

Capítulo V: Movimiento de los planetas, asteroides y cometas

I Planetas: Los nueve planetas conocidos: Mercurio, Venus, Tierra, Marte, Júpiter, Saturno, Urano, Neptuno y Plutón se mueven en órbitas elípticas alrededor del sol.

Las órbitas son casi circulares pues las excentricidades son menores que 0,1 excepto en los casos de Plutón $e = 0.25$ y Mercurio $e = 0.21$.

Los planos de las órbitas forman pequeños ángulos con respecto a la eclíptica, correspondiendo las mayores inclinaciones a Plutón 17° y a Mercurio $i = 7^\circ$.

Las masas, si se toma como unidad la masa terrestre van desde 0.05 en el caso de Mercurio a 318 para Júpiter. La masa de Júpiter es mayor que la suma de las masas de los restantes planetas.

Las distancias medias al Sol varían entre 0.39 UA correspondiente a Mercurio y 39,46 UA distancia de Plutón.

Todos cumplen su revolución en sentido directo (de oeste a este) con periodos desde 88 días para Mercurio a 248 años para Plutón. También todos rotan sobre su eje siendo la más rápida la rotación de Júpiter $9^h 10^m$.

Satélites: Solamente Mercurio, Venus y Plutón no tienen satélites conocidos.

Júpiter tiene doce, Saturno nueve, Urano cinco, Neptuno y Marte dos cada uno y la Tierra uno.

Seis de los treinta y un satélites tienen tamaños comparables a la Luna, aunque ninguno es tan grande como ésta comparado con su primario.

La mayoría de los satélites se mueven alrededor de los planetas en sentido directo y la mayoría de las órbitas se encuentran en el plano ecuatorial del respectivo planeta.

Como se ha visto (Capítulo I) se puede calcular la masa de un planeta aplicando la tercera ley de Kepler al movimiento de un satélite alrededor de un planeta y al movimiento de dicho planeta alrededor del Sol.

II Asteroides: Se los conoce también con el nombre de planetoides o pequeños planetas y la mayoría de sus órbitas se encuentran entre las de Marte y Júpiter.

En el año 1776 Titius descubrió una ley empírica o mejor dicho una regla para recordar las distancias de los planetas al Sol. Se la conoce con el nombre de Ley de Titius-Bode, pues fue Bode, director del Observatorio de Berlín, quien la dió a conocer.

Se escribe una progresión geométrica de razón dos y primer término tres, se agre

ga cero antes del primer término:

0 3 6 12 24 48 96 192 384 768

Se suma cuatro a cada término y se lo divide por diez:

0,4	0,7	1,0	1,6	2,8	5,2	10,0	19,6	38,8	77,2
Mercurio	Venus	Tierra	Marte	?	Júpiter	Saturno	Urano	Neptuno	Plutón

resultan así las distancias de los planetas al Sol en unidades astronómicas.

De acuerdo a esta ley existía una laguna entre los planetas Marte y Júpiter, correspondiente a la distancia 2,8 U.A. Por esto no causó sorpresa el descubrimiento, en el año 1801, del primer asteroide por Piazzi en el Observatorio de Palermo. Piazzi comunicó su descubrimiento a Bode pero este no pudo observarlo pues ya se encontraba en dirección muy cercana a la del Sol. El joven matemático alemán Carl F. Gauss (1777-1855) ideó un método de cálculo de órbitas con tres observaciones, que le permitió calcular la órbita de este nuevo astro. Se le dió el nombre de Ceres dios protector de Sicilia.

El método de Gauss de cálculo de órbitas, con muy pocas variantes, se utiliza en la actualidad.

En 1802 Olbers descubre el segundo asteroide al que llamó Pallas. El tercero Juno fué descubierto en 1804 y el cuarto Vesta en 1807. El quinto asteroide recién se descubre en 1845. Pero en el año 1890 ya se conocían trescientos asteroides.

El nombre de un asteroide va precedido por un número que indica el orden de descubrimiento: 1 Ceres, 2 Pallas... etc.

En el año 1891 Max Wolf en Heidelberg utiliza por primera vez la técnica de astronomía fotográfica para la búsqueda de asteroides. El movimiento angular de los asteroides es lo suficientemente grande como para que, si el telescopio sigue el movimiento diurno, su imagen forme una raya en la emulsión, que se distingue de las imágenes puntuales de las estrellas si el tiempo de exposición no es muy corto.

