

*principios físicos* y con la analogía con los demás planetas” (Kepler, 1992b: 324. La cursiva es nuestra).

Llegado a este punto, Kepler podía seguir dos caminos: o bien *reanudar el estudio de Marte*, con los nuevos conocimientos adquiridos sobre la órbita terrestre (epígrafe 3.3.7); o bien *profundizar en su hipótesis físico-dinámica*, que los anteriores resultados han reforzado (epígrafe 3.3.6). Hará esto segundo, de modo que la desviación del camino que conduce al análisis del mencionado planeta se va a alargar mucho más de lo previsto. Pero de momento se ha concluido algo importante; pese a los reparos de instrumentalistas y realistas geocéntricos, hay que afirmar rotundamente que *la Tierra se mueve, aunque no uniformemente*.

### 3.3.6. Sobre fuerzas y almas

Las arraigadas convicciones platónicas de Kepler no han impedido que renuncie a un *principio astronómico* tan importante como es el de *uniformidad* de los movimientos planetarios. La hipótesis que ha servido de guía a su investigación ha consistido en la novedosa idea del Sol como motor universal. Resulta así que premisas de carácter físico han conducido a obtener ciertos resultados en astronomía. Se rompe de este modo con una larga tradición de independencia (cuando no de fisura) entre estas dos formas de estudiar los fenómenos celestes, que se remonta a la Antigüedad griega (y muy especialmente a Platón).

Pero los propios *principios físicos* (aristotélicos) se ven afectados por este proceso innovador (epígrafe 1.6.2). En efecto, la fundamental noción de *movimiento natural celeste*, circular y uniforme ha de ceder su lugar a la de movimiento provocado por el Sol. En Aristóteles, así como en sus seguidores a partir de la Baja Edad Media, la posibilidad de un agente material impulsor se limitaba al mundo sublunar, esto es, a los fenómenos terrestres. De ahí que en el Cielo no pudiera haber movimientos provocados o violentos. Hablar ahora de la acción motriz del Sol supone, por tanto, trastocar los fundamentos de la concepción física del mundo.

A lo anterior hay que añadir otro tema. Kepler ha aceptado la conclusión extraída por Brahe a propósito del estudio de los cometas: *las esferas sólidas, capaces de alojar y trasladar a los planetas, no existen* (epígrafe 3.2.2). Las órbitas de los mencionados planetas pasan así a ser definidas del modo como es familiar a todo lector actual, esto es, en cuanto meras trayectorias espaciales.

Ahora bien, ello refuerza la pertinencia del punto de partida adoptado por Kepler, ya que entonces se hace más necesario proporcionar una explicación de la causa de los movimientos planetarios que se aparte de la tradicionalmente admitida. Todo hace suponer que se abre un capítulo nuevo de la *física celeste* entendida ahora como dinámica celeste o estudio de los movimientos que acontecen en los cielos en relación con las *fuerzas* que los producen. (Resultado anacrónico emplear el término “dinámica” referido a Kepler ya que fue acuñado por Leibniz a finales del siglo XVII. Pero en todo caso, a diferencia de la cinemática, se trata de expresar la relación entre movimientos y fuerzas.)

El epígrafe anterior ha dejado fijado el siguiente estado de cosas. En la obra publicada en el año 1609, *Astronomia Nova*, su autor incorporó lo ya defendido en su *Mysterium Cosmographicum* a propósito del Sol como responsable del acontecer cósmico. Ello implicó, por un lado, la necesidad de calcular la excentricidad de las órbitas planetarias a partir del Sol real (centro del cuerpo del Sol), y no a partir del Sol medio (centro de la órbita terrestre); por otro, la aceptación de la velocidad variable de los planetas. En una primera etapa de su investigación esto último supuso la reintroducción de los ecuanes eliminados por Copérnico precisamente por violar el principio de uniformidad.

Con estas herramientas geométricas tradicionales (epículos, excéntricas, ecuanes) pasó así a estudiar el problema propuesto por Brahe a su llegada a Benarék, el de la órbita de Marte. Los resultados obtenidos, sin embargo, habían mostrado un desajuste entre las posiciones predichas y las posiciones observadas de ocho minutos de arco, error que Kepler encontró inaceptable (pese a que era inferior al admitido por Ptolomeo y Copérnico). Luego la hipótesis de una *órbita circular* recorrida con una velocidad que sólo se iguala o se hace constante en relación a un *punto ecuanes* (en vez de a su centro) no había traído la solución buscada, al menos en lo que a este planeta atañe.

