

Jorge Barojas Weber y Andrea Mora Gómez

# Explicaciones acerca de la órbita de Mercurio

## Resumen

Como ejemplo de la evolución en la construcción del conocimiento científico, se consideran las sucesivas aportaciones de Kepler, Newton y Einstein para describir y explicar el movimiento del planeta Mercurio en su órbita alrededor del Sol.

## Características del planeta Mercurio

- Su masa es 0.054 veces más pequeña que la de la Tierra, que vale  $5.97 \times 10^{24}$  kg.
- Es el primero de todos los planetas del sistema solar; su distancia más cercana al Sol es de 47 millones de kilómetros y cuando está más alejado dista 70 millones de kilómetros (la Tierra está a una distancia promedio de 150 millones de kilómetros).
- Su movimiento de traslación alrededor del Sol es el más rápido de todos, pues viaja a una velocidad de 47 kilómetros por segundo y le da una vuelta al Sol en 88 días mientras que la Tierra viaja a la velocidad de 30 kilómetros por segundo y le da una vuelta al Sol en un año; es decir, en 365 días.
- Su órbita es la más alargada (su excentricidad vale 0.2056 mientras que la de la Tierra es 0.0157). Cuando el valor de este parámetro se aproxima a cero la órbita es más circular.

A continuación, analizamos una sola de estas propiedades de Mercurio: la órbita que describe alrededor del Sol y consideramos las aportaciones de Kepler, Newton y Einstein.

“... hundo mi brazo izquierdo en el Pacífico...”

## Observación y sistematización de datos

Johannes Kepler (1571-1630) supuso que el movimiento de los planetas estaba controlado por seres mágicos muy poderosos, como ángeles, que los hacían moverse con ritmo y armonía. Sin embargo, su pensamiento físico matemático tuvo tres características sumamente evolucionadas para la época:

**Creatividad:** Tomó en cuenta los datos obtenidos por Tycho Brahe (1546-1601) y los organizó en nuevos contextos siguiendo el modelo heliocéntrico de Copérnico en lugar del modelo geocéntrico de Ptolomeo. Las descripciones en órbitas elípticas alrededor del Sol dejaron obsoletas las combinaciones de curvas como epiciclos y excéntricas.

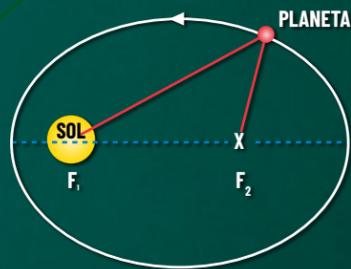
**Mentalidad abierta:** Era escéptico respecto de las ideas tradicionales, los axiomas y los dogmas; rompió con el hábito mental de aferrarse a las creencias aceptadas y superó este reto estableciendo nuevos conceptos y relaciones.

**Capacidad de síntesis:** Propuso una nueva estructura teórica del universo, más coherente, sencilla y efectiva que todos los modelos anteriores. Formuló tres leyes que rigen el movimiento de los planetas (Figura 1), publicadas en 1609 en su obra *Astronomia Nova*.

### PRIMERA LEY O LEY DE LAS ÓRBITAS

Los cuerpos celestes tienen movimientos en órbitas elípticas alrededor del Sol, el cual se encuentra en uno de los focos de la elipse.

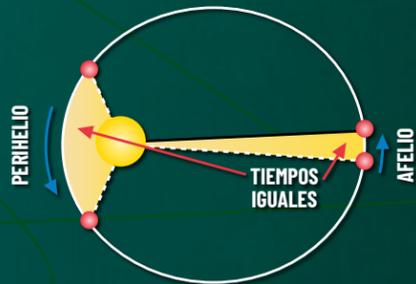
La suma de las distancias del planeta a cada uno de los focos de la elipse ( $F_1$  y  $F_2$ ) es una constante igual a dos veces el semieje mayor de la elipse ( $2a$ ). Esta ley indica que las formas de las órbitas planetarias son elipses en un plano, como consecuencia de que la fuerza gravitacional es central.



