

“La dificultad está únicamente en escoger, dice en su amena obra *La Tierra*, para citar ejemplos de ríos que modifican gradualmente su curso en el sentido previsto por la teoría. Al Sur del ecuador tenemos los afluentes del gigantesco río de la Plata, que después de nivelar al Oeste la extensión de las Pampas, corren sin cesar su orilla izquierda. En el hemisferio Norte, el Eufrates, que procura desembocar enteramente en el lecho del Hindiah, á la derecha de su propio curso; el Ganges, que abandona la ciudad de Gur, en medio de los bosques, y que se inclina á 7 ú 8 kilómetros al Oeste de su delta; el Indo, que socava las colinas guijarrosas de su orilla occidental para llevar su delta 1,000 kilómetros más al Oeste; el Nilo, que se separa de su antiguo lecho en el desierto de Libia para dirigirse hacia la cordillera arábiga. En Europa tenemos el Gironda, el Loira, el Elba, que minan la base de las escarpaduras de su orilla derecha, y el Vístula, que hace más profunda su desembocadura oriental á expensas de la de la izquierda. Los geógrafos han advertido además en el curso del Rhin, del Danubio y del Volga fenómenos análogos producidos por la misma causa.” “En la Rusia de Europa y de Asia, sigue diciendo el mismo autor, es donde la desviación normal de los ríos se presta especialmente á los estudios más interesantes. Allí se reúnen en efecto las condiciones más á propósito para la invasión gradual de las aguas en su orilla derecha; longitud considerable, poderosas masas líquidas que pueden allanar muchos obstáculos, enormes avenidas que aumentan periódicamente la fuerza de erosión de la corriente, peñas compuestas de un suelo friable, y por último la marcada curvatura del globo, causa de un cambio rápido de la velocidad angular en diferentes latitudes (1).” Y cita en apoyo de estas afirmaciones los movimientos de desviación del lecho del Volga á la derecha de su curso, es decir, hacia el Oeste. En Siberia, las corrientes se desvían en la misma dirección más rápidamente todavía.

Esta ley de desviación es asimismo aplicable á las corrientes marinas, siendo uno de sus más sorprendentes testimonios el Gulf-Stream, que se desvía al Este. Finalmente, ya veremos más adelante que una desviación parecida es la causa de la dirección que siguen los vientos alisios así al Norte como al Sur del ecuador.

Aunque un cuerpo se halle en un reposo relativo en la superficie de la Tierra, no por ello deja de estar sometido á la fuerza centrífuga desarrollada por la rotación común, y ya hemos visto que de aquí resulta una disminución en la fuerza de la gravedad y por consiguiente en el peso del cuerpo. Esta disminución llega á su máximum en el ecuador, porque la fuerza centrífuga tiene en él su mayor valor. El cálculo demuestra que este valor es la 289.^a parte de la fuerza de atracción terrestre. Por otra parte, como la fuerza centrífuga crece como el cuadrado de la velocidad angular de rotación, resulta de aquí con evidencia que si el movimiento de la Tierra fuese 17 veces más rápido, la fuerza centrífuga sería en el ecuador 17×17 , ó 289 veces más considerable: sería igual á la atracción terrestre, y por consiguiente los cuerpos no pesarían nada. Si la velocidad de rotación fuese todavía mayor, predominaría la fuerza centrífuga, y todos los cuerpos

(1) La reacción lateral de que se trata es una fuerza proporcional á la masa puesta en movimiento, á su velocidad de traslación y al seno de la latitud. Estos son los tres factores que influyen en los fenómenos en cuestión; no creemos que la longitud tenga ni pueda tener influencia, por lo que respecta á los ríos, sino en cuanto su caudal crezca con la longitud de su curso; pero en este caso lo que influye es la masa de las aguas y su velocidad. La curvatura de que habla Reclus es una expresión falsa ó por lo menos impropia, pues aquélla es más marcada en las latitudes bajas que en las altas. El ángulo que forma el horizonte con el eje de rotación del globo es el que crece del ecuador á los polos, haciendo tanto más poderosa la acción de la fuerza centrífuga compuesta, cuanto mayor es la distancia entre éstos.

que no estuvieran sujetos al suelo irían á parar al espacio; se separarían de nuestro globo describiendo una curva cuyos primeros elementos serían verticales. Luego veremos cómo se hace uso de esta hipótesis para averiguar el límite extremo de la atmósfera terrestre, y por consiguiente, el de la atmósfera de cualquier cuerpo celeste.