En ese punto de la investigación Kepler decidió emprender el estudio del movimiento orbital de la Tierra, convencido (con razón) de que ello podría arrojar luz en el conocimiento de los demás movimientos planetarios. Para lograr este objetivo mantuvo el esquema de órbita circular excéntrica y ecuanes que venía utilizando con Marte, lo cual implicaba aceptar que tampoco la Tierra se movía con velocidad orbital uniforme en torno a su propio centro. Tomando así como vértices de diversos triángulos el lugar ocupado por el Sol, la Tierra en diferentes puntos de su órbita y Marte siempre en la misma posición (cada seiscientos ochenta y siete días), y sirviéndose de la trigonometría, consiguió esta vez mejores resultados (debido al hecho de que la trayectoria de la Tierra se aparta mucho menos del círculo que Marte).

En opinión de Kepler, la victoria alcanzada confirmaba la validez del supuesto físico que había inspirado toda su investigación. Nada, ni siquiera la Tierra, puede sustraerse al *principio de velocidad variable*. En efecto, todos los planetas han de desplazarse tanto más deprisa cuanto más próximos se hallan al Sol y más despacio cuanto más alejados están de él, si es cierto que este astro es el que los mueve con una virtud motriz que se debilita con la distancia. (En realidad la ley kepleriana según la cual la velocidad es inversamente proporcional a la distancia sólo se aplica en la región de los ápsides, esto es, en el perihelio y en el afelio. Newton demostrará, décadas después, que si sobre un planeta que describe una órbita elíptica se ejerce la acción de una fuerza que decrece con el cuadrado de la distancia, entonces la velocidad es inversamente proporcional, no a la distancia al Sol, sino a la perpendicular trazada desde el Sol a la tangente a la elipse en un punto cualquiera. Newton, 1987: Libro I, Sección III, Proposición XVI).

Hasta aquí lo analizado en el epígrafe 3.3.5. Ha llegado el momento de interrogarse por las características, tanto cualitativas como cuantitativas, de esa acción que emana del Sol. En el *Mysterium Cosmographicum* había sustituido la pluralidad de almas o inteligencias planetarias por un alma motriz única localizada en el cuerpo de ese astro. Ahora, en la *Astronomia Nova*, opta a su vez por reemplazar el alma motriz por la noción de *fuerza motriz*, acerbándose de este modo a una concepción menos animista y más mecánica del movimiento. Con ello estaría afirmando la naturaleza física de la causa de los giros terrestres.

No puede negarse la dificultad de describir el tipo de influjo que experimentan los planetas y que les "obliga" a recorrer su órbita alrededor del Sol. La historia astronómica y física anterior había hablado de *movimientos naturales* y de *motores incorpóreos*, que incluían tanto el primer motor como los motores planetarios secundarios. Los cuerpos celestes, por su parte, no ofrecían la menor resistencia al movimiento; muy al contrario, *por naturaleza* tendían a mantenerse en movimiento circular, de modo que en ningún caso eran constreñidos desde el exterior a comportarse del modo que observamos. Kepler, sin embargo, introduce la idea de *acción externa* ejercida por el Sol sobre los planetas, poniendo así en cuestión la fundamental distinción entre movimiento natural y movimiento violento. Dos cuestiones se suscitan a continuación; la primera se refiere a las características de esa acción motriz solar; la segunda al tipo de respuesta que cabe esperar de los cuerpos sometidos a su influencia.

Comenzando por la última de ellas, Kepler explícitamente va a negar que la materia celeste se defina por su *aptitud para el movimiento circular*, tal como

ha venido siendo habitual hasta ahora (incluso en Copérnico). Dicha materia, por el contrario, se define por su *impotencia natural* para moverse, es decir, por su incapacidad para abandonar por sí misma el lugar que ocupa. Luego si los planetas giran constantemente alrededor del Sol es porque algo actúa sobre ellos. En caso contrario, permanecerían de manera indefinida en un punto cualquiera de su órbita.

Para designar esa incapacidad para el movimiento hizo uso de un término muy empleado en la actualidad: *inercia*. Su significado, sin embargo, es distinto del que conocemos tras la formulación de la correspondiente ley. En efecto, no se afirma la perseverancia de todo cuerpo en el estado de reposo o *de movimiento uniforme y rectilíneo*, sino únicamente en el de reposo. Esto quiere decir, por tanto, que en Kepler la fuerza motriz es *proporcional a la velocidad* (y no a la aceleración), debiendo vencer la pereza natural de los cuerpos al movimiento o inercia.