### SEGUNDA LEY O LEY DE LAS ÁREAS

Las áreas barridas por los radios vectores que van del Sol al planeta son iguales cuando son iguales los tiempos empleados en recorrer esos segmentos de la trayectoria.

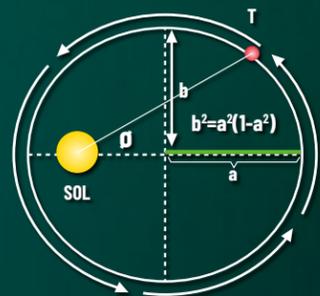
Esta ley prescribe que las órbitas elípticas se recorren con una velocidad ( $v$ ) que es inversamente proporcional a la distancia del planeta al Sol ( $r$ ), como consecuencia de la conservación del momento angular ( $mvr$ ); es decir, el planeta se mueve más rápido en el perihelio y menos en el afelio.



### TERCERA LEY O LEY ARMÓNICA

Los cubos de las distancias medias de cada planeta al Sol ( $a^3$ ) son proporcionales a los cuadrados de sus períodos de revolución ( $T^2$ ). Para toda pareja de planetas con distancias medias al Sol  $a_1$  y  $a_2$  y períodos  $T_1$  y  $T_2$  se cumple que  $[a_1/a_2]^3 = [(T_1/T_2)^2]$ , como consecuencia de que la fuerza gravitacional es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre el Sol y los planetas.

La relación anterior equivale a  $[(a_1)^3]/[(T_1)^2] = [(a_2)^3]/[(T_2)^2]$ . Si se considera que el planeta 2 es la Tierra y las cantidades  $a_1$  y  $T_1$  se miden en unidades reducidas, entonces  $[(a_1)^3]/[(T_1)^2] = 1$ .



## Descripción de la ley de atracción gravitacional

Isaac Newton (1642-1727) propuso en 1686 que entre el Sol y los planetas se aplicaba la fuerza de atracción gravitacional, de naturaleza desconocida, que operaba instantáneamente a través del espacio vacío, pero de magnitud y dirección predecibles.

La ley universal que expresa la atracción gravitacional entre el Sol (de masa  $m_s$ ) y un planeta de masa ( $m_p$ ) corresponde a la ecuación  $F_g = G \left[ \frac{(m_s m_p)}{r^2} \right]$ , donde  $r$  es la distancia que separa a los dos cuerpos celestes y  $G$  es la constante de atracción universal. Esta dependencia con el inverso del cuadrado de la distancia se aplica estrictamente sólo cuando los cuerpos en interacción tienen forma esférica.

Newton definió el concepto de fuerza como *the rate of change of momentum*; es decir, la fuerza es la razón de cambio respecto del tiempo del momento lineal:  $F = \frac{dp}{dt}$  donde el momento lineal  $p$  es el producto de la masa ( $m$ ) por la velocidad ( $v$ ). Si en la ecuación anterior se introduce la expresión de la fuerza gravitacional  $F_g$  en el lugar de  $F$  y se realizan varias operaciones matemáticas, resultan las formas de las trayectorias de los planetas que luego Johannes Kepler resumió en sus tres leyes.

Newton explicó lo que Kepler propuso: los planetas describen órbitas que son curvas cerradas (elipses o circunferencias) que permanecen fijas en el espacio y corresponden a trayectorias perfectas y eternas. Pero Newton no aclaró el misterio de cómo se produce esta fuerza de atracción gravitacional  $F_g$ . Convirtió la magia de las esferas celestes llenas de armonía y regularidad en cuya existencia creía Kepler en un misterio que cuestiona y explica, pero deja dudas acerca de por qué se mueven los planetas.