CAPÍTULO IV

LA GRAVITACIÓN UNIVERSAL

I

¿ES LA GRAVEDAD UNA FUERZA EXCLUSIVAMENTE TERRESTRE?

La gravedad, tal como acabamos de estudiarla en sus fenómenos y en sus leyes, es una fuerza que hasta el presente parece inherente á la Tierra; su dirección, siempre encaminada, ya que no á un punto determinado que debe ser el centro de nuestro globo, al menos á regiones muy próximas á este centro; su acción, que no tan sólo comprime de continuo todas las capas terrestres unas sobre otras y precipita los cuerpos abandonados á sí mismos en el aire ó en el vacío, sino que también atrae á la superficie del suelo los móviles lanzados en cualquier dirección, y se ejerce en todas las profundidades accesibles del propio modo que en todas las alturas de la atmósfera; sus variaciones de intensidad, que se patentizan cuando la latitud cambia, haciendo así ostensibles las variaciones mismas de la forma de la Tierra ó los accidentes de su superficie, y que dependen, como se ha visto, de la distancia al centro ó al eje de rotación; en una palabra, todo cuanto hasta ahora conocemos acerca de la gravedad, parece presentárnosla como fuerza eminentemente terrestre. Se ha visto que todos los cuerpos son pesados y que si no cambian de posición, si su latitud y la altitud del lugar en que se encuentran son invariables, su peso tampoco varía.

Sabemos, pues, que la gravedad, circunscrita á estos últimos límites, es una fuerza constante, y podemos añadir que es universal, por cuanto no hay en la Tierra un cuerpo sólido ó fluido, una partícula ni un átomo de materia que no sientan su influencia, tanto si están en reposo como si se mueven.

Ahora debemos ir más lejos; ahora debemos pasar desde la Tierra, donde hemos permanecido confinados y donde se han hecho hasta aquí todas las observaciones, todos los experimentos de que nos hemos ocupado, á las regiones celestes, á los cuerpos que se mueven en las profundidades del cielo. No ignoramos que la Tierra misma recorre esos espacios, y en realidad podría decirse que los explora y los conoce, que transporta á ellos por doquiera esa fuerza de gravedad que le es propia. Pero lo que se ha ignorado por espacio de mucho tiempo, más aún, lo que se ha venido negando, bajo el imperio de no sabemos qué ideas de vana metafísica, es que los cuerpos celestes están sujetos como los cuerpos terrestres á dicha fuerza. La Luna, que acompaña á la Tierra en su movimiento anual de traslación, ¿pesa hacia nuestro globo? El Sol, los planetas y todos los astros son, como el nuestro, asiento de fuerzas análogas á la gravedad terrestre, y si es así, todas esas fuerzas diseminadas por el espacio á toda distancia, ¿ejercen alguna reacción entre sí? Finalmente, si estas acciones y reacciones son reales, ¿cuál es su ley común?

Estas cuestiones que á nadie se le había ocurrido siquiera enunciar antes de la época de Galileo, y cuya gran importancia científica y filosófica no es posible desconocer, están hoy resueltas gracias al genio de Newton y á los admirables trabajos de los geómetras y astrónomos que de dos siglos á esta parte vienen siguiendo el camino trazado por aquel grande hombre. Procuraremos exponer con su mismo encadenamiento esa serie de descubrimientos que, al enlazar la Tierra con el cielo, los fenómenos terrestres con los observados en las profundidades del espacio, han hecho de la física terrestre y de la celeste una sola y misma ciencia.

