

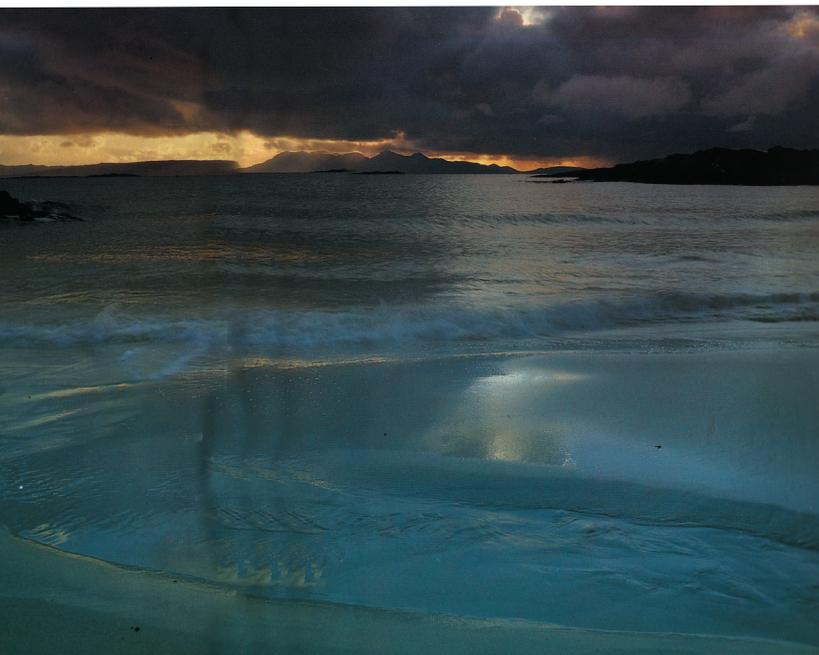
La naturaleza y sus leyes permanecieron en la noche, Dios dijo "hágase Newton", y todo fue luz.

Alexander Pope

CONTENIDOS

- Modelos cosmológicos
- Leyes de Kepler
- Ley de Gravitación Universal
- Consecuencias de la Ley de Gravitación
- Campo gravitatorio

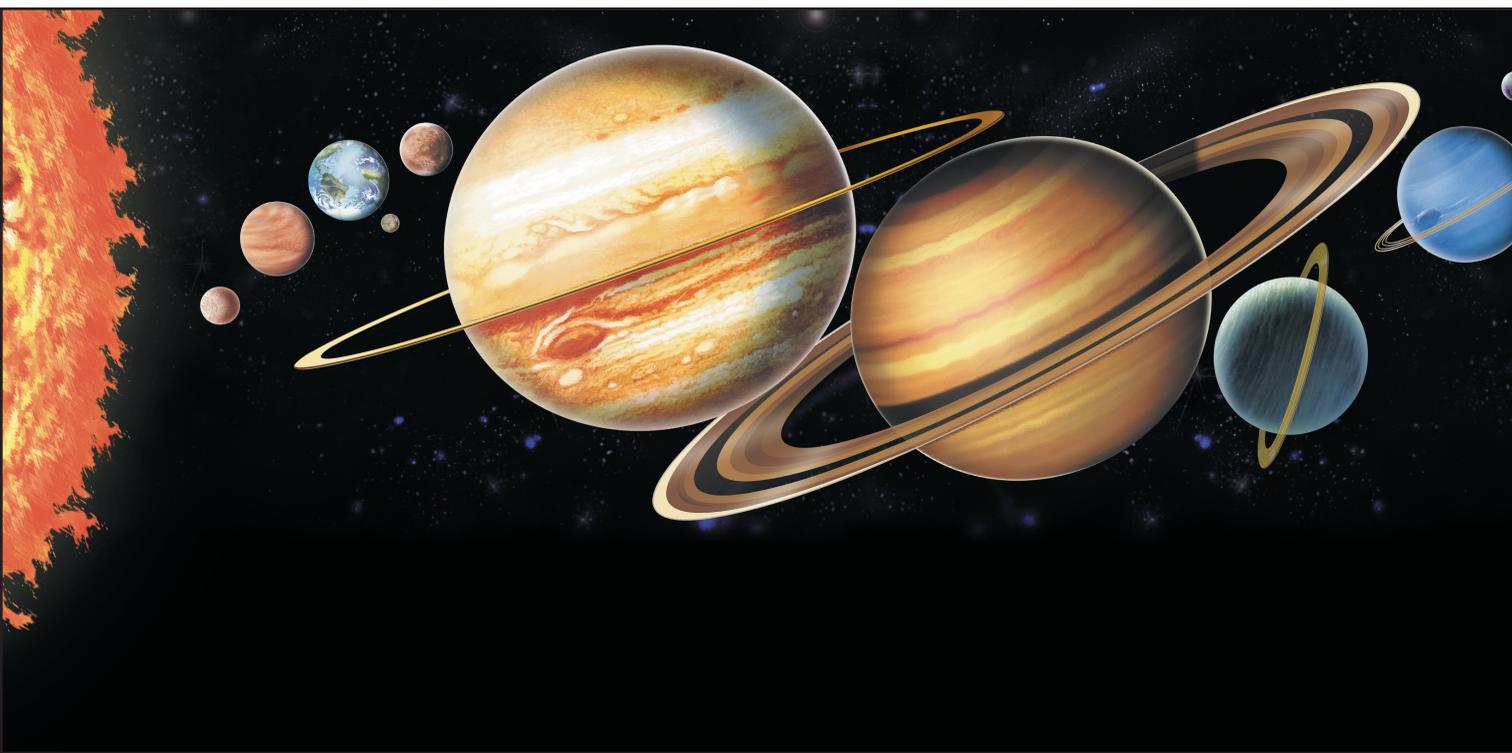
4 LA MECÁNICA CELESTE



Cambios climáticos en el mar.

Desde tiempos remotos, el hombre ha considerado que los movimientos de los astros dan lugar al día, a la noche, y al cambio de estaciones. Además, sobre todo desde que se hizo sedentario, el ser humano se interesó en conocer las posiciones de los astros porque le indicaban cuándo arar, sembrar, e incluso cómo guiarse en sus viajes por tierra y por mar. Las primeras civilizaciones que se dedicaron a una observación intensa y sistemática del cielo fueron la babilónica y la egipcia, aunque no lograron elaborar una astronomía propiamente dicha. Fueron los griegos los primeros en establecer un modelo astronómico, que logró perdurar durante unos dos mil años y que consideraba la Tierra inmóvil en el centro del universo. Posteriormente, Nicolás Copérnico propuso un nuevo modelo, defendido luego por Galileo Galilei, en el que la Tierra se desplazaba alrededor del Sol central, mientras que Johannes Kepler logró establecer que las órbitas de los plane-

tas son elipses con el Sol en uno de sus focos. Finalmente, Isaac Newton logró explicar los movimientos de los cuerpos en la Tierra y los de los astros en el sistema planetario mediante un pequeño conjunto de leyes (su famosa Ley de Gravitación Universal y sus Leyes de Movimiento), que unificaron desde entonces todo el universo.



El sistema solar.

Las primeras respuestas sobre la naturaleza del universo

¿Qué es el universo? ¿Cuáles son sus límites? ¿Cómo surgió? ¿Cuál es la razón de su existencia? ¿Qué lugar ocupa la humanidad en esta inmensidad? Sin duda, estas son algunas de las preguntas que el hombre intenta responder desde tiempos inmemoriales.

Las inquietudes sobre el universo no han sido, ni son, solamente científicas. Las respuestas de la ciencia tampoco son independientes de la concepción histórica, social, cultural y religiosa. Cada sociedad construye una imagen propia del mundo. Estas visiones se expresan en ramas del saber tan dispares como la Literatura, la Filosofía, la Música, la Pintura, la Religión y las Ciencias de la Naturaleza. En las siguientes páginas se presenta la construcción de distintos conceptos astronómicos a lo largo de unos dos milenios.

Inicialmente, las respuestas sobre la naturaleza del universo fueron míticas:

Ra, el dios Sol, abrió sus dos ojos y proyectó luz sobre Egipto y separó la noche del día. Los dioses salieron de su boca y la humanidad de sus ojos. Todas las cosas nacieron de él (Cosmogonía egipcia de 300 a.C.).

Esta visión también se dio, muy posteriormente, en las culturas originarias de América:

Y dijeron los Progenitores, los Creadores y Formadores, que se llaman Tepeu y Gucumatz: Ha llegado el tiempo del amanecer, de terminar la obra y que aparezcan los que nos han de sustentar, y nutrir, los hijos esclarecidos, los vasallos civilizados; que aparezca el hombre, la humanidad, sobre la superficie de la tierra. Así dijeron. Se juntaron, llegaron y celebraron consejo en la oscuridad y en la noche; luego buscaron y discutieron, y aquí reflexionaron y pensaron. De esta manera salieron a luz claramente sus decisiones y encontraron y descubrieron lo que debía entrar en la carne del hombre. Poco faltaba para que el Sol, la Luna y las estrellas aparecieran sobre los Creadores y Formadores (Popol Vuh. Libro sagrado de los mayas).

Modelos cosmológicos

La cosmología griega

La imagen que la ciencia actual tiene del universo posee unos pocos siglos de existencia, e incluso menos de un siglo en muchos aspectos. Hasta mediados del siglo XVI, el universo fue considerado como un cosmos, es decir, como una unidad ordenada donde cada elemento, incluyendo al hombre, ocupa el lugar que le corresponde.

