

Un observatorio en movimiento

Ser consciente de algo tan poco evidente a los sentidos como es el hecho de que el suelo bajo nuestros pies se mueve sin parar, es uno de los actos fundacionales de la ciencia moderna.

La observación de los astros desde un lugar que no se mantiene fijo en su posición ni en su orientación tiene consecuencias importantes. Aprendemos desde la infancia que la Tierra se mueve haciendo que pasen los días y las estaciones, pero el tema es mucho más sutil y complejo. En este capítulo se exponen esos movimientos y se definen conceptos que tendrán su reflejo y desarrollo a lo largo de todo este manual.

1.1. Un poco de historia

La revolución copernicana no habría sido posible sin el registro de las observaciones astronómicas que la humanidad ha venido realizando desde tiempos muy remotos. El movimiento diurno de las estrellas es bien conocido y se ha utilizado como calendario desde la prehistoria. Sobre ese fondo de estrellas se desplazan los luceros y la Luna siguiendo trayectorias y cambios de brillo de una complejidad que resultaba chocante para un observador que se creía estacionario, con el Cosmos girando a su alrededor.

Solo tras asumir el modelo heliocéntrico propuesto por Nicolás Copérnico (1473-1543) se pudieron explicar de una manera más simple esos fenómenos. Polémica en su día, poco a poco se fue asumiendo como la mejor explicación posible, por sencilla. Especialmente tras las observaciones de las fases de Venus con telescopio por Galileo Galilei (1564-1642).

Utilizando las precisas anotaciones de las posiciones de Marte elaboradas por Tycho Brahe (1546-1601), el modelo copernicano de órbitas circulares concéntricas fue refinado por Johannes Kepler (1571-1630), autor de las tres leyes que llevan su nombre.

La causa de ese movimiento orbital fue explicada por Isaac Newton (1643-1727)¹ con sus leyes de la mecánica y de la gravitación universal: la fuerza gravitatoria de atracción entre los cuerpos celestes es la única causa de sus movimientos. Las irregularidades detectadas en la órbita

¹1643 según el calendario gregoriano vigente en la actualidad, 1642 según el calendario juliano vigente en aquellos días en Inglaterra. Hay maneras más inequívocas de localizar un evento en el tiempo, como se explica en la página 33.

de Urano permitieron descubrir Neptuno mediante cálculos matemáticos. Las irregularidades inexplicables de la órbita de Mercurio quedaron resueltas al ampliar las leyes newtonianas con la teoría de la relatividad general de Albert Einstein (1879-1955).

El descubrimiento de que las estrellas son soles remotos, de la dinámica de las galaxias y sus agrupaciones, y de la expansión constante del Universo han hecho que abandonemos definitivamente la idea de un Cosmos con un punto central estático y privilegiado.

Con observaciones astronómicas más precisas y complejas se ha podido seguir refinando los modelos, descubrir otros movimientos de los que participa el planeta Tierra, e incluso medir la velocidad de desplazamiento de las placas continentales.

Todo esto, a partir de la observación detallada de esos débiles puntos del firmamento.

1.2. Movimiento orbital

En los textos escolares se habla de los movimientos de *rotación* y *traslación*. Sin embargo, la manera preferible de referirse al segundo es *movimiento orbital*.

1.2.1. Las leyes de Kepler

Las tres leyes enunciadas por Kepler se referían originalmente al movimiento de los planetas alrededor del Sol. Sin embargo pueden extenderse a toda relación gravitatoria entre dos cuerpos libres en el espacio, cuando la masa de uno de ellos es muy superior a la del otro.

Primera ley

Los planetas describen órbitas planas, siguiendo trayectorias elípticas alrededor del Sol, que ocupa uno de los focos de la **elipse**.

El punto más próximo de la órbita del planeta al Sol es el *perihelio*, y el más lejano el *afelio*, como se indica en la figura 1.1. Cuando el astro principal sea la Tierra, referido a sus satélites, se hablará de *perigeo* y de *apogeo* respectivamente. Cuando se trate de un astro genérico, se dirá en cambio *periastro* y *apoaastro*.