II

DESCUBRIMIENTOS ASTRONÓMICOS DE COPÉRNICO. — EL VERDADERO SISTEMA DEL MUNDO. LEYES DE KEPLERO

Acabamos de decir que ni siquiera se sospechaban los problemas que quedan formulados antes de la época de Galileo, es decir, antes de la introducción del método experimental en el estudio de la física. Añadamos ahora que su solución exigía y suponía una revolución inmensa, la cual ocurrió por fortuna en astronomía, merced al impulso de los Copérnico y de los Keplero. Para descubrir el vínculo físico que enlazaba todos los astros, la fuerza que dirigía los movimientos de los cuerpos del sistema solar, era preciso conocer las posiciones relativas verdaderas y los movimientos reales de todos estos cuerpos; era forzoso descubrir las leyes de estos movimientos. Copérnico había demostrado en su inmortal obra de las *Revoluciones celestes*, publicada en 1543, la realidad del doble movimiento de la Tierra, ó sea el de rotación sobre su eje y el de traslación alrededor del Sol, y haciendo extensiva á todos los planetas esta verdad que algunos filósofos de la antigüedad habían vislumbrado vagamente, fundó sobre sólidos cimientos el verdadero sistema del Mundo. El Sol es el centro relativamente inmóvil de todos los movimientos planetarios; en torno suyo y en el mismo sentido circulan Mercurio y Venus, la Tierra y Marte, Júpiter y Saturno, á distancias y en planos diferentes, y en períodos y con velocidades desiguales, pero constantes; la misma Luna no es más que un satélite de la Tierra, como los satélites que se descubrieron posteriormente y que acompañan á muchos de los planetas á la sazón conocidos.

Pero si Copérnico supo asignar al Sol, á los planetas y á la Tierra su verdadero papel, si substituyó la sencilla realidad á las hipótesis complicadas de los antiguos astrónomos, no pudo columbrar más que una parte de la verdad. Los antiguos, además de considerar á la Tierra como centro del mundo, basaban todas sus explicaciones de los movimientos celestes en la falsa idea de que los astros no pueden describir más curva que el círculo, al que consideraban como la curva por excelencia. Admitían además que este movimiento circular era necesariamente uniforme. Estas tres hipótesis falsas, es decir, la de la inmovilidad de la Tierra, la de la forma circular de las órbitas y la de la uniformidad del movimiento, predominaban en todo su sistema astronómico (1). Pero como

(1) Para explicar el movimiento aparente del Sol, la hipótesis era bastante sencilla. He aquí cuál era la adoptada por Hiparco. El Sol describía alrededor de la Tierra un círculo de radio CS , de movimiento uniforme, de suerte que el astro, visto desde el centro C , habría tenido un movimiento angular igual (fig. 119). Pero la Tierra está en T ; y por lo tanto, el movimiento del Sol parece variable para un observador situado en aquella. Hiparco explicaba así, en cierto modo, las observaciones: suponiendo que la Tierra estaba situada excéntricamente con relación á la órbita aparente del Sol (órbita que se ha tenido por real hasta Copérnico), suplía la falta de excentricidad de la curva misma.

la Naturaleza no se prestaba á estas miras *à priori*, menester era explicar las anomalías que la observación indicaba. Era preciso dar con la causa que hace que los planetas se muevan tan pronto lenta como rápidamente, la de que en sus revoluciones á veces parezcan estacionados, y por último, la de que, al cambiar la dirección de su marcha, retrogradan, se detienen de nuevo y emprenden otra vez su movimiento ordinario. Dada la hipótesis del movimiento uniforme y circular alrededor de la Tierra, esta explicación no era fácil; pero, aun sin desecharla, los astrónomos habían llegado á explicar tales irregularidades. Suponían que el planeta P (fig. 120) se movía alrededor de un círculo cuyo centro C se movía á su vez en torno de otro círculo, el cual describía por su centro C' una nueva circunferencia. Este era el sistema de los *epiciclos*. Gracias á estas suposiciones ingeniosas, pero complicadas, se conseguía explicar mal ó bien