Los babilonios y los egipcios fueron los primeros en realizar observaciones metódicas y sistemáticas del cielo. A lo largo de los siglos acumularon gran cantidad de datos, e incluso llegaron a realizar predicciones sobre los cambios celestes, como la posición de la Luna a lo largo del año y los eclipses. A pesar de ello, fueron los griegos los primeros que, aprovechando muchas de las observaciones de sus predecesores, lograron construir modelos del universo que describieran los movimientos celestes, partiendo de causas naturales.

Aristóteles, quien vivió en Grecia en el siglo IV a.C., afirmaba que había dos tipos de movimiento.

 **Filolao** propuso que la Tierra, la Luna y el Sol se trasladaban en una órbita circular alrededor de un fuego central. Además agregó un planeta, la Contratierra, entre el fuego central y la Tierra, que la protegía de la exposición directa al fuego.

El movimiento natural	El movimiento violento
Este movimiento consistía en la tendencia a alcanzar el lugar de reposo. Según esta explicación, el agua de lluvia cae y el humo asciende porque es natural que los objetos pesados caigan y que los livianos asciendan.	Este movimiento era ocasionado por alguna fuerza exterior, o sea tenía una causa externa. Por ejemplo, los carros avanzaban porque eran tirados por caballos. Según él, para desplazar un objeto de su lugar natural de reposo era necesario realizar un movimiento violento, es decir empujarlo o tirar de él.

Aristóteles también sostuvo que la Tierra se hallaba en reposo en el centro del universo, porque era su lugar natural. Además, al igual que su maestro Platón, suponía que las órbitas de los cuerpos celestes debían ser necesariamente circulares dado que los círculos no tienen principio ni fin y, por lo tanto, representan la eternidad y la inmutabilidad, mientras que su forma equidistante del centro representa la ausencia de cambios y la perfección. Estas ideas resultaron coherentes con las percepciones diarias: el Sol, la Luna, los planetas y las estrellas parecen moverse alrededor de la Tierra; y además, no parece que la Tierra se moviera. Solo en la Tierra existe la mutabilidad y la imperfección.

En la cosmovisión aristotélica, las leyes de movimiento celeste eran diferentes a las de los movimientos en la Tierra. Surge entonces una separación entre el mundo terrestre y el mundo de los astros. Sin embargo, ambas regiones son necesarias en su concepción del cosmos, puesto que cada una de ellas tiene una finalidad específica. Recién con Isaac Newton, unos 2000 años más tarde, el universo sería reunificado bajo las mismas leyes.

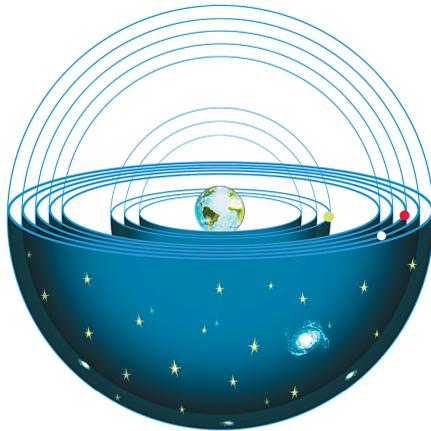
A pesar de las ideas aristotélicas, hubo griegos como Filolao e Hicetas que plantearon que la Tierra se movía. Incluso Aristarco de Samos fue acusado de impío por sus ideas heliocéntricas, que resultaron insostenibles en aquella época porque parecían contradecirse con los hechos observados: el Sol parece moverse sobre nosotros y no advertimos el movimiento terrestre.

 **Aristarco de Samos** fue un astrónomo griego nacido en 310 a.C.; vivió la mayor parte de su vida en Alejandría. Formuló por primera vez una teoría heliocéntrica completa, afirmando que la Tierra es un planeta que como el resto, se desplaza en una órbita circular en torno al Sol. Además sostuvo que el Sol se encuentra a una distancia muy grande de la Tierra y es mucho mayor que ésta.

El modelo geocéntrico

La explicación del universo que finalmente se aceptó, se basó en algunas ideas de Platón, pero especialmente de Eudoxo, Calipo y Aristóteles, cuya autoridad llegó a ser inobjetable con el tiempo. El modelo, llamado **geocéntrico** (*Geo* = Tierra), se puede resumir en las siguientes ideas:

- La Tierra es esférica y está inmóvil (geoestatismo).
- La Tierra se encuentra en el centro del universo (geocentrismo).
- La Tierra está rodeada por esferas que transportan a los planetas, a la Luna, al Sol y a las estrellas.
- La esfera más lejana es la de las estrellas que se encuentran fijas.
- Los movimientos de los astros son circulares y uniformes.

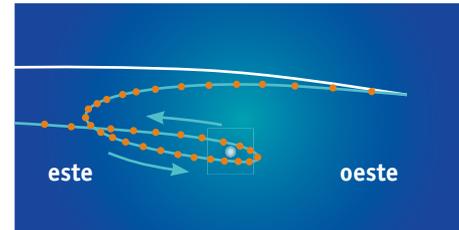


A pesar de su aceptación, el modelo, no podía explicar correctamente un conjunto de fenómenos. Entre ellos, por qué en algunas épocas del año los planetas brillaban más que en otras, ni por qué el tamaño de los planetas variaba. Pero fundamentalmente no logró resolver el problema de la **retrogradación** de los planetas. Aristóteles y sus discípulos intentaron encontrar las soluciones a estos inconvenientes, pero no lo consiguieron.

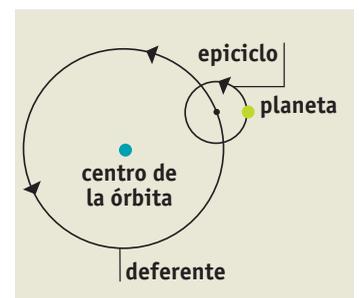
Con el tiempo, la Astronomía se fue transformando en una ciencia cuyo objetivo consistía en encontrar un modelo que describiera el movimiento celeste en forma más precisa, pero respetando los postulados del modelo geocéntrico. Hacia la mitad del siglo II, en su libro *Almagesto* el alejandrino Claudio Ptolomeo, propuso un sistema astronómico en el cual la Tierra, según los postulados de sus antecesores, estaba inmóvil en el centro del universo y los planetas se trasladaban alrededor del Sol describiendo **epiciclos**.

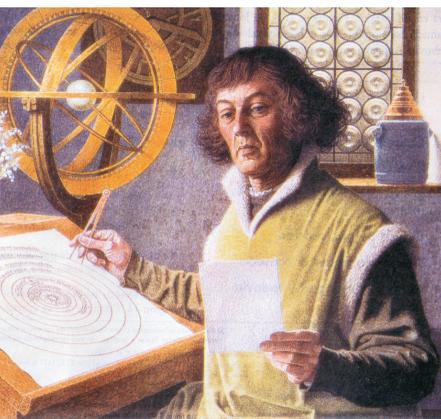
El modelo ptolemaico consiguió explicar y predecir con más precisión el movimiento de los astros, y el cambio de tamaño y brillo en los planetas, pues cuando el planeta se halla en la parte exterior del epiciclo parece más pequeño (al estar más alejado de la Tierra), y cuando está en la parte interna parece más grande. Sin embargo seguía manteniendo imprecisiones menores con respecto al movimiento de los astros, por lo cual cada vez se agregaban más epiciclos. A pesar de estas insuficiencias, el modelo de Ptolomeo explicaba satisfactoriamente muchos fenómenos, siendo por ello preferible a otros. Ésta es una de las razones que le permitió perdurar por más de 1000 años, hasta que en 1514, el sacerdote y astrónomo Nicolás Copérnico propuso otro modelo más simple.

Se denomina **retrogradación** a la forma que tiene la trayectoria que describen los planetas vistas desde la Tierra, formando una especie de bucle. En ciertos períodos, los planetas aparentemente se detienen, e incluso parecen retroceder, hasta finalmente volver a invertir su sentido original.



Un **epiciclo** es la trayectoria circular de un punto alrededor de un centro móvil que, a su vez, sigue otra trayectoria circular llamada **deferente**.





Nicolás Copérnico (1473-1543).

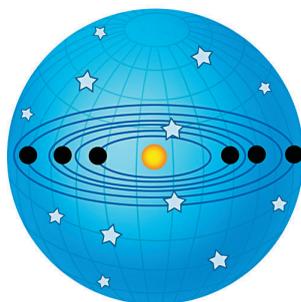
Una de las razones que llevaron a **Nicolás Copérnico**, sacerdote y astrónomo polaco, a proponer el modelo heliocéntrico fue la imagen del Sol ocupando el centro del universo, como fuente de toda luz y vida, imagen sensible del **Uno Neoplatónico** y del mismo Dios. Él pensaba que el universo debía ser más sencillo que el propuesto por **Ptolomeo**, porque creía que Dios no haría un mundo tan complicado. La redacción de su gran obra le llevó unos 25 años. El primer ejemplar lo habría recibido en su lecho de muerte, el mismo día de su fallecimiento. Dado su estado de salud, es muy probable que no fuera consciente de lo que estaba recibiendo.

