

# Las leyes de Kepler y de Newton

Extraído del libro *Panorama de la astronomía* (primera edición).

Por Armando Caussade, GCSc, BS

Sociedad de Astronomía de Puerto Rico, Inc. <http://www.astronomiapr.net/>

---

## INTRODUCCIÓN: MOVIMIENTO Y ÓRBITAS

El concepto "movimiento" resulta fundamental en la astronomía, pues en el universo nada permanece en reposo. En lo sucesivo, utilizaremos dos términos para referirnos a ciertos movimientos comunes en los astros, a saber: *traslación* (o *momentum* lineal), que se refiere a la trayectoria de un astro en relación a otro, y *rotación* (o *momentum* angular), que se refiere a la vuelta de un astro en torno a sí mismo.

Una *órbita* es la trayectoria, siempre curvada, que describe un astro a consecuencia de la gravedad. Aunque en teoría podría existir una órbita perfectamente circular, la realidad es que todas las órbitas cerradas poseen formas elípticas. La *excentricidad* de una órbita (que se expresa como una cifra entre 0 y 1) indica cuánto aquélla se aparta de formar un círculo exacto. Un valor de 0.05, como en el caso de la órbita lunar, se refiere a una elipse casi redonda, mientras que uno de 0.50 representará una elipse bastante pronunciada. De otra parte, el *semieje mayor* de una órbita se refiere a la mitad del lado más largo de la elipse (o sea, la distancia media que separa el centro de los dos astros). Estos dos números son indispensables, pues describen respectivamente la forma y el tamaño de una órbita.

Dado que las órbitas son elípticas, la distancia entre dos astros cambiará según transcurre el ciclo orbital. Los términos *periastro* y *apoaastro* se aplican a los lugares de una órbita donde los astros involucrados quedarían entre ellos a su mínima y máxima distancia, respectivamente. Cuando nos referimos a la órbita de la Tierra en torno al Sol (o de un astro cualquiera que se traslade alrededor del Sol) se dirá *perihelio* y *afelio*, mientras que para referirnos a la órbita de la Luna diremos *perigeo* y *apogeo*.

Haciendo una nota de carácter técnico, una órbita cualquiera puede ser descrita de modo único y exacto utilizando seis cantidades, que juntamente reciben el nombre de *elementos orbitales* o elementos de Kepler. Estos números son: (1) la excentricidad de la órbita,  $e$ ; (2) el semieje mayor de la órbita,  $a$ ; (3) la longitud del nodo ascendente,  $\Omega$ , que define la orientación longitudinal de la órbita; (4) la inclinación orbital,  $i$ , que sería el ángulo latitudinal formado por la órbita con respecto a un plano de referencia; (5) el argumento del periaastro,  $\omega$ , que se refiere al ángulo que va desde el nodo ascendente hasta el punto donde ocurre el periaastro; y (6) la anomalía verdadera,  $v$ , que describe la posición

particular del astro en la órbita. Este último elemento se define respecto de una fecha muy precisa denominada *época*.

Los elementos orbitales sirven para computar una *efeméride*, es decir, una lista que da las coordenadas de los astros, usualmente bajo el sistema ecuatorial, para ciertas fechas, separadas por intervalos regulares. Una efeméride puede también dar cuenta de eventos celestes, como fases lunares y eclipses.

Y en otro apunte técnico, un astro no se mueve precisamente en torno a otro, sino ambos en torno a un *centro común de masas* o baricentro. Por ejemplo, no sería incorrecto decir que la Luna circula la Tierra, aunque la realidad es que ambos cuerpos describen una órbita en torno a un centro de masas, que queda situado dentro de la Tierra y a 4,670 kilómetros encima de su centro. El Sistema Solar, entendido en su conjunto, posee también un centro común de masas, el cual queda a veces situado dentro del Sol, y otras veces afuera, aunque siempre muy cerca. Igualmente, el sistema completo exhibe una inclinación orbital media, definida por el centro de masas, que se conoce con el nombre de *plano invariable*.