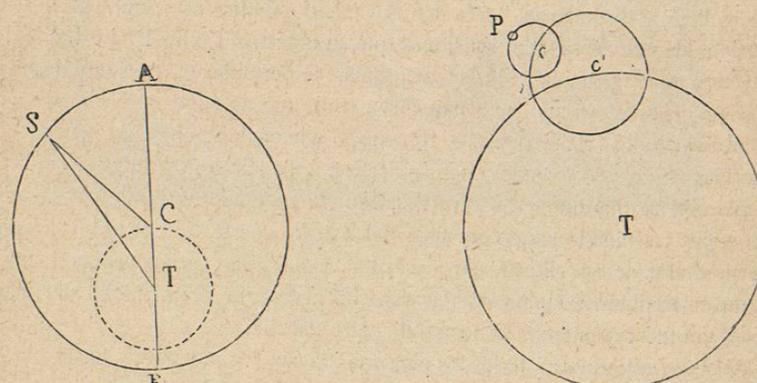


Fig. 119.—Movimiento del Sol alrededor de la Tierra, según la hipótesis de Hiparco

Fig. 120.—Epiciclos de los antiguos. Movimientos de un planeta alrededor de la Tierra

las apariencias. Mas á medida que se perfeccionaban los medios de observación, que se descubrían nuevas desigualdades, complicábase el sistema, y los círculos se enmarañaban más y más. Biot caracteriza perfectamente en pocas líneas el modo cómo los antiguos creyeron resolver la cuestión de los movimientos de los cuerpos celestes, y las dificultades que les oponía la solución adoptada.

“El problema de la astronomía planetaria, dice, consistía en suponer que el Sol, la Luna y los planetas se movían uniformemente en torno de varios círculos colocados de tal suerte en el cielo, que las posiciones sucesivas de dichos cuerpos, vistos desde la Tierra, concordasen con las desviaciones angulares que en ellos se observan. Tal fué el único objeto de los astrónomos griegos. No les era preciso, como á nosotros, conocer también las condiciones que resultan de las variaciones de distancia, pues no poseían instrumentos ópticos bastante sutiles para deducirlas de la medición de los diámetros aparentes con la seguridad indispensable para poder hacer uso de ellos. Por falta de este dato, sus sistemas de órbitas no fueron más que ficciones matemáticas sin realidad, y se vieron obligados á complicarlas de tal modo para representar los detalles de las apariencias observables, que no debían tener otro valor, ni aun á sus ojos.”

Al colocar Copérnico las cosas en su orden verdadero, al destruir esas vanas suposiciones, suprimió de un solo golpe las dificultades crecientes de semejante sistema, ó por lo menos las más importantes. Así su teoría del movimiento de la Tierra dió la explicación de las estaciones y retrogradaciones planetarias y de las variaciones aparentes

de velocidad que las acompañan. Aunque disipara este primero y capital error, no quedaba dicho todo; porque el gran astrónomo, que no desechaba á pesar de todo la idea de un movimiento uniforme y circular, seguía suponiendo que los planetas y la Tierra misma describían círculos alrededor del Sol con velocidades desiguales entre sí, pero invariables, y como no sucede así, quedaban por explicar las desigualdades comprobadas por la observación, para lo cual continuó Copérnico apelando á los epiciclos.

Necesario fué el genio de Keplero para extirpar estos postreros vestigios de los falsos sistemas. Aquel grande hombre desechó definitivamente el movimiento circular y uniforme, descubrió la verdadera forma de las órbitas, la ley de las variaciones de velocidad de los planetas en el curso de sus revoluciones, y asignó sus verdaderas relaciones á las dimensiones de dichas curvas, como consecuencia de las distancias de los astros al Sol y á la Tierra.

Keplero llegó á formular las leyes del movimiento elíptico estudiando los movimientos de Marte; las numerosas observaciones que su maestro Tycho Brahe había dejado acerca de este planeta, unidas á las suyas propias, le permitieron averiguar desde luego que la órbita no es un círculo, sino una curva oval, uno de cuyos vértices está más inmediato al Sol que el vértice opuesto. Reconoció además que el movimiento de Marte en esta órbita no es uniforme, sino que se acelera á medida que disminuye la distancia de este planeta al Sol; que pasa otra vez, aunque en sentido inverso, por las mismas variaciones de velocidad cuando se aleja del Sol, de suerte que el radio del planeta describe alrededor de este último astro sectores cuyas áreas varían proporcionalmente á los tiempos empleados en recorrerlas. La curva descrita de tal modo por Marte es una elipse, uno de cuyos focos lo ocupa el centro del Sol.