El modelo heliocéntrico

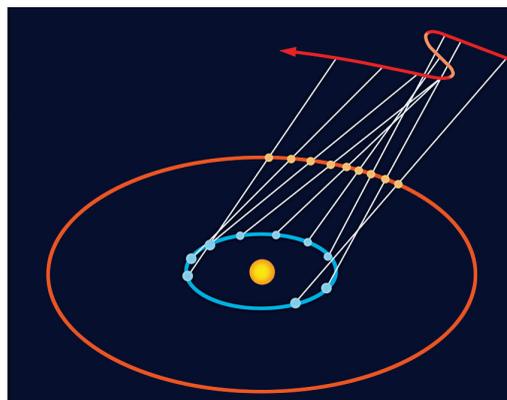
Unos 2000 años después de la muerte de Aristóteles, el astrónomo polaco Nicolás Copérnico presentó un nuevo modelo del universo. A partir de la lectura de los antiguos griegos, propuso que el Sol se encuentra en el centro del Universo, mientras que la Tierra y el resto de los planetas se trasladan a su alrededor. Este modelo **heliocéntrico** (*Helios* = Sol) se oponía a las ideas de sus contemporáneos, que continuaban siendo aristotélicas o geocéntricas y, que muchos consideraban irrefutables e indiscutibles.

El modelo heliocéntrico tiene las siguientes características fundamentales.

- La Tierra es un planeta.
- La Sol se encuentra en el centro del universo (heliocentrismo).
- Los planetas, con las esferas que los transportan, giran alrededor del Sol en el orden siguiente: Mercurio, Venus, Tierra, Marte, Júpiter y Saturno.
- La Luna gira alrededor de la Tierra.
- La esfera de las estrellas consideradas fijas se encuentra inmóvil.
- Los movimientos de los astros siguen postulándose como circulares y uniformes, como sostenía el modelo anterior.
- Se continúa considerando la existencia de los epiciclos para dar coherencia a la teoría.



Modelo heliocéntrico.



El italiano Galileo Galilei, en el siglo XVII, adoptó y defendió el modelo copernicano. En 1609, perfeccionó el telescopio que había sido recientemente inventado en la actual Holanda. Mediante uno que construyó él mismo, exploró el cielo, observó los cráteres de la Luna y descubrió cuatro satélites de Júpiter. Sin embargo, el sistema copernicano debió afrontar grandes discusiones entre defensores y opositores antes de ser aceptado.

El enfrentamiento de modelos rivales, como los de Copérnico y Aristóteles, fue frecuente a lo largo de la historia de la ciencia. Decidir entre uno y otro no dependía exclusivamente de las observaciones, sino también de los supuestos ideológicos de cada científico, de la comunidad de científicos y de la sociedad en general. La defensa del sistema geocéntrico no se basaba simplemente en lo que se percibía con los sentidos. También se defendía una manera de entender al mundo. Para la cultura de su época, una Tierra en el centro del universo significaba que el hombre era la criatura más importante del cosmos. Los supuestos movimientos circulares y uniformes de los astros, sin principio ni fin, expresaban la perfección de los cielos, en contraposición con el mundo imperfecto de los seres humanos. Abandonar el sistema geocéntrico implicaba, en algún sentido, sacar al hombre su primacía en el mundo. Indudablemente, una tarea nada fácil de realizar.

Leyes de Kepler

Primera Ley de Kepler

Copérnico y Galileo supusieron que las órbitas planetarias eran circulares, mientras que el Sol se ubicaba en el centro de dichas circunferencias concéntricas. Johannes Kepler (1571–1630), contemporáneo de Galileo, cuando revisaba personalmente las anotaciones de las posiciones de los astros efectuadas durante muchos años por su maestro, el astrónomo danés Tycho Brahe (1546–1601), notó que la órbita de Marte no era una circunferencia perfecta, sino que se parecía ligeramente a un óvalo. Se presentaban entonces dos posibilidades básicas: o bien había errores en los datos, o bien las órbitas no eran circulares. Kepler, que conocía cuán meticuloso y preciso era su maestro, luego de largo tiempo de revisión de los datos que éste había obtenido a simple vista (todavía no existía el telescopio, que fue inventado siete años después de la muerte de Tycho Brahe) se decidió por la segunda opción. Esto lo llevó a formular una hipótesis que se conoce como la **Primera Ley de Kepler**:

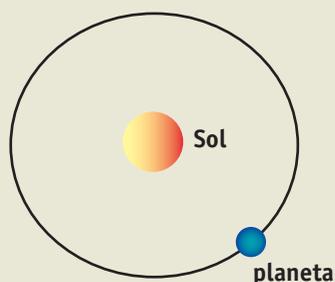
Las órbitas de los planetas son elípticas y el Sol se encuentra en uno de los focos de dichas elipses.

El postulado de la circularidad de las órbitas de los planetas tenía una historia de unos 2000 años. El abandono de esta idea por parte de Kepler no fue una decisión tomada de un día para el otro, sino que le llevó mucho tiempo de dudas, hipótesis, cálculos y revisión de los datos observacionales de Brahe. Sin embargo, pasados algunos años, esta nueva hipótesis fue aceptada por la comunidad científica. Así, el Sol dejó de ocupar el punto central del sistema solar, de la misma manera que con Copérnico la Tierra había sido desplazada de dicho lugar. El hombre no se encontraba en el centro del universo. El Sol, expresión de la luz divina, tampoco.

La excentricidad de las órbitas

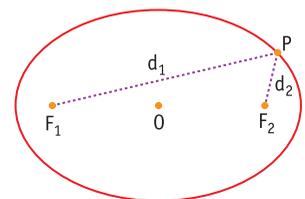
Se llama **excentricidad**, e , de una elipse a un número entre 0 y 1 que indica en qué grado esta figura difiere de una circunferencia. Si la excentricidad es cero, entonces la elipse coincide con la circunferencia y cuanto más cercano a 1 es el valor, entonces más alargada es la elipse.

Las órbitas planetarias son muy poco excéntricas. Si bien son elipses, son aproximadamente circulares. La excesiva forma elíptica de las órbitas planetarias en las ilustraciones que se observan habitualmente en libros y revistas pretenden hacer hincapié precisamente en las formas elípticas y no en qué grado lo son.

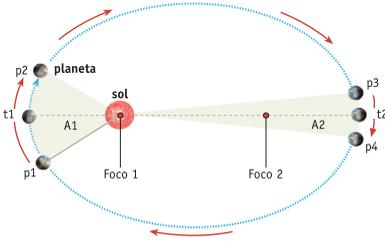


La excentricidad de la órbita terrestre es menor que 0,02, lo cual expresa que su forma es casi indistinguible de una circunferencia. La excentricidad de la órbita de Marte es casi 5 veces mayor que la de la Tierra, siendo la diferencia entre el diámetro mayor y el diámetro menor de 0,005. En cambio, la excentricidad de la órbita del cometa Halley es 0,97.

Una **elipse** es el lugar geométrico de los puntos del plano que verifican que la suma de las distancias a dos puntos fijos, llamados focos, es constante. Básicamente presenta la forma de un óvalo más o menos achatado.



Si ΔA es el área que barre el segmento que une el centro de un planeta con el centro del Sol durante el transcurso de un tiempo Δt , se llama **rapidez areolar media** del planeta al cociente $\frac{\Delta A}{\Delta t}$.



Segunda Ley de Kepler. Como la velocidad areolar es constante, si $t_1 = t_2$ entonces $A_1 = A_2$.

La **unidad astronómica** (UA) es la distancia media de la Tierra al Sol, que equivale aproximadamente a 150 millones de kilómetros. Es decir:

$$1 \text{ UA} = 150\,000\,000 \text{ km}$$

Esta es una unidad de longitud utilizada en Astronomía para trabajar con valores de distancias muy grandes, del orden de las distancias interplanetarias.

Además de su famosa primera ley, Kepler formuló otras dos, menos conocidas en general pero no por ello menos importantes.

Segunda Ley de Kepler

La Segunda Ley de Kepler, presentada conjuntamente con la primera en su obra *Nueva Astronomía* (1609), afirma que:

La rapidez de un planeta es tal que una línea imaginaria trazada desde el centro del Sol al centro del planeta barre áreas iguales en iguales intervalos de tiempo.

Si se llama **rapidez areolar** media al cociente entre el área que barre el segmento que une al centro del planeta con el centro del Sol y el tiempo transcurrido, entonces la Segunda Ley puede expresarse diciendo que la rapidez areolar de un planeta en su traslación alrededor del Sol es constante. Dado que las órbitas son elípticas, los planetas deben variar su rapidez para barrer iguales áreas en el mismo tiempo. La rapidez de traslación de cada planeta es mayor cuando se encuentra más cercano al Sol, y es menor cuando se halla más lejos de éste. El punto de mayor rapidez es el de mayor aproximación al Sol y se denomina **perihelio**, mientras que el de menor rapidez, el de mayor distancia radial al Sol, se llama **afelio**.

Tercera Ley de Kepler

La Tercera Ley describe la relación entre la distancia media de un planeta al Sol y su período de traslación (tiempo que tarda en realizar un giro completo alrededor del Sol) y afirma que:

Los cuadrados de los períodos de los planetas son proporcionales a los cubos de sus distancias medias al Sol.

Esta ley se puede enunciar diciendo que el cuadrado del período dividido por el cubo de la distancia media al Sol es constante para todos los planetas, es decir el cociente da por resultado el mismo valor para todos ellos. Por lo tanto:

$$\frac{T^2}{d^3} = K$$

donde T es el período de traslación de un planeta alrededor del Sol, d es la distancia media del centro del planeta al centro del Sol y K es una constante.