En conjunto puede afirmarse que nos hallamos en una etapa de transición, que tendrá su culminación en la obra de Newton. En efecto, Kepler elimina los movimientos naturales, pero no introduce los movimientos inerciales; habla de la pasividad de la materia (frente al animismo aristotélico), pero la identifica con la tendencia al reposo y no con la conservación del estado mecánico; defiende la existencia de una fuerza motriz procedente del Sol, pero no establece la reciprocidad que garantiza que no haya acción sin reacción (esto es, que todos los cuerpos interactúen entre sí). Asimismo, coincide con Aristóteles en que un movimiento constante requiere la actuación constante de un motor, de modo que la proporcionalidad no puede darse entre fuerza y aceleración sino entre fuerza y velocidad. Por último, la fuerza motriz kepleriana decrece con la distancia simple, y no con su cuadrado.

Pasando a la primera cuestión anteriormente planteada, hay que preguntarse ahora por la *naturaleza de la fuerza* que mueve a los planetas. Newton defenderá que es de una clase específica no comparable, ni a la electricidad, ni al magnetismo, ni a ninguna otra cosa conocida, y que ha de atribuirse a toda parte de materia por el mero hecho de serlo. Se trata de la famosísima *fuerza de gravitación universal*. Kepler, sin embargo, comprensiblemente buscó analogías para su nueva virtud solar en ámbitos que resultaran siquiera algo familiares, como eran la luz o el magnetismo (recientemente estudiado por Gilbert en su obra del año 1600 *De Magnete*; epígrafe 3.1.2).

Ateniéndonos a esta última analogía (entre la fuerza motriz solar y el magnetismo), podría aventurarse la hipótesis de que el Sol se comporta como un enorme imán que gira sobre su eje. A consecuencia de su movimiento de rota-

ción se producen ciertos radios de fuerza magnética tirados desde el Sol a los planetas, que arrastran a éstos en una especie de torbellino o remolino y les obligan a desplazarse en círculo. Kepler advierte, conforme a lo aprendido en Gilbert, que el imán no atrae las limaduras de hierro por todas sus partes, sino que en su región media su acción se limita a dirigir la orientación de éstas. Así, puesto que los planetas se mueven en el plano de la eclíptica, la fuerza magnética del Sol *no es una fuerza de atracción* (que los aproximaría indefinidamente), sino que se limita a impulsar a aquellos a lo largo de sus órbitas, determinando la dirección de sus movimientos.

Si no se añade nada más a lo dicho, resulta que los planetas deberían mantenerse siempre equidistantes del Sol, pero no es así. Ha de completarse, por tanto, la anterior explicación de modo que se justifique por qué las órbitas planetarias son excéntricas. Para dar razón de la existencia de posiciones más próximas y más alejadas del Sol, Kepler hace uso de nuevo de la idea de motores planetarios. El hecho es que la fuerza única que emana del Sol, al no ser atractiva, ni tampoco repulsiva, no es capaz de acercar o de alejar a los planetas. Luego cree necesario concluir que son ellos mismos los responsables de esta variación de la distancia al centro gracias a la virtud motriz propia de cada uno que no es sino su *alma motriz*.

En la *Astronomia Nova*, este tipo de descripción animista desaparecerá una vez que haya formulado su primera ley, es decir, sólo después de que haya dejado de asociar la forma de las órbitas con el círculo. Buscará entonces una explicación de la desviación de la figura perfecta en la acción que desde el exterior se ejerce sobre los planetas. Para ello recurrirá de nuevo al magnetismo, proponiendo esta vez considerar no sólo al Sol sino también a los planetas como *almas esféricas* que se trasladan alrededor de aquél manteniendo constante la dirección de sus respectivos ejes. Como consecuencia, unas veces estará orientado al Sol un polo y otras veces el otro, lo que producirá alejamientos y acercamientos alternativos.

Años después introducirá cambios en esta explicación, pero no es necesario dar más detalles al respecto. Lo interesante es subrayar las dificultades y vacilaciones de Kepler a propósito de *almas* (incorpóreas) y *fuerzas* (corpóreas), esto es, acercá del origen intrínseco o extrínseco de los movimientos. Decir que la causa de un cierto movimiento es el alma del cuerpo implica conceder a éste una potencia natural o capacidad para realizar por sí mismo una determinada acción o producir un efecto. En la medida en que esa capacidad sea consustancial a la materia, dicha causa estará siempre y, por tanto, el efecto tendrá lugar ininterrumpidamente. De ahí que cuanto más regular, uni-

forme y simétrico sea un movimiento, mayor será la tendencia a buscar en el propio cuerpo la causa del mismo.