Arriba: Johannes Kepler (1571-1630) Abajo: Isaac Newton (1642-1727)

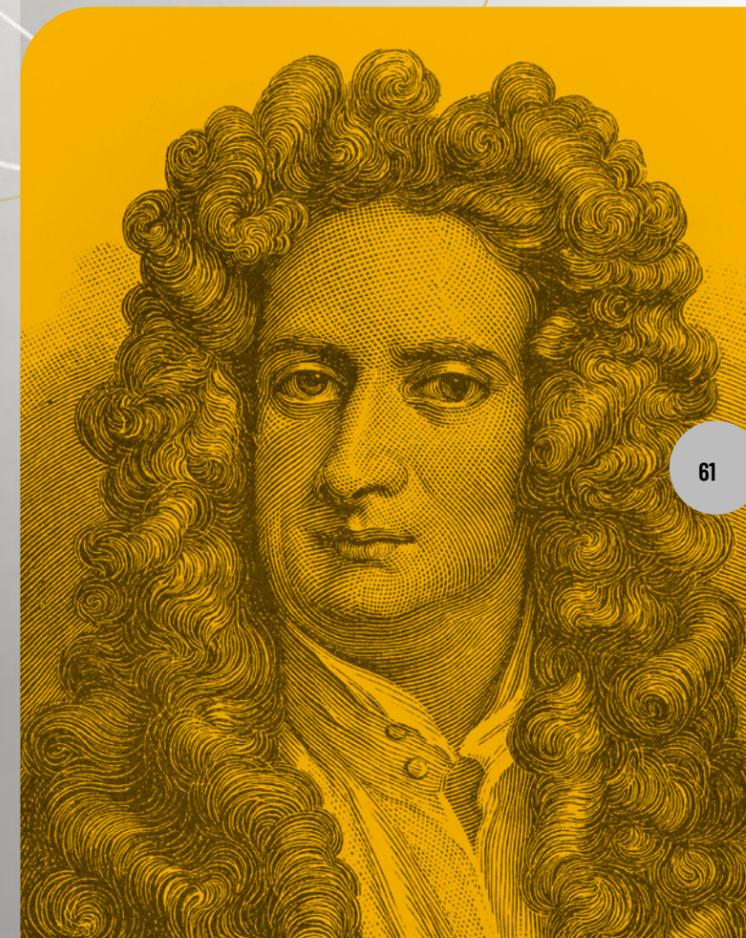
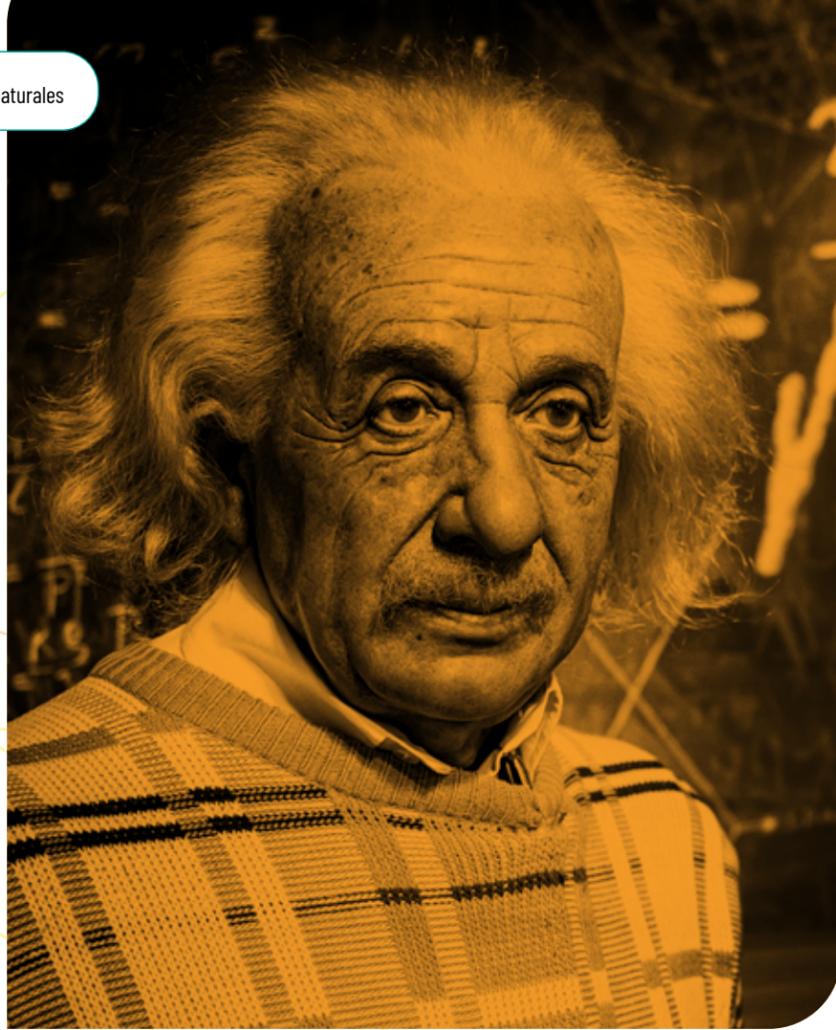