Como este cociente da lo mismo para cualquier planeta, para calcular la constante K , se puede tomar el planeta Tierra. En este caso, si se considera como unidad de tiempo el año terrestre, y como unidad de distancia la **unidad astronómica** (UA) que es la distancia media entre el Sol y la Tierra, entonces se obtiene que:

$$K = \frac{T^2}{d^3} = \frac{(1 \text{ año terrestre})^2}{(1 \text{ UA})^3} = 1 \frac{\text{año terrestre}^2}{\text{UA}^3}$$

De esta manera se obtiene que el valor de K es igual a la unidad. Expresando los períodos orbitales en años terrestres, y la distancia orbital media en unidades astronómicas, el valor de la constante será siempre igual a 1 independientemente del planeta del que se trate. Así, a partir del período orbital de un planeta es posible calcular su distancia media al Sol.

Aplicaciones de la Tercera Ley de Kepler

Si se sabe que Kepler estimó el período de Marte (T_M) en 684 días terrestres, determinen la distancia media de Marte al Sol (d_M) tomando la Tierra como referencia.

Dado que el período de Marte es 684 días terrestres, su equivalente en años terrestres es:

$$\frac{684 \text{ d}}{365 \text{ d}} \cdot \text{años terrestres} = 1,87 \text{ año terrestre.}$$

Como $1 \frac{\text{año terrestre}^2}{\text{UA}^3} = \frac{T_M^2}{d_M^3}$, por lo tanto,

$$d_M^3 = \frac{T_M^2}{1 \frac{\text{año terrestre}^2}{\text{UA}^3}} = \frac{(1,87 \text{ año terrestre})^2}{= 3,5 \text{ UA}^3} \cdot \text{UA}^3 = \frac{3,5 \text{ año terrestre}^2}{\text{año terrestre}^2}$$

de donde $d_M = 1,52 \text{ UA}$

Es decir, que la órbita media de Marte se encuentra 1,52 veces más alejada del Sol que la de la Tierra.

Como además 1 UA equivale a unos $1,5 \cdot 10^{11} \text{ m}$, entonces multiplicando esta cifra por 1,52 se obtiene la distancia media entre Marte y el Sol, o sea $2,28 \cdot 10^{11} \text{ m}$.

1. Calculen la distancia media de Júpiter al Sol sabiendo que el período de traslación alrededor del Sol es de 11,86 años terrestres.

2. Calculen el período de traslación de Mercurio alrededor del Sol sabiendo que la distancia media entre ambos es de 57,91 millones de kilómetros. Comparen los resultados obtenidos con los de la tabla de la página 68.

3. ¿Caro es un asteroide que realiza un giro alrededor del Sol en 410 días. Calculen su distancia media al Sol.

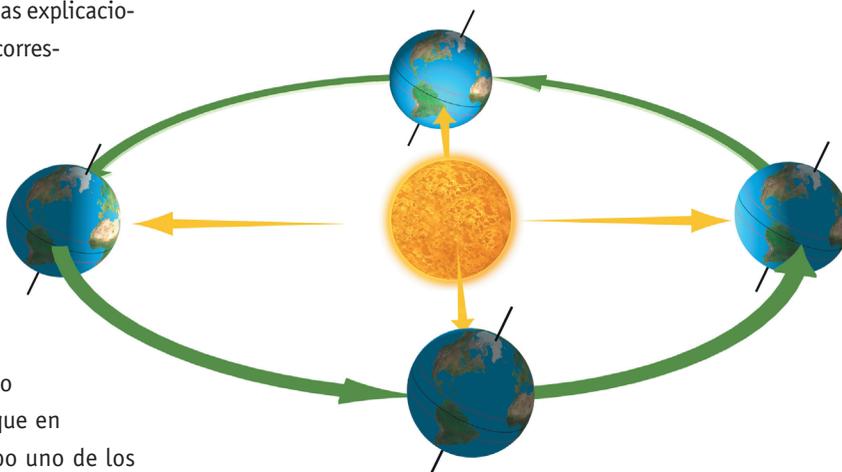
Las estaciones del año

En general, todo ser humano se hace representaciones del mundo a partir de la propia experiencia. Sin embargo, esas explicaciones y representaciones no necesariamente se corresponden con los hechos.

Dado que la órbita terrestre es elíptica, es común considerar que las estaciones del año se deben a la cercanía o a la lejanía de la Tierra con respecto al Sol. Desde este punto de vista no se tiene presente que cuando en el hemisferio Sur es verano, en el hemisferio Norte es invierno. Si se supone que la Tierra se encuentra en su punto de mayor acercamiento al Sol, no es cierto que en toda ella sea verano, ya que al mismo tiempo uno de los hemisferios se encuentra en invierno, que es la estación opuesta. Ante esta contradicción, se hace necesario presentar una nueva hipótesis.

El eje de rotación terrestre tiene una inclinación de unos $23,5^\circ$ con respecto al plano de su órbita. Además, este eje mantiene su dirección prácticamente invariante a lo largo de toda la trayectoria planetaria. Esta inclinación es justamente la responsable de las estaciones del año, pues proporciona diferentes cantidades de radiación solar a los dos hemisferios.

En la época del año en la que el hemisferio Sur recibe mayor cantidad de radiación que el hemisferio Norte, entonces es verano para el primero e invierno para el segundo. Cuando, contrariamente, el que recibe mayor radiación solar es el hemisferio Norte, allí es verano.



En esta representación puede notarse que la Tierra recibe distinta radiación solar en cada hemisferio debido a la inclinación de su eje.

Ley de Gravitación Universal

Planeta	D (*)	M (**)	P (***)
Mercurio	57,91	0,33	0,24
Venus	108,20	4,87	0,61
Tierra	149,60	5,97	1,00
Marte	227,94	0,64	1,87
Júpiter	778,30	1900	11,86
Saturno	1429,37	570	29,42
Urano	2875,04	87	83,75
Neptuno	4504,50	103	163,72
Plutón	5915,80	0,01	248,02

(*) Distancia media al Sol en millones de km

(**) Masa en múltiplos de 10^{24} kg

(***) Período en años terrestres

Sir Isaac Newton fue uno de los físicos más importantes de la historia. Uno de los períodos más fructíferos de su producción fue entre los años 1665 y 1666 cuando se encontraba en su casa natal, escapando de una peste que azotaba Cambridge. Según cuenta la leyenda, mientras estaba sentado en su jardín, la caída de una manzana lo llevó a reflexionar y preguntarse si la fuerza que atraía la manzana hacia el suelo sería la misma que causaba que la Luna efectuase una órbita alrededor de la Tierra.

Luego de realizar sus cálculos y comparar los resultados con los datos observacionales, Newton comprendió que dos objetos cualesquiera se atraen entre sí, simplemente por el hecho de poseer masa. El valor de esta fuerza de atracción, llamada **fuerza gravitatoria**, depende de la masa de los objetos y de las distancias que separan sus centros. Además, por ser una fuerza que proviene de una interacción entre dichas masas, actúa en la dirección que une los centros de los dos cuerpos, es decir que es una fuerza central.

Si se consideran dos cuerpos de masas m_1 y m_2 , separadas una distancia d , la ley de gravitación, formulada por Newton, establece que:

La intensidad de la fuerza de atracción gravitacional entre dos cuerpos es directamente proporcional al producto de sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que separa sus centros.

Newton propuso que **la Ley de Gravitación Universal** es válida para todos los cuerpos del Universo; y se expresa en forma matemática mediante la ecuación:

$$F_g = \frac{G \cdot m_1 \cdot m_2}{d^2}$$

donde F_g es la fuerza gravitacional, $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{kg}^2$ es la constante de gravitación universal; m_1 y m_2 son las masas de los cuerpos y d es la distancia que separa los centros de ambos.

La **constante de gravitación universal** $G = 0,000000000667 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{kg}^2$ indica que dos cuerpos de 1 kg cada uno separados una distancia de 1 m, experimentan una fuerza gravitacional de $0,000000000667 \text{ N}$, es decir, muy débil. Este tipo de fuerza solo se nota cuando uno o ambos cuerpos tienen mucha masa.

Directamente proporcional al producto de las masas

Si se mantiene constante la distancia entre los dos cuerpos, cuanto mayor es el producto de las masas, mayor será también la fuerza gravitatoria que las atrae mutuamente. Por ejemplo, la fuerza gravitatoria entre la Tierra y un camión es mayor que entre la Tierra y una pelota.

Si se sustituye a los cuerpos por otros de mayor masa, entonces la fuerza entre ellos también es mayor. Si se los sustituye por otros de menor masa, la fuerza también es menor. En cambio, si una masa es reemplazada por una mayor mientras que la otra se sustituye por una menor, debe evaluarse necesariamente el producto entre ellas. Si este producto aumenta, entonces la fuerza será mayor, incluso si una de las masas es menor. En todos los casos, la fuerza aumenta o disminuye proporcionalmente al producto de las dos masas.