El asteroide 323 Brucia fué el primero descubierto fotográficamente.

Órbitas de los asteroides: Los elementos orbitales de alrededor de 1.700 asteroides figuran en las correspondientes efemérides. Todos se mueven alrededor del Sol en sentido directo y la inclinación media de los planos de las órbitas es de 9° . Sin embargo hay más o menos veinticuatro asteroides con inclinaciones mayores de 25° , la órbita de Betulia es la más inclinada, 52° con respecto a la eclíptica.

Los semiejes de las órbitas varían desde 2,3 a 3,3 UA y los períodos siderales de 3,5 a 6 años. Icaro es el de órbita más pequeña, su semieje $a = 1,077$ UA y

La excentricidad es la más grande = 0,93. Al pasar por el perihelio su órbita es interior a la de Mercurio (fig. 1-V). La órbita mayor es la de Hidalgo $a = 5,79$ U.A., su excentricidad es $e = 0,66$ y en el aphelio su órbita es exterior a la de Júpiter (fig. 2-V).

El valor medio de las excentricidades de los asteroides es $e = 0,15$.

Tres asteroides han pasado a menos de cinco millones de kilómetros de la Tierra: Apollo, Adonis y Hermes pero sus órbitas no han sido bien determinadas.

El asteroide Amor cuya órbita es conocida pasa a una distancia mínima de la Tierra de dieciséis millones de kilómetros. Fue descubierto en 1932.

En 1898 había sido descubierto el asteroide Eros, el primero conocido cuya órbita es interior a la de Marte. En el perihelio la distancia de Eros al Sol es de 1,13 UA y en el aphelio de 1,78 UA, la inclinación de su órbita de 11° . La distancia mínima a la Tierra es de veintitrés millones de kilómetros, es decir que en esa época era el astro más cercano a la Tierra, después de la Luna. Su período orbital es de 1,76 años.

El acercamiento de Eros a la Tierra permitió determinar su paralaje por métodos geométricos y conocida entonces su distancia corregir el valor de la unidad astronómica aplicando la tercera ley de Kepler.

Otro asteroide que se acerca a la Tierra es Geógrafos que pasa a diez millones de kilómetros.

Kirkwoods Gaps: La distribución de las órbitas de los asteroides presenta "Gaps" o lagunas que llamaron la atención por primera vez a Kirkwoods en 1866.

Estas lagunas están situadas en partes bien definidas del espacio interplanetario en las cuales se cumplen condiciones de conmensurabilidad.

Si n es el movimiento medio de Júpiter y n' el de un asteroide y se cumple $\frac{n}{n'} = \frac{1}{1}$ siendo f y i' números enteros, los movimientos medios son conmensurables.

Las lagunas se encuentran por ejemplo en las regiones donde

$\frac{n}{n'}$ vale $\frac{1}{2}$ $\frac{1}{3}$ $\frac{2}{7}$ $\frac{2}{11}$ etc. También hay una laguna generada por Marte que corresponde a la conmensurabilidad $\frac{2}{1}$.

Sin embargo no en todas las conmensurabilidades existen lagunas.

Una explicación de estas lagunas es que en estas zonas las perturbaciones son muy grandes, por la presencia de pequeños divisores de la forma $1/n + i'/n'$ y entonces por el efecto de las perturbaciones los asteroides son llevados fuera de la región, es decir son regiones en que el movimiento no es estable.

Lagunas similares existen en los anillos de Saturno. La división de Cassini por ejemplo está relacionada con las conmensurabilidades existentes entre las partículas del anillo y los satélites de Saturno, Mimas o Enceladus.

El astrónomo japonés Hirayama explica las lagunas suponiendo que los asteroides se mueven en un medio resistente.

Los Troyanos: Vimos el capítulo III al tratar el problema restringido de tres / cuerpos que las soluciones L_4 L_5 encontradas por Lagrange forman triángulos equiláteros con los primarios.

En el año 1907 fue descubierto el asteroide Aquiles que se mueve alrededor del Sol casi en la órbita de Júpiter, coincidiendo aproximadamente su posición con el punto L_4 del sistema Sol-Júpiter. Después fueron descubiertos otros asteroides que pusieron de manifiesto la existencia en la naturaleza de soluciones lagrangianas del problema restringido de tres cuerpos.