Quizá eso es lo que llevó a Kepler a defender, a lo largo de toda su vida, la existencia de almas motrices en el Sol y en los planetas en tanto que responsables del constante y uniforme movimiento de rotación. En cambio, según se ha visto, planteó una explicación en términos de fuerzas para el irregular y variable (tanto en la velocidad como en la distancia al centro) movimiento de traslación.

Hoy consideramos inaceptable toda forma de animismo, toda atribución a la materia de principios de acción o de poderes en virtud de los cuales ésta pueda cambiar de estado por sí misma. La ley de inercia constituye la formulación de esa prohibición. Sin embargo, resultó muy difícil compatibilizar la idea de *materia inanimada* con la de *fuerza motriz*. Newton es un buen ejemplo de ello, según se tendrá la oportunidad de comprobar en el volumen segundo de la presente obra. De ahí que las polémicas a propósito de la cuestión se sucedieran a lo largo del siglo XVIII, dando lugar a apasionados debates. Se constata, con todo, un hecho que es cierto y definitivo: las fuerzas pueden cuantificarse; las almas no. En consecuencia, el programa de matematización de la Naturaleza, propio de la ciencia moderna, se decantará sin la menor duda por las primeras.

En Kepler aún conviven, sin embargo, almas y fuerzas, tal como corresponde a un autor que es ajeno al planteamiento inercial y mecanicista que su contemporáneo Descartes, por ejemplo, trataba de establecer con tanta radicalidad. Pese a que en el año 1605 manifestara su propósito de “demostrar que la máquina celeste ha de ser comparada, no a un organismo divino, sino más bien a un mecanismo de relojería”, difícilmente puede asimilarse el cosmos de Kepler a una máquina. A caballo entre dos mentalidades, este astrónomo pasará a la historia por tres leyes sobre los movimientos planetarios que encontramos en los libros de texto sin la menor referencia a fuerzas y mucho menos, a almas. Sin embargo, sin su hipótesis dinámica fundamental nunca las hubiera hallado. Ha llegado el momento de conocer cuáles son esas leyes, siguiendo el orden cronológico en que fueron establecidas.

### 3.3-7. La segunda y la primera ley de los movimientos planetarios

Los resultados obtenidos hasta este momento (finales del año 1601) han conducido a Kepler a considerar válido lo siguiente. Primero, los planetas se desplazan siguiendo órbitas circulares excéntricas en torno al Sol. Segundo, la

velocidad con la que recorren esas órbitas es variable. Tercero, dicha velocidad depende de la fuerza magnética que emana del Sol, de la distancia entre éste y el planeta en cuestión y de la pasividad natural o inercia de este último. Se hace intervenir pues la *velocidad*, la *fuerza*, la *distancia* y la *inercia*, además de la *circunferencia de las órbitas*. La fuerza será así directamente proporcional a la velocidad y a la inercia, e inversamente proporcional a la distancia.

El estudio del movimiento de la Tierra había concluido con la confirmación de su desigual velocidad a lo largo del recorrido orbital (epígrafe 3.3.5). Ahora bien, en realidad Kepler sólo había comprobado esta hipótesis en el perihelio y en el afelio. Habrá pues que investigar si en todos los puntos de la órbita la velocidad es proporcional a la distancia. Para ello hay que hacer intervenir el *tiempo* y su relación con el espacio.

En la medida en que la velocidad disminuye con la distancia al Sol, el tiempo empleado en recorrer un segmento de arco de la órbita aumentará, lo que quiere decir que dicho tiempo es inversamente proporcional a la distancia. En concreto, para un arco tan pequeño de la órbita que pueda desprejarse la variación de velocidad que tiene lugar, el tiempo que la Tierra empleará en recorrerlo será proporcional a la longitud de la línea magnética (imaginaria) que une a ésta con el Sol. Por tanto, *la duración del intervalo temporal puede determinarse a partir de la suma de las longitudes de las diferentes líneas comprendidas entre los dos puntos extremos del segmento de arco*.

El problema reside en que, por pequeño que sea dicho segmento, el número de líneas es infinito. Kepler no dispone del cálculo infinitesimal que inventarían décadas después Newton y Leibniz independientemente. En consecuencia, ha de poner a prueba su ingenio y concebir un método "imperfecto pero suficiente", según sus propias palabras. Dicho método consistirá en hacer equivalente (pese a no serlo) "suma de longitudes" y "áreas". Lo que se busca entonces es la relación existente entre la *superficie* contenida dentro del perímetro formado por las líneas o radios orientados del Sol al planeta en dos puntos distintos de su órbita y el *tiempo* empleado en recorrer el segmento de arco correspondiente. Ahora bien, las superficies no son sino la medida de los tiempos; de donde se concluye que *las superficies son proporcionales a los tiempos*.