4. Calculen, usando los datos de la tabla, el valor de la fuerza gravitatoria:

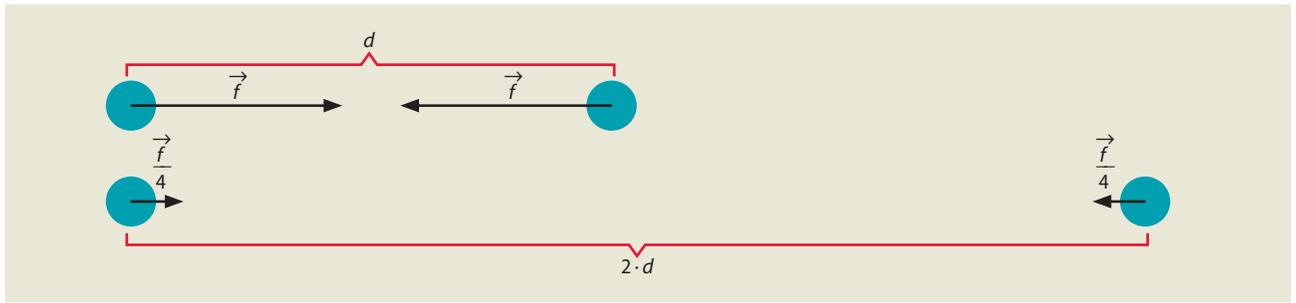
a. entre Marte y el Sol.

b. entre Plutón y el Sol.

5. Calculen el valor de la masa de la Luna, si su distancia a la Tierra es de unos $38,22 \cdot 10^7 \text{ m}$, y la fuerza gravitatoria entre ambos es de $20,44 \cdot 10^{17} \text{ N}$.

6. Calculen la distancia entre dos masas de 2 kg cada una para que la fuerza gravitatoria entre ellas sea de $1,5 \cdot 10^{-7} \text{ N}$.

Inversamente proporcional al cuadrado de la distancia



Si se mantienen constantes las masas de los cuerpos, cuanto mayor sea la distancia entre sus centros, menor será la fuerza gravitatoria entre ellos. Si la distancia se duplica, entonces la intensidad de la fuerza se reducirá a la cuarta parte. Si la distancia se triplica, esta se reduce a la novena parte, y así sucesivamente.

El valor de la fuerza gravitatoria entre el Sol y la Tierra a lo largo de su movimiento de traslación no es constante. Esta fuerza alcanza su valor máximo en el perihelio y su valor mínimo en el afelio.

Si se duplica la distancia entre los centros de dos cuerpos, la fuerza se reduce 4 veces.

Aclaraciones acerca de la Ley del Inverso del Cuadrado

Al analizar la interacción entre el planeta Tierra y una manzana a un metro de altura sobre su superficie, ¿se reducirá el valor de la fuerza gravitatoria a la cuarta parte si la manzana se eleva hasta los dos metros de altura? La fuerza gravitatoria no se reduce a la cuarta parte, dado que siempre se debe tener en cuenta que las distancias están medidas entre los centros de los cuerpos y no desde sus superficies.

Como el radio terrestre es de aproximadamente unos 6400 km, si un objeto que está a un metro de altura sobre la superficie se eleva hasta los dos metros, entonces, la distancia entre el centro del planeta y el objeto varía de 6 400 001 m a 6 400 002 m. Para calcular el valor de la fuerza gravitatoria en cada caso hay que tomar en cuenta que la masa de la Tierra es de $5,97 \cdot 10^{24}$ kg.

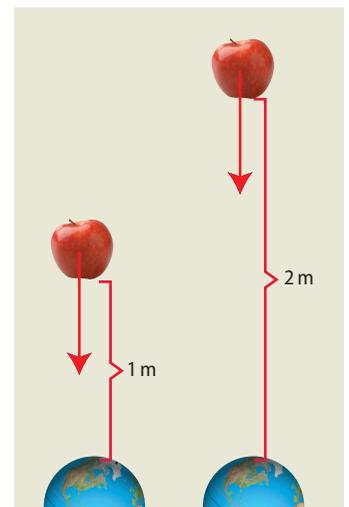
Si un objeto de 1 kg está a una distancia de 6 400 001 m del centro de la Tierra, su fuerza gravitatoria será:

$$F_g = \frac{G \cdot M \cdot m}{d_1^2} = \frac{6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{kg}^2} \cdot 5,97 \cdot 10^{24} \text{ kg} \cdot 1 \text{ kg}}{(6\,400\,001 \text{ m})^2} = 9,737936 \text{ N}$$

Si, en cambio, el objeto está a una distancia de 6 400 002 m del centro de la Tierra, entonces la fuerza gravitatoria se calcula como:

$$F_g = \frac{G \cdot M \cdot m}{d_1^2} = \frac{6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{kg}^2} \cdot 5,97 \cdot 10^{24} \text{ kg} \cdot 1 \text{ kg}}{(6\,400\,002 \text{ m})^2} = 9,737933 \text{ N}$$

Se puede apreciar que la diferencia de valores surge recién en el sexto dígito decimal, lo que implica una diferencia de 0,000003 N. La diferencia entre estos valores es tan pequeña que el valor de la fuerza gravitatoria es prácticamente idéntico en ambos casos.



En general, un cuerpo próximo a la superficie terrestre es atraído por la Tierra con una fuerza que en muchos casos puede considerarse constante (varía de forma insignificante con la altura). Esta fuerza es precisamente el peso. Por ello, el peso de un objeto prácticamente no varía con la altura, a menos que ésta sea importante frente al radio terrestre.

Para calcular con precisión la fuerza gravitatoria que la Tierra ejerce sobre un objeto cualquiera de masa m a una altura h sobre su superficie, la ecuación para dicha fuerza puede escribirse de la siguiente manera:

$$F_g = \frac{G \cdot M_T \cdot m}{(R_T + h)^2}$$

donde G es la constante de gravitación universal, M_T es la masa de la Tierra, R_T es el radio terrestre y m es la masa del objeto.

Fuerza gravitatoria en el interior de la Tierra

En el caso de cuerpos con gran radio, como la Tierra, la fuerza gravitatoria decrece a medida que aumenta la distancia desde su centro hasta el objeto, siempre y cuando se considere la masa total del planeta. Para que esto suceda, el objeto debe encontrarse a cualquier altura sobre la superficie, pero no en el interior de dicho planeta.

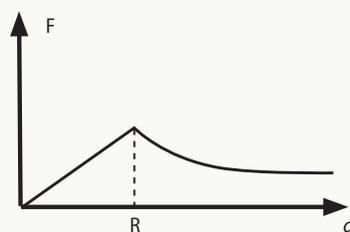
La fuerza gravitatoria en el interior de la Tierra no decrece a medida que aumenta la distancia desde su centro, sino que aumenta. Esto se debe a que al aumentar la distancia a un punto interior del planeta, también aumenta la masa que ejerce atracción hacia el centro, de manera tal que el resultado es un aumento lineal de la fuerza gravitatoria desde el centro del planeta hasta su superficie.

A una distancia del centro equivalente a la mitad del radio terrestre, el valor de la fuerza sobre un cuerpo es la mitad de lo que sería en la superficie.

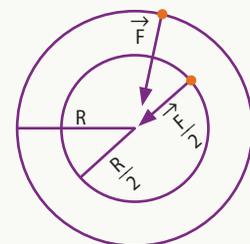
En cambio, tomando como referencia la superficie terrestre, a medida que aumenta la profundidad, la fuerza gravitatoria sobre un cuerpo en su interior se reduce linealmente con la distancia.

La disminución de la fuerza gravitatoria de acuerdo con la Ley del Inverso del Cuadrado de la Distancia solo es válida para el caso en que se considera que dicho objeto se encuentra alejándose de la superficie terrestre en dirección al espacio exterior.

En síntesis, desde la superficie terrestre la fuerza gravitatoria sobre un cuerpo disminuye tanto al adentrarse en el planeta como al alejarse de él hacia el espacio exterior, aunque siguiendo leyes diferentes en ambos casos.



Variación de la fuerza sobre un cuerpo en función de la distancia al centro de la Tierra, cuyo radio es R .



Un cuerpo en el interior del planeta a una distancia igual a la mitad del radio pesa la mitad que en la superficie.

Consecuencias de la Ley de Gravitación

La Ley de Gravitación Universal explica fenómenos tan distintos como la caída de los objetos, el movimiento de los planetas, de los satélites como la Luna, o el fenómeno de las mareas. Es importante destacar que Newton no descubrió la gravedad sino su validez universal. Es decir, descubrió que la fuerza de atracción gravitatoria existe siempre entre cuerpos por el simple hecho de poseer masa, sean éstos con mucha masa y distantes como estrellas, e incluso galaxias, o poco masivos y cercanos como pelotas o nueces.

La fuerza gravitatoria tiene, además, un alcance infinito y, si bien disminuye rápidamente a medida que los cuerpos se alejan el uno del otro, su valor nunca será exactamente cero, aunque se puedan desprestigiar sus efectos. Esto también implica que es imposible aislar absolutamente un cuerpo, ya que siempre está sometido a la influencia de la atracción gravitatoria del resto de partículas y cuerpos presentes en el universo, por más lejos que estos se encuentren.

Las consecuencias filosóficas y religiosas derivadas a partir de la Ley de la Gravitación Universal también han sido fundamentales para el pensamiento humano. A través de ella Newton logró establecer de un modo contundente que la división entre los mundos terrestre y celeste propuesta por Aristóteles era innecesaria. No hay leyes naturales diferentes para explicar lo que sucede en la Tierra y en el cielo. Las leyes que rigen los movimientos terrestres y celestes son las mismas, y con ello se unificó todo el universo y se puso fin al proceso de ruptura con la Física aristotélica que Galileo había comenzado con sus trabajos de Astronomía y Cinemática.

