas más cosas. Y desde luego sigue habiendo enigmas.

¿Qué tamaño tienen las partículas de los anillos de Saturno, por ejemplo, y de qué se componen? ¿Cómo es la superficie de Titán, considerando que es el único satélite del que sabemos que tiene atmósfera?

¿Por qué gira Urano de costado?

¿Por qué Febe y Nereida tienen unas órbitas tan extrañas? ¿Hay en el sistema solar exterior nuevos objetos, como Quitón?

¿Por qué gira Tritón en forma retrógrada?

¿Cómo son, en sus menores detalles, los anillos de Urano, y los tiene también Neptuno?

¿Qué más cosas podemos averiguar sobre Plutón y Caronte?

Cualquiera que sea el mensaje de las sondas enviadas, no cabe duda de que nos producirá satisfacción y asombro.

### Glosario

Abultamiento ecuatorial: Engrosamiento adicional de un planeta en las regiones ecuatoriales debido al efecto centrífugo de su rotación.

Achatamiento: Aplastamiento de un planeta, que deja de ser totalmente esférico debido a la fuerza centrífuga de la rotación.

Afelio: Punto de la órbita de un planeta donde mayor es su distancia del Sol.

Agua: Sustancia con moléculas que se componen de dos átomos de hidrógeno y un átomo de oxígeno (H2O).

Albedo: Fracción de la luz solar reflejada por un planeta o satélite.

Amoniaco: Sustancia con moléculas que se componen de un átomo de nitrógeno y tres átomos de hidrógeno (NH3).

Angulo: Figura formada cuando dos líneas rectas se encuentran en un punto o cuando dos planos se encuentran en una recta.

Área: Medida de la superficie de cualquier objeto.

Argón: Gas que constituye el 1 por 100 de la atmósfera de la Tierra.

Asteroide: Planeta pequeño.

Asteroides troyanos: Asteroides que se mueven en la órbita de Júpiter, pero 60 grados por delante y por detrás de Júpiter.

Atmósfera: Capa de gases que rodean a un planeta, satélite o estrella.

Azufre: Sustancia sólida amarilla.

Cabellera: Neblina de polvo y gas que rodea a la región central de un cometa.

Campo magnético: Región en la que se hacen notar las fuerzas electromagnéticas.

Carbono: Sustancia sólida negra; uno de los elementos que abundan en el universo.

Cinturón de asteroides: Región entre las órbitas de Marte y Júpiter donde se encuentran la mayoría de los asteroides.

Circunferencia: Longitud total de la curva de un círculo o forma semejante; longitud de una curva trazada alrededor de la parte más ancha de una esfera o forma semejante.

Cometa: Objeto que se mueve alrededor del Sol con una órbita excéntrica y cuyos materiales, al calentarse cuando se acercan al Sol salen despedidos del cometa formando una «cola».

Cometas de periodo largo: Cometas que, en el afelio, van mucho más lejos que los planetas y que no regresan al sistema sola r interior más que una vez en centenares de miles de años o que permanecen siempre a esas distancias tan enormes.

Cometoide: Cometa tan alejado del Sol que toda su sustancia es sólida y dura.

Comparador de destellos: Instrumento que sirve para proyectar dos fotografías de la misma región del cielo con rápidos movimientos de alternancia para ver si un objeto cambia de posición.

Densidad: Masa de un objeto dividida por su volumen.

*Diámetro*: Longitud del segmento que atraviesa la parte más ancha de un círculo o esfera y que pasa por el centro del círculo o esfera.

Diámetro ecuatorial. Diámetro que va de un punto situado en el ecuador al punto opuesto del mismo.

Diámetro polar: Diámetro que va del polo norte al polo sur.

Dióxido de carbono: Gas que existe en pequeñas cantidades en la atmósfera de la Tierra; aparece en las atmósferas de Marte y de Venus en grandes cantidades.

*Eclipse*: Ocultamiento de la visión de un objeto celeste por otro objeto que se coloca delante de él.

*Eclíptica*: Plano que pasa por el centro del Sol y por todos los puntos de la órbita de la Tierra.

Ecuador: Circunferencia que está a mitad de camino entre los dos polos de un objeto que gira.

Efecto centrifugo: Tendencia de todo objeto que gira alrededor de un centro a alejarse de dicho centro.

Efecto de marea: Forma en que la gravitación de un cuerpo afecta de distinta manera a las distintas partes de otro cuerpo, deformando así al segundo cuerpo.

Eje de rotación: Línea recta imaginaria en torno a la cual gira un objeto.

Eje mayor: Diámetro que pasa por los focos y el centro de una elipse.

Eje menor: Diámetro de una elipse que está en ángulo recto con el eje mayor.

Elemento: Una de las sustancias simples de que se compone el universo.

Elipse: Curva en forma de círculo achatado.

Elipsoide: Sólido en forma de esfera achatada.

Estrella: Uno de los objetos visibles en el cielo con forma de diminuta chispa de luz.

Etano: Sustancia con una molécula compuesta de dos átomos de carbono y seis átomos de hidrógeno (C2H6).

*Etileno*: Sustancia con una molécula compuesta de dos átomos de carbono y cuatro átomos de hidrógeno (C2H4).

Excentricidad: Grado de achatamiento de la elipse de una órbita.

Foco: Uno de los puntos del interior de una elipse. Los dos focos están a la misma distancia del centro de la elipse y en lados opuestos, ambos sobre el eje mayor.

Gas: Forma de la materia en la que los átomos y moléculas están muy separados y se mueven libremente; el ejemplo más conocido es el aire.