Expresado en términos modernos (que Kepler no usa) diremos que *las áreas barridas por el radio vector (línea que se tira desde el foco a cualquier punto de una curva) que une la Tierra con el Sol barre áreas iguales en tiempos iguales*. Cuando este resultado se generalice para todos los planetas, tendremos lo que se conoce como *segunda ley de Kepler*, establecida antes que la primera (figura 3.9; en ella se ha dibujado la órbita circular y no elíptica, tal como hace Kepler).

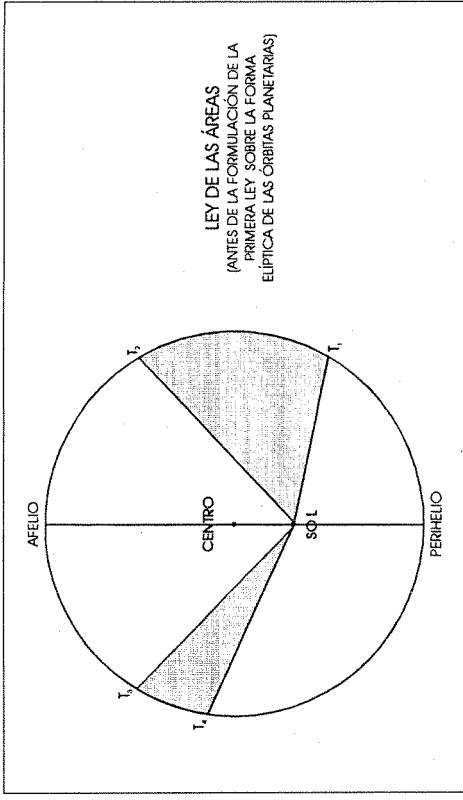


FIGURA 3.9.

Se trata de un hallazgo revolucionario, puesto que supone nada menos que la definitiva abolición de uno de los dos principios platónicos que durante veinte siglos ha presidido el estudio del Cielo. En efecto, se afirma ahora que, en tiempos iguales, el radio vector que une el planeta con el Sol no barre *ángulos* iguales sino *áreas* iguales. Se abandona así el *principio de uniformidad* o, dicho de otro modo, se acepta como un hecho, que no precisa ser "salvado", la variación de la velocidad angular. Ello hace perder todo sentido al intento de seguir haciendo ésta uniforme en relación al punto ecuante. Los ecuanter van a desaparecer de la astronomía tras la formulación de la segunda ley de las áreas, del mismo modo que la primera ley pondrá fin a las órbitas circulares excéntricas.

Kepler establece la nueva relación entre tiempos y áreas en el contexto de sus investigaciones sobre la órbita de la *Tierra*. Es hora de retornar al problema que le fue encomendado desde su misma llegada al observatorio de Tycho Brahe, el de la órbita de *Marte* (epígrafe 3.3.5). Según se ha visto, el rodeo que dio para llegar de nuevo a este punto fue muy largo. El camino se inició con el estudio de la órbita de este planeta, sirviéndose para ello de las herramientas tradicionales (epícloos, excéntricas y ecuanter). El error detectado de ocho minutos entre las posiciones predichas y las posiciones observadas llevó a abandonar provisionalmente la tarea para ocuparse de la Tierra. La comprobación de la velocidad no constante con la que ésta recorre su órbita fue interpretada

como una confirmación de la hipótesis dinámica según la cual, todos los planetas han de sufrir variaciones de velocidad en función de su distancia al Sol. Esto le condujo a tratar de profundizar en esa hipótesis, tanto desde el punto de vista cualitativo (naturalidad de la fuerza que emana del Sol), como cuantitativo (medida de la fuerza).

Como resultado creyó probada la validez del siguiente principio dinámico: la fuerza procedente del Sol es inversamente proporcional a la distancia. A continuación, partiendo de dos premisas falsas, una heredada de la tradición (la circularidad de las órbitas), y la otra establecida por él mismo (la anterior relación entre fuerza y distancia), logró formular la *Ley de las áreas*. No es de extrañar, en consecuencia, que alguien haya calificado de "milagro" su hallazgo.

La cuestión que se plantea a continuación es la siguiente: La recién hallada ley no se cumple para órbitas circulares sino elípticas. Kepler no lo advirtió al principio porque se ocupaba únicamente de una órbita muy próxima al círculo, la de la Tierra. Pero cuando quiso volver al análisis de Marte armado con estas nuevas armas que el estudio de nuestro planeta le había proporcionado, una sorpresa desagradable le aguardaba. La aplicación de la ley de las áreas arrojaba una vez más un error de ocho minutos en la determinación de las posiciones de aquél.