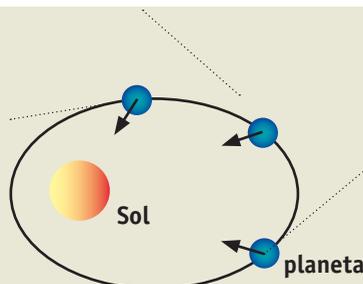
El movimiento de los planetas

Los planetas se trasladan alrededor del Sol bajo la acción central de la fuerza gravitatoria. Durante mucho tiempo se consideró erróneamente que sobre los planetas actuaba constantemente una fuerza en la dirección tangencial al movimiento, de manera que los empujaba a lo largo de su recorrido.

Valiéndose de sus Leyes del Movimiento y de la Gravitación Universal, Newton explicó el movimiento planetario. En ausencia de fuerzas externas, un planeta dotado de cierta velocidad tendería a seguir en una trayectoria rectilínea y a velocidad constante, de acuerdo con la ley de inercia. Sin embargo, el planeta describe una curva debido a la acción de la fuerza gravitatoria hacia el Sol, que lo desvía de su trayectoria rectilínea en cada uno de sus puntos. Como primera aproximación, puede decirse que a lo largo del desplazamiento elíptico del planeta, solo actúa la fuerza gravitatoria que lo atrae hacia el Sol, sin necesidad de otras fuerzas que lo impulsen hacia adelante.

Sin embargo, para un análisis más profundo, es necesario tener en cuenta las fuerzas gravitatorias que ejercen el resto de los planetas.

Una **galaxia** es un conjunto de millones de estrellas, gas y polvo interestelar, que se atraen mutuamente debido a fuerzas gravitacionales. Pueden clasificarse según su forma en espiraladas, elípticas o irregulares.



Este gráfico representa un planeta que está en órbita y en el cual actúa solamente la fuerza gravitatoria hacia el Sol.

La búsqueda de Plutón se debió a la diferencia de cálculos gravitacionales y datos experimentales obtenidos. Los astrónomos supusieron, al igual que para el caso de Urano, la existencia de un nuevo planeta (Plutón) que causaba las perturbaciones. Muy posteriormente, sin embargo, se comprendió que la razón de las diferencias era que la órbita de Neptuno no había sido determinada con precisión. Varios astrónomos buscaban al planeta Plutón unas décadas antes de ser encontrado. Incluso había sido fotografiado más de 10 años antes de su descubrimiento pero nadie interpretó correctamente las imágenes.

El descubrimiento de Neptuno

El Sol ejerce fuerzas gravitatorias sobre cada uno de los planetas y, a su vez, cada uno de ellos ejerce fuerzas gravitacionales sobre el resto de los planetas y sobre el mismo astro central. En principio, las fuerzas causadas por el Sol son mucho mayores que las debidas a la interacción entre planetas. Sin embargo, cuando dos planetas están próximos entre sí, la acción entre ellos origina leves apartamientos o perturbaciones de sus trayectorias ideales debidas solamente al Sol. Estas variaciones son más notorias cuando planetas muy masivos como Júpiter y Saturno se encuentran próximos entre sí.

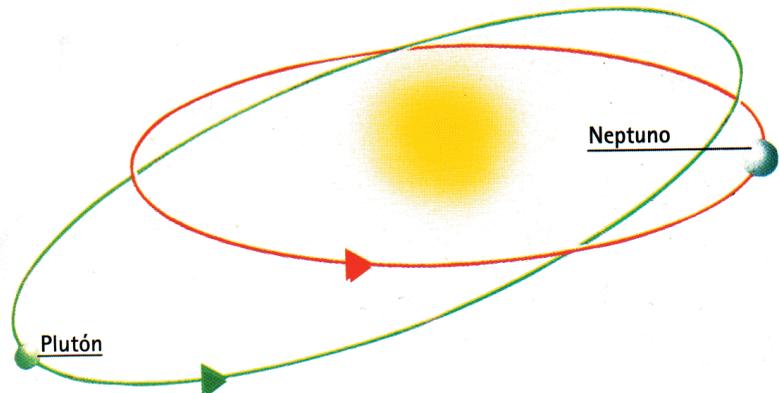
Hasta mediados del siglo XVII solo se conocían seis planetas: Mercurio, Venus, Tierra, Marte, Júpiter y Saturno. Urano fue descubierto accidentalmente algunos años después de la muerte de Newton. William Herschel anunció su descubrimiento en 1781. Mediante la Ley de Gravitación Universal, los astrónomos calcularon la órbita que este planeta debería describir bajo la acción de las fuerzas gravitatorias del Sol y de los otros planetas hasta entonces conocidos. Sin embargo, tras años de cuidadosa observación, descubrieron que su órbita no coincidía exactamente con la prevista teóricamente.

Hasta mediados del siglo XIX los astrónomos no habían logrado aún explicar las perturbaciones observadas durante el movimiento de traslación de Urano, ni siquiera considerando las fuerzas gravitatorias de los planetas conocidos hasta entonces. Se plantearon dos posibilidades: o la Ley de Gravitación era incorrecta, o debería haber una causa externa que produjera dichas perturbaciones.

Ante esta situación, dos astrónomos, independientemente uno del otro, lograron calcular y predecir la posición y trayectoria de un hipotético planeta más lejano que Urano. Ellos fueron el inglés John Adams (1845) y el francés Urbain Le Verrier (1846). Una vez predicha la posición teóricamente, enviaron pedidos a diferentes observatorios para que buscaran un nuevo cuerpo celeste en una región determinada del cielo. El permiso del observatorio de Berlín, adonde había enviado su carta Le Verrier, fue más rápido. En 1846, Johann Galle, solamente media hora después del comienzo de su primera noche de búsqueda, halló al planeta que posteriormente se llamaría Neptuno. También en base a perturbaciones todavía existentes en la trayectoria de Urano y del propio Neptuno, en 1930 Tombaugh descubrió Plutón.

Estos descubrimientos expresan claramente que la observación no fue anterior a la hipótesis, sino todo lo contrario. La teoría predijo con anterioridad los resultados y la observación sirvió para validarla. Si bien no se puede negar que, en algunas ocasiones, a partir de las observaciones pueden generarse hipótesis, éste no es el procedimiento habitual de la ciencia. En general, es la teoría, e incluso los supuestos y las creencias, lo que guía la búsqueda.

Este diagrama muestra las órbitas de Plutón y Neptuno alrededor del Sol. Dos veces, durante su órbita de 248 años, la trayectoria de Plutón se acerca más al Sol que la de Neptuno.



Interacción gravitatoria

Un problema muy importante derivado de la Ley de la Gravitación Universal consiste en el hecho de que la interacción gravitatoria se ejerce a distancia. La fuerza gravitatoria entre dos cuerpos es una consecuencia de la interacción entre sus respectivas masas. Esta interacción no requiere del contacto físico entre los dos cuerpos, sino que se ejerce aun estando muy alejados entre sí. Esta idea de acción a distancia no convenció a Newton, quien tampoco pudo resolver el problema. Él mismo, en una carta que envió al teólogo Richard Bentley en 1691, escribió que:

es inconcebible que la materia bruta inanimada, sin la mediación de algo más que no sea material, influya y afecte a otra materia sin contacto mutuo... Una gravedad... tal que cualquier cuerpo pueda actuar sobre otro a distancia, a través del vacío, sin la mediación de algo más, a través de lo cual pueda conducirse la acción y la fuerza, es para mí un absurdo tan grande que no creo que exista un hombre que con la facultad de pensamiento sobre materias filosóficas pueda creer en ello. La gravedad debe estar causada por un agente que actúa constantemente según ciertas leyes.

Recién en el siglo XIX se logró explicar la atracción gravitatoria de una manera más convincente que la simple acción a distancia, mediante la idea de **campo gravitatorio**. De acuerdo con esta concepción, el Sol genera una perturbación en el espacio que hace que los planetas situados en su campo gravitatorio experimenten también su atracción.

Campo gravitatorio

Un cuerpo que se encuentra cerca de a la superficie de la Tierra experimenta una fuerza de atracción gravitatoria hacia el centro del planeta. Este hecho puede explicarse a partir del concepto de campo vectorial.

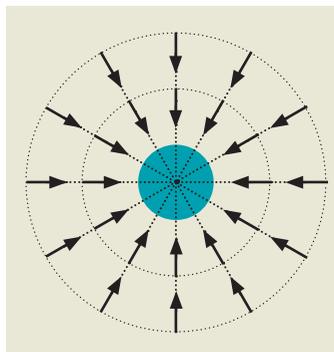
El **campo vectorial** es una herramienta matemática que asocia un vector a cada punto del espacio. De esa manera la fuerza que actúa sobre un cuerpo colocado en dicho punto se puede atribuir al campo. Así, por ejemplo, si se conoce el campo gravitatorio en un punto, es posible calcular la fuerza de origen gravitatorio que actúa sobre un cuerpo colocado en él.

Existen también otros campos como el eléctrico y el magnético. En general un campo de fuerza ejerce una fuerza sobre los objetos afectados por él.

Un cuerpo cualquiera genera a su alrededor un campo gravitacional, cuya intensidad es máxima en las proximidades y que va decreciendo al aumentar la distancia. Es posible describir y explicar la acción de cualquier planeta sobre un objeto mediante su campo gravitatorio. En el caso particular de la Tierra, este es el **campo gravitatorio terrestre**.