Es importante señalar que las órbitas no constituyen sistemas aislados, sino que están sujetas a *perturbaciones orbitales* causadas por la gravedad de otros cuerpos externos. Naturalmente, dichas perturbaciones siempre surtirán sus efectos en función del producto de las masas involucradas y en relación inversa al cuadrado de las distancias, lo cual implica que influirá más un cuerpo cercano que uno masivo. Por ejemplo, la órbita de la Tierra será definida no solo por la mutua atracción gravitatoria entre la Tierra y del Sol, en torno a un centro común de masas, sino también por la de otros astros cercanos y masivos, como la Luna y los planetas Venus y Júpiter. Además de las órbitas, la gravedad también gobierna otros fenómenos naturales como la caída de objetos en la Tierra y las mareas.

Las *mareas* son un efecto secundario de la atracción gravitatoria de la Luna y del Sol sobre el globo terráqueo. La razón entre ambas fuerzas es de 2.2:1, respectivamente, lo cual significa que la Luna será responsable por el 69% de la marea. El efecto apenas se nota sobre la corteza sólida, pero es muy visible en los océanos donde se observa diariamente un cambio de varios metros en el nivel del mar.

Después de comparar un gran número de órbitas se ha visto que algunos períodos discurren en múltiplos sencillos como  $1\frac{1}{2}$  o 2. A estas coincidencias, que casi nunca son casuales, sino que ocurren por efectos gravitatorios, se les denomina *resonancias orbitales*. Las más conocidas involucran las lunas galileanas Ganymedes, Europa e Io, (resonancia 1:2:4), e igualmente a Plutón y Neptuno, (resonancia 2:3).

De otra parte, se ha pensado en la posibilidad que los satélites del Sistema Solar pudieran

poseer sus propias lunas, hipotéticamente denominadas subsatélites, pero la mecánica celeste predice que sucumbirían a intensas fuerzas de marea y a muy complejas perturbaciones orbitales. Las simulaciones numéricas realizadas mediante supercomputadoras sostienen fehacientemente estos hechos.

## ANTECEDENTES HISTÓRICOS A LAS LEYES

Aunque el sistema heliocéntrico de Mikołaj Kopernik, i.e., Nicolaus Copernicus, que colocaba al Sol en el centro del universo, no predecía las posiciones de los planetas con mayor exactitud que el geocentrismo, al menos representó una simplificación del engorroso modelo que promovió Ptolomeo en su *Almagesto*. Tycho Brahe se percató que la falta de medidas precisas impedía lograr una comparación efectiva entre predicciones y observaciones. Sin telescopio y empleando un cuadrante mural de dos metros que construyó él mismo, acumuló veintiún años de exactísimas efemérides planetarias (1576 a 1597) que igualaban la máxima resolución alcanzable por el ojo humano, de un minuto de arco.

En 1609, el polímata Galileo Galilei fabricó un telescopio y lo empleó para realizar observaciones astronómicas, algo que antes nadie había intentado. Dos de sus descubrimientos resultaron claramente incompatibles con el sistema geocéntrico: las cuatro grandes lunas de Júpiter (1610) y las fases de Venus (1613). Naturalmente, esto fortaleció su confianza en el heliocentrismo. Además, realizó minuciosos experimentos de laboratorio que le ayudaron a clarificar los conceptos de masa y de movimiento. Estos trabajos están considerados hoy día los primeros realizados bajo el rigor del método científico.

El sistema copernicano, mas los trabajos de Tycho y de Galileo, sentaron las bases para el eventual desarrollo de las **leyes de movimiento planetario** (Kepler), y de la **ley de gravitación universal** (Newton).