Figura 1. Explicación del contenido y diagrama ilustrativo de las tres leyes de Kepler.



Albert Einstein (1879-1955)

### Corrimiento del perihelio de Mercurio

Tanto en el cielo como en la Tierra, la física llamada clásica consideraba que el espacio era algo infinito en su extensión y con las mismas propiedades en todo lugar y dirección, mientras que el tiempo, siendo independiente del espacio, tenía duración sin límite tanto hacia el pasado como hacia el futuro y transcurría de manera idéntica para todo observador. Espacio y tiempo eran cantidades absolutas que no dependían del estado de movimiento del observador; por eso, distancias y tamaños, duraciones y momentos, en principio podían ser medidos, calculados, predichos, comprendidos y explicados.

Sin embargo, resultó inexplicable para la física newtoniana la observación de que Mercurio, después de dar una vuelta completa al Sol no regresara exactamente en su órbita al lugar donde había partido: el eje principal de la elipse mostraba un cambio progresivo en su orientación. Cuando Mercurio llegaba al perihelio (la posición del planeta en que su distancia al Sol es la más corta) se apreciaba una pequeñísima desviación angular del eje de la órbita. Esto es lo que se conoce como la precesión anómala del perihelio de Mercurio. Existe precesión cuando algo que gira se adelanta en el tiempo.

A principios del siglo pasado, Albert Einstein (1879-1955) desarrolló su teoría de la relatividad en dos partes. Primero, en 1905, en la relatividad especial introdujo la noción de espacio-tiempo y postuló la constancia de la velocidad de propagación de la luz. Después, en 1915, en la relatividad general, enunció el principio de equivalencia en términos del cual la acción gravitacional produce el mismo efecto que la aceleración del sistema de referencia. La relatividad especial se aplica cuando el movimiento es con velocidad constante y en línea recta, mientras que la relatividad general cuando hay giros o se producen aceleraciones en el movimiento.

La teoría de la relatividad general señala que la fuerza de atracción gravitacional  $F_g$  es de naturaleza geometrodinámica: la fuerza de gravedad que producen grandes concentraciones de materia es debida a cambios en la configuración del espacio-tiempo; es decir, las interacciones físicas se explican como propiedades geométricas. De esta manera, en la vecindad de una estrella masiva como el Sol el espacio físico en que se mueven los planetas ya no es plano como en la física newtoniana, sino que es curvo y se modifican los valores de distancias y ángulos, de tiempos y velocidades.

En 1929 Einstein expresó que *"mi teoría explica cuantitativamente la rotación secular de la órbita de Mercurio descubierta por LeVerrier, sin necesidad de hipótesis especiales"*. Su cálculo relativista dio como resultado 43.0 segundos de arco por siglo, mientras que el valor experimental conocido en ese momento era de 42.9. Einstein convirtió el misterio del origen de la fuerza de atracción gravitacional en un milagro explicativo debido a la geometrización de la mecánica.