En este punto Kepler ha de adoptar una decisión fundamental. O bien mantiene la órbita circular y revisa la ley de las áreas, o bien mantiene esa ley y se atreve a admitir algo que ya recelaba: *la forma de la órbita no es un círculo*. En principio se inclinó por lo primero; sin embargo sucesivos fracasos le convencieron de lo inevitable: Al igual que el principio de uniformidad de los movimientos había sido eliminado, ahora le tocaba el turno al de circularidad.

Desde luego el problema no había hecho más que empezar porque si el círculo en tanto que figura perfecta no corresponde a las órbitas planetarias, ¿qué decirse que éstas pueden adoptar cualquier forma. Kepler no disponía de datos teóricos que le permitieran deducirla, de manera que procedió empíricamente aplicando un método de ensayo y error; esto es, de puro tanteo. La observación mostraba que la órbita de Marte parecía tener la amplitud del círculo en el perihelio, mientras que en los lados, y sobre todo en el afelio, se replegaba hacia dentro dibujando una curva en el interior del círculo. La conclusión a la que llega en el año 1604 es que se trata de un *óvalo* (esto lo había sospechado tiempo atrás, pero se había negado a tomarlo en consideración) (figura 3.10).

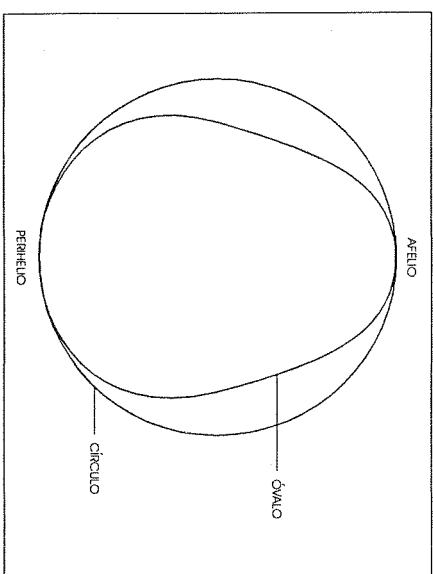


FIGURA 3.10.

No bastaba, sin embargo, con decir tal cosa. Había que saber abordar matemáticamente una figura ovoide. En concreto, se trataba de determinar el *área* de la órbita, ya que se supone equivalente a la suma de distancias y, en consecuencia, también a los tiempos (lo mismo que ocurría con el círculo). Pero lo cierto es que no podía acudir a los geómetras en busca de los conocimientos que precisaba para calcular el área de un huevo. Cosa distinta es si tuviera la forma de una *elipse*, pues en ese caso podría echar mano de la obra *Sobre las Cónicas* del gran geómetra y astrónomo del siglo III a. C., Apolonio de Pergea, y de la de Arquímedes *Sobre los Conoides y Esferoides*.

Decide entonces considerar la órbita de Marte como si fuera una elipse. Es decir, aunque todavía cree que *fiticamente* no tiene esa figura cónica, *matemáticamente* así la toma. Su acceso pues a la elipse es fortuito y teórico; simplemente es la forma que, junto con el círculo, mejor ha sido estudiada. Sin embargo, gradualmente se persuadirá de lo que constituye el contenido de la *primera ley: la órbita de los planetas es elíptica y el Sol ocupa uno de sus dos focos*. Nos hallamos ante un resultado obtenido en principio para Marte y, posteriormente, extrapolado al resto de planetas y satélites (figura 3.11).

Ahora es cuando podía aplicarse a este planeta la ley de las áreas con exactitud. Resulta así que, *en tiempos iguales, las áreas elípticas barridas por la línea (imaginaria) que une el planeta con el Sol son iguales*. Al fin ha resuelto el problema de Marte. Y con ello escribe una página nueva en la historia de la astronomía, puesto que formula dos leyes de los movimientos planetarios que van



mientos periódicos eran los que eran. Y a todo ello se respondería por medio de la teoría de los cinco poliedros regulares. Ahora le toca el turno a lo establecido en la *Astronomia Nova*. Las órbitas son excéntricas (primera ley) y la velocidad angular es variable (segunda ley). ¿Por qué es esto así y no de otra manera?