## LEYES DE KEPLER SOBRE MOVIMIENTO PLANETARIO

Johannes Kepler, último astrónomo pretelescopico, fue quien descifró el movimiento de los planetas, resolviendo así un problema arrastrado desde la antigüedad. Lo logró tras un análisis exhaustivo de las mediciones hechas por su mentor (Tycho) y al percatarse que la figura que mejor definía las trayectorias observadas era la elipse y no el círculo. Sus *leyes de movimiento planetario* son las siguientes:

**Primera ley (1609), o ley de las elipses.** Los planetas se desplazan alrededor del Sol siguiendo órbitas elípticas. El Sol siempre estará en uno de los dos focos de la elipse.

La primera ley tiene como consecuencia que un planeta se acercará y se alejará del Sol durante el transcurso de su órbita, alcanzando los respectivos extremos de distancia en su perihelio y en su afelio.

**Segunda ley (1609), o ley de áreas.** La línea imaginaria (o *radio vector*) que une un planeta con el Sol barre áreas iguales en tiempos iguales. Fue realmente la primera ley que descubrió Kepler

La segunda ley tiene como consecuencia que un planeta siempre se moverá más rápidamente en su perihelio. La velocidad de un cuerpo cualquiera, en la Tierra o en el espacio, puede calcularse mediante la siguiente relación:  $V = D \div T$ , donde  $V$  representa la velocidad (expresada usualmente en kilómetros por segundo, cuando se trata de astros en el Sistema Solar),  $D$  la distancia recorrida por el objeto (en kilómetros) durante un período determinado de tiempo, y  $T$  el período de tiempo transcurrido.

**Tercera ley (1618), o ley armónica.** Para cualquier planeta dentro del Sistema Solar, el cuadrado de su período orbital será directamente proporcional al cubo del semieje mayor de su órbita.

La tercera ley tiene como consecuencia que las órbitas de mayor tamaño tardarán más en completarse. Esta ley se puede expresar matemáticamente del modo siguiente:

$$P^2 = A^3$$

En dicha ecuación  $P$  (variable que en algunos textos es identificada como  $T$ ) representa el período orbital de un planeta en torno al Sol, expresado en unidades terrestres (o sea, en años sidéreos de aproximadamente  $365\frac{1}{4}$  días), y  $A$  representa el semieje mayor o distancia media de un planeta al Sol, también expresado en unidades terrestres (es decir, en unidades astronómicas que valen muy cerca de  $1.5 \times 10^8$  kilómetros).

Debido a las notables desviaciones que manifestaba el planeta Marte entre su trayectoria pronosticada y la observada, fue este el planeta que casi exclusivamente utilizó Kepler para comprobar sus leyes.

Las **leyes de movimiento planetario** establecen con exactitud las dimensiones relativas de las órbitas planetarias, quedando como problema fundamental la calibración del conjunto mediante la determinación del tamaño de la órbita terrestre. Durante los siglos XVIII y XIX se realizaron observaciones destinadas a medir simultáneamente las posiciones de Venus, y en concreto durante sus pasos frente al Sol, desde diversos lugares tomando como base la extensión del globo terráqueo; esto permitió derivar valores sucesivamente más exactos para la unidad astronómica.

Ya en el siglo XX y más concretamente desde la década de 1960, la astronomía de radar y la telemetría realizada mediante sondas planetarias han permitido medir las distancias con un error que no excede de varios metros, y en algunos casos hasta centímetros. Habiendo hallado tan exactamente el tamaño de nuestra órbita, podría decirse que la escala del Sistema Solar es hoy día materia resuelta.

## LEYES DE NEWTON SOBRE MOVIMIENTO

**Primera ley (1687), o ley de la inercia.** Todo objeto permanece en su estado de reposo o movimiento uniforme y rectilíneo, a menos que sobre él actúe una fuerza externa.

**Segunda ley (1687), o ley de la fuerza.** La *aceleración* de un objeto (o sea, el aumento o disminución en la rapidez de su movimiento) será inversamente proporcional a su masa y directamente proporcional a la fuerza neta que esté actuando sobre él.