Segunda ley

La velocidad a la que se desplaza un planeta por su órbita no es constante. El área barrida por un radio tendido

1. Un observatorio en movimiento

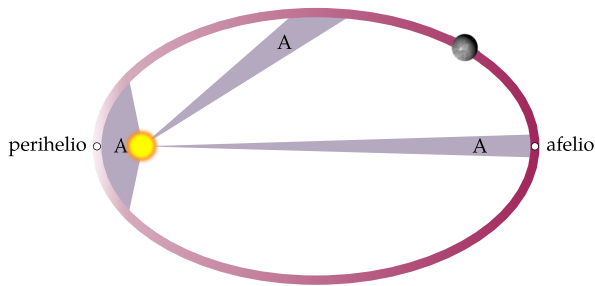


Figura 1.1. Órbitas keplerianas: elípticas, con el Sol en uno de los focos de la elipse. La velocidad de desplazamiento del astro es tal que se barren áreas iguales en tiempos iguales.

entre el Sol y el planeta es la misma a intervalos de tiempo iguales (figura 1.1).

Por lo tanto, la velocidad es máxima en el perihelio y mínima en el afelio. Esto es bastante intuitivo si se considera la órbita como una trayectoria de caída, como demostraría luego Newton: la velocidad es máxima en el punto más bajo de la trayectoria, y mínima en el más alto.

Tercera ley

El cubo del semieje mayor de la órbita del planeta es directamente proporcional al cuadrado del tiempo que le lleva al planeta completar una órbita.

Reparar en esta ley le llevó a Kepler mucho más tiempo que las dos anteriores. Con la mecánica newtoniana esta ley se puede resumir en la igualdad:

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{G(M_1 + M_2)} a^3$$

donde T es el periodo, es decir el tiempo que tarda el astro en completar una órbita. G es la constante de gravitación. M_1 y M_2 son las masas de los cuerpos involucrados: si se trata de una estrella y un planeta, la masa de este último suele ser despreciable. El semieje mayor de la elipse se suele representar con a .

1.2.2. La órbita terrestre. La eclíptica

No nos dejemos engañar por los gráficos: las órbitas de los planetas son más bien circulares. Solo las de Mercurio y Marte son fácilmente identificables como elipses.

Tal es el caso de la órbita de la Tierra en torno al Sol: en el afelio se encuentra a 152 098 232 km del centro del Sol; en el perihelio está a 147 098 290 km. Es decir, unos cinco millones de kilómetros de diferencia. Parece mucho, pero apenas es una variación del 3%.

La *unidad astronómica* se basa en la distancia media de la Tierra al Sol. En su definición de 2012 se adopta un valor igual a 149 597 870 700 m; redondeando, 150 millones de kilómetros.

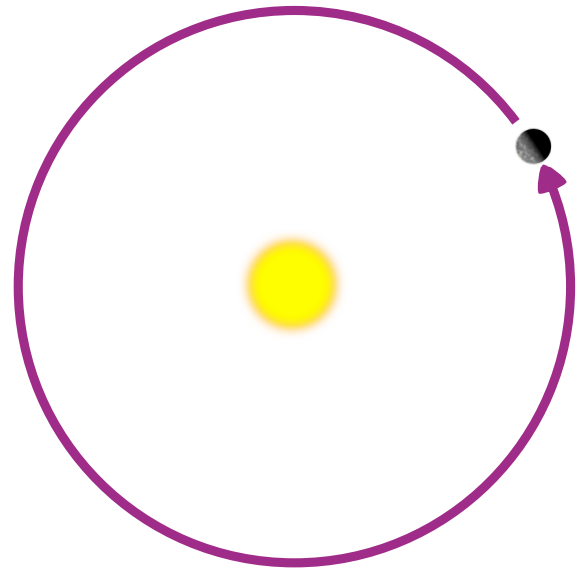


Figura 1.2. El periodo sidéreo de un astro es el tiempo que le toma completar una órbita.

El plano de la órbita terrestre se llama *plano de la eclíptica*. Se emplea como referencia para la localización de otros astros del Sistema Solar.

1.2.3. La órbita de los planetas

El resto de los planetas del Sistema Solar tienen órbitas muy similares a la de la Tierra. Discurren por planos muy poco inclinados respecto de la eclíptica (tabla 3.1), por lo que vistos desde la Tierra siempre estarán en una estrecha franja del cielo, llamada *zodiaco*.

Se llama *periodo sidéreo* al tiempo que tarda un astro en completar su órbita, siguiendo la tercera ley de Kepler (figura 1.2). Más concretamente, el tiempo que tarda en repetirse su posición relativa al astro que orbita y a una estrella lejana.

Sin embargo, para los observadores terrestres, puede ser mucho más importante su *periodo sinódico*: el tiempo que tarda en repetirse su posición respecto a la Tierra y al Sol (figura 1.3).