Gigantes gaseosos: Los planetas gigantes —Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno; así llamados porque se componen en gran parte de sustancias que en la Tierra son gases.

Grado: Medida angular equivalente a 1/360 de la circunferencia de un círculo.

*Gravedad superficial*: Fuerza de la atracción gravitatoria sobre la superficie de un planeta o satélite.

Gravitación: Atracción ejercida por un objeto sobre otros objetos del universo.

Helio: Gas compuesto del segundo más sencillo de todos los átomos.

*Hidrocarburo*: Sustancia cuyas moléculas se componen enteramente de átomos de carbono e hidrógeno.

Hidrógeno: Gas compuesto por el más simple de todos los átomos.

Hielos: Sustancias que en la Tierra son líquidos o gases y que se congelan en forma de sólidos blancos y quebradizos cuyo aspecto es parecido al hielo del agua común.

*Hierro*: Metal gris; el más común de los metales del universo.

Inclinación: Angulo entre el plano de la órbita de un planeta y la eclíptica.

Inclinación axial: Angulo entre el eje de rotación de un objeto y una línea perpendicular a su plano de revolución.

Ley de Titius-Bode: Conjunto de números qué representan las distancias entre el Sol y los planetas del sistema solar.

Límite de Roche: Distancia al centro de un objeto dentro de la cual el efecto de marea puede perturbar a un objeto próximo más pequeño.

Línea base: Distancia entre dos puntos de observación al establecer la paralaje...

Longitud de onda: Longitud de una onda de luz y de las radiaciones semejantes a la luz.

*Magnesio*: Uno de los metales más comunes de que se compone el universo.

Magnitud: Cifra que representa el brillo aparente de un objeto que brilla en el cielo. Cuanto más baja es la cifra, más brillante es el objeto.

Masa: En sentido general, cantidad de materia de un objeto.

*Metano*: Sustancia con moléculas que se componen de un átomo de carbono y cuatro átomos de hidrógeno (CH4).

Minuto de arco: Medida angular equivalente a 1/60 de un grado.

Molécula: Grupo de átomos mantenidos juntos por fuerzas electromagnéticas.

Movimiento directo: Movimiento giratorio en la misma dirección que la rotación de la Tierra; es la dirección normal de giro en el sistema solar.

Movimiento retrógrado: Movimiento en dirección contraria a la habitual.

*Neón*: Gas parecido al helio pero formado con átomos más complicados.

*Nitrógeno*: Gas que constituye 4/5 de la atmósfera de la Tierra.

Nodo: Punto en el que la órbita de un planeta cruza la Eclíptica.

Orbita: Camino seguido por un objeto que da vueltas alrededor de otro objeto mayor.

Oxígeno: Gas activo que constituye 1/5 de la atmósfera de la Tierra.

Parábola: Curva parecida a una elipse, pero estirada que no vuelve a cerrarse nunca.

Paralaje: Cambio aparente de la posición de un objeto próximo en comparación con un objeto más distante, cuando el observador cambia la posición desde la que observa el objeto.

Perihelio: Punto de la órbita de un planeta en que más cerca está del Sol.

Período de revolución: Tiempo que tarda un objeto en dar una vuelta completa alrededor de un objeto mayor.

Período de rotación: Tiempo que tarda un objeto en girar una vez sobre su eje.

*Planeta*: Originariamente, objeto del cielo que se movía sobre el fondo de las estrellas. Ahora se utiliza para todo objeto que gira en torno a una estrella y brilla únicamente porque refleja la luz...

Planetas exteriores: Planetas cuyas órbitas están más allá de la de Marte.

Plano: Figura geométrica que es perfectamente lisa y sin grosor.

Polos: Punto donde el eje de rotación llega a la superficie de un cuerpo que gira.

Radiación: Energía o partículas que, desde una fuente, se mueven hacia afuera y en todas las direcciones.

Radio: Distancia desde el centro a la superficie; la mitad de la distancia del diámetro.

Revolución: Vuelta de un objeto alrededor de otro.

Rotación: Giro de un objeto sobre su propio eje central.

Satélite: Objeto que da vueltas alrededor de un planeta.

Satélites de Galileo: Los cuatro satélites grandes de Júpiter: así llamados porque fueron descubiertos por Galileo.

Segundo de arco: Medida angular equivalente a 1/60 de un minuto de arco.

Silicatos: Sustancias compuestas por moléculas que contienen átomos de oxígeno y silicio; casi todas las rocas son silicatos.

Silicio: Elemento semimetálico que es muy abundante en el universo.

Sistema solar: El Sol y todos los objetos que se encuentran en su campo gravitatorio y se mueven en torno a él.

Sistema solar interior: Porción del sistema solar que llega hasta la órbita de Marte.

Sulfuro de hidrógeno: Sustancia con moléculas que constan de dos átomos de hidrógeno y un átomo de azufre (H<sub>2</sub>S).

Superficie: Parte exterior de un objeto sólido.

*Telescopio*: Tubo con lentes o espejos que hace que los objetos distantes parezcan mayores, más próximos o más brillantes.

*Unidad astronómica*: Distancia media entre la Tierra y el Sol.

Velocidad de escape: Velocidad con que se debe mover un objeto para escapar de la atracción gravitatoria de un planeta, satélite o estrella.

Velocidad orbital: Velocidad con que se mueve un objeto en su órbita.

*Viento solar*: Partículas cargadas procedentes del Sol que salen a gran velocidad en todas las direcciones.

Volumen: Espacio que ocupa un objeto.