El campo gravitatorio también puede representarse por líneas denominadas "de fuerza" que se dibujan de tal manera que el vector campo es tangente a ellas.

Para simplificar el análisis se considerara a la Tierra como una masa esférica perfecta y homogénea, cuyas líneas de fuerza pasan por el centro, son perpendiculares a su superficie y tienen sentido hacia el centro del planeta.



Una **perturbación gravitatoria** se propaga, y tarda cierto tiempo en afectar cuerpos distantes. Si repentinamente el Sol desapareciera del universo, la Tierra experimentaría su ausencia gravitatoria varios minutos más tarde, y Plutón lo haría más tarde aún.

Campo de fuerzas.

Intensidad del campo gravitatorio

Se denomina **intensidad del campo gravitatorio**, g , a la fuerza gravitatoria ejercida sobre un objeto cualquiera por unidad de masa. De esta manera, el valor del campo en cada punto es independiente de la masa de los objetos que se encuentren en él. Matemáticamente:

$$\vec{g} = \frac{\vec{F}}{m}$$

donde \vec{F} es la fuerza que actúa sobre el objeto y m es la masa del objeto.

La intensidad del campo gravitatorio se mide en newton sobre kilogramo y, por ejemplo, si el campo gravitatorio lunar es de 1,67 N/kg, sobre un objeto colocado en la Luna actuará una fuerza de 1,67 newton por cada kilogramo de masa.

La dirección del vector campo gravitatorio terrestre es vertical a la superficie, y su sentido hacia el centro de la Tierra.

Para calcular la intensidad del campo gravitatorio aplicando la Ley de Gravitación Universal, (página 68) se sustituye la intensidad de la fuerza por su expresión y se obtiene:

$$g = \frac{G \cdot M \cdot m}{d^2 m}$$

donde M es la masa del planeta, m la masa del objeto, d la distancia del objeto al centro del planeta y G la constante de gravitación universal.

Si se simplifica la masa del cuerpo, se obtiene que la intensidad del campo generado por un planeta de masa M a una distancia d de su centro es:

$$g = G \cdot \frac{M}{d^2}$$

Aplicaciones de la intensidad del campo gravitatorio

Calculen la intensidad del campo gravitatorio en la superficie de la Tierra, si su masa es $M_T = 5,98 \cdot 10^{24}$ kg y su radio $R_T = 6,37 \cdot 10^6$ m.

Como $g = G \cdot \frac{M}{d^2}$, entonces:

$$g = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{kg}^2} \cdot \frac{5,98 \cdot 10^{24} \text{ kg}}{(6,37 \cdot 10^6 \text{ m})^2} \approx 9,8 \text{ N/kg}$$

El valor obtenido coincide con el valor de la aceleración gravitatoria sobre la superficie terrestre, que es aproximadamente constante en la región cercana a ella.

Cualquier objeto en el campo gravitacional próximo de la Tierra será sometido a una fuerza, llamada peso, en la dirección de la línea radial de campo con sentido hacia el centro del planeta y cuya intensidad es aproximadamente de 9,8 N por cada kilogramo de masa.



7. Calculen la intensidad del campo gravitatorio terrestre a 10 000 metros de altura sobre el nivel del mar.

8. Calculen la masa del planeta Marte sabiendo que el valor del campo gravitatorio en su superficie es 0,38 del campo gravitatorio terrestre; y que su radio es de unos 3400 km. ($g_{\text{Tierra}} = 9,8 \text{ N/kg}$).
Comparen el resultado obtenido con el que aparece en la tabla de la página 68.

9. Una estrella de neutrones podría tener una masa equivalente a cinco veces la masa solar contenida en una esfera de 20 km diámetro. ¿Cuál es el valor del campo gravitatorio que genera en su superficie?

Rapidez de escape

Se denomina **rapidez de escape** al mínimo valor de velocidad necesario para que un objeto escape de la atracción gravitatoria que ejerce un planeta, una estrella o un satélite natural partiendo de su superficie.

Mediante análisis energéticos es posible deducir una ecuación para calcular la rapidez de escape de un objeto cualquiera, dependiendo de la masa del astro (M) y de su radio (R). La fórmula obtenida es:

$$V_e = \sqrt{\frac{2 \cdot G \cdot M}{R}}$$

donde M es la masa del astro, R es su radio y G la constante de gravitación universal.

Aplicaciones de la rapidez de escape

Calculen cuál es el mínimo valor de velocidad que tiene que alcanzar una nave espacial para escapar de la atracción gravitatoria terrestre.

Para responder lo pedido es necesario calcular la rapidez de escape del planeta Tierra.

Como $V_e = \sqrt{\frac{2 \cdot G \cdot M}{R}}$, si se utilizan los datos anteriores:

$$V_e = \sqrt{\frac{2 \cdot 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{kg}^2} \cdot 5,97 \cdot 10^{24} \text{ kg}}{6,37 \cdot 10^6 \text{ m}}}$$

Como 1 N equivale a 1 kg m/s², entonces:

$$V_e = \sqrt{\frac{2 \cdot 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{kg}^2} \cdot 5,97 \cdot 10^{24} \text{ kg}}{6,37 \cdot 10^6 \text{ m}}}$$

$$V_e = \sqrt{125\,032\,233,09 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}} = 11,18 \frac{\text{km}}{\text{s}}$$

Es decir, que una nave espacial debe llegar como mínimo a una rapidez de 11,18 km/s para escapar de la gravedad terrestre.



Los cohetes impulsores llevan al vehículo espacial a la velocidad necesaria para escapar de la atracción gravitatoria terrestre y dirigirse al espacio exterior. Generalmente realizan este proceso en tres etapas.

10. Calculen la rapidez de escape desde la Luna, sabiendo que la masa de la Luna es 0,01 de la masa terrestre, y su radio es de 0,27 el radio terrestre.

11. En un supuesto planeta donde la masa es el triple que la de la Tierra; ¿la rapidez de escape es menor, igual o mayor que en la Tierra? Calculen dicho valor.

12. Calculen el radio que debería tener un supuesto planeta con la misma masa que la Tierra para que su rapidez de escape fuese de 15 km/s.



¿Cómo funciona el sol?

EL SOL SIEMPRE HA GENERADO UN ESPECIAL INTERÉS EN TODA CULTURA. ¿QUÉ ES EL SOL? ¿DE QUÉ ESTÁ HECHO? ¿CÓMO FUNCIONA?

En un primer momento, preguntas acerca de la naturaleza física del Sol no hubiesen tenido sentido. Solo hace unos 2500 años comenzó a considerarse la posibilidad de cuestionarse acerca de ello.

Inicialmente, casi intuitivamente, una primera idea relacionó al Sol con el fuego. Ambos iluminan y dan calor. Son intangibles, tienen colores semejantes y una existencia efímera: la llama cesa cuando se consume el leño, mientras que el Sol desaparece

cada día con la llegada de la noche. En palabras del astrónomo argentino Horacio Tignanelli: “la vinculación del Sol con el fuego puede considerarse también como un triunfo del pensamiento de los hombres. En los albores de la historia, decir que el Sol era de fuego constituyó un avance importante para tratar de explicar la esencia de los objetos del cielo...”.

Esta idea de un Sol de fuego perduró hasta hace unos cien años. Primero se supuso que el Sol debía quemar grandes cantidades de leña. En el siglo XIX, en una época en la que el carbón era la fuente de energía más común entre las aprovechadas artificialmente por el hombre para hacer funcionar máquinas, calderas y hasta locomotoras, en las escuelas y universidades se enseñaba que el Sol generaba su luz y su calor quemando carbón. Sin embargo, para que el Sol funcionara a fuego, debería disponer de una reserva gigantesca de carbón y oxígeno. Los físicos, a partir

de estimaciones de la cantidad de energía que llegaba del Sol a la Tierra y de las dimensiones del astro, calcularon que un Sol funcionando a carbón nos iluminaría solo durante unos 1500 años. Evidentemente, la historia de la humanidad era mucho mayor. ¿Qué había en el Sol que permitía producir fuego a tal escala y durante tanto tiempo? Los materiales que se le adjudicaban fueron variando a medida que el hombre iba descubriendo nuevas formas de producir fuego. De esa forma, se propuso un Sol de petróleo y también de gas, sustancias descubiertas a posteriori. Actualmente la ciencia da una respuesta diferente y hasta asombrosa para muchas personas: en el Sol no hay fuego. Llegar a comprender el funcionamiento solar demandó casi cien años de investigaciones y un mayor número de cambios conceptuales.

Esta información fue extraída del libro *Así funcionaba el Sol*, de Horacio Tignanelli, 1998, Ediciones Colihue, Bs. As. Argentina.



Imagen reconstruida del planeta Cancri 55.



Luego de la lectura contesten.

- ¿Cuáles fueron las hipótesis dadas a lo largo de la historia para explicar la producción de luz y calor del Sol?
- ¿Qué relaciones pueden establecer entre la formulación de hipótesis científicas y el contexto social e histórico en la que se formulan?
- Actualmente la ciencia sostiene que en el Sol no hay fuego. Investiguen cómo se explica la generación de energía en su interior.