Dichas leyes establecen que los planetas están en constante cambio, puesto que en cada punto de su órbita modifican, tanto su distancia al Sol, como su movimiento. Se busca la causa formal, la razón arquetípica por la que el mundo no es tan inmutable como las figuras de la geometría. La teoría de los poliedros proporciona algo así como el criterio de distribución general de los cuerpos, pero no la explicación de su variabilidad.

Kepler aspira a apoderarse del gran secreto que encierra la relación entre las *distancias* y las *velocidades* de los planetas entre sí (lo cual ya se había planteado en su primera obra sin poderlo entonces descubrir). Pero, puesto que la velocidad no habla sólo de espacios recorridos sino de tiempos empleados, el tema abordado en el *Harmonice mundi* puede formularse en estos términos: ¿existe alguna fórmula que ligue los tiempos de revolución (período orbital) de los planetas con el tamaño de sus órbitas, esto es, con sus distancias al Sol?

La respuesta a este interrogante no es sino la denominada *tercera ley de Kepler*, según la cual *los cuadrados de los períodos orbitales de los planetas son proporcionales a los cubos de sus distancias medias al Sol* (las distancias medias se refieren al *radio medio* de una órbita elíptica, esto es, a la mitad de la longitud de la línea recta que une perihelio y afelio o, lo que es lo mismo, al semieje mayor de la elipse). A Kepler le produjo una honda satisfacción este hallazgo porque, en su opinión, iba mucho más allá de las dos leyes anteriores al lograr correlacionar los tiempos y las distancias de *todos* los planetas, y no la de cada uno de ellos individualmente considerado. Ello representaba un salto cualitativo en la búsqueda de armonías universales, a pesar de que su interés práctico fuera escaso (es con Newton con quien se pondrá de manifiesto toda su fecundidad).

A diferencia de lo ocurrido en la *Astronomia Nova*, en esta obra no ofrece indicación alguna de cómo logró formular esta tercera ley. Quizá, como algunos autores sugieren, el procedimiento fuera el de ensayo y error. En cualquier caso, lo que sí conocemos es el marco general en que se produjo este hallazgo. Sorprendentemente (para nuestra mentalidad), como si de una vuelta a Prágoras se tratara, ese marco general lo va a proporcionar la *música*.

Según se dijo anteriormente, en un mundo en el que las velocidades angulares y las posiciones con respecto al Sol cambian constantemente, las armonías presentes en el plan del Creador no pueden ser exclusivamente de carácter geométrico. En cambio, difícilmente encontramos un ámbito mejor que

el de la música para expresar la belleza y la armonía que resultan de la variación en el tiempo. ¿Por qué mejor un mundo cambiante que un mundo estático? Y supuesto que haya de haber cambio, ¿por qué mejor movimientos planetarios variables y excéntricos que uniformes y concéntricos?

Los *tonos* son la cualidad de los sonidos que nos permite ordenarlos de graves a agudos. Así, en una escala musical ascendente, partiendo de una nota fundamental es posible ir situando el resto a partir de los más graves, y en una escala descendente al revés. Los tonos dependen del número de vibraciones (por unidad de tiempo), de modo que a mayor número de vibraciones, tono más agudo (soprano en la voz humana o violín en los instrumentos de cuerda); a menor número de vibraciones, tono más grave (bajo y barítono en los hombres, contrabajo en la cuerda). Es posible, por tanto, disponer tanto las voces como los instrumentos de cuerda en función del tono en que emiten sonidos. ¿Cabe concebir una ordenación musical de similares características que se aplique a los planetas? Sugestiva y extravagante pregunta.

Supongamos con Kepler que fuera posible hacer corresponder *velocidades angulares* y *número de vibraciones* (por unidad de tiempo), de modo tal que una alta velocidad diera cuenta de un tono agudo y una baja velocidad de un tono grave. Así resultaría que si la velocidad angular de cada planeta varía constantemente en cada punto de la órbita, también se modificarán los tonos correspondientes. En el afelio (punto más alejado del Sol) el planeta adquiere la velocidad menor; en el perihelio (punto más próximo) lo contrario. Luego en el afelio habrá de emitir el sonido más grave y en el perihelio el más agudo. La distancia de ambos puntos depende de la excentricidad de la órbita. En consecuencia, la amplitud de su sonido estará condicionada por esa excentricidad.

Pero a su vez sabemos que cada planeta tiene una velocidad distinta según el tamaño de la órbita desde Mercurio, el más veloz por estar más cerca del Sol, hasta Saturno, el más lento por estar más alejado. En consecuencia cabría hablar no sólo de la música de cada planeta, sino también de la del conjunto de todos ellos. Podrían así ordenarse como si de una orquesta o de un coro se tratara. Con nuestra división actual de instrumentos y voces, Saturno sería el contrabajo o el bajo, Mercurio el violín o la soprano. Entre ambos se situarían los demás planetas de conformidad con el resto de los instrumentos y voces (la Tierra, por ejemplo, se asimilaría a la contralto). La partitura interpretada por los planetas tendría dos notas extremas, que irían desde la más grave emitida por Saturno en el afelio hasta la más aguda emitida por Mercurio en el perihelio.