Keplero hizo extensivos á todos los planetas á la sazón conocidos, y hasta á la Tierra misma, estas dos leyes importantes. Luego, por un esfuerzo de su genio, llegó á descubrir la relación de los elementos de las órbitas planetarias, es decir, la de los ejes mayores de estas curvas y la de las duraciones de sus revoluciones.

Estos descubrimientos son tan importantes que merecen que nos detengamos á considerarlos un momento, y que los formulemos rigurosamente. He aquí, pues, el enunciado exacto de las tres leyes á las cuales irá siempre gloriosamente unido el nombre de Keplero:

PRIMERA LEY.—Cada planeta describe alrededor del Sol una curva plana que tiene la forma de una elipse (1) y el centro del Sol ocupa uno de sus focos.

(1) Creemos oportuno entrar en algunos detalles acerca de la elipse, para la mejor inteligencia de aquellos de nuestros lectores que tal vez hayan olvidado la definición de dicha curva. Tómese un hilo cuyas dos puntas se atarán en dos clavitos ó alfileres: hínquense éstos en un papel, en una tabla ó en la superficie plana en que se quiera trazar la línea curva de que se trata, pero cuidando de que la porción de hilo comprendida entre los dos puntos fijos sea más larga que la distancia que media entre uno y otro. Hecho esto, se tesará el hilo con un lapicero lo suficiente para que sus dos porciones sean líneas rectas y de modo que la punta del lápiz pueda correr por el papel ó por la tabla: de este modo se trazará la mitad de una curva, que se completará fácilmente echando el hilo al otro lado de la línea recta que une los dos puntos fijos. La figura 121 representa la operación que acabamos de describir y demuestra cuál es la forma de la curva obtenida.

Tal es la línea que se llama *elipse* en geometría.

Los dos puntos FF son los *focos* de la elipse, las dos porciones del hilo los *radios vectores*, y la distancia OF del centro á uno de los focos, la *excentricidad*. Como la longitud del hilo permanece constante, la suma de los radios vectores es la misma en todos los puntos de la elipse. Esta propiedad sirve en geometría para definir dicha curva.

Fácilmente se ve que la curva es más prolongada en la dirección de la línea que une los focos; esta línea

Consideradas las diferentes órbitas planetarias como elipses invariables (más adelante veremos con qué restricciones) no son curvas semejantes; pues no tan sólo cambian las dimensiones de un planeta á otro, sino también la forma; en una palabra, las excentricidades de las elipses son muy desiguales. Véanse relativamente á los ocho pla-

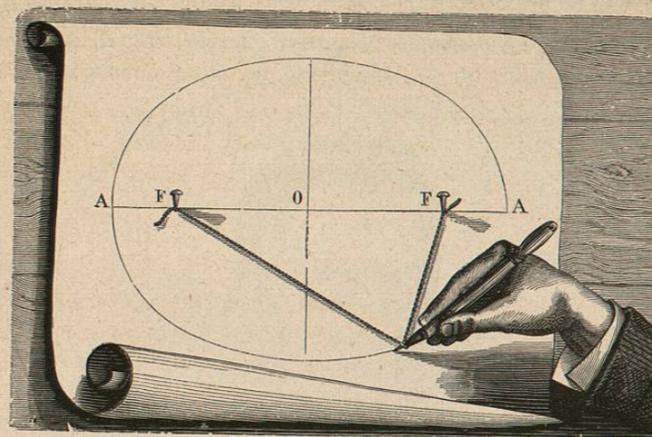


Fig. 121.—Método para trazar una elipse

netas principales los valores de este elemento, expresados en partes del semi-eje mayor, ó de la distancia media de cada uno de ellos al Sol, y colocados en orden decreciente:

Mercurio.	0,2056048
Marte.	0,0932611
Saturno.	0,0560713
Júpiter.	0,0482519
Urano.	0,0463402
Neptuno.	0,0167701
La Tierra.	0,0089946
Venus.	0,0068463

Como se ve, Mercurio es el que describe una órbita más excéntrica ó prolongada. Después de él sigue Marte, siendo Venus el planeta cuya órbita se acerca más al círculo. En el grupo de los pequeños planetas situados entre Marte y Júpiter, hay un gran número que tienen órbitas más excéntricas que las de Mercurio, por ejemplo la de *Æthra*, cuya excentricidad está representada por el número 0,3799257.