1.2.4. Elementos orbitales

Para determinar la posición de un astro en su órbita alrededor del Sol, se emplean seis parámetros, algunos de los cuales se reflejan en la figura 1.4, o alguna otra combinación equivalente de los mismos.

A partir del plano de la eclíptica, del Sol (o del centro de masas del Sistema Solar en algunos casos), y de una dirección de referencia elegida previamente, se define la *inclinación* orbital y la orientación del plano de la órbita (la *longitud del nodo ascendente*) respecto del plano de la eclíp-

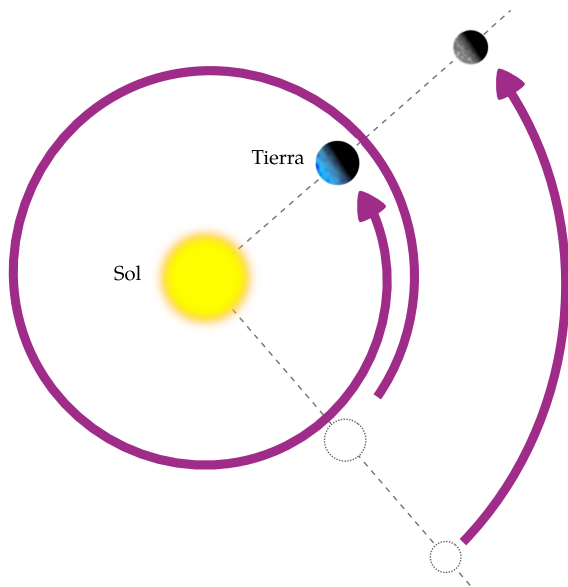


Figura 1.3. El periodo sinódico de un astro es el tiempo que le toma en repetir su posición respecto al Sol, visto por un observador terrestre.

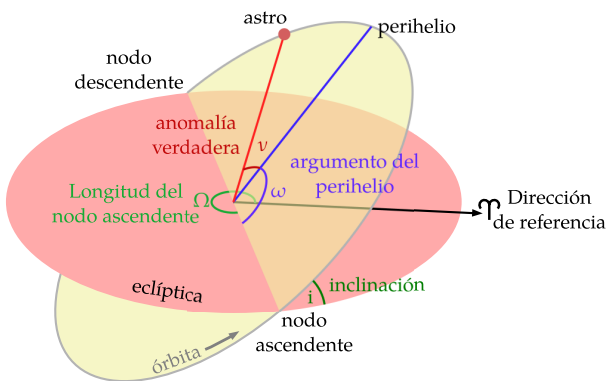


Figura 1.4. Elementos orbitales.

tica. Sobre ese plano se determina la geometría y orientación de la elipse de la órbita: *semieje mayor*, *excentricidad* (no representados en la figura) y *argumento del perihelio*, y la posición del astro sobre esa elipse, la *anomalía*.

Los puntos donde la órbita atraviesa la eclíptica se llaman *nodos*. Los puntos de la órbita más alejados del plano de la eclíptica son los *ápices*.²

1.2.5. Un mecanismo muy complejo

Utilizando la mecánica y la ley de la gravitación universal newtonianas es posible deducir matemáticamente las tres leyes de Kepler. Incluso se amplían las posibilidades de la geometría de las trayectorias, que pueden tomar la

²En singular *apex*.

forma de cualquier sección cónica: elipses, pero también parábolas e hipérbolas. Si la diferencia de masas entre los cuerpos que participan no es mucha, definirán una órbita para cada uno de ellos en torno al centro de masas del sistema.

Sin embargo esto solo es posible cuando se limita el número de cuerpos implicados a dos: en el caso de que participen tres o más cuerpos, no existe una solución analítica al problema. Aun así, se puede predecir la posición de los cuerpos del Sistema Solar con precisión suficiente, empleando métodos de cálculo que escapan del alcance de este manual.

Baste decir que esos métodos dan valores para los parámetros orbitales de cada cuerpo, pero no son valores constantes en el tiempo: los astros describen órbitas keplerianas, pero las dimensiones de la elipse y su orientación varían continuamente debido a las perturbaciones producidas por los demás astros.

Algunas de estas variaciones reciben el nombre de *precesión*: de los nodos, del perihelio, etc. No se deben confundir con el movimiento de precesión terrestre, que se explica más abajo, en el apartado 1.3.2.