IDEAS BÁSICAS DE LA UNIDAD

- Las **órbitas de los planetas** son elípticas y el Sol se encuentra en uno de los focos. La órbita de la Tierra es muy poco excéntrica.
- La **rapidez areolar** de un planeta en su traslación alrededor del Sol es constante. En cambio, la **rapidez de traslación** de un planeta es mayor cuando se encuentra más cercano al Sol, y es menor cuando se halla más lejos del Sol.
- Los cuadrados de los períodos de traslación de los planetas son proporcionales a los cubos de sus distancias medias al Sol.
- La **unidad astronómica** (UA) se define como la distancia media de la Tierra al Sol, que equivale aproximadamente a 150 millones de kilómetros.
- La **fuerza de atracción gravitacional** entre dos cuerpos es directamente proporcional al producto de sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que separa sus centros. La fuerza gravitatoria tiene un alcance infinito.
- La **interacción gravitatoria** entre dos cuerpos se explica actualmente mediante el concepto de campo gravitatorio.
- La **intensidad** del campo gravitatorio se define como la fuerza gravitatoria ejercida sobre un objeto cualquiera por unidad de masa.
- El valor del campo en cada punto es independiente de la masa de los objetos que se encuentren en él.
- El valor del **campo gravitatorio** generado por un planeta disminuye al alejarse de él según la ley del cuadrado de la distancia. El valor del campo gravitatorio disminuye en forma lineal, al aumentar la profundidad hacia el interior del planeta.
- La **rapidez de escape** es la mínima rapidez necesaria para que un objeto escape de la atracción gravitatoria que ejerce un planeta, una estrella o un satélite partiendo de su superficie.

Fórmulas

$$F_g = \frac{G \cdot M \cdot m}{d^2}$$

Ley de Gravitación Universal

$$g = \frac{F}{m} = G \cdot \frac{M}{d^2}$$

Intensidad del campo gravitatorio

$$F_g = \frac{G \cdot M_T \cdot m}{(R_T + h)^2}$$

Fuerza gravitatoria sobre un objeto a una altura h sobre la superficie terrestre

$$V_e = \sqrt{\frac{2 \cdot G \cdot M}{R}}$$

Rapidez de escape

ACTIVIDADES DE INTEGRACIÓN

1. Expliquen mediante las leyes de Kepler y la Ley de Gravitación Universal.

a. La masa de Júpiter es unas 300 veces mayor que la de nuestro planeta, mientras que su radio es unas 10 veces mayor. ¿En qué proporción es mayor la intensidad del campo gravitatorio en la superficie de Júpiter?

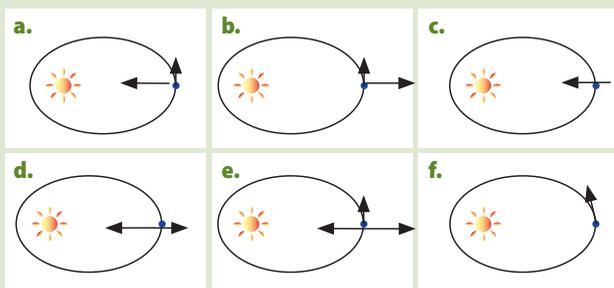
b. ¿Por qué no caen los satélites artificiales hacia la Tierra bajo la acción de la fuerza gravitatoria?

c. ¿Podría existir un planeta a una distancia de 10 UA del Sol cuyo período fuera de 20 años terrestres? ¿Por qué?

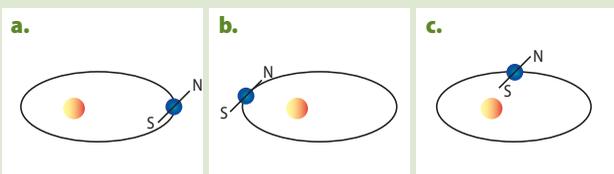
d. Un objeto lanzado verticalmente hacia arriba en la Luna, ¿llegaría más alto que en la Tierra si la velocidad inicial fuese la misma en ambos casos? ¿Por qué?

e. Escriban la ecuación que expresa el valor de la intensidad del campo gravitatorio a una altura h sobre la superficie de la Tierra.

2. Determinen cuál o cuáles de los siguientes esquemas representa satisfactoriamente la o las fuerzas que actúan sobre la Tierra en su movimiento de traslación alrededor del Sol para un observador situado fuera del Sistema Solar. Justifiquen sus respuestas.



3. El siguiente dibujo muestra algunas posiciones de la Tierra en su movimiento alrededor del Sol. ¿En qué posición es verano en la Argentina?



4. Si la elipse descrita por la Tierra en torno al Sol tiene un área $A = 6,98 \cdot 10^{22} \text{ m}^2$, ¿cuál es la rapidez areolar de la Tierra en m^2/s ? ¿Cuál es el área barrida en 90 días?

5. ¿Cuál es la distancia del centro de la Tierra a un punto exterior a ella donde el valor del campo gravitatorio es una décima parte del valor sobre la superficie?

6. Calculen el valor del campo gravitatorio a una altura de 3000 m por encima de la superficie terrestre.

7. ¿Cuál es el período de revolución de Júpiter, si su distancia media al Sol es unas 5,22 veces mayor que la de la Tierra al Sol?

8. En el Sistema Tierra-Luna: ¿a qué distancia del centro de la Tierra es nulo el campo gravitatorio debido únicamente a ambos astros? (Distancia Tierra - Luna = 384 000 km. Masa de la Luna es 0,012 veces la de la Tierra.)

9. ¿Cuál sería la rapidez de escape de un planeta cuyo radio fuera de 300 km con una aceleración gravitatoria de 3 m/s^2 ?

10. La rapidez de escape desde la superficie terrestre es de 11,2 km/s. ¿Cuál debería ser su rapidez de escape si la masa de la Tierra se duplicara, manteniendo el radio constante? ¿Y si se duplicara simultáneamente el radio?

11. La masa del planeta Marte es 0,11 veces la de nuestro planeta. Si además su radio es 0,53 veces el de la Tierra, ¿cuál es la rapidez de escape de Marte?

12. Estimen el valor de la fuerza gravitatoria entre dos personas que hablan una frente a la otra.

13. Estimen el valor del campo gravitatorio terrestre en la cima del Monte Aconcagua.

14. Diseñen y realicen un experimento para determinar el valor del campo gravitatorio en la superficie de la Tierra.

15. Representen gráficamente las líneas del campo gravitatorio generadas por un único cuerpo esférico.

16. Representen gráficamente las líneas del campo gravitatorio generadas por dos cuerpos esféricos separados una distancia d .

AUTOEVALUACIÓN

Determinen si cada una de las siguientes afirmaciones es verdadera (V) o falsa (F).
Justifiquen en cada caso.

1	La fuerza gravitatoria depende del volumen de los planetas. A mayor volumen, la fuerza gravitatoria es necesariamente mayor.	<input type="radio"/>
2	La fuerza gravitatoria entre dos cuerpos solo actúa sobre el cuerpo de menor masa.	<input type="radio"/>
3	Sobre un astronauta en el espacio exterior no actúan fuerzas gravitatorias.	<input type="radio"/>
4	El electrón se desplaza alrededor del núcleo atómico debido a la interacción gravitatoria entre ellos.	<input type="radio"/>
5	Entre el núcleo de un átomo y un electrón existe una interacción gravitatoria.	<input type="radio"/>
6	La aceleración gravitatoria sobre la superficie de los planetas más alejados del Sol es menor que en los más cercanos al astro.	<input type="radio"/>
7	La Tierra se desplaza con la misma rapidez a lo largo de su movimiento de traslación alrededor del Sol.	<input type="radio"/>
8	La fuerza gravitatoria que la Tierra ejerce sobre la Luna es mayor que la fuerza gravitatoria que la Luna ejerce sobre la Tierra.	<input type="radio"/>
9	Sobre una persona a 100 m por encima de la superficie terrestre, la fuerza gravitatoria que ejerce la Tierra es cuatro veces menor que si se encuentra a 50 m de altura.	<input type="radio"/>
10	El campo gravitacional terrestre alcanza su máximo valor en el centro del planeta.	<input type="radio"/>
11	En el interior de la Tierra, el valor de su campo gravitatorio es mayor que sobre su superficie.	<input type="radio"/>
12	La fuerza gravitatoria sobre un objeto disminuye con la distancia, y se hace cero cuando dicho objeto sale de la atmósfera.	<input type="radio"/>
13	La Tierra se traslada más rápido cuando se encuentra más próxima al Sol.	<input type="radio"/>
14	Según Kepler, el Sol se encuentra en el centro geométrico de las elipses que describen los planetas en sus movimientos de traslación.	<input type="radio"/>
15	La fuerza gravitatoria entre dos cuerpos aumenta al aumentar la masa de uno de ellos, suponiendo constante la distancia entre ambos.	<input type="radio"/>
16	El invierno se debe a que la Tierra se encuentra en su posición más alejada del Sol en ese período del año.	<input type="radio"/>
17	Un objeto lanzado verticalmente hacia arriba en la Luna llegará a una altura mayor que en la Tierra, si en ambos casos se parte con la misma rapidez inicial.	<input type="radio"/>
18	La rapidez areolar de la Tierra es mayor cuando se encuentra a mayor distancia del Sol.	<input type="radio"/>
19	La rapidez areolar de la Tierra es mayor cuando se encuentra a menor distancia del Sol.	<input type="radio"/>
20	El valor de la excentricidad de la órbita terrestre es muy próximo a 0.	<input type="radio"/>