Así pues, cada planeta se sitúa á diferentes distancias del Sol en el curso de una de sus revoluciones. La más corta, PS (fig. 122), es la *distancia perihelia*; la mayor, AS,

es su mayor diámetro y lleva el nombre de *eje mayor* de la elipse. El punto medio del eje mayor es el centro de la curva.

Si conservando los mismos focos se emplean hilos más cortos para trazar dicha curva, resultarán elipses más alargadas. Lo contrario sucederá si se usan hilos más largos: en este caso las elipses trazadas se aproximarán cada vez más á la figura del *círculo*, aunque sin llegar jamás á ser rigurosamente *círculos*.

Por último, si teniendo el hilo la misma longitud, se acercan ó retiran los focos, resultarán las mismas diferencias de forma. En este caso, la longitud del eje mayor será la misma, pero cuanto más disten los focos entre sí, más alargada será la forma oval; y cuanto menor distancia haya entre uno y otro, más se parecerá esta forma á un círculo, lo cual llegará á ser si los focos se confunden en un mismo punto.

es la *afelia*, y corresponden á los vértices del eje mayor de la elipse. MS ó M'S, situados en los vértices del eje menor, representan respectivamente la *distancia media*.

SEGUNDA LEY.—*Las áreas recorridas por los radios vectores de un planeta alrededor del foco solar son proporcionales á los tiempos empleados en recorrerlas.*

El radio vector es, según hemos dicho, la línea recta, de longitud variable, que va

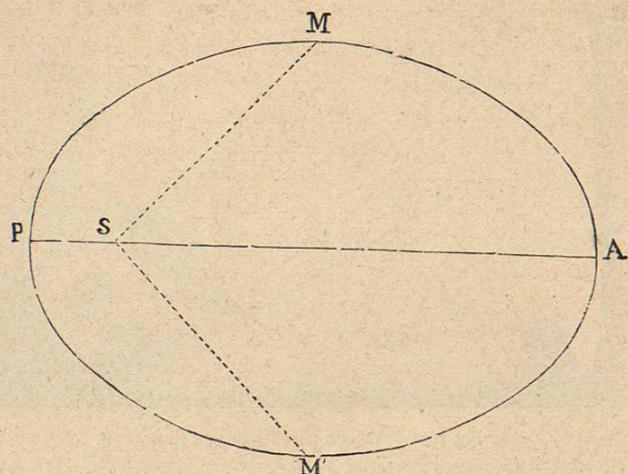


Fig. 122.—Distancias afelia, perihelia y media de un planeta

del planeta al Sol. En su movimiento de circulación se mueve el planeta con velocidad variable, que llega á su mínimum en el afelio y al máximium en el perihelio, de tal suerte que en un punto cualquiera de la órbita los sectores recorridos en tiempos iguales tienen superficies ó áreas iguales.

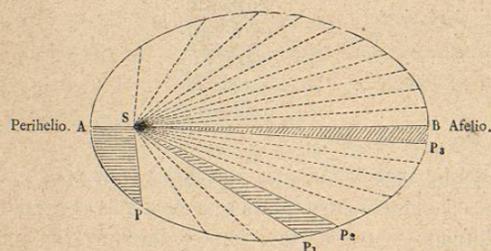


Fig. 123.—Ley de las áreas

Suponiendo que el astro recorre en un mismo espacio de tiempo los arcos AP, P₁P₂P₃B, las superficies de los sectores ASP, P₁P₂P₃B, serán iguales (fig. 123).

Pasemos ahora á la tercera ley.