En resumen, Kepler cree haber hallado la razón última que hace inteligible la variación de las velocidades y la excentricidad de las órbitas. Se trata de

la *música de los planetas*. Por supuesto, el compositor no puede ser otro que Dios, el cual ha concebido el universo desde la doble armonía matemática (geométrica) y musical. Por ello lo creado es la más perfecta obra que ha podido salir de su mano.

Desvelar el *secreto del universo* ha implicado poner de manifiesto la *armonía del mundo*. Más de veinte años han pasado entre una y otra obra, sin que el objetivo final haya cambiado. Se pretendía mostrar la verdad del sistema copernicano poniendo de manifiesto que sólo una *teoría físicamente verdadera* podría poner ante los ojos del intelecto las leyes estructurales que gobiernan el cosmos. Además, ello hará que sea útil desde la perspectiva de la observación y del cálculo; pero una teoría falsa como es la ptolemaica también puede ser útil. Por ello el criterio no es la utilidad sino la verdad.

No cabe duda de que Kepler, en la transición del siglo XVI al XVII, es uno de los más radicales *defensores realistas del sistema copernicano*. Su contribución a la causa, sin embargo, ha tenido una orientación muy distinta a la de G. Bruno. Este último había propuesto, no sin cierta osadía, la ruptura de la esfera estelar, la dispersión de las estrellas, la multiplicidad de los mundos, la infinitud del universo. Ningún tipo de apertura hacia el infinito hallamos en Kepler. El universo sigue siendo único, formado por seis y sólo seis planetas, con un privilegiado Sol central (que de ningún modo es un astro como los demás) y con estrellas encerradas dentro de la bóveda celeste, que no se elimina. En consecuencia, seguimos dentro de un mundo esférico, cerrado, limitado, regido por criterios estéticos de orden, armonía y regularidad. Los dos grandes principios astronómicos formulados en Grecia, el de uniformidad y el de circularidad, han sido reemplazados. Pero el cosmos griego en cierto modo permanece. Nada más ajeno a lo que Kepler describe que un universo ilimitado, ciego y mecánico, tal como el que su contemporáneo Descartes, por ejemplo, se afanaba por construir.

## 4 La física y el movimiento de la Tierra

### 4.1. Galileo Galilei: la física de una Tierra en movimiento

Siete años mayor que Kepler, Galileo es también un copernicano de segunda generación. Ambos nacen más de dos décadas después de la publicación del *De Revolutionibus* de Copérnico, en una época en la que el pensamiento dominante entre protestantes y católicos es aristotélico-ptolemaico. La obra de Kepler ha tenido como pretensión mostrar la verdad del copernicanismo mediante el hallazgo de las *leyes y armonías* que rigen la estructura del cosmos y el movimiento de los cuerpos celestes. En cambio, la contribución de Galileo a esta misma causa muestra características muy diferentes.

De lo que se tratará es de cumplir un doble objetivo. Por un lado, aspira a poner de manifiesto que los nuevos *fenómenos celestes*, a los que la utilización del telescopio le dará acceso por vez primera, se ajustan mejor a una concepción heliocéntrica del mundo que geocéntrica. Por otro, tratará de rebatir a quienes, desde la Antigüedad, han considerado los *fenómenos terrestres* como una prueba de la inmovilidad de la superficie que pisamos debido a que no percibimos su supuesto movimiento. La posibilidad de que éste no sea observable para quienes participan de él va a abrir las puertas a una completa renovación de las ideas mecánicas que regían desde Aristóteles. La fundamental noción de *movimiento inercial* hará su aparición, poniendo de manifiesto toda su fecundidad cuando es cuestión de hacer física en un mundo en el que la Tierra no está en reposo.

Se desarrollan así de modo paralelo dos tipos de investigaciones en favor del sistema copernicano. Por un lado la *física celeste* de Johannes Kepler, por otro la *física de una Tierra móvil* (la expresión es de Cohen, 1989: cap. 1.º) de Galileo Galilei. En uno y otro caso puede afirmarse que ha comenzado la construcción de la llamada *ciencia moderna* que conduce, en la segunda mitad del siglo XVII, a la síntesis de Isaac Newton.