1.3. Movimiento de rotación

Como hemos visto, los astros se desplazan por el espacio siguiendo trayectorias definidas por la interacción gravitatoria entre ellos. Al mismo tiempo, giran. Este movimiento de rotación se debe a la conservación del momento angular de la masa que dio origen al cuerpo celeste. No es debido a la gravedad, pero las interacciones gravitatorias, entre otras causas, pueden alterarlo.

Los puntos del astro que se mantienen fijos en la rotación se llaman *polos*. La línea recta que une los polos se denomina *eje de rotación*. El plano perpendicular al eje de rotación que atraviesa el centro de masas del astro se conoce como *plano ecuatorial*.

La dirección en la que rota un astro es la que va a marcar siempre hacia donde está el *punto cardinal este* en su superficie. A partir de ella se definen las direcciones de los demás puntos cardinales.

1.3.1. La Tierra. Rotación diurna

La rotación de la Tierra es bastante homogénea. Completa una revolución cada 23 horas, 56 minutos y 4 segundos. A este periodo se le denomina *día sidéreo*.³ Lentamente se va ralentizando de manera imperceptible, apenas 2 ms por cada siglo, debido a la interacción gravitatoria con la Luna principalmente.

El eje de rotación terrestre está inclinado unos 23,4° respecto al plano de la eclíptica (figura 1.5). Este valor, que como vamos a ver no es constante, se denomina *oblicuidad*

³Véase pág. 29.

1. Un observatorio en movimiento

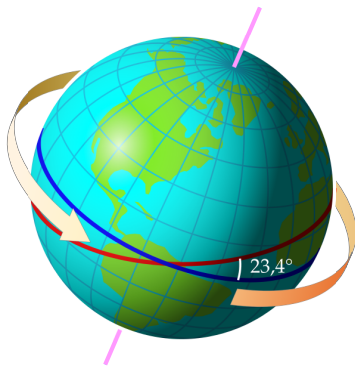


Figura 1.5. Rotación diurna. La línea azul es el plano ecuatorial y la roja es el plano de la eclíptica, en su intersección con el globo terrestre. El ángulo de $23,4^\circ$ entre ambos planos es la *oblicuidad de la eclíptica*.

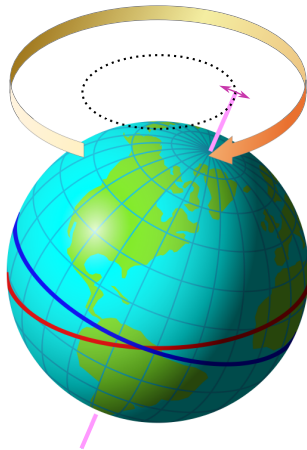


Figura 1.6. Precesión del eje y nutación. La orientación del eje describe un amplio círculo en torno al polo de la eclíptica, que recorre en sentido contrario al de rotación. Al mismo tiempo, sufre una oscilación muy leve. Véase también la figura 2.13.

de la eclíptica.⁴ Es la causa del ciclo de las estaciones; los astros con eje de rotación aproximadamente perpendicular a su plano orbital en torno al Sol, como Júpiter o la Luna, carecen de ciclo estacional.

1.3.2. Precesión del eje de rotación

La orientación del eje de rotación terrestre varía lentamente, en un ciclo estimado en 25 776 años, conocido como *año platónico* (figura 1.6). Este movimiento es la causa de la precesión de los equinoccios,⁵ y por eso se conoce como *movimiento de precesión*.

Es debido a la atracción ejercida por el Sol y sobre todo por la Luna, sobre la Tierra, por no ser esta un cuerpo

perfectamente esférico, y por no coincidir el plano de la órbita lunar con el plano ecuatorial terrestre.

1.3.3. Nutación

Por los mismos motivos que causan la precesión, el valor de la oblicuidad oscila en ciclos de 18,6 años, llegando a separarse hasta 9,2 segundos de arco de su valor medio.

1.3.4. Otros movimientos del eje

El valor medio de la oblicuidad varía lentamente entre los $22,1^\circ$ y los $24,5^\circ$ en periodos irregulares de más de 100 000 años.

La Tierra no es un sólido rígido: su interior es viscoso, y su corteza está fragmentada en placas continentales que se desplazan. Como resultado de las variaciones en la distribución de masas, los polos de rotación no se mantienen fijos en un punto de la superficie terrestre. También se producen alteraciones en la duración del día sidéreo.

⁴O simplemente *oblicuidad*.

⁵Véase pág. 15.