

# Las leyes de Kepler y de Newton

Extracto del libro *Astronomía descriptiva* (segunda edición, 2020).

Por Armando Caussade, GCSc, BS.

<http://armandocaussade.org/astromony/>

---

## I. MOVIMIENTO Y ÓRBITAS: NOCIONES DE MECÁNICA CELESTE.

El concepto "movimiento" resulta fundamental para la astronomía, pues en el universo nada permanece en reposo. En lo sucesivo, utilizaremos dos términos para referirnos a ciertos movimientos comunes: 1) *traslación*, que se refiere a la trayectoria de un astro en relación a otro, y 2) *rotación*, que se refiere a la vuelta de un astro sobre sí mismo. La *mecánica celeste*, fundamentada en las leyes de movimiento planetario y de gravitación universal, es la disciplina encargada de estudiar estos desplazamientos.

Una *órbita* es la trayectoria, siempre curvada y gobernada por la gravedad, que realiza un astro cualquiera. La forma de las órbitas puede corresponder a cualquiera de las cuatro secciones cónicas: círculos, elipses, parábolas e hipérbolas. La *excentricidad* de una órbita (que se expresa como una cifra entre 0 y 1) indica cuánto aquella se aparta de representar 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 los centros de cada astro). Estos dos números son indispensables, pues describen respectivamente la forma y el tamaño de una órbita.

Puesto que ninguna órbita es perfectamente circular, la distancia entre dos astros cambiará a lo largo del 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. Para referirse 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*. Luego de averiguar la excentricidad de una órbita (**e**) y su semieje mayor (**a**), podrán calcularse las distancias de periaastro (**d<sub>P</sub>**) y apoaastro (**d<sub>A</sub>**) mediante las ecuaciones siguientes:

$$d_P = a \cdot (1 - e)$$

$$d_A = a \cdot (1 + e)$$

Haciendo una nota de carácter técnico, una órbita cualquiera puede ser descrita de modo

único y exacto utilizando apenas seis cantidades, que juntamente reciben el nombre de *elementos orbitales* o elementos de Kepler. Estas cantidades 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 periastro,  $\omega$ , que se refiere al ángulo que va desde el nodo ascendente hasta el punto donde ocurre el periastro; 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*, una lista que provee coordenadas para un astro cualquiera, ordenadas mediante una secuencia de fechas separadas por intervalos regulares. Una efeméride puede también dar cuenta de ciertos eventos celestes, como fases lunares, tránsitos y eclipses.

Y en otro apunte técnico, un astro nunca se mueve precisamente en torno a otro, sino ambos en torno a un *centro común de masas* o baricentro. A modo de ejemplo, no es incorrecto decir que la Luna circula la Tierra, aunque la realidad sería que ambos cuerpos describen una órbita en torno a un centro de masas situado a 4 670 kilómetros encima del núcleo terrestre, aunque aún dentro del planeta. El Sistema Solar 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. El Sistema Solar exhibe también una inclinación orbital media definida a partir de aquel centro de masas, que se conoce con el nombre de *plano invariable*.

En la mecánica celeste las órbitas nunca constituyen sistemas aislados, sino que están sujetas a las *perturbaciones gravitatorias* causadas por astros circundantes. Según la ley de gravitación universal, dichas perturbaciones dependerán tanto de las masas involucradas como de las distancias, aunque influirá más un cuerpo cercano que uno masivo. Por ejemplo, la órbita terrestre queda definida no solo por la mutua atracción gravitatoria entre la Tierra y el Sol, sino también por las perturbaciones de astros cercanos, siendo siempre la Luna el más influyente, seguida por los planetas Venus y Júpiter. Las perturbaciones atentan contra la estabilidad de las órbitas a largo plazo, y la realidad es que con el paso del tiempo todas las órbitas irán variando, aunque los cuerpos pequeños como asteroides y cometas serán los más vulnerables. Dicho de otro modo, los elementos orbitales están siempre sujetos a cambio.

Después de comparar un gran número de órbitas, se ha visto que algunos períodos discurren en múltiplos sencillos como 1.5 o 2, fenómeno denominado como *resonancias orbitales* y que se atribuye a las perturbaciones gravitatorias. Las resonancias más conocidas involucran a tres grandes satélites de Júpiter, *Ganymedes*, *Europa* e *Io* (resonancia 1:2:4), e igualmente a Plutón y Neptuno (resonancia 2:3).