TERCERA LEY.—*Los cuadrados de los tiempos periódicos son proporcionales á los cubos de las distancias medias, ó lo que es lo*

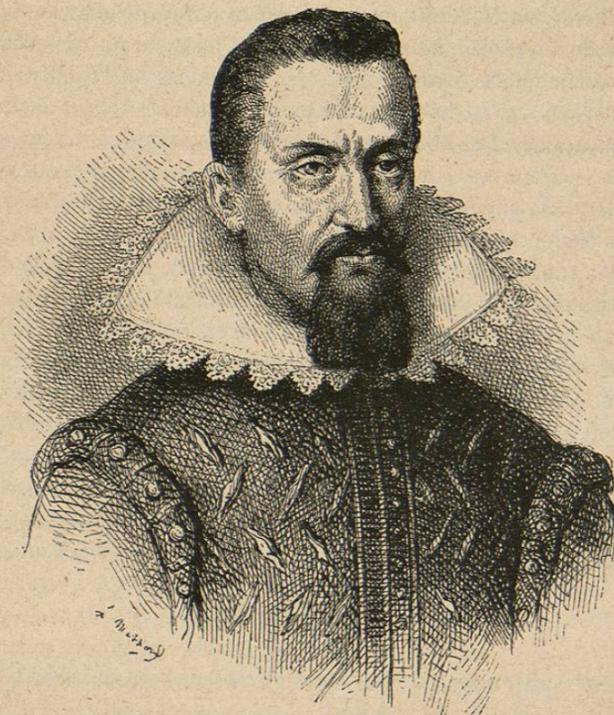
mismo, á los cubos de los ejes mayores de las órbitas.

Las dos primeras leyes son verdaderas en particular para cada órbita planetaria y subsistirían tales cuales son aun cuando no circulara en torno del Sol más que un solo planeta. La tercera ley, por el contrario, expresa una relación entre los elementos de dos planetas cualesquiera, y por consecuencia no tendría razón de ser en la hipótesis de que no hubiera más que un planeta; pero no por eso tiene menos importancia que las otras dos, y como dice Biot, éstas no proporcionaron á Keplero más que "los elementos individuales de los planetas en sus órbitas, sin establecer ninguna relación entre ellas. Sin embargo, desde sus primeros pasos en la carrera astronómica, Keplero estaba íntimamente persuadido de que debía existir semejante relación, por cuanto los movimien-

tos de los planetas, efectuados todos en la misma dirección y que van siendo más lentos á medida que aquéllos distan más del Sol, no podían carecer en absoluto de cierta conexión ni de obedecer á una ley común (1)."

Desde entonces cifró todos sus esfuerzos en averiguar las verdaderas proporciones de las órbitas planetarias, y tras diez y siete años de investigaciones, de tanteos, los vió en fin coronados de éxito.

Las leyes de Keplero son las bases, por siempre memorables, de la astronomía planetaria. En su generalidad no tan sólo abarcan las órbitas de los planetas conocidos



KEPLERO

en tiempo de su inmortal inventor, sino también las de todos los descubiertos posteriormente; son aplicables sin modificación alguna á los sistemas secundarios, es decir, á las órbitas que describen los satélites en derredor de cada planeta principal, y por último,

(1) He aquí en qué términos anuncia el mismo Keplero el descubrimiento de la nueva ley en sus *Harmonices mundi*:

"Después de haber averiguado cuáles eran las dimensiones verdaderas de las órbitas, gracias á las observaciones de Brahe y al esfuerzo continuo de un prolongado trabajo, he descubierto por fin la proporción de los tiempos periódicos con la extensión de dichas órbitas. Y si se quiere saber la fecha precisa, diré que fué el 8 de marzo del año corriente de 1618 cuando este descubrimiento, concebido primeramente en mi imaginación, luego tanteado torpemente por medio de cálculos y por consiguiente desechado como falso, emprendido de nuevo el 15 de mayo con creciente energía, se hizo luz á través de las tinieblas de mi inteligencia, quedando tan confirmado por mi trabajo de diez y siete años basado en las observaciones de Brahe y por mis propias meditaciones perfectamente concordantes, que al pronto creí soñar; pero no cabe la menor duda: es una proposición muy cierta y muy exacta....."