### La búsqueda de mejores explicaciones científicas

Las explicaciones de Kepler, Newton y Einstein de la órbita del planeta Mercurio muestran el camino del progreso de la ciencia, la astrofísica en este caso. Podríamos decir que en buena parte ilustran la necesidad de aclarar los mitos (los ángeles que controlan el movimiento de los planetas), resolver los misterios (el origen de la fuerza de atracción gravitacional) o aclarar los milagros (los cambios en el espacio-tiempo producen interacciones gravitacionales en la vecindad de grandes concentraciones de materia).

En relación con los tres tipos de explicaciones que hemos considerado respecto de la órbita de Mercurio, podemos preguntarnos si esas aportaciones científicas fueron descubrimientos o invenciones. Los descubrimientos permiten explicar o aplicar algo existente, aunque haya permanecido desconocido. Hay que encontrarlos, organizarlos y comunicarlos, como lo hizo Kepler al proponer sus tres leyes: los planetas ya se movían de la manera en que él lo describió. En cambio, las invenciones corresponden a la creación

original de algo totalmente nuevo, aunque existan antecedentes, pero que nadie se había atrevido antes a proponer y poner a prueba de manera exitosa. Así ocurrió con la ley de la atracción gravitacional propuesta por Newton y la teoría de la relatividad general formulada por Einstein.

Las aportaciones de Kepler, Newton y Einstein son eslabones en una cadena de explicaciones en la cual el modelo del universo newtoniano superó al modelo kepleriano y a su vez fue superado por el modelo einsteiniano, mismo que sigue siendo cuestionado y modificado. En la actualidad se investigan fenómenos que Einstein no explicó. En la concepción del universo einsteiniano no pudieron haber explicaciones satisfactorias acerca de la expansión acelerada, la materia oscura o la energía oscura; éstos y otros fenómenos le eran desconocidos. Entender las características conocidas actualmente acerca del universo va más allá de las explicaciones

de la órbita del elemento más pequeño de nuestro sistema planetario solar. Son nuevos eslabones en la cadena de las explicaciones científicas acerca del origen y evolución del universo.

La ciencia no establece verdades absolutas; propone explicaciones cada vez mejores. El conocimiento científico siempre es limitado y provisional. El conocimiento científico contribuye a invalidar dogmas que confinan y a superar contextos que empobrecen. Toda explicación tiene su región de validez.

Según Richard Feynman: *“la ciencia transforma las fronteras de nuestra ignorancia”*. Por eso evolucionan conceptos, modelos, leyes, principios y teorías. Cuando hay evolución se dan cambios en las representaciones de los resultados y en las interpretaciones de sus consecuencias. Así ha ocurrido con las explicaciones de la órbita de Mercurio.

### Referencias

Recomendamos los siguientes videos:

Orbits and Kepler's Laws: <https://www.youtube.com/watch?v=wj00rr2uPuU>

The Mysterious Orbit of Mercury: <https://www.youtube.com/watch?v=hSXNEOpNtr8>

### Ficha de los autores:

**Jorge Barojas Weber:**  
[jorge.barojas@ilce.edu.mx](mailto:jorge.barojas@ilce.edu.mx)

Profesor del Departamento de Física de la Facultad de Ciencias y tutor en el Doctorado en Ciencias de la Administración (línea de investigación en administración del conocimiento), ambas de la UNAM. Actualmente es investigador adscrito a la Unidad Académica del ILCE.

**Andrea Mora Gómez:**  
[mora.andrea25@hotmail.com](mailto:mora.andrea25@hotmail.com)

Egresada de la carrera de Licenciatura en Matemáticas de la Facultad de Ciencias de la UNAM. Actualmente realiza su servicio social colaborando en proyectos de la Unidad Académica del ILCE.