Aunque se ha pensado en la posibilidad que los satélites del Sistema Solar pudieran poseer sus propias lunas, hipotéticamente denominadas *subsatélites*, la mecánica celeste predice que estas terminarían en órbitas inestables por estar sometidas a un complicado escenario de perturbaciones gravitatorias, y las simulaciones numéricas realizadas mediante supercomputadoras sostienen estas predicciones.

Las *mareas* son un efecto secundario de la atracción gravitatoria de la Luna y del Sol sobre el globo terráqueo. La razón entre ambas atracciones es de 2.2 a 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 apreciable en los océanos donde se observa diariamente un cambio de varios metros en el nivel del mar.

## II. ANTECEDENTES HISTÓRICOS A LAS LEYES.

**El sistema geocéntrico**, mejorado hacia el año 140 por el astrónomo greco-egipcio Claudio Ptolomeo, partía de los siguientes supuestos: 1) todos los astros poseen una figura esférica; 2) las órbitas son perfectamente circulares y los movimientos siempre son uniformes; 3) la Tierra está situada en el centro del universo; 4) todo los astros se mueven en torno a la Tierra; y 5) la Tierra siempre yace inmóvil.

El heliocentrismo del astrónomo polaco Mikołaj Kopernik, i.e., Nicolaus Copernicus, no predecía las posiciones planetarias con mayor exactitud que el geocentrismo, aunque al menos facilitaba los cálculos requeridos para computar una órbita; pero esta falta de exactitud se debía a que el modelo copernicano, en su origen, arrastró ideas erróneas del modelo ptolemaico. Propuesto en 1543, el sistema heliocéntrico no empezó a arraigarse sino hasta las revisiones keplerianas de 1609 y 1618, y tampoco obtuvo pruebas sólidas sino hasta 1728, cuando Bradley descubrió la *aberración de la luz* ocasionada por el recorrido orbital de la Tierra. La prueba definitiva se consiguió en 1838, cuando Bessel observó y midió el primer *paralaje estelar* que representa la proyección de la órbita terrestre sobre el fondo de estrellas fijas.

**El sistema heliocéntrico**, en su versión original concebida por Copernicus, se basaba en los siguientes supuestos, no todos correctos: 1) todos los astros poseen una figura esférica; 2) las órbitas son perfectamente circulares y los movimientos siempre son uniformes; 3) el Sol está situado en el centro del universo; 4) únicamente la Luna se mueve en torno a la Tierra; 5) el Sol siempre yace inmóvil.

El astrónomo danés Tycho Brahe se percató que la falta de medidas precisas impedía lograr una comparación eficaz entre predicciones y observaciones. Sin telescopio y empleando un cuadrante mural de dos metros que construyó él mismo, acumuló veintiún

años de exactas efemérides planetarias (1576 a 1597) que igualaban la máxima resolución alcanzable por el ojo humano, un minuto de arco.

En 1609, el polímata italiano Galileo Galilei fabricó un telescopio y lo empleó para realizar observaciones astronómicas, cosa que pocos habían intentado. Dos de sus descubrimientos telescópicos resultaron 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. Hizo, además, cuidadosos experimentos de laboratorio que le ayudaron a comprender los conceptos de masa y de movimiento; estos trabajos se consideran los primeros efectuados bajo el rigor del método científico.

El modelo copernicano, más las observaciones de Tycho y de Galileo, sentaron las bases para el eventual desarrollo de las leyes de movimiento planetario, y estas, a su vez, para la ley de gravitación universal.

### III. LEYES DE KEPLER SOBRE MOVIMIENTO PLANETARIO.

El alemán Johannes Kepler, último astrónomo pretelescópico, fue quien finalmente 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 Tycho, su patrono y mentor, y al percatarse que la figura que mejor definía las trayectorias observadas era la elipse y no el círculo; este hallazgo resultó tan alarmante que hasta el mismo Galileo lo rechazó. 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 con figura elíptica. El Sol estará siempre en uno de los dos focos que contiene la elipse.