Se conocen quince de ellos. Diez se mueven delante de Júpiter, con una diferencia de longitud de 60° con dicho planeta, son: Aquiles, Héctor, Néstor, Agamenón, Odiseo, etc. Los otros cinco: Patroclus, Píffamo, Eneas, Anquises y Troilus siguen a Júpiter por su vecindad de L_5 , algunas veces se llama "Los Griegos" a estos últimos y "Los Troyanos" a los primeros, pero en general se los conoce a todos como Troyanos (fig. 3-VI).

Diámetros y masas: El asteroide de mayor diámetro es Ceres: $D = 785$ Km, lo siguen Pallas: $D = 489$ Km, Vesta: $D = 399$ Km y Juno: $D = 190$ Km. Se cree que estos cuatro asteroides que son los más brillantes son los de mayor diámetro. Existen 14 de ± 200 Km y a medida que los tamaños se reducen mayor es el número de asteroides que se encuentran en ese rango. Los más pequeños, como Hermes, tienen diámetros de unos centenares de metros.

La masa total del conjunto de asteroides no se conoce pero se piensa que alcanza solo a $\frac{1}{20}$ de la masa de la Luna. Probablemente existen varios miles de asteroides desconocidos pero de pequeño tamaño y la suma de sus masas no debe cambiar sustancialmente el valor estimado.

Cuando un asteroide pasa cerca de un planeta puede calcularse la masa de dicho planeta por las perturbaciones que causa en la órbita del asteroide. La masa de la Luna se calculó en 1931 a partir de las perturbaciones que produjo sobre Eros en el año 1931.

Origen de los asteroides: Se cree que han sido formados con el mismo material y más o menos al mismo tiempo que los planetas. Una teoría indica que los asteroides y los meteoritos se han originado por la explosión de un planeta que se movía alrededor del Sol a una distancia de 2,8 UA indicada por la ley de Bode. Pero debe tenerse en cuenta que la suma de las masas de los asteroides es menor que un milésimo de la masa terrestre.

En 1917 K. Hirayama clasificó los asteroides en familias de acuerdo con sus características orbitales. Supuso que cada familia pudo haberse originado por la explosión de un planeta o por la colisión de un planeta o por la colisión de dos de ellos.

En 1950 D. Brouwer extendió las investigaciones de Hirayama agrupando 1537 asteroides en 29 familias, cada familia contiene desde 4 a 62 miembros.

Estas hipótesis de fragmentación y colisión para explicar el origen de los

asteroides deben aún ser probadas y de ellas se infiere que el proceso de fragmentación continúa.

Orbitas de Cometas: Un cálculo preliminar de la órbita de un cometa, a partir de tres observaciones, da para estos astros con muy poca frecuencia órbitas elípticas, la mayoría de las veces la órbita es una parábola. Un cálculo posterior, en el cual intervienen todas las observaciones permite determinar si es una elipse, en cuyo caso el cometa es periódico, una parábola o una hipérbola. En estos dos últimos casos no podrá ser observado desde la Tierra en otra oportunidad.

En promedio pasan por la vecindad del Sol unos mil quinientos cometas por siglo, menos de la mitad de los cometas observados son de corto período, es decir los períodos están comprendidos entre tres y doscientos años. El más famoso es el Halley que aparece cada setenta y seis años, la próxima aparición será en el año 1986. Este cometa era conocido desde la antigüedad, existen por ejemplo datos de observaciones efectuadas por los chinos 240 años a.J.C., pero el Cometa lleva el nombre de Halley pues este astrónomo fue el primero en reconocerlo como miembro permanente del sistema solar.

El cometa de más corto período es el Encke, que completa su órbita en 3,3 años.

Se estima que los cometas periódicos se desintegran completamente después de más o menos cien pasajes por el perihelio. El cometa Biela, con un período de 7 años fué descubierto en 1772. Al acercarse al Sol en 1846, fue observado como dos cometas separados y ambos volvieron a verse en la misma órbita en 1852, después de lo cual desaparecieron. Sin embargo una lluvia de meteoros fue observada en 1872 y en 1885 en las fechas en que la tierra cruzó la órbita del cometa Biela.

A los cometas también se los clasifica en familias de acuerdo a sus características orbitales. La familia llamada de Júpiter tiene sus afelios cerca de la órbita de este planeta. Se piensa que primitivamente las órbitas de estos cometas eran muy grandes, como los de la mayoría, y que las perturbaciones de Júpiter / disminuyeron los ejes de las mismas.