La expresión matemática de esta ley es la siguiente:

$$F = m \times a$$

donde **F** representa la fuerza aplicada a un objeto (expresada en  $\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ , es decir, la unidad conocida como *newton*), **m** la masa involucrada (en kilogramos), y **a** la aceleración (en  $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ , que se lee como "metros por segundo cuadrado").

**Tercera ley (1687), o ley de acción y reacción.** Toda acción produce siempre una reacción igual y contraria; o sea, las acciones mutuas de dos objetos siempre son iguales y dirigidas en sentido opuesto.

## LEY DE NEWTON SOBRE GRAVITACIÓN UNIVERSAL

Aunque Kepler descifró cómo se mueven los planetas, nunca llegó a comprender el porqué. Isaac Newton investigó el asunto y lo resolvió mediante su *ley de gravitación universal*. En esencia, el trabajo de Newton consistió en auscultar las leyes de movimiento planetario y reescribirlas con más rigor, retirando al Sol como eje de traslación y reemplazándolo con un centro común de masas. Incorporó también algunas nociones adquiridas de Galileo Galilei y de Robert Hooke, planteando lo siguiente:

**Ley de gravitación universal (1687), o teoría newtoniana de la gravedad.** La gravedad mutua ejercida entre dos cuerpos, con masas **m<sub>1</sub>** y **m<sub>2</sub>** y separados por una distancia **d**, será directamente proporcional al producto de sus masas e inversamente

proporcional al cuadrado de la distancia.

La expresión matemática de la ley de gravitación universal es la siguiente:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{d^2}$$
 En esta ecuación **F** representa la fuerza gravitatoria ejercida entre ambos cuerpos, cuya dirección se encuentra en el eje que une ambos cuerpos, **G** es la constante de gravitación universal, **m<sub>1</sub>** y **m<sub>2</sub>** son las masas respectivas de los cuerpos, y **d** es la distancia que los separa. Las unidades se aplican como sigue:

1. La variable **F** se expresa en *newtons*, una unidad métrica derivada que equivale a  $\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ .
2. La constante **G**, de difícil medición, recibe el valor aproximado de  $6.674 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ .
3. Las variables **m<sub>1</sub>** y **m<sub>2</sub>** se expresan en kilogramos.
4. La variable **d** se expresa en metros.

La ley de gravitación universal constituye una brillante generalización, pues originalmente se basó en observaciones del desplazamiento de apenas siete astros, más un limitado número de experimentos sobre movimiento hechos en la Tierra. Más impresionante sería que se pudo demostrar su validez durante cada uno de los numerosos experimentos con los que se confrontó. La ley fue corroborada mediante un enorme caudal de observaciones realizadas a lo largo del siglo XVIII, por las cuales se precisaba la posición de la Luna, de los planetas y de ciertos cometas. El factor clave que aseguró su ratificación fue la perfecta coincidencia entre las posiciones observadas y las predicciones hechas empleando esta ley.

Un resultado de la ley de gravitación universal fue la generalización de las leyes de movimiento planetario para hacerlas aplicables a cualquier conjunto de astros que se orbiten mutuamente, algo que en un principio Kepler ni siquiera llegó a sospechar. Las figuras más importantes que, durante el siglo XVIII, se encargaron de interpretar a cabalidad la filosofía natural de Newton, llegando hasta sus últimas y más sutiles implicaciones, fueron Leonhard Euler, Joseph-Louis Lagrange y Pierre-Simon Laplace. Los primeros dos, matemáticos, trabajaron juntos para comprender las perturbaciones orbitales, cosa que luego el astrónomo Laplace identificaría con gran atino como variaciones regulares, y no caóticas.

---

**Copyright © 2017 Armando Caussade. Reservados algunos derechos.**

Este opúsculo es gratis. Puede fotocopiarse y distribuirse libremente.

Licencia Creative Commons: Atribución – No comercial – Sin derivar 4.0 Internacional.  
CC BY–NC–ND 4.0.