La primera ley tiene como consecuencia que un planeta se acercará y se alejará sucesivamente del Sol al recorrer 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 barrerá áreas iguales en tiempos iguales (realmente, esta fue la primera ley que descubrió Kepler).

Esta 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 relación siguiente:

$$V = D \div T$$

donde **V** representa la velocidad media (expresada 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 tiempo transcurrido (en segundos).

**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 365.25 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 150 millones de kilómetros).

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

Las leyes de movimiento planetario establecen con rigurosa exactitud las dimensiones relativas de las órbitas planetarias, quedando como problema fundamental la calibración del conjunto mediante la determinación del tamaño absoluto de la órbita terrestre (i.e., la unidad astronómica). Durante los siglos XVIII y XIX se hicieron minuciosas observaciones del planeta Venus durante sus tránsitos frente al Sol, método que entonces era el más eficiente para medir la órbita de la Tierra y que permitió derivar valores sucesivamente más precisos para la unidad astronómica. Ya en el siglo XX, la astronomía de radar y la telemetría realizada mediante astronaves han permitido medir las distancias con increíble exactitud, pues los errores actuales no exceden de varios metros y a veces ni siquiera pasan de milímetros.

#### **IV. LEYES DE NEWTON SOBRE MOVIMIENTO.**

Las *leyes de Newton sobre movimiento* constituyen la esencia y el cimiento de la física moderna, y al mismo tiempo subyacen la ley de gravitación universal. Estas tres leyes se expresan del modo siguiente:

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

**Segunda ley (1687), o ley de la fuerza.** La *aceleración* de un objeto cualquiera (concepto que se refiere al 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:

$$\mathbf{F} = \mathbf{m} \times \mathbf{a}$$

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"). Vale recordar que la masa, expresada habitualmente en kilogramos, es una medida de la cantidad de materia contenida en un cuerpo, concepto que será independiente del peso sostenido por un cuerpo en la Tierra.

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

## V. LEY DE NEWTON SOBRE GRAVITACIÓN UNIVERSAL.

Kepler había descifrado cómo se mueven los planetas, pero nunca llegó a comprender el porqué. El físico británico Isaac Newton investigó el asunto y lo resolvió mediante su *ley de gravitación universal*; le llamó "universal" al ver que la gravedad actuaba en todo lugar, tanto en la Tierra como en el espacio exterior. 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 por un centro común de masas. Incorporó también ideas sobre masa y aceleración adquiridas de Galileo Galilei, más la inversa del cuadrado que concibió el también británico 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  $m_1$  y  $m_2$  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:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

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 son las siguientes:

1. La variable **F** se expresa en *newton* (N), una unidad métrica derivada que equivale a  $1 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ .
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 (kg).
4. La variable **d** se expresa en metros (m).

## VI. RESULTADOS Y AVANCES POSTERIORES.

La ley de gravitación universal constituye una brillante intuición, pues Newton originalmente se basó en observaciones del desplazamiento de apenas siete astros, más un limitado número de experimentos sobre movimiento hechos en la Tierra, y resulta impresionante que se haya mantenido incólume durante cada uno de los numerosos experimentos con que sería confrontada. 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, siendo el factor clave la perfecta coincidencia entre las posiciones observadas y las predicciones hechas empleando esta ley.

Un resultado de la teoría newtoniana de la gravedad 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 principales personas que durante el siglo XVIII se encargaron de interpretar a cabalidad la gravitación newtoniana, y de llegar 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, un fenómeno que luego el astrónomo Laplace describiría con atino como variaciones regulares y no caóticas.

En la ley de gravitación universal se define la gravedad como una fuerza atractiva con propagación instantánea, pero estos supuestos quedarían eventualmente modificados a principios del siglo XX por la *teoría general de la relatividad* del físico Albert Einstein. También conocida como teoría einsteniana de la gravedad, dentro de esta nueva explicación las fuerzas gravitatorias han sido reemplazadas por curvaturas del espacio, y

la propagación gravitatoria nunca llegará a superar la velocidad de la luz.

---

**Copyright © 2020 Armando Caussade. Reservados algunos derechos.**  
Este opúsculo es gratis. Puede fotocopiar y distribuirse libremente.

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