Muchos de los cometas considerados no periódicos tienen sus órbitas originales elípticas. Utilizando modernas computadoras se calcula la órbita del cometa antes de ingresar a la esfera de atracción del sistema Solar, llamada órbita ori

ginal, y la órbita después de salir de ella / órbita futura.

Una órbita original elíptica solo es posible para un cuerpo que se mueve permanentemente alrededor del Sol. Si los cometas provinieran del espacio interestelar sus órbitas originales debieran ser hiperbólicas. Recordemos que la máxima energía en el problema de dos cuerpos corresponde a una órbita hiperbólica ya que en la ecuación de la energía $V^2 = \frac{2}{r} - \frac{1}{a}$ es la constante de la energía

$$C = \frac{\mu}{|a|} > 0 \text{ hipérbola}$$

$$C = 0 \text{ parábola}$$

$$C = \frac{\mu}{a} < 0 \text{ elipse}$$

La teoría más aceptada sobre el origen de cometas es la del astrónomo holandés J. H. Oort quien supone que los cometas tienen su origen en el sistema Solar y que existe una nube de cometas situada en una esfera con centro en el Sol y cuyo radio está comprendido entre 50.000 y 150.000 U.A.

Criterio de Tisserand para la identificación de cometas:

Si dos cometas aparecen en distintas épocas y se quiere saber si en lugar de dos apariciones de un mismo cometa, se puede simplificar el problema reduciéndolo a un problema restringido de tres cuerpos. Los tres cuerpos serán: el Sol Júpiter y el cometa, ya que Júpiter es el planeta que mayores perturbaciones / produce. Se supone la excentricidad de Júpiter igual a cero y la masa del cometa despreciable. Empleando entonces la integral de Jacobi se calcula para las dos apariciones el valor de la constante C , a partir de las coordenadas y las componentes de las velocidades;

$$V^2 = x^2 + y^2 + \frac{2(1-\mu)}{r_1} + \frac{2\mu}{r_2} - C'$$

$$V^2 = 2U - C'$$

Si los dos valores de C' que se obtienen coinciden, existe una gran posibilidad de que se trate de un mismo cometa y si los valores de C son diferentes los cometas serán distintos.

Si se quieren utilizar los elementos cometarios deberá primero pasarse a un sistema de coordenadas fijo pues la deducción de la ecuación de Jacobi se hizo refiriendo la posición de los cuerpos a un sistema rotante.

Las ecuaciones de transformación de coordenadas serán las inversas de las ecuaciones (2) capítulo III :

$$\begin{cases} x = \xi \cos t + \eta \sin t \\ y = \xi \sin t + \eta \cos t \\ u = \xi \end{cases}$$

La ecuación de Jacobi resulta:

$$\left(\frac{d\xi}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dn}{dt}\right)^2 + \left(\frac{d\eta}{dt}\right)^2 - 2\left(\xi\frac{dn}{dt} - n\frac{d\xi}{dt}\right) = \frac{2(1-\mu)}{r_1} + \frac{2\mu}{r_2} - C$$

y como:

$$\begin{cases} \left(\frac{d\xi}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dn}{dt}\right)^2 + \left(\frac{d\eta}{dt}\right)^2 = \frac{2}{r} - \frac{1}{a} \\ \left(\xi\frac{dn}{dt} - n\frac{d\xi}{dt}\right) = \sqrt{a(1-e^2)} \cos i \end{cases}$$

se obtiene finalmente

$$\frac{2}{r} - \frac{1}{a} - 2\sqrt{a(1-e^2)} \cos i = \frac{2(1-\mu)}{r_1} + \frac{2\mu}{r_2} - C$$

en la cual r es la distancia del cometa al centro de coordenadas,

Como en el caso de Júpiter y el Sol es $\mu < \frac{1}{1000}$ se puede tomar $r \simeq r_1$ pues el origen estará muy próximo al centro del Sol. Si además el cometa está lejos del Sol y de Júpiter puede despreciarse la cantidad $\frac{2\mu}{r_1} + \frac{2\mu}{r_2}$ y el cálculo de C puede efectuarse en la expresión simplificada.

$$\frac{1}{a} + 2\sqrt{a(1-e^2)} \cos i = C$$

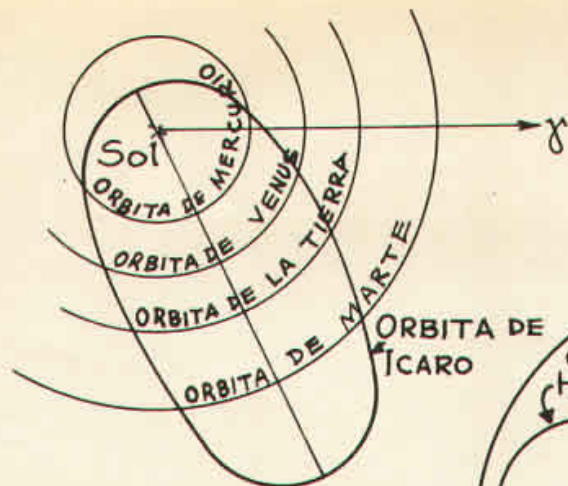


FIG. 1 - V

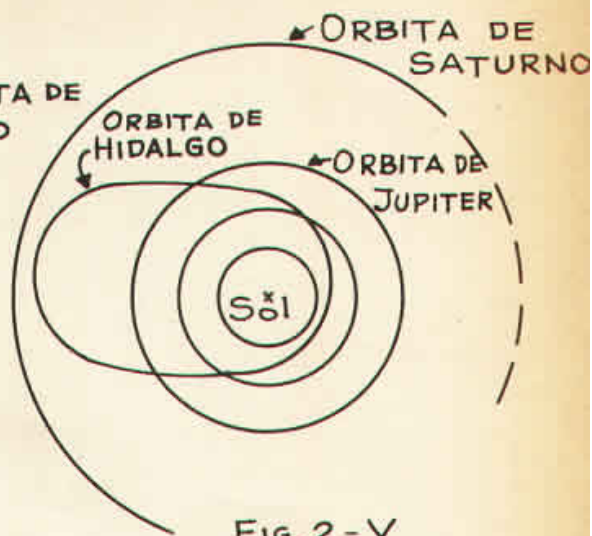


FIG. 2 - V

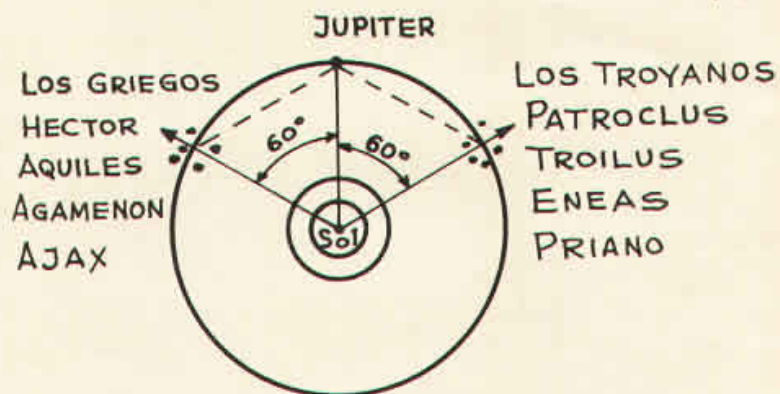


FIG. 3 - V

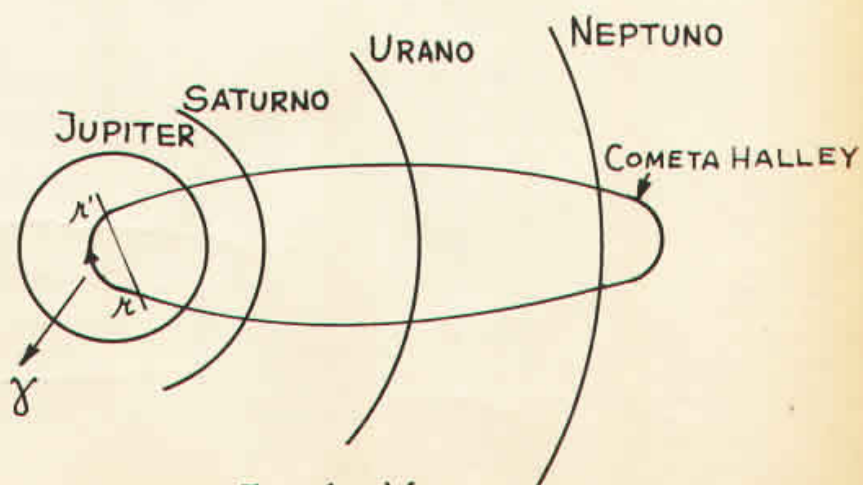


FIG. 4 - V